

■ LES AUTEURS



Ibrahim CHEDDADI est postdoctorant à l'Inra, à Avignon et à l'Inria, à Montpellier.



Pierre SARAMITO est directeur de recherche CNRS au laboratoire Jean Kuntzmann de l'université

Joseph Fourier, à Grenoble.



François GRANER est directeur de recherche CNRS au Laboratoire matière et systèmes

complexes de l'université Paris-Diderot.

Mettez un peu d'eau dans une bouteille, ajoutez quelques gouttes de liquide vaisselle, agitez... la mousse se forme. Avez-vous déjà essayé de la rincer ? Connaissiez-vous rien de plus agaçant ? Cette écume, si fragile, constituée de bulles d'air entourées de liquide, résiste obstinément à toute tentative de la faire s'écouler à travers le goulot, comme s'il s'agissait d'un solide. Pourquoi cet assemblage de gaz et de liquide se comporte-t-il ainsi ? Pour le comprendre, il faut s'intéresser à la dynamique des mousses, un domaine dont l'exploration est possible depuis quelques années grâce à de nombreux progrès expérimentaux et théoriques, ainsi que par l'amélioration des simulations numériques.

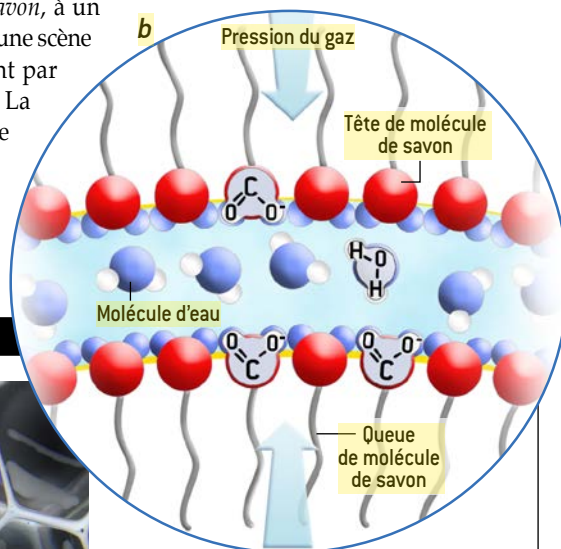
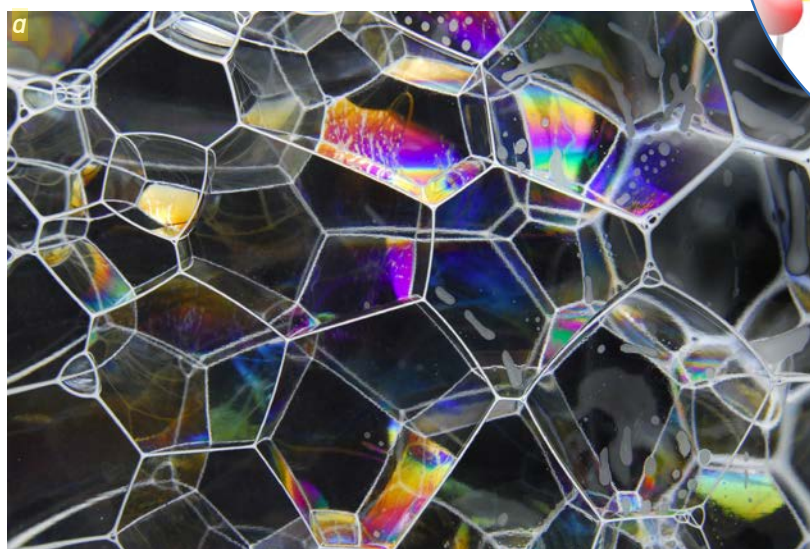
Pourtant, les mousses sont partout dans notre quotidien : bière fraîche, bain moussant, garniture des matelas (où un solide remplace le liquide autour des bulles d'air). Une autre application bien connue est la mousse des extincteurs : contrairement à l'eau, la mousse est plus légère que l'huile, ce qui la rend efficace sur un feu de pétrole. Les mousses inspirent même les artistes : d'un tableau de Jean Siméon Chardin, *La bulle de savon*, à un opéra contemporain dansé sur une scène remplie de mousse, en passant par les bulles géantes d'un clown. La coopération entre art et science a trouvé de quoi se nourrir au milieu de couleurs irisées.

L'omniprésence des mousses a depuis longtemps

attiré l'attention des savants. L'enjeu était alors de décrire la géométrie des bulles d'une mousse statique et les conditions de cette stabilité. Ainsi, en 1873, le physicien belge Joseph Plateau a énoncé les règles qui régissent l'assemblage des bulles et l'équilibre mécanique de la mousse : l'angle entre deux faces d'une bulle est de 120 degrés, chaque sommet est commun à 4 arêtes et l'angle entre les arêtes est proche de 109,5 degrés. Les chercheurs se sont également intéressés à l'agencement optimal de bulles toutes de même volume et respectant les règles de Plateau. En 1887, lord Kelvin a avancé l'hypothèse que la meilleure solution est un pavage périodique avec un polyèdre à 14 faces. Il faut attendre 1993 pour que Denis Weaire et Robert Phelan, du Trinity College, à Dublin, trouvent une solution un peu meilleure en combinant deux motifs de même volume.

Facile à observer et peu coûteuse, la mousse de savon s'est imposée comme système modèle en laboratoire pour des scientifiques de diverses disciplines. Les mathématiciens, bien que rarement enclins à s'appuyer sur des expériences, ont reconnu

LA STRUCTURE DES MOUSSES



La mousse liquide est constituée de bulles d'air (a) dont les parois (b) sont composées de films d'eau savonneuse. Les molécules du savon se placent à l'interface entre l'eau et l'air avec une tête qui se dissout dans l'eau et une queue grasse qui la fuit. Les charges portées par les têtes se repoussent et empêchent le film de s'amincir et de casser. L'équilibre global de la structure tient aussi compte d'autres forces : gravité du liquide, pression du gaz, tension et élasticité des interfaces.

© Severija Shutenstock.com ; Raphael Querrel

dans les films de savon des objets tendus, qui spontanément diminuent leur surface jusqu'à ce qu'elle soit minimale. Entre autres, Richard Courant, Américain d'origine allemande, qui a étudié les « surfaces minimales » dans les années 1950, a beaucoup observé les films de savon.

La mousse reste, en soi, un objet complexe. Le comportement macroscopique de la mousse dépend, à l'échelle millimétrique, des bulles qui la constituent, à l'échelle micrométrique, des films d'eau savonneuse qui forment les parois de ces bulles et, à l'échelle nanométrique, des molécules qui stabilisent ces films (*voir l'encadré page ci-contre*). Comprendre la mousse nécessiterait ainsi d'intégrer dans sa description des phénomènes qui agissent à des dimensions s'étalant sur neuf ordres de grandeur.

Cette compréhension est relativement bien établie pour une mousse immobile, à l'équilibre statique. L'étude du lien entre les molécules et le film a bénéficié des progrès de la physico-chimie, en particulier de l'école bulgare durant ces dernières décennies, aboutissant à des formulations stables, reproductibles et modulables à la demande. Durant les années 1980 à 2000, l'école française s'est beaucoup impliquée dans l'analyse du lien entre le film et la bulle, un ensemble dominé par les phénomènes de capillarité. Parallèlement, le lien entre la bulle et la mousse a été approfondi – des avancées où se sont illustrés des physiciens irlandais en collaboration avec des mathématiciens géomètres ou topologues de différents horizons.

La mousse qui s'écoule, un problème complexe

En revanche, les propriétés des mousses en écoulement sont moins bien maîtrisées. Or ces situations sont celles qui intéressent le plus les industriels. Les exploitations minières consomment près de 90 % des agents moussants produits dans le monde par an pour séparer les minerais utiles de la gangue inutile. L'industrie pétrolière aussi en utilise en grandes quantités, tant pour le forage que pour l'extraction. Des dizaines d'autres créneaux plus exotiques vont de l'amortissement des chocs à la

fracturation des roches en passant par l'injection de médicaments dans les veines. Ces applications font appel aux propriétés complexes d'écoulement de la mousse, sur lesquelles se penchent les chercheurs.

Notre équipe s'est particulièrement intéressée à la dynamique des mousses et

La mousse
a un comportement
**élastique,
plastique ou
visqueux**
selon la perturbation que
vous lui appliquez.

ses applications à la biologie. Les observations des tissus biologiques – les premières remontent à Antoni van Leeuwenhoek au XVII^e siècle – ont mis en évidence une analogie, au moins de forme, avec une mousse faite de bulles. Si les bulles et les cellules ont des propriétés très différentes, leur façon de s'assembler présente de réels points communs. Cela nous a conduits à étudier l'écoulement des mousses pour comprendre la dynamique des cellules biologiques au sein des tissus (*voir l'encadré page 58*).

Dans ce type d'études interdisciplinaires, nous collaborons avec des collègues qui s'intéressent à différents fluides dits complexes, faits par exemple d'émulsions ou de polymères. L'intérêt de la mousse est que c'est « le plus simple des fluides complexes », autrement dit le plus facile à étudier.

Depuis les années 2000, l'effort de recherche a surtout concerné les propriétés mécaniques d'une mousse. Intuitivement, on sent que la consistance de la mousse, qui contribue grandement à son charme, sort des catégories qu'on enseigne à l'école.

Est-elle solide ? Est-elle liquide ? Peut-elle être liquide et solide à la fois ? Qu'est-ce que cela signifie ?

Déposez dans votre main un peu de mousse à raser. Titillez-la délicatement avec un doigt : la mousse se déforme, ce qui signifie que les bulles qui la composent se déforment aussi, même si vous ne le constatez pas à l'œil nu. Quand vous retirez votre doigt, la mousse reprend sa forme initiale : les bulles reviennent dans la configuration non déformée, où leur énergie est plus petite. Votre morceau de mousse à raser a ainsi une forme propre et un comportement réversible. À strictement parler, c'est alors un solide élastique, tel un morceau de caoutchouc. Cette propriété est d'autant plus surprenante que, rappelons-le, cette mousse est faite d'un mélange de deux fluides ! En l'occurrence un gaz, celui des bulles, dispersé dans un liquide, celui des parois.

Soyez maintenant moins délicat et appuyez franchement sur la mousse à raser avec votre doigt. Celui-ci s'enfonce, sculpte la mousse. La mousse est modelable ou « plastique », comme peut l'être une boule de pâte à modeler, qui a une forme acquise. Autrement dit, en passant d'une petite déformation à une grande, vous avez modifié le comportement de la mousse, qui, d'un solide élastique, s'est muée en un solide plastique. On le comprend en observant les réarrangements de bulles. Quand on appuie légèrement, les bulles se déforment, mais restent à leur place ; et quand on arrête d'appuyer, les bulles reprennent leur forme. En revanche, si on appuie fortement, les bulles changent de voisines, certaines s'éloignent tandis que d'autres se rapprochent et une nouvelle configuration se met en place de façon irréversible.

Que se passe-t-il si vous déformez la mousse plus vite, c'est-à-dire si vous bougez rapidement une partie de la mousse par rapport à ses voisines ? Vous pouvez faire le test avec une lame de rasoir : la finesse de la lame crée des disparités brutales de vitesse sur de petites distances. Les comportements de type solide disparaissent. Vous constatez un comportement qu'on attend normalement d'un fluide : un écoulement visqueux, tel celui de l'huile.