

Biophysique de la circulation cours n°1



SOMMAIRE

- I – Bases physiques
 - A) Statique d'un fluide idéal
 - B) Dynamique d'un fluide idéal
 - C) Dynamique d'un fluide réel
- II – Particularités liées au sang

I. Bases physiques

Définitions

Fluide = milieu matériel déformable facilement, avec la capacité de s'écouler.

- Milieu gazeux: déformable et compressible
- Milieu liquide: déformable et incompressible
- Fluide idéal: s'écoule sans frottements
- Fluide réel: frottements (viscosité) ++

Statique des fluides: pression → fluide immobile

Dynamique des fluides: débit → fluide en écoulement

A. Statique d'un fluide idéal

- ★ La pression statique **P** correspond au poids de la colonne de fluide qui s'applique sur une paroi
- ★ **Pression relative** : poids de la colonne de liquide qui s'applique sur le capteur de pression = effet de la colonne de liquide

$$\Delta P = \rho g h$$

ρ = masse volumique

g = accélération de la pesanteur

h = hauteur de la colonne de liquide

- ★ **Pression absolue** : poids de la colonne de liquide + pression atmosphérique

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

1) Dimension de la pression

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

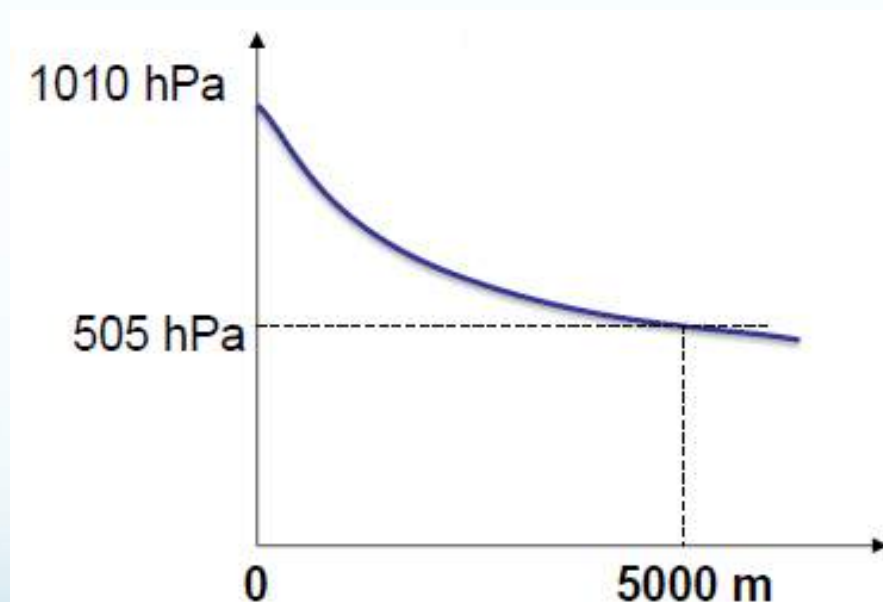
$$[P] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

2) Unités de la pression

- **Le Pascal (Pa) :**
 - unité du SI : $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N.m}^{-2}$
 - unité faible à l'échelle des pressions étudiées : utilisations de multiples → **1 hPa = 100 Pa**
- **Le bar** = 10^5 Pa
- le millimètre de mercure (mmHg), le centimètre d'eau (cmH₂O) ...

3) La pression atmosphérique

- **C'est le poids de la colonne d'air atmosphérique.**
- Elle varie avec l'altitude ou la profondeur.



Elle devient
moitié plus
faible quand
on monte à
5000m.

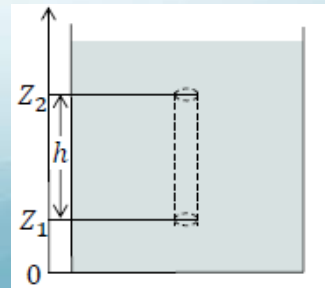
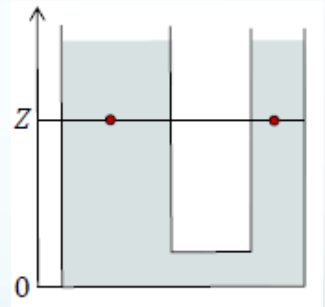
$$P_{\text{atm}} = \rho g h = 1013 \text{ hPa}$$

4) Principe et lois de Pascal (STATIQUE)

Principe de Pascal : Dans un liquide incompressible (non gazeux), une variation de pression se transmet intégralement et dans toutes les directions.

- ✦ **1^{ère} loi**: La pression est la même dans toutes les directions (indépendante de l'orientation du capteur).
- ✦ **2^{ème} loi**: La pression est la même en tout point de même profondeur (ou altitude).
- ✦ **3^{ème} loi**: La différence de pression entre 2 points est proportionnelle à leur différence de hauteur.

$$\Delta P = P_{z_1} - P_{z_2} = \rho g h = -\rho g d_z$$

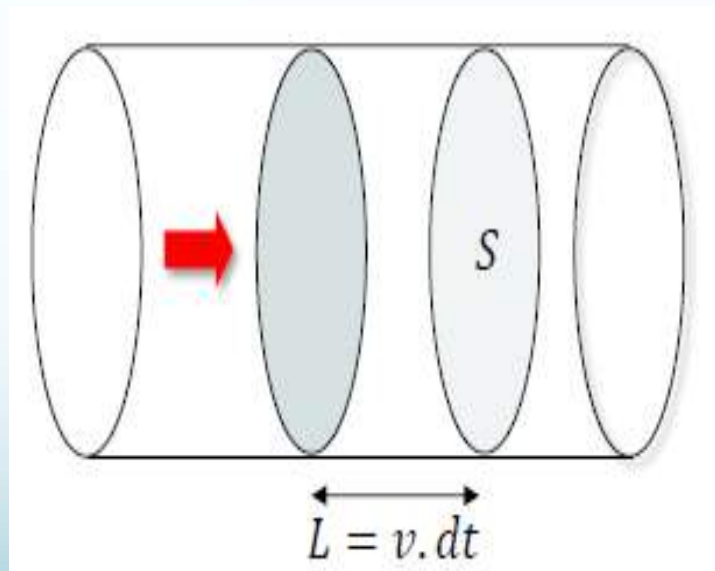


B) Dynamique d'un fluide idéal

Pas de frottements, pas de viscosité++

- Un débit (Q) est un volume (V) qui traverse une section (S) par unité de temps.

$$Q = S \times V$$



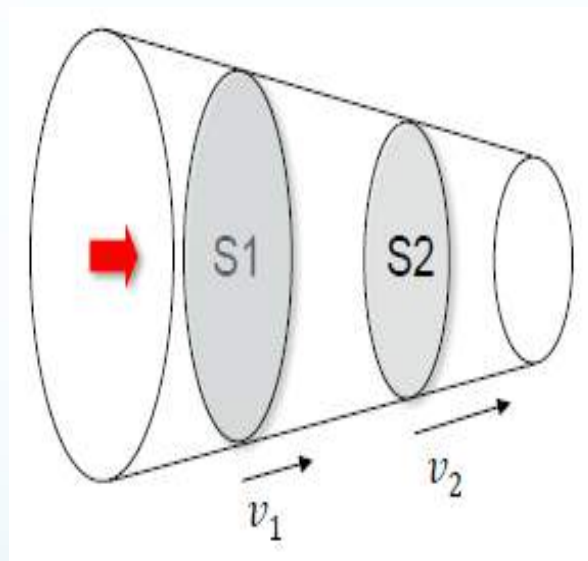
1) Principe de continuité du débit :

Hypothèses de base :

- Le fluide **circule** (dynamique)
- Le fluide est **idéal** (pas de frottements)
- Le fluide est **incompressible**: sa masse volumique ρ est constante.
- Le fluide s'écoule en **régime stationnaire** : sa vitesse en 1 point est constante.
- La section du tuyau dans lequel s'écoule le fluide est **variable** ($S_1 > S_2$)

1) Principe de continuité du débit :

- Lorsqu'un fluide incompressible circule en régime stationnaire dans un conduit dont la section varie, le **débit sera constant** tout au long du circuit :



$$Q_1 = Q_2 = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Si la section diminue, la vitesse augmente et inversement.

2) Ecoulement d'un fluide idéal :

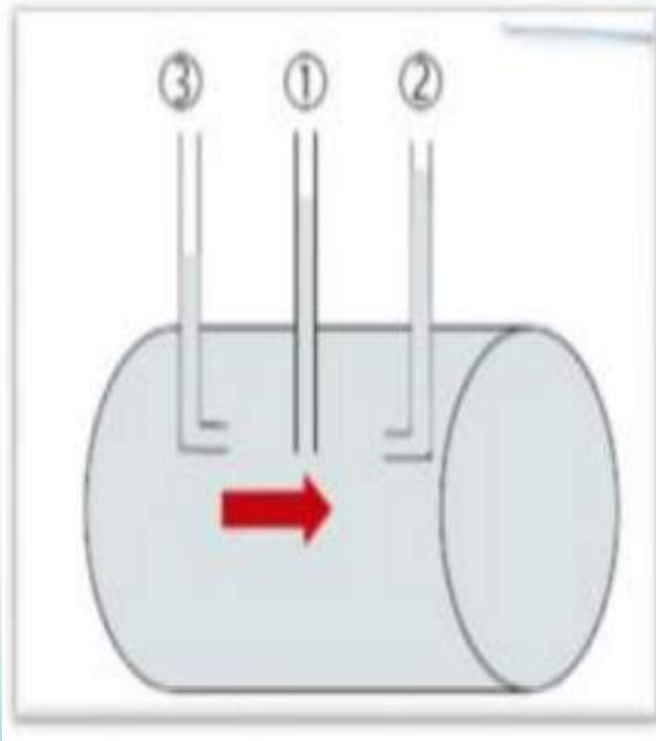
- Un fluide idéal s'écoule selon 3 types de pression :
- **Pression de pesanteur** = ρgh
- **Pression cinétique** = $\frac{1}{2} \rho v^2$
- **Pression statique** = P
- Comme il n'y a pas de frottements, la pression totale de ce fluide est constante,

c'est l'équation de **BERNOULLI** :

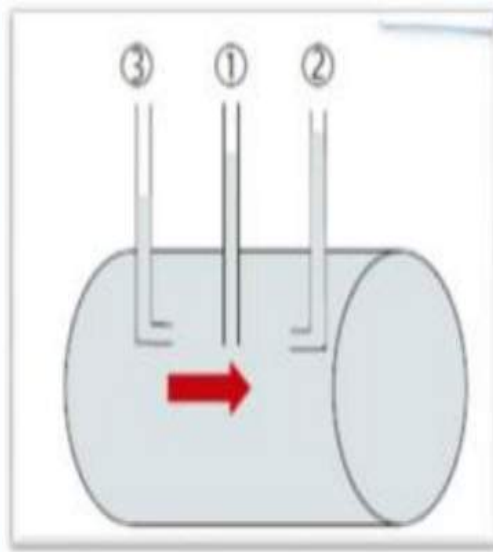
$$\text{Pression totale} = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P = \text{constante}$$

3) Mesure des pressions :

- Dans un fluide en écoulement, les valeurs 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 »:
 $P - 1/2\rho v^2$



① Pression latérale:
pression statique P

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

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

1) Le capteur est parallèle à la direction de circulation $\rightarrow V=0$
donc mesure de la **P lat= statique**

2) Le capteur fait face au courant \rightarrow mesure de la P terminale: **P terminale= P statique + P cinétique**

3) Le capteur voit partir le courant de circulation \rightarrow mesure de la P d'aval: **P d'aval= P statique - P cinétique**

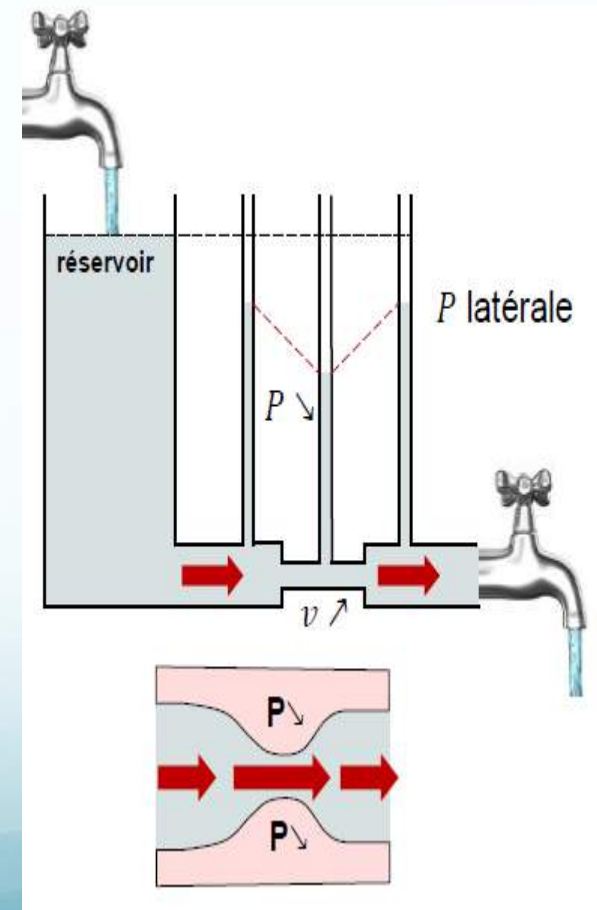
4) Cas particulier : écoulement horizontal :

- La pression totale se répartit entre la pression cinétique et la pression statique car la pression de pesanteur s'annule ($h=0$).

- Lors d'une variation de **section** on a une variation de la **vitesse** du fluide (inversement proportionnel) pour maintenir le **débit constant** selon $Q = S.V$

- Si la **section diminue** (par exemple en cas de sténose d'une veine), la **vitesse augmente** et donc la **pression cinétique augmente aussi** : c'est l'effet **VENTURI**.

Pour compenser, la **pression latérale P diminue** (ainsi l'équation de Bernouilli reste constante).



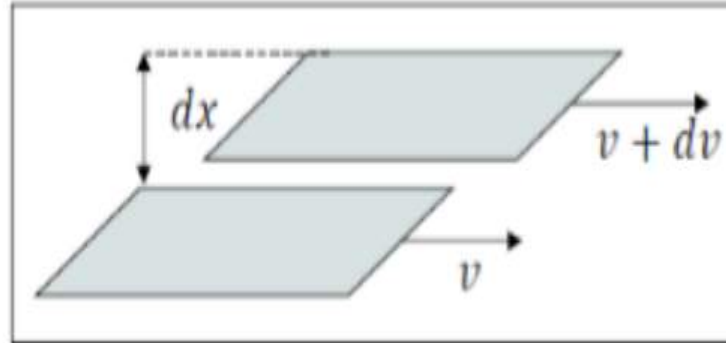
C) Dynamique d'un fluide réel

- Pour un fluide réel, les frottements interviennent : c'est la **viscosité**.
- La **viscosité** correspond à des frottements (entre les molécules du fluide) qui consomment de l'énergie (chaleur).
- Cette perte d'énergie est appelée « **perte de charge** », liée à la dissipation d'énergie en chaleur.
- **L'équation de Bernoulli n'est plus vérifiée !!**

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

1) 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.



La viscosité η est une constante caractéristique d'un liquide donné. Elle s'exprime en Pa.s (Poiseuille).

La force de frottement que chacune des deux lames exerce sur l'autre s'exprime :

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

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

Les liquides Newtoniens

η est une constante caractéristique du liquide mais qui varie avec la température.

Si la température \nearrow alors $\eta \nearrow$.

Ex : eau, $\eta=10^{-3}$ Pa.s à 20°C

Les liquides non Newtoniens

η dépend de la température mais aussi de dv/dx , le gradient de vitesse ou « **taux de cisaillement** ».

Ex : le sang :

Quand $dv/dx \searrow$, formation de rouleaux de globules rouges et $\eta \nearrow$.

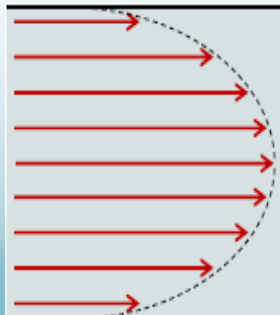
Une forte viscosité limite les variations de vitesse entre les couches et donc le gradient de vitesse est très faible(et inversement).

2) Ecoulement d'un fluide réel :

Ecoulement laminaire

La viscosité est un facteur de cohérence à vitesse faible.

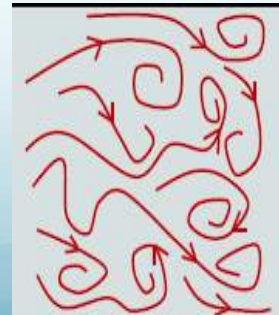
- Couche mince au contact de la paroi ne se déplace pas.
- Les lignes de courant ne se croisent pas.
- La vitesse est maximale au centre.
- Profil parabolique des vitesses.



Ecoulement turbulent

La viscosité n'est plus un facteur de cohérence à vitesse faible ou élevée.

- Les trajectoires individuelles tourbillonnent.
- Les lignes de courant se croisent.
- La vitesse moyenne diminue.
- Pas de distribution systématique des vitesses.



3) Frontière entre les deux régimes d'écoulement:

- Dépend de 4 paramètres simultanés:
 - La masse volumique du liquide ρ
 - Le diamètre du conduit d
 - La vitesse moyenne d'écoulement v
 - La viscosité η

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

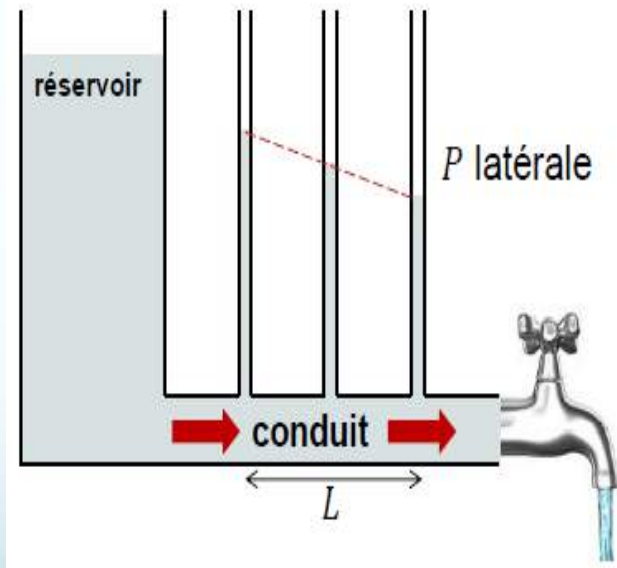
$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

Si $Re < 2000$: écoulement laminaire

Si $Re > 10\,000$: écoulement turbulent

4) La loi de Poiseuille (régime laminaire):

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



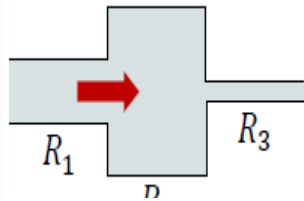
$$P_T = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + \text{chaleur} = \text{constante}$$

Loi de Poiseuilles:

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

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

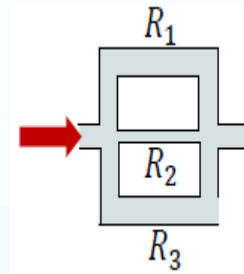
Conduit en série



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

La résistance totale du circuit est égale à la somme des résistances individuelles des sections traversées.

Conduit en parallèle



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

La résistance totale du circuit est égale à l'inverse de la somme des inverses des résistances individuelles.

Application numérique type

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 ?

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

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

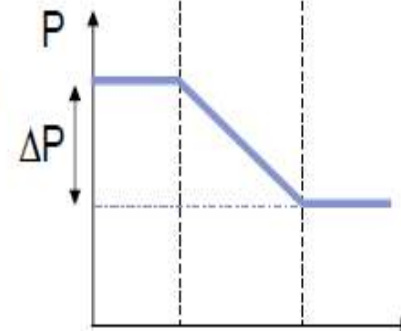
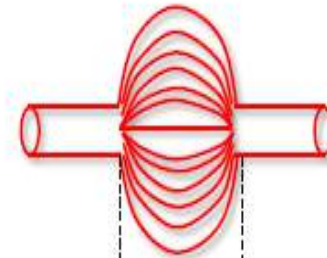
- En SI: $Q = 6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 $r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ et $L = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

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

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

- $\frac{1}{R} = \sum_1^{100} \frac{1}{R_i} = \frac{100}{R_i} \Rightarrow R = \frac{R_i}{100} = 796 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$

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



5) Ecoulement en régime turbulent :

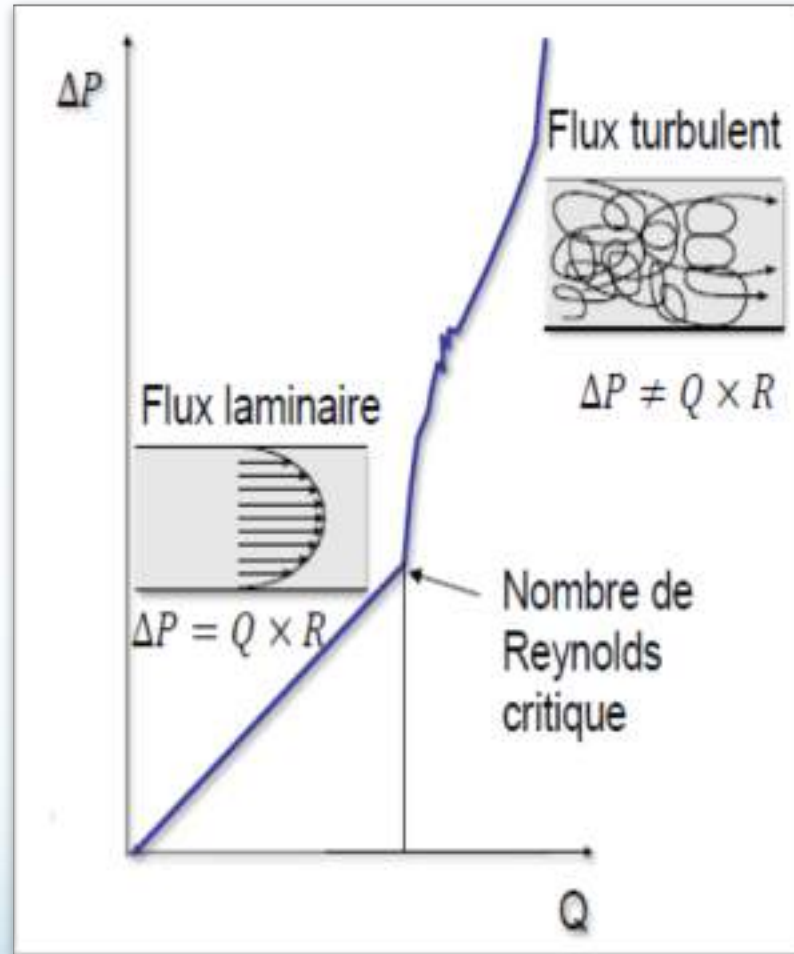
Ecoulement laminaire

- Toute l'énergie est utilisée pour vaincre la viscosité.
- La relation entre débit et pression est linéaire.
- Loi de Poiseuille ++

Ecoulement turbulent

- Les tourbillons consomment de l'énergie.
- Régime peu efficace.
- Pas de proportionnalité entre débit et pression.
- Chaleur + vibrations = bruits, souffles.

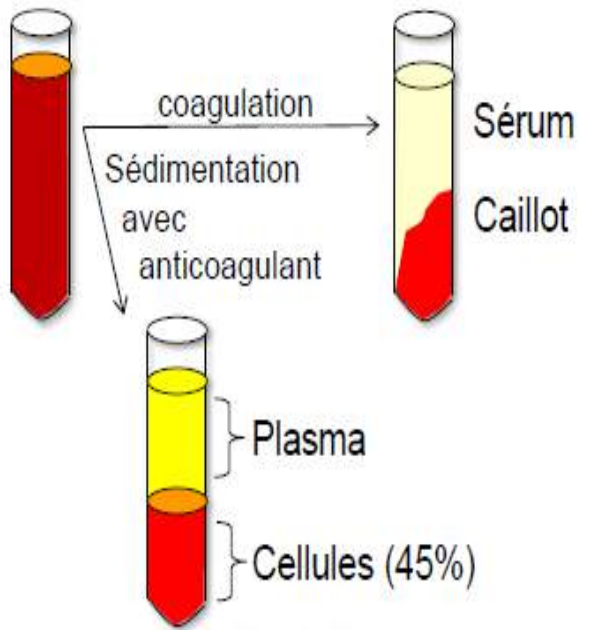
II – Particularités liées au sang



II – Particularités liées au sang

A – Description du sang au repos

Le sang est une suspension de cellules baignant dans une solution macromoléculaire : le plasma.



Hématocrite :

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

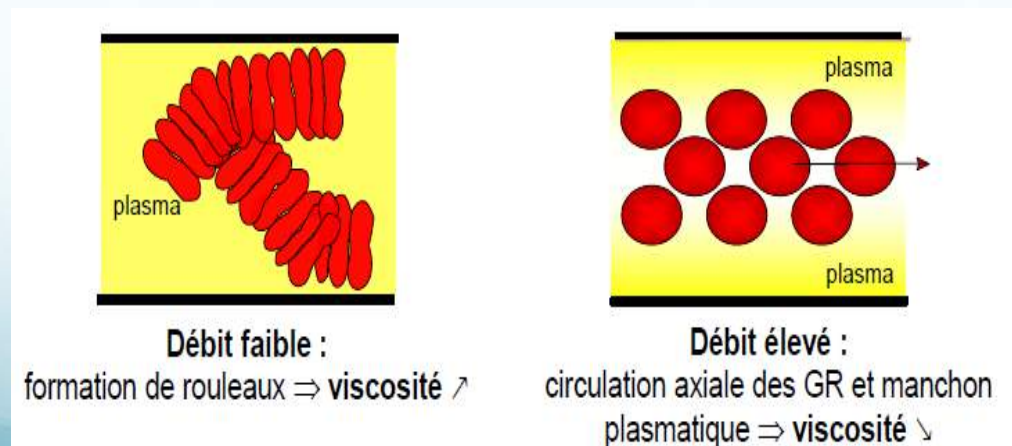
Plasma : sérum + éléments coagulants. **Fluide Newtonien.**

Sérum : plasma – éléments coagulants (piégés dans le caillot).

Les cellules sanguines (GR) ont des **propriétés rhéologiques** qui font que le **sang** se comporte comme un **fluide non Newtonien.**

B–Rhéologie du sang en écoulement dans les gros vaisseaux

- **Rhéologie** : étude des déformations de la matière en mouvement.
- La viscosité du sang est due aux **interactions intercellulaires**, qui font que le sang est un **fluide non Newtonien** dont la viscosité η varie avec dv/dx (taux de cisaillement).
- η diminue quand dv/dx augmente : rhéofluidification +++



Si on augmente l'hématocrite, la viscosité augmente
considérablement++

Patho : la maladie de Vaquez, la polyglobulie primitive

Le sujet fabrique trop de globules rouges

→ l'hématocrite devient sup à 55%

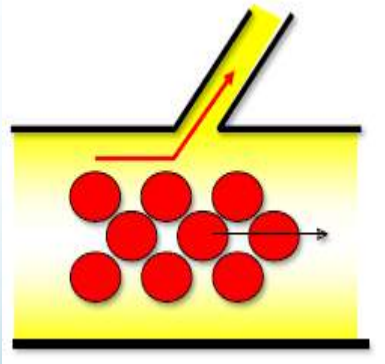
→ Circulation plus difficile: risque de thromboses

C - Rhéologie du sang en écoulement dans les petits vaisseaux

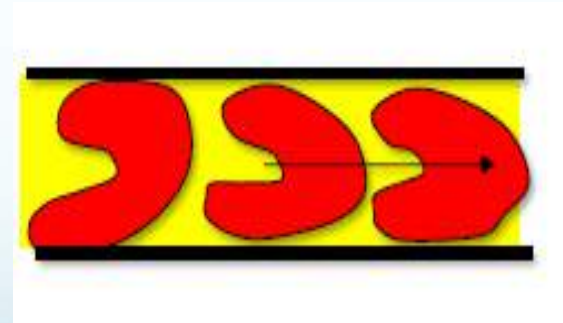
Artérioles

Capillaires < 8 μ m

Circulation axiale des GR \rightarrow phénomène « d'écémage » au niveau des vaisseaux latéraux : **diminution locale de l'hématocrite**



Déformation des GR. C'est la **viscosité intra-cellulaire** qui intervient



Patho: la drépanocytose

- Maladie génétique
- Fabrication d'une hémoglobine anormale HbS → rigidification des globules rouges
- Globules rouges falciformes rigides → diminution de la déformabilité → thromboses

RECAP

Fluide statique: Lois de Pascal

Dynamique d'un fluide idéal: Bernoulli
+ continuité du débit avec $Q=S.v$

Dynamique d'un fluide réel: nombre de Reynolds

Dynamique d'un fluide réel laminaire : loi de Poiseuille $\rightarrow \Delta P = Q.R$

QCM 1

- Concernant les bases physiques, donnez les vraies :
 - A) Un gaz est un milieu physique déformable et incompressible.
 - B) La pression statique d'un fluide est le poids de la colonne de fluide qui s'applique sur une paroi.
 - C) La loi de Bernouilli s'applique pour un fluide idéal.
 - D) La pression s'exprime comme une force par unité de volume .
 - E) Tout est faux.

QCM 1 : BC

- Concernant les bases physiques, donnez les vraies :
 - A) Un gaz est un milieu physique déformable et incompressible.
COMPRESSIBLE
 - B) La pression statique d'un fluide est le poids de la colonne de fluide qui s'applique sur une paroi.
 - C) La loi de Bernouilli s'applique pour un fluide idéal.
 - D) La pression s'exprime comme une force par unité de volume.
FORCE/SURFACE ET ENERGIE/VOLUME

QCM 2

- Concernant les bases physiques, donnez les vraies :
 - A) La principale force de frottement d'un fluide idéal est la viscosité.
 - B) Pour un fluide idéal, on peut exprimer le débit comme $Q = S/V$
 - C) L'effet Venturi correspond à une augmentation de la vitesse d'écoulement quand la section du conduit augmente.
 - D) L'équation de Bernoulli s'applique à un fluide réel.
 - E) Tout est faux.

QCM 2 : E

- Concernant les bases physiques, donnez les vraies :
 - A) La principale force de frottement d'un fluide idéal est la viscosité. REEL
 - B) Pour un fluide idéal, on peut exprimer le débit comme $Q = S/V$
 $Q = S \times V$
 - C) L'effet Venturi correspond à une augmentation de la vitesse d'écoulement quand la section du conduit augmente. La section diminue → la vitesse augmente+++
 - D) L'équation de Poiseuille s'applique à un fluide idéal. REEL++
 - E) Tout est faux.

QCM 3

- Concernant les propriétés liées au sang, donnez les vraies:
 - 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 sanguin total.
 - E) Tout est faux.

QCM 3 : ABCD

- Concernant les propriétés liées au sang, donnez les vraies:
 - 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 sanguin total.
 - E) Tout est faux.

QCM 4

Concernant l'écoulement d'un fluide réel :

- A) La viscosité est un facteur de cohérence pour un fluide à vitesse faible avec un nombre de Reynolds de 12000
- B) Les valeurs de pressions mesurées dépendent de l'orientation du capteur
- C) On peut appliquer la loi de Poiseuille : $\Delta P = Q \times R$
- D) La loi de Poiseuille n'est plus valable pour un fluide réel en écoulement turbulent
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM 4: BCD

A) Faux : $R = 12000 \Rightarrow$ écoulement turbulent \Rightarrow la viscosité n'est plus un facteur de cohérence de l'écoulement du fluide

B) Vrai

C) Vrai

D) Vrai : on perd la proportionnalité

E) Faux

QCM 5

On considère une artériole où le sang circule à 1 m/s. Quelle est la pression terminale sachant que la pression latérale est de 1,5 kPa ? Donnée : $\rho = 10^3$

A) 1000 Pa

B) 2000 Pa

C) 3000 Pa

D) 4000 Pa

E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM 5: B

B) Vrai : Pterminale

$$=P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = P + \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot (1)^2 = 1500 + 500 = 2000 \text{ Pa}$$

ANY

QUESTIONS

?