



HAL
open science

Instabilité de rides sur des microcapsules en écoulement extensionnel

Kaili Xie, Clément de Loubens, Marc Jaeger, Marc Leonetti

► **To cite this version:**

Kaili Xie, Clément de Loubens, Marc Jaeger, Marc Leonetti. Instabilité de rides sur des microcapsules en écoulement extensionnel. Rencontre du Non Linéaire, Mar 2019, Paris, France. hal-02375780

HAL Id: hal-02375780

<https://hal.science/hal-02375780>

Submitted on 22 Nov 2019

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.

Public Domain

Instabilité de rides sur des microcapsules en écoulement extensionnel

Kaili Xie^{1,2}, Clément de Loubens¹, Marc Jaeger², & Marc Leonetti¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP, Grenoble, France

² Aix Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, M2P2 UMR 7340, Marseille, France

marc.leonetti@univ-grenoble-alpes.fr, clement.de-loubens@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé. Les particules déformables telles que les cellules, les vésicules ou les microcapsules, ont une dynamique spatio-temporelle riche en écoulement. Un exemple marquant concerne les globules rouges qui présentent des oscillations de leur forme ainsi que des rotations dans des écoulements de cisaillement. De plus, d'autres phénomènes non-linéaires surgissent tels que le flambement de la membrane, observé sur des globules rouges rigidifiés ou bien encore des capsules [1,2] dans les années 70. Inspiré par les globules rouges, nous étudions l'émergence de telles instabilités élastiques sur des microcapsules en écoulement extensionnel.

Des rides très bien définies apparaissent sur la membrane de la capsule en extension lorsque la contrainte hydrodynamique dépasse un seuil. Au-delà de ce seuil, cette instabilité supercritique se développe le long de la capsule jusqu'à ce que la longueur des plis sature. La valeur critique de la contrainte hydrodynamique dépend du module élastique surfacique de cisaillement de la microcapsule mais correspond toujours à une valeur fixée de la déformation.

Abstract. Deformable particles such as cells, vesicles and microcapsules, have rich spatio-temporal dynamics of their shapes under flow. A striking example is the case of red blood cells (RBCs) in shear flow : tumbling, swinging oscillations of the shapes. Except that, other non-linear phenomena, for example buckling, are observed on the stiffened RBCs or artificial capsules [1,2]. Inspired by RBCs, we investigate emergence of such elastic instability on biomimetic microcapsules in extensional flow.

Well-defined wrinkles are first observed on the membrane of stretched capsules when the hydrodynamic stress is above a threshold. Above the threshold, this supercritical instability expands along the microcapsule up to saturate. The critical hydrodynamic stress depends on the surfacic shear elastic modulus of the microcapsule's membrane, but always corresponds to the same value of the deformation.

1 Introduction

Les dynamiques en écoulement de particules déformables, telles que les globules rouges, les vésicules ou encore les capsules, jouent un rôle important sur la migration transverse de ces objets, mais aussi sur les propriétés rhéologiques de telles suspensions et leur structuration sous écoulement. De nombreuses avancées aussi bien expérimentales, théoriques et numériques ont permis de comprendre les liens entre les propriétés interfaciales de ces particules et leurs dynamiques [3] avec de nombreuses conséquences sur notre compréhension des écoulements sanguins sains et pathologiques [4], mais aussi sur le développement de systèmes de séparations microfluidiques de cellules biologiques [5].

La forme de ces particules déformables et leurs dynamiques en écoulement résultent du couplage non-linéaire entre l'hydrodynamique et la réponse mécanique de leur membrane [6,7,8], c'est à dire leur rhéologie interfaciale. Cependant, dans le cas d'objets dont la membrane présente une résistance au cisaillement, la membrane peut former des structures de faible amplitude sous écoulement qui résultent d'une instabilité de flambage. Ce phénomène a été observé dans les années 70 aussi bien sur des globules rouges [2] que sur des capsules [1] donnant lieu soit à un flambement de la membrane avec une longueur d'onde de l'ordre de la taille de l'objet soit à un grand nombre de rides de faible longueur d'onde devant la taille de la particule. L'origine physique de ces instabilités est aujourd'hui comprise et a été identifiée par Secomb en 1986 [9] : l'écoulement génère une élongation globale de la particule dans une direction, ce qui induit une compression de la membrane dans la direction azimuthale. Cette compression, comme

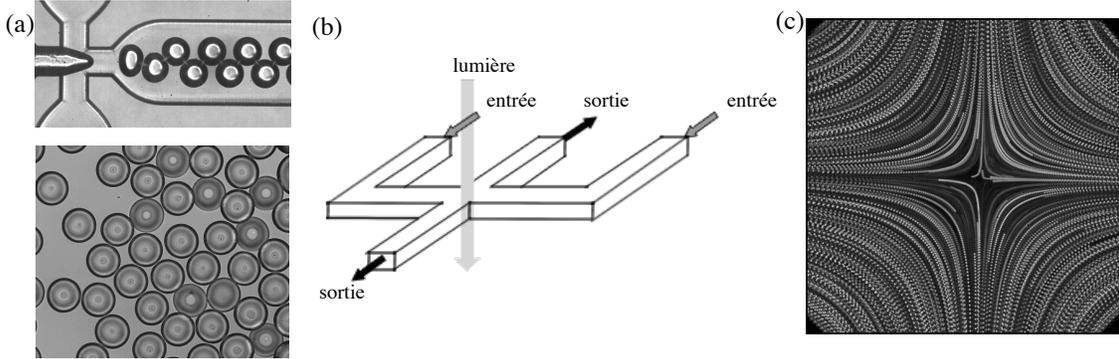


Figure 1. a : Les microcapsules sont produites dans une puce microfluidique afin de contrôler aussi bien la taille que les propriétés mécaniques des objets. b : Schéma de la chambre élongationnelle utilisée pour étudier les capsules dans le régime linéaire et au-delà. c : Visualisation par suivi de particules des lignes de courants caractéristiques d'un écoulement extensionnel dans la chambre d'écoulement.

dans le cas des films élastiques sous traction [10], est responsable de l'émergence de ces rides. Cependant, les paramètres physiques contrôlant cette instabilité sont encore à décrire pour ce type de particules composées d'une coque ultra-fine (quelques dizaines de nanomètres) et élastique [11,12].

Dans cet article, nous étudions l'apparition des plis avec des microcapsules aux propriétés mécaniques contrôlées. Tout d'abord, nous présentons la méthode de synthèse des microcapsules, ainsi que la chambre d'écoulement utilisée pour étudier l'émergence des rides. Ensuite, nous décrivons le rôle de l'élasticité de la capsule et de la contrainte hydrodynamique sur l'émergence de l'instabilité et la structure formée.

2 Matériel et méthodes

2.1 Synthèse des microcapsules

La membrane des microcapsules est formée par complexation électrostatique de chitosan (CAS 9012-76-4, Sigma-Aldrich) avec de l'acide phosphatidique [13]. Le chitosan, biopolymère cationique est dissous dans de l'eau déminéralisée à pH 3.0 (0.05 à 3.0 g/L). L'acide phosphatidique (AMP 4455, Palsgaard) est un surfactant chargé négativement qui est dissous dans de une huile végétale. Des gouttes de solution de chitosan sont formées dans la phase huile dans une puce microfluidique permettant de générer des capsules de rayon uniforme et variant de 30 à 400) μm , Figure 1-a. La membrane est ensuite formée au repos durant 2 à 30 min. Les capsules sont ensuite lavées avec du cyclohexane (CAS 110-82-7, pureté 99.5%, Sigma Aldrich) et suspendues dans de l'huile silicone AP1000 (IMCD, viscosité de 1.18 Pa s à 22°C). L'épaisseur de la membrane est mesurée par AFM et varie de 20 nm à 1 μm selon les concentrations en chitosan et acide phosphatidique utilisées et du temps laissé pour la formation de la membrane, voir les détails dans Xie *et al.*, [14].

2.2 Chambre d'écoulement élongationnel

Les microcapsules sont ensuite étudiées dans une chambre d'écoulement élongationnel. La chambre est formée d'une croix de section 1 x 1 mm² avec deux entrées et deux sorties, Figure 1-b. Le fluide contenant les capsules est amené par un pousse seringue. L'écoulement au centre de la croix est un écoulement élongationnel plan (Figure 1-c) dont le taux d'élongation est constant dans une région proche du centre de la croix [15,16]. Les capsules sont visualisées avec un microscope à fond clair Olympus IX-70 équipé d'un grossissement 20x et d'une caméra rapide Photron Fastcam SA3 (jusqu'à 5000 images par seconde). Le module élastique surfacique des microcapsules, noté G_s , est déterminé en appliquant des faibles contraintes hydrodynamiques à la capsule et en mesurant sa déformation $D = (L - S)/(L + S)$,

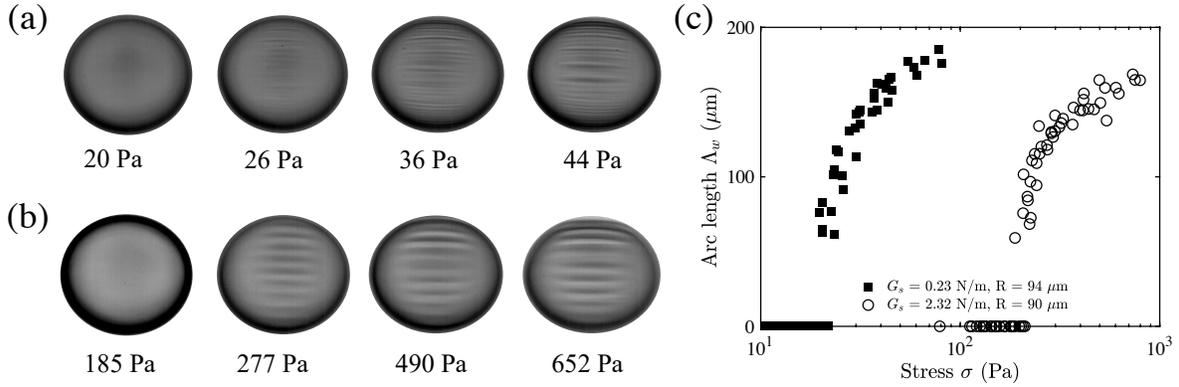


Figure 2. a, b : Emergence et évolution des rides avec la contrainte hydrodynamique pour une capsule avec une membrane de 60 ± 8 nm (a) and 650 ± 80 nm (b). c : La longueur des plis Λ_w est mesurée pour différentes contraintes hydrodynamiques σ , produit du taux d'élongation et de la viscosité du fluide porteur

où S est le petit axe de la capsule déformée et L son grand axe, Figure 2. Nous pouvons définir un nombre Capillaire Ca basé sur le module élastique surfacique de la membrane, $Ca = \sigma R / G_s$, avec σ la contrainte hydrodynamique, le produit du taux d'élongation et de la viscosité. Dans le régime des petites déformations, D est relié au nombre Capillaire par $D = (25/6)Ca$ [17].

3 Résultats et discussions

Lorsque les microcapsules sont soumises à un écoulement extensionnel plan, elles se déforment en ellipsoïde. La membrane reste lisse pour de faibles contraintes hydrodynamiques et les rides apparaissent lorsque cette contrainte dépasse un seuil. À ce moment, les rides apparaissent au centre de la capsule et s'étendent de plus en plus vers les pôles de l'ellipsoïde lorsque la contrainte augmente, Figure 2-a,b. La longueur d'onde des plis ne varie pas avec la contrainte, mais augmente avec l'épaisseur de la membrane comme dans le cas des films plans soumis à de la traction [10].

Cette instabilité est due au fait qu'il existe une zone de compression dans la région centrale de la capsule, schématisée par la zone en bleu sur la Figure 3-a. En visualisant la déformation de la capsule selon les trois principaux plans de déformation, nous montrons que le périmètre de la capsule augmente dans le plan $(x-z)$ alors qu'il diminue dans le plan orthogonal $(y-z)$ induisant une compression. Cette zone a été mesurée par des études numériques [17] et peut aussi se retrouver simplement en considérant une capsule élastique sphérique dans un écoulement élongationnel. Il faut noter que cette zone de compression existe dès que la capsule est déformée, alors que les rides apparaissent pour une déformation plus élevée.

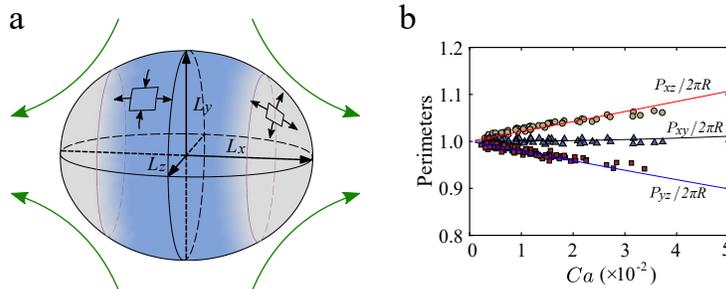


Figure 3. a : Schéma d'une capsule dans un écoulement élongationnel. La zone de compression est représentée en bleu. On définit les trois principales dimensions de l'ellipsoïde par L_x , L_y , L_z . b : Evolution des périmètres de la capsule dans les trois principaux plans de déformation.

Nous étudions ensuite la nature de cette instabilité de ride. L'évolution de la longueur des rides selon la contrainte hydrodynamique est présentée sur la Figure 2-c. Nous observons donc que la longueur des rides augmente fortement dès que la contrainte hydrodynamique seuil est dépassée. Cette dernière dépend de l'élasticité surfacique de cisaillement G_s de la capsule, ainsi que de son rayon R , mais est indépendante de la déformation de la capsule D . Quel que soit l'épaisseur de la membrane de la capsule (entre 30 et 1000 μm), la déformation critique est de l'ordre de $D = 0.03$. Les plis restent toujours limités spatialement. Cette caractéristique est réminiscente d'études précédentes sur des films ultra-minces posés sur une goutte [18]. Lorsque l'écoulement est arrêté, la capsule retrouve son état initial sans plis.

4 Conclusion

La membrane de particules déformables telles que les capsules peut être le siège d'instabilités élastiques sous écoulement. Elle se caractérise par l'apparition de rides. Cette instabilité est gouvernée par le taux de déformation de l'objet, quel que soit l'épaisseur de la membrane, tout du moins dans la gamme de paramètres étudiés dans cet article. Cependant, la structuration de la membrane et en particulier la longueur d'onde des rides est une signature de l'épaisseur de la membrane.

Références

1. Seshadri, V., Hochmuth, R. M., Croce, P. A., & Suter, S. P. (1970). *Microvascular research*, 2(4), 434-442.
2. Fischer, T. M., Haest, C. W. M., Stähr, M., Kamp, D., & Deuticke, B. (1978). *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 510(2), 270-282.
3. Barthes-Biesel, D. (2016). *Annual Review of fluid mechanics*, 48, 25-52.
4. Kumar, A., & Graham, M. D. (2012). *Physical review letters*, 109(10), 108102.
5. Wei Hou, H., Gan, H. Y., Bhagat, A. A. S., Li, L. D., Lim, C. T., & Han, J. (2012). *Biomechanics*, 6(2), 024115.
6. Omori, T., Imai, Y., Yamaguchi, T., & Ishikawa, T. (2012). *Physical Review Letters*, 108(13), 138102.
7. Dupire, J., Socol, M., & Viallat, A. (2012). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(51), 20808-20813.
8. de Loubens, C., Deschamps, J., Edwards-Levy, F., & Leonetti, M. (2016). *Journal of Fluid Mechanics*, 789, 750-767.
9. Secomb, T. W., Skalak, R., àzkaya, N., & Gross, J. F. (1986). *Journal of Fluid Mechanics*, 163, 405-423.
10. Cerda, E., & Mahadevan, L. (2003). *Physical review letters*, 90(7), 074302.
11. Walter, A., Rehage, H., & Leonhard, H. (2001). *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 183, 123-132.
12. Finken, R., & Seifert, U. (2006). *Journal of Physics : Condensed Matter*, 18(15), L185.
13. Gunes, D. Z., Pouzot, M., Rouvet, M., Ulrich, S., & Mezzenga, R. (2011). *Soft Matter*, 7(19), 9206-9215.
14. Xie, K., De Loubens, C., Dubreuil, F., Gunes, D. Z., Jaeger, M., & Léonetti, M. (2017). *Soft matter*, 13(36), 6208-6217.
15. de Loubens, C., Deschamps, J., Georgelin, M., Charrier, A., Edwards-Levy, F., & Leonetti, M. (2014). *Soft matter*, 10(25), 4561-4568.
16. de Loubens, C., Deschamps, J., Boedec G., & Leonetti, M. (2015). *Journal of Fluid Mechanics*, 767, R3.
17. Lac, E., Barthes-Biesel, D., Pelekasis, N. A., & Tsamopoulos, J. (2004). *Journal of Fluid Mechanics*, 516, 303-334.
18. King, H., Schroll, R. D., Davidovitch, B., & Menon, N. (2012). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(25), 9716-9720.