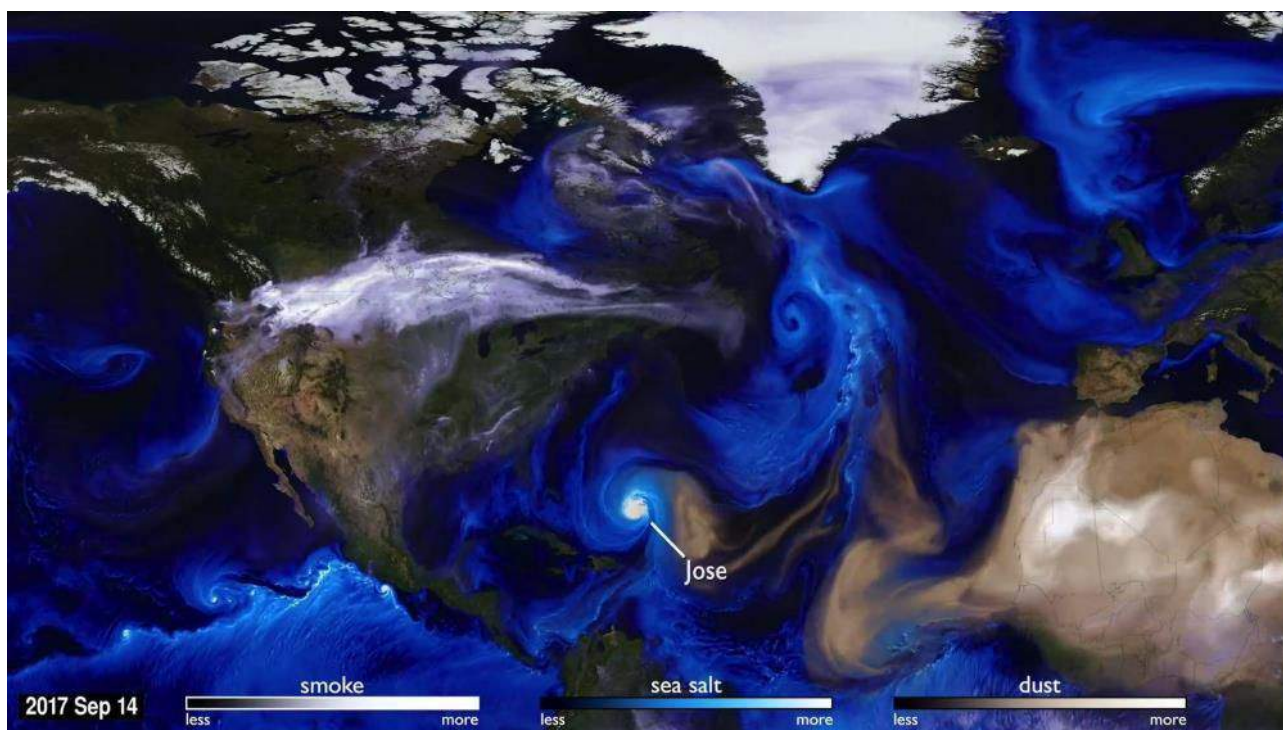


Savonnez José !



1

Auteurs : BRUNEAU Manon - DANIEL LAMAZIERE Baptiste

Encadrés par : Monsieur Ducassou et Monsieur Torrens

Année 2017-2018

¹ photo d'illustration : 2017 Hurricanes and Aerosols Simulation, NASA
Savonnez José !

RÉSUMÉ

Les cyclones sont des phénomènes physiques difficiles à modéliser alors que la prévision de leurs trajectoires est nécessaire pour la sauvegarde des populations. Une idée originale afin de mieux comprendre ce phénomène consiste à tenter d'établir un parallèle entre les tourbillons visibles à la surface de demi-bulle de savon et les cyclones atmosphériques, comme José qui a traversé l'Atlantique nord en fin d'été 2017. Les travaux de recherches sur cette thématique menés au LOMA (Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine) et plus particulièrement la thèse de Tinihau Meuel ont grandement inspiré ce projet.

La visualisation des tourbillons sur une bulle de savon est liée aux interférences de la lumière visible que l'on appelle irisations. Si nous chauffons la base de cette bulle, des déplacements de matière entreront en jeu et nous verrons alors apparaître des tourbillons grâce à la variation des couleurs à sa surface.

Pour ce projet, nous avons construit un dispositif expérimental pour la génération de demi-bulles de savon soumises à un gradient de température. Nous avons ensuite mis au point un système de prise de vues afin de filmer les tourbillons et nous avons étudiés quelques caractéristiques physiques de ces tourbillons (trajectoire, vitesse) que nous comparons à ceux des cyclones.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	2
Table des matières	3
Introduction	4
La bulle de Savon	5
Structure des bulles de savon	5
L'ingrédient clé : le tensio actif	5
Une réduction de la tension superficielle	5
Des bulles visqueuses	6
Les irisations des bulles	6
Présentation	6
Calcul du déphasage à l'infini entre deux ondes :	7
Discussion	8
Les cyclones	9
Présentation	9
Une modélisation difficile	10
Modélisation d'un cyclone par une demi-bulle de savon	11
Dispositif expérimental	11
Vue d'ensemble du dispositif expérimental	11
Partie fixe	11
Partie mobile	12
Génération des bulles	13
Technique de prise de vue	13
Mise en évidence et influence du gradient de température	15
étude d'ordres de grandeur	16
Analyse du déplacement d'un tourbillon	17
Analyse du sens de rotation des tourbillons	18
Prolongement du projet	19
Conclusion	19
Bibliographie	20

INTRODUCTION

Notre projet d'Olympiades de Physique consiste à caractériser les déplacements des tourbillons présents à la surface d'une bulle de savon. Créées par les enfants pour un simple divertissement, ces bulles de savon constituent un réel enjeu aux niveaux physique et chimique pour les scientifiques. Nous ne soupçonnions pas toutes les théories et modèles physiques qui permettent de décrire la bulle de savon avant de nous y plonger et de découvrir l'univers qui entoure la création, la vie et la mort de celles-ci. De plus, nous avons étudié une analogie qui paraît premièrement étrange mais toutefois passionnante : les bulles de savon (soumises à de certaines conditions) possèdent des irisations formant des vortex (que l'on appelle tourbillons) et peuvent être comparées à des cyclones à échelle terrestre.

L'intérêt de cette étude réside dans le fait que la prédiction de mouvements atmosphériques comme les cyclones est un enjeu actuel car ils sont dévastateurs et intensifiés par le réchauffement climatique. Il est donc nécessaire d'étudier ces turbulences pour affiner nos prédictions.

Plusieurs contraintes rendent difficile l'étude des cyclones : ces phénomènes ont des trajectoires aléatoires, et ils se produisent sur une grande échelle spatiale rendant les mesures expérimentales délicates. L'équation de Navier Stokes caractérisant ces mouvements est non-linéaire : sa résolution ne donne que des résultats approchés. Actuellement, les modèles numériques utilisés pour prévoir les cyclones sont donc peu précis sur les temps longs (2-3 jours).

De nouvelles approches seraient profitables pour prédire ces cyclones.

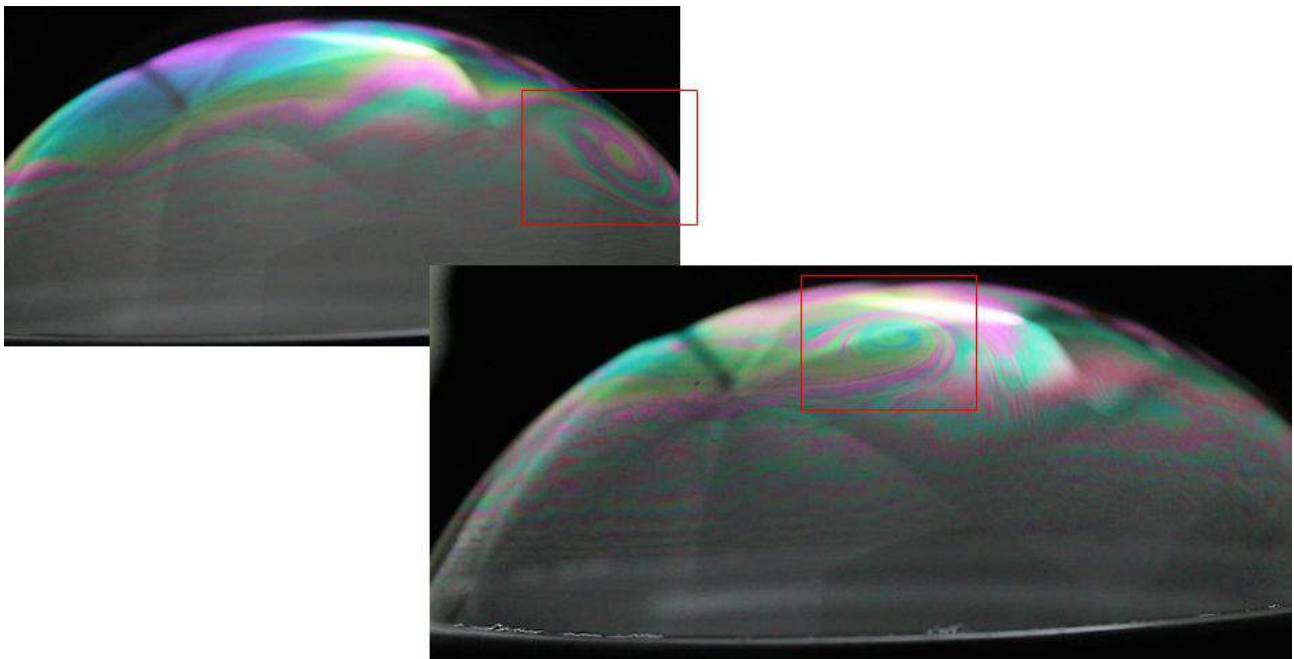


Figure 1 : Photographie de demi-bulles de savon

1. LA BULLE DE SAVON

1.1. STRUCTURE DES BULLES DE SAVON

1.1.1. L'INGRÉDIENT CLÉ : LE TENSIO ACTIF

Les bulles de savons correspondent à des fines pellicules d'eau. Elles se forment préférentiellement en présence de molécules amphiphiles (des tensioactifs) dans la phase aqueuse. Ces molécules présentes dans de nombreux produits, et notamment au sein des détergents, possèdent une structure particulière avec :

- une région polaire hydrophile (appelée tête) qui entre en interaction avec des molécules d'eau via liaisons hydrogène et/ou interaction de Van der Waals. Par exemple, dans l'exemple de la Figure 2, le groupement fonctionnel sulfate joue ce rôle,
- une région apolaire hydrophobe (appelée queue) qui ne pourra pas réaliser de liaisons hydrogènes ou tout autre interaction stabilisante avec l'eau.

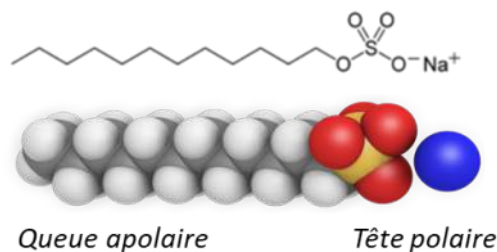


Figure 2 : Structure d'une molécule amphiphile : le laurylate de sodium

Pour nos expériences, nous utilisons les tensio-actifs issus de détergents (produit vaisselle Procter and Gamble®). Le produit est dilué de telle sorte que la masse de tensioactif corresponde à environ 1.5% du mélange.

1.1.2. UNE RÉDUCTION DE LA TENSION SUPERFICIELLE

Les tensioactifs favorisent l'apparition de bulles en réduisant la tension superficielle de la solution. La tension superficielle renvoie au degré de cohésion entre les molécules d'un fluide sur la surface que ce fluide partage avec un autre milieu. Il est quasiment impossible de faire une bulle avec de l'eau pure car sa tension superficielle est trop élevée.

Dans le cas d'un mélange eau/tensio-actif, les espèces amphiphiles ont leur tête hydrophile qui se place face aux molécules d'eau afin d'interagir avec elles alors que les queues apolaires sont dirigées vers l'air comme schématisé sur la Figure 3. La tension de surface devient alors beaucoup plus faible, il est possible d'augmenter la surface de contact liquide/air et de former des bulles.

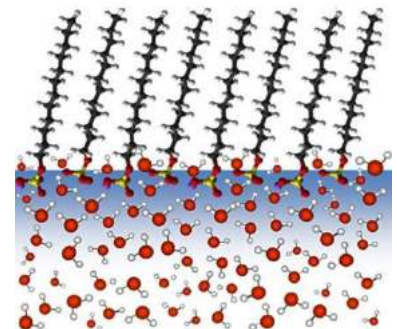


Figure 3 : Agencement des structures moléculaires à l'interface eau/air

Lorsqu'une bulle de savon se forme les tensioactifs emprisonnent une fine couche d'eau entre deux couches de molécules ayant leur tête polaire et hydrophile au contact de l'eau et maintenant l'air à l'écart de l'eau à l'intérieur comme à l'extérieur. L'eau maintenue entre deux monocouches de tensioactifs va se comporter comme une membrane et isoler l'air au sein de la bulle comme illustré sur la Figure 4.

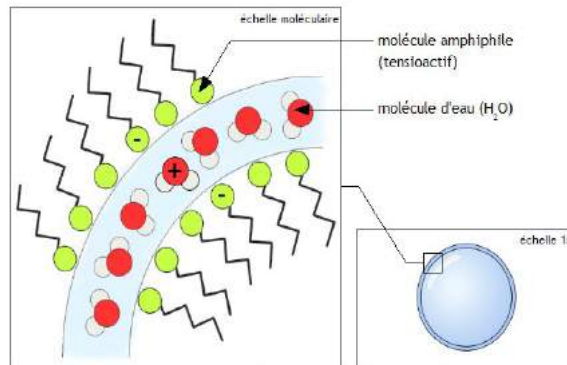


Figure 4 : l'organisation des tensioactifs au niveau de la membrane d'une bulle de savon. source : Centre Scientifique et Technique de la Construction <http://www.cstc.be>

1.1.3. DES BULLES VISQUEUSES

Les bulles de savon fabriquées uniquement à partir de détergents ont une durée de vie très courte (quelques dizaines de secondes). L'explication la plus commune est qu'elles se déforment sous l'effet de leur poids, la pellicule d'eau dans la partie supérieure s'amincissent jusqu'à la rupture. Afin d'obtenir des temps de « vie » plus longs, nous utilisons un agent épaississant du polyoxyde d'éthylène (1% environ de la masse du mélange). La solution est donc plus visqueuse, s'écoule moins, les bulles ont une durée de « vie » allongée.

1.2. LES IRISATIONS DES BULLES

1.2.1. PRÉSENTATION

Les irisations visibles à la surface d'une bulle sont dues à des interférences d'ondes lumineuses faisant intervenir toutes les longueurs d'onde du spectre visible. Néanmoins, ces couleurs ne sont pas dues à une décomposition de la lumière mais à une interférence entre le rayon lumineux réfléchi sur la bulle de savon et le rayon étant passé à l'intérieur de la pellicule de la bulle.

En effet, certaines ondes sont directement réfléchies par l'extérieur du film de savon qui constitue la surface de la bulle de savon, ces ondes repartent dans la direction opposée avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence α . D'autres ondes passent au travers de la couche externe du film de savon (phénomène de réfraction) et sont réfléchies par la paroi interne de la bulle. Elle sortent enfin dans l'air avec le même angle que les ondes qui ont été réfléchies directement sans pénétrer le film de savon (Figure 5). Ce phénomène d'optique qui consiste à réfléchir des ondes avec un angle réfléchi identique mais qui ont un trajet différent s'appelle une duplication de l'onde et résulte donc en 2 ondes de même fréquence et de même longueur d'onde mais qui sont déphasées l'une par rapport à l'autre car elles ne parcourent pas le même chemin optique. La duplication des ondes incidentes au film de savon est à l'origine de notre perception de différentes couleurs et donc des interférences.

1.2.2. CALCUL DU DÉPHASAGE À L'INFINI ENTRE DEUX ONDES :

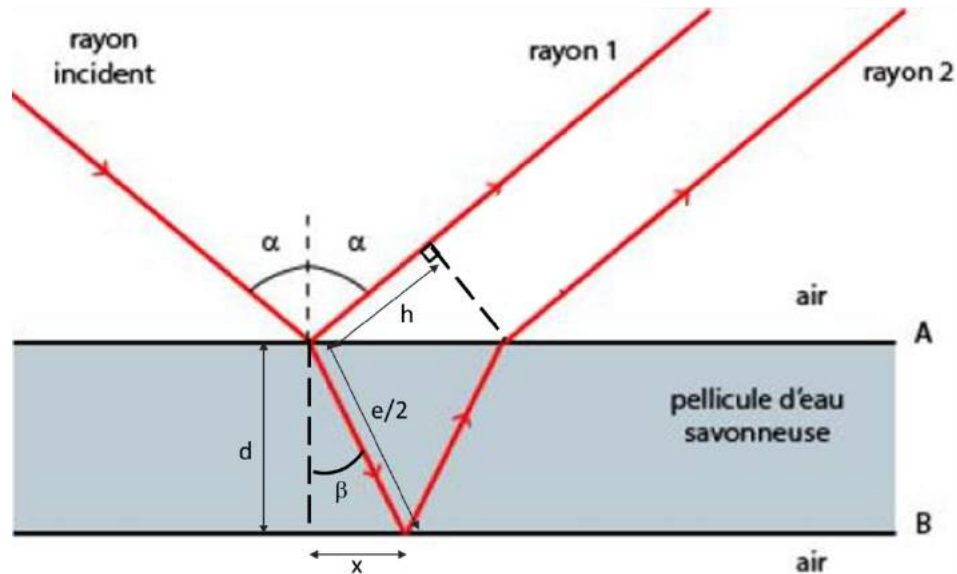


Figure 5 : Les deux chemins d'un rayon lumineux incident arrivant sur une pellicule d'eau savonneuse (adapté de : université en ligne <http://uel.unisciel.fr>)

Calcul de la différence de marche

La différence de marche entre les deux rayons correspond à la différence de chemin optique entre ceux-ci. Dans notre cas de figure, les rayons 1 et 2 présentent le même chemin jusqu'au point d'incidence, puis le rayon 1 parcourt la distance e dans l'eau savonneuse (indice n) et le rayon 2 parcourt la distance h dans l'air (indice 1). Ensuite leur chemin optique jusqu'à l'infini est identique.

La différence de marche δ s'exprime donc :

$$\delta = n.e - h$$

Loi de Snell – Descartes à l'incidence air/eau

$$\sin \alpha = n \sin \beta$$

Géométrie dans les triangles rectangles

- $\sin \beta = \frac{2x}{e}$
- $\sin \alpha = \frac{h}{2x}$
- $\tan \beta = \frac{x}{d}$

Expression de la différence de marche :

$$\delta = n.e - h = n \cdot \frac{2x}{\sin \beta} - 2x \sin \alpha$$

$$\delta = 2x \left(\frac{n}{\sin \beta} - \sin \alpha \right) = 2d \tan \beta \cdot \left(\frac{n}{\sin \beta} - \sin \alpha \right)$$

$$\delta = 2d \left(\frac{n}{\cos \beta} - \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\cos \beta} \right) = 2d \left(\frac{n}{\cos \beta} - \frac{\sin^2 \alpha}{n \cdot \cos \beta} \right) = \frac{2d}{\cos \beta} \left(n - \frac{\sin^2 \alpha}{n} \right)$$

$$\delta = \frac{2d}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} \left(n - \frac{\sin^2 \alpha}{n} \right) = \frac{2d}{\sqrt{n^2 - n^2 \cdot \sin^2 \beta}} (n^2 - \sin^2 \alpha) = \frac{2d}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} (n^2 - \sin^2 \alpha)$$

$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$$

À cette différence de marche, il faut ajouter une différence de marche supplémentaire due à la réflexion sur le dioptre inférieur de $\frac{\lambda}{2}$

$$\delta_{tot} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}$$

Calcul du déphasage :

Les deux rayons interfèrent à l'infini et sont caractérisés par une vibration de type sinusoïdale :

$$A_1 = A_0 \cos(\omega t)$$

On peut traduire la différence entre les deux ondes soit en considérant un déphasage φ , soit en considérant un retard de la seconde onde de Δt :

$$A_2 = A_0 \cos(\omega t + \varphi) = A_0 \cos(\omega(t + \Delta t))$$

Par identification : $\omega t + \varphi = \omega(t + \Delta t)$

$$\varphi = \omega \Delta t = \frac{2\pi c}{\lambda} \Delta t = \frac{2\pi \delta_{tot}}{\lambda}$$

$$\varphi = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \pi$$

1.2.3. DISCUSSION

Lorsqu'on étudie l'expression du déphasage entre les deux ondes, on s'aperçoit que celle-ci ne dépend effectivement que :

- de la longueur d'onde λ (ce qui explique pourquoi, en chaque point, certaines couleurs ne sont pas visibles car en interférence destructives et d'autre oui car interférant constructivement)
- de l'épaisseur d de la couche d'eau savonneuse (α est constant pour l'observateur, tout comme l'indice du milieu).

On peut relier cette grandeur aux observations expérimentales : Lorsqu'il n'y a aucune différence de température entre le pôle et l'équateur de la bulle les irisations s'organisent en bandes horizontales dont les couleurs se répètent. Chacune des bandes correspond à une couche de même épaisseur (voir photo 1, Figure 15 p.).

Les bandes du haut de la bulle sont plus larges et espacées que celles qui se trouvent à l'équateur de la bulle. En effet, grâce à la pesanteur, l'eau savonneuse de la bulle va se diriger vers le bas de la demi-bulle et donc faire augmenter l'épaisseur de la pellicule d'eau savonneuse de la bulle au niveau de l'équateur. Les variations d'épaisseur sont importantes vers l'équateur ce qui explique ces bandes rapprochées.

Enfin, quelques instants avant d'éclater, on voit sur la bulle que les bandes d'irisations du haut de la bulle sont devenues ternes et très larges. Ceci peut être relié au déphasage qui tend alors vers π , l'interférence est alors destructive.

2. LES CYCLONES

2.1. PRÉSENTATION

Un cyclone est le nom donné à une zone où une importante masse d'air entre en rotation autour d'une zone beaucoup plus petite de basse pression. Le flux d'air en rotation a un sens anti-horaire dans l'hémisphère nord et un sens horaire dans l'hémisphère sud comme n'importe quelle dépression. En somme, une dépression dont le diamètre est supérieur à 100 km et pouvant aller jusqu'à quelques milliers de kilomètres, ces grandeurs appartiennent à une échelle dite terrestre ou synoptique (car elle est visible à l'échelle du globe) ; l'appartenance de la dépression à cette échelle permet de la qualifier de cyclone.

Un cyclone est causé par une importante différence de pression entre le centre du cyclone (basse pression) et la zone autour du centre (haute pression). Cette augmentation du gradient de pression est à l'origine d'une forte circulation d'air vers le centre. C'est la force de Coriolis qui détermine le sens de rotation en fonction de l'hémisphère dans lequel on se trouve; la force de Coriolis étant due à la rotation de la Terre autour de son axe. A l'équateur la force de Coriolis étant nulle la formation de cyclones est peu probable.

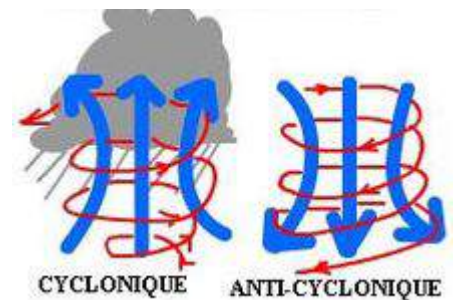


Figure 6 : Circulation verticale des vents dans l'hémisphère nord (source : Anticyclone, Wikipedia)

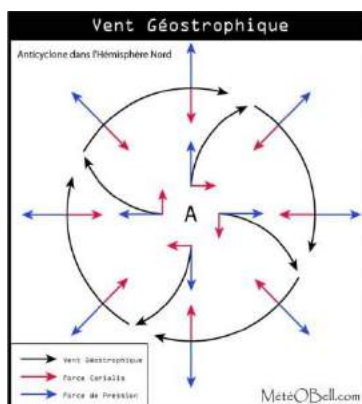


Figure 7 : Circulation des vents et des forces d'un cyclone dans l'hémisphère sud (source : Force de Coriolis, Meteobell)

En météorologie, la loi de Buys-Ballot affirme qu'un observateur situé dans l'hémisphère nord qui se place dos au vent a la dépression à sa gauche et l'anticyclone à sa droite. La position des zones de pressions est inversée dans l'hémisphère sud.

Comme les vents autour de la dépression dépendent de l'équilibre entre la force de Coriolis et le gradient de pression, ces vents sont qualifiés de géostrophiques et soufflent en théorie parallèlement aux isobares (ligne théorique reliant sur une carte météorologique les points d'égale pression). Les vents dans une dépression ressentent aussi la force de friction qui s'exerce près du sol en sens contraire au vent. Cette force oblige le vent à modifier sa direction en déviant légèrement vers le centre de la dépression. La force de friction entraîne donc une arrivée d'air vers le centre de la dépression par le bas qui doit être équilibrée par un mouvement ascendant caractéristique des systèmes cycloniques.

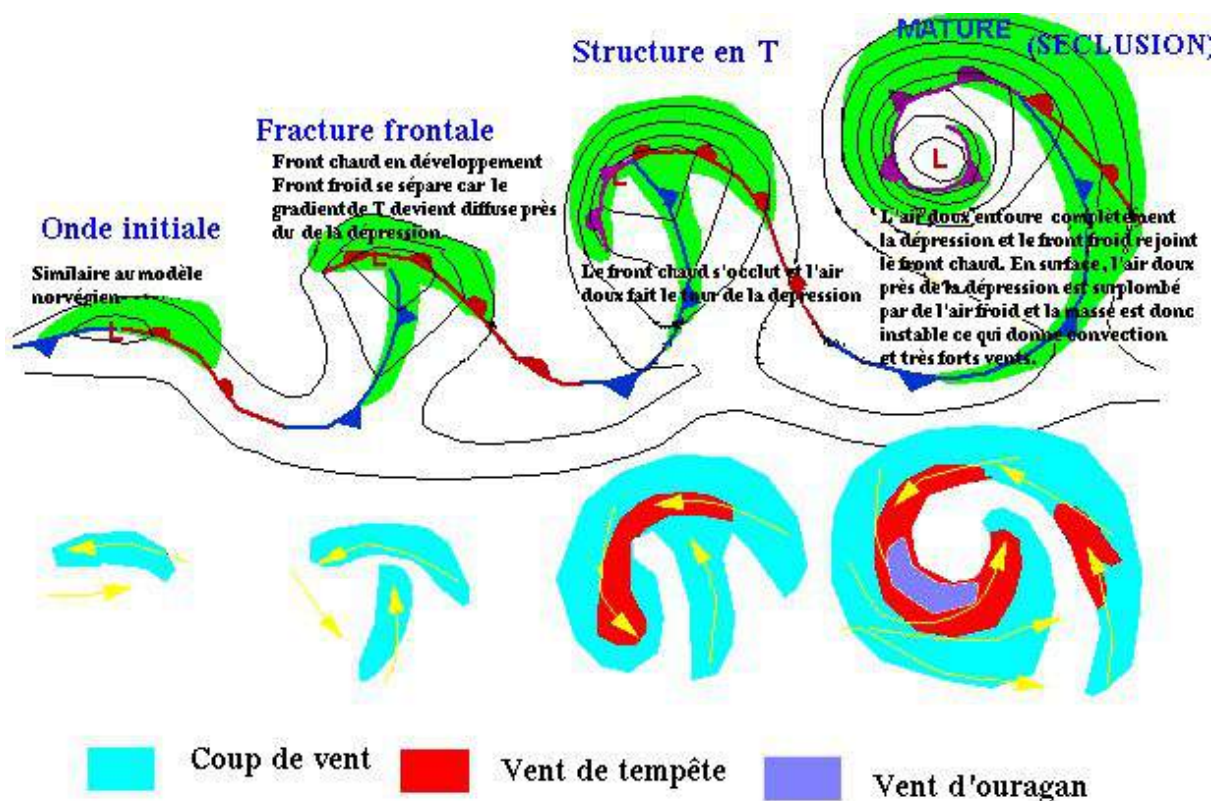


Figure 8 : Schéma explicatif de la formation d'un cyclone selon le modèle de Shapiro-Keyser (source : National oceanic and atmospheric administration)

2.2. UNE MODÉLISATION DIFFICILE

Malgré l'accumulation d'informations dans le domaine météorologique et l'emploi de supercalculateurs pour traiter des bases de données gigantesques, il est toujours extrêmement difficile, voire impossible, de prédire la trajectoire d'un cyclone sur des échelles de temps importantes (plus de quelques jours) car celui-ci se déplace en fonction de l'écoulement environnant et de la force de Coriolis. Afin de prédire les trajectoires des cyclones les météorologues utilisent des modèles statistiques qui prennent en compte les mouvements des cyclones précédents et se basent sur des postulats de climatologie voulant que les cyclones adoptent tous à peu près la même trajectoire à partir d'un même point donné.

On utilise aussi des modèles dynamiques qui sont des simulations prenant en compte les facteurs environnementaux à différentes échelles, malheureusement ces modèles sont difficiles à mettre en place car ils doivent prendre en compte une multitude de données, à commencer par celles du gradient de pression, du paramètre de Coriolis, de la force de friction,.... C'est pour cela que la zone étudiée prend toujours en compte une zone plus grande qui l'englobe. Enfin, l'atmosphère de la Terre comporte plusieurs couches (telles que la troposphère) aux propriétés physiques différentes (pression température) rendant la modélisation ardue. La modélisation par une bulle de savon simplifie d'ailleurs grandement l'étude du phénomène car il se limite à une étude bidimensionnelle (la surface de la bulle).

3. MODÉLISATION D'UN CYCLONE PAR UNE DEMI-BULLE DE SAVON

3.1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

3.1.1. VUE D'ENSEMBLE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Pour mettre en place notre projet et pouvoir l'expérimenter, il nous fallait un système permettant de :

- générer des demi-bulles de savon
- mettre en rotation les demi-bulles afin de simuler la rotation de la Terre
- chauffer la partie inférieure de la demi bulle afin d'obtenir un gradient de température d'apparence similaire à la Terre : entre Terre et équateur
- photographier/filmer nos bulles le mieux possible

PARTIE FIXE

Notre dispositif expérimental est assemblé à partir d'un **cadre en bois** (planches de bois de récupération que nous avons sciées et vissées).

Au centre de ce cadre, nous avons aménagé un emplacement pour une **perceuse** (seuls moteur et mandrin ont été conservés). Celle-ci est fermement maintenue entre des planches de bois. Nous avons par la suite ajouté de la mousse afin de mieux caler la perceuse en position verticale et éviter tout mouvement de celle-ci. Enfin, l'alimentation du moteur de perceuse est assurée par une source de tension variable qui nous permet de moduler la vitesse de rotation du système.

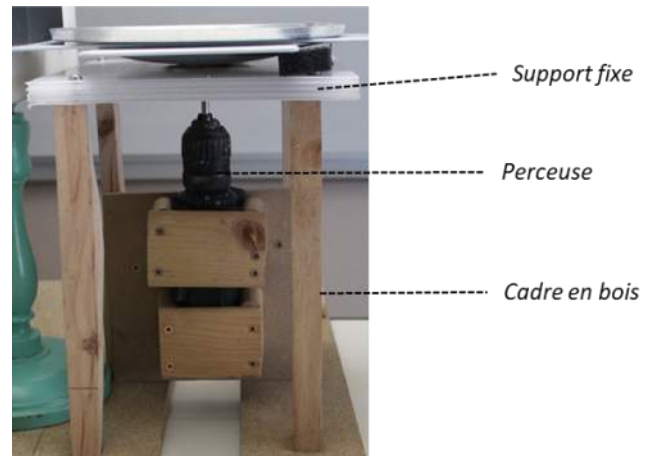


Figure 9 : La partie fixe du dispositif

Sur la partie supérieure, nous avons fixé horizontalement une plaque en polycarbonate à l'aide de vis qui servira de **support fixe**. Ce support est percé en son centre afin de laisser de la place à l'axe de la perceuse qui permettra de mettre en rotation notre demi-bulle. Un roulement à bille sert de liaison entre la plaque support et l'axe de la perceuse.

Notre idée initiale était de fixer une bassine en plastique qui servirait de réservoir d'eau pour faire un bain-marie qui lors de l'expérience permettrait de chauffer la plaque mobile. Nous envisagions

d'alimenter en continu le réservoir afin de maintenir la température constante.

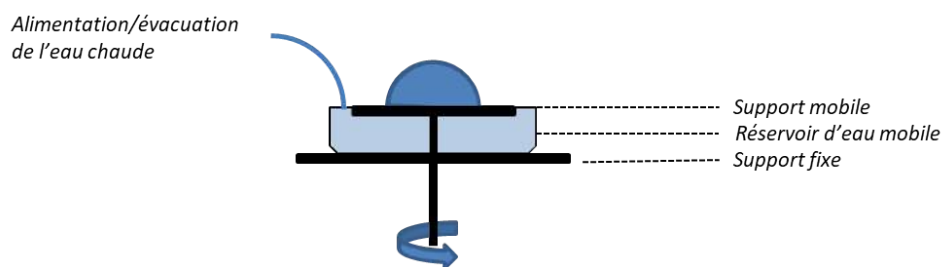


Figure 10 : Schéma de la partie mobile (idée abandonnée par la suite)

Néanmoins il nous a été impossible de maintenir le réservoir équilibré lors de la mise en rotation et les mouvements d'eau auraient été trop importants. Nous avons donc abandonné cette première approche.

Nous avons alors pensé à faire reposer des plaques métalliques sur notre dispositif. Celles-ci seraient préalablement chauffées à l'aide d'un décapeur thermique et maintiendraient une température suffisante pour l'exploitation de nos bulles pendant quelques minutes. Nous avons trouvé trois plaques métalliques (masse totale : 3,2 kg) que nous avons superposées et fixées sur l'axe de la perceuse. La liaison entre celles-ci et le support fixe est assurée par un roulement à bille afin d'éviter les frottements.

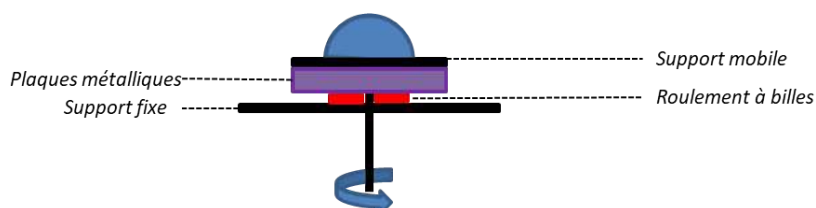


Figure 11 : Schéma de la partie mobile (assemblage final)

Enfin, nous créons nos bulles sur un **support mobile** (le fond d'un moule à tarte circulaire ou une assiette en terre cuite). Nous l'avons choisi dans un matériau susceptible de transmettre la chaleur et il peut accueillir le mélange liquide. Afin de former les bulles nous soufflons dans ce mélange grâce à un tube en plastique.

3.1.2. GÉNÉRATION DES BULLES

Pour former les bulles nous soufflons dans un tube en plastique dans le moule en métal circulaire déjà chauffé pour imiter le gradient de température de la Terre et nous mettons en rotation le dispositif grâce à un générateur de courant. Nous choisissons le couple de valeurs suivantes pour la tension et l'intensité ($U=0,2V$; $I=1,68A$) qui correspond à une vitesse d'environ un tour toutes les dix secondes.

La tension superficielle du liquide bien que amoindrie en présence de tensioactif cause la propension du fluide à réduire sa surface de contact avec un autre milieu, ici l'air. Étant donné que l'on souffle de l'air dans un faible volume de liquide disposé sur une plaque, l'air s'intercale entre le liquide et la plaque. Le volume occupé par l'air dépassant celui du liquide, celui-ci est forcé de modifier sa géométrie en veillant à réduire le plus possible l'interface entre les deux milieux. Or il se trouve que la géométrie permettant de réduire le plus possible la surface est de forme sphérique, expliquant ainsi la forme des bulles de savon. Dans notre expérience le récipient contenant le liquide n'est pas déformable, par conséquent la géométrie de la bulle est celle d'une demi-sphère.

3.1.3. TECHNIQUE DE PRISE DE VUE

Après avoir monté notre dispositif nous avons dû prendre en photo les bulles pour commencer l'exploitation de celles-ci. Cette étape fut compliquée car les irisations sont difficiles à voir sans un matériel spécifique. En effet, nous avons besoin impérativement d'un parapluie blanc car, sans, les irisations n'étaient qu'à peine visibles. Nous en avons donc commandé un. Entre temps, nous avons pu faire les réglages sur l'appareil photo : trouver le meilleur mode de photographie (temps de pose et ouverture), le meilleur angle de photo, l'éclairage nécessaire et suffisant.

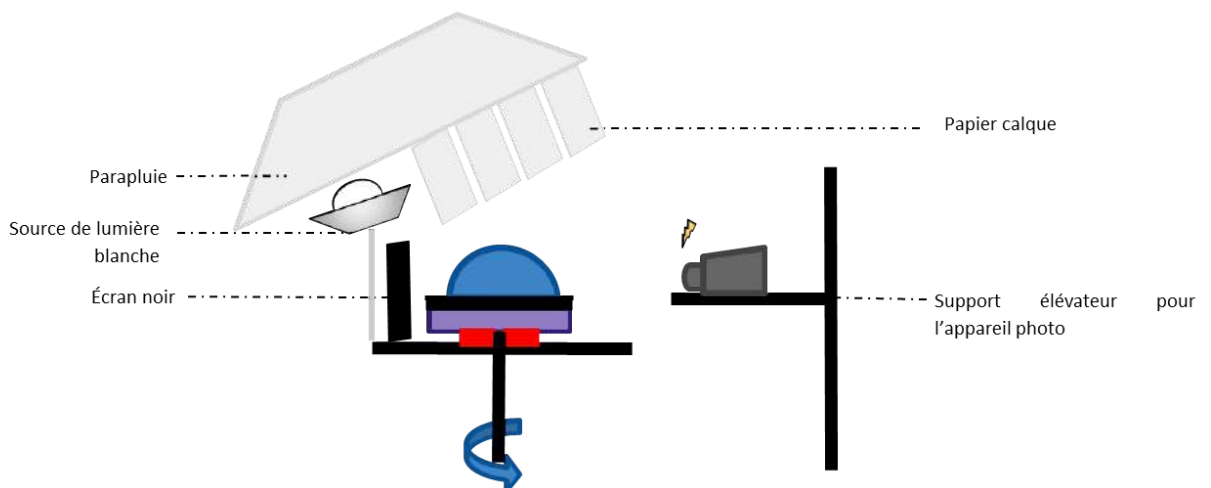


Figure 12 : Schéma du dispositif de prise de vues

Des lampes LED transmettant de la lumière blanche ont été placées derrière l'écran vers le haut, c'est à dire à l'intérieur et vers le haut du parapluie pour augmenter la diffusion de la lumière et du parapluie.

Grâce au parapluie, nous avons pu réellement commencer à visualiser les irisations sur la bulle, néanmoins celui-ci n'était pas suffisamment grand pour diffuser la lumière sur l'intégralité de la bulle. De plus, les baleines noires occultent une partie des irisations. Nous avons donc peint les baleines en blanc et scotché du calque au parapluie pour agrandir la surface de diffusion de la lumière émise par notre source. De plus, nos photographies sont réalisées avec, en fond, un écran noir car un fond noir améliore le contraste des irisations.



Figure 13 : Dispositif de prise de vues

Par la suite, nous avons voulu suivre les trajectoires des tourbillons à la surface de la bulle lorsque celle-ci est en rotation. Nous avons donc déplacé l'appareil photo au-dessus de notre dispositif expérimental pour pouvoir prendre des photos en centrant l'image sur le pôle de la bulle. Toutefois cette technique, même si elle nous permet d'observer la trajectoire des tourbillons de manière continue et ce même lorsque la demi-bulle est en rotation, comporte plusieurs inconvénients. Le principal est que, sur toutes les images obtenues, l'observation de la bulle est gênée par le reflet de l'appareil photo sur la bulle, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on prend des photos disposé à "l'équateur" de la demi-bulle de savon. Nous avons aussi eu l'idée de créer un bras mobile tournant autour du dispositif à la même vitesse que la bulle pour suivre les tourbillons et imiter le rôle d'un satellite géostationnaire. Néanmoins cette idée n'a pas pu être réalisable sur notre dispositif.

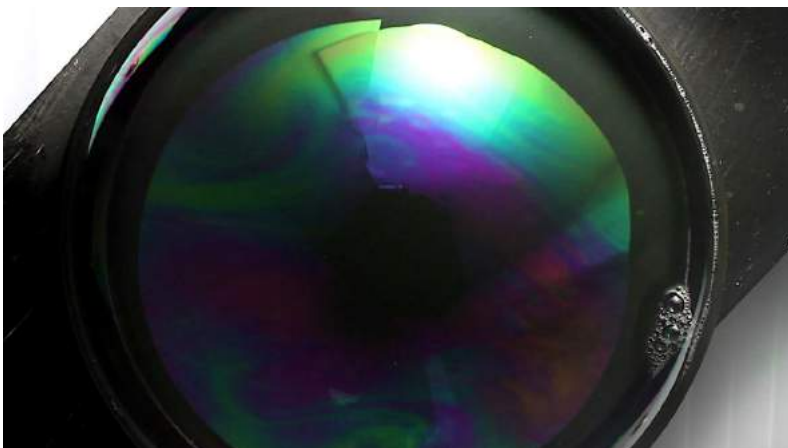


Figure 14 : essai de prise de vue par les pôles

3.2.MISE EN ÉVIDENCE ET INFLUENCE DU GRADIENT DE TEMPÉRATURE

De prime abord nous nous demandions quel était l'effet du chauffage sur notre bulle et si le système de rotation de cette bulle était nécessaire.

Nous avons tout d'abord mis en évidence la présence d'un gradient thermique au sein de la bulle grâce à une caméra thermique prêtée par un lycée voisin : la partie équatoriale est plus chaude que sur le pôle et nous voyons apparaître des panaches thermiques.

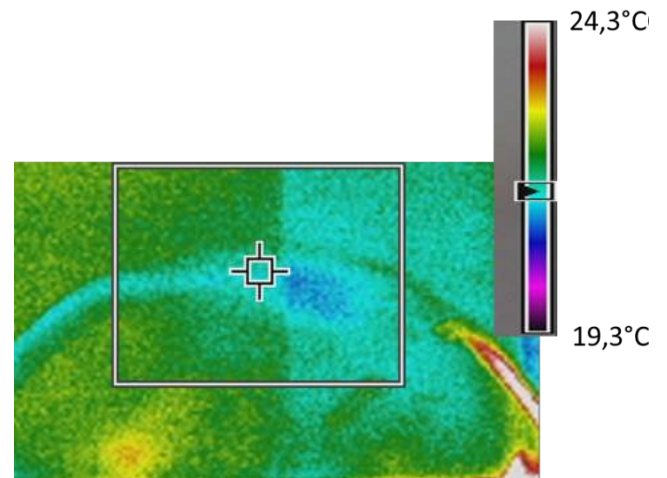


Figure 15 : Mise en évidence du gradient de température grâce à une caméra IR

Puis nous avons pris des photographies de nos bulles dans diverses conditions expérimentales (Figure 16) : Lorsqu'aucune source de chaleur n'est active, la bulle présente des irisations régulières et horizontales alors que lorsque la bulle est chauffée sur sa base, on aperçoit des panaches thermiques liés à des phénomènes de convection et l'apparition de tourbillons au niveau des pôles. La mise en rotation de notre dispositif (photo 3) en présence d'un gradient thermique permet l'observation des mêmes phénomènes. Par ailleurs, nous avons aussi contrôlé que ces tourbillons n'apparaissent pas lorsque le système est mis en rotation sans chauffage au niveau de l'équateur.

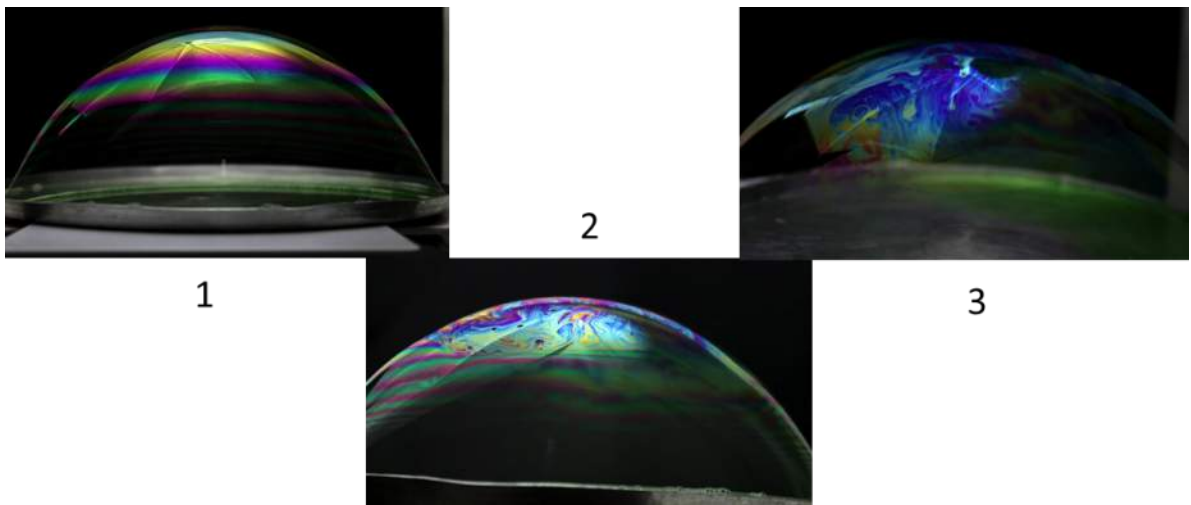


Figure 16 : Effets de la rotation et de la présence d'un gradient thermique. 1 : aucune rotation et température homogène ; 2 : aucune rotation et gradient de température ; 3 : système rotation et gradient de température

3.3. ÉTUDE D'ORDRES DE GRANDEUR

L'avantage de la demi-bulle pour schématiser un phénomène physique à l'échelle terrestre est que la bulle présente une forme sphérique et que sa couche superficielle est très petite par rapport à son volume intérieur tout comme l'est l'atmosphère terrestre par rapport au volume de la terre.

De plus lorsqu'on chauffe la demi-bulle à son équateur, on retrouve le gradient thermique naturel de la Terre qui est plus chaude en moyenne à l'équateur qu'aux pôles. Nous avons choisi une température sur la plaque d'environ 60°C afin de conserver la même amplitude thermique que sur Terre (40°C).

	Le cyclone	Notre dispositif
Diamètre	1,3.10 ⁷ m (Terre)	2,5 10 ⁻¹ m (plateau)
Épaisseur	1,0 à 1,5.10 ⁴ m (troposphère)	1,0x10 ⁻⁶ m
Vitesse de l'œil du tourbillon	2 à 5.10 ¹ m.s ⁻¹	5 à 10.10 ⁻² m.s ⁻¹
Gradient de température	Sur l'équateur ² : 25,5°C Sur les pôles ² : -15°C	Au contact de la plaque : 60°C Au pôle de la bulle : 21°C
Diamètre du cyclone et du tourbillon	3 à 5.10 ⁵ m	1,0x10 ⁻² m

Nous remarquons enfin que la vitesse de l'œil de nos tourbillons est naturellement bien inférieure à celle mesurée sur les cyclones (on estime à environ 1000 le rapport des vitesses) alors que le rapport entre les diamètres des deux phénomènes est de l'ordre de 10⁷.

² Robert A. Rohde pour Global Warming Art (https://www.notre-planete.info/terre/chiffres_cle.php)
Savonnez José !

3.4. ANALYSE DU DÉPLACEMENT D'UN TOURBILLON

Grâce au logiciel Latis Pro, nous avons effectué un relevé au cours du temps des positions d'un de nos tourbillons ainsi que celles de l'ouragan Harvey.

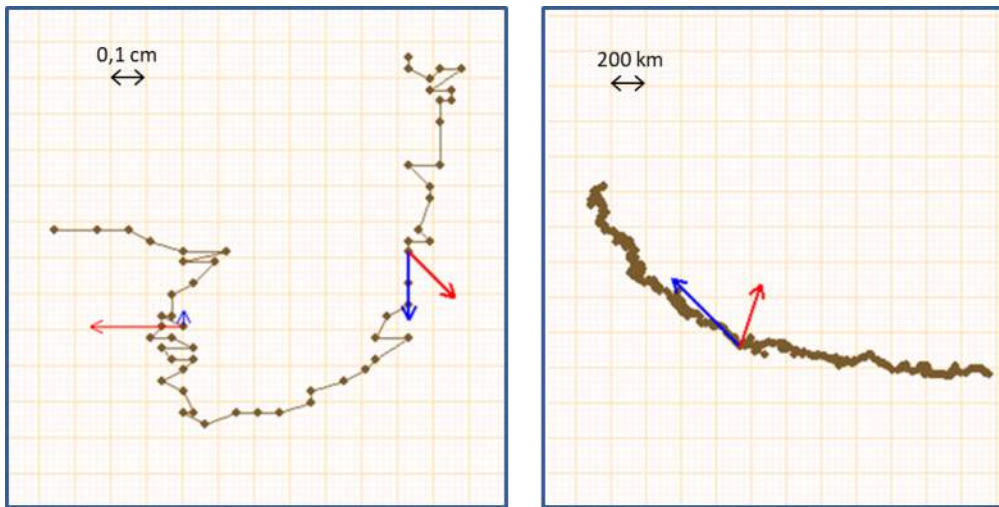


Figure 17 : Suivi chronophotographique d'un tourbillon issu de bulle (gauche) et de l'ouragan Harvey

On peut constater que la trajectoire du cyclone tout comme celle du tourbillon ne suit pas de règle déterminant son mouvement, ses déplacements sont donc relativement aléatoires, cette constatation



Figure 18 : prévisions des futurs déplacements d'un cyclone dans l'hémisphère nord Source : NOAA/NHC

explique le fait que les déplacements à venir du cyclone soient englobés dans un cône de prévisions visible sur la Figure 17. Ce cône de prévisions tente d'évaluer les possibles écarts de trajectoire du cyclone par rapport à sa trajectoire linéaire. Les mouvements du tourbillon et ceux du cyclone dépendent de l'écoulement de fluide qui les environne et exerce sur eux des forces qui modifient sa trajectoire. Par exemple on peut expliquer que dans l'Atlantique nord la plupart des cyclones aient le même trajet partant du tropique du Cancer au milieu de l'océan pour ensuite rejoindre les Caraïbes et le continent nord-américain comme José, Irma, Harvey, et ce, à cause des vents dominants dans l'Atlantique. Si ces cyclones remontent le long de la côte est des États-Unis, ils finissent alors par être emporté par le Gulf Stream et peuvent retraverser l'Atlantique en sens inverse comme ce fut le cas pour Ophelia qui est récemment passée au large de l'Irlande.

3.5. ANALYSE DU SENS DE ROTATION DES TOURBILLONS

En prenant contact avec Hamid Kellay, directeur de la thèse du LOMA nous avons pu être aiguillés sur une étude à faire entre le sens des tourbillons et le sens de rotation de la bulle. Pour trouver nos réponses, nous avons filmé une série de vidéos de bulle tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, puis dans le sens inverse. À la même vitesse de rotation de 0.5 tour par seconde et avec un gradient de température similaire, nous avons relevé le sens de rotation de nos tourbillons. Nous avons aussi effectué une expérience témoin (sans rotation) et les tourbillons présentaient des sens de rotation aléatoires.

Lorsque le dispositif est mis en rotation, les tourbillons se tournent majoritairement dans le même sens.

Ces tourbillons suivent donc la rotation de la bulle. Aussi, dans l'hémisphère nord de la Terre, les vents des dépressions tropicales tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud. Ces mouvements sont dus à la force de Coriolis qui exerce une force dirigée vers la droite sur l'hémisphère nord (sens antihoraire) et (sens horaire) pour l'hémisphère sud. Les tourbillons à la surface de la bulle sont analogues aux cyclones quant à leur sens de rotation comme le montre nos observations sur un échantillon de 50 tourbillons.

	Rotation sens horaire		Sans rotation		Rotation sens anti horaire	
	Hor.	Anti Hor.	Hor.	Anti Hor.	Hor.	Anti Hor.
Sens de rotation des tourbillons						
Nombre de tourbillons	42	8	24	26	8	42
Pourcentages	84%	16%	48%	52%	16%	84%

3.6. PROLONGEMENT DU PROJET

Une expérience supplémentaire que nous n'avons pas eu le temps d'effectuer serait d'étudier le profil des vitesses de nos tourbillons. En effet, il a été démontré que la vitesse de ceux-ci suit une loi simple de type :

$$v(t) = v_{max}(1 \pm \frac{t}{\tau})$$

avec : v_{max} , la vitesse maximale et τ un temps caractéristique.

Les études sur ces bulles (Figure 18) ont montré que les tourbillons visualisés présentent eux aussi la même caractéristique (avec des vitesses maximales et des temps caractéristiques bien sûr différents).

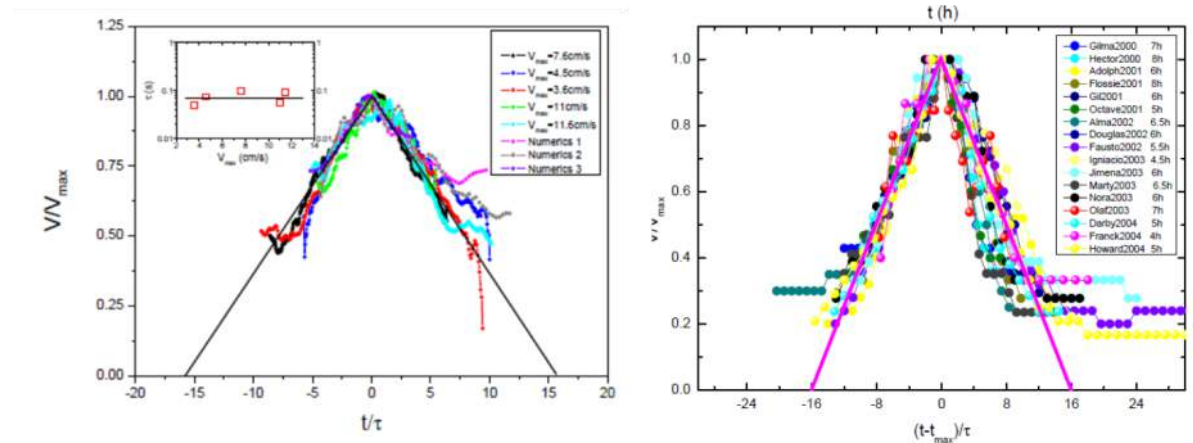


Figure 19 : tracés des lois de vitesse des tourbillons issus de bulles et de cyclone, thèse de T. Meuel, p.91&93

L'objectif à atteindre serait de faire un suivi chronophotographique de la vitesse de nos tourbillons et d'évaluer si elle suit la même loi que celle obtenue dans la thèse de T. Meuel.

CONCLUSION

Dans ce rapport, nous avons présenté la composition des bulles de savon et le processus de formation des cyclones afin de mettre en évidence des similitudes entre ces deux modèles. Cette proximité entre le modèle du tourbillon à la surface de la bulle et le cyclone nous ont conduit à chercher entre les deux phénomènes des points communs tels que la trajectoire, la durée de vie, la vitesse, conditions de formation.

L'intérêt de ces recherches réside dans le fait que les mathématiques du modèle physique sont trop ardues et impossible à résoudre de façon exacte. Tout modèle plus simple permettant d'expliquer la formation et le déplacement des cyclones est le bienvenu.

Nous avons donc au cours de ce projet fabriqué un système expérimental permettant de visualiser et donc d'étudier la formation de tourbillons dans des bulles de savon. L'étude de nos prises de vues a ensuite permis de retrouver des caractéristiques communes avec les tourbillons « géants » appelés cyclone. Des pistes d'améliorations existent : l'étude statistique des relevés expérimentaux, la modification des conditions opératoires (vitesse de rotation, diamètre de la bulle, gradient de température,...)

BIBLIOGRAPHIE

- H.Kellay, Conférence expérimentale filmée, Avril 2016, Université de Bordeaux, Cyclones en bulle, https://www.canal-u.tv/video/universite_de_bordeaux/cyclones_en_bulle.23080
- H.Kellay, Soap bubbles in a spin, Laboratory News, Avril 2014
- M. Montez, Bulles de Savon : Et si elles permettaient de prédire les cyclones, Sciences et Vie, n°1158, mars 2014
- T. Meuel, Cyclones dans une bulle de savon, thèse de doctorat, université de Bordeaux, 2014