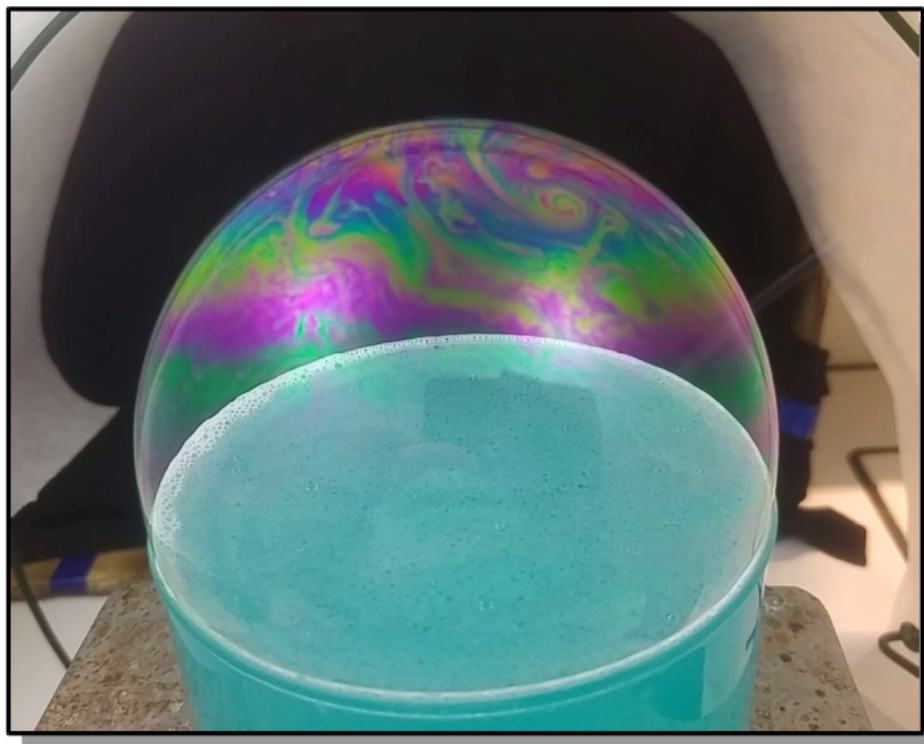


Cyclones à la surface d'une bulle de savon



Etudiants :

Audrey CEZERA
Camille LORMIER
Edouard GOUTEUX
Simon VALENTIN
Théo COUPPEY
Thibaud CLAVEL

Enseignant-responsable du projet :

Yann DUFRESNE

Remerciements :

Pour la réalisation de ce projet, nous remercions tout d'abord chaleureusement M. Dufresne. Il nous a largement guidé pendant tout ce semestre dans l'avancement du projet. Grâce à sa connaissance du sujet de notre projet, cela nous a permis de ne pas nous égarer dans ce sujet vaste.

Ensuite, nous remercions l'équipe du bâtiment Darwin qui nous a reçus et généreusement prêté le matériel nécessaire pour installer les expériences que nous voulions mettre en place. Enfin, nous remercions M. Williams qui nous a permis d'accéder aux locaux, nous travaillions donc en toute tranquillité.

Date de remise du rapport : 18/06/2017

Référence du projet : STPI/P6/2017 – 53

Intitulé du projet : Cyclone dans une bulle de savon

Type de projet : expérimental

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

- Observer la trajectoire d'un cyclone sur une bulle
- Réaliser les expériences nécessaires pour observer ces cyclones
- Comprendre les forces mises en jeu dans l'apparition et la rotation des cyclones sur Terre et sur la bulle
- Comparer la trajectoire des cyclones sur une bulle à ceux terrestres et conclure quant à la pertinence du modèle de la bulle

Mots-clefs du projet (4 maxi) : Cyclone, Bulle, Modélisation, Fluide

Table des matières

1	La théorie	8
1.1	Etude des bulles	8
1.1.1	Structure de la bulle	8
1.1.2	Force de tension superficielle	8
1.1.3	Equations de Navier-Stokes	9
1.1.4	Notre bulle de savon	10
1.2	Etude des cyclones	16
1.2.1	Formation des cyclones	16
1.2.2	Caractéristiques	16
1.2.3	Trajectoire d'un cyclone	17
1.3	Lien entre ces modèles : en quoi est-ce pertinent ?	17
1.3.1	Pertinence	17
1.3.2	Non pertinent	18
2	Expériences	19
2.1	Expérience principale	19
2.1.1	Fabrication de bulles stables	19
2.1.2	Prise de vue	20
2.2	Expériences parallèles	21
2.2.1	Détermination de la force superficielle	21
2.2.2	Détermination de l'épaisseur	22
2.3	Comparer nos résultats à ceux de obtenus par Meuel, étudiant de l'université de Bordeaux	23

Introduction

[1] Modéliser les cyclones terrestres à la surface d'une bulle de savon. . . L'idée peut sembler saugrenue, mais des chercheurs de l'université de Bordeaux en ont fait leur sujet d'étude. L'objectif est de simuler des écoulements de fluide pour s'approcher au plus près d'un modèle de tourbillons comparable aux phénomènes naturels atmosphériques.

Turbulence

[2] L'étude des cyclones dans les bulles de savon nous pousse à l'étude des écoulements turbulents. En effet, les mouvements de l'eau à l'intérieur de la bulle de savon sont qualifiés de turbulents à cause de leurs mouvements imprévisibles et des particules d'eau qui s'éloignent rapidement de manière "aléatoire" les unes des autres. L'imprévisibilité de ces mouvements est due à de petites incertitudes sur la connaissance initiale de l'écoulement qui s'amplifient, ce qui fait que nous observons des tourbillons dans des bulles de savon. Le modèle de l'écoulement turbulents tridimensionnel a fait l'objet de nombreuses études. Néanmoins, les lois du modèle tridimensionnel ne sont pas toutes applicables à l'étude bidimensionnelle. Pour une bulle de savon, il convient d'utiliser le modèle de l'écoulement bidimensionnel.

Utilisation de films de savon : un peu d'histoire

Depuis trente ans, des écoulements quasi bidimensionnels sont réalisés en laboratoire par des scientifiques dans le but d'étudier la turbulence.

Par exemple, Couder a étudié la turbulence dans un film de savon horizontal au repos et dans lequel les vitesses d'écoulement sont de l'ordre de la dizaine de centimètres par seconde. Par la suite, Gharib et Derango ont réalisé un écoulement stationnaire (vitesse constante) dans un film de savon horizontal. Les vitesses maximales de l'écoulement du film de savon y sont de l'ordre de 30 centimètres par seconde. [3]

D'autres chercheurs, Gharib et Derango, ont étudié pour la première fois l'écoulement stationnaire d'un film de savon horizontal et utilisé un anémomètre Doppler Laser pour caractériser le champ de vitesse. Leur dispositif utilise un jet d'eau plan pour tracter le film de savon horizontal. Les vitesses maximales obtenues sont de l'ordre de 30cm.s^{-1} . [4]

Afin de générer des nombres de Reynolds plus élevés, Kellay et son équipe ont, quant à eux, réalisé des films de savon verticaux entre deux fils de 180 centimètres de long, séparés de 5 centimètres et régulièrement alimentés par le haut en solution savonneuse par une pompe qui permettait d'ajuster le débit dans le film de savon. Les vitesses générées variaient de 40cm.s^{-1} à 4m.s^{-1} . [5, 6]

Le rôle de la friction de l'air (déjà évoqué par Couder) sur les écoulements dans le film de savon est plus tard étudié par Martin dont l'expérience se composait d'un film de savon vertical placé sous une cloche en verre dans laquelle on pouvait ajuster la pression de l'air entre 45 torr et 760 torr¹. Les résultats indiquent une hausse de l'intensité de la turbulence lorsqu'on diminue la pression de l'air. [8]

Zhender, Greffier et son équipe ont aussi mesuré les fluctuations d'épaisseurs du film de savon à l'aide d'un interféromètre. [9]

Toutes ces études ont été réalisées pour des films de savon plans. Mais qu'en est-il de la turbulence 2D en géométrie sphérique ?

Il a été montré que les bulles de savon pouvaient constituer un modèle acceptable pour étudier les cyclones dans l'atmosphère terrestre car elles sont géométriquement proche de celle-ci. En effet, comme l'atmosphère, la bulle se compose d'une couche très fine par rapport à son diamètre.

C'est l'idée suivie par Seychelles en 2008 et reprise par Meuel au cours de sa thèse (publiée en 2014) à l'université de Bordeaux qui consiste alors à utiliser la convection thermique comme moteur de la turbulence dans une demi-bulle chauffée à sa base.

La convection est un phénomène présent dans de multiples systèmes naturels comme les océans et l'atmosphère de la Terre, l'atmosphère des étoiles ou encore le cœur des planètes mais aussi dans des systèmes industriels. [10, 11]

Le phénomène de convection peut être mis en évidence plus facilement avec le problème de Rayleigh-Bénard. Il consiste à étudier un fluide dans un récipient chauffé par le bas et refroidi par le haut. On a alors deux cas : le cas où la température du fluide est plus élevée en haut qu'en bas, le fluide est alors stable, et d'autre part le cas où la température du fluide est plus élevée en bas qu'en haut, le fluide est alors instable. C'est le cas instable qui va entraîner les mouvements de convection. Le fluide ne se met en mouvement que lorsque la différence de température δ entre le haut et le bas dépasse une température critique δ_c . Dans ce cas, la masse volumique est plus faible aux endroits où la température est plus élevée. Ce sont alors les différences de poussée d'Archimède qui mettent le fluide en mouvement. [12]

Au cours de notre projet, nous nous sommes beaucoup intéressés au travail réalisé par les chercheurs de Bordeaux en 2014 et nous avons réalisé nous-mêmes quelques unes de leur expériences en espérant obtenir les mêmes conclusions qu'eux sur la pertinence de ce modèle. Enfin, nous avons comparé nos résultats et nos conditions d'expérimentation pour expliquer la différence des mesures observées.

1. Le torr (symbole Torr) ou millimètre de mercure (symbole mmHg) est une unité de mesure de la pression, initialement définie comme la pression exercée à 0 °C par une colonne de 1 millimètre (mm) de mercure (Hg). [7]

Chapitre 1

La théorie

1.1 Etude des bulles

1.1.1 Structure de la bulle

De nombreuses bulles peuvent être observées dans la nature comme à la surface d'un lac. Mais ces bulles éclatent très rapidement et ne durent que quelques instants avant de disparaître. Pour les faire tenir, des tensioactifs sont nécessaires comme par exemple le liquide vaisselle : on parle alors de "bulle de savon". Cf *image 2.1 page 27*

Les tensioactifs sont aussi appelés "molécules amphiphiles" car ils possèdent à la fois un groupe hydrophile et un groupe hydrophobe. Comme on peut le voir sur le schéma, ce sont ces molécules qui donnent sa structure à la bulle. [13]

Le groupe hydrophile, comme son nom l'indique, est soluble dans l'eau. Le groupe hydrophobe, quant à lui, est repoussé par l'eau.

Il existe quatre types de tensioactifs :

- les amphotères dont la partie hydrophile possède une charge nulle
- les cationiques dont la partie hydrophile est chargée positivement
- les non-ioniques qui ne possèdent "aucune charge nette" qui est donc considérée comme une charge nulle
- les anioniques dont la partie hydrophile est chargée négativement

Dans le cas du savon, la tête est chargée négativement donc la partie chargée positivement des molécules d'eau est attirée par cette tête. De même, la queue est repoussée.

L'eau se trouve alors bloquée entre deux couches de tensioactifs qui forment la paroi (les parois) de la bulle. [14]

Les tensioactifs modifient la tension superficielle entre deux surfaces.

1.1.2 Force de tension superficielle

Une bulle est formée d'une membrane comportant deux surfaces, une interne et l'autre externe, supposées de même rayon R . On considère donc que chaque surface est le siège d'une tension superficielle. Cette tension caractérise une interface. En effet, les deux fluides en contact ont des interactions différentes et donc des énergies également différentes. Il apparaît alors une tension correspondant à une force d'interaction au niveau des molécules présentes entre les deux

fluides. Les forces de pression qui ont globalement tendance à faire dilater la bulle compensent, quant à elles, les forces de tension superficielle sur les deux interfaces.

On peut visualiser cette force en essayant de créer une ouverture en forme de fente de longueur L . A la surface de l'eau, on constate qu'une force du liquide s'oppose à cette ouverture avec $F = L\gamma$; γ étant le coefficient de tension superficielle en $N.m^{-1}$ et dépend du liquide, de la température et du milieu extérieur. [15]

La loi de Laplace permet également de modéliser cette tension superficielle et s'écrit

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

avec Δp la surpression intérieure. On remarque, au passage, que la pression diminue bien lorsqu'on augmente le volume à considérer.

Dans le cas de la bulle de savon, il faut prendre en compte les deux interfaces : une interface air/liquide puis une interface liquide/air. On obtient donc

$$\Delta p = \frac{4\gamma}{R}$$

Si l'on tient compte de la légère différences entre les rayons des deux interfaces la loi de Laplace peut alors s'écrire

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

avec Δp la variation de pression en pascal dans les deux milieux au niveau de l'interface.

1.1.3 Equations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes, qu'est-ce que c'est ?

Les équations de Navier-Stokes ont été établies au XIXe siècle par le Français Navier et le Britannique Stokes. Il s'agit d'équations permettant de décrire le champ de vitesse d'un fluide. Si nous voulons approfondir, ce sont des équations qui relient ρ , v et P dans un fluide newtonien dont le champ de vitesse est inconnue. Les équations avec dérivées partielles ne sont pas linéaires.

Pour résoudre ces équations, la tâche est impossible aujourd'hui : la résolution mathématiquement rigoureuse des équations de Navier-Stokes constitue l'un des sept problèmes du prix du millénaire, du fait du nombre de variables à prendre en compte. Mais à quoi servent donc ces équations ?

Les équations de Navier-Stokes servent à décrire les déplacements des fluides dit "newtoniens"¹ avec l'approximation des milieux continus². En langage commun, nous pouvons dire qu'elles permettent de modéliser les mouvements turbulents tel que les tourbillons et les vortex. Il est admis que les équations de Navier-Stokes décrivent l'écoulement d'un fluide newtonien bidimensionnel ou tridimensionnel.

Ces équations permettent de nous proposer des modélisations pour certains phénomènes complexes comme les courants océaniques ou les mouvements des masses d'air dans l'atmosphère. Elles sont utilisées par les météorologues, astrophysiciens, ingénieurs et océanographes.

1. Fluide qui continue de s'écouler indépendamment des forces extérieures qui agissent sur lui. Par exemple, l'eau est un fluide newtonien parce qu'elle continue d'exhiber les propriétés d'un fluide quelle que soit la vitesse à laquelle elle est agitée. Les solutions aqueuses et les huiles de faibles viscosités, la plupart des solvants, l'air, de nombreux gaz, sont des exemples de fluides newtoniens.

2. L'hypothèse des milieux continus consiste à considérer des milieux dont les propriétés caractéristiques qui nous intéressent — densité, élasticité, etc. — sont continues. Une telle hypothèse permet d'avoir recours aux outils mathématiques reposant sur les fonctions continues et/ou dérivables, c'est-à-dire aux outils de la théorie des champs." [16]

Nous pouvons utiliser les équations de Navier-Stokes comme modèle mathématique pour les mouvements des masses d'eau à l'intérieur d'une bulle de savon car l'eau, à une certaine échelle, est un milieu continu et newtonien, comme le gaz de l'atmosphère terrestre dans lequel se déplacent les cyclones.

Paramètres de ces équations :

- un vecteur vitesse en M
- la pression p
- la densité du fluide
- la viscosité dynamique du fluide.
- la densité volumique f des forces extérieures.

Notations :

- L'opérateur nabla noté ∇

Prenons la formulation la plus utilisée des équations de Navier-Stokes : la formulation eulérienne. On suppose ici la masse volumique, la quantité de mouvement et l'énergie totale constante.

Nous obtenons l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0$$

Cette équation traduit la conservation de la masse. Elle découle de la dérivée particulaire ou dérivée hydrodynamique du champ de vitesse U. Cette équation est issue d'une description eulérienne. Elle repose sur la connaissance de l'évolution au cours du temps de grandeurs macroscopiques locales telles que la masse volumique, la température, la vitesse et la pression en chaque point fixe de l'espace. Celle-ci se différencie de la description lagrangienne, qui décrit la position, la vitesse et l'accélération d'une particule que l'on suit dans l'espace.

Équation de bilan de la quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) &= \nabla \cdot P + \rho g \\ &= -\nabla p + \nabla \cdot \Sigma + \rho g \end{aligned}$$

Nous avons dans ces équations :

- t le temps (en s)
- ρ la masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$)
- U la vitesse eulérienne d'une particule du fluide ($m.s^{-1}$)
- Σ le tenseur des contraintes visqueuses (Pa)
- p la pression thermodynamique (Pa)
- g la gravité ou toute autre force massique extérieure ($m.s^{-2}$)

Prenons maintenant le cas de notre bulle de savon, quelles sont alors les forces et les paramètres à prendre en compte ?

1.1.4 Notre bulle de savon

1.1.4.1 Le modèle

Nous opterons pour un modèle le plus simple possible. Tout d'abord, nous pouvons faire l'approximation d'un fluide incompressible. En réalité, l'eau a juste une compressibilité très faible

par rapport à l'air. En revanche, nous ne pouvons pas effectuer l'approximation d'une viscosité constante puisque celle-ci baisse lorsque la température augmente. La masse volumique ρ ne peut pas non plus être considérée comme constante car elle varie avec la température.

Équation d'incompressibilité :

$$\nabla \cdot U = 0$$

Équation de bilan de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (UU) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 U + g$$

avec :

- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ désignant la viscosité cinématique du fluide
- $\frac{\partial V}{\partial t}$ la dérivée particulaire ou convective du champs de vitesse v
- ρ la masse volumique du fluide
- p la pression
- g la gravité

Dans quelques cas, cette équation simplifiée permet d'obtenir des solutions approchées. Cette équation est valable pour les tourbillons, notamment le tourbillon de Taylor-Green qui décrit un ensemble de tourbillons qui s'amortissent avec le temps, le tout modélisé en 2D. Il est possible d'obtenir une solution analytique périodique utilisée pour les benchmarks, c'est-à-dire les points de références servant à effectuer une série de mesures. Cette méthode est également valable pour le tourbillon de Lamb-Oseen, écoulement tourbillonnaire de géométrie cylindrique et d'extension infinie.

De plus, si le fluide est incompressible on aura $\nabla \cdot U = 0$.
[17]

1.1.4.2 Les nombres adimensionnels

Du fait de l'irrésolubilité des équations de Navier-Stokes et de l'absence de conditions aux limites, nous devons utiliser les nombres adimensionnels. Dans son sens le plus général, un nombre adimensionnel est le rapport entre deux termes de même unité. Ces nombres permettent donc d'évaluer qualitativement quels termes sont prépondérants et quels termes sont négligeables. Deux effets peuvent être responsables de l'apparition des plumes de convection sous l'effet du gradient thermique :

- la poussée d'Archimède (dûe aux différences de densité de l'eau influencée par la température),
- l'effet Marangoni (différence de tension superficielle due à l'écart de température). Cet effet seul est responsable du phénomène des larmes de vin (lors d'une dégustation, après avoir fait tourner le verre pour y faire remonter le vin, une certaine partie du liquide adhère à ses parois, ce qui provoque la formation de gouttelettes redescendant lentement le long des parois. [41])

Nous avons voulu savoir laquelle des deux est prépondérante par un calcul de nombres adimensionnels.

Nombre de Reynolds :

Osborne Reynolds est parvenu en 1883 à caractériser la nature de l'écoulement d'un fluide grâce à un nombre adimensionnel : le nombre de Reynolds. Ce nombre permet de comparer les forces d'inertie aux forces visqueuses.

D'après la théorie des similitudes, deux fluides qui ont le même nombre de Reynolds ont un écoulement semblable. De plus, le nombre de Reynolds permet d'indiquer la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

Quand le nombre de Reynolds est petit, les forces d'inertie sont faibles par rapport aux forces de viscosité. Si le nombre de Reynolds est inférieur à 2000, alors l'écoulement est qualifié de "laminaire" tandis qu'entre 2000 et 3000, l'écoulement n'est plus réversible. Si le sens du courant est inversé, les particules de fluide ne retrouvent pas leur position initiale. Seuls les fluides très visqueux et à vitesse plutôt faible présentent un écoulement "laminaire". Les valeurs supérieures à 3000 caractérisent les écoulements turbulents.

Un écoulement turbulent est caractérisé par des forces d'inertie plus importantes que les forces de viscosités. Formule du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{U.D}{\nu} = \frac{\rho.U.D}{\mu}$$

avec :

- Re le nombre de Reynolds ($s.u$)
- U la vitesse débitante moyenne en ($m.s^{-1}$)
- D la longueur caractéristique (m)
- ν la viscosité cinématique ($m^2.s$)
- μ la viscosité dynamique ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
- ρ la masse volumique ($kg.m^{-3}$)

Notre nombre de reynolds : L'écoulement de l'eau à l'intérieur de notre bulle de savon peut être théoriquement qualifié de turbulent. Notre nombre de Reynolds doit donc théoriquement se trouver au dessus de 3000. La vitesse débitante de l'eau qui se trouve entre la couche hydrophile et hydrophobe pour notre bulle de savon se trouve entre $3 cm.s^{-1}$ et $7 cm.s^{-1}$, nous prendrons donc $5.10^{-2} m.s^{-1}$ pour notre vitesse. Pour ce calcul, nous prendrons une valeur de la longueur caractéristique de $4.5cm$, ce qui correspond au rayon de notre bulle de savon.

De plus, nous avons trouvé les valeurs suivantes sur un site qui a fait les calculs de la masse volumique et de la viscosité dynamique pour un mélange similaire.

- eau : 55.5%
- liquide vaisselle : 29.5%
- glycérine : 15%

D'où les valeurs suivantes :

Vitesse : $5 \times 10^{-2} m.s^{-1}$

Rayon : $4,5 \times 10^{-2} m$

La masse volumique : $1,04 \times 10^3 kg.m^{-3}$

Viscosité dynamique : $1,47 \times 10^{-3} Pa.s$

Calcul : $Re = \frac{(5 \times 10^{-2} \times 4,5 \times 10^{-2})}{\left(\frac{1,47 \times 10^{-3}}{1,04 \times 10^3}\right)} \approx 1655$ Nous pouvons dire que ce résultat est plutôt typique

d'un écoulement transitoire où localement de la turbulence se crée. [18]

D'autres nombres adimensionnels : Marangoni, Grashof Le nombre de Grashof correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses, et permet de caractériser le transfert thermique dû au déplacement naturel d'un fluide. Son expression est :

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_c^3 \cdot \rho^2}{\mu^2}$$

Avec

- g : accélération de la pesanteur
- β : coefficient de dilatation
- ΔT : différence de température
- L_c : longueur caractéristique
- ρ : Masse volumique du fluide
- μ : viscosité dynamique

Notre nombre de Grashof Nous prenons $\beta = 3,01 \times 10^{-4}$ pour valeur du coefficient de dilatation car les chercheurs de Bordeaux [2] ont assimilé cette valeur (le "coefficient de dilatation thermique de l'eau") avec celui de leur solution savonneuse. Nous gardons les mêmes valeurs pour la viscosité dynamique μ et la masse volumique ρ que pour le nombre de Reynolds.

De plus on a :

- $g = 9,81 \text{ m.s}^{-1}$
- $\Delta T \approx 30$ (différence entre la température ambiante au sommet de la bulle et celle à la base, à la surface de la solution, peu importe qu'elle soit en K ou en °C)
- $L_c = \text{diamètre de notre bulle} = 0,09$

Ainsi, on trouve :

$$G_r = \frac{9,81 \times 0,0000301 \times 30 \times (0,09^3) \times (1040^2)}{(0,00147^2)} = 32323345$$

Les nombres de Reynolds et de Grashof étant $\gg 1$, l'écoulement peut être qualifié de rapide. Une augmentation du nombre de Grashof traduit une augmentation de l'intensité de la convection naturelle. [19]

Le nombre de marangoni : Le nombre de marangoni représente le rapport des forces de surfaces sur les forces visqueuses.

$$M_g = -\frac{d\sigma}{dT} \frac{1}{\mu\alpha} L_c \cdot \Delta T$$

- L_c : longueur caractéristique du système = 0.09
- σ : tension superficielle
- α : diffusivité thermique
- μ : viscosité dynamique
- ΔT : différence de température

La diffusivité thermique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique).

Notre nombre de Marangoni Pour la diffusivité thermique α , nous prenons la valeur $0,143 \times 10^{-7}$ qui correspond à celle de l'eau à 25°C, à défaut de connaître celle de notre mélange.

Pour la différence de tension superficielle, nous considérons la dérivée $\frac{d\sigma}{dT}$ constante car notre plage de variations de température est relativement petite. Nous avons donc $d\sigma = \Delta\sigma$ et $dT = \Delta T$. Les termes ΔT se simplifient dans la formule ci-dessus.

Pour $\Delta\sigma$, nous prenons la différence entre les valeurs pour l'eau à 20 et 50°C, soit 73,03 et 68,307 [20] car nous ne trouvons pas de tables de variations de la tension superficielle en fonction de la température pour de l'eau savonneuse.

La longueur caractéristique à prendre en compte ici est l'épaisseur du film, soit environ $1,5\mu\text{m}$. Finalement, on trouve $M_a = \Delta\sigma \times \frac{L_c}{\alpha\mu} = 356786$.

Rapport des tensions de surface sur la poussée d'Archimède Lorsqu'on fait le rapport du nombre de Grashof sur celui de Marangoni, on obtient :

$$\frac{G_r}{M_a} = \frac{32323345}{356786} \approx 90$$

Ceci laisse entendre que l'effet des variations de poussée d'Archimède dûes au gradient de température serait prépondérant à l'effet des variations de tension superficielle dans la mise en mouvement du fluide. Nous gardons quelque réserves sur ce calcul puisque nous avons fait beaucoup d'approximation, surtout dans le calcul du nombre de Marangoni.

1.1.4.3 Les paramètres

Dans le cas de notre expérience, la bulle de savon qui se trouve au dessus de la casserole est soumise à plusieurs forces, dont certaines sont évidentes :

- le poids
- la poussée d'Archimède

Le poids tend à faire descendre l'eau vers la base de la bulle et à la faire éclater, tandis que le gradient thermique tend à faire remonter l'eau dans la bulle vers le haut.

Sans gradient thermique, nous n'observons aucun cyclone à la surface de la bulle.

Nous en déduisons que le gradient thermique est en grande partie responsable de la formation des cyclones dans la bulle de savon. [21]

Forme de la bulle :

[13]Les molécules s'attirent entre elles à l'intérieur du liquide, l'état le plus stable en absence de perturbation correspond à celui où la surface de contact entre le liquide et l'air est la plus petite. En effet la formation d'une bulle consomme de l'énergie. On souhaite alors limiter cette énergie : il faut donc minimiser la surface également. Mais il faut aussi que le volume ne soit pas trop petit ; on veut donc obtenir le meilleur rapport surface/volume, ce qui fait de la sphère la forme la plus adaptée.

Pour illustrer ce fait, nous pouvons comparer le rapport surface/aire d'une sphère avec le rapport surface/air de n'importe quelle autre forme. Prenons par exemple un tétraèdre de 16 cm^3 , nous obtenons une surface 46 cm^2 , alors que pour une sphère de 16 cm^3 , nous obtenons une surface de 31 cm^2 . Pour le cas de la bulle de savon, la bulle présente 2 surfaces de contact avec l'air, et le volume d'air est constant à l'intérieur de celle-ci. [22, 24, 25]

Couleur de la bulle :

Tout d'abord, rappelons ce qu'est une bulle de savon : il s'agit d'une fine couche d'eau emprisonnée à travers deux couches de molécules de savon, ici une couche hydrophile et une couche hydrophobe.

Les variations de couleurs observables sur la bulle viennent des différentes interférences optiques qui se produisent à la surface de la bulle. Cela est en lien avec le caractère ondulatoire

de la lumière. En effet, une bulle de savon se comporte comme un interféromètre : si deux ondes lumineuses de même fréquence se superposent, cela fera une couleur plus vive. Sinon, si les deux ondes sont en opposition de phase, on aura une absence de couleur. *Cf image 2.2 page 27*

De fait, certaines couleurs s'annuleront mutuellement tandis que d'autres seront amplifiées. Les couleurs observables sont toutes celles appartenant au spectre de la lumière blanche c'est-à-dire toutes les fréquences entre le rouge et le violet. *Cf image 2.3 page 28*

Mais la couleur de la bulle de savon ne dépend pas que de l'interférence de ces ondes. En effet, la couleur qui est amplifiée dépend de l'épaisseur de la pellicule d'eau. Ainsi, selon l'épaisseur, certaines couleurs seront favorisées par rapport à d'autres.

L'épaisseur de la bulle de savon n'est pas uniforme, et varie selon les conditions atmosphériques et certains phénomènes comme par exemple la fluctuation de la tension de surface qui peut créer des petites vagues. Cela explique les changements de couleurs rapides au cours du temps.

Stabilité de la bulle :

Aujourd'hui encore, la stabilité des bulles de savon reste un mystère. Par exemple on ignore toujours la taille maximale qu'une bulle de savon peut atteindre. De plus, les recherches effectuées sur des films de savon plans ont montré que leur éclatement était totalement aléatoire. En revanche, des physiciens du laboratoire de physique des solides LPS ont montré que le temps de vie des films verticaux tirés vers le bas par leur propre poids dépendait de "la vitesse de formation, de la nature et de la concentration en molécules de savon utilisées ainsi que de la viscosité de la solution." Aussi surprenant que cela puisse paraître, ils ont réalisé que les films avec la plus petite épaisseur étaient les plus stables en durée de vie. Mais le gradient de concentration des molécules de savon entre le haut et le bas du film a également un effet stabilisateur. [26]

Dans le cadre de notre projet, nous pouvons également nous poser la question de l'influence du gradient de température sur la stabilité de la bulle qui est chauffée. En effet, la chaleur risque de faire éclater la bulle mais nous pouvons également supposer que les mouvements de convection ainsi créés peuvent compenser les différences d'épaisseurs et donc l'instabilité de la bulle en faisant remonter une partie de la matière entraînée par son propre poids.

1.2 Etude des cyclones

1.2.1 Formation des cyclones

[35] Chaque année, on observe en moyenne entre 80 et 85 cyclones dont une quarantaine dépasse le seuil d'ouragan, c'est à dire que les vents dépassent les 117km/h.

Parmi ces cyclones, 70 % d'entre eux apparaissent dans l'hémisphère nord entre juin et novembre tandis que les 30 % restants se forment dans l'hémisphère austral entre juillet et octobre. Dans le monde, seulement sept bassins possèdent les conditions nécessaires à la formation de ces cyclones. La région la plus active et avec les cyclones les plus violents et les plus étendus est aujourd'hui l'océan Pacifique nord-ouest. De plus, "Sur l'ensemble du globe, seulement 22 % des perturbations évoluant en cyclones tropicaux prennent naissance au-dessous de 10 ° de latitude, contre 65 % entre 10 ° et 20 °, et seulement 13 % au-dessus de 20 °." [28] Cf image 2.4 page 28

Ces cyclones se forment dans une eau supérieure à 26°C et avec une profondeur au moins égale à 50m. En effet, l'évaporation de l'eau fournit l'énergie nécessaire à la formation du cyclone; il faut donc un grande quantité de vapeur pour que le cyclone apparaisse. Ce phénomène explique donc qu'un cyclone a une espérance de vie beaucoup plus élevée au-dessus de la mer que sur le continent car il perd alors sa principale source d'énergie et sa violence se réduit considérablement.

De plus, la force de Coriolis étant responsable du mouvement de rotation du cyclone, celui-ci ne peut se former qu'à 5°C de latitude minimum afin d'être suffisamment loin de l'équateur pour que cette force agisse. Cette dernière entraîne une déviation du vent vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

Enfin, une forte humidité supérieure à 40% est nécessaire pour la formation des cumulonimbus : masse nuageuse d'origine convective avec une forte extension verticale d'environ 15km et dont la partie supérieure est constituée de cristaux de glace. [28] Cf image 2.5 page 29

1.2.2 Caractéristiques

Un cyclone de taille moyenne possède un diamètre compris entre 200 et 500km mais les plus importants peuvent s'étendre sur 1000km. Sa durée de vie varie entre 40h et 100h avec une valeur moyenne de 55h.

Le centre de ce cyclone, en forme d'anneau compact et droit, est appelé "oeil du cyclone" et mesure entre 20 et 60km de diamètre. Il est caractérisé par des vents faibles et une pression basse. Il s'agit également de la zone la plus chaude du cyclone puisque la différence de température peut aller jusqu'à 10°C entre l'oeil et sa périphérie. Les vents au niveau de l'oeil descendent tandis que ceux vers l'extérieur sont ascendants. On observe donc un enroulement des vents entre les zones de hautes pressions et celles de basses pressions. Un équilibre se crée alors entre la force de Coriolis qui attire vers l'extérieur du cyclone et la dépression qui attire vers le creux du cyclone. Le mouvement d'enroulement des vents autour des zones de basses pressions se fait donc le long des lignes de pressions environ égales. On constate de plus que la taille de l'oeil diminue proportionnellement à la chute de pression.

Enfin on remarque que plus le diamètre d'un cyclone est petit, plus ces vents sont violents. La vitesse de l'ouragan augmente également avec le temps, passant de 20km/h à environ 45km/h. De plus, ces vents forts et la baisse de pression brutale autour du cyclone entraîne une surélévation anormale du niveau marin et peut alors entraîner des raz-de-marée. [27]

1.2.3 Trajectoire d'un cyclone

De nos jours, il est impossible de connaître avec certitude la trajectoire que le cyclone va suivre. Cependant, il existe plusieurs méthodes permettant de tracer un "cône d'incertitude" et d'obtenir ainsi un intervalle encadrant la trajectoire du cyclone. Le cône d'incertitude est comme son nom l'indique un cône traçant les valeurs extrêmes de la trajectoire. Sa forme évasée vient du fait que nous connaissons la position précise du cyclone à l'instant où nous l'observons alors que sa trajectoire devient de moins en moins certaine avec le temps puisque nous connaissons moins de variables comme l'orientation que va prendre le cyclone ou encore la force qu'il va prendre.

La première méthode consiste à observer et répertorier les trajectoires d'anciens cyclones dans une même zone géographique afin de déterminer la trajectoire la plus probable. Ces observations sont complétées par des simulations numériques ajoutant une légère fluctuation autour de cette trajectoire moyenne liée à la topographie et à la modification de la structure du cyclone au cours du temps. Cette approche statistique est donc peu précise et l'utilisation du cône de trajectoire est nécessaire pour tenir compte des écarts par rapport à la trajectoire des anciens cyclones.

- La seconde méthode se base également sur l'observation de la trajectoire des anciens cyclones mais en déduit cette fois-ci une équation suivant la loi universelle pour le déplacement quadratique moyen des cyclones. Ainsi, sur Terre cette équation s'écrit

$$X_{\pm}(t) = X(t_0) + V_x \cdot (t - t_0) \pm \left(A_c \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{t_c} \right)^{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- $X(t)$: soit latitude, soit longitude
- $X(t_0)$: position du cyclone au moment du calcul de la prévision
- V_x : vitesse du cyclone à t_0
- t_c et A_c : temps et aire caractéristiques du cyclone

L'utilisation de cette loi universelle s'explique par le fait que les cyclones suivent le "mouvement de Brown", c'est à dire que son déplacement est irrégulier. Pour une particule normale, le déplacement est proportionnel au temps. Or dans le cas des mouvements de Brown, c'est le carré du déplacement moyen qui est proportionnel au temps. D'où le calcul du déplacement quadratique moyen.

Cette loi est considérée comme quasiment toujours valable pour les déplacements des cyclones suite à des tests effectués sur plus de 500 cyclones dans les différents bassins. [22, 23]

1.3 Lien entre ces modèles : en quoi est-ce pertinent ?

1.3.1 Pertinence

Pour passer de l'étude des cyclones terrestres à ceux sur une bulle, nous sommes obligés de passer d'une modélisation 3D à une modélisation 2D. On peut donc se poser des questions quant à la pertinence d'une telle comparaison. Cependant si l'on considère que la hauteur d'un cyclone terrestre est de 15km et que son diamètre varie entre 200km et 1000km, on obtient un rapport diamètre/hauteur compris entre 13 et 65. On peut donc, à l'échelle de la Terre, assimiler ce cyclone à une surface plane et donc à une modélisation 2D.

De plus, les cyclones terrestres jouent un rôle essentiel dans les échanges d'énergie entre les régions équatoriales et les régions polaires. En effet, ils évacuent l'énergie excédentaire venant

de l'équateur vers les pôles sous forme de chaleur. On peut donc trouver des similitudes entre les cyclones sur Terre et ceux qui apparaissent sur la bulle lorsqu'on la chauffe; ces derniers se déplaçant suivant une trajectoire similaire.

Les deux structures ont un cycle de vie similaire : leur vitesse de rotation augmente jusqu'à atteindre un maximum, puis diminue jusqu'à évanouissement du phénomène. En effet, la loi universelle du déplacement quadratique moyen est également valable pour un vortex apparu sur la bulle de savon chauffée à sa base. Son exposant est toujours environ égal à 1,6. Il est de plus indépendant de la température et de la concentration en savon : conditions nécessaires à l'apparition du cyclone sur la bulle mais qui n'intervenaient pas dans la formation des cyclones terrestres. Cependant, pour les cyclones terrestres comme pour ceux d'une bulle, la trajectoire réelle diffère toujours de sa trajectoire moyenne initiale. [29, 30, 40]

1.3.2 Non pertinent

Certains aspects de la modélisation avec une bulle ne correspondent pas au cas des cyclones terrestres.

En effet, nous avons observé les différents rapports entre les cyclones sur terre et les phénomènes de tourbillons que nous pouvons observer dans une bulle de savon. Le rayon de notre bulle de savon est de 4,5cm, et l'épaisseur approximative de cette bulle de savon est de $1,5\mu m$. Nous en déduisons que le rapport épaisseur bulle/ rayon est de 0.00025.

Pour ce qui est du cyclone à la surface de la Terre, nous savons que le rayon de la Terre est de 6371 km et que la hauteur d'un cyclone est de l'ordre de 13 km environ, le rapport hauteur du cyclone/rayon de la Terre est de 0.0015. Nous observons donc que le rapport du cyclone sur le rayon de la Terre est environ 100 fois plus grand que le rapport de l'épaisseur de la bulle sur le rayon de la bulle de savon.

De plus, les cyclones terrestres sont créés grâce à la force de Coriolis suite à la rotation de la Terre tandis que les cyclones qui apparaissent à la surface de la bulle de savon qui ne tourne pas sont créés grâce au gradient thermique. En effet, des plumes de convections apparaissent suite à l'influence de ce gradient. Ces plumes de convection sont à l'origine des phénomènes de cyclones à la surface des bulles de savon. Les forces permettant la formation des cyclones sont donc totalement différentes suivant les deux modélisations.

Le modèle de l'étude des cyclones dans les bulles de savon, bien que comportant des similitudes avec les cyclones terrestres, est donc critiquable puisqu'il ne représente pas les cyclones à la surface de la Terre à échelle réduite et ne met pas en oeuvre les mêmes forces.

Nos recherches expérimentales lors de ce projet nous permettrons donc de confronter directement les hypothèses sur les deux modèles.

Chapitre 2

Expériences

2.1 Expérience principale

Le but de l'expérience est de filmer des cyclones à la surface d'une demi-bulle de savon chauffée par le bas afin de mesurer leur vitesse de rotation et de translation par rapport à la surface de la bulle.

On chauffe un cristalliseur contenant la solution à environ 50°C. Le produit est mélangé et agité jusqu'à formation de la bulle, pour ne pas influencer les mesures. On veille à retirer régulièrement la mousse en surface pour qu'elle n'éclate pas les bulles pendant leur formation. On souffle avec une paille en plastique à la surface du produit pour former une demi-bulle qui recouvre la surface du cristalliseur. On observe ensuite les cyclones en éclairant le cristalliseur d'une lumière blanche indirecte obtenue par réflexion de la lumière provenant d'une lampe de bureau sur du papier translucide. *Cf image 2.6 page 29*

La plaque chauffante crée un gradient de température entre la base de la bulle et son sommet, provoquant l'apparition des plumes de convection. Notons bien que dans notre étude, la bulle ne tourne pas, donc la force de Coriolis n'intervient pas.

2.1.1 Fabrication de bulles stables

Pour établir notre recette de produit à bulle, nous sommes partis des recherches réalisées par des lycéens dans le cadre de leur TPE qui consistait à déterminer la recette d'un "produit à bulles" le plus efficace possible, c'est-à-dire qui optimise la durée de vie des bulles de savon et leur résistance à la chaleur. Leur recette, à partir de laquelle nous avons créée la nôtre, était la suivante : 25% de liquide vaisselle, 5% de sucre, 10% de glycérine et 60% d'eau distillée .

Ci-dessous, la recette obtenue pour un volume de 350mL de produit : [13]

- 12mL de sucre soit 3.4 %
- 35 mL de glycérine soit 10%
- 75mL de MIR soit 21.4%
- Compléter avec de l'eau distillées soit 65.2%

"L'espérance de vie" de nos demi-bulles ainsi obtenue est de 60 à 120s. Un tutoriel de préparation de produit à bulles¹ nous a appris que pour plus de stabilité, il fallait laisser reposer le produit

1. <https://www.youtube.com/watch?v=eCDzLrhawvw>

48h avant utilisation. C'est pourquoi pendant quatre séances, nous avons conservé notre solution pour la réutiliser la fois suivante. Nous avons seulement rajouté juste assez d'eau pour compenser son évaporation, et le produit fonctionnait très bien.

Nous avons essayé une nouvelle recette pour améliorer la qualité des cyclones sur nos bulles. La nouvelle recette se compose de :

- 43,75 mL de glycérine soit 12,5%
- 87,50 mL de MIR soit 25%
- 218,75 mL d'eau du robinet soit 62,5%

Grâce à cette nouvelle recette, on obtient des couleurs plus vives et plus brillantes. Aussi, la durée de vie des bulles ne changent pas ; elle reste entre 60 et 120s. [34] Pour conserver notre solution, nous avons procédé à la même méthode avec la 2e solution.

2.1.2 Prise de vue

Pour obtenir des vidéos exploitables sur un logiciel de suivi point par point, nous avons utilisé la caméra d'un téléphone portable d'une résolution de 16 mégapixels.

Le caractère sphérique du film de savon dans lequel se déplacent les cyclones ne nous permet pas d'obtenir des résultats exacts sur leur trajectoire car même si l'on se contente de projeter la surface sphérique sur un plan, l'ampleur de leurs déplacements reste relative à leur distance du centre de la bulle. De plus, contrairement aux couleurs, les trajectoires des cyclones que nous observons dépendent de l'angle d'orientation de la caméra.

Nous avons constaté que les chercheurs de Bordeaux ont été confrontés aux mêmes problèmes. Ils ont étudié le déplacement des cyclones en coordonnées cartésiennes tant que leurs trajectoires restaient sur une surface relativement plane, tout en calculant les erreurs qu'ils commettaient en faisant cette approximation.

D'après eux, pour ne pas faire d'approximation, il aurait fallu pouvoir situer les centres des cyclones selon leur latitude et leur longitude sur la bulle. Pour cela, il aurait aussi fallu connaître la position exacte du centre de la bulle, son rayon, ainsi que l'inclinaison de la caméra. *Cf image 2.7 page 30*

Nous nous contenterons de faire la même approximation que les chercheurs de Bordeaux, en considérant les cyclones en coordonnées cartésiennes. puis en convertissant ces coordonnées en longitude et latitude après avoir ramené les valeurs cartésiennes obtenue par le logiciel de pointage sur une sphère de centre $(0, 0, 0)$ et de rayon $1m$.

Cependant, la principale difficulté que nous avons rencontrée était le problème de l'éclairage de la bulle. En effet, bien que nous observions de nombreuses couleurs et des mouvements sur la bulle, les cyclones n'apparaissaient qu'en fin de vie de la bulle et sur le dessus de celle-ci, alors que nous n'arrivions pas à filmer cette zone.

Nous avons donc fait varier la direction de l'éclairage, l'environnement de la bulle et l'angle de la caméra afin d'obtenir les images les plus nettes possibles. *Cf image 2.8 page 30*

Nous avons tout d'abord tenté d'éclairer la bulle avec la lumière blanche d'un téléphone en plaçant un fond noir derrière. Les téléphones furent vite remplacés par des lampes de bureau à lumière blanche pour une meilleur fiabilité et stabilité. Cependant, bien que les couleurs soient facilement observables en direct, les films n'étaient pas traitables à cause des reflets blancs sur la bulle liés à la lumière. Nous avons donc décidé d'éclairer la bulle par réflexion indirecte (a, b) en plaçant des feuilles blanches autour pour que la lumière se reflète sur ces dernières

avant d'arriver sur la bulle. Cet éclairage n'étant pas concluant, des feuilles de papier ont été positionnées sur les lampes pour tamiser la lumière et ainsi diminuer les tâches blanches au niveau de la bulle(c, d).

Le dernier montage (e) a été réalisé à la dernière séance d'expérimentation. Nous avons réussi à capturer quelques cyclones à cette occasion (f), mais leur durée de vie très courte limite considérablement l'exploitation que nous avons pu faire de ces vidéos.

De plus, même à la fin de nos expériences, nous ne parvenions à observer ces cyclones que sur un quart de la bulle ; le reste de la bulle apparaissant par transparence sur le film. Nos méthodes et techniques de filmage ont donc évolué avec le temps ; mais tous les films ont été pris dans une pièce noire pour éviter les reflets gênants de la lumière du jour.

L'autre difficulté majeure que nous avons rencontrée résidait dans le chauffage de la bulle. En effet, nous n'avions la chance d'observer des cyclones qu'à des températures très élevées entre 50 et 60°C à la surface de la solution, ou à la base de la bulle. Or, lorsque la solution est trop chaude, il devient impossible de former des bulles stables.

Nous devons donc chauffer suffisamment la surface pour faire apparaître les cyclones tout en gardant la température suffisamment basse pour pouvoir faire de nouvelles bulles.

Finalement, les seules vidéos de cyclones que nous avons obtenues ont été filmées en fin de séance, alors que nous réglions la température du chauffe-ballon au maximum une fois la bulle formée. Ainsi, la bulle pouvait se former à faible température et la solution avait le temps de chauffer suffisamment pour permettre l'apparition de cyclones pendant les dernières dizaines de seconde de vie de la bulle. L'inconvénient de cette manipulation réside dans son manque de reproductibilité : il faut attendre que le liquide refroidisse pour pouvoir former une nouvelle bulle, ce qui limite le nombre d'essais possibles en une séance, malgré notre système de refroidissement accéléré par l'eau du robinet. *Cf image 2.9 page 31*

Les chercheurs ayant rédigé la thèse de Bordeaux avaient la possibilité de chauffer leur solution à sa surface (soit directement à la base de la bulle), ce qui permet d'obtenir un gradient de température important sans avoir un volume trop important de solution à chauffer puis refroidir.

Si nous avions pu chauffer la solution dans le cristalliseur à sa surface plutôt qu'à sa base, nous aurions pu gérer plus facilement la température car le volume à chauffer aurait été moins important et donc plus rapide à refroidir, ce qui aurait permis de faire une autre bulle plus rapidement et de multiplier les tentatives.

2.2 Expériences parallèles

2.2.1 Détermination de la force superficielle

Afin de déterminer le coefficient de tension superficielle γ nous avons réalisé l'expérience suivante : on détermine la masse d'une goutte de solution qui sort d'un capillaire de rayon r . Dans notre cas, il s'agit d'une bulle plate de rayon r . Au début seul le poids $P = mg$ s'applique sur la goutte ; mais au moment où celle-ci se détache on obtient $P = F$ avec $F = 2\Pi r\gamma$ la force due à la tension superficielle γ au niveau du capillaire. On a alors

$$\gamma = \frac{P}{(2\Pi r)}$$

Ainsi, on peut mesurer par exemple la masse de 100 gouttes au dessus d'une balance.

Nous avons donc réalisé cette expérience à l'aide d'un fil de fer de forme ronde sur lequel la bulle était formée. Cependant le résultat reste peu précis et donc peu exploitable puisque nous ne possédions qu'une balance précise au gramme près.

Nous avons ainsi obtenu pour 120 gouttes tombées dans un bécher sur la balance une masse de 8g. De plus le périmètre de la bulle était de 80mm. Nous obtenons alors

$$\gamma = \frac{\left(\frac{0,008}{120}\right)}{8 \times 10^{-3}} = 0,00833 \text{ N.m}^{-1}$$

Il est important de constater que ce résultat est presque quatre fois plus petit que la valeur théorique qui pour l'eau et le savon valait 0.03 N.m^{-1}

2.2.2 Détermination de l'épaisseur

Afin de déterminer l'épaisseur de la bulle, nous nous sommes basés sur les interférences en observant les couleurs à la surface de la bulle.

Dans le cas de notre étude, le milieu extérieur est l'air avec pour indice de réfraction $n_{air} = 1$ et le milieu intérieur est la bulle avec $n_{bulle} = 1,3$. Il est important de remarquer que pour cette expérience, nous avons considéré que la surface était plane comme dans le schéma ci-dessous et nous avons négligé les déviations causées par les parois de la bulle très petites devant la pellicule d'eau piégée au milieu. De plus, nous avons supposé que l'angle d'incidence i_1 valait 45° . Cf image 2.10 page 31

Calcul de e : Tout d'abord, calculons l'angle réfracté i_2 :

$$n_{air} \times \sin(i_1) = n_{bulle} \times \sin(i_2)$$

$$\Leftrightarrow i_2 = \arcsin\left(\frac{n_{air} \times \sin(i_1)}{n_{bulle}}\right)$$

De plus, nous savons que la différence de marche vaut :

$$d = 2n_{bulle} \times e \times \cos(i_2) + \frac{\lambda}{2}$$

Dans notre cas, les couleurs observées sont constructives donc :

$$d = k \times \lambda$$

(avec k réel) Nous obtenons alors :

$$\begin{aligned} \lambda k &= 2n_{bulle} \times e \times \cos(i_2) + \frac{\lambda}{2} \\ e &= \lambda \left(k - \frac{1}{2}\right) \times \frac{1}{2n_{bulle} \times \cos(i_2)} \end{aligned}$$

Détermination de l'épaisseur suivant la valeur de k :

Cf image 2.1 page 32

Le tableau montre que suivant les différentes valeurs de k , l'épaisseur trouvée varie proportionnellement. A vue d'oeil, il nous est impossible de déterminer quel k est utilisé pour notre bulle. Cependant d'après les travaux de Boeuf, on peut supposer que l'épaisseur de la bulle est de l'ordre du micromètre, soit k environ égal à 10.

Cf image 2.11 page 32

On remarque des stries horizontales témoignant que l'épaisseur est plus faible en haut qu'en bas. En effet, pour un même k , d'après le tableau ci-dessus, la couleur bleue correspond à une épaisseur plus faible que le jaune, lui-même d'épaisseur plus faible que le rouge.

Prenons maintenant un cyclone obtenu sur l'une de nos bulles et comparons l'épaisseur de ce cyclone avec la pression d'un cyclone terrestre. Prenons l'image ci-dessous et utilisons les couleurs observables le long de la droite pour déterminer l'épaisseur du cyclone en différents points. Il faut cependant prendre en compte le fait que l'épaisseur obtenue est peu précise puisque nous prenons la valeur moyenne de chaque intervalle de couleur et que nous avons supposé que le $k=10$. *Cf image 2.12 page 32*

Nous constatons alors que les deux courbes possèdent un minimum situé au centre du cyclone et que la pression et l'épaisseur augmentent lorsqu'on se rapproche des extrémités de ce cyclone bien que les grandeurs ne soient pas comparables. De plus, dans le cas de l'épaisseur, nous avons appliqué une symétrie pour pouvoir comparer avec la courbe de pression. Cependant, les valeurs de l'épaisseur sont obtenues à partir d'un seul cyclone et peuvent donc légèrement varier d'un cyclone à l'autre. De plus, l'épaisseur trouvée dépendait de la position de la droite sur le cyclone. En effet, le cyclone n'a pas une forme sphérique parfaite et l'épaisseur varie suivant le rayon choisi. *Cf image 2.13 page 33*

2.3 Comparer nos résultats à ceux de obtenus par Meuel, étudiant de l'université de Bordeaux

A l'aide du logiciel de pointage Aviméca, nous avons obtenu les différentes trajectoires des cyclones que nous avons observés sur nos bulles en fonction du temps en coordonnées cartésiennes. Nous avons ensuite reporté ces valeurs sur la sphère unité et en avons déduit à chaque instant la longitude et la latitude du centre du cyclone en calculant les angles θ et φ comme dans le tableur joint en annexe. Nous avons de plus observé à l'oeil nu que les cyclones avaient tendance à tourner sur eux-mêmes et le long de la bulle dans le sens trigonométrique bien qu'il n'y ait aucune rotation de la bulle pour influencer leur direction.

Meuel constate la même chose sur ces propres cyclones. Celui-ci a tâché de l'expliquer en remarquant que le cyclone se formait toujours au niveau de la plus grande plume de convection et que celle-ci apparaissait au niveau des tuyaux d'arrivée et d'évacuation de l'eau chaude. En effet cette zone située sur la droite de la bulle dans ces films présentait une température plus élevée que sur le reste de la bulle et donc impliquait "un léger gradient horizontal pouvant être à l'origine du mouvement". Dans son cas les "vents de plumes observés" allait toujours de gauche à droite donc dans le sens trigonométrique. Or durant nos expériences notre bulle était chauffée à sa base donc cette hypothèse ne s'applique pas à nos propres bulles. *Cf image 2.14 page 33*

Nous avons enfin tracé les courbes de la longitude et de la latitude en fonction du temps et les avons comparées avec les résultats de Meuel. La durée des cyclones observés sur nos films allait de 2 secondes à 12 secondes mais pour plus de cohérence avec les résultats de la thèse de

Bordeaux nous avons pris uniquement un intervalle de temps allant de 0s à 5s. De plus, il est important de noter que les cyclones observés sur nos films n'en étaient pas à la même durée de vie et donc le cyclone ne part pas de la même longitude suivant les différentes courbes. Cependant, la trajectoire reste à peu près la même. Enfin, pour les courbes obtenues par Meuel, la courbe cohérente avec nos résultats est la courbe noire, soit pour $f = 0Hz$ puisque nous n'avons pas fait tourner la bulle pendant nos manipulations et nos expériences.

Cf image 2.15 page 34

Cf image 2.16 page 34

Cf image 2.17 page 35

Cf image 2.18 page 35

Nous constatons que nos résultats sont globalement cohérents avec les résultats de la thèse de Meuel puisque les courbes suivant la latitude et la longitude sont relativement proches avec la latitude comprise entre 20° et 60° et ayant tendance à diminuer au cours du temps bien que la trajectoire du cyclone montre clairement des pics et un déplacement aléatoire entre ses valeurs. Cependant, on constate que l'amplitude maximale de la latitude sur nos courbes vaut environ 20° alors que celle sur la courbe de Meuel est plus proche de 37° .

La longitude semble un peu plus constante puisque sa pente est faible et que les petites portions de courbes croissantes compensent globalement celles décroissantes. Les variations de cette longitude pouvant être comprises dans un intervalle d'amplitude environ égal à 30° . Cependant comme expliqué précédemment, bien que les tendances des courbes se ressemblent, elles ne se situent pas toutes à la même longitude initiale et cette observation est également valable pour les latitudes bien que cela soit moins marqué. Cela peut s'expliquer par le fait que les cyclones ne sont pas initialement apparus au même endroit ou bien que nous ne les avons pas filmés au même moment de leur vie.

De plus, dans la réalité, le cyclone accélère au fur et à mesure. Cependant, dans notre cas, les vitesses calculées semblaient totalement irrégulières; le cyclone accélérant sur la bulle puis ralentissant de manière aléatoire. Cette incohérence peut s'expliquer par le fait que nous observons nos cyclones sur un intervalle de temps trop court mais les écarts semblent tout de même très importants.

Cf image 2.19 page 36

L'irrégularité de la vitesse de nos cyclones nous a empêchés de comparer un deuxième type de courbes basé sur déplacement quadratique moyen puisque nous n'étions pas capable de déterminer t_c : la durée caractéristique correspondant à la durée nécessaire pour parcourir une aire moyenne de 10° , ni A_c : l'aire caractéristique. En effet, t_c prend une valeur différente pour chaque cyclone en se basant sur le temps qu'ils mettent pour parcourir une certaine distance. Or dans notre cas, n'ayant pas de films assez long pour obtenir une vitesse moyenne et la vitesse fluctuant trop pour déduire une tendance générale, nous ignorions comment obtenir ce temps caractéristique. Ainsi, les travaux de Meuel montrent que le déplacement quadratique moyen suit une loi superdiffusive (puisque l'exposant vaut 1,6)

$$X_{\pm}(t) = X(t_0) + V_x \cdot (t - t_0) \pm \left(A_c \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{t_c} \right)^{1.6} \right)^{\frac{1}{2}}$$

similaire à celle observée sur les cyclones terrestres, avec X la longitude ou la latitude. Cependant, étant donné que nos courbes pour la trajectoire des cyclones étaient fidèles à celles de la thèse de Meuel, nous pouvons supposer que nous aurions obtenu le même type de courbe dans ce cas-ci.

Cf image 2.20 page 36

Déplacement quadratique moyen pour un cyclone terrestre. Ici, les courbes suivent la loi des puissances avec $\alpha = 1.6$

Cf image 2.21 page 37

Déplacement quadratique moyen suivant X la longitude et Y la latitude pour un cyclone sur une bulle.

Les courbes du déplacement quadratique moyen pour la trajectoire d'un cyclone terrestre et la trajectoire d'un cyclone sur une bulle étant les mêmes ; nous pouvons conclure que le modèle de la bulle est cohérent pour déterminer à l'avenir la trajectoire des cyclones sur Terre avec plus de précision.

Conclusion

Durant notre projet, à travers plusieurs expériences comme la détermination de la trajectoire des cyclones où la similitude entre l'épaisseur d'un cyclone sur une bulle et la pression d'un cyclone terrestre, nous avons tenté de valider le modèle de la bulle pour mieux comprendre les déplacements des cyclones sur Terre encore mal connus. Ces expériences ont été réalisées sur une demi-bulle chauffée à sa base entre 30°C et 60°C. En effet, le modèle de la bulle utilise la convection thermique pour faire apparaître des turbulences sans faire tourner la demi-sphère ainsi que la représentation quasi 2D des cyclones.

Or ce modèle est bien différent du modèle terrestre où les cyclones sont entraînés par la rotation de la Terre et sont représentés en 3 dimensions, ces derniers étant liés au gradient de pression et non à celui de température comme dans la bulle. On constate cependant des trajectoires similaires dont les déplacements quadratiques moyens suivent dans les deux cas la loi des puissances

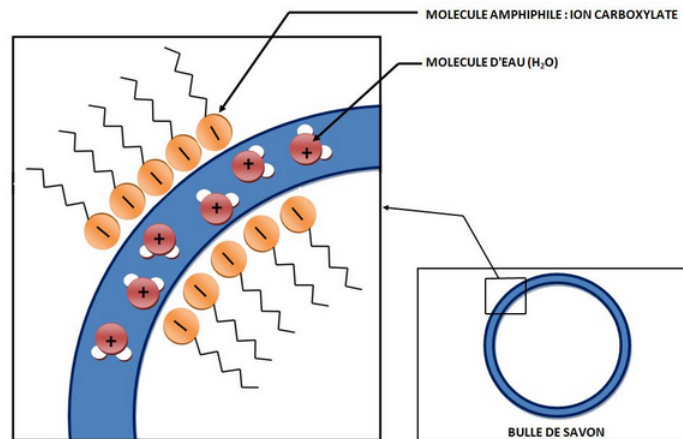
$$X_{\pm}(t) = X(t_0) + V_x \cdot (t - t_0) \pm \left(A_c \cdot \left(\frac{(t - t_0)}{t_c} \right)^{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}$$

avec l'exposant $\alpha = 1.6$ dans la bulle et légèrement variable dans le cas des cyclones terrestres bien que sa valeur reste proche de 1.6.

A travers nos expériences, nous avons donc constaté que le modèle de la bulle était pertinent pour les trajectoires mais que, dans notre cas, les vitesses de déplacements des cyclones étaient différentes de la réalité. Cependant, les chercheurs de la thèse de Bordeaux sur laquelle nous sommes appuyés tout au long du rapport obtenaient des vitesses cohérentes.

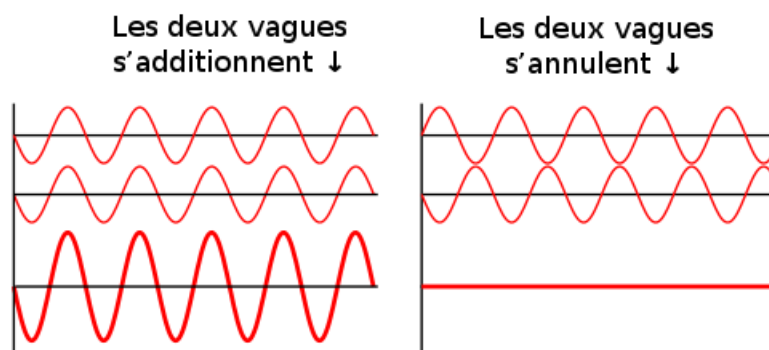
Annexe Images

FIGURE 2.1 – Schéma simplifié d'une bulle de savon



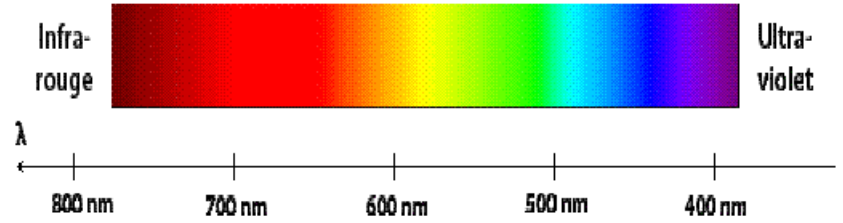
Revenir à : page 8
Source : [24]

FIGURE 2.2 – Les différentes phases d'ondes



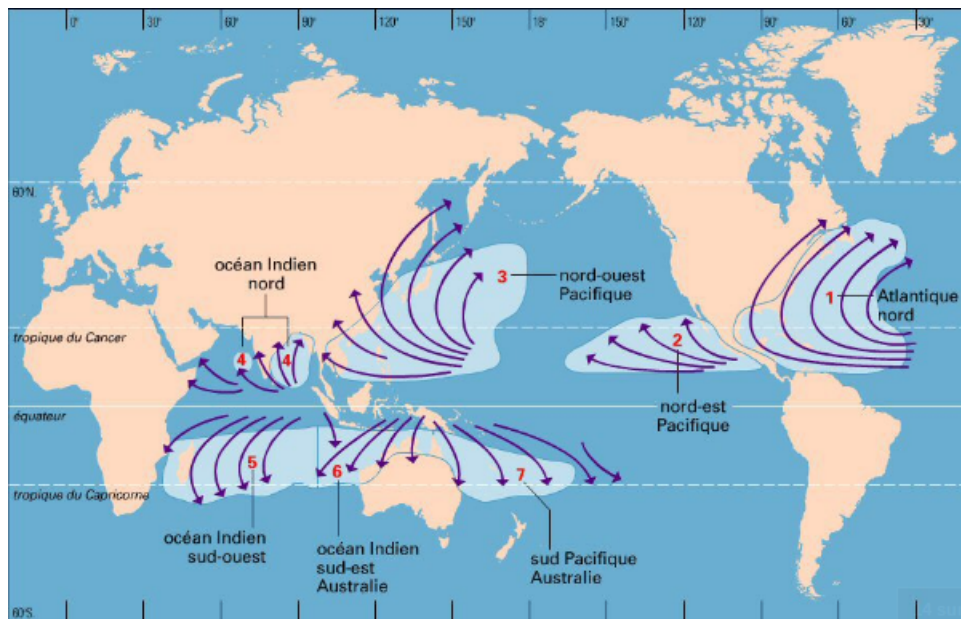
Revenir à : page 14
Source : [33]

FIGURE 2.3 – Spectre de la lumière visible



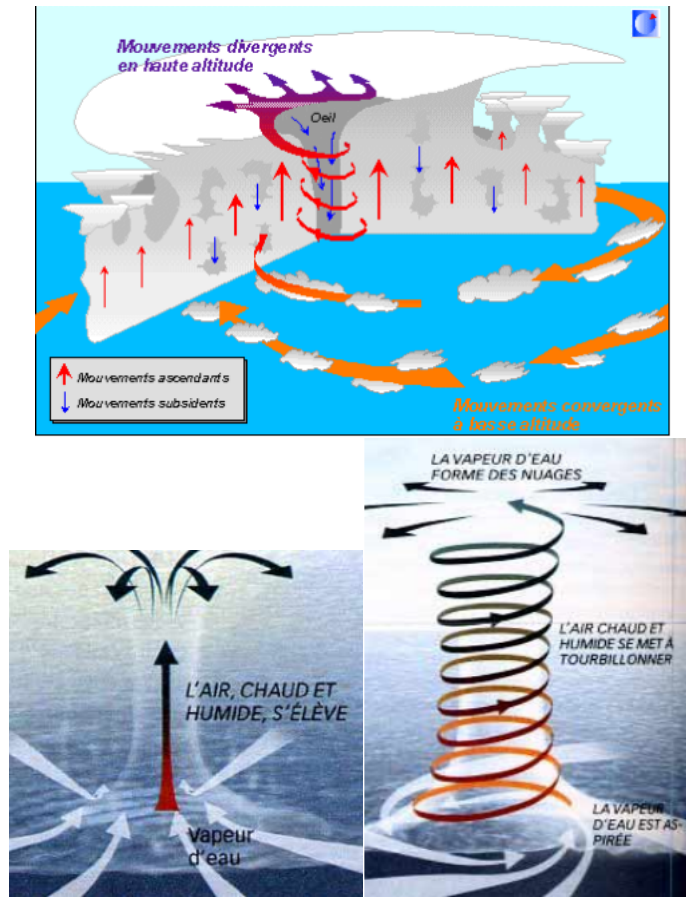
Revenir à : page 14
Source : [31]

FIGURE 2.4 – Carte représentative des zones touchées par les cyclones



Revenir à : page 16
Source : Universalis-edu.com

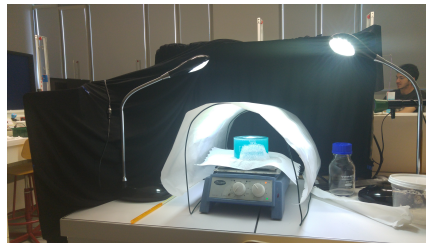
FIGURE 2.5 – Formation des cyclones



Revenir à : page 16

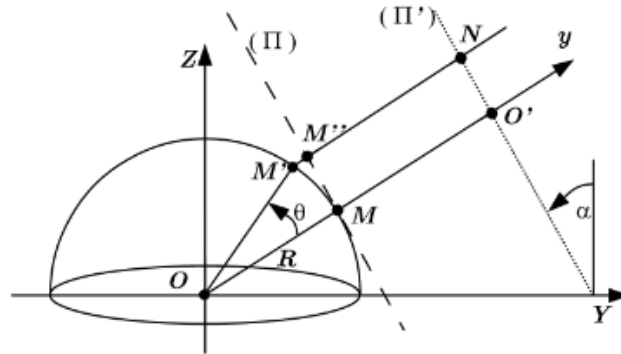
Source :[32]

FIGURE 2.6 – Dispositif expérimental



Revenir à : page 19

FIGURE 2.7 – Schéma des incertitudes liées aux positions des cyclones

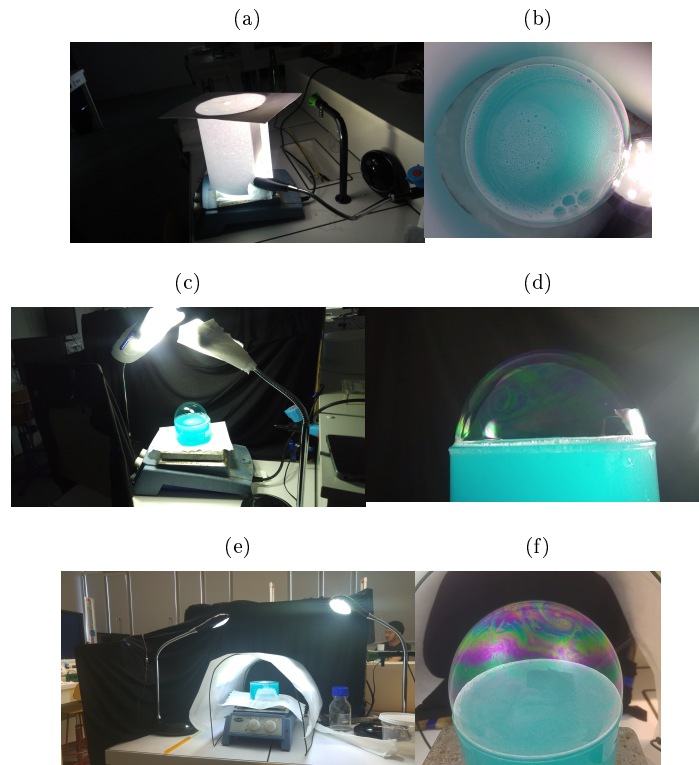


Représentation de la bulle et du plan (π) , tangent à la bulle au point d'intersection M entre celle-ci et l'axe de la caméra (OO') . (π) est parallèle au plan (π') du capteur de la caméra. Ceci permet d'évaluer l'erreur de la mesure des distances entre l'arc de cercle (MM') et sa projection (MM'') sur le plan (π) parallèlement à l'axe de la caméra. α : l'inclinaison de la caméra est l'angle entre le plan (π') du capteur de la caméra et la verticale.

Revenir à : page 20

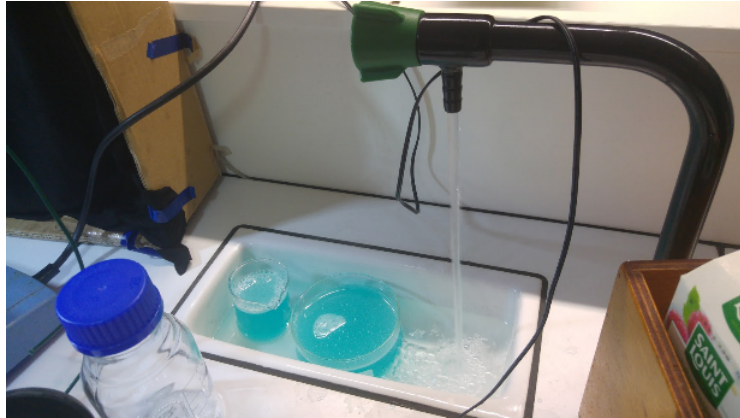
Source : [2, Tinihau Meuel]

FIGURE 2.8 – Les différents dispositifs d'expérimentation



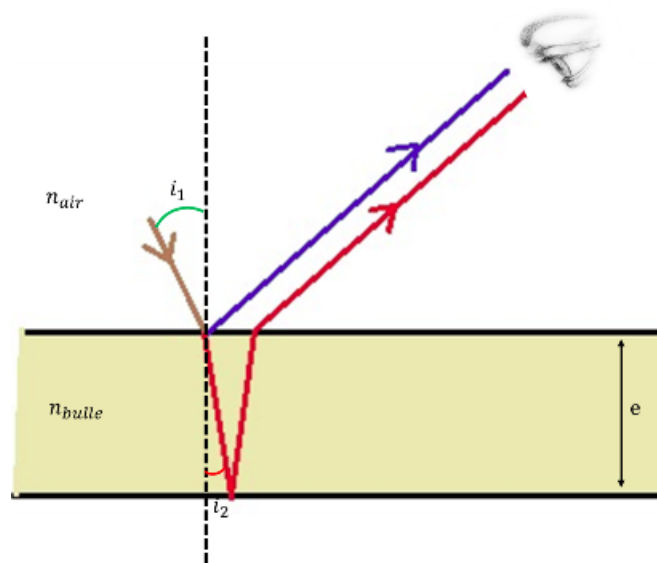
Revenir à : page 20

FIGURE 2.9 – Dispositif de refroidissement



Revenir à : Prise de vue

FIGURE 2.10 – Schéma de réfraction



Revenir à : page 22

TABLE 2.1 – Epaisseur de la bulle en fonction de k

Couleur	λ (nm)	e (nm) pour $k = 1$	e (μm) pour $k = 9$	e (μm) pour $k = 10$	e (μm) pour $k = 11$	e (μm) pour $k = 100$
Violet	$380 < \lambda < 450$	$87 < e < 103$	$1.48 < e < 1.75$	$1.66 < e < 1.96$	$1.83 < e < 2.17$	$17.3 < e < 20.5$
Bleu	$450 < \lambda < 490$	$92 < e < 112$	$1.61 < e < 1.91$	$1.80 < e < 2.13$	$2.00 < e < 2.36$	$19.5 < e < 22.4$
Vert	$490 < \lambda < 570$	$100 < e < 130$	$1.77 < e < 2.22$	$1.98 < e < 2.48$	$2.20 < e < 2.74$	$21.8 < e < 26.0$
Jaune	$570 < \lambda < 585$	$105 < e < 134$	$1.85 < e < 2.28$	$2.07 < e < 2.55$	$2.30 < e < 2.82$	$22.8 < e < 26.7$
Orange	$585 < \lambda < 620$	$108 < e < 142$	$1.91 < e < 2.42$	$2.15 < e < 2.7$	$2.40 < e < 2.99$	$23.6 < e < 28.2$
Rouge	$620 < \lambda < 750$	$113 < e < 173$	$2.03 < e < 2.92$	$2.28 < e < 3.27$	$2.55 < e < 3.61$	$25.0 < e < 34.2$

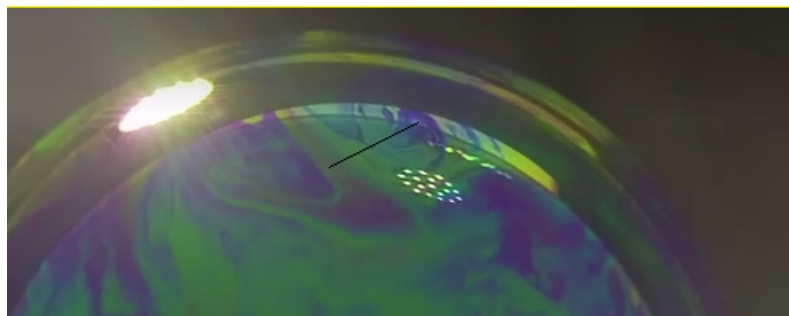
Revenir à : page 23

FIGURE 2.11 – Observation d'un film de savon plan



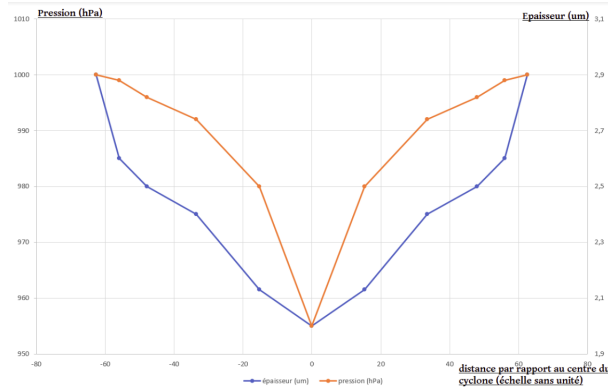
Revenir à : page 23

FIGURE 2.12 – Cyclone à la surface d'une bulle de savon



Revenir à : page 23

FIGURE 2.13 – Comparaison de l'épaisseur du cyclone d'une bulle et de la pression d'un cyclone terrestre



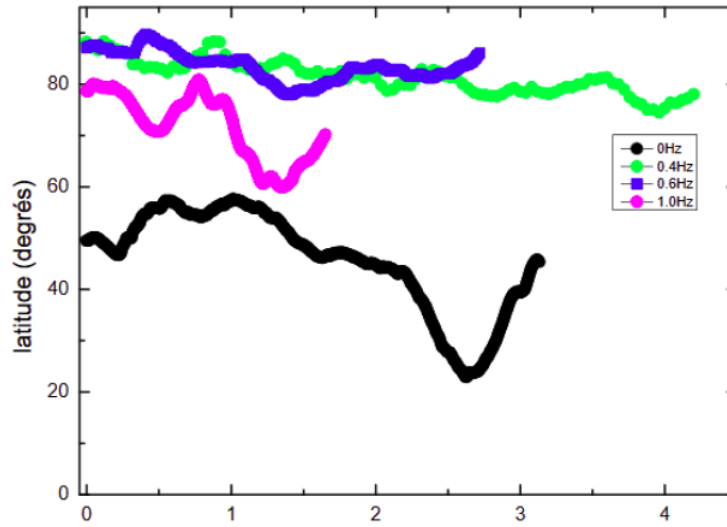
Revenir à : page 23

FIGURE 2.14 – Analyses des résultats

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R				
Coordonnées Vidéo				Rayon(fixe) p=1					Coordonnées sphériques					Coordonnées cartésiennes				Pointages AuMeca			
t (en s)	x	y		p	θ	φ	κ	γ	z	long	lat	t	x	y							
0	8.30E-02	8.27E-01		1.471	0.981	0.083	0.827	0.556		84.268829	33.782471										
6	0.034	8.51E-02	8.12E-01	1.466	0.955	0.085	0.812	0.577		84.017074	35.269291		4.404	8.30E-02	8.27E-01						
7	0.067	9.36E-02	8.04E-01	1.455	0.943	0.094	0.804	0.587		83.359637	35.959372		4.438	8.51E-02	8.12E-01						
8	0.101	1.09E-01	7.92E-01	1.434	0.926	0.109	0.792	0.601		82.163824	36.920913		4.471	9.36E-02	8.04E-01						
9	0.134	1.17E-01	7.85E-01	1.423	0.917	0.117	0.785	0.608		81.522778	37.470072		4.505	1.09E-01	7.92E-01						
10	0.167	1.32E-01	7.95E-01	1.406	0.937	0.132	0.795	0.592		80.572743	36.304287		4.538	1.17E-01	7.85E-01						
11	0.201	1.40E-01	8.04E-01	1.398	0.955	0.140	0.804	0.578		80.122164	35.303922		4.571	1.32E-01	7.95E-01						
12	0.234	1.40E-01	8.27E-01	1.403	0.995	0.140	0.827	0.544		80.391687	32.989922		4.605	1.40E-01	8.04E-01						
13	0.267	1.40E-01	8.39E-01	1.405	1.017	0.140	0.835	0.526		80.526604	31.72297		4.638	1.40E-01	8.27E-01						
14	0.301	1.49E-01	8.44E-01	1.396	1.030	0.149	0.844	0.515		79.988148	31.01888		4.671	1.40E-01	8.39E-01						
15	0.334	1.66E-01	8.42E-01	1.376	1.032	0.166	0.842	0.513		78.847185	30.884094		4.705	1.49E-01	8.44E-01						
16	0.368	1.66E-01	8.29E-01	1.373	1.007	0.166	0.829	0.534		78.676777	32.279101		4.738	1.66E-01	8.42E-01						
17	0.401	1.55E-01	8.29E-01	1.386	1.004	0.155	0.829	0.537		79.409558	32.502727		4.772	1.66E-01	8.29E-01						
18	0.434	1.40E-01	8.39E-01	1.405	1.017	0.140	0.835	0.526		80.526604	31.72297		4.805	1.55E-01	8.29E-01						
19	0.468	1.49E-01	8.39E-01	1.395	1.020	0.149	0.835	0.523		79.9297	31.556126		4.838	1.40E-01	8.39E-01						
20	0.501	1.38E-01	8.32E-01	1.406	1.004	0.138	0.832	0.537		80.582353	32.5026		4.872	1.49E-01	8.39E-01						
21	0.534	1.36E-01	8.32E-01	1.409	1.003	0.136	0.832	0.538		80.716447	32.537233		4.905	1.38E-01	8.32E-01						
22	0.568	1.49E-01	8.27E-01	1.393	0.998	0.149	0.827	0.542		79.786632	32.826558		4.938	1.36E-01	8.32E-01						
23	0.601	1.57E-01	8.14E-01	1.388	0.977	0.157	0.814	0.559		79.083148	34.003602		4.972	1.49E-01	8.27E-01						
24	0.634	1.64E-01	8.14E-01	1.372	0.980	0.164	0.814	0.557		78.608874	33.864618		5.005	1.57E-01	8.14E-01						
25	0.668	1.57E-01	8.12E-01	1.380	0.974	0.157	0.812	0.562		79.056908	34.204269		5.038	1.64E-01	8.14E-01						
26	0.701	1.64E-01	8.07E-01	1.370	0.968	0.164	0.807	0.567		78.512682	34.563737		5.072	1.57E-01	8.12E-01						
27	0.735	1.66E-01	8.04E-01	1.367	0.963	0.166	0.804	0.571		78.334198	34.819194		5.105	1.64E-01	8.07E-01						
28	0.768	1.68E-01	8.04E-01	1.365	0.964	0.168	0.804	0.570		78.197566	34.778358		5.139	1.66E-01	8.04E-01						
29	0.801	1.66E-01	8.04E-01	1.367	0.963	0.166	0.804	0.571		78.334198	34.819194		5.172	1.68E-01	8.04E-01						
30	0.835	1.51E-01	8.07E-01	1.386	0.963	0.155	0.807	0.571		79.40178	34.814427		5.205	1.66E-01	8.04E-01						
31	0.868	1.53E-01	8.04E-01	1.383	0.959	0.153	0.804	0.575		79.225527	35.072224		5.239	1.51E-01	8.07E-01						
32	0.901	1.64E-01	8.00E-01	1.369	0.956	0.164	0.800	0.577		78.414874	35.250452		5.272	1.53E-01	8.04E-01						
33	0.935	1.70E-01	8.00E-01	1.361	0.958	0.170	0.800	0.575		78.003101	35.128553		5.305	1.64E-01	8.00E-01						
34	0.968	1.72E-01	8.07E-01	1.361	0.970	0.172	0.807	0.565		77.968291	34.998727		5.339	1.70E-01	8.00E-01						
35	1.002	1.68E-01	8.19E-01	1.368	0.950	0.168	0.815	0.549		78.407825	33.274333		5.372	1.72E-01	8.07E-01						
36	1.035	1.62E-01	8.27E-01	1.377	1.002	0.162	0.827	0.538		78.916743	32.571783		5.406	1.68E-01	8.19E-01						
37	1.068	1.57E-01	8.29E-01	1.384	1.004	0.157	0.829	0.537		79.276057	32.463267		5.439	1.62E-01	8.27E-01						
38	1.102	1.49E-01	8.32E-01	1.394	1.007	0.149	0.832	0.534		79.846729	32.3027		5.472	1.57E-01	8.29E-01						
39	1.135	1.38E-01	8.27E-01	1.405	0.994	0.138	0.827	0.543		80.526643	33.024789		5.506	1.49E-01	8.32E-01						

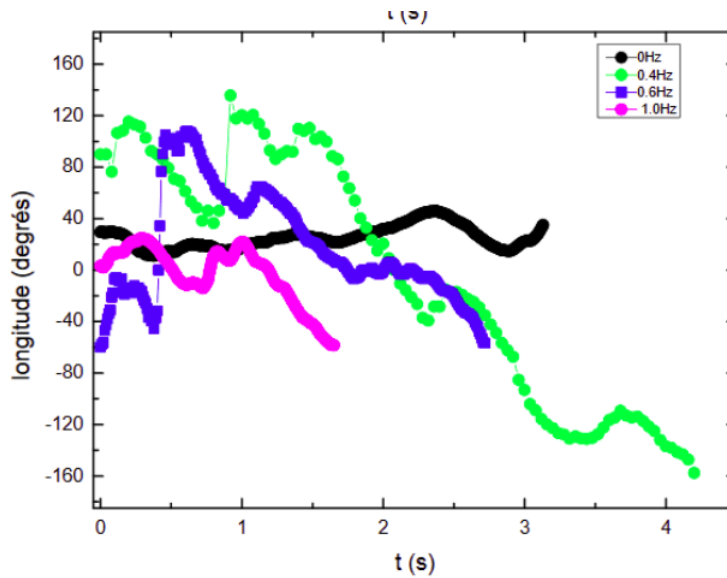
Revenir à : page 23

FIGURE 2.15 – Latitude en fonction du temps



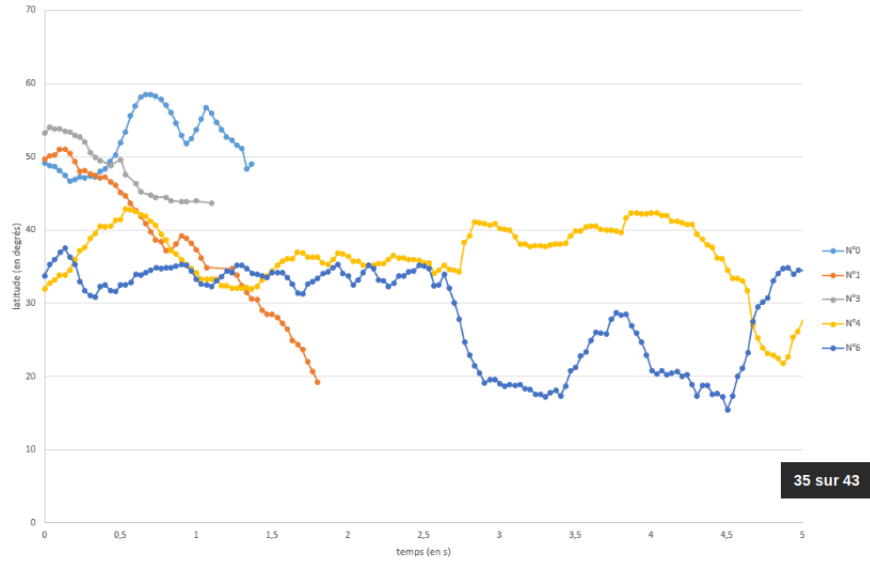
Revenir à : page 24

FIGURE 2.16 – Longitude en fonction du temps



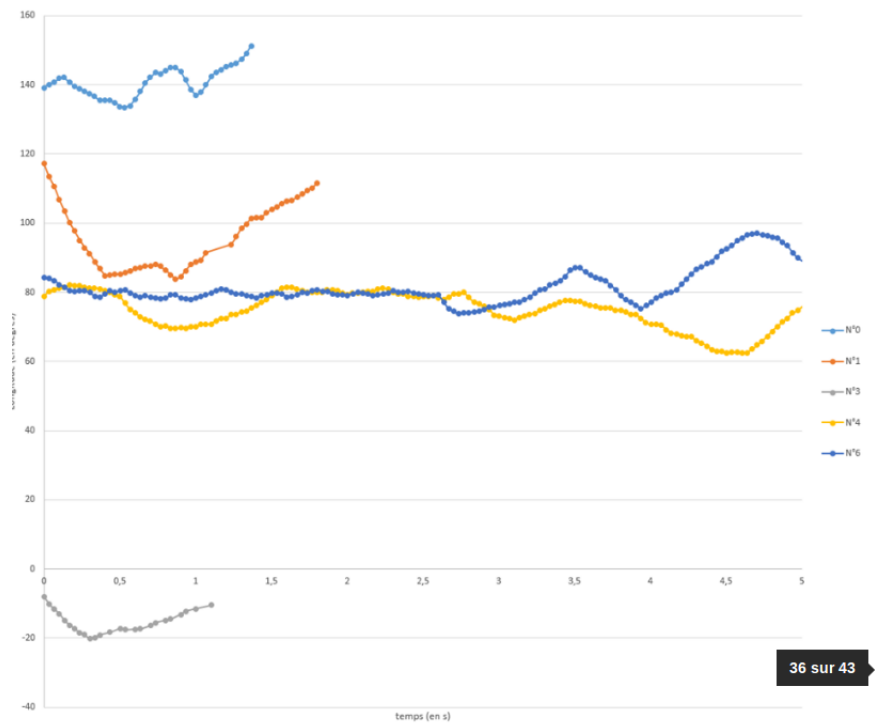
Revenir à : page 24

FIGURE 2.17 – Latitude en fonction du temps :



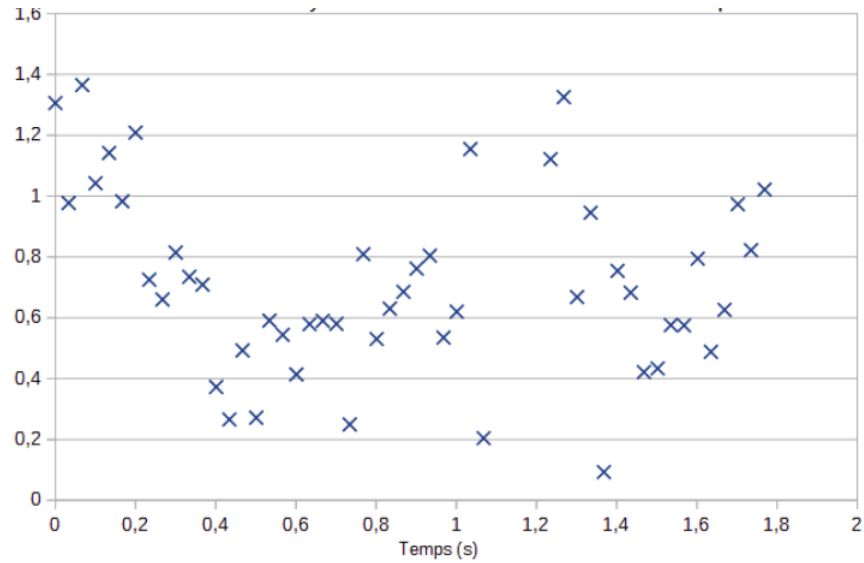
Revenir à : page 24

FIGURE 2.18 – Longitude en fonction du temps :



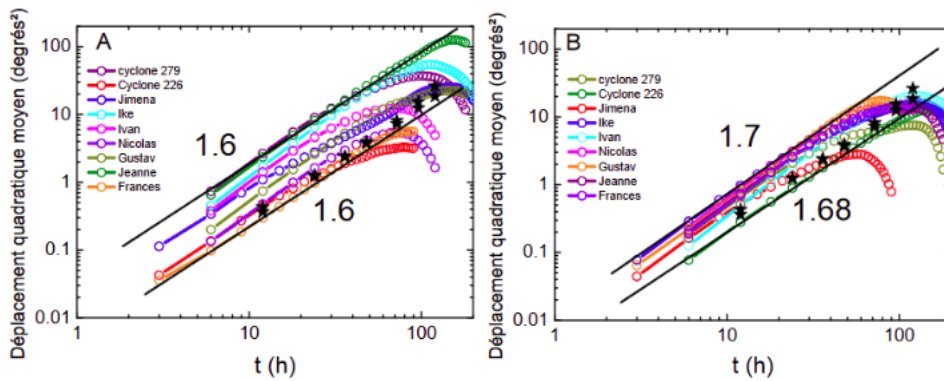
Revenir à : page 24

FIGURE 2.19 – Vitesse d'un cyclone sur la bulle en fonction du temps



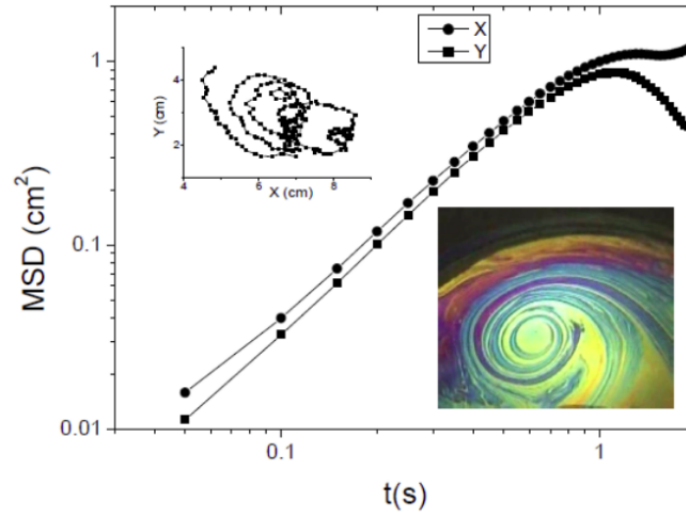
Revenir à : page 24

FIGURE 2.20 – Déplacement quadratique moyen (degrés²)



Revenir à : page 24

FIGURE 2.21 – MSD (cm^2)



Revenir à : page 24

Bibliographie

- [1] CNRS : *Mieux comprendre la trajectoire des ouragans grâce aux bulles de savon communiqué de presse*. Publié le 3 avril 2008, consulté le 28 avril 2017
<http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/1322.htm>
- [2] Tinihou Meuel : *Cyclones dans une bulle de savon. Milieux et Changements globaux*. Université de Bordeaux, publié en 2014, consulté entre février et juin 2017
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01142680/file/MEUEL_TINIHAU_2014.pdf
- [3] Y. Couder : *Two-dimensional grid turbulence in a thin liquid film*. J. Physique Lett., 45 :353–360, 1984.
- [4] M. Gharib and P. Derango : *A liquid film (soap film) tunnel to study two dimensional laminar and turbulent shear flows*. Physica D, 37 :406–416, 1989.
- [5] H. Kellay and Walter I. Goldburg : *Two-dimensional turbulence : a review of some recent*. Reports on Progress in Physics, 65 :845–894, 2002.
- [6] H. Kellay, X. Wu, and W. Goldburg : *Vorticity Measurements in Turbulent Soap Films*. Physical Review Letters, 80(2) :277–280, January 1998.
- [7] WIKIPEDIA : *Torr*. Publié le 4 juin 2004, mis à jour le 10 mai 2017, consulté le 14 mars 2017
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Torr>
- [8] B. Martin, X. Wu, W. Goldburg, and M. Rutgers : *Spectra of Decaying Turbulence in a Soap Film*. Physical Review Letters, 80(18) :3964–3967, May 1998.
- [9] O. Greffier, Y. Amarouchene, and H. Kellay : *Thickness Fluctuations in Turbulent Soap Films*. Physical Review Letters, 88(19) :194101, April 2002.
- [10] Leo P. Kadanoff : *Turbulent Heat Flow : Structures and scaling*. Physics Today, August :34–39, 2001.
- [11] Eric D. Siggia : *Turbulent Heat Flow : High Rayleigh Number Convection*. Annual Review of Fluid Mechanics, 26 :137–168, 1994.
- [12] Guenter Ahlers and Detlef Lohse : *Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Bénard convection*. Reviews of Modern Physics, 81(2) :503–537, April 2009
- [13] Thomas, Hakim, Eugénie et Aubin : *TPE : Composition d'une bulle de savon*. Lycée Saint Exupéry de Lyon - 1ère S6, publié en 2015, consulté le 18 avril 2017
<http://lesbullesdesavon2015.pagesperso-orange.fr/index.html>
- [14] J.ROUSSEL FEMTO, Cours de mécanique des fluides : *Tension superficielle*. Publié en mai 2011, mis à jour en novembre 2016, consulté le 10 février 2017
http://femto-physique.fr/mecanique_des_fluides/mecaflu_C4.php
- [15] B. Bonnel, N. Lebrun et D. Dangoisse : *Chapitre V : Tension superficielle et capillarité*. Publié en Octobre 2006 (version initiale par N. Lebrun et D. Dangoisse en octobre 2004),

- consulté le 15 avril 2017
http://phymain.unisciel.fr/wp-content/uploads/2014/03/bonnel_meca_flu.pdf
- [16] WIKI sciences amusantes : *Fluides non newtonien*. Date de publication inconnue, consulté le 29 mars 2017
http://wiki.scienceamusante.net/index.php?title=Fluides_non-newtonien
- [17] Hamid Kellay : *Turbulence à une et à deux dimensions*. Centre de physique moléculaire optique et hertzienne (CPMOH) UMR 5798 CNRS, université Bordeaux I, bât. Recherche physique, publié en février 2014, consulté en mars 2017
<http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/IdP01-02/14.pdf>
- [18] Olympiades de Physique : *Bulle, bulle, bulle... quand vas-tu éclater?* Lycée Français de Tananarive, 2015-2016, consulté en avril 2017
http://www.odpf.org/images/archives_docs/23eme/memoires/EquipeH/memoire.pdf
- [19] Philippe Marty : *Transferts thermiques convectifs*. Université de Grenoble, juillet 2012
http://www.odpf.org/images/archives_docs/23eme/memoires/EquipeH/memoire.pdf
- [20] Eddy Mezger : *Loi de variation de la tension superficielle avec la température*. Manuscrit reçu en 1946
http://www.odpf.org/images/archives_docs/23eme/memoires/EquipeH/memoire.pdf
- [21] C. Fukushima and J. Westerweel : *La mystérieuse équation de Navier-Stokes*. Technical University of Delft, The Netherlands, Wikimedia Commons, publié le 3 mars 2014, consulté le 7 mars 2017
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet.jpg>
- [22] T. Meuel, H. Kellay : *Cyclones dans une bulle de savon*. Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, publié en août 2013, consulté en mars 2017
http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/52327/a_3AVN5MU7.pdf?sequence=1
- [23] Université Paris-Sud : *Le mouvement brownien*
http://hebergement.u-psud.fr/rmn/thermo/thermo_exposes/Le%20mouvement%20brownien.pdf
- [24] Planete-Bulle.com, consulté le 15 février 2017
<http://www.planete-bulles.com/recette-produit-bulles.html>
- [25] Jean Etienne, Futura : *Les ouragans simulés... dans une bulle de savon*. Publié le 12 Avril 2008
<http://www.futura-sciences.com/planete/actualites/meteorologie-ouragans-simules-bulle-savon-15>
- [26] CNRS : *Quand un film de savon éclate-t-il?* Publié le 22 avril 2014, consulté le 15 mars 2017
<http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article2649>
- [27] CHABOUD René : *Cyclones tropicaux*. In Universalis éducation, Encyclopædia Universalis, consulté le 23 mai 2017
<http://villemin.gerard.free.fr/Wwwgymm/Chaos/NavierSt.htm>
- [28] Futura Science : *La vie d'un cyclone*. Publié le 4 octobre 2005, modifié le 7 septembre 2016
- [29] Hamid KELLAY, : *Cyclones dans des bulles de savon*. Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (LOMA)
<http://www.pc.bginette.com/Pc2/Physique/tipe/ADStypeX1refdp201546p20.pdf>
- [30] Hamid KELLAY : *Soap bubbles in a spin*. April 8, 2014

Sources Images et vidéo :

- [31] Tamaloubastien : *Interpréter le spectre de la lumière d'une étoile*. Publié le 17 mars 2015
http://tpe-physique-cuisine.pagesperso-orange.fr/images-utilisees/spectre_visible.gif
- [32] Futura Science : *La vie d'un cyclone*. Publié le 4 octobre 2005, modifié le 7 septembre 2016
<http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-cyclone-ouragan-typhon-sont-ils-5-page/4/>
- [33] Le Hollandais Volant
<https://lehollandaisvolant.net/img/interferences-constructives-et-destructives.png>
- [34] Fred Animation : *tutoriel bulle*. Youtube, publié le 18 mars 2015
<https://www.youtube.com/watch?v=eCDzLrhawwv>
- [35] William.f : *Les cyclones et ouragans*. Publiée le 31 mai 2014
<https://www.youtube.com/watch?v=5Lm6VI3ZB8Q>
- [36] William.f : *Les cyclones et ouragans*. Publiée le 31 mai 2014
<https://www.youtube.com/watch?v=5Lm6VI3ZB8Q>
- [37] Tinihau Meuel : *Cyclones dans une bulle de savon. Milieux et Changements globaux*.
- [38] VILLEMIN Gérard : *Équations de Navier-Stokes*. Publié le 4 février 2015, consulté le 18 mai 2017
<http://villemin.gerard.free.fr/Wwwgvmm/Chaos/NavierSt.htm>
- [39] https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01142680/file/MEUEL_TINIHAU_2014.pdf
- [40] Dalaise MARCEL : *Dalaise MARCEL*. vidéo CNRS images, 2014
- [41] Yann Rousselin : *Comment interpréter les larmes du vin ?* Vidéo publiée le 17 juil. 2012,
<https://www.youtube.com/watch?v=hqE20Mg1VKw>