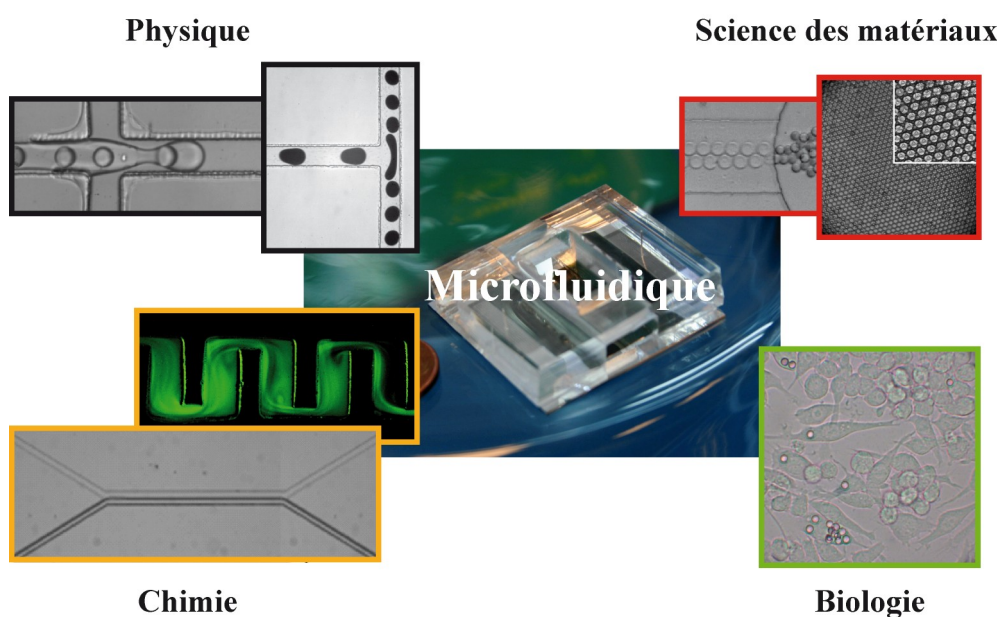


Laboratoire Physique de la Matière Condensée
CNRS - UMR7336 - Université Nice Sophia-Antipolis

Rapport de stage en laboratoire

Licence de physique 3
Encadrant : Céline Cohen

Calibration d'un système microfluidique pour la fabrication de gouttes monodisperses



*Antoniotti Alexandre
Koubi Jason*

Nice, Mai 2014

Table des matières

Introduction	3
1 Écoulement microfluidique	4
1.1 Équations de conservation dites de Navier-Stokes	4
1.2 Addimensionnement	4
1.3 Écoulement dans les microcanaux	5
2 Effet de surface – capillarité	6
2.1 Tension de surface	7
2.2 Capillarité et microfluidique	7
2.3 Instabilité de Rayleigh Plateau	7
3 Fabrication de goutte dans un système microfluidique par focalisation d'écoulement	8
3.1 Principe de cette méthode	8
3.2 Régime dans un Flow Focusing	8
4 Expérience et résultats du projet	9
Conclusion	10
Remerciements	10
Bibliographie	10

Introduction

La microfluidique est la science et technologie des systèmes qui manipulent des fluides à l'échelle micrométrique, et dont au moins l'une des dimensions caractéristiques est de l'ordre du micromètre. À petite échelle, le rapport surface sur volume est particulièrement élevé, par ailleurs les écoulements sont généralement laminaires, ce qui facilite notamment les conditions de formation des gouttes. Les techniques de génération des gouttes, sont basées sur un contrôle de l'équilibre des forces s'exerçant sur l'interface, principalement par le biais de la géométrie et des caractéristiques d'écoulement [1].

La grande variété de champs d'investigation offerte par la microfluidique, représente un atout majeur pour son développement. On la retrouve dans de nombreuses applications et des domaines très divers : en biologie (études des cellules), chimie (médicament) et l'industrie (cosmétique et matériaux). Une approche de la microfluidique largement exploitée est par exemple, l'élaboration des laboratoires sur puce, comme les testes de grossesses, de glycémie et d'ADN.

Les intérêts majeurs des techniques microfluidique sont nombreuses. Tout d'abord, la réduction des volumes permet d'accélérer les réactions chimiques et les phénomènes de diffusions. De plus c'est une méthode reproductible, contrôlée, qui permet d'avoir des gouttes monodisperses et des morphologies variées comme des émulsions multiples ou des en capsulations.

Il existe plusieurs techniques de microfluidique pour fabriquer des gouttes. Les plus connues sont la jonction T et la focalisation hydrodynamique d'écoulement "Flow Focusing". Dans notre cas, on s'intéresse seulement à la seconde.

Dans ce rapport, on présentera tout d'abord les écoulements en microfluidique. Puis on expliquera la fabrication de gouttes dans un système microfluidique par focalisation d'écoulement. En commençant par détailler le principe de cette méthode, ainsi que les différents régimes de formation observés dans le canal.

1. Écoulement Microfluidique

1.1 Équations de conservation dites de Navier-Stokes

L'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\boxed{\frac{d\rho}{dt} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0} \quad (1)$$

où ρ représente la masse volumique, et $\vec{v}$, la vitesse de l'écoulement.

On écrit l'équation de Navier-Stokes :

$$\boxed{\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} P + \eta \Delta \vec{v} + \vec{F}_g} \quad (2)$$

où P est la pression, η la viscosité dynamique, et $\vec{F}_g$ les forces volumiques extérieures. Ici, comme les effets de surface sont plus importants que les effets de volumes, alors on peut négliger les forces de gravités.

1.2 Adimensionnement

On suppose qu'il existe une longueur L , une vitesse U , et une pression $P_0 = \rho U^2$, caractéristiques de l'écoulement. Dans ce cas, on peut adimensionner l'équation de Navier-Stokes avec les variables adimensionnées : $x' = \frac{x}{L}$; $y' = \frac{y}{L}$; $v' = \frac{v}{U}$; $P' = \frac{P}{\rho U^2}$

Finalement :

$$(\vec{v}' \cdot \vec{\nabla}') \vec{v}' = -\vec{\nabla}' P' + \frac{\eta}{\rho UL} \Delta' \vec{v}' \quad (3)$$

On introduit ainsi le nombre de Reynolds, tel que :

$$\boxed{\text{Re} = \frac{\rho UL}{\eta}} \quad (4)$$

qui est une nombre sans dimension qui compare les effets inertiels sur les effets visqueux [2].

En microfluidique, les longueurs sont de l'ordre du micromètre et les vitesses d'écoulements sont très faibles, généralement inférieures à 0,1 m/s. On peut donc dire que le nombre de Reynolds est faible, et n'excède pas 0,1. Les effets inertiels sont donc négligeables par rapport aux effets visqueux. On a donc un écoulement laminaire. L'équation de Navier-Stokes se réduit alors à l'équation dite de Stokes en l'absence de forces volumiques extérieures [3]:

$$\boxed{\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_3^2} \right)} \quad (5)$$

Avec, ν la viscosité cinématique.

1.3 Ecoulement dans les microcanaux

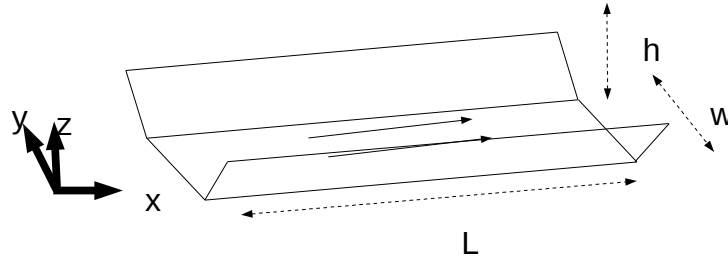


Figure 1.1 - Représentation d'un microcanal

On considère le système microfluidique représenté sur la (Figure 1.1). Ce microcanal est composé de 3 longueurs dont l'une domine les deux autres : $L \gg h, w$ où h est la hauteur, w la profondeur et L la longueur du microcanal. Ici on a $w \gg h$. On peut donc dire que le champ de vitesse dépend seulement de z [3].

De plus l'écoulement est permanent, et établi, ce qui conduit à : $\vec{U} = \vec{U}(z)$

Le fluide qui s'écoule est incompressible, ce qui implique que la masse volumique est constante, on la note ρ_0 . Le fluide est newtonien, de viscosité constante, noté η_0 .

La section du microcanal est constante donc : $\vec{U} = U(z)\vec{x}$.

Dans ce cas, les équations de Navier-Stokes deviennent :

$$\frac{-\partial p}{\partial x} + \eta_0 \left(\frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

D'après (7), on remarque que la pression ne dépend que de la variable x .

De plus, on a d'après (6) et (7) :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta_0 \left(\frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} \right) = f(z) = cst \quad (8)$$

On obtient alors : $p(x) = Ax + B$

Or d'après les conditions limites : $p(0) = p_1$ et $p(L) = p_0$

On trouve :

$$\boxed{p(x) = \frac{-\Delta p}{L} x + p_1} \quad (9) \quad \text{avec} \quad \Delta p = p_1 - p_0$$

On a une variation longitudinale de la pression, où Δp est la différence de pression qu'il faut imposer de l'extérieur pour obtenir un débit volumique Q . Pour déterminer ce débit, il faut calculer le champ de vitesse. En intégrant deux fois l'équation suivante issue de (9) et (8) on obtient :

$$\frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} = \frac{-\Delta p}{\eta_0 L} \quad (10)$$

On obtient l'expression suivante pour le champ de vitesse :

$$u(z) = \frac{-\Delta p z^2}{2 \eta_0 L} + Az + B \quad (11)$$

Or, la vitesse est nulle sur les parois : $u(-h/2) = u(h/2) = 0$. On a donc :

$$u(z) = \frac{\Delta p}{8 \eta_0 L} h^2 \left(1 - \frac{4z^2}{h^2} \right) \quad (12)$$

En intégrant sur la section on obtient le débit, et on trouve alors la relation entre le débit Q , et la différence de pression ΔP :

$$Q = \iint u \, dy \, dz = \frac{\Delta p}{12 \eta_0 L} w h^3 \quad (13)$$

Ainsi, on remarque que la profondeur du canal h est petite, et plus la différence de pression ΔP qu'il faut appliquer pour avoir un débit Q donné est grande.

On peut faire une analogie avec les circuits électriques :

$$\Delta p = RQ \quad (14)$$

R est la résistance hydraulique, Δp correspond à la tension U , et Q correspond à l'intensité I . Les règles de calcul de la résistance du système sont les mêmes que celle du circuit électrique.

$$\text{D'après (14), on trouve: } R = \frac{12 \eta_0 L}{w h^3} \quad (15)$$

Les résistances en séries s'ajoutent: $R_{eq} = R_1 + R_2$

Les résistances parallèles vérifient: $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (Re \ll 1)$

2. Effet de surface – Capillarité

Le changement d'échelle dû à la miniaturisation entraîne des bouleversements dans l'importance relative des phénomènes physiques rencontrés habituellement à l'échelle macroscopique.

2.1 Tension de surface

La tension superficielle, est une force qui existe au niveau de toute interface entre deux milieux différents (entre un solide ou un liquide et un gaz), on la note γ . Comme on l'a dit précédemment, les effets de surface sont importants. En effet, le rapport des forces de surface sur les forces de volume, va évoluer comme l'inverse de la longueur caractéristique du système. Son importance à l'échelle micrométrique peut entraîner l'apparition de phénomènes particuliers tels que l'instabilité de Rayleigh-Plateau (Figure 2.1).

2.2 Capillarité et microfluidique

Pour comparer l'impact des effets de viscosité par rapport aux effets de surfaces, on introduit le nombre capillaire :

$$C_a = \frac{\eta U}{\gamma}$$

En général le nombre capillaire varie de 10^{-4} à 1, car la tension superficielle est de l'ordre du mN/m et dans les microcanaux, la vitesse des fluides U est typiquement de l'ordre du centimètre par seconde. On peut également comparer les effets inertiels sur les effets capillaires, pour cela on introduit également un nombre sans dimension qu'on appelle le nombre de Weber :

$$W_e = \frac{\rho L U^2}{\gamma}$$

Ainsi, si une goutte a un nombre de Weber trop important, les effets inertiels sont importants par rapport à la tension de surface, au-dessus d'une certaine valeur dite nombre de Weber critique, la goutte est considérée comme instable, elle se divise en plusieurs petites gouttes lors d'un impact par exemple.

2.3 Instabilité de Rayleigh-plateau

L'importance des forces de surfaces peut entraîner l'apparition de phénomènes particuliers tels que l'instabilité de Rayleigh-Plateau. Un cylindre de fluide se déforme et se fragmente spontanément pour abaisser son énergie de surface comme nous pouvons le voir dans la figure 2.1. D'une façon très générale le film est instable, il ondule avec une longueur d'onde λ . Puis les ondulations continuent à croître, et se résolvent finalement en plusieurs gouttelettes[4]. Ce qui pilote l'instabilité est la seule tension de surface du liquide. Afin de connaître le critère de formation des gouttelettes, on calcule la différence d'énergie dE entre la surface modulée et le cylindre dont elle est issue. On voit que l'énergie est abaissée si la longueur d'onde est supérieure au périmètre du cylindre de départ : $\lambda > 2\pi R$. L'état final de l'instabilité est parfois une succession de petites gouttes dites "satellites". Les satellites proviennent d'une instabilité secondaire entre deux gouttes en train de se former.

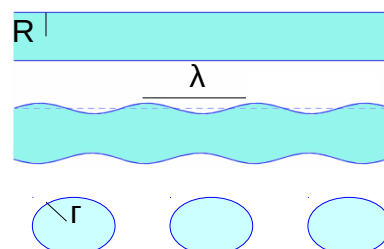


Figure 2.1 – Instabilité de Rayleigh-Plateau

3. Fabrication de goutte dans un système microfluidique par focalisation d'écoulement

3.1 Principe de cette méthode

La focalisation hydrodynamique d'écoulement, "Flow Focusing" est utilisée dans les systèmes microfluidique pour produire des gouttes. Il s'agit d'une jonction en croix comme nous pouvons le voir dans la figure 1.2. Dans cette géométrie, la phase dite dispersée (qui forme les gouttes) est pincée par la phase dite continue (dans laquelle les gouttes sont suspendus).

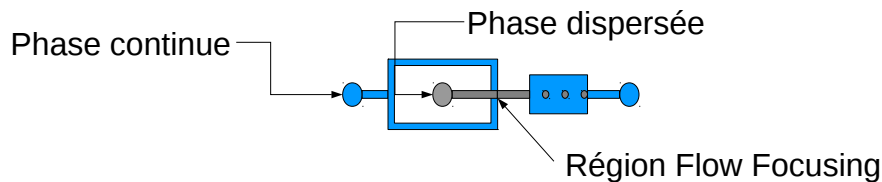


Figure 3.1 – Génération de gouttes dans un Flow Focusing

Dans notre cas, le canal central contenant la phase dispersée, ici l'huile minérale, s'écoule avec un certain débit. Les canaux extérieurs contenant la phase continue, ici l'eau, rejoignent le canal central au niveau de la jonction en croix, il s'agit de la zone de production des gouttes (région "Flow Focusing"). A ce moment, la phase continue va pincer la phase dispersée pour donner naissance à une goutte dans le canal de sortie. Selon les conditions expérimentales, il existe plusieurs types de régimes différents dans un "Flow Focusing".

3.2 Régime dans un Flow Focusing

Lorsque les débits sont faibles, l'interface entre la phase continue et la phase dispersée bouche l'orifice de sortie (figure 1.3 a). Ce blocage provoque l'augmentation de la pression de la phase continue, ce qui va réduire la largeur de la phase dispersée. La taille de la goutte ainsi formée est plus grande que celle de l'orifice. Ce régime est appelé "squeezing". Lorsque les débits augmentent, les forces visqueuses augmentent aussi et elles déforment l'interface de sortie. Cette interface va se déformer pour devenir un cylindre allongé (figure 1.3 b). Lorsque les dimensions du cou deviennent comparable à celles de l'orifice de sortie, la goutte se détache. dans ce régime, appelé "dripping", les gouttes tendent à être plus petites que l'orifice de sortie. Pour des débits beaucoup plus importants, la phase continue va stabiliser le cou et l'allonger jusqu'à la marche de notre système, où le cou se déstabilise en plusieurs gouttes à cause de l'instabilité de Rayleigh-Plateau. Ce régime est appelé "jetting" (figure 1.3 c).

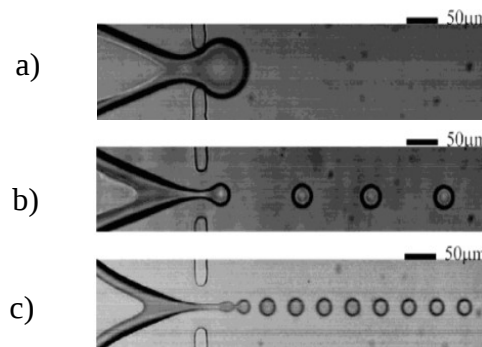


Figure 3.2 – les différents types de régime dans un flow focusing. a) : le régime squeezing, b) : le régime dripping et c) : le régime jetting.

4. expérience du projet

Dans nos expériences, nous avons utilisé un système semblable à celui de la figure 2.2. La seule différence est la présence d'une marche au niveau de la sortie du canal, c'est à dire un canal plus profond. Ceci change les mécanismes de formation des gouttes et dans nos expériences nous verrons que d'autres régimes apparaissent. Les résultats seront présentés dans le site. Nous avons fixé la pression de la phase continue et fait varier celle de la phase dispersée. Pour chaque couple de pression nous avons observé la formation de gouttes au niveau de la croix et de la marche comme nous pouvons le voir sur la Figure 4.1.

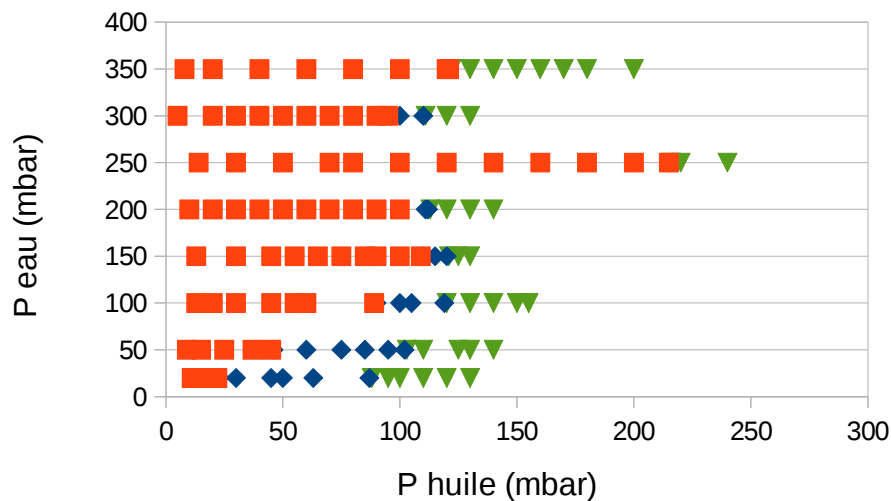


Figure 4.1 – graphique représentant les différents régimes pour P_{eau} fixée

Les carrés correspondent à un régime de cassure au niveau de la croix. On observe deux régimes différents :

Le régime squeezing, pour lequel la goutte est arrachée par pincement.

Le régime dripping, où la goutte est arrachée par cisaillement.

Les losanges correspondent à un régime de cassure à la marche pour des débits plus importants.

Pour des débits très élevés, on observe un régime où la cassure se produit à l'intérieur de la marche, avec la formation de grosses gouttes.

Conclusion

Dans ce rapport, Nous avons présenté les concepts physiques importants pour comprendre les observations expérimentales que nous avons faites. Nous avons tout d'abord décrit les écoulements dans des microcanaux, puis expliquer l'importance des forces capillaires. Enfin nous avons décrit les résultats de la littérature sur un système, très similaire au système que nous avons étudié expérimentalement : le Flow Focusing. En effet pendant ce stage, nous avons cherché à créer des gouttes grâce à des techniques microfluidique. Nous avons utilisé pour cela, un système microfluidique de type "Flow Focusing" avec une marche après la jonction en croix. Nous avons étudié les différents régime de formation observés dans cette géométrie.

Remerciements

Nous souhaiterons tout d'abord remercier Mme Céline Cohen pour son investissement personnel, ses conseils et son expérience durant toute la période du stage. Nous tenons aussi à remercier Mme Yaroslava Izmaylova pour l'implication dont elle a fait preuve pour nous aider à réaliser les systèmes microfluidiques en salle blanche. Nous souhaiterons aussi remercier tous les autres membres du laboratoire (LPMC) pour l'aide et les conseils qu'ils nous ont apporté durant ce stage. Enfin nous souhaiterons remercier Mme Valérie Doya, notre coordinatrice du 2ème semestre de Licence 3, pour son investissement et son suivi tout au long de ce stage.

Bibliographie

- [1] **Benjamin Dollet, Wim van Hoeve, Jean-Paul Raven, Philippe Marmottant, et Michel Versluis**, *Role of the Channel Geometry on the Bubble Pinch-Off in Flow-Focusing Devices*, Physical Review Letters (2008).
- [2] **Mr Meunier**, *Cours de Mécanique des milieux continus du 2ème semestre de L3 Physique*, 2014.
- [3] **Mme Cohen**, *Cours Introduction à la microfluidique*, 2014.
- [4] **Patrick Tabelling**, *Introduction à la microfluidique*, Belin, 2003.
- [5] **Wingki Lee, Lynn M. Walker, et Shelley L. Anna**, *Role of geometry and fluid properties in droplet and thread formation processes in planar flow focusing*, AIP Physics of Fluids.

