

Repliement élastocapillaire contrôlé par un impact de goutte

Marco Rivetti^{1,2}, Sébastien Neukirch^{1,2}, Christophe Josserand^{1,2}, & Basile Audoly^{1,2} & Arnaud Antkowiak^{1,2}

¹ UPMC Univ Paris 06, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005 Paris, France

² CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005 Paris, France.

`rivetti@lmm.jussieu.fr`

Résumé. Lorsqu'une goutte est déposée sur une fine membrane polymère, on peut observer une déformation de la feuille par la force capillaire pouvant aller jusqu'à l'encapsulation complète de la goutte. Ce type d'interaction élastocapillaire, abondant dans la Nature, suscite un fort intérêt dans la communauté scientifique, car il offre un nombre considérable d'applications technologiques. On montre que le repliement élastocapillaire, jusqu'ici observé de façon quasi-statique, peut être obtenu sur l'échelle de temps capillaire très rapide. Grâce à cette propriété, on utilise l'impact de goutte pour former des 'origamis capillaires'. On montre que des feuilles et gouttes identiques peuvent se replier en origamis totalement différents, selon la vitesse d'impact. Un contrôle précis du repliement peut alors être envisagé en utilisant simplement un impact de goutte. Pour détecter les acteurs-clé de ce phénomène, on emploie une expérience modèle 2d.

Abstract. When a liquid drop is gently deposited on a flexible membrane, capillary forces may bend the substrate up to complete self-wrapping of the drop. This process has recently been coined *capillary origami*. Such elastocapillary interactions have recently raised a keen interest in the physics community because of their relevance in a wide variety of practical applications all characterized by tiny lengthscales, ranging to biological ones to industrial applications where the run for miniaturization have let emerged these phenomena which can be dangerous if not harnessed. So far though, the focus of all studies has been restricted to quasi-static configurations. Here we show for the first time a paradigm for elastocapillary dynamics, consisting of a liquid drop impacting a soft membrane. As in the static configuration, encapsulation may occur, but this time on the very rapid capillary timescale, a factor that could be crucial in the manufacturing of small three-dimensional objects. The key point of our study is that dynamics now allows for selective folding of the membrane into e.g. a cylindrical or pyramidal shape. Using a two-dimensional model experiment, we explain the key features responsible for this behavior.

Introduction

Conformément à l'intuition, quand on dépose sur un support une goutte d'eau suffisamment petite pour que l'on puisse négliger la gravité, la goutte assume la forme d'équilibre d'une calotte sphérique. Même si on ne l'aperçoit pas, la force capillaire génère un effort de flexion sur le support. En effet, au point triple, la composante verticale de la tension de surface doit être compensée par la rigidité du solide. Très souvent, les surfaces sont suffisamment rigides pour ne pas se déformer. Pourtant, sur des membranes fines, non seulement ce phénomène devient visible, mais les déformations engendrées sont tellement importantes qu'elles peuvent modifier fortement la forme de la membrane.

Cela n'est qu'un exemple de couplage entre phénomènes capillaires et élastiques. Ce couplage peut souvent engendrer de considérables modifications des points de vue classiques de la mécanique des fluides, comme par exemple la montée du liquide dans un capillaire en présence de parois élastiques [1], ou l'émersion d'une tige élastique d'une surface libre [2].

La maîtrise des interactions élasto-capillaires est fondamentale dans plusieurs secteurs industriels, car l'action de la force capillaire est la cause des déformations et rassemblements des structures élastiques, comme par exemple les forêts de nanotubes de carbone [3,4]. Mais l'interaction élasto-capillaire ouvre aussi la voie à nouvelle technique d'auto-assemblage, permettant de réaliser des formes tridimensionnelles à partir d'un patron 2d, comme par exemple des modules de panneaux solaires [5].

Le repliement élasto-capillaire

Pour qu'une goutte puisse déformer la membrane sur laquelle pose, il faut que l'énergie capillaire soit suffisante pour permettre le repliement de la structure, qui nécessite la création d'une énergie de flexion. Il faut aussi que la tension de surface prédomine sur force de gravité. Il existe alors un région caractéristique de l'espace où ce phénomène peut avoir lieu.

D'abord, la capillarité devient plus important que la gravité pour des échelles de longueur inférieures à la longueur gravito-capillaire :

$$L_C = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}, \quad (1)$$

où γ désigne la tension de surface, g la gravité et ρ la masse volumique du liquide. En suite, limitant l'analyse à une déformation 2d d'une lamelle de longueur L , épaisseur h et largeur w , l'énergie élastique est $E_{el} \sim EI\kappa^2 L$, où E est le module de Young, $I = \frac{wh^3}{12}$ le moment d'inertie de la section de lamelle et κ la courbure locale. L'énergie capillaire, qui vaut $E_\gamma = \gamma Lw$, peut alors déformer la lamelle seulement si $L > L_{EC}$, où on a introduit la longueur élasto-capillaire [6] :

$$L_{EC} = \sqrt{\frac{Eh^3}{12\gamma}}. \quad (2)$$

On en déduit alors que les déformation élasto-capillaires sont observables sur des échelles L telles que :

$$L_{EC} < L < L_C. \quad (3)$$

Une première observation du repliement d'une feuille élastique sous l'action capillaire a été montré par Py *et al.* [7] : dans l'expérience, on suit l'évaporation d'une goutte d'eau posée sur un membrane fine. Au fur et à mesure que le volume liquide diminue, la membrane est déformée par l'action de la tension de surface. Selon la géométrie choisie, la membrane peut enrober complètement la goutte. Dans ce cas, pour atteindre l'évaporation du liquide et le repliement de la membrane, plusieurs minutes sont nécessaires.

Nous nous intéressons au repliement élasto-capillaire réalisé par l'impact de la goutte sur le film élastique. Les forces d'inertie, négligeables dans l'évaporation quasi-statique, jouent ici un rôle crucial, raison pour laquelle on parle d'encapsulation dynamique.

Dans toute la suite, le liquide utilisé est de l'eau. Le film élastique est réalisé en polydiméthylsioxane (PDMS - RTV), centrifugé à 1500 tours/min pour obtenir une épaisseur uniforme de 55 μm , et successivement découpé à l'aide d'un scalpel. Ce film est placé sur une surface de cuivre précédemment traitée afin d'augmenter l'angle de contact statique de l'eau : un dépôt de nitrate d'argent est suivi par un dépôt de thiol (perfluorodécane-thiol - $C_xH_yF_z$), dont les longues chaînes carbonées permettent d'obtenir l'hydrophobicité de la surface.

Un exemple de dynamique élasto-capillaire est montrée en figure 1. Ici une goutte d'eau tombe sur un patron de forme triangulaire (le côté mesure 7 mm) : après l'impact, la goutte s'étale sur la membrane et atteint son amplitude maximale quand la capillarité balance l'inertie. L'eau est alors rappelée vers l'intérieur par la tension de surface, et le système goutte - membrane rebondit. Au moment du rebond, le film élastique enrobe le liquide et forme une structure à tétraèdre. L'entière encapsulation a été réalisé en 40 ms, ce qui correspond à l'échelle de temps capillaire.

L'encapsulation dynamique permet aussi de sélectionner la forme finale de repliement de la membrane, selon la vitesse d'impact. La figure 2 en montre un exemple. Dans le premier cas, une goutte d'eau impacte sur un patron en forme de fleur et se replie en forme de cylindre, où les vertex des pétales se touchent deux par deux. Dans le deuxième cas, une goutte de la même taille mais animée d'une vitesse supérieure permet un repliement de la membrane en forme pyramidale, avec les quatre vertex qui se touchent au même point.

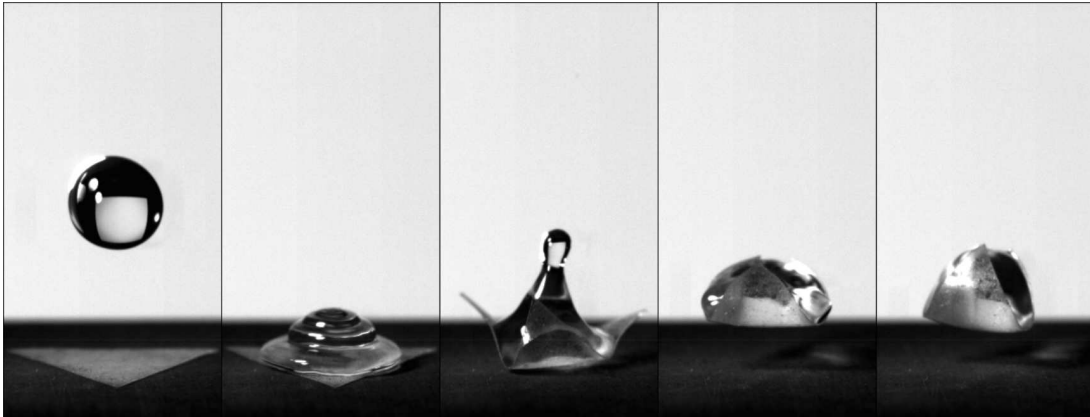


Fig. 1. Encapsulation dynamique d'une membrane élastique triangulaire. Le système goutte-membrane présente une forme d'équilibre finale à tétraèdre.

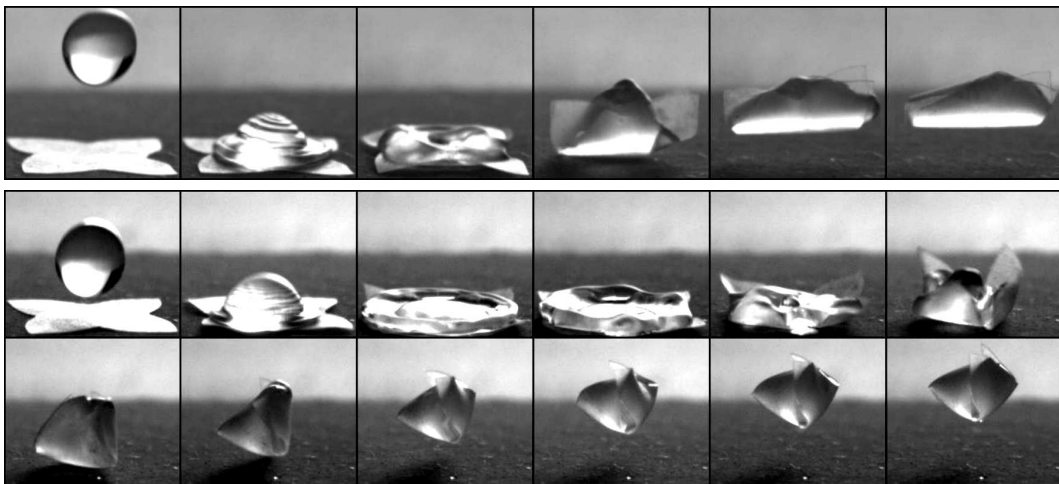


Fig. 2. Haut : encapsulation dynamique donnant lieu à une forme finale cylindrique. Bas : encapsulation dynamique donnant lieu à une forme finale pyramidale.

Le modèle 2d

L'encapsulation dynamique d'un patron 2d est un phénomène complexe, où il faut prendre en compte, au delà des effets de capillarité, inertie et gravité, les contraintes géométriques engendrées par le repliement. Pour mieux comprendre le rôle des différents acteurs d'un tel phénomène, on a choisi un modèle plus simple mais encore riche d'intérêt : l'impact d'une goutte sur une longue lamelle élastique. Ce n'est qu'une transposition bidimensionnelle du problème tridimensionnel présenté auparavant. En effet, le fait de réaliser l'impact sur une lamelle posée sur une surface superhydrophobe permet de confiner la dynamique du liquide sur le film élastique.

On étudie alors l'impact d'une goutte (de rayon $R = 1,2$ mm) sur une lamelle (dont la longueur totale est 5 cm), en faisant varier la vitesse d'impact de la goutte, U , et la distance x entre le point d'impact et l'extrémité libre de la lamelle (toujours en gardant l'autre distance beaucoup plus grande que celle-ci). Une fois la goutte lâchée, la dynamique d'impact ressemble à celle présenté pour l'expérience 3d : il y a une phase où le liquide s'étale, suivie par un phase où le liquide revient en arrière et le système rebondit. Il existe, pour cette configuration 2d, deux formes d'équilibre : une forme où la lamelle est presque plate et repose entièrement sur le support superhydrophobe (état non encapsulé), et une autre où l'extrémité

libre est passée de l'autre côté et a recouvert la goutte (état encapsulé). Cette dernière configuration permet de réduire l'énergie de surface, mais fait augmenter l'énergie élastique de la lamelle.

On résume les deux états finaux en fonction de la vitesse d'impact et de l'extrémité libre, dans le diagramme de phase de la figure 3. Ici, x et U apparaissent sous forme adimensionnelle comme $\frac{x}{R}$ et

$$We = \frac{\rho RU^2}{\gamma}.$$

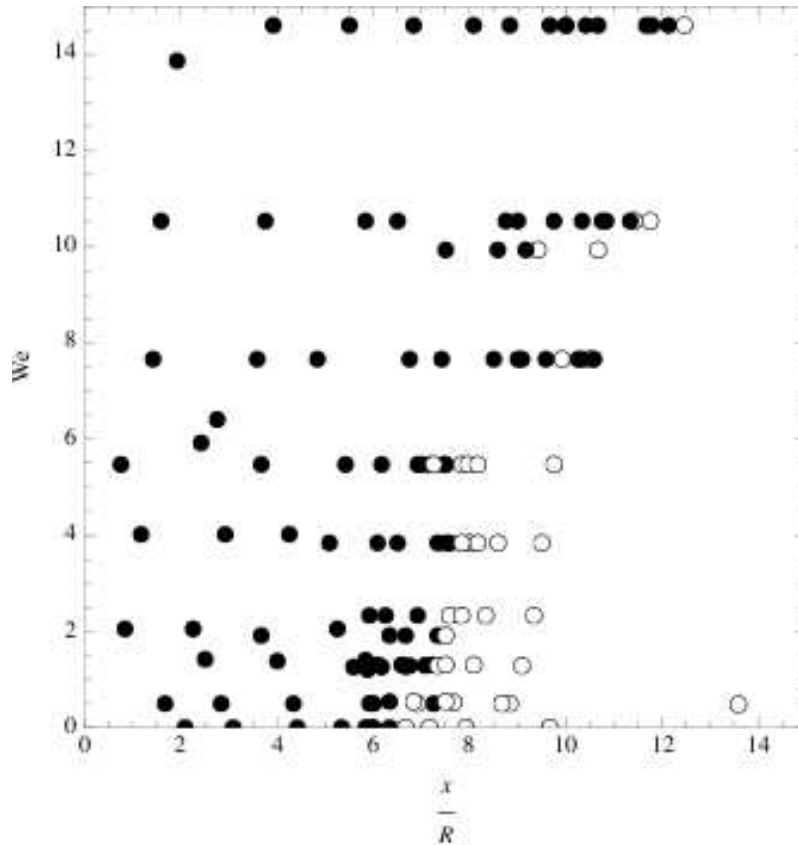


Fig. 3. Diagramme de phase des formes d'équilibre : en noir les états encapsulés, en blanc les états non encapsulés.

Dans le cas limite où $We \simeq 0$ la goutte est déposée très doucement sur la lamelle, et on n'observe que de légères déformations de l'interface liquide-air ; on peut alors négliger l'inertie du liquide et conclure que l'état final du système résulte du bilan entre tension de surface, force élastique et poids de la lamelle.

Dès que We augmente et qu'on observe un véritable impact de goutte, l'inertie du système couplé liquide-solide joue un rôle crucial. Comme on l'a déjà remarqué, le liquide s'étale et successivement revient en arrière, permettant au système de rebondir. Toutefois, la ligne triple reste accrochée au film élastique, et à cause de cet accrochage la force capillaire exerce une traction sur la lamelle. Selon la vitesse d'impact et la longueur de l'extrémité libre de lamelle, deux scénarios sont alors possibles, comme montré en figure 4 : dans l'image du haut, la lamelle n'arrive pas à encapsuler la goutte et retombe sur le support. D'autre part, sur l'image du bas la traction exercée par le liquide est suffisamment forte pour permettre à la partie libre d'enrouler la goutte.

La frontière entre les deux possibles états d'équilibre dépend du We , et cela montre que la dynamique est un acteur clé du processus de repliement capillaire. Néanmoins, la frontière n'est pas linéaire, mais présente un saut à $We \simeq 7$. En effet, lors de l'incrément de We , l'apport d'énergie cinétique devient non négligeable et de nouveaux phénomènes apparaissent. D'abord, pendant le rebond du système, on observe

des ondes élastiques se propager le long de la lamelle, ce qui peut influencer la dynamique d'encapsulation. Encore, la formation d'une goutte satellite et sa successive coalescence produisent une forte déformation de l'interface qui génère une traction capillaire encore plus élevée, ce qui explique partiellement le saut de la frontière. Enfin, quand on observe des impact à grands We et grands x , on constate que l'encapsulation se fait en repliant la partie libre de lamelle : ce coût en terme d'énergie élastique est nécessaire pour vaincre la force de pesanteur et permettre le passage de la lamelle au delà de la verticale.

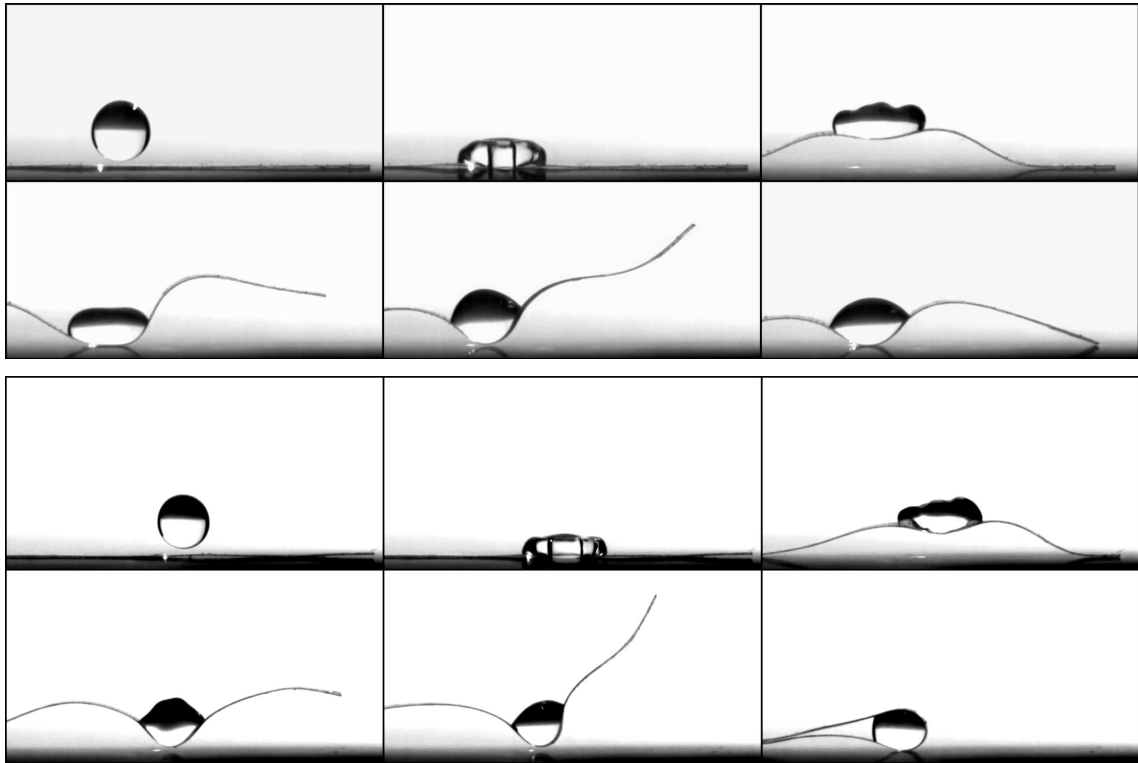


Fig. 4. Haut : séquence montrant la dynamique d'un état non encapsulé. Bas : séquence montrant la dynamique d'un état encapsulé.

Conclusion

Nous avons montré ici un exemple intéressant d'interaction élasto-capillaire, qui consiste à réaliser des formes tridimensionnelles grâce à un impact de goutte sur une membrane élastique 2d. À cause de l'action de la tension de surface, la membrane est déformée et sous certaines conditions elle peut enrober complètement la goutte. Cette encapsulation se fait sur une échelle de temps capillaire, correspondant à quelques millièmes de seconde. Nous avons prouvé que, selon la vitesse d'impact de la goutte, on peut sélectionner la forme finale de repliement du film élastique. Pour détecter les acteurs-clé de ce processus, nous avons introduit un modèle simplifié 2d, consistant à réaliser un impact de goutte sur une lamelle. Même si ce modèle simplifié présente une grande richesse de comportements et qu'une compréhension exhaustive du phénomène est de loin non triviale, on a montré que l'apport de la dynamique joue un rôle crucial dans la distinction entre les deux formes finales d'équilibre du système.

Références

1. H.Y. KIM & L. MAHADEVAN, Capillary rise between elastic sheets, *Journal of Fluid Mechanics*, **548**, 141-150 (2006).
2. S. NEUKIRCH, B. ROMAN, B. DE GAUDEMARIS & J. BICO, Piercing a liquid surface with an elastic rod : Buckling under capillary forces, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **55** (6), 1212-1235 (2007).
3. C.H. MASTRANGELO & C.H. HSU, Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **2**, 33-43 (1993).
4. N. CHAKRAPANI, B. WEI, A. CARRILLO, P. M. AJAYAN & R. S. KANE, Capillarity-driven assembly of two-dimensional cellular carbon nanotube foams, *Proceedings of the National Academy of Science (USA)*, **101**, 4009-4012 (2004).
5. X. GUO & S.R. KANE Two- and three-dimensional folding of thin film single-crystalline silicon for photovoltaic power applications, *Proceedings of the National Academy of Science (USA)*, **106**, 20149-20154 (2009).
6. J. BICO *et al.* Adhesion : Elastocapillary coalescence in wet air, *Nature*, **432**, 690 (2004).
7. C. PY, P. REVERDY, L. DOPPLER, J. BICO, B. ROMAN & C. N. BAROUD, Capillary Origami : Spontaneous Wrapping of a Droplet with an Elastic Sheet, *Physical Review Letters*, **98**, 156103 (2007).