

Ces résultats fournissent des informations sur la réaction du système climatique au forçage externe. Ils donnent aussi des pistes pour tester et améliorer les modèles qui nous permettront de mieux prédire le climat futur. Par exemple, on a montré qu'il y a eu une période froide en Antarctique durant le petit âge glaciaire. Les modèles la simulent-ils? Le font-ils avec la bonne amplitude, ou au moins avec une amplitude comparable à celle de l'hémisphère Nord? Sinon, quels sont les mécanismes manquants?

D'autres projets

Mars 2013, nouveau coup de fil: «Anaïs, j'ai fait du gryère dans Dronning Maud Land, il y a cinq trous à mesurer. Est-ce que tu veux m'accompagner? Ce sera une toute petite expédition.» L'aventure continue!

Aujourd'hui, je poursuis mes travaux sur la température en Antarctique non seulement sur d'autres sites de forage, mais aussi en utilisant de nouveaux outils. À l'issue de ma thèse, j'ai reçu une bourse de l'Union européenne pour poursuivre ce

type de travaux dans une autre région de l'Antarctique, à Talos Dome, une carotte forée par les Français et les Italiens. Les résultats sont encore préliminaires, mais ils vont dans le même sens.

Et à Dronning Maud Land, sur la zone «atlantique» de l'Antarctique, j'ai aussi un projet de mesurer le réchauffement climatique. Les réanalyses (des interpolations entre un modèle et les données existantes) prédisent un très faible réchauffement, mais le peu de données existantes, issues des températures de trou de forage, indiquent un réchauffement significatif. Qui a raison?

Malgré les difficultés, je suis toujours autant passionnée par mon sujet d'étude. Chaque réponse trouvée apporte son lot de nouvelles questions: ces changements tous les 200 ans sont-ils visibles dans d'autres régions, en Patagonie par exemple? Qu'est-ce qui peut causer une telle périodicité? Les modèles climatiques sont-ils capables de reproduire ces événements? C'est une des questions clés qu'il nous faudra résoudre pour mieux comprendre le réchauffement climatique en cours. ■

■ SUR LE WEB

Le site du campement de WAIS Divide : <http://www.waisdivide.unh.edu/>

GIEC, Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs, Contribution du groupe de travail I : <http://bit.ly/1k5sGpi>



{ Partagez
les savoirs }

**LES
RENDEZ-
VOUS DU
MUSÉUM**

Entrée
gratuite

COURS PUBLICS

Cycle Les plus anciens peuplements de l'Europe

Par *M.-H. Moncel*, préhistorienne, directeur de recherche CNRS, Muséum

Jeudi 3 décembre - 18h : Que se passe-t-il en Europe après 700 000 ans ?

L'arrivée (ou émergence) des bifaces et de l'Acheuléen

Jeudi 10 décembre - 18h : Le site acheuléen de la Noira : un atelier de taille datant de 700 000 ans

Grand Amphithéâtre du Muséum - 57 rue Cuvier, Paris 5^e

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 7 décembre - 18h : *Robert Doisneau*, un photographe au Muséum, Éditions Flammarion/MNHN, 2015

Avec *J.-P. Gasc*, spécialiste de la locomotion des vertébrés, Muséum ; *É. Joly*, directeur du département des Jardins Botaniques et Zoologiques, Muséum ; *A. Lemaire*, conservatrice à la bibliothèque centrale du Muséum ; *G. Rouhan*, botaniste, Muséum ; *A. Doisneau* et *F. Deroudille*, responsables de l'Atelier Doisneau

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution - 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

CONFÉRENCES

Cycle Rôle des galeries d'Anatomie comparée et de Paléontologie dans l'histoire des sciences et des arts

Jeudi 17 décembre - 17h : Fremiet et les grands singes

Par *L. Vivès*, chargé de projet, Muséum et *C. Argot*, chargée de conservation des collections, Muséum

Amphithéâtre des Galeries d'Anatomie comparée et Paléontologie - 2 rue Buffon, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE



La solidité de la mousse liquide

Ibrahim Cheddadi, Pierre Saramito et François Graner

À la fois liquides et solides, les mousses s'écoulent de façon bien mystérieuse pour les physiciens. Récemment, la compréhension de leur comportement a ouvert des horizons dans divers autres domaines.



L'ESSENTIEL

■ La mousse présente un triple comportement – liquide visqueux, solide élastique et solide plastique – qui rend son écoulement complexe.

■ En combinant dispositifs expérimentaux, simulations numériques et modèles théoriques, des physiciens ont réussi à modéliser ce comportement.

■ Les enseignements qu'en tirent les chercheurs sont si généraux qu'ils s'appliquent à d'autres domaines, tels que la biologie.

© Shutterstock Anna Sutterstock.com

■ 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.

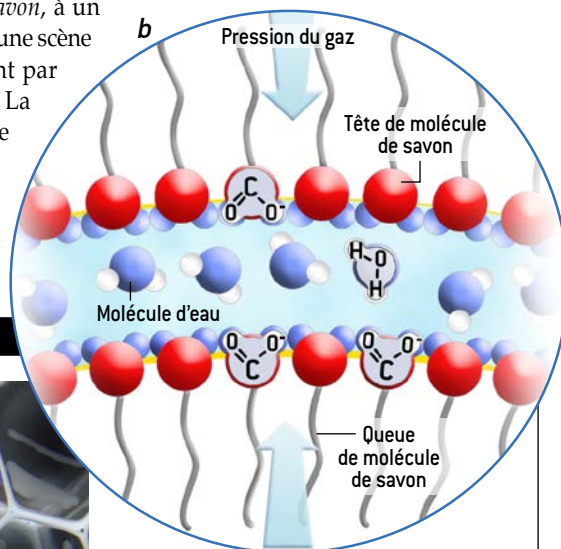
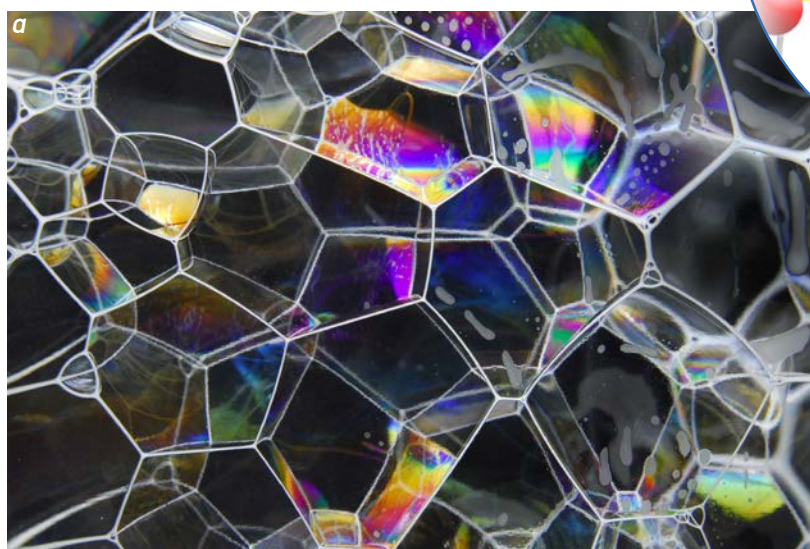
Pourtant, les mousses sont partout dans notre quotidien : bière fraîche, bain moussant, garniture des matelas (où un solide remplace le liquide autour des bulles d'air). Une autre application bien connue est la mousse des extincteurs : contrairement à l'eau, la mousse est plus légère que l'huile, ce 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 Queruel

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.

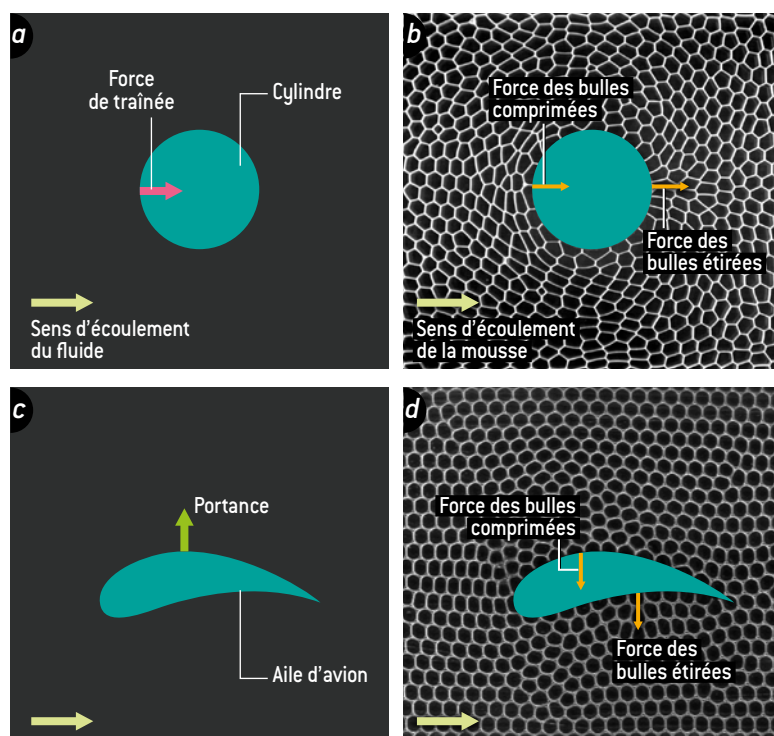
Est-elle solide ? Est-elle liquide ? Peut-elle être liquide et solide à la fois ? Qu'est-ce que cela signifie ?

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 trainée (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. Raudasteel, 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.

À partir de 2005, Benjamin Dollet et Christophe Raufaste ont étudié un dispositif différent durant leurs thèses réalisées à Grenoble sous la direction de l'un d'entre nous (François Graner). Avec des collègues de Grenoble, de Paris, de Dublin (en Irlande) et de South Bend (aux États-Unis), ils ont réalisé des expériences dans un canal rectangulaire d'un mètre sur quinze centimètres, également enfermé entre deux plaques de verre parallèles. Cette « soufflerie à mousse » est analogue à une soufflerie classique où l'on place une maquette de bateau ou d'avion dans un écoulement d'air ou d'eau. Ici, du gaz est soufflé avec un débit contrôlé dans de l'eau savonneuse. La mousse est ainsi produite à l'entrée du canal. Elle y entre et s'y écoule spontanément, puis sort à l'air libre.

La géométrie rectangulaire permet de tester de nombreuses configurations d'écoulement en introduisant des obstacles. La caméra visualise simultanément les divers réarrangements, déformations et vitesses des bulles. L'idée est d'accumuler de nombreuses informations sur le comportement des mousses afin de les modéliser.

Deux expériences consistent à faire passer la mousse soit à travers un petit trou, soit autour d'un obstacle circulaire. Ainsi, la mousse arrive par la gauche du dispositif avec des bulles peu déformées. En se rapprochant de l'obstacle ou du trou, elles s'étirent, se réarrangent et s'écoulent les unes par rapport aux autres. La mousse exerce sur l'obstacle une force dans la direction de l'écoulement, dite de « traînée », orientée vers

l'aval comme on s'y attend (voir l'encadré page ci-contre). Cette force est déterminée par le caractère visqueux de la mousse, comme dans un liquide usuel, mais aussi par ses propriétés élastiques, c'est-à-dire la propension des bulles à reprendre une forme régulière. Les bulles qui sont écrasées en amont de l'obstacle le poussent, celles qui sont étirées en aval le tirent. En outre, avant d'arriver à déplacer la mousse par rapport à l'obstacle, même à basse vitesse, il faut fournir une force suffisante pour forcer les bulles à se réarranger, signe de la plasticité de la mousse. Dès lors, la traînée d'une mousse se distingue de celle d'un liquide visqueux même à basse vitesse.

La mousse pousse l'aile d'avion vers le bas

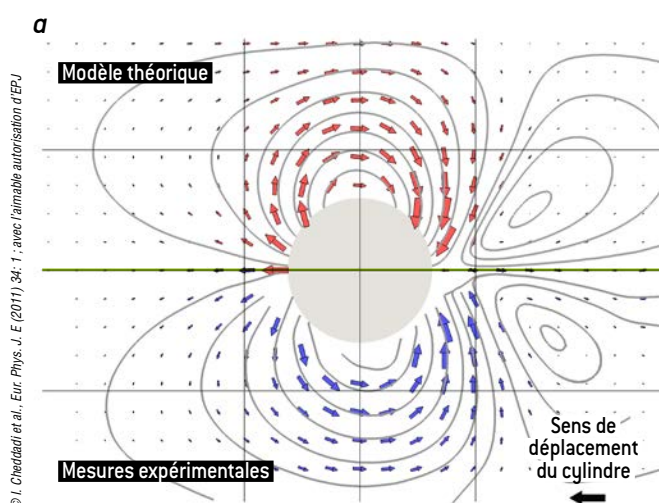
L'obstacle peut avoir d'autres formes, telle une ellipse ou un carré. Un cas intéressant est celui d'une aile d'avion. Dans une soufflerie classique, si de l'air s'écoule à haute vitesse autour d'un tel profil, l'air dispose de moins de place pour passer sur le dos que dans le creux de l'aile. Ainsi, l'air va plus vite sur le dos, ce qui y crée une dépression, et plus lentement sous l'aile, où se forme une surpression. La force qui en résulte, la portance, est perpendiculaire à l'écoulement, orientée du creux vers le dos, et dépend de la vitesse. C'est ainsi que le vent pousse une voile de bateau, ou qu'un avion plus lourd que l'air peut voler s'il avance vite. Dans la mousse, l'élasticité entraîne une

réponse différente. Les bulles sur le dos de l'aile sont comprimées, les bulles dans le creux ont plus de place et sont étirées. Tendant à reprendre une forme régulière, les bulles du dos poussent l'aile, celles du creux la tirent. La contribution à la portance qui en résulte est indépendante de la vitesse et, surtout, orientée du dos vers le creux !

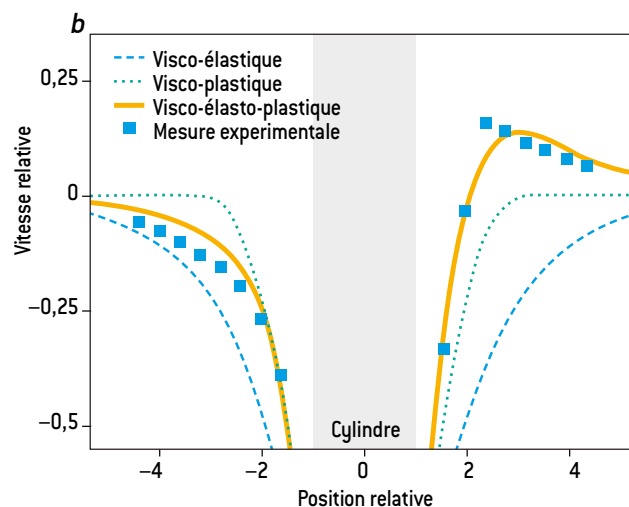
Grâce à ces observations, les physiciens ont commencé à se forger une intuition du comportement des mousses. L'étape suivante a consisté à développer des modèles pour affiner et tester la compréhension de l'expérience. L'intérêt immédiat est de permettre à un ingénieur de prévoir comment va s'écouler la mousse qu'il souhaite utiliser.

Des modélisateurs ont, par exemple, développé des théories statistiques ou des simulations numériques capables de représenter fidèlement la structure des bulles, au moins dans les écoulements lents, pour voir émerger leur comportement collectif. Comme dans les expériences, pour simplifier, les simulations se font plus souvent à deux qu'à trois dimensions.

Nous avons opté pour une autre approche en portant notre attention sur la mousse dans son ensemble, assimilée à un milieu continu. Nous avons dès lors considéré les équations les plus générales de la mécanique des milieux continus, en l'occurrence la conservation de la masse et celle de la quantité de mouvement. Puis nous avons injecté une troisième équation qui décrit le comportement spécifique de la mousse.



UN ÉCOULEMENT EST ÉTUDIÉ avec un cylindre qui se déplace dans la mousse de droite à gauche [a]. Les flèches indiquent la vitesse relative de déplacement de la mousse par rapport au cylindre. Les prévisions issues de la résolution des équations du modèle théorique (en rouge) sont en accord avec les mesures expérimentales (en bleu). Ce modèle



est fondé sur un écoulement visqueux, élastique et plastique. Le profil de vitesse de la mousse [b] au niveau de l'axe (a, en vert) compare les points expérimentaux (points bleus) à différents modèles. Seul le modèle visqueux, élastique et plastique reproduit l'effet d'entraînement de la mousse, avec une vitesse relative positive en aval.

Les tissus biologiques sont des structures dynamiques au sein desquelles les cellules se réarrangent – surtout dans les épisodes tels que le développement de l'embryon, la cicatrisation de blessures ou la prolifération de tumeurs.

L'hydre d'eau douce en est un exemple extrême. Cet animal d'un centimètre de long est capable de se régénérer : si on le coupe en deux, cinq, voire dix morceaux, chaque partie reprend spontanément la forme de l'animal et on obtient finalement dix hydres normales. Encore plus fascinant : si on dissocie toutes ses cellules, qu'on les mélange et qu'on les réagrège, on obtient une petite boule... qui elle aussi reforme, en une semaine, une hydre adulte !

Plus généralement, l'auto-organisation des cellules est un élément clé de l'extrême diversité des formes observées dans les organismes naturels. Un tissu est la somme des cellules qui le constituent et de leurs interactions. Ces dernières sont de deux types : biochimiques (signalisation entre cellules voisines) et mécaniques (les forces

auxquelles les cellules sont soumises).

D'un point de vue statique, l'analogie entre mousse et tissu cellulaire explique bien les formes d'équilibre des cellules au sein de certains tissus par une minimisation de l'énergie (a). Dans la mousse, où les parois des films séparant les bulles ont toutes la même tension, l'énergie minimisée est simplement proportionnelle à la surface des films. Dans des tissus dits « épithéliaux », tels que l'aile, le dos ou la rétine de la

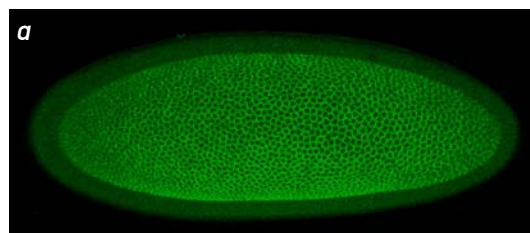
mouche, l'énergie inclut la rigidité du squelette de chaque cellule et l'adhésion entre cellules voisines. Sur ce point précis de la forme des cellules, le système biologique apparaît comme un système physique dominé par la mécanique, où la biochimie intervient essentiellement pour fixer les paramètres, certes plus compliqués que dans une mousse.

En est-il de même en dynamique ? En quelle proportion interviennent la mécanique et la biochimie pour expliquer l'évolution de tissus ? Sham Tlili a étudié cette question au cours de sa thèse sous la direction de François Graner. Elle a réalisé des écoulements contrôlés de cellules autour d'un obstacle ou

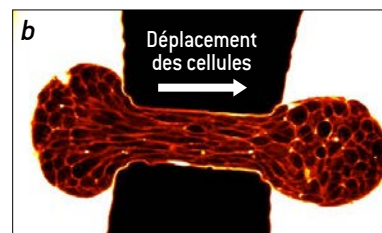
à travers un trou, à deux ou trois dimensions. Sur la figure b, un agrégat de cellules de souris, aspiré par un écoulement d'eau, s'écoule à travers un trou. En amont (à gauche) les cellules sont étirées vers le trou ; en aval, elles reprennent peu à peu une forme plus régulière.

Ce comportement ressemble à celui des mousses. Les travaux sur les mousses ont ainsi été cruciaux pour modéliser les écoulements de cellules et les comparer à des modèles de matériaux visco-élasto-plastiques.

Les chercheurs ont néanmoins observé des différences. Les cellules présentent un mouvement saccadé qu'il reste à comprendre.



CES TISSUS BIOLOGIQUES ressemblent à des mousses, en déformation lente avec un embryon de mouche [a] ou en déformation rapide avec des cellules de souris aspirées à travers un trou [b].



(a) Glenn Edwards/Institut Curie ; (b) Sham Tlili

Les physiciens savent décrire de nombreux matériaux. Les solides élastiques simples sont régis par des équations établies depuis près de deux siècles, et il en est de même pour les liquides visqueux simples. Les ingénieurs, mécaniciens, physiciens, mathématiciens ont eu tout loisir d'étudier ces équations, de les résoudre, de les tester en les confrontant aux expériences. On connaît aussi des matériaux visco-élastiques, comme la poix ou ces amusantes pâtes de polymères commercialisées sous le nom de « silly putty », ainsi que des matériaux viscoplastiques, ou « fluides à seuil », tels que des peintures ou des laves volcaniques, qui s'écoulent dès qu'on applique une force supérieure à un certain seuil. Ces matériaux sont étudiés depuis près d'un siècle et l'on a un recul suffisant pour savoir mettre en équation leur comportement en écoulement, par exemple autour d'un obstacle ou au travers d'un trou.

Pour tirer parti de cette expertise accumulée et aborder les écoulements

d'une mousse, nous avons commencé par simplifier le problème en oubliant... qu'il s'agissait d'une mousse. Nous nous sommes efforcés de modéliser un matériau visco-élasto-plastique le plus simple possible, décrit par une viscosité constante, une rigidité élastique constante, et un seuil de déformation au-delà duquel la plasticité apparaît.

Suivez les bulles !

Même ainsi, la résolution des équations est d'une redoutable complexité. Elle a fait l'objet de la thèse de l'un de nous trois (Ibrahim Cheddadi) sous la direction des deux autres. La difficulté provenait des équations qui ont des non-linéarités nombreuses et fortes. D'un point de vue physique, ces non-linéarités signifient que la réponse d'un système n'est pas proportionnelle à la force exercée, ce qui traduit le fait que les trois comportements rétroagissent les uns sur les autres.

À ce stade de nos travaux, nous avions d'un côté des expériences et de l'autre des équations avec des prédictions théoriques. Comment les comparer ? Par exemple, notre œil est plus attiré par les contours des bulles elles-mêmes que par l'écoulement à grande échelle. Nous avons donc développé des méthodes de mesure quantitative.

En 2008, avec Benjamin Dollet, Christophe Raufaste, Philippe Marmottant et d'autres physiciens grenoblois, nous avons eu l'idée d'utiliser les bulles pour caractériser la mousse à grande échelle tout comme de petites particules fluorescentes dans un fluide aident à en mesurer la vitesse. Nous suivions chaque bulle d'une image à la suivante pour mesurer son déplacement entre deux images successives. En poursuivant la même idée, nous avons aussi analysé la forme des bulles et leurs changements de voisines.

Nous avons ensuite créé des outils statistiques pour exploiter au mieux ces données. Partant de milliers d'images

contenant chacune des milliers de bulles analysées localement, c'est-à-dire de millions d'informations locales, nous avons obtenu un petit nombre de mesures moyennes très précises de grandeurs physiques globales intervenant dans la théorie de la mécanique des milieux continus : la vitesse, la déformation et la réponse plastique de la mousse.

D'une portée générale, ces outils statistiques se sont révélés utiles pour décrire bien d'autres systèmes faits de petits objets qui se réarrangent : verres, suspensions colloïdales, émulsions, tissus biologiques.

Un modèle en accord avec les expériences

Les prévisions théoriques et les mesures se sont étonnamment bien accordées, jusque dans les détails (*voir la figure page 57*). Cet accord est meilleur que nous ne l'espérions, compte tenu du fait que le modèle choisi était le plus simple possible. En outre, nous avons mis en évidence des comportements spécifiques de la combinaison triple entre viscosité, élasticité et plasticité. Par exemple, quand l'obstacle se déplace dans la mousse, même à basse vitesse, l'écoulement de la mousse autour de lui montre une nette asymétrie entre l'amont et l'aval. Derrière l'obstacle, la vitesse de l'écoulement passe par un point d'arrêt, change de signe, augmente, passe par un maximum et décroît.

Par ailleurs, lorsque nous avons analysé l'expérience de Georges Debrégeas et de ses collègues sur la mousse entraînée entre deux cylindres, nous avons constaté que l'écoulement dépend de l'état initial de la mousse, en particulier des contraintes mécaniques qui apparaissent au début de l'expérience lorsqu'on remplit de bulles le dispositif. Quand le cylindre intérieur est mis en rotation, la mémoire de ces contraintes initiales disparaît peu à peu, mais jamais totalement. Même quand un écoulement permanent et stable finit par être atteint, il dépend encore un peu de l'état initial de la mousse. Autrement dit, il n'est pas unique, et deux expériences successives peuvent donner des vitesses différentes. Cela justifie *a posteriori* le choix pour nos expériences d'une autre géométrie, en l'occurrence des écoulements dont l'hétérogénéité est forcée, qui eux sont reproductibles.

Ces comportements n'existent pas dans les écoulements visqueux simples, visco-élastiques ou visco-plastiques. L'aspect visco-élasto-plastique joue un rôle essentiel dans la dynamique de la mousse et il n'est pas possible de l'étudier en décomposant le système en sous-éléments plus simples pour isoler les aspects visqueux, plastique et élastique.

La confrontation d'expériences modèles à deux dimensions, d'expériences plus réalistes à trois dimensions, de simulations numériques et de modélisations théoriques montre l'émergence à grande échelle de propriétés de la mousse qui ne se ramènent pas trivialement à celles des bulles individuelles. En l'occurrence, au-dessus de deux ou trois diamètres de bulles, la mousse se comporte comme un milieu continu. Cependant, les expériences montrent que la mousse se distingue d'un fluide. Son comportement est plus riche et complexe. Bien que les bulles soient constituées de deux fluides, la mousse est solide.

Ce triple comportement est similaire pour des mousses de composition ou de taille de bulles très différentes. Cette universalité fait de la mousse un bon système modèle pour comprendre les matériaux complexes constitués d'un assemblage de cellules et, plus généralement, tous ceux qui sont à la fois visqueux, élastiques et plastiques (tels certains fluides d'émulsions ou de polymères). Les non-linéarités qui découlent de ce triple comportement créent une physique d'écoulement complexe et non intuitive, que l'on sait désormais bien prédire à partir d'un petit nombre de paramètres, tels que la viscosité, la rigidité élastique et le seuil plastique.

La physique des mousses dynamiques n'en est qu'à ses débuts. L'origine de ses paramètres, probablement cachée dans les interactions moléculaires, reste à expliciter. En outre, malgré l'universalité du comportement des mousses étudiées, certains effets peuvent varier du fait d'une composition différente, par exemple. Comment expliquer ces variations ? Il faudrait aussi prendre en compte des phénomènes dynamiques spécifiques tels que la rupture des films, le mûrissement par transfert de gaz d'une bulle à l'autre ou le drainage de l'eau vers le bas de la mousse sous l'effet de la gravité.

Quoi qu'il en soit, on comprend mieux maintenant pourquoi la mousse reste coincée dans la bouteille... parce qu'elle est solide ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

I. Cheddadi *et al.*, **Steady Couette flows of elastoviscoplastic fluids are non-unique**, *J. Rheol.*, vol. 56, pp. 213-239, 2012.

I. Cheddadi *et al.*, **Understanding and predicting viscous, elastic, plastic flows**, *Eur. Phys. J. E*, vol. 34, pp. 1-15, 2011.

I. Cantat *et al.*, **Les mousses, structure et dynamique**, Belin, 2010.

N. D. Denkov *et al.*, **The role of surfactant type and bubble surface mobility in foam rheology**, *Soft Matter*, vol. 5, pp. 3389-3408, 2009.

M. Vignes-Adler et F. Graner, **La vie éphémère des mousses**, *Pour la Science*, n° 293, mars 2002.

D. Weaire et S. Hutzler, **The physics of foams**, Oxford University Press, 1999.

DES ÉLECTRODES EN OR ornent une cellule photovoltaïque à pérovskite rouge, fabriquée par l'Institut de technologie du Massachusetts. Cette cellule, moins épaisse que du papier, fait quelques millimètres.