

# BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION COURS 1 :

## Sommaire :

Introduction à la biophysique circulatoire

### **1/ Statique d'un fluide**

- A) Types de pression
- B) principes et lois de Pascal

### **2/ Dynamique d'un fluide**

- A) Principe de continuité du débit
- B) Equation de Bernoulli
- C) Mesure de pression dans un conduit
- D) cas particulier d'un écoulement horizontal

### **3/ Dynamique d'un fluide réel**

- A) Perte de charge
- B) Viscosité
- C) Nombre de Reynolds et régime d'écoulement
- D) Loi de Poiseuille

**Les ajouts du cours présentiel seront de cette couleur.**

*Ce qui est en italique n'est pas à apprendre mais peut aider à la compréhension.*

## Intro :

### Fluide :

- Milieu matériel constitué de molécules mobiles entre elles
- n'a pas de forme propre (prend la forme du contenant / de l'enceinte) et peut donc se déformer et s'écouler

On a **Ec** = Energie cinétique et **EI** = énergie de liaison

On parle de 2 milieux : - **Milieu gazeux** : **Ec** >> **EI**

Les molécules ont des distances entre elles qui sont variables ; le gaz est généralement considéré comme compressible. Comme les distances sont variables, possibilités de rapprocher ou d'éloigner les molécules, c'est donc bien **compressible et expansible. Peut modifier son volume.**

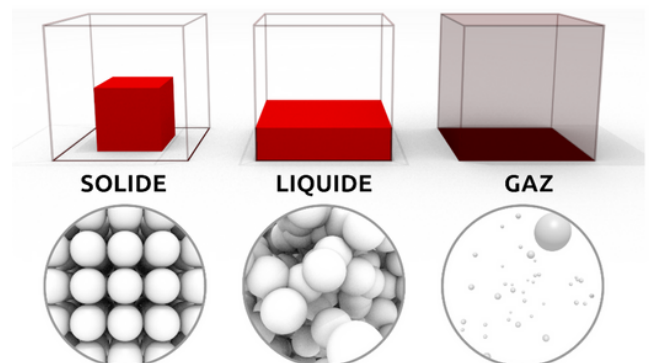
- **Milieu liquide** : **Ec** ≈ **EI**

Les molécules sont liées entre elles, se détachent et retombent sous l'emprise d'une autre molécule un peu plus loin. Les distances entre les molécules sont plus restreintes ; un liquide est donc supposé **incompressible et non expansible. Volume fixe.**

- Tout ce qu'on a dit s'oppose au solide, qui a des molécules liées entre-elles et non mobiles. Il a donc sa forme propre indépendante de l'enceinte
- Le liquide prend la forme de l'enceinte et par la loi de la gravité, comme vous le voyez sur le schéma, il se dépose au fond et ne remplit pas l'enceinte
- Le gaz a la capacité de remplir l'enceinte et de prendre sa forme car il est expansif

On parle de 2 fluides :

- **Idéal** (parfait) = pas de frottement
- **Réel** = frottement ( viscosité )



# 1/ Statique d'un fluide

## A) Types de pressions :

La statique des fluides concerne les fluides immobiles **caractérisés par une pression ++**

Ici, on ne se soucie pas de savoir si le fluide est idéal ou réel car il n'y a jamais de frottements.

- Pression : poids de la colonne de fluide qui s'appuie contre cette paroi.

- Formule :  $[P]=[F]/[S] = [E]/[V]$

- Unité (S.I) : Pascal

**La pression relative** : effet de la colonne de liquide

Différence de pression:  $\Delta P = \rho g h$  (avec  $\rho$  la masse volumique,  $g$  (vaut  $9,8 \text{ m.s}^{-2}$ ) l'intensité de la pesanteur et  $h$  la hauteur de la colonne de liquide – attention à bien tout mettre dans les mêmes unités, donc souvent  $\rho$  en  $\text{kg.m}^{-3}$ ,  $g$  en  $\text{m.s}^{-2}$  et  $h$  en m)

**La pression absolue** : liée à la pression de l'ensemble des fluides qui appuient sur cette paroi (colonne atmosphérique + colonne de liquide), donc  **$P_{\text{absolue}} = P_{\text{atm}} + \Delta P$**

Il y a aussi la **pression atmosphérique (PA)** : poids de la colonne d'air atmosphérique, l'air étant un fluide. Elle vaut **1013 hPa ++** et elle **diminue de moitié quand on atteint les 5000m d'altitude++**.

Aparté sur la pression :

**La pression est une force par unité de surface, mais aussi une énergie par unité de volume** (énergie des particules qui constituent le fluide).

Cette dernière est liée à l'agitation thermique des molécules qui vont constituer cette pression.

Donc on a  $[P]=[F]/[S] = [E]/[V]$

(démonstration en dessous pas à apprendre)

Donc on a  $[P] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{[E]}{[V]}$

On peut noter :  $[P] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{MLT^{-2}}{L^2}$

Mais on peut aussi multiplier par L en haut et en bas, ce qui donne :  $[P] = \frac{ML^2T^{-2}}{L^3} = \frac{[E]}{[V]}$

*Je vous mets ci-contre un rappel des différentes dimensions, ça pourrait vous aider à mieux comprendre pourquoi on passe de F/S à E/V, mais c'est pas à apprendre*

grandeur	dimension	Unité (SI)	Autre nom
Force	M.L.T <sup>-2</sup>	kg.m.s <sup>-2</sup>	Newton (N)
Fréquence	T <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>	Hertz (Hz)
Pression	M.L <sup>-1</sup> .T <sup>-2</sup>	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup>	Pascal (Pa)
Energie	M.L <sup>2</sup> .T <sup>-2</sup>	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup>	Joule (J)
Puissance	M.L <sup>2</sup> .T <sup>-3</sup>	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup>	Watt (W)
Charge électrique	I.T	A.s	Coulomb (C)
Tension électrique	M.L <sup>2</sup> .T <sup>-3</sup> .I <sup>-1</sup>	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> .A <sup>-1</sup>	Volt (V)
Résistance électrique	M.L <sup>2</sup> .T <sup>-3</sup> .I <sup>-2</sup>	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> .A <sup>-2</sup>	Ohm (Ω)

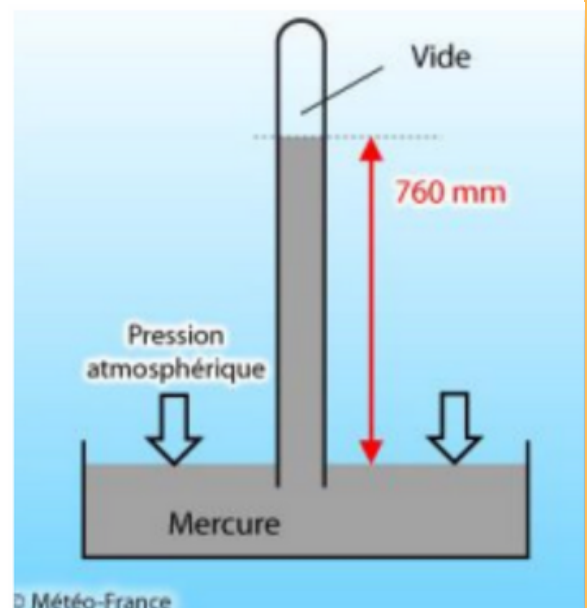
L'unité de Pression du SI (Système International) est le **Pascal** :  $1 Pa = 1 N/m^2$

Cependant le Pascal est une unité faible donc on a souvent recours à des multiples comme l'héctoPascal (hPa) ; Exemple la **pression atmo = 1013 hPa**

On peut aussi utiliser le bar :  $1 bar = 10^5 Pa$

## Précision sur la **pression atmosphérique** :

On a un récipient principal contenant du mercure et un tube, lui aussi rempli de mercure, retourné sur le récipient. Ainsi, le liquide dans le tube va s'immobiliser en laissant au-dessus un vide. La Patm qui s'exerce sur la surface de ce récipient va être caractérisée par la hauteur de cette colonne de mercure dans le **tube de Torricelli**.



Comme cette  $P_{atm}$  est le poids de la colonne d'air atmosphérique, **elle va diminuer lorsqu'on gagne en altitude** (puisque l'épaisseur de l'atmosphère va diminuer). On remarque sur le schéma que si la  $P_{atm}$  au niveau de la mer est de l'ordre de 1010hPa, **elle diminue environ de moitié lorsqu'on atteint 5000m** d'altitude (on se répète).

$$P_{atm} = \rho g h = 13,6 * 103 * 9,8 * 0,760 = 1013 \text{ hPa}$$

## B) Principes et lois de Pascal

### • Principe de Pascal:

Dans un liquide immobile incompressible (=liquide), une variation de pression se transmet intégralement et uniformément dans toutes les directions à l'ensemble de ce fluide et aux parois du récipient qui le contient

### • Lois « dérivées » de Pascal:

- 1ère loi: La pression est la même en tout point de même altitude
- 2ème loi : La différence de pression  $dP$  entre les points 1 et 2, situés respectivement à une profondeur  $h_1$  et  $h_2$ , est proportionnelle à la différence de hauteur  $dh$  entre ces 2 points.

$$dP = P_{h_1} - P_{h_2} = \rho g h_1 - \rho g h_2 = -\rho g (h_1 - h_2)$$

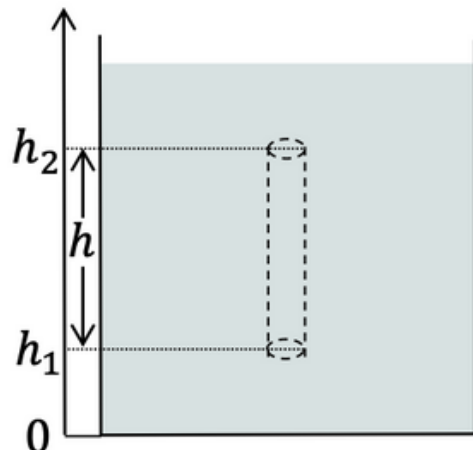
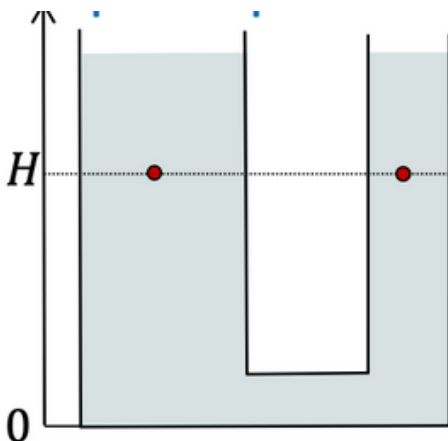
$$dP = \rho g (dh) \text{ avec } dh = h_2 - h_1$$

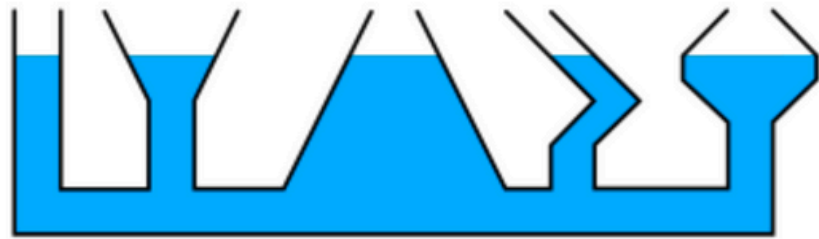
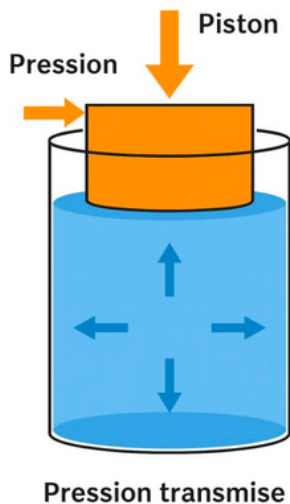
*$\rho$  et  $g$  sont des constantes qui ne varient pas, seul  $h$  varie*

On en tire la formule de la pression  $P$  en un point quelconque du liquide situé à une profondeur  $h$  :

$$P = P_0 + \rho g h \quad \blacktriangleright \text{ + en descend dans le liquide et + la } P \nearrow$$

$P_0 = P_r$  à la surface (souvent la pression atmosphérique) et  $h$  = profondeur du point dans le liquide





Principe des vases communicants : un liquide remplissant plusieurs récipients, reliés entre eux à leur base et soumis à la même pression atmosphérique, s'équilibre à la même hauteur dans chacun d'eux.

- Ainsi :
- Dans la statique des fluides, le paramètre essentiel est la **pression**
  - Cette pression est liée au poids de la colonne de fluide et est **indépendante de l'orientation du capteur.**

## 2/ dynamique d'un fluide idéal

**Débit** : volume de fluide qui traverse une section  $S$  par unité de temps.

On a donc le débit  $Q = V/dt$  ( $V$  est le volume,  $dt$  le temps), en  $m^3/s$

Il y a une **relation entre le débit et la vitesse d'écoulement** :

En tout point d'une canalisation le débit sera égal à :

$$Q = S.v = \text{Section} * \text{vitesse}$$

### Démonstration:

Soit  $v$  la vitesse d'un fluide.

$S$  la section du conduit dans lequel il s'écoule

On veut calculer le débit  $Q$  à travers la section  $S$

$Q$  correspond à toutes les molécules qui vont passer par la section  $S$  pendant le temps  $dt$  = toutes celles situées en amont de  $S$  à une distance égale à

$$L = v . dt.$$

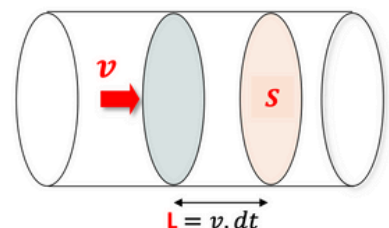
Le volume correspondant  $V$  est celui d'un cylindre de base  $S$  et de hauteur  $L$  :

$$V = S.L$$

$$\text{D'où : } Q = V / dt = (S.L) / dt$$

$$Q = (S.v.dt)/dt$$

$$\text{Débit: } Q = S.v = \text{section} \times \text{vitesse}$$



## A) Principe de continuité du débit

Ce principe n'est valable que si l'on part de ces hypothèses :

- **Incompressibilité** →  $\rho$  constante
- **Régime stationnaire** → la **vitesse en 1 point est constante** (elle ne change pas dans le temps)

La section **S** peut varier.

Dans cette situation, il y a une conservation de la masse qui, ajoutée à la condition d'incompressibilité, fait que le **débit va être constant en tout point de cette canalisation**.

Dans ce cas on a :

$$\bullet Q_1 = Q_2 = Q$$

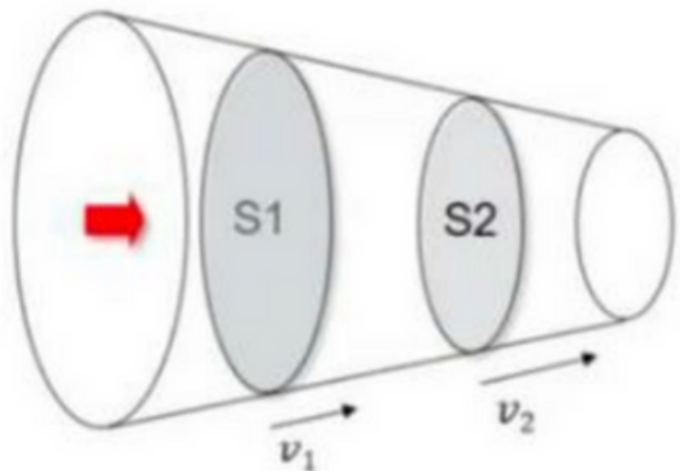
$$\bullet S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \text{Cste} = Q$$

Avec:

$S$  = section = Aire =  $\pi \times R^2$

$Q$  = débit

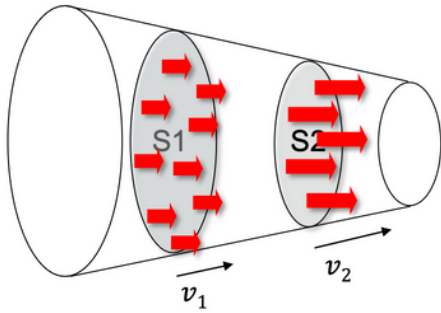
$v$  = vitesse



Lorsqu'un fluide incompressible circule en régime stationnaire dans un conduit, le produit **Section\*vitesse (=débit) est constant tout le long du conduit**.

Plus la **section est faible**, plus la **vitesse du fluide est élevée** et inversement afin de **maintenir le débit constant** :

**$Q = S \cdot v = \text{cste}$  donc si  $S \nearrow$  alors  $v \searrow$  et si  $S \searrow$  alors  $v \nearrow$**



- Par exemple, si  $S_2 \searrow$  alors  $v_2 \nearrow$

## B) Equation de Bernoulli

L'équation de Bernoulli permet de modéliser l'écoulement d'un **fluide idéal**.

Comme avec le principe de continuité du débit, on part là aussi d'hypothèses :

- **Incompressibilité** →  $\rho$  constante
- **Fluide idéal/parfait** → **pas de frottement**, la **viscosité** est **nulle**, pas de gêne à l'écoulement de ce fluide.

Un fluide idéal s'écoule sous l'effet de **3 types d'énergies** :

**E1** de pesanteur (liée à la hauteur) =  $mgh$

**E2** cinétique (liée à la vitesse) =  $\frac{1}{2}mv^2$

**E3** de pression statique =  $P.V$

Celles-ci nous donnant l'**équation de Bernoulli** :

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + P.V = cste$$

( $E_t$  = énergie totale)

Cette **énergie totale** d'un **fluide idéal** en écoulement est **constante** tout au long du conduit.

Les **énergies E1, E2, E3 peuvent varier entre elles tant que la somme reste constante** -> possibilité de redistribution.

Ici l'équation nous permet de trouver une énergie, or il est possible grâce à une simple formule de trouver la pression totale :

On rappelle que  $P = E/V$  ; et que  $\rho = m/V$

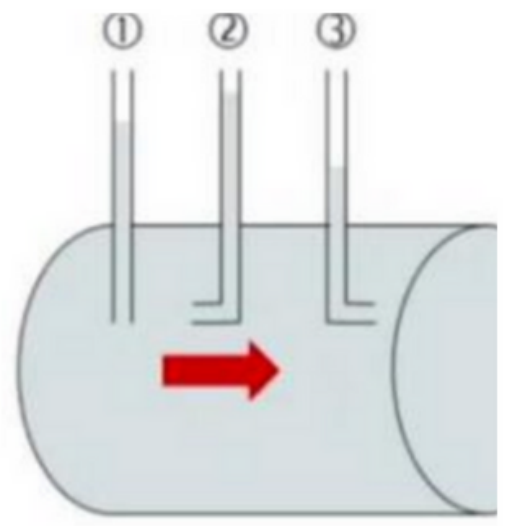
Donc on divise toutes nos énergies (E1, E2, E3) par le volume pour trouver des pressions.

Ce qui nous donne :  $P_t = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = cste$

### C) Mesure de pression dans un conduit

On peut mesurer des pressions grâce à un capteur. Cependant, à la différence des conditions statiques vues dans la première partie, **l'orientation du capteur importe** sur le résultat de la mesure.

- 1. Capteur **perpendiculaire** au courant → Pression **latérale ou statique** :  $P$
- 2. Capteur **face** au courant → Pression « **terminale** » :  $P_t = P + \frac{1}{2} \rho v^2$
- 3. Capteur **dos** au courant → Pression « **d'aval** » :  $P_a = P - \frac{1}{2} \rho v^2$



Ce phénomène est mis à profit dans le système du **tube de Pitot** utilisé en aéronautique.

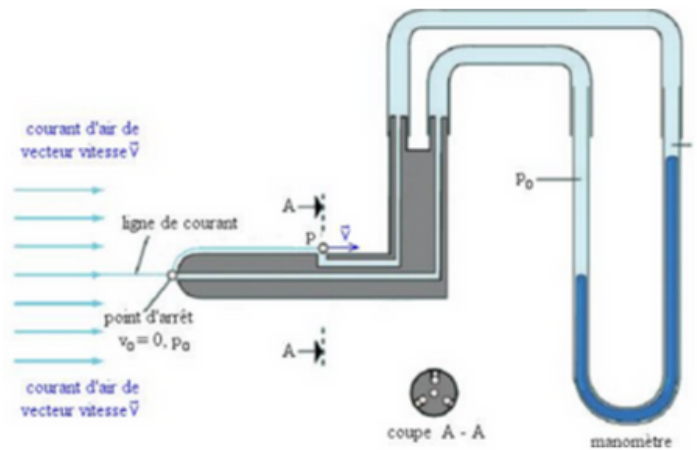
Ce dernier est constitué d'un **double capteur** et permet d'avoir accès à la mesure de la vitesse d'écoulement.

Un capteur fait **face** au flux d'air et mesure la **pression terminale PT** ;

l'autre capteur est **perpendiculaire** à l'axe du flux et mesure la **pression latérale**. Chacun est relié à une branche d'un tube qui permet de mesurer la **différence de pression** entre la PT et la P latérale.

Cette différence de pression correspond à  $\frac{1}{2} \rho v^2$ , c'est-à-dire la **pression cinétique**.

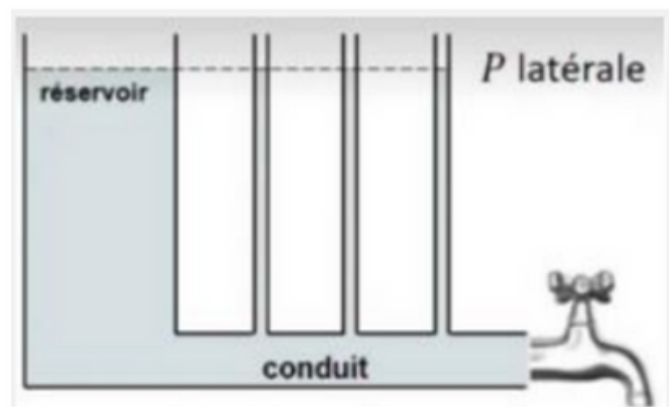
On peut alors en déduire la vitesse  $v$  (voir schéma).



## D) Cas particulier d'un écoulement horizontal

### **En condition statique:**

Le liquide ne s'écoule pas et les **lois de Pascal** s'appliquent : la pression est la même en tout point de même profondeur/altitude.



**La pression latérale est toujours la même !**

Le système est composé d'un réservoir principal qui alimente un conduit, avec des tubes parallèles à ce conduit qui nous permet d'accéder à la pression latérale.

## En condition d'écoulement:

Le réservoir est alimenté de manière à maintenir la même pression d'origine.

- Le conduit est horizontal donc la **pression de pesanteur ne change pas** ( $\rho gh = \text{cste}$ )

- Donc l'équation de Bernoulli devient :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{cste}$$

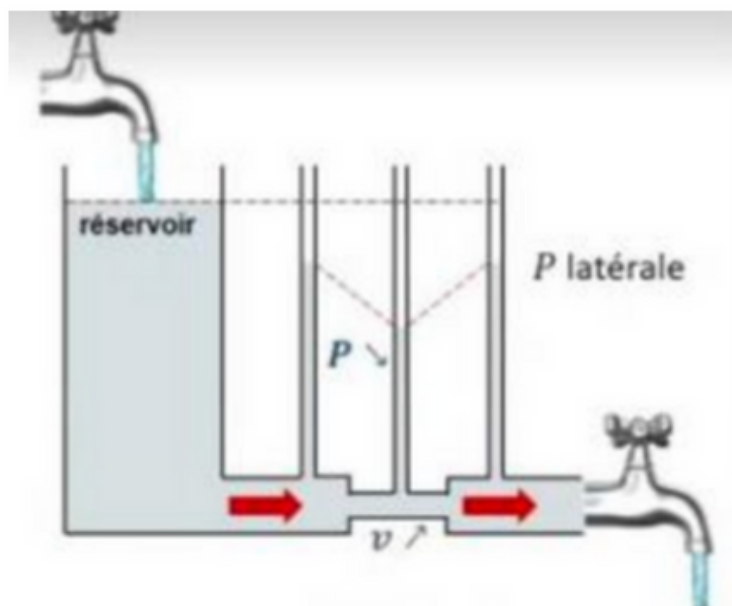
- Donc la pression totale se répartit entre la **pression cinétique et la pression latérale** (statique), d'où :

**$P = \text{cste} - \frac{1}{2} \rho v^2$**  ==> La P latérale va être diminuée par rapport à la situation statique puisqu'une partie de la pression est prise par la pression cinétique.

## EFFET DE VARIATION DE SECTION :

### Effet venturi :

Si la **section diminue** conformément à la continuité du débit ( $Q = Sv$ ), la **vitesse augmente**. Ainsi, la **pression cinétique augmente** ( $\frac{1}{2} \rho v^2$ ) donc la **pression latérale diminue**.

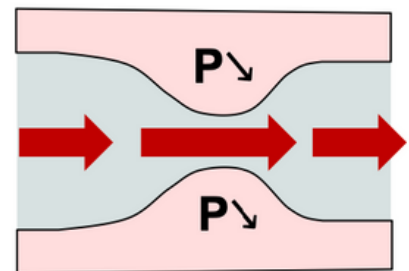


Effectivement, la **P latérale** au niveau d'un rétrécissement sur la canalisation diminue par rapport aux zones plus larges. Cet effet Venturi peut entraîner des **conséquences importantes en physiopathologie** si on considère une **sténose** vasculaire, avec une **augmentation de v**, une **augmentation de Pc**, donc une **diminution de P**. Il y a alors un **risque d'obstruction par spasme**.

### CONSEQUENCES MEDICALES :

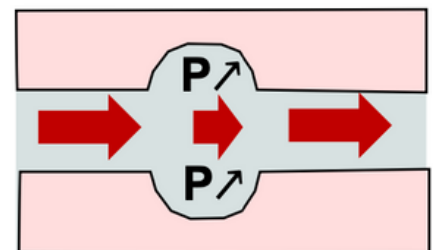
- **Risque en cas de sténose (=rétrécissement d'un vaisseau)**

Au niveau d'une sténose vasculaire, la vitesse ↗ et la pression latérale ↘  
**Risque d'obstruction par spasme.**



- **Risque en cas d'anévrisme (=dilatation d'un vaisseau)**

Au niveau de l'anévrisme vasculaire, la vitesse ↘ et la pression latérale ↗  
**Risque de rupture.**



### Conclusion :

L'écoulement d'un fluide idéal dans un conduit répond à des règles simples

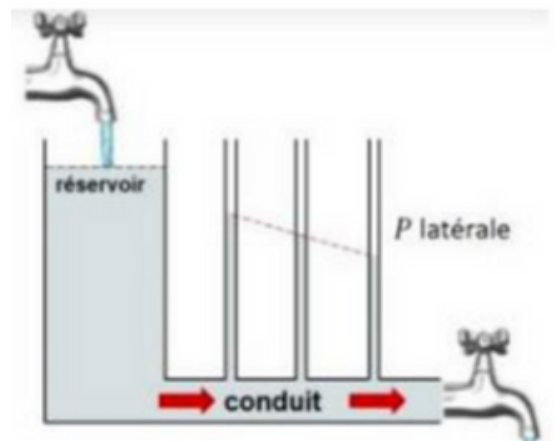
- La **constance du débit** ( $Q = S_1v_1 = S_2v_2 = \text{constante}$ )
- La **constance de la charge** (équation de Bernoulli) / constance de la somme des pressions
- Tout ça s'applique à un fluide **idéal** (*Ne pas confondre avec fluide réel que nous allons voir juste après*).

### 3/ dynamique d'un fluide réel

#### A) La perte de charge:

Dans le cas d'un liquide **réel**, il y a une perte de l'énergie utilisable lors de l'écoulement, c'est-à-dire une « **perte de charge** », liée à la **dissipation d'énergie en chaleur** du fait de la **viscosité** du liquide.

La **perte de charge** est liée à la **viscosité**, qui correspond aux **frottements** des molécules du fluide entre elles lorsque ce fluide est en écoulement.



Ces frottements consomment de l'**énergie** qui se dissipe sous forme de **chaleur**. Ainsi, l'équation de Bernoulli **n'est plus vérifiée** :

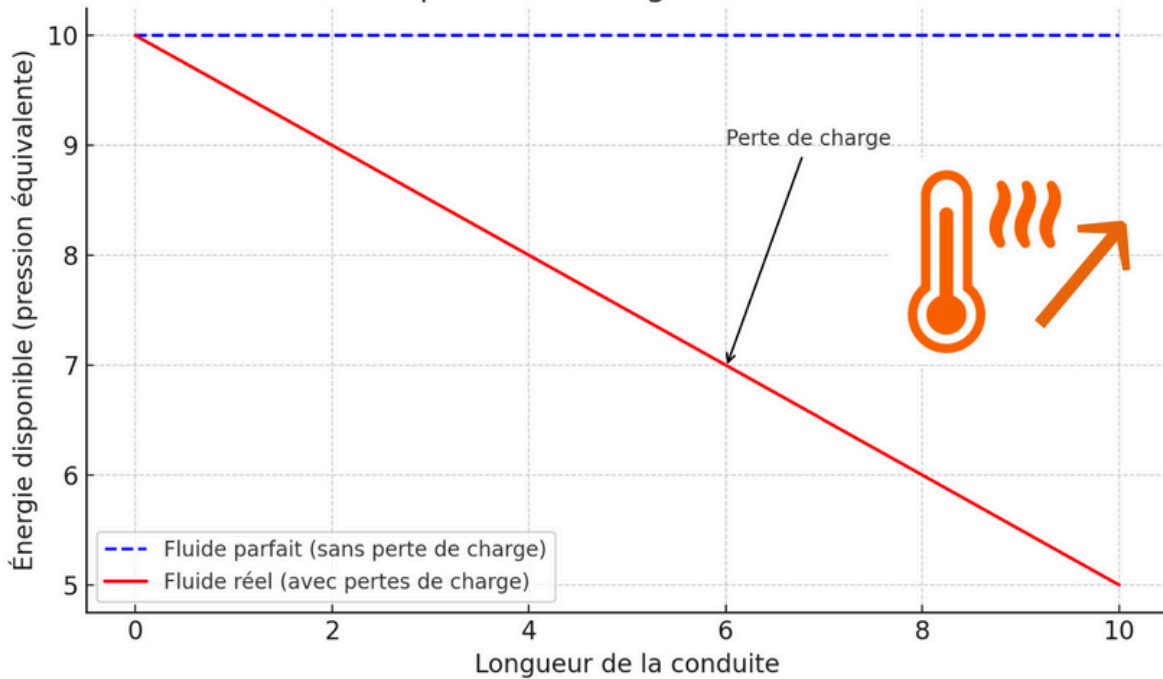
$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2} mv^2 + PV \neq \text{cste}$$

$$P_t = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P \neq \text{cste}$$

**P latérale n'est plus constante**

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

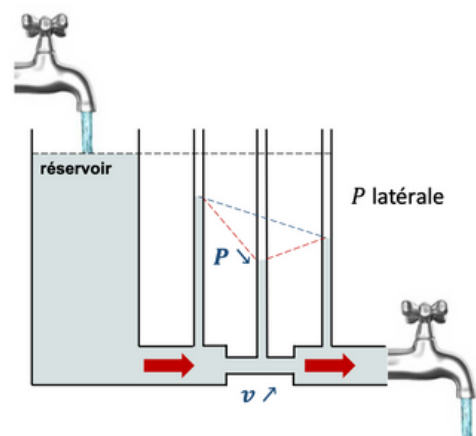
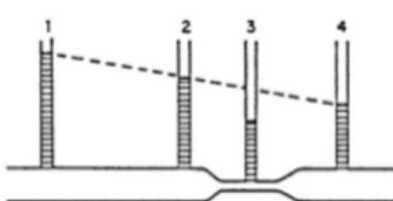
## Notion de perte de charge dans une conduite



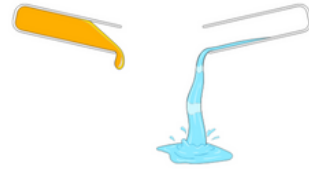
- Dans le cas d'un liquide réel, la perte de charge lors de l'écoulement est liée à la dissipation d'E en chaleur du fait de la viscosité du liquide.
- C'est la pression latérale (cad pression statique du fluide) qui diminue du fait de la perte de chaleur
- En effet, la pression de pesanteur et pression cinétique ne varient pas (si le tube est horizontal...)

Dans le cas de l'**effet Venturi** avec un fluide réel on retrouve ceci :

Là où la **pression latérale** (caractérisée par les conduits verticaux) lors d'un fluide idéal revenait au même niveau d'avant la sténose, ici en **fluide réel**, le **niveau baisse à cause de la perte de charge**.



## B) Viscosité



- **Définition intuitive:**

La viscosité est une propriété des fluides qui affectent la manière dont ils s'écoulent.

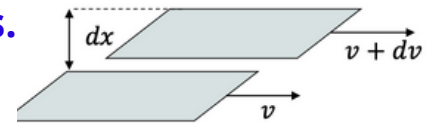
Un fluide très fluide (comme l'eau = faible viscosité → il s'écoule vite).

Un fluide épais (comme le miel = forte viscosité → il s'écoule lentement).

La viscosité affecte également les objets qui tentent de se déplacer dans le fluide

- **Définition physique :**

Elle correspond aux forces de frottements internes entre les molécules lors du mouvement du fluide. Deux lames de fluide circulent parallèlement à des vitesses différentes.



La viscosité est donc la résistance à l'écoulement de ce fluide. Il y a une perte d'énergie utilisable lors de l'écoulement (= perte de charge) qui est liée au dégagement de chaleur.

Cette **viscosité** est à l'origine de ce comportement particulier d'un **fluide réel** et de cette **perte de charge**.

La force de frottement que chacune exerce sur l'autre est donnée par Newton :  **$F = \eta S dv/dx$** .

**$\eta$  = viscosité (constante caractéristique du liquide)**

**$S$  = surface commune entre les 2 lames**

**$dv/dx$  = taux de cisaillement (ou gradient de vitesse)**

- **Unité de la viscosité  $\eta = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  SI**

- **Mais peut aussi être exprimée en Pa·s ou en Poiseuille (PI) qui est une unité spécifique à la viscosité.**

On distingue 2 catégories de fluides :

- **Newtonien** (ex : **eau**) :  $\eta$  est une cste caractéristique qui varie seulement avec la température T. Si  $T \nearrow$  alors  $\eta \searrow$
- **Non-newtonien** (ex **sang**) :  $\eta$  varie avec T et  $dv/dx$  (qu'on appelle aussi taux de cisaillement ou gradient de vitesse, correspondant à deux lames de fluide à une distance dx l'une de l'autre, parallèlement, à des vitesses différentes).

$$\text{Si } \frac{dv}{dx} \nearrow \text{ alors } \eta \searrow$$

La viscosité n'a théoriquement **plus de sens pour un liquide non newtonien**. On utilise donc une **viscosité apparente**.

**Viscosité apparente** = viscosité qu'aurait un fluide newtonien induisant le même débit pour une même différence de pression.

Il faut savoir que:

- Fluide **idéal** : toutes les molécules se déplacent à la **même vitesse**
- Fluide **réel** : la viscosité fait que les molécules se déplacent à des **vitesses différentes** en fonction des frottements qu'elles vont subir (interactions entre elles et avec la paroi).

## 2 régimes d'écoulement d'un fluide réel:

<b>Écoulement laminaire</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>v faible</b></li><li>• <math>\eta \rightarrow</math> facteur cohérence</li><li>• Ligne parallèle</li><li>• v max au centre</li><li>• Fine couche immobile</li><li>• <b>Profil parabolique des vitesses</b></li></ul>	 Image IRM des vitesses de la crosse aortique en couleur	 Répartition parabolique des vitesses
<b>Écoulement turbulent</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>v moyenne ou élevée</b></li><li>• <math>\eta \rightarrow</math> facteur cohérence</li><li>• désordonnée</li><li>• Trajectoire tourbillonnent</li><li>• <b>Pas de distribution systématisée des vitesses</b></li></ul>	 Plus de répartition parabolique des vitesses -> témoigne d'un flux turbulent dans cette aorte	

## C) Nombre de Reynolds et régime d'écoulement

4 paramètres interviennent simultanément pour conditionner le régime d'écoulement :

- 1/ La **vitesse** moyenne d'écoulement  $v$
  - 2/ Le **diamètre**  $d$  du conduit
  - 3/ La **masse volumique**  $\rho$
  - 4/ La **viscosité**  $\eta$
- Si ils **augmentent** on tend vers la **turbulence**
- Si elle **diminue** on tend vers la **turbulence**

C'est le **nombre de Reynolds** qui permet de créer la **frontière** entre un écoulement **laminaire** et un écoulement **turbulent**.

C'est un nombre empirique **sans unité**, qui sert à définir le seuil entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent, en donnant seulement des ordres de grandeur

Il utilise les **4 éléments** vu juste au dessus :

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

Ainsi :

- **Si  $Re \leq 2000$**  : Le régime d'écoulement est **laminaire**
- **Si  $Re > 10\,000$**  : Le régime d'écoulement est **turbulent**
- **Entre les 2** : le régime d'écoulement est **instable** : **on ne peut rien conclure**

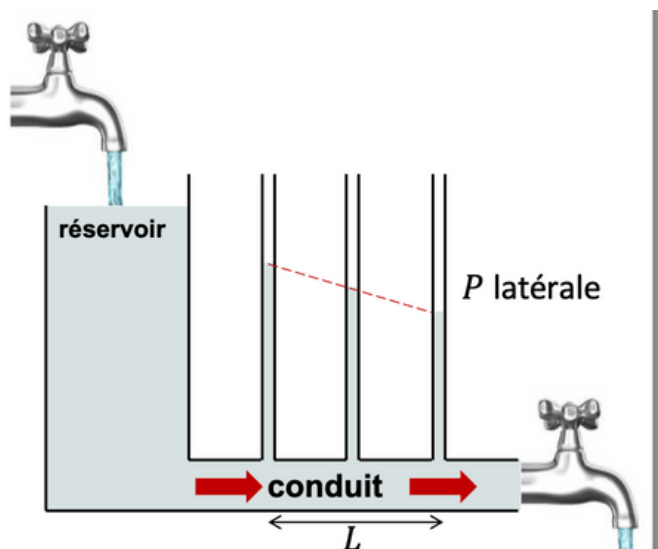
On définit aussi une **vitesse critique**, c'est-à-dire une vitesse au-delà de laquelle le régime laminaire n'est plus garanti, toutes choses étant égales par ailleurs (les autres facteurs sont constants, seule la vitesse peut être modifiée)

$$v = \frac{2000\eta}{\rho d}$$

## D) Loi de Poiseuille

La loi de **Poiseuille** concerne les fluides **réels, newtonien** en **écoulement laminaire seulement**.

On l'illustre sur un conduit horizontal cylindrique. Dans ces conditions, l'adaptation de l'équation de Bernoulli à un fluide réel donne:



**Il existe une relation simple entre:**

- la pression appliquée aux extrémités
- le débit volumique
- les caractéristiques du fluide et du tube.

Cette relation est donnée par la **loi de Poiseuille**:

$$\text{Débit (Q)} = \frac{\Delta P}{R}$$

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

$$\text{Débit(Q)} = \Delta P \times \frac{\pi r^4}{8\eta L}$$

Q = débit (m<sup>3</sup>/s)

$\Delta P$  = différence de pression entre l'entrée et la sortie du tube (en Pa)

r = rayon du tube (en m)

L = longueur du tube horizontal (en m)

$\eta$  = viscosité du fluide (en Pa.s)

Cela signifie qu'en écoulement laminaire dans un tuyau cylindrique, le débit est :

- proportionnel à la différence de pression
- inversement proportionnel à la longueur du tube L et à la viscosité  $\eta$
- Proportionnel à la 4ème puissance du rayon:  
-si rayon x 2 alors débit x16  
-Importance de la vasomotricité sur le débit sanguin!  
-Importance de la circulation capillaire !

On a :  $P_t = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + \text{chaleur} = \text{cste}$

- Horizontal :  $\rho gh = \text{cste}$
- Section constante :  $\frac{1}{2} \rho v^2 = \text{cste}$
- Seul P peut varier :  $P_t = P + \text{chaleur} = \text{cste}$

On voit donc que **P diminue** le long du conduit, ce qui traduit la **perte d'énergie** sous forme de **chaleur** liée à la **viscosité**.

Cette perte de pression latérale nous est donnée par la loi de **Poiseuille** : C'est P qui compense la perte de charge.

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

Avec

$n$  = nombre de capillaire.

$L$  = longueur

$r$  = rayon

$\eta$  = viscosité

$Q$  = débit

Ici, on a parlé de la résistance  $R$  comme la résistance d'un seul tuyau, d'une certaine longueur avec le même diamètre tout le long. Mais si on parle de la résistance  $R$  du sang, il n'y a pas qu'un seul tuyau de même diamètre mais un grand vaisseau : l'aorte qui se divise en artérioles et puis en capillaire (diamètre). Il faudra donc calculer la résistance dans chacun de ces petits capillaires.

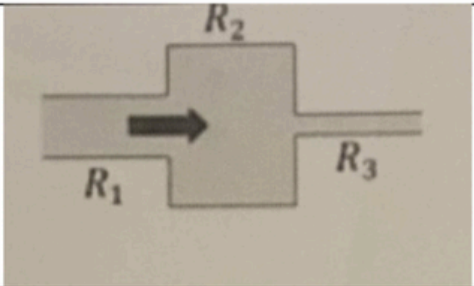
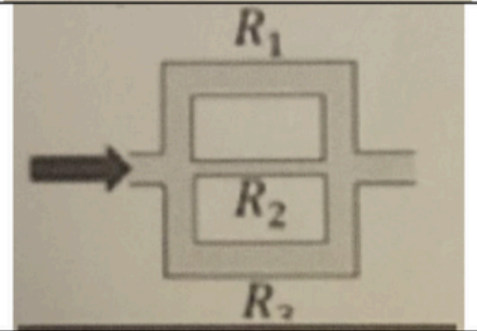
Pour calculer la résistance totale, on fait comme en électricité. On doit utiliser la loi d'Ohm :

$$U = R * I$$

$U = R \times I$  en électricité (loi d'ohm)

porte la même signification que

$\Delta P = R \times Q$  en dynamique des fluides

<p>Conduit en <u>série</u></p>	<p>La résistante totale est la somme des résistances individuelles.</p> $R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$	
<p>Conduit en <u>parallèle</u> (+ récurrent en anatomie humaine)</p>	<p>L'inverse de la <math>R_t</math> est la somme des inverses des résistances individuelles.</p> $1/R_t = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$	

# Écoulement en régime turbulent :

Rappel sur l'écoulement laminaire :

Toute l'énergie consommée est utilisée pour vaincre la viscosité.

$$\rho + \rho h + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho h \dots = \dots$$

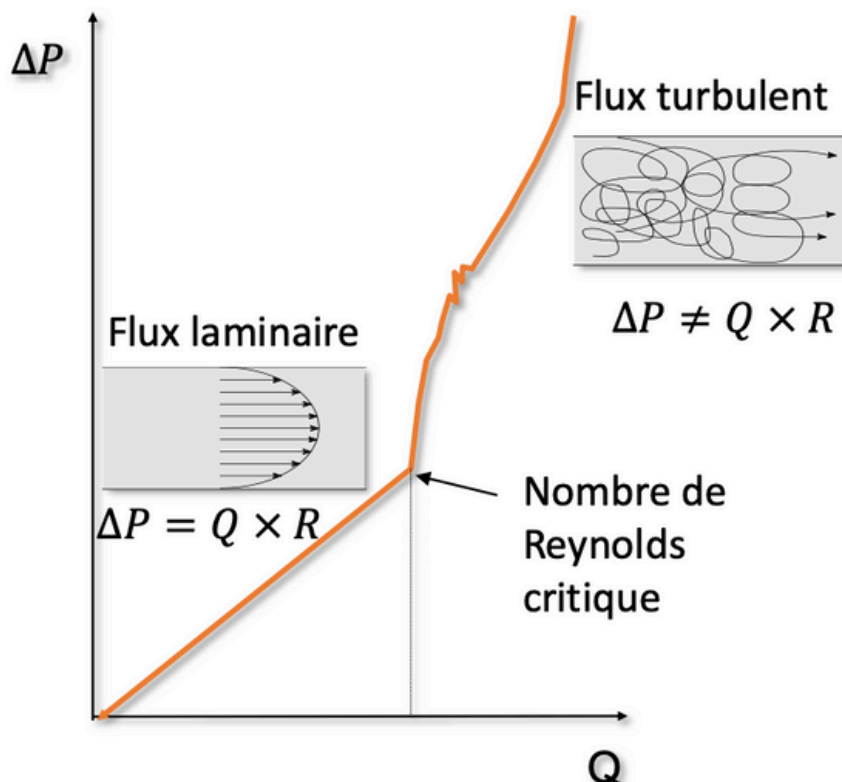
Relation linéaire entre  $\Delta P$  et le débit (loi de Poiseuille):

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

**LA LINEARITE n'est valable qu'en régime LAMINAIRE**

Écoulement turbulent :

- Il n'y a plus proportionnalité entre  $\Delta P$  et  $Q$  (Poiseuille n'est plus utilisable)
- C'est un régime peu efficace.
- Les tourbillons consomment une partie de l'énergie : chaleur + vibrations → bruits et/ou souffle



*Dédi pour ma famille qui m'a soutenu tout au long de la P1*

*Dédi à ma mère qui me faisait des bons petits plats et me soutenait moralement*

*Dédi à mon père qui a bien géré aussi*

*Dédi à mon petit frère avec qui je faisais la plupart de mes pauses*

*Dédi à ma tata*

*Dédi à Victoria*

*Dédi aux grands parents*

*Dédi à la famille de Sète*

*Dédi à la famille de Toulouse*