

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

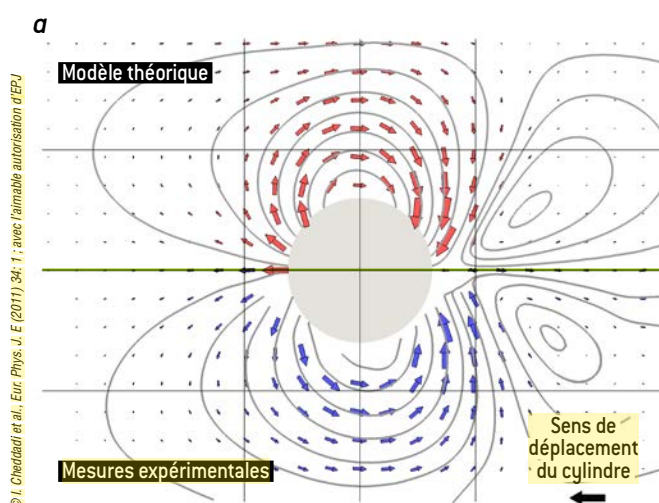
L'obstacle peut avoir d'autres formes, telle une ellipse ou un carré. Un cas intéressant est celui d'une aile d'avion. Dans une soufflerie classique, si de l'air s'écoule à haute vitesse autour d'un tel profil, l'air dispose de moins de place pour passer sur le dos que dans le creux de l'aile. Ainsi,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

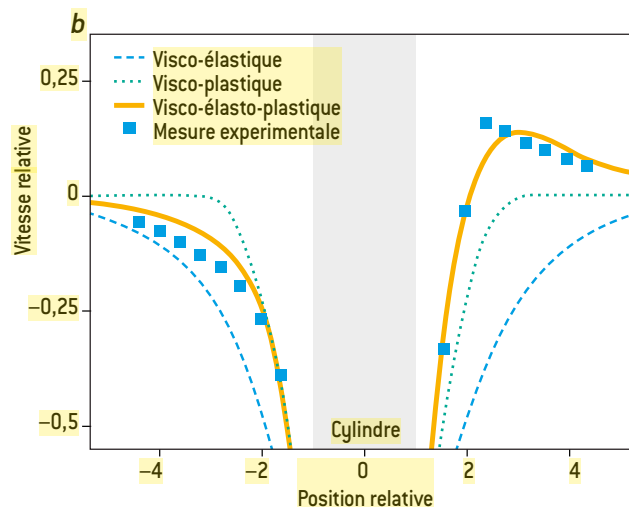
Grâce à ces observations, les physiciens ont commencé à se forger une intuition du comportement des mousses. L'étape suivante a consisté à développer des modèles pour affiner et tester la compréhension de l'expérience. L'intérêt immédiat est de permettre à un ingénieur de prévoir comment va s'écouler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

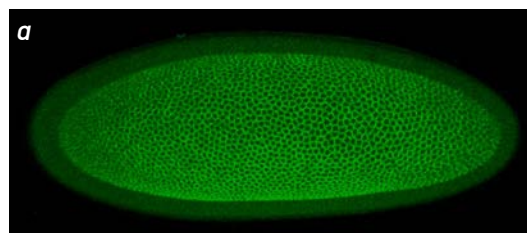
mouche, l'énergie inclut la rigidité du squelette de chaque cellule et l'adhésion entre cellules voisines. Sur ce point précis de la forme des cellules, le système biologique apparaît comme un système physique dominé par la mécanique, où la biochimie intervient essentiellement pour fixer les paramètres,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

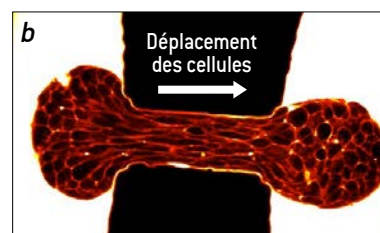
à travers un trou, à deux ou trois dimensions. Sur la figure b, un agrégat de cellules de souris, aspiré par un écoulement d'eau, s'écoule à travers un trou. En amont (à gauche) les cellules sont étirées vers le trou ; en aval, elles reprennent peu à peu une forme plus régulière.

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