

# CONCOURS EXTERNE SPÉCIAL DE L'AGRÉGATION

## SECTION PHYSIQUE-CHIMIE, OPTION PHYSIQUE

Session 2023-2024

### Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche.

Présenté par

Gabriel Le Doudic

## 1 Mon parcours académique

Suite à l'obtention d'un baccalauréat scientifique avec option Physique-Chimie en 2012, j'ai choisi de poursuivre mes études supérieures au Lycée Lapérouse Kerichen à Brest en section PCSI-PSI, puis PC, car j'éprouvais un intérêt particulier pour la Physique-Chimie et j'envisageais des études longues dans ces domaines. J'ai ensuite intégré le Magistère de Physique Fondamentale de l'Université de Paris Saclay où j'ai découvert un goût certain pour l'enseignement, ainsi que pour la recherche. En particulier pour la mécanique des fluides et la matière molle grâce aux nombreux stages de recherche et d'enseignement proposés par cette formation.

Pendant les trois années passé au Magistère, j'ai réalisé deux stages d'enseignement au lycée, qui m'ont donné le goût de l'enseignement. Ainsi que trois stages de recherche, le premier en 2016 au laboratoire de Physique des Solides à Orsay au sein de l'équipe MMOI qui s'intéresse aux propriétés des Mousses et des films savonneux. En 2017, j'ai effectué mon stage de M1 au laboratoire Matière et Systèmes Complexes (MSC) de l'université de Paris-Diderot, où j'ai travaillé sur la propagation d'ondes à la surface de gouttes maintenues en lévitation par effet Leidenfrost. Après ces deux stages de recherches, j'ai choisi de poursuivre mes études en intégrant le Master 2 de recherche Dynamique des Fluides et Énergétique (DFE) à Paris-Saclay. Ce master m'a permis de réaliser un troisième stage au laboratoire FAST sur le thème de la formation des vagues par le vent et de décrocher une thèse au laboratoire MSC auprès de Laurent Limat et Matthieu Roché sur l'effet Marangoni, qui s'est déroulée entre Octobre 2018 et Janvier 2022.

Pendant mon doctorat j'ai attaché de l'importance à continuer à enseigner ainsi qu'à partager mes recherches dans le milieu du collège, lycée. C'est pourquoi j'ai demandé à avoir des tutorats dans le contexte des missions doctorales possibles à l'Université Paris-Diderot. C'est ainsi que j'ai eu l'opportunité de donner des cours/TDs de Physique en première année de médecine et en sciences de la vie et de la Terre. J'ai eu l'occasion avec l'aide de mon laboratoire d'organiser la visite et la découverte du laboratoire MSC à des classes de terminales du lycée Lapérouse Kerichen de Brest, où je me suis également rendu sur place pour présenter mes travaux de recherche devant les étudiants en deuxième année de CPGE. J'ai aussi contribué au développement d'un projet de vulgarisation autour de la tension superficielle en compagnie de l'équipe « La Physique Autrement » de l'Université de Paris Saclay, ces travaux sont disponibles en ligne (<https://dgxy.link/marangoni>). Pendant ma thèse, j'ai réalisé que mon désir d'en apprendre toujours un peu plus en Physique était lié à mon envie de le partager et d'enseigner. C'est pourquoi à la fin de mon doctorat, j'ai décidé de me tourner exclusivement vers l'enseignement.

Après avoir fini mes travaux de thèse en Janvier 2022, en attendant d'intégrer la préparation à l'agrégation de Physique de Rennes en Septembre 2022, j'ai rejoint le laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes (PMMH) de l'ESPCI entre février et juillet 2022 pour réaliser un Post-Doctorat au cours duquel j'ai construit des expériences pour comprendre les mécanismes de fracture de la banquise dans la zone marginale glaciaire par les déformations induites par la houle de l'Océan. Cela m'a permis d'avoir une expérience de post-doctorat avant de me dédier à l'enseignement.

Suite à cette préparation à l'agrégation j'ai été admis aux écrits de l'agrégation externe spéciale docteur de physique chimie option physique. J'ai obtenu le concours du CAPES de physique-chimie la même année. J'ai donc enseigné au lycée Jean Guéhenno de Fougères comme professeur stagiaire certifié de physique chimie

en seconde et en première enseignement scientifique au cours de l'année 2023-2024. Au cours de cette année j'ai pris plaisir à concevoir mes enseignements et à expérimenter de nouvelles méthodes pédagogiques telles que la classe inversée pour permettre la construction des connaissances chez tous les élèves de mes classes. Cette nouvelle expérience professionnelle a confirmé mes vœux de poursuivre dans l'enseignement public.

## 2 Mes travaux de recherche

### 2.1 Introduction

Pendant ma thèse je me suis intéressé aux phénomènes interfaciaux dans les fluides, en particulier aux effets qui produisent des écoulements à l'interface entre deux fluides. Ces écoulements sont connus sous le nom d'écoulement de **Marangoni**. Ils sont nommés d'après Carlo Marangoni, le physicien qui a étudié ce phénomène en 1865.

Pour générer un tel écoulement, il suffit de déposer délicatement une goutte de liquide vaisselle à la surface d'une surface d'eau au repos. Lors du dépôt de la goutte, l'expérimentateur en s'aidant de traceurs posés sur l'eau (comme du poivre moulu), peut observer les traceurs à la surface de l'eau s'éloigner très rapidement de la goutte de savon (voir vidéo en cliquant ici : <https://dgxy.link/marangoni>). En effet, le savon contient des molécules capables de modifier la tension de surface, on appelle ces molécules des **tensioactifs**. Le dépôt d'une goutte de tensioactif sur de l'eau crée un **gradient de tension superficielle** le long de l'interface entre là où la goutte a été déposée et là où l'eau est encore propre. Ce gradient de tension superficielle génère une contrainte sur les fluides de part et d'autre de l'interface et les mets en mouvement, c'est l'effet Marangoni. L'écoulement ainsi généré s'étend radialement depuis la source de tensioactif où la tension interfaciale est la plus basse vers la région de tension interfaciale plus grande. Cet écoulement est l'écoulement de Marangoni.

L'écoulement de Marangoni est un écoulement radial, axisymétrique, pour ces raisons il fait partie d'une famille plus grande d'écoulements que l'on nomme les **écoulements divergents**. Ces écoulements sont sujets à une instabilité caractérisée par l'apparition de cellules de recirculation qui partent de la source de l'écoulement et reviennent au point de départ. Cette instabilité a longtemps été étudiée dans le but de trouver son origine et son mécanisme. Cependant, notre écoulement est très différent en aspect, car nous obtenons un écoulement axisymétrique qui s'étale sur une distance finie  $R_M$ . Dont l'instabilité est uniquement observée à l'extérieur de l'écoulement de Marangoni même pour des conditions expérimentales où l'instabilité divergente s'évanouit.

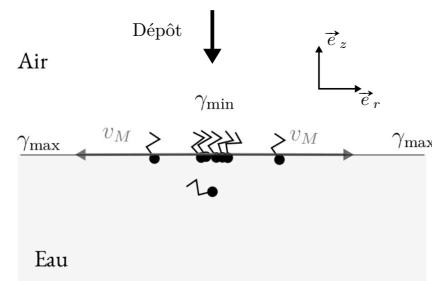
Le premier objectif de ma thèse a été de chercher à comprendre le mécanisme de génération de vorticité à l'extérieur de l'écoulement de Marangoni. Dans un second temps, je me suis intéressé à un système qui utilise l'effet Marangoni pour générer de la propulsion : les bateaux de Marangoni. Les études menées et présentées dans la littérature ne s'intéressent qu'aux trajectoires des bateaux et à l'influence de l'environnement du bateau. Pour ma part, je me suis intéressé à la relation entre la physico-chimie des tensioactifs et la propulsion du bateau de Marangoni. La thèse que je présente dans ce dossier s'intitule « Écoulements soluto-capillaires en présence d'échange interface-volume : génération de vorticité à l'interface et propulsion ». Dans un premier temps, nous ferons une description hydrodynamique de l'écoulement de Marangoni qui me permettra de faire le lien avec les éléments des programmes de CPGE de mécanique des fluides. Puis nous présenterons les résultats expérimentaux sur la génération de vorticité et la propulsion par effet Marangoni.

### 2.2 Description hydrodynamique de l'écoulement de Marangoni

Cet écoulement peut être modélisé par les équations de la mécanique des fluides. On considère un volume d'eau d'épaisseur finie. Au départ de la source, l'écoulement est radial et axisymétrique.

Grandeur du système	Notations
Vitesse de l'écoulement	$\vec{v}(r, z) = v_r \vec{e}_r + v_z \vec{e}_z$
Champ de pression	$p(r, z)$
Concentration en volume	$c(r, z)$
Concentration surfacique	$\Gamma(r)$
Tension superficielle	$\gamma(r)$
Viscosité dynamique	$\eta$
Viscosité cinématique	$\nu$
Masse volumique	$\rho$
Coefficient de diffusion	$D$
Température	$T$

**Table 1** – Grandeur mises en jeu



**Fig. 1** – Schéma de l'écoulement de Marangoni

Par symétrie de rotation, la vitesse  $\vec{v}$  de l'écoulement varie suivant la direction verticale et radiale :  $\vec{v}(r, z) = v_r \vec{e}_r + v_z \vec{e}_z$ . Par conséquent on peut décrire le système à l'aide de coordonnées cylindriques  $(r, \theta, z)$ . En plus de la vitesse, les quantités à prendre en compte pour décrire ce système sont répertoriées sur la table 1).

On a donc 5 grandeurs inconnues qui sont  $v_r$ ,  $v_z$  les vitesses radiales et verticales du champ de vitesse,  $p(r, z)$  le champ de pression et  $c(r, z)$  et  $\Gamma(r)$  les champs de concentrations des tensioactifs, pour résoudre le problème analytiquement il nous faut trouver 5 équations. La première étant l'équation de Navier-Stokes qui permet de décrire le transport d'une particule fluide soumise aux forces volumiques de pression et de viscosité.

### Équation de Navier-Stokes :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left( \vec{v} \cdot \vec{\text{grad}} \right) \vec{v} \right) = -\vec{\text{grad}} p + \eta \Delta \vec{v}. \quad (1)$$

Deuxième année PC, chapitre : équations locales de la dynamique des fluides.

En géométrie cylindrique si on projette l'équation (1) suivant  $\vec{e}_r$  et  $\vec{e}_z$  il vient :

$$\begin{cases} \vec{e}_r : & \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right); \\ \vec{e}_z : & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{v_z}{r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \end{cases} \quad (2)$$

### Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j}_m(M, t) = 0, \quad \vec{j}_m(M, t) = \rho \vec{v}(M, t). \quad (3)$$

Deuxième année PC, chapitre : description d'un fluide en mouvement

Dans notre cas, on suppose que le fluide est incompressible, sa masse volumique est constante, donc  $\partial \rho / \partial t = 0$ , dans ce cas l'équation (3) donne :

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Nous considérons que la vitesse  $\vec{v}$  s'évanouit à l'infini : *i.e* lorsque  $z \rightarrow \infty$ . À l'interface ( $z = 0$ ), la continuité de la contrainte tangentielle est assurée et impose une relation entre la vitesse et le gradient de tension superficielle de façon similaire à la contrainte qu'appliquerait une surface rigide en mouvement uniforme à la surface de l'eau.

### Conditions aux limites :

$$\vec{F}_{\text{plaque} \rightarrow \text{fluide}} = \eta \frac{dv}{dy} S \vec{u}_x. \quad (5)$$

Deuxième année PC, chapitre : description d'un fluide en mouvement, écoulement de Couette plan

Sachant que la tension superficielle est une force par unité de longueur on peut réécrire la relation (5) tel que :

$$\eta \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = \frac{\partial \gamma}{\partial r}, \quad \text{en } z = 0. \quad (6)$$

Cette relation est importante car le **moteur** de l'écoulement de Marangoni réside dans le terme  $\nabla_r \gamma$  via la dépendance de la tension de surface avec la concentration en tensioactifs. Le gradient de tension de surface est situé à l'interface entre l'eau et l'air, la vitesse sera donc maximale à la surface.

Il nous manque encore deux équations pour pouvoir résoudre le système, les équations sur le profil de concentration des tensioactifs. Les tensioactifs que l'on utilise sont solubles, elles peuvent désorber de la surface vers le volume de liquide. Cet échange de molécules entre le volume et l'interface est gouverné par la diffusion. De plus, à la surface l'écoulement de Marangoni transporte les molécules. Ces phénomènes

de transport et de diffusion donnent lieu à un écoulement de taille finie  $R_M$  symbole de l'équilibre entre l'advection des molécules de tensioactif à la surface et leur diffusion dans le volume.  $R_M$  correspond à la distance à partir de laquelle la concentration à la surface devient nulle.

On note la quantité de molécules qui restent à l'interface  $\Gamma(r)$  et celles dans le volume de liquide  $c(r, z)$ . L'équation qui décrit l'évolution de la concentration en tensioactif est la loi de Fick avec un terme convectif supplémentaire qui traduit le transport des tensioactifs par l'écoulement.

### Équation de convection diffusion pour le tensioactif

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \underbrace{(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})c}_{\text{convection}} = \underbrace{D\Delta c}_{\text{diffusion}} \quad (7)$$

Cette équation décrit la dynamique de diffusion du tensioactif qui peut à la fois diffuser et être transporter par l'écoulement. C'est la loi de Fick vue en deuxième année de CPGE PC avec un terme en plus : le terme de convection qui correspond à la divergence  $\text{div}(c\vec{v})$ .

En coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} - \frac{c}{r^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

De plus la conservation de la masse de tensioactifs à l'interface  $z = 0$  s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r \Gamma) = -D \frac{\partial c}{\partial z}, \text{ en } z = 0. \quad (9)$$

Supposons que l'échange de tensioactifs entre l'interface et le volume est limité par la diffusion, on fait l'hypothèse que l'interface est à l'équilibre avec le volume, soit :  $\Gamma(r) = \Gamma_{\text{eq}}(c(r, z = 0))$  et  $\gamma(r) = \gamma_{\text{eq}}(c(r, z = 0))$ . En faisant l'approximation de linéarité on obtient la variation de  $\Gamma$  et  $\gamma$  tel que :

$$\Gamma(r) = \frac{\partial \Gamma}{\partial c} c(r, 0), \quad \text{et } \gamma(r) = \gamma_0 - \left| \frac{\partial \gamma}{\partial c} \right| c(r, 0) \quad (10)$$

On obtient ainsi 5 équations pour résoudre un problème à 5 inconnues. En couplant ces 5 équations on peut déterminer une relation entre le **rayon maximal** de l'écoulement de Marangoni  $R_M$  ainsi que la **vitesse maximale** de l'écoulement en fonction des paramètres physico-chimiques du système et de paramètres expérimentaux :

$$R_{\text{max}}^a \propto \left( \frac{Q}{c^*} \right)^{3/4} \left( \frac{\eta \rho}{\Delta \gamma^2 D^3} \right)^{1/8}, \quad V_{\text{max}}^a \propto \left( \frac{c^* \Delta \gamma^3}{Q} \right)^{1/4} \left( \frac{D}{(\eta \rho)^3} \right)^{1/8}. \quad (11)$$

$c^*$  est la concentration micellaire critique (concentration à partir de laquelle la tension de surface d'un solution de tensioactif ne change plus) (CMC) ,  $\Delta \gamma$  est la différence de tension de surface entre la source et l'eau pure loin de la source,  $Q$  est le débit molaire d'injection de tensioactif,  $D$  est le coefficient de diffusion dans l'eau des tensioactifs,  $\eta$  la viscosité dynamique, et  $\rho$  la masse volumique de l'eau. Les expériences que l'on a réalisé se trouvent dans une gamme de vitesse à la surface  $v_{\text{max}} \in [0.1, 0.5] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  soit un nombre de Reynolds  $Re = \rho R v_{\text{max}} / \eta \in [2 \times 10^3, 2.5 \times 10^4]$ .

Nous avons décrit dans cette partie de façon générale l'écoulement de Marangoni et comment le mettre en équations. Nous avons vu que le moteur de l'écoulement réside dans le gradient de tension de surface qui apparaît lors de l'ajout de tensioactif solubles à la surface de l'eau. La compétition entre la diffusion vers le fond de l'eau et le transport des molécules à la surface donne lieu à un écoulement de taille finie dont on peut prédire la taille ainsi que la vitesse. On peut observer expérimentalement au bord de cet écoulement la génération de tourbillons par paires. Je présente dans la section suivante l'étude expérimentale de la génération de ces tourbillons avec laquelle j'ai cherché à comprendre leur mécanisme de génération.

## 2.3 Génération de vorticité par effet Marangoni

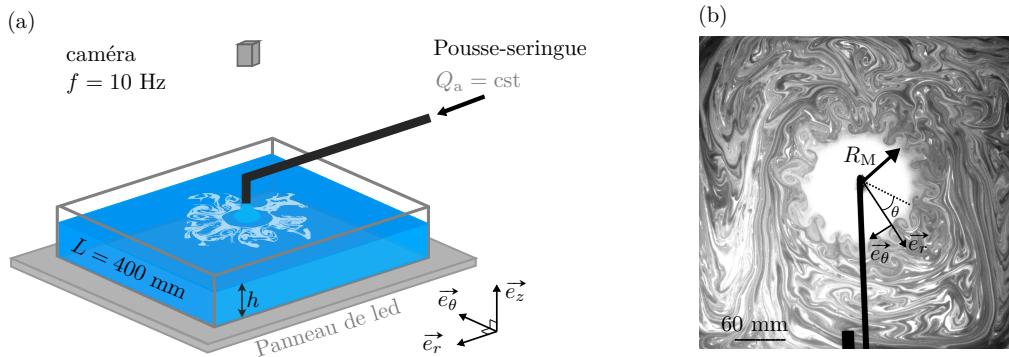
### 2.3.1 Dispositif expérimental

Je me suis intéressé à un écoulement de Marangoni solutal, généré à partir de tensioactifs hydrosolubles de la famille des alkyl triméthylammonium halides (C<sub>n</sub>TABr, n = 10 to 14, C<sub>n</sub>TACl, n = 12 et 16) ainsi que

de la famille des sodium alkyl sulfate ( $C_nNaSO_4$ ,  $n = 8$  to  $12$ ). Les tensioactifs sont dissous dans de l'eau ultra-pure et injectés sur une couche d'eau ultra-pure également d'épaisseur  $h$ .

### Visualisation de l'écoulement à la surface :

La solution de tensioactif étant transparente, on dépose le tensioactif sur la surface de l'eau sous la forme d'une émulsion composée d'huile d'olive et de tensioactif. L'émulsion est réalisée en faisant passer les deux liquides d'une seringue à l'autre à travers une section plus étroite ce qui permet de disperser l'huile dans la solution de tensioactif. On obtient une émulsion très stable (peut tenir plusieurs jours) avec des tailles de gouttes très contrôlées  $d \sim 10 \mu\text{m}$ . Les gouttelettes d'huile dispersées dans l'émulsion servent de traceurs passifs pour visualiser l'écoulement surfacique. On obtient alors des images comme la photo représentée sur la figure 2 (b) prise par dessus la surface d'eau. Lorsque l'émulsion est déposée sur la surface de l'eau pure, l'effet Marangoni déclenche l'écoulement que nous pouvons voir sur la figure 2(b).



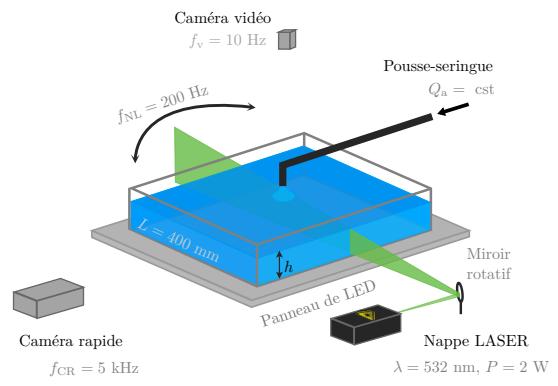
**Fig. 2** – (a) - Schéma du dispositif expérimental. Composé d'une cuve en plexiglas ( $L \times L \times H = 400 \times 400 \times 40$  mm) contenant de l'eau ultra-pure posée sur un panneau de leds pour l'éclairage. (b) - Photo de l'écoulement de Marangoni quasi-stationnaire pour une épaisseur d'eau  $h = 15$  mm et un débit molaire de  $Q_a = 0.16 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ . Nous observons sur cette photo les émissions de tourbillons tout autour du bord de l'écoulement.

L'image est obtenue par transmission, le panneau de leds est placé sous la cuve et la caméra capte les rayons lumineux transmis par la surface liquide sur laquelle l'émulsion s'étale. La zone de couleur blanche correspond à une zone de faible densité de gouttes d'huile puisqu'elles sont transportées par l'écoulement de Marangoni à une vitesse de l'ordre de  $v \approx 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Lorsque les particules atteignent le bord de l'écoulement en  $r = R_M$ , la vitesse de l'écoulement diminue rapidement (environ d'un ordre de grandeur  $v \approx 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Au voisinage de cette région, les gouttelettes d'huile s'accumulent et diffractent la lumière ce qui nous permet de voir l'écoulement en dehors de la zone de Marangoni. Avec cette méthode, je peux caractériser la structure de l'écoulement à la surface en fonction du tensioactif et du débit d'injection molaire noté  $Q_a$ .

L'aspect le plus spectaculaire de cette expérience est la génération de paires de tourbillons tout autour de la frontière de l'écoulement de Marangoni (visible sur la figure 2 ou en cliquant sur le lien ici sur « Le savon pour se déplacer »).

### Visualisation de l'écoulement en volume par vélocimétrie :

Pour caractériser l'écoulement sous la surface j'ai mis en place un autre dispositif expérimental que l'on appelle Particle Image Velocimetry (PIV). Il s'agit d'une méthode de vélocimétrie qui consiste à mesurer le déplacement au cours du temps de petites particules dispersées dans le fluide. Ces particules sont éclairées avec une source de lumière très forte, généralement une nappe laser. Le mouvement des particules dans le plan de la nappe laser est enregistré par une caméra rapide. Le film obtenu est analysé à l'aide d'algorithmes de corrélation d'images qui permettent de mesurer le déplacement de toutes les particules entre deux images successives. On peut alors calculer le champ de vitesse de l'écoulement au cours du temps.



**Fig. 3** – Dispositif expérimental pour la « Particle Image Velocimetry ».

Pour caractériser l'écoulement sous la surface, il faut mesurer le champ de vitesse dans un volume, car l'émission des tourbillons à la surface a lieu de façon aléatoire autour de l'écoulement de Marangoni. Pour pouvoir être sûr d'observer au moins un événement il faut scanner le volume de liquide en plusieurs endroits. Pour réaliser cela, nous utilisons une nappe laser ( $\lambda = 532$  nm) que l'on déplace à l'aide d'un miroir monté sur un oscillateur piézoélectrique contrôlé par un générateur à basse fréquence (GBF) qui permet de déplacer la nappe laser très rapidement [Brucker 2012, Lawson 2014]

Dans cette expérience, le choix des particules est essentiel pour obtenir la mesure la plus précise possible du champ de vitesse. Les particules doivent être des traceurs passifs qui ne perturbent pas l'écoulement pendant la mesure. Pour bien choisir les particules il faut prendre en compte deux paramètres : la densité et la taille des particules. La densité doit être choisie en fonction du fluide que nous souhaitons sonder. Dans mon cas, je souhaite obtenir une mesure dans le volume du liquide, donc les particules ne doivent pas flotter ni sédimentter. Par conséquent, la densité des particules doit être la plus proche de celle du liquide. De plus, la taille des particules doit être bien choisie pour échantillonner correctement le volume et ne pas perturber l'écoulement. Pour vérifier que les particules sont bien choisies par rapport à l'écoulement, nous pouvons calculer le nombre de Stokes (équation 12). Le nombre de Stokes est un nombre sans dimension utilisé pour étudier le comportement d'une particule dans un fluide. C'est le rapport entre l'énergie cinétique de la particule et l'énergie dissipée par le frottement avec le fluide.

$$St = \frac{1}{18} \frac{\rho_p d_p^2 v_0}{\mu_1 l_0}, \quad (12)$$

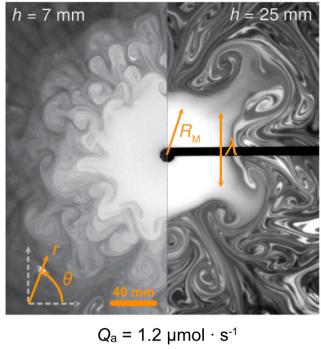
$\mu_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  Pa · s est la viscosité dynamique de l'eau,  $v_0$  est la vitesse typique de l'écoulement et  $l_0$  est l'échelle spatiale de variation de  $v_0$ .

J'ai pris des particules de nylon de diamètre  $d = 50 \mu\text{m}$  et de densité  $\rho = 1.14 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . La densité de ces particules est plus grande que celle de l'eau, donc elles sédimentent mais assez lentement pour pouvoir faire une mesure correcte du champ de vitesse sur le temps d'acquisition. En revanche, elles sont suffisamment petites pour se laisser entraîner par l'écoulement sans le perturber. Pour calculer le nombre de Stokes équation (12), j'ai mesuré la vitesse caractéristique  $v_0$  à partir de l'écoulement à la surface et  $v_0 \in [0.1, 0.5] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $l_0 = 1 \text{ mm}$ . J'en ai déduit un nombre de Stokes qui varie entre :  $St = [0.28, 1.43]$ . Le nombre de Stokes reste globalement autour de 1, donc les particules suivent les lignes de courant du fluide. En somme, les particules choisies sont de bons traceurs passifs dans cette étude.

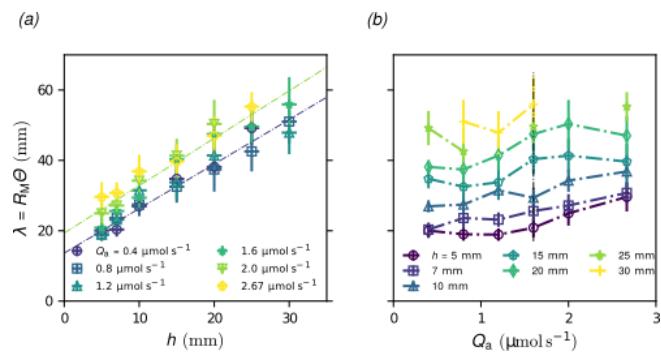
### 2.3.2 Résultats principaux

#### Observations depuis la surface

Nous avons choisi d'agir sur deux paramètres : le débit molaire d'injection  $Q_a$  ainsi que sur un paramètre qui n'apparaît pas dans les équations (11) qui est l'épaisseur de la couche d'eau  $h$ . Pour le débit molaire il suffit de changer le paramètre sur le pousse-seringue. Pour changer l'épaisseur d'eau dans la cuve, nous versons un volume d'eau ultra-pure dans la cuve qui correspond à la hauteur d'eau que nous souhaitons avoir. Ainsi, nous nous apercevons qu'en modifiant l'épaisseur d'eau, la structure de l'écoulement change drastiquement.



**Fig. 4** – Deux photos superposées de l'écoulement de Marangoni. La première avec une épaisseur d'eau  $h = 7 \text{ mm}$  et un débit molaire  $Q_a = 1.2 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$  et la seconde avec  $h = 25 \text{ mm}$  et  $Q_a = 1.2 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ .



**Fig. 5** – (a) Dépendance de la distance moyenne  $\lambda$  séparant deux paires de tourbillons sur la couche d'eau d'épaisseur  $h$ . Les lignes en pointillés représentent une régression linéaire de la forme :  $\lambda = Ah + \lambda_0$ . (b) Dépendance de la distance moyenne  $\lambda$  en fonction du débit molaire  $Q_a$  (la ligne en pointillé est un guide pour le regard).

La figure 4 montre la différence de structure de l'écoulement lorsque la hauteur de la couche d'eau passe de  $h = 7 \text{ mm}$  à  $h = 25 \text{ mm}$  à  $Q_a$  constant. La taille de l'écoulement de Marangoni reste constante  $R_M = 50 \text{ mm}$ , mais la taille et le nombre de tourbillons ont changé. Dans le cas  $h = 7 \text{ mm}$ , on compte sur un demi-cercle 6 paires de tourbillons émis simultanément, de taille  $d = 20 \text{ mm}$  et séparées les unes des autres d'une distance  $\lambda = 15 \text{ mm}$ . Tandis qu'à  $h = 25 \text{ mm}$ , on en compte 2 de plus grande taille  $d = 40 \text{ mm}$ , séparées de  $\lambda = 50 \text{ mm}$ . Sur la figure 5 j'ai reporté les mesures de  $\lambda$  en fonction de l'épaisseur d'eau. On observe que la distance moyenne  $\lambda$  séparant deux paires de tourbillons est proportionnelle à  $h$  pour les différents débits  $Q_a$ . Au-delà de  $h_{\max} = 40 \text{ mm}$  j'ai observé la disparition de l'émission de tourbillons. En fonction du débit  $Q_a$ , la distance  $\lambda$  reste constante.

Mon travail a permis de montrer que la génération des tourbillons dépend de l'épaisseur d'eau et donc que la structure des tourbillons est liée à un écoulement qui a lieu sous la surface.

### Écoulement sous la surface et mécanisme de génération tourbillonnaire

Les résultats précédents nous suggèrent que le mécanisme responsable de la génération de tourbillons à la surface de l'eau résulte d'effets se produisant sous la surface. On étudie l'écoulement sous la surface grâce à la méthode de PIV. Après enregistrement d'un film on obtient en superposant les images la figure 7. On observe que l'écoulement ressemble à un tourbillon qui occupe toute l'épaisseur de la couche liquide. À partir de film, en comparant deux images successives au cours du temps on peut calculer le champ de vitesse  $\vec{v} = v_x \vec{e}_x + v_z \vec{e}_z$  et la vorticité qui s'écrit comme le rotationnel du champ de vitesse  $\vec{\omega} = \text{rot } \vec{v} = \vec{\nabla} \wedge \vec{v}$  présentés sur la figure 8. Les résultats que j'ai obtenu de ces observations m'ont permis d'en déduire un mécanisme possible pour la génération de la vorticité au voisinage de l'écoulement de Marangoni. Ce mécanisme a lieu en plusieurs étapes.

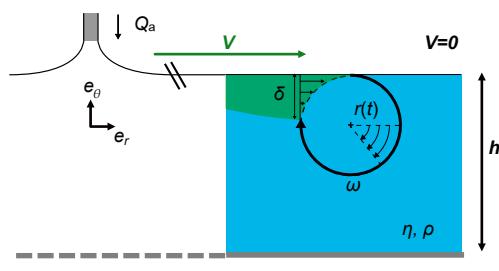
1. L'écoulement de Marangoni stationnaire cisaille la surface de l'eau sur une distance qui est le rayon de l'écoulement  $R_M$  avec une vitesse maximale  $v_M$  dont la quantité de mouvement diffuse sur une épaisseur de liquide  $\delta$ . On sait qu'un écoulement de cisaillement génère de la vorticité, celle-ci est contenue dans la couche limite et transportée jusqu'à ce que l'écoulement s'arrête.

2. La fin de l'écoulement de Marangoni et la modification du profil de vitesse entraîne l'enroulement de la couche limite sous la surface. Ceci fait penser au théorème de Kelvin qui nous dit qu'un écoulement parfait, incompressible et stationnaire conserve la circulation. Par conséquent si un écoulement présente une vorticité non nulle au départ il doit la conserver. Lorsque le transport de la vorticité dans la couche limite s'arrête. Par conservation du moment angulaire les particules fluides se mettent à tourner sur elle-même.

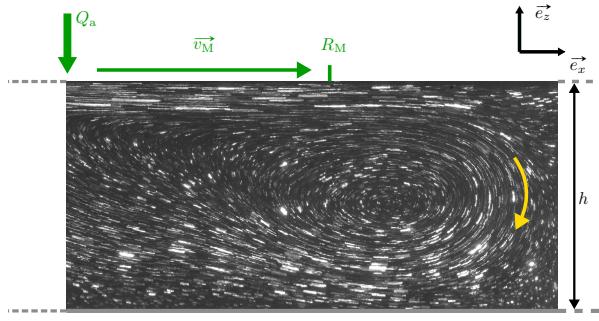
3. Cet enroulement est toujours en contact avec la couche de limite de vorticité  $\delta$  qui l'approvisionne en masse de liquide. En faisant l'hypothèse que le liquide qui entre dans l'enroulement n'en sort pas. C'est ce que j'observe expérimentalement, toute la quantité de mouvement reste dans le vortex. On peut calculer par conservation de la quantité de matière une croissance de l'enroulement  $r(t) = \delta \sqrt{1 + vt/(2\pi\delta)}$ . La croissance d'un tourbillon en  $\sqrt{t}$  est typique de la diffusion de la quantité de mouvement du vortex.

4. La croissance du vortex est uniquement limitée par la présence du fond de la couche d'eau. Lorsque le tourbillon « voit » le fond de la cuve il cisaille liquide entre le fond et lui-même ce qui crée une deuxième couche limite de vorticité au voisinage de la paroi immobile. Si le premier vortex est suffisamment fort, il peut entraîner la couche limite de vorticité autour de lui et créer un second vortex qui tourne alors dans le sens opposé.

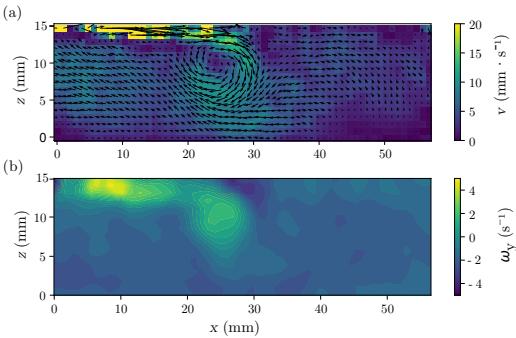
5. L'interaction entre les deux vortex est instable et a plusieurs conséquences. On peut observer des oscillations suivant l'axe de rotation du vortex primaire jusqu'à sa brisure en paire de vortex dont l'axe de rotation est perpendiculaire au premier vortex. C'est ce que l'on appelle dans la littérature l'instabilité des vortex en effet de sol [Harris 2012].



**Fig. 6** – Schéma de l'écoulement de Marangoni couplé au tourbillon sous la surface de l'eau



**Fig. 7** – Enroulement sous la surface par la PIV. Projection de 100 images d'un film de PIV dans les conditions expérimentales suivantes :  $h = 15$  mm et  $Q_a = 0.53 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ .



**Fig. 8** – (a) Mesure du champ de vitesse.(b) Mesure du champ de vorticité. Pour  $h = 15$  mm et  $Q_a = 1.2 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ . ( $\omega_y$ ).

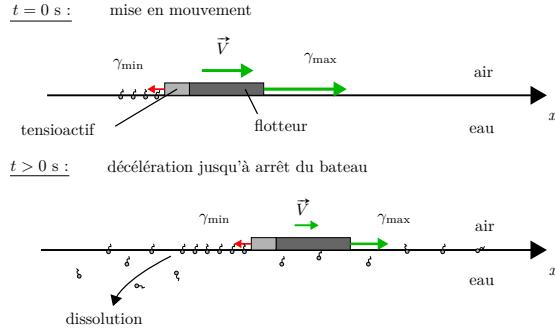
### 3 Bateaux de Marangoni

Pendant ma thèse je me suis intéressé à un autre aspect lié à l'effet Marangoni : la propulsion de bateaux de Marangoni. Ce sujet a fait l'objet de nombreuses études dans la littérature, notamment en médecine on sait réaliser des micro-robots pour amener les médicaments à des cibles précises dans l'organisme. Ces objets permettent également de comprendre comment certains insectes sont capables de se propulser à la surface de l'eau à des vitesses de l'ordre du demi-mètre par seconde.

#### 3.1 Principe

Lorsque le bateau de Marangoni se déplace à la surface de l'eau les tensioactifs contenus sur le bateau sont libérés sur la surface du liquide et s'étalent.

L'étalement des tensioactifs solubles sur le liquide est une situation hors-équilibre, car les tensioactifs peuvent désorber et s'adsorber à l'interface en plus d'être transportés par l'écoulement de Marangoni. Ces phénomènes se traduisent par la relation entre la concentration surfacique des tensioactifs  $\Gamma(r, t)$  et la concentration en volume des tensioactifs  $c(r, z, t)$  dont dépend la tension interfaciale  $\gamma(r, t)$  à chaque instant pendant le mouvement du bateau. Alors que les tensioactifs sont libérés, le gradient de tension de surface diminue au cours du temps jusqu'à ne plus pouvoir générer de propulsion. La vitesse du bateau diminue avec la diminution de la différence de tension de surface jusqu'à son arrêt complet lorsque  $\Delta\gamma = 0$  entre la proue et la poupe du bateau (voir figure 9).



**Fig. 9** – Schéma des bateaux de Marangoni solutal

#### 3.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental construit pour étudier la propulsion des bateaux par effet Marangoni est composé d'une cuve en forme de fleur (voir figure 10b) posée sur une plateforme permettant d'en assurer l'horizontalité. Un panneau de leds permet d'éclairer le tout par en-dessous. Les expériences sont enregistrées par-dessus avec une caméra (Imagine Source DMK 23U445) à une fréquence de 10 images par secondes pour suivre la trajectoire du bateau. La forme particulière de la cuve est primordiale, elle permet d'éviter que le bateau se coince contre les bords. Lorsqu'il rentre en contact avec la paroi il est redirigé vers le centre grâce à la forme incurvée des parois, ceci permet d'éviter un contact prolongé avec les bords de la cuve. Le bateau est composé de deux parties. La première est le flotteur, il s'agit d'une feuille de plastique transparente découpée en forme de hors-bord. La longueur du bateau est  $L = 2$  cm et de largeur  $W = 1.5$  cm comme illustré sur la figure 10a. La deuxième partie est le moteur du bateau. Il s'agit d'une languette de papier filtre imbibée de solution de tensioactif de concentration connue. Le moteur est fixé sur le bateau à  $l_1 = 1$  cm de l'arête et

déborde sur l'eau sur une distance  $l_2 = 2$  mm et de largeur  $w = 5$  mm. Pour fixer le moteur au bateau, nous utilisons une pointe de vernis à ongle de couleur sombre. Le vernis permet faciliter la détection du bateau pour pointer sa trajectoire. La trajectoire du bateau est reconstituée à l'aide d'un programme python qui permet de détecter les contours du bateau à partir desquels je calcule le barycentre du bateau que l'on suit au cours du temps.

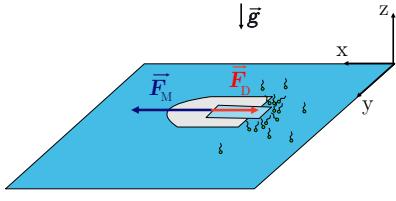
J'ai étudié l'influence de la concentration et de la concentration micellaire critique sur la trajectoire et l'évolution de la vitesse du bateau. J'ai mené des expériences pour différents types de tensioactifs (HTAC, TTAB, DoTAB et DeTAB) dont les concentrations micellaire critiques (CMC) sont reportées dans la table 2 Ces tensioactifs diffèrent de par la longueur de leur chaîne carbonée et la nature de la tête hydrophile.

Tensioactif	Acronyme	CMC ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$v_{\max}$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Hexadecyl Trimethyl Ammonium Chloride	HTAC, C <sub>16</sub> TAC	1.3	$28.1 \pm 1.1$
Tétradécyl Triméthyl Ammonium Bromide	TTAB C <sub>14</sub> TAB	3.6	$26.5 \pm 1.5$
Dodécyl Triméthyl Ammonium Bromide	DoTAB C <sub>12</sub> TAB	15.4	$25.2 \pm 1.6$
Décyl Triméthyl Ammonium Bromide	DeTAB C <sub>10</sub> TAB	62.5	$22.2 \pm 1.1$

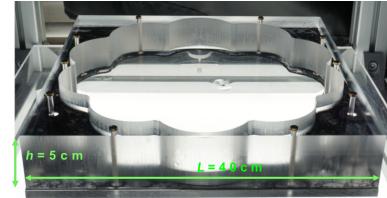
**Table 2** – Tableau récapitulatif des tensioactifs utilisés

Je suis donc à même d'enseigner la programmation python au lycée et en filières post-bac. Je l'utilise régulièrement cette année en tant que professeur de physique chimie pour présenter des animations en classe ou bien faire faire aux élèves des mesures, du traitement de données et des modélisations à l'aide du langage python.

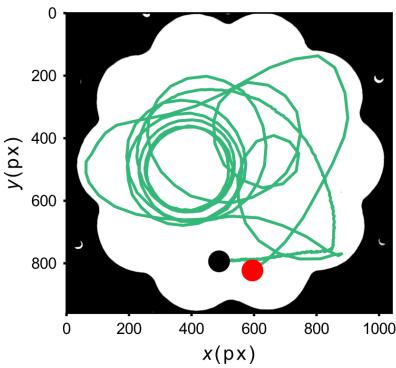
### 3.2.1 Résultats expérimentaux



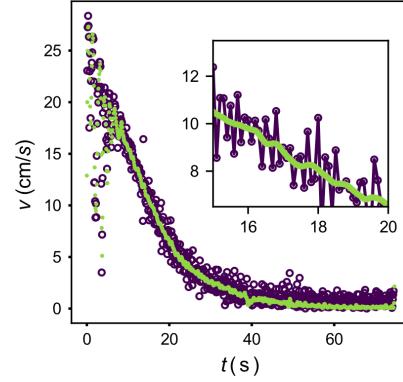
(a) Schéma de la modélisation du bateau de Marangoni



(b) Dispositif expérimental, cuve fleurie remplie d'eau pure, avec un bateau posé sur l'eau.



(c) Trajectoire du bateau, le bateau démarre au cercle rouge et s'arrête au cercle noir



(d) Évolution de la vitesse du bateau au cours du temps pour HTAC à  $c = 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

**Fig. 10** – Dispositif expérimental et mesure de la vitesse du bateau

J'ai étudié l'évolution de la vitesse en fonction de la concentration en tensioactif dans le réservoir. Quel que soit le tensioactif utilisé, l'évolution de la vitesse au cours du temps suit la même allure. Le bateau part avec une vitesse maximale à  $t = 0$  s puis décélère sur plusieurs dizaines de secondes ( $t_f \approx 60$  s). J'ai reporté les valeurs des vitesses initiales sur le tableau 2, pour la même concentration dans le réservoir  $c = 0.1 \text{ mol/L}$ . On observe que la vitesse initiale du bateau diminue lorsque la CMC augmente. En effet, l'HTAC est le tensioactif le plus efficace et peut propulser les bateaux à de grandes vitesses  $v = 28.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Au contraire,

le DeTAB est le moins efficace des quatre avec une vitesse de  $v = 22.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pour les quatre tensioactifs j'ai tracé l'évolution de la vitesse initiale des bateaux en fonction de la concentration de la solution initiale. Sur la figure 11 j'ai reporté la valeur moyenne sur trois réalisations. Nous pouvons remarquer que la vitesse initiale augmente avec la concentration de la solution, d'abord rapidement puis on observe un palier où la vitesse sature. À partir de ces observations, j'ai essayé de proposer un modèle qui tienne compte des paramètres physico-chimiques du système pour comprendre l'influence de la nature du tensioactif ainsi que de sa concentration.

### 3.2.2 Modélisation

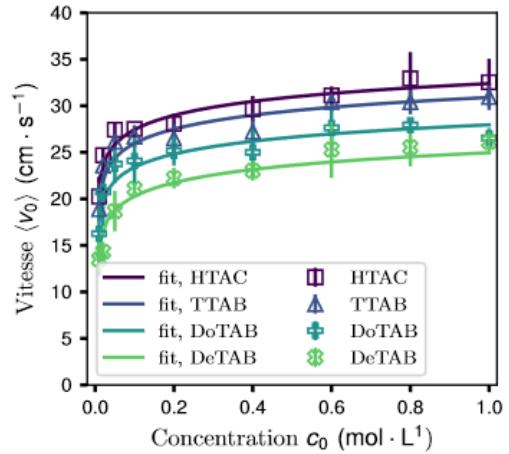
J'ai cherché à décrire l'évolution de la vitesse en fonction des paramètres qui sont : la concentration et la CMC du tensioactif. D'après nos résultats expérimentaux, les bateaux de Marangoni se déplacent spontanément sur la surface de l'eau. Dès que le bateau touche la surface, les tensioactifs s'étalent à l'arrière du bateau. Par conséquent, autour du bateau les tensioactifs sont plus concentrés à l'arrière qu'à l'avant, ce qui génère une différence de tension de surface le propulsant en avant. La force de propulsion qui s'applique au bateau est la différence de force capillaire entre l'avant et l'arrière du bateau dû à l'étalement des tensioactifs. Cette force est contrebalancée par les frottements entre l'eau et la coque du bateau. On applique la deuxième loi de Newton au système d'étude, c'est à dire un bateau se déplaçant dans le plan de la surface de l'eau (voir figure 10a). La difficulté du problème réside dans la relation entre le gradient de tension de surface et le profil de concentration ainsi que la CMC liée à la nature du tensioactif. Pour résumer, en supposant que le système est à l'équilibre à chaque instant on peut relier la variation de la tension de surface à la concentration via les équations d'états de Langmuir et de Gibbs. On obtient ainsi  $\Delta\gamma(r) = f(c, CMC)$ , ce qui nous permet de connaître  $F_{\text{propulsion}} = \alpha L \Delta\gamma$ .  $\alpha$  est le facteur de forme du bateau,  $L$  la longueur du bateau et  $\Delta\gamma$  la différence de tension de surface entre l'avant et l'arrière du bateau. Pour la force de frottement, j'ai considéré la forme de la force de frottement établie pour une plaque rigide dans un écoulement intermédiaire entre le régime laminaire et turbulent ( $Re \approx 1 \times 10^3$ ) :  $F_D = \beta v^{3/2}$  où  $\beta$  est un coefficient qui dépend de la géométrie du bateau, de la viscosité de l'eau et de sa masse volumique. En appliquant la deuxième loi de Newton on obtient l'équation différentielle suivante à résoudre :

$$m \frac{dv(t)}{dt} + \underbrace{\beta v(t)^{3/2}}_{\text{frottements visqueux}} = \underbrace{\alpha L \Delta\gamma_0 e^{-\frac{t}{\tau_M}}}_{\text{propulsion}}. \quad (13)$$

Le terme en  $\exp(-t/\tau_M)$  provient des observations expérimentales où la vitesse du bateau décroît de façon exponentielle.  $\tau_M$  est un temps caractéristique de décroissance de la vitesse du bateau. La résolution de l'équation différentielle nous donne une relation entre la vitesse initiale et les paramètres physicochimiques du système :

$$v_0(c_0) = \left( \frac{\alpha R T \Gamma_{\max}}{0.664 \rho L} \sqrt{\frac{L}{\nu} \ln(1 + K_L c_0)} \right)^{2/3}. \quad (14)$$

Cette relation ajuste bien les données expérimentales. Et permet de mesurer les paramètres  $\Gamma_{\infty}$  l'excès surfacique et  $K_L$  la constante de Langmuir qui viennent des équations d'états de Langmuir et de Gibbs et collent avec la littérature [Rosen 2004]. Mon travail présente ici un premier modèle simple qui capture correctement les données expérimentales malgré les hypothèses utilisées pour le modéliser. J'ai eu l'occasion de présenter ce sujet d'étude à des étudiants de première au lycée Léonard de Vinci à Saint-Michel sur Orge. J'ai organisé des travaux pratiques au cours desquels les étudiants ont construit leur dispositif, mesuré la vitesse en fonction de différents savons et étudier l'influence de la contamination de l'eau sur le mouvement du bateau. L'idée étant d'étudier l'influence de la pollution sur les déplacements d'insectes à la surface de l'eau.



**Fig. 11** – Comparaison entre modèle et expériences concernant la vitesse initiale en fonction de la concentration.

### 3.3 Recherche pendant mon post-doctorat.

J'ai été recruté en tant que post-doctorant par l'équipe Turbots du PMMH qui débutait un nouveau projet de recherche sur l'étude de la zone marginale glaciaire (Marginal Ice Zone en anglais ou MIZ), le but étant d'en réaliser un modèle expérimental à l'échelle du laboratoire. La MIZ est la zone où la banquise se réchauffe principalement, fond et se fragilise le plus. Dans cette région de la banquise, la houle océanique casse la banquise en fragments plus petits, accélérant la fonte de cette banquise. Jusqu'à présent les phénomènes d'interaction entre les vagues et la banquise ont été uniquement paramétrisées dans les modèles numériques climatiques planétaires. J'ai été recruté pour monter des expériences de laboratoire en mesure d'isoler et de reproduire les mécanismes physiques mis en jeu dans l'interaction entre la houle et la banquise. Le but étant d'obtenir des valeurs expérimentales pour vérifier les paramètres ajustables des modèles numériques.

Je me suis rapidement intégré à l'équipe et j'ai commencé à développer des outils d'analyse et de traitement de données basés sur une méthode de reconstruction de l'élévation de la surface de l'eau (synthetic schlieren) afin de mesurer l'amplitude des vagues et identifier les différents modes de déformation de la banquise en fonction de la fréquence et de l'amplitude des vagues. Ces outils numériques sont encore en développement et testés par l'équipe Turbots afin de publier. On peut trouver ces outils sur le lien suivant : <https://github.com/Turbotice/K-extraction>. Nous avons testé ces outils sur des modèles expérimentaux de « banquise ». Pour comprendre les mécanismes de rupture de la banquise on a cherché des matériaux cassants. Un candidat qui semble reproduire le comportement de la banquise est un verni-colle en spray qui solidifie une fois posé sur l'eau. Il forme alors une croûte qui se déforme sous l'effet de la houle jusqu'à une amplitude seuil où la croûte se brise. C'est une étude qui aujourd'hui fait l'objet d'une thèse, et depuis des expériences ont été menées à Rimouski dans la baie du Saint Laurent pour obtenir des données de terrain.

### 3.4 Travaux pratiques proposés à une classe de seconde sur la pollution des eaux

Au cours de ma thèse j'ai eu l'occasion de présenter mes travaux de recherche dans différents lycées. À l'une de ces occasions, j'ai créé une activité sous forme de travaux pratiques à destinations d'une classe de seconde du lycée Léonard de Vinci à Saint-Michel sur Orge qui portait sur la pollution des eaux. Vous trouverez le document fourni aux élèves à travers ce lien cozy drive <https://gledoudic-drive.mytoutatice.cloud/public?sharecode=XdzAEUL3Ekut>.

Grâce à cette activité/TP, les élèves ont pu entrevoir comment un chercheur aborde une question. Les élèves ont dû formuler des hypothèses sur l'influence de la pollution des eaux sur le déplacement des microvelia à la surface d'une couche d'eau. Puis ils ont cherché une façon simple de tester leurs hypothèses en modélisant un insecte qui relargue des tensioactifs par le bateau en papier muni d'un petit réservoir à tensioactif. Ils ont observé le déplacement du bateau dans une eau propre et ont comparé la trajectoire observée à la trajectoire dans des eaux plus polluées (avec du poivre moulu, du savon dans l'eau, etc), jusqu'à émettre leurs propres conclusions.

**TP Physique - Seconde**

**TP - Propulsion d'un bateau par effet MARANGONI**

Version 1.00, compilée le 18 février 2021 à 14:45.

Très tôt, on a appris que les liquides prennent la forme du récipient qui les contient. Au Collège, c'est même cette propriété qui est utilisée pour les défléchir. Pourtant, on observe ce qui suit : lorsque l'on ajoute des tensioactifs aux gouttes de rosée ou aux feuilles semblent adopter spontanément une forme sphérique.

Quel est TP, on cherche à comprendre les propriétés des interfaces eau-air, et à leur appliquer.

**Document 1 - Tension de surface**

Comment une interface peut par exemple la périphérie d'une goutte de pluie tombant dans l'air. Bien que cela ne se remarque pas toujours dans la viscosité, l'interface eau-air est assimilable à une membrane tendue. L'eau cherche ainsi à minimiser sa surface de contact avec l'air.

La tension de la membrane (la difficulté à augmenter la surface de l'interface liquide-air) est caractérisée par la tension de surface ( $\gamma$  en gamma), d'autant plus grande que la création d'interfice est difficile.

**QUESTION**

1. **QUESTION** Dans l'expérience illustrée dans le DOC. 1, que va-t-il arriver si l'oreille subissen la force  $F_x$ ?

2. Les gouttes d'eau semblent prendre spontanément une forme sphérique. A votre avis, quelle propriété géométrique la sphère permet-elle d'assurer à un volume donné?

**Mécanique des fluides**

**I. Effet MARANGONI**

**DOCUMENT 2 - Effet MARANGONI**

Il est possible de modifier la tension de surface entre l'eau et l'air en dissolvant des tensioactifs dans l'eau. Si l'air qui touche l'eau est plus concentré qu'une autre, il existe alors des différences de tension de surface entre plusieurs points du liquide. Cela engendre l'effet MARANGONI.

Crystalliseur  
Eau + Poivre  
Liquide vaisselle

**À compléter**

8. Les microvilia, insectes aquatiques (photo ci-dessous), peuvent se déplacer à des vitesses de plusieurs dizaines de centimètres par seconde en projetant un tensioactif sur l'eau. Si l'insecte souhaite avancer, doit-il injecter ce tensioactif devant lui ou derrière lui?

**Gerris à la surface de l'eau à gauche, microvilia à droite.**

**II. La propulsion des microvilia au laboratoire**

**2.1. Modélisation des microvilia**

Comme nous l'avons vu précédemment, les microvilia utilisent l'effet MARANGONI pour se propulser. Dans cette section, on cherche à recréer ce phénomène en laboratoire : on modélise les insectes par de petits bateaux décomposés dans une feuille plastique.

L'injection de tensioactif dans l'eau sera assurée par un morceau de papier filtré imbibé de liquide vaisselle placé à l'arrière du bateau.

**2.2. Mise en œuvre**

Afin de réaliser les expériences, vous avez à votre disposition :

- Un cristallisoir et du matériel de chimie courant ;
- Une solution de tensioactifs (distribuée par le professeur) ;
- Une feuille plastique et du papier filtré.

**ÉCHELLE**  
1 : 1  
 $\approx 2 \text{ cm}$   
Bateau (feuille plastique)

**Schéma des bateaux utilisés dans ce TP pour modéliser des microvilia.**

**2.3. Influence de la pollution sur les microvilia (\*)**

Dans cette section, on étudie l'influence de la pollution de l'eau sur la population des microvilia. On prépare une solution de tensioactif dans un papier filtre imbibé de tensioactif. Afin de simuler la pollution d'un lac, on verse dans l'eau du cristallisoir d'eau quelques ml de liquide vaisselle.

**À gauche, fleuve pollué. Au centre, panneau à proximité d'un lac en Ile de France.**

**15. Que signifie le pictogramme de sécurité représenté ci-dessous ?**

**16. Proposez un protocole permettant d'étudier l'influence de la pollution d'un lac sur la propulsion des microvilia. Le faire vérifier par le professeur.**

**17. Mettre en œuvre ce protocole.**

**18. Rédigez un court paragraphe de conclusion quant à l'influence de la pollution sur la propulsion des microvilia. Peut-on utiliser ces dernières comme indicateurs de la qualité de l'eau ?**

**Fig. 12 – TP proposé aux secondes : <https://gledoudic-drive.mytoutatice.cloud/public?sharecode=XdzAEUL3Ekut>**

## 4 Vulgarisation scientifique

En rapport avec le sujet de ma thèse, j'ai participé à la réalisation d'un projet de vulgarisation sur le thème de la tension de surface et de l'effet Marangoni. J'ai collaboré avec l'équipe de recherche en vulgarisation « La Physique Autrement » basée au Laboratoire de Physique des Solides (LPS) à Orsay. Avec Marianne Cardon et Julien Bobroff et Matthieu Roché, nous avons lancé l'idée de créer un format vidéo qui a pour but de présenter la recherche en laboratoire autour de l'écoulement de Marangoni. J'ai mis en place des expériences illustrant l'influence de la tension de surface et de la force capillaire qui en découle. Vous pouvez trouver la vidéo en ligne à travers ce lien <https://dgxy.link/marangoni1>. Ce projet s'est conclu par le design d'un ensemble d'expériences simples permettant d'illustrer des phénomènes de tension de surface pour des présentations en grand public que l'on peut trouver sur un autre onglet du même site <https://dgxy.link/marangoni2>.

J'ai également organisé un atelier pour la fête de la science portant sur la propagation d'ondes à la surface de gouttes toriques mises en lévitation par effet Leidenfrost. Cet atelier est parti de travaux que j'ai mené pendant mon stage de Master 1 sur ce thème. C'est un travail que j'ai poursuivi en parallèle de ma thèse pendant ces trois dernières années et qui a donné lieu à deux publications. Pendant ma thèse, j'ai eu l'opportunité de venir présenter les travaux que j'ai mené au laboratoire dans deux lycées, notamment au lycée Lapérouse Kerichen à Brest devant des lycéens et des élèves de Classes Préparatoires, ainsi qu'au lycée Léonard de Vinci à Saint-Michel sur Orge. Pour l'occasion de ce dernier séminaire avec le professeur des étudiants M. Robin Hénaff, nous avons préparé des travaux pratiques sur la propulsion des bateaux de Marangoni (Mesure de vitesse de propulsion, influence de la pollution sur la propulsion des Microvelias).

## 5 Enseignements

### 5.1 Mission doctorales d'enseignement à l'université de Paris Diderot

Pendant ma thèse j'ai souhaité enseigner dans le cadre des missions doctorales. J'ai enseigné en première année de médecine (32 heures par an). Au cours de ces 96 heures j'ai parcouru le programme complet de physique de médecine, on a abordé les notions d'énergie potentielle, conservation de l'énergie mécanique, hydrostatique, écoulements parfaits ainsi que les pertes de charges dans une conduite (écoulement de Poiseuille), acoustique et imagerie, potentiel et champ électrostatique. Et pour compléter mon service j'ai également encadré des cours/TD de Physique en licence 1 de Sciences de la Vie et de la Terre (32 heures). Avec un programme similaire aux premières années de médecine avec un peu plus de mécanique du point.

### 5.2 Fonctionnaire stagiaire à l'Éducation Nationale 2023-2024

Cette année scolaire 2023-2024, est ma première année en tant que professeur de physique chimie (stagiaire) au lycée GT Jean Guéhenno à Fougères. J'enseigne à une classe de seconde et à trois classes de premières en enseignement scientifique. C'est une année pendant laquelle j'ai pris beaucoup de plaisir à concevoir mes enseignements et à faire classe devant les élèves. J'ai aussi découvert la recherche en didactique et en pédagogie, j'ai essayé de m'y intéressé en expérimentant en classe de nouvelles façon d'enseigner comme la classe inversée qui consiste à laisser plus de place en classe à la résolution de problème plutôt qu'à l'apprentissage de notions de cours.

Je continue aussi à partager ma passion pour la recherche en montrant ce métier à mes élèves. J'ai eu l'opportunité d'inviter des chercheuses lauréates du concours L'Oréal Unesco : women in science à rencontrer mes élèves de seconde. Dr Alice Briole, Dr Suzanne Faure-Dupuy et Dr Lina El Hajji ont présenté leurs travaux en cours dans leurs laboratoires respectifs ainsi que le fonctionnement du monde de la recherche académique. Les élèves du lycée en ont également profité pendant un temps dédié à l'orientation pendant le midi ("les midis de l'orientation"). Les élèves ont beaucoup apprécié cet évènement, ce qui est ressorti le plus : c'était chouette de rencontrer des chercheuses, car c'est un métier qui est inconnu pour la majeure partie des élèves. Vous pouvez d'ailleurs trouver deux podcasts qui ont été réalisés par mes élèves à la suite de cet évènement <https://dgxy.link/podcast11> et <https://dgxy.link/podcast21>. Cet évènement a aussi été partagé dans les journaux tels que Ouest-France (<https://dgxy.link/2UEr6>).