

à la réalisation, bien concrète, elle, des ordinateurs programmables. Mais un écoulement fluide peut-il aussi simuler une machine de Turing universelle?

En 2014, cette question a pris une tout autre dimension sous l'impulsion de Terence Tao. Ce mathématicien de l'université de Californie à Los Angeles a suggéré que si un fluide est Turing-complet, il serait possible de l'utiliser pour démontrer la régularité des équations de Navier-Stokes. Ces équations, qui régissent la dynamique d'un fluide, posent en effet un problème aux mathématiciens: il n'est pas démontré qu'elles sont régulières, c'est-à-dire que leurs solutions ne divergent jamais vers des valeurs infinies – ce qui serait physiquement inacceptable. La démonstration de la régularité mathématique des équations de Navier-Stokes est d'ailleurs l'un des «sept problèmes du millénaire» listés en 2000 par l'institut Clay.

Certaines tentatives de preuve reposent sur la conservation de l'énergie. Terence Tao a voulu construire un contre-exemple à partir d'un modèle-jouet pour montrer que ce critère n'est pas suffisant. Pour cela, il a cherché à montrer que si un fluide a un comportement assez complexe pour faire des calculs et constituer une machine de Turing universelle, alors on pourrait concevoir un algorithme fluide qui conserverait l'énergie mais la concentrerait en un point de façon à obtenir une

singularité. Si, par cette approche, on parvenait à prouver qu'on aboutit parfois à des singularités en un temps fini, cela signifierait que les équations de Navier-Stokes ne sont pas régulières.

Passer d'un modèle-jouet aux vraies équations de Navier-Stokes est cependant très difficile. «En 2018, en lisant le blog de Terence Tao, j'ai réalisé qu'avec mes

Les fluides sont-ils assez complexes pour servir à effectuer des calculs?

collègues, nous avons développé des outils qui devaient nous permettre d'aborder ce problème», raconte Eva Miranda. Avec son équipe, elle a étudié le cas des équations d'Euler, qui correspondent à un cas particulier des équations de Navier-Stokes – correspondant aux fluides incompressibles et de viscosité nulle. Les chercheurs ont aussi restreint leur étude à des solutions stationnaires, c'est-à-dire indépendantes du temps. Ces chercheurs ont alors montré qu'il était possible de concevoir une machine de Turing universelle avec un tel fluide. Le système prend comme données en entrées un point de l'espace tridimensionnel. Puis la machine

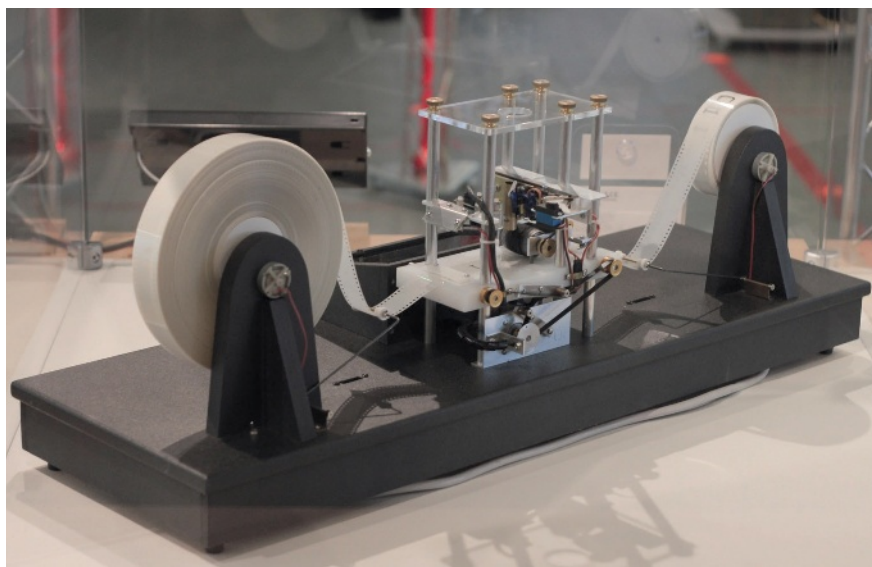
de Turing suit la trajectoire du fluide passant par ce point et donne en sortie la position résultante.

Ce résultat a une conséquence surprenante, car les machines de Turing sont associées à la notion d'indécidabilité. En 1931, le mathématicien autrichien Kurt Gödel a démontré que, dans un cadre axiomatique donné, certains énoncés mathématiques sont indécidables: il est impossible de prouver qu'ils sont vrais ou faux. Turing a transposé ce concept à certaines situations plus physiques. Il s'est intéressé au «problème de l'arrêt» qui consiste à déterminer, à partir de la description d'un programme et de ses données en entrée, si le programme terminera son calcul en un temps fini ou s'il tournera indéfiniment. Turing a démontré qu'il était impossible de concevoir un algorithme général qui résout le problème de l'arrêt quel que soit le programme donné. Le problème de l'arrêt est donc indécidable pour les machines de Turing.

Ainsi, Eva Miranda et ses collègues ayant montré que leur système fluide était capable de simuler une machine de Turing universelle, ce système doit présenter une part d'indécidabilité. Les chercheurs ont établi une correspondance précise entre le problème de l'arrêt et le calcul des trajectoires du fluide. À long terme, le comportement du fluide est donc indécidable: aucun algorithme ne peut garantir qu'une particule fluide, quelle qu'elle soit, passera ou non à un endroit donné en un temps fini.

Qu'en est-il du programme de Terence Tao pour prouver la régularité ou non des équations de Navier-Stokes? Eva Miranda et ses collègues ont montré que certains écoulements pouvaient en principe être utilisés pour concevoir une machine de Turing universelle. «Notre démonstration a un prix: elle fonctionne dans une géométrie particulière, où les distances sont déformées et qui ne correspond pas à la géométrie euclidienne de notre monde. Nous travaillons à alléger cette contrainte», souligne Eva Miranda. La conception d'une telle machine capable de concentrer de l'énergie en un point pour former des singularités dans notre monde réel reste une question ouverte... ■

Sean Bailly



Exemple de réalisation d'une machine de Turing. Elle lit les données sur le ruban et, selon les règles de l'algorithme implémenté, agira d'une façon spécifique.

R. Cardona *et al.*, *PNAS*, vol. 118(19), article e2026818118, 2021

BIOLOGIE CELLULAIRE

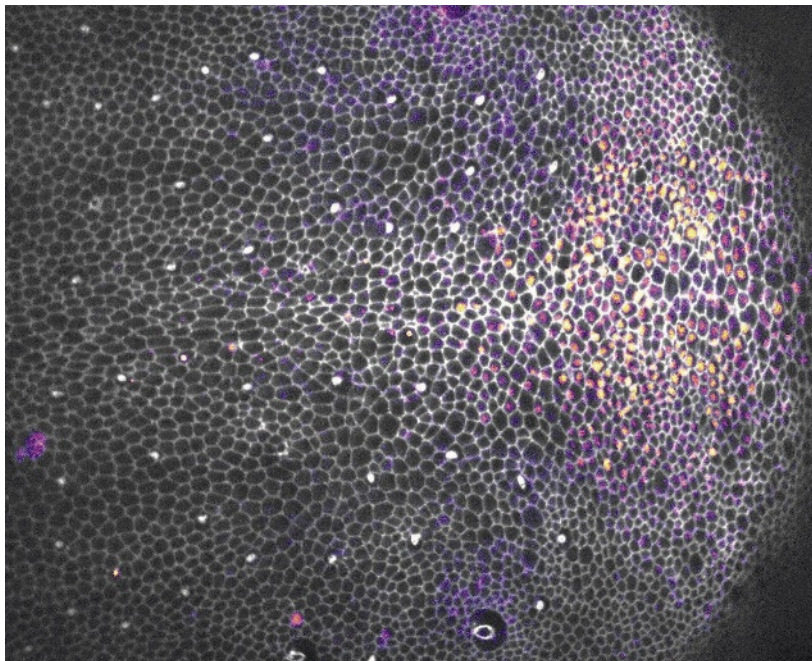
LA COHÉSION GARANTIE MALGRÉ LA MORT DE CELLULES

Dans certains tissus, un mécanisme contrôle la mort des cellules voisines pour assurer la cohésion et l'imperméabilité tissulaire.

Plus de dix milliards de cellules mortes sont éliminées chaque jour dans l'intestin d'un adulte, sans qu'apparaissent des brèches qui compromettraient le fonctionnement et l'intégrité de cet organe. Pourtant, le maintien de la cohésion des épithéliums, tissus composés de cellules étroitement juxtaposées qui jouent un rôle de barrière physique et chimique dans de nombreuses parties du corps (comme l'épiderme ou des muqueuses internes), est encore mal compris. On savait que lors de la mort d'une cellule, celle-ci est expulsée par extrusion et de nouvelles jonctions se forment rapidement entre les cellules restantes. Léo Valon et ses collègues, de l'institut Pasteur, à Paris, viennent de montrer qu'au cours de ce mécanisme, les cellules en état de mort cellulaire protègent transitoirement leurs voisines. Elles les empêchent ainsi de connaître le même sort qu'elles, ce qui évite la formation d'un trou dans le tissu.

Grâce à un outil optogénétique permettant de déclencher l'élimination individuelle de cellules grâce à un signal lumineux, les chercheurs ont montré chez la pupe de drosophile qu'induire la mort simultanée d'au moins trois cellules voisines aboutit à une perte de cohésion de l'épithélium. Même si des mécanismes de cicatrisation se mettent en place, une perte d'imperméabilité a bien lieu. De tels événements à répétition peuvent par exemple conduire dans l'intestin à des inflammations chroniques. «L'étude de l'organisation de la mort cellulaire dans le temps et dans l'espace, dans un tissu en renouvellement, nous a permis de comprendre que la distribution spatiale de la perte cellulaire est cruciale», explique Romain Levayer, qui a conduit ces recherches. Or les éliminations groupées ne se produisent jamais dans l'organisme, contrairement à ce qui serait attendu statistiquement en l'absence d'un mécanisme protecteur.

Grâce à des marqueurs fluorescents donnant accès à des informations à l'échelle de la cellule, les chercheurs ont constaté que le mécanisme protecteur en jeu était lié à l'activation, dans les cellules adjacentes de la cellule morte, de la voie de signalisation EGFR-ERK (déjà connue pour son rôle dans la régulation



Dans ce tissu épithélial de drosophile en fausses couleurs, on distingue les contours des cellules (en gris) et l'activation de la voie EGFR-ERK (par un gradient jaune-violet), qui assure la cohésion du tissu.

des cellules souches dans l'intestin et dans la survie cellulaire). Cette activation serait effective pendant au moins une heure après l'extrusion, ce qui laisse le temps aux cellules restantes d'établir des jonctions, garantissant ainsi la continuité de l'étanchéité. D'après les expériences de Romain Levayer et ses collègues, l'allumage de cette voie de signalisation serait mécanique, dû à la déformation liée à l'extrusion de la cellule morte.

Ces résultats soulignent l'incroyable capacité d'autoorganisation des tissus biologiques, dans un processus qui semble avoir été conservé au cours de l'évolution. Ainsi, l'équipe d'Olivier Pertz, de l'université de Berne, en Suisse, a observé ce même phénomène de protection lié à une activation locale de la voie EGFR-ERK dans des cellules humaines en culture. Les chercheurs comptent étudier la piste d'un éventuel défaut d'activation de ce mécanisme protecteur local dans l'intestin de patients souffrant de maladies inflammatoires chroniques. ■

Noëlle Guillon

L. Valon *et al.*, *Developmental Cell*, vol. 56(12), pp. 1700-1711, 2021 ; P. A. Gagliardi *et al.*, *ibid.*, pp. 1712-1726

ASTROPHYSIQUE

FILAMENTS EN ROTATION ?

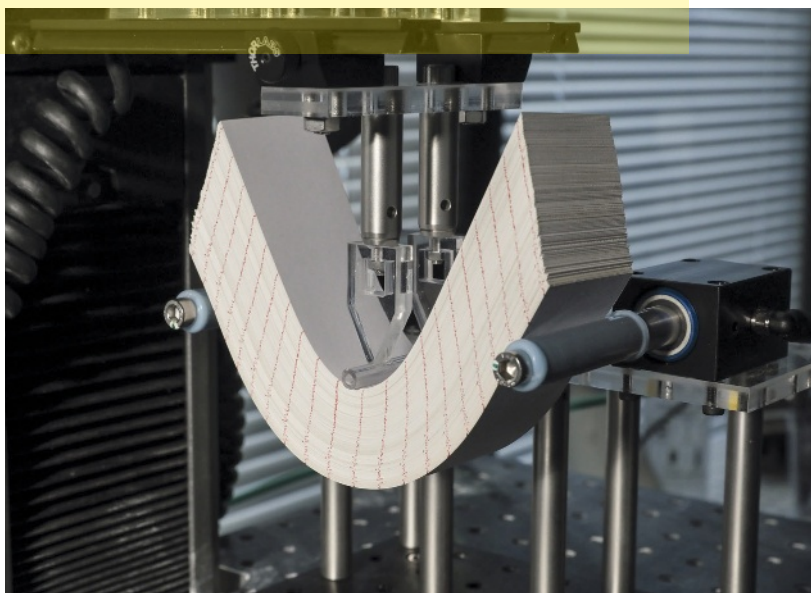
Les filaments cosmiques sont parmi les plus grandes structures de l'Univers; ils s'étendent typiquement sur 100 à 250 millions d'années-lumière. En 1998, Christophe Pichon et Francis Bernardeau, de l'institut d'astrophysique de Paris, ont prédit théoriquement que les filaments présentent une structure interne en rotation, en raison des conditions de leur formation. Cela restait à confirmer par l'observation. Noam Libeskind, de l'institut Leibniz d'astrophysique, à Potsdam, en Allemagne, et ses collègues ont mesuré le décalage spectral moyen dû à l'effet Doppler des galaxies dans plus de 17 000 filaments. Ils ont montré que la distribution et la dynamique des galaxies sont compatibles avec un mouvement de rotation autour de l'axe des filaments. ■

S. B.

P. Wang et al., *Nature Astronomy*, 14 juin 2021

PHYSIQUE

PLIER UN LIVRE, UN MODÈLE DE FROTTEMENTS



L'empilement de feuilles reposant sur deux supports est soumis à une flexion par une force appliquée au milieu de la pile par le dessus.

BIOPHYSIQUE

Ô GUÉPARD, SUSPENDS TON VOL

Avec ses pointes de vitesse à 110 kilomètres par heure, le guépard est le plus rapide des animaux terrestres. Tomoya Kamimura, de l'institut de technologie de Nagoya, et ses collègues ont passé au crible la course du prédateur, à travers un modèle mathématique tenant compte de ses caractéristiques physiques. La morphologie du guépard lui permet en effet de maîtriser une forme particulière de galop, dans laquelle l'animal se propulse successivement avec ses pattes avant et arrière. Entre ces propulsions, il se retrouve donc suspendu en l'air deux fois par foulée, contre une seule chez la plupart des quadrupèdes. La souplesse de la colonne vertébrale du félin serait l'élément crucial qui rend cette course redoutablement efficace. La grande amplitude d'incurvation de cette partie du squelette permet au guépard d'absorber plus facilement les chocs avec le sol, et donc de triompher de ses proies au sprint. ■

Valentin Rakovsky

T. Kamimura et al., *Scientific Reports*, vol. 11, article 9631, 2021

En 2015, Frédéric Restagno, du laboratoire de physique des solides, à Orsay, et ses collègues ont montré qu'en entrelaçant les pages de deux annuaires il était possible de créer un lien assez fort pour soulever une voiture avec une grue. Le secret de cette démonstration spectaculaire: les forces de frottements entre les pages en contact. Samuel Poincloux, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, et ses collègues ont modélisé ces forces de frottement quand on plie un livre. Cet objet présente *a priori* une certaine simplicité avec un empilement régulier de pages de même épaisseur. Une structure que l'on retrouve à de nombreuses échelles, des strates géologiques soumises à des déformations aux empilements de couches de graphène.

Les chercheurs ont d'abord étudié la réponse du livre en chargement et en déchargement (lors de l'application et du relâchement d'une force). Ils ont mesuré simultanément la force nécessaire à cette déformation ainsi que la forme que prend le livre. Ils ont ensuite modélisé ce système déformé afin d'estimer la quantité d'énergie dissipée par les frottements. Bien que ces forces soient très difficiles à calculer quand le système fait intervenir de l'élasticité, une géométrie non linéaire ou encore un nombre important de surfaces de contact, Samuel Poincloux et ses collègues ont réussi à décrire la réponse non linéaire de cet objet, en bon accord avec les expériences. La prochaine étape consistera à étudier la dynamique de cette structure, ses déformations au cours du temps ou sa réaction en cas d'un impact.

Grâce à ce modèle, les chercheurs comptent l'utiliser comme point de départ pour étudier et concevoir des objets plus complexes tels que des amortisseurs ou des matelas, dans lesquels les frottements jouent un grand rôle. ■

S. B.

S. Poincloux et al., *Physical Review Letters*, vol. 126, article 218004, 2021.