

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

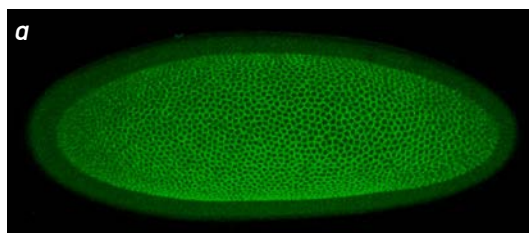
mouche, l'énergie inclut la rigidité du squelette de chaque cellule et l'adhésion entre cellules voisines. Sur ce point précis de la forme des cellules, le système biologique apparaît comme un système physique dominé par la mécanique, où la biochimie intervient essentiellement pour fixer les paramètres,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

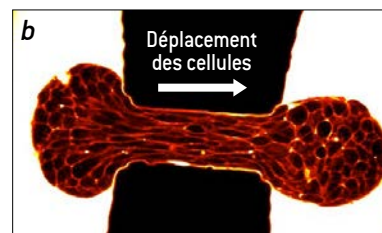
à travers un trou, à deux ou trois dimensions. Sur la figure b, un agrégat de cellules de souris, aspiré par un écoulement d'eau, s'écoule à travers un trou. En amont (à gauche) les cellules sont étirées vers le trou ; en aval, elles reprennent peu à peu une forme plus régulière.

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.