

ASTROPHYSIQUE

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE VALIDÉE AU CENTRE DE LA VOIE LACTÉE

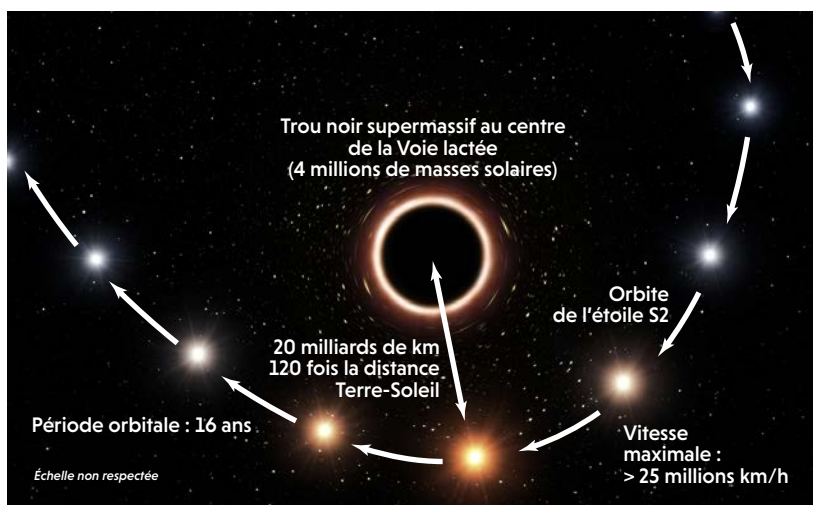
En mesurant le décalage spectral d'une étoile en orbite autour du trou noir central de la Galaxie, des astronomes ont confirmé une nouvelle fois la théorie de la gravitation d'Einstein.

La théorie de la relativité générale d'Einstein indique qu'un objet massif déforme l'espace-temps dans son voisinage. Aux abords de cet objet, le temps s'écoule plus lentement et les longueurs sont dilatées, du point de vue d'un observateur éloigné. L'une des conséquences est que la longueur d'onde d'un rayonnement émis aux abords de l'objet massif nous parvient décalée «vers le rouge», c'est-à-dire que la longueur d'onde est augmentée. On parle de décalage gravitationnel vers le rouge, pour ne pas le confondre avec l'effet Doppler dû au mouvement relatif entre la source et l'observateur. Cette conséquence de la relativité générale a été mesurée sur Terre dès 1959 par Robert Pound et Glen Rebka, aux États-Unis. Récemment, les astronomes du consortium international Gravity, impliquant le CNRS et les observatoires de Paris et Grenoble, ont testé cet effet près du trou noir Sagittarius A*, le trou noir supermassif qui se trouve au centre de la Voie lactée.

Les trous noirs sont des objets compacts qui déforment l'espace-temps au point que même la lumière ne peut s'en échapper. Cependant, autour de Sagittarius A*, des étoiles évoluent jusqu'à des distances très proches du trou noir, à l'instar de l'étoile S2. L'orbite de cet astre est très elliptique, de sorte qu'à son périastre (le point le plus proche de Sagittarius A*), la distance qui sépare l'étoile du trou noir est de seulement 120 fois la distance moyenne Terre-Soleil. À une distance aussi faible, les effets gravitationnels du trou noir sont intenses et le décalage gravitationnel vers le rouge de la lumière émise par l'étoile est important.

Entre 2003 et 2018, les astronomes ont mesuré le décalage vers le rouge de l'étoile S2 à l'aide des spectromètres en proche infrarouge Sinfoni du VLT (*Very Large Telescope*), au Chili, et Nirc2 de l'observatoire Keck, à Hawaï. En mai 2018, l'étoile S2 était à son périastre. Pour avoir une mesure très précise de sa position, les chercheurs ont utilisé un dispositif interférométrique, Gravity (qui a donné son nom à la collaboration), mis en service en 2016 au VLT.

Avec ces données, les membres du consortium ont montré que le décalage vers le rouge



L'étoile S2 est en orbite autour du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée. Plus l'astre est proche du trou noir, plus la longueur d'onde de sa lumière nous parvient décalée vers le rouge.

2,6 %
DE LA VITESSE
DE LA LUMIÈRE,
SOIT ENVIRON
25 MILLIONS
DE KILOMÈTRES
PAR HEURE.
C'EST LA VITESSE
DE L'ÉTOILE S2
AU PÉRIASTRE
DE SON ORBITE
AUTOUR DU TROU
NOIR SUPERMASSIF
SITUÉ AU CENTRE
DE LA VOIE LACTÉE.

observé est compatible avec un effet relativiste dû au champ gravitationnel du trou noir supermassif. Les astronomes restent toutefois prudents. Le modèle utilisé est un système simple, un trou noir supermassif autour duquel gravite une seule étoile. Mais d'autres corps présents dans le voisinage, comme des trous noirs de masse stellaire, pourraient perturber l'orbite de l'étoile S2.

« Nous prévoyons maintenant de réaliser des observations similaires avec des étoiles moins brillantes que S2, mais plus proches de Sagittarius A*. Les effets de décalage vers le rouge seraient alors encore plus importants et permettraient de tester avec une précision supérieure la relativité générale », s'enthousiasme Thibaut Paumard, chargé de recherche du CNRS à l'observatoire de Paris, qui a participé à l'étude.

Pour aller plus loin, les chercheurs espèrent mesurer le décalage (la précession) de l'orbite de l'étoile S2 prévu par la relativité générale par rapport à celui prévu par la théorie de la gravitation newtonienne. Une perturbation supplémentaire que les chercheurs assurent pouvoir mesurer d'ici à 2020. ■

LUCAS STREIT

R. Abuter et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol. 615, article L15, 2018

EN BREF

DU BOSON DE HIGGS AUX QUARKS « BEAUX »

Depuis sa découverte en 2012, les physiciens étudient le boson de Higgs et les façons dont il se désintègre. Les physiciens des expériences *Atlas* et *CMS*, au Cern, près de Genève, viennent de détecter sa désintégration en une paire quark-antiquark $b\bar{b}$. Ce « canal » de désintégration du boson de Higgs représente 60 % des cas. Bien que cette voie de désintégration soit la plus probable, sa signature est difficile à distinguer du bruit de fond. C'est ce qui explique pourquoi ce canal a été mis en évidence aussi tardivement.

LA STRATÉGIE DE LA LUCIOLE

Après avoir goûté une luciole (*Photinus pyralis*), les grandes chauves-souris brunes (*Eptesicus fuscus*) apprennent vite que ces insectes sont toxiques et non comestibles. Brian Leavell, de l'université d'État de Boise, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les mammifères volants utilisent deux stratégies pour reconnaître les lucioles : l'écholocation et la vision. Le signal bioluminescent des lucioles sert donc en partie à inciter leurs prédateurs à passer leur chemin !

UNE DALLE SCULPTÉE DU NÉOLITHIQUE

À Massongy, sur la rive française du lac Léman, la fouille d'une occupation du Néolithique et de l'âge du Bronze a livré un monument funéraire utilisé à plusieurs reprises entre 3900 et 1000 avant notre ère. Il s'organise autour d'une grande dalle de pierre de 3 mètres de long creusée de cupules (petites coupes) et entourée de nombreuses petites dalles, elles aussi creusées de cupules et incisées de lignes. Plusieurs tombes à inhumation ont été retrouvées, dont celle, datant de l'âge du Bronze final, d'une femme ornée d'un collier d'ambre.

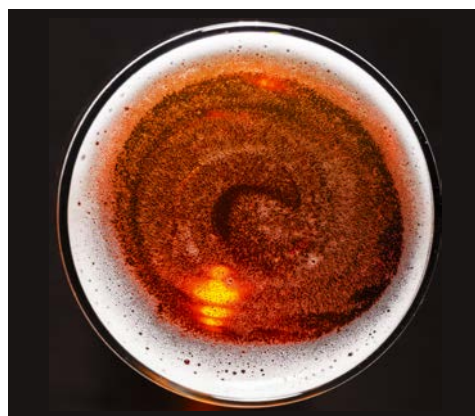
PHYSIQUE

LA MOUSSE À CONTRECOURANT

Faites tourner, par un mouvement de translation circulaire, votre verre rempli d'un liquide : une vague s'y forme. De toute évidence, elle tourne dans le même sens que le geste imprimé. Mais qu'en est-il de la mousse de votre bière ou de votre café ? *A priori*, elle suit le même mouvement. Pourtant, Frédéric Moisy, de l'université Paris-Saclay et du CNRS, et ses collègues ont montré que, dans certaines conditions, la mousse peut se mettre à tourner dans le sens inverse.

Lorsqu'un mouvement de translation circulaire est imprimé à un verre contenant un fluide, la surface de celui-ci s'incline à cause de la force centrifuge. La hauteur de la « vague » dépend alors de la vitesse de rotation et de l'amplitude du mouvement imposé. Le fluide ne peut jamais aller à contrecourant. Ce sont donc les propriétés des éléments présents à la surface qui peuvent conduire à un mouvement inverse.

Frédéric Moisy et ses collègues ont effectué des expériences avec un verre d'eau animé d'un mouvement constant et de faible amplitude. Ils l'ont saupoudré de divers matériaux qui flottent à la surface (mousse, microbilles de verre, cannelle et poivre). Ils ont augmenté peu à peu la quantité de mousse, par exemple, déposée à la surface. En petite quantité, le mouvement de



Dans un verre de bière en translation circulaire, la fine couche de mousse peut tourner à contresens.

la mousse suit celui de la rotation. Mais au bout d'un moment, la mousse finit par tourner à contresens. Le phénomène s'explique par la force de cohésion entre les bulles de la mousse. Le « radeau » qui se forme se comporte comme un solide bidimensionnel et élastique posé à la surface de l'eau. Lorsqu'il est petit, il est emporté par la vague. Mais quand il devient plus large, ses bords s'approchent des parois du récipient, où le fluide s'écoule plus lentement. Il en résulte des forces de friction et un couple mécanique qui conduit le radeau à tourner en sens inverse. ■

S. B.

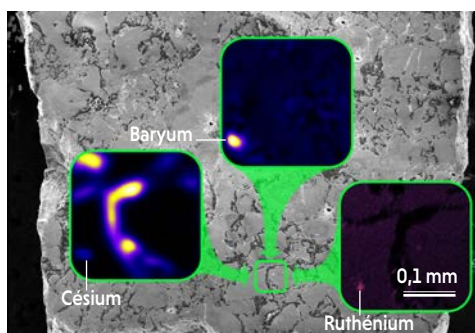
F. Moisy et al., *Europhysics Letters*, vol. 122(3), article 34002, 2018

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

CAPTURE DE CÉSIMUM À OKLO

Dans les mines d'uranium d'Oklo, au Gabon, un processus naturel de réactions en chaîne autoentretenues de fission nucléaire s'est déroulé il y a environ deux milliards d'années et a fonctionné pendant plusieurs centaines de milliers d'années. Comme les réacteurs industriels, ce réacteur nucléaire naturel a produit des « déchets » radioactifs. Une partie de ces déchets a été évacuée dans les eaux d'écoulement et une autre partie est restée piégée sur place.

Grâce à des techniques d'imagerie, l'équipe d'Evan Groopman, du laboratoire de recherche navale américaine, à Washington, a découvert que des agrégats métalliques de ruthénium, présents au sein du réacteur, ont fixé des isotopes radioactifs de baryum et de césium. Ce résultat est intéressant, car les isotopes 134



L'imagerie des isotopes dans ce minéral d'uranium montre que le ruthénium a fixé le césium et le baryum.

et 137 du césium sont très volatils. Ils sont relâchés dans l'environnement après des catastrophes nucléaires, comme celles de Tchernobyl ou de Fukushima. Le ruthénium constituerait ainsi une piste pour piéger le césium radioactif produit par les réacteurs. ■

L. S.

E. E. Groopman et al., *PNAS*, vol. 115(35), pp. 8676-8681, 2018

EN IMAGE

L'ÉCORCE, UN TREILLIS QUI MAINTIENT L'ARBRE DROIT

Quelles forces permettent à un arbre de pousser verticalement et, surtout, de maintenir cette posture? Les biomécaniciens ont longtemps pensé que les seules forces internes agissant dans le bois suffisaient. Mais l'équipe de Bruno Clair, du laboratoire Écologie des forêts de Guyane, à Kourou, et du laboratoire de mécanique et génie civil de Montpellier, vient de montrer que cette fonction est aussi assurée par une autre structure: l'écorce.

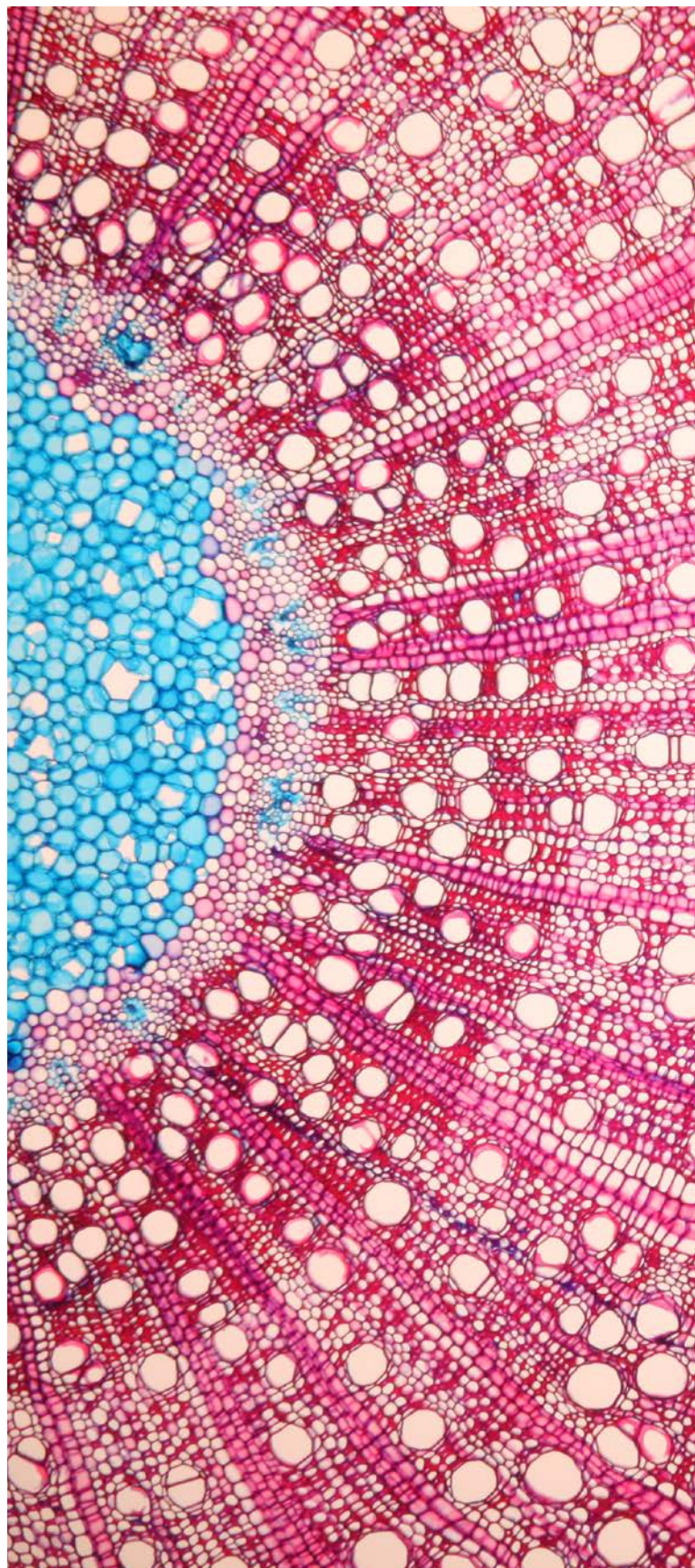
Les chercheurs ont cultivé des arbres tropicaux attachés à un tuteur incliné à 45 degrés. Après quelques mois, ils ont supprimé le tuteur. Les plantes se redressaient immédiatement. Cependant, chez certaines espèces, si on enlève leur écorce, ce retour à la verticale n'a pas lieu. L'écorce aurait donc un rôle crucial dans le contrôle de la posture de certains arbres.

Pour comprendre l'action de l'écorce, les chercheurs en ont étudié la structure. Les fibres y sont organisées en treillis, une sorte de réseau dont les mailles sont des losanges. Or, lorsque l'arbre s'incline (par exemple du fait de la présence d'une grosse branche d'un côté du tronc), une plus grande quantité de bois est produite du côté opposé au déséquilibre. À cet endroit, la circonférence de l'écorce augmente et le treillis est étiré latéralement. Les chercheurs suggèrent que, du fait de sa structure en losanges, le treillis engendre une force de traction verticale le long du tronc du côté où plus de bois a poussé. Cette asymétrie de forces verticales aide au redressement de l'arbre.

L'analyse de coupes réalisées sur des troncs d'arbres tels que le cacaoyer rivièr (*Pachira aquatica*) confirme ce mécanisme. Dans l'écorce (l'anneau périphérique bleu dans l'image ci-contre), les fibres du treillis sont organisées en flammes (en rouge) séparées par des cellules non lignifiées de parenchyme (en bleu). Dans le cas des arbres cultivés à 45 degrés, les flammes du côté supérieur du tronc sont très écartées les unes des autres par des cellules de parenchyme dilatées: le treillis est étiré, comme prévu. ■

DONOVAN THIEBAUD

B. Clair et al., *New Phytologist*, en ligne le 4 août 2018





© Bruno Clair, laboratoire Ecofog (CNRS/AgroParisTech/Cirad/Inra/Université de Guyane/Université des Antilles)

GÉOSCIENCES

DES SIMULATIONS POUR AVALANCHES DE PLAQUE

Ce type d'avalanche était particulièrement difficile à reproduire sur ordinateur. Grâce à un nouveau modèle, un chercheur l'a décrit avec une grande précision.

Souvent provoquées par le passage d'un seul skieur, les avalanches de plaque sont parmi les plus meurtrières. Prévoir leur déclenchement est d'une importance cruciale dans la prévention des risques en montagne, mais la tâche est difficile. En outre, la modélisation de ce phénomène sur ordinateur était jusque-là incomplète. Johan Gaume, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse, a développé un nouveau modèle mathématique pour décrire ces avalanches avec une précision sans précédent. Il a collaboré avec des spécialistes en modélisation 3D qui ont notamment simulé la neige dans le célèbre film d'animation de Disney, *La Reine des neiges*. Le résultat est fort réaliste.

Les avalanches de plaque se produisent dans un manteau neigeux particulier. Une couche de neige fragile, généralement très poreuse (constituée à 80% d'air), se forme au début de l'hiver à la base du manteau neigeux. Les chutes de neige suivantes enfouissent cette couche sous une plaque de neige plus dense. La configuration est instable. En bas d'une pente raide, un marcheur peut perturber la couche inférieure en créant une fissure, qui se propage très rapidement (jusqu'à 100 mètres par seconde) jusqu'en haut de la pente. La plaque finit par rompre là où l'angle de la pente dépasse l'angle limite de maintien de la plaque sur la couche poreuse. Elle se divise ensuite en plusieurs morceaux qui glissent sur la couche inférieure.

Il est difficile de prévoir ces avalanches par des mesures directes (température, pression, humidité, etc.). En général, les spécialistes savent repérer une couche poreuse, et donc un lieu à risque, mais ils ne sont pas en mesure d'estimer le volume de neige qui sera relâché par l'avalanche.

Pour répondre notamment à cette question, Johan Gaume et son équipe ont développé un modèle mathématique qui décrit les propriétés de la plaque et celle de la couche sous-jacente (notamment leur comportement élastoplastique). Leur simulation porte sur 30 millions de particules, qui représentent les grains de neige dans la plaque et la couche fragile. L'écoulement de l'avalanche est recréé



Sur cette image, l'arrière-plan est une photographie, mais le premier plan est un instantané d'une simulation tridimensionnelle d'avalanche de plaque.

100

KILOMÈTRES PAR HEURE

C'EST LA VITESSE QUE
PEUVENT ATTEINDRE
LES AVALANCHES
DE PLAQUE.
ELLES SONT
NÉANMOINS PLUS
LENTES QUE
LES AVALANCHES
DITES POUDREUSES,
DONT LES NUAGES
DÉVALENT LA PENTE
JUSQU'À
350 KILOMÈTRES
PAR HEURE.

en calculant, pour chaque pas de temps, la position des particules. Une modélisation particulièrement complexe, car les avalanches de plaque se manifestent sur une large gamme d'échelles: leur déclenchement est dû à la présence de microfissures, de longueur inférieure à un millimètre, tandis que les fractures, collisions et frictions entre plaques finissent par donner, à l'échelle macroscopique, un écoulement assimilable à celui d'un fluide visqueux. Malgré ces difficultés, la simulation reproduit avec fidélité les observations.

Le modèle de Johan Gaume présente toutefois une limite de taille: il décrit fidèlement l'avalanche de plaque uniquement pour un déclenchement rapide (provoqué par un skieur ou une explosion). Le chercheur travaille sur un nouveau modèle qui inclura les déclenchements naturels plus lents. Il espère également prédire le volume de neige relâché en fonction de paramètres plus précis tels que la distribution spatiale du manteau neigeux, le type de neige (sèche, humide ou fondante), l'érosion de la neige en aval de la plaque ou le type de dépôt de la neige. ■

L. S.

J. Gaume et al., *Nature Communications*,
vol. 9, article 3047, 2018

BIOLOGIE

E. COLI POUR ASSIMILER LE FER

Si certaines souches de la bactérie *Escherichia coli* sont pathogènes, la plupart sont inoffensives. Et d'ailleurs, elles représentent l'une des principales populations bactériennes du système digestif humain. Cependant, on savait qu'*E. coli* produit une molécule, l'entérobactine, qui permet à la bactérie d'assimiler le fer. Les biologistes pensaient qu'*E. coli* captait ainsi le fer au détriment de son hôte. Mais Bin Qi et Min Han, de l'université du Colorado à Boulder, aux États-Unis, suggèrent le contraire: l'entérobactine produite par *E. coli* dans le système digestif s'associerait à une protéine dans les mitochondries des cellules de l'hôte... aidant ainsi ce dernier à assimiler le fer. Ce résultat pourrait inspirer des stratégies thérapeutiques pour les personnes souffrant d'anémie. ■

S. B.

Bin Qi et Min Han, *Cell*, en ligne le 23 août 2018

GÉOSCIENCES

VIE ANCIENNE ET CONTINENTALE

Gâce au registre fossile, on estime que la vie sur Terre serait apparue dans les océans il y a 3,8 à 4,3 milliards d'années. Plus récente, la conquête du milieu terrestre par les organismes vivants est pourtant bien moins documentée. Cependant, Martin Homann, du Laboratoire géosciences océan, à Brest, et ses collègues ont découvert des traces de vie microbienne fossilisée dans des roches sédimentaires continentales âgées de 3,2 milliards d'années. Retrouvées en mer au large de l'Afrique du Sud, ces roches se seraient formées dans un lit de rivière, avant d'être emportées.

Les chercheurs ont montré que les microorganismes étaient déjà adaptés au milieu terrestre, où la sécheresse épisodique pouvait déshydrater les cellules et où l'absence de couche d'ozone exposait les organismes à un rayonnement solaire très mutagène. Cette découverte montre que la conquête du milieu terrestre a été bien plus ancienne et rapide qu'on ne l'imaginait. ■

CORALINE MADEC

M. Homann et al., *Nature Geoscience*, vol. 11, pp. 665-671, 2018

PHYSIQUE

LE RESSAUT HYDRAULIQUE REVU ET CORRIGÉ



Dans l'évier, le jet d'eau forme une région très lisse cernée par un bourrelet turbulent. C'est le ressaut hydraulique.

Lorsque l'eau du robinet coule dans l'évier, vous avez peut-être remarqué cette nappe d'eau très mince et lisse autour du jet d'eau; à une distance de quelques centimètres du jet, cette nappe disparaît dans un bourrelet d'eau turbulente. Depuis un siècle, les physiciens pensaient que la position de ce «ressaut hydraulique» était déterminée principalement par la gravité. Cependant, Rajesh Bhagat, de l'université de Cambridge, et ses collègues viennent de montrer que le phénomène dépendrait plutôt de la tension de surface et de la viscosité de l'eau.

Jusqu'à présent, on négligeait ces deux caractéristiques du fluide et on raisonnait que le ressaut se formait là où la vitesse du fluide (qui diminue à mesure qu'il s'éloigne du jet) et la vitesse (constante) des ondes de surface, c'est-à-dire des vagues, sont égales. Or cette dernière, dans la configuration de l'évier, dépend de g , l'accélération de la pesanteur. C'est donc la pesanteur, pensait-on, qui déterminerait la position du ressaut.

Dans le cadre de sa thèse, Rajesh Bhagat étudiait le nettoyage de surfaces par des jets de fluide. Il était ainsi amené à travailler avec des surfaces horizontales, mais aussi inclinées, voire verticales. Dans ces derniers cas, la forme du ressaut restait inchangée par rapport à la configuration horizontale – un résultat surprenant et difficile à expliquer si la gravité joue un rôle important dans la position du ressaut. Avec ses collègues, Rajesh Bhagat a repris les équations qui décrivent le système du fluide dans l'évier, en tenant compte de la viscosité et de la tension de surface. Les équations obtenues montrent que ces facteurs sont dominants, et que la gravité joue un rôle négligeable. Ces physiciens ont testé expérimentalement leur modèle en faisant varier la viscosité du fluide, sa tension de surface et l'angle de la surface, et montré qu'il prédit correctement la position du ressaut. ■

S. B.

R. K. Bhagat et al., *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 851, R5, 2018

GÉNÉTIQUE

INVASION DE RÉTROVIRUS EN COURS DANS L'ADN DES KOALAS

Le suivi de cette intrusion récente révèle comment les rétrovirus ont envahi les génomes de vertébrés il y a des millions d'années.

Un rétrovirus a commencé à s'introduire dans le génome des koalas depuis «seulement» 50 000 ans. Il est rare de pouvoir observer en temps réel (à l'échelle de l'évolution...) le début de l'invasion du génome d'un hôte par un rétrovirus. Une équipe internationale dont fait partie Ulrike Löber, de l'institut Leibniz de recherche sur les animaux sauvages et de zoo, à Berlin, s'est penchée sur ce phénomène et a ainsi obtenu des informations sur le mécanisme par lequel les rétrovirus s'intègrent au génome tout en perdant leur pouvoir pathogène.

Un rétrovirus est un virus dont le génome est constitué d'ARN. Au cours du cycle viral, une enzyme, la transcriptase inverse, produit un ADN à partir de cet ARN. Les rétrovirus insèrent cet ADN dans celui de leur hôte, qui produit alors de nouvelles copies du virus. Généralement, ce sont les cellules somatiques qui sont infectées, auquel cas le rétrovirus n'est pas transmis à la descendance. Mais il arrive parfois que des cellules germinales de l'hôte soient infectées. Si l'hôte survit, le rétrovirus se transmet alors aux générations suivantes et l'on dit de lui qu'il est endogène.

Chez les vertébrés, une part non négligeable du génome est constituée d'éléments provenant de rétrovirus endogènes. «Ils correspondent à d'anciens rétrovirus qui sont devenus "défectifs", c'est-à-dire qui ont perdu leur capacité à ressortir de la cellule pour aller en infecter d'autres», explique Pascale Lesage, de l'Institut universitaire d'hématologie, à l'hôpital Saint-Louis, à Paris. Ainsi, l'architecture du génome des vertébrés reflète une longue histoire d'invasion de la lignée germinale par des rétrovirus infectieux. Cependant, la plupart des rétrovirus endogènes connus ont terminé l'invasion de la lignée germinale de leur hôte il y a des millions d'années. Il est donc difficile de savoir ce qui s'est passé au moment même de l'intrusion et comment les virus ont été rendus défectifs.

Le cas des koalas constitue une exception. Un rétrovirus nommé KoRV (impliqué dans le syndrome d'immunodéficience du koala, l'équivalent du sida chez l'homme) a commencé à envahir le génome germinale de ces marsupiaux il y a seulement 50 000 ans. Ulrike Löber et ses



Depuis 50 000 ans, le rétrovirus KoRV s'installe dans le génome des koalas. En recombinant son génome avec celui d'un autre rétrovirus déjà intégré, KoRV perd son caractère infectieux.

8 %

C'EST LA PART DU GÉNOME HUMAIN CONSTITUÉ D'ÉLÉMENTS ISSUS DE RÉTROVIRUS ENDOGÈNES. PAR EXEMPLE, HERV-K EST UNE FAMILLE DE RÉTROVIRUS ENDOGÈNES QUI A ÉTÉ INTÉGRÉE AU GÉNOME HUMAIN IL Y A AU MOINS 30 MILLIONS D'ANNÉES.

collègues ont analysé le génome de koalas de différentes régions de l'Australie (des koalas sauvages ou en captivité, ou des spécimens conservés dans des muséums). Les résultats montrent que tous les koalas ne sont pas encore infectés par KoRV. Chez ceux qui le sont, le rétrovirus n'est pas encore fixé dans une région particulière du génome. Autrement dit, l'invasion n'en est encore qu'à ses débuts.

Les chercheurs ont aussi montré qu'à la suite de son intrusion, le génome de KoRV se recombine avec celui d'un autre rétrovirus endogène des koalas, déjà défectif. Cette recombinaison élimine des séquences importantes de KoRV pour ses fonctions pathogènes et a pour conséquence de permettre sa fixation dans la lignée germinale du koala. «La possible recombinaison entre deux rétrovirus était déjà connue, mais l'idée intéressante de l'équipe est que cela pourrait être l'un des moyens par lequel le rétrovirus devient endogène», précise Pascale Lesage. Cela expliquerait en partie pourquoi la plupart des rétrovirus endogènes sont devenus défectifs dans le génome des vertébrés. ■

ALINE GERSTNER

U. Löber *et al.*, *PNAS*, vol. 115(34), pp. 8609-8614, 2018