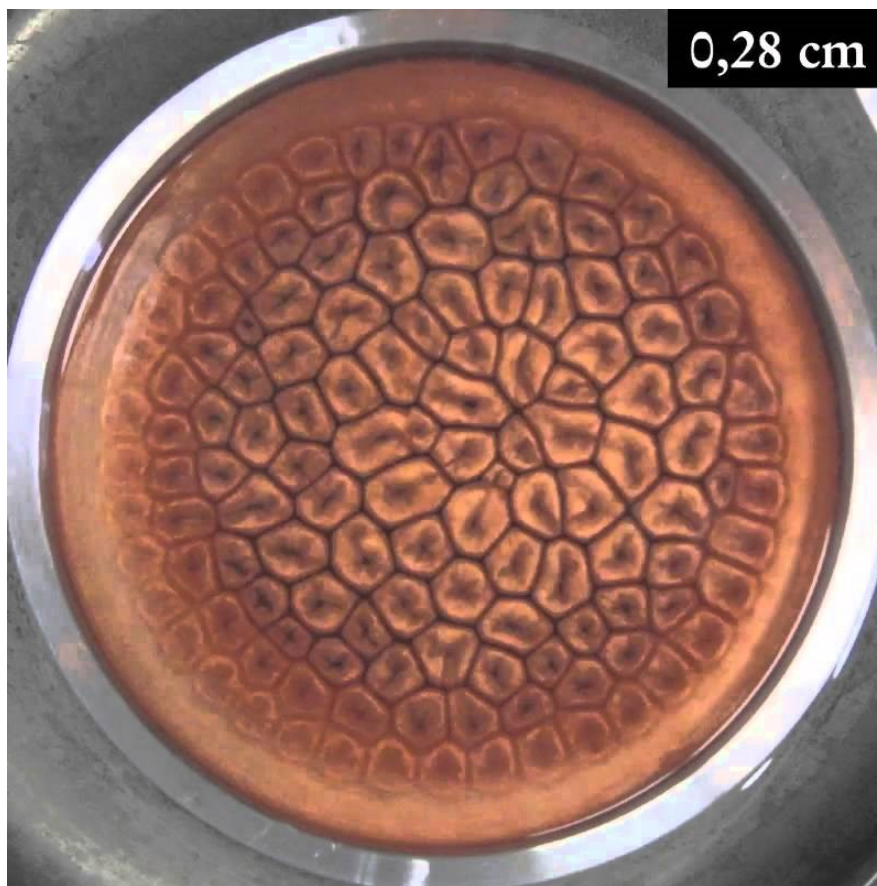


CONCEPTION ET REALISATION DE L'EXPERIENCE DE RAYLEIGH-BENARD-MARANGONI



Étudiants :

Francisco CAPITAO BARBOSA	Marceau DESMONS
Jean-Malo DREVON	Ziang GUAN
Shuaichen GUO	Achraf TALBY

Enseignant-responsable du projet :

Yacine BRAHAMI

Date de remise du rapport : 09/06/2018

Référence du projet : STPI/P6/2018 – 047

Intitulé du projet : Conception et réalisation de l'expérience de Rayleigh-Bénard-Marangoni.

Type de projet : *Expérimental*

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est, dans un premier temps, d'observer des cellules de convection dues aux phénomènes observés par Lord Rayleigh, M. Bénard et M. Marangoni. Puis dans un deuxième temps, le but est d'étudier expérimentalement les paramètres caractéristiques d'apparition de ces cellules, et de comparer nos résultats avec les valeurs théoriques attendues.

Mots-clefs du projet :

- *Convection*
- *Rayleigh-Bénard-Marangoni*
- *Cellules de Bénard*

Table des matières

Introduction	4
1 Méthodologie, organisation du travail	5
2 Travail réalisé et résultats	6
2.1 Phénoménologie	6
2.2 Protocole expérimental et prévisions expérimentales :	7
2.3 Expériences et analyse des résultats :	9
2.3.1 Expérience du 22/05 :	9
2.3.2 Expérience du 29/05 :	10
2.3.3 Expérience du 05/06 :	10
2.3.4 Expérience du 07/06 :	10
2.3.5 Analyse des résultats :	11
Conclusion et perspectives	12
Bibliographie	14
A Matériel utilisé	15

Introduction

Nous évoquons souvent la température, qui se manifeste physiquement par la sensation de chaud et de froid. Dès qu'il y a une différence de température, nous devons aborder le transfert de chaleur, le phénomène qui est au cœur de notre vie quotidienne. Parmi les différents types de transfert de chaleur, la convection est le type de mouvement de fluide le plus fréquent dans l'univers. L'étude de la convection est par conséquent un sujet majeur dans la recherche scientifique et pour les applications industrielles.

Historiquement, on fait remonter les études sur la convection aux travaux de Henri Bénard, physicien français, qui rédige en 1901 sa thèse nommée « *Les Tourbillons cellulaires dans une nappe liquide propageant de la chaleur par convection en régime permanent* ».

Celui-ci a observé le comportement d'une fine couche d'huile de baleine maintenue dans un récipient suspendu au-dessus d'un bain d'eau bouillante à une température approximative de 100°C . L'extension horizontale du récipient était beaucoup plus grande que sa profondeur et Bénard observa la formation, loin des bords du récipient, de cellules de convection de forme hexagonale. Il remarqua également que le fluide chaud montait au centre des cellules et descendait le long des contours hexagonaux et attribua la formation de ces structures aux variations de densité avec la température.

En 1916, Lord Rayleigh, physicien anglais, appuie cette interprétation par l'analyse d'une couche fluide horizontale infinie placée entre deux surfaces rigides maintenues à des températures différentes.

Lord Rayleigh (1842 – 1912) et Henri Bénard (1874 – 1939) sont les deux physiciens à l'origine de la découverte et de l'analyse des cellules de convections. Le premier s'est occupé de la partie théorique et le second de la partie expérimentale de l'expérience. Cette convection naturelle, appelée instabilité de Rayleigh-Bénard, est une instabilité thermo-convective susceptible de se développer dans un milieu fluide soumis à un gradient de température déstabilisant. Elle se traduit par la formation de structures convectives, les cellules de Bénard.

Nous côtoyons ce phénomène dans notre quotidien sans nous en rendre compte parfois. En effet, l'exemple le plus récurrent est l'observation des cellules de Bénard sous la forme de figures dans une tasse remplie de café après l'avoir laissé reposer pendant un certain temps. Il existe bien évidemment d'autres cas non perceptibles dans la vie de tous les jours comme les convections ayant lieu dans le noyau terrestre ou dans l'atmosphère terrestre par exemple.

Par ailleurs, nous souhaitons remercier notre encadrant M. BRAHAMI pour sa disponibilité, ses bons conseils, ses connaissances sur le sujet et son assistance qui ont assuré le bon déroulement de notre projet. Nous remercions également l'ensemble des encadrants ayant apporté leur aide pour nous procurer du matériel et ayant donné de leur temps pour mener à bien le projet.

Chapitre 1

Méthodologie, organisation du travail

Au cours du quatrième semestre, chaque élève a choisi un projet physique dont la note sera comptée dans son deuxième bloc. Chaque semaine, nous passons une heure et demie en compagnie de notre encadrant M. BRAHAMI Yacine.

Lors de la première séance, notre encadrant nous a présenté le principe du projet et de l'expérience dans sa globalité. Ainsi, durant les premières semaines, nous avons pour travail d'effectuer des recherches dans le but de trouver le plus d'informations possibles sur l'expérience de Rayleigh-Bénard mais également sur son application.

Après avoir assimilé le sujet, nous avons commencé à rédiger les premiers rapports, sous la demande de notre professeur, contenant l'historique de l'expérience et le listing du matériel utilisé. A côté de cela, nous avons également commencé à effectuer nos calculs théoriques qui nous ont permis de réaliser le projet en prévoyant la température adéquate permettant de visualiser les cellules de Bénard attendues.

Après avoir réalisé l'expérience à maintes reprises, nous avons défini un plan qui a été validé par notre professeur tout en se répartissant les tâches quant à la rédaction du rapport final. Pour rester en contact pendant ce travail, nous avons créé un groupe Facebook afin de nous poser des questions et de s'entraider. Nous avons créé un Google drive afin d'avoir une vue d'ensemble de l'avancement de notre projet. La communication au sein du groupe était ainsi devenue fluide, ce qui nous a permis de conclure le projet dans les temps.

Chapitre 2

Travail réalisé et résultats

2.1 Phénoménologie

L'expérience est simple dans sa réalisation. Un liquide est placé dans un récipient de sorte à ce qu'il y ait un solide en dessous et un fluide au-dessus. Le liquide doit alors être chauffé. Au départ lorsque le gradient est petit, le mode de transfert est la conduction. En effet, la chaleur est transférée sans déplacement de matière mais seulement par la diffusion. Puis, lorsque l'on chauffe plus, les particules de fluide se mettent à bouger. Il y a une auto-organisation de l'écoulement que l'on appelle cellule de Bénard. Sous l'effet de la chaleur de la paroi inférieure, les particules fluides à proximité voient leur masse volumique décroître et ont donc tendance à remonter vers la paroi supérieure sous l'effet de la poussée d'Archimède. Contrairement à cela, les particules situées à proximité de la paroi supérieure voient leur masse volumique augmenter et ont ainsi tendance à redescendre sous l'effet de la pesanteur.

A partir d'un certain seuil du gradient thermique $\Delta T = T_1 - T_0$ ce mouvement de particules se présente sous la forme de rouleaux thermo-convectifs résultants de la déformation du milieu fluide.

Ainsi un cycle se crée :

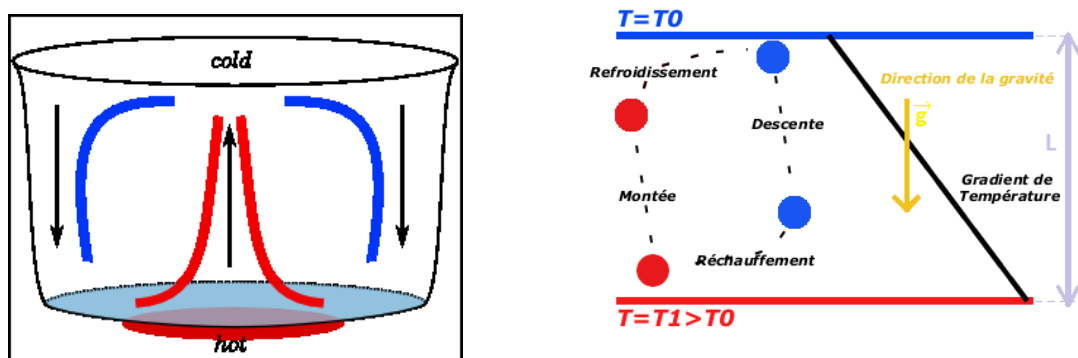


FIGURE 2.1 – Schémas simplifiés des rouleaux thermo-convectifs

Ce phénomène est régi par un unique nombre adimensionnel appelé nombre de Rayleigh. Ce nombre noté Ra compare le flux convectif et le flux conductif. En effet, pour un Ra suffisamment grand, l'état conductif (vitesse du fluide nul, distribution linéaire de température) perd sa stabilité pour laisser place à un mouvement de convection.

Ce nombre est :

$$Ra = \frac{\text{poussée d'Archimède}}{\text{Dissipation}} = \frac{L^3 g \beta \Delta T}{\nu \alpha}$$

Avec :

- g : Accélération de la pesanteur. [m/s^2]
- L : Longueur caractéristique qui correspond à la hauteur du liquide dans le récipient. [m]
- ΔT : différence de température entre la paroi basse du récipient et la température extérieure. [$^{\circ}C$]
- ν : Viscosité cinématique. [m^2/s]
- α : Diffusivité thermique. [m^2/s^{-1}]
- β : Coefficient de dilatation thermique volumétrique. [$^{\circ}C^{-1}$]

C'est le paramètre qui déterminera la stabilité du système. En effet, la stabilité du problème est pilotée par ce nombre. Plus la température de la plaque inférieure sera élevée, plus le nombre de Rayleigh sera grand. Pour des valeurs de Rayleigh suffisamment petites, le système est stable et on retrouve la solution de conduction. En revanche, pour un nombre de Rayleigh suffisamment grand, le système devient instable et on observe la formation des cellules de Bénard. Les cellules de convection sont stables, et leur sens de rotation est inverse pour deux cellules contigües dans le sens horizontal. Dans une cellule le liquide tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, et dans le sens inverse à l'intérieur de la suivante.

Dans notre expérience, qui n'utilise qu'une seule paroi (c'est à dire que le liquide sera en contact d'un côté de la paroi chauffée et de l'autre côté de l'air libre), lorsque le nombre de Rayleigh dépasse le seuil critique de $Ra = 1101$, le système devient instable et on observe la formation des cellules de Bénard.

Néanmoins, dans le cas où l'expérience se déroulerait avec deux parois, le seuil critique qui devrait être pris en compte serait de $Ra = 1708$.

2.2 Protocole expérimental et prévisions expérimentales :

Le protocole de l'expérience de Rayleigh-Bénard est défini ainsi :

1. Nous plaçons l'eau dans la casserole à une hauteur choisie en y ajoutant le traceur passif.
2. Nous disposons la casserole sur la plaque chauffante en mettant entre les deux le thermocouple. (Dans le cas de la plaque chauffante MR hei-tec, le thermocouple est directement intégré dans la plaque).
3. Nous étalonnons la réponse de la plaque avec son bouton.
4. Pour I fixé, nous cherchons un ΔT qui obtient les cellules de Bénard.
5. Nous cherchons le nombre Rayleigh critique correspondant à ces paramètres afin de vérifier s'il correspond à la valeur théorique.

De plus, plusieurs prévisions expérimentales ont été émises avant l'exécution de l'expérience :

- Le nombre de Rayleigh critique que l'on devait trouver grâce à l'expérience est 1101. Cependant, nous ne nous attendions pas à trouver ce nombre exact mais un nombre qui s'en rapproche. En effet, la qualité du matériel, les effets de bords, les erreurs des appareils de mesures et les erreurs humaines devaient avoir des conséquences sur notre résultat.
- La forme exacte des cellules qui apparaissent ne peuvent pas être prévu car, en réalité, nous ne pouvons pas négliger les effets de bords de la casserole mais aussi des défauts de cette dernière (sauté, surface non lisse). Nous nous attendons seulement à voir des polygones plus ou moins réguliers en fonctions des différents défauts du matériel.
- Nous ne pouvons pas du tout prévoir le sens de rotation des rouleaux car il dépend de variations microscopiques des conditions initiales.

Résultats attendus

Nous utilisons la formule $Ra = \frac{L^3 g \beta \Delta T}{\nu \alpha}$. On veut trouver le ΔT qui correspond à $Ra = 1101$.

Nous savons que :

- g (Accélération de la pesanteur) = $9,81 m/s^2$
- ν (Viscosité cinématique) = $1,01 mm^2/s$
- β (Coefficient de dilatation thermique volumétrique) = $2,06 * 10^{-4} C^{-1}$

Pour trouver la valeur de α (Diffusivité thermique), on utilise la formule $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$.
Nous trouvons que :

- c (Chaleur spécifique) = $4181 J/kg^\circ C$
- λ (Conductivité thermique) = $0,6 W K^{-1} m^{-1}$
- ρ (Viscosité cinématique) = $1 kg/L^3$

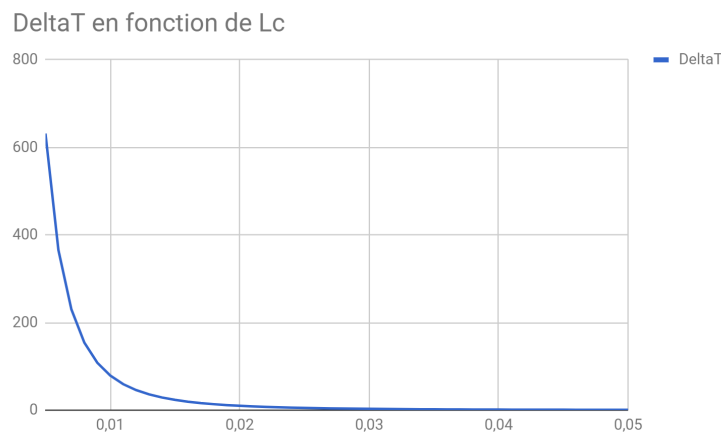


FIGURE 2.2 – Courbe représentant les variations du ΔT en fonction de la hauteur

Lors de l'expérience, nous mesurons L (Longueur caractéristique) = $0,015m$. Nous appliquons le calcul de ΔT et nous obtenons $\Delta T = 23,40^\circ C$. (Le ΔT change lors de l'expérience

du aux variations de la longueur caractéristique dues à une approximation trop éloignée de la réalité, d'une mauvaise lecture du ménisque ou encore du fait que le liquide s'évapore).

2.3 Expériences et analyse des résultats :

2.3.1 Expérience du 22/05 :

Nous choisissons de mélanger l'eau avec du cacao en tant que traceur. En effet il est impossible d'observer le phénomène avec uniquement de l'eau. Malheureusement, nous n'avons observé aucun phénomène de convection. Nous avons déduit que cela est dû au sucre en trop grosse quantité dans le cacao. En effet nous avons pensé qu'en chauffant de l'eau chocolatée, le sucre a fondu et a modifié les propriétés du liquide (comme par exemple sa chaleur spécifique ou encore sa viscosité cinématique). De plus n'ayant pas une plaque assez précise nous avons largement dépassé le ΔT recherché ce qui a provoqué l'évaporation du liquide.

Cependant, nous avons observé le phénomène de cellules en laissant reposer notre casserole à côté de la plaque chauffante. Nous en déduisons qu'il nous faut une plaque plus précise et qui monte à des températures moins basses que celles d'une plaque normale.



FIGURE 2.3 – Cellules de Bénard

2.3.2 Expérience du 29/05 :

Cette fois, nous disposons d'une plaque MR hei-Tec du laboratoire de chimie. Nous pouvons donc évaluer la température et la régler au degré près. Pour le traceur, nous avons opté pour le poivre en espérant que cela puisse être plus concluant que le chocolat en poudre. Cependant le poivre est trop lourd et crée des amas au fond de la casserole. Nous arrivons néanmoins à observer des particules de poivre qui se mettent en mouvement et qui suivent une trajectoire de cellule de convection. Nous ne pouvons pas conclure car nous n'observons pas à observer le phénomène comme nous souhaitons le faire.



FIGURE 2.4 – Montage Expérimental

2.3.3 Expérience du 05/06 :

Nous décidons d'essayer l'expérience avec du poivre plus fin. Nous observons parfois des particules de poivre bouger dans l'eau chauffée mais, tout comme la semaine précédente, il ne s'agit de rien de concluant. Nous pensons que les cellules de Bénard sont présentes mais nous ne pouvons les observer car le poivre (même fin) modifie les propriétés de l'eau. Nous essayons alors un autre chocolat en poudre, de marque ovomaltine. Des amas se créent à la surface. Nous n'observons pas de cellules. Nous augmentons de manière significative le ΔT pour essayer d'observer un phénomène. Malheureusement, l'eau chocolatée bout avant que nous puisse voir les cellules.

2.3.4 Expérience du 07/06 :

Ce jour-ci a été notre dernière occasion d'obtenir des mesures. Ne comprenant pas pourquoi nous n'observons pas de cellules, nous décidons de changer de méthode d'expérimentation. Nous choisissons comme traceur le chocolat en poudre car c'est le seul avec lequel nous avons réussi à observer un phénomène significatif. Nous chauffons le mélange à 90°C sur la plaque puis nous enlevons la casserole et la posons sur le plan de travail. Le but étant de reproduire ce que nous avons réussi à faire par hasard lors de la première expérience. Encore une fois le phénomène n'apparaît pas. Nous changeons plusieurs fois de hauteur de l'eau. Nous essayons 5mm , 15mm , 40mm mais rien ne se produit. Nous n'avons donc pas réussi à calculer le Rayleigh critique.

2.3.5 Analyse des résultats :

Lors de l'expérience nous avons remarqué des différences entre nos résultats et les résultats attendus. En effet, nous avons remarqué que les valeurs obtenues n'étaient pas proches de celles attendues, notamment pour le ΔT prévu.

Ces différences dans nos résultats peuvent s'expliquer de multiples manières.

Tout d'abord, il y a une incertitude sur les valeurs que nous avons mesurées avec nos expériences. En effet, l'apparition du phénomène se fait théoriquement quand le Rayleigh atteint le nombre critique ; 1101 dans notre cas. Or, nous ne pouvons remarquer cette instabilité immédiatement. Par exemple, nous devons remuer l'indicateur dans le cas d'utilisation de particules (chocolat, poivre) afin de mélanger celui-ci de manière homogène dans l'eau. Mais cette technique implique un mouvement de ces particules, ce qui rend plus difficile de saisir le moment précis où le nombre critique $Ra = 1101$ est dépassé.

De plus, les données enregistrées peuvent ne pas être aussi précises que ce qui est espéré. Tout d'abord, la plaque chauffante est extrêmement précise mais reste approximative, car le temps de réponse est, bien que naturel lorsque l'on chauffe une plaque, trop long pour faire l'expérience dans d'excellentes conditions : si l'on commence à chauffer la plaque jusqu'à une température donnée, l'air située au-dessus de la surface de l'eau va se retrouver chauffée du fait du phénomène de conduction. De même l'utilisation de deux moyens différents (un thermocouple et un thermomètre donnant la température de la plaque chauffée) ajoute une source d'erreur.

Un autre problème venant de l'expérience est l'évaporation de l'eau : lors de l'utilisation d'une longueur caractéristique trop faible, le ΔT exigé pour voir apparaître les cellules de convection implique à l'eau de chauffer jusqu'à sa température d'évaporation. Or si l'évaporation est trop importante, la longueur caractéristique peut varier ce qui fausse tous les calculs précédemment employés. Autre facteur important, les longueurs caractéristiques à partir desquelles ce phénomène d'évaporation apparaît sont situées entre 1 et 2cm. Or la variation d'un seul millimètre change de plusieurs dizaines de °C le ΔT dans cette zone de longueur caractéristique.

D'autres imprécisions ont pu également intervenir. Tout d'abord, le calcul du ΔT théorique est dû à de très nombreux termes, leur imprécision influe sur cette valeur tout autant que la longueur mesurée influe de manière cubique sur le calcul.

Enfin, la théorie s'applique en faisant beaucoup d'hypothèses, comme le fait que l'indicateur est passif ou que la plaque est à la même température que la casserole, et que les effets des bords de la casserole sont négligeables. Autant d'hypothèses rendent nos prévisions théoriques trop éloignées de la réalité de l'expérience.

Conclusion et perspectives

Notre projet se base sur une expérience qui s'est avérée être plus compliquée à mettre en place que ce qui était prévu. Nous n'avons ainsi pas eu le temps d'entreprendre tout ce que nous avions prévu. Nous avons souhaité dans un premier temps réaliser l'expérience avec d'autres fluides pour mieux comprendre l'influence de ceux-ci dans le phénomène mais au vu de la difficulté d'obtenir un résultat satisfaisant avec de l'eau, nous ne nous sommes pas penchés là-dessus. De plus, il était très compliqué de connaître à l'avance toutes les propriétés de fluides autres que l'eau, comme par exemple le lait qui est totalement différent d'une marque à l'autre et, de surcroît, sa nature organique rend son comportement très variable.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que la réalisation de ce projet nous a permis d'étudier un phénomène qui a amélioré notre compréhension des phénomènes physiques du quotidien. Nous nous sommes aperçus que, parfois, certaines découvertes se font par hasard (nous faisons référence au moment où l'on a obtenu des cellules de Bénard sans pour autant l'avoir fait exprès). Nous émettons tout de même l'hypothèse que les cellules de Bénard étaient bel et bien présentes à plusieurs reprises lors de nos expériences mais nous étions simplement dans l'incapacité de les apercevoir. Une caméra thermique aurait pu confirmer cela, mais cet équipement est extrêmement coûteux et cela ne correspond pas au budget fixé.

Domaines d'application

Les applications de notre expérience sont multiples. En partant de son café matinal et en passant par des phénomènes de convection en météorologie plus complexes, l'instabilité de Rayleigh Bénard peut être observée couramment dans la vie quotidienne. Son étude est une des bases de la mécanique des fluides.

Enrichissement personnel

Nous avons pris beaucoup de plaisir à travailler ensemble sur ce projet. En effet, nous avons eu à étudier et à réaliser une expérience qui était auparavant inconnue pour nous tous. Cela nous a permis de développer non seulement notre sens critique mais aussi notre capacité à prédire et effectuer des calculs expérimentaux dans le but de réaliser une expérience scientifique par nous-même. Nous avons par ailleurs découvert de nouvelles personnalités qui ont grandement contribué à la science comme par exemple Lord Rayleigh et M. Bénard.

De plus, ce projet nous a permis d'étendre nos connaissances sur certains fluides et leurs propriétés mais également sur certains appareils scientifiques utilisés non seulement par notre groupe mais aussi par le groupe voisin effectuant son projet à la même heure que nous.

En somme, ce travail en groupe a été très enrichissant puisque c'était l'une des premières fois que nous devions travailler avec des personnes que nous ne connaissions pas. Bien que

cela n'était pas une barrière, nous avons dû apprendre à se connaître d'autant plus que nous n'avons pas tous les mêmes origines.

Bibliographie

- [1] P.G.DRAZIN, W.H.REID *Hydrodynamic Stability (Second Edition)*, Cambridge University Press, 605 pages (2004).
- [2] BENOÎT TROUETTE, "*Instabilités de Rayleigh-Bénard-Marangoni, induites par évaporation, en régime transitoire. Applications aux solutions polymères.*", Mécanique [physics.med-ph]. Université Paris Sud - Paris XI, Français. <tel-00598835> (2010).
- [3] PAUL MANNEVILLE, "*Rayleigh-Benard convection, thirty years of experimental, theoretical, and modeling work*", Laboratoire d'Hydrodynamique, Ecole polytechnique F-91128 Palaiseau cedex, France. e-mail : paul.manneville@ladhyx.polytechnique.fr
- [4] J.PANTALONI, P.CERISIER, R.BAILLEUX, C.GERBAUD, "*Convection de Bénard-Marangoni ; un pendule de Foucault ?*", Journal de Physique Lettres, 1981, pages 147 à 150.
- [5] M.MEDALE, P.CERISIER, "*Structures et patterns d'écoulements thermo-convectifs de type Rayleigh-Bénard-Marangoni*", Université Aix-Marseille et IUSTI, Technopole de Chateau-Gombert, 13453 Marseille Cedex 13.
- [6] A.EL GALLAF, "*Etude de la dynamique non-linéaire des écoulements chauds et soumis à des champs magnétiques*", Ecole Centrale de Lyon. Français <tel-00569060> (2009).
- [7] P.ASSEMAT, "*Dynamique non-linéaire des écoulements confinés : application à l'instabilité de Marangoni-Bénard et aux écoulements entre surfaces texturées*", Université de Toulouse (2008).
- [8] LIEN INTERNET, https://en.wikipedia.org/wiki/Marangoni_effect (Valide à la date du 07/06/2018)
- [9] LIEN INTERNET, https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh%E2%80%93B%C3%A9nard_convection (Valide à la date du 07/06/2018)
- [10] LIEN INTERNET, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Convection> (Valide à la date du 07/06/2018)
- [11] LIEN INTERNET, <http://www.psc.edu/science/Gunton/gunton.html> (Valide à la date du 19/03/2018)
- [12] LIEN INTERNET, <http://home.iitk.ac.in/~sghorai/NOTES/benard/benard.html> (Valide à la date du 19/03/2018)
- [13] LIEN INTERNET, <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/convection-enslyon.xml> (Valide à la date du 19/03/2018)
- [14] LIEN INTERNET, <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Convection/fr-fr/> (Valide à la date du 19/03/2018)

Annexe A

Matériel utilisé

- Fluide utilisé : Les contraintes sur le fluide sont nombreuses. En effet il faut connaître toutes les propriétés du fluide afin de pouvoir calculer ses différents paramètres, comme sa viscosité dynamique ou encore sa diffusivité thermique. Nous avons essayé de trouver les paramètres de l'huile de silicone qui semblait être un liquide intéressant pour notre expérience. Cependant, ces paramètres sont très difficiles à trouver car ils dépendent de la nature même de l'huile de silicone qui change selon le fournisseur. Nous avons donc décidé d'utiliser de l'eau dont nous avons trouvé les propriétés.
- Un traceur passif : Afin d'observer les cellules de Bénard, il est nécessaire d'ajouter un traceur à l'eau. En effet, l'eau étant transparente nous devons ajouter quelque chose pour observer le phénomène sans pour autant modifier les paramètres de l'eau. Nous avons donc choisi d'utiliser du cacao en poudre.
- Récipient : Une casserole de 18cm de diamètre est le récipient que nous avons choisi. C'est assez grand pour pouvoir négliger les effets de bords au moins au milieu. Notre casserole est en inox car cela favorise le transfert de chaleur et permet de réaliser nos expériences plus rapidement. On considère que la casserole est assez bon conducteur ainsi on peut dire que la température à la surface de la plaque chauffante est la même que la température au fond de la casserole.
- Plaque chauffante : MR hei-tec. 145mm de diamètre. $\pm 1^{\circ}C$ de précision. Cette plaque permet de choisir la température à la surface de la plaque au degré près. La température est uniformément répartie à la surface.
- Sonde Pt1000 : Elle permet de mesurer la température à la surface du liquide.
- Une caméra : Fixée au-dessus du récipient elle permettra de prendre des vidéos et photos de nos expériences.



FIGURE A.1 – Agitateur magnétique chauffant MR hei-tec



FIGURE A.2 – Casserole