

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 : Régis Wunenburger (60)

Codirection et section CNU ou CNRS : Michaël Baudoin (60)

Titre de la thèse : Dynamique et transport de gouttes par ondes acoustiques de surface

Collaborations dans le cadre de la thèse : Philippe Brunet (10)

Rattachement à un programme : ARE AWESOME

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.

Les ondes acoustiques de surface sont couramment utilisées pour transporter, mélanger, et atomiser des gouttes posées en microfluidique pour des applications de plus en plus nombreuses en chimie, biotechnologies et biomédical. Pourtant, les mécanismes hydrodynamiques à l'œuvre dans leur transport, qui associent ondes de surface, écoulements dans les gouttes, propagation acoustique, forces de radiation, et mouvement de ligne triple, ne sont toujours pas élucidés. L'objectif de cette thèse est d'élucider les mécanismes de déformation et de transport de gouttes de liquides simples et complexes par ondes acoustiques de surface. Pour cela, plusieurs types d'expériences sur des gouttes posées seront menées en parallèle de modélisations théoriques et numériques afin d'élucider et de décrire précisément les mécanismes hydrodynamiques à l'œuvre dans le transport de gouttes posées par ondes acoustiques de surface.

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, notamment dans le contexte de la **microfluidique**.

La microfluidique est un domaine de recherche scientifique et technologique émergé il y a une quinzaine d'années et dédié à la miniaturisation de toutes les opérations physiques et chimiques impliquant des fluides, dans le but de réduire le volume des échantillons traités ainsi que d'accélérer et d'automatiser les diagnostics physico-chimiques et biologiques. Usuellement, le transport des échantillons est réalisé soit dans des micro-canaux sous forme de gouttes transportées par une phase liquide externe mouillant totalement les parois des canaux, soit à l'air libre sous forme de gouttes posées sur un substrat solide. Les gouttes posées peuvent être transportées de plusieurs manières, par exemple en utilisant des gradients de propriétés de surface (gradients de mouillabilité, effets thermo-capillaires) ou des ondes acoustiques de surface (OAS). Les ondes de surface sont aussi communément utilisées pour mélanger, fusionner et atomiser des gouttes posées qui peuvent alors être utilisées comme micro-réacteurs. Dans ces procédés, des gouttes posées de volume de l'ordre du microlitre et de diamètre de l'ordre de 500 μm sont manipulées avec des ondes de surface planes ou focalisées de fréquence de l'ordre de 10 MHz.

Le principe du transport des gouttes posées par OAS est le suivant : quand une OAS de type onde de Rayleigh (c'est-à-dire associant un mouvement longitudinal et un mouvement transverse perpendiculaire à la surface) se propageant le long de l'interface entre un substrat et l'air atteint la zone où le substrat est en contact avec un liquide, elle est partiellement convertie en onde acoustique de volume qui se propage au sein du liquide, voir la Figure 1a. Les forces de radiation acoustiques exercées en volume et à l'interface liquide-air par cette onde émise depuis le substrat peuvent alors être exploitées pour déformer et déplacer des gouttes posées, les atomiser, réaliser du mélange à l'intérieur de la goutte (Friend 2011) ... Pourtant, il n'y a actuellement aucun consensus sur les mécanismes selon lesquels le transport et l'atomisation de gouttes posées par OAS se réalisent. **L'objectif de cette thèse est d'élucider les mécanismes**

de déformation et de transport de gouttes de liquides simples et complexes par OAS.

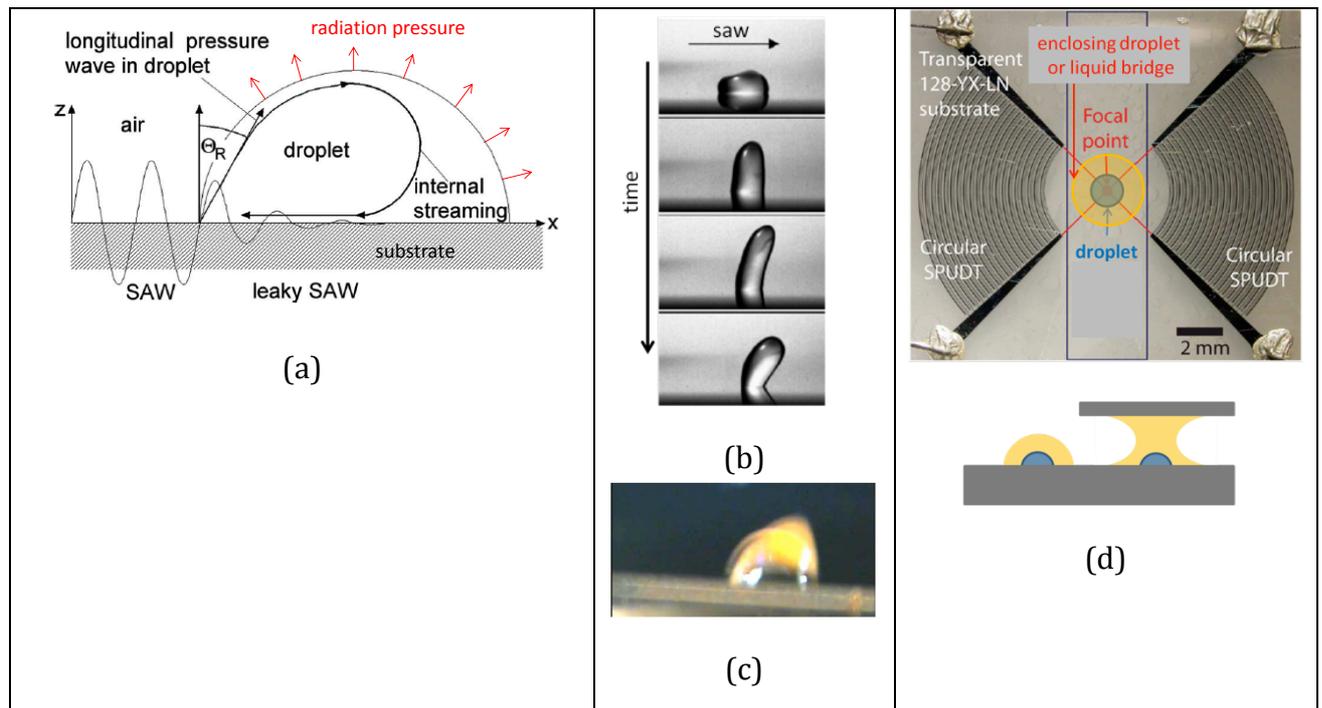


Figure 1: (a) Principe du transport de gouttes posées par ondes acoustiques de surface (OAS, SAW en anglais) : une onde progressive de surface de type onde de Rayleigh se propageant à la surface d'un substrat et atteignant une goutte est partiellement convertie en onde longitudinale de compression se propageant à travers la goutte et s'atténue le long de son trajet sous la goutte (leaky SAW). L'onde de volume induit un écoulement interne par dissipation visqueuse et exerce simultanément une pression de radiation sur la surface de la goutte. (c) Déformation et déplacement d'une goutte posée par action d'une onde de surface (SAW) progressive se propageant de la gauche vers la droite à la surface du substrat (haut : Brunet 2010, bas : Wixworth 2004). (d) Configuration d'excitation acoustique à symétrie axiale permettant de déformer la goutte sans la déplacer : une goutte (en bleu) est posée au point focal d'un ensemble de deux transducteurs focalisés à électrodes interdigitées déposées sur un substrat piézoélectrique. La goutte sera éventuellement recouverte par une autre goutte ou un pont liquide (en jaune), comme schématisé en bas.

Les rôles joués par les forces de radiation de surface et de volume dans les processus d'oscillation et de transport ne sont en effet actuellement pas élucidés. La modélisation de ces phénomènes est extrêmement complexe. En effet les formes des interfaces et les champs acoustiques impliqués sont souvent tridimensionnels, les écoulements induits par les forces de radiation acoustiques sont à surface libre, et de nombreux phénomènes couplés se produisent simultanément : ondes à la surface liquide-air, écoulements dans les gouttes, propagation acoustique, forces de radiation, mouvement de ligne triple. Il apparaît que le transport de gouttes posées de liquides simples s'accompagne souvent d'oscillations de forme (Wixforth 2004, Brunet 2010) voire de sauts (Renaudin 2007). Il a été montré que des oscillations forcées paramétriquement augmentent considérablement l'efficacité du transport (Baudoin 2012), dès qu'elle conduisent au dépiégeage de la ligne triple de contact. Les oscillations de gouttes apparaissent donc comme la clé du transport de gouttes posées. **Plusieurs types d'expériences sur des gouttes posées ou immergées** (cf. figure 1d) **seront menées en parallèle de**

modélisations théoriques et numériques afin d'élucider l'origine de ces oscillations et de décrire précisément les mécanismes hydrodynamiques à l'œuvre dans le transport de gouttes posées par OAS.

Transport et déformation de gouttes posées de fluides visco-élastiques

Parallèlement au cas des fluides simples, le transport de fluides complexes, en particulier de fluides visco-élastiques, n'a jusqu'à présent pas fait l'objet d'études. Pourtant, il constitue une question importante en terme d'applications. On peut anticiper que la visco-élasticité conduise à de nouveaux scénarios de transport, de déformation et d'atomisation induit par les OAS. En particulier, les polymères liquides, d'importance industrielle considérable, présentent une forte élasticité dans le domaine du MHz. En conséquence, on s'attend à ce qu'une onde de surface de type Rayleigh soit convertie en une onde longitudinale de compression et en une onde transverse de cisaillement à l'interface polymère-substrat, cf. Figure 5b. On s'attend à ce que l'hydrodynamique de ces gouttes soit déterminée par la propagation d'ondes transverses et longitudinales, qui peuvent être couplées par des conversions lors de leurs réflexions à l'interface polymère-substrat et à la surface de la goutte. Plusieurs questions émergent :

- Le forçage d'ondes de cisaillement intense, éventuellement résonantes, dans la goutte, peut-il conduire à la déformation, voire au transport de la goutte ? Des ondes de cisaillement pur pourraient-elles être utilisées à la place d'OAS afin d'éviter le forçage d'ondes longitudinales dans la goutte ?
- De la coopération peut-elle s'établir entre certains effets de ces deux types d'ondes ?
- Ces ondes de cisaillement pourraient-elles contribuer au déclenchement d'instabilités interfaciales, de la même manière que l'instabilité paramétrique de Faraday facilitée par des ondes de cisaillement stationnaires résonantes dans les fluides viscoélastiques (Ballesta 2006) ? Ceci pourrait promouvoir le transport de gouttes.

Ondes émises par une goutte mobile

Réciproquement, une goutte mobile émet-elle des ondes élastiques à la surface du substrat sur lequel elle se déplace ? Cette question est motivée par les récentes avancées de la compréhension du phénomène de mouillage statique et dynamique. Une goutte posée exerce en effet des forces d'origine capillaire sur le substrat. Lors de son déplacement, par exemple sous l'effet de la gravité, une goutte peut subir des cycles de freinage/arrêt/redémarrage associés au piégeage/dépiégeage de la ligne triple de contact, au cours desquels des ondes élastiques résultant des forces exercées par la goutte sur le substrat pourraient être émises. Détecter ces ondes permettrait de caractériser la rugosité du substrat, mais aussi la statistique des événements de piégeage-dépiégeage et ainsi de contribuer à élucider les mécanismes de dissipation d'énergie accompagnant le déplacement des gouttes, qui fait encore à l'heure actuelle l'objet de nombreux débats.