

## *Des gouttes à la piscine!*



*Auteurs :*

C. TENAUD

A. BEUNE-PIFFETEAU

*Encadrants :*

S. BELIN

C. POUQUET

Année scolaire 2023-2024

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Présentation de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Démarche</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Familiarisation avec l'effet Marangoni</b>	<b>5</b>
4.1	1 : L'expérience dite du "fil d'Ariane"	5
4.1.1	Explication du phénomène	6
4.1.2	Effet Marangoni	6
4.1.3	Approche via la notion de tension superficielle	7
4.1.4	Mouvement de l'encre	9
4.2	2 : Notre deuxième expérience dite des "Canaux" : faire varier la surface disponible	10
4.2.1	Canaux à un réservoir	10
4.2.2	Variation : canaux à deux réservoirs	11
4.3	3 : Notre troisième expérience dite des "Canaux" : faire varier la largeur des canaux	12
4.4	4 : Notre quatrième expérience dite des "Canaux" : faire varier la profondeur des canaux	12
4.5	Conclusion partielle	12
<b>5</b>	<b>Expérience des gouttes qui nagent</b>	<b>13</b>
5.1	Mise au point d'un protocole :	13
5.1.1	Conception de l'expérience	13
5.1.2	Choix des méthodes d'analyse des résultats	13
5.1.3	Visite à l'ESCPI	14
5.2	Les résultats	15
5.2.1	"Nage libre"	15
5.2.2	"Nage par catégorie"	16
5.2.3	"Nage en équipe"	17
5.3	Explication théorique	17
5.3.1	"Nageurs" autopropulsés ?	17
5.3.2	La mono-oléine : une molécule aux effets singuliers	17
5.3.3	Un flux inattendu	20
5.4	Quelques imprévus...	21
5.4.1	Des gouttes "doppées" au sel	21
5.4.2	Nageurs augmentés ?	21
5.4.3	Barres cristallisées	21
5.4.4	"Un maillot original"	22
5.5	Nage en altitude	22
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>Remerciements</b>	<b>25</b>



**FIGURE 1** Alexandre BEUNE-PIFFETEAU et Carmen TENAUD

## 1 Présentation de l'équipe

De gauche à droite : Alexandre Beune-Piffeteau, Carmen Tenaud. Nous sommes deux élèves de terminale du lycée Edmond Perrier de Tulle suivant les spécialités physique-chimie et mathématiques.

Lors de la préparation du concours, le travail a été réparti au fur et à mesure, il n'y a pas eu de spécialisation de l'un d'entre nous. Nous avons tous deux été tour à tour expérimentateur, codeur, source d'idée et en proposition d'expériences. Lors de la rédaction de ce compte rendu nous avons utilisé le site Overleaf, un outil de traitement de texte en LaTeX collaboratif qui nous a permis de travailler simultanément. De même, pour la préparation de la vidéo, nous nous sommes réparti le travail équitablement. Cela nous a permis de garder une grande complicité pendant tout notre travail en s'assurant que nul ne soit délaissé sur l'une des parties de nos expérimentations, ce fut donc un échange constant entre nous et une collaboration



enrichissante.

## 2 Introduction

Lors d'échanges avec d'anciens élèves de notre lycée ayant participé aux concours CGénial l'an dernier, et au regard de notre forte appétence pour le sujet de la physique expérimentale, nous avons décidé de nous engager pleinement dans cette belle aventure aux côtés de nos professeurs.

En cette année olympique, après une exploration "sportive" de différents canaux d'informations scientifiques en langues tant française qu'anglaise, le sujet de mécanique des fluides dit des "gouttes nageuses à la piscine" réalisé dans le cadre du projet Lutétium porté par une équipe d'étudiants de différentes écoles et universités de Paris, vient alors tout naturellement sur le devant de la "Seine".

Dans cette expérience, des gouttes d'eau salée introduites dans une solution contenant de l'huile de synthèse et un surfactant se déplacent d'une manière *a priori* spontanée.

Nos travaux ont pour objectif d'explorer l'effet Marangoni, responsable de la "nage" des gouttes, dans différentes situations. Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à nous familiariser avec cet effet, par la recherche bibliographique et la conduite d'expériences, dont une que nous avons au niveau de notre binôme nommée "le fil d'Ariane". Dans cette expérience, de l'encre entre spontanément en mouvement dans un labyrinthe en 3D rempli de lait et le résout. Dans un second temps, nous nous sommes consacrés à l'expérience des "gouttes qui nagent" et avons pu faire une expérience immersive dans une unité de recherche française; le laboratoire Gulliver de l'ESPCI, sis à Paris, travaillant entre autre sur ce mouvement des gouttes. Nos problématiques sont donc : **Comment l'effet Marangoni intervient-il à différentes interfaces? Comment de l'encre et de l'eau salée entrent-elle à l'échelle macroscopique spontanément en mouvement? Comment cette mise en mouvement spontanée pourrait-elle permettre de mieux comprendre l'origine de la vie pluricellulaires? Comment peut-on observer à l'échelle macroscopique un phénomène d'origine microscopique?** C'est avec fierté que nous vous présentons notre sujet, fruit de mois de préparation olympique, qui, nous l'espérons, mettra la physique qui est en vous en mouvement.

FIGURE 2 Effet Marangoni sur eau+cannelle+liquide vaisselle dans une boite Petri vide



### 3 Démarche

Pour la réalisation de ce projet, nous avons utilisé des outils très divers relevant de domaines différents : la physique et la chimie, dans la compréhension des phénomènes (notamment avec le lien entre gradients de concentrations et mouvement) ; l'informatique, pour analyser des vidéos (Tracker, ImageJ, Fidji) réaliser des courbes (Python), des modèles 3D (avec le logiciel Blender), écrire ce compte-rendu (langage LaTeX) ; les mathématiques (pour une approche théorique de l'effet Marangoni) ; la photographie (lorsque nous avons utilisé différents outils : rétro-projecteur, téléphones, différents modèles de caméras fixées sur des loupes binoculaires et enfin appareil photo) ; la communication (nous gérons un compte instagram dédié à l'expérience, nous sommes intervenus après de la radio locale Bram fm pour parler des expériences que nous avons étudiées, nous avons échangé avec des agents extérieures : nos partenaires et avons partagé notre projet lors de présentations réalisées devant nos camarades du lycée et devant le jury des Olympiades nationales de physique).

### 4 Familiarisation avec l'effet Marangoni

L'une des expériences les plus populaires et pratiquée parfois dès l'enfance est la recherche de l'effet d'une goutte de liquide vaisselle sur de l'eau recouverte de matière, tel du poivre. À la grande surprise du chercheur en herbe, le poivre est instantanément repoussé vers les bords du contenant.

Derrière la simplicité apparente de ce phénomène s'exprime **l'effet Marangoni**. Cet effet, découvert en 1865 par Carlo Marangoni, est un principe fascinant qui encore aujourd'hui donne lieu à des travaux de recherche en laboratoire.

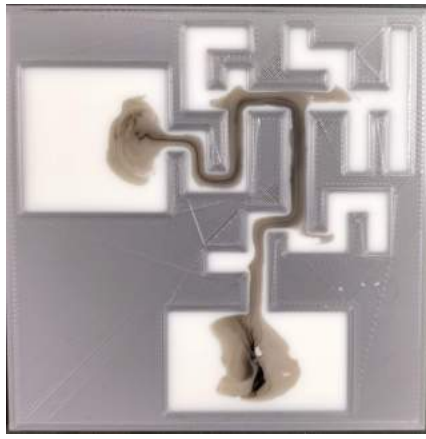
#### 4.1 1 : L'expérience dite du "fil d'Ariane"

Après s'être renseignés sur Internet sur l'effet Marangoni, nous décidons de mettre nous même en oeuvre une expérience qui nous semble nécessaire à notre familiarisation avec le phénomène.

Pour réaliser cette expérience présentée sur Internet par l'American Physical Society, nous nous sommes inspirés du matériel et des fluides utilisés. Dans cette vidéo, un colorant en poudre, après ajout d'une goutte de liquide vaisselle dans le réservoir d'"entrée" de la plaque "labyrinthe", se déplace jusqu'au réservoir "sortie" du labyrinthe.

Pour le matériel, nous concevons un modèle de labyrinthe et l'imprimons ensuite en matériau en plastique au sein de notre lycée à l'aide de notre professeur M. Belin.

Pour les fluides, nous choisissons un fluide coloré, disponible aisément dans la vie quotidienne et au coût accessible. Le lait est retenu comme fluide "support" de cette expérience ; sa couleur blanche permettant une visualisation et une analyse



**FIGURE 3** Expérience du "fil d'Ariane" : Plaque labyrinthe remplie de lait après ajout d'une goutte d'encre : vue de dessus

de mesures par des logiciels informatiques satisfaisantes des éléments colorés ajoutés. Concernant le second fluide ajouté, nous choisissons d'utiliser de l'encre de Chine, dont la couleur contraste avec celle du lait et qui joue le rôle de tensioactif (comme le liquide vaisselle) et de colorant. Nous nous sommes en effet rendu compte que l'encre de Chine contenait un tensioactif. Pour avoir un solide, ici, le pigment (le noir de fumé) en suspension dans le liquide, la présence d'un tensioactif est requise et cela explique pourquoi l'encre en contient.

**Protocole établi :**

- Concevoir et imprimer un modèle 3D de plaque labyrinthe en plastique avec le logiciel de modélisation 3D Blender ;
- Poser la plaque labyrinthe sur une surface plane et stable ;
- Verser du lait à l'aide d'une pipette Pasteur au niveau du réservoir du labyrinthe et remplir l'ensemble du volume des canaux ;
- Introduire une seule goutte d'encre de Chine dans le réservoir "entrée" à l'aide d'une micropipette dédiée.
- Observation immédiate de l'effet produit : en quelques secondes, l'encre de Chine introduite dans le lait progresse dans le réservoir en se déplaçant par le chemin le plus direct conduisant au second réservoir dit "de sortie". Une fois ce second réservoir atteint, l'encre de Chine se déplace très lentement un peu dans les autres chemins disponibles.

Cette expérience a été reproduite au moins 15 fois dans les mêmes conditions et avec des résultats similaires.

Conclusion : nous constatons que l'encre de Chine déposée en surface du lait se déplace prioritairement et systématiquement en direction du réservoir de "sortie", c'est à dire la zone contenant le plus grand volume de lait par rapport aux autres zones situées sur le trajet.

*4.1.1 Explication du phénomène*

*4.1.2 Effet Marangoni*

Afin d'expliquer le mouvement de l'encre, intéressons-nous pour commencer à la notion de **tension de surface**. Les molécules composant un liquide s'attirent entre elles. Une molécule située dans ce liquide est attirée de façon égale dans toutes les directions par ses molécules voisines, mais en surface, la molécule n'est pas attirée de la même façon de chaque côté (puisque elle touche l'air, par exemple, dont la structure n'est pas identique à celle du liquide), la résultante des forces n'est pas nulle et est dirigée vers le liquide. Les molécules situées à la surface de la goutte ont une énergie plus importante que celles situées à l'intérieur du liquide, il s'agit de la tension de surface. Le liquide étant incompressible, sa surface se réduit

de façon systématique sous l'effet de cette différence d'énergie interne. Ainsi, le liquide est courbé : il s'agit de la forme lui conférant la surface la plus faible à l'équilibre. Pour déformer le liquide, il faut fournir une force pour lui procurer l'énergie nécessaire à l'augmentation de sa surface. La tension de surface est la force résistante à l'étirement du liquide et s'exprime en  $N/m$  ou en  $J/m^2$ .

Cette tension de surface peut être modifiée localement par l'action d'un tensioactif (ou surfactant), qui est composé de molécules amphiphiles, c'est-à-dire de molécules présentant un déséquilibre des charges partielles, à la tête polaire hydrophile et à la queue apolaire lipophile. A partir d'une certaine concentration dans un liquide et au-delà d'une certaine température, ces molécules s'organisent en structures appelées "micelles". On peut le modéliser comme ceci dans le cas du savon, molécule tensioactive. Dans de l'eau, solvant polaire, la partie hydrophobe des molécules de savon est spontanément placée à l'intérieur des têtes hydrophiles des molécules de savon. Ainsi, le contact entre la partie hydrophobe et l'eau est réduit.

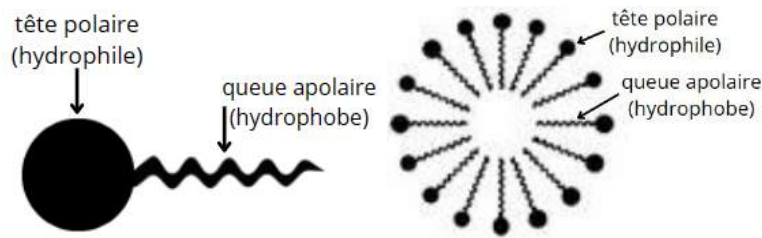


FIGURE 4 Représentation schématique d'une molécule amphiphile et d'une micelle de savon dans de l'eau

Si on dépose un tensioactif à la surface d'un liquide, la tension de surface diminue. Si une zone du liquide est plus concentrée en tensioactif qu'une autre, il y a un gradient de tension superficielle. Cette différence de tension cause un écoulement du tensioactif à la surface : les molécules amphiphiles sont tirées des zones où leur concentration est la plus forte en direction des zones où elle est la plus faible. Lorsque l'on dépose de l'encre tensioactive à la surface du liquide, un écoulement se forme du point de dépôt à la périphérie, ce qui correspond à l'**effet Marangoni**.

#### 4.1.3 Approche via la notion de tension superficielle

Nos recherches nous ont rapidement indiqué que la tension superficielle jouait un rôle prépondérant dans cette expérience, nous avons donc déterminés par la méthode dite de la "goutte pendante" différentes tensions de surface liquide/air. Pour le matériel, nous utilisons une seringue reliée à un cathéter introduit dans un capillaire, en plus d'un dispositif permettant une capture d'images (rétro-éclairage et appareil photo). Nous réalisons une analyse de ces captures avec le logiciel Fidji. Pour le fluide, nous utilisons successivement selon nos mesures du lait, de l'encre et un mélange lait-encre.

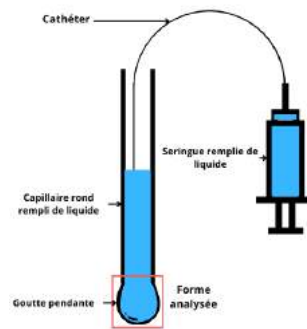
#### Protocole de mesure d'une tension superficielle liquide/air :

- Remplir une seringue du liquide étudié ;
- Relier cette seringue à un cathéter, lui-même inséré à moitié dans un capillaire en verre ;
- Pousser délicatement le piston de la seringue pour transférer le liquide afin de remplir la moitié inférieure du capillaire, jusqu'à former une goutte au bout du capillaire ;
- Procéder à la capture d'images : à l'aide du système de rétro-éclairage, permettant de créer un fort contraste et d'un appareil photo, prendre en photo la goutte dès sa formation à plusieurs reprises, et ne retenir que la photo précédant la chute de la goutte ;

— Procéder à l'analyse de la forme de la goutte l'aide de l'extension Fiji du logiciel ImageJ (avec comme échelle le capillaire) : déterminer une échelle de mesure à partir du capillaire dont le rayon extérieur est connu, indiquer la masse volumique du liquide analysé, la forme de la goutte étant schématiquement plus ou moins circulaire, le logiciel renvoie la tension superficielle liquide/air (si besoin, traiter l'image pour augmenter le contraste et ainsi faciliter la reconnaissance de la forme de la goutte par le logiciel) et donc de son volume.



**FIGURE 5** Mesures de tensions superficielles : photo du montage



**FIGURE 6** Formation de gouttes pendantes



**FIGURE 7** Goutte de lait pendante



**FIGURE 8** Goutte de lait+encre tensioactive pendante

La forme d'une goutte pendante résulte de la tension de surface et des effets de la gravitation : la première donne sa forme plus ou moins sphérique à la goutte, les seconds sont responsables de son allongement puis de sa chute finale.



Liquide	Tension de surface liquide-air ( $mN * m^{-1}$ )
Lait	53
Encre	52
Mélange Lait (90% du volume total)+Encre (10% du volume total)	40

FIGURE 9 Résultats des mesures de tensions de surface pour différents liquides

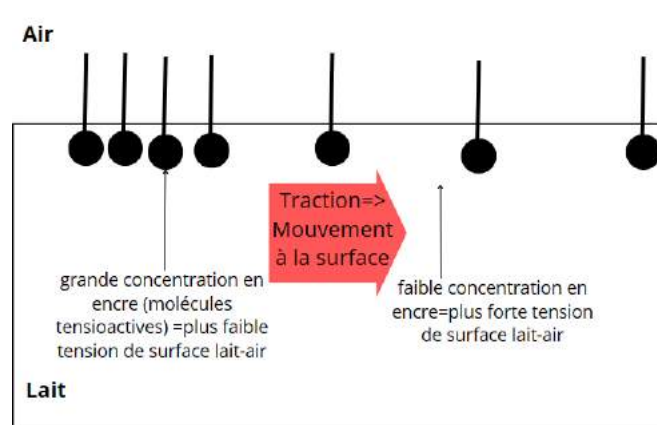


FIGURE 10 Schématisation de l'effet Marangoni dans le cas de l'encre

La tension de surface lait/air est supérieure à la tension de surface lait+encre/air (Figures 6, 7, 8).

Conclusion : L'ajout d'encre fait baisser la tension de surface lait-air.

#### 4.1.4 Mouvement de l'encre

Nous avons vérifié que le mouvement de l'encre dans les canaux avec deux réservoirs (expérience complémentaire détaillée dans la partie 2.2 : *Notre seconde expérience dite des canaux* , dans laquelle de l'encre entre sur une plaque de plastique que nous avons conçue et imprimée par un premier réservoir dans un canal menant à un second réservoir. L'encre se déplace jusqu'au second réservoir. Ce que nous avons suivi avec le logiciel Tracker n'était pas uniquement un phénomène diffusif en mesurant la distance parcourue en fonction du temps. Si le phénomène était uniquement diffusif, la distance parcourue par l'encre en fonction du temps pourrait être modélisée par une fonction "racine carrée". Or, nous avons testé ce modèle avec le logiciel Regressi, ce n'est pas le cas ici. Un phénomène supplémentaire entre donc en jeu.

Le mouvement de l'encre dans le labyrinthe semble se faire en surface.

Nous remarquons un écoulement à la surface du liquide. Par ailleurs, une fois agitée, l'encre forme de la mousse (ce qui n'est pas le cas d'un colorant alimentaire classique). Or, la formation de bulles persistantes dans le temps ne se fait qu'en présence d'un tensioactif.

Nous réalisons un test mettant en évidence la présence ou non d'un tensioactif dans l'encre : nous déposons de la cannelle sur de l'eau, nous ajoutons une goutte d'encre avec une pipette Pasteur. Nous observons que la cannelle est repoussée loin du point de dépôt de l'encre (avec un colorant alimentaire classique, cet effet n'est pas observé). L'encre semble donc contenir un tensioactif.

Enfin, comme nous l'avons mesuré par la méthode de la goutte pendante, la présence d'encre modifie la tension de surface lait/air. Nous concluons que notre encre contient des molécules tensioactives qui forment des bulles et, par effet Marangoni, repoussent la cannelle lors du test effectué. Dans le labyrinthe, les molécules tensioactives contenues de l'encre se

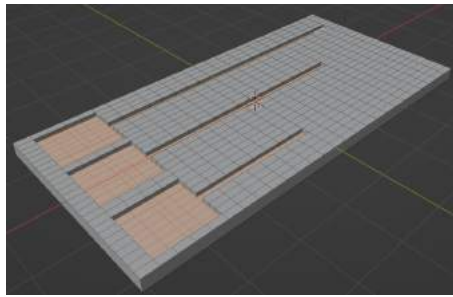


FIGURE 11 Modèle de plaque à 3 canaux de longueurs différentes conçu avec le logiciel de modélisation 3D Blender

concentrent au point où elle est versée, ce qui diminue la tension de surface lait-air à cet endroit, autour de ce point, l'encre n'est pas présente donc la tension lait-air est intacte, et plus élevée qu'au point de présence de l'encre. L'encre se déplace comme "tirée" vers ces zones, toujours à la surface du liquide, de proche en proche.

Dans le labyrinthe, l'encre se déplace donc vers le chemin présentant la plus grande surface disponible, qui est également le chemin le plus direct vers l'issue du labyrinthe, puis se déplace, une fois le bout du chemin le plus long atteint (le labyrinthe "résolu"), vers les issues restantes.

#### 4.2 2 : Notre deuxième expérience dite des "Canaux" : faire varier la surface disponible

Nous réalisons une seconde expérience dans laquelle nous étudions la longueur parcourue par l'encre en fonction de la longueur du canal emprunté, dans le but de vérifier que la distance parcourue par l'encre est d'autant plus grande que la surface disponible est grande. Le mouvement de l'encre dans ces canaux est dû à l'effet Marangoni, comme dans le labyrinthe.

##### 4.2.1 Canaux à un réservoir

Pour le matériel, nous concevons un modèle de plaque différent de l'expérience précédente dite du "Fil d'Ariane". Il comprend 3 circuits en "ligne", composés chacun d'un réservoir dit d'"entrée" et d'un couloir de circulation. La largeur et la disposition par rapport aux réservoirs de ces couloirs sont identiques. La longueur de ces canaux est différente pour chaque canal. Pour les fluides, nous utilisons les mêmes fluides que dans l'expérience précédente dite du "Fil d'Ariane".

#### Protocole établi :

- Concevoir et imprimer un modèle 3D de plaque "à 3 canaux" en plastique avec le logiciel de modélisation 3D Blender ;
- Poser la plaque sur une surface plane et stable ;
- Verser du lait à l'aide d'une pipette Pasteur au niveau de chacun des 3 réservoirs dits d'"entrée" et remplir l'ensemble du volume de chacun des 3 canaux ;
- Introduire une seule goutte d'encre de Chine dans chacun des réservoirs "entrée" à l'aide d'une micropipette dédiée.
- Observation immédiate de l'effet produit : l'encre introduite dans le lait progresse dans chaque canal jusqu'à atteindre son extrémité, sans pour autant toucher la paroi finale du canal. Pour une même goutte d'encre, les longueurs parcourues sont différentes : plus le canal est long, plus l'encre parcourt une distance importante.

Cette expérience a été reproduite au moins 15 fois dans les mêmes conditions et avec des résultats similaires.

Au gré des reconductions de l'expérience, pour dix expériences, nous procédons à des mesures de la longueur  $X$  du chemin parcouru par l'encre pour chaque canal de longueur  $L$ .



FIGURE 12 Expérience des 3 canaux : plaque contenant du lait et de l'encre vue du dessus

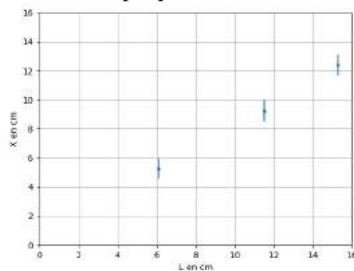


FIGURE 13 Tracé pour chaque longueur  $L$  du canal la moyenne des distances  $X$  parcourues par l'encre

Conclusion : l'encre va bien d'autant plus loin que la longueur accessible  $L$  est grande.

Cependant, la marge d'erreur sur la mesure de  $X$  est assez grande (utilisation du logiciel Tracker, et instant où l'encre s'arrête difficile à déterminer).

Nous avons réalisé une analyse des vitesses au cours du temps avec le logiciel Tracker (Figure 13).

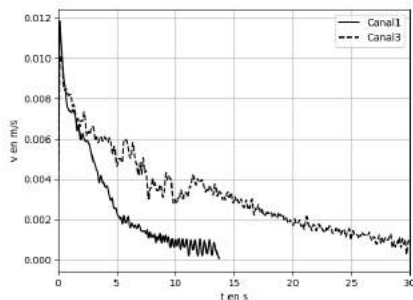


FIGURE 14 Canaux à un réservoir : Vitesses de l'encre en fonction du temps pour les canaux 1 et 3, Regressi

Ce ralentissement de l'encre est aussi observé sur les autres canaux. Cependant, l'encre n'allant pas jusqu'au bout des canaux, déterminer précisément l'instant où son mouvement s'arrête est difficile, l'incertitude sur les mesures des distances parcourues étant grande, il nous a semblé nécessaire de concevoir un autre modèle de canaux afin d'obtenir des résultats plus précis.

#### 4.2.2 Variation : canaux à deux réservoirs

Pour le matériel, nous concevons un dernier modèle de plaque. Il comprend 4 circuits en "ligne", composés chacun d'un réservoir dit d'"entrée", d'un couloir de circulation et d'un réservoir dit de "sortie". Les réservoirs d'"entrée" et les canaux

sont de mesure et disposition identiques. La taille du réservoir de "sortie" est différente pour chaque canal. Pour les fluides, nous utilisons les mêmes fluides que dans les expériences précédentes.

Nous utilisons le même protocole que pour l'expérience des canaux à un seul réservoir et analysons nos résultats avec le logiciel Tracker. Cette expérience a été reproduite au moins 5 fois dans les mêmes conditions et avec des résultats similaires. Voici les courbes d'analyse des vitesses de l'encre obtenues en fonction du temps entre l'entrée et la sortie des canaux (Figure 15). Nous comparons les vitesses en fonction du temps : la vitesse maximale atteinte par l'encre est d'autant plus

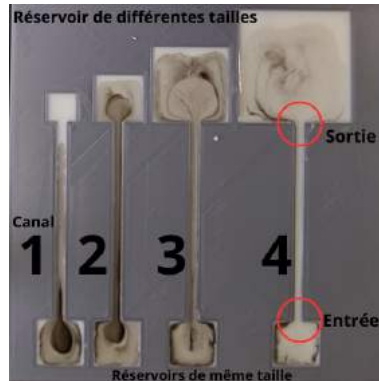


FIGURE 15 Expérience des canaux à deux réservoirs : plaque remplie de lait et d'encre-vue de dessus

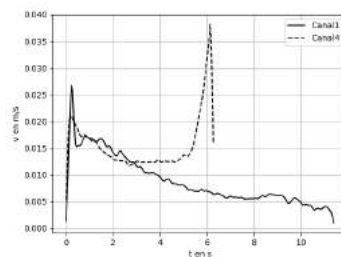


FIGURE 16 Tracé des vitesses de l'encre en fonction du temps pour les différents canaux

grande que le réservoir final est grand. Le profil type de ces courbes comporte un pic de vitesse à l'approche du réservoir de "sortie", ce qui traduit l'influence de la proximité du réservoir. Nous constatons en effet que dans le canal menant sur le plus grand réservoir ( le canal 4 ), l'encre subit une forte accélération à l'approche de ce réservoir de "sortie". Au contraire, dans le plus petit canal (le canal 1), l'encre accélère à son entrée dans le canal puis décélère, notre hypothèse est que le réservoir de sortie n'étant pas beaucoup plus grand que le canal (largeur du réservoir seulement deux fois plus grande que celle du chemin), son influence est très petite.

4.3 3 : Notre troisième expérience dite des "Canaux" : faire varier la largeur des canaux

4.4 4 : Notre quatrième expérience dite des "Canaux" : faire varier la profondeur des canaux

4.5 Conclusion partielle

Pour conclure, dans le labyrinthe, comme nous l'avions d'abord observé, puis confirmé avec les expériences des canaux, l'encre se déplace par effet Marangoni vers les zones présentant la plus grande surface de liquide (lait) disponible.

## 5 Expérience des gouttes qui nagent

A présent, intéressons-nous à l'effet Marangoni non plus à l'interface (lait+encre)/air, mais à l'interface goutte d'eau salée/squalane+mono-oléine, dans l'expérience des "gouttes à la piscine". Cette expérience a été réalisée par le laboratoire Gulliver de l'ESPCI, puis par un groupe d'étudiants de différentes écoles de Paris et mise en accès libre sur Internet ([sur YouTube](#)).

Notre but est de réaliser, à notre tour, comme elle l'a déjà été en laboratoire, l'expérience, puis de nous pencher sur certaines situations, comme la nage de gouttes en contact avec d'autres gouttes, ou la nage de gouttes selon une pente.

Pour ce faire, nous contactons le laboratoire Gulliver de l'ESPCI, qui nous a gracieusement fait parvenir la solution dans laquelle nagent les gouttes d'eau salée, composée de squalane et de mono-oléine.

### 5.1 Mise au point d'un protocole :

#### 5.1.1 Conception de l'expérience

Pour le matériel, nous utilisons des lames de verre sur lesquelles ont été déposés des réservoirs cylindriques faits en PDMS (Polydiméthylsiloxane, matériau de prédilection de la microfluidique), d'un rayon de 0.7 à 1cm et d'une profondeur d'environ 1mm. Pour former des gouttes d'eau de petite taille, nous utilisons une petite seringue munie d'un tube flexible, ce qui est plus adapté que la micro-pipette initialement prévue. Ce matériel nous a également été fourni gracieusement par l'ESPCI. Pour enregistrer nos manipulations, nous utilisons un appareil photo fixé au niveau du foyer image de l'objectif d'une loupe binoculaire (dont nous avons enlevé l'oculaire). Les piscines sont posées sur le plateau de la loupe binoculaire. Pour les fluides, nous utilisons de l'eau avec un pourcentage massique de sel de 15% pour former les gouttes. Pour le solvant, nous utilisons le mélange squalane+mono-oléine. La squalane est un hydrocarbure ramifié de formule  $C_{30}H_{62}$  et la mono-oléine est une molécule de formule  $C_{21}H_{40}O_4$ , d'une concentration de 25 mmol/L.

Protocole :

- A l'aide d'une pipette, remplir une piscine avec la solution (S) (Squalane + Mono-oléine);
- Prélever avec la seringue de l'eau distillée (ou de l'eau salée à 15% en masse environ);
- Insérer dans la piscine quelques gouttes d'eau (les plus petites possible);
- Pour nettoyer la piscine, éponger le liquide restant avec du papier absorbant, puis rincer avec de l'isopropanol (Propan-2-ol, de formule  $C_3H_8O$ );
- Nb : 1) Si la mono-oléine de la solution (S) a cristallisé (présence de filaments blancs dans la solution), réchauffer la solution (environ à 60°C) avant l'expérience (celle-ci redevient alors transparente).
- 2 : Pour éviter sa cristallisation, il est conseillé de faire l'expérience à une température ambiante de plus de 25 °C.

#### 5.1.2 Choix des méthodes d'analyse des résultats

Afin d'analyser quantitativement nos manipulations, nous les filmons toutes et exploitons ultérieurement ces films à l'aide de trois logiciels.

- Logiciel de mesure, ici de la taille des gouttes : ImageJ;

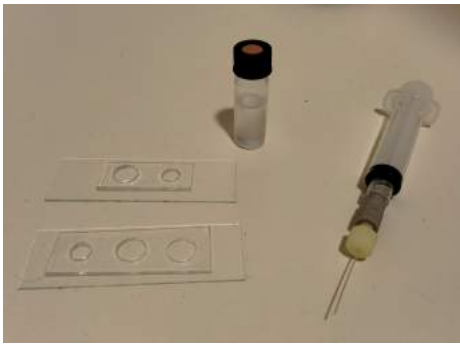


FIGURE 17 Matériel

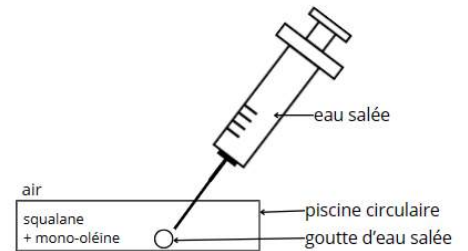


FIGURE 18 Introduction d'une goutte dans une piscine

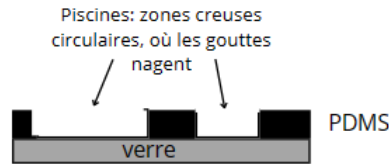


FIGURE 19 Gouttes nageuses : deux piscines sur une même lame de verre (coupe transversale)

- Logiciel de suivi, ici de la la position des gouttes au cours du temps : Tracker (ce suivi a été laborieux et chronophage, nos ordinateurs étant prévus à un usage domestique !);
- Logiciel nous permettant d'analyser ces positions (obtention de courbes de vitesse en fonction du temps) : Regressi;
- Langage informatique nous permettant de réaliser des courbes au profil adapté : Python.

Au sein du binôme, afin de coordonner la réalisation du mémoire et du diaporama, en plus des heures passées ensemble et de nos fréquents appels et visios (avec nos professeurs), nous utilisons des outils partagés permettant de modifier à plusieurs, à distance, les documents en tant réel :

- Ecriture du mémoire : utilisation du site web Overleaf (écriture en langage LaTeX);
- Conception du diaporama pour le possible futur passage devant un jury et les différentes présentations déjà réalisées : utilisation de l'application Google Slides.

### 5.1.3 Visite à l'ESPCI

Nous avons contacté l'équipe du laboratoire Gulliver de l'ESPCI par mail à partir des informations écrites dans la description de la vidéo du projet Lutétium (nous avons d'abord essayé de contacter le projet Lutétium puis sommes remontés à Olivier Dochaut, coordinateur), puis au téléphone courant septembre puis avons eu la chance de venir leur rendre visite à Paris durant deux jours en octobre. A cette occasion, nous avons discuté de l'expérience avec différents chercheurs (Olivier Dauchot, Mathilde Reyssat, Léo-Paul Barbier) de l'expérience des gouttes "nageuses", de la réaliser avec eux (après l'avoir déjà fait dans notre lycée). Nous avons taillé des capillaires avec une micro-forge dans une salle blanche et avec un FemtoJet, nous avons pu produire de très petites gouttes d'eau salée. Nous avons alors observé leurs mouvements dans le mélange squalane-mono-oléine avec un microscope performant. Nous avons également réalisé avec les chercheurs une solution de squalane-mono-oléine qu'ils nous ont offerte. Nous avons aussi pu discuter avec les autres chercheurs de l'équipe de leurs sujets d'expérimentations, ce qui nous a montré l'étendue du champ des possibles dans la recherche : certains nous les ont aussi montrés (biologie, mécanique, etc). Cette visite dans une école d'ingénieur a été, avec pour certains aspects une

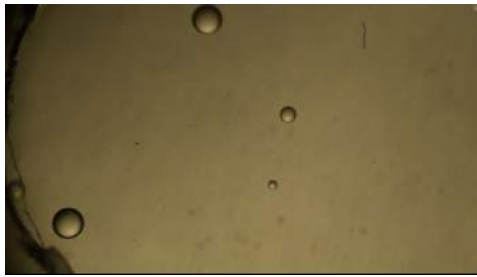


FIGURE 20 Exemple de gouttes

dimension industrielle, une immersion dans le monde de la recherche très enrichissante. Nous entretenons toujours des contacts avec les chercheurs et les avons plusieurs fois sollicité pour avancer dans nos manipulations. **Photos à rajouter**

## 5.2 Les résultats

### 5.2.1 "Nage libre"

En utilisant la seringue, nous avons réalisé des gouttes mesurant entre 120  $\mu\text{m}$  et 1 000  $\mu\text{m}$  (Figure 19), valeurs déterminées avec le logiciel ImageJ. Nous avons fait une analyse du mouvement des gouttes. Voici des exemples de trajectoire de gouttes (Figures 20 et 21).

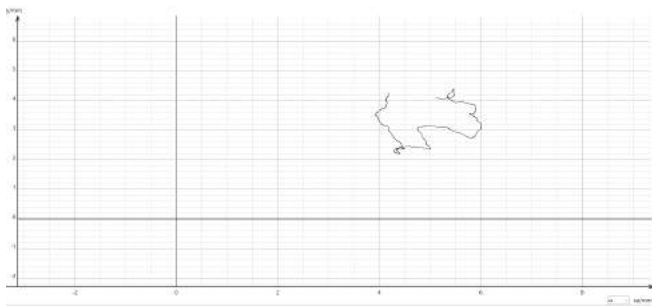


FIGURE 21 Gouttes "nageuses" : Trajectoire 1, Regressi

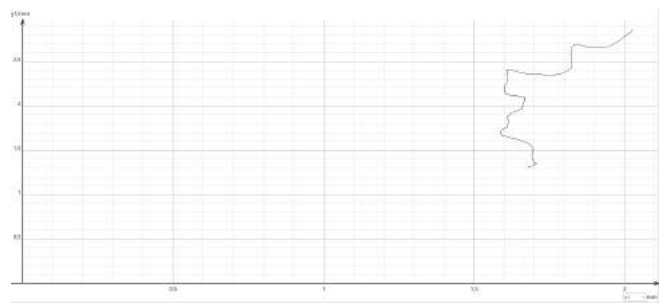


FIGURE 22 Gouttes "nageuses" : Trajectoire 2, Regressi

Nous remarquons tout d'abord que la goutte ne repasse pas ou très peu sur ses traces ; cela est très différent d'une trajectoire due, par exemple, à un mouvement Brownien (générée par un programme Python s'appuyant sur la librairie Turtle), où la particule change très souvent de direction aléatoirement, phénomène découvert par l'observation du mouvement de particules dans le fluide contenu dans des grains de pollen par Robert Brown au XIXème siècle. En dérivant les valeurs de x et y par rapport au temps, nous avons obtenu une courbe représentative de la vitesse de la goutte en fonction du temps (Figure 22).

Comme nous pouvons le voir, la vitesse de la goutte de la trajectoire 2 est ici en moyenne de 50  $\mu\text{m/s}$ , soit 1mm toute les 20 secondes. En ayant les données vitesse et rayon, nous sommes donc maintenant en mesure de calculer l'énergie cinétique de la goutte.

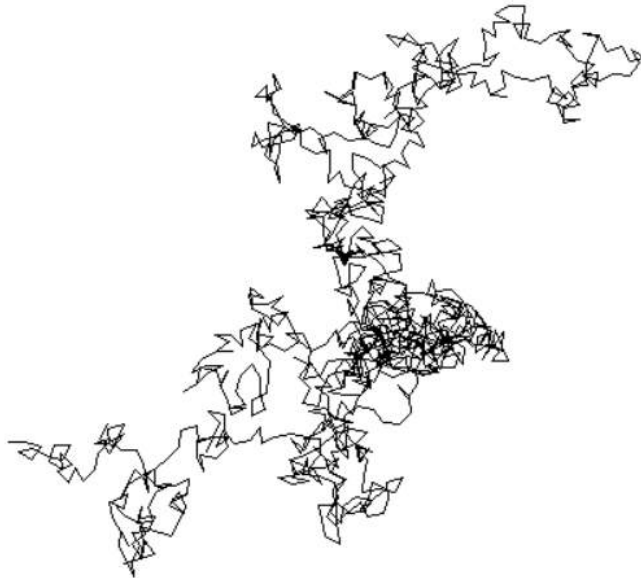
La goutte de la trajectoire 2 ayant un diamètre de 500 microns, nous calculons un volume de :

$$V_g = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{500}{2} \cdot 10^{-6}\right)^3 \approx 6.5 \cdot 10^{-11} m^3$$

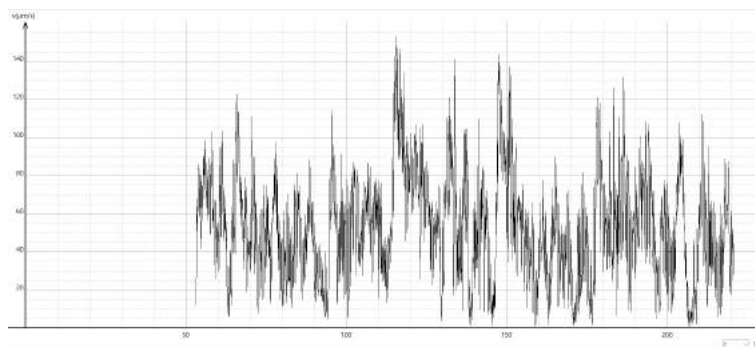
Nous calculons la masse volumique de l'eau salée composant les gouttes en supposant le volume final égal au volume du solvant lors de la dilution du sel (15% en masse) dans l'eau :

$$\rho = \frac{1000+150}{1} = 1.15 * 10^3 kg \cdot m^{-3}$$

Soit une masse de :



**FIGURE 23** Modélisation du mouvement Brownien avec Turtle



**FIGURE 24** Gouttes "nageuses" : Vitesse en fonction du temps de la goutte de la trajectoire 2, Regressi

$$m = \rho \cdot V_g = 1.15 \cdot 10^3 \times 6.5 \cdot 10^{-11} = 75 \mu g$$

En sachant que la vitesse mesurée est de  $50 \mu m/s$ , l'énergie cinétique est de :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 7.5 \times 10^{-8} \times (5.0 \times 10^{-5})^2 \approx 1 \cdot 10^{-16} J$$

Ainsi, pour une goutte supposée parfaitement sphérique de 500 microns de diamètre, 75  $\mu g$  sont transportés avec une énergie de  $10^{-16} J$ . Formulé de façon imagée : avec 100 millions de milliards de gouttes, nous aurions l'énergie nécessaire pour soulever d'un mètre une petite pomme.

### 5.2.2 "Nage par catégorie"

Nous observons une légère tendance à avoir des vitesses moyennes des gouttes plus importantes pour des rayons plus importants (Figure 24). Notre hypothèse est que la masse de la goutte n'augmente pas beaucoup par rapport à la surface, il y aurait ainsi plus de contact avec des micelles, qui pousseraient davantage la goutte. La goutte n'aurait alors pas une masse suffisante pour équilibrer cette plus grande propulsion et la vitesse de la goutte augmenterait. Testons notre hypothèse :

$$\frac{M}{m} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{10^{-9}} = 600$$

$$\frac{V}{v} = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-8}} = 60$$



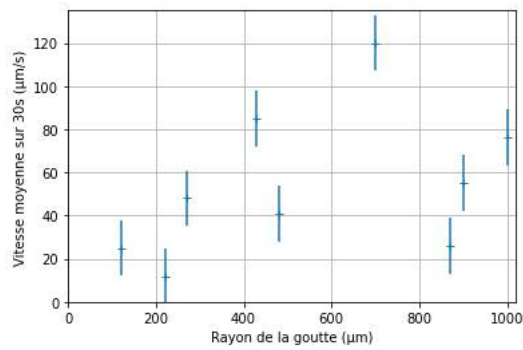


FIGURE 25 Gouttes nageuses : vitesses moyennes des gouttes d'eau sur 30s en fonction de leur rayon, Spyder

Rayon (µm)	Surface en $m^2$	Masse en kg	Vitesse moyenne sur 30s (µm/s)
60	$5 * 10^{-8}$	$10^{-9}$	25
500	$3 * 10^{-6}$	$6 * 10^{-7}$	76

FIGURE 26 Caractéristiques de gouttes "nageuses" de différents rayons

La goutte de 500 µm de rayon est 600 fois plus lourde que la goutte de 60 µm de rayon, tandis que sa surface est 60 fois plus grande que celle de la goutte de 60 µm de rayon, et sa vitesse est environ 3 fois supérieure à celle de la goutte de 60 µm de rayon. La précédente hypothèse n'est pas vérifiée, elle n'est donc pas retenue.

### 5.2.3 "Nage en équipe"

Il arrive que deux gouttes "nageuses" d'eau se rencontrent. 3 principaux phénomènes sont alors observés : les gouttes se repoussent, se tournent autour ou restent en contact puis se déplacent ensemble. Intéressons-nous à ce troisième phénomène pour deux gouttes de 700 et 1 000 µm. Nous avons suivi leurs trajectoire avec le logiciel Tracker pendant environ 4 minutes.

Nous ne remarquons pas d'évolution type de la vitesse des gouttes lorsqu'elles se déplacent ensemble (Figure 26).

## 5.3 Explication théorique

### 5.3.1 "Nageurs" autopropulsés ?

Observons deux images d'une même goutte :

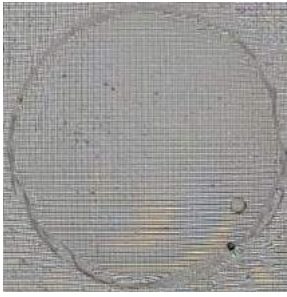
Nous constatons que la taille de la goutte diminue au cours du temps (Figures 26 et 27). De plus, nous déposons les gouttes au fond des piscines, et  $d(\text{eau}) > d(\text{squalane})$  ( $1 > 0.815$ ), celles-ci ne remontent donc pas à la surface ; la possibilité d'une évaporation de l'eau est donc à exclure. De l'eau se retrouve donc dans la squalane, puisque la goutte diminue de taille.

### 5.3.2 La mono-oléine : une molécule aux effets singuliers

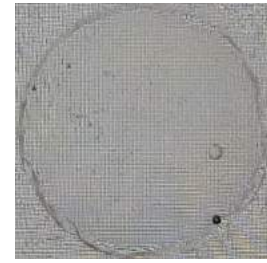
Voici à la figure 28 une représentation de la molécule de mono-oléine.

Rayon (µm)	Vitesse avant le contact (µm/s)	Vitesse après le contact (µm/s)
350	120	160
500	33	28

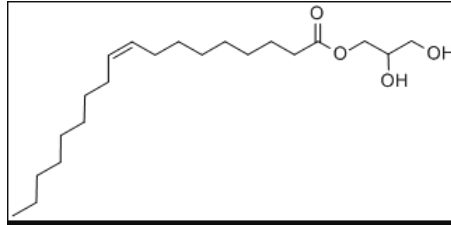
FIGURE 27 Gouttes nageuses : vitesses de gouttes avant et après contact



**FIGURE 28** t=10 minutes, diamètre de la goutte : 600 microns



**FIGURE 29** t=50 minutes, diamètre de la goutte : 500 microns



**FIGURE 30** Structure de la molécule amphiphile de mono-oléine

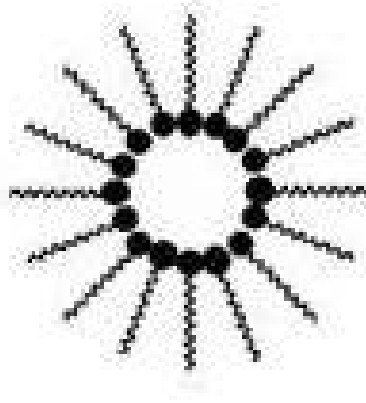
La molécule présente un léger déséquilibre des charges sur sa « tête ». Nous savons que la queue de la molécule est apolaire tandis que la tête est polaire. Cela lui confère un côté hydrophile et un côté hydrophobe. Il s'agit donc d'un tensioactif. Des micelles peuvent donc être formées par la mono-oléine. Il y a deux conditions à respecter afin de parvenir à la formation de ces micelles. La première est l'assurance que la concentration en mono-oléine dans la squalane soit suffisante. Il s'agit de la Concentration Micellaire Critique (CMC). Au vu de nos stocks de mono-oléine très limités, nous utiliserons la valeur obtenue par les chercheurs de l'ESPCI de 3 mmol/L. Dans la solution utilisée, nous travaillons avec une concentration de 25 mmol/L afin de pouvoir disposer de nombreuses micelles. Nous pouvons toutefois noter que les quantités à manipuler étant très faibles (0,267g à verser dans un petit flacon), la marge d'erreur est de +-1 mmol/L.

La deuxième condition à respecter est la température de Krafft, qui correspond à la température minimale pour la formation de micelles. Dans notre cas, l'expérience des "gouttes à la piscine" est réalisée à environ 25°C et est reproductible. Il serait très intéressant de déterminer cette valeur mais la mono-oléine cristallise à 25°C, il nous est donc impossible de tester des températures inférieures.

Dans notre cas, les têtes hydrophiles des molécules de mono-oléine sont spontanément orientées vers le centre, ce qui diminue leur surface de contact avec l'huile. Des micelles inverses par rapport à celles de savon dans de l'eau sont ainsi formées (Figure 30). Pour résumer, nous avons des gouttes d'eau dans une huile saturée en micelles. La mono-oléine diminue ainsi la tension superficielle squalane-eau localement.

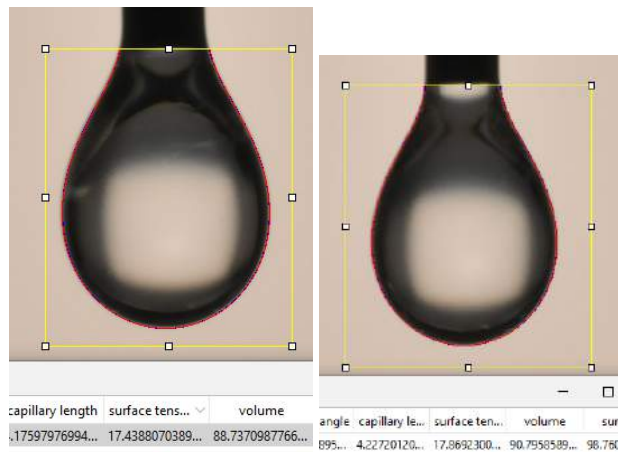


**FIGURE 31** Flacon de solution squalane+mono-oléine contenant de la mono-oléine cristallisée



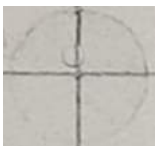
**FIGURE 32** Micelle de mono-oléine dans la squalane

Afin de justifier cette différence de tension, nous cherchons à déterminer par la méthode de la goutte pendante la tension superficielle squalane/air et la tension superficielle squalane+mono-oléine/air, en attendant une différence importante des coefficients de tension superficielle. Mais les valeurs trouvées par analyse avec le logiciel Fiji sont extrêmement proches. L'hypothèse avancée est que la mono-oléine n'est pas présente à la surface en raison de sa partie hydrophile. Nous supposons donc que la présence de la mono-oléine joue uniquement dans la valeur de la tension superficielle squalane+mono-oléine/eau par rapport à la valeur de la tension superficielle squalane/eau (Figure 31).

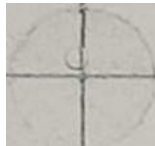


**FIGURE 33** Logiciel ImageJ : Mesure de tensions superficielles avec l'air : mono-oléine + squalane et Squalane pur

Afin d'isoler les variables, nous réalisons une manipulation suivant le protocole habituel en remplaçant le mélange squalane mono-oléine par du squalane pur, nous attendant à voir les gouttes rester immobiles, ce que nous observons effectivement (Figures 32, 33, 34). La présence de mono-oléine est donc essentielle au mouvement des gouttes. La mono-oléine est donc



**FIGURE 34** Goutte d'eau dans du squalane pur : t=0 s



**FIGURE 35** Goutte d'eau dans du squalane pur : t=180s



**FIGURE 36** Goutte d'eau dans du squalane pur : t=360s

essentielle.

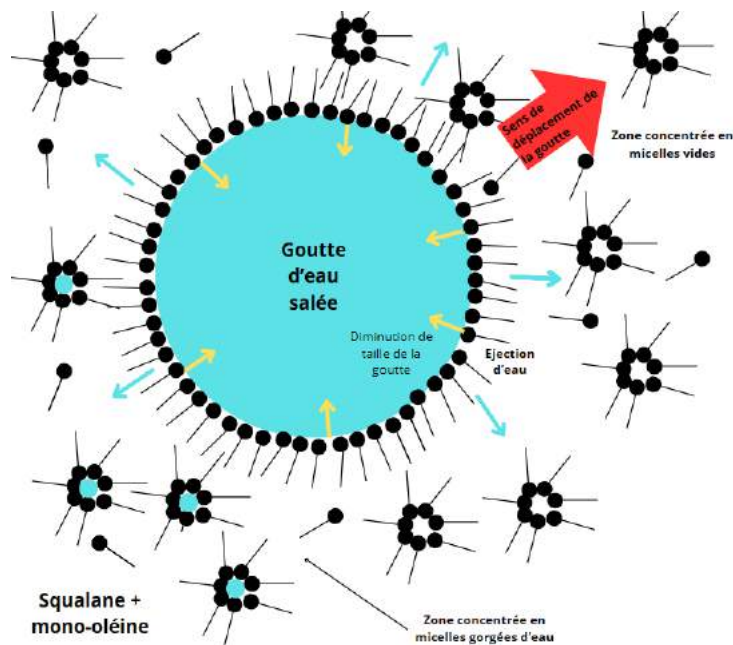


FIGURE 37 Schéma : mouvement des gouttes

### 5.3.3 Un flux inattendu

Les micelles de mono-oléine ne sont pas réparties équitablement dans la solution de squalane, et donc autour de la goutte. Nous pourrions penser que des gradients de concentration en micelles inverses de mono-oléine autour de la goutte induisent l'effet Marangoni. Cependant, ces gradients sont, d'après les recherches des chercheurs de l'ESPCI, beaucoup trop faibles pour cela. Repensons alors à l'observation inattendue de la solubilisation d'eau dans le mélange squalane-mono-oléine. Comme vu plus tôt, les micelles ont un centre hydrophile. L'idée, découverte par l'équipe d'Olivier Dauchot de l'ESPCI il y a dix ans, est que les micelles présentes aux frontières de l'interface se remplissent d'eau. Or, la concentration en micelles et particulièrement en micelles remplies n'est pas homogène autour de la goutte. Un flux de squalane des zones à la moindre concentration en micelles gonflée aux zones à la plus forte concentration en micelles gonflées s'organise alors autour de la goutte, pour équilibrer cette différence. La contrainte exercée par l'huile sur la goutte ainsi que la nécessité de remplir la place de l'huile déplacée causent le mouvement de la goutte. Le choix de la mono-oléine par rapport à d'autres tensioactifs s'explique ici.

En effet, deux phénomènes majeurs interviennent en mécanique des fluides :

- La diffusion : il s'agit de la tendance d'un fluide à se répandre dans toutes les directions en même temps.
- L'advection : il s'agit de la tendance d'un fluide à suivre le mouvement inertiel. Dans notre cas, c'est la tendance à rester groupé autour de la goutte et à l'accompagner dans son mouvement qui se produit. Afin de quantifier le rapport de ces deux valeurs, nous utilisons entre autres le coefficient de diffusion. Dans notre cas, la mono-oléine a un coefficient de diffusion de valeur suffisamment faible pour lui permettre de conserver des gradients de concentration en micelles remplies autour de la goutte. Si le coefficient de diffusion avait été trop élevé, les micelles ne resteraient pas autour de la goutte et il n'y aurait apparemment pas de mouvement. Les micelles se remplissent spontanément, l'huile se déplace alors pour homogénéiser la concentration en micelles remplies autour de la goutte et celle-ci est déplacée vers des zones à moindre concentration en micelles gonflées. Les micelles alors rencontrées sont remplies elles aussi, un flux d'huile est engendré et pousse la goutte plus loin. Comme la mise en mouvement repose sur une différence de concentration en micelles gonflées, et que la goutte

continue en se déplaçant de remplir des micelles, le gradient de concentration est permanent. De plus, nous observons que dans les zones où des gouttes d'eau sont déjà passées, d'autres gouttes ne passent généralement pas : la goutte a cédé de l'eau sur son chemin, remplissant des micelles, l'huile va donc vers ces endroits et la goutte se déplace dans la direction opposée à celle de l'huile. Les gouttes ne reviennent donc que très rarement sur leurs traces.

#### 5.4 Quelques imprévus...

Dans le cadre de nos expériences il nous est arrivé plusieurs fois d'observer des résultats assez inattendus, nous allons ici en détailler trois par soucis d'exhaustivité.

##### 5.4.1 Des gouttes "doppées" au sel

Comme expliqué dans le mémoire, nous avons été contraints d'utiliser de l'eau salée à 15 % en masse car la vitesse observée était bien supérieure et donc plus adaptée à nos analyses. Cependant, cela va à l'encontre d'une observation de Mme De Blois de la Calande. En effet, il a été observé que les gouttes salées se déplaçaient plus lentement en milieu tridimensionnel. La théorie alors avancée est que la pression osmotique ait augmenté suite à l'augmentation de la concentration en sel de la goutte. Il s'agit d'une force déterminée par une différence de concentration en un soluté entre deux solutions situées de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Afin d'arriver à une situation d'équilibre, le solvant passe du milieu le moins concentré au plus concentré. Ici, le soluté est le sel. L'eau de la goutte (contenant du sel) est transférée vers l'extérieur, vers les micelles, pour diminuer la concentration de la goutte en sel. Cependant, un autre résultat est à prendre en compte. Il a été montré que l'influence du fond et des frottements qui en découlent ne sont pas négligeables et ralentissent la goutte. L'hypothèse proposée alors par Olivier Dauchot est que de petites charges électriques sont présentes dans le verre et que ces dernières repoussent les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  présents dans l'eau salée. Cela engendrerait une zone d'huile entre le fond et la goutte, réduirait donc les frottements avec le fond et enlèverait une enclave à son mouvement.

##### 5.4.2 Nageurs augmentés ?

Une petite goutte nage à vitesse habituelle puis un solide touche l'interface et se colle à celle-ci, possiblement un cristal de sel présent suite à la solubilisation totale de l'eau d'une minuscule goutte salée dans le solvant, suite à quoi sa vitesse augmente fortement. L'hypothèse est alors que la présence de ce cristal détruit la symétrie de la goutte et crée une instabilité qui facilite son mouvement.

##### 5.4.3 Barres cristallisées

Une dernière observation est celle de gouttes salées se collant à un filament de monooléine cristallisée (apparemment à cause d'une température ambiante inférieure à 25 ° C, trop faible). Le cristal de mono-oléine hydrophobe semble alors se plier, puis il entre de la goutte d'eau salée, ce après quoi il n'est plus visible. Malgré cela, la goutte continue sa nage. Nous n'avons pas eu l'occasion d'étudier cette nage dans le temps.

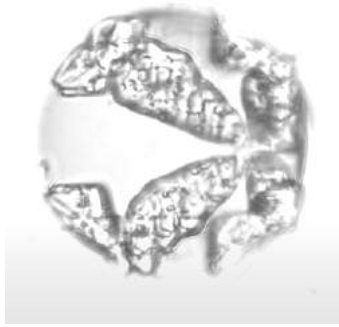


FIGURE 38 Cristal de sel dans une goutte

#### 5.4.4 "Un maillot original"

L'eau étant salée, la solubilisation d'eau dans la squalane peut entraîner la formation de cristaux dans la goutte puisque la concentration en sel augmente dans la goutte. Voici un très bel exemple de cristal de sel s'étant formé dans une goutte nageuse.

Cette goutte nage même après avoir partiellement cristallisé, ceci fonctionne avec d'autres petites particules comme nous avons pu le constater avec le transport d'une impureté lors d'une autre tentative.

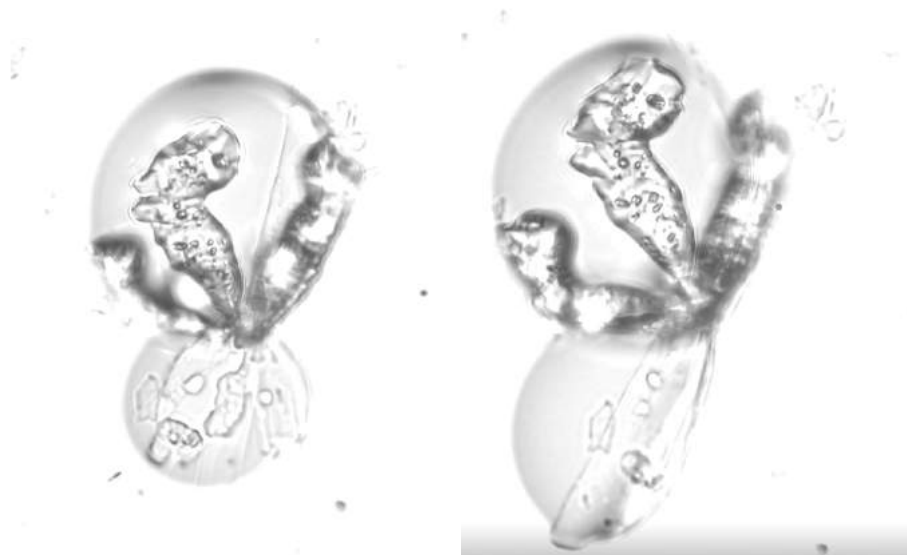


FIGURE 39 Deux gouttes collées partiellement cristallisées assimilant un filament de mono-oléine cristallisée

### 5.5 Nage en altitude

Après avoir observé les gouttes nager dans des piscines planes, nous avons voulu observer leur nage selon une pente, et déterminer l'inclinaison à laquelle elles arrêtent de nager, c'est à dire de jusqu'à quel angle leur auto-propulsion peut surpasser la gravité. Lors de nos 2 journées passées avec les chercheurs de l'ESPCI, nous avons réalisé une première manipulation.

#### Protocole 8

- Injecter une goutte d'eau salée dans un capillaire penché, du côté bas du capillaire ;
- Reboucher ce côté avec de la pâte à fixe ;
- Augmenter progressivement l'angle capillaire/support en tournant l'écrou sur lequel reposent les piscines ;

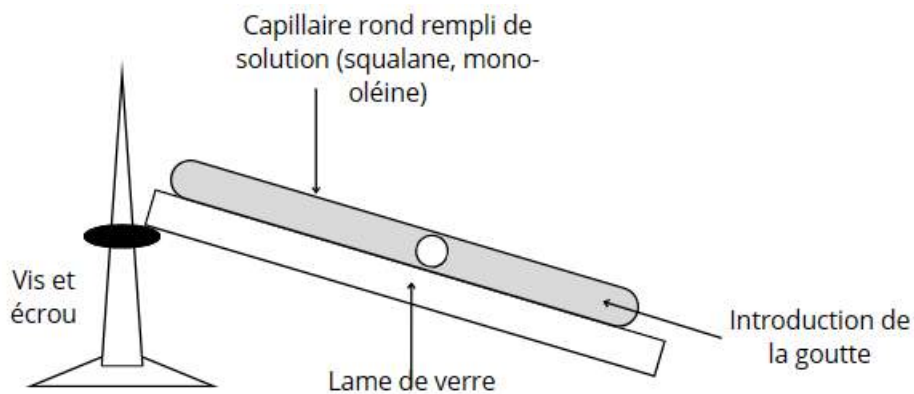


FIGURE 40 Croquis du montage initial(mouvement de la goutte selon une pente)

— Analyser les vidéos obtenues pour déterminer l'angle à partir duquel la vitesse de la goutte diminue, puis quand elle change de direction pour nager vers le bas du capillaire.

Sachant qu'une goutte introduite dans un capillaire n'inverse pas le sens de sa nage sans influence extérieure, l'angle maximal pour lequel la goutte continue de nager dans sa direction initiale correspond à l'angle jusqu'auquel la nage des gouttes surpasse la gravité.

De retour au lycée Edmond Perrier, nous avons voulu réitérer cette manipulation afin de déterminer cet angle. Pour cela, nous avons choisi de fixer le capillaire contenant les gouttes et la solution squalane-mono-oléine sur le plateau d'une loupe binoculaire, que nous inclinons. Ce montage nous permet de toujours pouvoir suivre la goutte (la focale de la loupe binoculaire étant fixée).

Nous introduisons les gouttes dans le capillaire à l'aide de notre seringue habituelle pour la formation de gouttes. Cependant, nous n'arrivons pas à former des gouttes ne se collant pas à la paroi du capillaire. Nous envisageons alors de réitérer l'expérience en augmentant la concentration massique en sel, auparavant de 15% des gouttes, à 30% et en frottant les capillaires avec de la laine pour essayer de les charger, afin que l'interaction entre les gouttes salées et cette charge décolle les gouttes du verre et qu'elles puissent entamer leur déplacement.

## 6 Conclusion

Ce travail nous a permis d'appréhender, par une approche bibliographique et surtout expérimentale, l'effet Marangoni. Nous avons notamment vu comment une goutte d'eau salée s'auto-propulsait par un jeu de gradients de tensions superficielles, lui-même dû à la présence de micelles dans l'huile formées par la mono-oléine, sans lesquelles il n'y a pas de mouvement. Ces mêmes gouttes sont également capables de transporter des colloïdes (particules de taille de l'ordre du micromètre), des cristaux, ou de surpasser la gravité en remontant des pentes jusqu'à un certain angle. Nous aimerions approfondir l'étude de la nage des gouttes selon une pente, selon leur taille et concernant l'expérience du fil d'Ariane, de l'avancée de l'encre en fonction de la largeur des canaux ou de leur profondeur. Dans cette expérience, la question du porteur d'information de la présence d'une plus grande surface persiste.

Une application de l'effet Marangoni existe déjà dans le domaine des arts : le suminagashi est un art traditionnel japonais consistant à verser de l'encre puis du savon (l'encre utilisée n'étant généralement pas tensioactive, le savon joue le rôle de tensioactif) à la surface d'un réservoir d'eau, afin de former des cercles d'encre, formés par un écoulement dû à l'effet Marangoni. Ils sont ensuite reportés sur un papier en plaquant celui-ci sur la surface de l'eau.

L'étude approfondie du phénomène des "gouttes à la piscine", et de l'effet Marangoni, pourrait permettre d'autres applications dans de nombreux domaines, comme dans le domaine de la santé : nous pouvons par exemple imaginer des gouttes distribuant des antibiotiques ou des minéraux dans le corps. Cependant, ce n'est pas tant par son utilité que cette expérience se démarque mais bien par sa capacité à exposer à l'échelle macroscopique un phénomène microscopique. Voir ces gouttes "danser" revient à observer les molécules de mono-oléine s'agencer à leur échelle autour de celles-ci. Enfin, la force d'une expérience est décuplée lorsque celle-ci est d'apparence simple et comment ne pas être émerveillé par le monde quand de l'eau et de l'huile arrivent encore à nous surprendre?! Cette expérience des "gouttes à la piscine", en effet, pourrait aussi participer à aggrandir notre connaissance du passé, dans la compréhension de mécanismes élémentaires de l'apparition de la vie uni puis pluricellulaire en milieu aqueux : de quoi attiser la "flamme" du chercheur!



**FIGURE 41** Suminagashi, exemple de l'utilisation de l'effet Marangoni



## 7 Bibliographie

Expérience des "gouttes à la piscine" :

- Vidéo du Projet Lutétium (élèves de l'ESPCI Paris, PSL Research University, l'ESPGG, l'EnsAD et du Conservatoire de Paris) présentant les "gouttes nageuses" ;
- Thèse de Charlotte De Blois de La Calande, " Goutte d'eau nageuse en environnement complexe, confinement, gravité et effets collectifs" ;
- Article sur l'histoire de l'expérience des gouttes nageuses ;
- [Self-Propulsion of Pure Water Droplets by Spontaneous Marangoni-Stress-Driven Motion](#) (Auto-propulsion de gouttelettes d'eau pure par Marangoni-Stress motion spontanée, publié sur Physical review letters par Ziane Izri, Marjolein N. van der Linden, Sébastien Michelin, et Olivier Dauchot ;
- [Conférence](#) d'Olivier Dauchot sur l'expérience des "gouttes nageuses" ;
- Des [animations](#) hébergées par le site de l'université Paris-Saclay à propos de l'effet Marangoni.

Expérience du labyrinthe :

- [Soap opera in the maze: Geometry matters in Marangoni flows](#) (Opération savon dans le labyrinthe : La géométrie compte dans les flux Marangoni), une vidéo présentant l'expérience de l'American Physical Society.

## 8 Remerciements

Nos plus sincères remerciements

- Aux équipes et la à Fondation CGénial,
- Concernant le lycée Edmond Perrier :
  - A nos professeurs référents Céline Pouquet et particulièrement Stéphane Belin, pour leurs idées, conseils, leur aide dans l'avancée du projet, dans sa compréhension comme dans les manipulations, pour leurs relectures, et pour tous les bons moments passés ensemble,
  - Au personnel des laboratoires de physique-chimie et de biologie du lycée Edmond Perrier,
  - A Mme Dubois, professeure d'arts plastiques au lycée Edmond Perrier de Tulle, pour sa recherche d'une encre tensioactive,
  - A monsieur Pinteau, proviseur, pour sa relecture du mémoire,
- A l'équipe du laboratoire Gulliver de L'ESPCI (L'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris), pour son accueil, ses explications, conseils, relectures, sa mise à disposition à titre gracieux de mono-oléine et de matériel et sa bonne humeur, spécialement Olivier Dauchot, Mathilde Reyssat et Léo-Paul Barbier,
- Aux Olympiades de physique, pour leur soutien financier et scientifique,
- A nos proches, pour leur accompagnement dans cette belle aventure !