

Biophysique de la circulation TTR 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

0/ Intro :

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

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

On parle de 2 milieux : - Milieu gazeux : $E_c \gg E_l$ 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 parle de 2 fluides : - Idéal (parfait) = **pas de frottement**

- Réel = frottement (viscosité)

1/ Statique d'un fluide

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

A) 2 types de pressions :

La pression relative : effet de la colonne de liquide, Différence de pression : $\Delta P = \rho gh$ (avec ρ 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 ρ en kg.m^{-3} , g en 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 $[P] = [F]/[S] = [E]/[V]$

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

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**

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 : $[P] = \frac{ML^2T^{-2}}{L^3} = \frac{[E]}{[V]}$

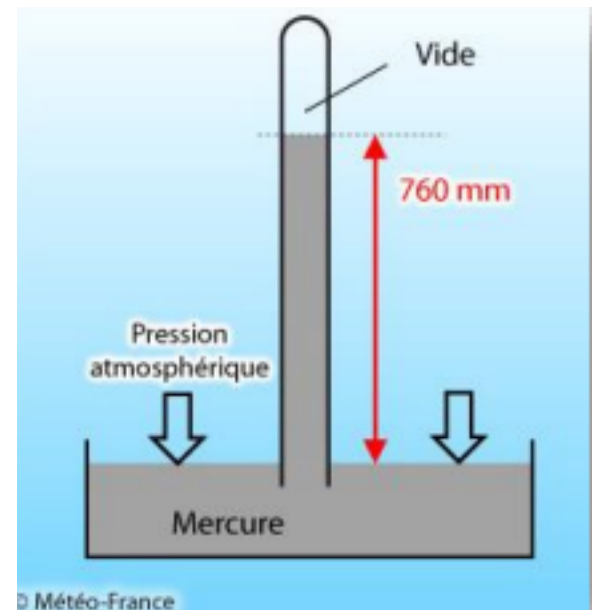
Je vous mets ci-contre un rappel des différentes dimensions, ça pourrait vous aider à mieux comprendre pourquoi on passe de F/S à E/V, mais c'est pas à apprendre

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

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.

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

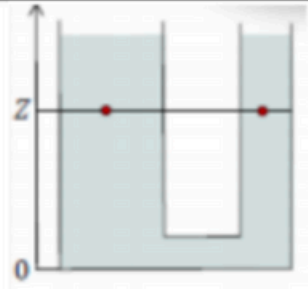
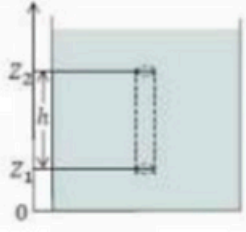


Comme cette Patm est le poids de la colonne d'air atmosphérique, **elle va diminuer lorsqu'on gagne en altitude** (puisque l'épaisseur de l'atmosphère va diminuer). On remarque sur le schéma que si la Patm au niveau de la mer est de l'ordre de 1010hPa, **elle diminue environ de moitié lorsqu'on atteint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

B) Principes et lois de Pascal

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

3 lois :

1^{ère} Loi de Pascal	La pression est la même dans toutes les directions → indépendante de l'orientation du capteur	
2^{ème} Loi de Pascal	La pression est la même en tout point de même profondeur (ou altitude).	
3^{ème} Loi de Pascal	<p>La différence de pression dP entre 2 points est proportionnelle à la différence de hauteur entre ces 2 points.</p> <p>$\Delta P = P_{z1} - P_{z2} = \rho gh = -\rho g \Delta z$</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>Δz : 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.

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 :

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

Le tutorat est gratuit, toute vente ou reproduction est interdite.

A) Principe de continuité du débit

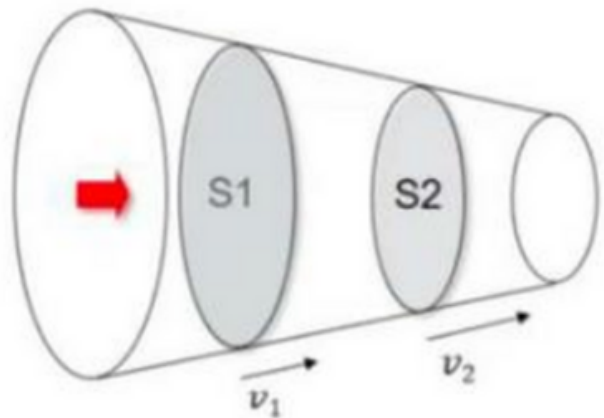
Ce principe n'est valable que si l'on part de ces **hypothèses** :

- *Incompressibilité* → ρ 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.**

Dans ce cas on a :

- $Q_1 = Q_2 = Q$
 - $S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \text{Cste} = Q$
- (Avec $S = \text{Aire} = \pi \times R^2$)



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 :

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

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 :

Le tutorat est gratuit, toute vente ou reproduction est interdite.

- **Incompressibilité** → ρ 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 :

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

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.

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

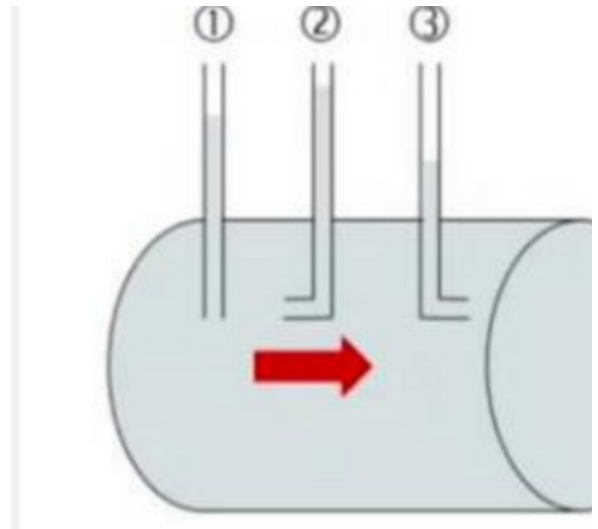
Donc on divise toutes nos énergies (E1, E2, E3) par le volume pour trouver des pressions.

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

C) Mesure de pression dans un conduit

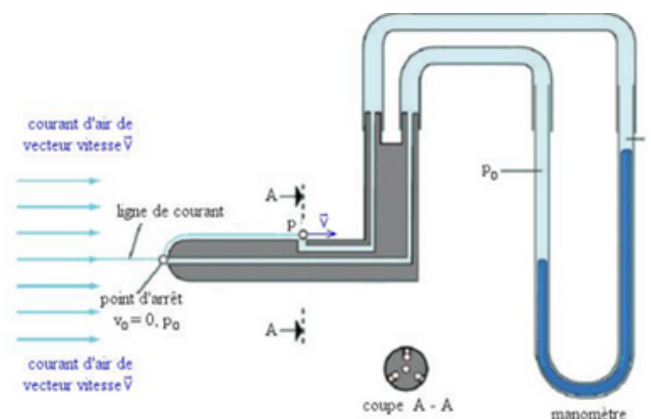
On peut mesurer des pressions grâce à **un capteur**. Cependant, à la différence des conditions statiques vues dans la première partie, **l'orientation du capteur importe** sur le résultat de la mesure.

- 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 » : $P_A = P - \frac{1}{2} \rho v^2$



ATTENTION : certains d'entre vous ont remarqué une discordance entre la biophysie et la physio, en effet le professeur s'est trompé le capteur est bien **PERPENDICULAIRE la pression statique**

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.

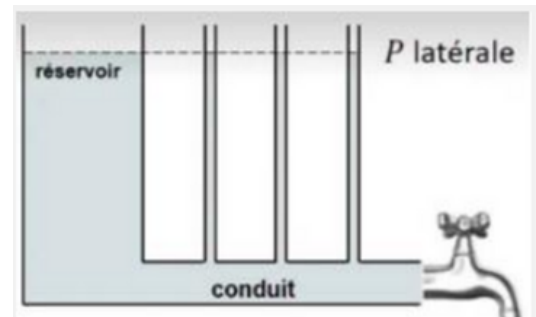
Un capteur fait face au flux d'air et mesure la pression terminale PT ; l'autre capteur est parallèle à l'axe du flux et mesure la pression latérale. Chacun est relié à une branche d'un tube qui permet de **mesurer la différence de pression entre la PT et la P latérale**.

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). *(miam la sv...)*

D) Cas particulier d'un écoulement horizontal

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.



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 :

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

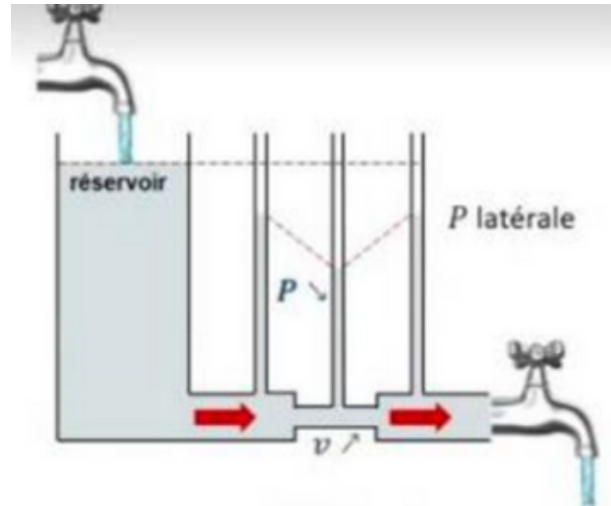
- Donc la pression totale se répartit entre la pression cinétique et la pression latérale, d'où :

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

Le tutorat est gratuit, toute vente ou reproduction est interdite.

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 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*).

3/ dynamique d'un fluide réel

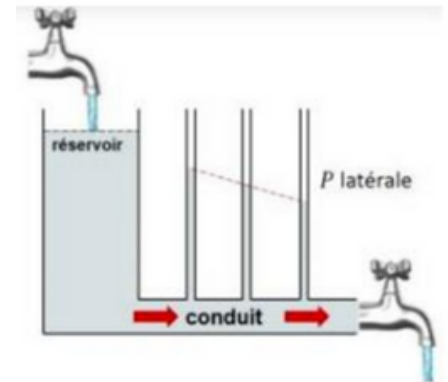
A) La perte de charge:

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** :

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

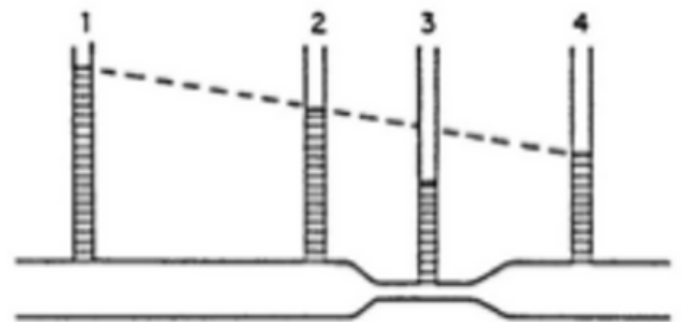
$$P_t = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P \neq \text{cste}$$



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** 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

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 : $F = \eta S \, dv / dx$

On distingue 2 catégories de fluides :

- Newtonien (ex : eau) : η est une cste caractéristique qui varie seulement avec T. Si $T \nearrow$ alors $\eta \searrow$
- Non-newtonien (ex sang) : η 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).

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**.

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

Petits conseil by votre diabétique préféré : Dans ces cours le professeur aime bien expliqué des concepts avec des mots compliqués et des formules etc... En vrai il ne fait (normalement) tomber que certaines parties du cours. DONC faites les annales pour savoir ce que le prof attend de vous et ça ira les petits potes

2 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).

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

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** ρ

4/ La **viscosité** η

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**.

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

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

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

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**.

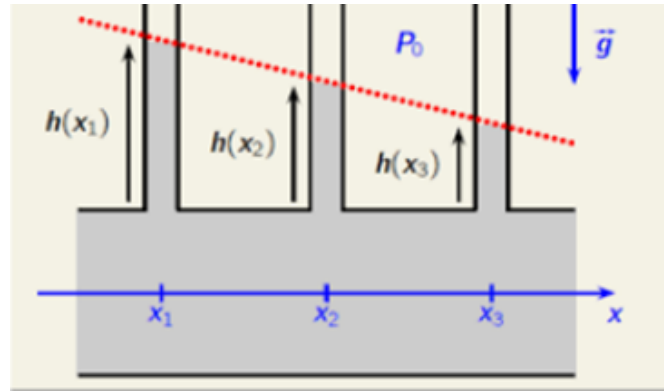
On définit aussi une **vitesse critique**, c'est-à-dire une vitesse au-delà de laquelle le régime laminaire n'est plus garanti, toutes choses étant égales par ailleurs (les autres facteurs sont constants, seule la vitesse peut être modifiée)

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

D) Loi de poiseuille

La loi de **Poiseuille** concerne les fluides **réels 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 (voir image page suivante) :



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**.

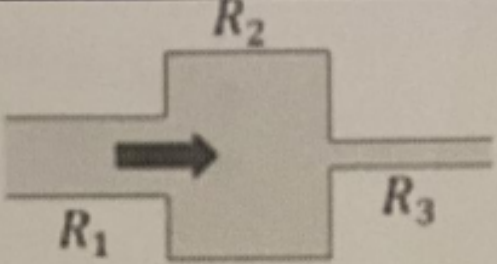
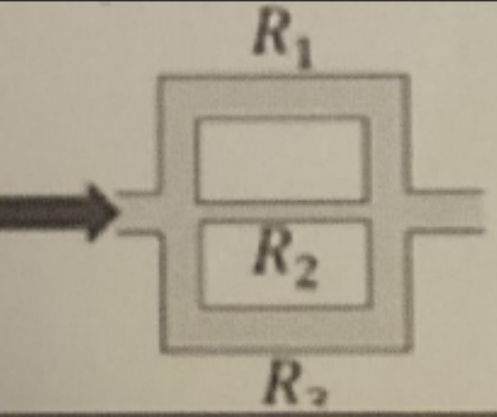
Cette perte de pression latérale nous est donnée par la **loi de Poiseuille** : C'est P qui compense la perte de charge

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

Avec n = nombre de capillaires, L = longueur, r = rayon, η = viscosité, Q = débit

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) :

$$U = R * I$$

<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 R_t est la somme des inverses des résistances individuelles.</p> $1/R_t = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$	

Merci à mon vieux ce bon vieux Guérein pour ce tableau qui m'évite de le refaire

C'est la fin du premier cours entier de circu place maintenant à quelques dédis :

Dédis à Matisse que je laisse flop exprès alors qu'en vrai il est marrant

Dédis à Yan et à toutes les fois où on s'est couché tôt

Dédis à Clément le plus beau des mister...

Dédis à Clémentine elle ça sera sans commentaire...

Dédis à Papin un élu de promos vraiment exemplaire (hum)

Dédis à Titouan parce que c'est Titouan

Dédis à Noélie parce que c'est ma voisine et qu'en vrai elle me fait peur

Dédis à Laura la personne la plus fan de Vanessa au monde

Dédis à Ophélie, Antonin et Virgile pour nos repas du midi en P1 qui étaient mémorables

Le tutorat est gratuit, toute vente ou reproduction est interdite.