
BIOPHYSIQUE DE LA CIRCULATION 1

I. INTRODUCTION

A. 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.

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.

B. DÉFINITIONS

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

▮ **Milieu gazeux :** $E_c \gg E_l$

Les molécules ont des **distances** entre elles qui sont **variables** ; le gaz est généralement considéré comme **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**.

▮ **Fluide parfait (=idéal) :** pas de frottements

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

C. 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 ++
- ◇ 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. ++

II. STATIQUE D'UN FLUIDE

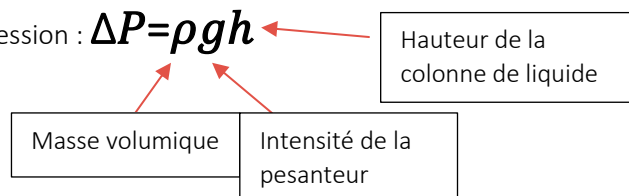
A. NOTION DE PRESSION STATIQUE D'UN FLUIDE

Par définition, la pression est le poids de la colonne de fluide qui s'applique contre cette paroi.

On distingue :

- **Pression absolue** : liée à la pression de l'ensemble des fluides qui appuient sur cette paroi (colonne atm + colonne de liquide)
- **Pression relative** : effet de la colonne de liquide (sépare surface et zone de mesure)

Différence de pression : $\Delta P = \rho g h$



B. UNITÉ DE PRESSION

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

Cependant, le Pascal est une unité faible.

On a donc souvent recours à des multiples, par exemple pour la pression atmosphérique qu'on exprime en hecto Pascal : $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$

Pression atmosphérique = 1013hPa

Il existe comme autre unité de pression le bar (10^5 Pa).

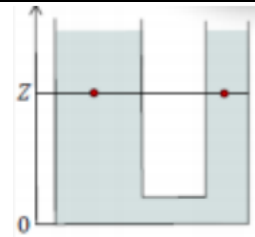
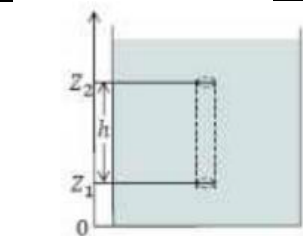
Les autres unités en physiologie sont liées à l'utilisation de **manomètres à colonnes de liquides**, comme le **millimètre de mercure** (mmHg) ou le **centimètre d'eau** (cmH₂O).

C. PRINCIPE ET LOIS PASCAL

(1) PRINCIPE

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

(2) LOIS

<u>1^{ère} loi :</u>	La pression est la même dans toutes les directions → indépendante de l'orientation du capteur	
<u>2^e loi :</u>	La pression est la même en tout point de même profondeur	
<u>3^e loi :</u>	<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>

On retient donc :

- ♥ 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**.

III. DYNAMIQUE D'UN FLUIDE IDÉAL

A. NOTION DE DÉBIT

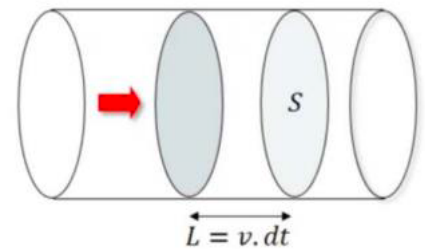
Débit : **volume de fluide** qui traverse une section **S** **par unité de temps**

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

Diagram showing the equation $Q = \frac{V}{dt}$ with red arrows pointing from the boxes 'Volume' and 'Temps' to the variables V and dt respectively.

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

(Le schéma ci-contre 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 ont 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 :

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

ATTENTION $V \neq v$ (oui je l'ai dit 15 fois mais mieux vaut trop que pas assez 🙄)

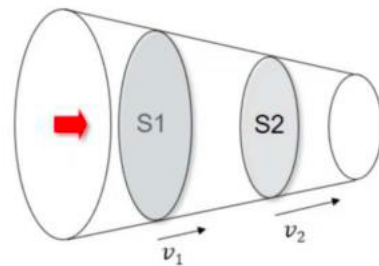
B. PRINCIPE DE CONTINUITE DU DEBIT

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

- ☞ Incompressibilité $\rightarrow \rho$ constante
- ☞ Régime stationnaire \rightarrow 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 de la section par la vitesse (donc le débit) est le même tout au long du conduit.

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

► $Q = S \cdot v = \text{cte}$ donc si $S \searrow$ alors $v \nearrow$

C. ÉQUATION DE BERNOULLI

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

On part là aussi d'hypothèses :

☞ **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)
- **E₂ cinétique** (liée à la vitesse)
- **E₃ de pression statique** $E_3 = P.V$ (car $P = E/V$, la pression est une énergie sur un volume)

L'énergie total E_t (=charge) => somme des 3 énergies

Équation de Bernoulli : $E_t = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = cte$

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

Les énergies E_1 , E_2 , E_3 peuvent **varier** entre elles tant que la somme reste constante -> possibilité de redistribution.

Réécriture :

$$P_t = \frac{E_t}{V} = \frac{mgh}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv^2}{V} + P = cte$$
$$P_t = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = cte$$

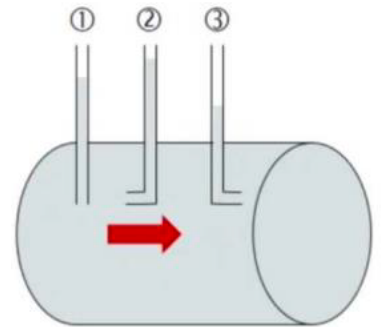
Pression de pesanteur Pression cinétique Pression statique

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



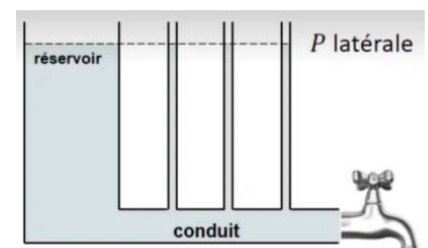
En fonction de la position du capteur, on mesure des valeurs de pressions différentes

E. CAS PARTICULIER : 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**

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**

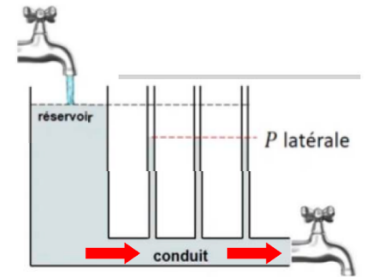
Le conduit est horizontal donc la **pression de pesanteur ne change pas** ($\rho gh = cte$) Donc l'équation de Bernoulli devient :

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

$$P_t = \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = cte$$

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

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



Donc la **pression totale** se répartit entre la pression cinétique et la pression latérale.

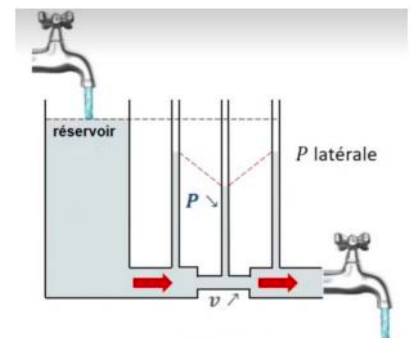
La **P latérale va être diminuée** par rapport à la situation statique puisqu'une partie de la pression est prise par la pression cinétique.

(3) EFFET DE LA 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**.

- Si $S \searrow$ alors $v \nearrow$ ($Q = Sv$) or $P = cte - \frac{1}{2} \rho v^2$
- $\Rightarrow \frac{1}{2} \rho v^2 \nearrow$ ($P_c \nearrow$)
- $\Rightarrow P \searrow$

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 avoir 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**.

On retient :

- ♥ L'écoulement d'un **fluide idéal** dans un conduit répond à des règles simples :
 - La constance du débit ($Q = S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{constante}$)

→ La constance de la charge (équation de Bernoulli) / constance de la somme des pressions

♥ Tout ça s'applique à un **fluide idéal** !

IV. DYNAMIQUE D'UN FLUIDE RÉEL

A. LA PERTE DE CHARGE

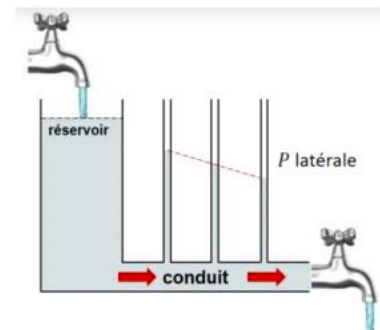
La **perte de charge** est liée à la **viscosité**, qui correspond au frottement des molécules du fluide entre elles lorsque ce fluide est en écoulement. Ces frottements **consomment de l'énergie** qui se dissipe sous forme de **chaleur**.

Ainsi, l'équation de Bernoulli n'est plus vérifiée :

$$Et = E_1 + E_2 + E_3 = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV \neq cte$$

$$Pt = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P \neq cte$$

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.

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 :

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

On distingue deux catégories de fluides :

- ◇ Newtoniens $\rightarrow \eta$ est une cte caractéristique qui varie seulement avec T ($T \nearrow \Rightarrow \eta \searrow$)
- ◇ Non Newtoniens $\rightarrow \eta$ varie avec T et $\frac{dv}{dx}$ ($\frac{dv}{dx} \nearrow \Rightarrow \eta \searrow$)

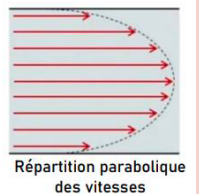
C. DEUX RÉGIMES D'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE RÉEL

Écoulement laminaire

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



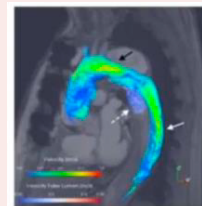
Image IRM des vitesses de la crosse aortique en couleur



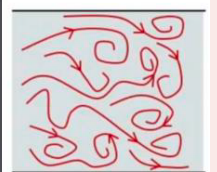
Répartition parabolique des vitesses

Écoulement turbulent

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



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



D. FRONTIÈRES ENTRE LES 2 RÉGIMES D'ÉCOULEMENT

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

1. Vitesse moyenne d'écoulement v
 2. Diamètre du conduit d
 3. Masse volumique ρ
 4. Viscosité η
- } si v, d ou $\rho \nearrow$ alors $Re \nearrow$
- si $\eta \nearrow$ alors $Re \searrow$

On définit le **nombre de Reynolds** :

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

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**.

E. 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 :

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

Horizontal : $\rho gh = cste$

Section constante : $\frac{1}{2} \rho v^2 = cste$

Seul P peut varier : $P_t = P + \text{chaleur} = cte$

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**.

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

F. RÉCAP/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 :
 - 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 et/ou souffles

BON COURAGE !!!!

Dédi à mes co-tuts Lisa, Éléa et Yasmine les bests,
Dédi à Bryan et son amour pour la bioch,
Dédi à Roméo le frerot
et dédi à Lili rose ptdr #amphi1