

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.

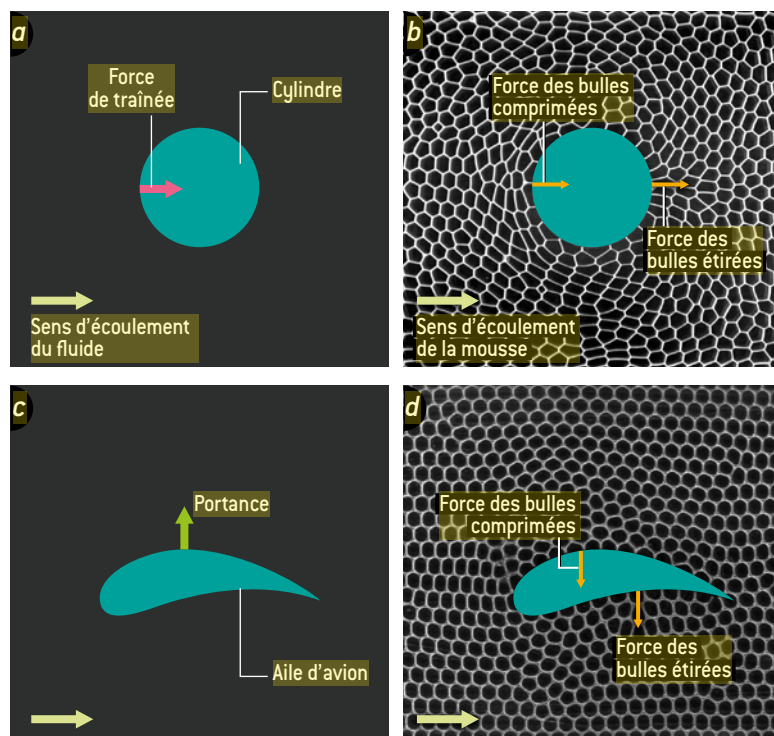
Est-elle solide ? Est-elle liquide ? Peut-elle être liquide et solide à la fois ? Qu'est-ce que cela signifie ?

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.

UNE MOUSSE QUI S'ÉCOULE NE SE COMPORTE PAS COMME UN FLUIDE



Les chercheurs ont comparé le comportement d'un fluide (air ou eau) et d'une mousse lors d'un écoulement face à un obstacle. Si l'obstacle est un cylindre (le pilier d'un pont ou un gratte-ciel), le fluide exerce sur lui une force de traînée (a). Avec une mousse, d'autres forces apparaissent. En amont, les bulles élastiques sont comprimées et, par réaction, appuient plus sur l'obstacle (b). À l'inverse, en aval de l'obstacle, les bulles sont étirées et tirent sur l'obstacle.

Si l'obstacle a une forme d'aile d'avion, un fluide crée une force, la portance, qui permet aux avions de voler. Le fluide s'écoule plus vite au-dessus de l'aile qu'en dessous, ce qui diminue la pression sur la partie bombée et crée un effet d'aspiration vers le haut (c). Avec de la mousse, un effet contraire émerge. Les bulles au-dessus de l'aile sont écrasées sur l'aile et poussent vers le bas ; celles en dessous sont étirées et entraînent aussi l'aile vers le bas (d).

Cylindre : C. Raudasteau, Cheddadi et al., Eur. Phys. J. E (2011) 34 : 1 ; avec l'aimable autorisation d'EPJ ; Aile d'avion : Benjamin Dolet

La mousse et l'acier, des points communs utiles

Dans les années 1950, le Britannique Cyril Smith, spécialiste de la métallurgie, a mis en évidence une analogie entre les vieillissements de la mousse de savon et de l'acier. Les propriétés d'un acier dépendent beaucoup de sa structure en petits grains cristallins, une structure qui, telle celle de la mousse, évolue au cours du temps en vieillissant. Smith étudia ces structures à partir de la mousse de savon, plus facile à observer à l'œil nu qu'un acier au microscope.

Ainsi, la même mousse peut être élastique, plastique ou visqueuse, selon la perturbation appliquée. Certes, d'une mousse à l'autre, les propriétés particulières changent. Telle mousse est plus rigide, telle autre tolère des déformations plus grandes, telle mousse enfin casse si on essaie de la déformer trop vite. Ces différences proviennent de la proportion d'eau, de la composition du savon ou de la distribution des tailles des bulles, par exemple. Mais fondamentalement, le triple comportement élastique, plastique et visqueux est lié à la structure même de la mousse, plus précisément à sa nature cellulaire. Il y a ainsi une certaine universalité.

Une soufflerie à mousse

Comment étudier un tel triple comportement, aussi complexe qu'insaisissable ? Il faut d'abord le caractériser et le décrire, mais une difficulté est à surmonter : les bulles d'une mousse usuelle à trois dimensions diffusent la lumière, ce qui la rend opaque comme un brouillard. Une solution, que nous explorons, consiste à utiliser les rayons X, qui la traversent sans être déviés et en visualisent l'intérieur. Cela nécessite

des équipements importants. Une autre solution a été proposée en 2001 par Georges Debrégeas, Hervé Tabuteau et Jean-Marc di Meglio, de l'institut Charles Sadron à Strasbourg. Ils se sont inspirés d'un dispositif utilisé pour les études statiques : la mousse est prise entre deux plaques de verre parallèles. Cette « mousse à deux dimensions », faite d'une seule couche de bulles, est facile à observer tant à l'œil nu qu'avec une caméra. Pour introduire un aspect dynamique, ils ont confiné la mousse entre deux cylindres concentriques d'axe perpendiculaire à la couche de mousse. Le cylindre interne tourne, entraînant ainsi la mousse, tandis que l'autre est fixe (un dispositif utilisé pour étudier l'écoulement de Taylor-Couette en mécanique des fluides). Les chercheurs visualisaient simultanément les changements de chaque bulle proche du cylindre qui tourne et l'écoulement d'ensemble à l'échelle de la mousse. Ils ont observé, par exemple, des mouvements de cisaillement au sein de la mousse. Mais le fait d'utiliser une seule configuration géométrique ne permet pas de recenser toutes les caractéristiques de la dynamique des mousses. Il est nécessaire de multiplier les géométries des dispositifs.