

Leçon de Physique n°5 Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Niveau : PC

Programme : PC

Notions et contenus

Capacités exigibles

Coefficient de tension superficielle.

Mesurer un coefficient de tension superficielle.
Utiliser l'expression de l'énergie de tension superficielle pour interpréter un protocole expérimental.

Livres : HGP, Gouttes, bulles, perles et ondes de Gennes, Sanz PC, H prépa mécanique des fluides 2ème année

Pré-requis :

Intro : cf. chapitre 1 de Gennes

1 – Tension superficielle

Expérience : bulle de savon → sphère parfaite et très peu déformable

Le surface d'un liquide est comme une membrane tendue caractérisée par une « tension superficielle » (ou « tension de surface ») qui s'oppose à ses déformations. Nous allons nous intéresser à l'origine physique et aux conséquences de la tension superficielle.

1) Origine et définition de la tension superficielle

Liquide = état condensé : les molécules s'attirent (si l'agitation thermique l'emportent sur cette attraction → gaz) *Schéma : de Gennes*

Dans le liquide : une molécule subit l'influence de toutes ses voisines (U : énergie de cohésion par molécule)

A la surface : les molécules perdent la moitié des interactions cohésives (état énergétiquement défavorable)

=> 1 molécule à la surface perd environ $U/2$ = défaut d'énergie de surface

→ les liquides ajustent leur forme pour exposer le minimum de surface

Il faut fournir de l'énergie mécanique pour créer de la surface (ex : vinaigrette).

On veut déformer de liquide : $A \rightarrow A+dA$:

Le travail est proportionnel au nombre de molécules qu'il faut amener à la surface et donc à dA : $\delta W = \gamma dA$ où γ est la tension superficielle

$$[\gamma] = [\text{Energie}]/[\text{L}]^2 = [\text{M}][\text{T}]^{-2}$$

γ : énergie à fournir pour augmenter la surface d'une unité

=> donner des valeur de γ

2) Forces capillaires

γ : énergie/u. de surface ou force /u. de longueur → on peut l'exprimer en N.m^{-1}

Expériences :

a) cadre avec deux fils non tendu + mélange 1/3 glycérol, 1/3 eau et 1/3 liquide vaisselle (= liquide glycérique) : + webcam ?

+ schéma !

On veut minimiser la surface. La force dépend de la longueur du fil

b) cadre avec tige mobile plongé dans un liquide glycérique → la tige se déplace

spontanément dans le sens de la flèche pour diminuer la surface (cf. schéma de Gennes)

Si on déplace la tige de dx , on fournit un travail : $\delta W = F \cdot dx = 2 \gamma l dx$ (2 car il y a deux interfaces liquide/air)

γ est une force par u. de surface normale à la tige, dans le plan de la surface et dirigée vers le liquide

Illustration : permettent aux insectes de marcher sur l'eau mais si par malheur on pollue la mare avec du détergent qui abaissent la tension de surface, ils coulent (photo+ schéma et/ou expérience avec bateau + qq gouttes de tensio-actif cf. de Gennes)

II – Forces de pression associées aux phénomènes de tension superficielle

1) Interface courbe et loi de Laplace

*Goutte sphérique (on néglige mes effets de la pesanteur) de rayon R d'un fluide (1) immergé dans un fluide (2)

Rayon de la goutte due à un équilibre entre les effets de tension superficielle et de surpression à l'intérieur de la goutte par rapport à l'extérieur

Système : {goutte de (1) + interface}

On veut augmenter le rayon R de dR à $\Delta P = P_1 - P_2 = \text{cste}$

Travail à fournir : $\delta W = \delta W_A + \delta W_P$

δW_A : travail dû à la variation d'énergie de surface de la sphère : $\delta W_A = \gamma_{12} dA = \gamma_{12} 8\pi R dR$
(car aire d'une sphère = $4\pi R^2$)

δW_P : travail des forces de pression : $\delta W_P = -P_1 dV_1 - P_2 dV_2$ or $dV_1 = 4\pi R^2 dR = -dV_2$

donc $\delta W_P = -(P_1 - P_2) 4\pi R^2 dR$

Equilibre si $\delta W = 0 \Rightarrow \Delta P = P_1 - P_2 = 2\gamma_{12}/R$ (formule de Laplace)

*Bulle de savon dans l'air

Schéma : air (film eau savonneuse) air

$\Delta P = P_{\text{int}} - P_{\text{ext}} = 4\gamma/R$ car il y a 2 interfaces eau savonneuse/air

Expérience : loi de Laplace avec manomètre

avec webcam, on mesure le diamètre projeté sur papier millimétré.

avec le jeu de robinets, on mesure la surpression dans la bulle

$\rightarrow \text{fit} \rightarrow \gamma$

*Interface quelconque cf. de Gennes (facultatif) : $\Delta P = P_1 - P_2 = \gamma_{12} C$ avec C la courbure totale $1/R + 1/R'$

2) Influence de la gravité

Photo GHP gouttes mercure

Les + petites \rightarrow calottes sphériques

Les + grosses \rightarrow aplaties sous effet de la pesanteur

Il existe une échelle de longueur qu-delà de laquelle la gravité devient importante :

longueur capillaire notée l_c (nous ne pourrions plus négliger les effets de la pesanteur).

On l'estime en comparant la pression de Laplace $\Delta P \approx \gamma/l_c$ et la pression hydrostatique

$\Delta P = \Delta \rho g l_c \Rightarrow l_c = \sqrt{\gamma/\Delta \rho g} \approx 2\text{mm}$

bulle sur surface de hauteur h :

si $h < l_c$: gravité négligeable : liquide comme en impesanteur et effets capillaires dominants

si $h > l_c$: régime dit « de gravité »

3) Ascension capillaire et loi de Jurin GHP

l_c : ordre de grandeur de la hauteur d'ascension capillaire d'un fluide le long d'une paroi verticale dans le cas où le fluide « mouille » c'est-à-dire lorsque le centre de courbure de l'interface est à l'extérieur du liquide (\neq mercure sur le verre). *Photo GHP*

Lorsqu'un tube capillaire est plongé dans un liquide, on observe une déformation de l'interface près des parois mais également une ascension du ménisque dans le tube par rapport à l'extérieur.

Nous écrivons l'équilibre de la colonne de liquide située dans le tube capillaire (colonne de rayon r et de hauteur h) sous l'effet de son poids ($\pi r^2 h \rho g$) et de la différence de pression au niveau de l'interface.

Hypothèse : interface liquide/air sphérique, de rayon R

Pression juste en dessous de l'interface dans le capillaire : $P_A = P_{atm} - 2\gamma/R$.

Rayon de courbure de l'interface R liée au rayon r du tube et à l'angle de raccordement θ par la relation $r = R \cos \theta$

Pression au point B sous A, à l'altitude $h=0$: $P_B = P_{atm} = P_A + \rho g h$

$\Rightarrow h = 2\gamma \cos \theta / (\rho g r)$

Expérience avec plusieurs tubes de différents diamètres (on considère un angle de raccordement nul) cf. Duffait \Rightarrow en déduire γ

à faire avec de l'alcool pur (meilleur mouillage)

Chasser tout liquide résiduel pour éviter la formation de bulles.

Faire l'image des tubes avec une lentille ($f=20\text{cm}$) \rightarrow attention : image inversée (QI + calque + tube + lentille + diaphragme + écran)

III – Notion de mouillage

Mouillage : étude de l'étalement d'un liquide déposé sur un substrat solide (ou liquide).

Applications : cf. de Gennes

Il faut comprendre le mouillage pour le contrôler en modifiant la surface pour rendre un solide mouillant non mouillant ou l'inverse.

Mouillage total : quand le liquide a une forte attraction pour le solide.

Mouillage partiel : dans le cas contraire.

Faire un schéma

Hypothèse : on néglige les effets de la pesanteur

1) Paramètre d'étalement de Gennes

Paramètre d'étalement S mesure la différence entre l'énergie de surface du substrat sec et mouillé (par unité de surface) :

$S = E_{\text{substrat sec}} - E_{\text{substrat mouillé}} = \gamma_{SA} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LA})$ *Schéma + définir les γ*

Présence de film favorable si $E_{\text{substrat mouillé}} < E_{\text{substrat sec}} \Rightarrow S > 0$

$S > 0$: mouillage total : le liquide s'étale complètement pour abaisser l'énergie superficielle ($\theta_E = 0$) \Rightarrow film d'épaisseur nanoscopique qui résulte de la compétition entre les forces moléculaires et capillaires.

$S < 0$: mouillage partiel : la goutte ne s'étale pas et a la forme d'une calotte sphérique avec un angle de contact θ_E .

2) Gouttes et loi de Young-Dupré

En équilibrant les forces capillaires agissant sur la ligne de contact (ou « ligne triple »)

Schéma avec les vecteurs forces surfaciques γ_{SA} , γ_{SL} et γ_{LA} et l'angle θ_E

Projeter les forces sur Ox : $\gamma_{LA} \cos \theta_E = \gamma_{SL} - \gamma_{SA}$ + définition de $S \Rightarrow S = \gamma_{LA} (\cos \theta_E - 1)$

Remarques :

- θ_E n'est défini que si $S \leq 0$, θ_E est d'autant plus grand que le liquide est non-mouillant

- la projection des forces capillaires sur la verticale est équilibrée par une force élastique de réaction du solide.

3) Critères de mouillage : règle de Zisman (factultatif) de Gennes

Peut-on prévoir qu'une surface solide est mouillable ou non mouillable ?

- Solides dus à des liaisons fortes (ioniques, covalentes ou métalliques) ont de fortes énergies de surface ($\gamma_{SA} \approx E_{\text{liaison}}/a^2 \approx 1\text{eV}/a^2 \approx 0,5\text{-}5 \text{ N.m}^{-1}$)

exemple : verre, silice, oxydes métalliques : ils sont généralement mouillés par la plupart des liquides

- Solides dus à des liaisons de plus basse énergie (VdW, LH) auront des énergies de surfaces faibles ($\gamma_{SA} \approx kT/a^2 \approx 10 \text{ à } 50 \text{ mN.m}^{-1}$)

exemples : polymères, teflon, paraffine : de telles surfaces seront plus difficilement contaminées : mouillage partiel ou total suivant le liquide utilisée

Il faut regarder le signe de S.

Critère empirique de Zisman : tout substrat solide a une tension critique de surface γ_c telle que :

$\gamma > \gamma_c$: mouillage partiel où : tension superficielle du liquide

$\gamma < \gamma_c$: mouillage total

Conclusion :

On a vu dans cette leçon comment que les phénomènes interfaciaux entraînent dans de nombreuses problématiques physiques et est utilisé dans plusieurs processus industriel et naturel.

Nous avons défini la tension superficielle et étudié son origine ainsi que ses conséquences lors de l'étude des interfaces. Nous avons pu décrire mathématiquement une interface à 2 phases avec la loi de Laplace et décrire le phénomène d'ascension capillaire via la loi de Jurin. Enfin, nous avons étudié la notion de mouillage et son lien avec la tension de surface.