

Titre : LP5 - Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Présentée par : Ludivine Emeric

Rapport écrit par : Marion Spir-Jacob

Correcteur : Marc Rabaud

Date : 8 février 2021

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Cours de Marc Rabaud	Marc Rabaud	
Gouttes, bulles, perles et ondes	P.G. de Gennes	Belin, 2005
Instabilités hydrodynamiques	F. Charru	CNRS éditions, 2013
Physique tout-en-un PC PC* (4 ^e édition)		Dunod
Hydrodynamique physique	Guyon, Hulin, Petit	
Thermodynamique	Diu	
"Why is surface tension a force parallel to the interface?", American Journal of Physics 79, 999 (2011). arXiv 1211.3854	A. Marchand et al.	

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon :
licence

Pré-requis :
Thermodynamique
Statique des fluides

Introduction (1min30)

Phénomènes du quotidien : bulles de savon, café qui remonte dans morceau de sucre, petits objets qui tiennent à la surface de l'eau.

I – Tension de surface (15min)

1. Définition thermodynamique (4min30)

On définit la tension de surface γ comme (dF/dA) à (T, V, n) fixés. Interprétation : énergie nécessaire pour augmenter l'aire d'une interface.

2. Description mécanique (6min)

Vidéo : une tige se déplace sur un cadre, elle subit une force parallèle à l'interface.

$$dW = \gamma dA = F dx$$

L'origine microscopique des forces vient du fait que les molécules à la surface ont moins d'interactions que celles au milieu. La valeur élevée de la tension de surface eau/air vient des liaisons H et celle encore bien plus élevée du mercure, des liaisons métalliques.

3. Facteurs influençant γ (4min)

La tension de surface diminue avec la température jusqu'à s'annuler pour la température critique.

[Voir questions/réponses : attention, il faut aussi jouer sur la pression.]

La présence de tensio-actifs comme des savons permet aussi de diminuer γ .

II - Interfaces statiques (27min)

1. Forces de pression (12min)

Bilan des forces sur un hémisphère de goutte d'eau : forces de pression int, ext et force de tension exercée par l'autre hémisphère tout le long de l'équateur. Le calcul aboutit à la loi de Laplace : $\Delta P = 2\gamma/R$. On peut généraliser pour une courbure quelconque C : $\Delta P = \gamma C$. Dans le cas d'une bulle on a deux interfaces donc $\Delta P = 4\gamma/R$. Application numérique pour une bulle d'eau savonneuse de 1cm de rayon : $\Delta P = 12 \text{ Pa}$.

Expérience avec un dispositif formant une bulle et un manomètre permettant de retrouver l'ordre de grandeur de γ (30mN/m).

2. Mouillage (9min)

Définition du paramètre d'étalement qui compare la tension solide/gaz à la somme des tensions solide/liquide et liquide/gaz. S'il est positif : mouillage total, s'il est négatif, mouillage partiel.

Dans ce cas on fait un bilan des forces projeté sur l'horizontal sur un point de la ligne triple : loi de Young-Dupré. Si $\theta < 90^\circ$: bon mouillage, si $\theta > 90^\circ$: surface hydrophobe.

Applications technologiques : traitement des surfaces pour les rendre hydrophobes.

3. Compétition capillarité/gravité (6min)

Nombre de Bond $Bo = \rho g h / (2\gamma/R) = \rho g R^2 / \gamma$. $Bo = 1$ pour $R = l_c$ la longueur capillaire.

Ex : eau $l_c = 3 \text{ mm}$.

Tube capillaire, loi de Jurin.

Conclusion : ouverture sur les aspects dynamiques, ondes capillaires et instabilités de Rayleigh Taylor. (1min)

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Question : À propos de la loi de Jurin, y a-t-il une limite à la montée du liquide dans le tube ?

Réponse : Oui, il y a une limite : la dépression qui fait monter le liquide n'est possible que jusqu'à un certain point car on atteint la pression de vapeur saturante.

Q : L'ordre de grandeur ?

R : à peu près 10m

Q : Inversement si le rayon du tube est grand, le calcul reste-il juste ?

R : Non car l'interface n'est plus sphérique. L'eau ne monte pas.

Q : Revenons sur l'image du pinceau trempé dans l'eau : il y a une force de cohésion due à la tension superficielle. On utilise les mêmes arguments pour expliquer la construction des châteaux de sable sur la plage. Pouvez-vous expliquer le processus ?

R : Les grains de sable sont entourés d'eau. S'il y a trop d'eau, elle peut circuler entre les grains, il n'y a pas de cohésion. Il en faut juste suffisamment pour créer un pont entre les grains, un film pour assurer la cohésion.

Q : Quelle doit être la courbure des ponts d'eau entre les grains ? Quelle doit être la pression dans le pont capillaire par rapport à P_{atm} ? On veut une surpression ou une dépression ? On doit attirer les grains.

R : On veut une surpression.

Correction : Non, on veut une dépression. On a deux rayons de courbure, un négatif et un positif. On veut que la courbure totale soit négative. Il faut des grains proches, un petit disque d'eau entre les grains de sorte à avoir la courbure négative très grande devant la courbure positive. Ce processus génère une cohésion très puissante.

Q : Pouvez-vous refaire le calcul de la tension de surface de la bulle de savon mesurée ?

R : Calcul au tableau.

Q : Dans un verre de champagne ou de bière on voit des bulles. Y a-t-il des choses à dire en rapport avec la tension de surface à dire ?

R : C'est la présence d'aspérités qui initie les bulles.

Q : Peut-on le voir par la surpression de Laplace ? Que se passe-t-il quand R tend vers 0 ?

R : On a une pression infinie.

Correction : C'est en quelque sorte l'autre limite que celle mentionnée pour la loi de Jurin : on ne peut pas avoir des pressions trop faibles sinon le liquide se met à bouillir, ni des pressions trop fortes sinon le gaz reste dissous. Dans une flûte de champagne on voit des chapelets de bulles qui

se sont formées au même endroit, là où une rugosité du verre permet d'initier la formation de bulles.

Q : Existe-il d'autres façons de mesurer la tension de surface ?

R : Il y a la méthode de l'arrachement avec une lame de Wilhelmy. Le poids est équilibré et on mesure la force nécessaire à l'arrachement de la lame, qui correspond à la tension de surface.

Q : Elle existe seulement pour liquide/gaz ? Cette méthode marcherait-elle si on avait 2 liquides ?

R : Je ne sais pas.

Correction : c'est possible mais ça devient difficile (force plus faibles), on utiliserait plutôt d'autres méthodes, étudier les gouttes de l'un dans l'autre par exemple dans un tube tournant.

Q : Dans votre présentation vous avez un schéma des molécules à l'interface, vous pouvez me le commenter ?

R : On a les forces attractives et répulsives (trace au tableau le potentiel pour des forces de Van der Waals). Les forces répulsives sont à très courte portée, et les forces attractives à plus longue portée.

Correction : En effet, c'est un argument essentiel. Un autre argument important est de considérer l'épaisseur de l'interface sur laquelle la densité varie continûment (même si très rapidement).

Question/remarque : Vous avez indiqué la température dans les facteurs influençant la tension de surface. Vous avez dit qu'elle s'annulait en augmentant la température. Mais à 100°C la tension de surface de l'eau liquide n'est pas nulle. Il ne suffit pas d'augmenter la température. Il faut aussi jouer sur la pression pour s'approcher du point critique. On peut changer de phase sans avoir annulé la tension superficielle.

Q : Pouvez-vous expliquer pourquoi quand on fait sécher une serviette, elle est rêche ?

R : Les fibres restent collées comme les poils du pinceau.

C : Pour faire sécher des matériaux très fragiles, on peut faire le tour du point critique pour faire disparaître la tension interfaciale. Par exemple pour le nettoyage à sec par CO₂ supercritique : pour des objets fragiles on a intérêt à éviter la tension superficielle au moment du séchage. Aussi utilisé pour le séchage hypercritique des aérogels.

Q : Vous avez fait le calcul de la surpression de Laplace sur la bulle. Vous avez généralisé $\frac{2}{R} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R'}$. Pouvez-vous en dire un peu plus ?

R : Il faudrait faire un calcul thermodynamique plus complexe en minimisant le potentiel pour en déduire cette loi.

C : Le fait que $\frac{1}{R}$ puisse être positif ou négatif n'est pas évident. Je pense qu'il faudrait mentionner que R est une quantité qui peut avoir un signe.

Q : Pouvez-vous refaire l'argumentation du bilan des forces nul sur la calotte sphérique dans la slide sur le mouillage ? Quel est le système ? Il est immatériel, c'est une ligne triple, le petit élément de longueur transverse. Elle n'a pas de masse, donc pas de poids. Une force n'est pas dessinée, c'est celle du solide qui refuse de se déformer. On n'est à l'équilibre que parce qu'il y a une force verticale supplémentaire.

Q : Dans le même ordre d'idée, dans un bain moussant, si on zoome sur les bulles, que peut-on dire sur la tension superficielle de ces bulles ? Ce sont des sphères ? Si vous prenez deux bulles et que vous les laissez se coller, quelle est la frontière qui les sépare ? Si elles n'ont pas la même

taille, pas la même pression, l'interface va être courbée. Si elles ont la même taille, ça va être un plan. S'il y a 3 bulles, on obtient trois membranes. Dessinez les trois arêtes et faites l'équilibre de la tension superficielle.

R : Dessin au tableau (angles de 120°).

Correction : Phénomène de mûrissement des bulles par lequel on n'a à la fin que les grosses bulles (les petites ayant une surpression plus importante, elles se vident dans les grosses) qui finissent par éclater par drainage à cause de la gravité.

Q : Vous avez dit que l'eau sur le verre faisait un angle de 0° , pouvez-vous expliquer que quand il pleut, les gouttes ne semblent pas s'étaler sur les fenêtres des maisons ou des voitures ?

R : Déjà il y a des saletés sur les verres ce qui doit jouer sur la rugosité. De plus pour les surfaces inclinées, la goutte va se déformer à cause de la gravité. L'angle à l'arrière est plus petit que l'angle à l'avant.

C : En effet dans ce cas la différence des deux forces peut équilibrer le poids de la goutte. C'est effectivement extrêmement sensible à la propreté. Pour avoir réellement $\theta = 0$ c'est une exception, il faut être dans des conditions opératoires impeccables.

Q : Vous avez essentiellement présenté des aspects statiques. Dans quels cas dynamiques peut-on avoir des effets de tension superficielle ?

R : Le cas des vagues, on peut avoir une compétition entre la tension de surface et la gravité. On peut distinguer deux régimes, le régime des ondes de gravité et des ondes capillaires.

Q : Il y a 2 forces de rappel qui font la propagation : la gravité et les ondes capillaires, et il y a des échelles de longueur où la capillarité domine. Dans quelle échelle est-ce le cas ?

R : Il faut comparer la longueur d'onde avec la longueur capillaire du liquide.

Q : D'autres phénomènes où la capillarité arrive en dynamique ?

R : Instabilités de Rayleigh Taylor.

Q : L'image montrée est un mauvais exemple : les deux liquides ont l'air miscibles, l'expérience ne caractérise pas vraiment la tension superficielle.

Commentaires lors de la correction de la leçon

*(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. **L'enseignant** relit, et rectifie si besoin)*

Les points principaux de la leçon sont là, les réponses aux questions montrent une bonne compréhension. Le manque d'assurance est dommage, il faudrait travailler l'introduction, connaître par cœur les 2/3 premières phrases pour te lancer, ainsi que la dernière phrase de conclusion. Ne pas hésiter également à insister sur les transitions afin d'aider l'auditoire à se repérer. Et aussi faire attention au temps.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Bon plan, pas de problème. Parler des micelles dans l'eau savonneuse est sans doute inutile à ce niveau vu le manque de temps

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Peut-être insister un peu plus sur les raisons microscopiques

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

La mesure de la tension de surface avec la bulle de savon marche étonnamment bien. On peut envisager de dégonfler légèrement la bulle et de faire plusieurs points de mesure en répétant l'opération

Bibliographie conseillée :

Les bonnes références sont déjà listées.