

L5 : Phénomènes interfaciaux impliquant les fluides

Sommaire

1	Tension superficielle	1
1.1	Observations	1
1.2	Origine microscopique	2
1.3	Approche énergétique	2
2	Interface à deux fluides	3
2.1	Loi de Laplace	3
2.2	Instabilité de Rayleigh-Plateau	4
3	Interfaces triples	6
3.1	Mouillage	6
3.2	Ascension capillaire	7

Niveau :

Prérequis

- Hydrostatique
- Thermodynamique (dont potentiels thermos)
- Mécanique

INTRODUCTION Phénomènes interfaciaux entre fluides présents dans quotidien comme avec les bulles de savons ou pourquoi les gouttes sont plutôt circulaires ? Pk fluide remonte dans capillaires ?

En zoologie : les insectes qui se déplacent sur l'eau

Interface : frontière entre 2 phases considérées

Expe quali : trombone sur eau flotte => grâce à tension superficielle (si on ajoute savon il coule (à faire plus tard))

1 Tension superficielle

1.1 Observations

Expe quali : cadre avec tige mobile, on crée un film de savon. On perce le film d'un coté => la tige se déplace vers le film restant (pour diminuer aire de la surface du film de savon)

Pour empêcher le mouvement de la barre, il faudrait appliquer une force dans le sens opposé (\vec{F}_0) pour s'opposer à la force qu'exerce l'interface sur la tige (\vec{F}_γ).

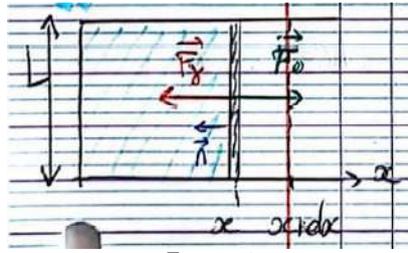


Figure 1

Expérimentalement, on trouve que plus L est grand plus la force à appliquer est grande => dépendance linéaire. On définit un coeff γ : **tension de surface** qui caractérise la proportionnalité entre \vec{F}_γ et L (dirigé vers interface pour réduire sa surface) => de manière générale $\vec{F}_\gamma = \gamma L \vec{n}$.

Ici on a 2 interfaces liq-air => $\vec{F}_\gamma = 2\gamma L \vec{n}$.

$\vec{\gamma}$: **force linéique** [$N.m^{-1}$]

1.2 Origine microscopique

Tension superficielle associée aux forces de cohésion entre les molécules de fluides (Vdw, hydrogènes, métalliques, ioniques).

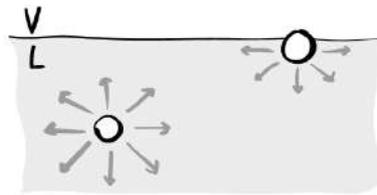


Figure 2

Si on compare une molécule I à l'interface et une V dans le liq => il manque des interactions stabilisantes pour la molécule I/V (le gaz est moins dense => moins d'interactions) => avoir une grande surface est couteux en énergie

=> γ : force qui tend à minimiser la surface entre les interfaces.

ODG de γ :

- eau pure : 72 mN.m^{-1}
- éthanol : 22 mN.m^{-1}
- mercure : 485 mN.m^{-1}

Mais on peut aussi la voir comme une énergie de surface.

1.3 Approche énergétique

La tension de surface peut être vue comme l'énergie à fournir pour augmenter la surface d'une interface [$J.m^{-2}$].

Travail de cette force pdt déplacement dx : $\delta W = F_\gamma dx = 2\gamma L dx = 2\gamma dA$

Avec dA : élément de surface élémentaire correspondant au déplacement dx => γ : énergie pour

étirer l'interface de $dA \Rightarrow$ plus elle est grande, plus c'est difficile de déformer le liq.

ex bulle : il faut étirer la surface avec le cout en énergie le plus faible \Rightarrow petit γ . Or $\gamma_{eau pure} \gg \gamma_{savon} \Rightarrow$ difficile de faire une bulle avec eau pure.

Expe quali : on rajoute du savon dans l'eau \Rightarrow le trombone tombe car tension de surface abaissée

Pour un système à une interface $\Rightarrow A$: nouvelle variable intensive \Rightarrow Indentité thermo : $dU = TdS - pdV + \mu dN + \gamma dA \Rightarrow U(S, V, N, A)$

$$\gamma = \left. \frac{\partial U}{\partial A} \right|_{S, V, N} = \left. \frac{\partial F}{\partial A} \right|_{T, V, N} = \left. \frac{\partial G}{\partial A} \right|_{T, p, N} \quad (1)$$

Minimisation du potentiel thermo adaptée \Rightarrow minimisation de la surface de l'interface.

Ex : en absence de forces ext, une masse liq sera sphérique car c'est la géométrie qui minimise la surface pour un volume donnée \Rightarrow gouttes sphériques

Facteurs influençant γ :

- nature des fluides en contact
- température
- impureté (généralement γ diminue sauf pour sel (car on rajoute des interactions))

2 Interface à deux fluides

La tension de surface est à l'origine de la surpression à l'intérieur des gouttes et bulles (pour garantir équilibre méca)

2.1 Loi de Laplace

Système :

- bulle de gaz sphérique à T, P et de rayon R
- entourée de liq qui se comporte comme un thermostat T_0 et P_0
- fermé : interface ne laisse pas passer de particule (bof ici mais ok dans bulle : $\tau_{eqmeca} \ll \tau_{eqsmotique}$)

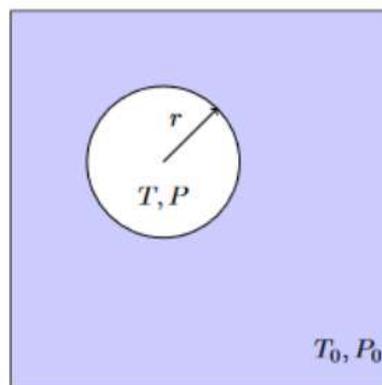


Figure 3

Comme on travaille avec un thermostat avec T_0 et P_0 fixées \Rightarrow potentiel thermo adaptée pour décrire l'équilibre de la bulle de gaz : enthalpie libre du syst à l'eq $G^* \Rightarrow G^* = U + P_0 V - T_0 S$

On différencie :

$$dG^* = dU + P_0 dV - T_0 dS = T dS - P dV + \gamma dA + P_0 dV - T_0 dS = (P_0 - P) dV + \gamma dA + (T - T_0) dS \quad (2)$$

Or $A = 4\pi R^2 \Rightarrow dA = 8\pi R dR$ et $V = \frac{4}{3}\pi R^3 \Rightarrow dV = 4\pi R^2 dR$.

$$\Rightarrow dG^* = (T - T_0) dS + (4\pi R^2 (P_0 - P) + 8\pi R \gamma) dR = (T - T_0) dS + 4\pi R^2 (P_0 - P + \frac{2\gamma}{R}) dV \quad (3)$$

A l'éq thermo, le potentiel thermo est extrémal par rapport à chacune de ses variables, ici G^* est min $\Rightarrow dG^* = 0$

- $T = T_0$: équilibre thermique
- $P = P_0 + \frac{2\gamma}{R}$: équilibre méca \Rightarrow courbure de l'interface \Rightarrow surpression à l'intérieur de la bulle = pression de Laplace \Rightarrow plus bulle petite \Rightarrow plus R petit \Rightarrow plus surpression grande

Loi de Laplace : $\Delta P = P - P_0 = \frac{2\gamma}{R}$

Généralisation : $\Delta P = P - P_0 = \gamma(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}) = \gamma C$

- R et R' : rayons courbures principaux au point considéré :
 - Si $R = R' \Rightarrow$ sphère
 - $R' \rightarrow \infty \Rightarrow$ pas de discontinuité de pression \Rightarrow interface plane
- C : courbure moyenne locale de l'interface

Expe quanti : Vérifier expérimentalement loi de Laplace avec bulles de savon

- Film de savon \Rightarrow 2 interfaces eau-air $\Rightarrow \Delta P = P - P_0 = \frac{4\gamma}{R}$ avec γ : tension superficielle de l'eau savonneuse et R : rayon de la bulle approximée à une sphère
- On fait des bulles de tailles différentes (on mesure le rayon avec ImageJ) et on mesure la surpression avec une balance.
- En effet, la balance mesure la réaction qui est proportionnelle à $\vec{g} \cdot \vec{R} \alpha \vec{g}$. Elle nous affiche une masse qui est ce coeff de proportionnalité $\vec{R} = m \vec{g}$. Par principe des actions réciproques $\vec{R} = -\vec{F}$ avec \vec{F} : la résultante des forces associée à tout ce qu'il y a sur la balance. Ici on veut mesurer une surpression donc on tare la balance (avec l'embout à l'air libre à P_0) pour que la masse affichée corresponde uniquement à la pression de l'air ajouté dans le système qui permet d'avoir la bulle. On peut exprimer la force liée à la surpression (en projetant sur axe vertical) comme $S \Delta P \Rightarrow R = mg = S \Delta P \Rightarrow \Delta P = \frac{mg}{S}$ avec $S = \pi \frac{D^2}{4}$ la surface du couvercle.
- On trace $\Delta = f(1/R) \Rightarrow$ on obtient bien une relation linéaire \Rightarrow Laplace vérifiée et coeff directeur $\Rightarrow \gamma$ de eau savonneuse < eau pure

2.2 Instabilité de Rayleigh-Plateau

Si on ouvre un robinet, on observe que le jet d'eau se fragmente en gouttelettes \Rightarrow pk? pour abaisser son énergie de surface On modélise :

- jet comme un cylindre de rayon R et longueur L \Rightarrow surface $S_0 = 2\pi RL$

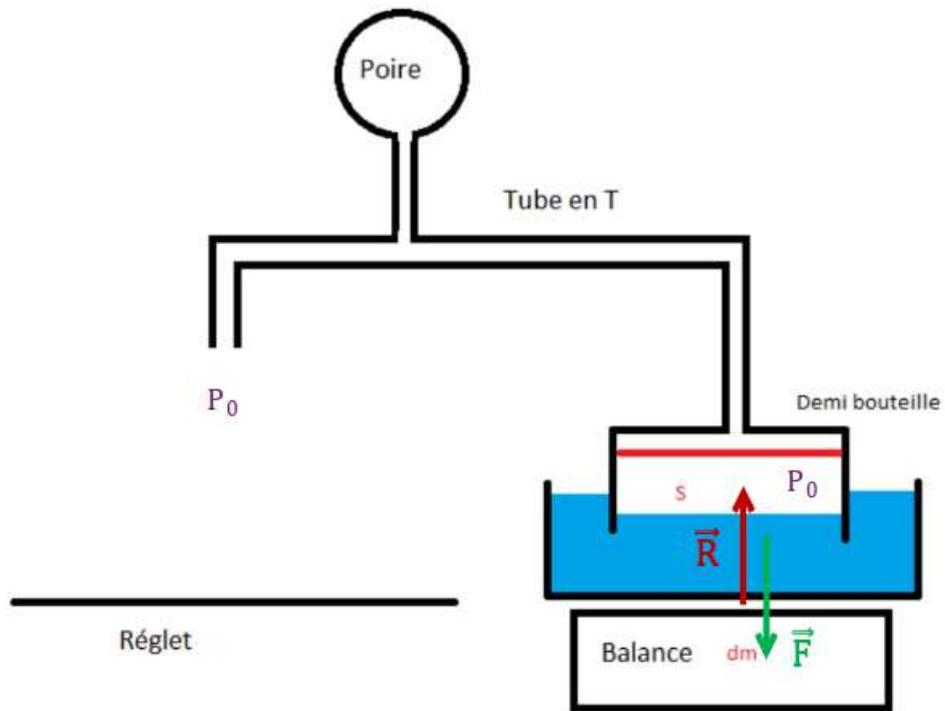


Figure 4

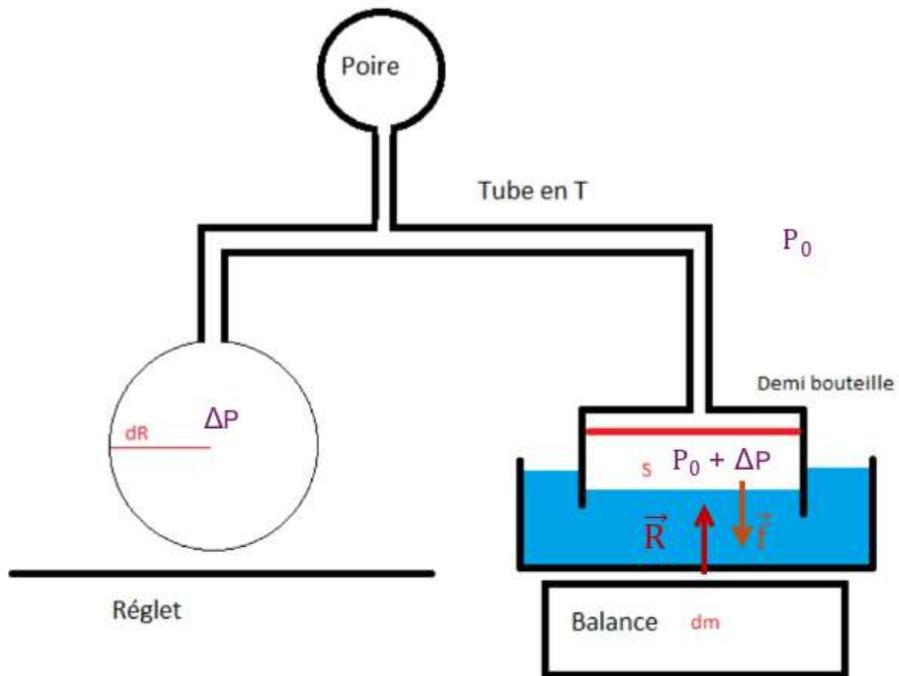


Figure 5

— n gouttelettes de rayon $r \Rightarrow$ surface $S_n = n4\pi r^2$

Conservation du volume $\Rightarrow \pi R^2 L = \frac{4}{3}\pi r^3 n \Rightarrow n = \frac{R^2 L 3}{4r^3}$

Rapport des surfaces :

$$\frac{S_n}{S_0} = \frac{n4\pi r^2}{2\pi RL} = \frac{R^2 L 3}{4r^3} \frac{4\pi r^2}{2\pi RL} = \frac{3R}{2r} \quad (4)$$

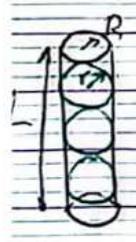


Figure 6

Dès que $r > \frac{3}{2}R \Rightarrow S_n < S_0 \Rightarrow$ phénomène de Rayleigh-plateau où le jet se fragmente en gouttes car mieux énergétiquement.

Eau sur table \Rightarrow 3 interfaces!

3 Interfaces triples

3.1 Mouillage

C'est l'étude de l'étalement d'un liq sur 1 substrat (liq ou sol) dans un environnement gazeux. 3 phases en jeu \Rightarrow 3 interfaces \Rightarrow 3 tensions de surfaces : γ_{SG} , γ_{SL} et γ_{LG}
 ligne de contact entre les 3 phases (rouge) : ligne triple

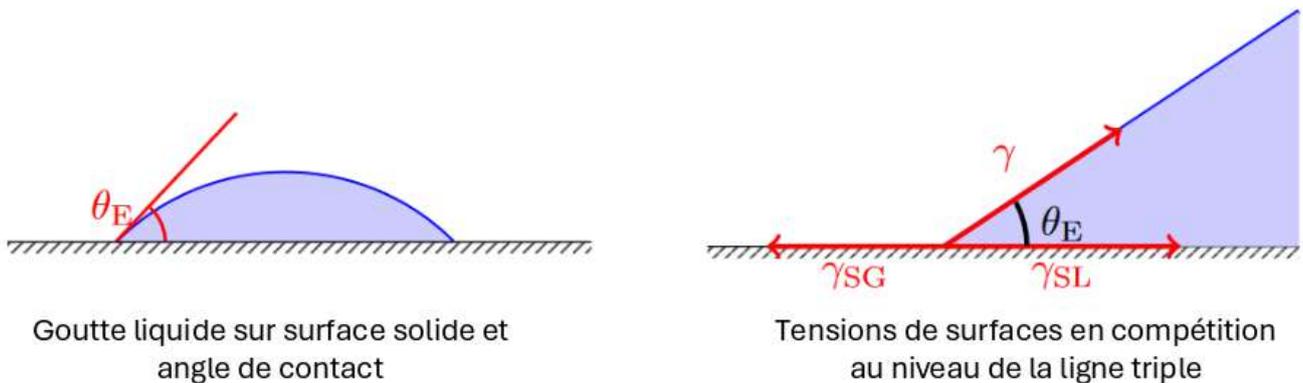


Figure 7

Le mouillage résulte de la compétition entre les affinités relatives des 3 phases. ex : étaler liq \Rightarrow augmentation des interfaces L/G et S/L en diminuant celle L/G

Efficacité du mouillage en fct de θ_e : anle de contact entre interfaces LG et SL.

— $\theta_e < \frac{\pi}{2}$: goutte cherche à maximiser surface liq-sol \Rightarrow liquide plutôt "mouillant" (eau, éthanol)



Figure 8

— $\theta_e = 0$: liq s'étale totalement : mouillage total

— $\theta_e > \frac{\pi}{2}$: goutte cherche à diminuer surface liq-sol \Rightarrow allure quasi sphérique \Rightarrow liq plutôt "non mouillant" (mercure)



Figure 9

Equilibre des force qui s'exercent sur la ligne triple de longueur $l \Rightarrow \sum_i \gamma_i l = 0 \Rightarrow / \vec{e}_x :$
 $-\gamma_{SG}l + \gamma_{SL}l + \cos\theta_e \gamma_{LG}l = 0$

$$\Rightarrow \text{Loi de Young-Dupré : } \boxed{\cos\theta_e = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}}}$$

$\Rightarrow \theta_e$ dépend du matériau et du fluide à travers les différents γ : il résulte de la compétition entre les affinité des différentes phases en présence.

Utile car la mesure de θ_e (avec photo) permet de mesurer γ_{SG} (très faible) en connaissant γ_{SL} et γ_{LG} . Aussi utilisé en chmie pour vérifier la pureté d'un produit en mesurant l'angle.

3.2 Ascension capillaire

C'est l'ascension d'un fluide mouillant dans un capillaire due à al compétition des différentes tension de surface : compétition capillaire mouillage

Quand on plonge un tube capillaire dans un liquide (plutôt mouillant) \Rightarrow ascension du liq dans tube + déformation interface près des parois (dans l'autre sens si non mouillant comme mercure)

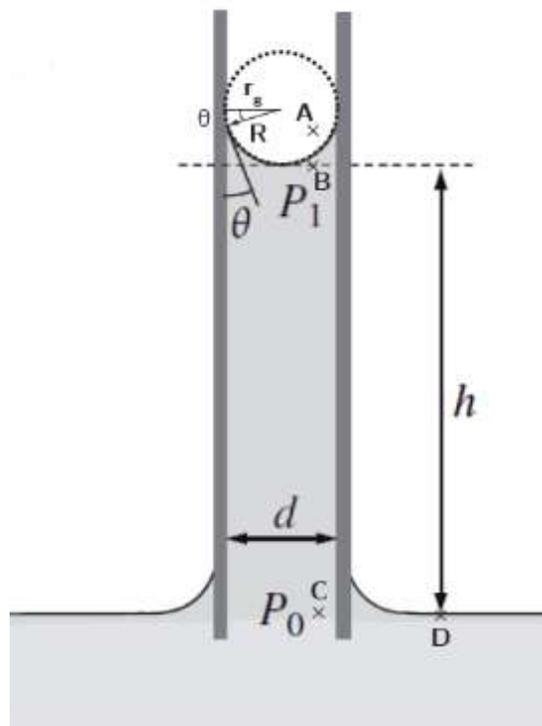


Figure 10

Objectif : mesurer la hauteur (h) d'ascension d'un liq

Expe quali : le liq monte à des hauteurs différentes suivant le rayon du capillaire

Loi de Laplace entre A et B : $\Delta P = P_a - P_B = \frac{2\gamma_{LG}}{R}$
 avec $r_g = R \cos\theta_e$ si mouillage (R : centre sphère qui donne sa forme au ménisque, r_g : rayon du

capillaire)

Loi de l'hydrostatique :

— B et C : $P_C = P_B + \rho_f g h$

— A et D : $P_D = P_A + \rho_g g h$

Or $P_C = P_B \Rightarrow P_B + \rho_f g h = P_A + \rho_g g h \Rightarrow P_B = P_A + (\rho_g - \rho_f) g h$.

En supposant $\rho_f \gg \rho_g \Rightarrow \Delta P = P_a - P_B = \rho_f g h$.

En combinant Laplace et hydrostatique on obtient la **Loi de Jurin** :
$$h = \frac{2\gamma_{LG} \cos\theta_e}{\rho_f g}$$

Si on connaît h et qu'on suppose mouillage total ($\theta_e = 0$) \Rightarrow on peut déterminer la tension de surface d'un liq \Rightarrow
$$\gamma_{LG} = \frac{h \rho_f g}{2}$$

CONCLUSION On a vu comment les phénomènes interfaciaux entrent dans plusieurs problématiques physiques et sont utilisées dans la nature (animaux, nénuphar avec gouttes eau) et industrie (contrôle pureté).

Tension superficielle résulte d'effet microscopiques : définition comme force par unité de longueur ou énergie par énergie de surface.