

Biophysique de la Circulation : Partie 1

Sommaire :

Introduction à la Biophysique Cardiovasculaire
Introduction à la Biophysique de la Circulation :
Rappel sur les fluides

I. Statique d'un fluide
1.1 Notion de pression statique P dans un fluide
1.2 Dimension de la pression
1.3 Unités de pression
1.4 Pression atmosphérique
1.5 Principe et Lois de Pascal

II. Dynamique pour un fluide idéal
2.1 Notion de débit
2.2 Principe de continuité du débit
2.3 Équation de Bernoulli
2.4 Mesure des pressions dans un conduit
2.5 Cas particulier de l'écoulement horizontal

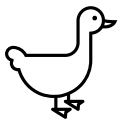
III. Dynamique pour un fluide réel
3.1 La viscosité
3.2 Les 2 régimes d'écoulement d'un fluide réel
3.3 La perte de charge
3.4 La loi de Poiseuille
3.5 Écoulement en régime turbulent

Coucou les P1 ! Premier cours de Biophysique de la Circulation qui comporte 3 cours en tout !! Dans ce cours on aborde déjà des notions qui peuvent être compliqués mais c'est pas mal de concret donc vous verrez ça va aller ! COMPRENEZ avant d'apprendre, l'apprentissage sera plus simple comme ça !

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

Voilà voilà je vous laisse débuter ce merveilleux cours, je vous souhaite bon courage vous êtes les meilleurs ! Et si vous avez besoin n'hésitez pas → FORUM ou Messenger : Taher EL KARKARI !!!

Introduction à la Biophysique Cardiovasculaire :



Le **système cardio-vasculaire** (= un ensemble moteur de pompes) est constitué du **cœur**, qui va propulser le sang, ainsi que des **vaisseaux** sanguins pour faire circuler le sang. *Mon vieux (GuéRein) nous dit que pour comparaison c'est littéralement une tuyauterie. L'analogie est bien, utilisez-la ou conséquences.*

Ce système circulatoire va être organisé de manière à favoriser les **échanges de nutriments** au niveaux des capillaires viscéraux et cela grâce à deux choses :

- Une **grande surface d'échanges**
- 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 qui est constitué de molécules mobiles entre elles et qui n'a pas de forme propre, qui peut donc **se déformer et s'écouler**.

On a différents milieux :

- **Milieu gazeux : Ec >> El** : l'agitation thermique domine.

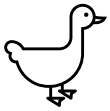
  Ici, les molécules ont une *distance variable* entre elles ! Le gaz est un fluide **compressible et expansible.** *Parce que les distances sont variables entre les molécules, on peut les rapprocher et les éloigner donc c'est compressible et expansible.*

  Pour des soucis de mise en page, on va continuer sur la prochaine page la team.

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

- **Milieu liquide : Ec ≈ El** : équilibre entre l'énergie de liaison et l'énergie cinétique.

  Cette fois, les molécules sont liées entre elles donc les distances entre elles sont plus restreintes. Une molécule va se détacher d'une autre puis retomber sous l'emprise d'une molécule qui se trouve un peu plus loin. Les liquides sont **non compressibles et non expansibles.** *Contrairement aux gaz…*

Mais on a aussi **2** catégories de fluide : 

- **Fluide idéal/parfait** : **pas de frottement** => écoulement sans perte d'énergie.
- **Fluide réel** : **phénomène de frottement** lors de l'écoulement du fluide => viscosité => perte d'énergie sous forme de chaleur lors de l'écoulement.

La mécanique des fluides :

- **Statique** : Le fluide est ici immobile et concerne les fluides caractérisés par une pression. Que ce soit un fluide idéal ou réel, ils auront le même comportement. *Car s'il est immobile, il n'y a pas d'écoulement donc pas de frottement dans tous les cas.*
- **Dynamique** : Le fluide est cette fois en mouvement (=écoulement) et concerne les fluides caractérisés par un **débit**. On aura un comportement différent entre un fluide idéal et réel. Je m'explique, si on est en mouvement, donc en écoulement, on n'aura pas de frottements en fluide idéal mais on aura des frottements en fluide réel donc on aura des calculs et des résultats différents.

I. Statique d'un fluide

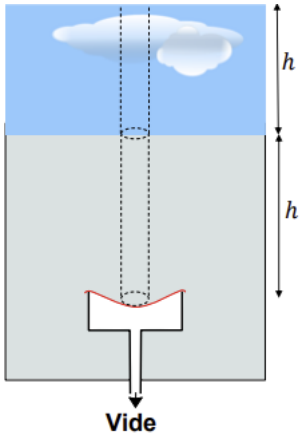
1.1 Notion de pression statique P dans un fluide :

Mise en évidence expérimentale :

On prend un récipient qui est rempli d'un fluide et dans lequel se trouve un capteur à l'intérieur duquel on fait le vide et qui possède une paroi déformable.

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

La pression P se manifeste par une déformation de la paroi.



La Pression (P) : Poids de la colonne de fluide sur cette paroi. *(ça c'est ++++ c'est la base)*

On peut observer 2 types de pression :

- **Pression relative** : Effet de la colonne de liquide (exemple de la surpression par rapport à la surface).

Différence de pression : **$\Delta P = \rho g h$** *(+++)*

Avec **ρ** la masse volumique, **g** l'intensité de la pesanteur et **h** la hauteur de la colonne de liquide. De plus, il faut faire attention à tout mettre dans les mêmes unités, donc souvent : **ρ** en $kg.m^{-3}$; **g** en $m.s^{-2}$; **h** en m.

- **Pression absolue** : Effet de la pression atmosphérique + Effet de la colonne de liquide. Donc la **pression de l'ensemble des fluides** qui appuient sur la paroi. On a alors : **$P_{absolue} = P_{atm} + \Delta P$** *(+++)*

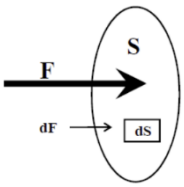


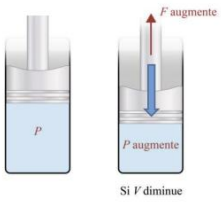
1.2 Dimensions de la pression P

La pression est une **force par unité de surface**. Mais aussi, elle est une **énergie par unité de volume** (énergie des particules qui constituent le fluide). Celle-ci est liée à l'agitation thermique des molécules qui vont constituer cette pression.

On aura donc :

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





On peut noter :

$$[P] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{MLT^{-2}}{L^2} \rightarrow$$

En multipliant par L en haut et en bas, on aura :

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

Avec : *P* = Pression ; *F* = Force ; *S* = Surface ; *M* = Masse ; *L* = Longueur ; *T* = Temps ; *E* = Énergie ; *V* = Volume.

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

1.3 Unités de pression

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

Mais le Pascal, c'est une unité faible… 1Pa c'est comme la pression exercée par 102g sur $1m^2$… Donc on utilise souvent des multiples avec par exemple la **pression atmosphérique (=1013 hPa)** qu'on exprime en **hecto Pascal** :

1 hPa = 100 Pa ; 1 milli bar = 1 hPa

Il existe d'autres unités de pression comme le bar : **1 bar = 10^5 Pa**

Les autres unités en physiologie vont être liées à l'utilisation de divers **manomètres** à colonnes de liquide comme le millimètre de mercure (**mmHg** pour la mesure de l'HTA par exemple) ou le centimètre d'eau (**cmH_2O**).

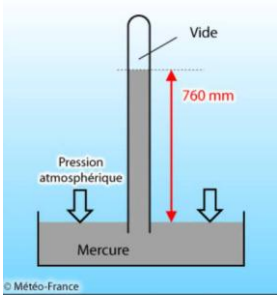
1.4 Pression atmosphérique

L'air est un fluide, alors en partant de ce principe, on peut définir la pression atmosphérique.

Pression Atmosphérique : Poids de la colonne d'**air atmosphérique**.

De plus, on peut avoir recours à l'expérience de Torricelli pour la mesurer :

On prend un récipient principal qui contient du mercure et un tube lui aussi rempli de mercure et retourné sur le récipient *(basez-vous sur l'image qui est juste à côté)*. De cette manière, on verra que le liquide (mercure) va s'immobiliser dans le tube en laissant au-dessus de lui un vide. La P_{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.



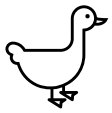
En gros, on a dit que la pression c'était une force sur une surface, bah là, la colonne d'air appuie sur le mercure du récipient et pousse le mercure dans le tube. Plus ça va monter dans le tube, plus cette pression est forte et inversement ; là je vous ai dis ça pour que vous compreniez mais il faut aussi retenir que la pression atmosphérique ne change pas !! C'est 1013 hPa comme dit plus haut.

$P_{atm} = \rho gh = 13,6 \times 10^3 \times 9,8 \times 0,760 = 101\ 300\ Pa = 1013\ hPa$

La P_{atm} est le poids de la colonne d'air atmosphérique, donc elle va **diminuer lorsqu'on gagne en altitude** *(car l'épaisseur de l'atmosphère va diminuer)*. La P_{atm} au niveau de la mer est de l'ordre de 1010 hPa, elle diminue environ de **moitié** lorsqu'on atteint **5000m** d'altitude.

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

1.5 Principe et Lois de Pascal :



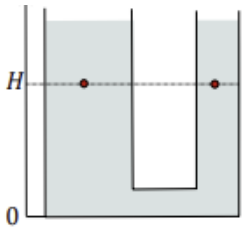
Principe :

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

Lois « dérivées » de Pascal : (+++)

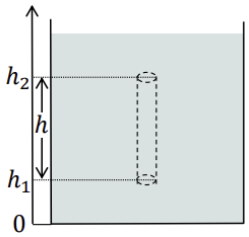
- **1ère Loi :** La pression est **la même en tout point de même altitude**.

Okay là normalement ce n'est pas compliqué mais pour vous donner un exemple, si on prend la pression atmosphérique au niveau de la mer au milieu de l'océan Pacifique et de même au milieu de l'océan Atlantique, indépendamment des conditions météorologiques, la pression (atmosphérique ici) sera la même.

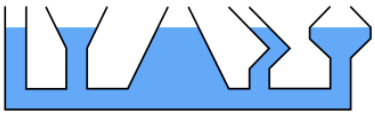


- **2ème Loi :** La différence de pression *dP* entre les points 1 et 2, situés respectivement à une profondeur h_1 et h_2, est **proportionnelle à la différence de hauteur *dh* entre ces 2 points.**

Si on est sur un même fluide, la masse volumique ρ sera la même sur 2 points différents. Et pour l'intensité de pesanteur, elle reste la même donc ρ et g restent les mêmes et seul la hauteur h va changer donc la différence de pression dP, donné par dP = ρgh, est proportionnelle à la différence de hauteur entre les 2 points car c'est le seul facteur qui change… j'espère vous avez compris mdr



$$\boldsymbol{dP} = Ph1 - Ph2 = \rho gh1 - pgh2 = -\boldsymbol{\rho g(h1 - h2)}$$



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.

Le signe négatif est ici présent pour traduire la relation inverse entre la hauteur et la pression. Plus **on monte (*h/z* augmente)**, plus **la pression diminue** et inversement, plus **on descend (*h/z* diminue)**, plus la **pression augmente**.

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**.

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

II. Dynamique d'un fluide idéal

2.1 – Notion de débit

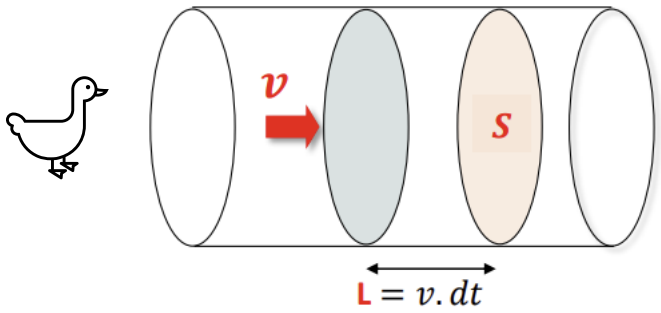
Débit : Volume de fluide qui traverse une section S par unité de temps.

On va donc avoir le débit : $\boldsymbol{Q = \frac{V}{dt}}$ (***V*** est le volume, ***dt*** le temps), en $\boldsymbol{m^3/s}$.

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

ATTENTION : Bien différencier *V = Volume et v = Vitesse*

Le schéma que je vous mets juste en dessous c'est une canalisation (un tuyaaau) de gauche à droite (c'est le sens de circulation la team) et nous on va s'intéresser au calcul du débit qui va passer à travers une section S à une certaine vitesse v. Ce débit c'est toutes les molécules qui sont situés dans le cylindre avec pour base S et pour hauteur L.



Soit $\boldsymbol{v}$ la vitesse d'un fluide et $\boldsymbol{S}$ la section du conduit dans lequel il s'écoule.
On veut calculer le débit $\boldsymbol{Q}$ à travers la section $\boldsymbol{S}$ à une vitesse $\boldsymbol{v}$.
Eh bien $\boldsymbol{Q}$ va correspondre à toutes les molécules qui vont passer par la section $\boldsymbol{S}$ pendant le temps $\boldsymbol{dt}$
Ce sont toutes les molécules situées en amont de $\boldsymbol{S}$ à une distance égale à :
$\boldsymbol{L = v.dt}$

Le volume $\boldsymbol{V}$ qui correspond est celui d'un cylindre de base $\boldsymbol{S}$ et de hauteur $\boldsymbol{L}$:
$\boldsymbol{V = S.L}$

Donc on aura : *(+++ la formule en dessous en rouge)*

$\boldsymbol{Q = \frac{V}{dt} = \frac{(S.L)}{dt}}$ ➔ $\boldsymbol{Q = \frac{(S.v.dt)}{dt}}$ ➔ Débit : $\boldsymbol{Q = S.v = section \times vitesse}$

Car V = S.L

Car L = v.dt

Et les *dt* s'annulent

Et le débit sera égal à cela en tout point d'une canalisation !!

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

2.2 – Principe de continuité du débit

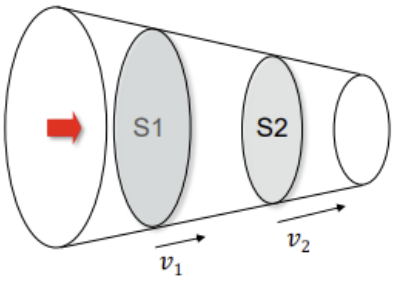
Ce principe ne sera valable que sous les hypothèses suivantes :

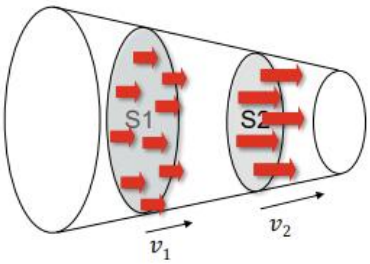
- Incompressibilité → ρ constante
- Régime stationnaire → la vitesse en 1 point est constante *(donc elle ne change pas dans le temps)*
- Conduit avec une section variable

Avec 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.

$\Rightarrow Q_1 = Q_2 = Q = constante$

$\Rightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2 = constante = Débit\ Q$





Quand un fluide incompressible circule en régime stationnaire dans un conduit, le produit $section \times vitesse$ (= débit) est constant tout le long du conduit.

Donc, plus notre section sera faible, plus la vitesse est élevée et inversement pour maintenir le débit constant :

$Q = S.v = constante$ **donc si S↗ alors v↘ et si S↘ alors v↗.**

2.3 – Équation de Bernoulli

Pour modéliser l'écoulement d'un **fluide idéal**, on utilise *l'équation de Bernoulli.*

Comme précédemment avec le principe de continuité, on part d'hypothèses :



- Incompressibilité → ρ constante
- Fluide idéal/parfait → pas de frottement, la viscosité est nulle et il n'y a pas de gêne à l'écoulement de ce fluide
- Écoulement non tourbillonnaire → non turbulent

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

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) *(là on va se permettre de traficoter et réarranger tout ça pour avoir une belle équation)*

On va donc avoir l'énergie totale E_t : E_t = E1 + E2 + E3, qui nous donne…

L'équation de Bernoulli :

$$\boldsymbol{Et = E1 + E2 + E3 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = constante}$$ *(+++)*

L'énergie totale (la charge) d'un fluide idéal est **constante** tout au long de la conduite.
On peut avoir une **redistribution** éventuelle entre les répartitions des énergies E1, E2 et E3 et ceci tant que la somme reste constante. *En gros si E1 diminue, E2 peut augmenter pour compenser par exemple, tant que notre Et reste constante c'est bon.*

On réécrit l'équation de Bernoulli en termes de pression :

Rappel : $[\boldsymbol{P}] = [\boldsymbol{E}]/[\boldsymbol{V}]$**.** On divise donc nos énergies par le Volume *V* pour passer à des pressions. Cela donne :

$\frac{Et}{V} = \frac{mgh}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv^2}{V} + \frac{P.V}{V} = \boldsymbol{constante.}$ V/V = 1 ; m/V = ρ. On peut remplacer…

Cela va finalement nous donner :

$$\boldsymbol{Pt = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = constante}$$ *(+++)*

$\boldsymbol{\rho gh}$ = Pression de pesanteur ; $\frac{1}{2}\boldsymbol{\rho v^2}$ = Pression Cinétique ; $\boldsymbol{P}$ = Pression statique

J'espère vous avez capté la team parce que c'est important !

2.4 – Mesure des pressions dans un conduit

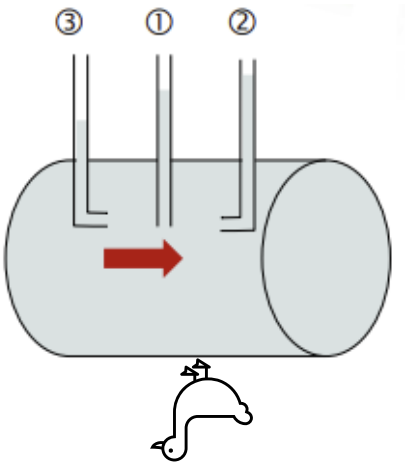
Grâce à un capteur, on peut mesurer des pressions. Dans la première partie, on a dit que l'orientation du capteur n'était pas importante *(page 6 à la fin la team)* mais c'était pour un fluide statique. Ici, pour un fluide en écoulement, **l'orientation du capteur importe** sur le résultat de la mesure.

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

Selon l'orientation du capteur, on aura 3 types de mesures (≠ 3 types de pressions) : *(+++)*

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

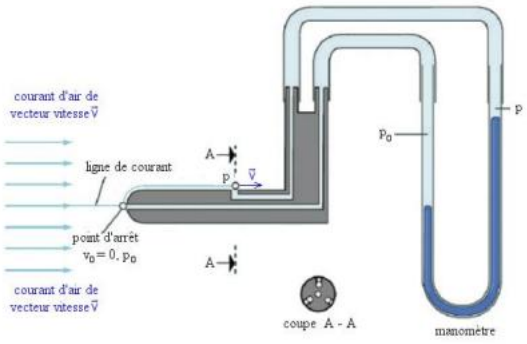
En fonction de la position du capteur, on mesure des valeurs de pressions différentes.



Juste après on voit le tube de Pitot, c'était dans le cours avant et là ce n'est plus présent dans le diapo du prof mais je vous le mets quand même pour votre culture et pour votre compréhension, ça peut aider mais honnêtement si vous avez compris ce que j'ai expliqué juste au-dessus ne vous attardez pas dessus.

Tube de Pitot :

Le phénomène qu'on vient de voir est mis à profit dans le système du tube de Pitot, utilisé en aéronautique. Il est constitué d'un double capteur et va permettre d'avoir accès à la mesure de la vitesse d'écoulement.
On a un capteur qui fait face au flux d'air et qui mesure la pression terminale PT ; l'autre capteur est parallèle à l'axe du flux et mesure la pression latérale/statique.
Chacun de ces capteurs 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 elle 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).



En gros, dites-vous que là on a PT et P, on veut la vitesse, alors on va faire PT – P parce que PT c'est P + ½ pv^2 donc il suffit d'enlever P alors on le soustrait. Donc si on a, grâce à ce calcul et au mesure, ½ pv^2 alors on pourra déduire la vitesse v (suffira de connaître la masse volumique p en gros). Voilà j'espère que c'est clair mais là on voit que l'orientation du capteur est importante.

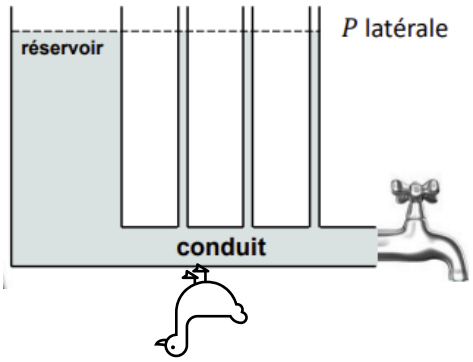
Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

2.5 – Cas particulier de l'écoulement horizontal

1. En condition statique :

Le liquide ne s'écoule pas ici et on va avoir la 2ème loi de Pascal qui s'applique : la pression est la même en tout point de même profondeur/altitude. *Okay je sais, plus haut, pour la même loi on disait que c'était la 1ère loi « dérivé » de pascal, bah c'est la même chose que 2ème loi de Pascal, je demanderais au prof*

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 (parce que c'est parallèle au courant on se rappelle la team). 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.

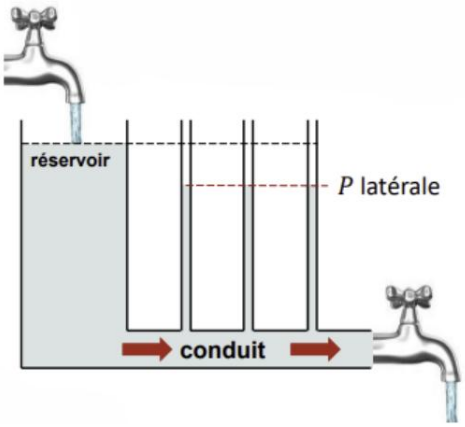
L'écoulement est horizontal donc la pression de pesanteur ne change pas (pgh = constante) donc l'équation de Bernoulli devient :

$$Pt = \frac{1}{2}\rho v^2 + P = constante$$

Donc la pression totale, qui est constante, va se répartir entre la pression statique (= pression latérale) et la pression cinétique, d'où :

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

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



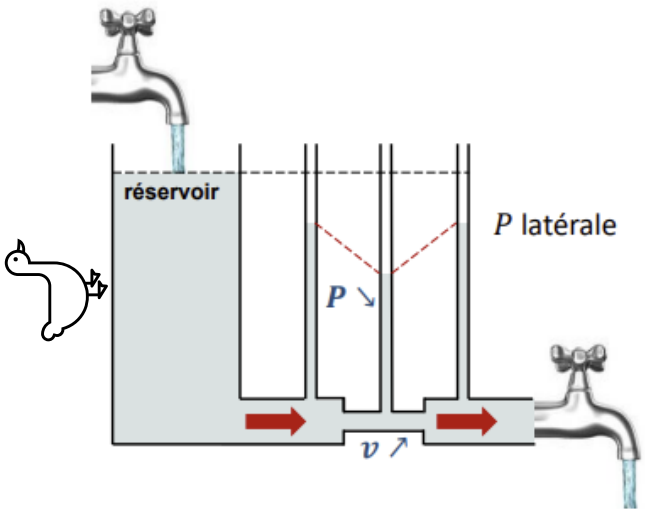
Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

3. Effet de variation de section :

On rappelle : $\boldsymbol{P = constante - \frac{1}{2}\,\rho v^2}$

Si la section diminue conformément à la continuité du débit ($Q = S.v$), la vitesse augmente.

De cette manière, la pression cinétique augmente ($½\rho v^2$) donc la pression latérale diminue.



C'est l'effet Venturi (+++)

4. Conséquences médicales :

➢ Risque en cas de **sténose** (= rétrécissement d'un vaisseau) : *(+++)*

Au niveau d'une sténose vasculaire, la vitesse $\boldsymbol{v}$ augmente, donc la pression cinétique Pc augmente aussi et entraînera une diminution de la pression latérale P. => Risque d'**obstruction par spasme**.

➢ Risque en cas d'**anévrisme** (= dilatation d'un vaisseau) : *(+++)*

Au niveau de l'anévrisme vasculaire, la vitesse v diminue, donc la pression cinétique Pc diminue aussi et entraînera une augmentation de la pression latérale P. => Risque de **rupture**.

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

Conclusion :

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

- La **constance du débit** (Q = S1v1 = S2v2 = constante)
- La **constance de la charge** (équation de Bernoulli) / constance de la somme des pressions
- Tout ça s'applique à un **fluide idéal** (et non pas **réel**, qu'on va voir…)

Okay la team là on va passer à l'écoulement d'un fluide réel, vous verrez ça va aller mais pitié il faut bien faire la différence entre ce qu'il se passe pour un fluide réel et un fluide idéal, c'est des pièges faciles en vrai… allez courage et soyez fiers de vous !!!

III. Dynamique d'un fluide réel



3.1 – Viscosité

On va avoir 2 définitions, une définition intuitive et une définition physique. La définition intuitive elle va être simple et basée sur la compréhension. La définition physique sera plus précise et scientifique, avec les conditions nécessaires. Je précise parce qu'en soit, les deux définitions sont bonnes, donc faites pas les choqués si en QCM vous voyez 2 définitions différentes…

Définition intuitive :

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

Un fluide très fluide *(…)* comme l'eau aura une **faible viscosité** -> il va s'écouler plus vite.
Un fluide épais comme le miel aura une **forte viscosité** -> il va s'écouler plus 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. *(+++)*

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

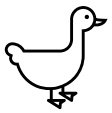
La viscosité est donc la résistance à l'écoulement de ce fluide. Il y a perte d'énergie utilisable lors de l'écoulement **(= perte de charge)** qui est liée au dégagement de chaleur.

Okay là dans ce qui va suivre, le prof met dans son diapo qu'on est toujours sur la définition de la viscosité, mais d'après moi c'est plutôt la définition du taux de cisaillement/gradient de vitesse… je demanderais ou j'effectuerais mes recherches, après la viscosité et le taux de cisaillement c'est lié, vous verrez…

Définition physique :

Deux lames de fluide circulent parallèlement à des vitesses différentes. *Là d'après moi c'est la définition du taux de cisaillement mais c'est +++.*

La force de frottement (ou F cisaillement) que chacune exerce sur l'autre :



$$F = \eta S \frac{dv}{dx}$$ (Newton…)

η = viscosité (*constante caractéristique du liquide*)

Unité : $\eta = kg.m^{-1}.s^{-1}$ (SI) ou $Pa.s$ ou en Poiseuille (PI) (unité spécifique à la viscosité).

S = surface commune entre les 2 lames

$\frac{dv}{dx}$ = **taux de cisaillement** (ou gradient de vitesse)

On a deux catégories de fluides :

- **Newtoniens** (ex : l'eau) : η est une constante caractéristique du liquide et qui va **varier seulement avec la température *T***.
  Quand *T* augmente, alors η diminue. ***T* ↗ alors η ↘**
- **Non Newtoniens** (ex : sang) : η n'est pas constant et va dépendre des contraintes qui s'exercent sur lui. Donc η varie avec *T* et $\frac{dv}{dx}$ *(je rappelle que c'est le taux de cisaillement/gradient de vitesse)* mais le plus souvent, la viscosité η dépend du **taux de cisaillement** $\frac{dv}{dx}$ seulement. Donc quand $\frac{dv}{dx}$ diminue, alors η augmente (les globules rouges formeront des rouleaux).
  ***dv/dx* ↗ alors η ↘** *vous voyez que c'est lié* 😊

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

La viscosité n'est donc pas très utile pour décrire la physique des liquides non newtoniens. On utilise alors une **viscosité apparente** (c'est la viscosité qu'on aurait avec un fluide newtonien qui induirait le même débit dans les mêmes conditions de pression).

3.2 – Les 2 régimes d'écoulement d'un fluide réel

Il faut savoir, avant d'aborder nos 2 régimes d'écoulements, qu'on a :

- **Fluide idéal** : toutes les molécules se déplacent à la même vitesse.
- **Fluide réel** : la viscosité va faire que les molécules se déplacent à des vitesses différentes (qui dépendra des interactions entre-elles et avec les parois). *Répétition de la page 3 mais c'est important pour comprendre +++*

On a donc 2 régimes d'écoulement :

- **Écoulement laminaire** *(+++)* : une vitesse v **faible** et la viscosité η va être un **facteur de cohérence** de l'écoulement… on aura un profil parabolique des vitesses, la vitesse v est maximale au centre et minimale au contact de la paroi (*voire nulle…*), avec une fine couche immobile *(au contact de la paroi, c'est pour ça qu'on dit avant que la vitesse est nulle)* et enfin on a des lignes qui ne se croisent pas (*elles sont parallèles entre elles*). *vous en faîtes pas je vais vous mettre un magnifique récap de mon vieux GuéRein le goat*

- **Écoulement turbulent** *(+++)* : une vitesse v **moyenne ou élevée** et la viscosité η ne sera **plus un facteur de cohérence**… on n'aura pas de distribution systématisée des vitesses *(c'est la caTaher (oui…))* avec des trajectoires individuelles tourbillonnantes et des lignes de courant qui se croisent (*non parallèles entre elles*) *eeeet le récap sous forme de tableau tant attendu… :*



Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

Frontière entre les deux régimes d'écoulement :

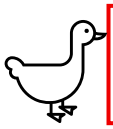
Le passage entre un écoulement laminaire et turbulent dépendra de 4 paramètres :

- La vitesse moyenne d'écoulement v
- Le diamètre du conduit d
- La masse volumique du liquide ρ
- La viscosité η

Si l'un ou plusieurs paramètres (parmi les 3 premiers) augmentent, augmentation fort risque de turbulence

Si η augmente, diminution du risque de turbulence

Tous ces beaux paramètres vont définir le **nombre de Reynolds Re** *(+++)* :



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

C'est un nombre empirique qui va servir à **définir le seuil entre les deux régimes d'écoulement, laminaire ou turbulent** (en donnant des ordres de grandeur obtenus en conditions expérimentales sur des tubes cylindriques) :

On considère *(+++)* :

- Si $Re \leq 2000$ ⇒ régime d'écoulement **laminaire**
- Si $Re > 10000$ ⇒ régime d'écoulement **turbulent**
- **Entre les 2** : Le régime d'écoulement est **instable** : on ne peut rien conclure.

On peut aussi parler de **vitesse critique**, c'est-à-dire une vitesse au-delà de laquelle le régime laminaire n'est plus garanti (il faut considérer que les paramètres, autres que la vitesse, ne varient pas) $v_c = \frac{Re.\eta}{\rho.d} = \frac{2000.\eta}{\rho.d}$



3.3 – La perte de charge

La **viscosité** va correspondre aux forces de frottements internes entre les molécules lors du mouvement du fluide → Elle crée donc de l'énergie qui se dissipe sous forme de chaleur.

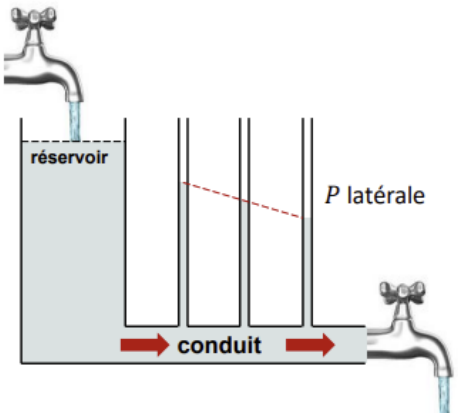
L'équation de Bernoulli n'est plus vérifiée pour un fluide : *la honte*

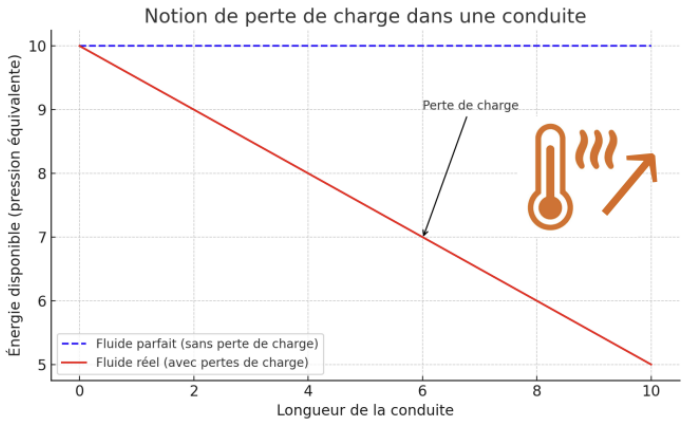
$$Et = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV \neq constante \; / \; Pt = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P \neq constante$$

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

➢ Dans le cas d'un **liquide réel**, on aura une perte charge utilisable lors de l'écoulement liée à la dissipation d'énergie E **en chaleur** du fait de la viscosité du liquide, c'est ce qu'on appelle la **« perte de charge ».**

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





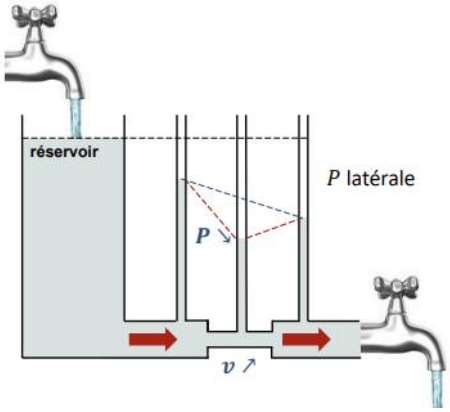
Toujours dans le cas d'un **fluide réel**, la perte de charge lors de l'écoulement sera liée à la **dissipation d'énergie E en chaleur** du fait de la viscosité du liquide.

C'est notre **pression latéral qui va diminuer** du fait de la perte de chaleur (donc la pression statique du fluide qui diminue).

En effet, la pression de pesanteur et la pression cinétique ne varient pas (que si le tube est horizontal…)

On peut aussi se pencher sur **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**.



Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

3.4 – La loi de Poiseuille (toute la partie c'est +++ surtout le calcul)

La loi de Poiseuille va concerner **uniquement** les fluides réels en flux **laminaire** et **newtonien** qui s'écoule dans un tube horizontal cylindrique.

Il va exister une relation simple entre :

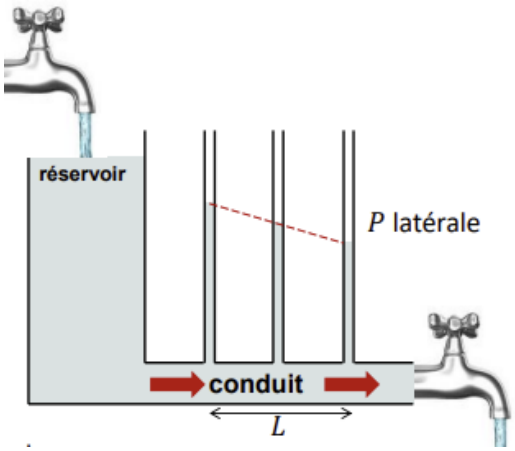
- La **pression appliquée** aux extrémités.
- Le **débit volumique**
- Les **caractéristiques du fluide et du tube**.

Cette relation, elle va être donnée par la **Loi de Poiseuille** :

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

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

Avec $\boldsymbol{R = 8\eta L/\pi r^4}$ et $\boldsymbol{Q}$ = débit (m^3/s) ; $\boldsymbol{\Delta P}$ = différence de pression entre l'entrée et la sortie du tube (en Pa) ; $\boldsymbol{r}$ = rayon du tube (en m) ; $\boldsymbol{L}$ = longueur du tube horizontal (en m) ; $\boldsymbol{\eta}$ = viscosité du fluide (Pa.s)



Cette Loi de Poiseuille, elle caractérise le **flux** (pression-débit).

Cela veut dire, 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 η**

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

- **Proportionnel à la 4ème puissance du rayon** : si le **rayon** fait **x2**, alors le **débit** fera **x16**. On voit l'importance au niveau de la vasomotricité sur le débit sanguin ainsi qu'une importance de la circulation capillaire.

On peut aussi **calculer la résistance R sur un ensemble de conduits de différents diamètres** (puisque c'est le cas de la circulation sanguine !) *un peu moins +++ qu'avant*

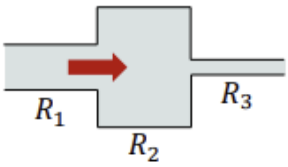
- Les **résistances** à l'écoulement se combinent comme en électricité : *en gros ça date du collège et du lycée la team*

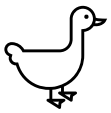
$$U = R \times I$$

Et cette formule aura la même signification que notre Loi de Poiseuille en dynamique des fluides.

On le voit dans 2 conduits différents :

- Conduit en **série** : **La résistance totale est la somme des résistances individuelles**. $Rt = R1 + R2 + \cdots + Rn = \sum_1^n Ri$





- Conduit en **parallèle** : **L'inverse de la R_t est la somme des inverses des résistances individuelles**. $\frac{1}{Rt} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \cdots + \frac{1}{Rn}$

3.5 – Écoulement en régime turbulent

On se rappelle sur l'écoulement laminaire que toute l'énergie consommée est utilisée pour **vaincre la viscosité**.

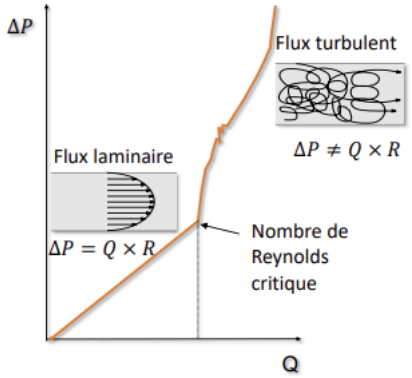
$$P + \rho gh + \frac{1}{2pv^2} + chaleur = constante$$

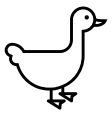
Et on va avoir une relation linéaire entre la différence de pression et le débit (donnée par la Loi de Poiseuille) : $Débit\ (Q) = \frac{\Delta P}{R}$ avec $R = 8\eta L/\pi r^4$

Le tutorat est un service gratuit (masterclass). Toute vente ou reproduction est interdite.

Et bien sur l'écoulement turbulent, il n'y a plus de proportionnalité entre la différence de pression et le débit (donc Poiseuille n'est plus utilisable).

Ca va être un **régime peu efficace** et dans lesquelles les **tourbillons consomment une partie de l'énergie** : chaleur + vibrations → **bruits et/ou souffle.**





FINITO PIPO POUR CE PREMIER COURS DE BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION LA TEAM BRAVOOOO <3

Dédiiiis Version TUT'AMBIANCES : *ENFIIIIIN*

Big Dédi à Rilès, mon artiste préféré, je sais que beaucoup n'aiment pas et c'est okay, moi il m'a accompagné en musique dans des périodes où c'était pas la forme et depuis plusieurs années je l'écoute maintenant alors mon top 1 hein

Big Dédi aux STROKES pitié c'est mon groupe préféré, allez les écouter ils ont sorti leur dernier album « Reality Awaits » que j'ai évidemment acheté et j'adore Dine N'Dash, Liar's Remorse et Going to Babble On

Toujours les Strokes avec l'album The New Abnormal qui est tout simplement mon top1 des albums of all time, une pépite, mon top1 des sons dedans c'est Ode To The Mets un pur banger pour les oreilles et MERCI à CLARISSE votre CT Log qui m'a offert leur vinyle qui est tout simplement incroyable.

