

UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES

Laboratoire Transferts, Interfaces et Procédés (TIPS)



&

**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE TOULOUSE**



Université
de Toulouse

Interface, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Dynamics of bubbles in microchannels: theoretical, numerical and experimental analysis

Thesis Submitted by

Omer Atasi

A thesis presented for the degree of
Doctor of Philosophy
in
Engineering Science and Technology

Thesis advisors:

Benoît Haut, Université libre de Bruxelles

Dominique Legendre, Institut National Polytechnique de Toulouse

Benoit Scheid, Université libre de Bruxelles

Jury:

Anne De Wit, Université libre de Bruxelles

Frank Dubois, Université libre de Bruxelles

Benjamin Lalanne, Institut National Polytechnique de Toulouse

Emmanuelle Rio, Université Paris-Sud

Stéphane Vincent, Université Paris-Est Marne-la-Vallée

ACKNOWLEDGEMENTS

Je remercie Frank Dubois d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, Anne De Wit et Benjamin Lalanne d'avoir accepté de faire parti de ce jury et tout particulièrement Emmanuelle Rio et Stéphane Vincent pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse.

Je tiens a remercier Benoît Haut et Benoit Scheid, mes promoteurs de thèse, en particulier. Outre le financement de thèse FNRS que j'ai pu obtenir avec leur soutien, je leur suis reconnaissant de m'avoir soutenu pendant les périodes qui ont suivi les ruptures d'anévrisme que j'ai subies en 2013 et 2014. Concernant celà, je remercie également François Reniers, Laetitia Brone, et Anita Mathieu de l'Université libre de Bruxelles pour le soutien qu'ils m'ont apporté, tant financier que moral. De plus, je remercie tout particulièrement Benoît Haut d'avoir prolongé mon financement de thèse suite a l'année pendant laquelle je n'ai pas pu travailler.

Concernant mon apprentissage scientifique, je tiens à remercier mes promoteurs de thèse Benoît Haut, Benoit Scheid et Dominique Legendre, pour l'encadrement qu'ils m'ont fourni. En particulier, cette thèse a été l'occasion de m'initier à de nouveaux domaines et nouvelles techniques scientifiques, ce qui n'a été possible qu'avec leur patience et leur don à transmettre leurs connaissances. En particulier, je remercie Benoît Haut pour ses connaissances et la rigueur qu'il m'a transmises durant cette thèse. Je remercie Dominique Legendre de m'avoir introduit dans le monde de la "Computational Fluid Dynamics", domaine où j'ai pu apprendre et m'épanouir. Je remercie tout particulièrement mon co-promoteur de thèse Benoit Scheid qui m'a offert l'unique occasion de séjourner pendant 8 mois à la Princeton University afin de travailler dans l'équipe du Professeur Howard A. Stone. Je remercie aussi le Prof. Howard Stone. J'ai pu apprécier sa dévotion à la science et au bien être de ses collaborateurs et sa disponibilité malgré son planning très chargé. Cette expérience m'a beaucoup apprise d'un point de vue scientifique et je lui en suis reconnaissant, ainsi qu'aux membres de son équipe, Sepideh Khodaparast, Estella Yu, Hyoungsoo Kim, Mirco Magnini et tous les autres.

Au sein de l'équipe du Laboratoire Transferts Interfaces et Procédés je tiens à remercier tout d'abord Sam Dehaeck, Adrien Dewandre et Alexei Rednikov pour leur contribution dans les aspects techniques de mon travail tant dans le domaine expérimental que théorique, et aussi Youen Vitry et Hervé Baudine de m'avoir assisté lors de problème technique au niveau des expériences conduites au laboratoire. Je remercie les membres et ex-membres du TIPs avec qui j'ai partagé de bons moments.

Parmi les membres de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, je suis reconnaissant à Anaig Pedrono avec qui nous avons développé une partie de JADIM. Elle a toujours été disponible, même pour de longues séances de débogage. Je remercie également Mijail Febres Soria, avec qui nous avons eu de nombreuses discussions scientifiques, et les membres du service Interface : Mithlesh, Paul, Sébastien, Elena, Esli et Romain.

Un remerciement particulier à mon père, Samer Atassi, ingénieur et double docteur en automatique, qui a auparavant encadré de nombreux travaux de recherche et avec qui j'ai pu avoir des discussions scientifiques sur des sujets précis concernant des parties de ma thèse. Je remercie ma mère, Yasmine Atassi, pour sa bonne humeur et les soutiens qu'elle m'a apporté, et mon grand père Abdhul Karim Atassi, sans qui tout cela n'aurait pas été possible. Enfin, je remercie tout mes amis et proches qui ont contribué à rendre cette période de ma carrière inoubliable.

ABSTRACT

Keywords: microfluidics, bubbly flow, Taylor flow, surfactants, lubrication film

This thesis aims at contributing to the characterization of the dynamics of bubbles in microfluidics through modeling and experiments. Two flow regimes encountered in microfluidics are studied, namely, the bubbly flow regime and the Taylor flow regime (or slug flow).

In particular, the first part of this thesis focuses on the dynamics of a bubbly flow inside a horizontal, cylindrical microchannel in the presence of surfactants using numerical simulations. A numerical method allowing to simulate the transport of surfactants along a moving and deforming interface and the Marangoni stresses created by an inhomogeneous distribution of these surfactants on this interface is implemented in the Level set module of the research code. The simulations performed with this code regarding the dynamics of a bubbly flow give insights into the complexity of the coupling of the different phenomena controlling the dynamics of the studied system. For example it shows that the confinement imposed by the microchannel walls results in a significantly different distribution of surfactants on the bubble surface, when compared to a bubble rising in a liquid of infinite extent. Indeed, surfactants accumulate on specific locations on the bubble surface, and create local Marangoni stresses, that drastically influence the dynamics of the bubble. In some cases, the presence of surfactants can even cause the bubble to burst, a mechanism that is rationalized through a normal stress balance at the back of the bubble. The numerical method implemented in this thesis is also used for a practical problem, regarding the artisanal production of Mezcal, an alcoholic beverage from Mexico.

The second part of the thesis deals with the dynamics of a Taylor flow regime, through experiments and analytical modeling. An experimental technique that allows to measure the thickness of the lubrication film forming between a pancake-like bubble and the microchannel wall is developed. The method requires only a single instantaneous bright-field image of a pancake-like bubble translating inside a microchannel. In addition to measuring the thickness of the lubrication film, the method also allows to measure the depth of a microchannel. Using the proposed method together with the measurement of the bubble velocity allows to infer the surface tension of the interface between the liquid and the gas. In the last chapter of this thesis, the effect of buoyancy on the dynamics of a Taylor flow is quantified. Though often neglected in microfluidics, it is shown that buoyancy effects can have a significant impact on the thickness of the lubrication film and consequently on the dynamics of the Taylor flow. These effects are quantified using experiments and analytical modeling. This work was performed at Princeton University with Professor Howard A. Stone during an eight month stay.

CHAPTER 1

Scientific Communications

1.1 Published articles

Atasi, O., Khodaparast, S., Scheid, B., Stone, H.A., 2017. Effect of buoyancy on the motion of long bubbles in horizontal tubes. *Physical Review Fluids* 2, 094304.

Khodaparast, S., Atasi, O., Deblais, A., Scheid, B., Stone, H.A., 2018. Dewetting of Thin Liquid Films Surrounding Air Bubbles in Microchannels. *Langmuir* 34, 1363-1370.

Atasi, O., Haut, B., Pedrono, A., Scheid, B., Legendre, D., 2018. Influence of soluble surfactants and deformation on the dynamics of centered bubbles in cylindrical microchannels. *Langmuir* 34, 10048-10062.

Atasi, O., Haut, B., Dehaeck, S., Dewandre, A., Legendre, D., Scheid, B., 2018. How to measure the thickness of a lubrication film in a pancake bubble with a single snapshot ? *Applied Physics Letter* (Editor's pick).

1.2 Submitted articles

G. Rage, Atasi, O., M. M. Wilhemus, J.F. Hernandez-Sanchez, Haut, B., Scheid, B., Legendre, D., Zenit, R., 2018. The pearls of mezcal: stability of surface bubbles as a traditional method to assess the ethanol content in distilled beverages . submitted to *Proceedings of the National Academy of Science*.

1.3 Scientific communications and conference papers

Atasi, O., Khodaparast, S., Scheid, B., Stone, H.A., 2016. Effect of gravity on the thin film surrounding a bubble translating in a tube. *American Physical Society, Division of Fluid Dynamics*, 19-21 November, Portland, Oregon.

Atasi, O., Khodaparast, S., Scheid, B., Stone, H.A., 2017. Effect of buoyancy on the motion of a long bubbles in horizontal tubes. *MicroMast annual meeting*, 13-14 September, Brussels, Belgium.

Atasi, O., Khodaparast, S., Scheid, B., Stone, H.A., 2017. Effect of buoyancy on the motion of long bubbles in horizontal tubes. *FLOW17 Conference*, 3-5 July, Paris, France.

Atasi, O., Haut, B., Scheid, B., Legendre, D., 2017. Effect of surfactants on the dynamics of a single bubble in a horizontal microchannel : A CFD study. *13th International Conference on Gas-Liquid and Gas-Liquid-Solid Reactor Engineering (GLS-13)*, 20-22 August, Brussels.

Atasi, O., Haut, B., Scheid, B., Legendre, D., Zenit, R., 2017. A numerical study of the lifetime of superficial

bubbles in water-alcohol mixtures with surfactants. American Physical Society, Division of Fluids Dynamics, 18-20 november, Denver, Colorado.

Atasi, O., Haut ,B., Scheid, B., Pedrono A., Legendre., D, Zenit., R., 2018. Numerical study of bubble bouncing and resting under a free surface in the presence of surfactants. Eurofoam, 9-12 July, Brussels, Belgium.

TABLE OF CONTENTS

ACKNOWLEDGEMENTS	1
ABSTRACT	2
1 Scientific Communications	3
1.1 Published articles	3
1.2 Submitted articles	3
1.3 Scientific communications and conference papers	3
2 Introduction	1
2.1 Bubbly flow and Taylor flow in microchannels	1
2.2 Some important non dimensional numbers in microfluidics	2
2.3 Use of surfactants in microfluidics	3
2.4 Objectives of the thesis and structure of the manuscript	3
I Dynamics of bubbly flows in microchannels	5
3 Governing equations	6
3.1 Introduction	6
3.2 Mass conservation	6
3.3 Momentum conservation	7
3.4 Surfactant mass conservation on the bubble surface	7
3.4.1 The general form	7
3.4.2 The normal time derivative form	8
3.4.3 The Eulerian form	9
3.5 Surfactant transport in the liquid bulk	12
3.6 Surface equation of state	12
3.7 Conclusion	12
4 The numerical code JADIM-LS	13
4.1 Numerical methods for multiphase flows	13
4.2 The JADIM code	15

4.2.1	One fluid formulation	15
4.2.2	The projection method	16
4.2.3	The Level-set method	16
4.2.4	Spatial discretization	17
4.2.5	Temporal discretization	19
4.3	Numerical methodology to account for surfactants	19
4.3.1	Transport of surfactants on the surface	20
4.3.2	Transport of surfactants inside the bulk phase	23
4.3.3	Marangoni stress	23
4.4	Conclusion	24
5	Validation of the numerical procedure	26
5.1	Validation of the numerical procedure used to transport surfactants on the bubble surface	26
5.1.1	Expansion test	26
5.1.2	Advection test	27
5.1.3	Adsorption/desorption test	30
5.1.4	Diffusion test	31
5.1.5	Discussion	32
5.2	Exchange term in the surfactant transport equation inside the bulk phase	34
5.3	Marangoni stress	36
5.4	Bubble rising in an infinite stagnant liquid	37
5.5	Conclusion	41
6	Influence of soluble surfactants and deformation on the dynamics of centered bubbles in cylindrical microchannels	42
6.1	Introduction	42
6.2	Problem statement	44
6.2.1	Geometry	44
6.2.2	Equations and modeling assumptions	44
6.2.3	Dimensional analysis	46
6.3	Results	46
6.3.1	Spherical bubbles	47
6.3.2	Deformable bubble without surfactants	50
6.3.3	Deformable bubble with surfactants	54
6.4	Conclusion	58
7	A numerical investigation of the lifetime of superficial bubbles inside Mezcal	60

7.1	Introduction	60
7.2	Experimental observations	62
7.3	Problem statement	63
7.4	Setup for the simulations	64
7.4.1	Domain	64
7.4.2	Mesh	64
7.5	Results	66
7.5.1	Determination of the lifetime	66
7.5.2	Role of surfactants	67
7.5.3	Lifetime of bubbles as a function of the alcohol volume fraction.	69
7.5.4	Scaling analysis	70
7.6	Conclusion and perspective	73
 II Dynamics of Taylor flow in Microchannels		75
 8 Introduction		76
8.1	Lubrication approximation	76
8.2	The analysis of Bretherton	77
8.3	Extension of the Bretherton model	79
8.4	Conclusion	80
 9 How to measure the thickness of a lubrication film in a pancake bubble with a single snapshot?		81
9.1	Introduction	81
9.2	Methodology	84
9.2.1	Experimental setup	84
9.2.2	Raytracing	87
9.2.3	Model of the bubble shape	88
9.3	Results and discussion	91
9.3.1	Establishment of an alternative equation for measuring the thickness of the lubrication film and the channel height	91
9.3.2	Experimental measurements	92
9.3.3	Effect of a finite numerical aperture	94
9.4	Conclusion	96
 10 Effect of buoyancy on the motion of a long bubble in a horizontal tube		97
10.1	Introduction	97
10.2	Experimental setup	100

10.2.1	Refractive index matching	100
10.2.2	Experiments	100
10.2.3	Visualization and image processing	101
10.2.4	First experimental observation	102
10.3	Theoretical predictions	102
10.3.1	Thickness of the liquid film at the front of the bubble	102
10.3.2	Inclination angle in the thin film region	108
10.4	Experimental results and discussions	108
10.4.1	Thickness of the liquid film at the front of the bubble	108
10.4.2	Inclination of the bubble	110
10.4.3	Liquid film at the back of the bubble	111
10.5	Conclusion	112
11	Conclusions and perspectives	114
11.1	Conclusion	114
11.2	Perspectives	116
12	Appendixes	118
12.1	Appendix A	118
12.2	Appendix B	120