

Mathématiques

Des rides hexagonales ou labyrinthiques

La formation de plis sur des surfaces courbes résistait à la modélisation mathématique. Une nouvelle approche a permis de préciser ce qui détermine les motifs observés.

Quand un grain de raisin se dessèche, sa peau se ride. Le même type de sillons sinueux apparaît dans les empreintes digitales, car un processus similaire est à l'œuvre. Ce mécanisme produit aussi des motifs hexagonaux analogues à ceux de la surface d'une balle de golf. Mais de quels paramètres dépend la forme des rides ? Sur des surfaces courbes, ces structures étaient difficiles à étudier. Le mathématicien Jörn Dunkel et son équipe de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) viennent de franchir une étape.

On explique la formation des plis ou des rides par l'instabilité de flambage. Lorsqu'un matériau est comprimé, il se déforme uniformément dans un premier temps, avant de se plier lorsque la contrainte imposée devient trop importante. Pedro Reis et Denis Terwagne, du MIT, ont étudié l'instabilité de flambage sur un film mince élastique à la surface d'une sphère qu'ils dégonflaient peu à peu. Les rides formaient soit un motif hexagonal, soit un motif de type labyrinthe.

Ils se sont associés aux mathématiciens du MIT pour

comprendre le mécanisme de formation et le processus de sélection des deux motifs.

Walter Koiter, de l'Université de Delft, avait développé une théorie mathématique qui décrit les déformations d'une surface courbe et élastique. Cependant, la résolution de ces équations était trop difficile pour étudier la transition entre les différentes formes de rides – le cas qui intéressait Jörn Dunkel et ses collègues –, en raison d'effets non linéaires importants, liés à la courbure de la surface.

En appliquant des hypothèses simplificatrices validées expérimentalement, les chercheurs ont réduit les équations de Koiter à une seule équation, dite de Swift-Hohenberg, qu'il est possible de résoudre numériquement.

Grâce à cette approche, les chercheurs ont mis en évidence le rôle clé joué, dans la sélection du motif de rides, par la courbure de la surface et l'épaisseur du film élastique. Par exemple, plus une surface est courbée, plus les rides présentent un motif hexagonal régulier. Plus le film élastique

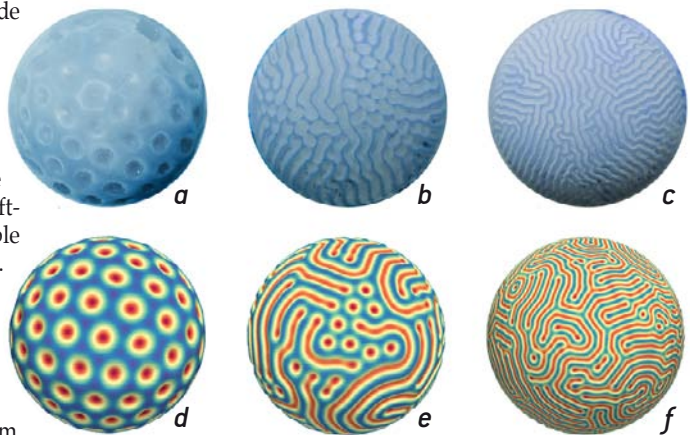
est mince, plus les rides forment des sillons labyrinthiques. Jörn Dunkel et ses collègues ont ainsi quantifié les relations entre ces paramètres et la forme des rides. Ils ont aussi observé une phase intermédiaire dans laquelle cohabitent des structures hexagonales et labyrinthiques.

Les prévisions du modèle sont en accord avec les observations. Le phénomène serait universel et s'appliquerait à

des échelles aussi bien microscopiques que macroscopiques. Il interviendrait sur tout type de surface courbée en compression et expliquerait, entre autres, l'aspect des raisins secs, les empreintes digitales et les circonvolutions du cerveau.

S. B.

N. Stoop et al., *Nature materials*, en ligne le 2 février 2015



En fonction de certains paramètres, la surface d'une sphère en contraction adopte une structure de plis hexagonale (a), labyrinthique (c) ou d'une phase intermédiaire (b). Les simulations du modèle (en bas) correspondent à ce que l'on observe (en haut).

© N. Stoop et al./Nature materials

Aux origines des hippopotames

L'analyse génétique établit que les cétacés sont les plus proches cousins des hippopotames. Ce lien était difficile à clarifier, par manque de fossiles des ancêtres des hippopotames. Au Kenya, une équipe franco-kenyane, menée par Fabrice Lihoreau de l'Université de Montpellier 2, a découvert une mâchoire et des dents, datés de 28 millions d'années, d'une nouvelle espèce d'anthracothères. Il s'agit d'une famille disparue et qui comble la lacune entre les hippopotames et leur ancêtre commun avec les cétacés.

L'humanité sature ses mers de plastique

Jenna Jambeck, de l'Université de Géorgie et des collègues ont établi qu'en 2010, entre 1,7 et 4,6 % des rejets de plastiques quotidiens d'une population côtière étaient susceptibles de parvenir en mer. Il s'ensuit que sur les 275 millions de tonnes

de déchets de plastique produites chaque jour dans le monde en 2010, entre 4,8 et 12,7 millions de tonnes ont fini dans les océans. Pour la France, cela signifie que chaque jour, sur les quelque 3303 tonnes de déchets de plastiques produites, entre 56 à 152 tonnes ont gagné la mer.

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Comment rendre utiles les débats publics

Les débats publics sur les sciences et les techniques resteront stériles tant qu'un choix réel entre plusieurs options n'y sera pas proposé.

Michel CALLON

Californie, février 1975. À l'appel du biochimiste américain Paul Berg, plus de 150 chercheurs venus du monde entier se réunissent à Asilomar pour un congrès d'un genre nouveau. La question posée est : faut-il encadrer les manipulations génétiques pour éviter qu'elles ne constituent un danger pour l'espèce humaine ? La réponse apportée – contentons-nous de renforcer les règles de sécurité – ne brille pas par son audace, mais le mouvement est lancé. Depuis cette date, de nombreux débats, consacrés aux problèmes posés par les sciences et les techniques, ont été organisés par les scientifiques, mais aussi les pouvoirs publics, des associations, des organisations non gouvernementales (ONG), des entreprises ou des citoyens. Cependant, leurs bienfaits semblent de moins en moins évidents, et des doutes s'élèvent sur leur utilité.

Une majorité de chercheurs estime qu'il est inutile d'ouvrir les dossiers techniques à des groupes – associations, structures de recherches alternatives, citoyens – qui se révèlent incapables d'entrer dans les contenus et qui sont prompts à dénigrer le progrès scientifique et technique. Quant aux citoyens intéressés, ils tendent à considérer que ces débats ne servent à rien, si ce n'est à faire accepter des décisions déjà prises.

Faut-il donc en finir avec les débats publics sur les nanosciences, les déchets radioactifs, les antennes-relais, les biotechnologies, l'environnement, et admettre que les technosciences et leurs effets ne sont

pas discutables ? La solution est tentante, mais chaque jour des problèmes pratiques se rappellent à notre attention. Il y a des déchets radioactifs à gérer, legs des générations passées de décideurs, et dont nous ne savons pas s'il faut les enterrer définitivement ou les conserver à portée de main ; il y a des plantes transgéniques dont certains pensent qu'elles mettent en péril les formes d'agriculture traditionnelles ; il y a le changement climatique qui, on le sait déjà, empoisonnera la vie de nos descendants.

Face à ces problèmes, il ne suffit pas de se demander s'il faut en discuter et avec qui.

COMMENT CRÉER UNE DIVERSITÉ des choix ? En imposant leur réversibilité, la coexistence des options, et des prises de décision mesurées.

Quelques siècles de vie démocratique nous enseignent que des choix doivent exister entre plusieurs options. Si cette diversité des mondes possibles disparaît, alors le débat, même s'il a lieu dans les formes, ne peut être que stérile. Comment créer cette diversité ? L'expérience de ces dernières décennies apporte des éléments de réponse. Trois notions en particulier ont joué un rôle exemplaire dans plusieurs débats : la réversibilité des choix, la coexistence des options et la décision mesurée. Trois dossiers en montrent l'importance : les déchets radioactifs, les organismes génétiquement modifiés (OGM) et le changement climatique.

En misant sur le nucléaire, les générations précédentes se sont peu soucies de l'héritage qu'elles nous laissaient. Elles ont imposé leurs choix sans nous demander notre avis. Devons-nous faire de même avec les générations futures ? Cette question a été au cœur des débats sur les déchets radioactifs organisés lors de la préparation de la loi Bataille, en 1991, et de ceux qui ont suivi. La notion de réversibilité des décisions y a été proposée pour sortir de cette logique.

Une décision sera considérée comme réversible si elle permet de transmettre à la génération suivante une palette d'options au moins équivalente à celle dont nous disposons. La génération suivante pourra alors décider soit de laisser ouvertes ces options et de continuer à les enrichir pour les transmettre à son tour, soit de s'engager définitivement dans l'une d'elles.

La notion de réversibilité a un contenu moral puisqu'elle invite à donner des marges de manœuvre à nos successeurs. Elle exprime également une exigence technique et scientifique. Pendant 30 ans, notre génération doit continuer à explorer la possibilité de l'enfouissement profond tout en investissant dans des activités de recherche et de développement consacrées à d'autres options. Alors nos enfants auront les moyens d'un vrai choix. Ils pourront décider de continuer ou d'arrêter certaines explorations, et, s'ils le désirent, de n'en poursuivre qu'une seule.

Une autre question, au moins aussi importante, est celle du maintien de la diversité des options face aux nombreuses forces qui

tendent à la réduire. Comment assurer que les choix envisageables ne seront pas éliminés avant même que les modalités de leur développement n'aient été éprouvées ? Cette menace n'a rien de théorique. Livrés à eux-mêmes, c'est-à-dire aux puissants intérêts qui les gouvernent, les marchés tendent à privilégier certaines solutions qui deviennent, du fait des investissements consentis, les seules considérées comme rentables et efficaces : le standard VHS s'est imposé pour les magnétoscopes alors que Betamax était le meilleur techniquement ; le clavier QWERTY de même, bien qu'il n'optimise ni la vitesse de frappe ni le confort de travail ; et sans les investissements considérables dont elle a fait l'objet en France, l'énergie nucléaire ne serait pas devenue aussi incontournable pour les décideurs.

C'est sur le dossier des OGM qu'ont été formulés avec le plus de clarté les défis posés à la démocratie par ces mécanismes de sélection et d'élimination. Comment s'assurer, par exemple, que soient conciliées dans le futur deux formes d'agriculture et d'industrie alimentaire, l'une qui recourt aux OGM et l'autre qui repose sur des plantes non modifiées, sachant que les rapports de force économiques tendent à favoriser la première au détriment de la seconde ? La réponse apportée par le législateur tient en une notion – la coexistence – à laquelle il reste à donner un contenu.

Le Haut conseil des biotechnologies a fait des propositions intéressantes sur le sujet. Elles incluent notamment : la mise en place d'expérimentations progressives et de dispositifs d'évaluation de leurs effets sociaux, environnementaux et économiques ; l'organisation de recueils d'informations et leur mise en circulation ; un accès ouvert à la recherche publique pour les différentes options ; la réforme du système de la propriété intellectuelle. Ces formes nouvelles d'organisation, réalistes, éviteraient, si elles étaient adoptées, les mécanismes de verrouillage et préviendraient la disparition des options.

Mais réformer la recherche et les marchés pour entretenir la diversité des options ne suffira pas. Dans les dossiers mis en débat ces 40 dernières années, les décisions et

les choix ne reposent, au moins au début, sur aucune certitude établie. Les réponses passent par des modélisations et des simulations qui mobilisent nombre d'hypothèses pas toujours explicites ni faciles à vérifier. Comment, dans ces conditions, prendre des décisions raisonnables et éclairées et ne pas sombrer dans l'inaction ?

C'est dans le cas du changement climatique, où les incertitudes sont plus fortes et complexes qu'ailleurs, qu'ont été imaginés des dispositifs loin d'être parfaits, mais prometteurs. Des procédures permettent de mieux évaluer la solidité des preuves et la confiance à accorder aux travaux des experts. C'est ainsi qu'une instance (SBSTA) intermédiaire entre les experts (GIEC) et les gouvernements a été créée pour rendre moins étanche la frontière entre questions de fait et de valeur. On demande aussi aux experts d'évaluer leur degré d'accord et les incertitudes non encore levées. Enfin, des décisions mesurées tendent à se substituer aux décisions tranchantes et définitives : à chaque étape sont attendus les retours d'expérience pour conforter les modèles et prendre de nouvelles décisions.

On l'aura compris, les débats restent nécessaires. Mais leur rôle ne doit pas se limiter à l'inventaire des points de vue et à la recherche de compromis souvent introuvables. Leur principale fonction est d'aider à faire émerger les options envisageables et à en accompagner l'exploration. Les illustrations précédentes montrent que la tâche n'est pas impossible. Des solutions sont imaginées. Notre devoir est de les faire connaître, de faciliter leur discussion et leur transposition. Certes elles peuvent paraître utopiques. Pourtant, l'utopie pourrait bien être du côté de ceux qui pensent que la simple recherche d'un consensus suffit à la démocratie. ■

■ L'AUTEUR



Michel CALLON est chercheur au Centre de sociologie de l'innovation, à MinesParisTech.



QUE FAIRE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES ?

Selon Michel Callon, les débats doivent aider à l'émergence et au développement de différentes options et accompagner l'exploration et l'évaluation de chaque piste, afin de laisser aux générations suivantes la possibilité de choisir.



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

« L'hygiène lumineuse est essentielle, au même titre que l'hygiène alimentaire »

L'œil ne sert pas qu'à voir. L'intensité lumineuse qu'il reçoit et les moments où cela se produit influent sur notre santé, explique Claude Gronfier, neurobiologiste spécialisé dans l'étude des effets de la lumière sur l'organisme.



Claude GRONFIER est chercheur au sein du Département de chronobiologie de l'unité Inserm 846, à Bron (Lyon).

Tablettes, ordinateurs, télévision, téléphone portable... Les sources de lumière artificielle se sont multipliées dans notre environnement, et l'on s'aperçoit que leur effet sur les rythmes biologiques n'est pas anodin. En 2010, 30 % des adolescents en France présentaient des troubles d'endormissement, selon l'étude HBSC 2010 publiée en 2012 par l'INPES (Institut national de prévention et d'éducation pour la santé), et ceux qui utilisaient un ordinateur, un téléphone portable ou la télévision le soir dormaient 30 à 45 minutes de moins par nuit que la moyenne de leurs camarades. À l'inverse, trop peu de lumière peut être néfaste. Décryptage de Claude Gronfier, auteur de plusieurs travaux sur le sujet.

POUR LA SCIENCE

Comment s'est-on aperçu que la lumière influe sur les rythmes biologiques ?

CLAUDE GRONFIER : On a longtemps pensé que la lumière était surtout nécessaire à la vision. On a ensuite montré qu'elle intervient dans la synthèse de la vitamine D et participe au bien-être. Mais à partir des années 1970, on a découvert qu'il existe une horloge biologique au cœur du cerveau,

impliquée dans la genèse des rythmes biologiques de l'organisme. Si l'on s'endort et se réveille tous les jours à peu près à la même heure, c'est parce que cette horloge permet l'installation du sommeil à certains moments et active la veille à d'autres. On a aussi mis en évidence le rôle clé de la lumière dans ce processus. En 1980 notamment, Charles Czeisler, de la *Harvard Medical School*, et ses collègues ont montré que c'est elle qui remet à l'heure l'horloge biologique, et non des synchroniseurs sociaux, comme on le pensait alors.

PLS

La lumière agit-elle sur l'horloge biologique via les mécanismes de la vision ?

CL. G. : C'est ce qu'on a pensé au départ. On avait admis que la lumière synchronisait l'horloge biologique par l'intermédiaire des cônes et des bâtonnets, cellules photosensibles de la rétine qui transforment les signaux lumineux en influx nerveux. Mais en 2002, on a découvert qu'il existe d'autres récepteurs de lumière dans la rétine, les cellules ganglionnaires à mélanopsine, principales responsables de l'effet de la lumière sur l'horloge biologique. Via ces cellules, la lumière a bien d'autres effets sur le cerveau. Un câblage neuronal les connecte à l'horloge, mais aussi à plusieurs structures cérébrales impliquées dans

la mémoire, le contrôle des émotions, l'humeur, la cognition, la vigilance, le sommeil. Dès qu'une lumière active ces cellules, ces structures sont activées ou inhibées. On se rend compte aujourd'hui que le sommeil de qualité pendant la nuit et la veille de qualité durant le jour sont liés à différents effets de la lumière sur diverses structures cérébrales.

PLS

La lumière artificielle a-t-elle le même effet sur la rétine que la lumière naturelle ?

CL. G. : Cette question suscite beaucoup de recherches. L'homme a évolué à l'extérieur, exposé à la lumière solaire. Il n'est donc pas étonnant que cette lumière soit optimale tant pour la vision que pour activer l'horloge biologique et les autres fonctions cérébrales non visuelles. L'effet des lumières artificielles, en revanche, dépend de leur spectre.

Globalement, elles sont toutes efficaces sur la vision. La lumière solaire paraît blanche parce qu'elle active les trois types de cônes de la rétine, sensibles respectivement au rouge, au bleu et au vert. On peut avoir la même illusion avec des lumières fluorescentes ou des diodes électroluminescentes (LED), même si leur contenu spectral est plus pauvre : il suffit qu'elles contiennent un peu de rouge, de bleu et de vert en bonnes proportions. Certaines, dites chaudes, sont enrichies