

Appel A Projets I : formulaire de candidature

Nom du correspondant : Chinaud Maxime

Nom du projet : **CABRIBIO (CApillary BRIDGE BIOlogical)**

Résumé du projet (5 lignes en anglais)

The shape of an interface between two immiscible fluids allows to characterise the physico-chemical properties of the interface in a non-intrusive manner. These properties are key elements for understanding mass transfer phenomena, and bio-chemical reactions at interfaces. In this project we propose to study the interfacial properties of an active biological fluid in the presence of mass transfer and / or stimulated by chemical reactions. We will consider a drop of liquid placed between two horizontal plates in a configuration like a Hele-Shaw cell [20]. This experimental arrangement has two main advantages, (i) it allows fine control of mass transfer (diffusive regime) and (ii) to evaluate the interfacial properties in quasi-static regime. The Hele-Shaw cell allows the effects of heat and mass transfers to be separated from the mechanics of the liquid bridge.

In this configuration, the properties of the interface, modified by the biological suspensions contained in the fluid, will be measured simultaneously by an optical technique and a mechanical technique using a precision weight scale. We will measure the shape and position of the interface and the forces of the liquid bridge, which will allow us to access the evolution of evaporative mass transfers and the modifications of surface energies induced by biochemical reactions.

Volet(s) complémentaires demandé(s) :

Collaboration internationale Pédagogie

Contenu scientifique

Contexte scientifique

I. Rappels bibliographiques et contexte de l'étude :

Les phénomènes d'interface ont été largement étudiés depuis les travaux fondateurs de Plateau [1] et de Rayleigh [2]. La forme d'une interface entre deux fluides est décrite par l'équation de Young-Laplace qui lie le saut de pression à la courbure totale de l'interface. Le pont liquide entre deux plaques horizontales est un cas d'école qui a donné naissance à une abondante littérature de travaux théoriques et expérimentaux [3]. Ces études ont caractérisé la force générée par le pont liquide et les conditions de rupture du pont liquide [4, 5] pour comprendre par exemple comment « tient » un château de sable [6]. Il existe de nombreux exemples de problèmes de ponts liquides dans l'industrie ou dans la nature [7].

Des cas plus complexes, considérant des géométries différentes (sphères, cônes, etc.) et couplant la mécanique du pont aux transferts de masse évaporatifs ont aussi été étudiés [8, 9, 10]. Récemment, l'évaporation d'un pont capillaire entre deux plaques a été explorée dans des conditions bien contrôlées par Portuguez et al. [11, 12] pour différents angles de mouillage et humidités de l'air.

Le pont capillaire est l'une des configurations les plus standards dans laquelle les effets d'interface peuvent être étudiés et caractérisés. La configuration expérimentale en cellule de Hele-Shaw proposée ici se distingue du cas simple de l'évaporation d'une goutte sessile sur un substrat car elle permet : (i) de ramener le problème 3D à une étude 2D, (ii) de contrôler le flux d'évaporation en modifiant l'entrefer entre les deux plaques et (iii) d'évaluer directement les propriétés de la surface en mesurant la force générée par le pont liquide. Pour une goutte sessile, les énergies de surface ne sont pas accessibles directement et doivent faire appel à des reconstructions difficiles et moins précises. La technique du pont capillaire en cellule de Hele-Shaw est fiable, contrôlable et plus précise que la technique de la goutte sessile pour caractériser les propriétés des interfaces. Une première collaboration entre AMU-IUSTI et l'Université de Liège a permis de caractériser et de valider le concept de mesure des propriétés interfaciales par pont liquide en cellule de Hele-Shaw [13].

Les propriétés de surface sont particulièrement importantes pour les fluides biologiques. Les bactéries, par exemple, ont accès à l'oxygène de l'air par transfert de masse au niveau de l'interface. Certaines bactéries sécrètent des molécules biologiques (protéines, polysaccharides, etc.) qui peuvent modifier les propriétés de surface et donner lieu à la production de bio-surfactants [14, 15]. Ces bio-surfactants et/ou biofilms sont utilisés industriellement pour la production de produits pharmaceutiques [16] et alimentaires (produits laitiers transformations [17], procédé spécifique de vinification [18], etc...). Dans ce contexte, plusieurs tentatives ont été faites pour caractériser l'effet des bio-sécrétions sur les propriétés de l'interface, comme le test de chute de goutte [19]. Les tests actuels découplent mal les différentes propriétés du fluide (le test de chute de goutte fait intervenir la viscosité du fluide par exemple) ou bien sont difficiles à mettre en œuvre et ne contrôlent pas les conditions de transfert de masse (goutte sessile).

Notre dispositif de pont capillaire en cellule de Hele-Shaw nous permet de caractériser proprement et de manière découplée les propriétés de surface d'un liquide biologique actif (présentant un gradient de concentration le long de la surface ou des propriétés évoluant dans le temps). Nous mesurons expérimentalement le taux d'évaporation et les forces de surface générées par le pont capillaire. Nous mesurons aussi l'évolution de ces quantités dans le temps lors de la production de bio-surfactants ou bien de la construction d'un biofilm.

Le projet est organisé comme suit :

- Mise en œuvre d'un dispositif expérimental instrumenté et automatisé pour évaluer l'évolution des forces capillaires et des transferts de masse aux interfaces dans le temps.
- Mise en œuvre d'un modèle pour relier les mesures de forces et de taux d'évaporation aux tensions de surface et aux cinétiques de transfert de masse.
- Mise en œuvre d'un modèle théorique-numérique pour évaluer les transferts de masse aux interfaces.
- Si l'étude s'avère concluante, nous envisageons de réaliser un dispositif automatisé pour caractériser les propriétés de surface des bio-fluides actifs à destination de l'industrie pharmaceutique et agroalimentaire.

II. Contexte du projet

Le laboratoire AMU-IUSTI travaille depuis de nombreuses années sur les phénomènes de changement de phase et des transferts de chaleur et de masse pour des applications à l'industrie et à l'énergie. Les configurations sur lesquelles nous travaillons sont des configurations idéalisées pour comprendre les phénomènes de transferts sur des entités élémentaires : bulles, gouttes, particules. Les configurations considérées jusqu'alors ne permettent pas de mesurer directement les forces capillaires. Pourtant l'accès à ces forces est fondamental pour comprendre le comportement des interfaces soumises aux transferts de masse et/ou aux réactions chimiques.

Des études préliminaires ont été menées pour mesurer ces forces dans une géométrie simple : le pont liquide. Nous avons démarré, courant 2017, une étude par un travail d'initiation à la recherche (TAPIR) avec des étudiants de 5ème année de l'école Polytech Marseille. L'idée était à la fois d'initier les ingénieurs de l'école aux interfaces et de mettre au point une technique simple de mesure des forces capillaires. La configuration retenue pour réaliser ces expériences est celle d'un pont liquide axisymétrique reliant deux plaques planes horizontales. Ce travail a été poursuivi au cours de l'année 2018. À cette occasion une première collaboration avec le laboratoire MCT (Membranes et Cibles Thérapeutiques), spécialisé dans l'étude de fluides biologiques contenant des bactéries, a été engagée. Les premières expériences ont été réalisées et se sont avérées très intéressantes mais n'ont pas été poursuivies car le dispositif original mis en place n'était pas suffisamment précis tant sur les aspects de mise en œuvre de l'expérience que du point de vue de l'instrumentation.

Dans le même temps une étude expérimentale et théorique était menée au laboratoire Microfluidics Lab de l'Université de Liège sur les ponts liquides dans le but de déplacer des objets miniatures pour des applications aux MMS (Micro-Mechanical Systems). Cette double approche a permis d'initier une collaboration entre nos deux équipes qui a donné lieu à un premier article sur la méthode mesure [13] et à deux communications internationales [20-21].

Sur la base des travaux déjà réalisés sur les ponts liquides, nous proposons de développer un projet sur la caractérisation des propriétés interfaciales des fluides biologiques et leur évolution temporelle. Il s'agit de mettre au point une technique de mesure fiable permettant d'accéder aux propriétés interfaciales d'un fluide biologique. Cette technique allie des mesures mécaniques et de suivi d'interface par imagerie. Elle permettra d'explorer le comportement des interfaces de fluides biologiques où des mécanismes couplés peuvent prendre place aux interfaces.

Les partenaires de ce projet sont les laboratoires IUSTI avec l'axe Combustion Risques et Génie Civil (CRGC) pour les aspects mise au point du dispositif expérimental et son exploitation pour les mesures, l'axe Ecoulements Compressibles, Ondes de Choc et Interface (ECOCI) pour la modélisation des phénomènes de transfert de masse par l'approche de la théorie cinétique des gaz, le laboratoire MCT (Membranes et Cibles Thérapeutiques) UMR AMU/INSERM pour la synthèse et la manipulation des fluides biologiques (solution de bactéries) et le Microfluidics Lab de l'université de Liège pour les études analytiques des interfaces.

Programme

1. Task-1 : Approche expérimentale

1.1 Réalisation et automatisation du banc expérimental (Axe CRGC de l'IUSTI, AMU)

Le principe de l'expérience consiste à créer un pont liquide entre deux plaques et de mesurer à l'aide d'une balance de précision la force d'adhésion capillaire (Mettler Toledo xs205, possédant une précision de 1 μN). Un dispositif optique associé, constitué d'une caméra haute résolution (Basler ace - acA4024-8gm) ainsi que d'un macro-objectif (Opto Engineering MC3-03X), permet de réaliser le suivi de la surface du pont liquide au cours de son évaporation. Les mesures simultanées de la forme de l'interface et de la force capillaire permettent de déterminer l'évolution de la tension superficielle de manière précise au cours du temps. Ces mesures nous renseigneront sur les phénomènes mis en jeu au niveau de l'interface. Elles permettront d'évaluer les modifications des propriétés de l'interface à mesure que celles-ci évoluent pour des raisons de transfert de masse et/ou de réaction bio-chimique.

Les plaques peuvent être constituées de divers matériaux afin de pouvoir étudier l'influence des angles de contact dans la dynamique d'évaporation. Une attention particulière sera apportée à des surfaces innovantes de type SLPIS, constituées d'un milieu poreux saturé d'un liquide [29]. Ces surfaces innovantes permettent de travailler avec des

3

états de surfaces particulièrement bien définis. La plaque inférieure est fixée au socle de la balance tandis que la plaque supérieure est reliée à un module de micro-déplacement permettant ainsi de faire varier l'entrefer entre les deux plaques avec une très grande précision.

Le schéma de principe est représenté sur la figure 1. Les travaux préliminaires ont permis de montrer la faisabilité de ce système. Nous envisageons dans le cadre de ce projet de mettre au point un dispositif contrôlable et précis avec une meilleure maîtrise des conditions opératoires et environnementales (en particulier les conditions de température et d'humidité de l'air). Le point crucial réside dans l'automatisation du dispositif pour permettre de réaliser des études exploratoires robustes et systématiques sur des fluides biologiques différents.

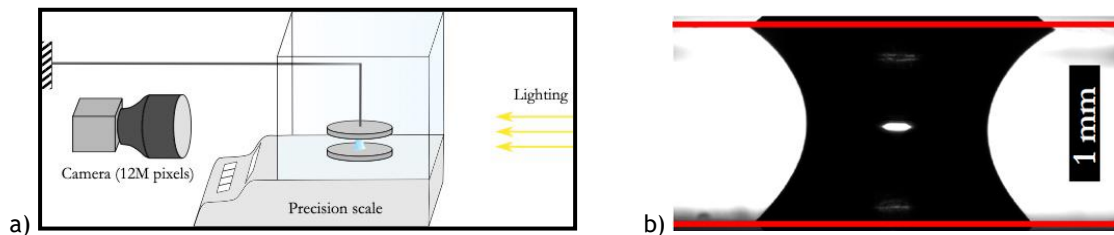


Figure. 1 : a) Schéma du banc expérimental et b) photo d'un pont liquide d'eau entre deux plaques de PVC

1.2 Réalisation et automatisation du banc expérimental (Laboratoire MCT - INSERM, AMU)

Les fluides biologiques seront réalisés en collaboration avec Jean-Michel Bolla Directeur de recherche au laboratoire MCT. Ce laboratoire est un laboratoire de Microbiologie, orienté vers la compréhension des mécanismes de résistance aux antibiotiques des bactéries. Il étudie notamment les transporteurs bactériens et tente de développer des molécules capables de bloquer ces transporteurs afin de restaurer l'activité de certains antibiotiques sur les bactéries pathogènes. Le laboratoire MCT dispose de compétences et d'équipements adaptés à la culture la concentration et le traitement d'échantillons bactériens dans des locaux de sécurité microbiologiques de niveau 2. Il est notamment spécialisé dans l'étude des bactéries de type *Escherichia coli* et *Staphylococcus*. Dans ce projet il réalisera le stockage, l'identification, la culture et la concentration de microorganismes destinés aux expériences suivantes. Il propose de traiter deux types de bactéries, les *Escherichia coli* (forme bacillaire de 1 à 2 micromètres de long) et les *Staphylococcus epidermidis* (forme sphérique d'environ 0,5 micromètre de diamètre). Dans les deux cas il s'agira de souches ne présentant pas de risque infectieux, qui pourront donc être manipulées hors du laboratoire MCT. Il conviendra seulement de traiter les déchets et excédent avec de l'eau de javel ou par autoclavage (au laboratoire MCT) suivant la nature du matériau contaminé.

2. Task-2 : Approche théorique (Microfluidics Lab, Université de Liège)

Les ponts liquides sont décrits par les surfaces à courbure constante. Cette description est exacte tant que le fluide est au repos. La production de bio-surfactants par les bactéries ainsi que l'évaporation du pont liquide créent des mouvements de type marangoni et des flux de liquides au sein du pont. Ces effets peuvent modifier les résultats classiques concernant (i) les forces capillaires. Elles seront modifiées par les gradients de concentration en bio-surfactants. La modélisation se basera sur les outils classiques de mécanique des milieux continus. (ii) Les flux d'évaporation peuvent aussi être modifiés par la présence de biofilms. Une modélisation milieu continue sera aussi employée.

Enfin des résultats préliminaires ont aussi montré que le volume de rupture du pont à hauteur fixée sera modifié. Une modélisation variationnelle couplée à une analyse spectrale permettra de déterminer précisément les conditions de rupture.

3. Task-3 : Approche numérique (Axe ECOCI de l'IUSTI, AMU)

L'équation Enskog-Vlasov (EV) [22] fournit une description approximative d'un fluide composé d'atomes interagissant par un potentiel obtenu en ajoutant une partie attractive à la contribution répulsive de la sphère dure. Une équation cinétique fermée pour la fonction de distribution d'une particule est obtenue en supposant que la contribution de la sphère dure peut-être traitée par le terme collisionnel d'Enskog [22], tandis que la partie attractive est prise en compte par un champ de force auto-cohérent déterminé par une fonction linéaire de la densité du fluide. Malgré le traitement simplifié des corrélations de paires dans la phase dense [23], l'équation EV fournit une description raisonnablement précise des écoulements diphasiques, suivant automatiquement la formation d'interfaces gaz-liquide [24, 25, 26] et solide-liquide [27, 28]. La mise en œuvre de la solution numérique de l'équation EV dans un cas unidimensionnel est prévue, ce qui aidera à mieux comprendre les propriétés des interfaces liquide-gaz et liquide-solide.

Retombées attendues

- Meilleure connaissance des transferts interfaciaux dans le cas de phénomènes couplés mécanique-transferts-réaction chimique.
- Mise au point d'un dispositif expérimental de référence. Applications industrielles.
- Renforcer les collaborations internationales (Université de Liège et Polytechnico di Milano).

Délivrables :

- Valorisations des travaux par des articles (2 prévues, 1 en 2020 et 1 en 2021) de revues et communications internationales.
- Rapport de stage de niveau Master 2 (deuxième semestre 2021).

Références

1. Plateau JAF. (1873) Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires, vol. 2. Paris: Gauthier-Villars.
2. Rayleigh L. (1878) On the instability of jets. Proc. Lond. Math. Soc. 1, 4-13.
3. Akbari A, Hill RJ. (2016) Liquid-bridge stability and breakup on surfaces with contact-angle hysteresis. Soft Matter 12, 6868-6882.
4. Lubarda VA. (2015) On the stability of a cylindrical liquid bridge. Acta Mech. 226, 233-247.
5. Fel LG, Rubinstein BY. (2015) Stability of axisymmetric liquid bridges. Z. Angew. Math. Phys. 66, 3447-3471.
6. Pakpour M, Habibi M, Møller P, Bonn D. (2012) How to construct the perfect sandcastle. Sci. Rep. 2, 549.
7. Gernay S, Federle W, Lambert P, Gilet T. (2016) Elasto-capillarity in insect fibrillar adhesion. J. R. Soc. Interface 13, 20160371.
8. Neeson MJ, Dagastine RR, Chan DY, Tabor RF. (2014) Evaporation of a capillary bridge between a particle and a surface. Soft Matter 10, 8489-8499.
9. Mielniczuk B, Hueckel T, El Youssoufi MS. (2014) Evaporation-induced evolution of the capillary force between two grains. Granular Matter 16, 815-828.
10. Mielniczuk B, El Youssoufi MS, Sabatier L, Hueckel T. (2014) Rupture of an evaporating liquid bridge between two grains. Acta Geophys. 62, 1087-1108.
11. Portuguez E, Alzina A, Michaud P, Smith A. (2016) Evaporation kinetics and breaking of a thin water liquid bridge between two plates of silicon wafer. Adv. Mater. Phys. Chem. 6, 157.
12. Portuguez E, Alzina A, Michaud P, Hourlier D, Smith A. (2017) Study of the contact and the evaporation kinetics of a thin water liquid bridge between two hydrophobic plates. Adv. Mater. Phys. Chem. 7, 99.

13. Tadrist, L., Motte, L., Rahli, O., Tadrist, L. (2019). Characterization of interface properties of fluids by evaporation of a capillary bridge. *Royal Society Open Science*, 6(12), 191608.
14. Wilking JN, Zaboradaev V, De Volder M, Losick R, Brenner MP, Weitz DA. (2013) Liquid transport facilitated by channels in *Bacillus subtilis* biofilms. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 110, 848-852.
15. Hennes M, Tailleur J, Charron G, Daerr A. (2017) Active depinning of bacterial droplets: the collective surfing of *Bacillus subtilis*. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 114, 5958-5963.
16. Sandeep L, Rajasree S. (2017) Biosurfactant: pharmaceutical perspective. *J. Anal. Pharm. Res.* 4, 00105.
17. Refstrup E. (2000) Evaporation and drying technology developments. *Int. J. Dairy Technol.* 53, 163
18. Charpentier C, Dos Santos A, Feuillat M. 2004 Release of macromolecules by *Saccharomyces cerevisiae* during ageing of French flor sherry wine 'Vin jaune'. *Int. J. Food Microbiol.* 96, 253-262.
19. Tugrul T, Cansunar E. 2005 Detecting surfactant-producing microorganisms by the drop-collapse test. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 21, 851-853.
20. L. Tadrist, O. Rahli, L. Motte, and L. Tadrist, Preliminary study of adhesion forces of an evaporating capillary bridge, 13-th Int. Conf. on "Two-Phase Systems for Space and Ground Applications", Xi'an, China, October 15-19, 2018
21. M. Chinaud, L. Tadrist, L. Tadrist, A high precision experimental procedure to study capillary bridges, Granada (Spain), September 24-27, 2019
22. D. Enskog, Kinetische theorie der wärmeleitung, reibung und selbstdiffusion in gewissen verdichteten gasen und flüssigkeiten, *K. Svensk. Vet. Akad. Handl.*, 63 (1922), 5-44.
23. M. Grmela, Kinetic equation approach to phase transitions, *J. Stat. Phys.*, 3 (1971), 347-364.
24. P. Barbante, A. Frezzotti, L. Gibelli and D. Giordano, A kinetic model for collisional effects in dense adsorbed gas layers, in *Proceedings of the 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics* (eds. I. Wysong and A. Garcia), vol. 1333 of *AIP Conference Proceedings*, 2010, 458-463
25. A. Frezzotti and L. Gibelli, A kinetic model for equilibrium and non-equilibrium structure of the vapor-liquid interface, in *Proceedings of the 23rd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics* (eds. A. Ketsdever and E. Muntz), vol. 663 of *AIP Conference Proceedings*, 2003, 980-987.
26. A. Frezzotti, L. Gibelli and S. Lorenzani, Mean field kinetic theory description of evaporation of a fluid into vacuum, *Phys. Fluids*, 17 (2005), 012102
27. A. Frezzotti, S. Nedeia, A. Markvoort, P. Spijker and L. Gibelli, Comparison of molecular dynamics and kinetic modeling of gas-surface interaction, in *Proceedings of the 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics* (ed. T. Abe), vol. 1084 of *AIP Conference Proceedings*, 2009, 635-640.
28. A. Frezzotti and L. Gibelli, A kinetic model for fluid wall interaction, *Proc. IMechE, Part C: J. Mech. Eng. Science*, 222 (2008), 787-795.
29. J. H Guan, G. G Wells, B. Xu, G. McHale, D. Wood, J. Martin, & S. Stuart-Cole (2015). Evaporation of sessile droplets on slippery liquid-infused porous surfaces (slips). *Langmuir*, 31(43), 11781-11789