

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 réagrége, 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

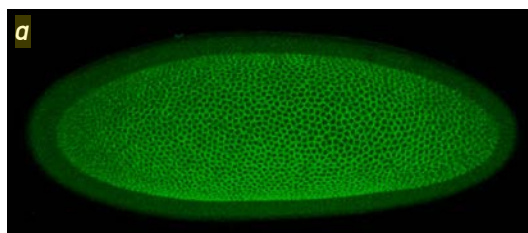
mouche, l'énergie inclut la rigidité du squelette de chaque cellule et l'adhésion entre cellules voisines. Sur ce point précis de la forme des cellules, le système biologique apparaît comme un système physique dominé par la mécanique, où la biochimie intervient essentiellement pour fixer les paramètres,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

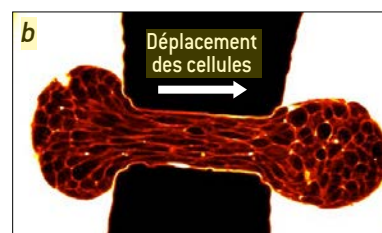
à travers un trou, à deux ou trois dimensions. Sur la figure b, un agrégat de cellules de souris, aspiré par un écoulement d'eau, s'écoule à travers un trou. En amont (à gauche) les cellules sont étirées vers le trou ; en aval, elles reprennent peu à peu une forme plus régulière.

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