

GÉOSCIENCES

LE RÔLE DES GAZ À EFFET DE SERRE À LA FIN DE L'ÉOCÈNE

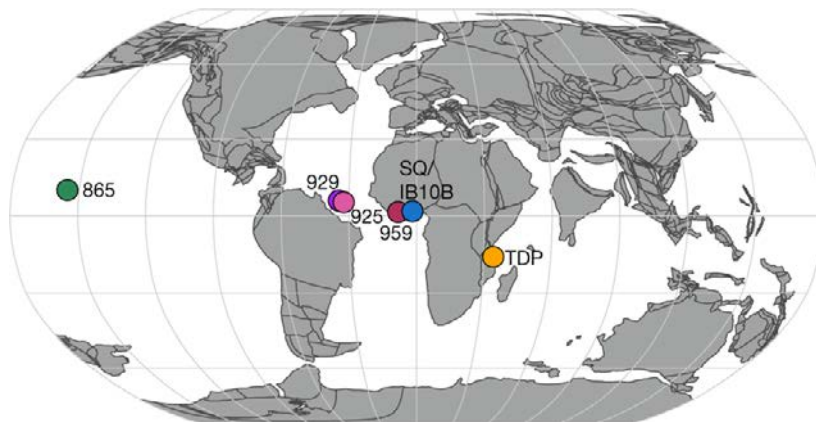
La chute de température à la fin de cette période géologique, il y a 34 millions d'années, serait due à la baisse de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre.

Le réchauffement climatique en cours s'explique surtout par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, etc.) dans l'atmosphère. Pour comprendre comment le climat évoluera, il est intéressant d'étudier la dynamique atmosphérique du passé, notamment durant l'Éocène. En effet, cette période géologique, il y a entre 56 et 34 millions d'années, a été l'une des plus chaudes. Sa fin est marquée par une chute rapide des températures. Margot Cramwinckel, de l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, et des collègues de plusieurs pays ont analysé des sédiments de l'océan Atlantique afin de déterminer la cause de cette baisse de température.

Les géologues proposaient deux scénarios pour expliquer cette évolution. Le premier s'appuie sur le fait qu'à la fin de l'Éocène, l'Australie et l'Antarctique, qui ne formaient qu'un seul continent, se sont séparés. Cette ouverture aurait modifié les courants marins profonds, ce qui aurait provoqué une chute de la température des eaux océaniques de l'hémisphère Sud. La seconde piste est celle d'une baisse de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. La température des océans aurait diminué, mais selon une dynamique et une répartition différentes du premier scénario.

Pour départager ces hypothèses, Margot Cramwinckel et ses collègues ont mesuré, dans des sédiments, les variations de concentration en lipides produits par des bactéries du genre *Thaumarchaeota*. Les traces laissées par ces organismes (des archées), qui synthétisent des quantités de lipides différentes selon la température de leur environnement, permettent de déterminer les variations de température dans les régions tropicales à la fin de l'Éocène.

En comparant ces températures à celles issues de carottes prélevées dans d'autres océans, les chercheurs ont reconstruit l'évolution des différences de température entre les eaux océaniques polaires et équatoriales (on parle de gradient thermique méridional). Résultat : ce gradient s'accroît au cours de l'Éocène alors que la température océanique des deux régions diminue. D'après le modèle développé par Margot Cramwinckel et ses



Cette carte montre comment l'Australie et l'Antarctique ont commencé à se séparer à la fin de l'Éocène. Les sédiments étudiés (point bleu) ont été comparés à d'autres (les autres points) pour déterminer les températures océaniques durant l'Éocène.

8 °C

**DE PLUS
QUE LA
TEMPÉRATURE
MOYENNE ACTUELLE,
C'EST CE QUI
PRÉVALAIT AU COURS
DE LA TRANSITION
ENTRE LE PALÉOCÈNE
ET L'ÉOCÈNE.
CAUSE PROBABLE,
SELON LES DONNÉES
GÉOPHYSIQUES :
UNE IMPORTANTE
HAUSSE DE LA
CONCENTRATION
ATMOSPHÉRIQUE EN
GAZ À EFFET DE SERRE
IL Y A 56 MILLIONS
D'ANNÉES.**

collègues, ces observations signifient que le changement global de température a eu un effet beaucoup plus important sur les régions polaires que sur les régions tropicales à la fin de l'Éocène. Ce phénomène, connu sous le nom de facteur d'amplification polaire, est caractéristique de l'influence des gaz à effet de serre. Les chercheurs en concluent que c'est la baisse de concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère qui a provoqué le refroidissement de la fin de l'Éocène.

L'équipe de Margot Cramwinckel a aussi noté que les températures des régions tropicales durant l'Éocène variaient beaucoup. Elle suggère que les régions tropicales étaient très sensibles aux changements de composition atmosphérique et de concentration en gaz à effet de serre, avec un effet direct sur les températures. Transposé à l'évolution actuelle du climat, ce résultat souligne l'importance critique de maîtriser les émissions de gaz à effet de serre.

Par ailleurs, le modèle proposé par ces chercheurs est le premier capable de reproduire les variations de températures océaniques et les gradients de température sur des périodes de temps aussi longues. Il fournit aux climatologues des outils robustes pour estimer les évolutions futures de notre climat. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

M. J. Cramwinckel et al., *Nature*,
vol. 559, pp. 382-386, 2018

DU PAIN AVANT L'AGRICULTURE

Du pain calciné, retrouvé en Jordanie dans les vestiges de foyers vieux de plus de 14 000 ans, s'est révélé préparé à partir de céréales sauvages. Il serait ainsi antérieur d'au moins 4 000 ans à l'émergence de l'agriculture.

Ces deux foyers, des sortes de fours circulaires, étaient enfouis sous le site archéologique de Shubayqa 1, où se trouvait auparavant un village de Natoufiens, un peuple de chasseurs-cueilleurs de la fin du Paléolithique. Au vu de la complexité, du temps de préparation et du coût en énergie de la fabrication de cet aliment, Amaia Arranz-Otaegui, de l'université de Copenhague, et ses collègues suggèrent que ces peuples consommaient du pain en période de fête pour impressionner les convives. ■

L. S.

A. Arranz-Otaegui et al., *PNAS*, vol. 115 (31), pp. 7925-7930, 2018

L'ÉLASTICITÉ DU TRICOT COMPRISE

Le tricot, contrairement à une toile tissée, est constitué d'un unique fil qui dessine des méandres pour former les mailles. C'est cette topologie complexe qui assure l'élasticité du tricot, le fil glissant de maille en maille lorsque le matériau est étiré. Les modèles décrivant ce comportement n'étaient jusqu'à présent pas très satisfaisants. Samuel Poincloux, de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues en proposent un nouveau.

Ces physiciens ont d'abord suivi avec une caméra la déformation individuelle de chaque maille dans un tricot étiré. Ils ont alors élaboré un modèle, dont l'élément fondamental est une cellule à quatre côtés qui peut se déformer mais qui doit respecter certaines contraintes liées à la topologie du matériau. Ce modèle restitue parfaitement les observations lors de l'étirement du tricot. Une avancée qui intéressera l'industrie, notamment dans le domaine biomédical, les propriétés d'élasticité et de drapé du tricot ayant de nombreuses applications potentielles. ■

SEAN BAILLY

S. Poincloux et al., *Physical Review X*, vol. 8, article 021075, 2018

UN DEMI-MILLION D'ANNÉES DE SAPIENS



L'apparition dans le registre fossile africain de ces pointes bifaciales, pointes de flèches, perles en coquillage, morceaux d'ocre ou d'œufs d'autruche gravés signale l'émergence d'*Homo sapiens*.

Une brochette de paléanthropologues insignes, comprenant les préhistoriens Francesco d'Errico et Lounes Chikhi du CNRS, vient de publier un article rejetant l'idée que notre espèce, *Homo sapiens*, est le produit de l'évolution depuis 200 000 ans d'une seule population dans une unique région africaine.

Au lieu de cela, ces chercheurs proposent que la lignée *sapiens* a commencé à émerger en Afrique, il y a au moins 500 000 ans, ce qui est évidemment une conséquence de la découverte récente de plusieurs fossiles *sapiens* de quelque 315 000 ans d'âge... Ils vont même plus loin, en partant de la constatation que les plus anciens fossiles *sapiens* connus traduisent une assez grande diversité morphologique et sont disséminés à travers toute l'Afrique. Selon eux, si l'on tient compte des données archéologiques, génétiques, paléoclimatiques et paléoécologiques, cette situation correspond plutôt à l'idée que notre espèce s'est diversifiée au sein d'un réseau de populations réparties à travers toute l'Afrique. Les divers bassins de ces populations étaient séparés par des barrières naturelles, tels le Sahara ou la forêt, mais reliés par des flux géniques sporadiques. La dissémination de la population ancestrale *sapiens* a favorisé son hybridation avec des formes humaines divergeant d'*H. sapiens*, hybridation qui a d'ailleurs continué à se produire lorsque *H. sapiens* est sorti d'Afrique.

Ainsi, l'archéologie et les autres paléosciences devront désormais être convoquées ensemble chaque fois que l'on cherchera à préciser quel réseau natif *sapiens* a pu exister à une certaine époque. Un point que Lounes Chikhi commente ainsi : « Les données convergentes issues de ces différents domaines soulignent l'importance de considérer la structure des populations dans les modèles d'évolution humaine. Cela devrait donc nous amener à remettre en question les modèles actuels de changements de la taille de la population ancienne, et peut-être réinterpréter certains des anciens goulots d'étranglement, comme des changements dans la connectivité. » Décidément, tout est affaire de réseau aujourd'hui ! ■

F. S.

E. Scerri et al., *Trends in Ecology and Evolution*, en ligne le 11 juillet 2018

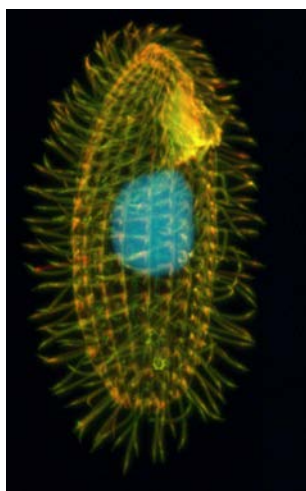
ÉVOLUTION

LE SEXE ENGENDRE LES SEXES

Chez la plupart des espèces, il n'existe que deux sexes. Mais certaines en comptent plus d'une centaine. Quelles contraintes expliquent l'apparition de nouveaux types sexuels ?

Dans la plupart des forêts du monde, sur de vieilles souches, vit le champion du sexe toutes catégories : *Schizophyllum commune*, un petit champignon blanc. En effet, chez cette espèce il n'existe pas deux, mais... 23 000 sexes différents ! Cette profusion a un avantage : elle multiplie le nombre de partenaires possibles. Ce champignon peut se reproduire avec 22 999 types sexuels sur les 23 000 disponibles, quand le système mâle-femelle n'offre, pour la reproduction, qu'une seule catégorie possible de partenaires. Malgré tout, les espèces à deux sexes restent largement majoritaires. George Constable, mathématicien à l'université de Bath, au Royaume-Uni, et Hannah Kokko, biologiste de l'université de Zurich, en Suisse, ont développé un modèle mathématique visant à mieux comprendre les contraintes qui limitent, au sein de la biodiversité, la profusion des sexes.

Chez *Schizophyllum commune* comme chez toutes les espèces dites isogames – à l'instar des algues, champignons, microorganismes –, les différences entre sexes ne s'expriment que d'un point de vue génétique. La mutation d'un seul gène peut alors conduire à l'apparition d'un nouveau sexe !



Le cilié *Tetrahymena thermophila*, qui ne se reproduit, par voie sexuelle, qu'une fois toutes les cent générations environ, compte sept types sexuels différents.



Le champignon *Schizophyllum commune* présente pas moins de 23 000 types sexuels. Un individu d'un type donné peut se reproduire avec un autre si celui-ci appartient à l'un des 22 999 autres types.

Le modèle de George Constable et de Hannah Kokko porte sur les espèces isogames et repose d'abord sur deux paramètres : le taux de mutation et la taille de la population. Si le taux de mutation conditionne la fréquence d'émergence de nouveaux types sexuels, la taille de la population influe, elle, sur leur disparition. En effet, plus une population est petite, plus grande est la probabilité que certains allèles (versions d'un gène) codant un type sexuel disparaissent au fil des générations.

Mais l'originalité du travail de George Constable et Hannah Kokko réside dans l'introduction d'un troisième paramètre : le taux de reproduction sexuée au sein de l'espèce. En effet, chez de nombreuses espèces isogames, la reproduction sexuée est facultative. Les levures *Saccharomyces cerevisiae*, par exemple, ne se reproduisent qu'une fois toutes les 5 000 générations, pratiquant davantage la division cellulaire (reproduction asexuée).

Les deux chercheurs ont alors montré que dans une population qui ne se reproduit que par reproduction sexuée – comme le champignon *S. commune* –, mais avec une faible fréquence de mutation, une centaine de types sexuels différents émergeront au cours des générations. À l'inverse, de toute évidence, si l'espèce ne se reproduit que par reproduction asexuée, un seul sexe se maintient au cours des générations. Entre les deux, plus le taux de reproduction sexuée est fort, plus le nombre de sexes pouvant apparaître sera élevé.

Ainsi, si la plupart des espèces isogames présentent deux types sexuels, c'est qu'elles sont nombreuses à pratiquer une reproduction sexuée très occasionnelle et une reproduction asexuée courante. Cette pratique s'explique assez bien : la reproduction asexuée a l'avantage d'être rapide et peu coûteuse en énergie, et elle permet de transmettre l'intégralité du patrimoine génétique du parent. Mais lorsque les conditions du milieu changent, la reproduction sexuée devient plus avantageuse, car les nouvelles combinaisons génétiques qu'elle introduit peuvent conduire à des organismes mieux adaptés au nouvel environnement. ■

C. M.

G. W. A. Constable et H. Kokko, *Nature Ecology & Evolution*, vol. 2, pp. 1168-1175, 2018

COSMÉTIQUES ÉGYPTIENS

La phosgénite, un carbonate de plomb, était un ingrédient classique des cosmétiques en Égypte antique. La phosgénite naturelle étant très rare, les historiens soupçonnaient les anciens Égyptiens de maîtriser déjà sa synthèse. Pour le prouver, Lucile Beck, de l'université Paris-Saclay, et ses collègues ont analysé des échantillons retrouvés dans des pots datant de 1500 ans avant notre ère et conservés au musée du Louvre, en adaptant une méthode de datation normalement utilisée sur des échantillons organiques (bois, os, etc.): la datation au carbone 14. Résultat: la phosgénite égyptienne a bien été synthétisée, car le carbone qui la compose provient de sources organiques ou atmosphériques datant de la même époque que les pots. Les chercheurs proposent de dater ainsi les peintures, de toutes époques, contenant des pigments carbonatés. ■

M. T.

L. Beck et al., *Communications Chemistry*, vol. 1, article 34, 2018

MORTELLE MIGRATION

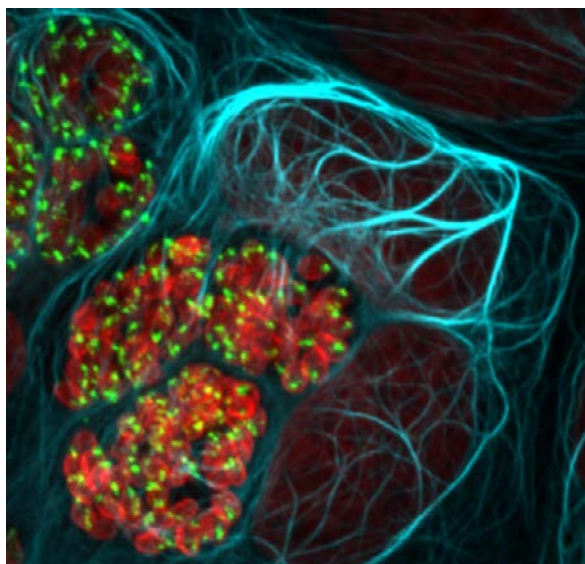
Chaque année, des oies, les bernaches nonnettes, passent l'hiver en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas et en Allemagne puis migrent vers le nord pour se reproduire. Or, avec le réchauffement climatique, les printemps sont de plus en plus précoces en Arctique. Une équipe de l'université d'Amsterdam menée par Bart Nolet a ainsi constaté que ces oies sont capables d'accélérer leur migration en cours de route pour arriver plus tôt en Arctique.

Les oies seraient capables de juger au cours du voyage, grâce à des repères environnementaux, quand aura lieu le printemps en Arctique. Ce comportement semble *a priori* avantageux pour la survie des futurs poussins, mais il n'en est rien! Migrer plus vite demandant plus d'efforts, les oies arrivent épuisées et ne peuvent pas pondre dès leur arrivée. Elles attendent finalement la même époque que d'habitude. Conséquence tragique: les poussins ratent le printemps et, la nourriture n'étant plus assez disponible, ils meurent de faim. ■

CLAIRE HEITZ

T. Lameris et al., *Current Biology*, vol. 28, pp. 1-7, 2018

LE TWIST DU PARASITE DE LA TOXOPLASMOSE



Dans une cellule humaine, dont on distingue les microtubules (en bleu), des vacuoles contiennent la progéniture d'un seul parasite *Toxoplasma*. Les contours des parasites sont marqués en rouge et une protéine produite par ces protozoaires apparaît en vert.

La toxoplasmose est une infection parasitaire provoquée par le protozoaire *Toxoplasma gondii*. Si elle est en général bénigne, elle peut être dangereuse pour les fœtus des femmes enceintes et les personnes immunodéprimées. Chez toutes ses victimes, humains compris, le parasite de la toxoplasmose doit pénétrer dans des cellules hôtes et y créer une niche protectrice, la vacuole parasitophore, pour se multiplier aux dépens de la cellule nourricière. Certains aspects du processus restaient à préciser. Afin de concevoir de nouvelles stratégies de lutte contre ce parasite, une équipe de l'Inserm, à Grenoble, menée par Isabelle Tardieux, a étudié, grâce à des techniques d'imagerie à haute vitesse et haute résolution, comment le protozoaire envahit les cellules de ses hôtes.

Pour pénétrer dans une cellule, le parasite injecte des protéines dans la membrane. Ces molécules forment une «porte» qui sert de point d'appui au parasite pour se propulser à l'intérieur et forcer le «bourgeonnement» de la membrane en formant la vacuole. Jusqu'à présent, on ignorait comment le parasite refermait la porte derrière lui tout en préservant l'intégrité de la membrane cellulaire. L'équipe grenobloise vient d'élucider l'énigme: le parasite effectue un mouvement de rotation sur lui-même. Cela provoque mécaniquement un rapprochement des deux régions de la membrane, ce qui favorise leur fusion et l'isolement de la vacuole. En fixant des billes micrométriques à l'extrémité postérieure du parasite, les chercheurs ont empêché sa rotation et donc la fermeture de la porte. Ce défaut d'étanchéité entraîne un gonflement anormal du bourgeon membranaire, qui comprime le parasite et finit par le tuer.

Les travaux de l'équipe d'Isabelle Tardieux permettront peut-être d'identifier des cibles intéressantes pour contrer la capacité invasive non seulement de *Toxoplasma gondii*, mais aussi de *Plasmodium*, le parasite responsable du paludisme, lequel utilise un complexe similaire comme point d'ancrage et porte d'entrée dans les globules rouges. ■

C. H.

G. Pavlou et al., *Cell Host & Microbe*, vol. 24, pp. 81-96, 2018

MÉDAILLES FIELDS 2018: DES LAURÉATS SANS FRONTIÈRES

La diversité des nationalités des nouveaux lauréats de cette prestigieuse récompense illustre le cosmopolitisme des mathématiques. Petit regret, l'absence de femmes.

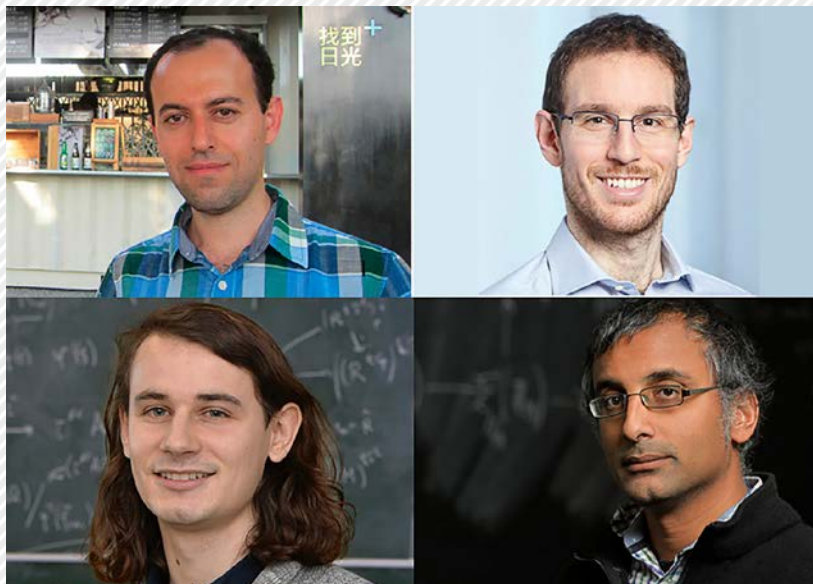
Tous les quatre ans, les mathématiciens se réunissent pour un congrès international où les chercheurs présentent un état de l'art de la discipline. La 28^e édition s'est tenue pour la première fois dans l'hémisphère Sud, à Rio de Janeiro, au Brésil. Lors de la cérémonie d'ouverture, les noms des quatre lauréats de la très convoitée médaille Fields ont été dévoilés: Caucher Birkar, Alessio Figalli, Peter Scholze et Akshay Venkatesh.

La médaille Fields est l'un des prix les plus prestigieux en mathématiques. Elle est attribuée à deux, trois ou quatre chercheurs de moins de 40 ans tous les quatre ans. Pour le mathématicien canadien John Charles Fields, à l'origine du prix, celui-ci est, d'une part, une reconnaissance des résultats obtenus par les lauréats, mais aussi un encouragement pour les chercheurs récompensés à poursuivre leurs travaux et une stimulation pour l'ensemble de la communauté. Qui sont donc les quatre chercheurs récompensés cette année?

Caucher Birkar est un mathématicien britannique d'origine kurde et né en Iran en 1978. Il est professeur à l'université de Cambridge et spécialiste de géométrie algébrique. Il a notamment contribué à un champ particulier, la géométrie dite birationnelle. Il a obtenu des résultats fondamentaux dans la classification de variétés algébriques (des objets géométriques définis par des équations polynomiales, comme $y^2 = x^3 + 3$).

Alessio Figalli est un mathématicien italien de 34 ans, chargé de recherche au CNRS et actuellement détaché à l'École polytechnique fédérale de Zurich. Il a effectué sa thèse sous la direction de Luigi Ambrosio et Cédric Villani, également lauréat (en 2010) de la médaille Fields. Alessio Figalli travaille, entre autres, sur la théorie du transport optimal. Ce domaine d'étude permet de déterminer le moyen le moins coûteux pour transporter un objet d'un endroit à un autre. Les applications sont nombreuses en économie et dans l'industrie.

Peter Scholze faisait figure de grand favori pour la médaille Fields. Ce jeune mathématicien allemand de 30 ans a en effet développé des outils très puissants dans le domaine de la géométrie arithmétique, les perfectoides. Ces



De gauche à droite et de haut en bas: Caucher Birkar, Alessio Figalli, Peter Scholze et Akshay Venkatesh.

1

**SEULE FEMME
A REÇU LA MÉDAILLE
FIELDS DEPUIS SA
CRÉATION EN 1936 :
L'IRANIENNE
MARYAM MIRZAKHANI,
DISTINGUÉE EN 2014
POUR SES TRAVAUX
SUR LA GÉOMÉTRIE
DES SURFACES DE
RIEMANN. ELLE EST
DÉCÉDÉE EN 2017.**

perfectoides sont construits à partir des nombres p -adiques, une extension abstraite des entiers naturels qui s'est révélée très utile en théorie des nombres. Depuis 2012, Peter Scholze est professeur à l'université de Bonn. Deux ans plus tôt, il avait fait sensation en simplifiant une démonstration réalisée par Michael Harris et Richard Taylor dans le cadre du programme de Langlands, la ramenant de 288 pages à seulement 37. Grâce également à ses grandes qualités humaines soulignées par ses pairs, Peter Scholze est devenu l'un des mathématiciens les plus influents du monde.

Akshay Venkatesh est né en 1981, à New Delhi, en Inde, puis a grandi en Australie. Il est professeur à l'université Stanford et, depuis cette année, à l'Institut d'études avancées de Princeton. Il travaille notamment sur la théorie des nombres. On lui doit aussi d'importantes contributions à la théorie ergodique, domaine né à la suite des travaux de Ludwig Boltzmann sur la cinétique moléculaire des gaz, au XIX^e siècle.

À noter, c'est la première fois depuis 1994 qu'aucun mathématicien français n'est récompensé. Avec près d'un quart du total des 60 médailles Fields attribuées à ce jour, la France se place juste derrière les États-Unis. ■

S. B.