

Biophysique de la circulation 1



Système cardio-vasculaire = ensemble moteur de pompes, le cœur + des vaisseaux sanguins, pour faire circuler le sang.

Le **système circulatoire** est organisé de manière à **favoriser les échanges** de nutriments au niveau des capillaires viscéraux

⇒ **grande surface d'échanges et vitesse circulatoire lente**

I. Bases physiques

Un fluide est un **milieu matériel déformable sans forme propre** qui s'écoule.

- ✓ **gazeux** : déformable + compressible
- ✓ **liquide** : déformable mais **incompressible**

2 catégories de fluides :

- * **Parfait = idéal** : sans frottements, la viscosité n'entre donc pas en jeu
- * **Réel** : avec frottements, la viscosité joue un rôle important

2 types de mécanique :

Mécanique	Caractéristique
STATIQUE : fluide immobile <i>Les fluides réels et idéaux ont le même comportement.</i>	Pression
DYNAMIQUE : fluide en mouvement <i>Les fluides réels et idéaux ont des comportements différents.</i>	Débit

A. Statique d'un fluide

La **pression statique** d'un fluide correspond au poids de la colonne de liquide qui s'exerce sur lui.

Pression relative : effet de la colonne de liquide uniquement

$$\Delta P = \rho gh$$

Pression absolue : effet de la colonne de liquide et de la pression atmosphérique

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

$$= \rho gh + P_{\text{atm}}$$

La **pression** est une :

Force par unité de <u>surface</u> ++	Energie par unité de <u>volume</u> ++
$P = \frac{F}{S}$	$P = \frac{E}{V}$

Unités de pression :

- * **Pascal** (unité SI) : **1 Pa = 1 N.m⁻²**
 - * Unité faible
 - * Utilisation de multiples
 - * **P_{atm} = 1013 hPa**

* **Bar** (ancienne unité) : **1 bar = 10⁵ Pa**

Les autres unités en physio sont liés à l'utilisation de manomètres à colonnes de liquide (mmHg, cm² d'eau).

* Pression atmosphérique

L'air est un **fluide gazeux** (donc compressible).

P_{atm} = poids de la colonne d'air atmosphérique

Appareil : manomètre à mercure (expérience de Toricelli)

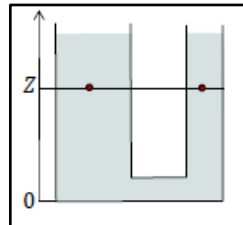
Tous les 5000 mètres, la P_{atm} est divisée par 2.

➡ **LOIS DE PASCAL**

Principe : Dans un liquide immobile incompressible, 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).

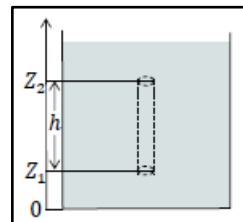
2^{ème} loi : La pression est **la même en tout point de même profondeur** (ou altitude)



3^{ème} loi : La différence de pression ΔP entre 2 points est **proportionnelle à la différence de hauteur** entre ces 2 points.

$$\Delta P = P_{z1} - P_{z2} = \rho gh = - \rho g \Delta z$$

Si on l'exprime en fonction de la position z, on met un signe négatif pour exprimer que +Z diminue, + P augmente.



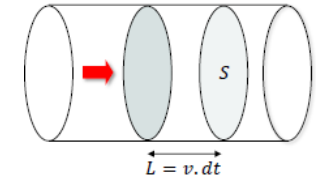
B. Dynamique d'un fluide

IDEAL

Débit (Q) = volume de fluide qui traverse une section S par unité de temps :

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

Q : m ³ .s ⁻¹	S : m ²	v : m.s ⁻¹
-------------------------------------	--------------------	-----------------------



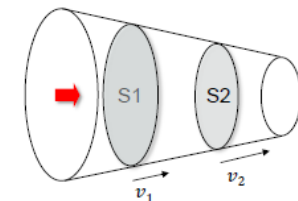
➤ Principe de continuité du débit :

Il s'applique à un cas présentant les caractéristiques suivantes :

- Fluide **Incompressible**
- **Régime stationnaire** : vitesse en 1 point est constante
- **Section S variable** du tuyau dans laquelle s'écoule le fluide

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

$$Q = S1 \times v1 = S2 \times v2 = \text{constante}$$



❖ Equation de BERNOULLI

Conditions +++ :

- Fluide : **incompressible**
- **Idéal**
- Ecoulement : **laminaire**

Le fluide s'écoule sous l'effet de 3 types d'énergie :

- * **PESANTEUR** : lié à la **hauteur/altitude h**
- * **CINETIQUE** : liée à **vitesse v**
- * **PRESSION STATIQUE** : liée au **volume V**

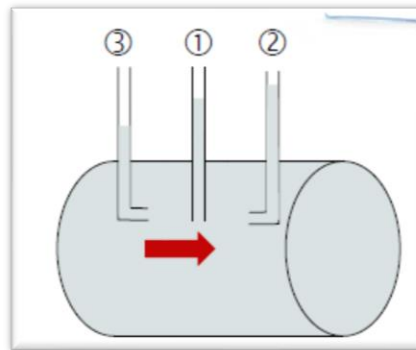
$$E_{\text{totale}} = E_{\text{pesanteur}} + E_{\text{cinétique}} + E_{\text{pression statique}}$$

$$= mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = \text{cte}$$

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

Dans un fluide dynamique (en écoulement), il existe 3 types de mesures de pression selon l'orientation l'orientation du capteur :

- 1) Si le capteur est parallèle au courant :
Platéral = Pstatique = P
- 2) Si le capteur est face au courant :
Pterminale = Plat + Pcinétique = P + ρv^2
- 3) Si le capteur est dos au courant :
Paval = Plat - Pcinétique = P - ρv^2



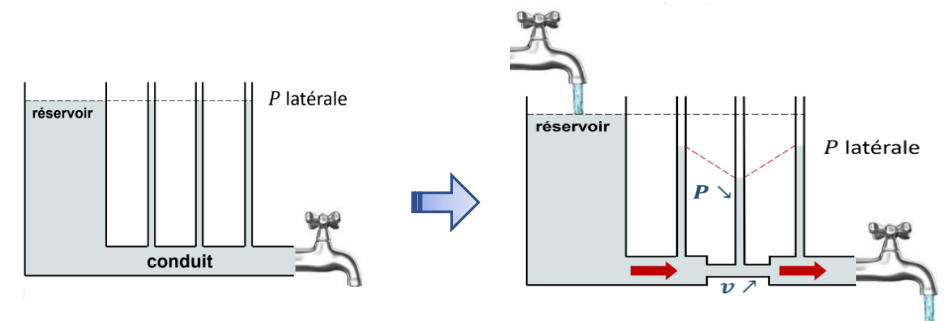
* Le tube de Pitot permet de mesurer la vitesse des engins en aéronautique. Il est constitué :

- un tube qui fait face
- un tube latéral

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

➤ Cas particulier : **Ecoulement horizontal**

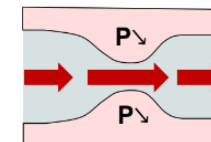
La **Pression latérale** va **diminuer** alors qu'elle est constante en situation statique car la **Pression atmosphérique est constante** mais la **vitesse augmente**. La **Pression cinétique** va donc **augmenter** et la **Pression latérale** va **compenser** en diminuant.



Une variation de Section entraîne une baisse locale de la Plat au niveau du rétrécissement. +++

* Application clinique : **Effet VENTURI** : +++

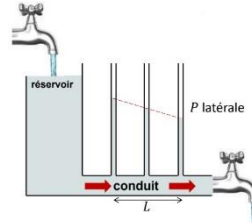
Lors d'une **sténose** (rétrécissement d'un vaisseau), la **Pression latérale** peut devenir tellement faible qu'elle est **insuffisante à maintenir l'ouverture** : il y a un **risque d'obstruction complète / spasme**.



REEL

Attention : Bernoulli n'est plus vérifié car il y a une **perte de charge** lié à la **viscosité**. ++

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



2 lames de fluide circulant parallèlement à des vitesses différentes exercent **une force de frottement F** l'une sur l'autre → consommation d'énergie.

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

Viscosité η : consommation d'énergie libérée sous forme de chaleur
Elle entraîne **une diminution progressive de la Pression LATÉRALE** même s'il n'y a pas de rétrécissement ++

La viscosité est exprimée en **Pa x s = POISEUILLE**

Elle individualise 2 types de liquides :

- **Newtonien** : constante mais varie avec la Température : $T^\circ C \nearrow \rightarrow \eta \searrow$
 - **Non-newtonien** : dépend de la Température ET du Taux de cisaillement = gradient de vitesse : $\frac{dv}{dx} \nearrow \rightarrow \eta \searrow$.
- ↳ On parle alors de **viscosité apparente*** car elle n'est pas constante ++

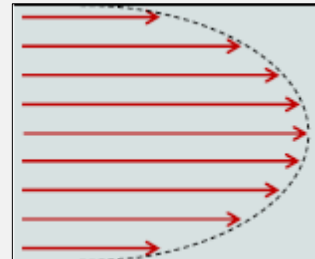

* **Viscosité apparente** : viscosité qu'aurait un fluide newtonien induisant le **même débit** pour une **même différence de pression**.

Le **sang** est un liquide **non-newtonien** : sa viscosité augmente quand le gradient de vitesse (=taux de cisaillement) diminue. Dans le sang, les globules rouges participent à la viscosité.

↳ viscosité apparente = **3×10^3 Pa.s** à **$20^\circ C$**

Contrairement à un fluide idéal, les **molécules d'un fluide réel se déplacent à des vitesses différentes** à cause de la viscosité (interactions entre elles, avec les parois).

Il existe **2 régimes d'écoulement** :

LAMINAIRE	TURBULENT
♥ A vitesse faible , la viscosité est un facteur de cohérence	♥ A vitesse moyenne à élevée , la viscosité N'est PAS un facteur de cohérence
♥ 1 couche de liquide mince au contact de la paroi ne se déplace pas	♥ Les trajectoires individuelles tourbillonnent : les lignes de courant se croisent
♥ v maximale au centre	
♥ Profil parabolique des vitesses : les lignes de courant ne se croisent pas	♥ Pas de distribution systématisée des vitesses
	

➤ Frontière entre les 2 régimes d'écoulement :

Elle dépend de 4 paramètres :

Vitesse moyenne d'écoulement :

Diamètre du conduit : d

Masse volumique du liquide : ρ

Viscosité : η

Ils sont regroupés dans le **nombre de Reynolds**, nombre empirique sans unité, qui définit le seuil entre un régime d'écoulement laminaire et turbulent.

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

- Si $Re \leq 2\,000$: Le régime d'écoulement est laminaire.
- Si $Re \geq 10\,000$: Le régime d'écoulement est turbulent.
- Entre les 2 : le régime d'écoulement est instable : on ne peut rien conclure.

On caractérise alors la vitesse critique, vitesse au-delà de laquelle le régime laminaire n'est plus assuré :

$$v_c = \frac{2000\eta}{\rho d}$$

❖ **Loi de Poiseuille**

- Fluide : **REEL**
- Ecoulement : **laminaire**

Lors de l'écoulement d'un fluide réel à l'horizontal ($P_{\text{pesanteur}} = \text{constante}$) à section constante, la **pression latérale P compense la « perte de charge »**.

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

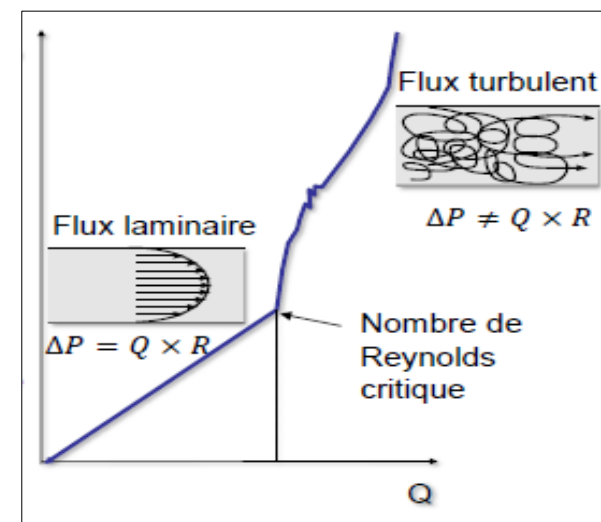
On a donc :

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

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

Comparaison : écoulement en régime laminaire et turbulent

Ecoulement laminaire	Ecoulement turbulent
<ul style="list-style-type: none"> • Toute l'énergie est consommée pour vaincre la viscosité • Relation linéaire entre ΔP et le débit • Loi de Poiseuille ++ 	<ul style="list-style-type: none"> • Tourbillons : consommation d'énergie • Régime peu efficace • Pas de proportionnalité • Vibrations + chaleur = Perception d'un souffle et/ou bruit



II. Particularités liées au sang

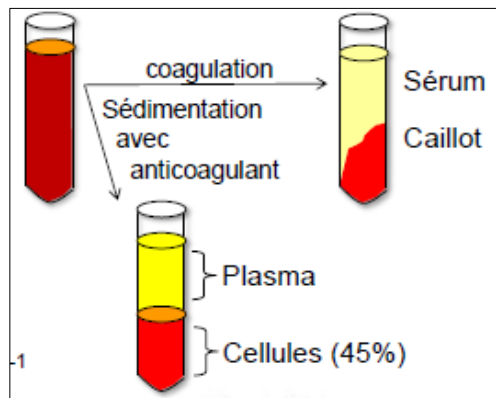
A) Description du sang au repos

Le **sang** est une **suspension de cellules dans une solution macromoléculaire** = plasma ++

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

- ❖ **Sérum** = plasma – les éléments figurés du sang piégés dans le caillot (éléments coagulants)
- ❖ **Plasma** = sérum + éléments coagulants.
Il se comporte comme un 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**. ++++



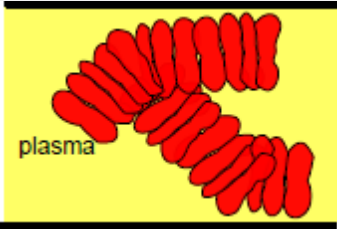
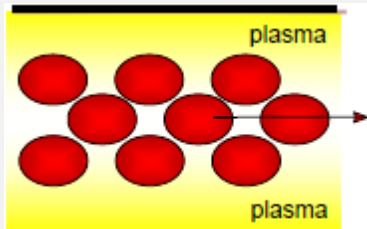
B) Ecoulement du sang dans les GROS vaisseaux

- ❖ **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.

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

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

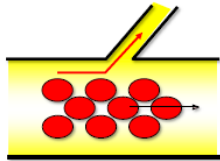
Débit faible	Débit élevé
<ul style="list-style-type: none">✓ Les globules rouges forment des rouleaux✓ <u>Conséquence directe</u> : ↗ de la viscosité	<ul style="list-style-type: none">✓ Les globules rouges ont une circulation axiale : on parle de manchon plasmatique✓ Rhéofluidification → ↘ viscosité
	

Nb : à 37°C et Hte=0.45, La viscosité η vaut $4.10^{-3} \text{ Pa.s}^{-1}$ (poiseuille)

- ❖ **Pathologie** : **Maladie de Vaquez = polyglobulie primitive**
→ l'hématocrite devient supérieure à 0.55
→ thromboses par hyperviscosité du sang.

C) Ecoulement du sang dans les petits vaisseaux

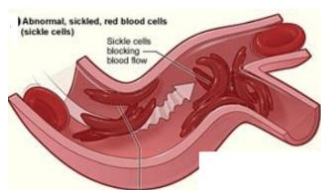
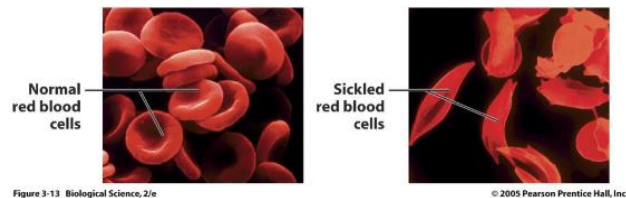
- ❖ « **Phénomène d'écroulement** » : au niveau des **embranchements des petits capillaires** provoque une **diminution localisée** de l'hématocrite.



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



- ❖ **Pathologie : Drépanocytose** (Hémoglobine S mutée)
 - **Falciformation** \leftrightarrow augmentation de la viscosité **intracellulaire**
 - diminution de la déformabilité
 - thromboses capillaires



Bravo d'avoir fini cette fiche ! Ce cours peut paraître un peu confus au début mais revoyez le calmement en essayant de comprendre au mieux les mécanismes et si vous avez des questions : go forum !

Retenez bien les différences entre les fluides réels / idéaux, les lois qui s'y appliquent, les différents types d'écoulement et les patho ! Vous verrez, les QCM ne sont vraiment pas difficiles ++

Courage pour cette fin de TTR !

Révissez bien pour le CCB ! <3

Instant dédié :

A mes fillots du love (Ilana <3) : Jeanne, Elisa, Lorana, Niels, Arthur et Saif, courage les gars ! A Philippine <3, A Milan L (tmtc) A Eden C, Laura S, Léa H, Ariel A, et Daniel B #teamF A Alix et Anne parce qu'elles ont si bien géré le S2 mais elles n'ont pas fini.

A mes co-tuts, parce qu'on est la meilleure team OLE <3 Et à nos vieux : Marine, Romain et Michael parce qu'ils nous fournissent une aide précieuse. A droite, l'un d'eux qui apparemment a une bonne thermorégulation :

