

Biophysique de la circulation 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 physique

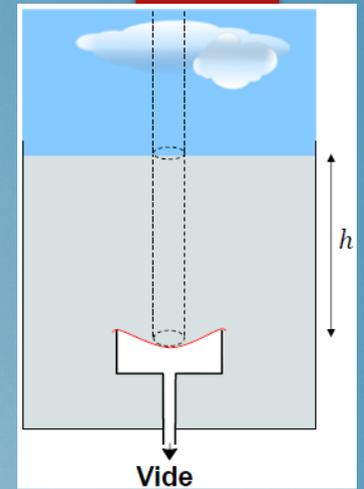
Définitions :

- ▶ Un fluide est un **milieu matériel déformable facilement** (sans forme propre) : **capacité d'écoulement**.
- ▶ Milieu gazeux : déformable et compressible
- ▶ Milieu liquide : déformable et incompressible
- ▶ Fluide idéal : s'écoule sans frottements
- ▶ Fluide réel : frottements (viscosité) ++

- ▶ **Statique** des fluides : on étudie les pressions (fluide immobile)
- ▶ **Dynamique** des fluides : on étudie les débits (fluide en mouvement)

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 à laquelle s'ajoute celle de la pression atmosphérique.

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

1) Dimension de la pression :

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

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

2) Unités de la pression :

▶ **Le Pascal :**

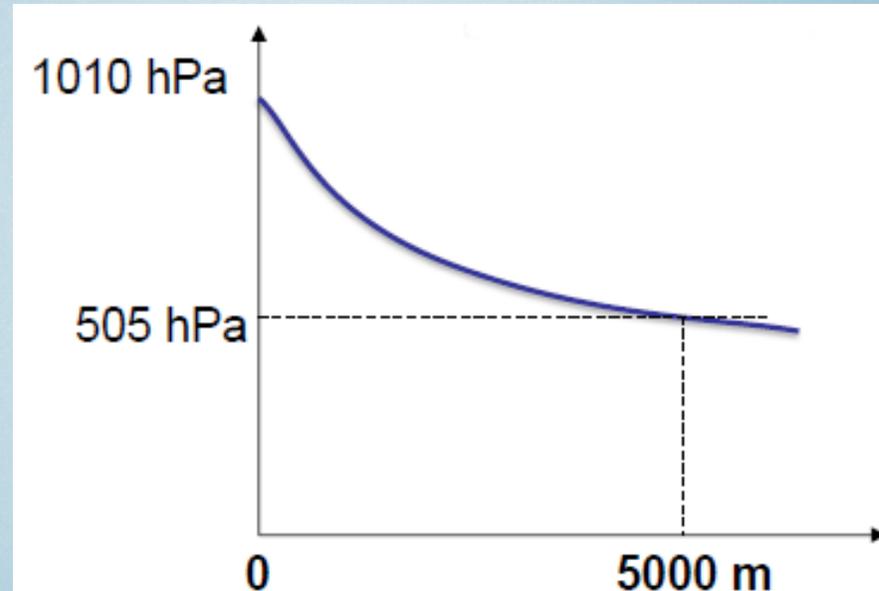
- unité du SI
- $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
- Unité faible à l'échelle des pressions : utilisation des multiples ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$).

▶ Le **bar** (ancienne unité) : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

▶ Le millimètre de mercure (mmHg), le centimètre d'eau (cmH₂O)...

3) La pression atmosphérique:

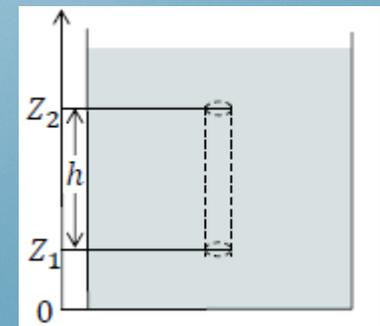
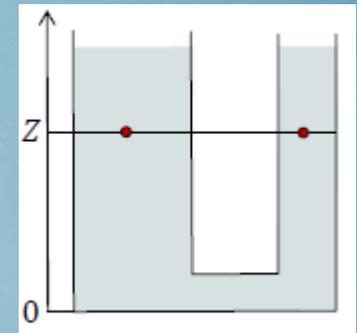
- ▶ **C'est le poids de la colonne d'air atmosphérique.**
- ▶ Elle varie avec l'altitude ou la profondeur.



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

4) Principe et lois de Pascal :

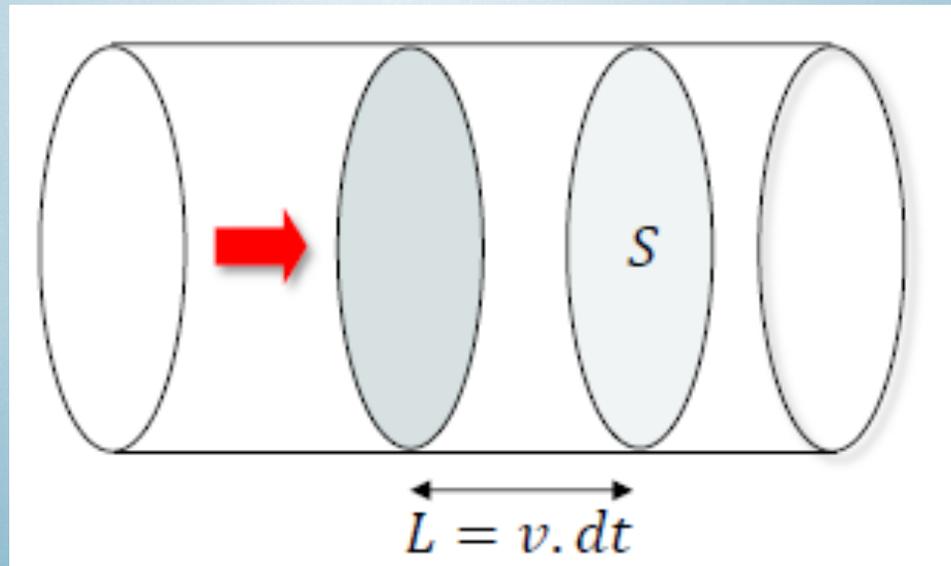
- ▶ **Principe de Pascal** : Dans un liquide incompressible, une variation de pression se transmet intégralement et dans toutes les directions.
- ▶ **1ère loi** : La pression est la même dans toutes les directions (indépendante de l'orientation du capteur).
- ▶ **2ème loi** : La pression est la même en tout point de même profondeur (ou altitude).
- ▶ **3ème loi** : La différence de pression entre 2 point 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

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

$$Q = S \times V$$

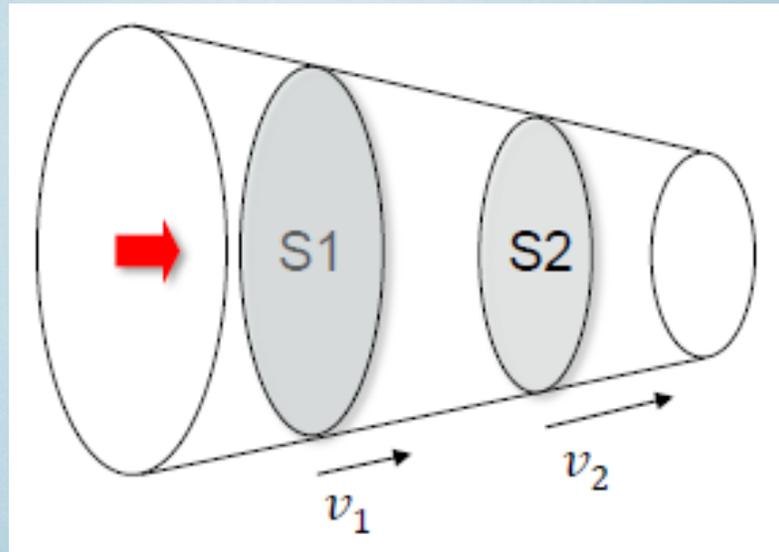


1) Principe de continuité du débit :

- ▶ 3 hypothèses :
- ▶ 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**.

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 :



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

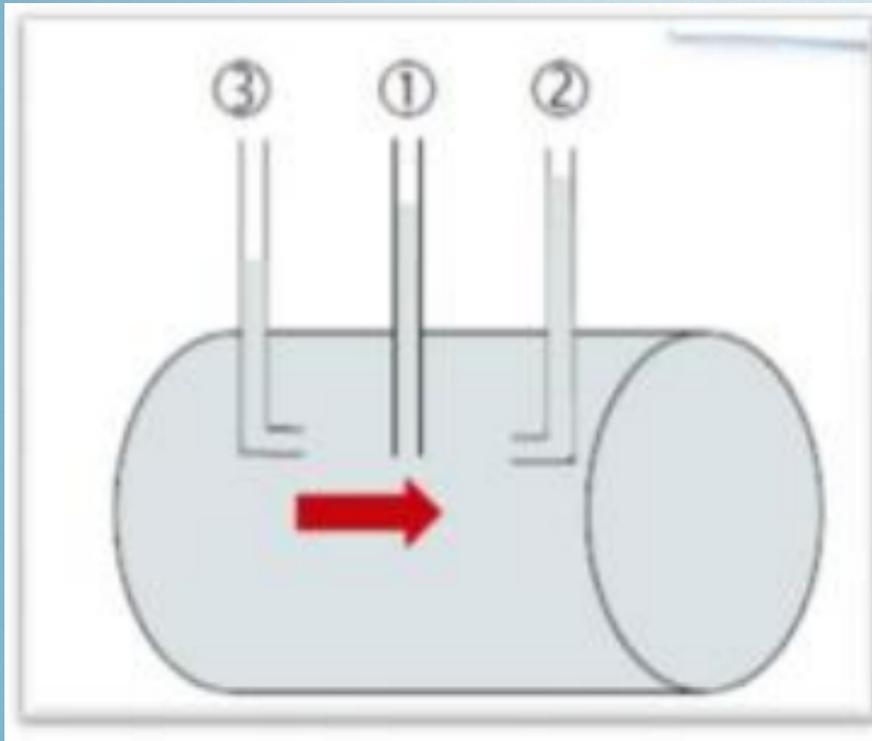
2) Ecoulement d'un fluide idéal :

- ▶ Un fluide idéal s'écoule selon 3 types d'énergies :
- ▶ **Energie E1 de pesanteur** = ρgh
- ▶ **Energie E2 cinétique** = $\frac{1}{2} \rho v^2$
- ▶ **Energie E3 de pression statique** P
- ▶ Comme il n'y a pas de frottements, l'énergie 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 »:
 $P - 1/2\rho v^2$

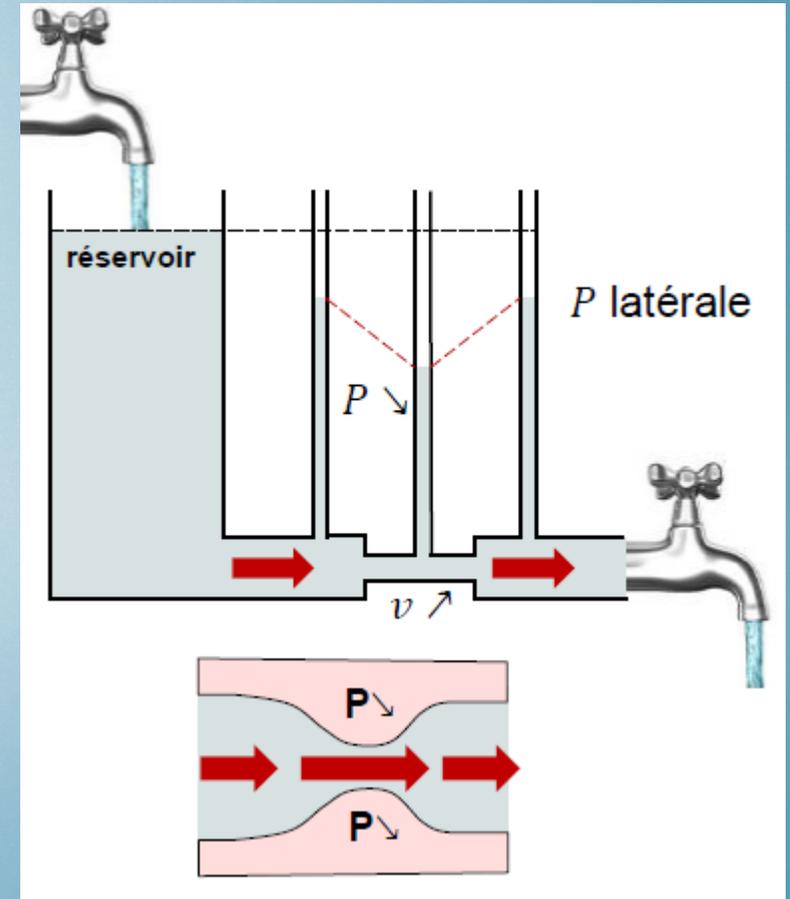
$$P_T - P = \frac{1}{2} \rho v^2$$

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).



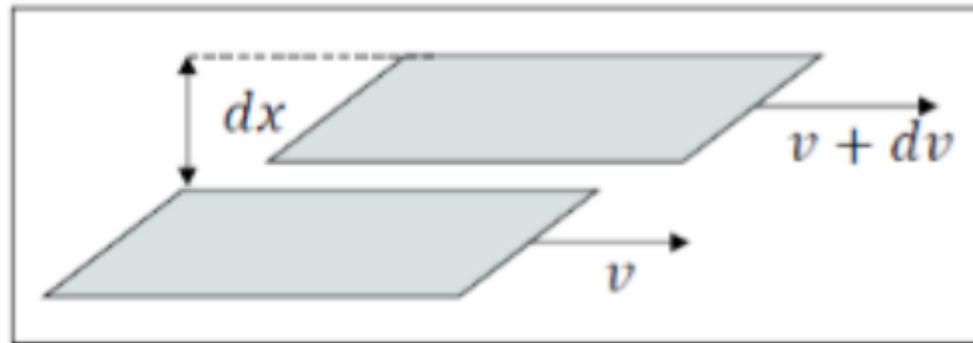
C) Dynamique d'un fluide réel

- ▶ 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 :

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

Avec : S = surface commune aux 2 lames;

dv/dx = « taux de cisaillement » ou gradient de vitesse

Les liquides Newtoniens

η est une constante caractéristique du liquide mais qui varie avec **la température**.
Si la température \nearrow alors $\eta \searrow$.

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** ».

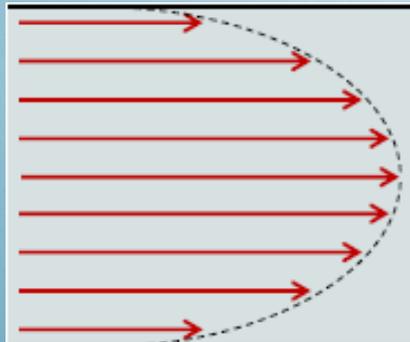
Ex : le sang : phénomène de rhéofluidification :
Quand $dv/dx \searrow$, formation de rouleaux de globules rouges et $\eta \nearrow$.

2) Ecoulement d'un fluide réel :

Ecoulement laminaire

La viscosité est un facteur de cohérence à vitesse faible.

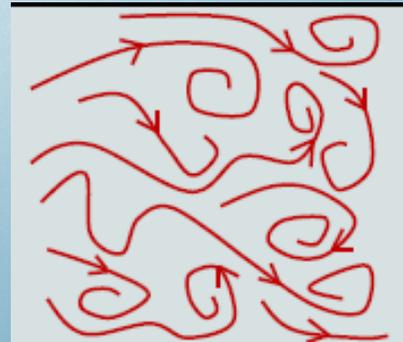
- Couche mince au contact de la paroi ne se déplace pas.
- Les lignes de courant ne se croisent pas.
- La vitesse est maximale au centre.
- **Profil parabolique des vitesses.**



Ecoulement turbulent

La viscosité n'est plus un facteur de cohérence à vitesse moyenne 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 :

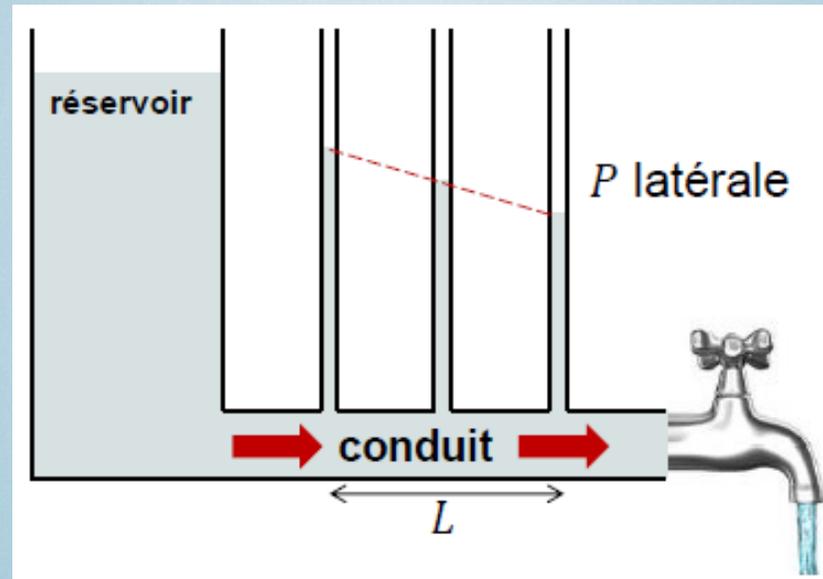
$$\mathbf{Re = \frac{\rho v d}{\eta}}$$

Si $Re < 2000$: écoulement laminaire

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

4) La 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 »**.

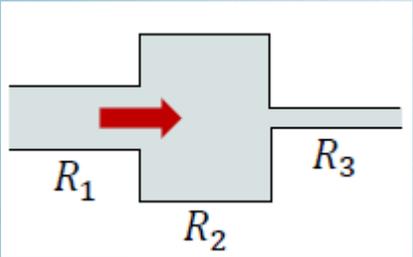


$$P_T = \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 + P + \text{chaleur} = \text{constante}$$

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

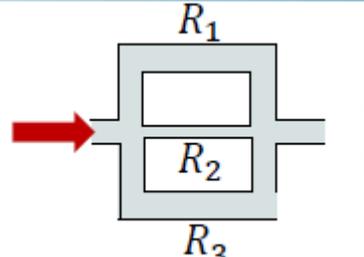
Q = débit
 L = distance
 η = viscosité
 r = rayon du conduit

Conduit en série Conduit en parallèle



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

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



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

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

Application numérique type concours +++

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 ?

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

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

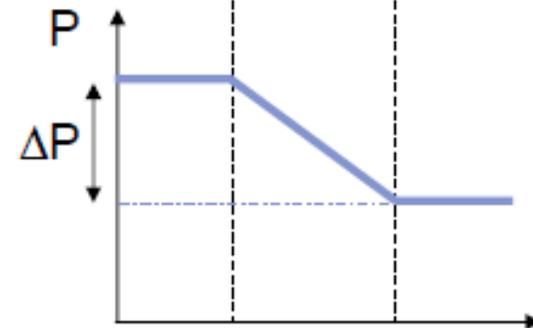
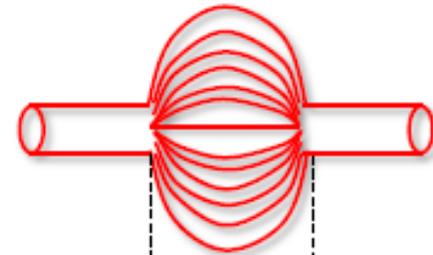
- En SI: $Q = 6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 $r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ et $L = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

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

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

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

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



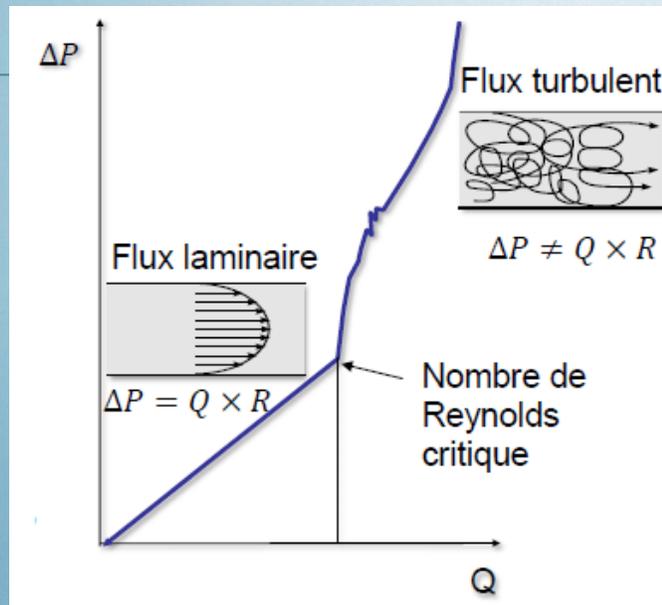
5) Ecoulement en régime turbulent :

Ecoulement laminaire

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

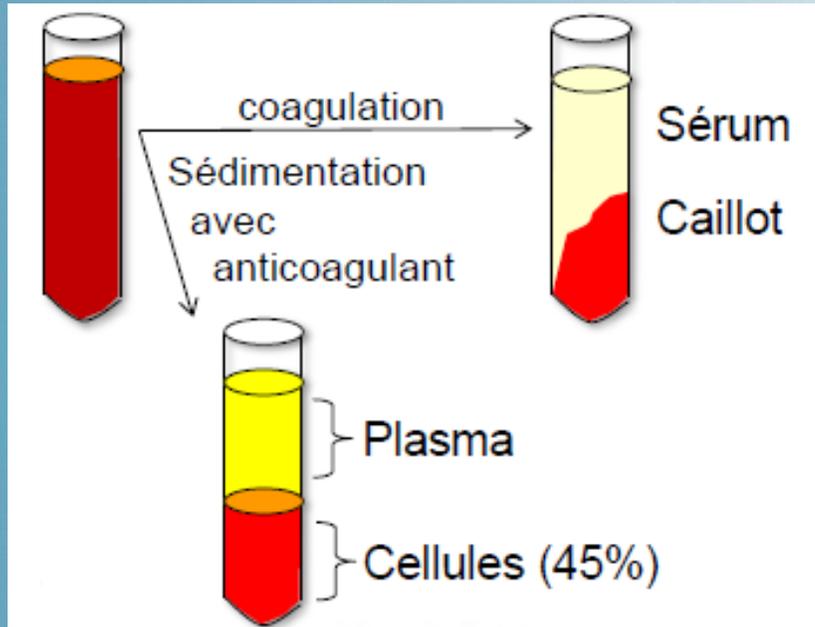
Ecoulement turbulent

- 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

A – Description du sang au repos



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

Hématocrite :

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

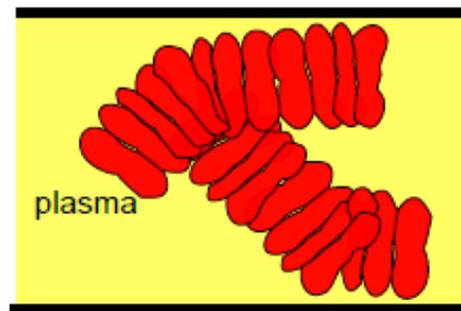
Plasma : sérum + éléments coagulants. **Fluide Newtonien.**

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

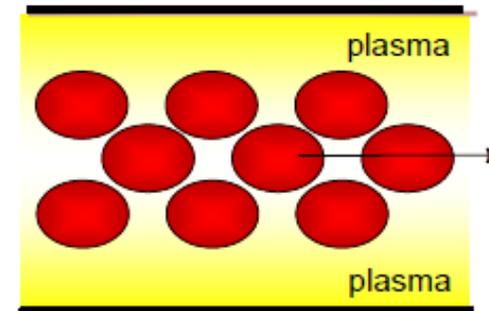
Les cellules sanguines (GR) ont des **propriétés rhéologiques** qui font que le **sang** se comporte comme un **fluide non Newtonien.**

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 +++**



Débit faible :
formation de rouleaux \Rightarrow viscosité \nearrow

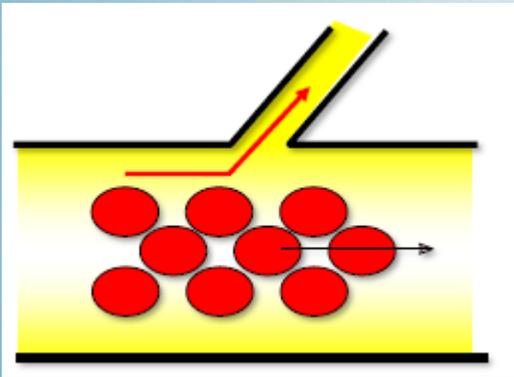


Débit élevé :
circulation axiale des GR et manchon
plasmatique \Rightarrow viscosité \searrow

C - Rhéologie du sang en écoulement dans les petits vaisseaux

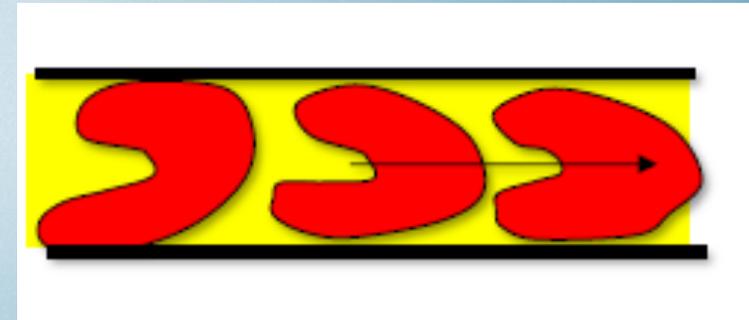
Artéioles

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



Capillaires < 8µm

Déformation des GR. C'est la **viscosité intracellulaire** qui intervient



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 Poiseuille s'applique pour un fluide idéal en écoulement laminaire.
 - D) La pression s'exprime comme une force par unité de volume .
 - E) Tout est faux.

QCM 1 : **B**

- 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 Poiseuille s'applique pour un fluide idéal en écoulement laminaire. REEL
 - D) La pression s'exprime comme une force par unité de volume. FORCE/SURFACE
 - E) Tout est faux.

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 Bernoulli s'applique à un fluide réel. IDEAL
- E) Tout est faux.

QCM 3

- Concernant les propriétés liées au sang, donnez les vraies:
- A) Le sang est un fluide 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 : BCD

► Concernant les propriétés liées au sang, donnez les vraies:

- A) Le sang est un fluide Newtonien. 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.

