

Niveau : L2

Agrégatif : espère que son titre
de LP sera compréhensible

Jury :

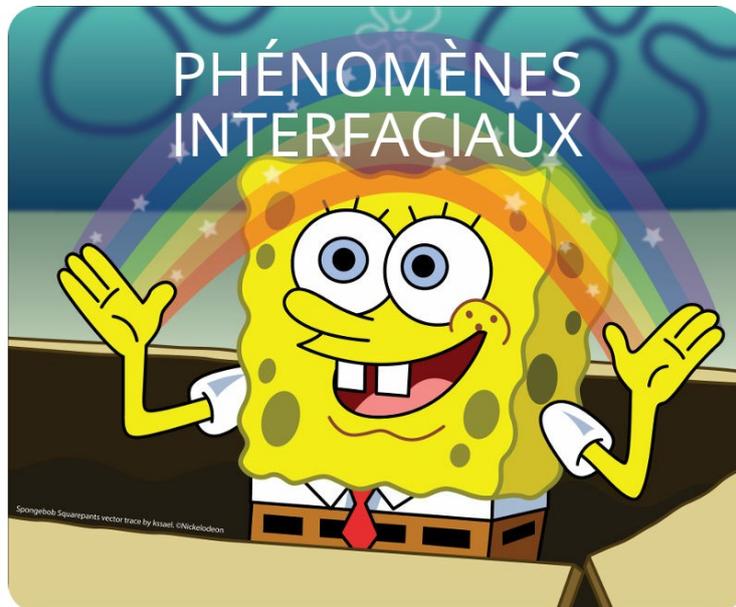


Table des matières

1	Généralités sur la leçon	2
2	Développement de la leçon	2
2.1	Première approche de la tension superficielle	2
2.2	Compétition avec la pesanteur	3
3	Exercices de base et applications intéressantes pour la leçon	4
4	Bibliographie pour construire la leçon	4
5	Expériences illustratives	4
6	Questions et remarques du correcteur	4
6.1	Questions	4
6.2	Remarques.	5

1 Généralités sur la leçon

Le titre de cette leçon peut sembler assez vague et laisser beaucoup de possibilités (tension superficielle, domaines magnétiques, frottements solides, transferts thermiques ou, d'un tout autre point de vue, passage d'ondes à une interface). Toute fois la tension superficielle semble un passage obligé auprès du jury. Le titre demandant des phénomènes au pluriel, il va donc falloir faire du lien entre différents domaines de la physique.

J'ai donc essayé d'orienter la leçon sur le point de vue énergétique et la compétition entre des énergies surfaciques et volumiques plutôt que de dérouler la physique de la tension de surface linéairement. J'ai donc essayé de faire un parallèle avec les domaines magnétiques (compétition entre énergie d'appariement de spin et énergie magnétique). Une grosse partie est aussi consacrée à la compétition avec la gravité.

Prérequis :

- ▷ Hydrostatique ; Dynamique des fluides
- ▷ Théorèmes énergétiques
- ▷ Interaction de Van der Waals ; liaisons hydrogènes / métalliques
- ▷ Magnétisme (notion de spin, énergie magnétique)

2 Développement de la leçon

Introduction

- ▷ Cette leçon va traiter des phénomènes impliqués par la présence d'une interface entre deux milieux.
- ▷ La présence d'une interface induit un coût énergétique
- ▷ **Exemples du quotidien** : Capillaires ; Gouttes sur un robinet ; Bulles de savon
- ▷ **Hypothèses** :
 - ★ Les deux milieux en contact sont non-miscibles (pas de mélanges binaires)
 - ★ Il n'y a pas de transferts de matière (pas de réactions chimiques ni de changements de phase)
 - ★ On considère l'équilibre thermodynamique installé (milieux au repos)

2.1 Première approche de la tension superficielle

► 1) Mise en évidence expérimentale

Expérience : film de savon dans un cadre rigide avec un barreau mobile.

- Le film exerce une force sur le barreau. Cette force est proportionnelle à la longueur L du barreau.
- Si on souhaite augmenter la surface d'une longueur dl , il faut fournir un travail $\delta W = Fdl \propto Ldl = dS$. On définit donc le coefficient de tension superficielle γ tel que $\delta W = 2\gamma dS$. Le facteur 2 vient de la présence de deux interfaces liquide-air dans cette situation.

► 2) Origine microscopique du phénomène

On s'intéresse à une interface liquide-air. A l'intérieur du liquide, la cohésion est assurée par des forces de cohésion (interactions de Van der Waals, liaisons hydrogènes, ...). Dans le volume, les interactions s'équilibrent entre molécules voisines, mais pour les molécules à l'interface, le nombre moyen de voisins est inférieur. On a donc une différence d'énergie de cohésion qui induit cette force de tension.

Ordres de grandeur : Pour l'eau : liaisons hydrogènes $E_I \simeq 10 \text{ kJ.mol}^{-1}$, taille typique $a \sim 3\text{\AA} \implies$

$$\gamma_{eau} \sim \frac{E_I}{N_A a^2} \sim \frac{10^4}{6.10^{23} * (3.10^{-10})^2} \sim 0.15 \text{ N.m}^{-1}.$$

En réalité, à T_{amb} , $\gamma_{eau} = 72 \text{ mN.m}^{-1}$; $\gamma_{cyclohexane} = 23 \text{ mN.m}^{-1}$ (car molécules apolaires aprotiques) ; $\gamma_{Hg} = 450 \text{ mN.m}^{-1}$ (car liaisons métalliques).

Remarques :

- Il existe des tensions de surface pour des interfaces liquide-air, liquide-liquide, liquide-solide ou solide-air.
- On voit déjà que créer une interface à un coût énergétique. En l'absence d'autres phénomènes, un fluide va chercher à minimiser sa surface (c'est pour cela que les bulles sont sphériques).

► 3) Première application : Suppression d'une bulle

On s'intéresse à une bulle d'air dans de l'eau (ou une bulle d'eau dans l'air). On va négliger l'effet de la pesanteur. Deux énergies sont à prendre en compte :

- pression : $E_p = -\Delta p V = -\frac{4\pi}{3} R^3 \Delta p$
- tension superficielle : $E_\gamma = \gamma S = 4\pi R^2 \gamma$

Une variation dR du rayon implique :

- $dE_p = -4\pi R^2 \Delta p dR$
- $dE_\gamma = 8\pi R \gamma dR$

A l'équilibre : $dE_{tot} = 0 = 8\pi R \gamma dR - 4\pi R^2 \Delta p dR \implies \Delta p = \frac{2\gamma}{R}$

Remarque :

- Attention : pour une bulle de savon, il faut prendre en compte 2 interfaces $\implies \Delta p = \frac{4\gamma}{R}$
- On voit une compétition entre une énergie volumique E_p et une énergie surfacique E_γ . Analogie avec les milieux magnétiques : compétition entre l'énergie d'appariement pour créer une paroi de domaine (énergie en surface) et l'énergie du champ magnétique produit (énergie en volume).

Transition didactique : On va maintenant regarder la compétition entre la pesanteur (énergie en volume) et la tension superficielle (énergie en surface).

2.2 Compétition avec la pesanteur

► 1) Longueur capillaire

On cherche à définir une grandeur pour délimiter deux régimes.

- Pesanteur : $E_{pp} = \rho g z_G V = \rho g R * \frac{4\pi}{3} R^3$; z_G le centre de gravité
- Tension de surface : $E_\gamma = \gamma S = 4\pi R^2 \gamma$

$$\implies \frac{E_{pp}}{E_\gamma} = \frac{\rho g R^2}{3\gamma}$$

Def : longueur capillaire : $l_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$

- Si $l_c \gg R$: régime capillaire
- Si $l_c \ll R$: régime gravitaire

► 2) Etallement d'une goutte

On considère une goutte sur une table. On approxime la goutte à un cylindre de rayon R et de hauteur h : $V = \pi R^2 h$.

Dans le système {goutte + table}, il y a trois énergies de tension superficielle à prendre en compte :

$$\triangleright E_{\gamma, LV} = \gamma_{LV} \pi R^2 = \gamma \frac{V}{h} \text{ en négligeant les cotés du cylindre}$$

$$\triangleright E_{\gamma, LS} = \gamma_{LS} \pi R^2 = \gamma_{LS} \frac{V}{h}$$

$$\triangleright E_{\gamma, SV} = \gamma_{SV} (S_{table} - \pi R^2) = \gamma_{SV} \frac{V}{h} + c_{ste}$$

$$\triangleright + \text{ la pesanteur : } E_{pp} = \rho g \frac{h}{2} V + c_{ste}$$

L'énergie totale s'exprime donc $E = (\gamma + \gamma_{LS} - \gamma_{SV}) \frac{V}{h} + \frac{1}{2} \rho g h V + c_{ste}$. On voit apparaître une différence de gamma :

Def : Paramètre d'étalement $s = \gamma_{SV} - (\gamma + \gamma_{LV})$.

Ce paramètre compare le terme énergétique sans la bulle et avec les interfaces produites par la présence de la bulle :

- si $s > 0$, ie $\gamma_{SV} > (\gamma + \gamma_{LV})$, il est rentable de créer l'interface \implies mouillage total
- si $s < 0$, ie $\gamma_{SV} < (\gamma + \gamma_{LV})$, il n'est pas rentable de créer l'interface, il va donc se former une bulle pour diminuer la surface de contact avec la table \implies mouillage partiel

Si on revient au cas de la bulle, on réécrit l'énergie $E = s \frac{V}{h} + \frac{1}{2} \rho g h V + c_{ste}$.

A l'équilibre : $\left. \frac{dE}{dh} \right|_{h_{eq}} = 0 = \frac{1}{2} \rho g V - s \frac{V}{h_{eq}^2} \implies h_{eq} = \sqrt{\frac{-2s}{\rho g}}$

► 3) Loi de Young-Dupré (partie tiroir)

On s'intéresse maintenant à l'angle de contact qu'on avait écarté pour la partie précédente. Sur la ligne triple, on ne doit tenir compte que des tensions de surface car la ligne n'a pas de masse. On projette sur la surface :

$$\gamma_{LS} + \gamma \cos \theta = \gamma_{SV} \implies \cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{LS}}{\gamma} = \frac{s}{\gamma} + 1 \text{ avec le paramètre d'étalement.}$$

On retrouve que l'angle θ n'est défini que si $s < 0$, ie si une goutte se forme.

Conclusion

- ▷ Compétition Volume/Surface
- ▷ Analogie avec la conduction thermique : Stockage d'énergie en volume et pertes par flux aux interfaces

3 Exercices de base et applications intéressantes pour la leçon

- ▷ Loi de Young-Dupré / Loi de Laplace
- ▷ Etalement d'une goutte
- ▷ Collage capillaire
- ▷ Loi de Jurin / Mesure par arrachement
- ▷ Instabilités de Rayleigh-Plateau / Instabilités de Rayleigh-Taylor

4 Bibliographie pour construire la leçon

- ▷ Hydrodynamique physique ; Guyon, Hulin, Petit (à la bibli ou sur le Drive)
- ▷ Why is surface tension a force parallel to the interface? ; Antonin Marchand + Vulgarisation par Louis Heitz <3 (sur le Discord)
- ▷ Cours sur la capillarité de Lyon ; (sur le Discord)

5 Expériences illustratives

- ▷ Expérience introductive : Film de savon dans un anneau avec un fils. En perçant d'un des deux côtés du fils, on voit qu'il se tend : le film de savon cherche à minimiser sa surface car ça lui coûte de l'énergie.
- ▷ Si vous développez Young-Dupré : regarder l'angle de contact de l'eau sur différentes surfaces (parafilm, verre, téflon)

6 Questions et remarques du correcteur

6.1 Questions

- ▷ Quelles méthodes expérimentales pour mesurer une tension de surface : loi de Jurin, arrachement, ondes gravito-capillaires
- ▷ OdG des liaisons hydrogène : 5-40 kJ.mol⁻¹
- ▷ Marcher sur du mercure / insecte qui marche sur l'eau : Le Gerri
- ▷ Liaisons métalliques dans des liquides?? Oui, même si elles n'impliquent pas un ordonnement de la matière. C'est comme dans l'eau : les liaisons H peuvent produire de la glace ou juste assurer la cohésion de l'eau.
- ▷ Exemples de matériaux sur lesquelles l'eau garde sa forme de goutte? Lotus : structure microscopique. Applications : Textiles,...
- ▷ Loi de Laplace généralisée : $\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$, avec R_1 et R_2 les deux rayons de courbe locale
- ▷ Autre démo de Laplace : Thermo (cf Diu page 211)
- ▷ Débat sur l'influence de la température dans Δp dans la loi de Laplace.

- ▷ Modèle micro : liaisons avec l'air ? Oui mais tellement dilué que les interactions sont négligeables par rapport à celles au sein du liquide.
- ▷ Peut-on avoir une tension de surface négative ? Non, mais on peut avoir une différence entre les tensions (paramètre d'étalement s) négative : ça explique la loi de Jurin avec le mercure.
- ▷ Évolution de la tension de surface en fonction de la concentration de tensioactif ? Parler de concentration micellaire critique
- ▷ Comment on ferait l'expérience du barreau qui met en évidence la tension superficielle ?
- ▷ Pourquoi on utilise de l'eau savonneuse ?
- ▷ Pourquoi la tension superficielle est tangentielle alors que le modèle développé en I)2) donne une résultante vers le bas ? (*cf* biblio)
- ▷ Surface hydrophobe/superhydrophobe : la différence est due à l'origine : hydrophobe = chimique, superhydrophobe = physico-chimique
- ▷ Principe du savon
- ▷ Tensioactifs, amphiphiles

6.2 Remarques

- ▷ Se placer en L3 permet de faire de la dynamique et des exemples plus sexy. D'autant plus que la L2 est parfois un peu léger pour parler de tension de surface...
- ▷ Potentiellement faire un Rayleigh-plateau (car il manque de la dynamique...)
- ▷ Pour une transition sur les frottements solides : Angle de reculée, angle d'avancée (hystérèse de l'angle de contact) dû à la rugosité du matériau

- LA BISE -