

Cours – TD 1.1 – Le système circulatoire

Programme : On mettra en évidence (1) la notion de pression dans un fluide ; (2) le principe fondamental de l'hydrostatique ; (3) la loi des vases communicants ; (4) la loi de conservation du débit dans le contexte des pressions dans les différentes parties du système vasculaire. Une question se posera alors : pourquoi la pression veineuse est-elle plus faible que la pression artérielle (même lorsqu'on est couché) ? Le TP est là pour le découvrir.

Exercice d'introduction

- 1) Dans le premier cours (cours 0) nous avons parlé du travail du cœur. Mais pourquoi le cœur effectue ce travail ? A quoi sert cette énergie fournie ?

Au niveau du ventricule on observe des variations de pression entre une pression minimale (diastolique) d'environ **80 mmHg** (ou torr) et une maximale (systolique) d'environ **120 mmHg**, la valeur moyenne étant autour de 100 mmHg. Ces pressions sont, en fait, des surpressions par rapport à la pression atmosphérique P_0 .

- 2) Rappeler la valeur de P_0 en unités mmHg, atm et Pa, et comparer avec la surpression ventriculaire moyenne.

Exercice : Pression hydrostatique

Mais ça veut dire quoi exactement, pression dans un liquide ? Retrouvons cette notion à partir de la définition plus élémentaire de force.

On fabrique des palets cylindriques en glace, avec $e = 2 \text{ cm}$ d'épaisseur, $S = 80 \text{ cm}^2$ de surface.

- 1) On en pose un sur une table : quelle est la force que ce palet exerce sur la table ? Quelle est la (sur)pression sur la surface de la table (par rapport à la pression atmosphérique) ?
- 2) On pose un deuxième palet sur le premier. Quelle est la force que le deuxième palet exerce sur le premier ? Quelle est la (sur)pression correspondante ? Quelle force et quelle (sur)pression s'exercent maintenant sur la table ?
- 3) On les empile pour faire une tour de 15 palets. Décrire (tracer) l'évolution de la (sur)pression en fonction du numéro du palet.
- 4) On met les 15 palets empilés dans une cuve cylindrique de même diamètre que les palets et on attend que l'eau fonde complètement. Comment varie la (sur)pression en fonction de la hauteur, entre le fond et la surface de l'eau liquide ? Comment justifier alors l'existence d'une pression hydrostatique dans un liquide ?
- 5) Qu'est-ce l'origine de la pression atmosphérique ?
- 6) Comment les résultats précédents sont-ils modifiés par la présence de l'atmosphère au dessous de la pile de palets, puis de la colonne d'eau ?
- 7) Que vaut la pression à une profondeur donnée en dessous de la surface de la mer ?

On retient :

Principe fondamental de l'hydrostatique :

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

pour un fluide à l'équilibre (donc immobile) avec ΔP différence de pression, ρ masse volumique, g accélération de la pesanteur, h altitude. (Unités : $\text{Pa} = \text{N/m}^2 = (\text{kg/m}^3) \cdot (\text{m/s}^2) \cdot \text{m}$)

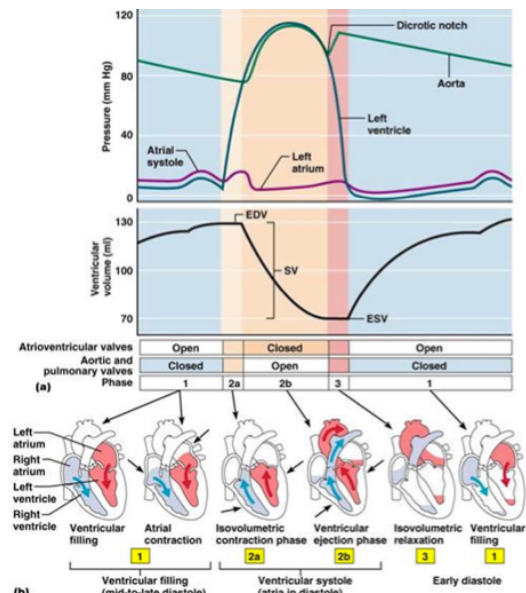


Figure 0 : depuis Campbell "Biology"

Principe des vases communicants

Pourquoi, dans le dispositif en figure, le niveau du liquide doit nécessairement être le même si le liquide est à l'équilibre ?



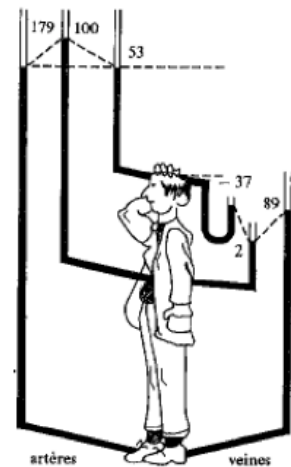
Figure 3 : Vases communicants de 3B scientifique

La pression hydrostatique dans le système cardio-vasculaire

- 1) La pression ventriculaire moyenne (ou la pression artérielle mesurée au niveau de l'avant-bras, c'est à dire pratiquement au niveau du cœur) est donc de 100 mmHg. Ceci correspond à la pression hydrostatique exercée par une colonne de sang de quelle hauteur ?

Masse volumique du sang: 1,05 kg/L.

- 2) En supposant que, pour un homme debout, le sommet de la tête se situe 60 cm au dessus du cœur, quelle est la différence de la pression sanguine artérielle qu'on peut prévoir entre les deux parties ?
- 3) Même question entre les pieds et le cœur, en supposant une distance d'environ 100 cm.
- 4) Comparer aux valeurs des pressions artérielles mesurées et indiquées dans la figure 4.
- 5) La pression ventriculaire moyenne (question 1) peut-elle s'expliquer comme un pur effet Hydrostatique ? Pourquoi ? Qui fait la différence ?



10. Au contraire, pour un individu debout, il y a des variations importantes des pressions artérielles et veineuses entre la tête, le cœur et les pieds. Les pressions indiquées ici sont les sommes de celles indiquées sur les figures 8 et 9; la valeur négative de - 37 torr ne doit pas surprendre; il s'agit en fait d'une différence par rapport à la pression atmosphérique extérieure, et indique par conséquent une dépression par rapport à celle-ci.

Question : que devient cette pression ?

Comparons le schéma précédent avec celui d'un homme allongé : on voit bien que dans ce cas les différences de pression associées à la gravité que nous venons de calculer s'annulent, et en particulier, les pressions sont les mêmes dans les pieds et dans la tête.

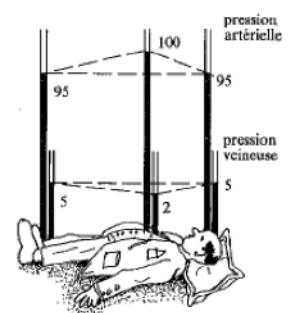
Cependant :

Pourquoi la pression artérielle dans les pieds et dans la tête est plus faible qu'au niveau du cœur ?

Et surtout, pourquoi la pression veineuse est elle tellement plus faible que la pression artérielle ?

Nous n'allons pas répondre aujourd'hui à ces questions, mais nous pouvons obtenir quelques éléments utiles pour trouver une réponse.

Figure 4 : depuis Bouyssy, Davier Gatty



9. Pour un individu couché, les pressions artérielles d'une part, et veineuses d'autre part, sont sensiblement les mêmes en divers endroits du corps.

Figure 5 : Depuis Bouyssy, Davier, Gatty

Géométrie du système circulatoire

Le sang circule dans un système de « tuyaux » qui a une géométrie particulière, avec des multiples branchements (voir figure 5).

Ayons une vision un peu plus *quantitative* de la **géométrie** ce système hydraulique : on trouve en particulier les données suivantes :

- La section d'une grosse artère (aorte) : $s_A = 3 \text{ cm}^2$
- La section d'un capillaire : $s_C = 60 \mu\text{m}^2$
(Le diamètre d'un capillaire : $d_C = 9 \mu\text{m}$)
- La section d'ensemble de tous les capillaires :
 $s_{\text{Ctot}} = 2400 \text{ cm}^2$, soit près de 3000 fois supérieure à celle d'une artère !

1) Estimer le nombre de capillaires.

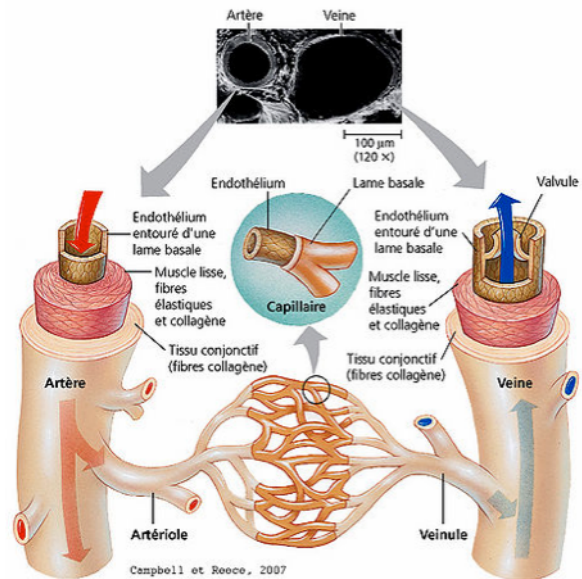


Figure 5 : Depuis

http://biowiki.mbolduc1.profweb.ca/index.php?title=L_a_circulation_sanguine

Conservation du débit et estimation des vitesses du sang

1) Conservation du débit Q

Le sang, comme la plupart des liquides, est (presque) **incompressible** : le volume d'une quantité donné de matière **ne change pas**. Par conséquent...

1) Que vaut le volume ΔV de fluide qui traverse une section de surface A d'un tuyau en un laps de temps Δt , si la vitesse d'écoulement est v (Figure 6) ?

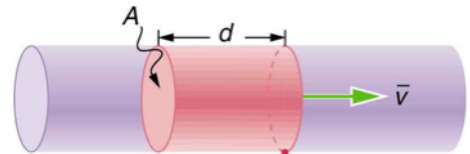


Figure 6 : le volume qui traverse une section d'un tuyau en un temps Δt si la vitesse est v .

Depuis <http://philschatz.com/physics-book/contents/m42205.html>

2) Exprimer alors le **débit Q** à travers la surface A , c'est-à-dire le volume de fluide qui la traverse par unité de temps.

3) On considère maintenant un tuyau qui change de section, comme en figure 7.
Que vaut le débit Q_1 à travers la surface A_1 ?
Et le débit Q_2 à travers la surface A_2 ?
Que peut-on dire de la relation entre ces deux grandeurs pour un fluide incompressible ?

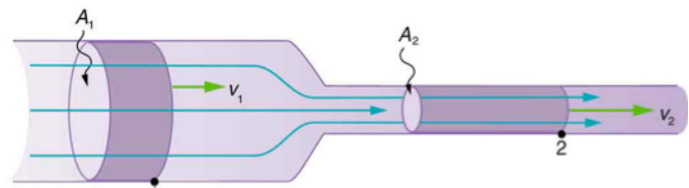


Figure 7 : Conservation du débit. Depuis

<http://philschatz.com/physics-book/contents/m42205.html>

4) Comment faut-il écrire la conservation du débit en correspondance d'un branchement ?
Par exemple, en figure 8, que vaut la vitesse dans les trois branches 1 2 et 3 si toutes les sections sont égales ?
Quelle est la surface qu'il faut prendre en compte pour ce calcul ?

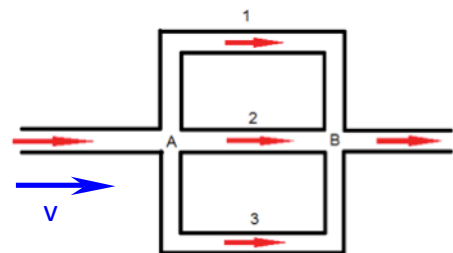


Figure 8 : Conservation du débit à un branchement.

2) Vitesse du sang

Le résultat précédent permet d'estimer la vitesse du sang dans les différents niveaux de branchement du système circulatoire. La figure 9 (haut) montre la **surface de la section totale traversée par le sang à chaque niveau de branchement**.

- 1) Ecrire la conservation du débit entre l'aorte et les capillaires.
On pourra appeler v_A la vitesse du sang dans l'aorte, v_C celle au niveau des capillaires.
- 2) Que vaut le débit Q en sortie du cœur (comment l'estimer) ?
Que vaut alors la vitesse du sang dans l'aorte, v_A ?
En déduire v_C .
Comparer avec les données de vitesse des figures 9 et 10.

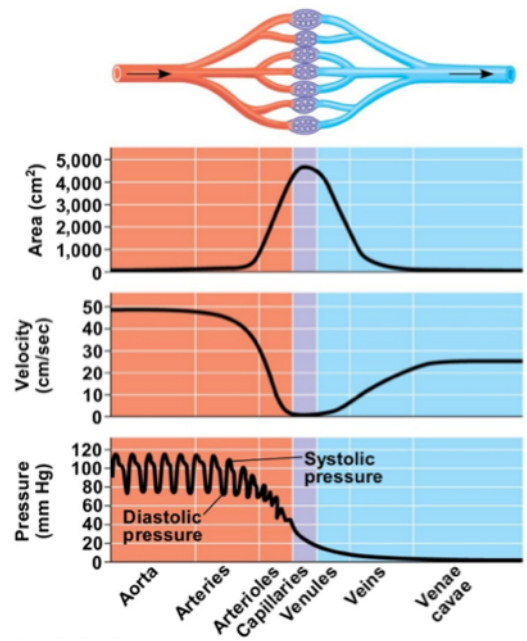


Figure 9 : Depuis Campbell, "Biology".

Et la pression ?

Quoi dire maintenant de la pression ? On connaît la pression en sortie du cœur, peut-on en déduire celle au niveau des capillaires ?

Théorème de Bernoulli

Une loi physique qu'on pourrait penser d'utiliser est le **théorème de Bernoulli**, valable que pour un fluide parfait, c'est à dire en l'absence de toute dissipation d'énergie :

$$P + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{cte} \quad \text{Théorème de Bernoulli}$$

où P est la pression, ρ la masse volumique, h l'altitude, v la vitesse, et la grandeur indiquée est constante lorsqu'on se déplace le long d'une « ligne de courant » qui suit le mouvement du fluide.

Ce théorème traduit la conservation d'énergie le long d'une ligne de courant. Il n'est vraiment pas intuitif : par exemple, il nous dit que **pour un fluide en mouvement ($v \neq 0$), la pression P n'est pas égale à la pression hydrostatique $\rho g h$** .

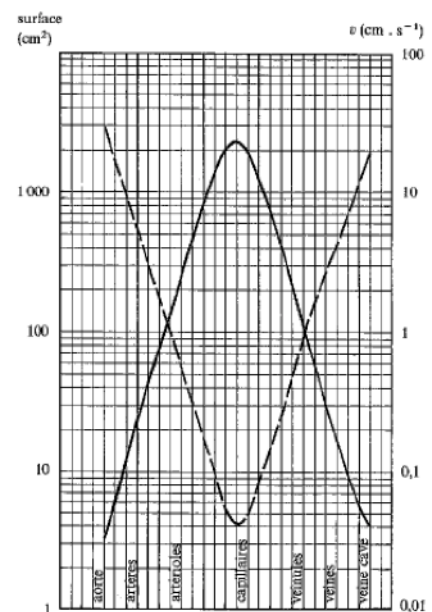


Figure 00 : Depuis Bouyssy Davier Gatty.

Nous n'allons pas le discuter en détail, mais seulement identifier ses limites.

- 1) Considérons un homme couché : alors $\rho g h = \text{cte}$ et le théorème de Bernoulli devient $P + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{cte}$.
Si le théorème s'appliquait au cas de la circulation sanguine, comment la pression devrait évoluer en allant des artères aux capillaires ?
- 2) Comparer avec la figure 9. Cette prévision est-elle correcte ?
- 3) Que peut-on conclure sur la conservation de l'énergie dans ce cas ? Le sang se comporte-t-il comme un fluide parfait ?

Dans le TP et dans le prochain cours – TD, nous aborderons la question du comportement d'un liquide visqueux, ou plus précisément nous nous demanderons : **dans quelles conditions la viscosité d'un liquide est négligeable, dans quelles conditions elle ne l'est pas ?** Puis reviendrons vers le sang pour voir si les propriétés d'un liquide visqueux permettent de comprendre son comportement et quelles sont les limites de ce modèle physique.