

BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION 1

Système Cardio-Vasculaire = Ensemble moteur de pompes

- ❖ Constitué du **CŒUR** (Pompe) + **VAISSEAUX** (Circulation)

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

- ❖ **GRANDE SURFACE D'ÉCHANGE** + **VITESSE CIRCULATOIRE LENTE** ++

I) BASE DE LA BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION

FLUIDE = Milieu matériel déformable **sans forme propre** et **qui s'écoule** +++

- ❖ 2 milieux fluides :

MILIEU GAZEUX	MILIEU LIQUIDE
$E_{cinétique} \gg E_{liaison}$ <i>L'agitation thermique domine</i>	$E_{cinétique} \approx E_{liaison}$
Molécules à distances variables	Molécules liées entre elles et à distances restreintes
COMPRESSIBLE	SUPPOSÉ INCOMPRESSIBLE

- ❖ 2 types de fluides +++

FLUIDE PARFAIT IDÉAL	PAS DE FROTTEMENTS (On ne prend pas en compte la <u>viscosité</u>)
FLUIDE RÉEL	FROTTEMENTS (La <u>viscosité</u> joue un rôle important++)

- ❖ 2 types de situations +++

<u>MECANIQUE STATIQUE</u>	<u>MECANIQUE DYNAMIQUE</u>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluide IMMOBILE ▪ Caractérisé par une PRESSION ▪ MÊME COMPORTEMENT Idéal/Réel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluide en MOUVEMENT ▪ Caractérisé par un DÉBIT ▪ DIFFÉRENT COMPORTEMENT Idéal/Réel

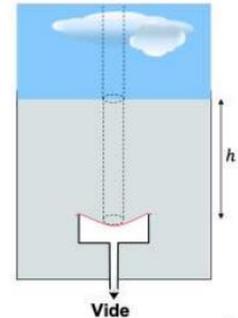
II) STATIQUE D'UN FLUIDE

A) NOTION DE PRESSION STATIQUE D'UN FLUIDE

PRESSION STATIQUE P = Poids de la colonne de fluide

Mise en évidence expérimentale :

Un récipient, rempli d'un fluide, contient un capteur 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**.



PRESSION RELATIVE	PRESSION ABSOLUE
Effet de la <u>colonne de liquide uniquement</u>	Effet de la <u>colonne de liquide + la colonne atmosphérique</u>
$\Delta P = \rho g h$	$P_{\text{absolue}} = P_{\text{relative}} + P_{\text{atmosphérique}}$

B) DIMENSION DE LA PRESSION

Je vous mets ce tableau pour que vous puissiez comprendre les calculs dimensionnels mais IL N'EST PAS A APPRENDRE

Grandeur de base	Nom	Symbole	Symbole de la dimension
Longueur	mètre	m	L
Masse	kilogramme	kg	M
Temps ou durée	seconde	s	T
Intensité du courant électrique	ampère	A	I
Température thermodynamique	kelvin	K	Θ
Quantité de matière	mole	mol	N
Intensité lumineuse	candela	cd	J
Angle solide	stéradian	sr	Ω

$$[P] = \frac{M \cdot L \cdot T^{-2}}{L^2}$$

$$[P] = \frac{M \cdot L^2 \cdot T^{-2}}{L^3}$$

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

Dimension d'une énergie

La pression est une **force par unité de surface** $[P] = [F] / [S] ++$

Avec les calculs dimensionnels, on se rend compte que la pression est aussi une **énergie par unité de volume** (énergie des particules de fluide) ++. Elle est **liée à l'agitation thermique** des molécules constituant la pression

C) UNITÉ DE LA PRESSION

L'unité de Pression SI est le **Pascal** ++ : $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

Le Pascal est une **unité faible**, ce qui explique qu'on a souvent recours à des multiples :

$$1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} // \text{Pression atmosphérique} = 1013 \text{ hPa}$$

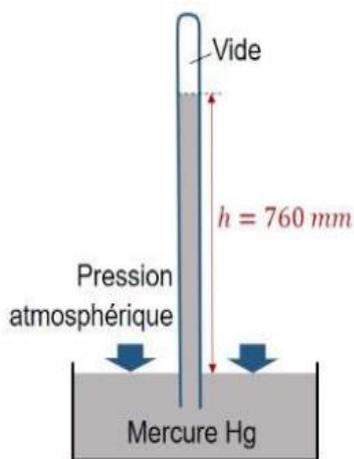
Il existe comme autre unité **le bar** :

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} // 1 \text{ milli bar} = 1 \text{ hPa}$$

Les autres unités en physiologie sont liées à l'utilisation de **manomètres à colonnes de liquides** : le millimètre de mercure (**mmHg**) ou le centimètre d'eau (**cmH₂O**).

D) LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

P_{atm} = Poids de la colonne d'air atmosphérique, l'air étant un fluide il peut exercer une *pression*. On la mesure grâce à l'expérience de Toricelli.



On prend une cuve remplie de mercure et un tube lui aussi rempli de mercure. On retourne le tube dans la cuve. La colonne de mercure descend et laisse un vide dans le fond du tube.

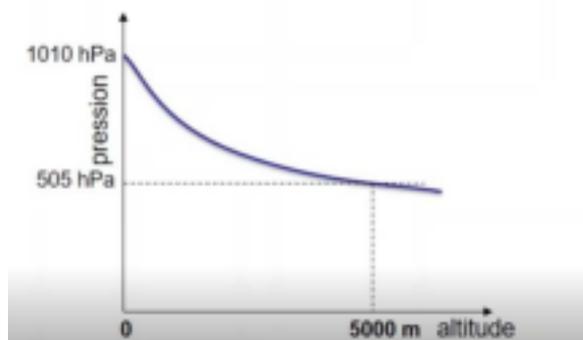
Qu'est-ce qu'il se passe ? En fait on va avoir un équilibre avec **la pression atmosphérique qui lutte contre la descente du mercure**

La pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface de ce récipient va être **caractérisée par la hauteur de cette colonne de mercure** dans le tube de Toricelli

$$P_{\text{atm}} = \rho gh = 1013 \text{ hPa}$$

Bonus : Il y a une unité de mesure de la pression qui s'appelle l'atm, ça correspond 1013 hPa donc une atmosphère.

Variation avec l'altitude :



Plus l'altitude augmente, plus la pression atmosphérique diminue.

Logique car la colonne d'air atmosphérique devient plus petite quand on prend de l'altitude.

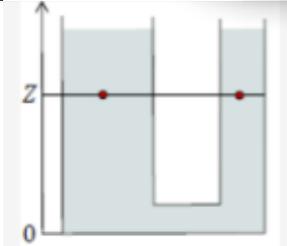
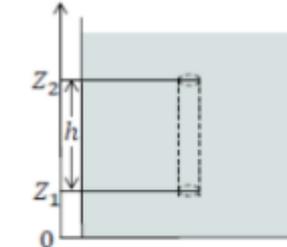
A **5000m**, la pression atmosphérique a diminué de moitié.

E) PRINCIPES ET LOIS DE PASCAL → FLUIDE STATIQUE +++

Les lois de Pascal rendent compte des variations de pression en fonction de l'altitude.

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

Ce principe donne lieu à **3 lois** :

1ère Loi	<p>La pression est la même dans toutes les directions → indépendante de l'orientation du capteur.</p>	
2e Loi	<p>La pression est la même en tout point de même profondeur.</p>	
3e Loi	<p>La différence de Pression dP entre 2 points est proportionnelle à la différence de hauteur entre ces 2 points</p> $\Delta P = P_{z1} - P_{z2} = \rho g h = -\rho g \Delta z$ <p><i>Retenez principalement que la pression est fonction de l'altitude, plus h augmente, plus P augmente.</i></p>	 <p>Δz : différence de hauteur entre les 2 points.</p> <p><i>Faites bien la différence entre z et h.</i></p>

CONCLUSION STATIQUE DES FLUIDES

- ❖ Paramètre essentiel = **Pression** ++
- ❖ Pression liée au **pois de la colonne de liquide**
- ❖ Indépendante de l'orientation du capteur

III) DYNAMIQUE D'UN FLUIDE IDÉAL

A) NOTION DE DÉBIT

Débit = Volume de fluide traversant une section S par **unité de temps ++**
Retenez bien cette définition vous l'entendrez assez dans le cours sur les compartiments

$$Q = \frac{V}{dt}$$

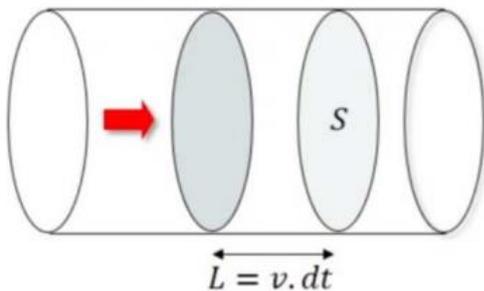
Avec V le volume en m^3
 dt la durée en s
 Et Q le débit en m^3/s

Dimension : $L^3 \times T^{-1}$ // unité : m^3/s

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

⚠ $v = \text{vitesse} // V = \text{volume}$

Attention là c'est de la démo mathématique donc n'apprenez pas le détail



Le schéma représente une **canalisation** avec un débit qui va de gauche à droite et on voudrait calculer le **débit qui passe par la section S**. Ce débit est **l'ensemble des molécules qui a pour base S et pour hauteur L**

On a v , la vitesse des particules

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 $V = S \cdot L$

Qu'est-ce que ça veut dire tout ce charabia ? Je vais essayer de vous l'expliquer

On prend un temps infinitésimal que l'on nomme dt .

L correspond à la distance maximale à laquelle les particules pourront passer la section en allant à une vitesse v en un temps dt .

Du coup, on a une hauteur et une base cylindrique, ça peut nous donner un volume cylindrique : $V = L \cdot S$

Ne vous prenez pas la tête avec ça si vous ne comprenez pas, c'est de la physique pure et dure et c'est clairement pas ce que le prof vous demandera.

On a : +++

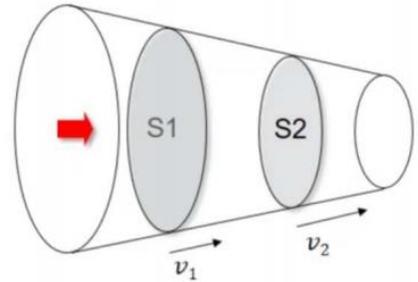
$$Q = S.v = \text{Section} \times \text{Vitesse}$$

Retenir que $S = \pi r^2 = (\pi.d^2)/4$ pour une section cylindrique

B) PRINCIPE DE CONTINUITÉ DU DÉBIT

On pose 3 hypothèses :

- ❖ Le fluide est **incompressible** → ρ est constante
- ❖ On est en **régime stationnaire** → La **vitesse** en un point est **constante**
- ❖ La **section** est **variable**



Dans ce cas précis, on a une conservation de la masse qui, avec l'incompressibilité, donne un **débit constant en tout point** : +++

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{constant} = Q$$

C'est très important pour les exos ça, c'est ++

Avec ces conditions, on a donc un **débit constant** tout le long du conduit. On en déduit que plus la **section** est **faible**, plus la **vitesse** est **élevée** pour maintenir le **débit constant**.

C) ÉQUATION DE BERNOULLI

L'équation de **Bernoulli** permet de modéliser l'écoulement d'un fluide **IDÉAL** ++

Hypothèses :

- ❖ **Incompressibilité** → ρ constante
- ❖ **Fluide idéal/parfait** → pas de frottement, viscosité nulle

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 v)
- ✓ **E3 pression statique** (Comme la pression est une énergie sur un volume, on a $E3 = \text{Pression} \times \text{Volume}$)

!/ \ ATTENTION :Bernoulli s'applique à un fluide idéal donc on ne parle pas d'écoulement laminaire ou turbulent !

La **somme** de ces trois énergies nous donne **l'équation de Bernoulli** : ++

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

Cette énergie est constante mais il peut y avoir des **redistributions**.

Réécriture en termes de **Pressions** : +++

$$P_t = \frac{E_t}{V} = \frac{mgh}{V} + \frac{1/2 mv^2}{V} + P = \text{constante}$$

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

ρgh = pression de pesanteur

$1/2 \rho v^2$ = pression cinétique

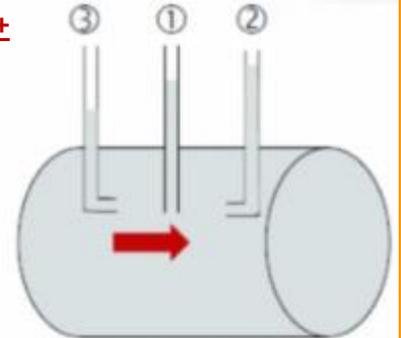
P = pression statique

Une pression est une énergie par volume ++ On donc divisé l'équation par le volume pour trouver les pressions

D) MESURE DES PRESSIONS

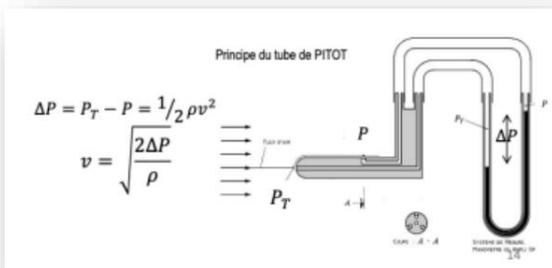
!/! Contrairement aux fluides STATIQUES, dans un fluide EN ÉCOULEMENT, les valeurs mesurées **dépendent de l'orientation du capteur++**

- Il existe 3 types de mesures (≠ des 3 types de pressions) : ++++
- (1) Capteur **parallèle** au courant -> Pression **latérale** ou **statique** P
- (2) Capteur **face** au courant -> Pression « **terminale** » : $P_T = P + 1/2\rho v^2$
- (3) Capteur **dos** au courant -> Pression « **d'aval** » : $P_A = P - 1/2\rho v^2$



Petit Mémo des familles : La terminale ça passe vite (Du coup la pression terminale c'est celle qui se prend la vitesse en pleine tête)

Le Tube de Pitot :

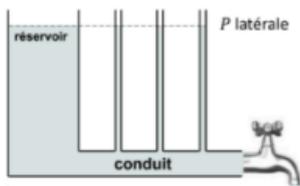


C'est un système utilisé dans l'aérodynamique pour **calculer la vitesse**. On deux capteurs, un qui mesure la pression terminale et l'autre qui mesure la pression latérale. Chacun est relié à une branche d'un tube en U qui permet de mesurer la **différence de pression** entre P_T et P . Cette différence sera égale à $1/2\rho v^2$. **On peut en déduire la vitesse ++**

E) CAS PARTICULIER D'UN ÉCOULEMENT HORIZONTAL : FLUIDE IDÉAL ++

Le système est constitué d'un réservoir principal qui alimente un conduit avec des tubes parallèles qui permettent d'accéder à la pression latérale

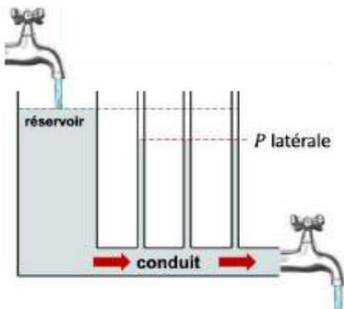
❖ En condition statique :



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

On voit que la **P latérale est égale à celle qui règne dans le réservoir** puisque le liquide est en situation statique

❖ En écoulement :



Le réservoir est alimenté → maintien de la pression d'origine
La pression totale se répartit entre la pression latérale et la pression cinétique car la pression de pesanteur reste **constante** (même altitude).

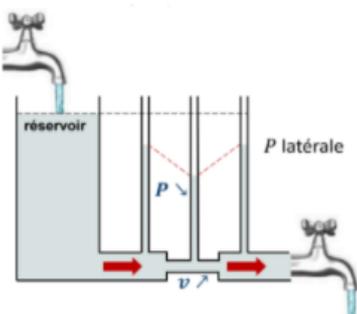
$$P_t = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = \text{Constante}$$

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

$$\text{D'où } P = \text{constante} - \frac{1}{2}\rho v^2$$

La pression latérale diminue parce qu'une partie de la pression totale est prise par la pression cinétique

❖ Effet de la variation de section :



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

Si la section diminue, conformément à la **continuité du débit** ($Q=Sv$), la vitesse augmente → D'où d'après l'équation de Bernoulli → La **pression cinétique augmente** et la **pression latérale diminue**.

Une diminution de la section entraîne une baisse locale de La Pression Latérale au niveau du rétrécissement → c'est

L'EFFET VENTURI++

Application médicale :

En cas de **sténose vasculaire**, la **vitesse** ↗ mais la **pression latérale** ↘ et peut devenir tellement faible que cela peut provoquer une **obstruction par spasme**.

CONCLUSION DYNAMIQUES D'UN FLUIDE IDÉAL

❖ Deux règles pour l'écoulement d'un fluide idéal dans un conduit :

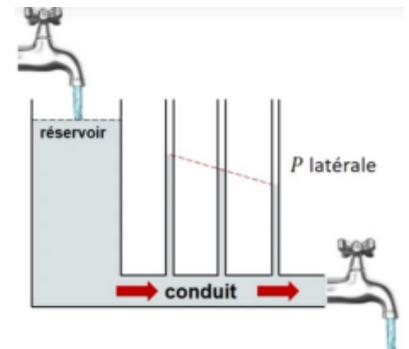
- La **constance du débit** ($Q = S_1v_1 = S_2v_2 = \text{constante}$)
- La **constance de la somme des pressions** (équation de Bernoulli)

IV) DYNAMIQUE D'UN FLUIDE RÉEL

A) LA PERTE DE CHARGE

La **viscosité** qui correspond à des **frottements** (entre les molécules de fluide) consomme de l'énergie libérée sous forme de **chaleur**, il y a donc une **perte d'« énergie »** qu'il faut compter dans l'équation de Bernoulli.

La **pression latérale n'est plus constante** *comme on avait pu le voir dans le cas d'un écoulement d'un fluide idéal sans variation de section*. Elle diminue à cause de cette perte de charge liée aux frottements



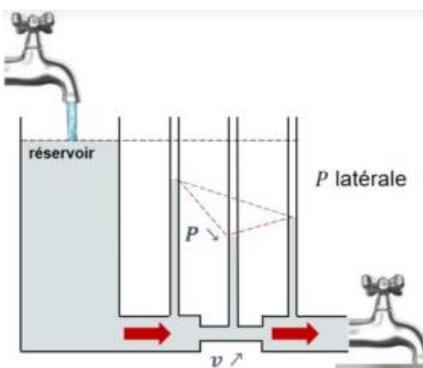
++ L'ÉQUATION DE BERNOULLI N'EST PLUS VERIFIÉE ++

$$E_T = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + P \neq \text{CONSTANTE}$$

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

$$P_T = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P + \text{CHALEUR} = \text{CONSTANTE}$$

❖ Concernant l'effet Venturi :



Pour un **liquide réel**, on a le même phénomène que pour un fluide idéal mais il faut prendre en compte la **perte de charge**. La vitesse augmente et il y a une redistribution des pressions mais **la pression latérale va remonter mais pas au même niveau que précédemment puisqu'on a une perte de charge.**

B) LA VISCOSITÉ



Deux lames de fluides circulent parallèlement à des vitesses différentes. La force de frottement est exprimée par :

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

S = Surface commune aux 2 lames

dv/dx = gradient de vitesse (« taux de cisaillement »)

η = **viscosité** (constante caractéristique du liquide en PI = Poiseuille = Pa.s = $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)

Ne vous prenez pas trop la tête avec ça, cette formule sert principalement à introduire le taux de cisaillement et la viscosité. Par contre reprenez bien les unités c'est +++

Note d'un vieux tuteur à la retraite : le taux de cisaillement représente la **distance entre les molécules/cellules**. D'où si le taux de cisaillement augmente, la distance augmente, et ainsi la viscosité diminue.

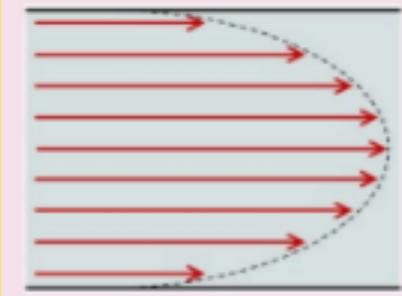
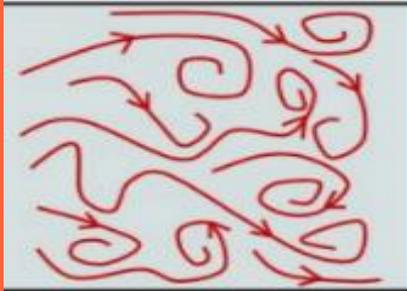
On distingue deux catégories de fluides : +++

- ❖ **NEWTONIENS** : η est une **constante caractéristique du liquide** qui varie seulement avec la **température** ($T^{\circ}\text{C} \nearrow \rightarrow \eta \searrow$)
- ❖ **NON NEWTONIENS** : η varie avec la **température** mais aussi avec le **taux de cisaillement** ($\frac{dv}{dx} \nearrow \rightarrow \eta \searrow$) $\rightarrow \eta$ *n'étant plus une constante on parle de viscosité apparente (ex : sang)*

C) RÉGIMES D'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE RÉEL

Contrairement à un fluide idéal, la **viscosité** des fluides réels fait que les molécules se déplacent à **des vitesses différentes** en fonction **des frottements** qu'elles vont subir (interactions entre elles et la paroi)

On décrit 2 régimes d'écoulement possibles : ++++

ÉCOULEMENT LAMINAIRE	ÉCOULEMENT TURBULENT
<ul style="list-style-type: none"> ❖ La vitesse d'écoulement est faible ❖ La viscosité devient un facteur de cohérence ❖ Une couche infiniment mince au contact de la paroi ne se déplace pas ❖ Les lignes de courant ne se croisent pas, la vitesse est maximale au centre ❖ Profil parabolique des vitesses 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ La vitesse d'écoulement est moyenne ou élevée ❖ La viscosité n'est plus un facteur de cohérence ❖ Les trajectoires sont désordonnées et tourbillonnent ❖ Pas de distribution systématisée des vitesses 

D) FRONTIÈRE ENTRE LES DEUX RÉGIMES D'ÉCOULEMENT

Dépend de 4 paramètres simultanément :

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ La vitesse moyenne d'écoulement v ✓ Le diamètre du conduit d ✓ La masse volumique du liquide ρ ✓ La viscosité η | } | <p>si \nearrow = risque de turbulence \nearrow</p> |
| | | <p>si \nearrow = risque de turbulence \searrow</p> |

On définit le **nombre de Reynolds** : ++

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

Le nombre de Reynolds, nombre empirique sans unités, sert à définir le **seuil entre les régimes d'écoulement laminaire et turbulent**. ++

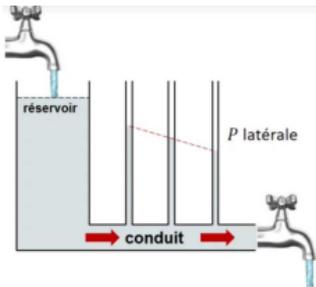
- ❖ Si $Re \leq 2000$: Le régime d'écoulement est **laminaire**
- ❖ Si $Re > 10\,000$: Le régime d'écoulement est **turbulent**
- ❖ **Entre les 2** : le régime d'écoulement est **instable** on ne peut rien conclure

Cela nous permet d'aboutir à la notion de **vitesse critique** :

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

C'est la vitesse au-delà de laquelle le régime laminaire n'est plus **garantie**

E) LOI DE POISEUILLE



Dans un conduit **horizontal** cylindrique en **écoulement laminaire** : la **pression de pesanteur est constante** et la **section est constante** donc la **vitesse constante**

→ **C'est P (= la pression latérale) qui compense la perte de charge**

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

On peut calculer la baisse de la pression latérale grâce à la loi de Poiseuille : ++++++

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

Q = Débit
L = distance
 η = viscosité
r = rayon du conduit

Cette formule permet de calculer la perte de charge dans un vaisseau unique (aorte, ...), pour un système de capillaire on le revoit dans la fiche Biophy Circu 2

CONCLUSION DYNAMIQUES D'UN FLUIDE RÉEL

Écoulement Laminaire	Écoulement Turbulent
<ul style="list-style-type: none"> Toute l'énergie est utilisée pour vaincre la viscosité Relation linéaire entre la différence de pression et le débit 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de proportionnalité entre la différence de pression et le débit, la formule de Poiseuille n'est plus utilisable Régime peu efficace Les tourbillons consomment beaucoup d'énergie : chaleur + vibrations → bruits et/ou souffle

Place au dédis (oui je prends une nouvelle page juste pour les dédis) :

- *Dédi à mes fillots Emma, Axel et Roméo, on croit en vous les loulous*
- *Dédi à Audrey ma co-marraine*
- *Dédi à mes parrains toutes années confondues Sacha, Margot, Sarah et Giorgio (la lignée de chef-tut) <3*
- *Dédi à mes co-tut, je cite Oscar, Elisa et Clara. Je pouvais pas rêver mieux*
- *Dédi au chien de Tom votre tuteur de Biocell qui s'appelle comme moi*
- *Dédi aussi à Tom du coup chez qui j'habite à titre honoraire*
- *Dédi à la crème de la crème (ils se reconnaîtront)*
- *Dédi au Tut'tut*
- *Dédi à vous qui lisez cette fiche, j'espère qu'elle vous a plus*
- *Et enfin dédi à tous les P1 qui ont un parcours chelou, les réorientations, les césures, les pauses, on est là les gars. Je crois en vous, j'étais pareil que vous <3*



Des bisous du Tutorat <3