

ED SMAER

Sujet de thèses 2014

Laboratoire : Institut d'Alembert

Etablissement de rattachement : Université Pierre et Marie Curie

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : R. Wunenburger (60)

Codirection et section CNU ou CNRS :

Titre de la thèse : **Ejection acoustique de gouttes**

Collaborations dans le cadre de la thèse :

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 :

NOTA : L'ED SMAER collecte environ 100 fiches par an. Merci de limiter cette fiche à 1 page maxi.

L'objectif de la thèse est d'étudier expérimentalement l'éjection de gouttes de fluides simples et complexes depuis une surface libre, obtenue en utilisant les forces de radiation acoustique associées à des faisceaux ultrasonores intenses. Outre l'identification des mécanismes fondamentaux à l'œuvre dans le processus d'éjection à la surface libre de fluides simples (importances relatives des forces de radiation acoustiques de surface et de volume dans l'éjection, influence de la viscosité...), l'émulsification et l'encapsulation acoustique seront étudiées. L'étude sera étendue aux fluides complexes, en particulier aux gels physiques et aux fluides à seuil, qui présentent tous deux un fort potentiel applicatif, et dont on s'attend à ce que la rhéologie non-newtonienne et non-linéaire modifie fortement le scénario d'éjection.

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

Les ondes acoustiques exercent des forces de moyenne temporelle non nulle sur la matière (effets redressés), appelées *forces de radiation*. Ces forces peuvent être classées en deux catégories :

- Des forces s'exerçant aux interfaces, dues aux contrastes de densité et de compressibilité entre les deux milieux en contact. Ces forces surfaciques, communément appelées *pression de radiation*, impriment des déformations stationnaires aux interfaces liquides ou molles.
- Des forces s'exerçant dans le volume du milieu ou dans les couches limites, à cause de l'atténuation du son par dissipation. Ces forces déclenchent des écoulements redressés lorsque le milieu de propagation est fluide, qui sont communément appelés *acoustic streaming*, ou des déformations permanentes lorsque le milieu de propagation est un solide mou.

Ces forces sont le résultat du transfert de quantité de mouvement de l'onde au milieu de propagation qui se produit lorsque la quantité de mouvement du son varie à la traversée d'une interface ou par dissipation. Ces forces sont impliquées dans de nombreux procédés dédiés à la manipulation de fluides, de solides mous ou d'interfaces à l'échelle sub-millimétrique, qui ont émergé durant les dix dernières années, parmi lesquelles La production et le transport contrôlés de gouttelettes (cf. Figure 1a) :

- pour la distribution sans contact d'échantillons pour le criblage biologique automatisé à haut débit (voir par exemple les compagnies EDC Biosystems et Labcyte, Californie)
- pour l'impression de type jet d'encre de matériaux pour la microélectronique, la micro-lithographie...

Dans ces procédés, des gouttes de volume de l'ordre du nanolitre et de diamètre de l'ordre de 50 μm sont produites en utilisant des faisceaux acoustiques focalisés de fréquence de l'ordre de 10 MHz.

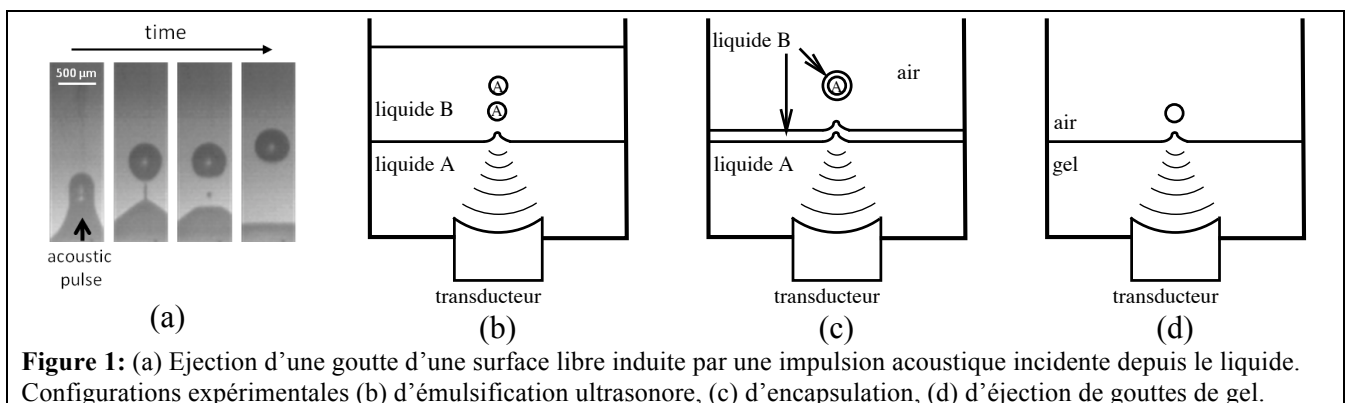


Figure 1: (a) Ejection d'une goutte d'une surface libre induite par une impulsion acoustique incidente depuis le liquide. Configurations expérimentales (b) d'émulsification ultrasonore, (c) d'encapsulation, (d) d'éjection de gouttes de gel.

Pourtant, il y a eu très peu d'études fondamentales de ces procédés induits par les forces de radiation acoustiques, en particulier, seules des excitations acoustiques impulsionnelles et de la dynamique non visqueuse ont été décrites (Cinbis 1993, Tjan 2007). Pourtant :

- des expériences préliminaires ont mis en évidence l'influence de la durée d'excitation acoustiques sur le volume et même le nombre des gouttes éjectées,
- réduire la taille des gouttes éjectées et augmenter de la versatilité de cette technique nécessitent d'élucider la rôle de la viscosité sur le processus d'éjection. On s'attend en

effet à ce que la viscosité ait deux conséquences : (i) l'influence de l'acoustic streaming sur la déformation de la surface conduisant à l'éjection, (ii) un écoulement non parfait du liquide poussé.

Mécanismes d'éjection acoustique de gouttes de fluides simples

Le premier objectif de la thèse sera donc de contribuer à la compréhension et à l'amélioration des procédés d'éjection acoustique de gouttes en élucidant les mécanismes fondamentaux d'éjection (éjection pilotée par les forces de surface versus de volume, écoulements parfaits versus rampants) et en décrivant ses caractéristiques (nombre, volume, vitesse des gouttes) en fonction des propriétés du liquide et de l'excitation acoustique, des importances relatives de l'inertie, de la gravité, des forces capillaires, des forces visqueuses et de la durée d'excitation. Pour atteindre cet objectif, des expériences impliquant des faisceaux acoustiques intenses seront conduites. De l'acquisition vidéo rapide et de l'analyse de l'éjection de gouttes, potentiellement couplées à de la vélocimétrie par imagerie de particules, seront mises en œuvre. Ces expériences pourront être éventuellement complétées par des simulations numériques d'écoulements diphasiques dans le cadre de collaborations internes à l'Institut d'Alembert.

Emulsification acoustique

Par analogie avec l'éjection de gouttes à une surface libre, l'éjection de gouttes à une interface liquide-liquide (cf. Figure 1b) devrait constituer un procédé d'émulsification bien contrôlée avec un haut degré potentiel de monodispersité. Déterminer expérimentalement les conditions d'émulsification acoustique constitue un développement possible de la thèse.

Encapsulation

La direction et l'amplitude des forces de radiation de surface exercées sur une interface dépendent des contrastes de densité et de compressibilité à l'interface. Déterminer dans quelle conditions l'encapsulation d'un liquide A dans un liquide B peut être obtenue (cf. Figure 1c). constitue un autre axe de développement possible de la thèse. Ce procédé présente un intérêt potentiel pour la synthèse d'aérosols thérapeutiques.

Ejection de fluides complexes

Les fluides complexes (polymères, émulsions, ...), à rhéologie non-newtonienne, parfois non-linéaire, avec effets mémoire, ou présentant un seuil d'écoulement (fluide à seuil)... sont présents dans la majorité des produits de la vie courante, détergents, produits agro-alimentaires, fluides biologiques, ... Contrôler leur éjection permet d'envisager de nombreuses retombées applicatives. En particulier il est proposé d'étudier expérimentalement dans quelles conditions (i) des gels physiques (analogue à la gelée alimentaire), (ii) des fluides à seuil (analogue au gel coiffant) peuvent être éjectés en utilisant des ondes acoustiques (cf. Figure 1d). Etudier comment éjecter un gel physique de sa surface libre présente un double intérêt :

- contribuer à déterminer dans quelle mesure les dégâts collatéraux (comme des hémorragies des poumons et des intestins) des procédés de thérapie (comme la lithotripsie et l'hyperthermie) et même d'imagerie rapide ultrasonore pourraient être dus aux forces de radiation acoustique. Celles-ci commencent en effet à être suspectées (Tjan 2007), plutôt que la cavitation, qui est impliquée en histotripsie à des

indices mécaniques plus élevés. Les organes affectés sont en effet caractérisés par des contrastes d'impédance élevés. A ce stade, des expériences contrôlées de déformations et d'éjection de solides mous modèles (gels) constituent une étape essentielle.

- étudier la faisabilité du transfert par ondes acoustiques d'échantillons de cultures cellulaires en milieu gel, qui pourrait constituer une alternative technologiquement plus simple et potentiellement moins intrusive à la technique de Laser Induced Forward Transfer consistant en une ablation par cavitation générée par la réflexion à la surface libre d'une onde de choc induite par laser dans le milieu de culture (Unger 2011).

Dans le cas des fluides à seuil, l'irradiation acoustique peut-elle conduire à de la fluidisation du fluide à seuil ? Pourrait-on en déduire un procédé d'éjection en deux étapes constituées d'une fluidisation préliminaire à faible puissance suivie d'une éjection à puissance acoustique plus faible qu'en absence de fluidisation ?

Bibliographie

- Elrod 1989 S.A. Elrod et al., *Nozzleless droplet formation with focused acoustic beams*, J. Applied. Phys. **65**, 3441 (1989).
- Tjan 2007 K. K. Tjan and W. C. Phillips, *On impulsively generated inviscid axisymmetric surface jets, waves and drops*. J. Fluid Mech. **576**, 377 (2007)
- Unger 2011 C. Unger, M. Gruene, L. Koch, J. Koch and B. N. Chichkov, *Time-resolved imaging of hydrogel printing via laser-induced forward transfer*, Appl. Phys. A **103**, 271 (2011)