

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

Mai 2017 - n° 475

www.pourlascience.fr

TROUS NOIRS INTRIKUÉS

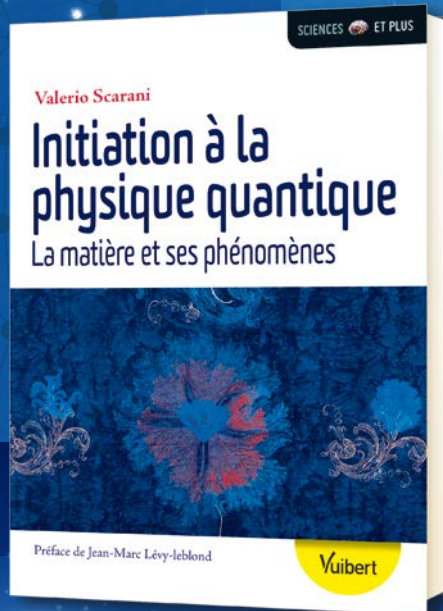
Une porte vers l'espace-temps quantique



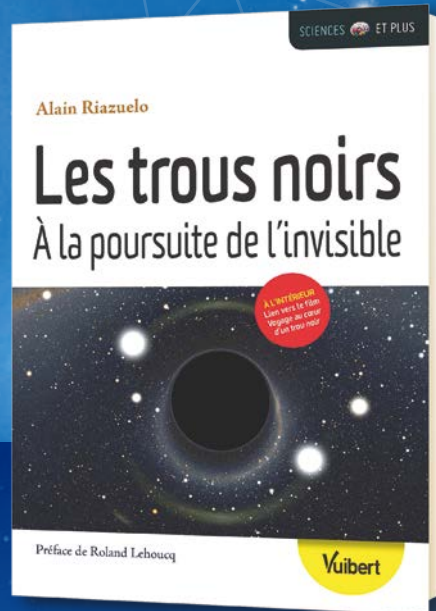
M 02687 - 475 - F: 6,50 € - RD



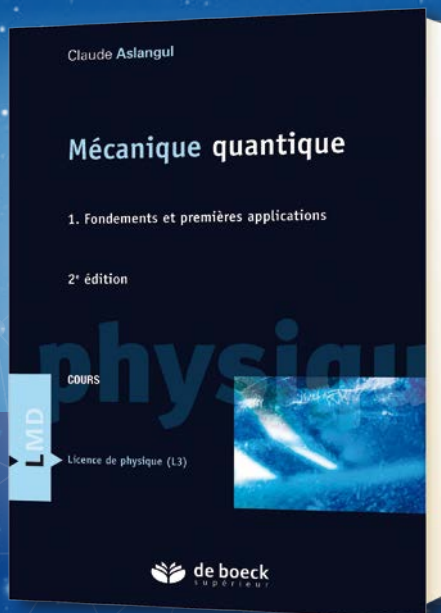
Découvrez la physique quantique



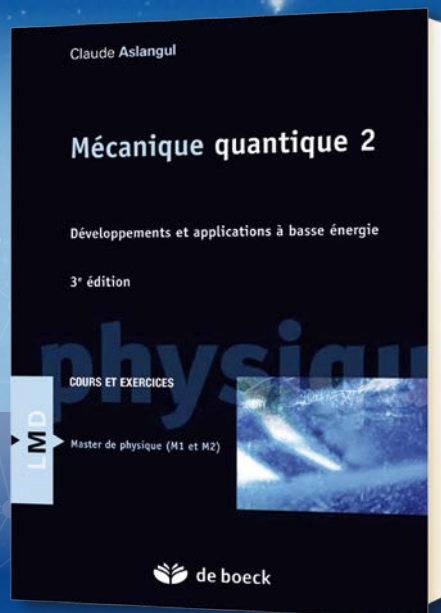
192 p. • 1^{ère} éd. 2016 • **14,90€**
ISBN : 9782311403060



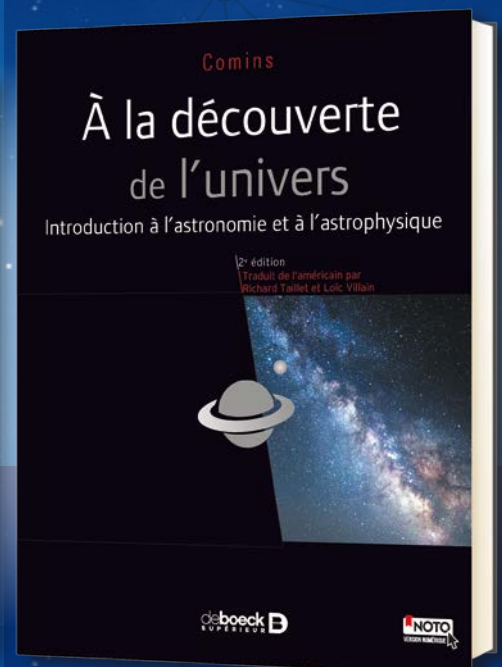
208 p. • 1^{ère} éd. 2016 • **17,90€**
ISBN : 9782311403145



744 p. • 2^e éd. 2016 • **39,00€**
ISBN : 9782807302952



1040 p. • 3^e éd. 2015 • **39,00€**
ISBN : 9782804191153



536 p. • 2^e éd. 2016 • **49,90€**
ISBN : 9782807302945

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

170 bis boulevard du Montparnasse
75014 Paris – Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeiro-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion : Laurence Hay, Arthur Peys

assisté de William Armand

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Didier Aurelle, Maud Bruguère, Eric Buffetaut, Gwendoline Fox,

Aline Gerstner, Évelyne Host-Platret, Laurence Henry, Cédric

Hubas, Capucine Jahan, Stefan Lalonde, Christophe Pichon,

Pierre Sans-Jofre, Daniel Tacquenot, Loïc Villain

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr – Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin

jf.guillotin@pourlascience.fr – Tél. 01 55 42 84 28

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne : <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science,

19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES

<http://boutique.pourlascience.fr/>

DIFFUSION

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak.

President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou

les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans

la revue « Scientific American », dans les livres édités par

« Pour la Science » doivent être adressés par écrit à « Pour la

Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L.

Siège social : 170 bis boulevard du Montparnasse 75014 Paris.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de

représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom

commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific

American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégra-

lement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de copie [20 rue des Grands-

Augustins - 75006 Paris].

Origine du papier : Autriche

Taux de fibres recyclées : 30 %

Certification : PEFC

« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau » :

P_{tot} 0,007 kg/tonne



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Ruée sur l'espace-temps

Qu'est-ce que l'espace ? Qu'est-ce que le temps ? Jusqu'au début du XX^e siècle, les physiciens voyaient l'espace et le temps comme un cadre vide et totalement passif au sein duquel se déroulent les phénomènes : une sorte de réceptacle inerte où le réel se manifeste et qui se décrit à l'aide de quatre dimensions, trois pour l'espace et une pour le temps.

Même la relativité restreinte d'Einstein, théorie publiée en 1905, n'a pas modifié fondamentalement cette conception. Elle a certes montré que les relations entre coordonnées spatiales et temporelles sont plus complexes que celles de la physique galiléenne, au point qu'il était pertinent d'introduire le terme d'espace-temps, mais on restait sur l'idée d'un cadre vide et passif.

Un aperçu sur son intimité quantique ?

La véritable révolution est venue en 1915 avec la théorie de la relativité générale. L'espace-temps y obtenait le statut d'acteur physique à part entière : la déformation de la géométrie de l'espace-temps traduit ce que nous appelons la gravitation, déformation qui dépend elle-même de la matière et de l'énergie présentes.

En physique quantique, en revanche, l'espace-temps continue de jouer le rôle d'un réceptacle passif. C'est l'un des symptômes de l'incompatibilité entre la physique quantique et la relativité générale – et de l'inexistence, à ce jour, d'une théorie quantique de la gravitation. Mais les théoriciens ne sont pas à court d'idées. Tout un projet international consiste ainsi à explorer l'hypothèse que l'espace-temps émerge de l'intrication quantique de minuscules entités fondamentales (voir pages 20 à 26). Et deux éminents physiciens ont découvert un lien étonnant entre relativité générale et théorie quantique, en étudiant l'intrication quantique de deux trous noirs (voir pages 28 à 35). Un premier aperçu sur l'intimité quantique de l'espace-temps ? Il serait... temps, la science attend cela depuis près d'un siècle. ■

3 Édito

Actualités

- 6 Sida : des réservoirs du virus démasqués
- 7 Changer l'arbre de parenté des dinosaures ?
- 8 Le méthane, facteur clé de la Grande Oxydation
- 9 Dans le dédale de l'embryon humain
- 12 De belles mosaïques à Uzès



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Une stratégie payante : personnifier la nature
Catherine Larrère
- 16 **Homo sapiens informaticus**
L'informatique va rompre le lien entre travail et revenu
Gilles Dowek



- 17 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Le prix de la réciprocité
Gérald Bronner

Ce numéro comporte une offre d'abonnement L'Éléphant sur une sélection d'abonnés France métropolitaine.
En couverture : © Malcolm Godwin, Moonrunner Design

À LA UNE

20 PHYSIQUE THÉORIQUE À la poursuite de l'espace-temps quantique

Clara Moskowitz

L'espace et le temps émergeraient de l'intrication quantique de minuscules bribes d'information : telle est l'audacieuse hypothèse explorée par le projet collaboratif intitulé *It from Qubit*.

28 L'intrication quantique est-elle un trou de ver ?

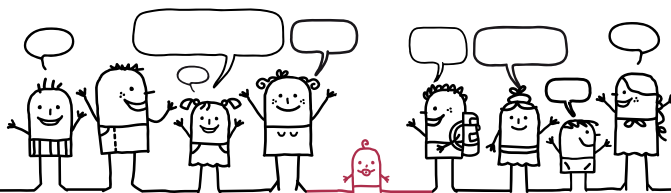
Juan Maldacena

Réconcilier enfin relativité générale et physique quantique ? Un rêve de physiciens qui prendrait corps avec une nouvelle théorie : l'intrication quantique de deux trous noirs correspondrait à la formation d'un trou de ver reliant les deux astres.

36 LINGUISTIQUE Au-delà de la grammaire universelle

Paul Ibbotson et Michael Tomasello

L'enfant est-il muni de règles de grammaire innées qui lui permettent d'apprendre n'importe quelle langue ? Cette théorie de Noam Chomsky, longtemps dominante, a du plomb dans l'aile. L'enfant apprendrait plutôt de ce qu'il entend, en exploitant des facultés cognitives générales.



44 **BIOLOGIE CELLULAIRE** L'indispensable dialogue des cellules

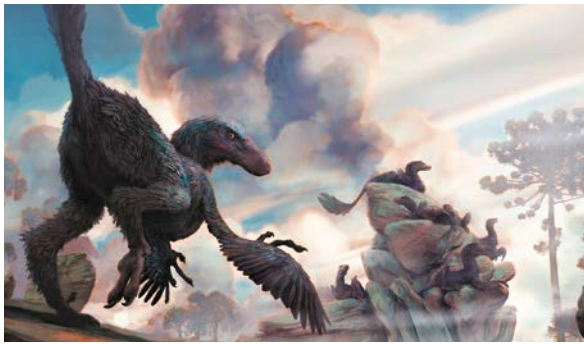
Dale Laird, Paul Lampe et Ross Johnson

La plupart des cellules communiquent avec leurs voisins *via* des myriades de minuscules canaux. Un système de signalisation essentiel tant aux battements cardiaques qu'à la cicatrisation.

54 **PALÉONTOLOGIE** Comment les ailes sont venues aux dinosaures

Stephen Brusatte

Les fossiles de dinosaures à plumes du Liaoning, en Chine, révèlent que la transformation de certains dinosaures en oiseaux a été longue. Et que les premières plumes n'avaient rien à voir avec la capacité de voler.



64 **GÉNÉTIQUE** Le paradoxe de Huntington

Chiara Zuccato et Elena Cattaneo

Le gène à l'origine de la maladie de Huntington, une maladie neurodégénérative dévastatrice, a joué un rôle crucial dans l'évolution de notre système nerveux.

72 **PORTFOLIO** Dans les greniers des lycées

Francis Gires

Fruit d'un périple de longue haleine dans les oubliettes des lycées, une encyclopédie présente près de 1 000 instruments ayant servi à enseigner la physique du XVIII^e siècle au milieu du XX^e... Des trésors à remettre au goût du jour !



Rendez-vous

78 **Logique & calcul**

Quand considère-t-on qu'un théorème est définitivement prouvé ?

Jean-Paul Delahaye

Renforcer la confiance qu'on a dans la preuve d'un théorème difficile est possible. Il faudrait le faire pour le grand théorème de Fermat.

84 **Science & fiction**

L'imaginaire des profondeurs

J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 **Art & science**

Terminator et la petite fleur

Loïc Mangin

89 **Idées de physique**

Les infidèles micros de la guitare électrique

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



92 **Question aux experts**

Avaler un corps étranger est-il dangereux ?

Bernard Schmitt

94 **Science & gastronomie**

Le goût du fumé sans ses inconvénients

Hervé This

96 **À lire**

98 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

Archives numériques

POUR LA
SCIENCE.fr

Tous les numéros
depuis 1996



Suivez-nous sur les réseaux sociaux

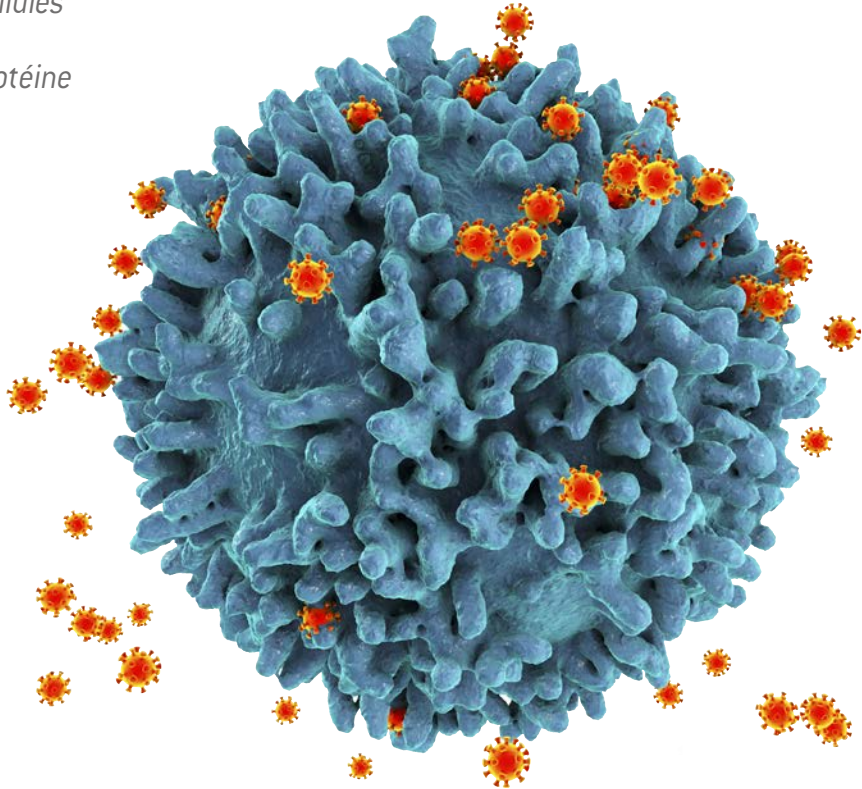


Actualités

Médecine

Sida : des réservoirs du virus démasqués

Jusqu'alors indétectables, des cellules porteuses silencieuses du virus ont été repérées à l'aide d'une protéine présente à leur surface.



Parmi les lymphocytes T (en bleu, l'un d'eux) que le VIH infecte, rien ne permettait de distinguer les réservoirs de virus inactif des cellules non infectées. Il s'avère que les réservoirs portent une protéine que les autres ne produisent pas.

Un patient infecté par le virus du sida doit prendre un traitement à vie. Pour quelle raison ? Les thérapies antirétrovirales empêchent la réplication du virus de l'immunodéficience humaine (VIH) dans ses cibles, les cellules du système immunitaire appelées lymphocytes T CD4. Cependant, les antirétroviraux ne débloquent pas les réservoirs de ce virus—certains lymphocytes T CD4 qui hébergent son génome sans le traduire en molécules virales. Or, en cas d'arrêt du traitement, ces « cellules dormantes » (de l'ordre de une pour un million de lymphocytes T CD4 infectés), qui peuvent rester silencieuses pendant des années, finissent par se réveiller et relâcher de nouveaux virus dans l'organisme.

Jusqu'à ce jour, ces cellules dormantes étaient indétectables

et échappaient à tout traitement. Cependant, avec leurs collègues, Benjamin Descours et Gaël Petitjean, de l'Institut de génétique humaine de l'université de Montpellier (UMR 9002, CNRS), ont découvert un marqueur qui permet de repérer ces réservoirs et qui apporte donc de nouveaux espoirs dans la lutte contre le virus.

Pour détecter ces cellules dormantes, les biologistes ont posé l'hypothèse que leur métabolisme devait présenter des différences. Ils ont donc construit un dérivé génétique du VIH qui produit une protéine fluorescente. Ils ont ensuite infecté avec ce virus fluorescent des lymphocytes T CD4 qui ne répliquaient pas l'ADN viral de façon active, afin de les marquer.

En utilisant une technique de séquençage à haut débit de

l'ARN, les chercheurs ont alors regardé si certains gènes étaient davantage exprimés dans les cellules marquées par la protéine fluorescente que dans les autres. Ils ont trouvé que 103 gènes étaient plus exprimés, dont 16 codant des protéines transmembranaires, de bonnes candidates pour identifier et trier les cellules. Parmi ces 16 gènes, le plus exprimé codait une protéine nommée CD32a.

En temps normal, cette protéine est détectée à la surface de diverses cellules du système immunitaire, où elle active plusieurs mécanismes de défense contre des agents pathogènes. Néanmoins, elle n'est jamais produite par les lymphocytes T. Or Benjamin Descours et ses collègues ont découvert que CD32a est présente sur la membrane externe d'environ

50 % des lymphocytes T CD4 dormants infectés, mais pas sur les cellules T non infectées, ni sur celles où le VIH se réplique. À l'aide d'un anticorps commercialisé qui reconnaît la protéine CD32a, les auteurs de l'étude ont même pu isoler les cellules T CD4 qui la produisent des autres.

Des expériences effectuées sur des échantillons sanguins de patients vivant avec le VIH et sous traitement l'ont confirmé : les cellules porteuses du marqueur CD32a contenaient presque toutes le VIH. Et *in vitro*, l'activation de ces cellules a induit une production de virus capables d'infecter des cellules saines. À l'inverse, leur élimination a provoqué un retard de la production virale.

Ce marqueur spécifique pourrait aider les chercheurs à

Paléontologie

Changer l'arbre de parenté des dinosaures ?

Avec des collègues, Matthew Baron, du Muséum de Londres, vient de réétudier l'arbre de parenté des dinosaures. Surprise : les dinosaures qui ont donné les oiseaux, que l'on regroupait depuis un siècle avec les grands dinosaures herbivores, sont désormais rapprochés d'une tout autre famille : celle du tricératops. Le paléontologue Eric Buffetaut commente.

étudier les lymphocytes T CD4 dormants infectés : il offre un moyen de les purifier et, ainsi, d'obtenir des suspensions de ces réservoirs, indispensables à de nombreuses études.

La découverte du marqueur CD32a soulève toutefois de nouvelles questions : CD32a n'est présente que sur environ 50 % des cellules réservoir du virus. Comment détecter les autres ? La centaine d'autres gènes exprimés par les cellules dormantes coderait-elle d'autres protéines susceptibles de constituer des marqueurs encore plus efficaces ?

Par ailleurs, détruire les cellules exprimant CD32a pourrait être dommageable pour celles qui l'expriment en temps normal, sans être infectées. De plus, les auteurs de l'étude se sont intéressés uniquement aux lymphocytes T CD4 du sang, qui ne représentent que 2 % tout au plus des cellules T CD4 infectées dans tout l'organisme. Reste à savoir si ce marqueur est aussi présent sur les lymphocytes infectés latents présents notamment dans les ganglions et le tissu digestif.

Néanmoins, pour Christine Rouzioux, du Laboratoire de virologie de l'hôpital Necker, à Paris, et de l'université Paris-Descartes, « cette étude est très intéressante, c'est un joli modèle. On ne sait pas encore grand-chose sur la protéine CD32a, mais cela devrait être un bon outil pour avancer ». De nombreuses études sont encore nécessaires avant de pouvoir crier victoire face au virus responsable du sida, mais ces travaux ouvrent une nouvelle voie particulièrement encourageante.

Aline Gerstner

B. Descours et al., *Nature*, vol. 543, pp. 564-567, 2017

Quelle classification traditionnelle ce travail remet-il en cause ?

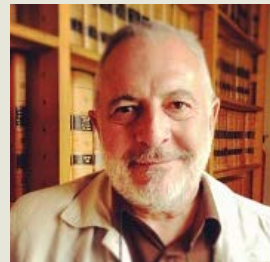
Eric Buffetaut : Celle que proposa le paléontologue britannique Harry Govier Seeley en 1888 : elle suppose une grande dichotomie au sein des dinosaures, fondée sur la structure du bassin. Seeley distinguait les saurischiens, c'est-à-dire les « bassins de lézard », des ornithischiens, ou « bassins d'oiseaux ». Ces étymologies sont avant tout inspirées de l'observation et n'impliquent *a priori* pas de parenté entre saurischiens et lézards, ni entre ornithischiens et oiseaux.

Cette nouvelle classification phylogénétique vous semble-t-elle plus logique ?

E. B. : Dans ce nouveau système, les dinosaures théropodes, qui ont donné les oiseaux et qui faisaient partie des saurischiens pour Seeley, se retrouvent avec les ornithischiens, qui comprennent les cératopsidés – des dinosaures à cornes – et de nombreuses sortes d'autres dinosaures herbivores ou omnivores. Les ornithischiens et les théropodes sont censés former désormais un nouveau groupe, celui des ornithoscelidés, ou « cuisses d'oiseaux ». Cette nouvelle classification traduit une nouvelle logique, mais elle ne me semble pas plus rationnelle que l'ancienne.

À défaut d'être plus logique, ce regroupement des ornithischiens avec les théropodes est-il important ?

E. B. : Pas à cause de leurs bassins en tout cas, car les ornithischiens peuvent avoir eu des « bassins d'oiseaux » pour des raisons sans rapport avec l'origine de celui des oiseaux. Plus significatif serait le fait que l'on sait depuis peu de temps que certains ornithischiens avaient, sinon des plumes, du moins des filaments de kératine sur le corps, ce qui les rapproche



Eric Buffetaut, Laboratoire de géologie de l'ENS, Paris.

notamment des théropodes et des nombreux « dinosaures à plumes » dont sont issus les oiseaux. En fait, la vraie révolution avec cette classification est qu'elle sépare les théropodes des grands sauropodes, tels que les diplodocus, alors que l'on pensait depuis plus d'un siècle leur origine commune.

La question est donc de savoir si l'on accepte la nouvelle classification ?

E. B. : Oui. Pour l'établir, Matthew Baron et ses

collègues ont comparé 74 espèces de dinosaures archaïques en se servant de 457 caractères pour faire apparaître des groupes descendant d'un même ancêtre, ce que l'on nomme des clades.

Il ne faut pas se laisser impressionner par le nombre de caractères : j'ai vu des analyses phylogénétiques fondées sur plus de 1 000 caractères, qui se sont révélées entièrement fausses... Il va donc falloir examiner de très près la pertinence des caractères choisis par l'équipe de Matthew Baron pour établir sa classification. Je serai très étonné si elle n'est pas contestée. Nous verrons.

Si l'on suppose cette classification pertinente, nous dit-elle quelque chose sur l'origine géographique des dinosaures ?

E. B. : Non, car lorsque les premiers dinosaures sont apparus il y a quelque 230 millions d'années, au Trias moyen, toutes les terres issues du supercontinent de la Pangée étaient encore connectées. Il n'y a donc pas eu de grande différenciation des faunes en fonction de la géographie, comme ce sera le cas plus tard, tout particulièrement au Crétacé, une fois les grands continents bien séparés.

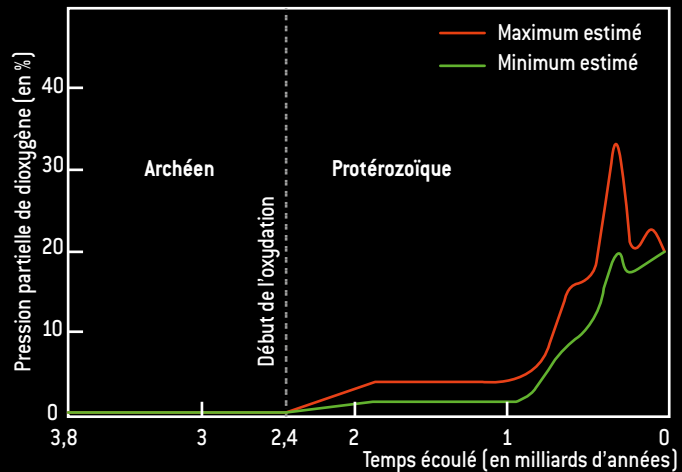
François Savatier

Nature, vol. 543, pp. 501-506, 2017

Géochimie

Le méthane, facteur clé de la Grande Oxydation

Il y a 2,4 milliards d'années, l'oxygénation de l'atmosphère terrestre par les bactéries photosynthétiques aurait été facilitée, voire rendue possible, par l'activité préalable des bactéries productrices de méthane.



Titan, lune de Saturne (*ci-dessus*), est entouré d'un halo de méthane probablement similaire à celui de la Terre juste avant la Grande Oxydation, événement capital dans l'histoire de la vie (*ci-dessus à droite*).

La teneur
atmosphérique
en dioxygène a été

**multipliée par
100 000**

depuis la Grande Oxydation,
il y a 2,4 milliards
d'années.

Il y a 2,4 milliards d'années, au Protérozoïque, ère qui suit l'Archéen, l'atmosphère terrestre s'est fortement enrichie en dioxygène (voir la courbe *ci-dessus*). Deux principaux mécanismes sont supposés expliquer cet événement nommé Grande Oxydation : la photosynthèse d'une part, accompagnée par un enfouissement de matière organique dans les sédiments ; l'échappement d'hydrogène vers l'espace d'autre part, qui réduit le piégeage de l'oxygène sous la forme d'eau (H_2O). Or avec des collègues, Gareth Izon, de l'université de Saint Andrew, en Écosse, vient de présenter un scénario accréditant l'idée qu'une production biologique massive de méthane (CH_4) aurait déclenché une évacuation massive de l'hydrogène planétaire.

Dans l'ouest du bassin sédimentaire du Griqualand, en Afrique du Sud, les chercheurs ont mis en évidence, à 840 mètres de profondeur, dans une strate d'époque juste antérieure à la Grande Oxydation, de brutales

variations des rapports isotopiques $^{36}S/^{32}S$ et $^{33}S/^{32}S$, relatifs au soufre, et une baisse du rapport $^{13}C/^{12}C$, pour le carbone.

Ces changements signalent l'arrivée massive de méthane dans l'atmosphère. Pourquoi ? En conditions anaérobies, le métabolisme des bactéries sulfato-réductrices, qui « respirent » des sulfates et produisent des sulfures, conduit à de légères différences entre les abondances des isotopes de soufre. Toute variation dans leurs proportions signale une évolution de l'atmosphère.

De quels changements s'agissait-il ? L'enrichissement concomitant des sédiments marins en carbone 12 indique une production massive de méthane. En effet, les bactéries méthanogènes synthétisent plus de méthane à partir de carbone 12 qu'à partir de carbone 13. Lorsque ces bactéries abondent, elles accumulent le méthane à carbone 12, lequel finit donc par s'amasser dans les sédiments marins.

La modélisation de l'atmosphère archéenne réalisée par les

chercheurs suggère que les variations mesurées s'expliquent au mieux si l'on admet que juste avant la Grande Oxydation, les bactéries méthanogènes ont, pendant un million d'années, créé dans l'atmosphère une brume de méthane comparable à celle présente sur Titan, la lune de Saturne. Parvenues dans la haute atmosphère, les molécules CH_4 auraient été dissociées par le rayonnement solaire, et des masses énormes d'hydrogène se seraient ainsi échappées dans l'espace.

À la fin de l'Archéen, la multiplication de tels épisodes aurait considérablement diminué le caractère réducteur de l'atmosphère. Ensuite, l'activité des bactéries photosynthétiques ainsi qu'un autre processus, la dissociation de molécules d'eau par le rayonnement solaire dans la haute atmosphère, ont peu à peu augmenté la teneur atmosphérique en dioxygène – qui est aujourd'hui environ 100 000 fois celle atteinte par la Grande Oxydation.

F. S.

PNAS, vol. 114, pp. E2571-E2579, 2017