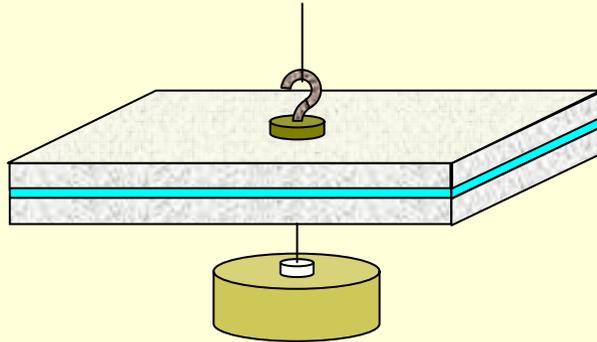


Chapitre V : Tension superficielle et capillarité

*B. Bonnel, Octobre 2006
(version initiale :
N. Lebrun et D. Dangoisse,
Octobre 2004)*

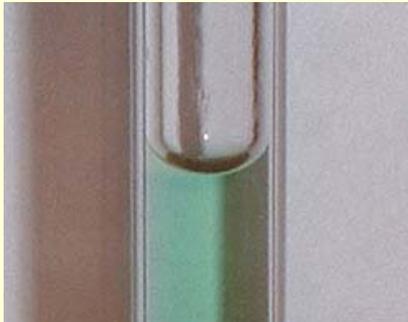
V-1 Tension superficielle

1 - Quelques observations



Deux plaques de verre entre lesquelles on a déposé un mince film d'eau semblent collées l'une à l'autre. La plaque inférieure peut supporter une masse de plusieurs centaines de grammes avant de tomber.

Dans un tube, la surface libre de l'eau forme un ménisque près des bords.



<http://perso.wanadoo.fr/philippe.boeuf/robert/physique/mouille.htm>

Une punaise (ou une aiguille d'acier) flotte à la surface de l'eau.



N. Vandewalle et al., Université de Liège

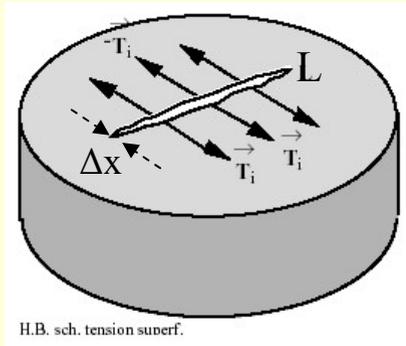
Certains insectes sont capables de se déplacer sur l'eau.



<http://blog.empyree.org/?Galerie-photo>

2 - Force de tension superficielle

Les phénomènes observés précédemment sont dûs à l'existence de forces existant à la surface libre du liquide :



Imaginons qu'on veuille créer à la surface libre d'un liquide une ouverture en forme de fente, de longueur L et de largeur Δx très petite : il faut pour cela exercer en plusieurs points de l'ouverture des forces T_i , qui doivent être des **forces de traction** : En effet, le liquide tend à s'opposer à cette opération en développant une force \vec{F} de norme F qui s'oppose aux forces T_i .

La norme F de la force \vec{F} est proportionnelle à la longueur L de la fente. On peut donc écrire

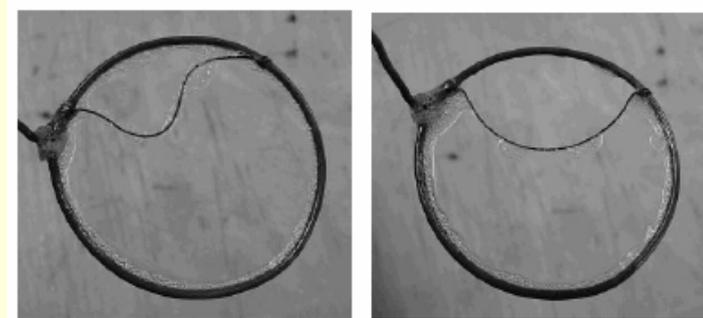
$$F = \gamma L$$

Le coefficient γ s'appelle **tension superficielle** et se mesure en **N/m**.

Expérience faite en salle de TP :

Un fil de coton est placé sur un anneau que l'on plonge dans de l'eau savonneuse. Si le film de savon remplit tout l'anneau, le fil reste détendu. Si on perce l'un des deux côtés, le fil se tend.

La tension superficielle est la même en tout point de la surface du film ; la force F est normale en tout point du fil de coton : c'est elle qui tend le fil.



La tension superficielle dépend du liquide, du milieu qui surmonte sa surface libre et de la température.

Quelques valeurs de γ pour un liquide placé dans l'air :

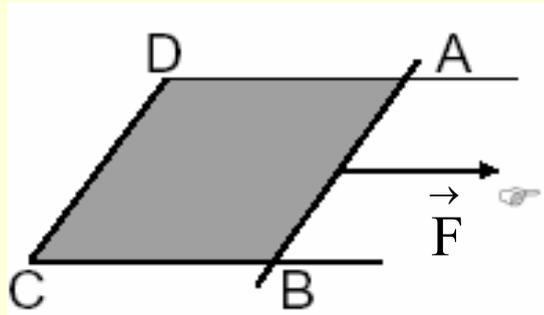
liquide	γ (N·m ⁻¹) à 20 °C
eau (à 20 °C)	$73 \cdot 10^{-3}$
eau (à 0 °C)	$75,6 \cdot 10^{-3}$
huile végétale	$32 \cdot 10^{-3}$

liquide	γ (N·m ⁻¹) à 20 °C
éthanol	$22 \cdot 10^{-3}$
éther	$17 \cdot 10^{-3}$
mercure	$480 \cdot 10^{-3}$

Attention, piège !

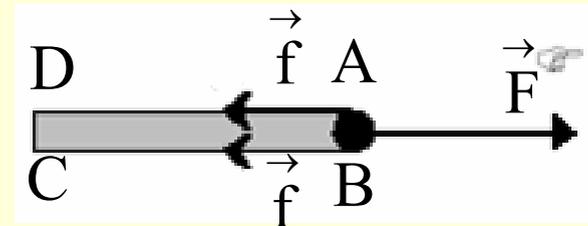
Soit un cadre filaire ABCD dont le côté AB, de longueur L , peut glisser sur DA et CB. Plongé initialement dans de l'eau savonneuse, ce cadre est rempli d'une lame mince liquide. On maintient le fil mobile en équilibre en exerçant sur lui une force \vec{F} .

Le liquide tire AB vers DC avec une force f **sur chaque face de la lame** :



$$f = \gamma L$$

Mais la lame possède deux faces...



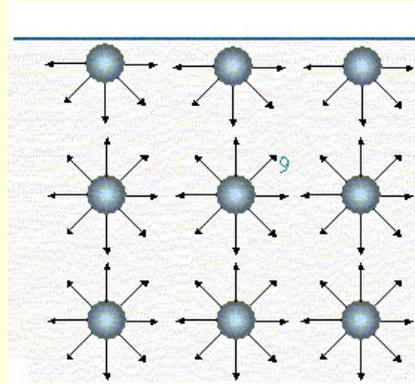
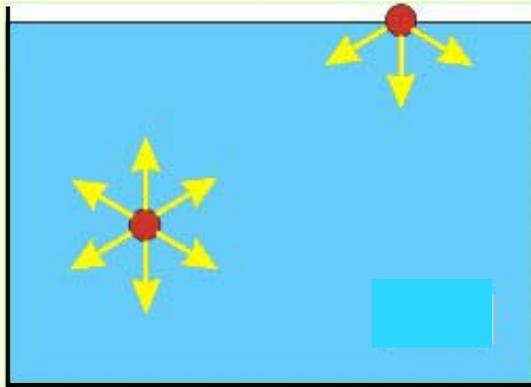
Donc :

$$F = 2 f = 2 \gamma L$$

Pour une face de la lame de savon.

3 - Aspect énergétique

a . Point de vue microscopique



<http://perso.orange.fr/philippe.boeuf/robert/physique/goutte-eau.htm>

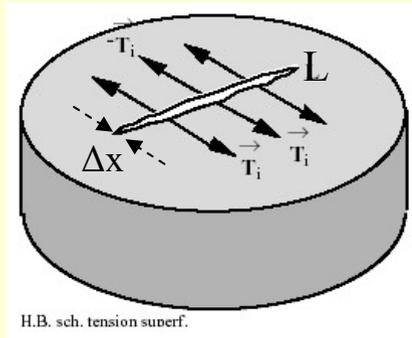
http://wwwens.uqac.ca/chimie/Chimie_physique/Chapitres/c hap_4.htm

Les deux schémas ci-dessus représentent les forces qui agissent sur les molécules plongées dans un liquide, et sur celles qui sont au voisinage de sa surface libre.

Dans un liquide, on peut imaginer que les molécules qui sont à l'intérieur du liquide sont soumises à des forces différentes de celles subies par les molécules qui sont situées à la surface du liquide : en effet, dans la phase liquide contrairement à ce que l'on a vu en phase gazeuse, les molécules se touchent. Bien souvent, ces molécules ne sont pas neutres sur le plan électrique. C'est le cas tout particulièrement de l'eau qui porte un moment dipolaire important. Ces moments dipolaires interfèrent les uns avec les autres de telle sorte qu'au sein du liquide une molécule est l'objet de tensions orientées dans toutes les directions de la sphère qui l'entoure. Sur la surface du liquide, ces tensions sont limitées à la demi sphère située sous la surface. Il s'ensuit que la résultante de ces forces **ne peut pas être nulle**.

Cette résultante est nécessairement dirigée vers le bas, puisque (sauf s'il y a évaporation) le liquide ne s'échappe pas du récipient. Ce phénomène se traduit par l'apparition d'une **tension de surface caractéristique de chacun des liquides**. On peut dire qu'il se forme un film de molécules en surface qui n'a pas plus tout à fait la même structure que celle que l'on retrouve au sein du liquide.

b . Energie potentielle de surface



Revenons à la figure déjà vue en V-2. Pour “ouvrir” une fente à la surface du liquide, il faut apporter de l'énergie, pour lutter contre la force \vec{F} qui s'oppose à cette action.

Cette énergie est mesurée au signe près par le travail de \vec{F} au cours de l'accroissement de surface. Au signe près, car \vec{F} effectue un travail résistant et que ceci accroît l'énergie du liquide.

Si l'on oublie les problèmes de signe, on peut simplement écrire l'augmentation d'énergie apporté à la surface comme

$$\Delta E = F \cdot \Delta x = \gamma L \cdot \Delta x, \text{ soit}$$

$$\Delta E = \gamma \cdot \Delta S$$

Ainsi la tension superficielle γ peut aussi se définir comme le rapport de l'augmentation d'énergie potentielle de surface par unité de surface accrue.

$$\gamma = \frac{\Delta E}{\Delta S}$$

La tension superficielle peut donc aussi se mesurer en **Joules / m²**.

La relation $\Delta E = \gamma \cdot \Delta S$ peut aussi s'écrire $\mathbf{E} = \gamma \cdot \mathbf{S}$: L'énergie potentielle de surface d'un liquide est proportionnelle à la surface libre de ce liquide. Or une condition de stabilité d'équilibre est que l'énergie potentielle soit la plus basse possible (pensez à l'énergie potentielle de pesanteur). Il s'ensuit que

La surface libre d'un liquide se place naturellement pour être la plus petite possible.

L'étude microscopique vue ci-dessus suggérait déjà cette notion de surface minimale.

Exemple 1 : *pourquoi les gouttes d'eau (ou de whisky) sont-elles sphériques ?*



<http://forum.hardware.fr/hardwarefr/Photonumerique>

Hergé, "on a marché sur la Lune", page 5

Parce que, pour un volume de liquide donné, c'est cette forme qui donne une enveloppe de surface minimale.

Exemple 2 : *pourquoi, lorsqu'on rapproche deux gouttes d'eau, celles-ci se fondent-elles en une seule ?*

En "cassant" une gouttelette en deux, on crée de la surface : deux sphères de volume $V/2$ ont une aire plus grande qu'une sphère de volume V . Si les deux gouttelettes se rencontrent, elles ont donc tendance à fusionner pour minimiser leur surface.



Réunion de deux gouttes pour réduire la surface et donc l'énergie

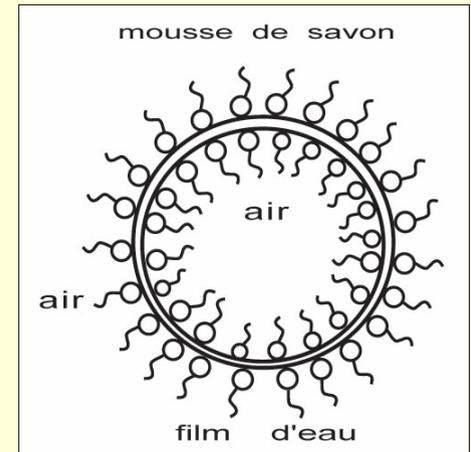
4 – Application : agents tensioactifs

Les agents tensioactifs abaissent la valeur de γ des liquides dans lesquels ils sont ajoutés et les rendent **mouillants, moussants, détergents, émulsifiants...**

Si l'énergie de surface entre un solide et l'eau est importante, l'eau reste sous forme de gouttelettes : certains tissus laissent glisser l'eau. En ajoutant un agent tensioactif, l'énergie de surface diminue, la goutte s'étale et peut pénétrer dans le tissu.

Les émulsifiants sont des tensioactifs : pour garder l'huile d'une vinaigrette sous la forme de petites gouttelettes, ou *émulsion*, il faut diminuer la tension superficielle afin que le gain d'énergie de surface lorsque deux gouttes se réunissent soit faible.

Les tensioactifs permettent de stabiliser les bulles. Une bulle, formée dans un verre d'eau avec une paille, crève, lorsqu'elle atteint la surface. En ajoutant du sirop dans l'eau, la bulle reste à la surface. L'augmentation de surface due à la présence de la bulle ne provoque pas une grande augmentation d'énergie car γ est faible. C'est pourquoi les lessives, qui contiennent des agents tensioactifs pour favoriser la pénétration de l'eau dans les tissus, moussent facilement.



Une mousse. Représentation d'un film d'eau dans une double couche de tensioactifs qui assure la stabilité de la bulle. © P. Le Perchec

V- 2 Suppression dans les gouttes – Loi de Laplace (1749 – 1827)

Soit une goutte sphérique de rayon R : les forces de tension superficielle, qui sont dirigées vers l'intérieur de la goutte, exercent une compression à l'intérieur de celle-ci. La pression p_i dans la goutte est donc supérieure à celle du milieu extérieur, p_0 . Cette compression est, bien sûr, d'autant plus grande que les forces superficielles sont grandes, donc que la tension superficielle γ est élevée.

La loi de Laplace permet de calculer la différence $p_i - p_0 = \Delta p$ en fonction de R et de γ .

Si on augmente le rayon R de la goutte de dR , son volume augmente de $S \cdot dR = 4\pi R^2 dR$, où S est la surface de la goutte.

Travail des forces de pression au cours de cette opération :

$$\begin{cases} dW_0 = - p_0 4\pi R^2 dR \\ dW_i = p_i 4\pi R^2 dR \end{cases}$$

Le travail total est donc : $dW = (p_i - p_0)4\pi R^2 dR$

Ce travail est égal à celui des forces de tension de surface :

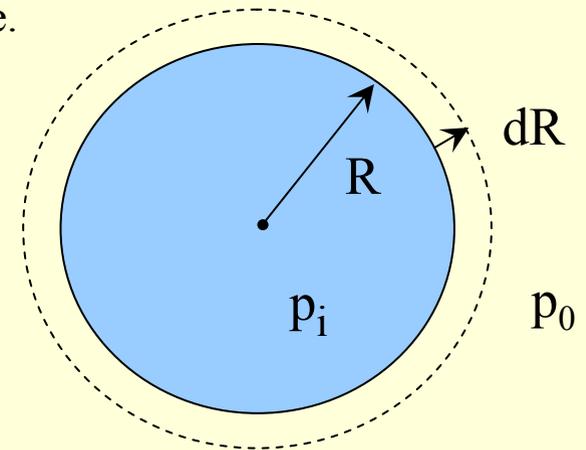
$$dW = \gamma dS$$

La surface d'une sphère vaut : $S = 4\pi R^2$. Son augmentation dS est égale à : $dS = 8\pi R dR$.

Il s'ensuit :

$$\Delta p = p_i - p_0 = \frac{2\gamma}{R}$$

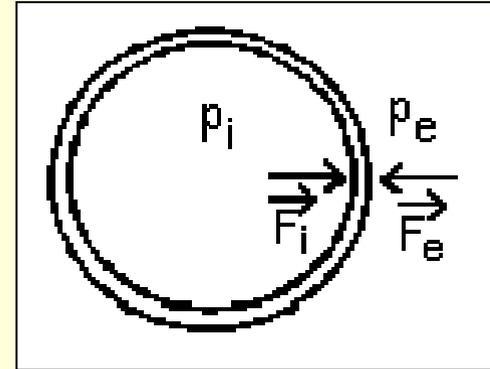
La surpression Δp est une fonction inverse du rayon de la goutte.



Suppression dans les bulles

Attention, piège ! Revoir la planche 3.

Une bulle est formée d'une membrane comportant deux surfaces (interne et externe) supposées de même rayon R , chacune d'elles étant le siège d'une tension superficielle. Les forces de pression qui ont globalement tendance à faire dilater la bulle, doivent donc compenser les forces de tension superficielle sur les deux interfaces.



Chaque traversée de surface amène un $\Delta p = 2 \gamma / R$

On a donc :

$$\Delta p = p_i - p_0 = \frac{4\gamma}{R}$$

La surpression intérieure est donc d'autant plus grande que le rayon de la bulle est petit.



Lorsque deux bulles de diamètres différents sont reliées, c'est la plus petite qui se dégonfle dans la plus grande.

Application en Biologie : la respiration chez les êtres vivants

La surface des poumons est augmentée par la présence des alvéoles.

La dilatation des poumons requiert un travail considérable car la tension superficielle qui colle les membranes alvéolaires est élevée.

Pour faciliter la ventilation, des surfactants réduisent la tension superficielle à la surface interne des alvéoles.

La présence de ces surfactants réduit le travail nécessaire à la dilatation des poumons :

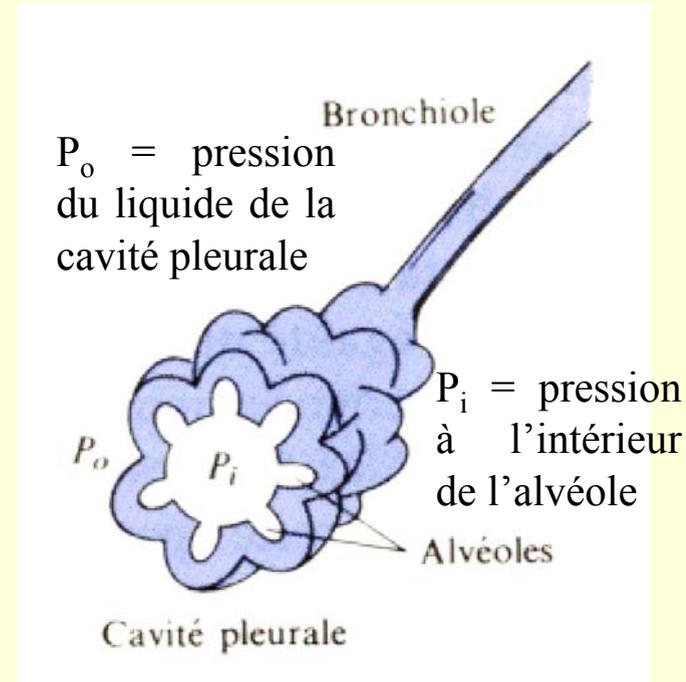
Lorsque l'alvéole se dilate, la concentration des surfactants par unité de surface diminue, la tension superficielle augmente. La résistance à la dilatation augmente et protège les alvéoles contre l'éclatement.

$$(p_i - p_o) r = r \cdot \Delta p = 2\gamma$$

Expiration $\rightarrow p_o$ augmente, Δp et r diminuent

Inspiration $\rightarrow p_o$ diminue, Δp et r augmentent

r est le rayon d'une alvéole (supposée sphérique).



Kane/Sternheim Physique InterEditions

La tension superficielle γ doit être modifiée pour que l'équilibre soit conservé.

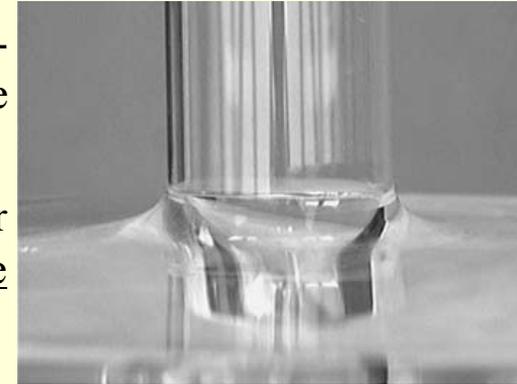
V-3 Angle de contact et capillarité

Photos : <http://perso.wanadoo.fr/philippe.boeuf/robert/physique/mouille.htm>

Schémas : S. Giasson, Université de Montréal

1 - Observations

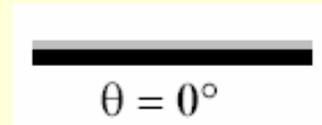
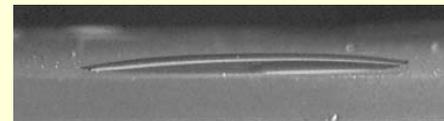
- Dans un tube de verre étroit (tube à essai), l'interface air-liquide est bombée vers le bas : la surface forme un ménisque concave ; de plus, l'eau s'élève le long des parois,.
- L'eau monte aussi le long des fibres d'une feuille de papier trempée dans un verre d'eau. Il peut donc avoir ascension de l'eau, malgré les forces de gravité.



2 - Interprétation

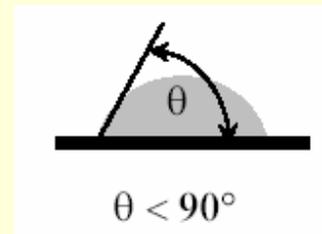
- Une goutte de liquide déposée sur une plaque solide plane et horizontale peut :

- Soit s'étaler, on dit que le **liquide mouille parfaitement** le solide.

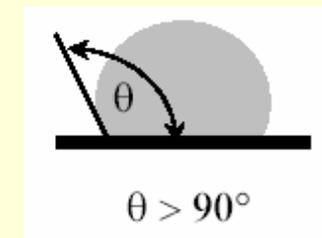
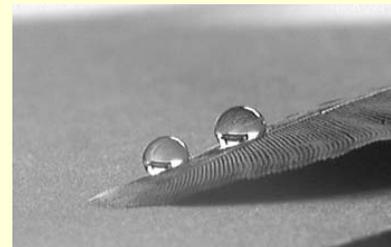


- soit former une lentille, avec deux cas de figure :

→ $\theta < 90^\circ$:
le liquide **mouille imparfaitement** le solide



→ $\theta > 90^\circ$:
le liquide **ne mouille pas** le solide



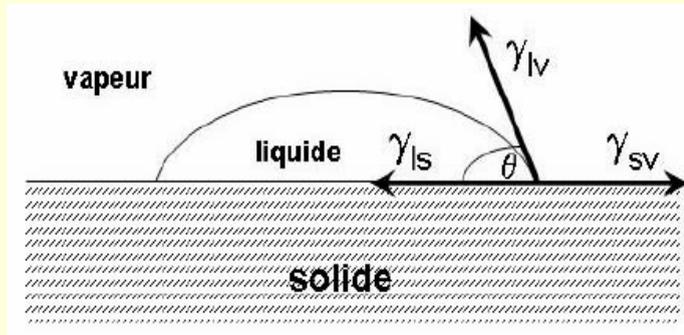
(Goutte d'eau sur les plumes d'un canard enduites d'une substance grasse hydrophobe).

3 - Modélisation

L'angle θ s'appelle **angle de contact**. Il dépend à la fois du liquide, du solide qui le supporte ou le contient, et du gaz qui environne les deux. Trois paramètres sont donc à prendre en compte :

- La tension superficielle γ_{sl} entre le solide et le liquide ;
- La tension superficielle γ_{lv} entre le liquide et sa phase vapeur ;
- La tension superficielle γ_{sv} entre le solide et la vapeur.

Le schéma ci-dessous montre les trois forces en présence, représentées par leurs tensions superficielles correspondantes :



L'équilibre de la goutte se traduit par

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta, \text{ soit}$$

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}}$$

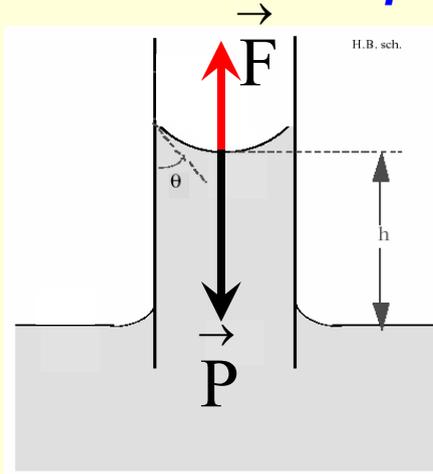
Ainsi, les phénomènes de capillarité sont liés à un équilibre entre les énergies de surface liquide –vapeur, liquide –solide et solide-vapeur.

Dans le cas du mouillage, la configuration adoptée est celle qui minimise la somme des énergies d'interface entre ces trois milieux. Le schéma montre que l'énergie d'interface solide/liquide doit être plus faible que l'énergie d'interface solide/vapeur.



Goutte d'eau sur une feuille de cactus

4 - Ascension capillaire (du latin *capillus* : cheveu)



*Cours de Physique, H. Broch,
Université de Sophia-Antipolis*

Un tube de verre de faible diamètre est plongé dans un liquide mouillant, de l'eau par exemple. Dans le tube, le niveau du liquide est supérieur au niveau de la surface libre du récipient. Le ménisque concave fait un angle θ avec la surface du tube.

L'ascension capillaire est due aux forces superficielles appliquées en tout point du contour du ménisque. La résultante F de ces forces équilibre le poids P du liquide soulevé. L'élévation du liquide dans le tube compense la différence de pression entre les deux côtés de la paroi. (Loi de Laplace).

Le poids de la colonne de liquide dans le tube $P = mg = \pi R^2 h \rho g$
est équilibré par la force de tension superficielle $F = 2\pi R \gamma \cos \theta$
s'exerçant sur la ligne de raccordement entre le liquide et la paroi du tube.

On obtient ainsi la relation

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{R\rho g}$$

que l'on appelle **Loi de Jurin**

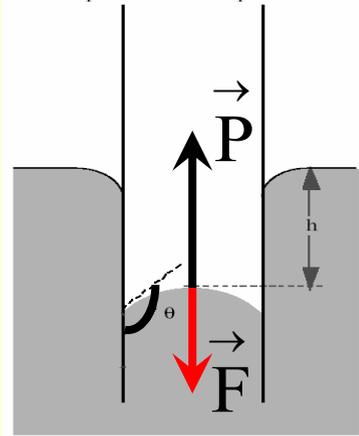
R : rayon intérieur du tube, ρ : masse volumique du liquide, g : accélération de la pesanteur,
 γ : tension superficielle du liquide, θ : angle de raccordement liquide/solide

$\cos \theta$: parce que seule la composante verticale contribue à la résultante F .

Dans le cas du mouillage parfait, $\cos \theta = 1$.

Remarque :

Si l'angle θ dépasse 90° , la loi de Jurin donne h négatif. On parle alors de **dépression capillaire**. C'est le cas du mercure au contact du verre et de tous les liquides non mouillants.



Cette fois les forces de cohésion sont supérieures aux forces d'adhésion, le liquide ne mouille pas les parois du tube.

Le niveau du liquide s'abaisse dans le tube au dessous du niveau de la surface libre du récipient. Le ménisque est convexe et forme l'angle $\theta > 90^\circ$ avec la paroi du tube.

Les forces de tension superficielle tirent le liquide vers le bas. La résultante F de ces tensions équilibre maintenant le poids P du liquide manquant.

Quelques valeur de l'angle de contact :

Interface dans l'air	Ange de contact θ	Ascension capillaire
Eau - verre	0	↑
Liquide org. - verre	0	↑
Alcool - verre	0	↑
Mercure - verre	140	↓

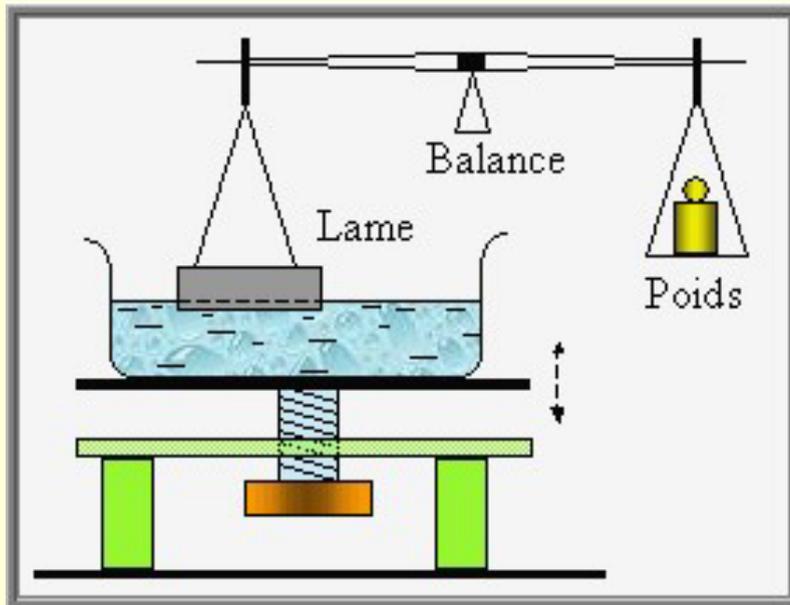
Interface dans l'air	Ange de contact θ	Ascension capillaire
Kérozène - verre	26	↑
Eau - paraffine	107	↓
Eau - acier	90	nulle
Eau - bois	0	↑

V-4 . Mesure de la tension superficielle

Méthode du capillaire (voir en TP)

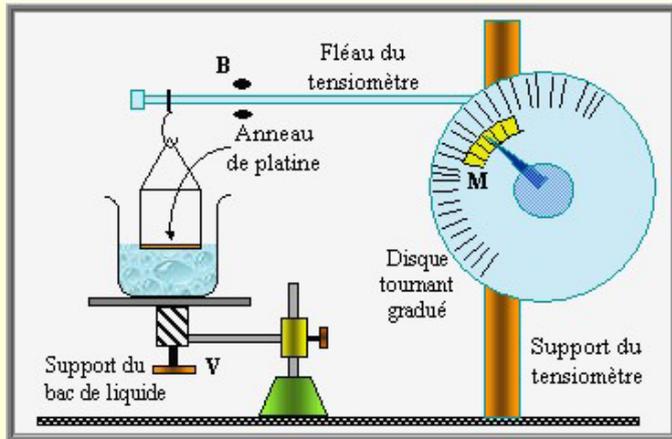
En appliquant la loi de Jurin, on déduit une valeur de γ de la mesure de la dénivellation h et de la connaissance des autres paramètres.

Traction sur une lame immergée



On installe sur une extrémité d'un fléau de balance une lame métallique dont on connaît la masse. Une fois l'équilibre atteint, la lame étant hors du liquide, à l'aide d'une vis sans fin on remonte lentement un bac chargé du liquide. Au moment où il y a contact entre la lame et le liquide, une force d'attraction se développe et la lame plonge dans le liquide. On doit alors augmenter la pesée sur l'autre plateau de la balance pour ramener le fléau à sa position d'équilibre. La différence de masse entre ces deux pesées donne accès à la mesure de la tension de surface du liquide.

Arrachement d'un anneau immergé



On remplace la lame précédente par un anneau en platine. Cette fois on immerge l'anneau dans le liquide. On positionne le fléau de la balance à l'équilibre. Avec la vis sans fin on abaisse lentement le réservoir. Lorsque l'anneau tend à sortir du liquide, la tension de surface se développe : l'anneau est attiré vers le liquide et suit le mouvement descendant du niveau de liquide. Il faut alors ajouter des poids sur l'autre plateau de la balance pour le maintenir en position horizontale, jusqu'au moment où on obtient l'arrachement.

Méthode du stalagmomètre (voir en TP)

Lorsqu'un liquide de masse volumique ρ s'écoule par un tube fin, le poids des gouttes obtenues est proportionnel à la tension superficielle γ du liquide et au rayon extérieur R du tube : $mg = kR\gamma$.

On compte le nombre N de gouttes qui s'écoulent pour un volume V donné : $N = V\rho g / kR\gamma$.

Le stalagmomètre est ensuite étalonné avec un liquide de tension γ_0 connue : $N_0 = V\rho_0 g / k R\gamma_0$

On en tire :

$$\gamma = \gamma_0 \frac{\rho N_0}{\rho_0 N}$$



Goutte se détachant d'un robinet