

# Chapitre 1

## Introduction générale

- La mécanique des fluides étudie les lois liées à l'écoulement des liquides, elle concerne aussi un outil particulièrement précieux en physiologie permettant de mieux comprendre les aspects physiques du système cardio-vasculaire.
- En effet le sang est un liquide visqueux s'écoulant dans des canalisations représentées par les vaisseaux et dont l'écoulement obéit aux lois de la mécanique des fluides.
- Le sang est loin d'être un liquide parfait, il s'agit en effet d'un liquide de viscosité complexe, néanmoins les lois de l'écoulement des liquides constituent assez souvent une bonne approximation pour décrire certains aspects de la circulation sanguine.

Avant d'aborder les lois auxquelles obéissent l'écoulement des liquides visqueux, il est ainsi très utile d'étudier celles se rapportant à l'écoulement des liquides parfaits.

## Quelques définitions

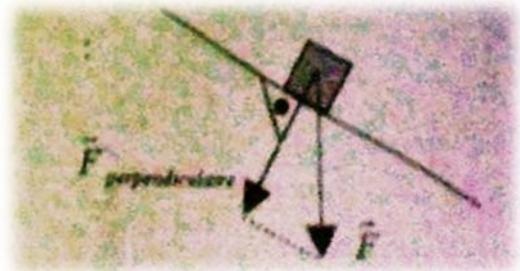
- **Le Fluide** : c'est un corps qui n'a pas de forme propre –épouse celle du récipient-. Les gaz et les liquides sont des fluides.
- **Fluide réel/ fluide parfait** :  
Si les forces de viscosité sont nulles, on a affaire à un fluide dit parfait, sinon on a un fluide réel. Les forces de viscosité étant nulles au repos : la statique des fluides réels se confond avec celle des fluides parfaits.
- **Pression** :

La pression est une grandeur proportionnelle à l'intensité de la force, et inversement proportionnelle à la surface  $S$  sur laquelle s'exerce cette force.

$$P = F/S \quad F \text{ en newtons } N. S \text{ en } m^2.$$

$P$  en  $N/m^2$  ou en pascals  $Pa$

La pression n'est pas une grandeur vectorielle mais une grandeur scalaire.



- **Autres unités de pression** :

Le centimètre de mercure **1 cm hg = 1334 Pa**

- L atmosphères **1 atm = 76 cm de hg = 1014.10 Pa**
- Le bar et le mbar **1 bar = 10 pa**
- 1mbar=10 pa

- **La pression statique** :

- C'est la force qui s'exerce normalement à l'unité de surface au sein d'un liquide quel que soit l'orientation de cette surface.
- En un point  $M$  du liquide la pression statique est la même dans toute les directions ; il s'agit donc d'une grandeur scalaire.
- La variation de la pression statique mesurée entre 2 points donnés dépend uniquement de la variation de leur profondeur.

## Unités

Selon le choix du système d'unités, la pression statique peut être exprimée :

- Dans le système international **MKS** en **Pa**. 1 pascal est la pression développée par une force de 1 newton s'exerçant normalement sur une surface de 1 m<sup>2</sup> : **1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>**.
- Dans le système **CGS** en **barye**. 1 barye est la pression développée par une force de 1 **dyne** sur une surface de 1 **cm<sup>2</sup>**.
- Dans le système **métrologique** on utilise le **bar** : **1 bar = 10<sup>6</sup> baryes = 10<sup>5</sup> Pa**
- Dans le domaine de la **thermodynamique** on utilise l'**atmosphère atm** comme unité de pression, cette unité est définie par la relation  
1 atm = 1.013 bar = 1.013 \* 10<sup>5</sup> Pa     1 atm est équivalent à 10<sup>5</sup> Pa
- Dans le domaine **clinique** la pression est le plus souvent exprimée en hauteur d'un liquide de référence généralement le **mercure hg**.

### Exemple 1 :

Exprimez la pression  $P = 45 \cdot 10^6$  pas en bar mbar atm cm hg et  $P = 1.09$  en pas atm cm hg

### Exemple 2 :

Une pression de 1 mmhg de la P développée par une colonne de 1 mm hg

1 mmhg =  $\rho g h = 13.6 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 10^{-3} = 133.3$  pas

-  $\rho$  masse volumique  $13.6 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>

-  $G$  la gravité 9.81 m/s<sup>2</sup>

-  $H$  hauteur  $10^{-3}$  m

De la même façon 1 cm de h<sub>2</sub>O =  $\rho g h = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 9.81 \cdot 1 \cdot 10^3 = 98 \approx 100$  pas

## Equation fondamentale de l'hydrostatique

### **Loi de pascal :**

Considérons un liquide au repos placé dans un récipient dont le fond est à une profondeur  $h$

La pression  $P$  au point  $M$  est égale à :

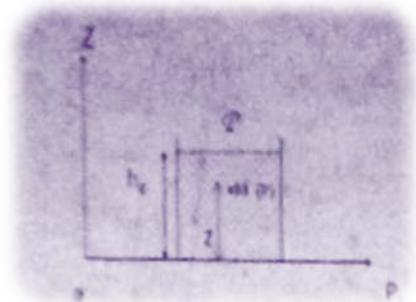
$P = p + \rho \cdot g \cdot (h - z)$       $p$  la pression atmosphérique

$Z$  la cote de  $M$  par rapport au niveau 0

Ce qui donne  $P + \rho \cdot g \cdot z = p + \rho \cdot g \cdot h = \text{cste}$

$P + \rho \cdot g \cdot z = \text{cste}$

- Elle donne les conditions de repos d'un liquide.
- $\rho \cdot g \cdot z$  est appelée pression de pesanteur.
- La somme des 2 pressions statiques et de pesanteur est appelée **charge hydrostatique totale**.



- Un liquide est au repos lorsque sa charge hydrostatique est constante.

**Remarque :**

la loi de pascal peut être exprimée en hauteur  $(P/\rho.g) + z = cste$   $z$  est appelée : **la hauteur de position** .

- **$P/\rho.g$**  est appelée **hauteur piézométrique** , elle représente la valeur de la pression statique exprimée en hauteur du même liquide.

Exemple hauteur du même liquide

$$P_1 = P_3$$

$$P_1 \neq P_2$$

Principe des vases communicantes

Presse hydraulique

## Applications

### Exemples de pression physiologique

#### **1) la pression artérielle**

- C'est la pression statique du sang mesurée au niveau d'une artère, elle a la même valeur dans toutes les directions et en particulier latéralement contre les parois de l'artère.
- Elle est appelée ainsi pression transmurale.
- Habituellement elle mesure l'excès de pression par rapport à la pression tissulaire externe supposée= a la pression atmosphérique.
- La pression artérielle est mesurée sur un sujet couché ou à l'hauteur du cœur. les valeurs normales obtenues au repos se situent entre une valeur minimale de l'ordre de **80mmHg** appelée **pression diastolique**.

R ! La période moyenne de la variation de la P artérielle permet de calculer notamment la  $P_m$  sur une période T

$$P_m = 1/T \int_{p_t} p_t dt = p_s + p_d = 100 \text{ mmhg}$$

Il est possible d'estimer l'énergie fournie par le ventricule gauche pendant chaque systole

$V = \int p_t . dv = p_m . v_s$  étant le  $v$  est le volume d'éjection.

#### **2) la pression veineuse :**

C'est l'excès de la pression statique du sang mesurée au niveau d'une veine, cette pression est très faible  $P = 10 \text{ cm } h_2o$

#### **3) la pression du LCR liquide céphalo-rachidien :**

C'est l'excès de la pression statique mesurée au niveau du LCR ,cette pression est de l'ordre de  $10\text{-}15 \text{ cm } h_2o$  soit (1 à 1.5) soit 1.5 KPa.

LCR est un liquide biologique transparent dans lequel baignent le cerveau et la moelle osseuse.

#### 4) la pression inter oculaire :

C'est l'excès de pression statique mesurée à l'intérieur des chambres oculaires ; cette pression est  $\pm$  inférieure à 20 mm Hg. Elle peut  $\nearrow$  dans des situations pathologiques (glaucome) pour atteindre des valeurs de 100 mm Hg.

### Théorème d'Archimède

Considérons un objet dans un rectangle de volume  $V$  et de hauteur  $H$ .

De section  $S$   $S=l/L$  et de masse volumique  $\rho$  que l'on fixe à une certaine de positions dans un fluide de masse volumique  $\rho_{\text{objet}}$ .

\*si cet objet est lâché va-t-il rester immobile, couler ou monter ???

#### NOTION

$m$ =masse de l'objet

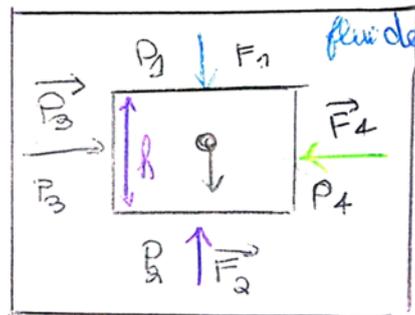
$v$ = volume

$\rho_m$ =masse volumique de l'objet

$s$ = surface de haut et du bas de l'objet

$h$ = la hauteur de l'objet  $V=S.h$

$\rho_{\text{fluid}}$  = la masse volumique du fluide



○ le résultat final est que la force résultante vaut  $F_{\text{res}} = (\rho_{\text{objet}} - \rho_{\text{fluide}})g.v$

si  $F$  est + la force résultante est dirigée  $\rightarrow$  le bas

si  $F$  est - // // //  $\rightarrow$  le haut

○ La force  $\rho.g.v$  est simplement la force de pesanteur de l'objet  $m.g$

$F_a = \rho_{\text{fluide}} .g.v$  s'appelle la force d'Archimède

○ Elle est égale à la force de pesanteur du fluide déplacée par l'objet mais dirigée vers le sens opposé.

○ Tout objet plongé dans un fluide subit une force de bas en haut égale à la force de pesanteur du fluide qu'il déplace.

C'est la formation du principe d'Archimède

L'étude de la force résultante permet de prédire ce qu'il va passer

Si  $\rho_{\text{objet}} > \rho_{\text{fluide}}$  la force résultante est positive l'objet va couler.

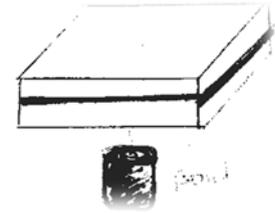
Si  $\rho_{\text{objet}} = \rho_{\text{fluide}}$  la force résultante est nulle l'objet va rester sur place .

Sipobjet < pfluide la force résultante est négative l'objet va monter.

## La tension superficielle Phénomène de capillaire

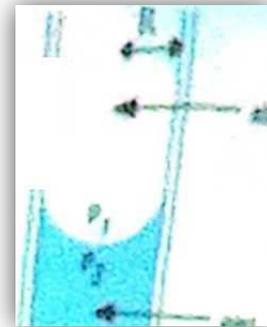
### Quelques observations

- ❖ on a 2 plaques de verres entre lesquelles on a déposé une mince couche d'eau ces 2 plaques semblent collées l'une à l'autre.
- ❖ dans un tube la surface libre d'eau forme un ménisque près des bords.
- ❖ une punaise flotte à la surface de l'eau.
- ❖ certains insectes sont capables de se déplacer sur l'eau.



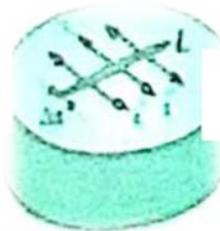
### Définition

- L'interface est une surface de contact entre 2 milieux différents.
- La création d'une interface entre 2 milieux est toujours accompagnée d'une consommation d'énergie.
- Cette énergie de surface est égale à l'aire de la surface multipliée par une quantité appelée tension de surface ou encore tension superficielle.



- L'énergie de la surface  $ES = S \cdot \gamma$
- Elle peut s'exprimer aussi en N/m

comme une force par unité de longueur



$$F = L \gamma$$

$$\gamma = F/L$$

D ou  $\Delta E = F \cdot \Delta X = \gamma L \cdot \Delta X$

$$\Delta E = \Delta S \cdot \gamma \text{ soit } \gamma = \Delta E / \Delta S$$

- La tension superficielle est une force qui existe depuis la création d'une interface qui sépare 2 milieux différents.
- Elle existe à ce qu'il n'y a plus d'interface.
- Elle explique de nombreux phénomènes telles que le fait que l'eau ne mouille pas le lotus ou qu'une aiguille puisse flotter à la surface de l'eau.

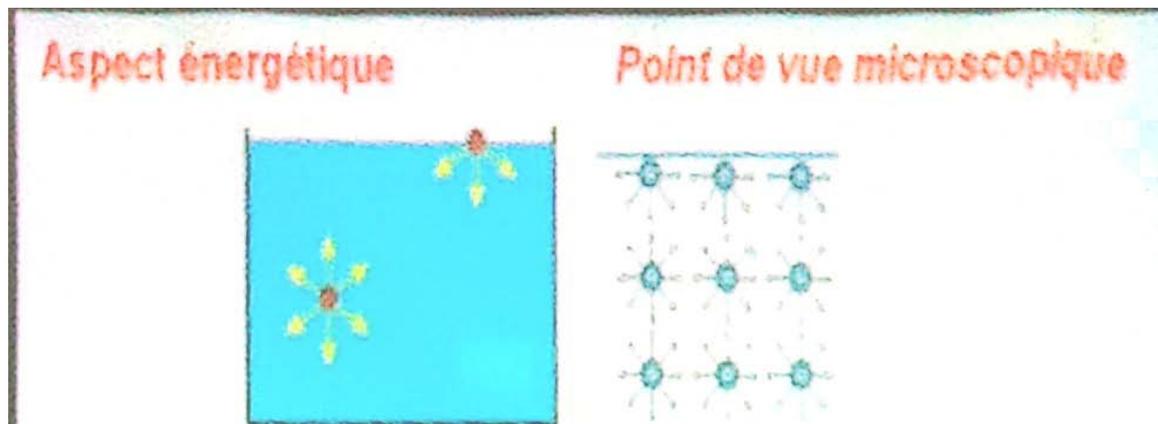
Le tableau de valeurs de tension superficielle pour certains liquides à une température de 20 – température ambiante :

| Nom de liquide | Tension superficielle N/m |
|----------------|---------------------------|
| Mercure        | $480 \cdot 10^{-3}$       |
| Eau            | $73 \cdot 10^{-3}$        |
| Glycémie       | $63 \cdot 10^{-3}$        |
| Chlore         | $34 \cdot 10^{-3}$        |
| Ethanol        | $22 \cdot 10^{-3}$        |
| Azote          | $9 \cdot 10^{-3}$         |

Les valeurs typiques l'eau à une tension superficielle élevée.

R ! l'eau pure  $0.0072 \text{ N/m}$  l'ajout du savon diminue la tension superficielle  $0.03$

| Liquide   | (N/m) la tension sup |
|-----------|----------------------|
| Huile     | 0.021                |
| Eau       | 0.072                |
| Eau+savon | 0.03                 |
| Glycérol  | 0.063                |
| Mercure   | 0.5                  |



### L'aspect énergétique :

- Dans un liquide les molécules exercent entre elles des forces d'attractions ou de répulsions.
- Ces forces sont nommées : la 1<sup>ère</sup> force est nommée force **de van der waals** et la 2<sup>ème</sup> force est **électrostatique**.
- Chaque molécule d'eau subit l'attraction de ses voisins proches.
- La résultante de ces forces ne s'annulent pas, en effet les molécules d'eau situées la surface d'un liquide n'attirent pas l'air.
- La résultante à la surface est donc dirigée vers le bas.
- Ces forces sont équilibrées par les forces de pression qui entraînent les molécules sur chaque coté de l'interface.
- Les forces intermoléculaires sont à l'origine de l'énergie de surface .

### Loi de Laplace mouillabilité :

- Dans le cas où l'interface est courbée il y a une différence de pression entre les pressions des différents milieux.

Par exemple Dans un tube à essai si une interface courbée se forme après avoir rajouter de l'eau la pression de l'eau sera différente de celle de l'air c a d la pression atmosphérique.

- Par observation de la courbe de ménisque de l'interface on peut intuitivement déduire laquelle des 2 pressions est + élevée que l'autre .

- En effet on reprenant notre exemple si l'eau a une interface bombée vers le haut alors la pression atmosphérique.
- Au contraire si l'eau a une interface courbée vers le bas comme une selle de cheval alors la  $P_{atm}$  est plus élevée.
- ❖ La loi de Laplace établit une relation entre la différence de la pression et la tension superficielle elle est énoncée au-dessous.

$$P = P_1 - P_2 = 2\gamma / R$$

$P_1$  pression du côté concave

$P_2$  // // convexe

$R$  le rayon du tube capillaire

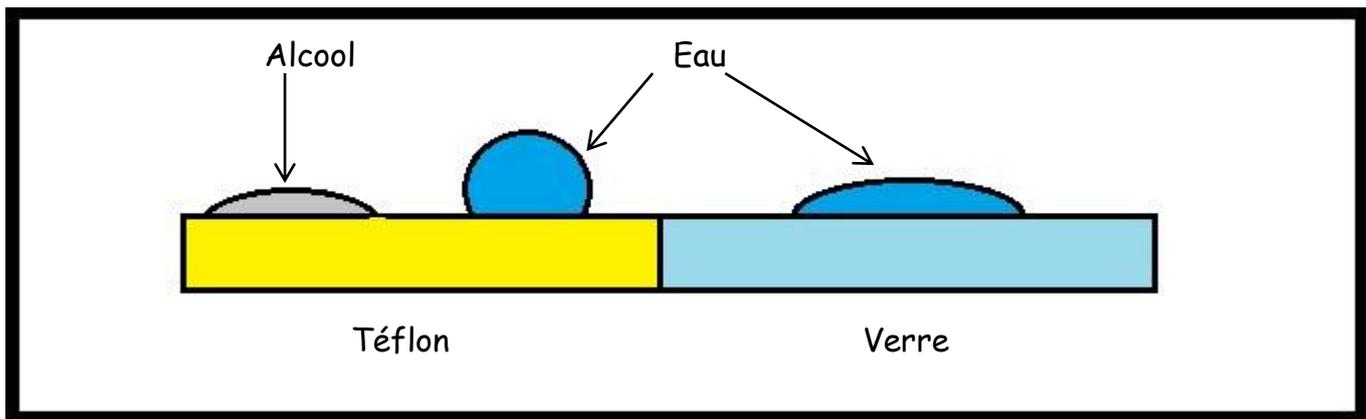
$\gamma$  Tension superficielle du liquide

- On peut ainsi trouver la tension superficielle d'un liquide en connaissant la différence de la pression et le rayon du récipient.
- La mouillabilité permet de décrire comment un liquide arrive à s'étaler en présence d'un autre liquide sur un solide.
- L'étalement d'un liquide dépend des milieux où se situe le solide.



- Un liquide posé sur un solide forme un angle qui varie selon l'étalement.
- L'angle de contact entre le liquide et le solide se nomme l'angle de mouillage
- Cet angle de mouillage dépend de la tension Superficielle.
- En effet une variation de la tension Sup d'un liquide joue sur son étalement.
- La loi de Cassie nous montre que si l'angle de contact est entre  $90^\circ$ - $180^\circ$  alors le liquide est hydrophobe c a d le liquide ne mouille pas.  
Si l'angle de contacte mesure entre  $10^\circ$ - $90^\circ$  le liquide est hydrophile –liquide mouillant.

## Mise en évidence expérimentale



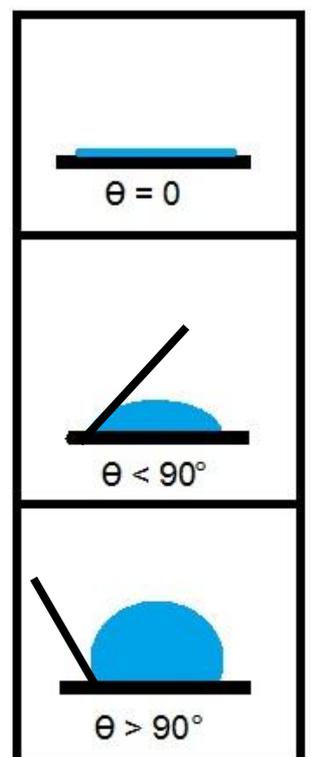
**Figure:** selon la nature du solide et du liquide , les phénomènes observés sont différents

- Sur une plaque de Téflon (matière plastique) déposons une goutte et une goutte d'alcool
- Si on reprend l'expérience avec une goutte d'eau déposée sur une plaque de verre, nous remarquerons que l'eau mouille davantage le verre que le téflon
- Leurs Profils ne sont pas les mêmes : l'alcool s'étale davantage , en dit qu'il mouille plus le Téflon

## Interprétation

Une goutte de liquide déposée sur une plaque solide plane peut :

- soit s'étaler, on dit que **le liquide mouille parfaitement** le solide
- Soit forme une lentille, avec 2 cas de figures
  - Cas 1 :  $\theta < 90$ , **le liquide mouille imparfaitement** Le solide
  - Cas 2 :  $\theta > 90$ , **le liquide ne mouille pas** le solide



## Goutte sphérique

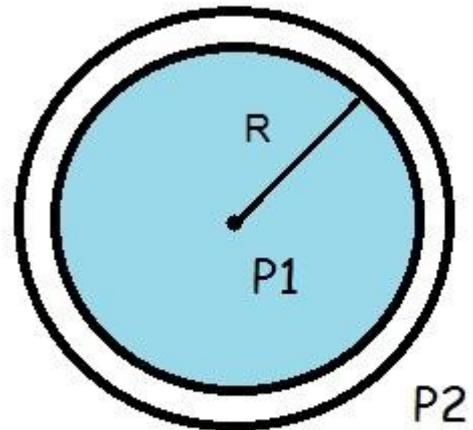
Dans le cas particulier d'une goutte sphérique, les deux rayons de courbure  $R_1$  et  $R_2$  sont égaux et identiques au rayon de goutte

Cette loi alors peut s'écrire plus simplement :

$$P_1 - P_2 = \frac{2\gamma}{R}$$

Ou :

- $P_1$  : la pression du coté extérieur en Pa
- $P_2$  : la pression du coté intérieur en Pa
- $\gamma$  : la tension superficielle à la limite de séparation en N/m
- $R$  : le rayon de la goutte en m



## La bulle de savon

La pression de Laplace est à l'origine de la sphéricité de la bulle de savon

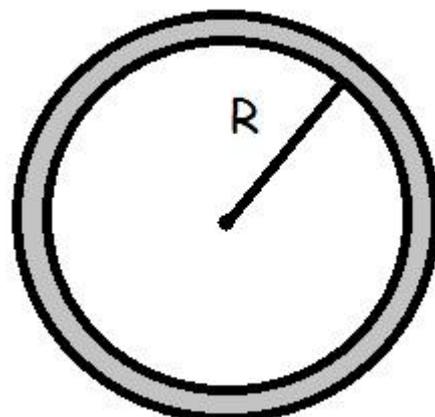
La pression est uniforme dans la bulle ce qui lui donne sa forme sphérique

Pour calculer la pression dans la bulle de savon il faut prendre en compte le fait qu'il y a deux interfaces :

Une interface (Air - Liquide) à l'intérieur, puis une interface (liquide - air)

→ La différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur et donc doublée

$$P_1 - P_2 = \frac{4\gamma}{R}$$



## Loi de Jurin

La loi de Jurin donne la hauteur à laquelle un liquide monte dans un tube capillaire (un tube très fin)

Cette loi s'exprime par 
$$h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g}$$

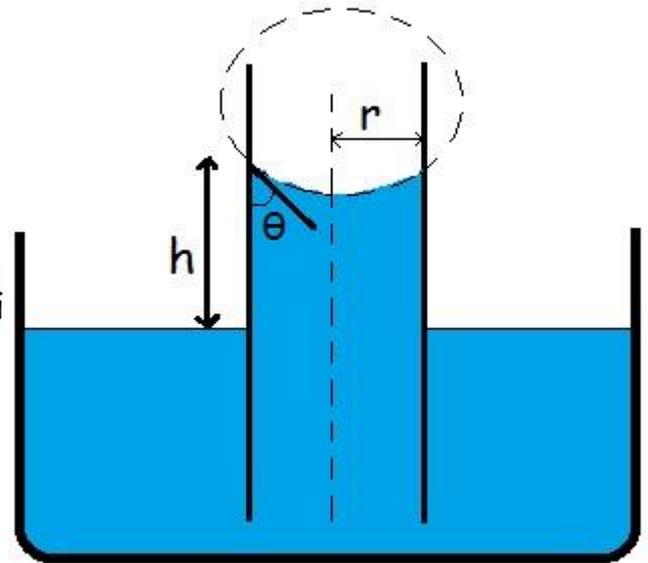
$\gamma$  : la tension superficielle du liquide

$\theta$  : l'angle de contact entre la liquide et la paroi de tube

$\rho$  : la masse volumique du liquide

$r$  : le rayon du tube

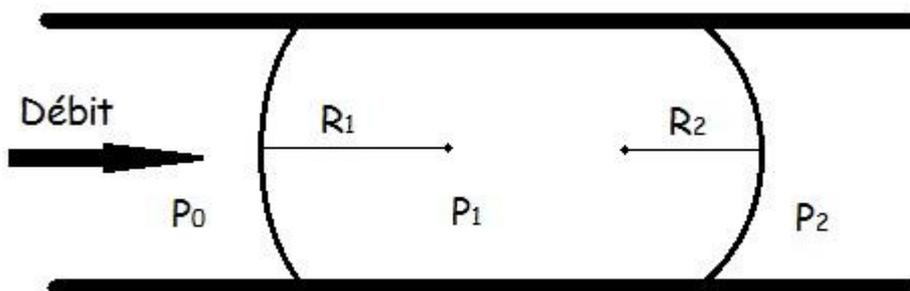
$g$  : l'accélération de pesanteur



condition de validité : il faut que le diamètre du tube soit petit devant la longueur capillaire, qui vaut typiquement 2 mm pour de l'eau à la température et pression ambiantes

## Embolie capillaire

Considérons une bulle gazeuse obstruant un capillaire sanguin



Les pressions sont respectivement :

$P_0$  en amont de la bulle

$P_2$  en aval de la bulle

$P_1$  pression à l'intérieur de la bulle

Par suite de la déformation de la bulle , les rayons de courbures  $R_1$  et  $R_2$  des interfaces amont et aval sont tel que :  $R_1 \gg R_2$

D'après la loi de Laplace :

$$P_1 - P_0 = \frac{2\gamma}{R_1} \quad \text{et} \quad P_1 - P_2 = \frac{2\gamma}{R_2}$$

$$\Rightarrow P_2 - P_0 = 2\gamma \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \approx -\frac{2\gamma}{R_2}$$

La pression aval  $P_2$  est donc inférieure à la pression en amont  $P_0$  et pour un grand nombre de bulles , la circulation peut être bloquée