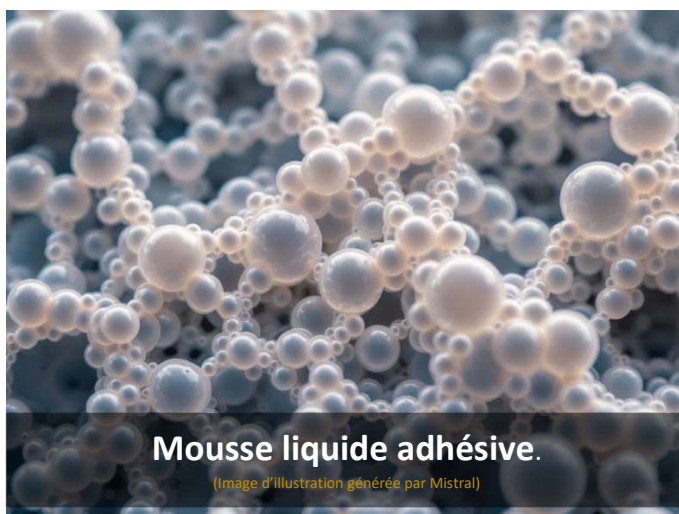


Proposition de thèse 2025

Bulles collantes et nouvelles mousses liquides.

Les mousses liquides jouent un rôle central dans la transition écologique et énergétique. Grâce à leurs excellentes propriétés d'isolation thermique, elles optimisent l'efficacité énergétique des bâtiments et des infrastructures. Elles présentent de nombreuses applications, telles que le nettoyage et la décontamination des surfaces et des espaces confinés, la capture et le contrôle des poussières sur les chantiers de construction ou les sites industriels, le traitement des eaux usées, ou encore la séparation par flottation des matériaux finement divisés. Par ailleurs, de nouveaux procédés émergent, exploitant les propriétés des mousses pour extraire les métaux précieux issus du recyclage des appareils électroniques (urban mining), contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources et des déchets urbains. D'autres applications potentielles incluent l'amélioration et la réhabilitation des sols, ainsi que le stockage du CO₂ en sous-sol. Les mousses liquides sont des matériaux multifonctionnels qualifiés de « complexes », car elles sont composées d'un ensemble de bulles de tailles et de concentrations variables dans un liquide. Pour exploiter pleinement leurs avantages, il est essentiel de maîtriser leurs techniques de production, de contrôler leur évolution au fil du temps (vieillessement), et de prédire leurs propriétés physiques, aussi bien à l'état liquide qu'à l'état solide (durci). Malgré les progrès significatifs de la recherche au cours des vingt dernières années, de nombreux aspects restent encore à approfondir.



Nous proposons d'explorer un nouveau type de mousse liquide dont les bulles, au lieu de se repousser comme dans les mousses classiques, adhèrent les unes aux autres lors du contact, jusqu'à ce qu'une force suffisante les sépare. Ces mousses à bulles adhésives constituent un domaine encore inexploré, ouvrant ainsi un champ de recherche inédit, riche en découvertes potentielles et en perspectives d'application. L'adhésion entre bulles devrait modifier en profondeur l'organisation interne de la mousse, donnant lieu par exemple à des structures denses où les bulles forment un réseau compact, entrecoupé d'espaces inoccupés (voir illustration). Ces changements microstructuraux influencent nécessairement les propriétés mécaniques et dynamiques de la mousse. L'objectif de cette thèse est d'étudier ces propriétés et d'en dégager les principales caractéristiques.

L'effet de l'adhésion entre les bulles sur la microstructure de la mousse sera étudié sous deux aspects : d'une part, dans une mousse au repos, en analysant l'agencement des bulles en fonction de leur fraction volumique ; d'autre part, lors d'un écoulement dans des géométries confinées (microfluidique), conçu pour induire des réarrangements topologiques et examiner la réorganisation des bulles qui en découle. Cette approche permettra de manipuler ces bulles adhésives afin de les placer dans une configuration inédite, où de

petits groupes de bulles fortement imbriquées forment des « clusters » distincts les uns des autres. Cette microstructure originale pourrait donner naissance à des mousses aux propriétés innovantes, ouvrant la voie à de nouvelles applications.

La contrainte nécessaire pour mettre en écoulement une mousse liquide et maintenir une certaine vitesse de déformation (cisaillement) est une grandeur supposée très sensible aux forces d'adhésion qui peuvent apparaître aux contacts entre les bulles. La relation entre la contrainte et le taux de cisaillement sera mesurée à l'aide d'un rhéomètre afin de quantifier cet effet en fonction de l'intensité des forces d'adhésion et de la fraction volumique occupée par les bulles. Cette étude permettra de déterminer la fraction critique en-dessous de laquelle les forces d'adhésion dominent les interactions entre les bulles.

Le mûrissement est un processus clé dans l'évolution des mousses, car il entraîne l'augmentation de la taille moyenne des bulles au fil du temps. Ce phénomène résulte des échanges de gaz entre les bulles par diffusion du gaz dissous dans le liquide. Là encore, la présence d'adhésion entre les bulles devrait avoir un impact significatif, d'autant plus que la fraction volumique occupée par les bulles est faible. Le mûrissement sera étudié dans une cellule en rotation, permettant de compenser les écoulements gravitaires induits par la forte différence de densité entre les bulles et le liquide qui les suspend. L'acquisition d'images au fil du temps, associée à des outils de traitement d'images assistés par IA, permettra d'analyser l'évolution de la distribution des tailles de bulles et de leur taille moyenne, mettant ainsi en évidence le rôle joué par l'adhésion. Le mûrissement sera également étudié sous l'effet d'un cisaillement appliqué à la mousse, qui contrôle la durée des contacts transitoires entre les bulles. On s'attend à ce que cette durée entre en compétition avec celle associée à la formation des contacts sous l'action des forces d'adhésion, ce qui devrait se traduire par une modification significative de l'évolution de la taille moyenne des bulles. Le temps de formation d'un contact adhésif sera par ailleurs étudié à l'aide d'un dispositif dédié permettant de réaliser une 'collision' contrôlée entre deux bulles.

Contacts :

Florence Rouyer, florence.rouyer@univ-eiffel.fr

Olivier Pitois, olivier.pitois@univ-eiffel.fr

PhD thesis proposal 2025

Sticky Bubbles and Novel Liquid Foams.

Liquid foams play a crucial role in the ecological and energy transition. With their excellent thermal insulation properties, they enhance the energy efficiency of buildings and infrastructure. They have various applications, such as cleaning and decontaminating surfaces and confined spaces, capturing and controlling dust on construction sites or industrial areas, wastewater remediation, and separating finely divided materials through flotation. Furthermore, new processes are emerging that utilize the properties of foams for extracting precious metals from recycled electronic devices (urban mining), promoting a more sustainable management of resources and urban waste. Other potential applications include soil improvement and rehabilitation, as well as underground CO₂ storage. Liquid foams are multifunctional materials referred to as "complex" because they consist of an assembly of bubbles in varying concentrations within a liquid. To fully exploit their advantages, it is crucial to master their production methods, control their aging process over time, and predict their physical properties, both in their liquid and solid (hardened) states. Despite significant research advances over the past twenty years, many aspects still need to be mastered.

We propose to explore a new type of liquid foam in which bubbles, instead of repelling each other as in conventional foams, adhere upon contact until a sufficient force separates them. These adhesive bubble foams represent an unexplored domain, opening up a novel research field rich in potential discoveries and application prospects. Bubble adhesion is expected to profoundly alter the internal organization of the foam, leading, for example, to dense structures where bubbles form a compact network interspersed with unoccupied spaces (see illustration). These microstructural changes inevitably impact the foam's mechanical and dynamic properties. The objective of this thesis is to study these properties and identify their key characteristics.



The effect of bubble adhesion on the microstructure of foam will be studied from two perspectives: first, in a static foam, by analyzing the arrangement of bubbles as a function of their volume fraction; and second, during flow in confined geometries (microfluidics), designed to induce topological rearrangements and examine the resulting bubble reorganization. This approach will make it possible to manipulate these adhesive bubbles and place them in a novel configuration, where small groups of tightly interlocked bubbles form distinct 'clusters.' This original microstructure could lead to foams with innovative properties, paving the way for new applications.

The stress required to initiate the flow of a liquid foam and maintain a certain deformation rate (shear) is expected to be highly sensitive to adhesion forces that may arise at bubble contacts. The relationship between stress and shear rate will be measured using a rheometer to quantify this effect as a function of the adhesion force intensity and the volume fraction occupied by the bubbles. This study will help determine the critical fraction below which adhesion forces dominate bubble interactions.

Coarsening is a key process in the evolution of foams, as it leads to an increase in the average bubble size over time. This phenomenon results from gas exchange between bubbles through the diffusion of dissolved gas in the liquid. Here again, the presence of bubble adhesion is expected to have a significant impact, especially when the volume fraction of bubbles is low. Coarsening will be studied in a rotating cell, which compensates for gravity-induced flows caused by the large density difference between the bubbles and the suspending liquid. Time-lapse image acquisition, combined with AI-assisted image processing tools, will enable the analysis of bubble size distribution and average bubble size evolution, highlighting the role of adhesion. Coarsening will also be studied under applied shear, which controls the duration of transient bubble contacts. This duration is expected to compete with the timescale of contact formation due to adhesion forces, leading to significant modifications in the evolution of the average bubble size. Additionally, the time required for an adhesive contact to form will be investigated using a dedicated setup that allows for controlled 'collisions' between two bubbles.

Contacts :

Florence Rouyer, florence.rouyer@univ-eiffle.fr

Olivier Pitois, olivier.pitois@univ-eiffle.fr