

Comment coulent les mousses...

Les mousses aqueuses sont des fluides complexes qui présentent des propriétés structurales et mécaniques remarquables. Celles-ci sont intimement liées aux écoulements à l'échelle des bulles, films ou interfaces qu'induisent la gravité ou une sollicitation mécanique imposée. Deux chercheurs de l'équipe « Mécanique multiéchelle des solides faibles » de l'INSP, en collaboration avec un chercheur de l'IFSTTAR, présentent l'état de l'art des expériences et modèles des couplages multiéchelles qui pilotent le drainage et la mécanique des mousses.

Les mousses sont des dispersions concentrées de bulles de gaz dans une solution savonneuse (fig 1). Leur structure est organisée sur plusieurs échelles de longueurs caractéristiques, depuis la taille des bulles, l'épaisseur des films de savon jusqu'à l'échelle nanométrique des molécules tensioactives adsorbées en monocouches aux interfaces liquide-gaz. Ces molécules stabilisent les mousses tout en conférant des propriétés mécaniques originales à leurs interfaces liquide/gaz. Les propriétés physiques des mousses résultent de couplages entre processus à toutes ces échelles. Cette revue décrit d'une part le drainage, vieillissement des mousses dû aux écoulements en son sein, et d'autre part leurs propriétés mécaniques (écoulement, plasticité, relaxations viscoélastiques), mettant en jeu là aussi des écoulements locaux complexes.

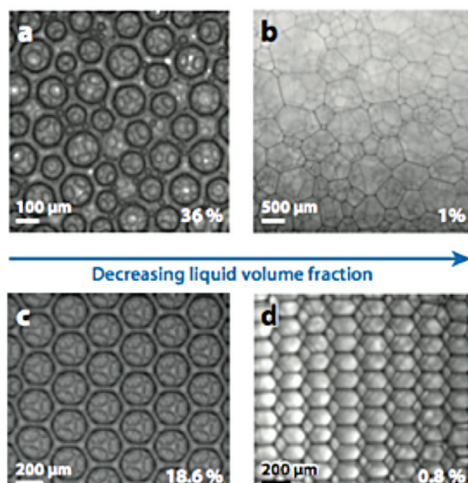


Figure 1

Mousses pour différentes fractions volumiques de liquide comme indiqué. a) et c) Proches de la transition de blocage, lorsque les contacts entre bulles voisines disparaissent. b) et d) Mousses contenant très peu de liquide. Les structures peuvent être désordonnées a) et b), ou ordonnées : c) structure c.f.c, et d) structure c.c.

Vu leur surface spécifique élevée, les mousses sont métastables et vieillissent. Sous l'effet du drainage gravitaire, une colonne de mousse s'assèche à son sommet alors que le liquide s'accumule au bas (fig. 2a). Ce processus non linéaire se décrit comme un écoulement à travers un milieu poreux déformable. La perméabilité de ce poreux est fortement couplée à la résistance des interfaces à se déformer, qui fixe les conditions aux limites hydrodynamiques des écoulements dans les différents éléments géométriques constitutifs d'une mousse : films, arêtes à la jonction des films et vertex aux points de rencontre des arêtes (fig. 2b). L'un des enjeux actuels est de modéliser la perméabilité de ces éléments en fonction de la résistance à un cisaillement ou une dilatation/compression des interfaces pour prédire la loi de drainage d'une mousse à l'échelle macroscopique.

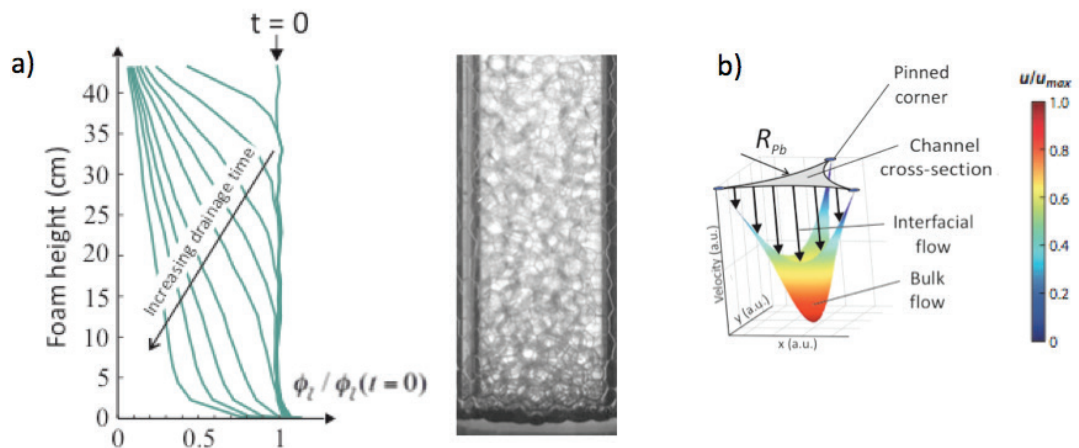


Figure 2

a) Drainage d'une colonne de mousse verticale sous l'effet de la gravité. Initialement d'une teneur en liquide homogène ϕ_l , elle s'assèche progressivement au cours du temps. Les bulles deviennent polyédriques en haut, sphériques en bas là où le liquide s'accumule. b) Profil de vitesse u d'écoulement le long de l'arête à la jonction entre trois films. L'interface liquide-gaz est entraînée (comme l'indiquent les flèches) par l'écoulement sous-jacent. La vitesse, maximale au centre, est nulle là où le canal rejoint les films. La perméabilité du canal est modélisée à l'aide du nombre de Boussinesq caractéristique de la viscosité du liquide, de celle de l'interface, et du rayon de courbure de l'arête, R_{pb} .

Bien que constituées uniquement de fluides, les mousses peuvent avoir le comportement mécanique d'un solide ou d'un liquide selon la contrainte qui leur est appliquée et leur teneur en liquide. À la différence d'un solide ordinaire, leur élasticité provient uniquement de leur surface spécifique et de leur tension interfaciale. Dans le domaine de la réponse linéaire, les mousses deviennent plus rigides aux temps courts, ce qui se comprend par un couplage avec l'élasticité des interfaces. Au contraire, à basse fréquence, une mousse s'écoule lentement au gré des réarrangements irréversibles de structure induits par le mûrissement. Ceux-ci sont aussi induits par une contrainte appliquée lorsqu'elle dépasse le seuil de plasticité. Leur dynamique qui met en jeu des écoulements à l'échelle des films et de leurs jonctions, est déterminante de la loi de friction macroscopique non linéaire qui décrit l'écoulement des mousses en régime stationnaire. Dans le cas d'interfaces peu rigides, cette friction est dominée par les écoulements visqueux dans les films de contacts entre bulles voisines (fig. 3a et 3b). Lorsque la rigidité interfaciale croît, la friction macroscopique augmente aussi (fig. 3c). Cependant, le lien quantitatif entre les deux n'est pas entièrement compris. Quand on ajoute du liquide à une mousse, les contacts entre bulles voisines disparaissent progressivement jusqu'au point où l'empilement perd son élasticité et la moindre contrainte provoque un écoulement. Proche de cette transition de blocage, tant que les interfaces sont peu rigides, le comportement mécanique d'une mousse devient analogue à celui d'une suspension de grains solides (fig. 3d).

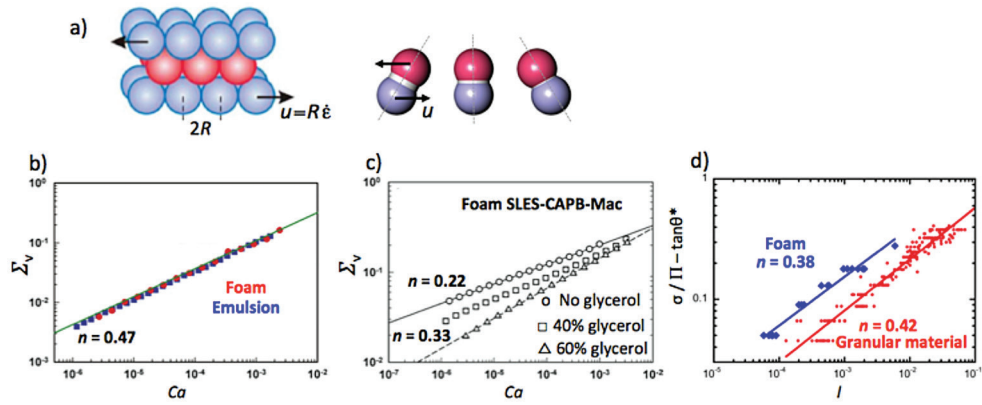


Figure 3

a) Modèle schématique de l'écoulement stationnaire d'une mousse ordonnée. Sous l'effet d'un cisaillement imposé (indiqué par les flèches), les couches de bulles sont translattées les unes par rapport aux autres, ce qui se traduit par des réarrangements structuraux à l'échelle des bulles. L'écoulement dans le film de contact entre deux bulles voisines détermine la loi de friction locale. Lois de friction représentant la contrainte de cisaillement normée (ôtée de la contrainte seuil) en fonction du taux de déformation adimensionné pour b) une mousse avec des interfaces très rigides en compression/dilatation ; c) une mousse avec des interfaces très rigides en compression/dilatation et une émulsion concentrée ; d) une mousse proche du blocage (cf. fig. 1a) et une suspension concentrée de grains solides dans les mêmes conditions.

Au-delà de son intérêt fondamental, la mécanique multiéchelle des mousses, présente un enjeu important pour les applications ou procédés industriels qui mettent en œuvre ces fluides complexes, souvent à très grande échelle, comme dans l'extraction du minerai ou la récupération assistée du pétrole.

Références

"Flow in foams and flowing foams"

Sylvie Cohen-Addad, Reinhard Höhler, Olivier Pitois

Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 45 (2013), p. 241-267

Contact

sylvie.cohen-addad@insp.upmc.fr