

ED SMAER

Sujet de thèses 2013

Laboratoire : Matière et Systèmes Complexes, UMR 7636

Etablissement de rattachement : CNRS et Université Paris Diderot

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Laurent LIMAT, section 10 du CNRS

Codirection et section CNU et CNRS : Luc LEBON, section 10 du CNRS

Titre de la thèse : **Nappes, cloches et rideaux liquides.**

Collaborations dans le cadre de la thèse : Andrew Belmonte, Penn State University (USA)

Rattachement à un programme :

Le sujet peut être publié sur le site web de l'ED SMAER : OUI ~~NON~~ rayer la mention inutile.

Résumé du sujet :

Dans de nombreuses situations industrielles ou naturelles, un liquide en écoulement rapide prend la forme d'une feuille bidimensionnelle libre: rideaux liquides tombant verticalement, cloches de forme plus ou moins complexe, lames liquide tombant d'un déversoir.... L'histoire de ces structures est très ancienne et remonte à Savart, qui s'était intéressé aux impacts de jets sur des solides, puis à leur rebond sous forme de nappes ou cloches liquides. Ce sujet, repris plus tard par Taylor, est resté très important du fait de ses multiples applications. Ainsi, l'enduction ou "coating" d'un solide par une couche fluide (vernis, traitement de surface) peut se faire par "couchage" d'un rideau liquide tombant sur ce solide en mouvement. L'atomisation d'un carburant en fines gouttelettes dans un moteur est également souvent engendrée par déstabilisation d'une nappe liquide (cylindrique ou cônica) émise par une buse très petite. Malgré de nombreux travaux, la compréhension de ces écoulements reste imparfaite. Ainsi, on ne sait toujours pas bien ce qui contrôle la stabilité d'un rideau liquide tombant à faible vitesse entre deux guides limitant le cintrage, particulièrement lorsque le liquide est très visqueux ou même viscoélastique. La forme prise par des cloches liquides très visqueuses ou viscoélastiques formées par impact d'un jet sur un disque est également encore mal résolue. Des expériences un peu parcellaires montrent des formes parfois surprenantes, dont la genèse reste à comprendre, et qui peuvent même être utilisées pour caractériser la viscoélasticité (rhéomètre sans contact). D'une façon générale, les scénarios et dynamiques de rupture de nappes liquides (visqueux ou non-newtoniens) restent imparfaitement explorés, malgré des applications industrielles importantes. Un exemple original de rupture est celle induite par la présence de bulles en assez grand nombre dans le liquide. On s'efforcera de caractériser celle-ci en combinant des expériences et des modèles simples en terme d'hydrodynamique physique dans deux géométries idéales (rideaux verticaux à basse vitesse et cloches formées par impact). On explorera aussi la forme des cloches en variant les propriétés du liquide, particulièrement son caractère visco-élastique. A plus long terme, des situations plus complexes seront explorées: nappes en écoulement très rapide, ondulantes et turbulentes, nappes formées à la rencontre de deux jets, etc...

Sujet développé (à présenter en 2 ou 3 pages maximum, en précisant notamment le contexte, les objectifs, les résultats attendus)

Contexte et Objectifs.

L'histoire des nappes et cloches liquides libres remonte à Savart, Boussinesq puis Taylor. Des progrès importants ont été faits par Brown, Lin, Weinstein et d'autres, et par les équipes spécialisées dans le "coating" (enduisage) pour le cas des rideaux liquides (cf Miyamoto et Katagiri 1997), tandis que des comportements spectaculaires ont été mis en évidence, dans le cas des cloches ou nappes annulaires par Bush, Clanet, Villermaux et d'autres. Il reste toutefois de nombreuses zones d'ombre, qui jointes au caractère très intrigant des formes observées, en font un sujet de recherche encore très attractif. Ainsi le problème, pourtant simple en apparence, de la stabilité d'un rideau liquide vertical, basse vitesse, tombant entre deux guides (cf. figure de gauche) reste mal compris. Les approches académiques mènent invariablement à l'existence d'un nombre de Weber critique, comparant inertie de l'écoulement à la tension de surface, au dessus duquel le rideau serait stabilisé. En pratique, la viscosité, qui n'entre pas dans ce critère, semble jouer un rôle clef, avec, une valeur optimale (20 cP pour les solutions de gélatine dans les anciens procédés de coating pour photos argentiques) toujours inexplicée. Enfin, le cas de rideaux très visqueux, ou viscoélastiques n'est pas non plus compris, malgré de nombreuses applications industrielles, dans le domaine du coating. Dans une autre direction, la forme de cloches liquides très visqueuses a suscité des images surprenantes avec des effets de facettage (travaux de J. Bush, exemple reproduit au centre de la figure), mais les mécanismes, la description théorique de ces formes reste peu explorés. Enfin, le cas de cloches viscoélastiques est quasiment inconnu, à part peut être quelques articles dont un de Entov. Des travaux préliminaires dans notre équipe [Lebon et al., 2006] ont montré des effets sur la forme importants (à droite), pouvant même être utilisés pour caractériser cette visco-élasticité (rhéomètre visuel, sans aucune pièce mobile). Enfin, la question de l'atomisation de ces cloches viscoélastiques (dernière image de droite) est un problème également non résolu, nos premières expériences suggérant des scénarios atypiques de fragmentation en très longs filaments, après ouverture de trous en expansion dans la paroi de la cloche.



Figure: de gauche à droite, rideau visqueux tombant entre deux guides, perturbé par éclatement d'un chapelet de bulles (L. Lebon et T. Merle), ouverture spontanée d'un rideau turbulent (L. Limat, fontaine de Molinges, Jura), cloche facettée visqueuse (J. Bush), cloche viscoélastique formée par impact d'un jet vertical sur un disque horizontal (A. Belmonte et L. Lebon), et son atomisation filamenteuse par croissance de trous interférant (Belmonte et Lebon, vue en caméra rapide).

Dans cette thèse, nous souhaitons développer des expériences permettant de comprendre les lois et mécanismes mis en jeu, en compliquant la situation de façon progressive. En parallèle, des modèles seront proposés, analytiques, et de complexité croissante. Nous considérerons ainsi successivement les cas suivants:

1) Rupture d'un rideau liquide très visqueux, viscoélastique, puis bulleux...

Reprenant une étude ancienne que nous avons conduite sur des rideaux inertiels, à basse viscosité [Roche et al., 2006, Le Grand 2006], nous souhaitons caractériser la croissance de trous dans un rideau très visqueux, puis la forme des "arches" obtenues aux temps longs. Des résultats préliminaires nous ont montré que différents scénarios étaient possibles: croissance limitée avec convection vers l'aval, fermeture, expansion en formant une arche liquide tombante ogivale, rupture complète avec formation d'un bord libre statique. Il s'agira ensuite d'explorer le cas de rideaux viscoélastiques, dans lesquels les tensions élastiques vont s'opposer à l'ouverture. De ce point de vue, beaucoup d'applications visent à restabiliser les rideaux liquides par ajout de composés viscoélastiques (en plus de surfactants), mais aucune modélisation, ni même observation quantitative n'est disponible dans la littérature... Enfin, nous voulons explorer le cas de liquides bulleux [Lhuissier et Villermaux, 2013], mais très visqueux ou viscoélastiques, qui posent problème pour de nombreux procédés de "coating": quelle taille de bulle va conduire à une rupture du rideau, comment se compare cette taille à son épaisseur, comment limiter ou contrôler les ouvertures? Du point de vue des applications, un contrat est en cours avec une société utilisant des rideaux liquides aqueux de ce type.

2) Cloches liquides très visqueuses puis viscoélastiques (avec C. Belmonte).

Du côté des cloches liquides, nous souhaitons engendrer de façon contrôlée des cloches liquides visqueuses, puis viscoélastiques par impact d'un jet sur un disque, en explorant leur forme, puis leur stabilité. Nous tenterons également, dans le cas des cloches visqueuses, de contrôler ou forcer l'ordre de symétrie en jouant sur la forme ou la surface de la cible impactée. Au niveau des modèles, l'approche de Entov [Entov et al. 1980] est relativement lourde. Nous souhaitons construire des approches au départ plus simples, puis les compliquer en ajoutant des effets, et en ne traitant qu'en fine le cas des modèles les plus élaborés de viscoélastiques (collaboration probable avec Cyprien Gay et A. Ponton).

5) Rupture de cloches liquides visqueuses ou viscoélastiques, atomisation.

La question de la rupture des cloches liquides généralisera les observations qui seront faites sur les rideaux à 2D. Nous explorerons les scénarios à la caméra rapide en construisant des modèles inspirés de ce cas plus simple (croissance de trous sur une surface courbe, puis formation de ligaments, etc...). Nous comparerons entre elles diverses situations: cloches inertielles, cloches visqueuses, cloches viscoélastiques, cloches bulleuses, émulsions...

6) Rideaux turbulents - Auto-oscillations des déverseurs.

Dans une direction complètement différente, la simple observation (par exemple sur une fontaine, comme sur la figure) de rideaux liquides turbulents à haut débit révèle des effets étonnants: contrairement aux rideaux très visqueux, les fluctuations de la surface conduisent à des ouvertures et fermetures incessantes de trous, lorsque le débit n'est pas trop élevé. Leur périmètre est irrégulier, avec des ondulations des bords à très petite échelle. Ce régime d'écoulement est peu connu, la plupart des études s'étant focalisée sur l'atomisation à haut débit. Un autre phénomène observé à bas débit est la mise en oscillation du rideau avec une fréquence très caractéristique (bruit rythmé des fontaines et déverseurs). A notre connaissance ces régimes n'ont jamais été explorés, nous souhaitons les reproduire et les comprendre (collaboration probable avec C. Clanet).

Conclusion.

Comme on peut le remarquer, le domaine est très riche, et il reste encore de nombreux problèmes mal explorés, voir même complètement inconnus. Du côté théorique, le problème combine différents aspects: approches en terme de mécanique physique de l'ouverture de trous ou de la forme de bords libres, calculs de déformation d'une surface avec effets viscoélastiques, stabilité en terme absolu et convectif de rideaux liquides... Au niveau des applications, nous avons obtenu un contrat de quelques mois avec une entreprise préoccupée par l'application de peinture aqueuse plus ou moins table sur des solides. Nous pensons maintenir ces collaborations industrielles et les amplifier.

Bibliographie:

- F. Savart, Mémoire sur le choc d'une veine liquide lancée contre un plan circulaire, *Ann. Chim.*, 54 (1833).
- J. Boussinesq, Théorie des expériences de Savart, sur la forme que prend une veine liquide après s'être choquée contre un plan circulaire, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 69 (1869).
- W.N. Bond, The surface tension of moving water sheet, *Proc. Phys. Soc. B*, 67 (1935).
- F.L. Hopwood, Water bells, *Proc. Phys. Soc. B*, 65 (1952).
- G.I. Taylor, The dynamics of thin sheets of fluid. I Water bells, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 253 (1959).
- D. R. Brown, A study of the behaviour of a thin sheet of moving liquid, *J. Fluid Mech.* 10, 297 (1961).
- V. M. Entov, S. Kestenboim, A. N. Rozhkov and L. I. Sharchevich, Dynamic equilibrium shape of a film of viscous or viscoelastic liquid, *Fluid. Dyn.* 15, 181-189 (1980).
- S. P. Lin and G. Roberts, Waves in a viscous liquid curtain, *J. Fluid Mech.* 112, 443 (1981).
- S. P. Lin, Stability of a viscous liquid curtain, *J. Fluid Mech.* 104, 111 (1981).
- S. P. Lin, Z. W. Lian, and B. J. Creighton, *J. Fluid Mech.* 220, 673 (1990)
- D. S. Finnicum, S. J. Weinstein, and K. J. Ruschak, The effect of applied pressure on a liquid curtain falling under the influence of gravity, *J. Fluid Mech.* 255, 647 (1993).
- K. Miyamoto and Y. Katagiri, "Curtain coating," in *Liquid Film Coating* (ed. S. F. Kistler & P. M. Schweizer), pp. 461–494. Chapman & Hall (1997).
- L. de Luca and M. Costa, Instability of a spatially developing liquid sheet, *J. Fluid Mech.* 331, 127 (1997).
- L. de Luca, Experimental investigation of global instability of plane sheet flows, *J. Fluid Mech.* 399, 355 (1999).
- P. Marmottant, E. Villermaux & C. Clanet, Transient surface tension of an expanding liquid sheet. *J. Colloid Interface Sci.* 230, 29–40 (2000).
- R. Buckingham & J.W.M. Bush, Fluid Polygons, *Phys. Fluids*, 13 (2001).
- C. Clanet, Dynamics and stability of water bells, *J. Fluid Mech.*, 430 (2001).
- P. Marmottant & E. Villermaux, On spray formation. *J. Fluid Mech.* 498, 73–111 (2004).
- P. Brunet, C. Clanet & L. Limat, Transonic liquid bells, *Phys. Fluids*, 14 (2004).
- P. Luchini, Is a plane liquid curtain algebraically absolutely unstable ? *Phys. Fluids* 16, 2154 (2004).
- J.-S. Roche, N. Le Grand, P. Brunet, L. Lebon, and L. Limat, Perturbations on a liquid curtain near break-up: Wakes and free edges, *Phys. Fluids* 18, 082101 (2006).
- N. Le Grand-Piteira, P. Brunet, L. Lebon and L. Limat, Propagating wave pattern on a falling liquid curtain, *Phys. Rev. E* 74, 026305 (2006).
- L. Lebon, L. Limat, & A. Belmonte, Cloches de liquides viscoélastiques, *Actes des Rencontres du Non-Linéaire*, Institut Poincaré (2006).
- N. Brémont, C. Clanet & E. Villermaux, Atomization of undulating liquid sheets. *J. Fluid Mech.* 585, 421–456 (2007).
- "Effervescent" atomization in two dimensions, H. Lhuissier and E. Villermaux, *J. Fluid Mech.*, 714, 361-392 (2013).