

**UNIVERSITE DE LILLE - SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**Ecole doctorale Science de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement**  
**THESE DE DOCTORAT**

**Spécialité : Biotechnologies agroalimentaire, sciences de l'aliment, physiologie**

Présentée et soutenue par

**Heni DALLAGI**

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LILLE**

---

Numerical and experimental investigations of the rheological behavior of foam flow:  
Application to the cleaning of surfaces contaminated by microorganisms in the food industries

Investigations numériques et expérimentales du comportement rhéologique de mousses  
en écoulement: Application au nettoyage des surfaces contaminées par des micro-organismes  
dans les industries agro-alimentaires

---

**Unité Matériaux et Transformations**

Équipe : Processus aux Interfaces et Hygiène des Matériaux (INRAE)

Soutenue le 28 février 2022 devant le jury composé de :

**Président**

M. Jack LEGRAND : *Professeur, GEPEA, Université de Nantes*

**Rapporteurs**

Mme Kathryn WHITEHEAD : *Professeure, Metropolitan Manchester University*

M. Arnaud SAINT-JALMES : *Directeur de recherche, CNRS - IPR / Université de Rennes*

**Examineurs**

Mme Imca SAMPERS : *Professeure, Faculty of Bioscience Engineering / Université de Gand*

M. Alexis DUCHESNE : *Maître de conférences, IEMN / Université de Lille*

**Invités**

M. Hein TIMMERMAN : *Global Sector Specialist Food & Beverage at Diversey*

Mme Anne-Laure FAMEAU : *Chargée de recherche, INRAE - UMET / Université de Lille*

**Co-Directeur de thèse**

Mme Christine FAILLE : *Directrice de recherche, INRAE - UMET / Université de Lille*

M. Fethi ALOUI : *Professeur, LAMIH / Université Polytechnique des Haut-de-France*

**Directeur de thèse**

M. Thierry BÉNÉZECH : *Directeur de recherche, INRAE - UMET / Université de Lille*

## ABSTRACT

**Title:** Numerical and experimental investigations of the rheological behavior of foam flow: Application to the cleaning of surfaces contaminated by microorganisms in the food industries

**Keywords:** Foam flow; Rheological behavior; Conductimetry; Polarography; PIV; bubble size; shear stress; CFD; Cleaning-in-place; Spores; Biofilms; LCA

**Abstract:** In this research, experimental and numerical characterization of the rheological behavior of an aqueous foam flowing inside a horizontal pipe with and without singularities (presence of half-sudden expansion, and a fence) were investigated. Different conditions of foam flow were studied by varying the foam qualities (from 55% to 85%), and three Reynolds numbers (32, 65, and 97). Measurements of the pressure measurements, and at the wall the local velocity repartition and the thickness of the liquid films using respectively pressure sensors, Particle Image Velocimetry, and a conductimetry technique shown a reorganization of the foam downstream the geometry change, with a thicker liquid film at the duct bottom, larger bubble sizes at the top, as well as a larger foam void fraction increased from the bottom to the top part of the duct section. In addition, foam would present a visco-elastic character comparable to a non-Newtonian monophasic liquid. Computational Fluid Dynamics simulations were undertaken to predict this rheological behavior of the foam, the two models Herschel-Bulkley and Bingham were tested taken into account the presence of an underlying liquid film at the bottom of the channel. Comparison between experimental and numerical results showed that regardless of the foam quality, Herschel-Bulkley model could accurately describe the rheological behaviour of the aqueous foam under the different flow conditions analysed.

The second target was to investigate the ability of a wet foam flow (quality of 50%) to clean stainless-steel surfaces contaminated by microorganisms. For this purpose, two different contamination patterns were studied, droplets containing *Bacillus subtilis* spores (either hydrophilic *B. subtilis* PY79 or hydrophobic *B. subtilis* PY79 spsA), and biofilms produced by three bacteria strains encountered in food industry production plants (*Escherichia coli* SS2, *Bacillus cereus* 98/4, and *Pseudomonas fluorescens* Pf1). Different flow conditions were performed by varying the wall shear stresses (2.2 - 13.2 Pa), and bubble sizes (0.18-0.34 mm) in a straight duct with no geometrical changes, in order to identify the mechanisms of contamination release and thus better control and optimize the foam cleaning process. Results show that compared to conventional cleaning-in-place, foam flow effectively removed *B. subtilis* spores as well as Bc-98/4, Ec-SS2, and Pf1 biofilms. Moreover, the combination of high shear stress at the wall and small bubble sizes (<0.2 mm) showed promise for improving the cleaning efficiency of spores. On the other hand, a clear improvement of the biofilm removal was observed when increasing the mean wall shear stress. The characterization of the foam and the interface phenomenons (using polarography, conductimetry, and bubble size analysis methods) indicated that mechanisms such as fluctuation in local wall shear stresses, or in the liquid film thickness between the bubbles and the steel wall induced by bubble passage, foam imbibition, and sweeping of the contamination within the liquid film could participate largely to the removal mechanisms. Finally, the life cycle assessment study demonstrated that foam flow cleaning could be a suitable technique to reduce water and energy consumption (7 and 8 times less, respectively) presenting less environmental impacts than CIP processes, with about 70%. Lastly, foam flow cleaning can be an alternative method, which can improve efficiency and reduce environmental impact.

Additional activities conducted during the PhD period related to hygienic design are presented highlighting the role of the contaminants (spores and biofilms), the material (other than stainless steel) and the geometry (ducts or more complex design) in hygiene monitoring.

## RESUME

**Titre:** *Investigations numériques et expérimentales du comportement rhéologique de mousses en écoulement: Application au nettoyage des surfaces contaminées par des micro-organismes dans les industries agro-alimentaires*

**Mots clés:** *Mousse en écoulement; Comportement rhéologique; Conductimétrie; Polarographie; PIV; Taille des bulles; contrainte de cisaillements; CFD; Nettoyage en place; Spores; Biofilms; ACV*

**Résumé:** *La caractérisation expérimentale et numérique du comportement rhéologique d'une mousse aqueuse s'écoulant à l'intérieur d'un tuyau horizontal avec et sans singularités (présence d'une demi-expansion soudaine, et d'une clôture) a été étudiée. Différentes conditions d'écoulement de la mousse ont été étudiées en faisant varier les qualités de mousse (de 55% à 85%), et trois nombres de Reynolds (32, 65, et 97). Les mesures de la pression, de la répartition de la vitesse locale et de l'épaisseur des films liquides au niveau de la paroi à l'aide respectivement de capteurs de pression, de la vélocimétrie par image de particules et d'une technique de conductimétrie ont montré une réorganisation de la mousse en aval du changement de géométrie, avec un film liquide plus épais au fond du conduit, des bulles de plus grande taille au sommet, ainsi qu'une plus grande fraction de vide de la mousse augmentant de la partie inférieure à la partie supérieure de la section du conduit. En outre, la mousse présenterait un caractère visco-élastique comparable à celui d'un liquide monophasique non newtonien. Des simulations de dynamique des fluides par ordinateur ont été entreprises pour prédire ce comportement rhéologique de la mousse, les deux modèles Herschel-Bulkley et Bingham ont été testés en tenant compte de la présence d'un film liquide sous-jacent au fond du canal. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques a montré que, quelle que soit la qualité de la mousse, le modèle de Herschel-Bulkley pouvait décrire avec précision le comportement rhéologique de la mousse aqueuse dans les différentes conditions d'écoulement analysées.*

*Le deuxième objectif était d'étudier la capacité d'un écoulement de mousse humide (qualité de 50%) à nettoyer des surfaces en acier inoxydable contaminées par des micro-organismes. Pour cela, deux types de contamination ont été étudiés, des gouttelettes contenant des spores de *Bacillus subtilis* (soit hydrophiles *B. subtilis* PY79 ou hydrophobes *B. subtilis* PY79 spsA), et des biofilms produits par trois souches de bactéries rencontrées dans les usines de production de l'industrie alimentaire (*Escherichia coli* SS2, *Bacillus cereus* 98/4, et *Pseudomonas fluorescens* Pf1). Différentes conditions d'écoulement ont été réalisées en faisant varier les contraintes de cisaillement de la paroi (2.2 - 13.2 Pa), et la taille des bulles (0.18-0.34 mm) dans un conduit droit sans changement géométrique, afin d'identifier les mécanismes de libération de la contamination et ainsi mieux contrôler et optimiser le processus de nettoyage par mousse. Les résultats montrent que, par rapport au nettoyage en place conventionnel, le flux de mousse a éliminé efficacement les spores *B. subtilis* ainsi que les biofilms Bc-98/4, Ec-SS2 et Pf1. De plus, la combinaison d'une contrainte de cisaillement élevée au niveau de la paroi et de bulles de petite taille (<0,2 mm) s'est avérée prometteuse pour améliorer l'efficacité du nettoyage des spores. D'autre part, une nette amélioration de l'élimination des biofilms a été observée en augmentant la contrainte de cisaillement moyenne sur la paroi. La caractérisation de la mousse et des phénomènes d'interface (à l'aide de méthodes de polarographie, de conductimétrie et d'analyse de la taille des bulles) a indiqué que des mécanismes tels que la fluctuation des contraintes de cisaillement locales de la paroi, ou de l'épaisseur du film liquide entre les bulles et la paroi en acier induite par le passage des bulles, l'imbibition de la mousse et le balayage de la contamination dans le film liquide, pourraient participer largement aux mécanismes d'élimination. Enfin, l'étude d'analyse du cycle de vie a démontré que le nettoyage à la mousse peut être une technique appropriée pour réduire la consommation d'eau et d'énergie (7 et 8 fois moins, respectivement) présentant moins d'impacts environnementaux que les procédés CIP, avec environ 70%. Enfin, le nettoyage à la mousse peut être une méthode alternative, qui peut améliorer l'efficacité et réduire l'impact environnemental.*

*D'autres activités menées au cours de la période de doctorat liées à la conception hygiénique sont présentées en soulignant le rôle des contaminants (spores et biofilms), du matériau (autre que l'acier inoxydable) et de la géométrie (conduits ou conception plus complexe) dans le contrôle de l'hygiène.*