

Sélection de forme par capillarité: l'exemple du claquage

A. Fargette^a, S. Neukirch^b, et A. Antkowiak^b

a. Département de Physique, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France

b. Université Pierre et Marie Curie et Centre National de la Recherche Scientifique, Unité Mixte de Recherche 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, 4 Place Jussieu, F-75005 Paris, France

Résumé :

Nous étudions de manière numérique et expérimentale les conditions sous lesquelles une goutte d'eau ou une bulle de savon peut engendrer une instabilité de claquage sur une poutre flambée dans le plan. Nous montrons qu'aux échelles millimétriques les effets de tension de surfaces peuvent être suffisamment puissants pour induire une instabilité de claquage d'une poutre métallique.

Abstract :

We report on the capillary-induced snapping of soft elastic beams. A drop is gently deposited on a thin buckled polymer strip and triggers an elastocapillary snap-through instability. We investigate both theoretically and experimentally this phenomenon.

Mots clefs : flambage, fluide-structure, bifurcation

1 Introduction

Une coque sphérique ou un arc élastique peut supporter des charges transverses importantes avant de céder. Pour des structures minces une charge trop importante provoquera un effondrement du dôme ou de l'arche : le claquage. Le claquage [Tim35] est a priori une instabilité qui est évitée lors du dimensionnement des structures mais récemment ce phénomène a été mis à profit pour actionner des systèmes bi-stables [SG98]. D'autre part plusieurs phénomènes naturels font intervenir le claquage de poutre, plaques ou coques : capture de proie par la plante carnivore dionée [FSDMnt], éjection rapide de spores [NRW⁺12], pièges aquatiques [VWP⁺11].

2 Claquage sec

Une poutre sous chargement longitudinal répond d'abord en compression. Ce n'est que lorsque le chargement dépasse un certain seuil que les déformations de flexion apparaissent : c'est le flambage. Si l'on augmente encore la charge, le déplacement transverse augmente et la poutre adopte une forme d'équilibre en arche, en Λ . On fixe alors le déplacement axial et l'on introduit maintenant une force tranchante en milieu de poutre, dirigée vers le bas. Lorsque la force tranchante dépasse un certain seuil la poutre claque et adopte une forme d'arche inversée, en V. Le seuil de stabilité pour la force tranchante dépend du point précis où la force est appliquée, voir figure 1.

Les expériences sont réalisées avec des poutres de PDMS (Sylgard 184 Elastomer). L'épaisseur est vérifiée à l'aide d'un profilomètre : $h = 30\mu\text{m}$. Le module de Young est mesuré avec un essai en traction sur une machine Shimadzu : $E = 1.50 \pm 0.05$ MPa. Nous avons utilisé deux tailles de poutres données en Table 1.

3 Claquage mouillé

Nous remplaçons maintenant la force tranchante par une goutte d'eau. Nous déposons des gouttes de tailles croissantes sur la face supérieure d'une poutre flambée en Λ , voir Figure 2. La hauteur de l'arche

#	L (mm)	w (mm)	h (μm)	L_{eg} (mm)	Δ/L
S1	5	1.07	68.3	3.83	0.95
S2	3.5	0.98	33.7	2.39	0.90

TABLE 1 – Géométrie des poutres utilisées lors des expériences. La longueur élasto-gravitaire est définie comme $L_{\text{eg}} = (EI/\lambda g)^{1/3}$, où EI est la rigidité de flexion et λ la masse linéique. C'est la longueur que doit avoir une poutre pour être sensiblement fléchie sous son poids propre.

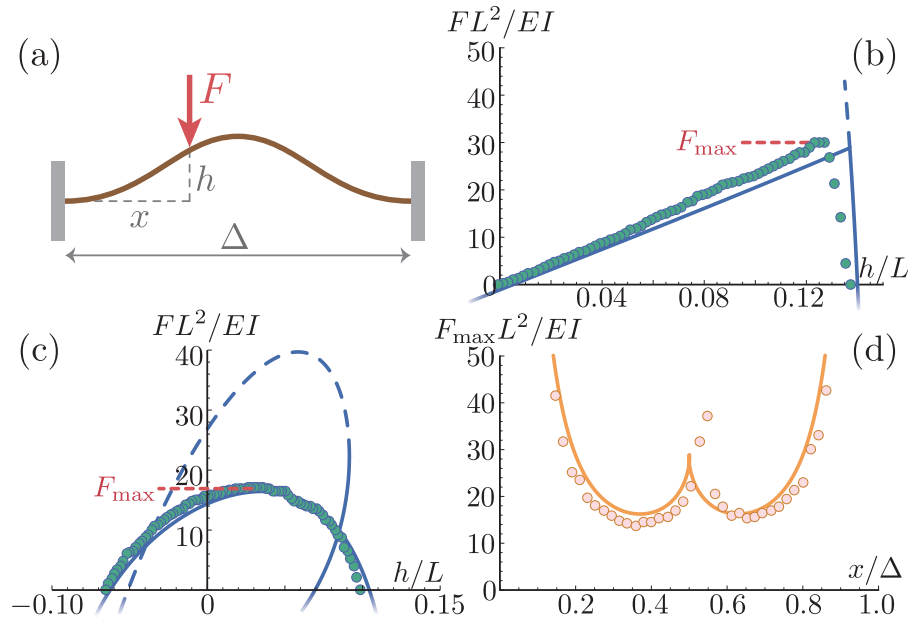


FIGURE 1 – Claquage par force tranchante. (a) Poutre encastree flambée dans le plan, avec un déplacement axial imposé $\Delta = 0.95L$. On indente verticalement le système : h est progressivement réduit et on mesure F . (b) Comparaison entre expérience et calcul dans le cas où l'indentation se fait en milieu de poutre : $x/\Delta = 1/2$, $F_{\text{max}} = 55 \mu\text{N}$. (c) Même diagramme de bifurcation mais cette fois dans le cas où $x/\Delta = 1/3$. (d) Evolution du seuil de claquage F_{max} en fonction du placement de la force tranchante. Il ressort deux positions symétriques préférentielles où la force seuil est minimale $x/\Delta \simeq 0.37$ and 0.63 .

est mesurée et reportée en fonction du poids de la goutte. Lorsque le volume de la goutte augmente la hauteur h de l'arche décroît, jusqu'à atteindre une limite pour laquelle le système cède et claque vers une configuration en V. Nous remarquons que toutes choses étant égales par ailleurs la poids de la goutte nécessaire pour faire claque le système est plus de moitié moindre comparé à la force tranchante critique mesurée sur l'expérience de claquage sec de la Section 2.

Nous répétons maintenant l'expérience mais plaçons la goutte sur la face inférieure d'une poutre fléchie en Λ . De la même manière nous augmentons le volume de la goutte jusqu'à obtenir le claquage. Nous remarquons que le poids de goutte nécessaire au claquage est bien plus important que la force tranchante nécessaire au claquage en configuration sèche, voir Figure 2. Nous en déduisons que les forces capillaires exercées par la goutte sur la poutre doivent être prises en compte lors du calcul d'équilibre et stabilité du système.

4 Conclusions

Nous avons montré que les forces capillaires peuvent aider ou gêner le claquage d'une poutre par force tranchante : pour une arche en Λ , une goutte placée sur la face supérieure (respectivement inférieure) d'une poutre induira le claquage vers le bas pour des poids de liquide bien inférieurs (respectivement

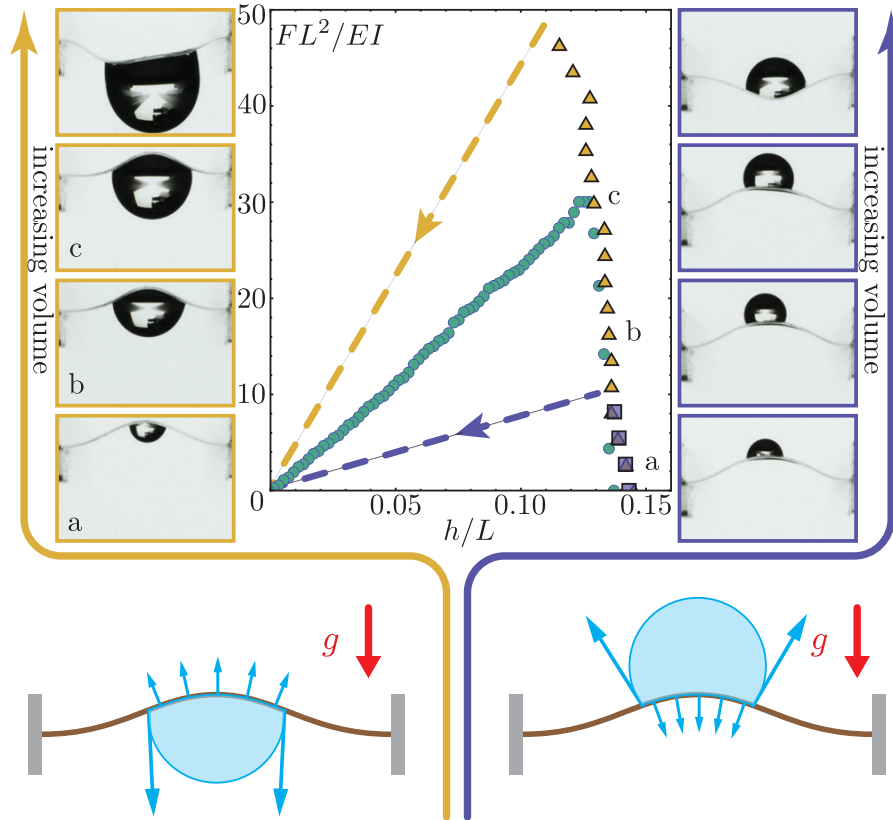


FIGURE 2 – Influence de la capillarité sur le diagramme de bifurcation de la Figure 1(b). Des gouttes de tailles croissantes sont déposées en dessous (triangles jaunes) ou au dessus (carrés bleus) d’une poutre de type S1, flambée vers le haut avec $\Delta = 0.95L$. Lorsque le poids de liquide adimensionné FL^2/EI croît, la déflection h/L décroît, jusqu’à un point où le système claque vers le bas. A titre de comparaison les données de la figure 1(b) sont aussi tracées (ronds bleu clair).

supérieurs) à la force tranchante nécessaire au claquage en configuration sèche. Ce rôle des forces capillaires qui devient prépondérant aux petites échelles amène la question suivante : est-il possible qu’une goutte déposée sur la face inférieure d’une arche en V induise un claquage du système vers le haut ?

Références

- [FSDMnt] Yoel Forterre, Jan M. Skotheim, Jacques Dumais, and L. Mahadevan. How the venus flytrap snaps. *Nature*, 433(7024) :421–425, 01 2005/01/27/print.
- [NRW⁺12] X. Noblin, N. O. Rojas, J. Westbrook, C. Llorens, M. Argentina, and J. Dumais. The fern sporangium : A unique catapult. *Science*, 335(6074) :1322, 2012.
- [SG98] W.K. Schomburg and C. Goll. Design optimization of bistable microdiaphragm valves. *Sensors and Actuators A : Physical*, 64(3) :259 – 264, 1998.
- [Tim35] S. P. Timoshenko. Buckling of flat curved bars and slightly curved plates. *J. Appl. Mech.*, 2 :17–20, 1935.
- [VWP⁺11] Olivier Vincent, Carmen Weißkopf, Simon Poppinga, Tom Masselter, Thomas Speck, Marc Joyeux, Catherine Quilliet, and Philippe Marmottant. Ultra-fast underwater suction traps. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 2011.