

Pourquoi la tension de surface est-elle parallèle à l'interface ?

Louis HEITZ

Prépa agreg 2020/2021

Ce document est un condensé/résumé de l'article disponible ici, toutes les figures de ce document sont issues de cet article. De plus tous les arguments qualitatifs développés ont été justifié par des simulations numériques. L'article répond à quatre questions classiques liées à la tension de surface.

Tous (ou presque) les détails techniques sont passés sous silence, on tente uniquement de donner une idée de la démonstration pour pouvoir répondre à un jury taquin. En cas de doute, il faut se référer à l'article directement.

Table des matières

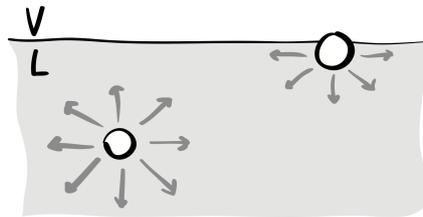
1 Pourquoi ma force associée à la tension de surface est parallèle à l'interface ?	2
1.1 Interface liquide/vapeur :	2
1.2 Interface liquide/solide	4
2 Pourquoi n'y a-t-il pas de force verticale pour contrebalancer $\gamma_{LV} \sin \theta$?	5
3 Pourquoi prend on en compte 3 forces dans une interface liquide/vapeur/solide alors que dans une expérience d'arrachement il n'y a que deux interactions ?	6
4 Dans le cas du mouillage total, la force est-elle en γ_{LV} ou en $\gamma_{SV} - \gamma_{LV}$?	7

1 Pourquoi la force associée à la tension de surface est parallèle à l'interface ?

Réponse rapide : Il faut prendre en compte les forces répulsives dans le bilan des forces. Celles-ci étant isotropes au contraire des forces attractives au voisinage de l'interface, on obtient une force parallèle à l'interface.

1.1 Interface liquide/vapeur :

Pour expliquer l'existence d'une tension de surface on fait souvent le schéma suivant :



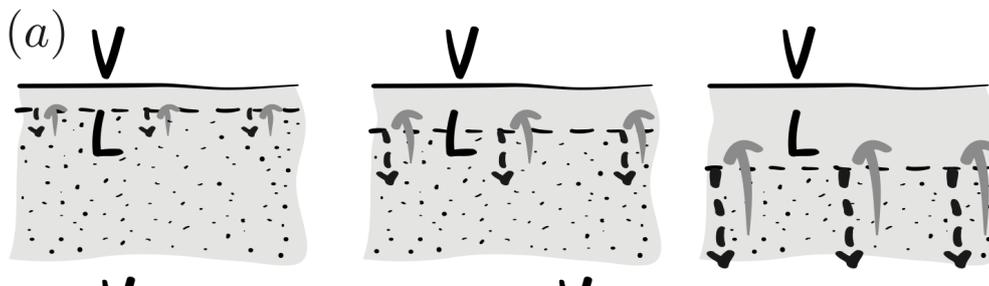
On explique alors que les molécules en surface manquent de voisin donc elles ont un déficit d'énergie. Mais comment expliquer le fait que cette force n'est pas dirigée vers le fluide et qu'elle est parallèle à l'interface ?

En fait, sur le schéma on ne représente que les forces attractives entre molécules, mais à courte distance on sait qu'il y a une force interaction répulsive (du fait de la répulsion des nuages électroniques). Or il y a une différence très importante entre la force attractive et la force répulsive :

La force répulsive est isotrope alors que la force attractive ne l'est pas

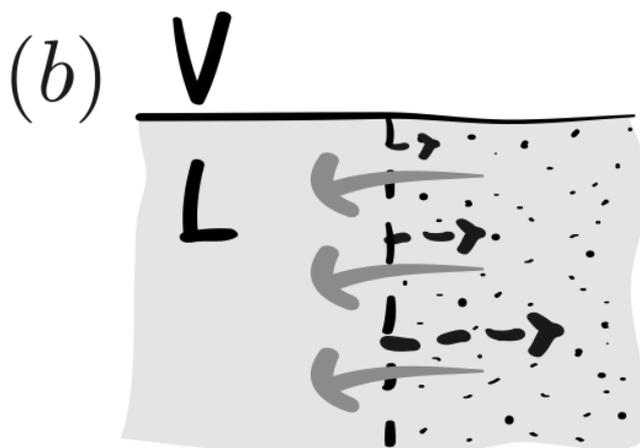
Cela se comprend qualitativement : on peut imaginer que la force répulsive agit comme une force de contact et n'est donc pas très sensible à la structure moléculaire au voisinage de l'interface. En revanche, les interactions attractives étant à longue portée, elles sont sensibles à la structure moléculaire.

Regardons dans le détail comment cela permet de comprendre le fait que la force est tangentielle à l'interface. Pour cela on va diviser le système en plusieurs sous-systèmes successivement.



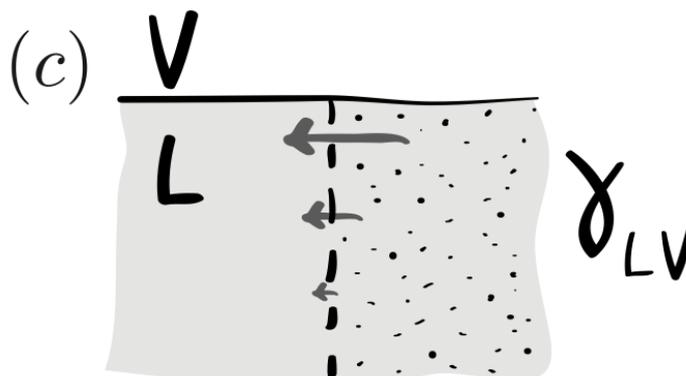
On considère dans un premier temps une frontière parallèle à l'interface liquide-vapeur. On sait que le système est à l'équilibre mécanique dans la direction de la normale à l'interface. Donc à toute profondeur dans le liquide les forces attractives (flèches grises) compensent les forces répulsives (flèches noires pointillées). Les forces attractives augmentant en intensité lorsqu'on s'enfonce dans le liquide (de plus en plus de voisins) les forces répulsives deviennent également de plus en plus intenses.

On divise maintenant le système avec une frontière orthogonale à l'interface liquide-vapeur :



Utilisons maintenant le fait que les forces répulsives (flèche pointillées noires) sont isotropes : leur composante parallèle à l'interface augmentent donc au fur et à mesure qu'on s'enfonce dans le liquide (puisque leur composante verticale a ce comportement d'après ce qui précède). Mais les interactions attractives parallèle à l'interface ne sont pas affectées par la présence de l'interface : elles sont donc égales aux interactions attractives au sein du liquide.

En faisant le bilan des forces on obtient alors une force parallèle à l'interface :



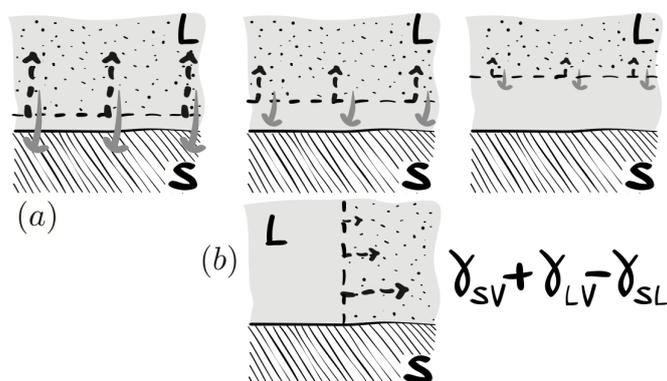
Dans tout ce qui vient d'être fait on a considéré qu'il n'y avait pas d'interaction avec

la vapeur, du fait que la densité de molécule pour la vapeur est très faible. Quand on considère un solide, il faut prendre en compte ces interactions.

1.2 Interface liquide/solide

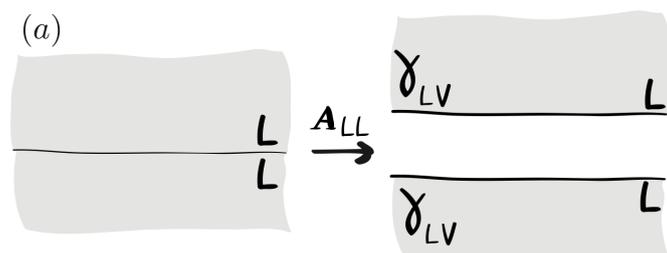
Comme annoncé précédemment, il y a maintenant deux effets à prendre en compte : d'une part la raréfaction de molécules de liquide à l'interface (comme pour l'interface avec la vapeur) et d'autre part l'interaction avec le solide.

On a déjà traité le premier effet ci-dessus, le second se fait d'une manière similaire en remarquant que l'intensité de la force attractive du solide sur le liquide décroît avec la distance à l'interface. Avec le schéma ci-dessous, on comprend bien ce qu'il se passe, il s'agit d'un raisonnement analogue à celui mené précédemment.



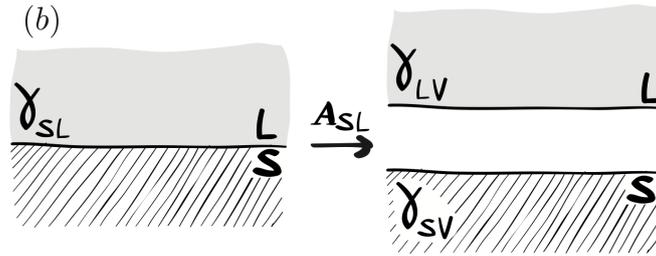
Il reste maintenant à comprendre pour l'intensité de la force est $\gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$ et non pas simplement γ_{SL} .

Comment crée-t-on une interface liquide solide ? Il faut dans un premier temps couper le liquide en deux, on crée donc deux interfaces liquide/vapeur pour un coût énergétique de $A_{LL} = 2\gamma_{LV}$



Il en va de même pour couper le solide en deux, cela a un coût $A_{SS} = 2\gamma_{SV}$. Enfin, lorsqu'on approche le solide du liquide, cela réduit le coût énergétique d'un facteur γ_{LS} il en résulte donc un coût total $A_{SL} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$

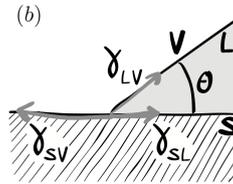
En faisant le bilan, on obtient alors un coût énergétique de $\gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} - \gamma_{LV} = \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$ en sommant la force répulsive due au solide à la force attractive due au manque de liquide.



2 Pourquoi n'y a-t-il pas de force verticale pour contrebalancer $\gamma_{LV} \sin \theta$?

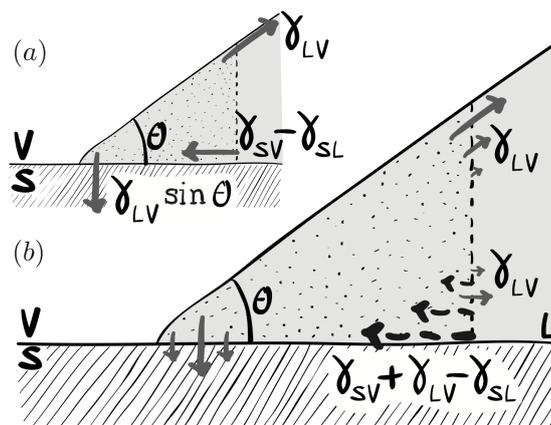
Réponse rapide : Il manque la force attractive du solide, qui compense exactement le terme $\gamma_{LV} \sin \theta$.

On voit souvent le schéma suivant pour effectuer le bilan des forces sur une ligne de contact :



Un problème se pose : quid de l'équilibre des forces verticales ?

En réalité, il faut faire attention au système on applique les forces. En effet, **on ne peut appliquer de force à la ligne de contact, puisqu'elle ne représente aucun système matériel**. En prenant comme système un coin de liquide délimité par la ligne de contact, tout marche bien :



Dans le coin en haut à droite, on a une interface liquide/vapeur donc une force parallèle à l'interface d'intensité γ_{LV} . Dans le coin en bas à droite une interface liquide/solide, donc

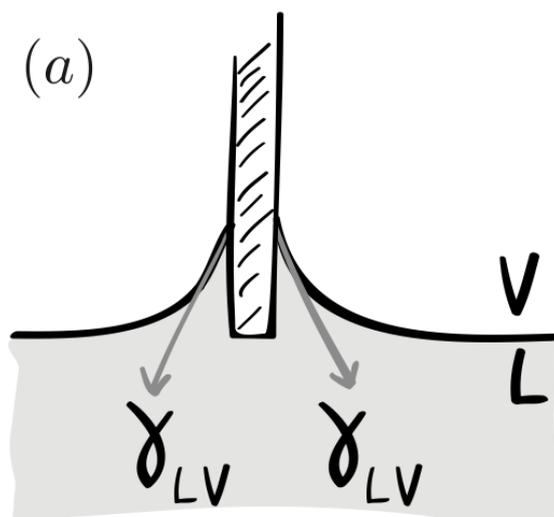
ue force d'intensité $\gamma_{SV} - \gamma_{SL}$. Précisons maintenant l'origine de la force attractive dans le coin en bas à gauche.

Puisque le solide s'étant indéfiniment parallèlement à l'interface, la résultante des forces est nécessairement orthogonale à l'interface. Loin de l'interface, cette force est équilibrée par les forces répulsives. Mais puisque les forces répulsives sont nulles à l'extérieur du liquide et sont continues, elles doivent décroître au voisinage de l'interface : d'où l'existence d'une force attractive vers le solide. Cette force se trouve être parfaitement égale à $\gamma_{SV} \sin \theta$.

3 Pourquoi prend on en compte 3 forces dans une interface liquide/vapeur/solide alors que dans une expérience d'arrachement il n'y a que deux interactions ?

Réponse rapide : A nouveau, il faut faire attention au système considéré, on aboutit à une force en $\gamma_{LV} \sin \theta$ (par unité de longueur)

Pour une expérience d'arrachement on fait souvent le schéma suivant :



En fait sur ce schéma on ne considère que les forces qui s'exercent **sur le solide**. Pour prendre en compte les forces qui s'exercent sur le liquide on aboutirait au schéma obtenu dans la partie précédente.

Considérons dans un premier temps les forces exercées par le liquide sur le solide à l'interface. On a déjà vu que la force liée à l'interaction solide-liquide est $A_{SL} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$ en introduisant la loi de Young-Dupré on aboutit à $A_{SL} = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta)$.

On considère ensuite les forces exercées par le liquide sur le solide loin de l'interface.

Le solide étant légèrement déformé, il se crée une courbure qui aura pour effet de modifier la pression dans le liquide (loi de Laplace) qui a pour amplitude γ_{LV} . Cela ne dépend pas du solide, puisque c'est uniquement le manque de molécules de liquide qui est à l'origine du changement de pression.

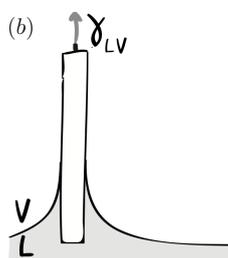
En soustrayant cette force à la force liée à l'interface, on retrouve finalement bien une force en $\gamma_{LV} \cos \theta$, en accord avec la thermodynamique.

4 Dans le cas du mouillage total, la force est-elle en γ_{LV} ou en $\gamma_{SV} - \gamma_{LV}$?

Réponse rapide : C'est γ_{LV} , il faut prendre en compte le fait qu'il y a une fine épaisseur de liquide tout autour du solide (film de pré-mouillage)

Pour rappel la loi de Young - Dupré stipule que $\gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV}$ et on se place dans le cadre du mouillage total pour lequel on a $\gamma_{SV} - \gamma_{SL} > \gamma_{LV}$. Il n'y a donc plus lieu de parler de l'angle de contact et la loi de Young-Dupré n'est plus valable.

En pratique, on observe l'existence d'un ménisque où le liquide s'approche du solide :



Mais en réalité il existe une fine couche de liquide tout autour du solide, appelée film de pré-mouillage. L'existence d'une ligne de contact apparente est uniquement due à la gravité : sur une surface plane, le liquide s'étalerait sur tout le solide. En prenant en compte l'équilibre hydrostatique et la pression de Laplace, on montre que la largeur du film est de l'ordre de la centaine de nanomètres, c'est donc un volume mésoscopique. Ainsi du point de vue du solide, puisque l'épaisseur est mésoscopique (plus grand que la largeur typique d'une interface solide-liquide) tout se passe comme si c'était une épaisseur infinie de liquide sur le solide. On n'a donc que des effets type pression de Laplace, qui donnent une force orthogonale à l'interface.

En intégrant le long du film de pré-mouillage cette pression (dans le ménisque elle est équilibrée par la pression hydrostatique), on montre que son intensité est γ_{LV} par unité de longueur de la ligne de contact apparente.

