



PSL 



SORBONNE  
UNIVERSITÉ

université  
PARIS-SACLAY

*Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge*

---

# PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT - CAPILLARITÉ

---

2024-2025



*This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.*

## Table des matières

0.1	Pour la partie Capillarité . . . . .	2
0.2	Pour la partie transfert thermique . . . . .	2
<b>1</b>	<b>Phénomènes de transport</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Rayonnement thermique</b>	<b>3</b>
2.1	Rayonnement du corps noir et principe du pyromètre optique . . . . .	3
2.2	[1P] Mesure d'émissivité par thermographie infrarouge . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Diffusion thermique</b>	<b>4</b>
3.1	Mesure de la conductivité thermique du cuivre . . . . .	4
3.2	[1P] Visualisation de la diffusion thermique par thermographie infrarouge . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Diffusion particulaire</b>	<b>5</b>
4.1	[1P] Diffusion du Glycérol dans l'eau . . . . .	5
4.2	[AP] Diffusion de charge à une dimension . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Capillarité</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>[1P] Tensiomètre à lame mouillée</b>	<b>8</b>
6.1	Principe . . . . .	8
6.2	Expérience . . . . .	8
<b>7</b>	<b>Loi de Jurin</b>	<b>9</b>
7.1	[1P] Mesure de l'ascension dans des tubes capillaires . . . . .	9
7.2	[1P] Mesure dans une cuve triangulaire . . . . .	10
7.3	[AP] Mesure du régime transitoire avec caméra . . . . .	11
<b>8</b>	<b>[2P] Loi de Laplace</b>	<b>13</b>
8.1	Expérience qualitative . . . . .	13
8.2	Expérience quantitative . . . . .	13
<b>9</b>	<b>Expériences qualitatives sur les lames de savon</b>	<b>13</b>
9.1	Rappels sur les tensioactifs . . . . .	13
9.2	[2P] Expériences . . . . .	14

### Bibliographie :

#### 0.1 Pour la partie Capillarité

- De Gennes, Brochard-Wyart, Quéré, *Gouttes, Bulles, Perles et Ondes*
- Cabane, Hénon, *Liquides : Solutions, dispersions, émulsions, gels*

#### 0.2 Pour la partie transfert thermique

- Diu, Guthmann, Lederer, Roulet, *Physique statistique*
- Taine, Enguehard, Lacona, *Transferts thermiques - Introduction aux transferts d'énergie, Dunod*

Ce TP regroupe les expériences portant sur les phénomènes de transport et celles portant sur les phénomènes de capillarité. Lors de votre premier passage sur ce TP, il est raisonnable de commencer par traiter les deux premières expériences [1P] impliquant la caméra thermique, qui sont les plus délicates. On pourra ensuite lancer l'expérience de la diffusion du glycérol dans l'eau (prévoir une heure) dont les mesures pourront être effectuées pendant que la partie *capillarité* du TP est traitée.

## 1 Phénomènes de transport

Cette partie n'a pas vocation à donner une liste exhaustive des expériences impliquant les phénomènes de transport mais à en introduire quatre nouvelles et à rappeler l'existence d'autres, complémentaires, vues dans les séries précédentes.

## 2 Rayonnement thermique

### 2.1 Rayonnement du corps noir et principe du pyromètre optique

Le rayonnement du corps noir, notamment la loi de Stefan, a déjà été étudié dans le TP de thermométrie.

### 2.2 [1P] Mesure d'émissivité par thermographie infrarouge

Cette manipulation étudie l'émissivité thermique de différents métaux, dont on utilisera des plaques métalliques chauffées. Pour rappel, la puissance rayonnée par un corps noir par unité de surface est donnée par  $P = \sigma T^4$  où  $T$  est la température du corps et  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  la constante de Stefan. La puissance rayonnée par un corps réel correspond à la puissance rayonnée par un corps noir de même température multipliée par l'émissivité  $\epsilon$  de l'objet étudié :  $P_{\text{obj}} = \epsilon_{\text{obj}} \sigma T_{\text{obj}}^4$ . En toute rigueur, l'émissivité dépend de la longueur d'onde (voir le complément sur le rayonnement thermique du Diu de physique statistique à ce sujet). Les émissivités dépendent fortement, pour un même matériau, de l'état de surface, on devra se contenter d'une vérification de leur ordre de grandeur.

Les métaux étudiés n'étant pas des corps noirs parfaits, ils vont réfléchir une partie du rayonnement ambiant reçu avec un coefficient de réflexion égal à  $(1 - \epsilon_{\text{obj}})$ . Ces métaux n'étant pas transparents, il n'y a pas lieu de tenir compte d'un coefficient de transmission.

La puissance surfacique totale émise par l'objet est donc :

$$P_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{obj}} \sigma T_{\text{obj}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{obj}}) \sigma T_{\text{amb}}^4 \quad (1)$$

où  $\epsilon_{\text{obj}}$  est l'émissivité du métal étudié,  $T_{\text{obj}}$  et  $T_{\text{amb}}$  sont les températures respectives de l'objet étudié et du milieu ambiant.

En négligeant la puissance rayonnée par la tranche d'air entre le métal et la caméra et ainsi que sa transmission (ce qui semble raisonnable vu les distances), la puissance surfacique reçue par la caméra sera une fraction, dépendant uniquement de la géométrie, de la puissance surfacique totale émise. Elle dépend donc de la température de l'objet mais aussi de celle du milieu environnant.

**Expérience** On dispose sur une plaque chauffante régulée en température des plaques de différents métaux, sur chacune desquelles est collé un petit morceau de scotch noir. La caméra doit être à **au moins une distance de 50 cm** (la caméra ne peut mettre au point à une distance inférieure, voir sa notice) de l'objet et perpendiculaire à la plaque. Un support est fourni avec la caméra qui permet de la fixer à un pied. Notez (voir notice) qu'elle affiche non pas la puissance reçue mais la température. Différentes mesures de températures vont permettre de remonter à l'émissivité d'un métal.

*La procédure qui suit est celle de la norme ASTM E1933-99A utilisée dans les mesures de températures par thermographie.*

**Détermination de la température du fond ambiant :** viser avec la caméra un papier aluminium froissé. Régler l'émissivité à 1. La température affichée correspond à une bonne estimation de  $T_{\text{amb}}$ , qu'il faut mettre à jour

dans le menu de la caméra comme température d'arrière-plan (background). Pour la suite, on fixe l'émissivité à  $\epsilon_{\text{scotch}} = 0.95$  qui est celle du scotch noir.

**Pour chaque métal étudié :** on vise (point central) le scotch noir. On relève la température du point central qui est  $T_{\text{obj}}$ . On vise ensuite une partie métallique sans scotch. On relève alors une température plus basse qu'on notera  $T_{\text{luc}}$ . La température de l'objet étant uniforme, on peut supposer que le métal est bien à la température relevée sur le scotch dont on connaît l'émissivité. On obtient alors l'émissivité réelle du métal en égalant l'émission théorique prenant en compte ses vraies température et émissivité (terme de gauche), et l'émission telle qu'exprimée à partir de  $T_{\text{luc}}$  par la caméra infrarouge qui suppose (incorrectement) une émissivité de 0,95 (terme de droite) :

$$\epsilon_{\text{obj}} T_{\text{obj}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{obj}}) T_{\text{amb}}^4 = \epsilon_{\text{scotch}} T_{\text{luc}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{scotch}}) T_{\text{amb}}^4 \quad (2)$$

$$\epsilon_{\text{obj}} = \epsilon_{\text{scotch}} \frac{(T_{\text{luc}}^4 - T_{\text{amb}}^4)}{(T_{\text{obj}}^4 - T_{\text{amb}}^4)}. \quad (3)$$

On trouvera sur le site de Fluke quelques valeurs d'émissivité attendues selon la qualité de la surface métallique. On a généralement une fourchette de valeur. Par exemple :

- Aluminium non oxydé 0,02---0,2 ;
- Cuivre 0,02---0,05 (poli) ou 0,05---0,2 (non poli) ;
- Acier inox 0,1---0,8 ;
- Laiton 0,03---0,05 (poli) vers 0,2 (non poli) ;
- Zinc 0,05---0,1 selon la surface.

**Note additionnelle.** Si on ne dispose pas d'une caméra thermique, on peut réaliser une mesure similaire à l'aide d'un thermomètre IR. Contrairement à la caméra thermique, le thermomètre IR ne donne qu'une seule mesure de température : la température moyenne sur la surface de mesure. La surface de mesure dépend de la distance du thermomètre à l'objet. Pour éviter une erreur systématique, il faudra donc effectuer la mesure de température au 'presque' contact de la surface (1 à 2 mm de distance par exemple) --- pour les mesures de  $T_{\text{obj}}$  et  $T_{\text{luc}}$ . Pour la mesure de  $T_{\text{amb}}$ , soit le thermomètre IR permet de changer la valeur de l'émissivité, alors on peut procéder comme avec la caméra thermique ; soit il ne le permet pas, on prendra alors pour  $T_{\text{ref}}$ , la température ambiante de la pièce. Bien que moins précises et moins pratiques que les mesures avec une caméra thermique, ces mesures avec un thermomètre IR sont assez cohérentes.

## 3 Diffusion thermique

### 3.1 Mesure de la conductivité thermique du cuivre

Pour rappel, la conductivité thermique du cuivre a été mesurée dans le TP de thermométrie.

### 3.2 [1P] Visualisation de la diffusion thermique par thermographie infrarouge

Les images obtenues à la caméra thermique permettent de visualiser les profils de température dans des barres métalliques de différents métaux dont les extrémités sont à des températures différentes. La manipulation est assez semblable à celle de l'étude de la conductivité thermique dans le barreau de cuivre excepté que la surface latérale des barres ne peut être supposée isolée ici. On peut s'en servir pour illustrer un phénomène de transfert thermique conducto-convectif.

On utilise le dispositif Jeulin (ENSP 4485, notice 264). Il s'agit d'une enceinte métallique dans laquelle on fait circuler de l'eau venant d'un bain thermostaté. Dans cette enceinte on fixe 4 barres métalliques : acier, laiton, aluminium et cuivre. Afin d'avoir une émissivité identique et de déduire la température des images de la caméra, Les barres sont recouvertes de scotch noir sur un côté. La longueur de scotch sur la barre est de 79 cm. Une extrémité de la barre plonge dans l'eau chaude et l'autre est à l'ambiante.

Choisir une température du bain de l'ordre de 60°. Mettre en route la circulation au moins 30 minutes avant d'enregistrer une image.

**Réglages préalables de la caméra** : il faut d'abord régler la température du fond ambiant, puis rester sur une émissivité de 0.95 (celle du scotch) et placer la caméra sur un pied à au moins 50 cm du dispositif en faisant en sorte que la plus grande dimension de l'image soit parallèle aux barres. Choisir dans le menu d'enregistrer les **images en niveaux de gris**. On peut rester sur une échelle Auto de température, en revanche éviter d'avoir un marqueur au milieu de l'écran. La conversion entre niveau de gris et température est simple : niveau nul pour la température minimale de l'échelle et niveau de gris égal à 255 pour la température maximale.

Les barres sont cylindriques de rayon  $R$  et de longueur  $L$ , et si la température est supposée uniforme sur une section  $S$  de la barre, on se limite à un problème unidimensionnel (pour une modélisation plus poussée, voir le chapitre sur les ailettes de refroidissement du Taine). L'équation de diffusion dans la barre supposée entourée d'air à la température ambiante uniforme  $T_{\text{air}}$  s'écrit alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{2h}{\rho c R} (T(x) - T_{\text{air}}). \quad (4)$$

avec  $\lambda$  la conductivité thermique du métal,  $\rho$  la masse volumique,  $c$  la capacité thermique massique et  $h$  le coefficient de transfert thermique surfacique (ou coefficient de Newton).

Si on impose comme conditions aux limites une extrémité à la température  $T_0$ , on s'attend, dans un régime **stationnaire**, à un profil de température le long de la barre de la forme :

$$T(x) - T_{\text{air}} = (T_{\text{air}} - T_0) \frac{\sinh(\alpha(x-L))}{\sinh(\alpha L)}. \quad (5)$$

avec  $\alpha = \sqrt{\frac{2h}{R\lambda}}$

Pour  $\alpha L \gg 1$ , on aura  $T(x) - T_{\text{air}} \sim (T_0 - T_{\text{air}}) \exp(-\alpha x)$ .

**Exploitation d'une image** : ouvrir l'image dans le logiciel ImageJ, l'outil Line permet de tracer une droite sur la barre puis d'obtenir le profil de température le long de cette droite (Menu Analyse puis Plot profile) qu'on peut ensuite exporter sous forme d'un tableau donnant la température en niveau de gris pour chaque pixel de la barre. A faire pour chaque barre. Les données sont exploitables dans un logiciel type qtiplot pour tracer le niveau de gris en fonction du pixel et faire les ajustements **uniquement pour la zone couverte par le scotch** et en remarquant que la température de la limite inférieure du scotch n'est pas celle du bain. On peut transformer facilement en température vs longueur en utilisant la relation niveau de gris --- température et la correspondance pixel --- position sur la barre.

On pourra vérifier si les profils de température ont bien la forme attendue en régime stationnaire quand ce régime est atteint. L'ajustement permet d'obtenir  $\alpha$  pour les différents métaux . Si les coefficients de Newton sont identiques d'un métal à l'autre, le rapport de  $\alpha$  entre deux métaux devrait être égal à l'inverse de la racine carrée du rapport des  $\lambda$ .

## 4 Diffusion particulière

### 4.1 [1P] Diffusion du Glycérol dans l'eau

L'expérience a fait l'objet d'une partie de la Composition 2002. On pourra se reporter à l'énoncé et au corrigé pour les calculs correspondants. La notice a été éditée dans le BUP n°819 (décembre 1999). Enfin, elle est décrite en anglais dans *Optics* de Sommerfeld (p. 347).

**Principe** À l'instant initial, eau et glycérol ne sont (en théorie) pas mélangés du tout et forment deux phases distinctes. Du fait de leur miscibilité, ils diffusent l'un dans l'autre au cours du temps ce qui atténue le gradient de concentration jusqu'à ce que la solution soit complètement homogène pour  $t \rightarrow +\infty$ . L'eau et le glycérol ayant des indices optiques différents, le gradient de concentration est directement équivalent à un gradient d'indice. On se sert alors de cette variation d'indice optique dans l'espace et dans le temps pour visualiser la déviation d'un faisceau lumineux. Cette déviation est donc, à l'instant  $t$  l'image directe du gradient de concentration. Sa mesure au cours du temps permet ainsi de remonter au coefficient de diffusion  $D$  du glycérol dans l'eau.

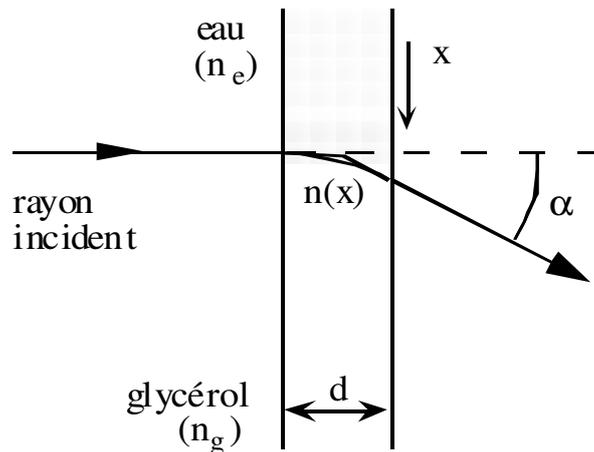


FIGURE 1 –

Si la déviation  $\alpha$  du rayon est petite :

$$\alpha = d \frac{dn}{dx} \quad (6)$$

L'indice optique est une fonction linéaire de la concentration, et on trouve finalement que la déviation maximum vaut :

$$\alpha_{\max} = \frac{(n_g - n_e)dC_0}{2\sqrt{\pi Dt}} \quad (7)$$

où  $D$  est la diffusivité et  $t$  le temps ( $t = 0$  correspondrait à l'instant où les 2 liquides n'ont pas encore diffusé).  $C_0$  est la fraction volumique du glycérol dans le mélange eau-glycérol utilisé (plus loin, on suggère  $C_0 = 50\%$ ).

**Réalisation de l'expérience** Élargir un faisceau laser avec une lentille cylindrique (agitateur en verre par exemple) pour réaliser une nappe, inclinée à  $45^\circ$  par rapport aux côtés de la cuve. On fera les observations sur un écran recouvert d'un papier millimétré situé à environ 50 cm de la cuve.

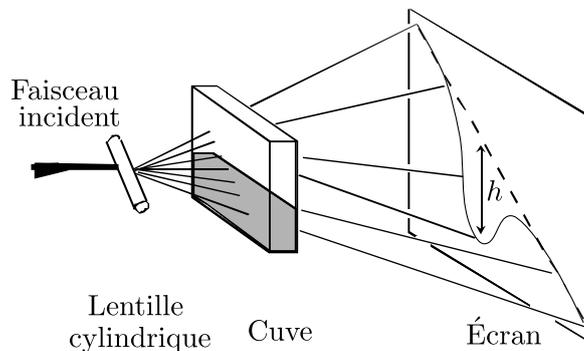


FIGURE 2 –

Quand la cuve est vide, la trace de la nappe sur l'écran est une ligne inclinée à  $45^\circ$  (trait pointillé sur la figure ci-dessus). Repérer cette trace sur le papier.

Remplir à moitié d'eau, puis verser doucement le glycérol dans le fond de la cuve à l'aide de la burette. L'extrémité de la burette doit être sur le côté de la cuve et plonger jusqu'au fond pour limiter au maximum le mélange des deux liquides par convection. La nappe laser est alors fortement déformée : l'allure de la trace sur l'écran est indiquée en trait plein sur la figure.

### Précautions

- être sûr que tout est prêt avant de verser le glycérol : la diffusion est un phénomène irréversible ! En cas de fausse manœuvre, il faut tout recommencer après avoir bien nettoyé la cuve.
- purger la burette
- ne pas secouer la cuve pendant l'expérience (il ne faut surtout pas essayer d'enlever la burette après avoir versé le glycérol)
- *utiliser plutôt un mélange eau-glycérol (50%)* que du glycérol pur, dont l'indice est trop différent de celui de l'eau ; la déviation est alors très importante et on sort du domaine de validité des formules ci-dessus. Si on utilise un mélange, celui-ci doit être bien homogène.
- il faut veiller à placer la cuve de manière à ce que le faisceau soit visible pendant toute l'expérience. En particulier, si la cuve est placée sur un support élévateur, il faut la placer au bord de celui-ci, le plus loin possible du laser (pour éviter que le faisceau ne soit arrêté par le support). D'autre part, il faut utiliser un écran de taille suffisante, surtout vers le bas (là où est dévié le faisceau).

Relever la déflexion maximum  $h_{max}$  en fonction du temps ; il est souhaitable de prendre des points pendant au moins une vingtaine de minutes.

En pratique, la formule qui donne  $\alpha_{max}$  ne permet pas d'ajuster de manière satisfaisante les résultats expérimentaux. En remplaçant  $t$  par  $t + t_0$  où  $t_0$  est un paramètre libre, l'ajustement est satisfaisant.  $t_0$  en général de l'ordre de 200-500s.

L'origine de ce temps  $t_0$ , nettement plus élevé que le temps nécessaire pour verser le glycérol, n'est pas claire :  $t_0$  ne doit pas être interprété comme étant l'instant du "mélange". L'hypothèse la plus probable est que le faisceau qui arrive à l'interface (endroit où le gradient d'indice est maximal) est dévié dans la cuve vers un endroit où le liquide est encore homogène et ne subit plus de déviation en l'absence de gradient d'indice. Tout se passe alors comme si la cuve avait une largeur plus faible et la déviation vaut donc moins que  $d$  ( $dn/dx$ ) aux temps courts. Cette hypothèse est compatible avec l'observation expérimentale que  $t_0$  augmente fortement si la largeur de la cuve augmente.

Ainsi, pour montrer que l'on a affaire à une loi de diffusion, il faut effectuer un ajustement linéaire et tracer  $h_{max}$  en fonction de  $1/(t + t_0)^{0,5}$ , ou  $h_{max}^2$  en fonction de  $1/t$ . La pente est reliée à  $D$  (donné dans les articles de la notice) et l'abscisse à l'origine est  $t_0$ .

Enfin, à partir de la forme du plan laser, déduire le profil vertical du gradient de concentration et le comparer à une gaussienne.

### Valeurs numériques :

indice de l'eau  $n_e = 1,33$ , du glycérol  $n_g = 1,47$ .

## 4.2 [AP] Diffusion de charge à une dimension

La question de la conductivité électrique du cuivre a été abordée dans le TP d'introduction aux mesures électriques.

On dispose dans la collection d'une expérience d'électrocinétique permettant de modéliser l'équation de diffusion sur la charge électrique. Sa notice est très complète et auto-suffisante. Consulter aussi la page Diffusion de charge à une dimension.

## 5 Capillarité

**Avertissement :** Pour les expériences quantitatives, utiliser de l'eau distillée (ou permutée) ou de l'éthanol, ainsi que du matériel propre, rincé préalablement à l'alcool et séché. Une quantité infime de contaminants peut modifier de manière considérable la tension de surface. En particulier, il faut prendre soin de ne pas recontaminer les objets (verrerie, lame du tensiomètre, etc.) lavés à l'alcool et à l'eau distillée en les touchant sans gants ou en passant les mains non gantées au-dessus. Si on ne dispose pas de chiffons en papier ne laissant pas de fibres, la meilleure solution pour le séchage est de laisser l'alcool s'évaporer, en accélérant si nécessaire le processus avec de l'air comprimé.

## 6 [1P] Tensiomètre à lame mouillée

Cet appareil sert à mesurer la tension superficielle d'une interface liquide-gaz.

### 6.1 Principe

On mesure avec une balance la force qu'exerce le fluide sur une lame solide plongé dans celui-ci.

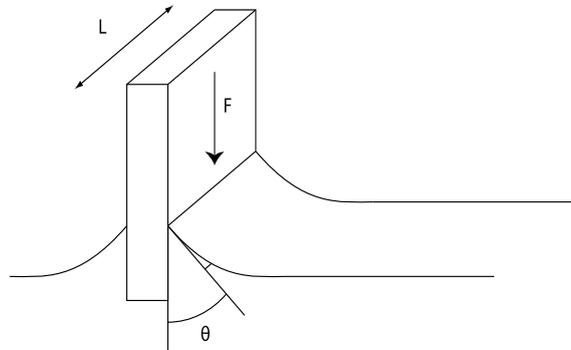


FIGURE 3 –

On établit que la lame mince est soumise de la part du liquide à une force dirigée vers le bas qui vaut :

$$F = 2L\gamma \cos \theta \quad (8)$$

où  $L$  est la largeur de la lame,  $\theta$  l'angle de raccordement du liquide sur la lame et  $\gamma$  est la tension superficielle de l'interface liquide/gaz étudiée. La mesure de la force conduit directement à la valeur de  $\gamma \cos \theta$ . Dans la pratique, on fait en sorte d'avoir  $\cos \theta \approx 1$  en utilisant une lame spécialement traitée pour être parfaitement mouillée par les liquides usuels. On s'arrange aussi pour que le bas de la lame soit au même niveau que le liquide loin du ménisque, de façon à annuler la différence de pression entre le haut et le bas de la lame (c'est-à-dire pour annuler la résultante de la poussée d'Archimède).

### 6.2 Expérience

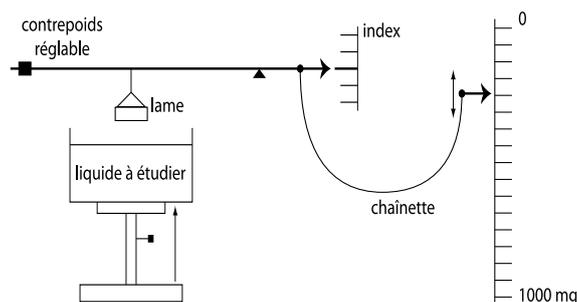


FIGURE 4 –

#### Précautions importantes :

- Régler soigneusement l'horizontalité du tensiomètre à l'aide des vis situées sous son support. Le fil à plomb doit se trouver à la verticale de la position indiquée.
- Avant d'effectuer les mesures, bien rincer les récipients et la lame à l'eau puis à l'alcool ordinaire. Ceci permet d'éliminer toute trace de graisse et de savon (la graisse empêche le mouillage parfait et le savon abaisse considérablement la tension superficielle de l'interface eau/air (voir ci-dessous)).
- Faire la mesure avec de l'éthanol propre (mettre moins d'un centimètre dans la cuve).

- Éventuellement, la refaire avec de l'eau permutée propre.

### Mesure :

Mettre en place la lame plate. La chaînette étant sur zéro, régler le contrepoids pour rétablir l'horizontalité du bras de la balance. Monter la cuve de liquide jusqu'à effleurement par la vis située dessous. La lame est attirée vers le liquide. Rétablir l'horizontalité du fléau au moyen de la chaînette. Lire la valeur de la masse qui équilibre la force de tension superficielle.

On a :  $mg = 2\gamma L$ . Or par construction,  $L = 4,905$  cm donc  $\frac{2L}{g} = 10^{-2}\text{s}^2$ . La mesure de  $m$  en milligrammes divisée par 10 donne directement la valeur de  $\gamma$  en mN/m.

Expérience facultative : sans changer l'équilibre de la balance, ajouter une goutte de savon. Interpréter l'effet puis mesurer la nouvelle valeur de  $\gamma$ . Rajouter du savon et vérifier que  $\gamma$  ne varie plus. Interpréter.

### Données : tension de surface de l'eau

- $\gamma = 71.97$  mN/m à 25°C.

Pour d'autres températures, voir dans le Handbook (*6-5 Vapor pressure and other saturation properties of water*)

## 7 Loi de Jurin

Il s'agit de vérifier expérimentalement la loi de Jurin qui prévoit l'ascension capillaire des liquides :

$$h = 2\gamma \cos \theta / \rho g r, \quad (9)$$

avec :

- $h$  la hauteur de fluide,
- $\theta$  l'angle de contact (ou de récession),
- $\gamma$  la tension de surface du fluide,
- $\rho$  la masse volumique du fluide,
- $g = 9,81\text{m/s}^{-2}$  l'accélération normale de la pesanteur.

### 7.1 [1P] Mesure de l'ascension dans des tubes capillaires

On dispose de 4 tubes de diamètres différents. On réalisera l'expérience avec de l'alcool, l'eau posant trop de problèmes de mouillage imparfait. Avant d'effectuer la manipulation, on nettoiera les tubes à l'alcool, qu'on séchera complètement à l'aide d'air comprimé. Il est important de chasser tout liquide résiduel pour éviter la formation de bulles. Après avoir placé la cuve pré-remplie sur un support réglable, on montera ensuite lentement le support jusqu'à obtenir le contact entre le liquide et l'extrémité inférieure des tubes capillaires. Il est aussi possible de plonger les tubes dans la cuve et de faire couler de l'alcool dans la cuve grâce à une pipette en plastique.

Faire l'image des tubes avec une lentille comme indiqué ci-dessous (attention, les images sont inversées sur l'écran !)

Tracer l'ascension  $h$  du liquide dans le tube en fonction du rayon  $r$  du tube. Cette hauteur  $h$  est la différence de hauteurs entre le ménisque dans le tube et la zone de la cuve où la surface du liquide est horizontale et plate. Même si le tube peut être légèrement incliné, la hauteur doit être mesurée selon la verticale (pourquoi ?).

En déduire une estimation de  $\gamma$  en prenant  $\theta = 0$  (mouillage total du verre par l'alcool).

### Données :

Ethanol pur à 25°C :

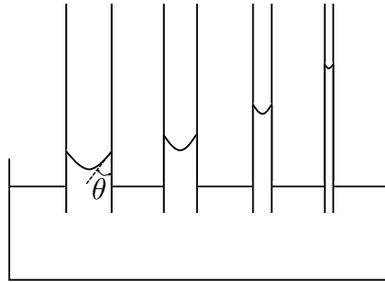


FIGURE 5 –

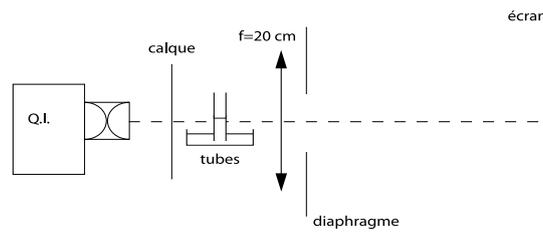


FIGURE 6 –

- Tension de surface  $\gamma = 22,91 \text{ mN/m}$
- Masse volumique  $\rho = 785.0 \text{ kg/m}^3$

Ethanol à 90° (en volume, soit 85,66 % de masse) à 25°C :

- Tension de surface  $\gamma = 23.20 \text{ mN/m}$
- Masse volumique  $\rho = 826.5 \text{ kg/m}^3$

Pour d'autres températures et proportions eau-éthanol, voir dans le Handbook :

- 6-190 *Surface Tension of Common Liquids*
- 6-195 *Surface Tension of Aqueous Mixtures*
- 15-42 *Density of ethanol-water mixtures*

## 7.2 [1P] Mesure dans une cuve triangulaire

Afin de ne pas être limité par le nombre de capillaires ainsi que par leurs états de surface, on peut également utiliser une cuve triangulaire ENSP 4436. Elle a l'avantage d'offrir un continuum de valeurs de  $h$ . On pourra se référer à la notice 263.

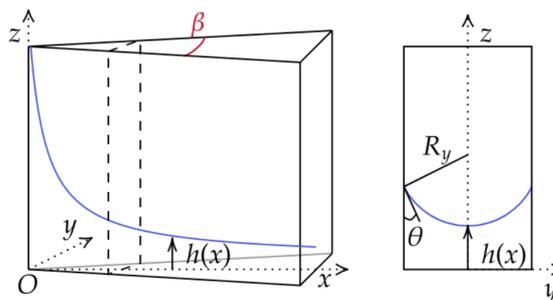


FIGURE 7 – Schéma de la cuve triangulaire

Il s'agit d'une cuve transparente en forme de triangle, d'angle au sommet  $\beta \approx 6,5^\circ$  (à mesurer précisément au pied à coulisse). La cuve doit être soigneusement nettoyée et séchée pour éviter les poussières ou autres contaminations. Remplir doucement la cuve d'une faible quantité d'éthanol jusqu'à observer un ménisque sur la longueur de la cuve. La hauteur du ménisque  $h$  est donnée par la relation suivante :

$$h(x) = \frac{\ell_c^2 \cos(\theta)}{x \tan(\beta/2)} \quad (10)$$

où  $\ell_c = \sqrt{\gamma/\rho g}$  est la longueur capillaire et  $\theta$  l'angle de mouillage que l'on pourra supposer nul.

Derrière la cuve, placer une feuille de papier millimétré : s'il est bien aligné, il permet également d'avoir une référence d'horizontalité. Vérifier et ajuster l'horizontalité de la cuve.

Pour assurer un contraste suffisant, on éclairera la cuve par-derrière. Afin d'obtenir une illumination la plus uniforme possible, on pourra placer un écran derrière la cuve afin de diffuser la lumière, et éclairer la cuve de façon indirecte en illuminant l'écran avec un faisceau le plus large possible, imitant ainsi les méthodes d'éclairage de la photographie et du cinéma. On peut sinon utiliser un panneau rétroéclairé blanc LED. Il est important d'assurer une illumination la plus uniforme possible dans le champ de vue de la caméra : des gradients d'intensité lumineuse trop importants dans l'image risqueraient de rendre la vidéo difficile à exploiter.

On placera la caméra de sorte que l'ensemble de la cuve soit dans le champ, et on réglera l'objectif de la caméra afin d'obtenir une image la plus nette possible du ménisque en prenant soin d'éviter les effets de parallaxe et de distorsion.

Une fois prise, exporter la photographie sur ImageJ. Si nécessaire, redresser l'image avec l'outil *Rotate* (on pourra s'aider des guides horizontaux). Définir une référence de longueur, et relever le bas du ménisque sur une vingtaine de points. Il faudra toutefois être vigilant sur la détermination de l'échelle physique de l'image dans le plan des tubes capillaires, car le ménisque et le papier millimétré ne sont pas dans la même échelle. Même si l'échelle fournie par la grille millimétrée ne peut être utilisée directement pour traduire la mesure des hauteurs dans les tubes, la présence de cette grille permet d'estimer les distorsions du champ par l'optique de la caméra : en particulier, de vérifier que les échelles verticales et horizontales sont identiques (ou faire une correction si ce n'est pas le cas).

Ajuster sur QtiPlot la loi et comparer les valeurs de tension de surface obtenue et tabulée. Il faut garder en tête que les positions mesurées ne sont pas absolues, et qu'il faut prendre en compte un décalage systématique dans l'ajustement.

### 7.3 [AP] Mesure du régime transitoire avec caméra

Afin de mesurer les hauteurs atteintes par le liquide dans les tubes capillaires, on peut aussi utiliser une caméra pour filmer l'ascension.

L'utilisation d'une caméra permet aussi d'enregistrer la montée capillaire pendant toute la durée du phénomène : il est donc possible, en mesurant les positions successives du ménisque dans chaque tube, d'étudier la cinématique du phénomène. En pratique, on peut relever les positions manuellement sur la vidéo, image par image, mais c'est un peu fastidieux. On peut aussi utiliser une procédure de suivi automatique, par exemple avec ImageJ. La progression du ménisque dans le tube capillaire est le résultat de trois phénomènes : la tension de surface qui tire vers le haut la ligne de contact du ménisque avec le tube ; le poids croissant de la colonne de liquide dans le tube, et la viscosité (Poiseuille) qui freine l'ascension. En pratique, notamment à la fin de l'ascension capillaire, l'inertie du liquide peut être négligée, et le frottement visqueux considéré comme proportionnel à la vitesse. La progression du ménisque est très rapide au début (loi en  $z \propto t^{1/2}$ ), puis ralentit à l'approche de la hauteur d'équilibre : la fin de l'ascension suit alors une dynamique de relaxation exponentielle vers la hauteur d'équilibre. En théorie, l'exploitation de la dynamique de la montée capillaire permet aussi d'estimer la viscosité du liquide.

Une fois la vidéo de la montée capillaire enregistrée, on pourra mesurer directement sur l'image la hauteur (verticale) atteinte dans chaque tube. Il faudra faire attention à la référence d'échelle : la grille millimétrée collée sur la paroi arrière de la cuvette parallélépipédique n'est pas dans le même plan que les capillaires, et le facteur de conversion pixels  $\rightarrow$  millimètres sera donc assez différent dans les deux plans. Pour obtenir l'échelle dans le plan



FIGURE 8 –

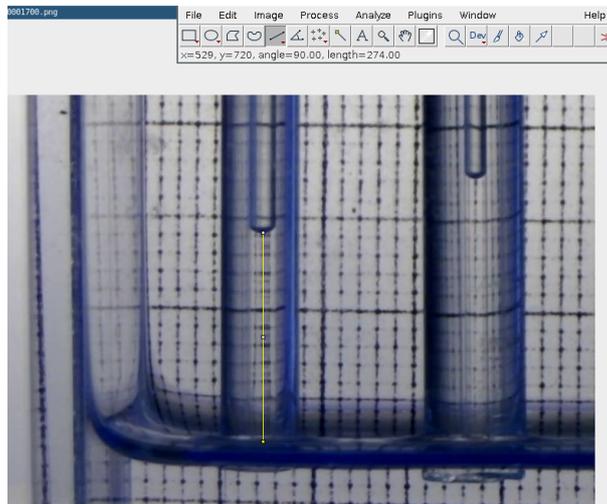


FIGURE 9 –

des tubes capillaires, il y a plusieurs possibilités : on pourra utiliser dans l'image les diamètres extérieurs des tubes capillaires, mesurés individuellement au pied à coulisse ; ou, si les tubes sont approximativement au centre de la cuve, à équidistance des deux grandes parois, on pourra alors supposer que le facteur d'échelle dans le plan des tubes capillaires est la moyenne des facteurs d'échelle des deux grandes parois (avant et arrière) de la cuve dont on aura au préalable mesuré précisément les dimensions. (il faudra s'assurer d'avoir la totalité de la cuve dans le champ pour que cela soit possible).

## 8 [2P] Loi de Laplace

Rappelons que c'est une loi générale de la tension superficielle. On propose de la vérifier ici dans le cas d'une bulle de savon. Elle s'écrit alors :  $\Delta P = \frac{4\gamma}{R}$  où  $R$  est le rayon de la bulle,  $\gamma$  la tension de surface et  $\Delta P$  la surpression à l'intérieur de la bulle.

### 8.1 Expérience qualitative

Former à chaque extrémité du «générateur de bulles» des bulles de tailles différentes. Les mettre en communication. Vérifier que la grosse «mange» la petite.

### 8.2 Expérience quantitative

Utiliser le «générateur de bulles» composé d'une poire et de trois robinets (il vaut mieux regarder la notice pour son emploi). En utilisant le capteur de pression différentiel dont l'une des entrées est à la pression atmosphérique, mesurer la surpression pour différentes valeurs du rayon de la bulle (mettre un papier millimétré derrière la bulle). On pourra faire la mesure, à la volée, sur une même bulle, en prenant soin de prendre des points pour la plus petite et la plus grosse bulle possible ; on peut aussi produire une grande bulle, puis la dégonfler progressivement. Vérifier la loi de Laplace en traçant  $\Delta P$  en fonction de la courbure de l'interface et en déduire la valeur de  $\gamma$  pour l'eau savonneuse.

## 9 Expériences qualitatives sur les lames de savon

### 9.1 Rappels sur les tensioactifs

La concentration des tensioactifs en solution est toujours le résultat d'un équilibre entre la surface et le volume, entre lesquels les tensioactifs s'échangent. Les molécules tensioactives mises en solution dans l'eau s'adsorbent majoritairement à la surface afin de minimiser les interactions entre les queues hydrophobes et l'eau. Si la quantité de tensioactifs en solution est progressivement augmentée, on observe que la tension de surface varie qualitativement de la façon suivante :

(i) À faible très concentration, l'interface n'est pas saturée. Une augmentation de concentration entraîne alors une baisse de la tension de surface due à l'augmentation de la concentration en surface. (ii) Puis, quand la concentration est suffisante l'interface est saturée. La concentration reste constante en surface tandis qu'elle augmente en volume. La tension de surface continue à diminuer lorsque la concentration en tensioactif augmente. (iii) Enfin, au-delà d'une concentration seuil, appelée concentration micellaire critique (cmc), la tension de surface reste constante. En effet, malgré l'ajout de tensioactif, quand la cmc est atteinte, les molécules s'associent en volume de façon à rassembler leurs parties hydrophobes en exposant leurs têtes polaires vers l'extérieur. Ces agrégats sont appelés "micelles". Une bonne référence sur le sujet est le livre de Cabane et Hénon (chap. 15 et 16, p. 294).

En définitive, la tension de surface  $\gamma(T)$  est indépendante de l'aire de la surface pour un corps pur. Pour une solution contenant un tensioactif comme le savon (qui est en fait un mélange contenant notamment des tensioactifs), la tension de surface à l'équilibre ne dépend de l'aire que pour des variations d'aire telles que la concentration volumique de tensioactif change de façon non-négligeable (condition nécessaire). Ce cas, qui demande des concentrations relativement faibles en tensioactif, ou bien un grand rapport aire/volume, est rare en pratique. Dans les différentes expériences présentées ici, la concentration en tensioactifs sera toujours supérieure à la cmc et la surface sera donc toujours saturée.

## 9.2 [2P] Expériences

On dispose des objets suivants :

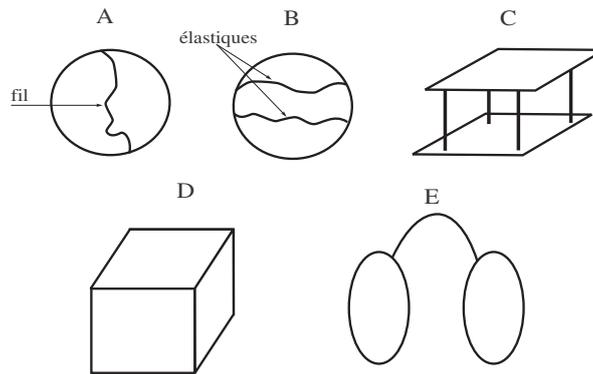


FIGURE 10 –

Plonger l'objet A dans l'eau savonneuse et percer l'un des côtés de la lame. On illustre ainsi la loi de la surface minimale (en tenant compte des contraintes imposées à la lame) et on met aussi directement en évidence la force de tension superficielle agissant sur le fil.

Plonger l'objet B et percer les parties supérieures et inférieures de la lame. Tirer sur le fil inférieur et vérifier que cela n'a aucune action sur la forme de l'élastique supérieur. On illustre ainsi que la force par unité de longueur ne dépend pas de la surface de la lame, le comportement est donc très différent de celui d'une lame élastique usuelle (ballon de baudruche).

Plonger l'objet C. Interpréter la forme obtenue en termes de surface minimale. La symétrie observée obéit-elle aux lois de Curie ? (pour la réponse, cf. BUP n°689). Vérifier que l'angle de raccordement entre les différentes parties de la lame est  $120^\circ$  ce qui illustre indirectement le fait que la force exercée par chaque lame sur une unité de longueur de la ligne de raccordement ne dépend pas de sa surface. En effet, pour que la somme de trois forces faisant entre elles des angles de  $120^\circ$  soit nulle, il faut que les trois forces soient identiques. Le cube D présente le même phénomène mais attention, les lames ne sont pas planes.

Avec l'objet E, on obtient en général une lame sur chaque anneau. Pour obtenir une lame unique les liant (ce qui correspond à une surface plus faible s'ils sont suffisamment proches, cf. Landau de mécanique des fluides, p.294) il faut transitoirement les rapprocher et souffler de sorte que les deux lames adhèrent l'une à l'autre. Vérifier que les signes des rayons de courbure principaux en un point de la lame sont opposés : en effet, les deux côtés de la lame étant à la pression atmosphérique, la loi de Laplace impose  $\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} = 0$ . Il est cependant difficile de vérifier quantitativement que  $R = -R'$ .

### Note :

les lames étant de petites dimensions, on pourra éventuellement rendre l'expérience visible de loin en formant une ombre qui les agrandit 2 à 4 fois. Alternativement, on pourra utiliser une webcam et un vidéoprojecteur.

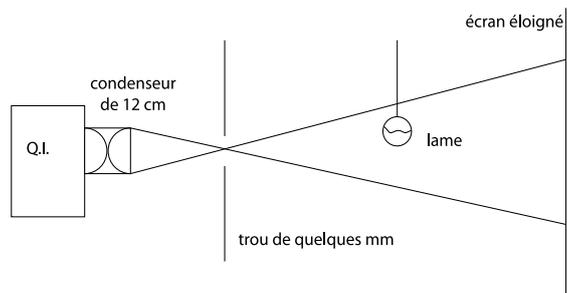


FIGURE 11 –