



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

Conférence-débat



© V. Couffillot

## Le temps des sciences de l'Univers

Mardi 21 mai 2019 de 14h30 à 17h00

Grande salle des séances  
de l'Institut de France

23, quai de Conti, 75006 Paris

Le temps est fondamental en astronomie comme en géologie. L'observation de l'Univers primordial repose sur le temps de la physique des particules et de la théorie des champs.

L'astronomie utilise le temps atomique pour ses mesures ultra-précises et ses échelles de temps, menant à une connaissance de plus en plus fine des irrégularités de la rotation de la Terre. La paléontologie a permis au 19<sup>e</sup> siècle une datation relative des périodes géologiques ; dans la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle, la géochimie a donné accès à la datation absolue par des mesures isotopiques. Dans la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle, on a pu combiner anomalies magnétiques et datations isotopiques pour construire une échelle des inversions du champ magnétique et déchiffrer la cinématique des plaques. Le calcul des cycles de Milankovitch permet désormais une calibration astronomique de l'échelle des temps géologique. Du Big Bang à la formation du système solaire, de la naissance de la Terre à l'évolution des espèces, on date les grandes étapes et les accidents de cette histoire du monde, et on tente d'en prédire les évolutions futures.

Cette conférence présentera les avancées scientifiques récentes qui en résultent dans tous les domaines des sciences de la Terre et de l'Univers.



# Les organisateurs de la conférence-débat



## Nicole CAPITAINE

Astronome, Observatoire de Paris et Académie des sciences

Astronome émérite de l'Observatoire de Paris, Nicole Capitaine est spécialiste d'astronomie fondamentale. Elle a notamment dirigé le Département d'astronomie fondamentale (DANOF, maintenant SYRTE), de cet établissement et présidé le Bureau des longitudes. Son activité scientifique porte sur la théorie des systèmes de référence, l'astrométrie de haute précision, la rotation de la Terre et la géodésie spatiale. Ses travaux ont conduit à une meilleure connaissance du mouvement de rotation de la Terre, ainsi qu'à l'adoption au niveau international de nouveaux paramètres et de nouveaux modèles pour l'astronomie et la dynamique spatiale.



## Vincent COURTILOT

Géophysicien, université de Paris et Académie des sciences

Vincent Courtillot est professeur émérite de géophysique (université de Paris). Il a dirigé l'Institut de Physique du Globe et enseigné à Stanford, Santa Barbara et Caltech. Ses recherches vont du champ magnétique terrestre à la géodynamique. Il a mis en évidence le rôle du volcanisme géant des traps sur les extinctions en masse. Il travaille actuellement sur les relations Soleil-Terre. Il a présidé l'*European Geosciences Union* (dont il a reçu la médaille Holmes) et la section géomagnétisme et paléomagnétisme de l'*American Geophysical Union*. Vincent Courtillot est membre de l'Académie des sciences, de l'*Academia Europaea*, de la *Chinese Academy of Sciences*, et *Fellow* de l'AGU et de la *Royal Astronomical Society*.



## Jacques LASKAR

Astronome, Observatoire de Paris et Académie des sciences

Jacques Laskar est astronome à l'Observatoire de Paris, directeur de recherche au CNRS, membre de l'Académie des sciences et du Bureau des Longitudes. Il travaille sur la dynamique des systèmes planétaires. En prolongeant les travaux de Laplace et de Lagrange par des calculs analytiques sur ordinateur, il a mis en évidence le mouvement chaotique des planètes du Système Solaire, ce qui rend impossible la détermination de leurs orbites au-delà de 60 millions d'années. Il a aussi montré que l'axe de rotation de Mars est fortement chaotique et que l'axe de la Terre ne doit sa stabilité qu'à la présence de la Lune.



## Jean-Loup PUGET

Astronome, Institut d'astrophysique spatiale, École normale supérieure et Académie des sciences

Jean-Loup Puget est directeur de recherche émérite au CNRS. Il a travaillé en cosmologie et sur la physique du milieu interstellaire. Il a développé les observations spatiales dans les domaines infra rouge et micro-ondes. Il a dirigé l'instrument hautes fréquences de la mission Planck. Il a été le promoteur de l'Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay. Il a reçu en 2018 les prix Shaw et Gruber.

# Programme

- 14:30 Ouverture de la séance**  
**Pierre CORVOL**, médecin scientifique, président, Académie des sciences  
**Etienne GHYS**, mathématicien, secrétaire perpétuel, Académie des sciences  
**Nicole CAPITAINÉ**, astronome, Observatoire de Paris et Académie des sciences
- 14:40 Le temps cosmologique**  
**Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE**, cosmologiste, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
- 14:55 Discussion**
- 15:05 L'apport du temps atomique à l'astronomie**  
**Noël DIMARCO**, physicien, Laboratoire Astrophysique relativiste théories expériences métrologie instrumentation signaux (Artemis), Observatoire de la Côte d'Azur, université Côte d'Azur
- 15:20 Discussion**
- 15:30 L'évolution du vivant et les repères du temps géologique**  
**Philippe JANVIER**, paléontologue, Muséum national d'histoire naturelle et Académie des sciences
- 15:45 Discussion**
- 15:55 Les âges de la Terre et du système solaire**  
**Maud BOYET**, géocosmochimiste, Laboratoire Magmas et volcans (LMV), université Clermont Auvergne
- 16:10 Discussion**
- 16:20 Astronomie et échelles de temps géologiques**  
**Jacques LASKAR**, astronome, Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE), Observatoire de Paris et Académie des sciences
- 16:35 Discussion**
- 16:45 Discussion générale et conclusion**  
**Vincent COURTILLOT**, géophysicien, université de Paris et Académie des sciences

# Résumés et biographies



## **Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE**

Cosmologiste, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), CEA Saclay

Nathalie Palanque-Delabrouille est directrice de recherche au CEA, spécialiste de cosmologie et porte-parole de l'expérience internationale DESI dédiée à l'étude de la matière et de l'énergie noires de notre univers. Très active dans la diffusion des sciences, elle donne de nombreuses conférences et a présidé en 2018 le grand prix du festival international du film scientifique Parisciences. Son travail de recherche a été récompensé à plusieurs reprises, notamment en 2010 par le prix Thibaud de l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon et en 2017 par le prix Irène Joliot-Curie pour la femme scientifique de l'année.

## **Le temps cosmologique**

La cosmologie donne un âge à l'Univers, mais la notion même de temps a-t-elle un sens ? L'histoire de l'Univers repose non pas sur une datation externe, mais sur un modèle mathématique que les données observationnelles testent, valident ou infirment. Dans cet exposé, nous mentionnerons les hypothèses clés sur lesquelles le modèle est établi. Nous aborderons quelques jalons cosmiques fondamentaux qui fournissent des informations sur les conditions dans le cosmos à différentes époques. Toutefois, seul le modèle cosmologique nous permet d'associer ces événements à un temps donné. Une autre histoire serait-elle possible ? Jusqu'où pouvons-nous remonter la flèche du temps ? Existe-t-il un « temps zéro » ?



## **Noël DIMARCQ**

Physicien, Laboratoire Astrophysique relativiste théories expériences métrologie instrumentation signaux (Artemis), Observatoire de la Côte d'Azur, université Côte d'Azur

Après avoir dirigé le laboratoire Systèmes de référence temps-espace (SYRTE) à Paris et le réseau d'excellence national Formation, innovation, recherche, services et transfert en temps-fréquence (FIRST-TF), Noël Dimarcq, directeur de recherche CNRS au laboratoire Artemis (Nice), est actuellement directeur adjoint de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Son domaine de recherche concerne les mesures de très haute précision par interférométrie atomique et la métrologie du temps et des fréquences. Noël Dimarcq a reçu pour ses travaux plusieurs distinctions dont la médaille d'argent du CNRS. Il est membre du Bureau des Longitudes et du Comité international des poids et mesures.

## **L'apport du temps atomique à l'astronomie**

Pendant des siècles, la mesure précise du temps a été réalisée à partir d'observations astronomiques mais, depuis plusieurs décennies, ce sont les horloges atomiques qui réalisent l'échelle de temps de référence UTC avec une précision exceptionnelle, avec des applications importantes pour la science et la société.

L'exposé présentera quelques illustrations du lien fort entre espace et temps issu du mariage entre les domaines de l'astrogéodésie et de la métrologie du temps et des fréquences. Il décrira les principales méthodes, terrestres et spatiales, permettant de réaliser les systèmes de référence spatio-temporels et de déterminer précisément les paramètres d'orientation de la Terre, ces éléments étant indispensables à la navigation spatiale et à la compréhension de la dynamique globale de la Terre.

## Philippe JANVIER

Paléontologue, Muséum national d'histoire naturelle et Académie des sciences

Philippe Janvier est paléontologue, directeur de recherche émérite au CNRS, membre de l'Académie des sciences et travaille au Muséum national d'Histoire naturelle sur les premiers vertébrés fossiles, datant de 535 à 360 millions d'années, qu'il a découvert et décrit dans les terrains paléozoïques dans diverses régions. Son ouvrage *Early vertebrates* synthétise l'histoire évolutive des vertébrés et les adaptations majeures qui ont marqué les premières étapes de l'histoire de ce groupe zoologique.



## L'évolution du vivant et les repères du temps géologique

La découverte du principe de superposition des couches de sédiments par Nicolas Steensen (Sténon) en 1669 a montré l'irréversibilité du temps. Il fallait trouver des repères chronologiques relatifs dans ce temps « long » et linéaire. Buffon a montré que des fossiles comptaient des « espèces perdues ». Son élève Lamarck, savait distinguer les très petites différences entre les espèces, qu'il voyait comme la preuve d'un continuum dans l'histoire du vivant. Il l'appliqua à la succession des espèces de mollusques trouvées dans les sédiments du Bassin de Paris, chaque couche étant repérée par une espèce particulière. Cette méthode empirique a été étendue à tous les terrains sédimentaires par Smith, Lyell et d'Orbigny qui y ont défini des subdivisions, constituant une « échelle stratigraphique » devenue internationale et désormais bien étalonnée grâce aux datations absolues radiométriques aux limites des étages. Darwin a conçu l'histoire du vivant comme une hiérarchie, un « arbre » qu'il était difficile d'adapter à un temps géologique linéaire. Les données paléontologiques impliquaient l'existence de nombreuses lacunes du registre fossile, que la systématique phylogénétique de Willi Hennig a permis de combler par la datation des derniers ancêtres communs. La « conversion » de l'échelle stratigraphique en une hiérarchie permet une meilleure adéquation entre celle-ci et l'arbre du vivant.

## Maud BOYET

Géocosmochimiste, Laboratoire Magmas et volcans (LMV),  
université Clermont Auvergne

Directrice de recherche au Laboratoire Magmas et Volcans de l'université Clermont Auvergne, Maud Boyet est géocosmochimiste. Elle travaille sur l'évolution de notre planète Terre au tout début de son histoire. L'étude des couples radioactifs et le développement des radioactivités éteintes ont notamment permis d'établir un cadre chronologique relativement précis concernant la condensation du gaz de la nébuleuse solaire, la formation et la structuration chimique des corps planétaires et des planètes.



## Les âges de la Terre et du système solaire

La radioactivité naturelle des roches terrestres et extraterrestres donne accès à la mesure absolue et relative du temps, et par ce biais, à la reconstruction de l'histoire de la formation et de l'évolution précoce du système solaire et de la Terre. L'événement le plus ancien que l'on peut dater est la condensation de minéraux réfractaires à très haute température dans le gaz entourant le Soleil en formation il y a  $4567,3 \pm 0,3$  Ma. Les simulations astrophysiques d'effondrement du nuage protosolaire et de constitution du disque d'accrétion montrent que cet âge « zéro » est à quelques 100 ka près celui du début de la formation du Soleil. Des premières planètes de quelques centaines de km de diamètre se forment dans les 500 ka qui suivent, Mars atteint 50% de sa taille environ 2 Ma plus tard, la Terre se construit par accrétion d'embryons de taille martienne en 50 à 100 Ma avec une dernière collision géante dont la Lune est issue. La Lune et la Terre se différencient très vite et la Terre commence sa longue évolution géologique marquée par le début de la dynamo et d'une tectonique des plaques, l'apparition de la vie, et la mise en place de processus géochimiques qui modulent la composition de l'atmosphère et la température de surface à l'échelle des temps géologiques.



## Jacques LASKAR

Astronome, Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE), Observatoire de Paris et Académie des sciences

Jacques Laskar est astronome à l'Observatoire de Paris, directeur de recherche au CNRS, membre de l'Académie des sciences et du Bureau des Longitudes. Il travaille sur la dynamique des systèmes planétaires. En prolongeant les travaux de Laplace et de Lagrange par des calculs analytiques sur ordinateur, il a mis en évidence le mouvement chaotique des planètes du Système Solaire, ce qui rend impossible la détermination de leurs orbites au-delà de 60 millions d'années. Il a aussi montré que l'axe de rotation de Mars est fortement chaotique et que l'axe de la Terre ne doit sa stabilité qu'à la présence de la Lune.

## Astronomie et échelles de temps géologiques

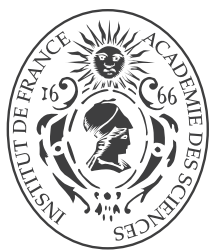
Selon la théorie de Milankovitch (1941), les grands changements climatiques du passé ont pour origine les variations de l'orbite terrestre et de son axe de rotation résultant de l'attraction gravitationnelle des autres planètes. On peut suivre ces variations sur plusieurs millions d'années (Ma) dans les enregistrements sédimentaires géologiques, bien que les mécanismes qui transfèrent l'insolation forcée à la réponse climatique et aux variations des sédiments ne sont pas connus avec précision.

Cette corrélation entre les enregistrements sédimentaires des variations climatiques et les variations de l'insolation à la surface de la Terre, obtenues par les calculs de mécanique céleste tenant compte du mouvement de l'ensemble des planètes du système solaire permet d'obtenir une échelle de temps astronomique pour les temps géologiques.

Depuis 2004, l'échelle de temps du Néogène (0-23Ma) est calibrée astronomiquement, et ce travail se prolonge actuellement vers l'ensemble du Cénozoïque (0-66Ma). Une difficulté importante existe cependant en raison de la limite de prédictibilité de la mécanique céleste due au comportement chaotique du mouvement des planètes du système solaire.







INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

Inscriptions ouvertes au public dans la limite des places disponibles.

[www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)  
(rubrique «prochains évènements»)