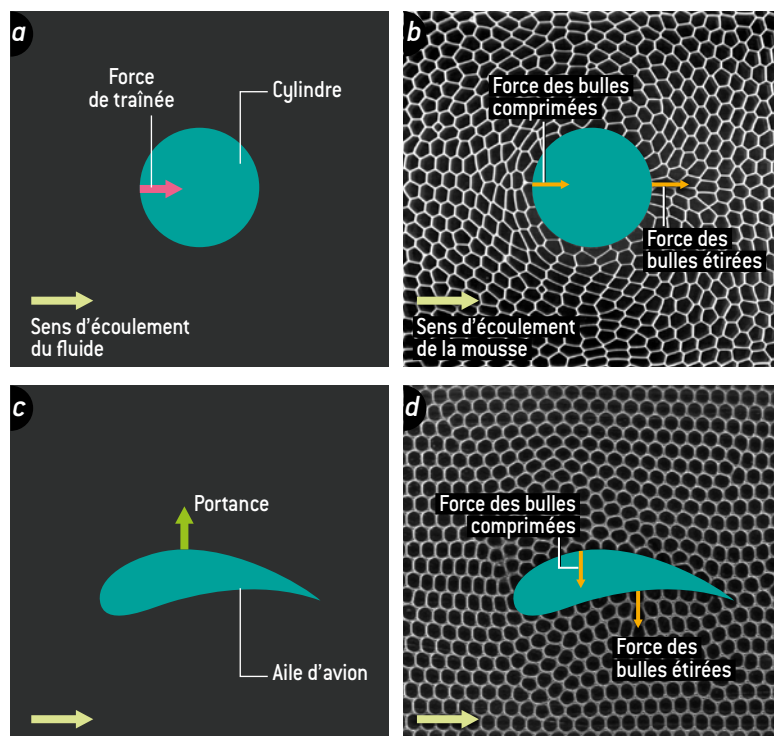


UNE MOUSSE QUI S'ÉCOULE NE SE COMPORTE PAS COMME UN FLUIDE



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

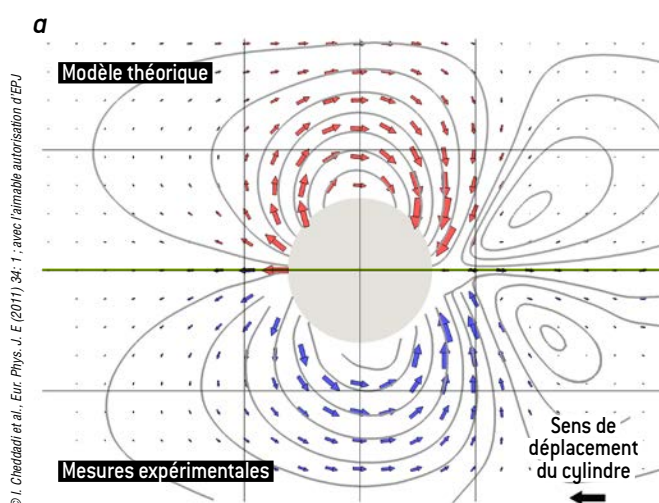
L'obstacle peut avoir d'autres formes, telle une ellipse ou un carré. Un cas intéressant est celui d'une aile d'avion. Dans une soufflerie classique, si de l'air s'écoule à haute vitesse autour d'un tel profil, l'air dispose de moins de place pour passer sur le dos que dans le creux de l'aile. Ainsi, 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 !

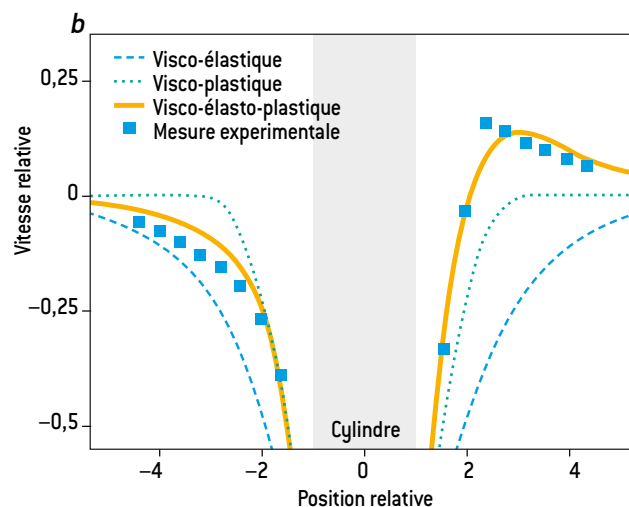
Grâce à ces observations, les physiciens ont commencé à se forger une intuition du comportement des mousses. L'étape suivante a consisté à développer des modèles pour affiner et tester la compréhension de l'expérience. L'intérêt immédiat est de permettre à un ingénieur de prévoir comment va s'écouler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