

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

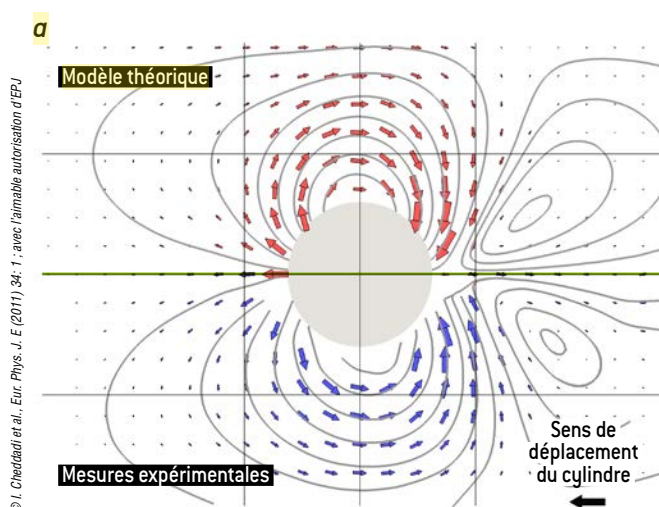
L'obstacle peut avoir d'autres formes, telle une ellipse ou un carré. Un cas intéressant est celui d'une aile d'avion. Dans une soufflerie classique, si de l'air s'écoule à haute vitesse autour d'un tel profil, l'air dispose de moins de place pour passer sur le dos que dans le creux de l'aile. Ainsi,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

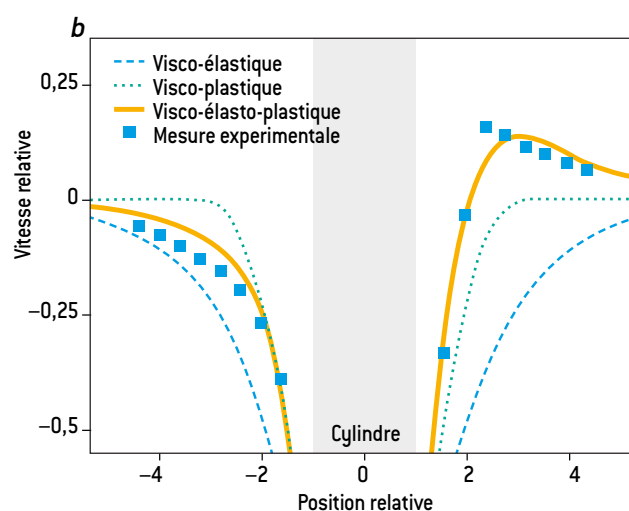
Grâce à ces observations, les physiciens ont commencé à se forger une intuition du comportement des mousses. L'étape suivante a consisté à développer des modèles pour affiner et tester la compréhension de l'expérience. L'intérêt immédiat est de permettre à un ingénieur de prévoir comment va s'écouler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