

Biophysique de la circulation

Cours n°1



Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

Sommaire

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Définitions

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
 - II) Propriétés liées au sang
 - III) Particularités liées à l'anatomie
-
- Un fluide est un milieu **matériel déformable** facilement : capacité d'écoulement
 - Milieu gazeux : déformable et compressible
 - Milieu liquide : déformable mais incompressible
 - Fluide idéal : absence de forces de frottements
 - Fluide réel : frottements ++
 - Statique des fluides : on étudie les pressions
 - Dynamique des fluides : on étudie les débits

Statique d'un fluide idéal

➤ La pression statique d'un fluide est égal au poids de la colonne de liquide qui s'applique sur lui

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

- Pression relative : poids de la colonne de liquide qui s'applique sur le capteur de pression = effet de la colonne de liquide.

$$\Delta P = \rho gh$$

ρ : masse volumique

g : accélération de la pesanteur

h : hauteur de la colonne de liquide

- Pression absolue : poids de la colonne de liquide à laquelle s'ajoute celle de la pression atmosphérique.

$$P \text{ absolue} = P \text{ relative} + P \text{ atmosphérique}$$

A) Dimensions de la pression

Force par unité de surface	Energie par unité de volume
$[P] = \frac{[F]}{[S]}$ $[P] = \frac{M \cdot L \cdot T^{-2}}{L^2}$ $[P] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	$[P] = \frac{[E]}{[V]}$ $[P] = \frac{M \cdot L^2 \cdot T^{-2}}{L^3}$ $[P] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$

$$[P] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

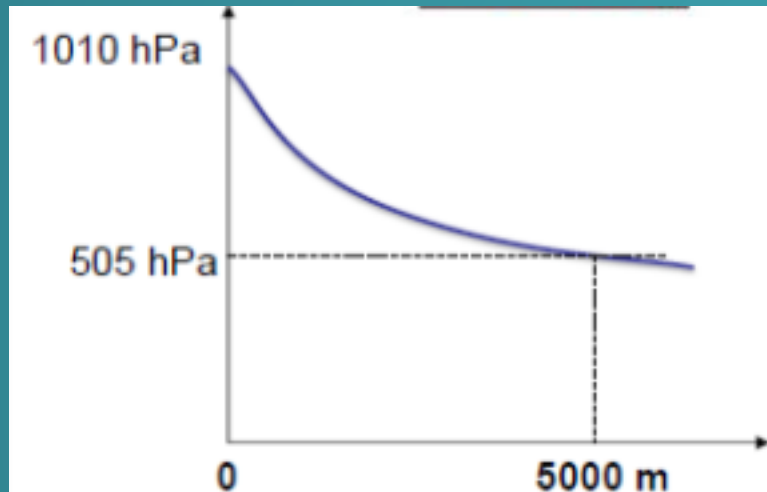
- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

B) Unités de pressions

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Le Pascal	Le Bar
<ul style="list-style-type: none">• Unité du système international• $1\text{Pa} = 1\text{N.m}^{-2}$• Unité très faible à l'échelle des pressions, on utilise donc des multiples• $1\text{hPa} = 100\text{ Pa}$	<ul style="list-style-type: none">• Ancienne unité• Unité beaucoup plus élevée• $1\text{ Bar} = 10^5\text{ Pa} = 10^2\text{ hPa}$

C) Pression atmosphérique



C'est le poids de la colonne d'air atmosphérique => Elle varie avec l'altitude et la profondeur

$$P_{\text{atm}} = \rho g h = 1013 \text{ hPa}$$

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

D) Lois de pascal

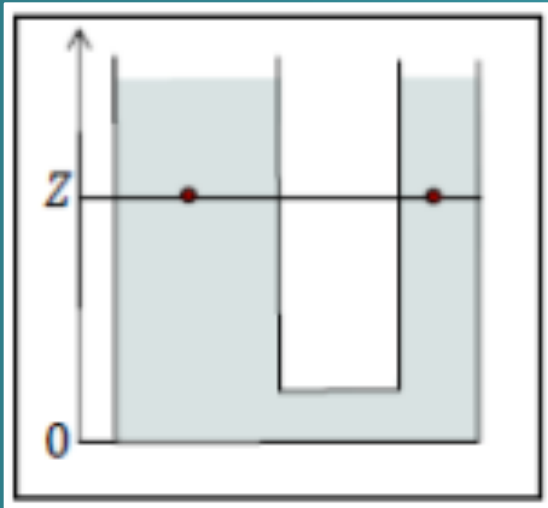
- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

➤ Dans un liquide incompressible (/!\ non gazeux) une variation de pression se transmet **intégralement et dans toutes les directions.**

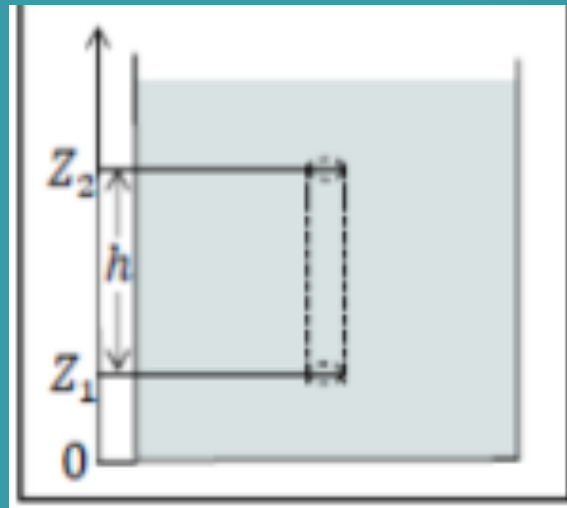
- 1) La pression est la même dans toutes les directions c'est à dire indépendante de l'orientation du capteur.
- 2) La pression est la même en tout point d'une même profondeur (ou altitude)
- 3) La différence de pression entre deux points est proportionnelle à la différence de hauteur entre ces deux points

D) Lois de pascal

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie



2eme loi



3eme loi

$$\Delta P = -\rho g d_z \Rightarrow Z \downarrow \Rightarrow P \uparrow$$

Dynamique d'un fluide idéal

❖ Un débit est un volume de fluide qui traverse une section S par unité de temps.

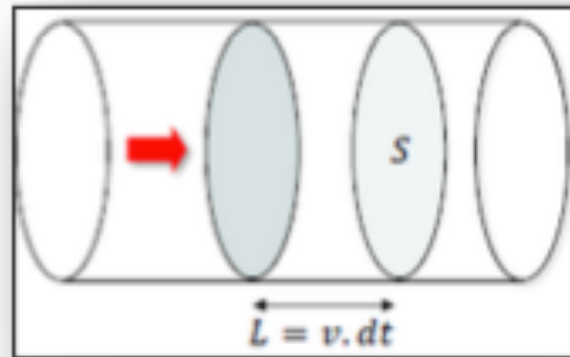
- On donne :

$$Q = S \times v$$

Q : débit en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

S : section en m^2

v : vitesse en s^{-1}



- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

A) Principe de continuité du débit

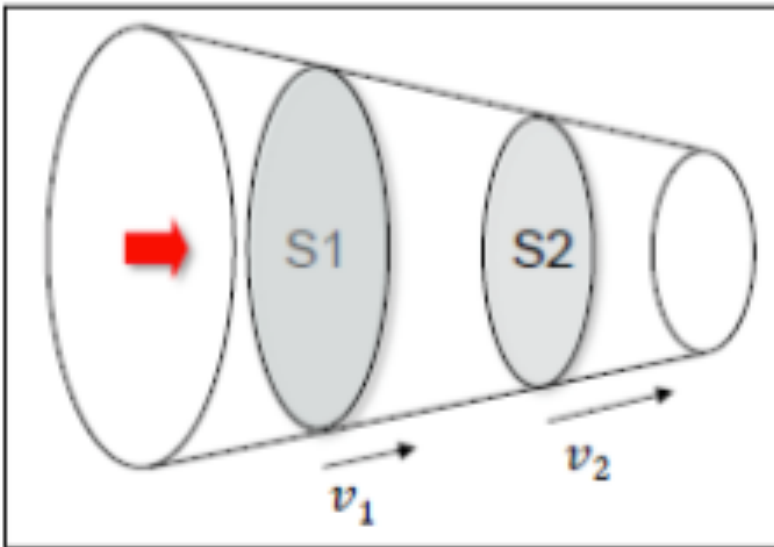
HYPOTHESES

- 1) On suppose que le fluide est incompressible \Rightarrow masse volumique constante au cours du temps
- 2) La section du tuyau dans laquelle s'écoule le fluide est constante
- 3) Le fluide s'écoule en régime stationnaire

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Application

- Lorsqu'un fluide incompressible circule en régime stationnaire dans un conduit, le produit de la **section x vitesse** (débit) reste constant au cours du temps.



$$Q = S_1 \times v_1 = S_2 \times v_2$$

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

B) Ecoulement d'un fluide idéal

Un fluide idéal s'écoule selon 3 types d'énergies :

- Energie de pesanteur : ρgh
- Energie cinétique : $1/2\rho v^2$
- Energie de pression statique (latérale) : P

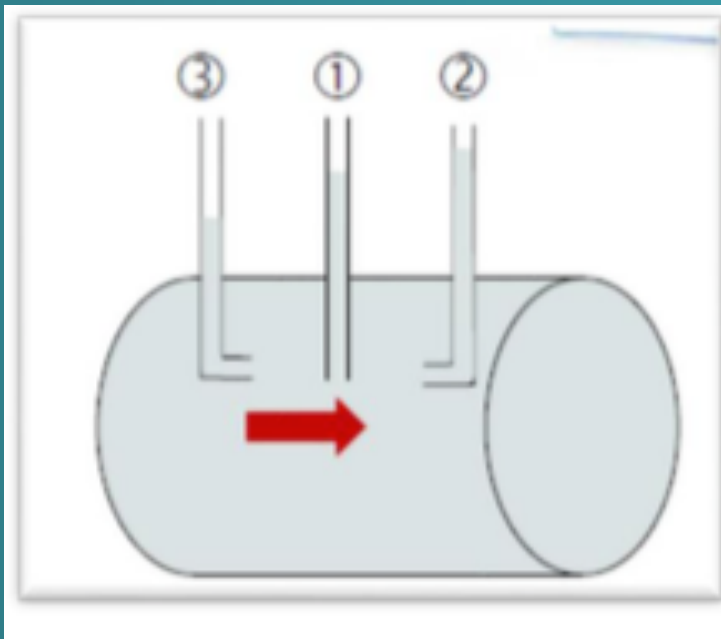
EQUATION DE BERNOULLI :

$$\text{Energie totale} = \rho gh + 1/2\rho v^2 + P = \text{CONSTANTE}$$

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

C) Mesure de pressions

- Quand un fluide est en mouvement, les valeurs de pressions mesurées dépendent de l'orientation du capteur



① Pression latérale:
pression statique P

② Pression « terminale »:
 $P + 1/2\rho v^2$

③ Pression « d'aval »:
 $P - 1/2\rho v^2$

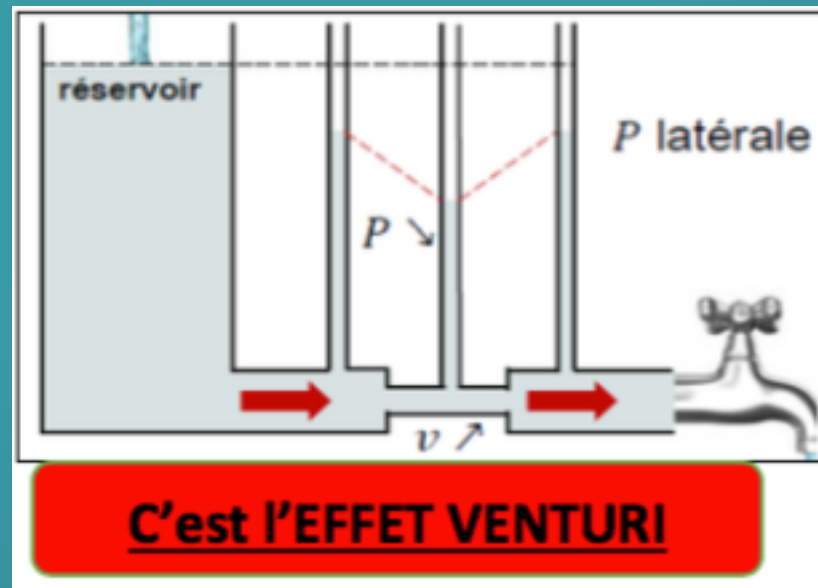
- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

D) Cas particulier : écoulement horizontal

La pression de pesanteur s'annule car $h=0$

Lors d'une variation de section on a une variation de la vitesse du fluide (**inversement proportionnel**)

Section diminue \Rightarrow vitesse augmente

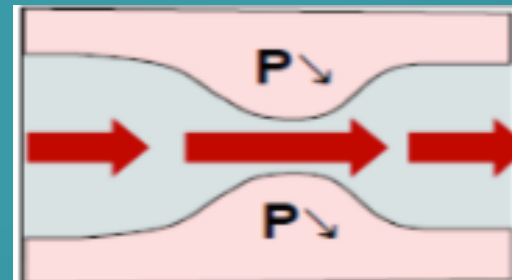


- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Application

- Une diminution de section, cela se traduit selon l'équation de bernoulli par une augmentation de la pression cinétique et donc une diminution de la pression statique (latérale).

Sténose vasculaire => diminution de section du vaisseau => augmentation de la vitesse mais diminution de la pression latérale => Peut provoquer un arrêt du flux sanguin.



- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Dynamique d'un fluide réel

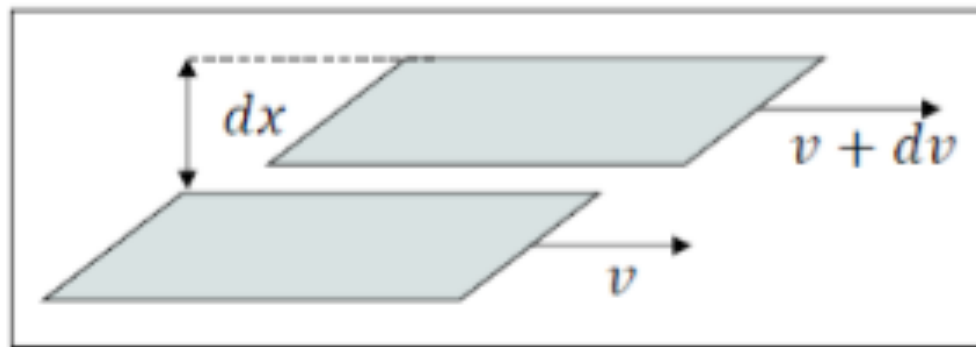
- Dans un fluide réel, il y a une perte d'énergie utilisable lors de l'écoulement qui est due aux forces de frottements et particulièrement à la viscosité.
- On nomme cette perte d'énergie, la « perte de charge » liée à la dissipation de l'énergie sous forme de chaleur.
- L'EQUATION DE BERNOULLI N'EST PLUS VERIFIEE

$$Et = \rho gh + 1/2\rho v^2 + P + \text{Chaleur} = \text{CONSTANTE}$$

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

A) La viscosité

Deux lames de fluide circulent parallèlement à des vitesses différentes et exercent une force de frottement l'une sur l'autre → conso d'énergie.



- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

- La viscosité η est une constante caractéristique du fluide.
- η s'exprime en Pa.s = Poiseuille
- La force de frottement que chacune des lames de liquide exercent l'une sur l'autre s'exprime :

$$F = \eta S \frac{Dv}{Dx}$$

S = section et Dv/Dx = « taux de cisaillement »

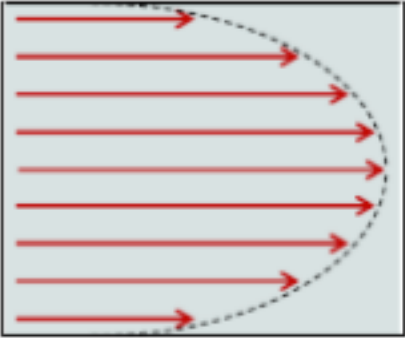

Types de liquides :

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

✓ **Liquides Newtoniens** : η varie avec la température ($T^{\circ}\text{C} \nearrow \rightarrow \eta \searrow$)

✓ **Liquides non Newtoniens** : η varie avec la température et le « taux de cisaillement »
Ex : le sang

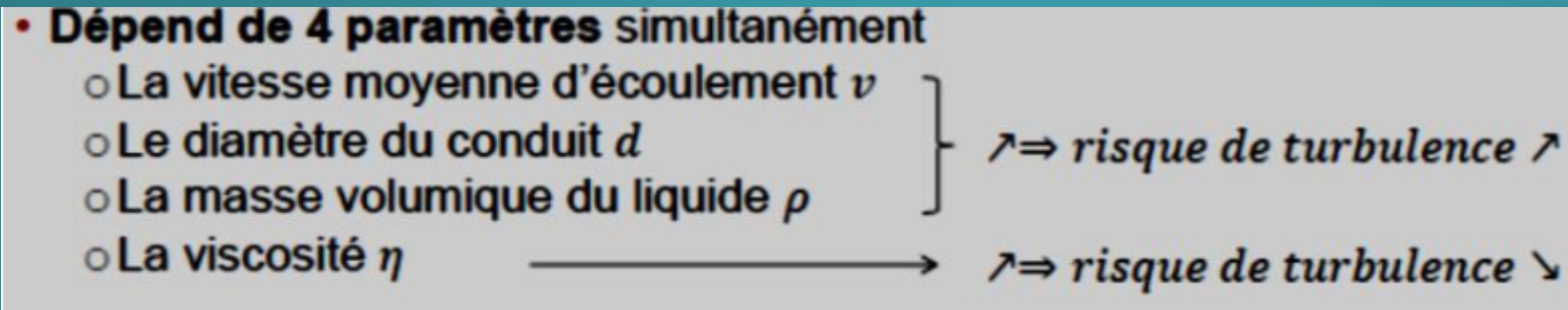
B) Ecoulement d'un fluide réel

Écoulement laminaire	Écoulement turbulent
<ul style="list-style-type: none">♥ La viscosité est un facteur de cohérence à v faible♥ Couche mince au contact de la paroi ne se déplace pas♥ Les lignes de courant ne se croisent pas♥ v est maximale au centre♥ Profil parabolique des vitesses	<ul style="list-style-type: none">♥ La viscosité n'est plus un facteur de cohérence à v faible ou élevée♥ Les trajectoires individuelles tourbillonnent♥ Les lignes de courant se croisent♥ Pas de distribution systématisée des vitesses
	

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

C) Frontière entre 2 régimes

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie



➤ Le nombre de Reynolds sert à déterminer la limite entre un écoulement turbulent et laminaire.

➤ **Re < 2000 => Laminaire**

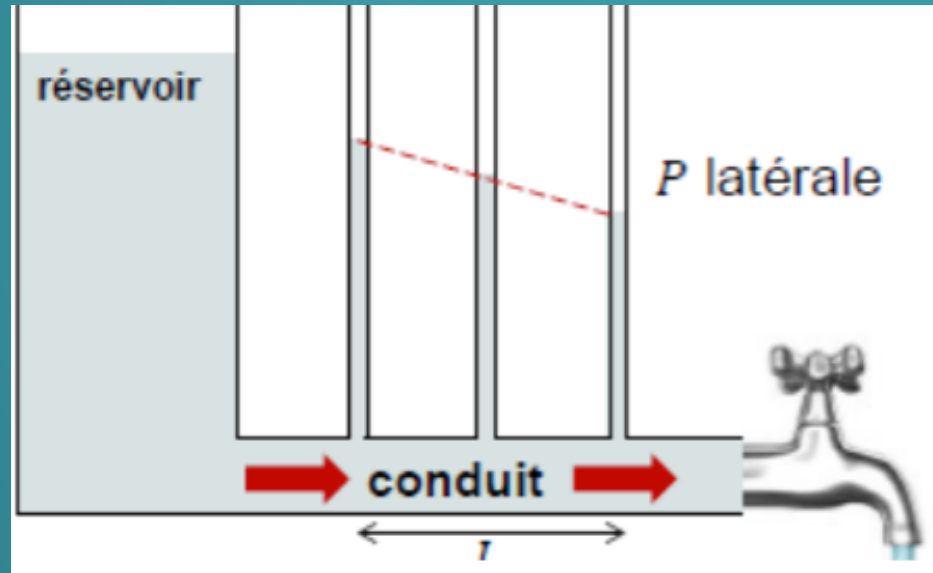
➤ **Re > 10000 => Turbulant**

➤ Entre les 2 on ne peut rien affirmer !

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

C) Loi de Poiseuille

❖ Lors de l'écoulement d'un fluide réel à l'horizontale (pression pesanteur = constante) avec section constante, la pression latérale P compense la « perte de charge ».



- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Résistance à l'écoulement

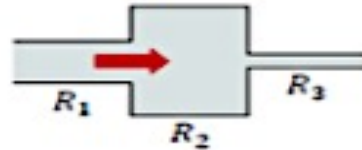
$$\Delta P = Q \times R \text{ avec } R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

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

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

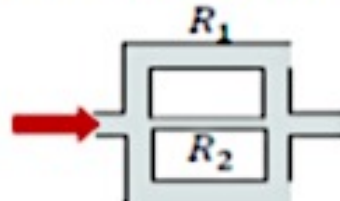
- Circuit en série : on additionne les résistances ;

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_1^n R_i$$



- Circuit en parallèle : on additionne l'inverse des résistances ;

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$



Application

Exercice: Soit une artériole avec un débit de $6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. Elle se divise en 100 capillaires de rayon $r = 0,4 \text{ mm}$ et de longueur $L = 2 \text{ cm}$. Quelle est la chute de pression entre l'entrée et la sortie de ce réseau capillaire ?

($\eta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

$$\Delta P = Q \times R \text{ avec } R = \frac{8\eta L}{\pi r^4} \text{ résistances à l'écoulement}$$

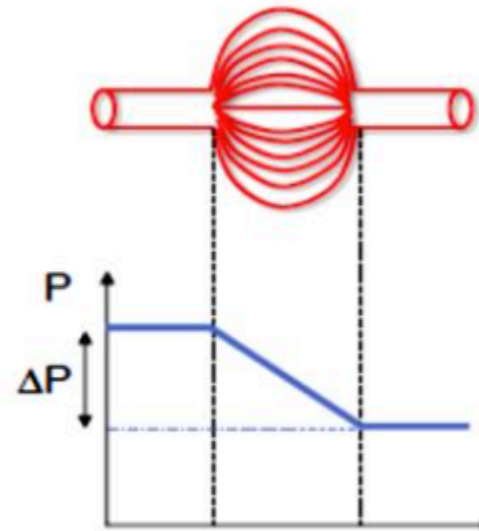
- En SI: $Q = 6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 $r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ et $L = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

- $\Delta P = Q \times R$?

- $R_i = \frac{8\eta L}{\pi r^4} = \frac{8 \times 4 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{-2}}{\pi (4 \cdot 10^{-4})^4} = 796 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$

- $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{100} \frac{1}{R_i} = \frac{100}{R_i} \Rightarrow R = \frac{R_i}{100} = 796 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$

- $\Delta P = Q \times R = 1 \cdot 10^{-7} \times 796 \cdot 10^5 = 7,96 \text{ Pa}$



- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

E) Ecoulement en régime turbulent

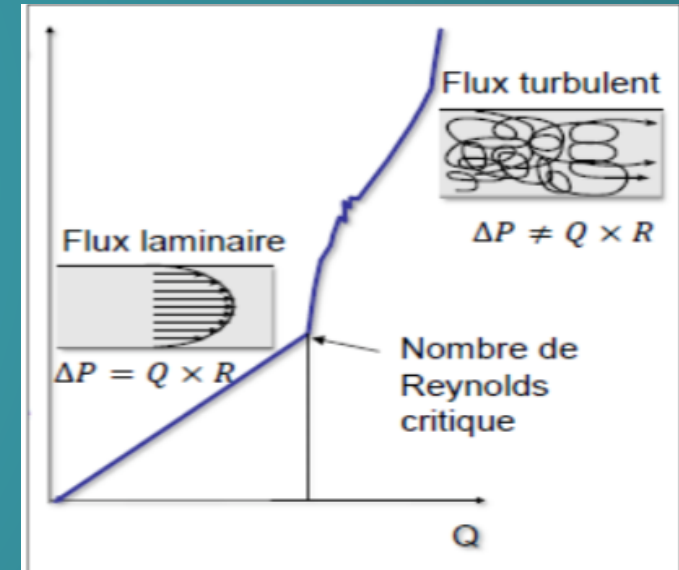
- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Ecoulement laminaire

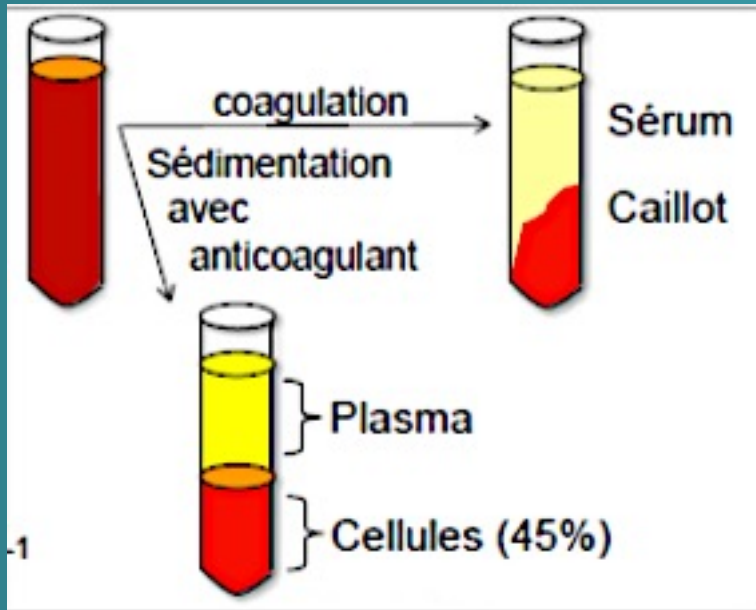
- Toute l'énergie est consommée pour vaincre la viscosité
- Relation linéaire entre ΔP et le débit
- Loi de Poiseuille ++

Ecoulement turbulent

- Les tourbillons : conso Energie
- Régime peu efficace
- Pas de proportionnalité
- Vibrations + chaleur = Perception d'un souffle et/ou bruit



A) Description du sang au repos



- **Hématocrite :**
$$\frac{\text{Volume de cellules}}{\text{Volume total de la solution}} ; N = 0.45$$

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

- Plasma = fluide newtonien
- Les cellules sanguines sont les globules rouges, elles ont des **propriétés rhéologiques** qui font que le SANG se comporte de manière globale comme un FLUIDE NON NEWTONIEN .

B) Rhéologie dans les gros vaisseaux

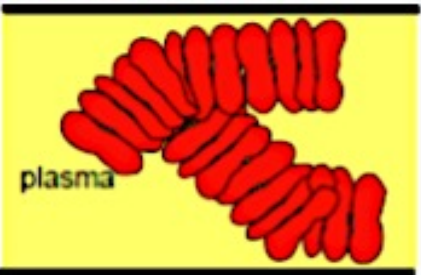
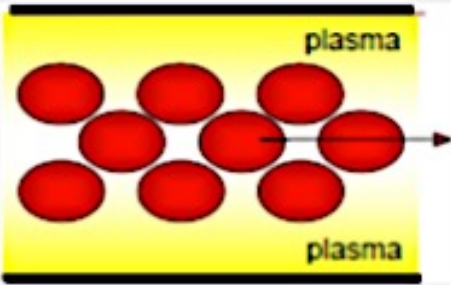
Rhéologie: étude des déformations de la matière en écoulement

La viscosité du sang du sang est due aux interactions intercellulaires, ces interactions font que le sang se comporte comme un fluide non newtonien.

→ η varie avec dv/dx (taux de cisaillement)

→ η diminue quand dv/dx augmente : « rhéofluidification »

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

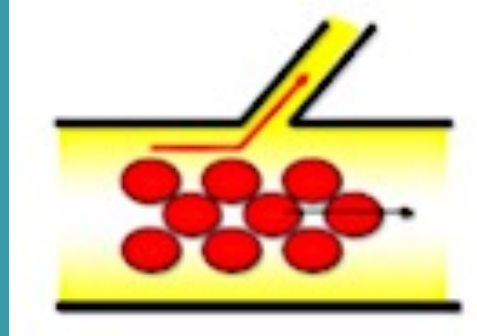
Débit faible	Débit élevé
<ul style="list-style-type: none">✓ Les globules rouges forment des rouleaux (« se tiennent la main »)✓ Cela a pour conséquence directe une \uparrow de la viscosité	<ul style="list-style-type: none">✓ Les globules rouges « se lâchent la main »✓ Circulation axiale des cellules✓ Rhéofluidification → \downarrow viscosité
	

Pathologie : La polyglobulie → l'hématocrite devient supérieure à 0.55 → thromboses par hyperviscosité du sang.

C) Rhéologie dans les petits vaisseaux

Il existe un «phénomène d'écroulement» au niveau des embranchements des petits capillaires qui provoque une **diminution localisée de l'hématocrite**.

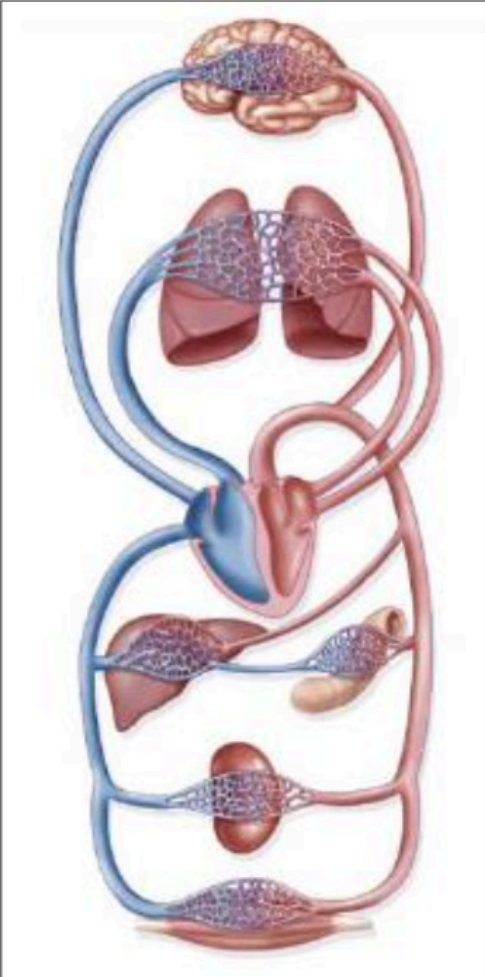
Pour passer dans les petits capillaires de taille $< 8\mu\text{m}$, le globule rouge doit se déformer (intervention de la viscosité intracellulaire)



- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

Pathologie : La drépanocytose (Hémoglobine mutée) → **Falciformation** ↔ augmentation de la viscosité intracellulaire → diminution de la déformabilité → thromboses capillaires

Anatomie des vaisseaux



- Circulation Systémique : elle part du ventricule gauche et revient à l'oreillette droite par les veines caves sup et inf
- Circulation Pulmonaire : elle part du ventricule droit pour aller s'oxygéner dans les poumons (**hémato**se) et revient à l'oreillette gauche par les veines pulmonaires
- Il faut surtout retenir qu'il y a une **forte différence de pression** entre ses deux circulations (5x supérieure pour la circulation systémique).

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

- I) Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

QCM

Concernant les bases physiques, donnez la(les) vraie(s) :

- A) Un gaz est un milieu déformable mais incompressible
- B) La pression statique d'un fluide est égal au poids de la colonne de liquide qui s'applique sur lui
- C) La pression s'exprime comme une force par unité de surface
- D) La loi de Poiseuille ne s'applique que pour un fluide idéal en écoulement laminaire
- E) Les propositions A,B,C et D sont fausses

Concernant les bases physiques, donnez la(les) vraie(s) :

- A) Un gaz est un milieu déformable mais incompressible
- B) La pression statique d'un fluide est égal au poids de la colonne de liquide qui s'applique sur lui
- C) La pression s'exprime comme une force par unité de surface
- D) La loi de Poiseuille ne s'applique que pour un fluide idéal en écoulement laminaire
- E) Les propositions A,B,C et D sont fausses

QCM

Concernant les bases physiques, donnez la(les) vraie(s) :

- A) La principale force de frottement d'un fluide idéal est la viscosité
- B) Pour un fluide idéal, le débit s'exprime comme la section \times la vitesse d'écoulement
- C) L'effet Venturi correspond à une diminution de la pression latérale lorsque la section diminue
- D) Pour un fluide réel, l'équation de Bernoulli n'est plus vérifiée
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM

BCD

Concernant les bases physiques, donnez la(les) vraie(s) :

- A) La principale force de frottement d'un fluide idéal est la viscosité
- B) Pour un fluide idéal, le débit s'exprime comme la section \times la vitesse d'écoulement
- C) L'effet Venturi correspond à une diminution de la pression latérale lorsque la section diminue
- D) Pour un fluide réel, l'équation de Bernoulli n'est plus vérifiée
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM

Concernant les propriétés liées au sang, donnez la(les) vraie(s) :

- A) Le sang est un fluide non newtonien
- B) Les globules rouges définissent les propriétés rhéologiques du sang
- C) Dans les petits vaisseaux il existe une diminution localisée de l'hématocrite
- D) L'hématocrite correspond au volume de cellules sur le volume total sanguin
- E) Les propositions A,B,C et D sont fausses

QCM ABCD

Concernant les propriétés liées au sang, donnez la(les) vraie(s) :

- A) Le sang est un fluide non newtonien
- B) Les globules rouges définissent les propriétés rhéologiques du sang
- C) Dans les petits vaisseaux il existe une diminution localisée de l'hématocrite
- D) L'hématocrite correspond au volume de cellules sur le volume total sanguin
- E) Les propositions A,B,C et D sont fausses

FIN



Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.