

# 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.

$$\Delta P = \rho gh$$

$\rho$  : 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

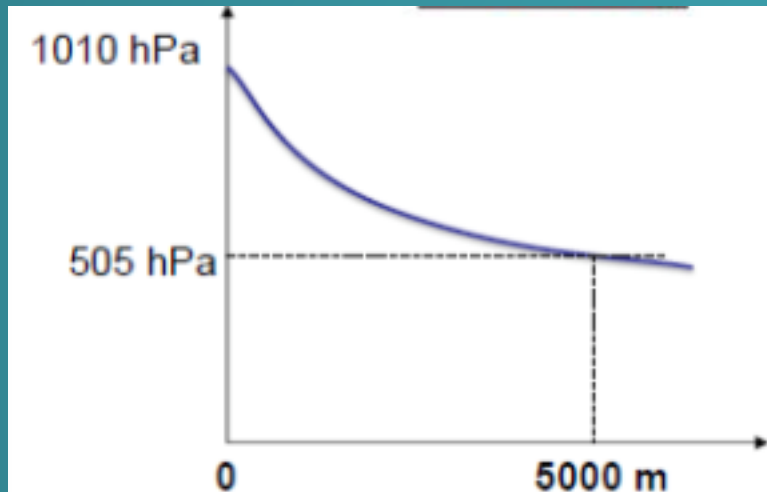
## B) Unités de pressions

- 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"><li>• Unité du système international</li><li>• <b>1Pa = 1N.m<sup>-2</sup></b></li><li>• Unité très faible à l'échelle des pressions, on utilise donc des multiples</li><li>• 1hPa = 100 Pa</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ancienne unité</li><li>• Unité beaucoup plus élevée</li><li>• 1 Bar = 10<sup>5</sup> Pa = 10<sup>2</sup> hPa</li></ul>



# 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

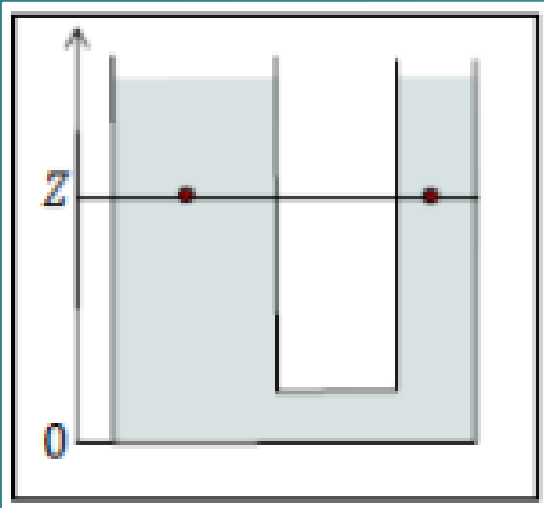
➤ Dans un liquide incompressible ( /!\ non gazeux ) une variation de pression se transmet **intégralement et dans toutes les directions.**

- 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

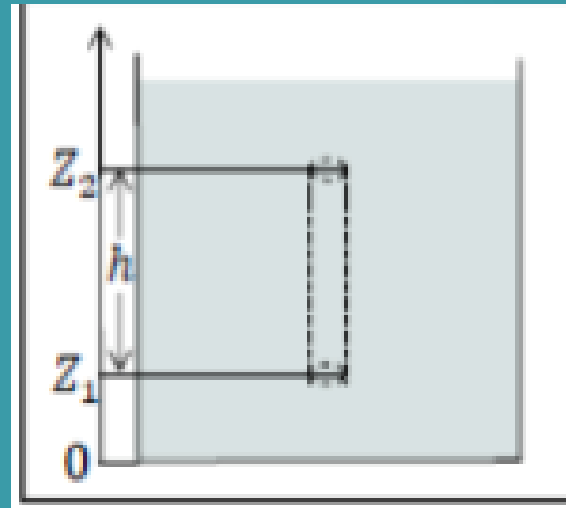


# D) Lois de pascal

- 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

$$\Delta P = -\rho g d_z \Rightarrow Z \searrow \Rightarrow P \nearrow$$

# Dynamique d'un fluide idéal

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

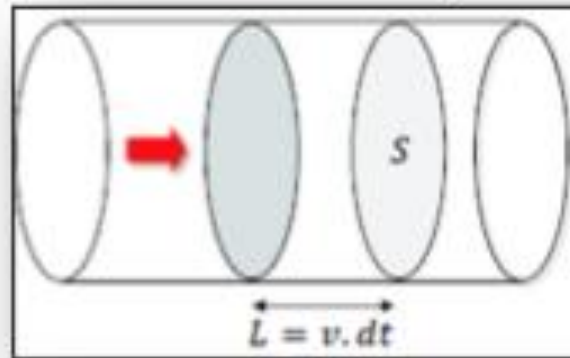
- On donne :

$$Q = S \times v$$

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

$S$  : section en  $\text{m}^2$

$v$  : vitesse en  $\text{s}^{-1}$



- 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

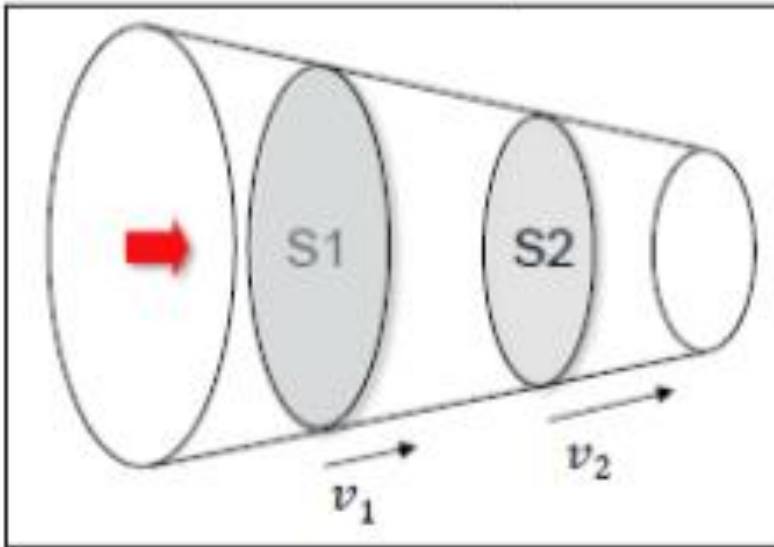
## HYPOTHESES

- 1) On suppose que le fluide est incompressible => 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 :  $\rho gh$
- Energie cinétique :  $1/2\rho v^2$
- Energie de pression statique (latérale) :  $P$

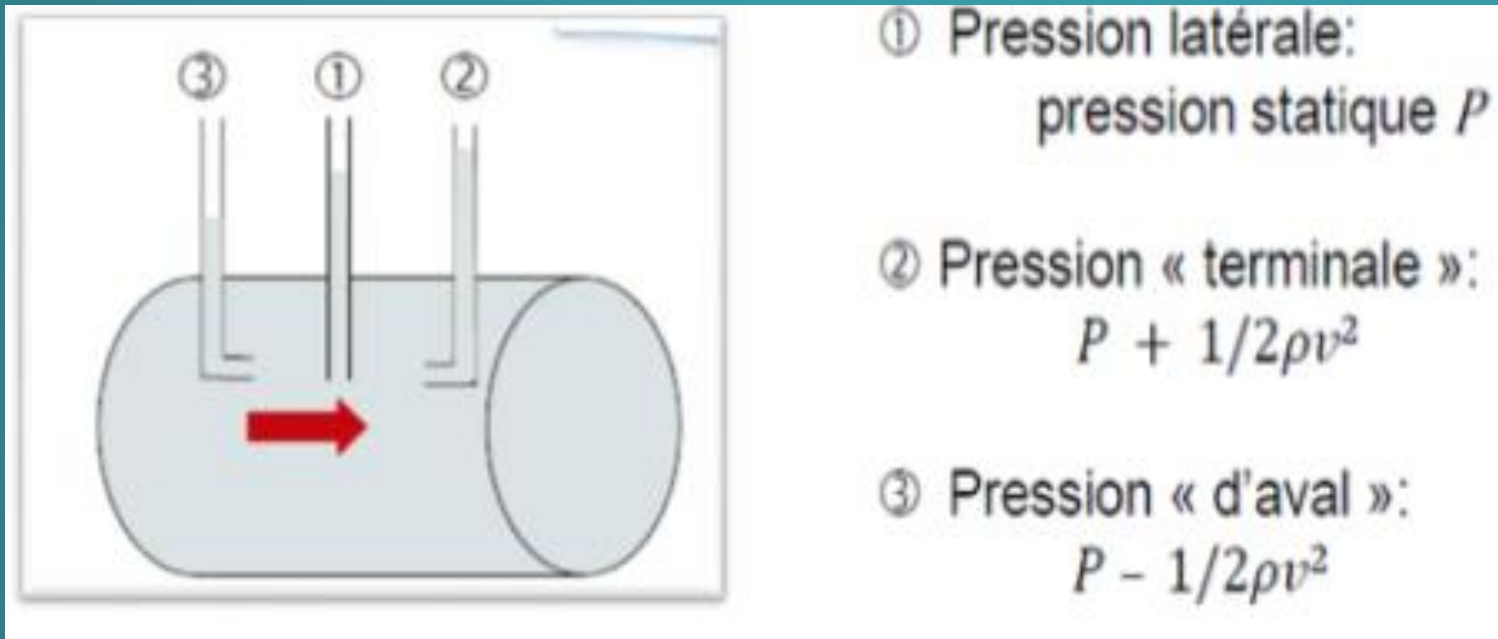
### EQUATION DE BERNOULLI :

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

- 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



- 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

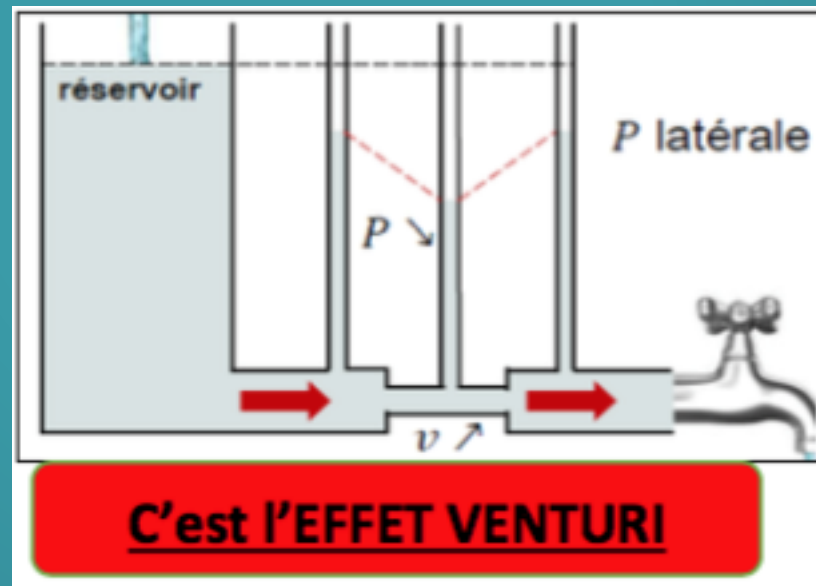


# D) Cas particulier : écoulement horizontal

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 augmente  $\Rightarrow$  vitesse diminue

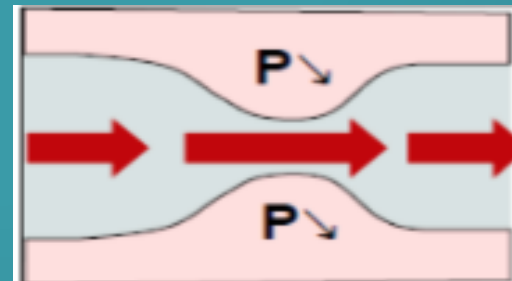


- I) Bases physiques
  - A) Statique d'un fluide idéal
  - B) Dynamique d'un fluide idéal
  - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

# 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

- 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

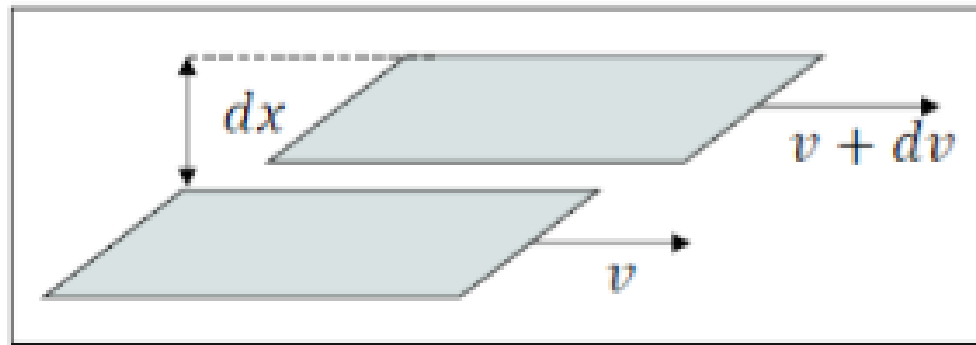
- Dans un fluide réel, il y a une perte d'énergie utilisable lors de l'écoulement qui est due aux forces de frottements et particulièrement à la viscosité.
- On nomme cette perte d'énergie, la « perte de charge » liée à la dissipation de l'énergie sous forme de chaleur.

## ➤ L'EQUATION DE BERNOULLI N'EST PLUS VERIFIEE

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

# 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  $\eta$  est une constante caractéristique du fluide.
- $\eta$  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 :

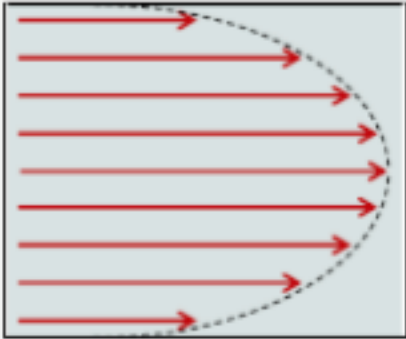
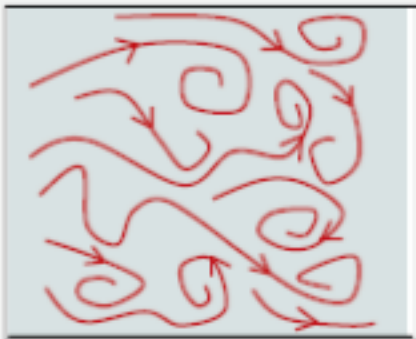
- I) Bases physiques
  - A) Statique d'un fluide idéal
  - B) Dynamique d'un fluide idéal
  - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

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

✓ **Liquides non Newtoniens** :  $\eta$  varie avec la température et le « taux de cisaillement »

Ex : le sang

## B) Ecoulement d'un fluide réel

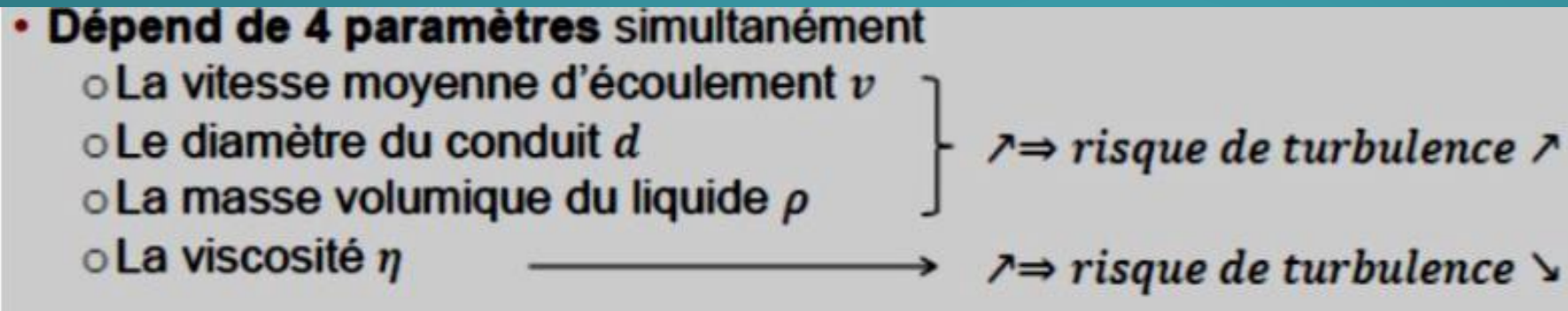
Écoulement laminaire	Écoulement turbulent
<ul style="list-style-type: none"><li>♥ La viscosité est un facteur de cohérence à <math>v</math> faible</li><li>♥ Couche mince au contact de la paroi ne se déplace pas</li><li>♥ Les lignes de courant ne se croisent pas</li><li>♥ <math>v</math> est maximale au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

- 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**

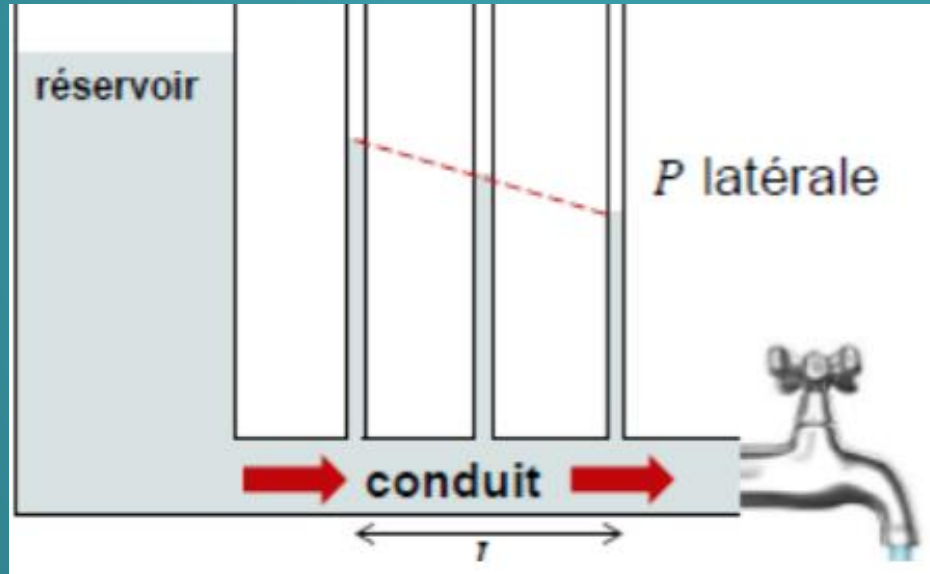
➤ **Re > 10000 => Turbulant**

➤ 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 ».



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

# Résistance à l'écoulement

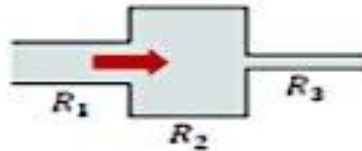
$$\Delta P = Q \times R \text{ avec } R = \frac{8\eta L}{\pi r^4}$$

$Q$  = débit  
 $L$  = distance  
 $\eta$  = 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

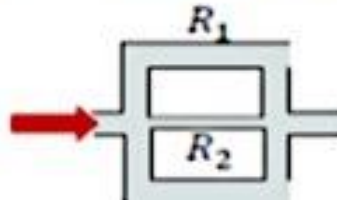
- Circuit en série : on additionne les résistances ;

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



- 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 ?

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

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

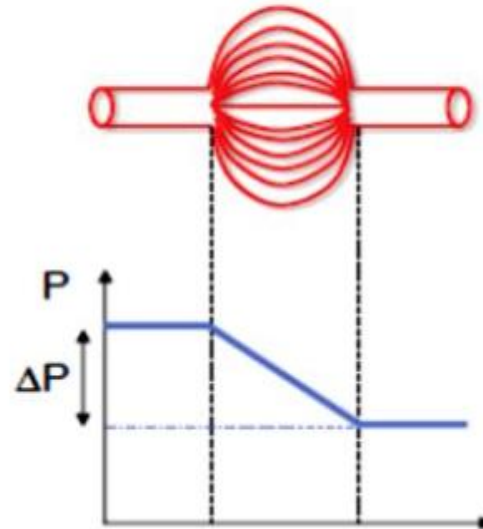
- En SI:  $Q = 6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  et  $L = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

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

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

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

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



- 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

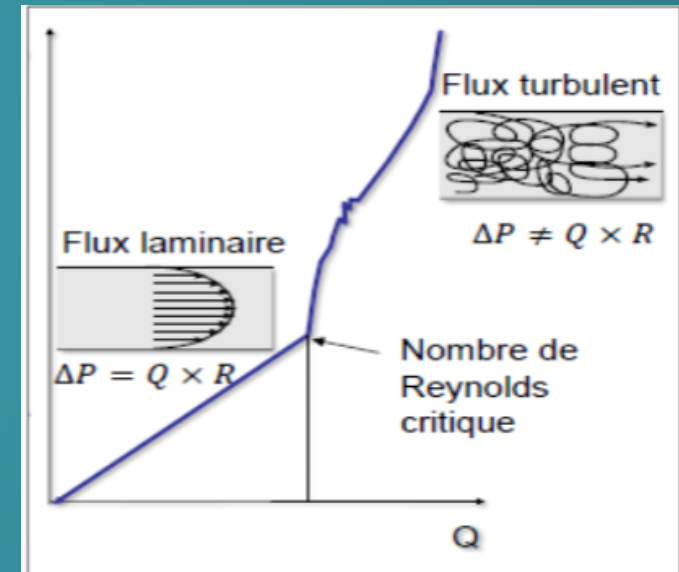
- I) Bases physiques
  - A) Statique d'un fluide idéal
  - B) Dynamique d'un fluide idéal
  - C) Dynamique d'un fluide réel
- II) Propriétés liées au sang
- III) Particularités liées à l'anatomie

## Ecoulement laminaire

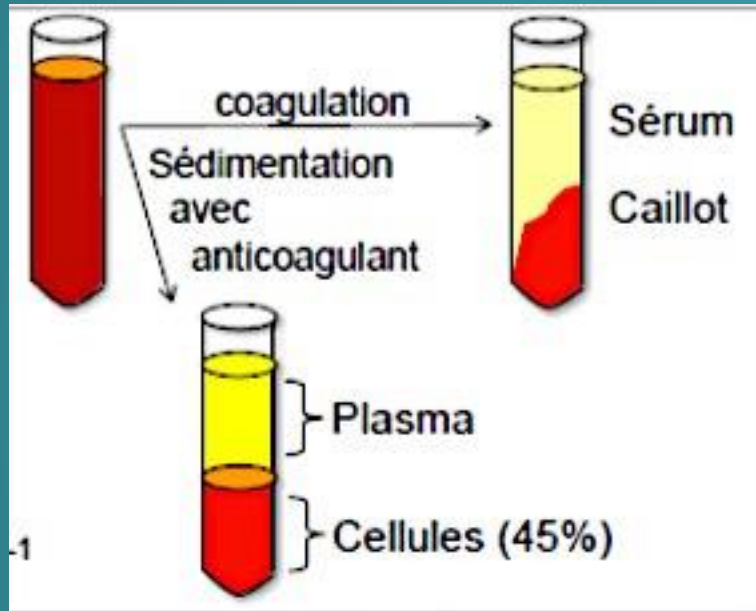
- Toute l'énergie est consommée pour vaincre la viscosité
- Relation linéaire entre  $\Delta P$  et le débit
- Loi de Poiseuille ++

## 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

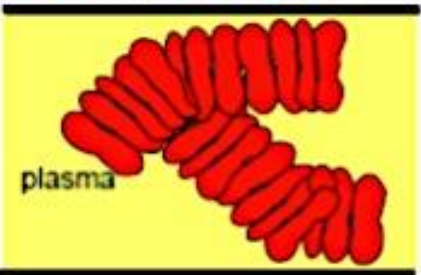
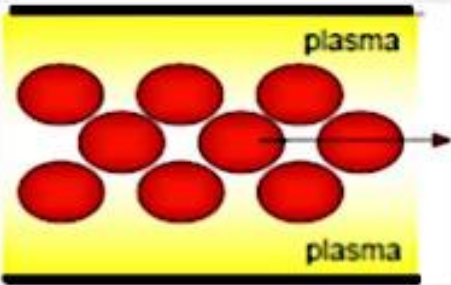
Rhéologie: étude des déformations de la matière en écoulement

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

→  $\eta$  varie avec  $dv/dx$  (taux de cisaillement)

→  $\eta$  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"><li>✓ Les globules rouges forment des rouleaux (« se tiennent la main »)</li><li>✓ Cela a pour conséquence directe une <math>\nearrow</math> de la viscosité</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Les globules rouges « se lâchent la main »</li><li>✓ Circulation axiale des cellules</li><li>✓ Rhéofluidification → <math>\searrow</math> viscosité</li></ul>
	

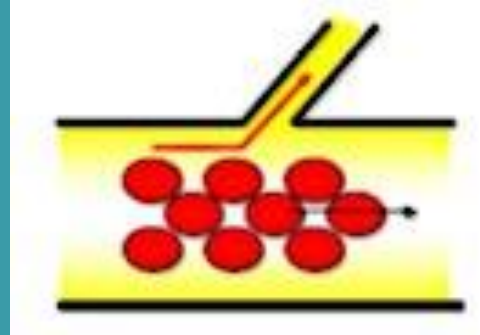
Pathologie : La polyglobulie → l'hématocrite devient supérieure à 0.55 → thromboses par hyperviscosité du sang.

# C) Rhéologie dans les petits vaisseaux

- 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

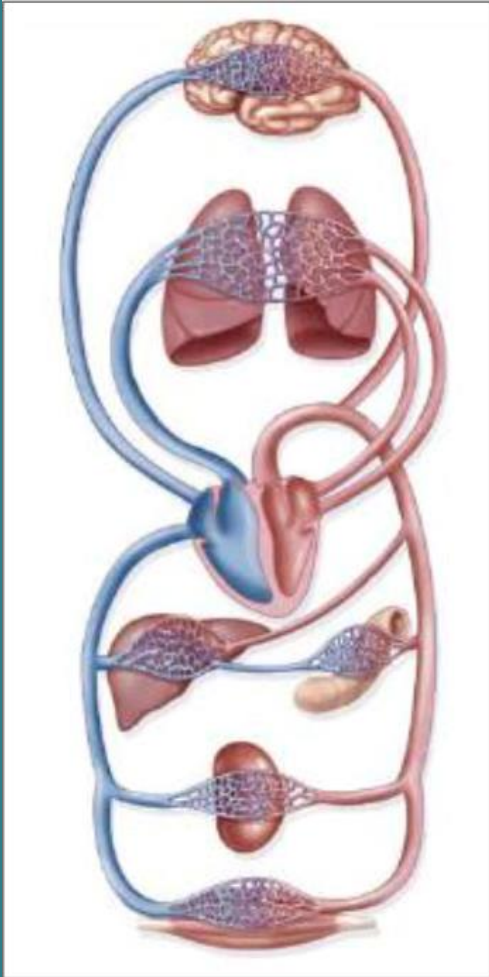
Il existe un «phénomène d'écroulement» au niveau des embranchements des petits capillaires qui provoque une **diminution localisée de l'hématocrite**.

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



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 (**hématoxe**) 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 Poiseuilles 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 augmentation de vitesse d'écoulement lorsque la section du conduit 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 augmentation de vitesse d'écoulement lorsque la section du conduit 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.