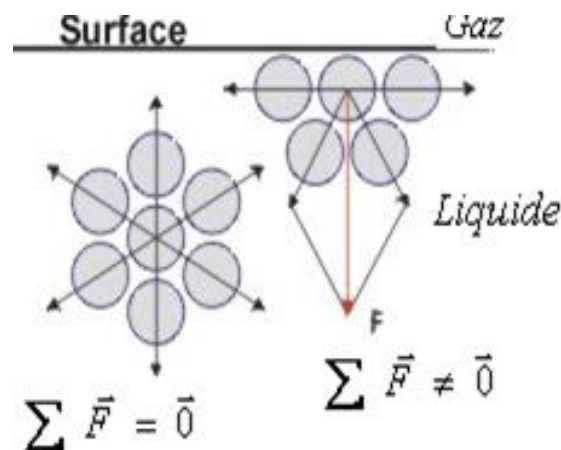


III-1 Introduction :

Contrairement aux gaz, un corps à l'état liquide n'occupe pas tout le volume disponible, ceci à cause des phénomènes de cohésion. La cohésion des liquides est due aux forces d'attraction interatomiques ou intermoléculaires. Ces phénomènes de cohésion tendent à minimiser la surface libre d'un liquide, cette surface semble se comporter comme une membrane élastique tendue, où il existe un phénomène de tension superficielle. A cet égard, plusieurs exemples permettent d'illustrer l'influence de la tension de surface tels que: une aiguille à coudre ou un trombone qui peuvent flotter librement dans un verre d'eau, lorsqu'on met notre main sur la surface d'un liquide et on l'enlève progressivement, nous sentons que le liquide nous attire, certains insectes peuvent marcher sur l'eau comme s'ils glissaient sur un film souple, on observe des ménisques sur les bords des verreries (verres, pipettes, récipients...) contenant un liquide et la nature de gouttes de pluie qui ont une forme sphérique.

III-2 Interface liquide-gaz:

Au niveau microscopique, chaque molécule est soumise à des forces attractives de la part de toutes celles qui l'entourent. La résultante de ses forces agissant sur la molécule située à l'intérieur de liquide ou de gaz est nulle. Il y a alors un équilibre statistique des forces $\sum \vec{F} = \vec{0}$. Au contraire, pour les molécules situées à l'interface du liquide (i.e. à une distance de la surface inférieure au rayon moléculaire), elles sont soumises à des forces d'attraction dont la résultante n'est pas nulle $\sum \vec{F} \neq \vec{0}$ car la répartition autour n'est pas isotropique. Ainsi, le liquide exerce donc sur ces molécules de surface une force de rappel vers l'intérieur du liquide (voir la figure ci-dessous). Afin de minimiser l'aire de l'interface pour diminuer l'énergie potentielle.[4][5][6]

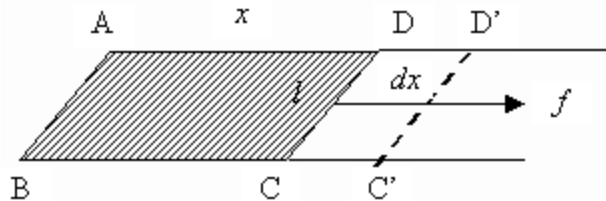


Chapitre III : Etude des interfaces liquide-gaz (phénomène de surfaces)

a- Tension superficielle

1- Force de tension superficielle

Afin d'obtenir l'expression de la force de tension superficielle, nous supposons une lame savonneuse rectangulaire de longueur l et de largeur x formée dans un fin cadre métallique $ABCD$ dont l'un des côtés CD est mobile.



On note ici que la surface totale de la lame, compte tenu de ses deux faces est $2.x.l$. La lame a tendance à se rétracter, pour maintenir sa surface constante, il faut exercer sur CD une force f qui est évidemment proportionnelle à sa longueur. Cette force est appelée: Force de tension superficielle : $f = \sigma.2l$ [N]

Où σ [N/m] est une constante de chaque liquide dite: constante de tension superficielle.

On donne quelques résultats expérimentaux de la tension superficielle en mN/m à différentes températures :

Liquide	0°	20°	40°
Eau	75,64	72,75	69,56
Méthanol	24,50	22,65	20,90
Ethanol	24,05	22,27	20,60
Acétone	26,21	23,70	21,16

Remarques

- 1- La constante σ dépend de la température T et elle décroît lorsque T augmente.
- 2- De point de vue énergétique: pour déplacer le côté CD d'une longueur dx dans l'exemple précédent il faut fournir le travail: $d\omega = F.dx$. Ce déplacement, à température et volume constant, correspond à un accroissement de la surface de liquide de $dS = 2l.dx$.

$$\text{Donc } \sigma = d\omega / dS \quad [J / m^2].$$

- 3- L'énergie de tension superficielle est donnée par $E_s = \sigma.S$

Chapitre III : Etude des interfaces liquide-gaz (phénomène de surfaces)

2- Energie de cohésion

Dans un liquide pur, les forces d'attractions intermoléculaires sont appelées: *forces de cohésion*. Si on veut séparer ces colonnes (ensemble de molécules), on doit fournir une énergie. Cette énergie s'appelle : *énergie de cohésion* qui est égale à

$$\omega = E_{S_f} - E_{S_i} = \sigma(S_f - S_i).$$

Exemple

De quelle hauteur doit-on laisser tomber une goutte d'eau de diamètre $D = 1 \text{ mm}$ sur une surface hydrophobe (qui ne peut pas être mouillée par l'eau) pour qu'elle se fragmente en 8 gouttelettes identiques?

On donne: $\sigma_{\text{eau}} = 73 \text{ mJ.m}^{-2}$, $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$, $g = 10 \text{ ms}^{-2}$.

Calcul de la hauteur nécessaire pour que la goutte se fragmente en 8 gouttelettes identiques :

Par définition l'énergie de tension superficielle ω_s est donnée par

$$\omega = E_{S_f} - E_{S_i} = \sigma(S_f - S_i)$$

On note que, pour pulvériser ou fragmenter la goutte, il faut que l'énergie de tension superficielle ω_s égale à l'énergie mécanique $\omega_{\text{méc}}$:

$$\omega_s = \omega_{\text{méc}} \Rightarrow \sigma(S_f - S_i) = mgh.$$

Avec $S_i = 4\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi D^2$ et $S_f = 8S = \pi d^2$.

Avec

S_f : représente la surface totale des gouttes à l'état final.

S_i : est la surface de la goutte dans l'état initiale.

S : est la surface de la gouttelette de diamètre d .

Selon la condition de conservation de la masse, nous écrivons :

$$m_i = m_f \Rightarrow V_i = V_f \Rightarrow \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3 = 8 \cdot \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 \Rightarrow d = \frac{D}{2}.$$

Alors, d'après le résultat précédent on obtient:

$$h = \frac{\sigma(S_f - S_i)}{mg} = \frac{\sigma\pi\left(8\frac{D^2}{4} - D^2\right)}{mg} = \frac{\sigma\pi D^2}{mg} = \frac{6 \cdot \sigma}{\rho g D}.$$

Application numérique $h = \frac{6 \cdot \sigma}{\rho g D} = \frac{6 \cdot 73 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 4,38 \text{ cm}.$

Chapitre III : Etude des interfaces liquide-gaz (phénomène de surfaces)

b- Pression de Laplace et ses applications

Dans cette partie, nous allons voir la loi de Laplace et quelles sont ses applications et son utilité dans la description de quelques phénomènes biophysique[4][5][6].

1- Les bulles d'air dans un liquide

Pour former une bulle d'air de rayon R à l'intérieur d'un liquide de tension superficielle σ , il faut que la surpression ΔP s'exerçant sur la membrane sphérique de la bulle d'air soit positive. C'est à dire, la pression interne P_{int} dans la bulle soit supérieure à celle du milieu externe P_{ext} . La loi de Laplace, nous permet de donner l'expression de cette surpression $\Delta P = P_{\text{int}} - P_{\text{ext}}$ en fonction de R et de σ . En effet, d'une part, pour augmenter le volume V de la goutte de $dV = SdR = 4\pi R^2 dR$ (on augmente le rayon R de la goutte de dR), on doit fournir un travail des forces de pression $d\omega$ au cours de la variation de volume telle que $d\omega = \Delta P \cdot dV = \Delta P 4\pi R^2 dR$.

D'autre part, on note que cette expression de travail est toute à fait semblable (égale) à celle de travail des forces de tension superficielle $d\omega = \sigma \cdot dS = 8\pi R dR$.

Finalement, après comparaison, on constate que l'expression de la surpression à l'intérieur d'une bulle d'air dans un liquide est donnée par $\Delta P = 2\sigma / R$.

Exemple

Une bulle d'air sphérique, de diamètre 0,02 mm, est située à 10m de profondeur dans une cuve de liquide de masse volumique 10^3kg.m^{-3} . La pression absolue à la surface de ce liquide est de 10^5 Pascal. La tension superficielle de liquide est $75 \cdot 10^{-3} \text{N.m}$.

Calculer la pression absolue à l'intérieur de la bulle ?

D'une part, d'après la loi de Laplace, on a $\Delta P = P_{\text{int}} - P_{\text{ext}} = P_{\text{int}} - P_a = 2\sigma / r$.

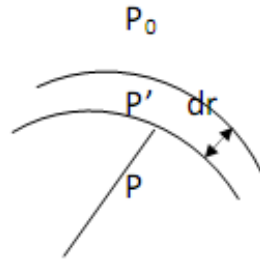
En d'autre part, selon la loi hydrostatique on a : $\Delta P = P_a - P_{\text{atm}} = \rho gh$

On trouve alors que $P_{\text{int}} = P_{\text{atm}} + (2\sigma / r) + \rho gh$.

Application numérique : $P_{\text{int}} = 10^5 + \frac{2 \cdot 75 \cdot 10^{-3}}{10^{-5}} + 10^3 \cdot 10 \cdot 10 = 2,15 \cdot 10^5 \text{ Pascal}$

2- Les bulles de savon dans l'air

Soit une bulle savonneuse de tension superficielle σ et de rayon r sur la couche intérieure et de rayon $r+dr$ sur la couche extérieure.



Avec le même raisonnement que le cas précédent, on peut écrire la surpression due à la couche extérieure comme $P' - P_0 = \frac{2\sigma}{r + dr}$ et la surpression due à la couche intérieure par $P_0 - P = 2\sigma / r$ qui nous donnent la surpression finale de la bulle de savon dans l'air par la relation suivante $\Delta P = 4\sigma / r$, où nous avons supposé que $dr \ll r$.

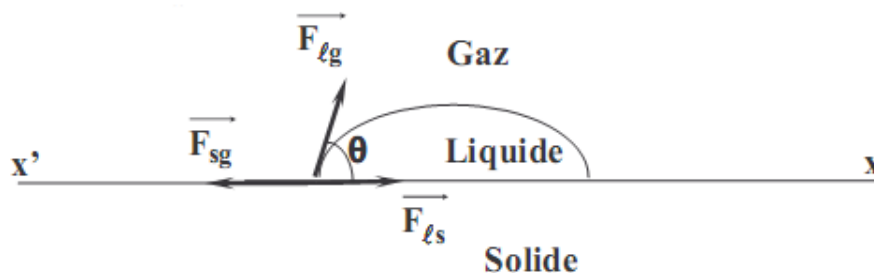
3- Loi de Jurin

Avant de commencer l'étude de cette loi, il est très commode de bien comprendre le rôle de l'angle de contact ou de raccordement liquide-solide. A cet égard, on note qu'il est bien connu que lorsqu'on dépose une goutte de liquide sur une plaque solide plane ou horizontale, il existe trois forces de tension superficielles agissant sur les surfaces de séparation qui se rejoignent à la périphérie de la goutte:

\vec{F}_{lg} est la force exercée sur les molécules de liquide situées sur le pourtour de la goutte par les autres molécules de gaz située sur la surface de séparation liquide-gaz.

\vec{F}_{sg} est la force exercée sur les molécules de liquide situées sur le pourtour de la goutte par les autres molécules de solide située sur la surface de séparation solide-gaz.

\vec{F}_{ls} est la force exercée sur les molécules de liquide situées sur le pourtour de la goutte par les autres molécules de gaz située sur la surface de séparation liquide-solide.



Au point d'équilibre la résultante de ces forces s'écrit: $\vec{F}_{lg} + \vec{F}_{sg} + \vec{F}_{ls} = \vec{0}$. Après une simple projection sur l'axe XX' , on obtient la condition d'équilibre suivante

$F_{sg} = F_{lg} \cos \theta + F_{ls}$ qui peut être réécrite sous la forme :

$$\sigma_{sg} = \sigma_{lg} \cos \theta + \sigma_{ls}.$$

Chapitre III : Etude des interfaces liquide-gaz (phénomène de surfaces)

Remarque

- Si l'angle de raccordement $\theta=0^\circ$, le liquide mouille parfaitement le solide (par exemple de l'eau sur du verre propre)



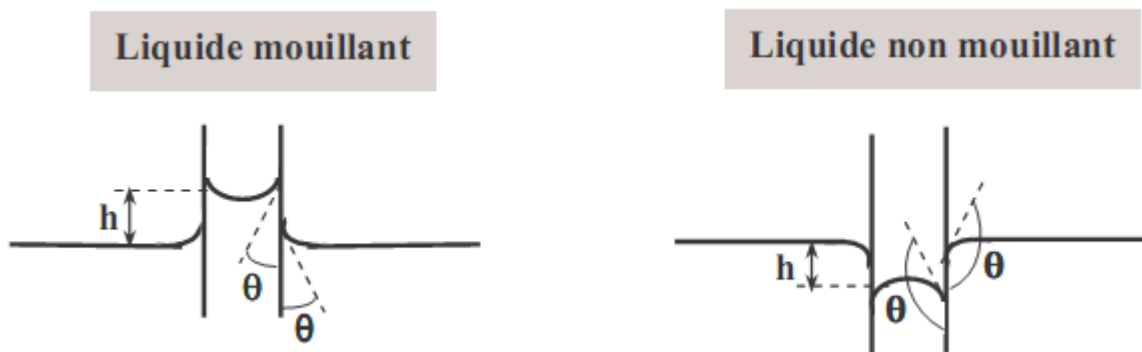
- Si $\theta < 90^\circ$, le liquide mouille imparfaitement le solide (par exemple l'eau sur du verre sale)



- Si $\theta > 90^\circ$, le liquide ne mouille pas le solide (par exemple le mercure sur du verre).



On remarque aussi, que ce phénomène de mouillage se produit également dans le cas d'une paroi de solide verticale, où l'on observe une ascension (avec un ménisque concave vers l'extérieur) ou une descente (avec un ménisque convexe vers l'intérieur).



En 1717 le médecin anglais *James Jurin* a montré que lorsqu'on plonge un tube capillaire de rayon R , ouvert aux deux extrémités, dans un liquide de tension superficielle σ , celui-ci monte ou descend dans le tube d'une hauteur h . où il a constaté que la pression dans le liquide situé juste en dessous du ménisque (courbure de liquide) obéit simultanément à deux lois : la loi hydrostatique dans le liquide s'écrivant la relation de l'écart de pression sous le ménisque par $\Delta P = P_{atm} - P_{ext} = \rho g h$ et la loi de Laplace à travers l'interface constituant le ménisque, qui nous permet de donner l'expression de la surpression

$$\Delta P = P_{int} - P_{ext} = P_{atm} - P_{ext} = \frac{2\sigma}{r}$$