

# Biophysique de la circulation 1

## Table des matières

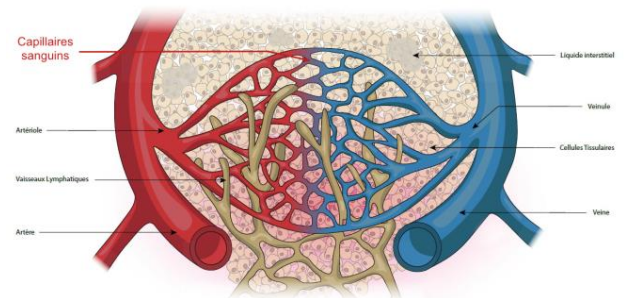
|  |    |
|--|----|
| Introduction à la biophysique cardiovasculaire.....                        | 2  |
| Introduction à la biophysique de la circulation .....                      | 2  |
| La mécanique des fluides .....   | 3  |
| I.    Statique d'un fluide .....   | 3  |
| A) Notion de pression statique d'un fluide .....                           | 3  |
| B) Unité de pression.....  | 4  |
| C) Pression atmosphérique.....   | 4  |
| D) Principe et lois de Pascal .....  | 5  |
| II.   Dynamique d'un fluide idéal .....                                    | 7  |
| A) Notion de débit.....  | 7  |
| B) Principe de continuité du débit .....                                   | 8  |
| C) Equation de Bernoulli .....   | 8  |
| D) Mesure de pression dans un conduit .....                                | 9  |
| E) Cas particulier d'un écoulement horizontal .....                        | 10 |
| 1- En condition statique .....   | 10 |
| 2- En écoulement .....   | 10 |
| 3- Effet de variation de section .....                                     | 11 |
| III.  Dynamique d'un fluide réel .....                                     | 12 |
| A) La perte de charge .....  | 12 |
| B) La viscosité $\eta$ .....   | 13 |
| C) Deux régimes d'écoulement d'un fluide réel.....                         | 13 |
| D) Frontière entre les deux régimes d'écoulement.....                      | 14 |
| E) La loi de Poiseuille ( <i>aka le plus gros calcul de l'année</i> )..... | 15 |

## Introduction à la biophysique cardiovasculaire

Le **système cardiovasculaire** (= un ensemble moteur de pompes) est constitué du **cœur** qui va propulser le sang dans les **vaisseaux**, dans l'arbre vasculaire (*pour comparaison, c'est littéralement de la tuyauterie*).

Ce système circulatoire est organisé de manière à favoriser les **échanges de nutriments** au niveau des organes périphériques dans les capillaires viscéraux, grâce à :

- Une **grande surface d'échange**
- Une **vitesse circulatoire lente**



Des règles physiques simples et la connaissance de l'anatomie des vaisseaux permettent d'expliquer facilement **l'évolution des pressions et des débits** qu'on observe le long de l'arbre vasculaire.

## Introduction à la biophysique de la circulation

**Fluide** : milieu matériel déformable sans forme propre et qui s'écoule.

On a  $E_c$  = Energie cinétique et  $E_l$  = énergie de liaison

On a différents milieux :

- **Milieu gazeux** :  $E_c \gg E_l$  : c'est l'agitation thermique qui domine

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

- **Milieu liquide** :  $E_c \approx E_l$

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 supposé incompressible.

On a aussi **2** catégories de fluide :

- Fluide **parfait** (=idéal) : **pas de frottements**
- Fluide **réel** : phénomène de frottements (= viscosité) qui va intervenir lors de l'écoulement de ce fluide

## La mécanique des fluides

- La **statique** des fluides concerne un fluide immobile caractérisé par une pression. Dans cette situation, que le fluide soit idéal ou réel, on a un **comportement identique**, CQFD : *pas de frottements dans les 2 cas car immobile (pas d'écoulement)*.
- La **dynamique** des fluides concerne un fluide en mouvement caractérisé par un **débit**. Ici, il y aura un **comportement différent** entre le fluide idéal ou le fluide réel. *Eh oui, car avec un écoulement, on aura des frottements en fluide réel mais pas en fluide idéal donc les calculs et résultats seront différents*

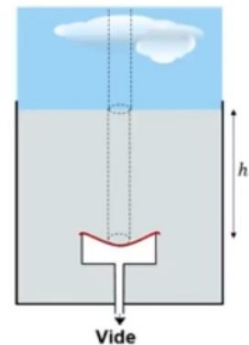
### I. Statique d'un fluide

#### A) Notion de pression statique d'un fluide

##### Mise en évidence expérimentale :

Un récipient, rempli d'un fluide, contient un capteur (une chambre) à l'intérieur duquel on fait le vide et qui possède une paroi déformable. La pression  $P$  se manifeste par une déformation de cette paroi.

**La pression est le poids de la colonne de fluide qui s'applique contre cette paroi.**



On distingue 2 types de pression :

- ✚ La **pression relative** : effet de la colonne de liquide (sépare surface et zone de mesure)  
Différence de pression :  **$\Delta P = \rho g h$**  (avec  $\rho$  la masse volumique,  $g$  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  $\text{m}$ )
- ✚ La **pression absolue** : liée à la pression de l'ensemble des fluides qui appuient sur cette paroi (colonne atmosphérique + colonne de liquide), donc  **$P_{\text{absolue}} = P_{\text{atm}} + \Delta P$**

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

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)     |

## B) Unité de pression

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

Cependant, le Pascal est une unité faible, en effet 1Pa correspond à la pression exercée par 102g sur 1m<sup>2</sup>.

On a donc souvent recours à des multiples, par exemple pour la pression atmosphérique qu'on exprime en **hecto Pascal** : 1 hPa = 100 Pa ; 1 milli bar = 1 hPa

**Pression atmosphérique = 1013hPa**

Il existe comme autre unité de pression le bar (pour la culture, souvent utilisé en plongée sous-marine) : **1 bar = 10<sup>5</sup> Pa**

Les autres unités en physiologie sont liées à l'utilisation de **manomètres** à colonnes de liquide, comme le millimètre de mercure (**mmHg**, souvent utilisée pour la mesure de l'hypertension artérielle HTA par exemple) ou le centimètre d'eau (**cmH<sub>2</sub>O**).

## C) Pression atmosphérique

**PRESSION ATMOSPHERIQUE** = poids de la colonne d'air atmosphérique, l'air étant un fluide. Pour la mesurer, on a recours à l'expérience de **Torricelli** :

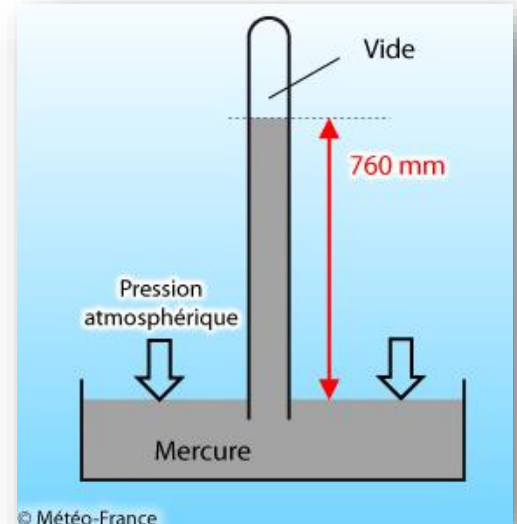
On a un récipient principal contenant du mercure et un tube, lui aussi rempli de mercure, retourné sur le récipient. Ainsi, le liquide dans le tube va s'immobiliser en laissant au-dessus un vide.

La  $P_{\text{atm}}$  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.

$$P_{\text{atm}} = \rho g h = 13,6 \times 10^3 \times 9,8 \times 0,760 = 1013 \text{ hPa}$$

Comme cette  $P_{\text{atm}}$  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).

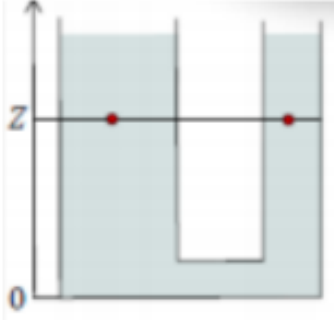
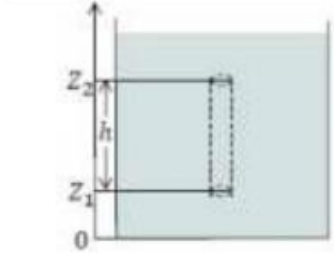
On remarque sur le schéma que si la  $P_{\text{atm}}$  au niveau de la mer est de l'ordre de 1010hPa, elle diminue environ de **moitié** lorsqu'on atteint **5000m d'altitude**.



#### D) Principe et lois de Pascal

❖ **Principe** : Dans un **liquide immobile incompressible**, une variation de pression se transmet **intégralement** et dans **toutes les directions**.

❖ **3 lois** :

|                                      |  |  |
|--------------------------------------|--|--|
| <b>1<sup>ère</sup> Loi de Pascal</b> | La pression est <b>la même dans toutes les directions</b> → indépendante de l'orientation du capteur   |  |
| <b>2<sup>ème</sup> Loi de Pascal</b> | La pression est <b>la même en tout point de même profondeur</b> (ou altitude).   |   |
| <b>3<sup>ème</sup> Loi de Pascal</b> | <p>La différence de pression dP entre 2 points est <b>proportionnelle à la différence de hauteur entre ces 2 points.</b></p> <p><math>\Delta P = P_{z1} - P_{z2} = \rho gh = -\rho g \Delta z</math></p> <p>Si on l'exprime en fonction de la position z, on met un signe négatif pour exprimer que +z diminue, +P augmente.</p> |  <p><math>\Delta z</math> : différence de hauteur entre les 2 points.</p> |

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.**

## II. Dynamique d'un fluide idéal

### A) Notion de débit

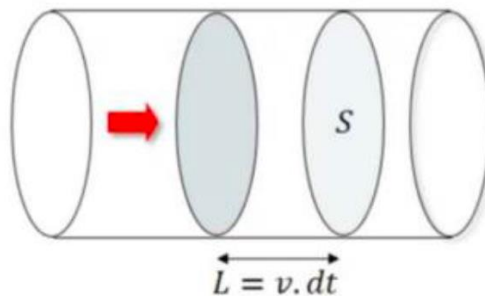
**Débit** : volume de fluide qui traverse une section S par unité de temps.

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

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

### **△ Bien différencier $V$ =volume et $v$ =vitesse**

*Le schéma ci-dessous représente une canalisation de gauche à droite, et on s'intéresse à calculer le débit qui va passer à travers la section  $S$ . Ce débit est l'ensemble des molécules qui sont situées dans le cylindre qui a pour base  $S$  et pour hauteur  $L$ .*



Soit  $v$  la vitesse d'un fluide. Les particules qui vont traverser la section  $S$  pendant le temps  $dt$  sont toutes celles situées en amont de  $S$  à une distance au plus égale à  $L = v \cdot dt$

Le volume correspondant est  $V = S \cdot L$

$$\text{D'où } Q = \frac{V}{dt} = \frac{S \cdot L}{dt} = \frac{S \cdot v \cdot dt}{dt} = S \cdot v$$

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

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

## B) Principe de continuité du débit

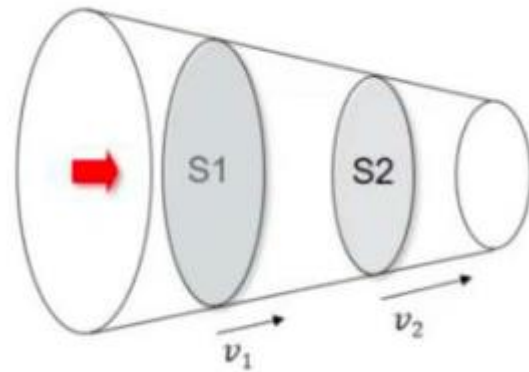
Ce principe n'est valable **que** si l'on part de ces hypothèses :

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

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.

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$



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  $v \nearrow$**

## C) 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)
- ✚ E2 **cinétique** (liée à la vitesse)
- ✚ E3 de **pression statique** ;  $E3 = P.V$  (car  $P = E/V$ , la pression étant une énergie sur un volume, *on se permet de trafiquer et réarranger tout ça pour avoir une équation*)

On a donc l'énergie totale  $E_t = E1 + E2 + E3$ , nous donnant :

**L'équation de Bernoulli :  $E_t = E1 + E2 + E3 = mgh + \frac{1}{2} mv^2 + P.V = cste$**

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.

On a  $P_t = E_t/V = mgh/V + \frac{1}{2}mv^2/V + P/V = cste$ , ainsi :

$$P_t = \underbrace{pgh}_{\text{Pression de pesanteur}} + \underbrace{\frac{1}{2}pv^2}_{\text{Pression cinétique}} + \underbrace{P}_{\text{Pression statique}} = cste$$

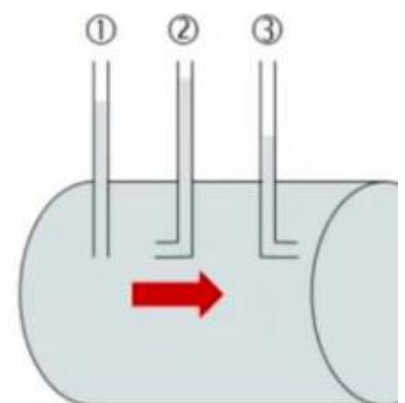
#### D) Mesure de pression dans un conduit

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.

On obtient 3 types de mesures ( $\neq$  3 types de pressions) :

1. Capteur parallèle au courant  $\rightarrow$  **Pression latéral ou statique** :  $P$
2. Capteur face au courant  $\rightarrow$  **Pression « terminale »** :  $P_T = P + \frac{1}{2} pv^2$
3. Capteur dos au courant  $\rightarrow$  **Pression « d'aval »** :  $P_A = P - \frac{1}{2} pv^2$

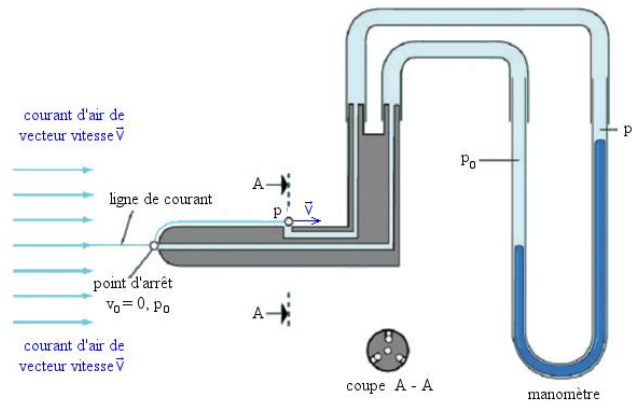
En fonction de la position du capteur, on mesure des valeurs de pressions différentes.



Tube de Pitot :

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

Il 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  $P_T$  ; l'autre capteur est parallèle 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  $P_T$  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).

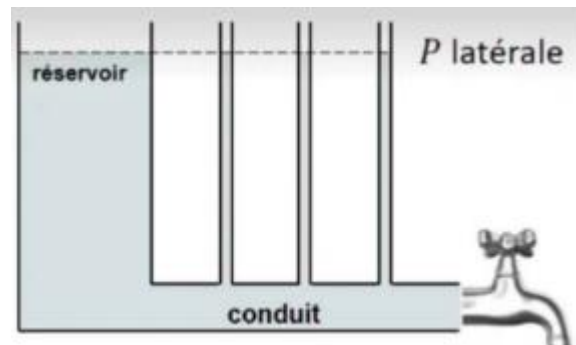


## E) Cas particulier d'un écoulement horizontal

## 1- En condition statique

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

*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. On voit que cette pression est égale à celle qui règne dans le réservoir puisque le liquide est en condition statique.*



## 2- En 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, d'où :

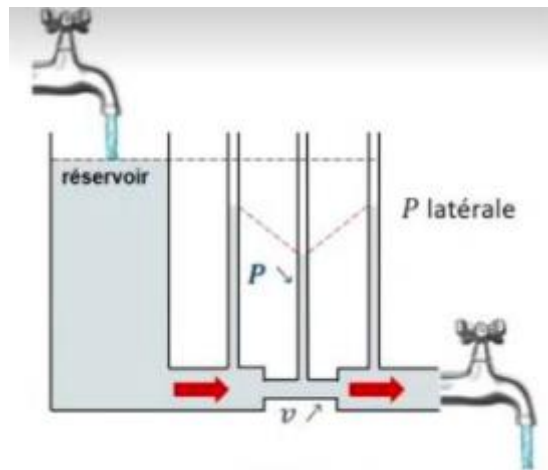
$$P = \text{cste} - \frac{1}{2}\rho v^2$$

La P latérale va être diminuée par rapport à la situation statique puisqu'une partie de la pression est prise par la pression cinétique.

### 3- Effet de variation de section

**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.



### C'est l'effet Venturi

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  $P_c$ , donc une diminution de  $P$ . Il y a alors un risque d'obstruction par spasme.

### 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** (*ATTENTION ne pas confondre avec réel, ce qui va suivre*).

### III. Dynamique d'un fluide réel

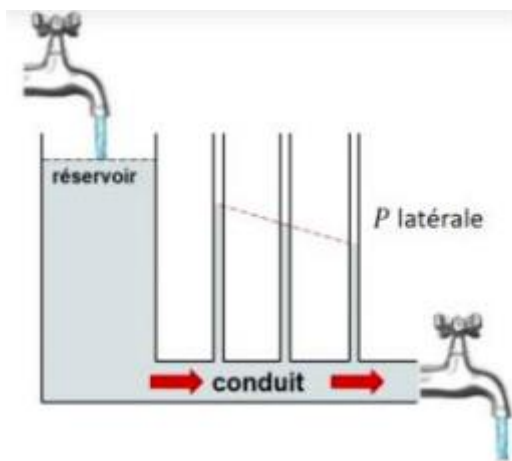
#### A) La perte de charge

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 :

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

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

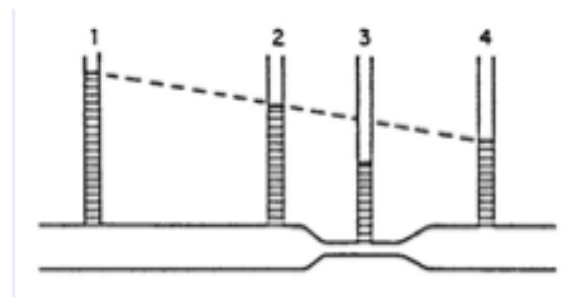


*On voit sur le schéma que la pression latérale n'est plus constante comme c'était le cas pour un fluide idéal mais qu'elle diminue du fait de cette perte d'énergie additionnelle liée aux frottements.*

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.

Dans le cas de l'effet Venturi avec un fluide réel :

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) La viscosité $\eta$

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 (*vraiment le sang ce gars*) :

$$F = \eta S \frac{dv}{dx}$$

On distingue deux catégories de fluides :

- **Newtoniens** (ex : eau) →  $\eta$  est une cste caractéristique qui varie seulement avec T.  
Si  $T \nearrow$  alors  $\eta \searrow$
- **Non Newtoniens** (ex : sang) →  $\eta$  varie avec T et  $\frac{dv}{dx}$  (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).  
Si  $\frac{dv}{dx} \nearrow$  alors  $\eta \searrow$

La viscosité n'a **théoriquement plus de sens pour un liquide non newtonien**. On utilise donc une **viscosité apparente**, càd la viscosité qu'aurait un fluide newtonien induisant le même débit pour une même différence de pression.

## C) Deux régimes d'écoulement d'un fluide réel

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).

## Écoulement laminaire

- **v faible**
- $\eta \rightarrow$  facteur cohérence
- Ligne parallèle
- v max au centre
- Fine couche immobile
- **Profil parabolique des vitesses**

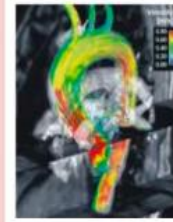
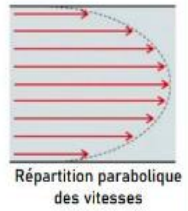


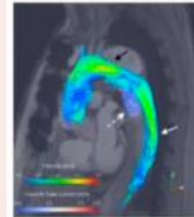
Image IRM des vitesses de la crosse aortique en couleur



Répartition parabolique des vitesses

## Écoulement turbulent

- **v moyenne ou élevée**
- $\eta \rightarrow$  ~~facteur cohérence~~
- désordonnée
- Trajectoire tourbillonnante
- **Pas de distribution systématisée des vitesses**



Plus de répartition parabolique des vitesses  $\rightarrow$  témoigne d'un flux turbulent dans cette aorte



### D) Frontière entre les deux régimes 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 un ou plusieurs augmentent, + fort risque de turbulence

Si elle augmente, diminution du risque de turbulence

Ainsi, ces 4 éléments définissent le **nombre de Reynolds** **Re** :

$$Re = \frac{\rho dv}{\eta}$$

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 (obtenus en conditions expérimentales sur des tubes cylindriques) :

- 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**, càd 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). On a  $v = \frac{2000\eta}{\rho d}$

### E) La loi de Poiseuille (aka le plus gros calcul de l'année)

La loi de Poiseuille concerne les **fluides réels 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 :

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

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

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  $\Delta P$ .

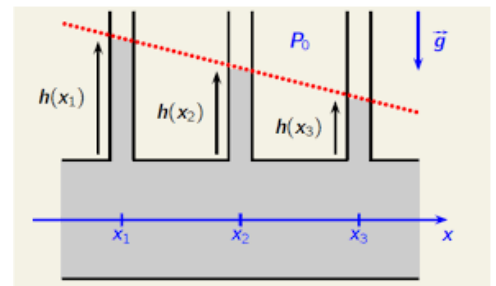
$$\Delta P = \frac{8\eta L}{\pi r^4} Q$$

Résistance à l'écoulement R, donc on peut aussi écrire  $\Delta P = Q \cdot R$

Avec L la longueur du vaisseau, r son rayon, Q le débit et la viscosité  $\eta$  (**ATTENTION aux unités**)

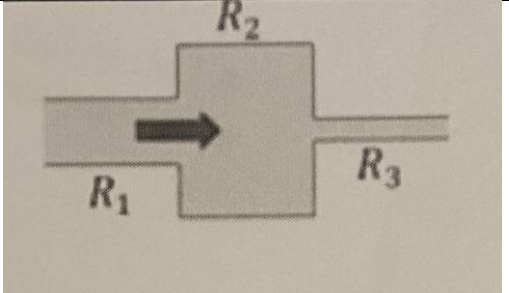
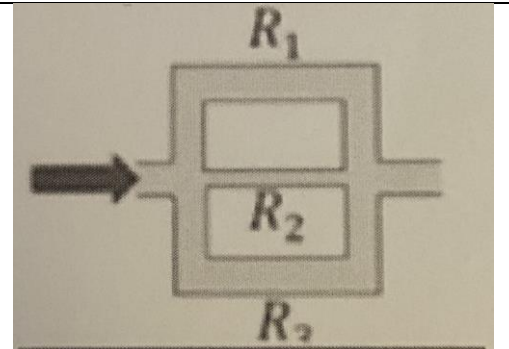
Si section = cste, alors la chute de pression est proportionnelle à la longueur :  $\Delta P = kL$

Sinon :  $\Delta P = \frac{k'L}{r^4}$



Quand on a des conduits **plus complexes** qu'un simple conduit à section circulaire, on va pouvoir calculer ces résistances à l'écoulement car elles se combinent comme en électricité (vu depuis le collège) :

$$U = R * I$$

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

### Conclusion :

#### Dynamique d'un fluide réel :

##### ❖ Écoulement laminaire :

- Toute **l'énergie est utilisée pour vaincre la viscosité**
- Relation linéaire entre la différence de pression et le débit

##### ❖ Écoulement turbulent :

- Il n'y a plus de proportionnalité entre la différence de pression et le débit, la formule de **Poiseuille n'est pas utilisable**
- C'est un régime **peu efficace**
- Les tourbillons consomment beaucoup d'énergie : chaleur + vibrations → **bruits/souffles à l'auscultation**

C'est fini, vous en faites pas les circu 2 et 3 arrivent aussi 😊



Et enfin forcément quelques dédis :

Dédis à mes cotuts : Iris, Héloïse et Lili.

Dédis à Hugo, Manon, Mina, Pierre, Milien, Baptiste, Nahélé, bref tous mes potes de med

Dédis à tous les vieux aka JA, Noé, Oscar, Anis, Elea, Mathilde qui n'est pas ma CT pref, Greg ce goat, Felix le chef du tutorat (merci France 3), Camilya et son appendice et Madeline.

Dédi à Camille ex tutrice de chimie qui est bien vieille maintenant (grosse bizou)

Dédi à Bastien qui n'aime pas Jul

Dédis à vous aussi surtout bon courage on est pas ensemble (enfin si quand même on est là pour ça).

Dédi à moi un peu qui tape une fiche un big 23 juillet (bon j'avoue je l'ai complétée le 7/09).