

Tous droits réservés Tutorat Santé Brestois ©
Toute diffusion et reproduction, totale ou
partielle, de ce document est interdite

Biophysique de la circulation

Mécanique des Fluides

Stage de Pré-Rentrée 2023
Pôle Biophysique/Physiologie

Inspiré du cours du Professeur Salaün



Petit message d'avertissement avant de commencer :

Nous vous rappelons que ce diaporama, réalisé par des étudiants, est une aide et **non un support de cours officiel** et ne peut donc pas être considéré comme un ouvrage de référence lors de l'examen de PASS ou de L.AS.

Il se base sur le **cours de l'année précédente** qui peut être **amené à être modifié** dans sa forme et son contenu au bon vouloir du professeur.



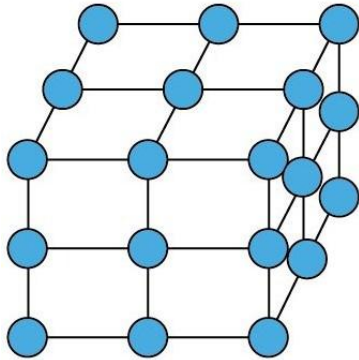
Have fun ;)

Sommaire

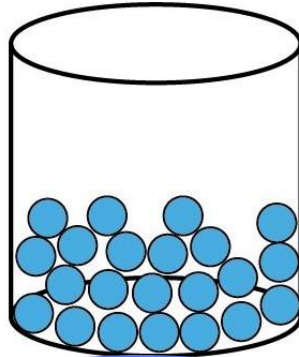
1. Définitions
2. Statique au sein d'un fluide incompressible
3. Dynamique au sein d'un fluide incompressible
4. Bruits de Korotkov



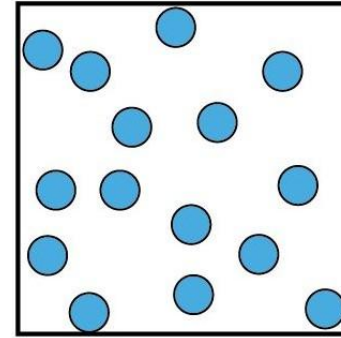
1. Définitions



Solid



Liquid



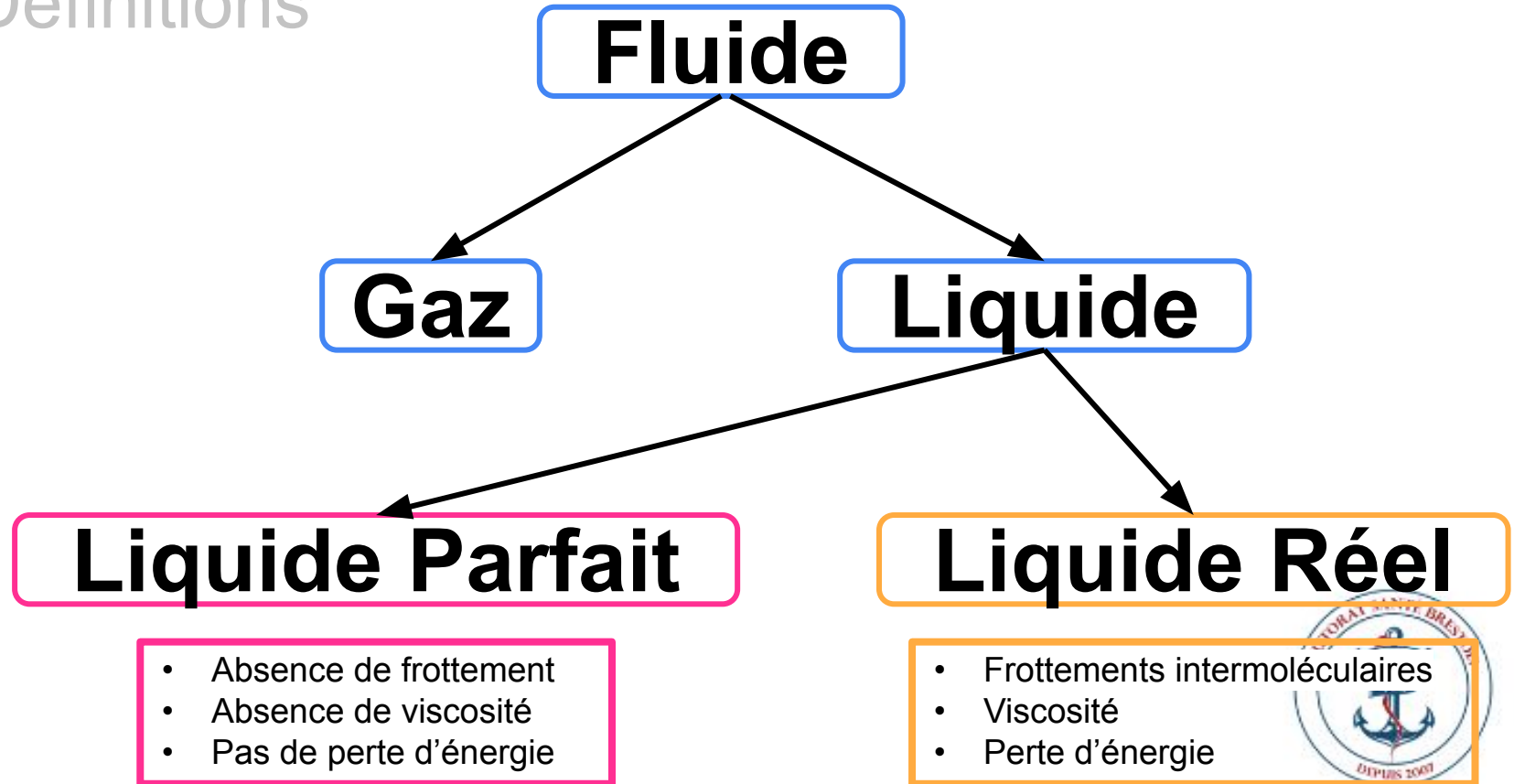
Gas

- Occupe un volume défini
- Incompressible
- Inextensible
- Pas de forme propre

- Occupe un volume NON défini
- Compressible
- Extensible
- Pas de forme propre



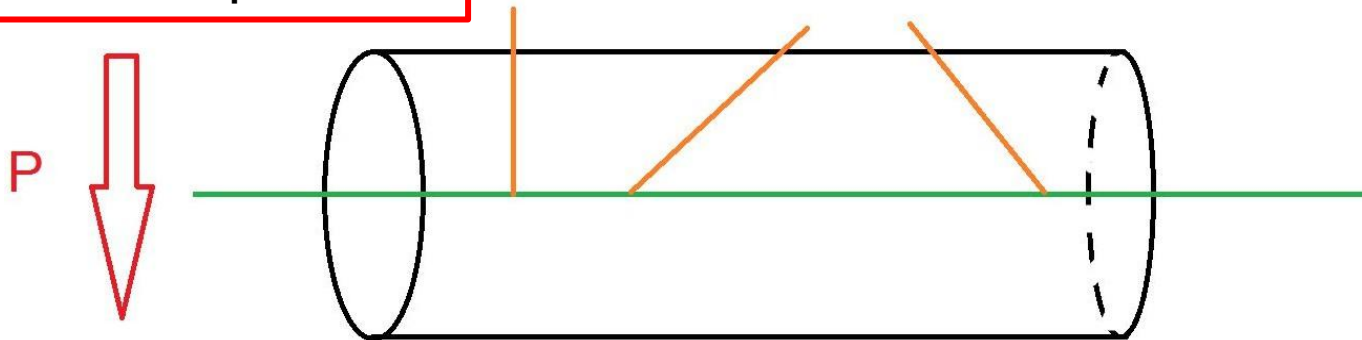
1. Définitions



2. Statique au sein d'un fluide incompressible

Au sein d'un liquide **statique**, un capteur recueille une pression qui :

- Est **indépendante** de l'orientation du capteur et **perpendiculaire** aux parois du récipient
- Est **identique** pour tous les points d'un même niveau.
- Augmente avec la **profondeur**



2. Statique au sein d'un fluide incompressible

La **pression P** (N/m^2) est le résultat d'une **Force (Newton, N)** sur une **Surface** (m^2). L'unité de la pression est le **Pascal (Pa)**.

$$P = F/S = \text{N/m}^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{Pascal}$$

$$\text{Car } \text{N} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

La **pression** est aussi le résultat d'une **énergie** sur un **volume**.



2. Statique au sein d'un fluide incompressible

Dimensions

$M.L^{-1}.T^{-2}$

$M.T^{-2}$

$M.L.T^{-2}$

$M.L^2.T^{-2}$

Unités système
international

$1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$

1 kg.s^{-2}

1 kg.m.s^{-2}

$1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$

Pression

Tension

Force

Energie

$\times l$

$\times l$

$\times l$

$\times S$

$\times S$

$\times V$

2. Statique au sein d'un fluide incompressible

Mais il existe différentes unités de Pression :

$$1 \text{ atm} = 1013 \text{ hPa} (101\,300 \text{ Pa})$$

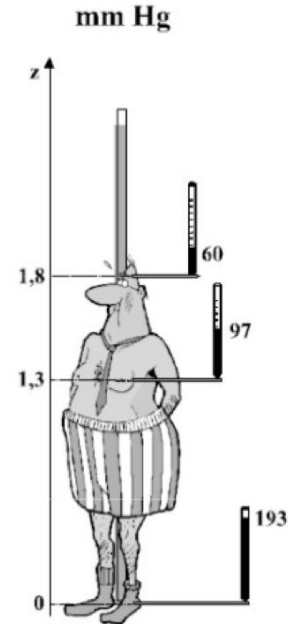
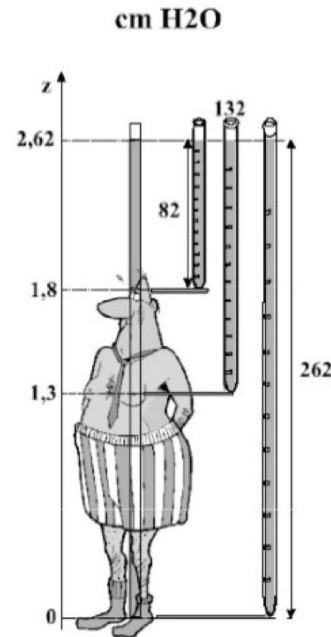
$$1 \text{ cmH}_2\text{O} = 98 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.2 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1 \text{ torr}$$

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$



2. Statique au sein d'un fluide incompressible

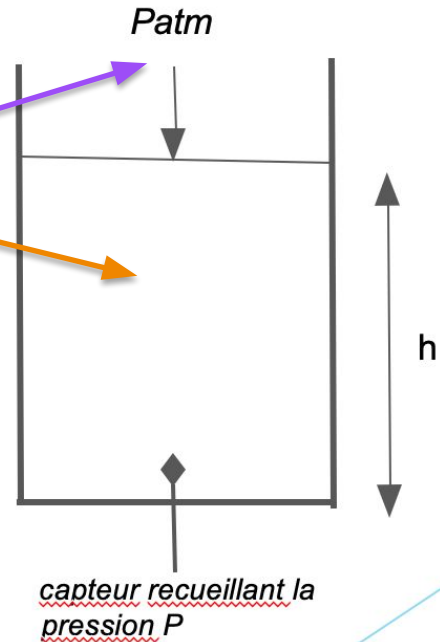
La **loi de Pascal** définit la **pression** au sein d'un liquide **STATIQUE** (*fluide immobile, incompressible et de masse volumique uniforme*).

Dans une colonne d'eau :

$$P = \rho gh + P_{atm} = \text{Poids de la colonne d'eau} + \text{poids de la colonne d'air}$$

Avec :

- **P** = pression au sein du liquide (en pascal)
- **P_{atm}** = pression atmosphérique au dessus du liquide (en pascal)
- **ρ** = masse volumique (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- **g** = intensité de la pesanteur (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
- **h** = hauteur de la colonne de liquide (en m)

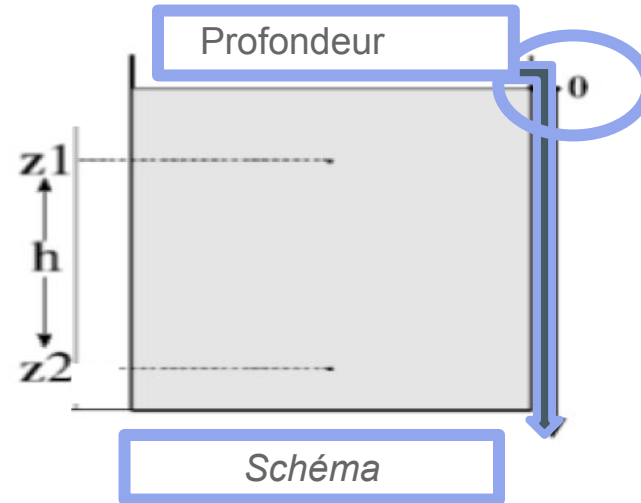


2. Statique au sein d'un fluide incompressible

Formule à connaître :

$$P_{z2} - P_{z1} = \rho g h$$

Avec $h = dz = z2 - z1$



L'orientation dans l'espace **est importante !**



Profondeur

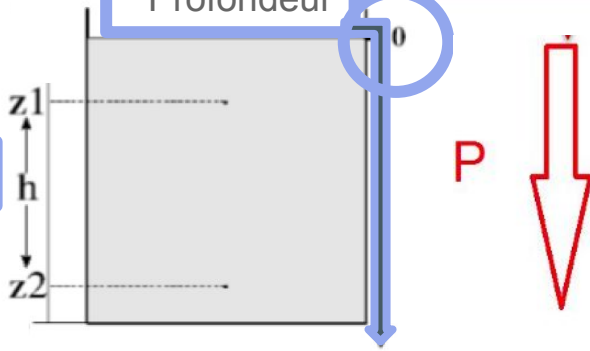


Schéma 2

Formule à connaître :

$$P_{z2} - P_{z1} = \rho g h$$

Avec $h = dz = z2 - z1$

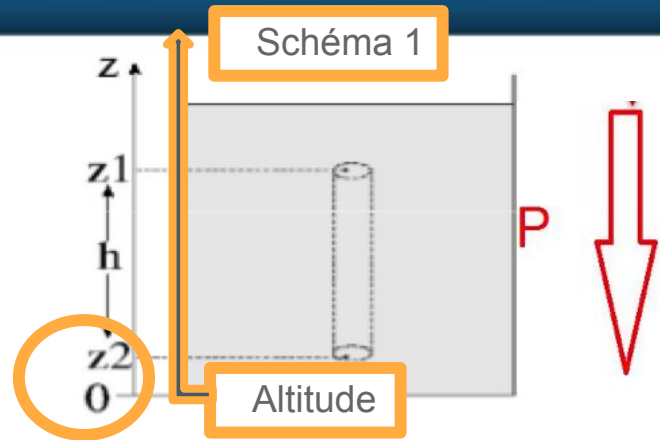
$$P_{z2} - P_{z1} > 0$$

$$\rho > 0 \quad g > 0 \quad h \leftrightarrow dz \leftrightarrow z2 - z1 \quad dz ?$$

$$z2 > z1 \quad \leftrightarrow \quad z2 - z1 > 0 \quad \leftrightarrow \quad dz > 0$$

$$\rho g h > 0$$





Formule à connaître :

$$P_{z2} - P_{z1} = \rho g h$$

Avec $h = dz = z2 - z1$

$$P_{z2} - P_{z1} > 0$$

$\rho > 0$ $g > 0$ $h \leftrightarrow dz \leftrightarrow z2 - z1$ $dz ?$
 $z2 < z1 \leftrightarrow z2 - z1 < 0 \leftrightarrow dz < 0$
 $\rho g h < 0$
 $-\rho g h > 0$

Formule à connaître :

$$P_{z2} - P_{z1} = -\rho g h$$

2. Statique au sein d'un fluide incompressible

La PA est + faible au niveau de la tête qu'au niveau des pieds où elle est la plus forte :

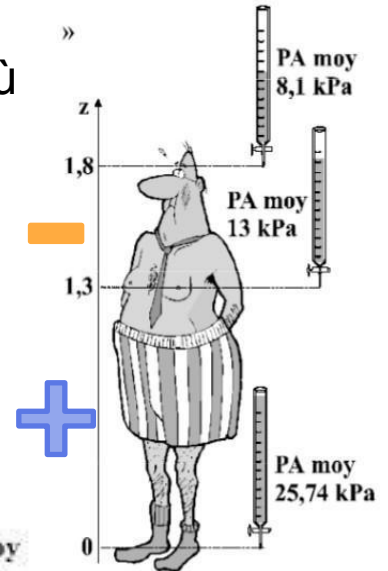
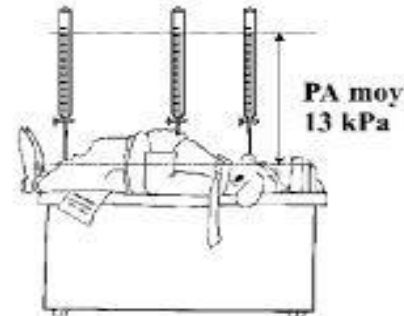
$$P = \rho gh + \cancel{P_{atm}}$$

En hauteur (altitude) par rapport au coeur : $dP(\text{artérielle}) = - \rho gh$

En profondeur par rapport au coeur : $dP(\text{artérielle}) = + \rho gh$

Mais lorsque le patient s'allonge :

$PA(\text{tête}) = PA(\text{coeur}) = PA(\text{pieds}) = 13 \text{ kPa}$



2. Statique au sein d'un fluide incompressible

Formule à connaître :

$$P_{z2} - P_{z1} = \rho gh$$

$$P(\text{pieds}) = P(\text{coeur}) + dP(\text{coeur et les pieds})$$

$$P(\text{pieds}) - P(\text{coeur}) = dP(\text{coeur et les pieds})$$

$$P(\text{pieds}) - P(\text{coeur}) = \rho gh$$

Pour calculer la pression au niveau des pieds $P(0)$, on peut utiliser la loi de Pascal : $P(0) = P(\text{coeur}) + dP(\text{coeur et les pieds})$

On a donc :

$$\begin{aligned} P(0) &= 13 \text{ kPa} + \rho gh \\ &= 13 \cdot 10^3 \text{ Pa} + 1 \cdot 10^3 \times 9.8 \times 1.3 \\ &= 25,74 \text{ kPa} \end{aligned}$$

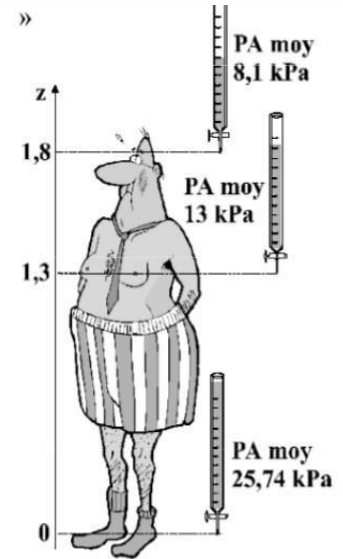
$$\rho(\text{sang}) = 1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

g = intensité de la pesanteur = constante

h = différence de hauteur

entre le coeur et les pieds = 1,3 m

$$P(\text{coeur}) = P(1,3) = 13 \text{ kPa}$$



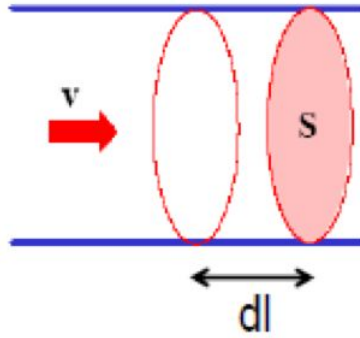
3. Dynamique d'un fluide incompressible

A. Débit d'un fluide incompressible

Le débit correspond à un volume V de fluide traversant une section S pendant une unité de temps t .

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

$$D = dV / dT \text{ en } m^3.s^{-1}$$



3. Dynamique d'un fluide incompressible

A. Débit d'un fluide incompressible

Le fluide traversant la section pendant l'intervalle de temps donné se situe entre la section S et une distance dl .

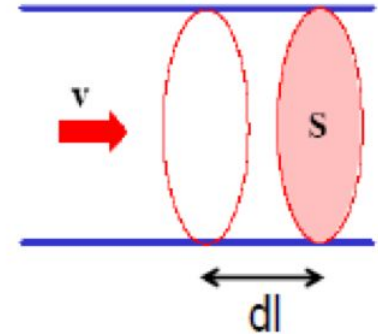
$$D = dV / dt$$

$$dV = S \cdot dl$$

$$D = S \cdot dl / dt$$

$$dl / dt = v \text{ (vitesse)} ; \quad v = d/t$$

$$\text{donc : } D = S \cdot v$$



Débit = Section x vitesse

3. Dynamique d'un fluide incompressible

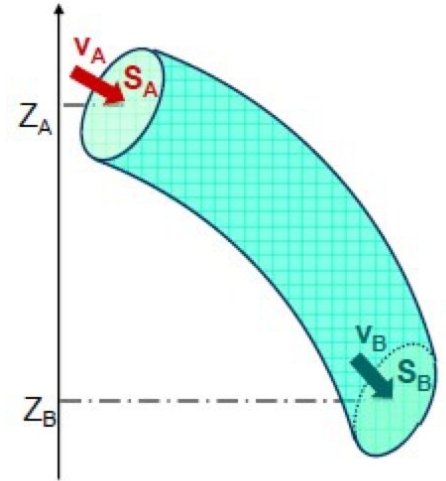
A. Débit d'un fluide incompressible

- Conservation des masses : $m_a = m_b = m$
- Fluide incompressible donc masse volumique constante
- Liquide idéal (non visqueux)
- Le régime est **permanent** ou stationnaire ($D_A = D_B$)

$$D_A = S_A \cdot v_A$$

$$D_B = S_B \cdot v_B$$

$$S_A \cdot v_A = S_B \cdot v_B$$



Exemple : S augmente

$$2 \times v_A = 3 \times v_B$$

$$v_A = 3 \quad v_B = 2$$

Quand la section augmente, la vitesse diminue et inversement.



3. Dynamique d'un fluide incompressible

B. Écoulement d'un liquide idéal

3 types d'énergie :

- **E1** : Énergie **potentielle**, liée à la pesanteur
- **E2** : Énergie **cinétique**, liée au mouvement
- **E3** : Énergie liée à la **pression statique**

$$E_{\text{tot}} = E1 + E2 + E3$$

L'équation de Bernoulli rend compte du **principe de conservation de l'énergie**.

Dans un fluide parfait : **pas de frottement, donc pas de perte d'énergie**.



3. Dynamique d'un fluide incompressible

B. Écoulement d'un liquide idéal

3 types d'énergie :

- Energie **potentielle** = mgh
- Energie **cinétique** = $\frac{1}{2} * mv^2$
- Énergie de **pression** : PV

Dans le cas d'un liquide idéal (non visqueux), il n'y a pas de perte de charge (pas de frottement) donc l'**énergie totale reste constante**.

$$E_{tot} = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = \text{constante}$$

Or $P = E/V$ (cf. méthode PTFE) et $\rho = m/V$ donc :

$$P_{tot} = E_{tot} / V = (mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV) / V = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{constante}$$



3. Dynamique d'un fluide incompressible

B. Écoulement d'un liquide idéal

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

Si on applique cela entre un point A et un point B,

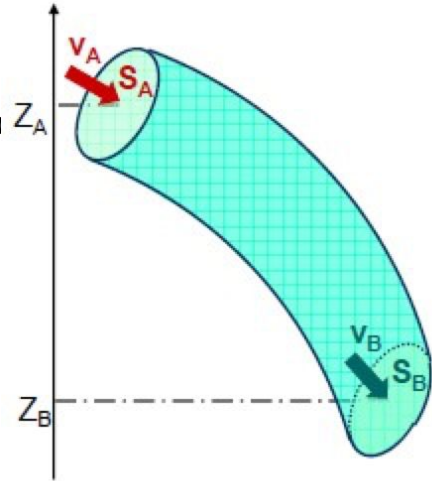
$$\Rightarrow P_{\text{tot A}} = P_{\text{tot B}} \leftrightarrow \rho g Z_a + \frac{1}{2} \rho v_a^2 + P_a = \rho g Z_b + \frac{1}{2} \rho v_b^2 + P_b$$

Dans le cas d'un fluide statique où $v = 0$

L'équation de Bernoulli devient : $\rho g Z_a + P_a = \rho g Z_b + P_b$

$$P_a - P_b = \rho g Z_b - \rho g Z_a \leftrightarrow P_a - P_b = \rho g (Z_b - Z_a)$$

On retrouve la loi de Pascal !

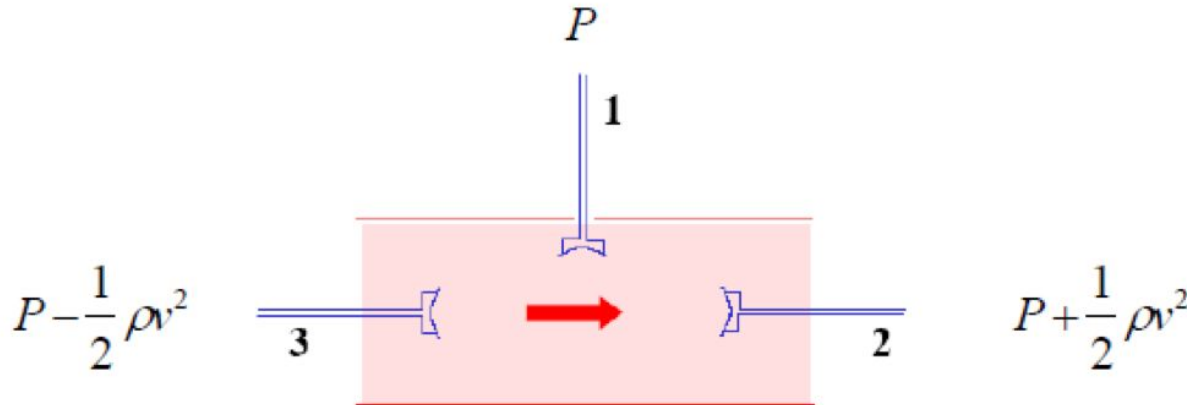


3. Dynamique d'un fluide incompressible

B. Ecoulement d'un liquide idéal

Loi de **Pascal** → liquide **statique** et **Bernoulli** → liquide **dynamique** S'IL est parfait.

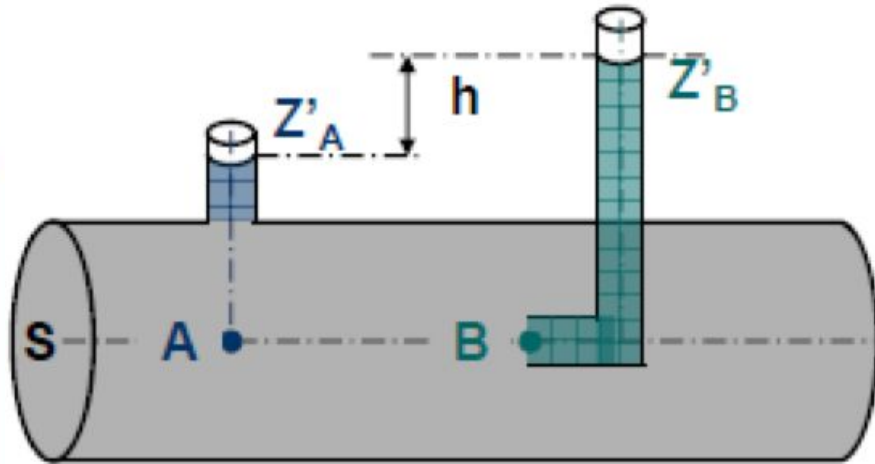
⚠ En dynamique (≠ statique), la pression n'est pas indépendante de l'orientation du capteur.



3. Dynamique d'un fluide incompressible

B. Écoulement d'un liquide idéal

a) Application : Tubes de Pitot



Fluide statique dans les colonnes A et B, mais dynamique dans le tube gris + parfait

$$Z_A \rho g + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + P_A = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + Z_B \rho g$$

$$P_B - P_A = Z_A \rho g - Z_B \rho g + \frac{1}{2} \rho v_A^2 - \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

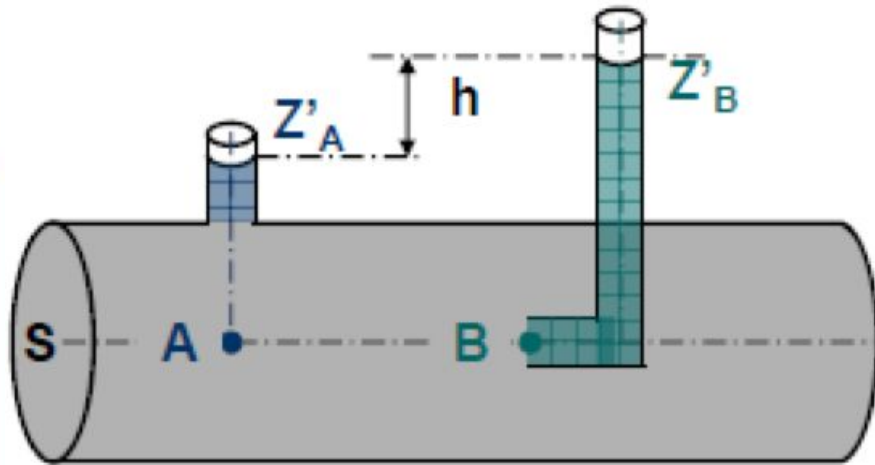
$$P_B - P_A = \frac{1}{2} \rho v_A^2 - \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

Or la vitesse en B est nulle. On obtient donc :

$$P_B - P_A = \frac{1}{2} \rho v_A^2$$



3. Dynamique d'un fluide incompressible



$$P_B - P_A = \frac{1}{2} \rho v_A^2 = h \rho g$$

$$v_A^2 = hg / \frac{1}{2}$$

$$\Leftrightarrow v_A^2 = 2hg$$

$$\Leftrightarrow v_A = \sqrt{2hg}$$



3. Dynamique d'un fluide incompressible

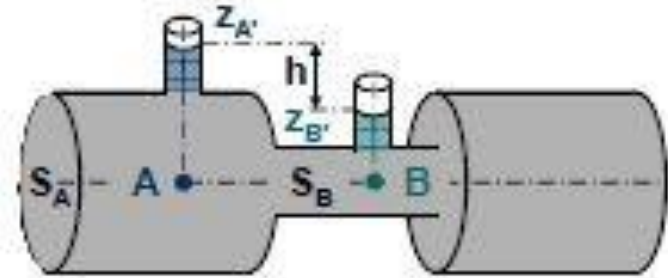
$$Z_A \rho g + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + P_A = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + Z_B \rho g$$

$$P_B - P_A = Z_A \rho g - Z_B \rho g + \frac{1}{2} \rho v_A^2 - \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

$$P_B - P_A = \frac{1}{2} \rho v_A^2 - \frac{1}{2} \rho v_B^2$$

$$P_B - P_A = \frac{1}{2} \rho (v_A^2 - v_B^2)$$

Or, on sait que la vitesse au point A est plus faible (car section plus grande) qu'au point B. Donc la différence de pression $P_B - P_A$ sera négative et $P_B < P_A$

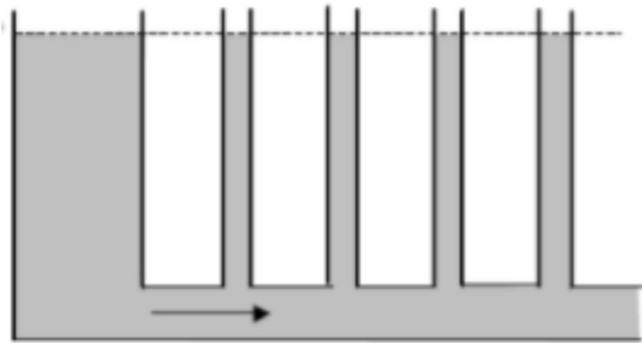


On peut donc dire que si la section diminue, la vitesse augmente, et la pression diminue : c'est l'effet Venturi.



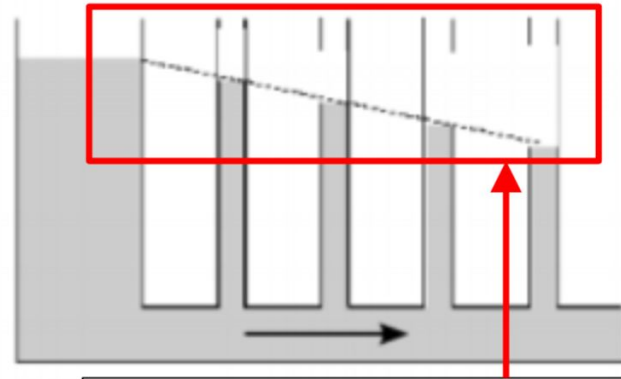
3. Dynamique d'un fluide incompressible

Toujours incompressible mais visqueux (frottements).



L'équation de Bernoulli n'est plus vérifiée :

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



Perte d'énergie à l'écoulement
lié à la viscosité

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



3. Dynamique d'un fluide incompressible

La viscosité (η) s'exprime en Poiseuille.

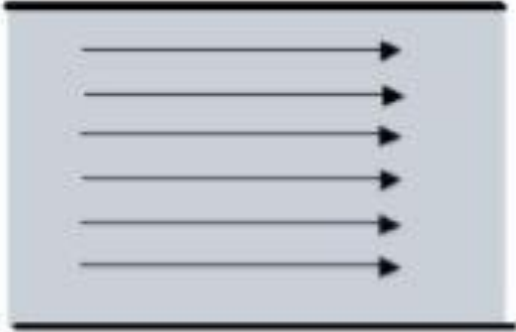
$$\eta = \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1} = \text{Pa.s} = \text{Poiseuille.}$$

η est une constante caractéristique du liquide en question. Mais elle varie avec la température (si $T^\circ \nearrow$, $\eta \searrow$) :

- **Liquides newtoniens** : η est constante à une température donnée
(ex : eau $\eta = 10^{-3}$ Poiseuille)
- **Liquides non newtoniens** : η n'est pas constante
(dans les petits capillaires, la densité de globules rouges est variable ce qui fait varier la viscosité du sang)



3. Dynamique d'un fluide incompressible



Chaque flèche représente 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**.



3. Dynamique d'un fluide incompressible

Rappels :

- Débit = Section x vitesse
- $\rho g Z_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + P_A = P_B + \rho g Z_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \Delta P$

Loi de Poiseuille :

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

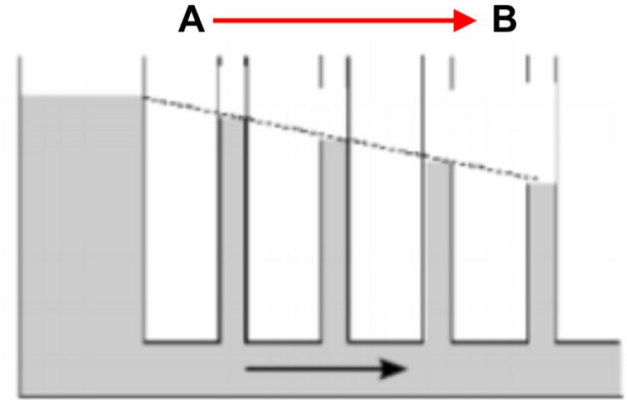
ΔP = Perte de charge = perte de pression

Q = Débit total

η = Viscosité

L = Longueur

R = Rayon du tube ou vaisseau

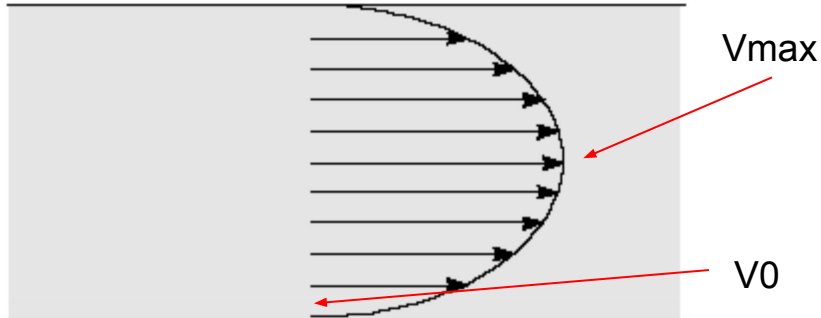


3. Dynamique d'un fluide incompressible

Le débit d'un liquide réel peut être :

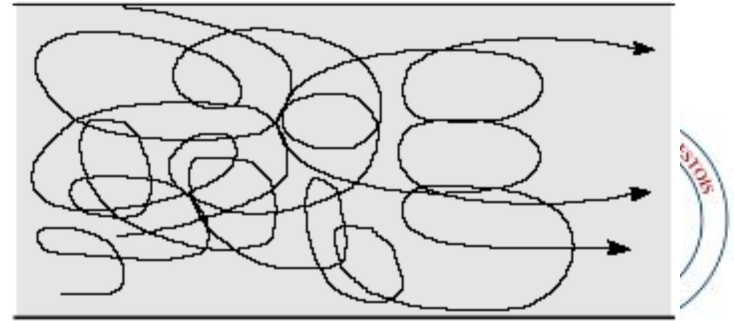
Laminaire (vitesse faible) :

- Vitesse est maximale au centre ($V_{max} = 2V_{moy}$)
- Vitesse est nulle en périphérie



Turbulent (vitesse élevée) :

- On ne peut plus utiliser la loi de Poiseuille.
 - On ne peut plus quantifier ΔP .
- Loi de Poiseuille plus applicable*



3. Dynamique d'un fluide incompressible

Pour savoir si un liquide réel est turbulent ou laminaire, on calcule **Re** (le nombre de Reynolds) :

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

Avec :

- ρ = densité du sang = constante
- η = viscosité = constante
- d = diamètre du vaisseau = constante
- v = vitesse = variable

$Re < 2000$ → Laminaire

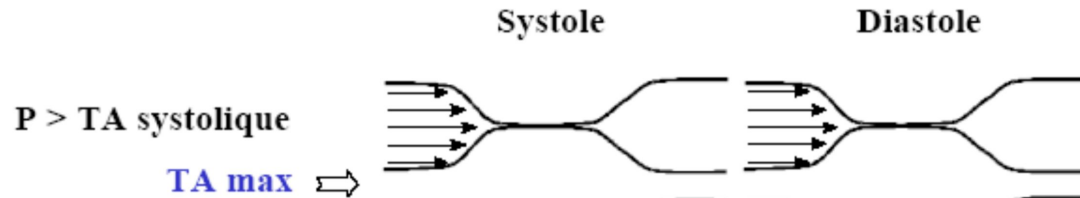
$Re > 3000$ → Turbulent

La **vitesse critique** est la vitesse pour laquelle on passe d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent.



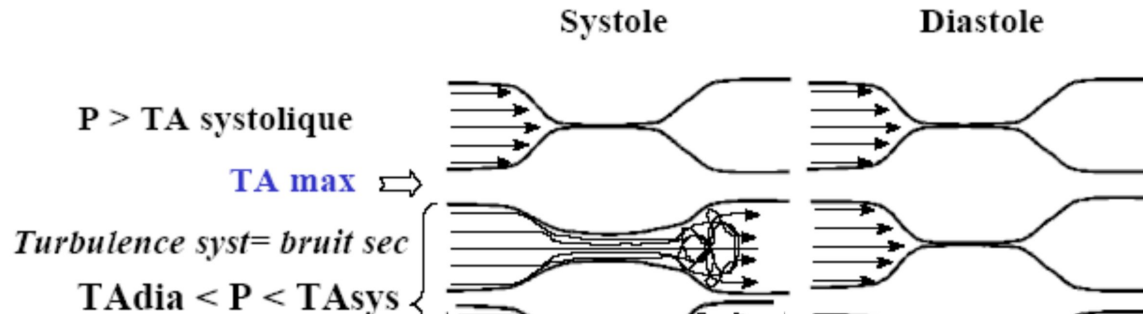
4. Bruits de Korotkov

1. Occlusion de l'artère humérale par le garrot, la pression du ❤️ est inférieure à celle du garrot, le sang ne passe pas. On n'entend rien.



4. Bruits de Korotkov

2. On ouvre petit à petit le garrot, sa pression baisse et devient inférieure à celle du cœur. Le sang passe mais est turbulent. On entend un souffle. On mesure alors la PA systolique.



4. Bruits de Korotkov

3. On continue à ouvrir le garrot, le flux devient laminaire. On n'entend plus rien. On mesure alors la PA diastolique.

P= pression dans le brassard

