

# M02: Surfaces et interfaces

Sandra MONTALESCOT et Caroline BOULOC

Jeudi 17 octobre 2013

Correcteur: Jean CVIKLINSKI

## Intro:

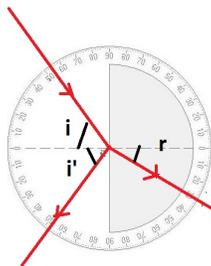
- **Interface:** Plan ou surface de discontinuité formant une frontière commune à deux domaines aux propriétés différentes et unis par des rapports d'échanges et d'interaction réciproques (immatériel).
- **Surface:** Face extérieure d'un corps (matériel)

## 1 Propriétés optiques d'une interface

**Lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction** On considère des milieux homogènes et isotropes. Un dioptre est une surface séparant deux milieux transparents d'indices de réfraction différents.

Matériel: Laser He-Ne + boy, hémicylindre de plexiglas fixé sur une plaque graduée en angle.

L'objectif de cette manipulation est de montrer les lois auxquelles obéissent les rayons lumineux à la traversée de l'interface entre deux milieux d'indice différents.



On place le faisceau laser en incidence normale par rapport au dioptre plan de l'hémicylindre. On tourne l'hémicylindre vers la gauche (angles comptés positivement) et on mesure les angles incident, réfléchi et réfracté. On fera attention à ce que le faisceau laser arrive toujours au centre de l'hémicylindre. On réitère les mesures en tournant l'hémicylindre vers la gauche (angles comptés négativement).

Remarque: l'hémicylindre n'est pas rigoureusement fixé selon l'axe  $0^\circ$ - $180^\circ$ : il faut tenir compte d'un écart de  $0.75^\circ$ , ce qui permet de définir les angles corrigés suivants:

$$i \text{ corr} = i - 0.75^\circ$$

$$r \text{ corr} = r - 0.75^\circ$$

$$i' \text{ corr} = i' + 0.75^\circ$$

On trace  $i' \text{ corr} = f(i \text{ corr})$ : linéaire, de pente 1. On obtient la loi de Descartes pour la réflexion:  $i = i'$  (2ème loi de Descartes)

On trace  $\sin(i \text{ corr}) = \sin(r \text{ corr})$ : linéaire, de pente  $n$ . On obtient  $n = 1,49 \pm 0.03$  On montre ainsi la loi de Descartes pour la réfraction:  $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$  (3ème loi de Descartes)

L'incertitude prise sur les angles est de  $\pm 0.5^\circ$  (erreur déterminée en réitérant une mesure par plusieurs expérimentateurs).

**Conclusion:** La réflexion et la réfraction des rayons lumineux à la traversée d'un dioptre est régie par les lois de Descartes, que nous utiliserons plus tard dans ce montage.

## 2 Caractérisation mécanique d'une surface

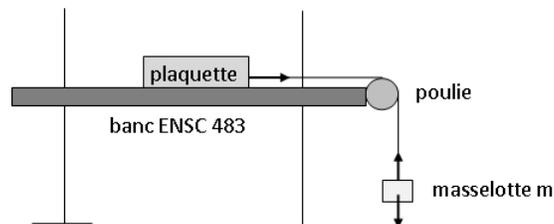
### 2.1 Contact entre deux solides

**Mesure des coefficients de frottement** Matériel: Banc ENSC 483 (cadre en alu et rail de PVC), maintenu en hauteur à l'aide de deux potences

**Attention:**

- Repeser les masses utilisées, ainsi que les plaquettes
- Régler l'horizontalité du banc avec un niveau
- Nettoyer les surfaces

**Première expérience: (non présentée)**



L'objectif de cette partie consiste à mesurer le coefficient de frottement statique entre deux surfaces solides. Pour cela, on pose une plaquette sur un banc de PVC et on y accroche une masselotte, maintenue au-dessus du vide par le biais d'une poulie. On augmente progressivement la masse de cette masselotte jusqu'à ce que les frottements statiques ne compensent plus le poids de la masselotte et donc que la plaquette soit mise en mouvement. On fera attention à tenir la plaquette en accrochant la masselotte, afin de ne pas lui conférer de vitesse initiale qui l'aiderait à vaincre les frottements statiques. Les frottements dynamiques étant plus faibles que les frottements statiques, la plaque poursuivrait alors son mouvement.

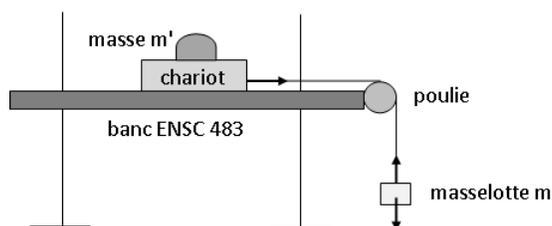
On note  $M$  la masse de la plaquette,  $m$  la masselotte à ajouter pour que la plaquette se mette en mouvement,  $l$  la longueur du fil.

$$l = 41 \text{ cm.}$$

Les mesures ont été effectuées pour différents matériaux de plaquettes. En revanche, une seule plaque rentre dans le cadre alu du banc: il s'agit de la plaque de PVC. Nous ne pourrions donc donc estimer que les frottements statiques par rapport au PVC.

Matériau de la plaquette	PVC	plexiglas	liège	acier	feutre
m (g)	7-8	7-8	3-4	28-32	33-34
M (g)	15.5	13.1	7.63	82.8	84

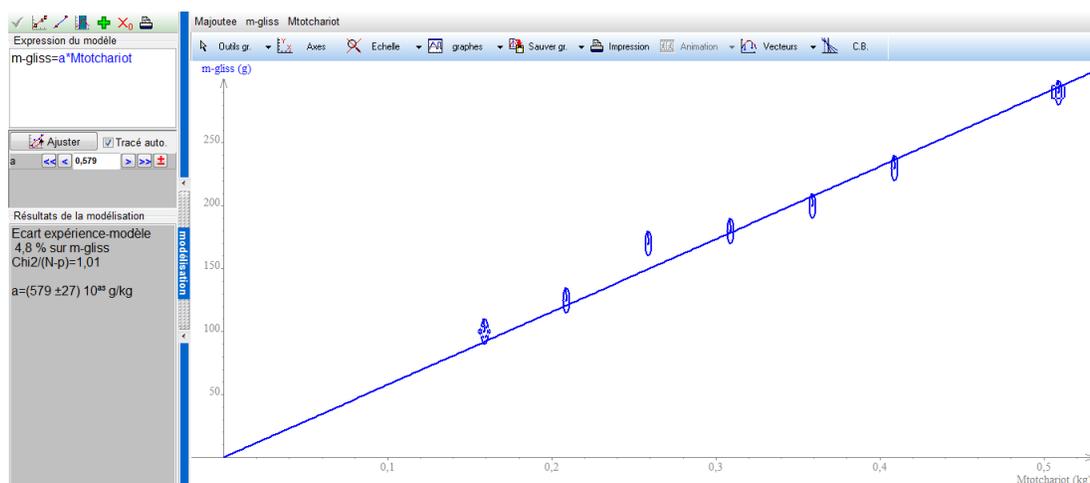
### Deuxième expérience:



On remplace la plaquette par une chariot de PVC dans lequel on place une masselotte. La manipulation est identique à celle décrite ci-dessus. L'objectif est cette fois de retrouver les lois de Coulomb pour le frottement statique, pour un contact PVC-PVC. On note  $m'$  la masselotte placée dans le chariot,  $M$  la masse totale (chariot + masselotte),  $m$  la masse de la masselotte suspendue au fil nécessaire pour mettre le chariot en mouvement. La masse du chariot est de 108.9 g.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant. On trace ensuite  $m$  en fonction de  $M = M_{\text{chariot}} + m'$ .

$m'$	50	100	150	200	250	300	350
$m$	$100 \pm 10$	$125 \pm 10$	$170 \pm 10$	$180 \pm 10$	$200 \pm 10$	$230 \pm 10$	$290 \pm 10$



Le PFD appliqué au chariot donne:  $f_T = mg$  (la composante tangentielle de la force de frottement compense la tension du fil et donc le poids de la masselotte).

Or  $mg = a \cdot M_{tot}g$  donc  $f_T = a \cdot P_{tot}$

On retrouve la loi de Coulomb  $f_T = f \cdot f_N$  avec  $f_N$  composante normale de la force de frottement (compense le poids  $P_{tot}$  du chariot + masse)

Le coefficient statique vaut  $f_s = 0.5$ . (on attend 0,5-0,6)

Remarque: ici  $f$  est noté sans indice, car à la limite (au moment où le chariot est mis en mouvement), le coefficient de frottement statique et le coefficient de frottement dynamique sont égaux.

Ne pas sous-estimer l'incertitude sur  $f_s$ .

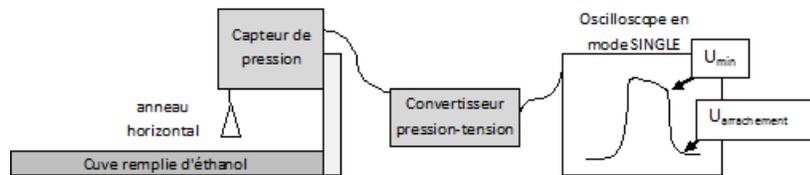
**Conclusion:** On retrouve la tendance attendue (loi de Coulomb). En revanche cette manipulation est très imprécise et peu reproductible (dépend beaucoup de l'état de surface notamment). De plus, suivant la position initiale du chariot sur le rail de PVC, il arrive que le chariot glisse ou non pour la même masse  $m$ , d'où l'incertitude importante sur  $m$ .

## 2.2 Tension de surface

**Manipulation introductive:** Anneau plongé dans de l'eau savonneuse, avec une ficelle au milieu. La ficelle se tend quand on perce une bulle: on met ainsi en évidence un premier phénomène de surface: la minimisation de la surface de savon à l'interface air-savon.

**Définition:** Les liquides adoptent des formes géométriques très stables. La tension superficielle s'oppose aux déformations. On peut voir la tension superficielle de deux façons: 1) elle mesure le défaut d'énergie de liaison par unité de surface (les molécules du liquide se lient aux molécules qui les entoure, donc celles en surface font moitié moins de liaisons). 2) c'est le travail à fournir pour augmenter la surface d'une unité.

**Mesure de la tension superficielle de l'éthanol avec une balance d'arrachement**



Matériel: cuve de Langmuir, munie d'un capteur de pression (dispositif ENSC 461.01). Convertisseur pression-tension. Oscilloscope ENSC 108.3. Anneau très fin (plateau) pouvant s'accrocher au capteur de pression. Masselottes de 50 à 500 mg pour l'étalonnage. Ethanol.

**Précaution: nettoyer la cuve avec un petit aspirateur.** Principe de l'expérience: on plonge un anneau horizontal dans une cuve d'éthanol. En remontant l'anneau, on se rend compte qu'à la surface, l'anneau semble entraîner un peu d'éthanol avec lui. Bien que l'anneau soit légèrement au-dessus du niveau du liquide, le liquide semble rester solidaire de l'anneau: il apparaît un phénomène appelé tension de surface. Au-delà d'une certaine hauteur, le contact entre le fluide et l'anneau est rompu: on dit qu'il y a arrachement.

L'objectif de cette expérience est de mesurer la tension superficielle de l'éthanol. Pour cela, on va mesurer la force exercée par l'anneau sur le crochet du capteur de pression et relever cette valeur à l'oscilloscope. On en déduit la tension de surface de l'éthanol.

Remarque: on pourrait utiliser du papier buvard plutôt que l'anneau, mais le papier buvard ne reste pas horizontal lors de l'arrachement, ce qui fausse la mesure.

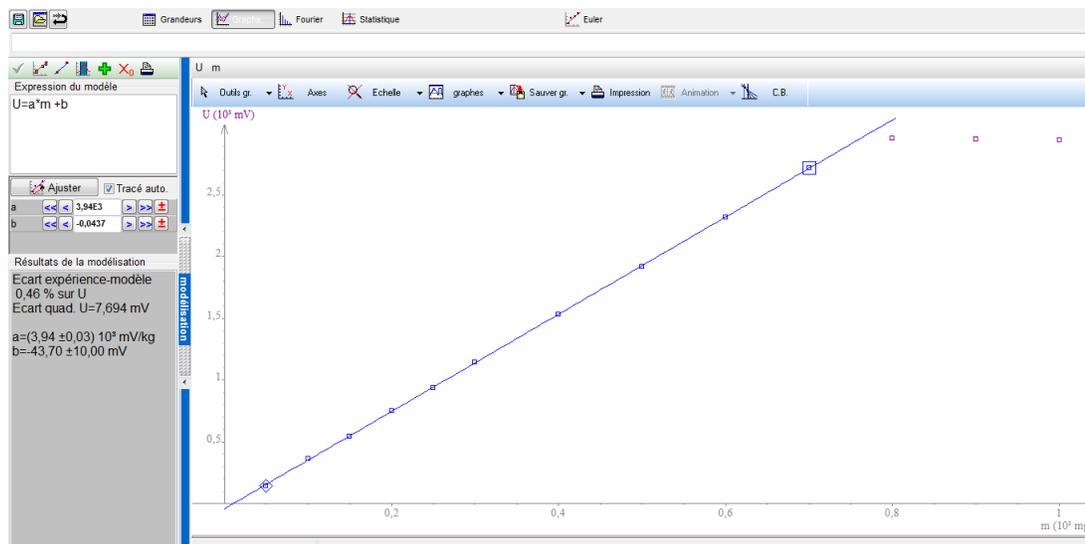
**Première étape: étalonnage de la balance d'arrachement**

Nous allons dans un premier temps étalonner le capteur de pression, afin de connaître la relation entre la force exercée par le système {éthanol + anneau} sur le crochet et la tension mesurée à l'oscilloscope.

On accroche le plateau au crochet du capteur et on dépose une masse m dessus. On relève pour chaque masse la tension affichée à l'oscilloscope.

<b>masse posée sur le plateau (mg)</b>	<b>0</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>150</b>
<b>Tension mesurée à l'oscilloscope (mV)</b>	<b>-30.2 ± 0.1</b>	<b>144.5 ± 0.6</b>	<b>363.8 ± 0.3</b>	<b>542 ± 1</b>

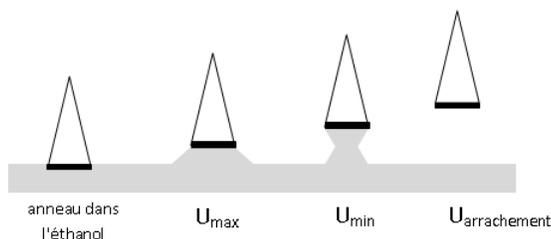
<b>200</b>	<b>250</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>
<b>750.4 ± 0.2</b>	<b>939.8 ± 0.5</b>	<b>1143 ± 1</b>	<b>1531 ± 1</b>	<b>1918 ± 2</b>
<b>600</b>	<b>700</b>	<b>800</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>
<b>2320 ± 2</b>	<b>2722 ± 3</b>	<b>2957 ± 1</b>	<b>2950 ± 2</b>	<b>2948 ± 2</b>



Sur le graphe: la courbe  $U = f(m)$  représente une fonction affine:  $U = a m + b$ .

On constate qu'au-delà de 700-800 mV, la courbe présente une saturation: limite de fonctionnement linéaire du capteur de pression. On se placera donc dans la zone linéaire pour les mesures.

## Deuxième étape: mesure de la discontinuité de tension lors du décrochage, calcul de la tension superficielle de l'éthanol



On place l'oscilloscope en mode single, de façon à faire une acquisition de la tension autour de l'arrachement.

Lorsqu'on relève l'anneau, on constate que la tension passe par un maximum puis un minimum juste avant l'arrachement qui se traduit par une discontinuité de tension  $\Delta U$ . On mesure cette différence de tension et on réitère 5 fois la mesure pour estimer l'incertitude liée à la mesure. Afin d'optimiser l'utilisation de l'oscilloscope, on ajuste l'échelle pour pouvoir mesurer les tensions avant et après arrachement en étant seulement limité par le pas de quantification de l'oscilloscope.

<b>U<sub>min</sub> (mV)</b>	<b>547 ± 1</b>	<b>505.2 ± 2</b>	<b>530 ± 5</b>	<b>507 ± 2</b>	<b>554 ± 1</b>
<b>U<sub>arrachement</sub></b>	<b>-25 ± 2</b>	<b>-20 ± 2</b>	<b>-25.5 ± 1</b>	<b>-29.0 ± 0.8</b>	<b>-28.6 ± 2</b>

L'écart entre les mesures peut être expliqué notamment par le salissement de la surface d'éthanol et de la surface de l'anneau au cours de la manipulation. Par ailleurs, on remarque que la portion de courbe après arrachement n'est pas symétrique à celle correspondant au cas où l'anneau est plongé dans l'éthanol. Cela s'explique notamment par la présence de quelques micro perles d'éthanol restées en surface de l'anneau à sa sortie du liquide (ce qui fausse la force exercée par l'anneau sur le capteur).

On en déduit la tension superficielle  $\gamma$  de l'éthanol:

$$\gamma = \frac{(M_{min} - M_{arrachement}) \cdot g}{4 \cdot \pi \cdot R_{anneau}}$$

avec  $M_{min}$ ,  $M_{arrachement}$  = masses correspondant à  $U_{min}$  et  $U_{arrachement}$  (relation: étalonnage:  $a = 3.94 \cdot 10^3$  V/kg)

Remarque:  $M_{min}$  est une masse effective, comme si le poids de l'anneau et la tension superficielle étaient regroupées sous  $M_{int}$  g (poids effectif).

$R$  = rayon de l'anneau = 0.6 cm

**Incertitudes:** 
$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta M_{min}}{M_{min}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M_{arr}}{M_{arr}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

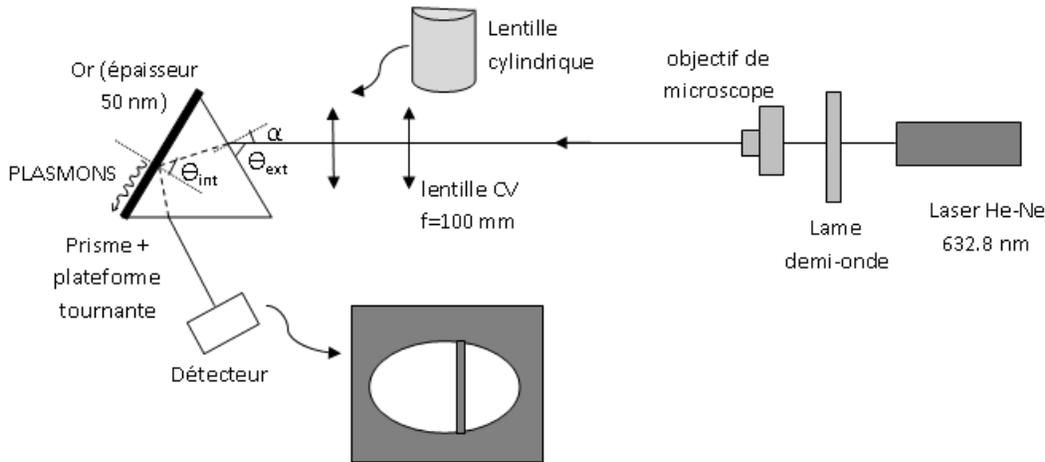
On obtient:  $\gamma = 19 \pm 1$  mN/m (l'incertitude avait été sous-estimée en présentation).

valeur théorique pour un mélange eau-éthanol à 95%:  $22.8 \pm 0.1$  mN/m

**Conclusion:** Grâce à un capteur très sensible, nous avons pu mesurer une des caractéristiques d'un liquide: sa tension superficielle. La valeur expérimentale est inférieure à la valeur attendue, car cette expérience est très dépendante de l'état de surface des produits et matériaux utilisés (cuve et anneaux un peu sales). Toute impureté abaisse la tension superficielle (surtout quand le solvant est l'eau, polaire).

### 3 Ondes évanescentes en surface d'un métal

Mise en évidence de l'existence des plasmons de surface:



On utilise une lentille cylindrique afin d'éclairer le prisme avec une large gamme de rayons incidents ayant des angles d'incidence différents: parmi tous ces angles d'incidence, il y en a forcément un qui nous permet d'observer le phénomène...

Sur l'écran, on observe une "coupure" du faisceau laser: les rayons ayant cet angle d'incidence particulier ne sont pas réfléchis par la surface d'or. Interprétation: il y a eu absorption de l'énergie lumineuse par la surface d'or, pour donner naissance à une onde plasmon de surface à l'interface air-or (attention, pas verre-or). Les plasmons de surface sont créés lors de l'excitation de modes collectifs d'électrons du métal (ici, l'or). On dit qu'il y a résonance des plasmons de surface.

Remarque: influence de la polarisation sur la résonance plasmon: si la polarisation est horizontale, il y a extinction; si la polarisation est verticale, il n'y a pas extinction.

#### Mesure de la permittivité diélectrique de l'or:

On ne garde que le laser + prisme + écran. Sur l'écran, on peut observer le faisceau laser, très lumineux. En tournant le prisme, on se rend compte qu'il y a un angle pour lequel l'intensité lumineuse est tombée à 5% de sa valeur normale. C'est l'extinction, caractéristique de la résonance plasmon de surface. A cet angle d'incidence, les plasmons de surface sont excités.

On mesure cet angle d'incidence:

- Régler la plaque tournante pour que les zéros coïncident
- Tourner le prisme pour que la réflexion revienne sur le laser
- Fixer le prisme par rapport au plateau
- Tourner le plateau pour voir l'extinction.
- On mesure  $\alpha$

La condition de couplage entre l'onde excitatrice (le laser) et l'onde plasmon de surface est donnée par la relation suivante:

$$\theta_{int} = A - \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha)}{n}\right)$$

$$(n \cdot \sin(\theta_{int}))^2 = \frac{\epsilon_{or}(\omega) \cdot \epsilon_{air}(\omega)}{\epsilon_{or}(\omega) + \epsilon(\omega)}$$

.D'où  $\epsilon_{or} = -12.6 \pm 1.2$

avec  $A$  = angle du prisme, celui qui est tout en haut sur la figure de l'expérience d'introduction.  
Valeur théorique pour la permittivité de l'or à 632.8 nm:  $-11.78 + 1.25i$ .

**Conclusion:** A partir d'un phénomène surfacique, on peut remonter à une grandeur volumique: remise en question: jusqu'à quelle distance peut-on encore parler de "surface"?

Illustration: influence de l'épaisseur de la couche d'or: pour 50 nm, il y a extinction; pour 65 nm il n'y a plus extinction (la couche d'or est trop épaisse: l'or absorbe l'énergie lumineuse: il n'y a plus assez d'énergie au niveau de l'interface air-or pour former des ondes de plasmon de surface, ou du moins l'intensité est si faible qu'ils ne sont pas visibles).

.

**Conclusion du montage: plusieurs façons de caractériser surfaces et interfaces. Des lois régissent les comportements aux interfaces: on a en a mis en évidence dans le cas de l'optique, de la mécanique. Nous avons également étudié un autre effet de surface à travers les plasmons: la pénétration d'une onde électromagnétique dans un milieu avec atténuation de son amplitude: onde évanescente.**

## 4 Bibliographie

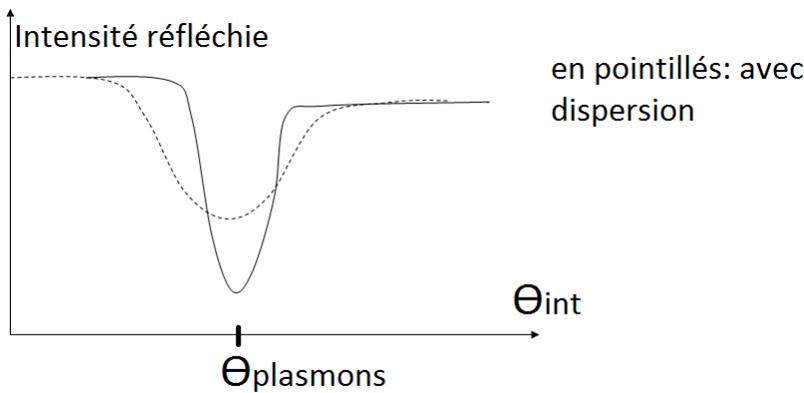
- Physique, Hecht
- Gouttes, bulles, perles et ondes P.G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D.Quéré
- Montages de physique au Capes, statique des fluides (Dunod, 2ème édition) JP Bellier, C.Bouloy, D.Guéant
- Laboratory experiments for exploring the surface plasmon resonance, IOP Publishing, Eur.J.Phys. 32 (2011) 585-599, O.Pluchery, R.Vayron, K.Van
- Fiches techniques des appareils
- Calcul de la distance d'arrêt pour la mesure du coefficient de frottement dynamique: Physique spé PC Gié, Olivier, Sarmant

## 5 Questions et commentaires

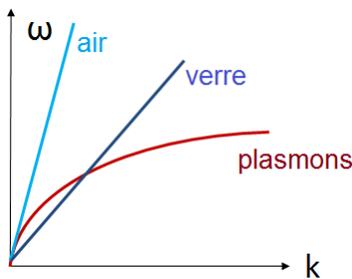
### 5.1 Questions

- Qu'est-ce qui prouve que le phénomène de plasmons de surface est un phénomène de surface et pas de volume? Si le dépôt est épais, la surface d'or se comporte comme un miroir qui réfléchit tout.

- Expérience des frottements: comment mesurer le coefficient de frottement dynamique? Même dispositif que pour le frottement statique. Ajouter une masse pour mettre en mouvement le chariot. Quand la masse touche le sol, on constate que le chariot poursuit sa course un bref instant. En filmant cet instant et en repérant les données sous cinéris, on remonte au coefficient de frottement dynamique (comparer la distance parcourue et la hauteur de chute). Remarque: mettre une masse assez petite dans le chariot mais une masse assez grande pour faire avancer le chariot (pour qu'il ait beaucoup "d'élan"), et prévoir un banc assez long et une hauteur de chute faible.
- La droite  $m = f(M_{tot})$  ne semble pas passer par l'origine: pourquoi? à cause des frottements secs au niveau de la poulie.
- Pourquoi la tension de surface diminue entre  $U_{max}$  et  $U_{min}$ ? car avant  $U_{max}$ , l'angle formé entre le liquide et le plan de l'anneau est obtus ( $\alpha > 0$ ) alors qu'après  $U_{max}$ , cet angle est aigu ( $\alpha < 0$ ).
- Pourquoi la formule de la tension superficielle fait apparaître  $4\pi R_{anneau}$ ? car l'éthanol exerce une force sur le contour extérieur de l'anneau et sur son contour intérieur. (2x périmètre de l'anneau)
- Est-ce que l'éthanol mouille l'anneau? Oui. Est-ce important? Oui, afin de mesurer  $F = 2 \cdot \gamma \cdot \text{périmètre}$  et non  $F' = 2 \cdot \gamma \cdot \text{périmètre} \cdot \cos\theta_{mouillage}$ .
- Pourquoi passer par  $U_{max}$ ? c'est le moment où l'éthanol forme un mur "vertical" depuis l'anneau ( $\alpha = 0$ ). Dans la formule, il est donc préférable de faire intervenir  $U_{max}$ . Néanmoins  $U_{min}$  est peut-être dû au décollage anneau-éthanol. Donc il faut peut-être garder  $U_{min}$ .
- Idée d'expérience pour montrer l'influence d'un surfactant: cuillerée d'eau bombée. Ajouter une goutte de savon: la cuillère déborde. (la tension superficielle diminue).
- Idée d'expérience pour mesurer  $\gamma_{vinaigre/huile}$ : mélange vinaigre + huile dans un bécher. Placer l'anneau à la frontière vinaigre-huile et observer l'arrachement à l'oscilloscope comme précédemment.
- Comment fonctionne le capteur de pression? la notice est peu explicite. Le fil auquel est suspendu l'anneau est relié à une bobine. Une diode infrarouge permet de repérer le déplacement de la bobine. La bobine est ramenée à sa position initiale grâce à un système d'asservissement. La tension qu'il faut fournir pour ramener la bobine à sa position initiale est reliée au signal de sortie (envoyé par le capteur de pression à l'oscilloscope).
- Remarque sur l'expérience d'arrachement: il y aurait moins d'ambiguïté avec le papier buvard (par de problème de  $U_{max}/U_{min}$ ). Mais il faut faire attention à ne pas détacher le papier en biais.
- la dispersion angulaire du laser abîme-t-elle la mesure du contraste? oui:



- .
- Pourquoi n'y-t-il pas directement réflexion sur la surface d'or? (besoin d'un prisme de verre) car ainsi on peut coupler de façon significative l'excitation (laser) et la résonance de plasmons de surface. En effet, les relations de dispersion d'une onde EM dans l'air et des plasmons de surface ne présente pas de point d'intersection ("point de fonctionnement"), alors que la relation de dispersion des plasmons et d'une onde EM dans le verre se coupent. Il faut venir d'un milieu d'indice plus grand:



- Que devient la puissance lumineuse absorbée à l'angle  $\theta_{plasmons}$ ? Elle est absorbée par l'or.
- Comment contrôle-t-on l'épaisseur du dépôt d'or (dépôt effectué par évaporation)? on pourrait le faire par STM. Ou encore en utilisant une lame témoin (interférences). Ou encore par ellipsométrie.

## 5.2 Propositions d'amélioration du plan

- Trouver une trame. Un peu difficile car les expériences sont variées (différents domaines, différentes surfaces).
- Ne pas utiliser la manip des lois de Descartes telle qu'elle. Il faut plutôt le traiter dans la partie sur les plasmons, pour introduire le phénomène d'onde évanescente. Eclairer un prisme en paraffine en réflexion totale. Montrer en ajoutant un second prisme à la suite du premier qu'on récupère un faisceau réfracté (le deuxième prisme transmet l'onde évanescente créée à l'interface paraffine-air du premier prisme). Expérience qualitative mais permet de faire une transition avec les plasmons. Ne pas présenter  $\sin i = f(\sin i')$ . Si on veut présenter une manip avec un prisme, la faire tenir verticalement (potence): plus visible pour le jury.
- Il faudrait mesurer le coefficient de frottement dynamique pour enrichir cette partie. De plus, introduire le principe de l'expérience de façon historique permettrait de donner du corps à l'exposé, en montrant qu'on adopte les mêmes démarches que Coulomb.

- Autres manip possibles: plus de petites expériences sur les tensions de surface (ascension capillaire...). Expérience du câble coaxial pour mettre en évidence l'effet de peau (apparition de courants surfaciques en surface d'un conducteur).
- Expérience des plasmons dans le montage métaux: modèle de Drude +  $\epsilon$  mesuré : on en déduit le nombre d'électrons dans le métal
- Parler de la partie imaginaire de  $\epsilon_{or}$ .