

Forces capillaires: mieux les comprendre?

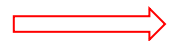
Laurence Viennot
laurence.viennot@univ-paris-diderot.fr



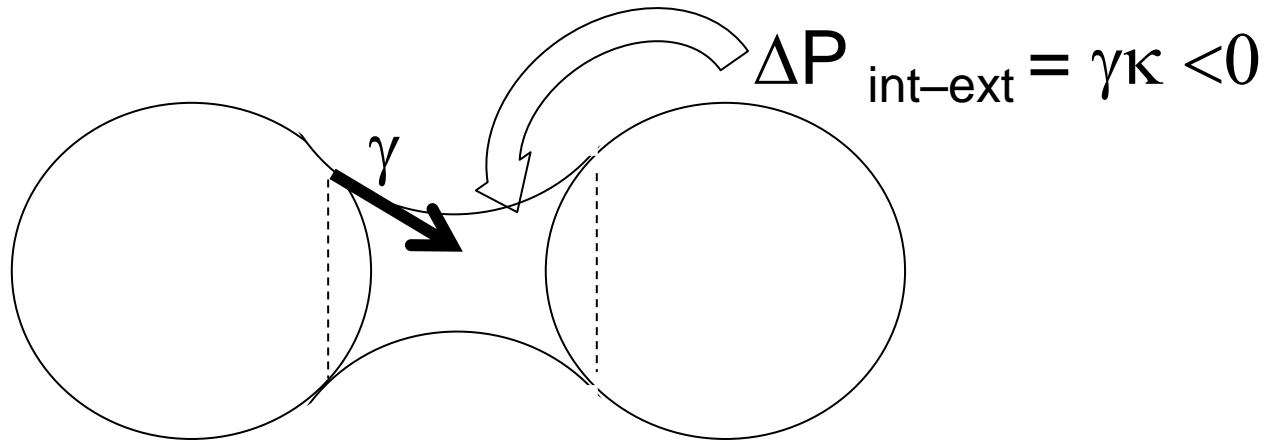
Quel est le problème?



La presque dernière diapo




Pont liquide

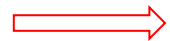


« Cette **différence de pression** engendre une force d'attraction entre les deux grains de sable, qui s'ajoute à la **force de traction** sur la ligne triple (grain/air/liquide) et les garde collés ensemble ». SSJ 2020

$$F_{\text{sur-un-grain}} = \Delta P (\text{surface section pointillée}) + \gamma_{\text{LG}} (\text{périmètre en pointillé}) \cos \theta \dots$$

Et la convexité du grain solide ? 

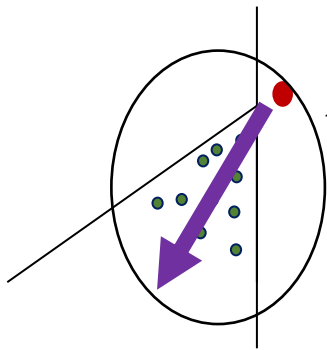
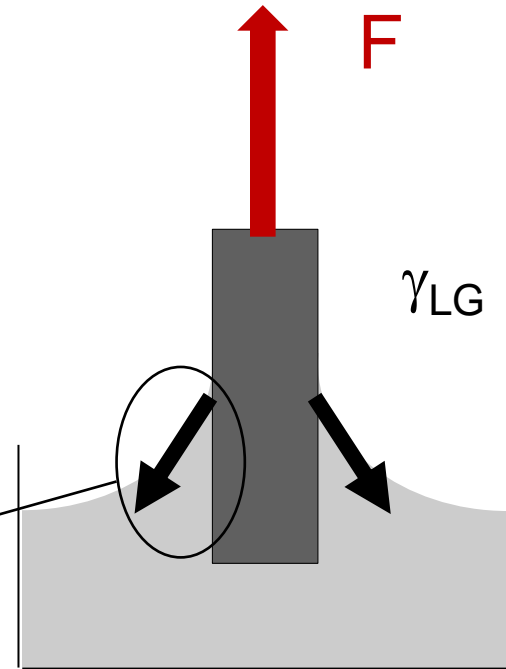
Préambule



Quel est le problème?

Pour mes étudiants, je vais prendre cette explication et **je me déteste parce que j'ai toujours détesté cette explication.**

Un agrégé MEEF 2



On m'avait dit qu'une molécule de verre située sur la ligne triple était attirée par *toutes* les molécules d'eau du voisinage



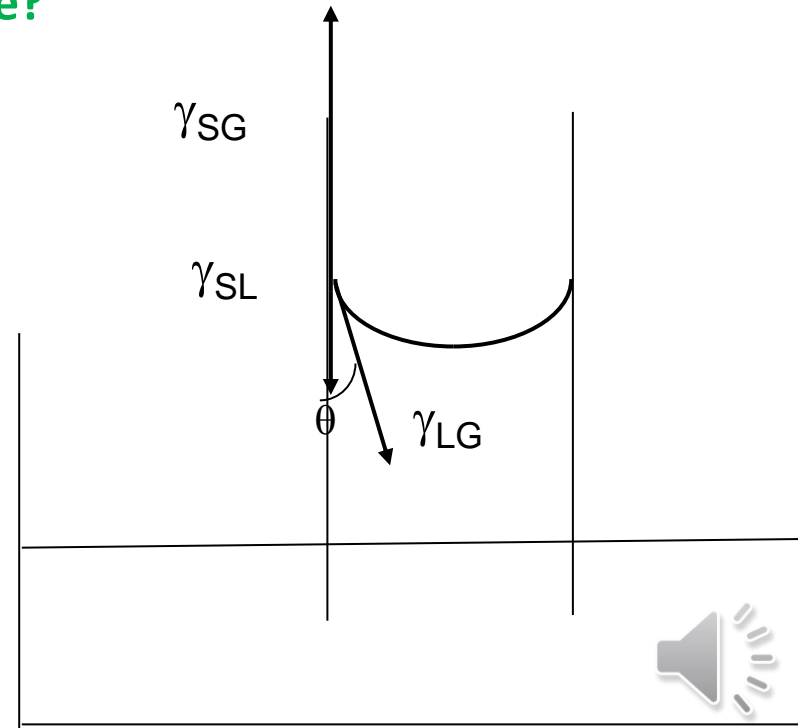
Quel est le problème?

Un agrégé MEEF 2

Et pourquoi ces trois vecteurs et la somme des trois vecteurs n'est pas nulle et

qu'est-ce que c'est que cette histoire d'équilibre?

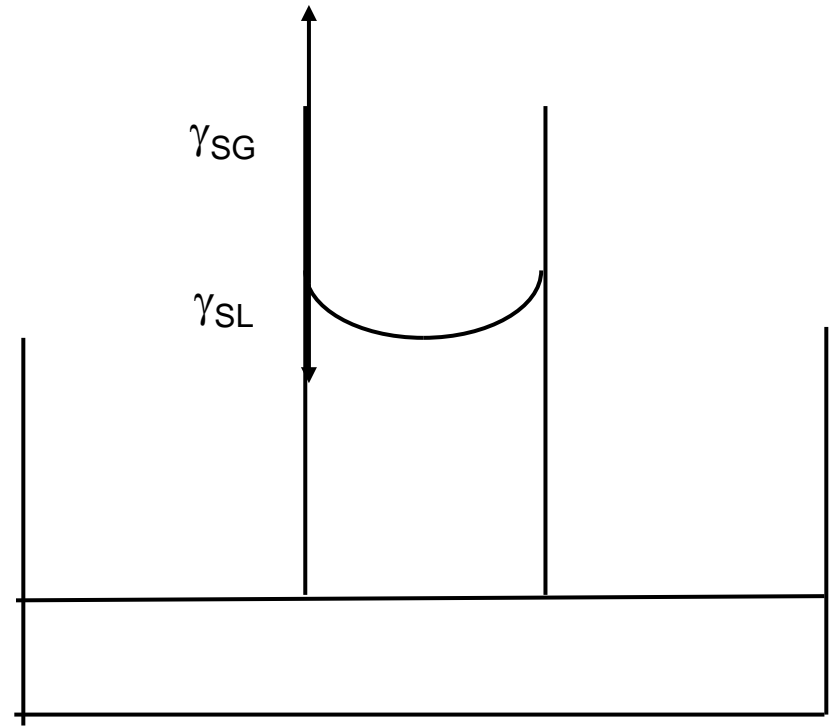
Je croyais qu'on ne pouvait pas faire un bilan Newtonien sur une entité sans masse.



En circulation

La force qui hisse le liquide

dGBQ p.41

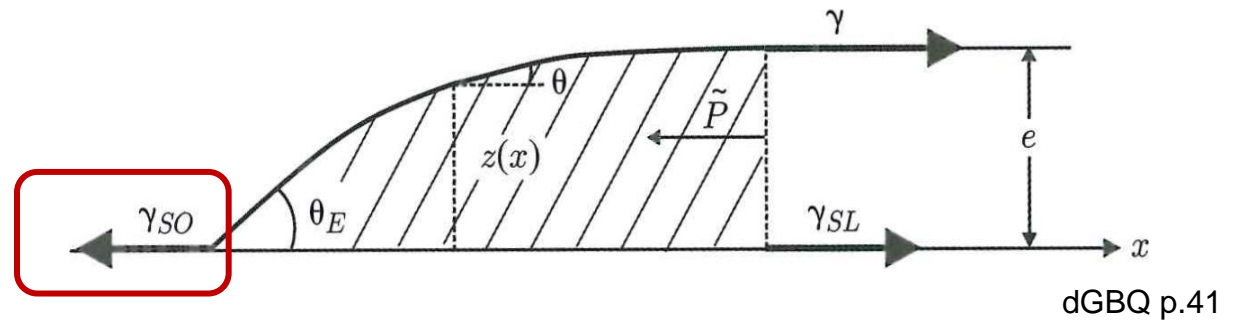


On m'avait dit qu'une molécule d'eau n'était attirée par le verre que perpendiculairement au plan de séparation



La traction tirant le liquide vers la zone sèche est

(FIG. 6.1) dGBQ p.128



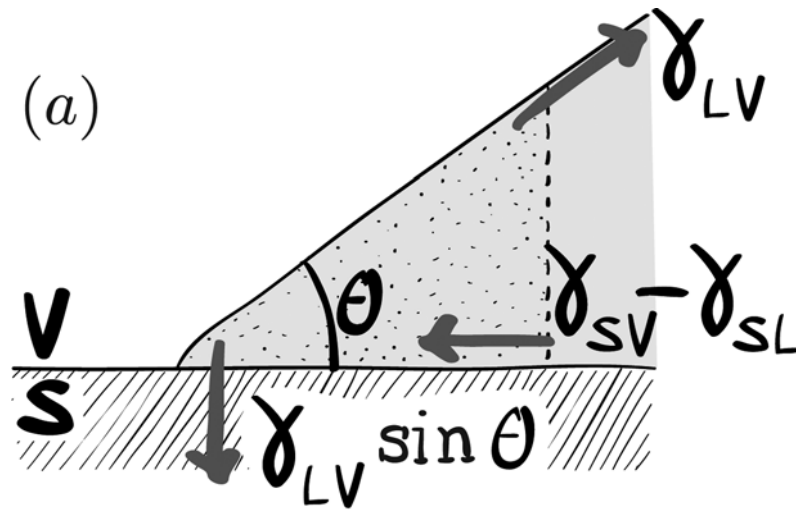
On m'avait dit qu'une molécule d'eau n'était attirée par le verre que perpendiculairement au plan de séparation



Proposition Marchand et al. 2011 (entre autres)

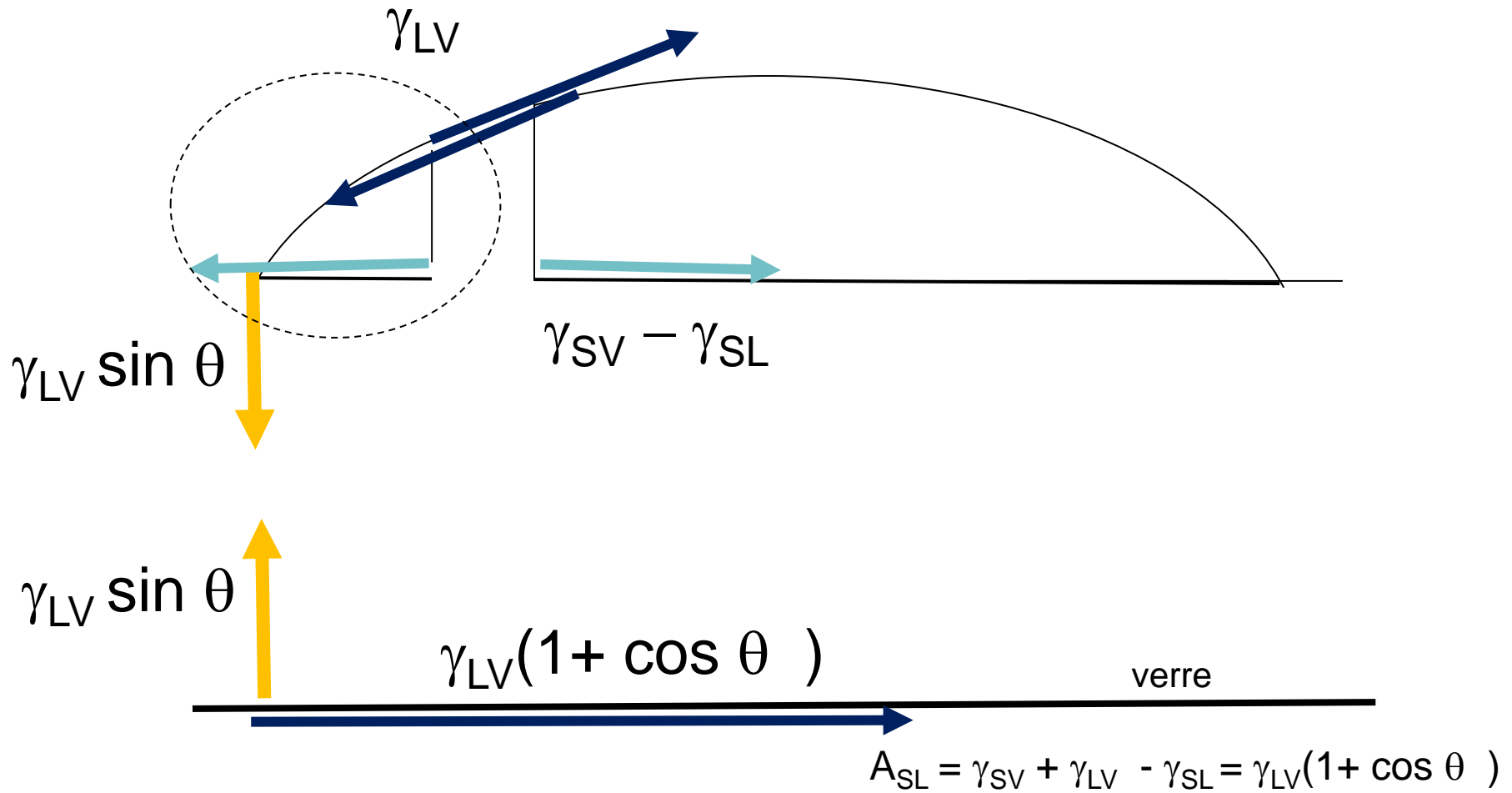
Marchand A, Weijs J H, Snoeijer J H and Andreotti B 2011 Why is surface tension parallel to the interface, *American Journal of Physics*, 999 -1008





Là ce qu'il y a de bien, c'est qu'on parle d'un système, le coin liquide. Ça me va mieux.



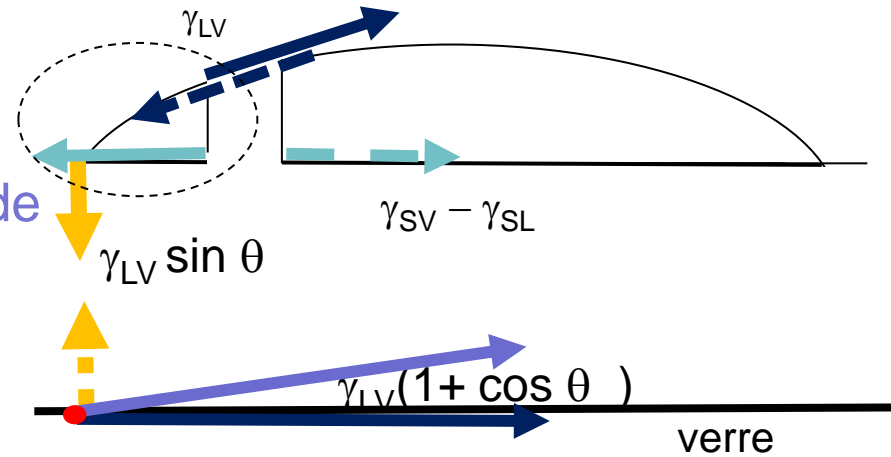
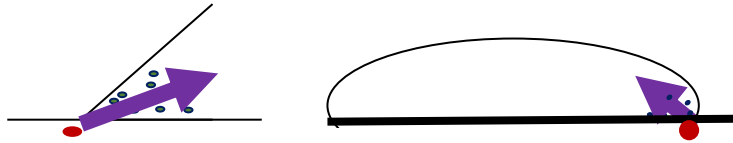


L'**attraction normale** se fait sans condition
(cf « la réaction élastique du solide »)



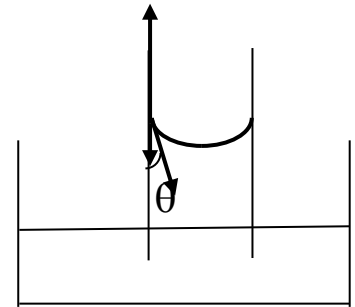


Une molécule de verre située sur la ligne triple est attirée par *toutes* les molécules de liquide du voisinage.



Au niveau du coin, le solide est tiré obliquement vers le liquide

On ne peut pas faire un bilan Newtonien sur une entité sans masse.



Une molécule de liquide n'est attirée par le verre que perpendiculairement au plan de séparation. Si le liquide se déplace parallèlement à ce plan, c'est qu'il est *poussé* parallèlement à ce plan.



Certaines forces mises en œuvre dans des explications sont ad hoc, métaphoriques, traductions **arbitrairement localisées** de l'approche énergétique.



Deux prolongements

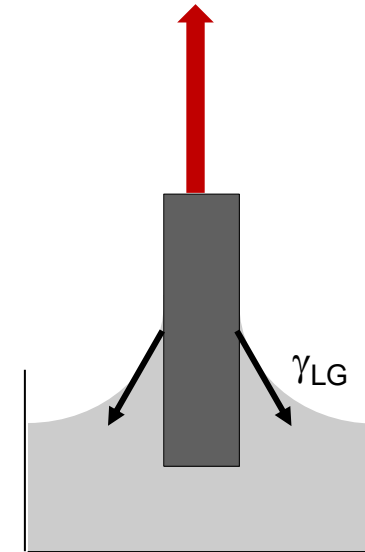
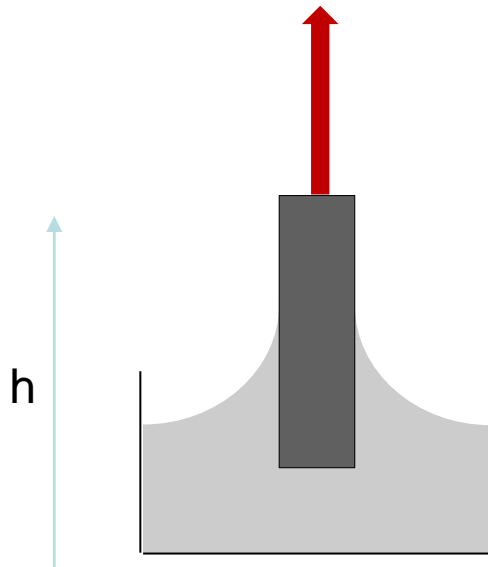
- Le tensiomètre
- Le pont liquide



Le tensiomètre



Tensiomètre: explications courantes



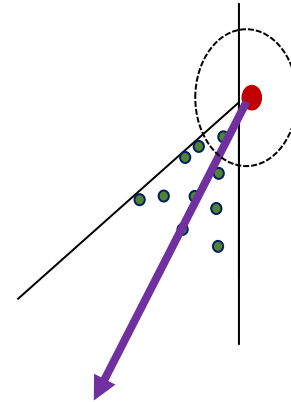
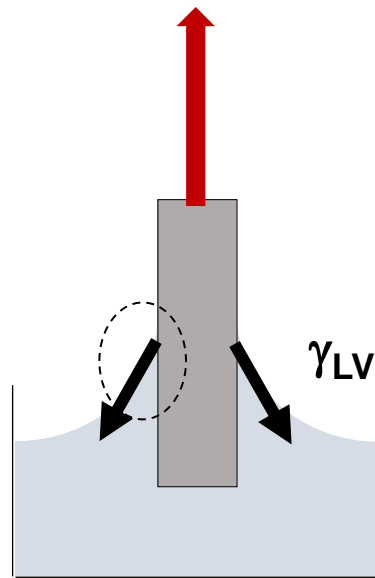
$$\delta H_{\text{free en système liq-sol/capil}} = [(\gamma_{\text{SG}} - \gamma_{\text{SL}}) l] \delta h$$

$$F_{\text{ext-équil}} = (\gamma_{\text{SG}} - \gamma_{\text{SL}}) l = (\gamma_{\text{LG}} \cos \theta) l$$

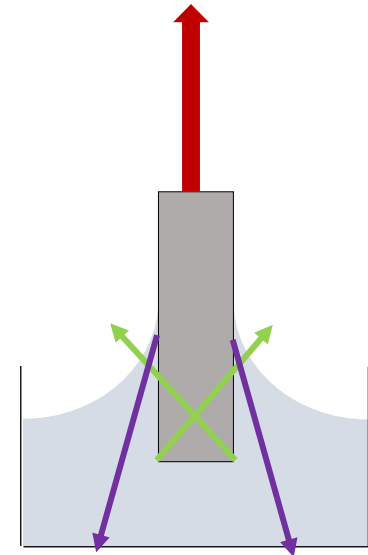
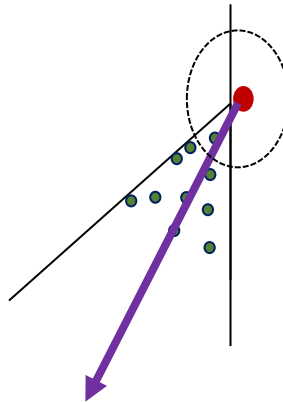
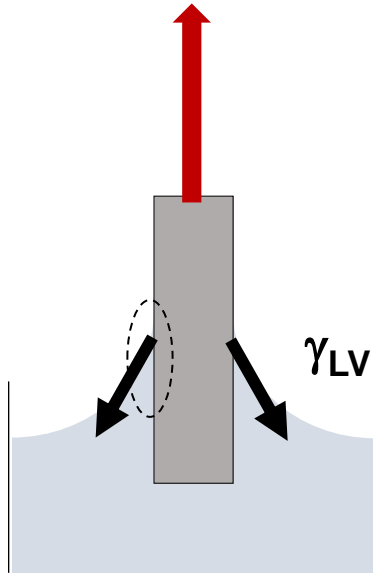
Une explication fondée sur la force exercée par le liquide sur le solide immergé $F_{\text{ext-équil}} = (\gamma_{\text{LG}} \cos \theta) l$



Ce n'est pas seulement la surface qui « tire »



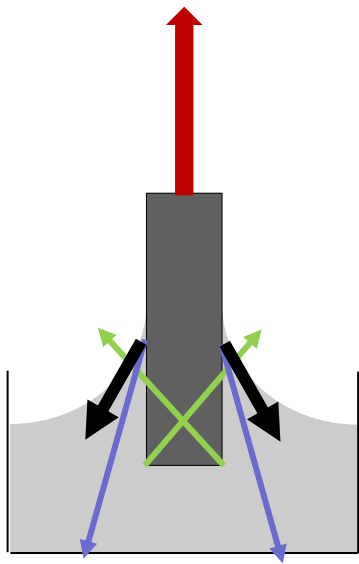
Ce n'est pas seulement la surface qui « tire »



La somme des forces « violettes » et « vertes » est égale
à la force « noire » (*non localisée*)

Détail ----->





Action d'un liquide sur un solide: une prise en compte de forces réparties sur tout l'interface liquide-solide est nécessaire.

- Composante verticale de l'attraction exercée par le liquide sur le solide

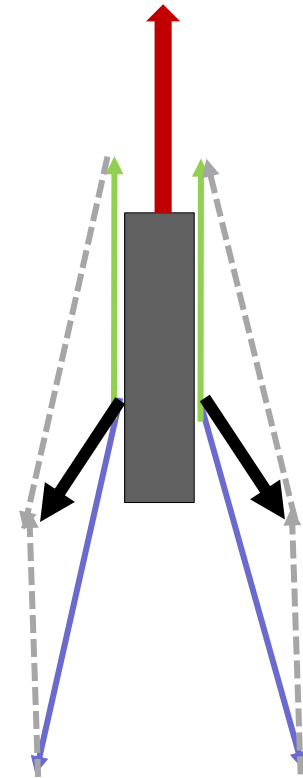
$$-l \gamma_{LG}(1+\cos\theta) \mathbf{u}_z$$

- Action du liquide sur le solide du fait de la courbure en bas du solide

$$l \gamma_{LG} \mathbf{u}_z$$

- Force totale liquide sur solide

$$F_{LS} = - \mathbf{F}_{\text{tensiomètre sur solide}} = l (-\gamma_{LG} \cos\theta) \mathbf{u}_z$$



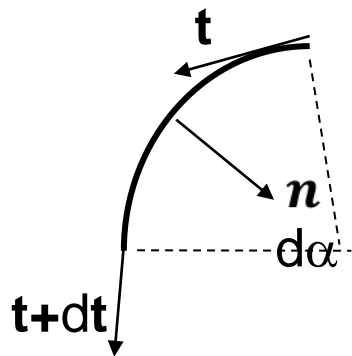
La force « en noir » intègre l'attraction locale sur la ligne triple et l'effet de la courbure du solide.



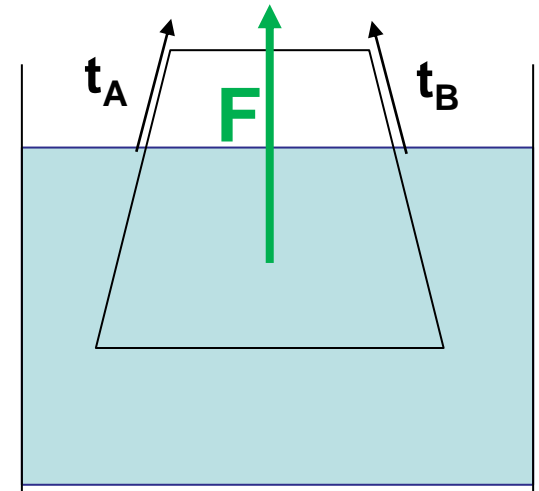
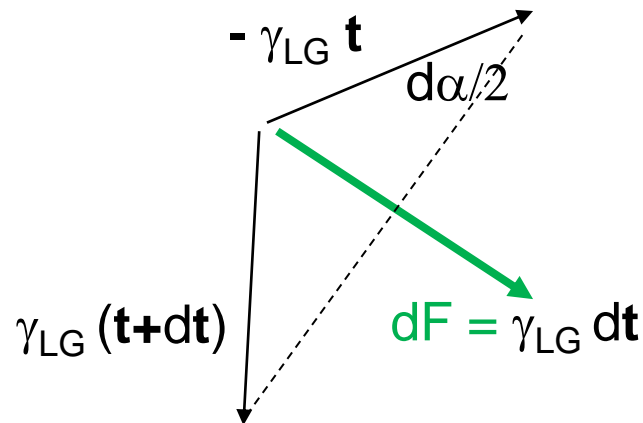
Force par unité de longueur de génératrice exercée par un liquide en interface concave sur un solide

Cas d'une surface cylindrique à génératrice perpendiculaire au plan de la figure

$d\mathbf{t}$ différence de deux vecteurs unitaires tangents successifs



Traction à chaque extrémité d'une bande en interaction surfacique: $\pm \gamma_{LG} \mathbf{t}$



$$d\mathbf{t} = d\alpha \mathbf{n} = \kappa ds \mathbf{n}$$

$$\mathbf{F} = \int_A^B \gamma_{LG} d\mathbf{t} = \gamma_{LG} (\mathbf{t}_A + \mathbf{t}_B)$$

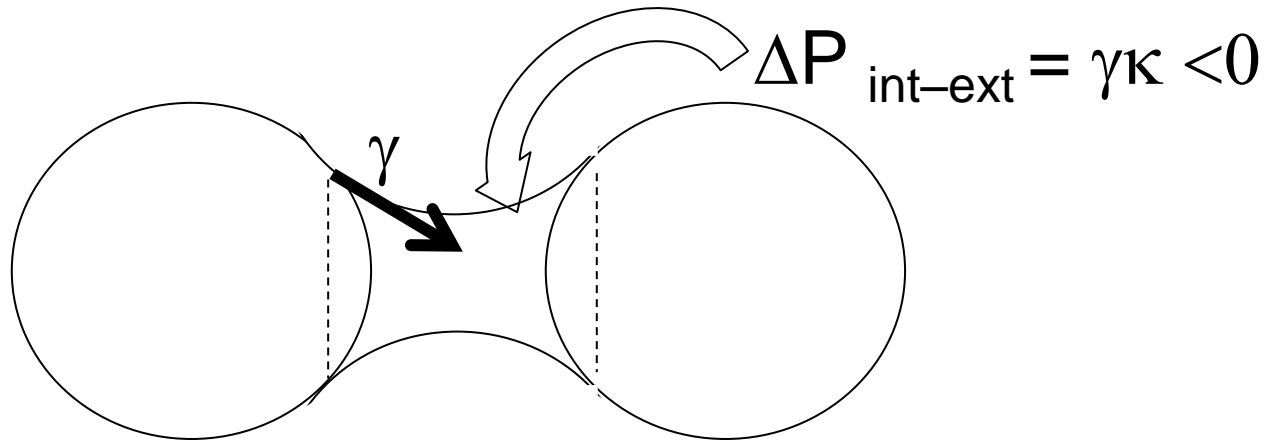
quelle que soit la forme submergée



Le pont liquide



Pont liquide

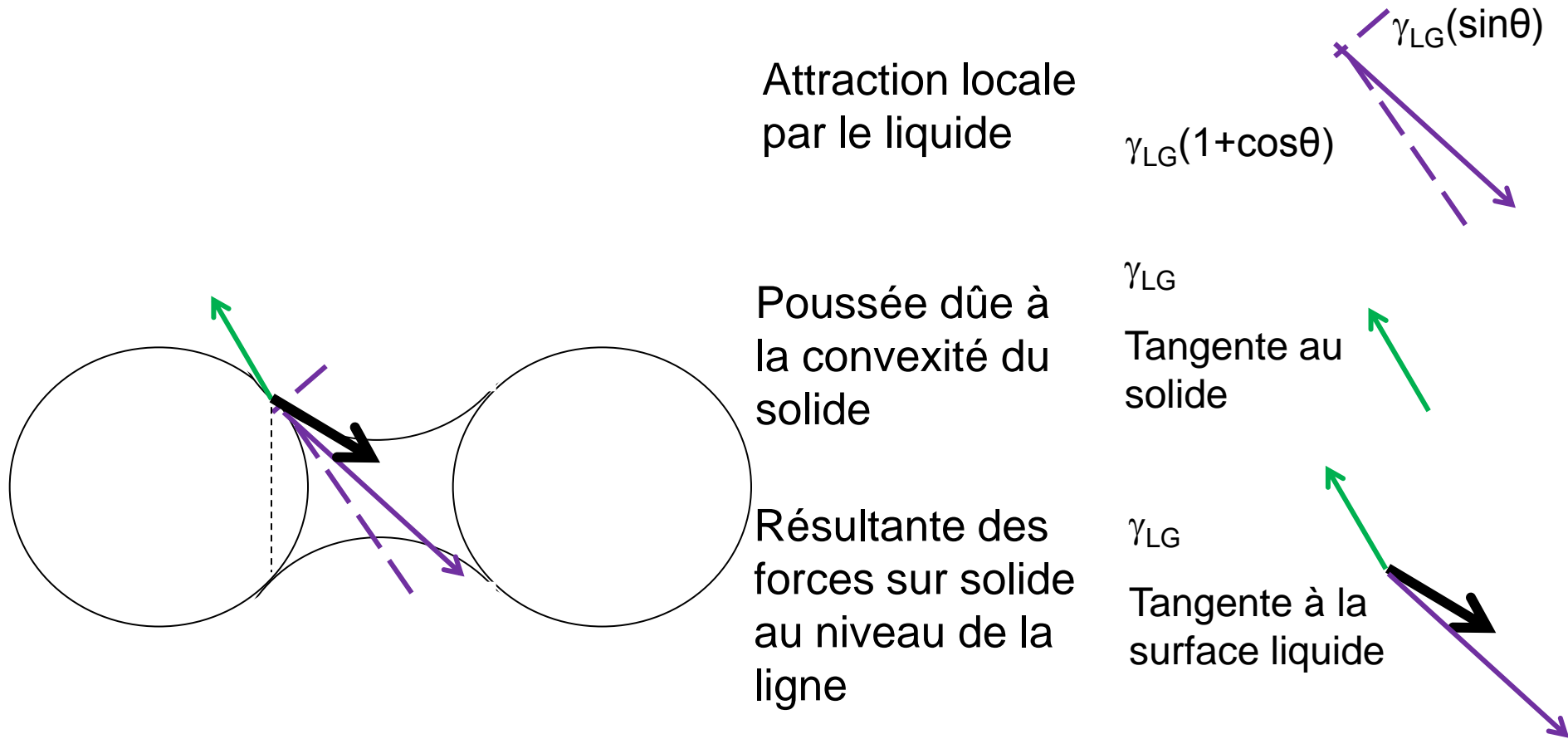


« Cette **différence de pression** engendre une force d'attraction entre les deux grains de sable, qui s'ajoute à la **force de traction** sur la ligne triple (grain/air/liquide) et les garde collés ensemble ». SSJ 2020

$$F_{\text{sur-un-grain}} = \Delta P (\text{surface section pointillée}) + \gamma_{\text{LG}} (\text{périmètre en pointillé}) \cos \theta \dots$$

Et la convexité du grain solide ? 

Et la convexité du grain solide?

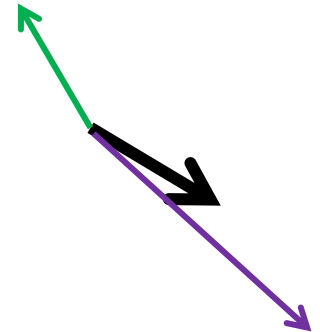


La valeur de la force **liquide sur solide** résume l'attraction locale et l'effet de la convexité du grain solide.



Corps immergé ou pont liquide:

La valeur de la force liquide sur solide
intègre l'attraction locale liquide-solide et
l'effet de la convexité du solide



D'accord? Pas d'accord?

- L'équilibrage de vecteurs «agissant sur » une ligne de contact triple ne peut pas s'interpréter comme un bilan de forces newtonien.
- Un solide plan invariant par translation ne tire le liquide que perpendiculairement à sa paroi plane (au voisinage du coin $\gamma_{LV} \sin \theta$).
- Au niveau d'un coin liquide, le solide est tiré obliquement vers le corps du liquide
- Composantes de forces normales à l'interface solide-liquide: C'est à la présence du solide (et non à son éventuelle déformation) que sont dues la force linéique d'attraction du liquide (à distance) par le solide et la force linéique (opposée) d'attraction (à distance) du solide par le liquide.
- Certaines forces mises en œuvre dans des explications sont ad hoc, métaphoriques, traductions **arbitrairement localisées** de l'approche énergétique.
- Ascension capillaire: en fait le liquide est poussé vers le haut, par en dessous.
- Etalement d'une goutte sur support solide: en fait le liquide est poussé du centre de la goutte vers l'extérieur.
- Action d'un liquide sur un solide : une prise en compte de forces réparties sur tout l'interface liquide-solide est nécessaire
- Corps immergé ou pont liquide: La valeur de la force liquide-sur-solide au niveau de la ligne triple intègre l'attraction locale liquide sur solide **et** l'effet de la convexité du solide immergé.



Remarques finales

Les explications qui circulent en formation à la recherche méritent une analyse critique multi critères, afin d'orienter les choix.

Merci de votre attention

Références

- Marchand A, Weijs J H, Snoeijer J H and Andreotti B 2011 Why is surface tension parallel to the interface, *American Journal of Physics*, 999 -1008
- de Gennes P G, Brochard Wyart F and Quéré D 2005 Gouttes, bulles, perles et ondes, Paris : Belin p. 64. 1]
- Viennot L and Décamp N 2018 Activation of a critical attitude in prospective teachers: from research investigations to guidelines for teacher education *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 14, 010133
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010133>
- Guyon, E., Prost, J., Betrencourt, C., Boulet, C. et Voloachine B.1982 Attention aux tensions superficielles *Eur. J. Phys.* 3 (1982) 159-168 (p. 161)
- GHP Guyon, E., Hulin, J.P. et Petit, L. 2012, Hydrodynamique physique, 3me édition, Les Ulis : EDP Sciences-CNRS
- Viennot L. et Décamp N. 2019 *L'apprentissage de la critique Développer l'analyse critique en physique* Les Ulis: EDP Sciences-UGA (Grenoble) In French.
- Viennot L 2020. Developing critical analysis of explanations in physics teachers: Which direction to take? *Phys. Educ.* 55 015008 DOI:
<https://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/ab4f64>
- Fusheng Mu and Xubin Su 2007 Analysis of liquid bridge between spherical particles *China particuology* [Volume 5, Issue 6](#), 420-42
<https://doi.org/10.1016/j.cpart.2007.04.006>
- Sauret, A., Sanguier, G. et Jop, P. 2020 Erosion et accréation de matériaux granulaires humides, *Reflets de la Physique* 64 17-22 Encadré 1 p. 18

En circulation

BB p. 33 ligne triple

We can then sketch the different forces that are exerted by the presence of a fluid on the triple line (figure 1.42). At equilibrium, the resultant of the forces must be zero

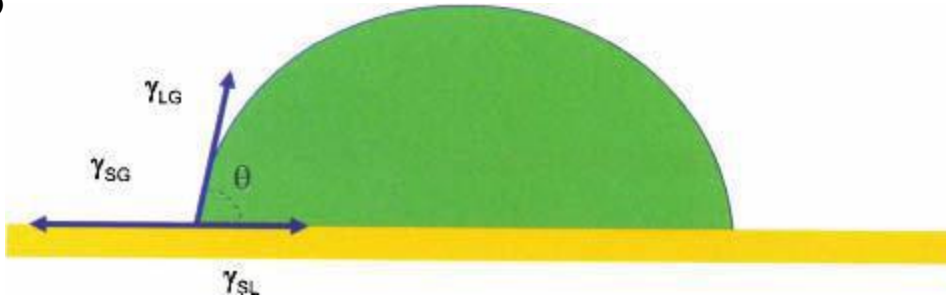


Figure 1.42 Schematic of the forces at the triple contact line

At equilibrium, the projection of the resultant on the x-axis is zero:

$$\gamma_{LG} \cos \theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL}$$

dGBQ p 25 En équilibrant les forces de contact agissant sur la ligne de contact

G p 161 Il n'y a donc pas d'équilibre local pour la composante verticale (perpendiculaire à la surface solide) des forces

G p 162 L'absence d'équilibre local est non physique. Dans un problème réel, il faudrait tenir compte de **l'équilibre des forces de déformation élastique du solide sur les points du périmètre.**

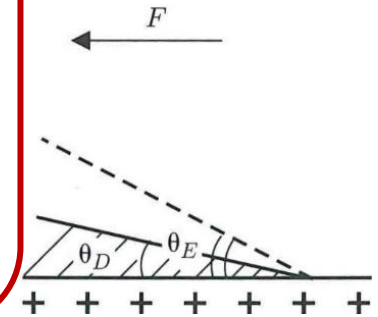
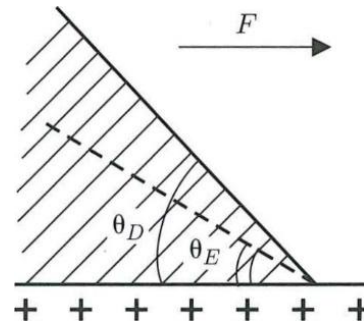
dgBQ p 25 La projection des forces capillaires sur la verticale est équilibrée par **une force élastique de réaction du solide**

GHP p. 35 On peut écrire les conditions d'équilibre de forces pour la ligne triple de contact de l'interface liquide avec la paroi. La composante verticale est équilibrée **par la réaction élastique de la paroi solide:**

Les forces qui tirent

la traction tirant le liquide vers la zone sèche est (FIG. 6.1) .

$$F(\theta_D) = \gamma_{SO} - \gamma_{SL} - \gamma \cos \theta_D$$



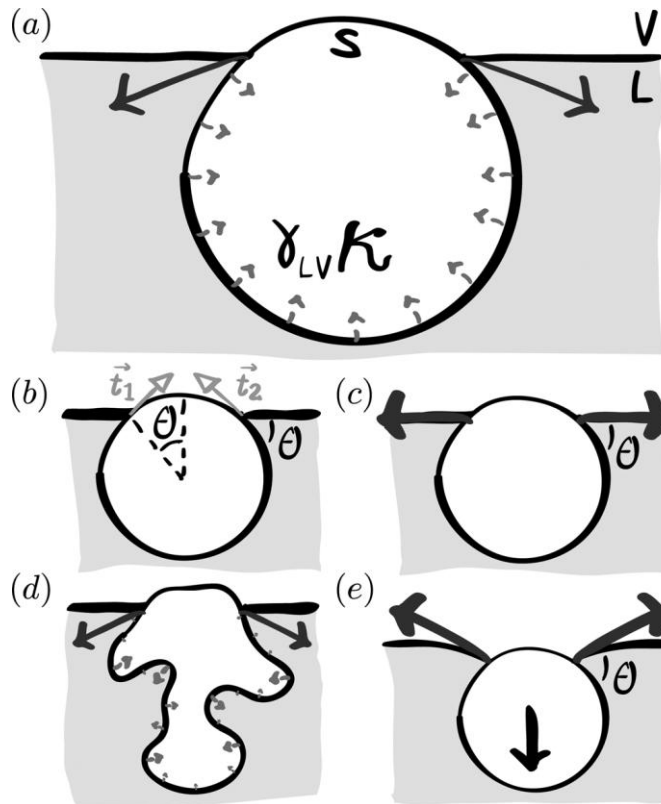
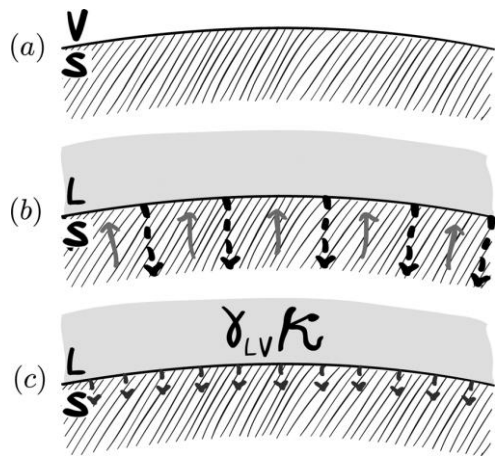
(a)

(b)

Fig. 6.1. Forces s'exerçant sur la ligne triple hors d'équilibre

dGBQ p.128

Etalement d'une goutte sur support solide:
en fait le liquide est poussé du centre de la
goutte vers l'extérieur

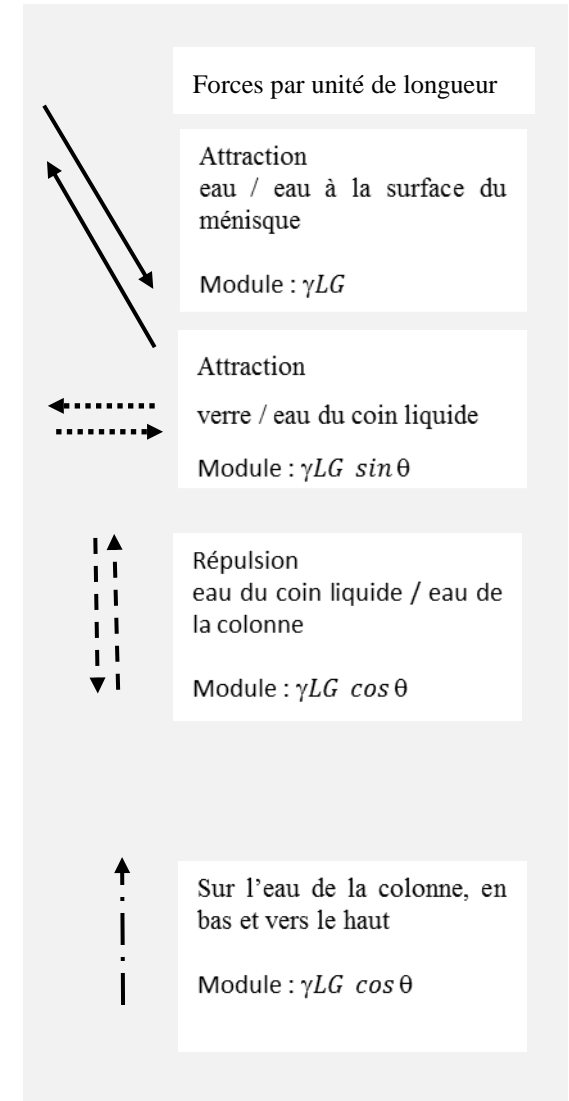
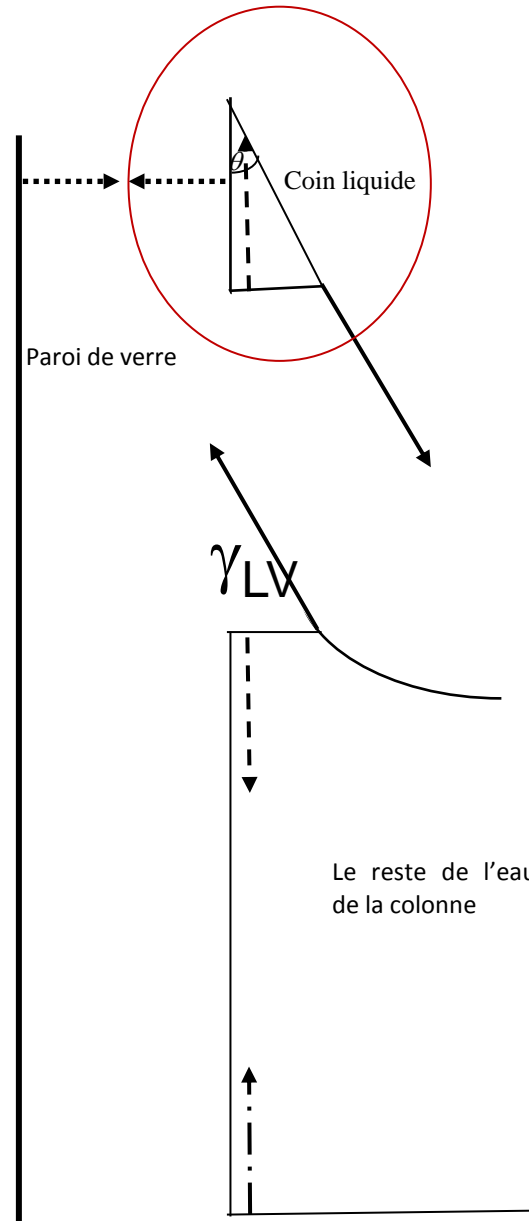


The curvature of the solid-liquid interface creates a normal force distributed over the entire immersed surface of the solid of magnitude $\gamma_{LV}\kappa$ per unit surface. Integrating over the curvature of the submerged surface from one contact line to the other gives the resultant of the Laplace pressure:

$$\gamma_{LV} \int_1^2 \kappa \mathbf{n} dS = \gamma_{LV} (\mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2)$$

where \mathbf{t}_1 and \mathbf{t}_2 are unit vectors tangential **to the body**, pointing upward. This result is independent of the shape of the body.

Schéma éclaté pour l'ascension capillaire



Simplicité: une notion simple?

La simplicité c'est le plus important.

Je reviendrai dessus plus tard.

C'est trop simple, en fait.

Je me déteste.

Je ne vais plus me détester.

Si on comprend, ca devient simple.

Ben je vois pas pourquoi ils ne pourraient pas comprendre ce que j'ai compris.

Simplicité: une notion à travailler en formation