



HAL
open science

Brisure de gouttes dans une jonction en T à faible nombre capillaire

Marie-Caroline Jullien, M.-J. Tsang Mui Ching, C. Cohen, L. Menetrier, P. Tabeling

► **To cite this version:**

Marie-Caroline Jullien, M.-J. Tsang Mui Ching, C. Cohen, L. Menetrier, P. Tabeling. Brisure de gouttes dans une jonction en T à faible nombre capillaire. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03391240>

HAL Id: hal-03391240

<https://hal.science/hal-03391240v1>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Brisure de gouttes dans une jonction en T à faible nombre capillaire

M.-C. JULLIEN, M.-J. TSANG MUI CHING, C. COHEN, L. MENETRIER ET P. TABELING

MMN, CNRS, ESPCI ParisTech, 10, rue Vauquelin, 75005 Paris, France

Résumé :

Nous présentons des résultats expérimentaux de brisure de gouttes dans une jonction en T pour des nombres Capillaires variant de $4 \cdot 10^{-4}$ à $2 \cdot 10^{-1}$ et pour deux rapports de viscosités entre la phase dispersée et la phase continue. De la sorte, nous étendons la gamme de nombres capillaires explorés de deux ordres de grandeur par rapport à ce qui est rapporté dans la littérature. Nous mettons en évidence deux régimes de brisure. Dans un premier régime, un tunnel se forme entre la goutte et la paroi du microcanal avant que la goutte ne se brise. Dans ce cas, le processus de brisure est en bon accord avec les travaux théoriques de Leshansky et Pismen [1]. Dans un second régime, la goutte obstrue la jonction de façon permanente avant de se briser. Dans ce cas, nous introduisons la notion de longueur initiale de goutte critique.

Abstract :

We perform experimental studies of droplet breakup in microfluidic T-junctions in a range of Capillary numbers lying between $4 \cdot 10^{-4}$ and $2 \cdot 10^{-1}$ and for two viscosity ratios of the fluids forming the dispersed and continuous phases. The present paper extends the range of Capillary numbers explored by previous investigators by two orders of magnitude. We single out two different regimes of breakup. In a first regime, a gap exists between the droplet and the wall before breakup occurs. In this case, the break up process well agrees with the analytical theory of Leshansky and Pismen [1]. In a second regime, droplets keep obstructing the T-junction before breakup. Using physical arguments, we introduce a critical droplet extension for describing the breakup process in this case.

Mots clefs: microfluidique digitale, brisure de goutte, nombre capillaire.

1 Introduction

L'idée de développer des réactions chimiques et biochimiques dans des micro-gouttes, plutôt que dans des micro-puits ou micro-canaux, a été proposée récemment [2-4]. On peut citer parmi les nombreux intérêts de cette approche l'absence de contact des espèces chimiques avec les parois des microcanaux, et le fait que les micro-gouttes sont des entités de volume contrôlé qui représentent en elles-mêmes un microréacteur chimique [2-4]. Si l'on souhaite développer des systèmes intégrant la microfluidique digitale, cela nécessite de contrôler des opérations élémentaires telles que la coalescence de goutte, la brisure, le transport ou encore le stockage. Dans la suite, nous nous sommes focalisés sur le problème de brisure de gouttes. Dans la plupart des situations en microfluidique, le nombre capillaire est faible ; par conséquent les contraintes tangentielles visqueuses, qui sont responsable de la déformation des interfaces, jouent un rôle mineur comparée à la force capillaire qui tend à minimiser l'aire de l'interface, ce qui, couplé au confinement, favorise la formation de formes simples des gouttes. La plupart des études portent sur une jonction en T dans laquelle un canal est divisé symétriquement en deux branches filles. Dans de tels systèmes une goutte arrivant dans la jonction soit se brise, soit emprunte l'une des branches filles, selon le nombre capillaire, l'extension initiale de la goutte, ou encore le rapport de viscosité des deux phases [5-8]. Dans la description faite dans [5], les gouttes subissent une élongation par l'action des gradients de vitesse et la goutte se brise lorsque les conditions de Rayleigh-Plateau sont rencontrées. Des expériences ainsi que des simulations numériques [8] ont permis de valider les résultats obtenus théoriquement [5] pour des nombres capillaires variant de $2 \cdot 10^{-3}$ à $7 \cdot 10^{-2}$. Dans

un article récent, Leshansky et Pismen [1] ont développé un calcul analytique qui décrit le processus de brisure dans une jonction en T à deux dimensions. Ils ont pu déterminer des solutions stationnaires correspondant au régime de non brisure. Nous allons par la suite confronter nos résultats expérimentaux à ces deux modèles.

2 Dispositif expérimental

La figure 1 représente le dispositif expérimental qui a été utilisé lors de notre étude. Les gouttes sont fabriquées dans une jonction et s'écoulent vers l'aval jusqu'à la jonction en T. A la jonction, le canal se sépare en deux branches filles symétriques, de manière à obtenir la même résistance hydrodynamique dans les deux branches, puis les deux branches se rejoignent à l'aval à un nœud. L'ajout d'un peigne injectant de la phase continue permet d'augmenter la distance entre chaque goutte et ainsi de s'assurer qu'il n'y a qu'une seule goutte dans la bifurcation, évitant ainsi toute asymétrie introduite par la présence d'une goutte dans l'une des deux branches filles. Pour générer des écoulements à faible nombre capillaire, les liquides sont mis en écoulement en utilisant une source de pression (MFCS Fluigent). Concernant la microfabrication, les systèmes sont moulés dans du PDMS en utilisant les techniques conventionnelles de lithographie douce. Les canaux sont tous de section carrée de dimension $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$.

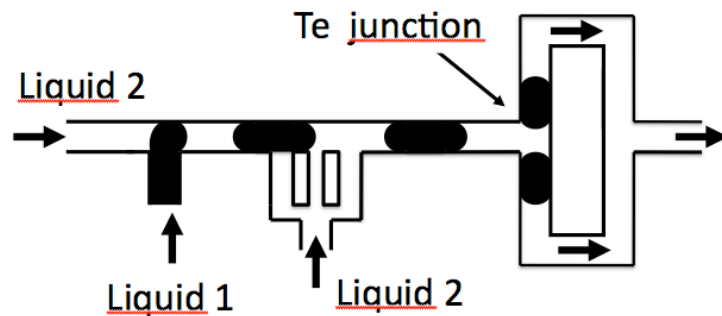


Fig 1: Schéma de l'expérience : des gouttes d'eau sont formées dans une jonction microfluidique et se dirigent vers la jonction en T, où, selon certaines conditions, elles se brisent ou sont redirigées vers l'une des deux branches.

Comme le montre le tableau suivant, nous avons également souhaité déterminer l'influence du rapport de viscosité des deux phases. Nous avons donc utilisé les deux couples de liquides suivants :

Couples de liquides	$\lambda = \mu_d / \mu_c$	Vitesse initiale de la goutte U ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	γ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)	Nombre capillaire Ca
Gouttes d'huile fluorée dans de l'eau DI + SDS	1.67	$5.8 < U < 300$	15.4	$3 \cdot 10^{-4} < Ca < 1.8 \cdot 10^{-2}$
Gouttes d'eau dans de l'hexadécane + SPAN80	0.11	$2.4 < U < 165$	5	$3.8 \cdot 10^{-3} < Ca < 0.27$

3 Régimes de brisure observés

Nous proposons dans cette partie une classification des phénomènes observés. Nous verrons que cette description fait la distinction entre des écoulements obstrués et non-obstrués. Nous considérons par la suite qu'il y a obstruction lorsque la goutte, vue de dessus, touche les parois de la jonction, c'est-à-dire lorsque la distance entre la goutte et la paroi est en dessous de la résolution optique. Dans le cas non-obstrué, un "tunnel" d'écoulement de la phase continue est visible entre la paroi de la jonction et la goutte. Notre définition d'obstruction est donc purement géométrique.

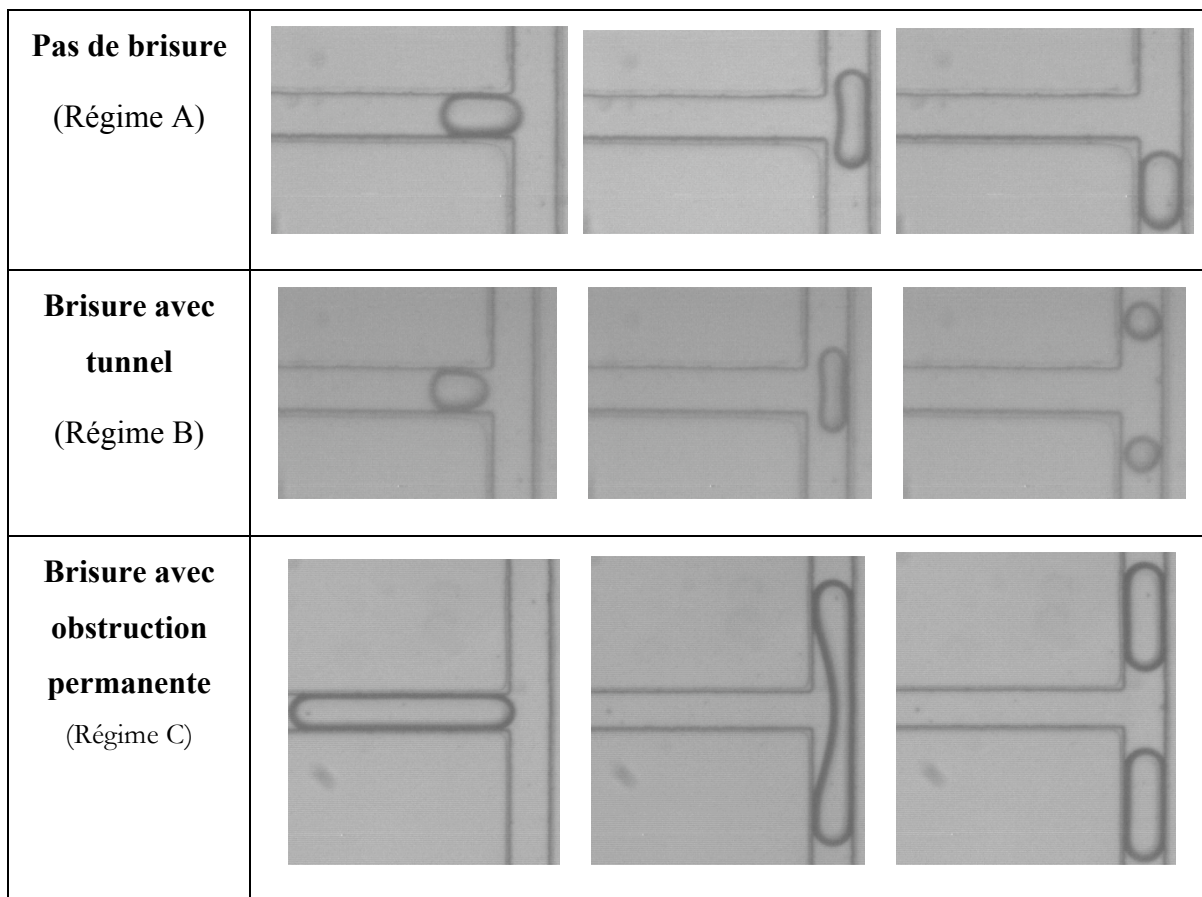


Fig. 2: Illustrations des trois régimes de brisure observés dans le cas de gouttes d'huile fluorée dans l'eau ($l=1.67$). Les gouttes se déplacent de la gauche vers la droite le long du canal horizontal. Le pas de temps entre chaque figure dépend du régime de brisure, il a été déterminé dans chaque cas de manière à extraire les étapes significatives de brisure dans chaque régime : (A) pas de brisure, (B) brisure avec tunnel et (C) brisure avec obstruction permanente.

Nous avons observé les régimes suivants :

- A- *Pas de brisure* : Lorsque la goutte arrive au niveau de la jonction, sa vitesse décroît, elle entre dans la jonction, puis sous l'effet d'une perturbation aléatoire, bifurque dans l'une des deux branches fille.
- B- *Brisure avec tunnel* : La goutte entre dans la jonction symétriquement dans les deux branches filles. Deux sous-cas ont été observés : dans un premier cas (représenté dans la figure 2), pour des extensions modérées, la goutte n'obstrue jamais les branches, laissant ainsi un tunnel de manière permanente entre les parois et la goutte. Les contraintes tangentielles permettent l'élongation de la goutte jusqu'à ce que celle-ci se brise. Dans un autre cas, pour des extensions plus importantes, la goutte pénètre dans la jonction obstruant temporairement les branches filles. Dans ce processus la partie centrale de la goutte se creuse jusqu'à l'ouverture d'un tunnel qui permet alors à la phase continue d'étirer la goutte et on se retrouve dans le processus décrit dans le premier cas.
- C- *Brisure avec obstruction permanente* : La goutte entre dans la jonction, obstruant de manière permanente les deux branches. Dans ce processus, un pincement de forme circulaire se développe dans la partie centrale de la goutte, jusqu'à ce que la goutte se brise formant ainsi deux gouttes filles.

4 Brisure avec tunnel

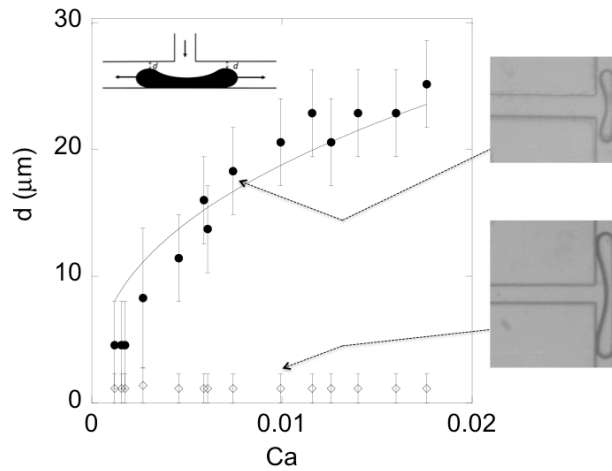


Fig. 3: Epaisseur minimale du tunnel précédant la brisure en fonction du nombre capillaire pour deux cas : (●) régime B (brisure avec tunnel); (◇) régime C (brisure avec obstruction). La ligne continue représente l'expression $1.5wCa^{2/5}$.

Nous allons maintenant étudier la différence entre les régimes obstrués et non-obstrués. Nous avons mesuré la largeur d du tunnel juste avant que la goutte ne se brise, en fonction du nombre capillaire pour les régimes B et C. Les résultats sont représentés sur la figure 3. Dans le régime B, d croît avec le nombre capillaire et ce de manière indépendante de l'extension initiale de la goutte. Un ajustement en loi de puissance nous donne l'expression suivante :

$$d = (1.5 \pm 0.1)Ca^{0.4 \pm 0.05}w,$$

où w est la largeur du canal. Ce résultat est en bon accord avec les prédictions de [1] qui ont trouvé, à deux dimensions, que d doit croître comme $\approx wCa^{2/5}$. La loi de puissance et le préfacteur que nous avons obtenu sont remarquablement proches de ceux prédits par la théorie. En revanche, dans le cas C, c'est-à-dire lorsque les branches filles sont obstruées de manière permanente, la mesure de d se trouve en deçà de notre résolution optique. Nous trouvons alors dans ce cas un plateau proche de l'axe horizontal ce qui permet de souligner deux évolutions différentes pour la largeur du tunnel d en fonction du nombre capillaire, selon que la goutte obstrue ou non. Cette observation justifie qu'une distinction soit faite entre ces deux cas.

5 Longueur critique

La figure 4 représente les trois régimes A-C dans un diagramme extension/nombre capillaire pour les deux couples de liquides que nous avons utilisé. Chaque régime est identifié par un symbole particulier. Il est notable que, bien que différents, les deux diagrammes possèdent la même structure. Ce diagramme permet de comparer nos résultats expérimentaux aux différents modèles proposés dans la littérature. L'intérêt de notre étude est que les nombres capillaires étudiés sont de deux ordres de grandeur plus faibles que ceux déjà rapportés. Plus spécialement, concernant la théorie proposée dans [5] :

$$Ca = \alpha \frac{l_0}{\pi w} \left[\left(\frac{\pi w}{l_0} \right)^{2/3} - 1 \right]^2,$$

où α est un paramètre ajustable ; nous trouvons $\alpha = 1.8$ pour $\lambda=0.11$ et $\alpha = 0.25$ pour $\lambda=1.67$ ce qui est en bon accord avec les valeurs obtenues dans [5] et [8]. Cette prédiction décrit la frontière entre les régimes A et

B pour les valeurs de nombres capillaires les plus élevées mais n'est pas en bon accord avec les observations aux plus faibles nombres capillaires.

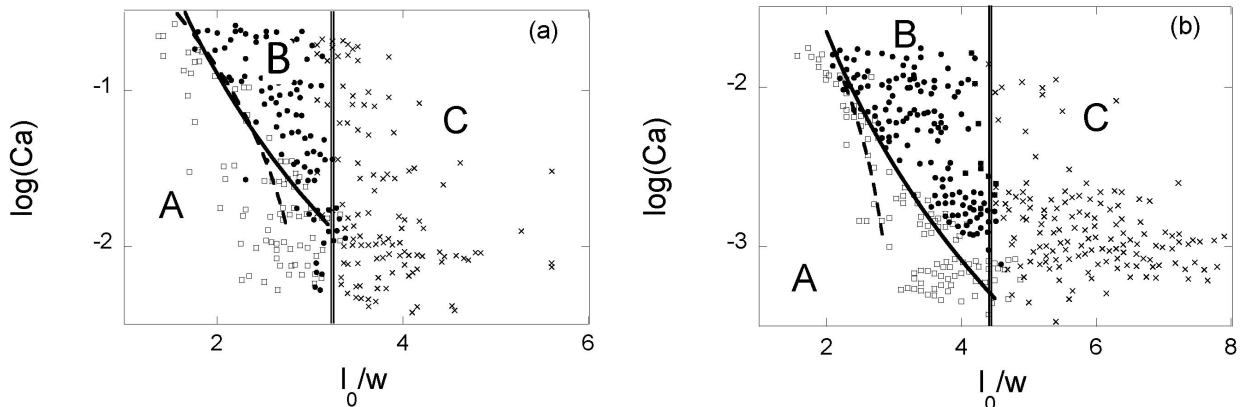


Fig. 4: Diagramme des phases représentant les différents comportements observés qui sont empruntés par les gouttes entrant dans la jonction en T pour deux rapports de viscosité différents : a) $\lambda=0.11$; b) $\lambda=1.67$. Les différents régimes sont : (A) pas de brisure, (B) brisure avec tunnel et (C) brisure avec obstruction. La ligne verticale doublée représente la longueur critique l_c/w au delà de laquelle aucun tunnel n'est observé, la ligne continue représente la théorie proposée en [1] et la courbe discontinue représente la théorie proposée en [5].

Dans la théorie de Leshansky et Pismen [1], la frontière entre les régimes A et B est donnée par :

$$l \approx \chi Ca^{-0.21}$$

avec $\chi \approx 1.3$ proposée dans le cas 2D [1]. Nos résultats expérimentaux sont compatibles avec ce modèle avec $\chi \approx 1.3$ pour $\lambda=0.11$ et $\chi=0.9$ pour $\lambda=1.67$. Finalement, le modèle de Leshansky et Pismen est en bon accord avec nos résultats expérimentaux sur plus d'une décade de nombres capillaires.

Nous allons maintenant discuter du régime C dans lequel les gouttes obstruent la jonction en T et se brisent. Pour les deux diagrammes, ce régime apparaît pour une longueur critique représentée par une ligne verticale doublée. Au delà de cette longueur critique, la goutte obstrue la jonction de manière permanente et la brisure est inévitable. La région C est donc définie davantage par des conditions géométriques plutôt que dynamiques.

6 Conclusion

Nous avons étendu la description de brisure de gouttes dans une jonction en T en couvrant une gamme de nombres capillaires qui n'avait jusqu'alors pas encore été explorée. Nous avons observé deux régimes de brisure principaux, selon que la goutte obstrue ou non la jonction : pour les gouttes qui n'obstruent pas la jonction, nos observations expérimentales sont en bon accord avec la théorie de Leshansky et Pismen [1]. Par ailleurs, notons que cette théorie a été développée à deux dimensions, il est donc tout à fait remarquable que cette théorie décrive aussi bien nos résultats. Enfin, cette théorie ne permet pas de décrire tous les régimes que nous avons observés : pour que la théorie puisse être appliquée il faut qu'il y ait présence d'un tunnel. Cela exclu par conséquent les régimes dit obstrués de manière permanente pour lesquels aucun tunnel n'est observé. Nous introduisons ce régime par la notion d'une longueur critique qui ne dépend pas du nombre capillaire. Ces observations montrent qu'il est nécessaire de faire la distinction entre le cas obstrué et non obstrué pour décrire la brisure de gouttes dans une jonction en T.

References

- [1] A. M. Leshansky, & L. M. Pismen, Breakup of drops in a microfluidic T junction, *Phys. of Fluids* 21(2), 023303, 2009.
- [2] B. Zheng, & R. F. Ismagilov, A microfluidic approach for screening submicroliter volumes against multiple reagents by using preformed arrays of nanoliter plugs in a three-phase liquid/liquid/gas flow. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* 44, 2520-2523, 2005.
- [3] H. Song, & R. F. Ismagilov, Millisecond kinetics on a microfluidic chip in multiphase microfluidics at low values of the Reynolds and capillary numbers. *J. Am. Chem. Soc.* 125, 14613, 2003.
- [4] K. Jensen, & A. Lee, The science and applications of droplets in microfluidics devices, special issue, *Lab Chip*, 2004.
- [5] D. R. Link, S. L. Anna, D. A. Weitz, & H. A. Stone, Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices. *Phys. Rev. Lett.* 92, 053403, 2004.
- [6] P. Garstecki, M. Feuerstman, H. A. Stone, & G. M. Whitesides, Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction: scaling and mechanism of breakup. *Lab Chip* 6, 437-446, 2006.
- [7] M. De Menech, P. Garstecki, F. Jousse & H. A. Stone, Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction, *Journal of Fluid Mechanics* 595, 141, 2008.
- [8] M. De Menech, Modeling of droplet breakup in a microfluidic T-shaped junction with a field-phase model, *Phys. Rev. E* 73, 031505, 2006.