

Tension de surface. Phénomènes capillaires

Géraud Dupuy

April 2021

Niveau : L3

Prérequis :

- Mécanique des fluides : fluide parfait, écoulement visqueux
- Interactions de Van der Waals, liaisons hydrogène
- Potentiel thermodynamique : enthalpie libre
- Notion de courbure d'une surface : rayon de courbure
- Instabilités

Introduction

Si on avait juste des écoulements, comment peut on expliquer certaines structures particulières comme celles-ci (sur diapo) : bulle de savon, gouttes sur une toile d'araignée.

1 Notion de tension de surface

1.1 Mise en évidence expérimentale

- Faire l'expérience du barreau sur un rail
- Montrer qu'on peut mettre une évidence une force tangentielle à l'interface

1.2 Origine microscopique

- Faire l'explication à base d'interaction attractives (sur diapo)
- Montrer l'idée de minimisation de surface, d'où la sphère.

- On peut effectuer le calcul en ordre de grandeur. Rapporter ça aux ordres de grandeurs des interactions :
 - énergie de stabilisation $U \sim k_B T \sim \frac{1}{40} eV$, déstabilisation de $\frac{U}{2}$
 - Surface en a^2
 - on en déduit $\gamma \frac{U/2}{a^2} \sim 20 mJ/m^2$
- Valeurs de tension de surface (sur diapo) pour différents liquides cohérentes avec calcul ODG (eau au dessus car liaisons H, mercure car liaisons métalliques)

1.3 Description thermodynamique

- Montrer que cela revient à prendre en compte un terme en plus dans l'identité de thermo avec G.
- En redéduire la force.

2 Discontinuité de la pression

2.1 Loi de Laplace

- Système { goutte de liquide de rayon r (P, T) + gaz (P_0, T_0) }
- $G = U - T_0 S + P_0 V$
 $dG = \dots = (P_0 - P)dV + \gamma dA + (T - T_0)dS$
 $dG = (P_0 - P)4\pi r^2 dr + \gamma 8\pi r dr + (T - T_0)dS$
 $dG = (P_0 - P + \frac{2\gamma}{r})4\pi r^2 dr + (T - T_0)dS$
- A l'équilibre :
 $P = P_0 + \frac{2\gamma}{r}$
 $T = T_0$
- (Démonstration dans le cas général avec Green Ostrogradski)
- Explicitation dans le cas général avec les rayons de courbure. Cas de la goutte, cas de la bulle.

2.2 Adhesion capillaire

- Bien setup le problème (schéma avec hauteur H entre les deux lames, rayons de courbure $R_{c,1}$, et $R_{c,2}$, angle à l'horizontale θ_e , différence de pression (loi de Laplace)). Bien expliquer les rayons de courbures et les hypothèses.
- Faire des ordres de grandeur : $H \sim 5 \mu m$, $R \sim 1 cm$, $\theta_e \sim 0 rad$

- Sous l'hypothèse $R \gg H$, on aboutit à $\delta P \sim 0,3 \text{ bar}$, soit pour une surface de 1 cm^2 , une force de l'ordre de 10 N .
- Manip : le mettre en évidence avec les lames de microscope.

3 Instabilités et capillarités

3.1 Longueur capillaire, nombre de Bond

- Poser le problème d'une goutte d'eau juste soumise à la gravité et à la tension de surface
- Montrer les deux termes de surpressions $\Delta P_{grav} \sim \rho g l$ et $\Delta P_{cap} \sim \frac{\gamma}{l}$
- Les comparer. Faire ressortir la longueur capillaire l_c et le nombre de Bond Bo

3.2 Instabilité de Rayleigh-Plateau (sur diapo)

- Poser le problème sur un fil de $100 \mu\text{m}$ d'épaisseur.
- Donner le nombre de Bond : $Bo \sim 0,01$: gravité négligable.
- Faire les calculs du gain d'énergie d'une instabilité sinusoïdale
- Donner l'évolution de l'instabilité
- Manip : Le montrer sur l'exemple d'un écoulement d'un robinet avec un stroboscope.

4 Conclusion

On a des très belles structures, qui ne demande qu'à être détaillé. La beauté de ces phénomènes, c'est que ça touche à la physique du quotidien, et que de nombreuses questions peuvent se poser.

Bibliographie

- Pierre Gilles de Genes; Gouttes, bulles, perles, et ondes
- Diu, Thermo

Questions

- Choix du niveau L3 ? Abordable niveau L2/CPGE.
- Prérequis instabilités ? être capable d'identifier système instable si $\frac{d\delta x}{dt} > 0$
- Autres types d'instabilité ? Rayleigh Bénard (convection), Kelvin-Helmoltz, modèles climatiques ...
- Que doit un élève retenir sur γ ? Dimension : force linéique (N/m) et énergie surfacique (J/m²), signe, odg. Tableau récapitulatif ?
- Qu'est-ce qui se passerait si $\gamma < 0$? Système qui se fractionnerait spontanément. $\gamma = 0$? Point triple de l'azote.
- Choix des manip : vidéo du rail qui montre l'existence de la force ; possibilité de tremper un cube dans de l'eau savonneuse pour montrer la minimisation de la surface.
- Plus insister sur l'idée de minimisation de surface ; de façon générale, mettre un peu plus de liant au sein des parties.
- Facteur deux pour la force : 2 surface pour l'énergie, deux lignes de contact pour la force.
- Mesure de γ ?
- Commenter le résultat de la loi de Laplace (calcul qui prend du temps, voir s'il faut le faire au tableau ; peut-être l'amener avec une manip et la poser ad hoc ?) : qu'est ce que ça signifie que la pression est différente des deux côtés ? Possibilité de le montrer avec la stabilisation des mousses (mûrissement d'Oswald : petites bulles qui se déversent dans les grosses bulles car la pression y est moindre.)
- Schéma avec rayons de courbure sur diapo.
- Exemples d'adhésion capillaire au quotidien ? Poils de pinceau, insectes sur les murs (humidité au bout des pattes)
- Manip d'adhésion capillaire : améliorer avec un système de masse qu'on accrocherait à la lame pour caractériser la force nécessaire à appliquer ?
- Choix des ODG : mieux les justifier (montrer R , justifier $\theta_e \sim 0$ car eau liquide mouillant. Commenter la valeur de la force trouvée !
- Commenter la longueur capillaire : goutte vs flaque.
- Si erreur sur slide, la corriger au tableau.

- Dégager plus de temps pour cette partie.
- Diapo d'intro : s'efforcer de reboucler sur les exemples présentés au début de la leçon.
- Ajustation de la fréquence du stroboscope ? Dire qu'on est limité techniquement (débit du robinet pas contrôlable, et fin de gamme du strobo). Sinon prendre un vase de Mariotte pour gérer le débit.
- Autres questions et notions : forme des ménisques, loi de Jurin (si hauteur de Jurin $>$ hauteur du capillaire, kespasstil ?), application au sopalin, Young-Dupré.