

Publication de l'Académie
des sciences

23, quai de Conti 75 006 PARIS
Tél. : 01 44 41 43 68
Fax : 01 44 41 43 84
http : www.academie-sciences.fr

Directeur de publication
Jean-François Bach

Directoire
Jean-François Bach
Jean Dercourt

Rédacteur en chef
Paul Caro

Secrétariat général
de la rédaction
Marie-Christine Brissot

Conception & réalisation
graphique
Nicolas Guilbert

Photographies & illustrations
C. Pichon couv.,
DR p. 16, 33, 36, 40
Nicolas Guilbert p. 3, 7, 16, 22, 44-45

Comité de rédaction
Jean-François Bach, Édouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro, Alain Carpentier,
Pascale Cossart, Anne Fagot-Largeault,
Jean-Pierre Kahane, Nicole Le Douarin,
Jacques Livage, Dominique Meyer,
Jean Salençon, Philippe Taquet

Photogravure & impression
edipro
01 41 40 49 00
n° de C.P. : 0108 B 06337
ISSN 2102-5398



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Simulations numériques
de la formation des galaxies,
Projet Horizon, C. Pichon



Dossier
2009 & 2010 :
poursuite de l'âge d'or
de l'astronomie

ÉDITORIAL

De l'innovation
Alain Carpentier
page 1

DOSSIER

Astronomie

2009 et 2010 : poursuite de l'âge d'or de l'astronomie
Nicole Capitaine
page 2

Le nouveau cycle d'activité solaire (2009-2020)
Jean-Marie Malherbe
page 7

Les satellites des planètes géantes
Christophe Sotin
page 11

Les succès de la mission spatiale CoRoT
Claire Moutou et Annie Baglin
page 16

Plus de lumière sur la matière noire et la formation des galaxies
Françoise Combes
page 22

La mission spatiale Herschel : 1^{er} anniversaire
Jean-Paul Baluteau et Annie Zavagno
page 26

L'année de l'astronomie 2009
Entretien de Catherine Cezarsky par Paul Caro
page 32

QUESTION D'ACTUALITÉ

Éviter, à l'occasion de la crise financière, de nouvelles méprises concernant les probabilités
Marc Yor
page 36

LA VIE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

L'Académie des sciences s'est associée à l'éditeur De Vive Voix pour une collection de livres audio « L'Académie raconte la science »
page 40

Présentation des « France-Hong Kong Distinguished Lectures »
Philippe G. Ciarlet
page 41

Rapport RST n°29
Événements climatiques extrêmes
Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux
page 42

LA VIE DES SÉANCES

Cultiver la science, la formation continue des professeurs enseignant les sciences
page 43

Une image
page 44-45

De l'innovation

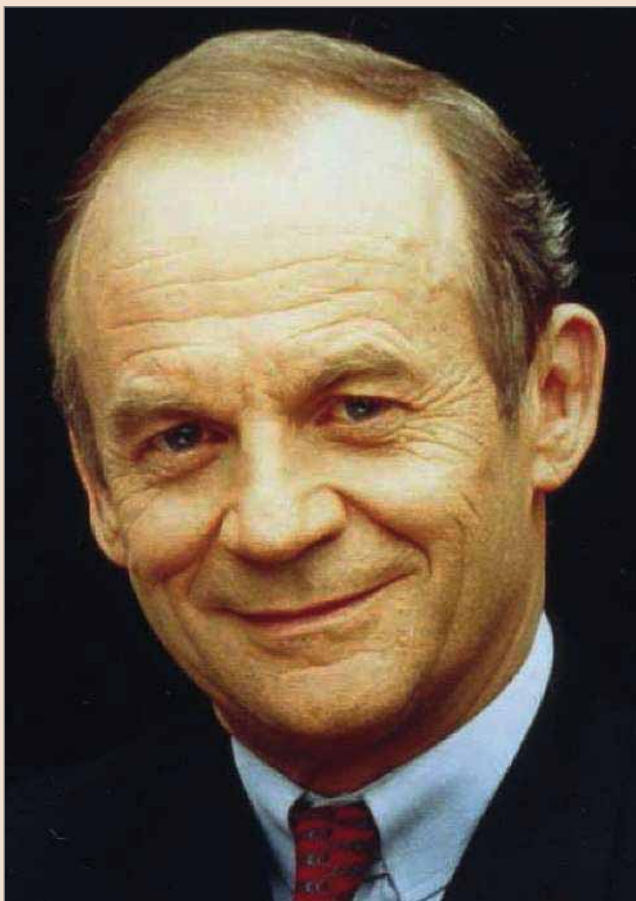
Par **Alain Carpentier**
Vice-Président de l'Académie des sciences,
professeur émérite à l'université Pierre et Marie Curie.

L'innovation est à l'ordre du jour. Dans tous les pays où sévit la crise, innover est l'injonction magique avancée pour résoudre les difficultés socio-économiques actuelles. Mais l'innovation ne se décrète pas, elle se conquiert. Il faut pour cela lui donner les moyens nécessaires. C'est dans ce but que fut élaborée la loi de juillet 1999, dite loi Allègre, et dans cet esprit que l'an dernier, la Ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche demandait à l'Académie des sciences de faire le bilan de cette loi à l'occasion de son dixième anniversaire. « Il s'agit de savoir si les résultats de notre dispositif de recherche ont pu être valorisés de manière optimale sur le plan socio-économique... notamment en termes de partenariats avec les entreprises et de créations d'entreprises par les personnels académiques ». Un groupe de travail fut constitué qui réunissait trente membres de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies, tous directement impliqués dans l'effort de transfert de l'innovation scientifique des établissements publics à l'industrie. Le groupe remettait son rapport à la Ministre le 3 février 2010, laquelle organisait presque aussitôt des réunions de travail entre des membres de son ministère et une délégation du groupe de travail. Sans revenir sur ce rapport, disponible sur le site de l'Académie², j'en soulignerai ici les traits les plus saillants et en analyserai les premiers résultats.

Chacun s'accorde à reconnaître que cette loi a constitué un progrès important à la fois sur le plan juridique – mise à disposition des personnels publics, détachement, consultance – et de façon plus importante encore sur le plan culturel. La coopération recherche académique – industrie n'a plus la connotation négative qu'on lui prêtait parfois; elle a aujourd'hui l'image d'une contribution positive et responsable. Comment expliquer alors que notre pays reste en retard par rapport à nos voisins européens comme en témoigne la part des contrats de recherche avec une entreprise dans le budget de la recherche publique qui est deux fois plus élevée au Royaume-Uni et trois fois plus élevée en Allemagne qu'en France? Force est de constater qu'un fossé continue de séparer la recherche publique de l'industrie dans notre pays. Pourquoi? En partie parce qu'une certaine opposition persiste entre recherche fondamentale et recherche appliquée. La recherche fondamentale est la richesse intellectuelle d'un pays. Nous y excellons. La recherche appliquée est sa richesse économique. Nous la négligeons. Or, elles se complètent et doivent aller de l'une à l'autre en de mutuels enrichissements. Autre niveau de blocage, la valorisation. L'innovation sans valorisation reste stérile ou est exploitée par d'autres. Disons le crûment, nous sommes en France souvent très bons en innovation et médiocres en valorisation. Il est donc plus que jamais nécessaire que les chercheurs des universités et des EPST aient une meilleure appréhension de leur responsabilité socio-économique et des enjeux industriels qui se posent dans leur domaine de recherche. En réponse à la demande de la Ministre, plusieurs propositions importantes ont été faites par le groupe de travail pour aider à relever ce défi. Les plus marquantes sont:

- Une meilleure information donnée aux chercheurs concernant la loi et les très nombreuses dispositions réglementaires qui favorisent l'innovation et la valorisation.





- La possibilité pour les chercheurs de choisir librement leur instance de valorisation de façon à entretenir une saine émulation entre elles.
- L'extension des règles statutaires de mobilité des chercheurs intégrant la mobilité vers l'industrie avec une incidence positive sur leur profil de carrière.
- L'amélioration des conditions juridiques et fiscales de la consultance.
- L'organisation au sein des universités de formations à la création d'entreprises dispensées par des enseignants et industriels expérimentés.
- L'amélioration de la composition et du fonctionnement des instances de valorisation et des commissions de déontologie.
- Une aide renforcée à la création d'entreprises par des chercheurs avec notamment l'accès au conseil d'administration et au capital de l'entreprise qu'ils ont contribué à créer, sans la limitation actuelle à 15 % qui n'a aucune raison d'être.

Ces propositions furent étudiées en un temps record par le Ministère. Pour améliorer l'information, celui-ci créa un *vade-mecum*³ à l'usage des étudiants et chercheurs. À la fois table d'orientation et feuille de route, il vise à les aider à choisir leur voie et à se diriger dans le dédale des décrets et des réglementations qui se sont multipliés depuis dix ans. Le Ministère s'est également engagé à actualiser les circulaires relatives à la mobilité des chercheurs et

des enseignants chercheurs vers les industries privées et à faire en sorte que celles-ci puissent bénéficier d'une réduction d'impôt si elles embauchent un jeune chercheur. Il faudra veiller à ce que cette dernière disposition se fasse au bénéfice prédominant des petites et moyennes entreprises, spécialement celles engagées dans la production plutôt que dans les services. Les autres propositions du groupe de travail sont à l'étude. Elles forment un tout indissociable si l'on veut relancer l'innovation et la valorisation. Nous n'ignorons pas que certaines rencontreront des oppositions. Elles ne sont pas faites pour plaire mais pour faciliter le transfert de l'innovation des établissements publics vers le secteur industriel. Elles répondent à une urgence et une nécessité. L'avenir de notre pays en dépend. Au moment où la crise économique et financière secoue le monde, et où notre pays perd des pans entiers d'activités industrielles et donc d'emplois malgré les efforts louables de beaucoup d'entreprises, il est nécessaire de donner à la recherche, à l'innovation et à la valorisation les moyens et la liberté nécessaires à l'exercice de leur mission ■

2. http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport_innovation_recherche_03_02_10.htm
 3. <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pid23910/vade-mecum-des-passerelles-public-privé.html>

L'astronomie : nécessité et succès de la coordination internationale

Par **Nicole Capitaine**

Correspondant de l'Académie des sciences,
astronome à l'Observatoire de Paris, SYRTE.

Conjonction d'événements astronomiques divers au cours de la période 2009-2010

La période récente a été particulièrement riche en événements astronomiques, puisque l'année 2009, année mondiale de l'astronomie, a également été celle de la 27^e assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI), qui fut l'occasion d'adopter des résolutions importantes destinées à l'ensemble de la communauté astronomique, certaines relevant de politique scientifique, et d'autres, d'aspects purement scientifiques. De plus, cette période a été particulièrement fructueuse pour l'astronomie spatiale, aussi bien par le lancement de projets d'importance majeure pour l'astronomie, comme Herschel et Planck, que par la moisson de résultats scientifiques spectaculaires obtenue grâce à des missions spatiales récentes, telles CoRoT. Elle a également été très riche par les résultats scientifiques remarquables, comme l'exploration des premières galaxies de l'Univers, obtenus par les instruments d'observations au sol, tels le VLT de l'ESO (Observatoire européen austral) au Chili, ou l'IRAM (Institut de radioastronomie millimétrique) près de Grenoble et Grenade (Espagne). Mentionnons aussi que, grâce aux méthodes de détection diverses au sol et dans l'espace, le nombre de planètes extrasolaires découvertes depuis 1995 atteint maintenant près de 500.

Par ailleurs, notre Soleil a exigé ces trois dernières années une attention toute particulière du fait du minimum exceptionnel d'activité solaire qui a été observé en 2008 et d'une durée particulièrement très longue du cycle solaire, l'activité solaire n'ayant finalement repris qu'en 2010.

Année mondiale de l'astronomie et 27^e assemblée générale de l'UAI

En janvier 2009, l'Union astronomique internationale (UAI) et l'UNESCO lançaient à Paris, l'Année mondiale de l'astronomie (AMA09), marquant ainsi le 400^e anniversaire de l'utilisation de la lunette astronomique par Galilée et le 40^e anniversaire du premier pas sur la Lune. Les objectifs étaient de faire partager la passion de la découverte astronomique, la valeur des méthodes scientifiques et le plaisir qu'il y a à mieux comprendre l'Univers, ainsi que la place que nous y occupons. Dans cet esprit, l'ouverture officielle de l'AMA09 a été accompagnée d'un symposium UAI « Astronomie et Société », consacré au rôle de l'astronomie dans la société et la culture. Cette Année mondiale de l'astronomie, présidée par Catherine Cesarsky, a rencontré un immense succès ; elle été célébrée et développée dans près de 150 pays, constituant ainsi le plus grand réseau scientifique jamais développé dans le monde. Pendant un an, des milliers de bénévoles, astronomes amateurs ou professionnels, se sont mobilisés dans ces différents pays pour faire découvrir le ciel au plus grand nombre. Les actions sur l'astronomie, comportant nuits d'observation, expo-



sitions, rencontres et conférences, créations musicales, picturales ou théâtrales, publication de livres, DVD, ou films, ont touché un public de tous âges et de toutes cultures, que l'on a pu évaluer, rien que pour la France, à près d'un million et demi de personnes. Une telle mobilisation sans précédent des astronomes amateurs et professionnels, a enclenché une grande dynamique qui se prolongera bien au-delà de l'Année mondiale de l'astronomie. Celle-ci s'est achevée, en janvier 2010 par deux cérémonies internationales : la clôture officielle à Padoue (Italie), intitulée « Astronomy Beyond 2009 » et un colloque international organisé à Paris, par le COSPAR et l'UNESCO, sur « La contribution de la recherche spatiale à l'astronomie ».

La 27^e assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) s'est réunie, du 2 au 17 août, à Rio de Janeiro (Brésil), avec la tenue d'un ensemble de symposiums et discussions scientifiques, qui a réuni des milliers de spécialistes sur les sujets astronomiques les plus actuels, suivi de l'adoption de plusieurs résolutions importantes. Les résolutions relatives à la politique scientifique mondiale ont permis de prolonger certains objectifs de l'AMA09 : elles concernent l'adoption d'un plan stratégique visant à encourager le développement de l'astronomie dans les pays en voie de développement, le renforcement du rôle des femmes en astronomie et la protection de la qualité astronomique du ciel nocturne. Deux autres résolutions de nature purement scientifique concernent le domaine des systèmes de référence astronomiques, domaine qui est à la base à l'astronomie dans son ensemble.

Achèvement d'une réforme majeure des références astronomiques internationales

L'Union astronomique internationale a achevé, lors de son assemblée générale de 2009, une réforme majeure concernant les références astronomiques internationales, par l'adoption de deux résolutions ; celles-ci ont recommandé officiellement l'adoption du *Système UAI 2009 de constantes astronomiques* (Résolution B2), ainsi qu'une nouvelle version, appelée *ICRF2*, du repère international de référence céleste (Résolution B3).

La réforme des systèmes de référence astronomiques, engagée depuis près de vingt ans, était rendue nécessaire par l'extrême exigence d'exactitude pour exprimer les positions et les mouvements des objets célestes qui sont observés par des techniques astrométriques toujours plus performantes. Notons que la coordination internationale, exemplaire dans ce domaine, en particulier grâce à l'existence de services scientifiques internationaux, tels que le « Service international de la rotation de la Terre et des systèmes de référence », IERS, ou le « Service international VLBI pour la géodésie et l'astrométrie », IVS, et de groupes de travail internationaux (UAI, IERS et IVS), a joué un rôle décisif, aussi bien pour la modernisation des concepts que pour celui de leur mise en pratique.

Ces dernières améliorations complètent et affinent la série de résolutions successives de l'UAI sur les systèmes de référence, qui ont conduit, de 1991 à 2006, à l'adoption du cadre théorique de la relativité générale pour leur définition, du système international de réf-

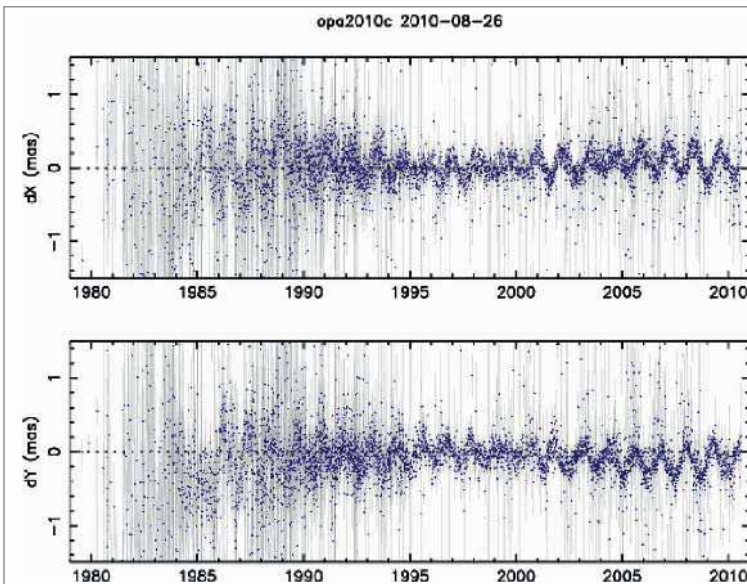


Figure 1 : écarts observés en $0.001''$ (mas) entre la direction du pôle céleste dans le système international de référence céleste, ICRS, déterminée à partir d'observations par interférométrie à très longue base (VLBI) de radio-sources extragalactiques et la direction calculée par le modèle UAI 2006/2000 de précession-nutation, entre 1985 et 2010.

Les écarts sont dus principalement à un mouvement périodique (appelé "nutation libre du noyau"), de période de l'ordre de 430 jours et d'amplitude variant entre 0 et 0.4 mas, qui ne peut pas être modélisé. Une fois ce terme corrigé, l'écart (quadratique moyen pondéré) entre modèle et observations est inférieur à 0.15 mas.

(Crédit : Centre d'analyse IVS de l'Observatoire de Paris/SYRTE)

rence céleste (ICRS) et de sa réalisation (ICRF), ainsi que d'un modèle de précession-nutation de haute précision ; ceci a été accompagné d'une modernisation des concepts et de la nomenclature associée, en particulier pour la définition de l'ICRS, basée sur les directions de quasars, ainsi que pour la représentation de la rotation de la Terre. Notons par exemple que, grâce à ces progrès, les performances du modèle UAI 2006/2000 de précession-nutation sont telles qu'il permet de représenter le déplacement de l'axe de rotation de la Terre dans l'espace avec une précision de l'ordre d'une centaine de microsecondes de degré (voir Fig. 1), donnant ainsi accès à une connaissance très fine des paramètres de la dynamique globale de la Terre et de son noyau fluide.

Le nouveau repère de référence céleste

Rappelons que le système international de référence céleste (ICRS), adopté en 1997 par l'UAI, est un système de référence idéal, défini de sorte que les directions de quasars vues du centre des masses du système solaire soient pratiquement fixes ; ces objets extragalactiques ont la propriété d'être si distants que leurs déplacements apparents restent indétectables, contrairement aux étoiles, utilisées jusque-là comme points de référence, dont les mouvements propres sont difficiles à modéliser finement. Le repère international de référence céleste (ICRF) est la réalisation du système ICRS par un ensemble de coordonnées de radiosources extragalactiques observées par la technique ultra-précise de radio-interférométrie à très longue base (VLBI). Depuis l'adoption de l'ICRF, de nombreux catalogues rattachés à ce repère ont vu le jour de façon à le densifier et le rendre accessible aux observations astronomiques dans différentes longueurs d'onde. La représentation officielle de l'ICRS dans le domaine de l'optique est basée sur le catalogue de plus de 100 000 étoiles, construit à partir du satellite astrométrique Hipparcos.

La nouvelle version, ICRF2, du repère international

de référence céleste est entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2010. Elle représente une amélioration significative par rapport à la précédente version (voir Fig. 2), tout en conservant, par construction, la même direction des axes de référence ; elle contient plus de 3 000 sources au lieu de 600 ; sa précision (de l'ordre de 40

microsecondes de degré) est cinq fois meilleure que celle de l'ICRF qui avait lui-même des incertitudes environ 100 fois plus petites que celles du catalogue d'étoiles FK5, précédente référence officielle de l'UAI. D'importants efforts doivent encore être déployés afin d'améliorer et densifier des repères de référence de grande exactitude à d'autres longueurs d'onde et de les raccorder avec l'ICRF2. Le projet d'astrométrie globale GAIA, mission de l'ESA qui devrait être lancée en 2012 pour localiser plus d'un milliard d'objets astronomiques (étoiles, quasars, galaxies, planètes, astéroïdes) avec une précision inégalée de 7 à 300 microsecondes de degré, devrait mener à une importante avancée dans ce domaine.

Le nouveau système de constantes astronomiques

Un système de « constantes astronomiques » est un ensemble de valeurs numériques conventionnelles adoptées pour certaines constantes intervenant dans la représentation des observations astronomiques (et géodésiques) et dans la théorie des mouvements des objets célestes. Ces valeurs numériques sont à la base de tout calcul astronomique ; elles fixent la représentation dynamique du système solaire et permettent son raccordement aux objets galactiques et extragalactiques. La cohérence et l'exactitude de ce système de constantes sont d'une grande importance pour toute réduction d'observation astronomique ainsi que pour tout calcul théorique de position ou de mouvement d'un corps du système solaire ou d'un astre. Seule l'utilisation de mêmes constantes dans l'ensemble des travaux astronomiques permet de confronter valablement les résultats. La qualité du système de constantes doit évidemment être adaptée régulièrement à la précision des mesures, comme cela a été fait par nos prédécesseurs depuis plus de cent ans.

L'amélioration du système UAI 2009 de constantes astronomiques par rapport au précédent système, UAI

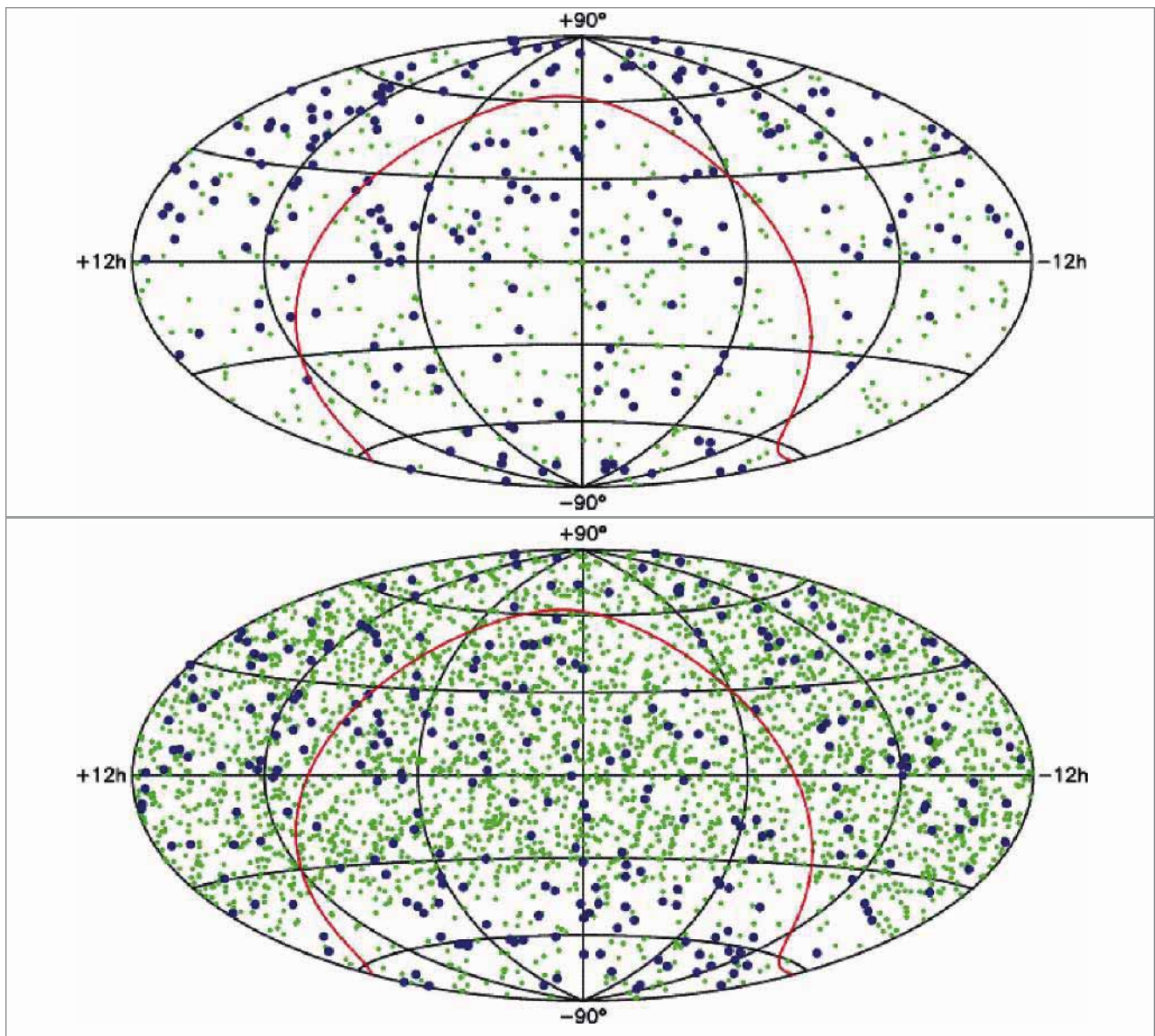


Figure 2 : les deux versions successives ICRF (haut) et ICRF2 (bas) du repère international de référence céleste. Sur ces représentations de la sphère céleste, sont indiquées les positions des radiosources de « définition » (points bleus) et des autres sources (points verts). L'ICRF résultait de 1 600 000 observations par interférométrie à très longue base (VLBI) menées de 1979 à 1995, tandis que l'ICRF2 résulte de 6 000 000 de ce même type d'observations de 1979 à 2009. On note la densification de l'ICRF2 par rapport à l'ICRF et sa meilleure couverture de l'hémisphère austral. (Crédit : International Earth rotation and reference systems Service, IERS).

1976, repose sur une classification plus rigoureuse des constantes suivant leur nature, une amélioration très significative de la précision des valeurs numériques, l'ajout de nouvelles constantes et l'expression des valeurs numériques en accord avec les différentes échelles de temps relativistes utilisées dans le système solaire. À noter que la liste des constantes comprend les valeurs conventionnelles adoptées par l'UAI en 2000 et 2006 pour la définition de l'angle de rotation de la Terre et de certaines échelles de temps. Les valeurs numériques bénéficient de la précision de la détermination des paramètres physiques de la Terre, de la Lune, des planètes et petits corps du système solaire par des mesures radar, Doppler ou de télémétrie laser, ainsi que des récentes déterminations du champ de gravité de la Terre par géodésie spatiale. Notons par exemple que les incertitudes relatives sur les mesures de distances peuvent maintenant être réduites à 10^{-11} .

En parallèle à l'adoption de ce système de constantes UAI, il est prévu qu'un service opérationnel destiné à la communauté scientifique soit mis en place de façon à lui permettre de disposer en permanence des meilleures valeurs disponibles.

Conséquences de l'adoption de ces nouvelles références

L'amélioration des références astronomiques se traduira par une meilleure exactitude des mesures des positions et mouvements des objets célestes, ouvrant ainsi des perspectives nouvelles pour mieux comprendre les processus qui affectent par exemple l'orientation de la Terre dans l'espace, ou encore pour détecter des variations possibles des constantes de la physique, telle que la constante de la gravitation. Notons que le rôle des systèmes de référence astronomiques est tout à fait

essentiel pour de nombreuses applications, telles que le lancement des satellites artificiels, la navigation spatiale, et bien d'autres applications pratiques.

Succès récents des missions astronomiques spatiales

Les années 2009 et 2010 ont vu le lancement de cinq missions spatiales astronomiques très attendues, dont les buts sont particulièrement ambitieux. En mai 2009, deux missions phare de l'ESA ont été lancées : Herschel, portant le plus grand télescope jamais envoyé dans l'espace, vise à percer les secrets de la formation des étoiles et de l'évolution de la vie des galaxies ; Planck, vise à observer le rayonnement fossile pour remonter aux origines de l'Univers. En ce qui concerne les planètes extrasolaires, la mission Kepler de la NASA, lancée en mars 2009 ouvre des perspectives de découverte possible d'exoplanètes rocheuses semblables à la Terre. Deux missions spatiales chargées de surveiller et « mesurer » le Soleil ont vu le jour respectivement en mai et juin 2010 : la mission Solar Dynamics Observatory de la NASA est consacrée à la mesure du champ magnétique du Soleil, tandis que le microsatellite Picard du CNES, instrument de métrologie solaire, est chargé de mesurer la vitesse de rotation du Soleil, sa puissance rayonnée, le nombre de taches à sa surface, sa forme et son diamètre.

Par ailleurs, une moisson de résultats scientifiques spectaculaires couvrant une grande variété de sujets liés à l'astronomie a été faite ces deux dernières années ; elle résulte en particulier d'observations faites depuis l'espace par des missions spatiales en cours. On peut citer, en particulier, les succès obtenus par le satellite CoRoT du CNES, en fonctionnement depuis fin 2006, pour la détection d'oscillations stellaires et la découverte de planètes extrasolaires par la méthode des transits. On peut citer également les découvertes du système de Saturne par la mission (NASA/ESA/ASI) Cassini-Huygens, en orbite autour de cette planète depuis 2004 et récemment prolongée jusqu'en 2017. Citons encore les résultats scientifiques de premier plan sur la formation stellaire, les galaxies, le rayonnement fossile du Big Bang, etc. que les missions Herschel et Planck ont permis d'obtenir dès leur première année de fonctionnement. Les résultats inédits obtenus en planétologie par les missions Mars Express et Venus Express, mises en orbite autour des deux planètes les plus proches de la Terre depuis 2003 et 2006 respectivement, ont amené l'ESA à prolonger ces missions jusqu'en 2012.

Instruments et missions spatiales du futur

De nouveaux projets au sol et dans l'espace encore plus ambitieux sont en cours de conception ou de réalisation pour tenter de répondre aux questions fondamentales : comment se forment les planètes, les étoiles, les

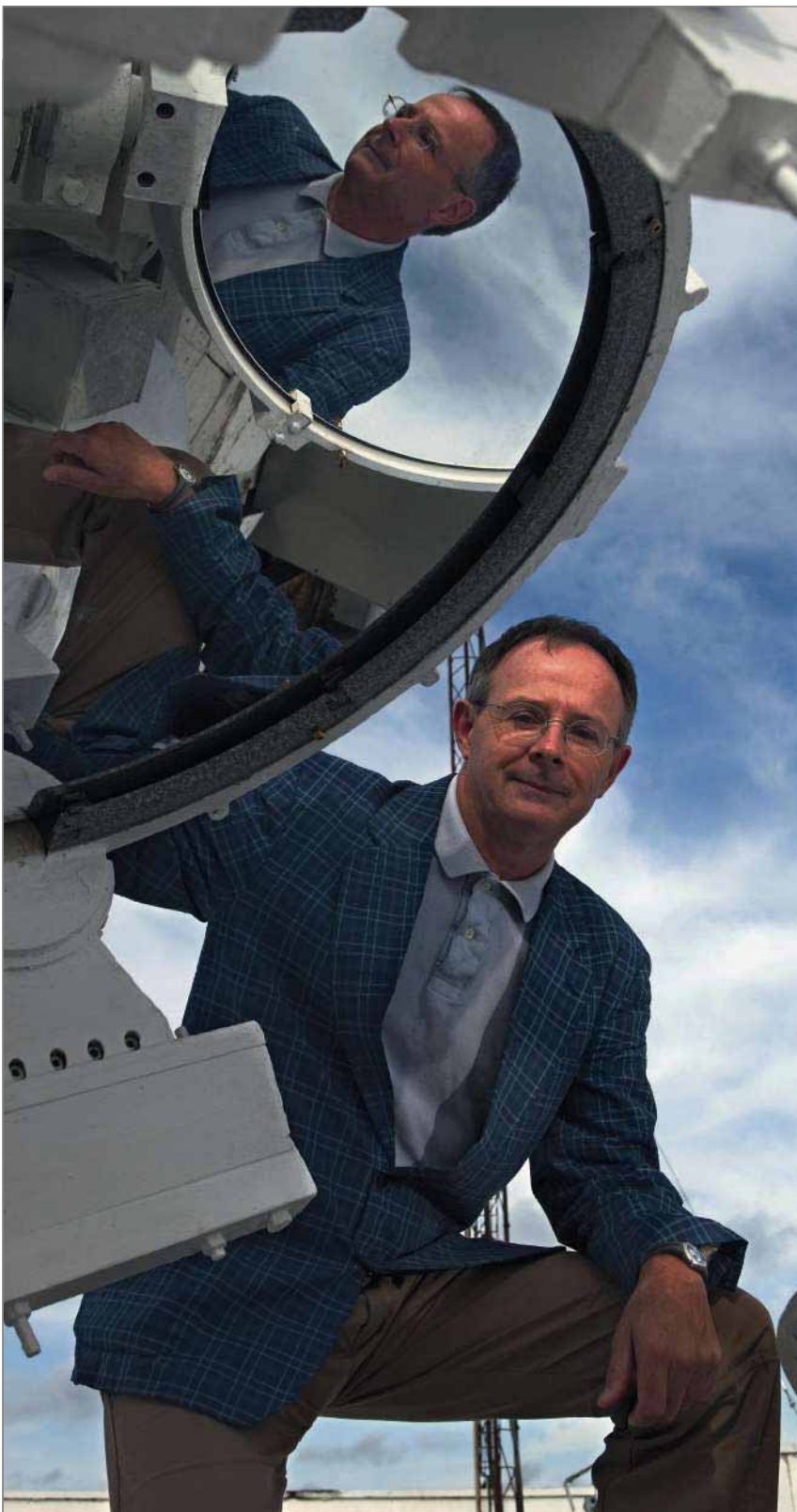
exoplanètes, comment s'est formé le système solaire, les galaxies, etc. Pour atteindre ces objectifs et préparer au mieux les programmes du futur, la communauté astronomique se coordonne et se structure aux niveaux national, européen et international, en grands projets, consortiums, ou services scientifiques internationaux.

Les prochaines années devraient voir se concrétiser de nouveaux instruments au sol. Le projet ALMA, développé en partenariat entre l'Europe, le Japon et l'Amérique du Nord, en collaboration avec la République du Chili, qui est en construction dans les Andes chiliennes, entrera en fonction en 2012, comportant un réseau principal de cinquante antennes de 12 mètres de diamètre, utilisées ensemble comme un télescope unique – un interféromètre, ce qui en fait le plus important projet astronomique existant à ce jour ; il observera dans les longueurs d'ondes millimétrique et submillimétrique. Au niveau spatial, beaucoup d'espérances reposent sur les missions qui doivent être lancées ces prochaines années, telles que GAIA (2012), projet d'astrométrie globale pour le 21^{ème} siècle déjà cité, la mission franco-chinoise SVOM-ECLAIRS pour l'étude multi-longueurs d'onde des sursauts gamma (2012), Mars Science Laboratory pour l'exploration de la planète Mars (2012), Microscope, pour tester le principe d'Equivalence (2013), PHARAO/ACES qui portera les premières horloges atomiques à atomes froids dans l'espace (2013), ou le James Webb Space Telescope qui devrait remplacer le télescope spatial Hubble en 2014.

Une astronomie de nouvelle génération se prépare pour la décennie à venir grâce, par exemple, à des projets de télescopes géants au sol de conception révolutionnaire, tel l'E-ELT (European Extremely Large Telescope) de l'ESO ou le SKA (Square Kilometre Array), radio-télescope international géant, qui deviendra le plus grand télescope au monde, avec une surface collectrice effective de 1 km² ; ces deux instruments devraient être opérationnels vers 2020. En parallèle, des missions de grande envergure sont en phase de sélection ou de définition, dans les différentes agences spatiales. En ce qui concerne l'ESA, on peut se réjouir du fait que la communauté française est particulièrement bien représentée dans la sélection du programme obligatoire appelé "Cosmic Vision", dont la sélection finale devrait intervenir en 2011 pour un lancement vers 2017-2018.

La suite de ce dossier présente des avancées récentes dans quelques uns des domaines évoqués ci-dessus : l'activité solaire, les satellites des planètes géantes, la sismologie stellaire et les exoplanètes observées par le satellite CoRoT, la matière noire et la formation des galaxies, ainsi que les premiers résultats du satellite Herschel. Les articles ont pour auteurs des scientifiques fortement impliqués dans les progrès récents accomplis dans ces domaines ■

Le nouveau cycle d'activité solaire (2009-2020)



Par **Jean-Marie Malherbe**
Chercheur, LESIA, Observatoire de Paris.

Le Soleil est l'une des 200 milliards d'étoiles que compte notre galaxie. Il s'agit d'une étoile banale, de rayon 700 000 km, densité moyenne 1.4 et température effective 5750 degrés. Le Soleil puise son énergie dans les réactions nucléaires de fusion d'hydrogène en hélium dans son cœur porté à 15 millions de degrés. L'atmosphère solaire, seule observable, est constituée de la photosphère (300 km), la chromosphère (2 000 km) et la couronne (millions de km) qui la raccorde au milieu interplanétaire. Il s'en échappe un flux permanent de particules chargées, le vent solaire, qui croise la Terre à 400 km/s. L'atmosphère solaire est dominée par des champs magnétiques dont les taches représentent la signature. La rotation différentielle, plus rapide à l'équateur (26 jours) qu'aux pôles (31 jours), conduit à des instabilités magnétiques violentes (éruptions de plasma, éjections de matière coronale) qui se propagent parfois jusqu'à la Terre.

Les traceurs de l'activité : taches et éruptions

Les taches, constituant le premier traceur de l'activité solaire, ont été repérées à l'œil nu par les chinois il y a plus de mille ans. C'est la lunette de Galilée qui va marquer le début des observations régulières, à partir de 1610. En France, la fondation de l'Observatoire de Paris sous le Roi Soleil va faire du XVII^e siècle celui de

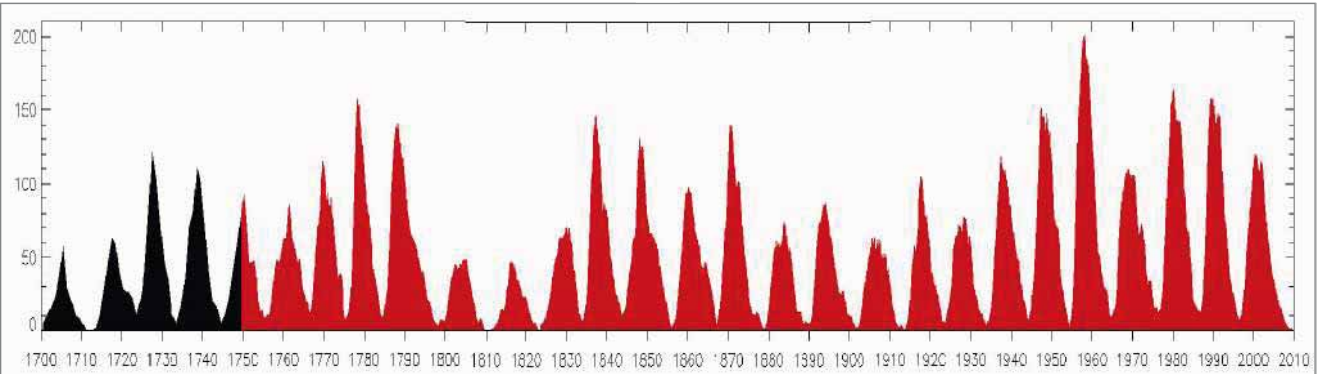


Fig 1 : Nombre de taches (dit de Wolf) en fonction du temps (Observatoire royal de Bruxelles) mettant en évidence le cycle de 11 ans ainsi qu'une modulation plus ou moins séculaire, <http://sidc.oma.be/>

l'astrométrie. Cassini y impulse un programme d'observations des taches avec Picard et La Hire. Auzout invente l'oculaire micrométrique autorisant des mesures de position précises. Huygens introduit les horloges qui permettront de chronométrer les passages. L'observation des éruptions est plus tardive : Carrington, en 1859, mentionne la première éruption en lumière blanche. Les éruptions sont d'une grande importance dans les

montée de 4.24 ans et de descente de 6.79 ans. Gleissberg a découvert une modulation du cycle de 11 ans (c'est à dire une variation d'amplitude des cycles, certains étant très productifs en taches, et d'autres moins) : la période de cette modulation semble centennale, mais reste imprécise. Des cycles faibles ont eu lieu vers 1810, 1910, et on pourrait s'orienter vers une nouvelle série.

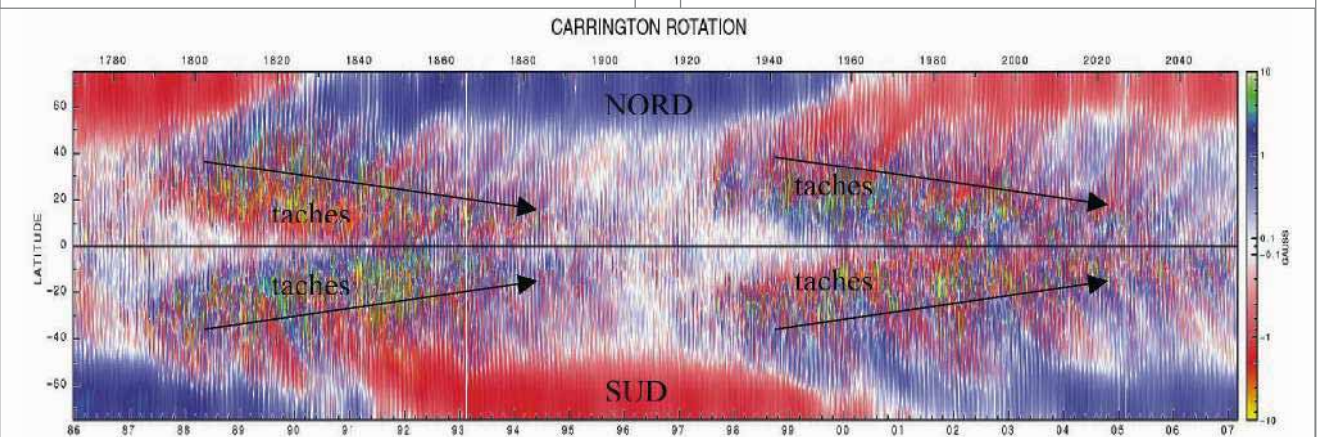


Fig. 2 : cycle magnétique de 22 ans, carte d'évolution temporelle des champs magnétiques (téléscope solaire de 150 pieds du Mont Wilson, UCLA). Cette carte de synthèse montre la distribution des polarités magnétiques (bleu et rouge) en fonction du temps (croissant de gauche à droite entre 1986 et 2007) et de la latitude (de bas en haut). La latitude d'apparition des taches (entre 10° et 40°) décroît au cours du cycle de 11 ans.

relations Soleil Terre; elles peuvent injecter dans le milieu interplanétaire du plasma renforçant le vent solaire, qui, lorsqu'il parvient à la Terre, interagit avec la magnétosphère. Les mécanismes précis qui régissent le déclenchement des éruptions, leur développement et leur propagation, sont complexes et nécessitent le déploiement de simulations numériques. Sur ces sujets de recherche modernes progressent de nombreuses équipes internationales, appuyées par les données des missions spatiales.

Le cycle de 11 ans et sa modulation

Le cycle d'activité de 11 ans, caractérisé par une variation périodique du nombre de taches présentes sur la surface du Soleil, ne fut découvert qu'en 1843, par Schwabe, en compilant les données anciennes (fig. 1). La durée moyenne des cycles est de 11.03 ans, 70 % des cycles durant de 10 à 12 ans, avec un temps de

L'activité solaire ne se quantifie pas qu'au comptage des taches : on utilise d'autres indicateurs bien corrélés comme l'irradiance totale (puissance du rayonnement reçu au niveau de l'orbite terrestre par mètre carré, $1366 \pm 0,05 \text{ W/m}^2$, fig. 4), le nombre d'éruptions (fig. 5) ou encore le flux radio centimétrique à 10,7 cm. Le déficit d'irradiance qu'on penserait imputer aux taches est plus que compensé par l'excédent dû aux facules brillantes, dont la surface est plus grande. L'irradiance solaire n'est donc pas constante et varie environ de 1 pour 1000 avec le cycle. L'identification du cycle magnétique associé de 22 ans est due à Hale. Grâce à l'effet Zeeman, qui interprète le dédoublement des raies atomiques en présence de champ magnétique, Hale a compris la nature magnétique des taches en 1908, puis découvert en 1919 le cycle magnétique de 22 ans lié au renversement tous les 11 ans de la polarité des deux hémisphères du Soleil (Fig. 2).

Des minima remarquables

L'observation des taches solaires a été plus ou moins continue au XVII^e siècle, les astronomes les plus actifs dans ce domaine étant Scheiner, Hevelius, puis Picard et la Hire à l'Observatoire de Paris. Cependant, très peu de taches furent observées entre 1645 et 1705, époque où l'apparition d'une tache était souvent notée comme un événement. Les reconstructions historiques montrent que ce déficit est bien réel. Une baisse du nombre d'aurores boréales corrobore l'idée que le soleil fut très peu actif durant plusieurs décennies. Cette période est connue sous le nom de Minimum de Maunder, son découvreur. On a

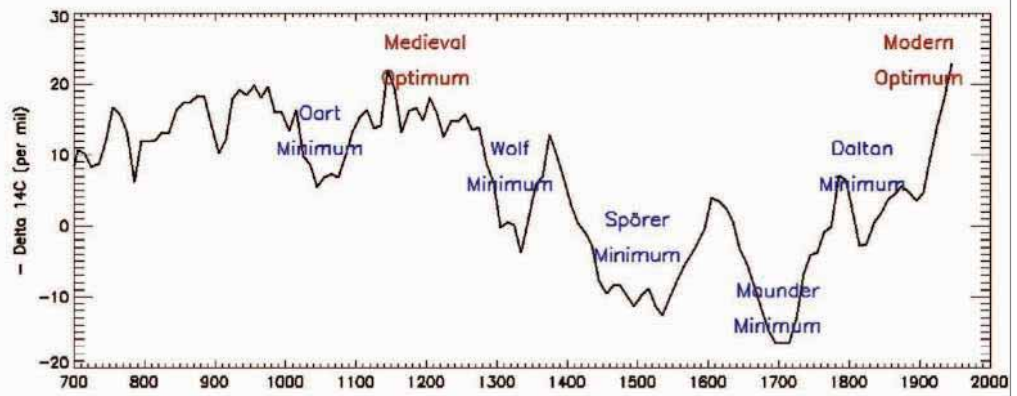


Fig. 3 : la concentration atmosphérique décennale en isotope ¹⁴C mesurée dans les anneaux de croissance des arbres (selon les données Intcal98, Quaternary Isotope Laboratory) donne une indication sur l'activité solaire ancienne.

mois). L'irradiance totale au minimum solaire mesurée en orbite a également décliné (-0.02 %, fig. 4). L'activité solaire est néanmoins repartie à la hausse en 2010, mais les méthodes de prévision des cycles suggèrent que le maximum de 2013 (cycle 24) sera moins fort que le précédent (fig. 5), donnant crédit à la modulation de l'amplitude des cycles sur une période centennale.

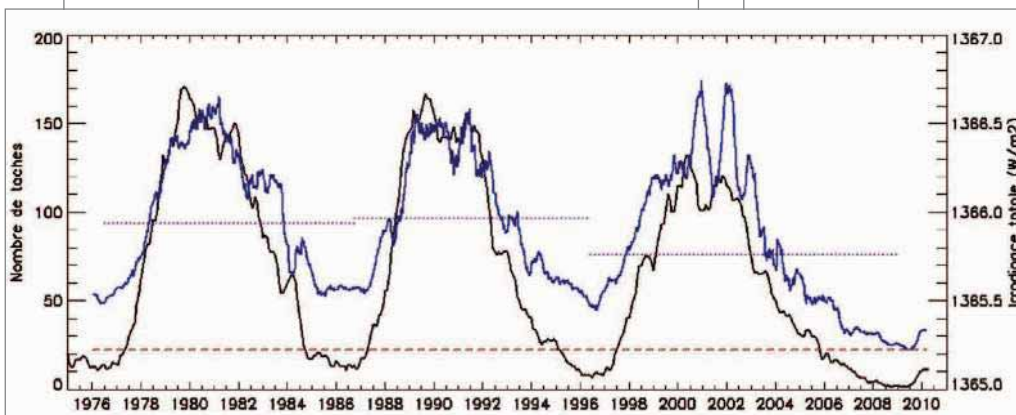


Fig. 4 : nombre de taches (Observatoire Royal de Bruxelles, noir) et irradiance solaire totale 1976-2010 (bleu, d'après les données de C. Fröhlich, version d41_62_1003, PMOD/WRC, Davos, Suisse)

constaté un refroidissement de la température moyenne contemporaine (le « petit âge glaciaire »). On sait, par examen de la concentration en isotopes cosmogéniques ¹⁴C ou ¹⁰Be, formés par l'impact des rayons cosmiques sur l'atmosphère terrestre remonter dans le passé et identifier d'autres minima, comme ceux de Spörer, Wolf ou Oort (fig. 3). La concentration en ¹⁴C est plus faible en période de maximum solaire car les particules cosmiques sont déviées par les champs magnétiques.

L'anomalie de 2008 et le nouveau cycle

Le précédent maximum remonte à l'an 2000. Le récent minimum de 2008 a été plein de surprises : pendant 266 jours, aucune tache n'a été vue sur le Soleil et il faut revenir cent ans en arrière pour retrouver une telle situation. Le flux radio centimétrique et la pression du vent solaire n'y ont jamais été aussi faibles depuis 50 ans et le cycle a été particulièrement long (12 ans 7

Instrument et bases de données solaires internationaux

Au sol, les observatoires de Tenerife et La Palma (Canaries) concentrent la majeure partie des télescopes optiques de pointe, dont THEMIS (INSU/CNRS), complétés par la station de Nançay en ondes radio. Les projets du futur

(2020) comptent deux télescopes de 4 m, l'un européen (« European Solar Telescope ») et l'autre américain (« Advanced Technology Solar Telescope »). Dans l'espace, de nombreux instruments se sont succédés depuis 20 ans. YOHKOH (SolarA-JAXA) a étudié le cycle en rayons X ; SOHO (« Solar and Heliospheric Observatory » ESA/NASA) surveille depuis 1996 la couronne solaire en ultraviolet (UV) ; le « Transition Region And Coronal Explorer » (NASA) a complété SOHO en 1999. Depuis 2006, STEREO (« Solar Terrestrial Relations Observatory », NASA) apporte avec ses deux sondes une vision 3D des phénomènes éruptifs et HINODE (SolarB-JAXA) fournit un pouvoir séparateur sans précédent (0.2'') sur les centres actifs. « Solar Orbiter » (ESA) pourrait s'approcher du Soleil vers 2020. Les observations sont délivrées par des bases de données sol et spatiales (Bass2000, MEDOC) qui intègrent progressivement le concept d'observatoire virtuel.

2010 : lancement de SDO et de PICARD

En 2010, deux nouvelles expériences spatiales sont programmées. « Solar Dynamics Observatory » (SDO, NASA, <http://sdowww.lmsal.com/sun-today#>) surveille depuis mai le Soleil en UV et l'évolution des champs magnétiques vectoriels en mode Soleil entier avec une résolution temporelle inédite d'une minute (fig. 6).

PICARD (CNES, <http://smc.cnes.fr/PICARD/Fr/>), à la mémoire de l'abbé Jean Picard, l'un des premiers académiciens de l'Observatoire de Paris, est un microsatellite de météorologie qui va s'attaquer (lancement mi 2010) à l'étude des variations des paramètres fondamentaux que sont le diamètre et l'irradiance solaire durant la montée du cycle 24 (2010-2013). Tout est à apprendre des fluctuations du diamètre solaire (fig. 7), et PICARD aura une précision de quelques millièmes de seconde de degré !

La prévision de l'activité solaire et la météorologie spatiale

L'étude et la prévision des effets de l'activité solaire sur la Terre et ses impacts sur les activités humaines sont en plein essor. Les agences spatiales ont besoin de prévisions fiables lorsqu'il s'agit de procéder au lancement d'une fusée (« Solar Influences Data analysis Center » de Bruxelles, <http://sidc.oma.be/>, « Space Weather Prediction Center » de la NOAA, <http://swpc.noaa.gov/>). L'Agence Spatiale Européenne (ESA) a lancé le programme « Space Situational Awareness », la NASA « Living With a Star ». Ce sont les particules accélérées par les éruptions qu'il faut prévoir en surveillant le Soleil quotidiennement. Les observations systématiques menées à Meudon ou au Pic du Midi y contribuent (<http://bass2000.obspm.fr>), ainsi que les moniteurs à neutrons de Kerguelen et de Terre Adélie (<http://previ.obspm.fr>). Des bulletins journaliers sont émis. Les effets les plus connus de l'activité solaire sur l'environnement terrestre sont :

- les aurores polaires, observées également sur d'autres

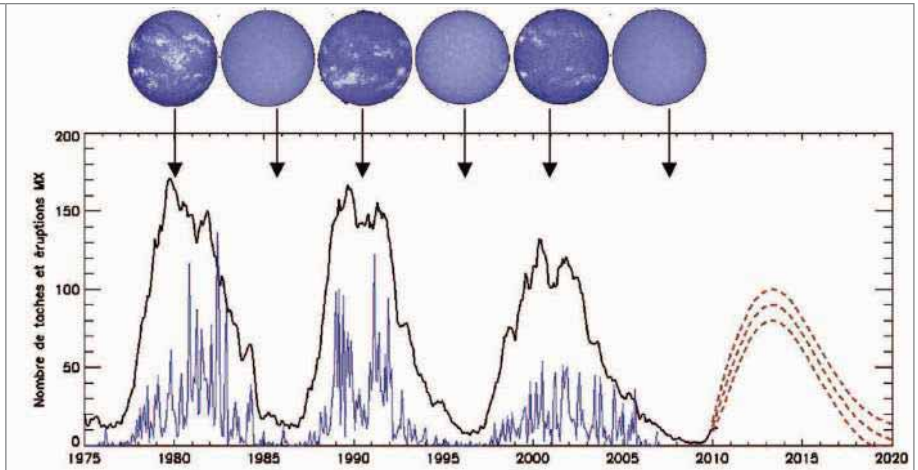


Fig. 5 : cycles 21, 22, 23 (nombre de taches en noir, nombre d'éruptions de classe M et X en bleu) et prévision du cycle 24 (en rouge, source NOAA), avec l'aspect du Soleil dans la raie Call K3 393.4 nm (Observatoire de Meudon).

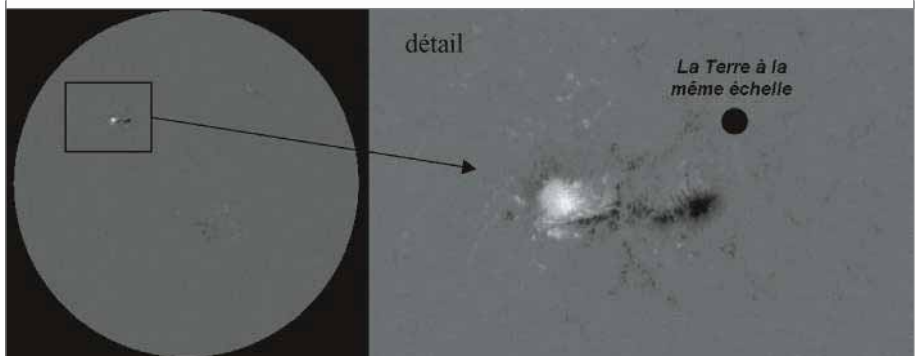


Fig. 6 : premier magnétogramme longitudinal de HMI/SDO (0.5"/pixel), avril 2010, NASA (polarités magnétiques en noir et blanc).

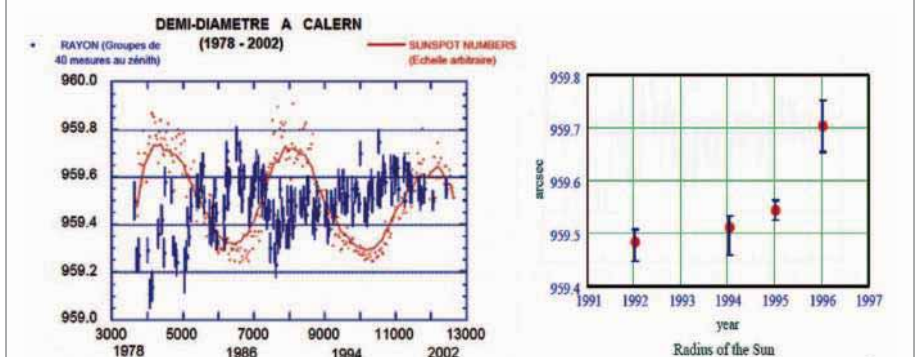


Fig. 7 : certaines mesures du diamètre solaire au sol (astrolabe de Calern, Observatoire de la Côte d'Azur, Ch. Delmas, F. Laclare) et en ballon (« Solar Disk Sextant », Yale University, S. Sofia) suggèrent une anticorrélation avec le cycle : PICARD est conçu pour éclaircir ce mystère (Advances in Space Research, 35, 2005, 329, G. Thuillier, PI de PICARD).

- planètes comme Mars, Jupiter, Saturne et Uranus ;
- la dégradation des satellites artificiels par les bombardements de particules chargées ;
- l'irradiation, pouvant mettre en danger la vie des astronautes et contaminer les personnels navigants des vols aériens circulant dans les zones polaires (système de contrôle SIEVERT) ;
- les phénomènes inductifs dans les lignes à haute tension, risquant d'endommager les transformateurs des usines électriques et provoquer des coupures d'alimentation ;
- la corrosion des pipelines ;
- les perturbations des communications radio utilisant la propriété de réflexion des ondes sur l'ionosphère ■

Les satellites des planètes géantes



Par **Christophe Sotin**
Jet Propulsion Laboratory, Caltech, Pasadena, CA, USA.

Les satellites de glace des planètes géantes ont vu leur intérêt grandir avec la forte présomption de présence d'eau sous leur croûte glacée. Est-il si fou d'imaginer que la vie se soit développée dans ces réservoirs liquides ? Tel n'est pas l'avis des agences spatiales qui viennent de prolonger la mission Cassini pour sept années supplémentaires de découvertes du système de Saturne et de se lancer dans le développement de la mission EJSM (Europa & Jupiter System Mission). Mais au-delà de leur intérêt exobiologique, ces corps glacés surprennent par leurs caractéristiques (voir Table 1) parmi lesquelles on peut citer le champ magnétique propre de Ganymède, le cycle du méthane sur Titan, la géologie d'Europe, les geysers d'Encelade, ou la montagne équatoriale de Japet. Certains de ces satellites, comme Ganymède, Titan ou Callisto, sont plus grands que Mercure, d'autres comme Japet ou Miranda font quelques centaines de kilomètres de rayon, et d'autres comme Encelade ne font que 250 km

de rayon. Les processus géologiques qui contrôlent la dynamique, la composition et la structure de ces satellites sont similaires à ceux qui opèrent sur Terre. L'étude des satellites de glace fournit ainsi de nouvelles contraintes sur les simulations et la compréhension de ces processus. Après avoir donné les raisons pour lesquelles on pense que des océans sont présents dans de nombreux satellites de glace, ce chapitre explique le rôle des effets de marée avant de consacrer un chapitre sur Titan, le seul satellite à posséder une atmosphère dense et le seul corps du système solaire autre que la Terre à avoir des étendues liquides stables à sa surface.

La présence d'un océan dans certains satellites est suggérée par deux arguments : le premier est l'interprétation de la nature d'une couche conductrice en profondeur détectée par des observations électromagnétiques par les sondes spatiales, et le second résulte de simulations numériques des transferts thermiques.

L'une des découvertes majeures de la mission Galileo fut la détection d'un champ magnétique propre de Ganymède et la présence de champs induits dans Europe, Ganymède et Callisto. Le champ intrinsèque de Ganymède suggère la présence d'un noyau de fer liquide au centre du satellite. Ce modèle est en accord avec la très faible valeur du moment d'inertie qui implique un très fort degré de différenciation. Les champs induits seraient liés à la présence d'un océan contenant des électrolytes de la même manière qu'il existe un champ magnétique induit par les circulations océaniques terrestres. La profondeur de cet océan ne peut être bien contrainte par les données magnétiques. Pour Titan, l'observation d'un champ induit est difficile car le champ magnétique de Saturne est plus faible que celui de Jupiter, la présence d'une atmosphère ne permet pas à Cassini de s'approcher à moins de 1 000 km de la surface de Titan et l'amplitude des signaux ionosphériques rend l'identification d'un signal induit très délicate. Mais la sonde Huygens a détecté un champ électrique principalement horizontal et d'amplitude décroissante lors de sa descente dans l'atmosphère de Titan en janvier 2005. Ce signal est interprété comme la seconde harmonique d'une résonance de Schumann atypique qui est excitée et entretenue par d'intenses courants électriques induits dans l'ionosphère par le

	Satellites de Jupiter				Satellites de Saturne			Terre
	Ganymède	Callisto	Europa	Io	Japet	Encelade	Titan	
Masse (10^{24} kg)	0.1485	0.1076	0.0481	0.0894	$1.81 \cdot 10^{-3}$	$1.08 \cdot 10^{-4}$	0.1345	5.98
Rayon (km)	2634	2403	1569	1822	734.5	252.3	2575	6371
densité	1.940	1.851	2.970	3.528	1.088	1.607	1.881	5.52

Table 1: quelques caractéristiques des satellites des planètes géantes comparées à celles de la Terre. Noter que la densité élevée de la Terre est liée à l'effet de la pression. Sans cet effet, la densité serait proche de celle de Io.

flux du plasma magnétosphérique de Saturne. Ces données suggèrent que la couche conductrice se situe à une profondeur de 45 km sous la surface de Titan. Les modèles d'évolution thermique des satellites prédisent des structures plus ou moins différenciées après la période d'accrétion en fonction de leur taille et de leur composition. Comme l'eau est plus dense que la phase de basse pression de la glace, une croûte de glace se forme au-dessus de l'océan qui résulte de la fusion des planétésimaux de glace et de silicates lors de l'accrétion. Tant que l'épaisseur est faible, la chaleur est transférée par convection avec un flux qui diminue avec l'épaississement de la croûte. Quand cette couche de glace devient suffisamment épaisse, les processus de convection se mettent en place et permettent d'éva-

cuer la chaleur d'accrétion ainsi que l'énergie produite par la désintégration des éléments radioactifs contenus dans la fraction silicatée. L'efficacité du transfert thermique par convection dépend principalement de la valeur de la viscosité de la glace et très peu de l'épaisseur de la croûte (Figure 1). Ces modèles de convection prédisent que l'océan cristallise très rapidement. Pour éviter la cristallisation complète de l'océan, soit celui-ci contient de l'ammoniaque qui abaisse sa température de fusion suffisamment pour que la viscosité de la couche de glace devienne très grande, soit une autre source d'énergie est présente comme l'énergie de marée, pour équilibrer le flux de chaleur qui peut être évacué par convection.

L'énergie produite par les effets de marée est le proces-

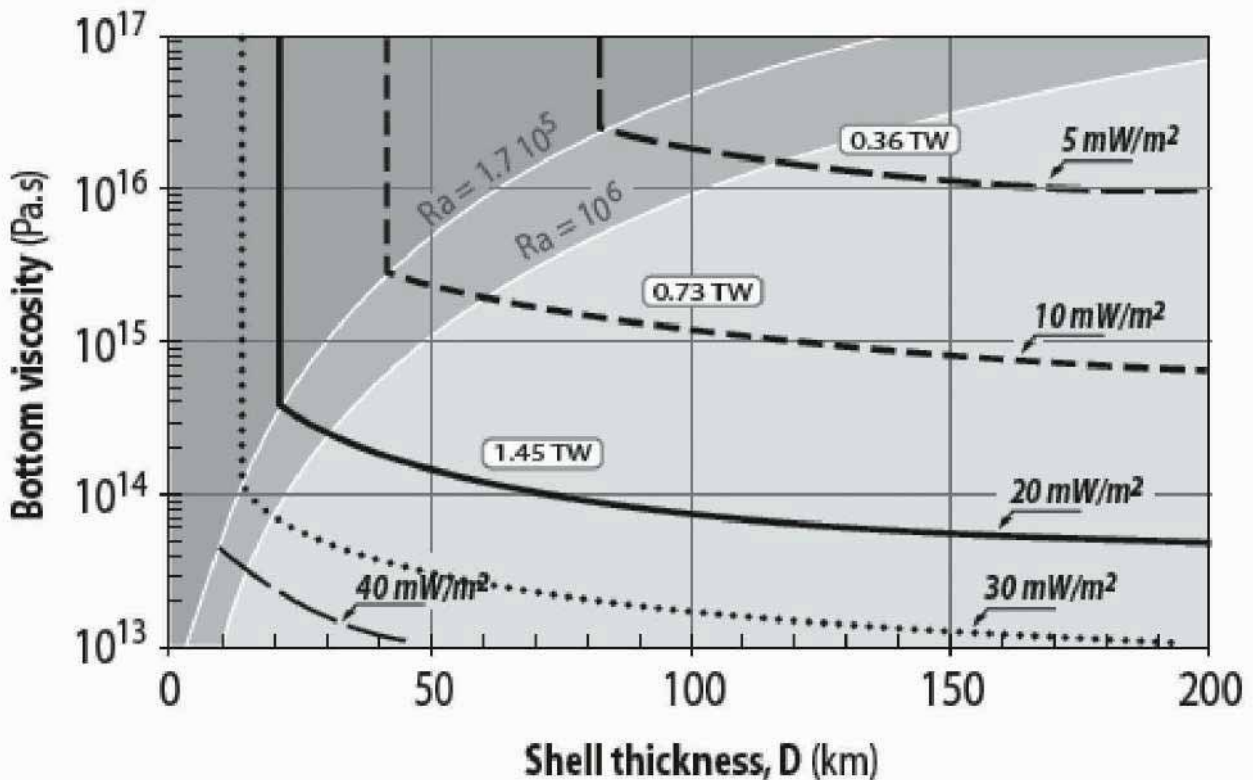


Figure 1: simulation de la quantité de chaleur évacuée (en mW/m^2) en fonction de la viscosité à la base de la croûte de glace et de son épaisseur. Si la glace est au point de fusion à sa base, cette viscosité est de l'ordre de 10^{14} Pa.s. La puissance en TW correspond à la chaleur évacuée pour un satellite de la taille de Titan, Callisto ou Ganymède. Le nombre de Rayleigh traduit le rapport entre les forces d'Archimède et les forces visqueuses. Plus la valeur est élevée plus les processus de convection sont intenses. La valeur de $1.7 \cdot 10^5$ correspond à la valeur critique à partir de laquelle la couche de glace devient instable. À partir d'une valeur de 106, la vigueur de la convection peut se décrire par des lois d'échelles. (Sotin et al.; Chapter 4: Titan's Interior Structure; In: Brown, R.H., Waite, H., Dougherty, M. (Eds.), Titan, Springer-Verlag, 61-73; 2009).

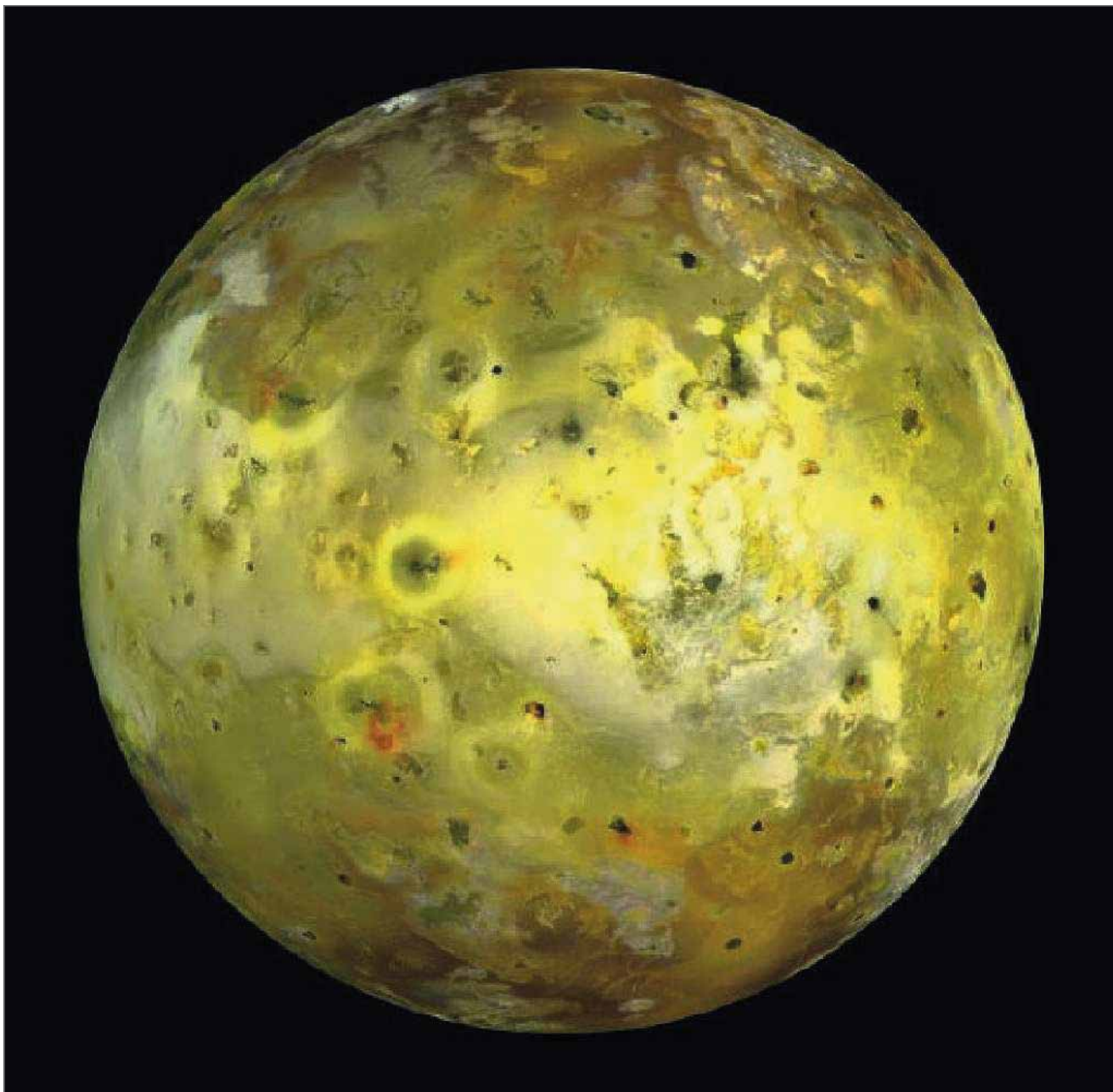


Figure 2: la surface de Io (satellite de Jupiter) est couverte de structures volcaniques, certaines d'entre elles étant actives actuellement. (© NASA)

sus invoqué pour expliquer la très forte valeur du flux géothermique à la surface d'Io ainsi que son intense activité volcanique. Les valeurs de flux de chaleur mesurées par les sondes spatiales montrent l'efficacité de ce processus. Dans le cas de Io, Europe et Ganymède, l'effet de marée est entretenu par la résonance 4:2:1 entre Io, Europe et Ganymède. La quantité d'énergie libérée par cycle dépend de la viscosité des matériaux à la période d'excitation. Il se trouve que pour Europe, la viscosité de la glace, aux températures proches du point de fusion, sont proches de la valeur optimale, celle qui maximise l'énergie de marée laquelle pourrait être d'un ordre de grandeur supérieur à celle de l'énergie radioactive. Une telle valeur est suffisante pour maintenir un océan liquide à l'intérieur d'Europe. La présence d'un océan sous la couche de glace d'Europe est intéressante pour les questions exobiologiques. En

effet, la quantité relativement faible d'H₂O sur Europe (sa densité est proche de celle des silicates) fait que cet océan serait en contact direct avec le noyau rocheux. Les conditions de pression et de température à l'interface eau/roche sont proches de celles qui existent au fond des océans terrestres là où une vie sans lumière s'est développée.

Encelade est un autre satellite où les effets de marée jouent sans doute un rôle important. La sonde Cassini a découvert des geysers (Fig. 3) qui sont émis le long de failles dans la région du pôle Sud. Des modèles géophysiques suggèrent deux origines possibles pour ces geysers : soit ils sont produits par le frottement le long de ces failles connues sous le nom de "Tiger stripes", soit ces geysers proviennent de processus de fusion et dégazage en profondeur. L'énergie mise en œuvre nécessite que la croûte de glace soit au moins partiel-

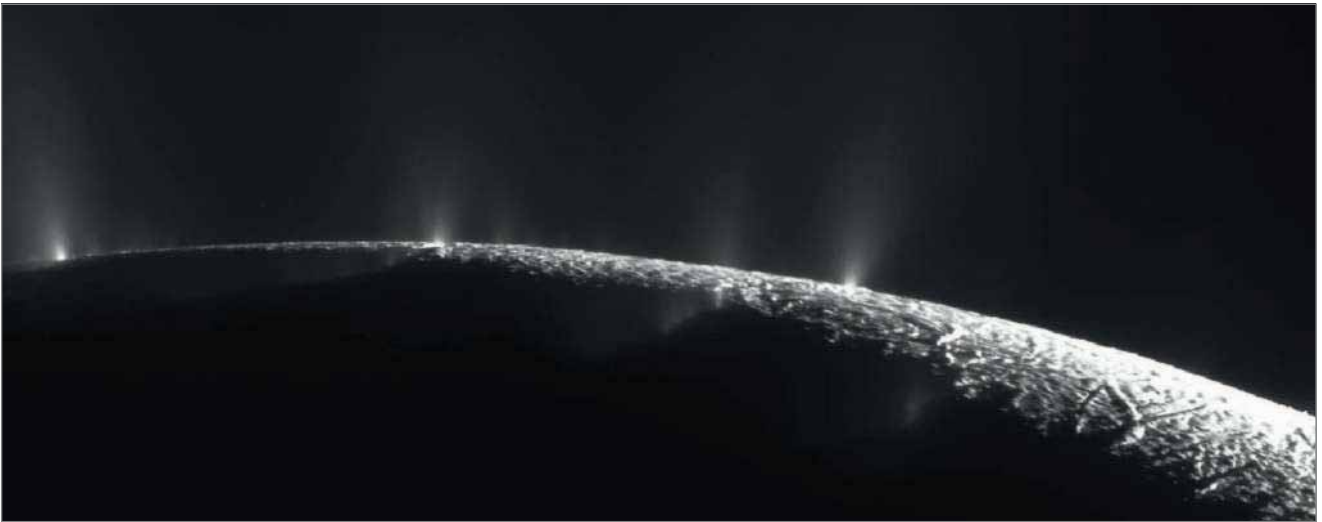


Figure 3 : les geysers d'Encelade (satellite de Saturne) sont la preuve de l'existence d'une source de chaleur importante. Par analogie avec Io, on pense que cette source est liée à la déformation engendrée par les forces de marée. (crédit NASA).

lement découplée du noyau rocheux par une couche liquide.

Les effets de marée peuvent aussi avoir joué un rôle important au tout début de l'histoire géologique des satellites. Japet, par exemple, a une montagne équatoriale qui culmine à plus de 18 km de hauteur. Cette montagne aurait pu être créée lors de la transition d'une rotation initiale rapide de quelques heures à la période de rotation synchrone actuelle de 79,33 jours. Une telle variation implique des changements de forme importants et des énergies de marée qui permettent d'expliquer l'évolution de l'orbite avec une excentricité actuelle de 2,83 %.

Sur Titan, comme pour Callisto, les effets de marée ne permettent pas d'expliquer la présence d'un océan après plus de 4 milliards d'années d'évolution. Pour ces deux satellites, la présence d'ammoniaque est requise car l'ammoniaque abaisse la température de cristallisation de l'océan de plus de 100 K. Au fur et à mesure que la croûte de glace s'épaissit par cristallisation de glace d' H_2O à l'interface avec l'océan, celui-ci s'enrichit en ammoniaque et sa température diminue. La température de la glace qui cristallise est de plus en plus faible et sa viscosité de plus en plus forte, ce qui limite l'efficacité du transfert par convection et la quantité d'énergie libérée par effets de marée.

Mais Titan est un objet unique avec son atmosphère et ses étendues d'hydrocarbures liquides. L'atmosphère

est composée principalement de N_2 , comme sur Terre, mais le méthane y est la seconde espèce la plus abondante. Ce gaz à fort effet de serre maintient la température de surface plus de 20 K au-dessus de la température de surface classique des satellites de Saturne (70 K). Cela permet au méthane et à l'azote d'être sous forme gazeuse. Le profil thermique dans l'atmosphère crée comme sur Terre une trappe froide. Sur Titan, les nuages d'hydrocarbures (méthane et éthane) peuvent ainsi se former et donner lieu à des précipitations qui nourrissent les lacs et mers des régions polaires. Comme le méthane se photodissocie de manière irréversible en éthane sur des périodes de quelques millions d'années, un cycle du méthane doit exister qui implique un réapprovisionnement important à des échelles de plusieurs dizaines de millions d'années. Cet approvisionnement pourrait être associé à des processus géologiques marquants de l'histoire de Titan. La trace de tels processus à la surface est encore controversée. Mais cette surface est marquée par une densité faible en cratères d'impacts par rapport aux autres satellites de Saturne, par la présence de chaînes de montagnes et de structures de coulées qui pourraient être l'équivalent des coulées volcaniques terrestres. L'existence d'un cryovolcanisme actif n'est pas démontré mais l'existence de régions anormalement brillantes à 5 microns et leur corrélation avec les structures lobées vues en imagerie radar suggèrent leur présence en au moins deux endroits de Titan : Tui et Hotei regio.

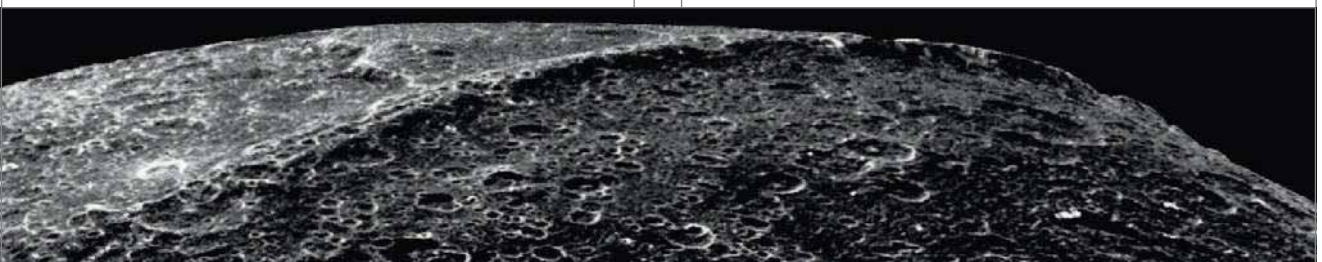


Figure 4 : la montagne équatoriale de Japet (satellite de Saturne) atteint parfois plus de 15 km de hauteur. Elle a été observée sur plus de 1500 km le long de l'équateur. Elle est très cratérisée, ce qui démontre l'âge très ancien de cette structure. (crédit NASA).

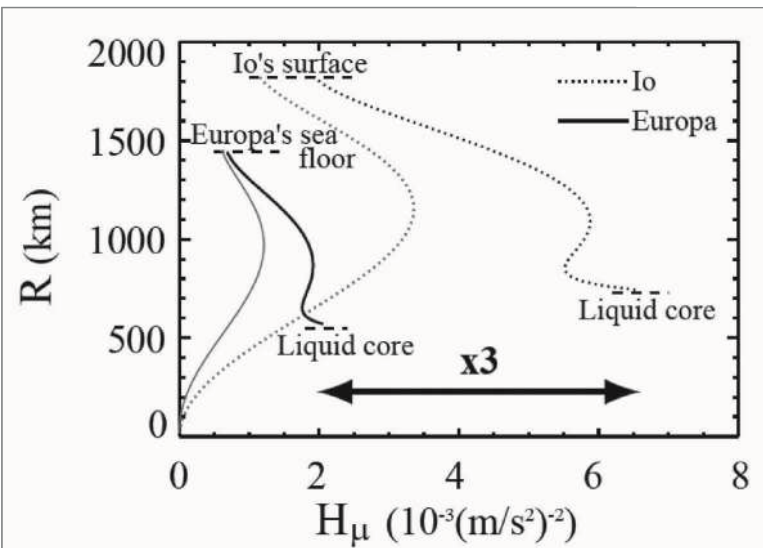


Figure 5: comparaison entre les énergies de marée pour Io et Europe (Sotin et al., Tides and Tidal Heating on Europa; Pappalardo R. et al. (Eds), University of Arizona Space Science Series, 85-117 ; 2009).

La confirmation de l'existence d'océans dans les satellites de glace des planètes géantes nécessite de nouvelles missions vers les systèmes de Jupiter et de Saturne. La mission EJSM (Europa and Jupiter Science Mission) devrait permettre de détecter la profondeur de l'océan d'Europe grâce aux mesures de variations du champ de gravité et aux mesures de déformation de la surface au cours de sa rotation autour de Jupiter. La mission Cassini en orbite autour de Saturne depuis

2004 a été prolongée jusqu'en 2017 qui correspond au solstice d'été (de Saturne), pour permettre entre autres objectifs scientifiques, de suivre l'évolution climatique de Titan et de mieux comprendre le cycle du méthane. De futures missions vers Titan sont en cours de préparation et permettront d'étudier la chimie organique qui opère dans l'atmosphère et à sa surface ■

Pour en savoir plus :

Lorenz, R. and C. Sotin (2010) *The Moon that would be a planet*, Scientific American, 302, 36-43.
<http://www.jpl.nasa.gov/solar-system/>
 url – site public laboratoire de Nantes (disponible dans quelques jours).



Figure 6 : la surface de Titan vue dans l'infrarouge par la caméra hyperspectrale VIMS à bord de Cassini. Noter Kraken Mare au pôle Nord qui est la plus grande étendue d'hydrocarbures liquides à la surface de Titan ainsi que les plaines équatoriales recouvertes de dunes. (crédit : NASA/JPL/UA).

Les succès de la mission spatiale CoRoT



Par **Claire Moutou**¹ et **Annie Baglin**²

1. Laboratoire d'astrophysique de Marseille.

2. Observatoire de Paris, LESIA.

CoRoT (CONvection, ROTation et Transits planétaires) est une mission spatiale dédiée à l'observation des étoiles et la recherche de planètes par la méthode des transits. Ce satellite tourne autour de la Terre en 90 minutes, sur une orbite polaire à 896 km d'altitude. Il a été lancé le 27 décembre 2006 par une fusée Soyuz II-b depuis le cosmodrome de Baïkonour.

Il porte à son bord un télescope photométrique qui enregistre au cours du temps les variations du flux lumineux des étoiles.

La précision de la mesure du flux est 100 à 1 000 fois meilleure que précédemment. La durée de l'observation d'un même objet peut aller jusqu'à 180 jours et les interruptions ne dépassent jamais 10 % du temps total d'observation. C'est grâce à ces propriétés, qui ont été à la base de la conception de cette mission, qu'il réalise ses deux programmes scientifiques principaux : l'exploration des intérieurs stellaires et la détection et la caractérisation de planètes extrasolaires.

De nombreuses observations au sol, souvent simulta-

nées, complètent la connaissance des objets et contribuent à l'interprétation des résultats.

CoRoT a été développé et est opéré par le CNES, associé à plusieurs laboratoires français de l'INSU, avec le partenariat de l'Agence spatiale européenne, l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Brésil et l'Espagne.

La communauté scientifique qui interprète les données est très large. Elle comprend 150 à 200 chercheurs dans les pays participants. Leur travail est coordonné par un comité scientifique. Au fur et à mesure que les données sont disponibles sur Internet, cette communauté ne cesse de grandir et de s'étendre à de nombreux pays.

Mesurer la lumière stellaire

Situées à des distances considérables – en général plusieurs centaines d'années-lumière, les étoiles observées par le satellite CoRoT ne dévoilent leurs mystères qu'après une fine analyse des photons collectés. Avec un miroir primaire de 27 cm de diamètre, et un concept optique original permettant de limiter la lumière parasite, le télescope de CoRoT obtient une précision remarquable sur les courbes de lumière qu'il enregistre, jusqu'à 0,001 % de l'intensité lumineuse reçue.

Deux stratégies sont appliquées en parallèle, chacune

	champ «exo»	champ «sismo»
domaine de magnitude	10-16	6-9
cadence	32 ou 512 sec	1 sec
nombre d'étoiles	6000 / CCD	5 / CCD
objectif	caractériser les planètes extrasolaires en détectant des transits photométriques	comprendre les intérieurs stellaires en mesurant les fréquences d'oscillations

sur la moitié du champ de vue disponible : dans un cas, on observe quelques étoiles brillantes, à la très haute cadence d'une image par seconde, et dans le second cas, on observe un grand nombre d'étoiles plus faibles, avec une cadence d'une image toutes les 32 secondes. Les étoiles brillantes sont la cible d'études de sismologie, qui cherchent à contraindre la physique des intérieurs stellaires en mesurant les oscillations de la surface des étoiles. Le second champ, rempli d'un grand nombre d'étoiles, est destiné à la recherche de planètes extrasolaires, par la méthode des transits qui est sensible à la baisse de luminosité se produisant pendant le passage d'une planète devant le disque de son étoile. Les observations ont lieu dans deux directions opposées du ciel (Figure 1), l'une proche du centre de la Galaxie (de mars à octobre), et l'autre de l'anticyentre

de la Galaxie (d'octobre à mars). Le satellite peut scruter une région du ciel de $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ simultanément pour les deux objectifs de la mission, à l'intérieur d'un cercle d'une dizaine de degrés. Les observations durent de 20 à 150 jours pour chaque pointage, avec 4 pointages par an depuis février 2007. Originellement prévue pour 3 ans, la mission a récemment été étendue à 3 années supplémentaires, et la réception des données spatiales se terminera en avril 2013.

Nouvelles planètes

On connaît à ce jour plus de 450 planètes extrasolaires, c'est-à-dire des planètes qui tournent autour d'étoiles autres que le Soleil. La plupart d'entre elles ont été découvertes de façon indirecte par spectroscopie, et 80

Planète x	Particularités
1, 5, 12	géantes gazeuses, anormalement volumineuses, de très courte période orbitale
2	géante gazeuse dilatée dans un système planétaire très jeune
11	géante gazeuse orbitant une étoile en rotation extrêmement rapide
3, 15	naines brunes à courte période orbitale
4, 6, 13, 14	géantes gazeuses de dimension similaire à Jupiter
7	première super-Terre en transit, planète rocheuse de période orbitale extrême, 20h
8	géante de glace, de densité similaire à Neptune
9	première géante gazeuse tempérée: un «Jupiter» sur l'orbite de Mercure
10	géante gazeuse en orbite très allongée

Les particularités des planètes découvertes par CoRoT

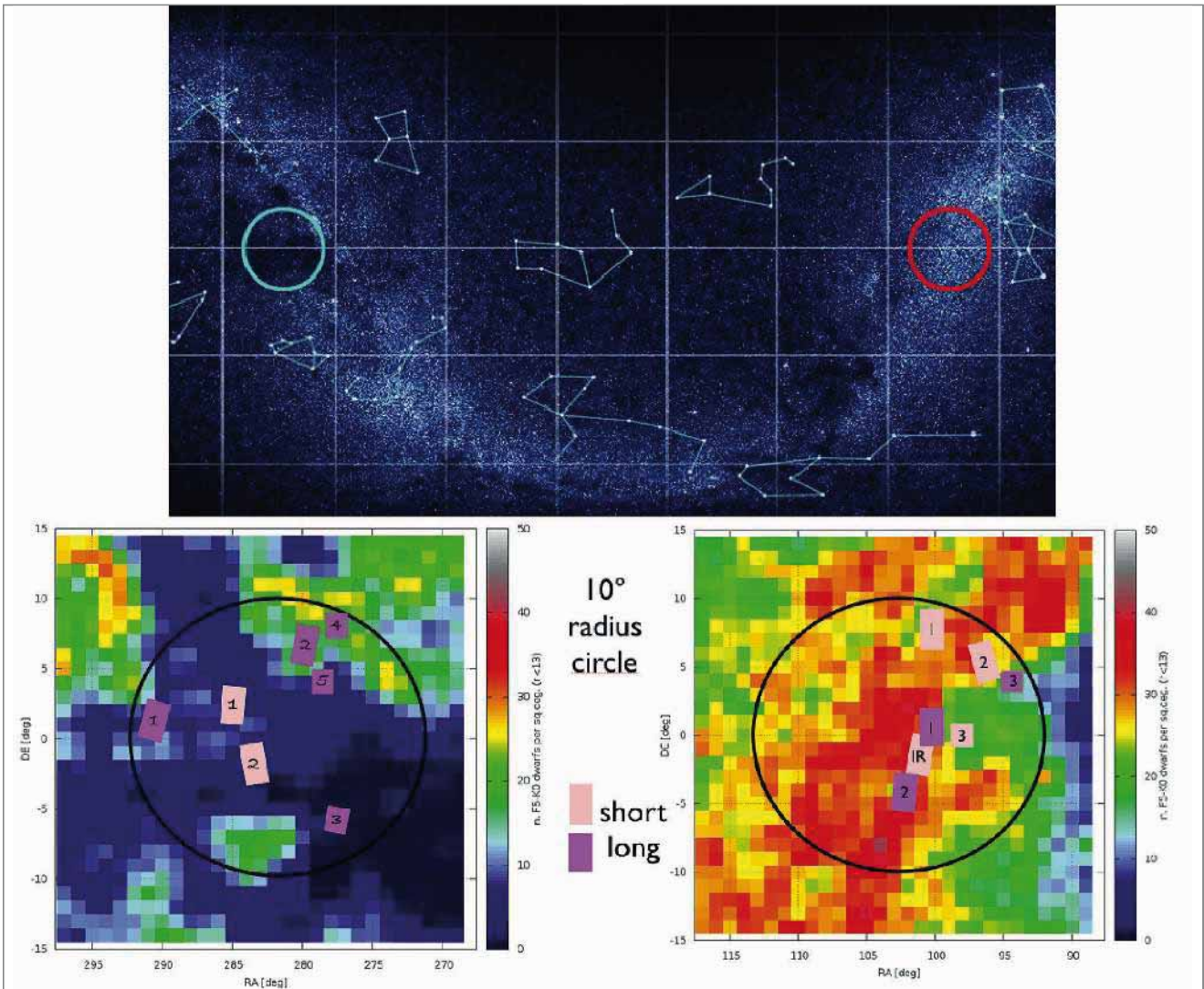


Figure 1 : les étoiles observées par CoRoT sont situées proches du plan Galactique, à l'intérieur de deux cercles d'environ 10° (en haut : ©Laurent Boissard). Les cartes (en bas) montrent la densité des étoiles dans ces deux « yeux », et les positions et orientations des 14 premiers champs observés.

d'entre elles sont également détectées par la méthode des transits.

Les exoplanètes dont l'orbite est vue par la tranche produisent en effet des micro-éclipses pendant leur passage devant le disque stellaire; ce « transit », à la forme carrée bien reconnaissable (Figure 2), dure quelques heures et se produit une fois par période orbitale de la planète; son amplitude est proportionnelle au rapport entre la surface des disques planétaire et stellaire. Les planètes de courte période et de grand rayon sont les plus faciles à détecter par cette méthode; depuis l'espace où l'on obtient une meilleure précision, et des courbes continues, on s'attend à trouver aussi des planètes de petite taille et éloignées de leur étoile. En observant des centaines de milliers d'étoiles, CoRoT détecte des centaines de ces événements, dont certains sont effectivement des transits planétaires.

Les transits découverts par CoRoT ont une amplitude entre 0.02 et quelques pourcents, correspondant à des planètes de taille très différentes, entre 1,5 et 20 fois le rayon terrestre. La longueur de la courbe de lumière limite quant à elle la période orbitale des planètes découvertes, puisqu'il faut au moins observer deux transits pour mesurer cette période.

Après la détection des transits par CoRoT, une série d'observations avec des télescopes terrestres est nécessaire pour rejeter les nombreux candidats qui se révèlent être des étoiles binaires à éclipse. Les observations d'accompagnement au sol représentent un effort considérable, impliquant une dizaine de télescopes et d'équipes. Il faut ensuite mesurer la masse des planètes confirmées et l'excentricité de leur orbite par spectroscopie, puis obtenir les paramètres de l'étoile centrale. Avec la masse de la planète, et son rayon mesuré par CoRoT, on en déduit la densité moyenne de la planète, c'est-à-dire sa nature rocheuse, glacée ou gazeuse. Les planètes en transit découvertes par CoRoT illustrent l'immense diversité des mondes hors du système solaire, comme le montre la Figure 3.

Leurs particularités sont listées dans la table page 17.

Chaque planète découverte par CoRoT porte le nom CoRoT-x-b; x est un nombre qui correspond à l'ordre de la découverte, b indique le corps orbitant (la planète); l'étoile qui abrite la planète est appelée CoRoT-x.

Dans le domaine d'étude des planètes extrasolaires, les questions auxquelles les astrophysiciens tentent de répondre à l'aide des résultats de CoRoT sont les suivantes :

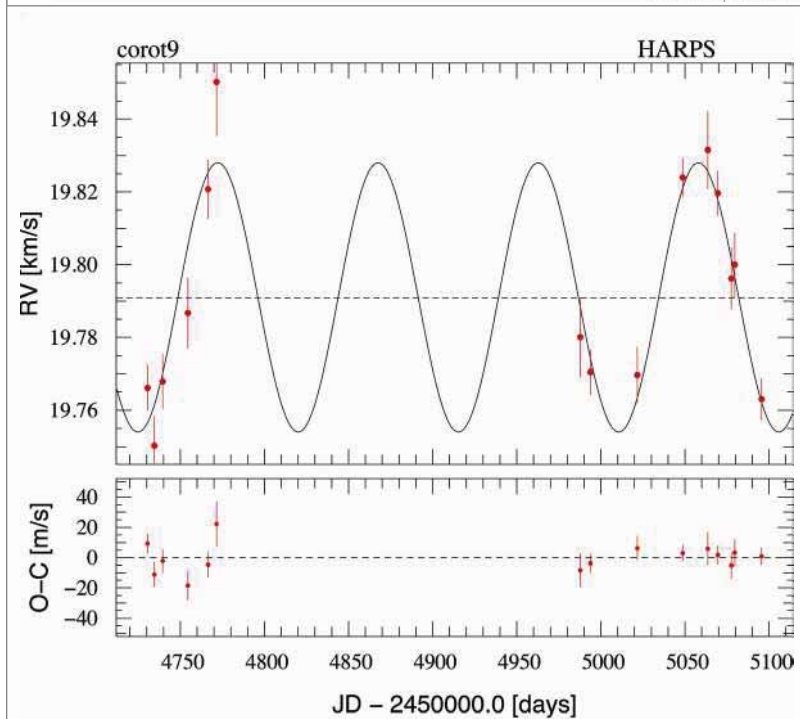
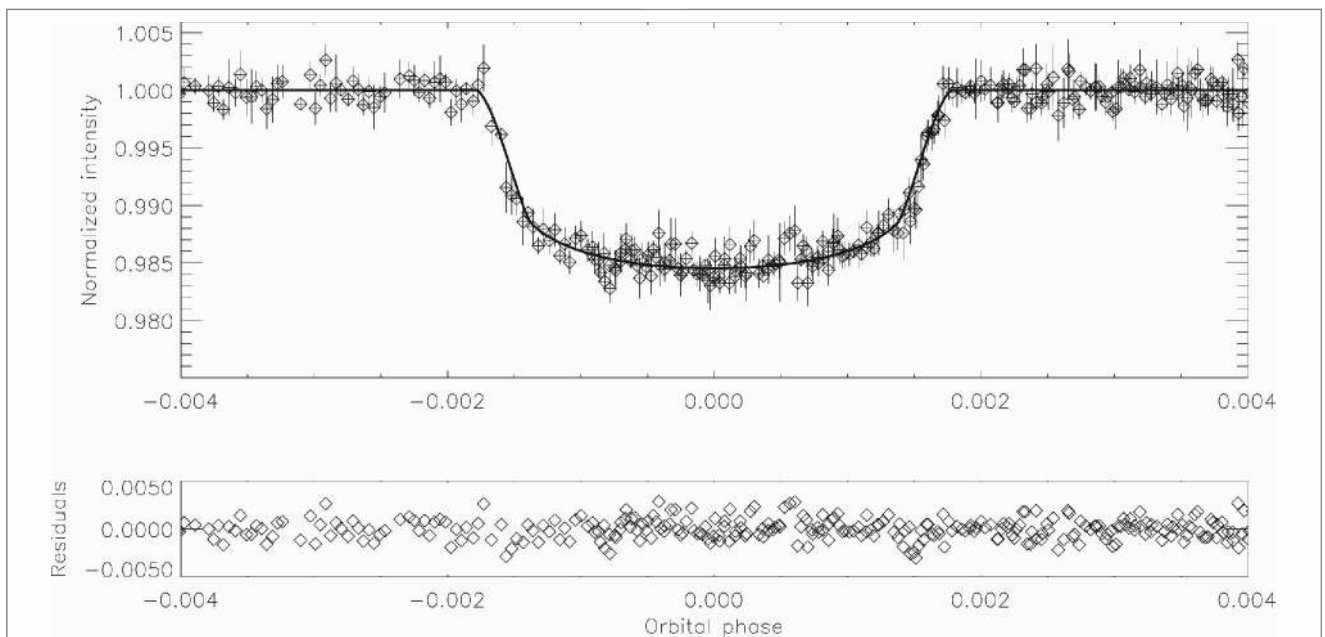


Figure 2: les planètes, ici CoRoT-9b, sont découvertes par le transit dans la courbe de lumière obtenue par CoRoT (en haut), et complètement caractérisées par leur courbe de vitesses radiales (ci-contre: ici, mesurée avec HARPS sur le télescope de 3,60 m à l'ESO). Les premières permettent de mesurer le rayon des planètes et naines brunes, et les secondes permettent d'établir la nature planétaire en mesurant la masse de la planète ainsi que l'excentricité de son orbite.

Existe-t-il des planètes telluriques dans les régions internes des systèmes extrasolaires, et quelles sont les caractéristiques de ces planètes? La découverte de CoRoT-7b, une planète terrestre chauffée à l'extrême par son étoile, a pu démontrer pour la première fois l'existence d'une planète de densité rocheuse hors de notre système solaire.

Quelle est la structure interne des planètes géantes, et dépend elle de l'environnement dans lequel évolue la planète? La moisson des résultats CoRoT a énormément contribué à élargir cette connaissance, en découvrant des systèmes aux caractéristiques différentes des autres projets. En particulier, CoRoT-9b est la seule planète géante connue, en transit, dont la distance à l'étoile reste relativement grande tout au long de son orbite; la surface de la planète reste alors tempérée entre -40 et +140 °C. Cet objet est à comparer aux pla-

nètes en transit les plus courantes, dont la température dépasse 1000 °C. L'énergie reçue de l'étoile par ces planètes chaudes contribue à empêcher leur contraction, et elles se caractérisent par un volume gigantesque, contrairement à CoRoT-9b. CoRoT a également découvert des planètes autour d'étoiles jeunes ou en rotation rapide.

La densité des 15 planètes découvertes par CoRoT jusqu'à aujourd'hui s'étend de 0.15 à 26 g/cm³, un domaine considérable qui explore des objets très divers. Certaines ont des masses considérables, ce

sont des naines brunes plutôt que des planètes géantes classiques. La moisson continue et les planétologues de CoRoT attendent encore de nouvelles surprises...

De la sismologie stellaire

Pour chacune des dix étoiles du champ dédié à la sismologie, CoRoT mesure seconde par seconde la quantité de lumière reçue, avec une grande précision (dispersion par point de mesure allant jusqu'à 4.10⁻⁴), pendant des durées allant jusqu'à une demi-année.

Cent vingt étoiles brillantes ont déjà été observées par CoRoT au cours des trois années passées.

Les « courbes de lumière » (variation relative au cours du temps du flux lumineux de l'étoile et reçu par le télescope) obtenues sont d'une qualité sans précédent et montrent une très grande diversité (Figure 4).

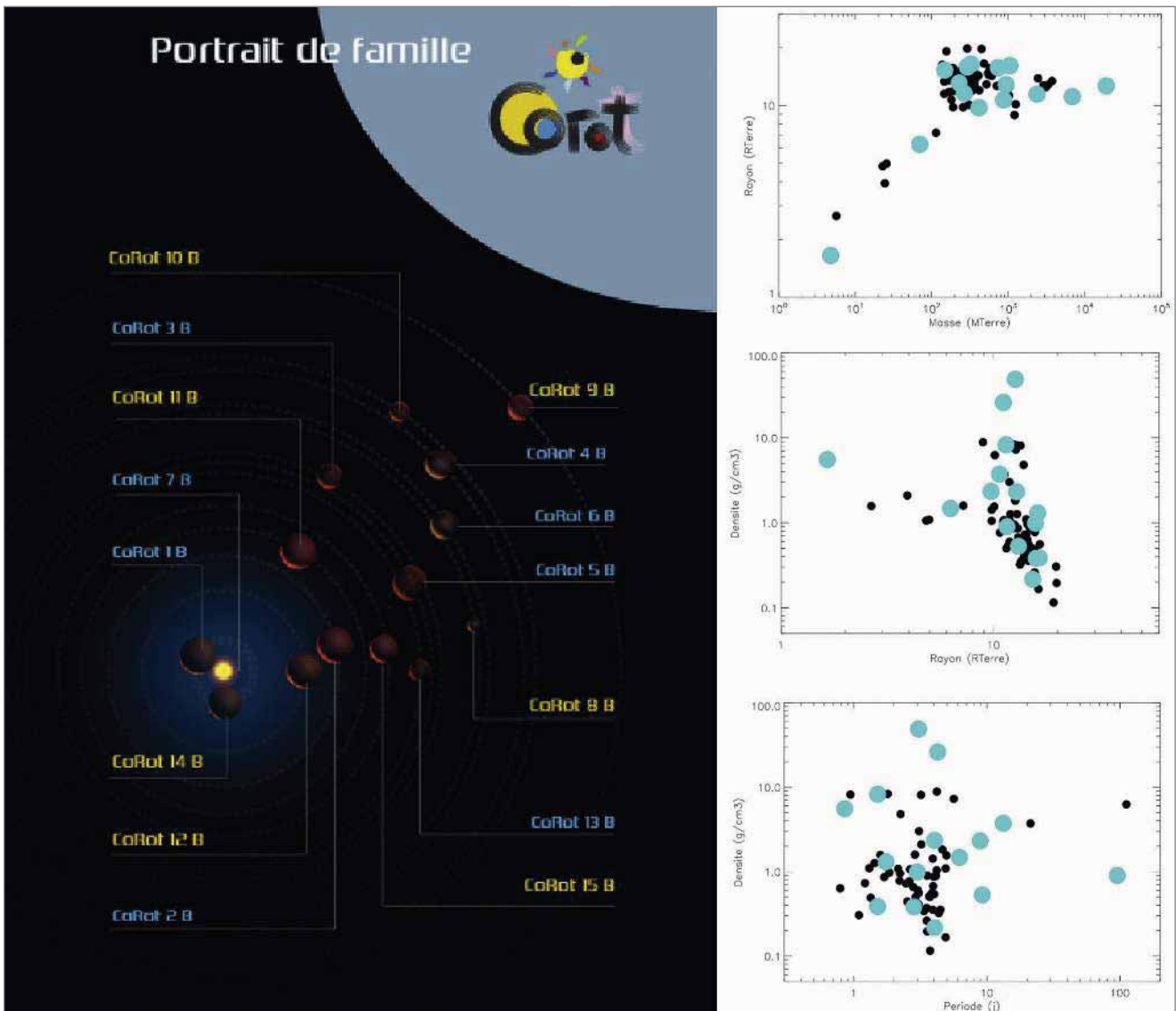


Figure 3 : (à gauche : ©Patrice Amoyel) vue d'artiste des planètes CoRoT. (à droite) les diagrammes des paramètres des planètes à transit connues en mai 2010 (ronds noirs), et des 15 planètes CoRoT en turquoise. Ces systèmes couvrent un large domaine de masses, rayons, densités, périodes et excentricités.

Leur analyse fine révèle des pulsations extrêmement faibles, de l'ordre du ppm (part par million). La mesure précise de ces pulsations (en termes de fréquences, d'amplitudes, de phase et de durée de vie) constitue le programme central du programme de sismologie stellaire (Figure 5). Les fréquences caractérisent la structure de l'étoile : ses dimensions, sa forme, la manière dont son intérieur est stratifié, comment cet intérieur tourne.

Les amplitudes et les durées de vie des oscillations nous renseignent sur les aspects énergétiques : comment l'oscillation perd de l'énergie dans certaines régions de l'étoile, en gagne dans d'autres, comment elle interagit avec la convection et ce qu'elle peut en retour nous apprendre sur ce processus complexe.

Citons quelques exemples.

CoRoT a découvert dans une dizaine d'étoiles bien sélectionnées, des oscillations analogues à celles qu'on observe depuis 30 ans dans le Soleil. Leur interprétation encore très préliminaire révèle une structure interne complexe (plus complexe que celle du Soleil!),

et permet d'évaluer la taille des régions centrales mélangées, siège des réactions nucléaires. Elles se révèlent plus étendues qu'on ne le pensait, ce qui va conduire à une révision des âges de ce type d'étoiles, généralement utilisées comme indicateurs dans les études de structure galactique.

Les oscillations des étoiles jeunes et chaudes observées par CoRoT sont aussi surprenantes. Elles sont très variées, dans un large domaine de fréquence et vont fortement contraindre les modèles et obliger à des révisions drastiques.

L'observation des pulsations des vieilles étoiles (géantes rouges), observées en grand nombre dans le champ « exo », permet de déterminer de nouveaux paramètres « sismiques », indépendant de la distance de l'objet, qui vont servir de traceurs du taux de formation des étoiles dans la Galaxie.

Ces courbes de lumière montrent également la signature d'un grand nombre d'autres phénomènes, comme par exemple la granulation ou l'activité magnétique.

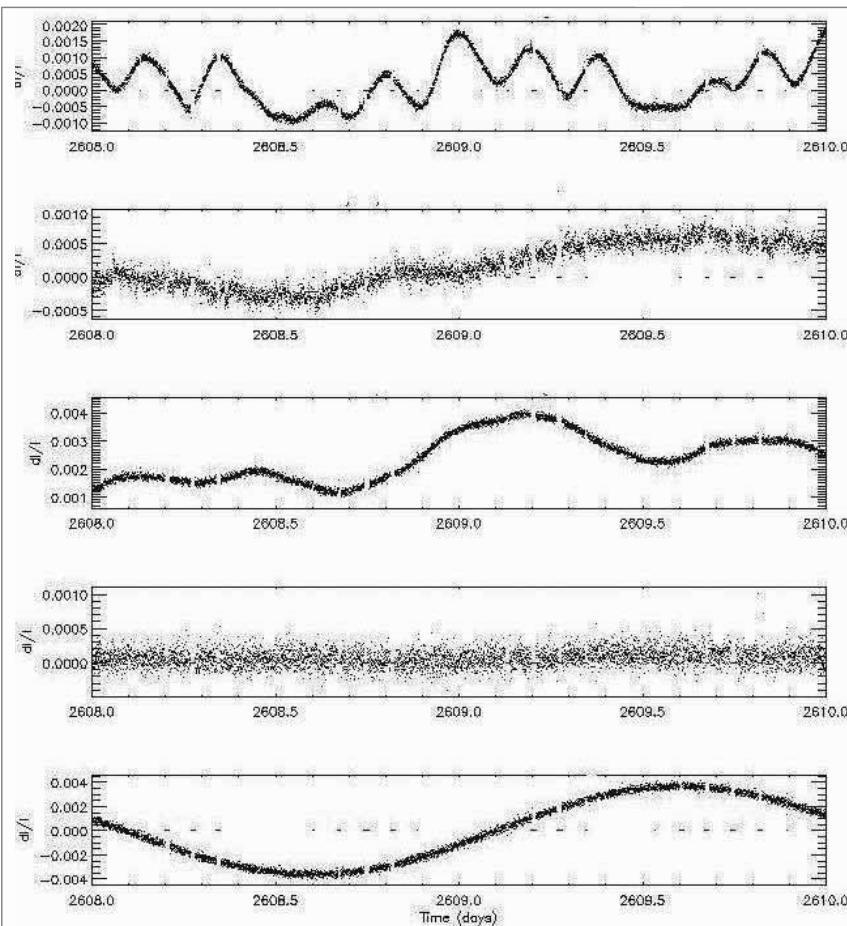


Fig 4 : courbes de lumières (ici présentées sur une durée de 2 jours) obtenues avec CoRoT, pour 5 étoiles observées simultanément. Avant même une analyse plus fine, on remarque des variations très diverses, toutes d'amplitude très faible (de l'ordre du millième). © Éric Michel.

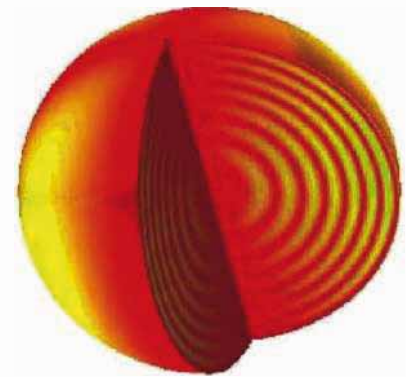


Fig 5 : illustration des perturbations (de température) au sein d'une étoile vibrant suivant un mode non radial de pulsation. © Soren Frandsen.

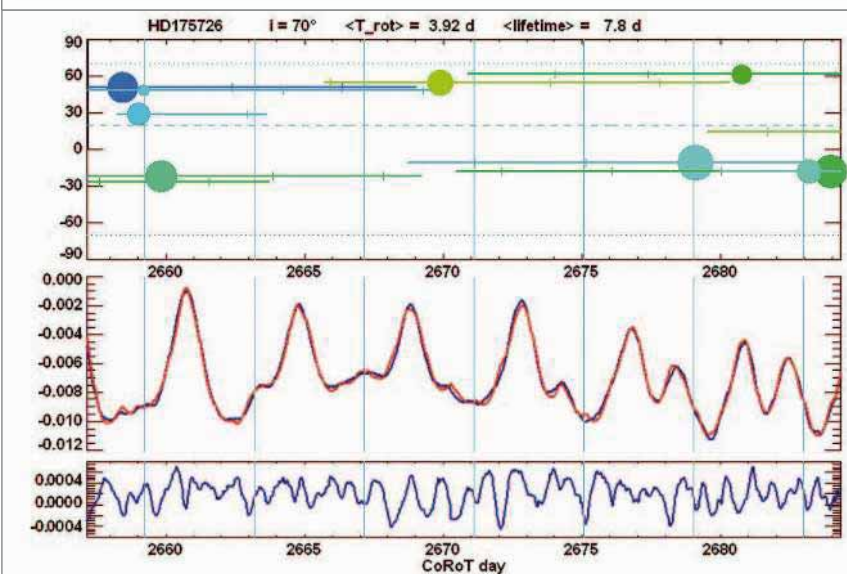


Fig 6 : exemple de courbe de lumière (au centre) dont les variations sont interprétées par la présence de taches (haut) dont on estime la taille (largeur des cercles), la position en latitude (ordonnée) et la durée de vie (trait horizontal). Le résidu après soustraction de la signature des taches est tracé en bas de la figure (bas). Remerciements © Benoît Mosser.

Ainsi la présence de taches plus sombres (comme celles observées sur le Soleil) à la surface de l'étoile produit des variations au cours du temps du flux lumineux reçu, qui est modulé par la rotation de l'étoile (Figure 6). Enfin, lorsque l'étoile est double et présente des éclipses, on peut y mesurer les masses, les rayons, les échanges de matière entre ces deux corps et leur déformation par les effets de marée. En parallèle, de nombreuses études théoriques sont dé-

veloppées actuellement pour rendre compte des processus de mélange et ségrégation des éléments chimiques à l'intérieur des étoiles, du rôle de la rotation et du champ magnétique. La sismologie stellaire apparaît comme un outil de prédilection pour étayer ces travaux en apportant des observables nouvelles, porteuses d'information sur l'intérieur des étoiles.

Et après...

Le principe instrumental de CoRoT, qui s'est révélé très bien adapté à ces programmes, a été utilisé pour définir de nouveaux projets plus ambitieux. Dès l'an dernier, la mission KEPLER de la NASA a été lancée. Elle emporte un télescope de 90 cm de diamètre, dont la sensibilité devrait permettre de détecter de toutes petites planètes, cousines de la Terre.

Les données sont d'excellente qualité et nul doute que la moisson va être riche.

Ensuite, le projet PLATO, de l'Agence spatiale européenne, pourrait être lancé vers 2018. Composé de nombreux petits télescopes identiques, pointant les mêmes étoiles, sa sensibilité et la durée de ses observations lui permettront de se consacrer à l'étude des systèmes planétaires complets, étoile et cortège de planètes ■

Plus de lumière sur la matière noire et la formation des galaxies

Par **Françoise Combes** ¹

Membre de l'Académie des sciences, astronome à l'Observatoire de Paris.



Notre modèle d'Univers a beaucoup progressé ces dernières années ; les observations cosmologiques ont permis de préciser tous ses paramètres : son âge de 13,7 milliards d'années, son taux d'expansion

qui s'accélère, sa courbure qui est nulle, et son contenu. De façon surprenante, près des trois quarts de l'Univers sont constitués d'énergie sombre, un peu plus de 20 % de matière noire exotique, faite de particules inconnues, et seulement 4 % de la matière ordinaire, les baryons, faits essentiellement d'hydrogène. Malgré tous les succès de la cosmologie observationnelle, les astronomes ont encore d'énormes problèmes à résoudre, d'autant que même parmi ces 4 % de matière « ordinaire », la plupart est encore sombre et inconnue. Seuls 10 % des baryons sont identifiés de façon certaine par leur rayonnement : ce sont des étoiles ou du gaz interstellaire et intergalactique.



Mais comment se forment les grandes structures et les galaxies ?

La gravité est bien sûr essentielle, les structures s'effondrent par leur propre gravité, pourtant cet effondrement est extrêmement lent, car il est contrecarré par l'expansion rapide de l'Univers. On peut montrer que les fluctuations relatives de densité accroissent leur amplitude très doucement, à un taux proportionnel à celui de l'expansion.

Nous avons la chance de pouvoir mesurer l'amplitude de ces fluctuations primordiales, car elles sont conservées dans le rayonnement du fond cosmologique, vestige du Big-Bang. Ce rayonnement est celui d'un corps noir, qui s'est refroidi aujourd'hui à 2.7 degrés Kelvin, et qui émet donc en micro-ondes (son maximum est à 3 mm de longueur d'onde). Avant que le rayonnement puisse apparaître, les photons et les baryons ont fluctué ensemble, jusqu'à ce que la température de l'Univers tombe en-dessous de 3 000 degrés : les atomes d'hydrogène se sont recombinaés, et les fluctuations sont restées figées à leur niveau dans le bain de photons, qui s'est découplé. À l'époque de ce découplage, le rayon de l'Univers était mille fois plus petit qu'aujourd'hui. Les fluctuations primordiales à l'origine des structures de l'Univers étaient alors extrêmement faibles, de 1 pour 100 000. Il est impossible avec ce niveau de fluctuations des baryons seuls de former les structures et les galaxies connues aujourd'hui. Heureusement, une solution est trouvée avec l'hypothèse d'une matière noire avec aucune autre interaction que la seule gravité, avec baryons et photons. Ces particules de matière noire se découplent plus tôt, et peuvent ainsi commencer leur effondrement gravitationnel bien avant les baryons.

Lorsque les baryons, formés essentiellement d'hydrogène, se découplent enfin, ils peuvent alors s'effondrer dans les puits de potentiel de matière noire. Durant cette période, l'Univers se refroidit par expansion adiabatique à une température inférieure au fond cosmologique. Ces baryons ne rayonnent pas, on parle d'âge sombre. Celui-ci se termine dès que l'effondrement des baryons aura donné lieu aux premières étoiles, formant ainsi les premières galaxies. Celles-ci sont des galaxies naines, dont la masse est inférieure à 1 % de la masse de notre Galaxie, la Voie lactée. Ces premières étoiles émettent des rayons ultraviolets, qui réionisent l'hydrogène neutre qui les entoure. Peu à peu, tout l'hydrogène entre les galaxies sera ré-ionisé, comme aujourd'hui, ou le gaz neutre ne se retrouve que dans les régions denses, filaments cosmiques et galaxies.

La réionisation de l'Univers est progressive, elle dure près d'un milliard d'années, et les noyaux actifs des galaxies y contribuent aussi. En effet, les premiers trous noirs super-massifs se forment très vite au centre des galaxies, et vont accompagner la vie des galaxies, en croissant en masse avec elles. Il est bien établi aujourd'hui que chaque

galaxie abrite un trou noir en son centre, de masse proportionnelle à la masse de son bulbe.

Les simulations numériques, qui se sont extrêmement développées ces dernières années, ont permis de mieux comprendre la formation des structures. Bien que la distribution initiale des fluctuations de densité soit connue, il faut cependant faire beaucoup d'hypothèses sur la nature de la matière noire, sur la distribution des baryons noirs, leur état physique, si bien que l'évolution de l'Univers est encore un domaine à explorer. Une des caractéristiques communes à toutes les simulations, et qui correspond bien aux observations, est la structure filamentaire de l'Univers, comme illustrée en Figure 1. Les filaments sont constitués de matière noire et de baryons, et les galaxies se forment à l'intérieur de ces filaments. À la croisée des filaments, se forment des amas de galaxies. Ces structures sont confirmées par la cartographie des galaxies de notre univers proche (cf. Figure 2).

Depuis une dizaine d'années, cette cartographie a fait des pas de géants : autrefois, les spectres des galaxies (donc leur décalage vers le rouge, ou leur distance) étaient obtenus un à un par spectroscopie à fente, mais aujourd'hui, chaque pixel peut donner un spectre, grâce aux fibres optiques ou micro-miroirs, et les instruments actuels peuvent obtenir jusqu'à mille spectres simultanés ! Dans les années 2000, le projet SDSS (Sloan Digital Sky Survey, <http://www.sdss.org/>) a obtenu images et spectres de près d'un million de galaxies, couvrant le quart du ciel, alors que les cartographies du siècle dernier ne se comptaient qu'en dizaines de milliers. Les instruments à haute résolution angulaire comme le télescope Hubble, ou haute sensibilité comme le VLT de l'ESO (Very Large Telescope, <http://www.eso.org>) permettent des cartographies plus profondes, et donc d'atteindre des galaxies plus lointaines, dans des régions du ciel plus petites. Un grand nombre de projets se prépare pour le futur, comme le LSST en optique (Large Synoptic Survey Telescope, <http://www.lsst.org>), ou le SKA dans le domaine radio (Square Kilometer Array, <http://www.skatelescope.org>), qui permettront de cartographier plus d'un milliard de galaxies dans tout le ciel.

La distribution de masse des fluctuations primordiales est telle que ce sont les petites structures qui se forment en premier, et les autres se forment ensuite progressivement par fusion de structures plus petites. Dans ce scénario hiérarchique, les galaxies se forment par coalescences successives. Mais une galaxie assemble sa masse très progressivement, non seulement par fusions de galaxies, mais aussi par accrétion continue de gaz provenant des filaments de matière cosmique.

Si la simulation de la matière noire est aisée, en faisant intervenir uniquement la gravité, celle des baryons est très complexe. Le gaz est certainement multi-phase, avec des composantes de différentes températures, plus ou

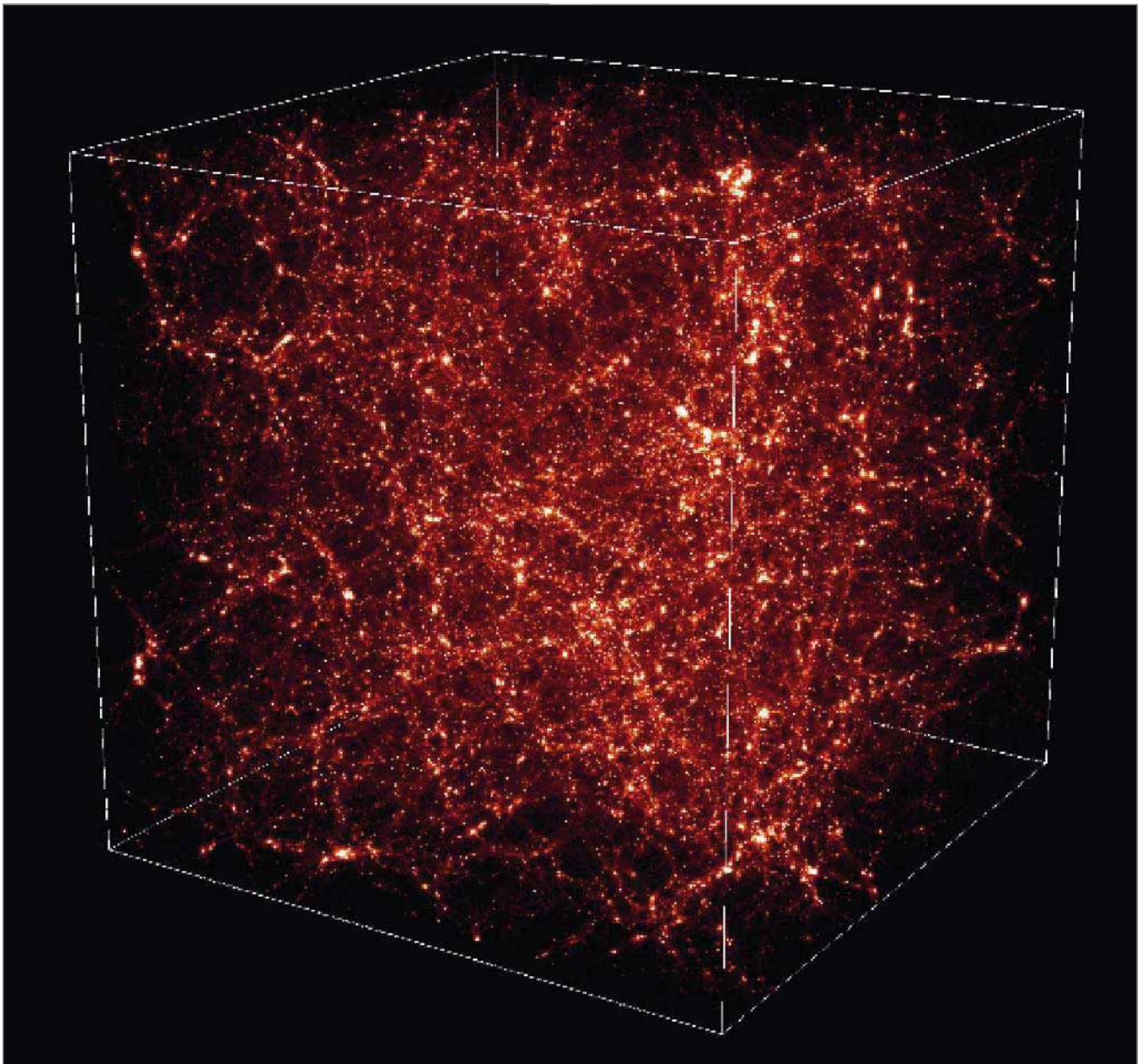


Figure 1 : simulations numériques de la formation des structures (crédit Projet Horizon, <http://www.projet-horizon.fr/>). Le projet Horizon rassemble depuis 2005 les principaux groupes de simulations extra-galactiques en France, soit une vingtaine de chercheurs, afin de progresser de façon significative dans le problème de la formation des galaxies dans un contexte cosmologique. Les plus grosses simulations au niveau international ont été effectuées dans ce cadre, comprenant non seulement la matière noire, mais l'hydrodynamique du gaz, la formation des grandes structures, des premières étoiles, etc. Les plus ambitieuses recouvrent une région du ciel comprenant tout l'Univers observable aujourd'hui, jusqu'à l'horizon cosmique (ou remontée dans le temps/ espace de 13,7 milliards d'années-lumière), d'où le nom du projet.

moins dissipatives, représentant du gaz ionisé, atomique, ou des nuages moléculaires. Des étoiles se forment dans les nuages froids moléculaires, avec un taux mal connu, que l'on suppose toujours proportionnel à la densité volumique de gaz. Une fois ces étoiles formées, elles rejettent de la masse par vent stellaire, ou par explosions de supernovae, ce qui ré-injecte de l'énergie dans le milieu interstellaire, et s'oppose pendant un temps à la formation de nouvelles étoiles. Ces phénomènes de rétroaction peuvent varier et changer le destin des galaxies et l'histoire de la formation d'étoiles. Ainsi les modèles actuels rencontrent de nombreux problèmes, par exemple une formation catastrophique d'étoiles, si la rétroaction n'est pas mise en œuvre.

D'autre part, contrairement aux prédictions du scénario hiérarchique, les observations montrent des galaxies

très massives qui se forment très tôt et très vite, et sont aujourd'hui éteintes, alors que la formation d'étoiles se produit aujourd'hui essentiellement dans des galaxies naines, riches en gaz. Les effets d'environnement pourraient être à l'origine de ce paradoxe. Le réservoir de gaz froid autour des galaxies étant chauffé dans des chocs lors des nombreuses interactions, l'évolution des galaxies dans les amas s'effectue beaucoup plus rapidement que la moyenne, mais l'alimentation en gaz froid s'épuisant, les galaxies ne peuvent plus former de nouvelles étoiles. Ainsi, dans certains amas riches de galaxies, la masse de gaz chaud inter-galactique est 10 fois plus grande que la masse de toutes les galaxies réunies.

Le grand succès de la formation des structures filamentaires (cf. Figure 1 et 2) cache à petite échelle des

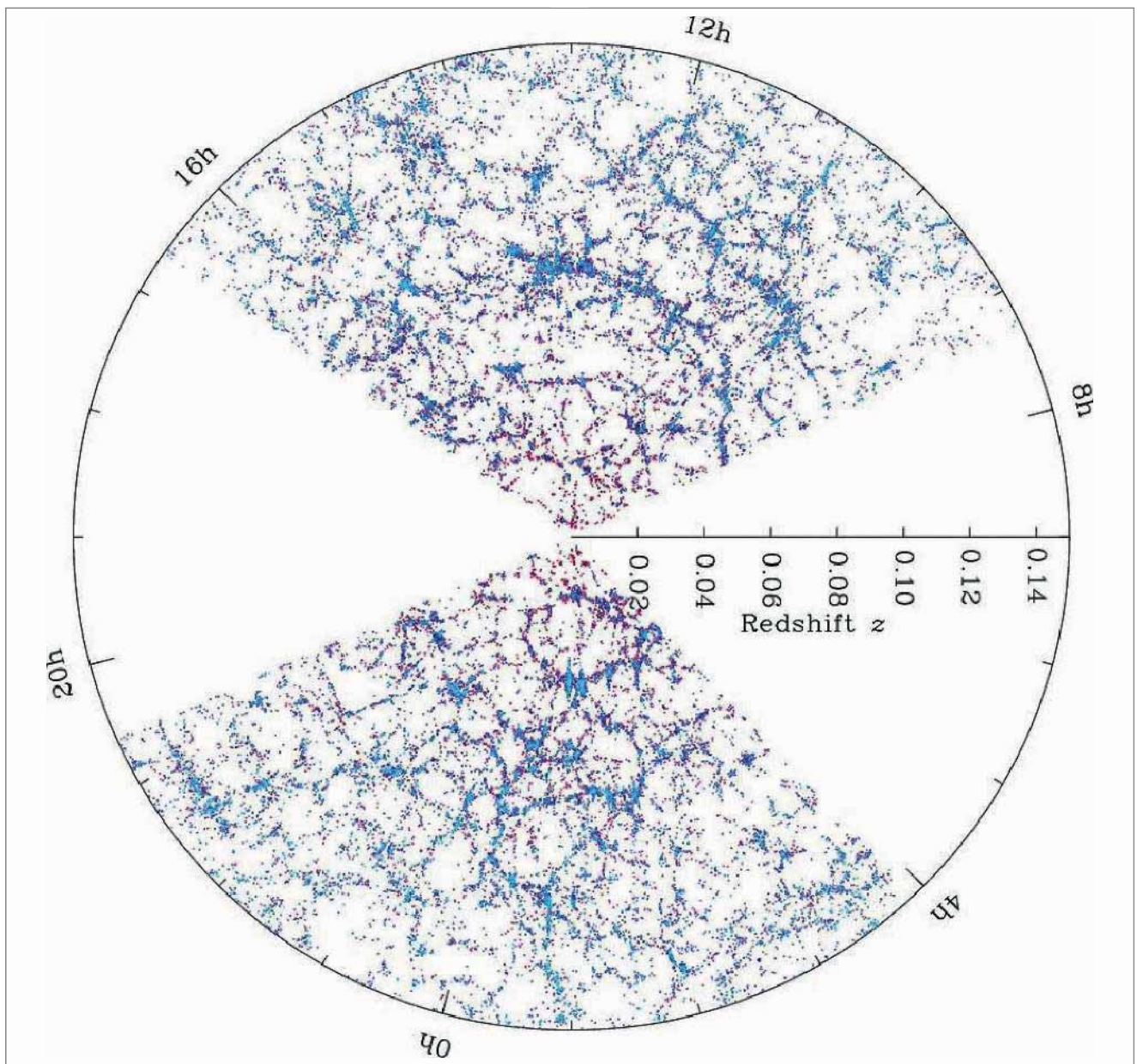


Figure 2: tranche d'Univers, où chaque point est une galaxie, dont la distance est connue par son décalage vers le rouge z . Notre galaxie est au sommet des deux cônes. (crédit Sloan Digital Sky Survey, <http://www.sdss.org/>).

problèmes non résolus, qui concernent plus particulièrement la nature de la matière noire. Dans les simulations, celle-ci se concentre considérablement dans les galaxies, jusqu'à former un pic central, qui aurait dû être observé par son effet cinématique sur les courbes de rotation des galaxies. Or ces courbes de rotation ne montrent qu'une faible concentration de matière noire au centre des galaxies. D'autre part, le modèle standard prédit un grand nombre de structures à petite échelle : une galaxie comme la Voie lactée devrait être entourée de milliers de petits satellites, qui ne sont pas observés. Il faudrait alors supposer que la plupart de ces satellites sont des halos noirs qui ont été vidés de leur gaz, par des phénomènes de pression dynamique, ou de marée ; ou bien que la formation des premières étoiles a éjecté tout le gaz, par l'intermédiaire des vents stellaires et des supernovae, dont l'énergie est trop grande pour ces petits potentiels gravitationnels.

Pour expliquer la non concentration de matière noire au centre des galaxies massives, les phénomènes de rétroaction dus aux trous noirs super-massifs sont invoqués. La symbiose entre les galaxies et leur trou noir a des conséquences profondes sur l'évolution des galaxies. L'énergie libérée par la chute de matière sur le trou noir est considérable, et même si le trou noir représente en général moins de 0.2 % de la masse de la galaxie, il peut arrêter toute formation d'étoiles, et éjecter au loin les baryons, qui entraînent aussi un peu de la matière noire. L'efficacité de ces phénomènes est toutefois difficile à évaluer, car ils se produisent à des échelles trop petites pour être simulés. En fait, les plus grosses incertitudes aujourd'hui concernent les phénomènes microscopiques, qui ne sont ajoutés dans les simulations que de façon empirique. Beaucoup plus d'observations devront être effectuées pour mieux cerner et résoudre les problèmes de la formation des galaxies ! ■

La mission spatiale Herschel : 1^{er} anniversaire

Par **Jean-Paul Baluteau**¹ et **Annie Zavagno**²

1. Chercheur au Laboratoire d'astrophysique de Marseille.

2. Chercheur au Laboratoire d'astrophysique de Marseille.

La mission Herschel, baptisée du nom du physicien William Herschel à l'occasion du bicentenaire de sa découverte de l'infrarouge (IR), avait pour objectif d'étudier l'histoire de la formation des étoiles et des galaxies et de comprendre comment les étoiles se forment dans notre galaxie et dans les galaxies extérieures à partir d'observations dans un domaine spectral encore pratiquement inexploré, celui de l'infrarouge lointain et du submillimétrique. Herschel (voir Figure 1) a été lancé le 14 mai 2009 par Ariane 5, et les premières observations astronomiques ont commencé un mois plus tard.

Le rayonnement infrarouge est indétectable par l'œil humain et n'est perçu par l'homme que comme rayonnement thermique (sensation de chaleur). Tout corps physique émet un rayonnement dans un domaine de longueurs d'onde qui dépend de sa température. La longueur d'onde du maximum de l'émission est liée à la température du milieu observé par une relation simple. Les instruments devant observer dans l'infrarouge lointain doivent être refroidis à de très basses températures, proche du zéro absolu (-273,15 °C) de façon à ne pas être aveuglés par leur propre rayonnement. De plus, l'atmosphère terrestre, à cause de son contenu en

vapeur d'eau, est presque totalement opaque aux longueurs d'onde de l'IR lointain : les observations dans ce domaine nécessitent donc l'utilisation de moyens spatiaux.

Le milieu interstellaire (MIS) est constitué de gaz et de poussières. Les grains de poussière interagissent avec le rayonnement par absorption ou diffusion (comme dans un brouillard). Le rayonnement visible et ultraviolet est absorbé par ces poussières et réémis dans l'IR lointain et le submillimétrique.

Les zones froides du MIS et la formation stellaire

Les étoiles se forment dans des nuages moléculaires froids constitués de gaz et de poussières. Les premières étapes de la formation de ces étoiles sont donc masquées aux observateurs dans le domaine optique, à cause de l'absorption du rayonnement par les poussières. Ces nuages froids vont rayonner dans l'infrarouge lointain qui devient un domaine privilégié pour l'étude des phases précoces de la formation des étoiles. Les satellites infrarouges européen ISO puis américain Spitzer ont permis de grandes avancées dans ce domaine, mais la couverture en longueurs d'onde et le faible diamètre de ces télescopes ont limité les découvertes.

Une problématique particulière est associée à la formation des étoiles massives (étoiles dont la masse dépasse 8 fois celle du Soleil). En théorie, ces étoiles ne devraient

pas se former, le fort rayonnement ultraviolet qui leur est associé bloquant le processus d'accrétion de matière qui permet à l'étoile de se construire. Pourtant des étoiles massives (jusqu'à 120 fois la masse du Soleil) sont observées dans les galaxies. De plus, les étoiles massives sont rares, souvent distantes et elles évoluent rapidement. Il est donc très difficile de les observer au tout début de leur formation. Herschel, en sondant l'univers très froid, nous offre, pour la première fois, la possibilité de découvrir de telles sources. Sa résolution spatiale ne sera pas suffisante pour comprendre les mécanismes physiques qui conduisent à la formation de ces étoiles massives

Figure 1 : la mission Herschel

L'observatoire spatial Herschel est doté d'un télescope de type Cassegrain dont le miroir primaire a un diamètre de 3,5 m, soit le plus grand miroir lancé actuellement dans l'espace. Il a été réalisé en carbure de silicium pour réduire au maximum son poids : il pèse 250 kg et a une épaisseur de 350 mm. Le corps du satellite est constitué d'une énorme bouteille « thermos » contenant 2500 litres d'hélium liquide (au lancement) et qui contient les trois instruments scientifiques qui sont refroidis à une température proche de 4 degré Kelvin (-269 °C). Une trentaine de laboratoires ou instituts (dont une grande majorité sont européens) ont proposé et réalisé les trois instruments complémentaires sélectionnés pour être installés au plan focal du télescope Herschel. SPIRE (Spectral and Photometric Imaging REceiver) est constitué d'une caméra à trois bandes spectrales simultanées et d'un spectromètre travaillant entre 194 et 672 microns. PACS (Photoconductor Array Camera and Spectrometer) est aussi constitué d'une caméra à trois bandes, mais dont deux sont simultanées, et d'un spectromètre dont le domaine de travail est entre 55 et 210 microns. HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared) est un spectromètre à très haute résolution spectrale couvrant deux domaines, de 157 à 212 microns et de 240 à 625 microns. Les spectromètres de PACS et SPIRE sont des spectro-imageurs c'est à dire qu'il permettent d'obtenir une information spatiale (spectres en plusieurs points du ciel obtenus de façon simultanée grâce à la séparation des détecteurs en matrices).
Crédits : Vue d'artiste (ESA).





Figure 2a: Crédits: F. Motte (programme HOBYS) et les consortia PACS et SPIRE.

mais la possibilité de les répertorier sera un atout majeur pour le futur. L'interféromètre millimétrique ALMA (Atacama Large Millimeter Array; projet international opérationnel en 2011) devrait permettre de résoudre cette question en sondant le cœur des très jeunes étoiles massives découvertes par Herschel.

L'image présentée en Figure 2 montre deux régions de formation d'étoile dans notre Galaxie, la région de la Rosette et la région d'hydrogène ionisée RCW 120. Grâce à l'imagerie et à la photométrie (mesure du flux émis par les sources dans une bande de longueur d'onde donnée), dans un domaine où les jeunes étoiles émettent le maximum de leur énergie, il nous est désormais possible de caractériser, pour la première fois, leurs propriétés physiques. La Figure 3 présente un exemple de ce que le sondage Hi-GAL, en imagerie, d'une partie du plan de notre Galaxie, peut produire. Ces données constituent une mine très riche qui sera exploitée

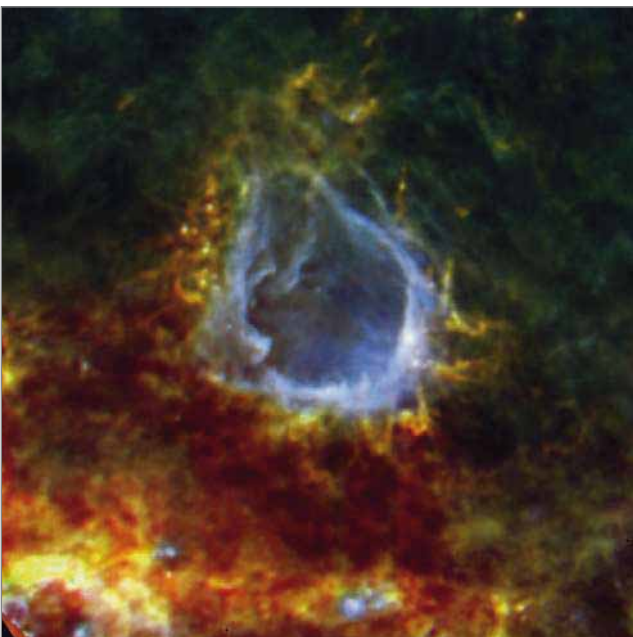


Figure 2b: la région d'hydrogène ionisée RCW 120 observée avec PACS et SPIRE. Image couleur (bleu PACS 70 microns, vert: PACS 160 microns, rouge: SPIRE 250 microns). Crédits A. Zavagno (programme HOBYS) et les consortia PACS et SPIRE.

Ces images de régions de formation d'étoiles situées dans notre Galaxie révèlent des sources très rouges observées loin des étoiles massives déjà évoluées et responsables de la formation des régions d'hydrogène ionisé (zones vues en bleu au centre). Ces étoiles sont des étoiles très jeunes qui n'étaient pas connues (car non détectées) avant les résultats de la mission Herschel.

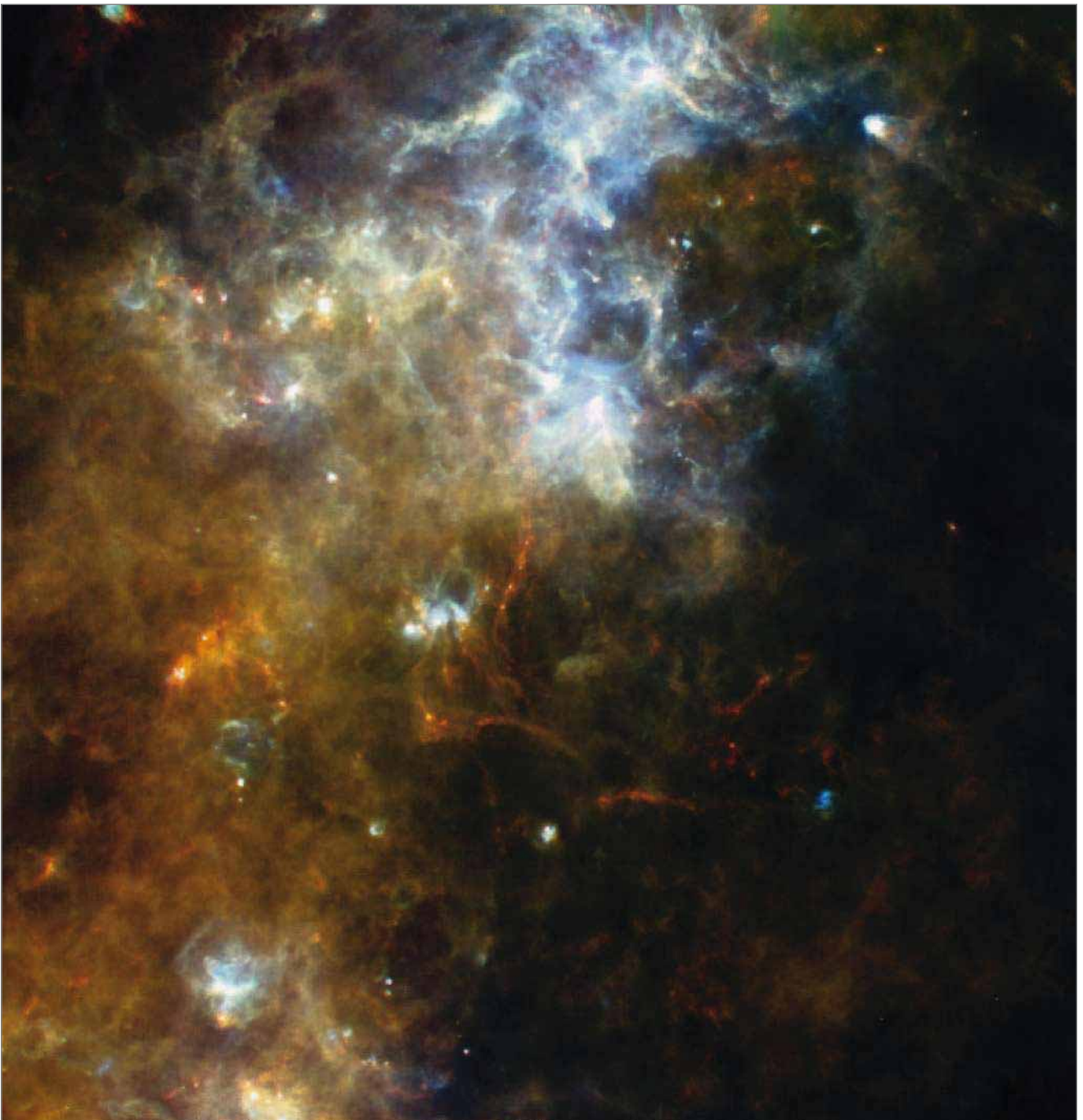


Figure 3 : une zone du plan de notre Galaxie observée avec PACS et SPIRE (programme Hi-GAL). Image couleurs Image couleur (bleu PACS 70 microns, vert : PACS 160 microns, rouge : SPIRE 250 microns). Les zones bleues sont des régions d'hydrogène ionisé dans lesquelles le gaz est chaud. En dehors de ces zones on observe de nombreux filaments plus froids contenant des surdensités contenant des étoiles en formation. La taille du champ est de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$. Crédits: S. Molinari (programme Hi-GAL) et les consortia PACS et SPIRE.

pendant de longues années après la fin de la mission. Ce qu'elles nous révèlent est que la formation stellaire semble s'organiser le long de grands filaments, observés partout dans le plan de notre Galaxie.

Les galaxies proches et lointaines

L'expansion de l'univers se traduit par l'observation d'une récession (éloignement) des galaxies les plus lointaines. Par effet Doppler, une source lumineuse qui s'éloigne émet un rayonnement à des fréquences plus basses (donc à des longueurs d'onde plus grandes). Le décalage spectral vers le rouge qui en résulte est noté

« z », exprimant le rapport de la variation en longueur d'onde à la longueur d'onde de ce même rayonnement au repos.

Herschel permet de mesurer le taux de formation stellaire et la distribution des populations d'étoiles dans les galaxies, dont celles distantes de la nôtre et donc plus jeunes (jusqu'à une époque de quelques milliards d'années après la naissance de notre univers). La matière interstellaire dans ces galaxies contient une proportion importante (et variable suivant le type et l'âge de la galaxie-hôte) de grains de poussière. Le principal moteur de l'évolution des galaxies est la formation stellaire et la compréhension de l'origine des différents types morpho-

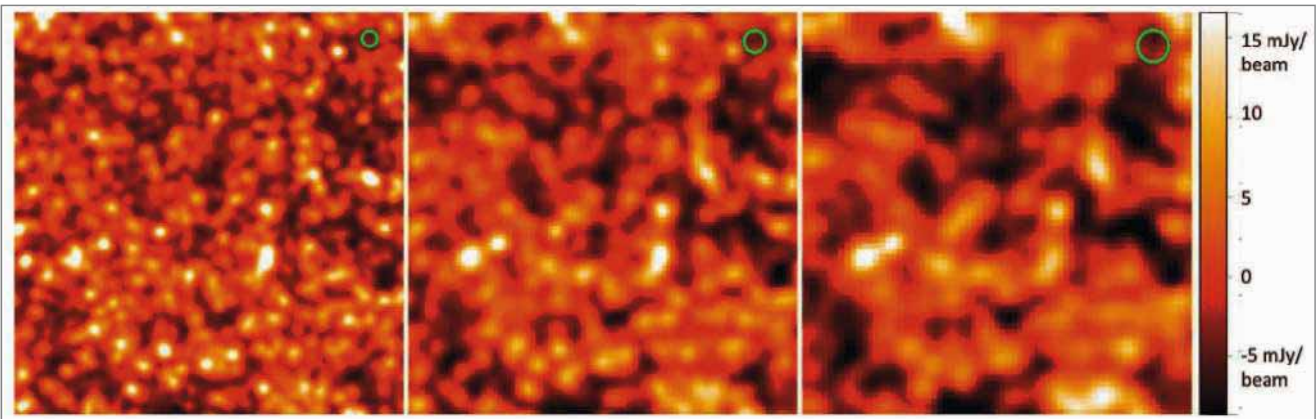


Figure 4 : programme HerMES Ces trois images ont été obtenu avec l'instrument SPIRE dans ses trois bandes photométriques (de gauche à droite : 250, 350 et 500 microns) dans la région du ciel GOODS-N (dimension: 16' x 16') et montrent la multitude de galaxies très lointaines dont la plupart sont détectées pour la première fois. La résolution angulaire (la capacité de séparer ces galaxies) est représentée par les cercles verts. Ces images illustrent le phénomène de « confusion » lié à la mesure du fond de rayonnement infrarouge cosmique: tâche difficile car toutes les galaxies à tous les décalages spectraux y contribuent et donc ne produisent pas de signatures caractéristiques propres. Ces premiers résultats montrent qu'une population de galaxies distantes non vues précédemment, parmi les plus faibles et les plus distantes détectées et résolues par Herschel, sont responsables d'une grande partie de ce fond infrarouge cosmique.
Crédits : Consortium SPIRE.

logiques de galaxie est liée à l'histoire de leur formation stellaire.

Les mécanismes qui gouvernent la formation stellaire dans les galaxies sont très mal connus. Le taux de formation stellaire peut évoluer de manière très lente ou, au contraire, de manière brutale (comme lors de la collision entre deux galaxies). Cette mauvaise connaissance est principalement liée à notre incapacité à mesurer la quantité globale d'énergie émise dans les zones d'activité associées à de grandes quantités de poussières. À grand décalage spectral, la plus grande partie de l'énergie, résultant soit de la formation stellaire soit de la présence d'un noyau galactique actif, est absorbée par les poussières et réémis dans le domaine de l'infrarouge lointain (domaine spécifique d'Herschel).

Les premiers résultats montrent qu'un grand nombre de galaxies détectées par Herschel ont un contenu important en poussières et ont donc échappé aux observations précédentes : l'énergie globale de ces nouvelles

galaxies est aussi importante que (ou peut-être même supérieure à) celle des galaxies déjà recensées. Contrairement aux attentes, les résultats d'Herschel montrent que les galaxies formant des étoiles ont un comportement relativement uniforme et que les noyaux actifs de galaxie suivent cette tendance, impliquant que, pour ces derniers, la majorité de leur énergie est due à la formation stellaire.

Les propriétés des galaxies, déduites des premiers résultats d'Herschel concernant des observations dans des champs sélectionnés par le programme GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey; destiné à l'étude de l'univers lointain par un très grand nombre d'observatoires et dans des domaines spectraux très différents), sont en cours d'analyse (Figure 4). La surprenante relative uniformité de leurs propriétés sur les 10 derniers milliards d'années de l'histoire de notre univers, partagée semble-t-il par les galaxies ayant un noyau actif, ouvre une nouvelle vision sur la naissance des étoiles dans l'univers primordial. Cela indiquerait que l'histoire de la formation stellaire est gouvernée par des processus simples et universels.

La physique du milieu interstellaire et la spectroscopie Le cycle de la matière dans le milieu interstellaire de notre Galaxie est étroitement lié à la formation des étoiles. Les étoiles massives en particulier synthétisent les éléments lourds et viennent en enrichir le milieu interstellaire lors de leur explosion en supernovae à la fin de leur vie. Un programme dédié à ce thème vise à suivre le cycle de cette matière et à en observer les variations physico-chimiques en fonction de l'état d'évolution tem-

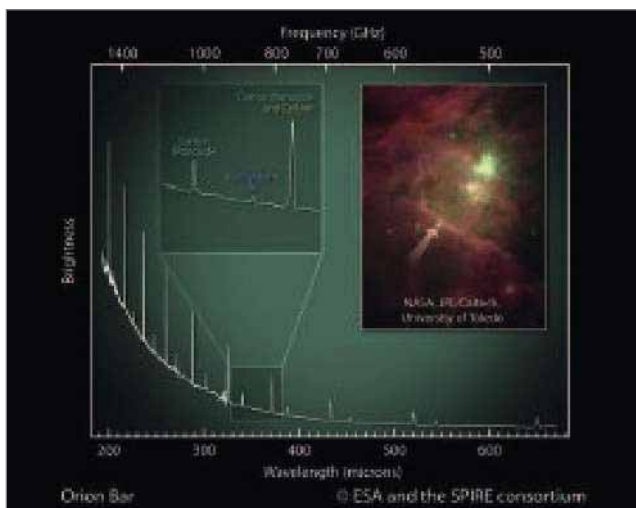


Figure 5 : la détection avec le spectromètre à transformée de Fourier de SPIRE du cation méthylidine (CH+) en direction de la Barre d'Orion.
Crédits : ESA et le consortium SPIRE.

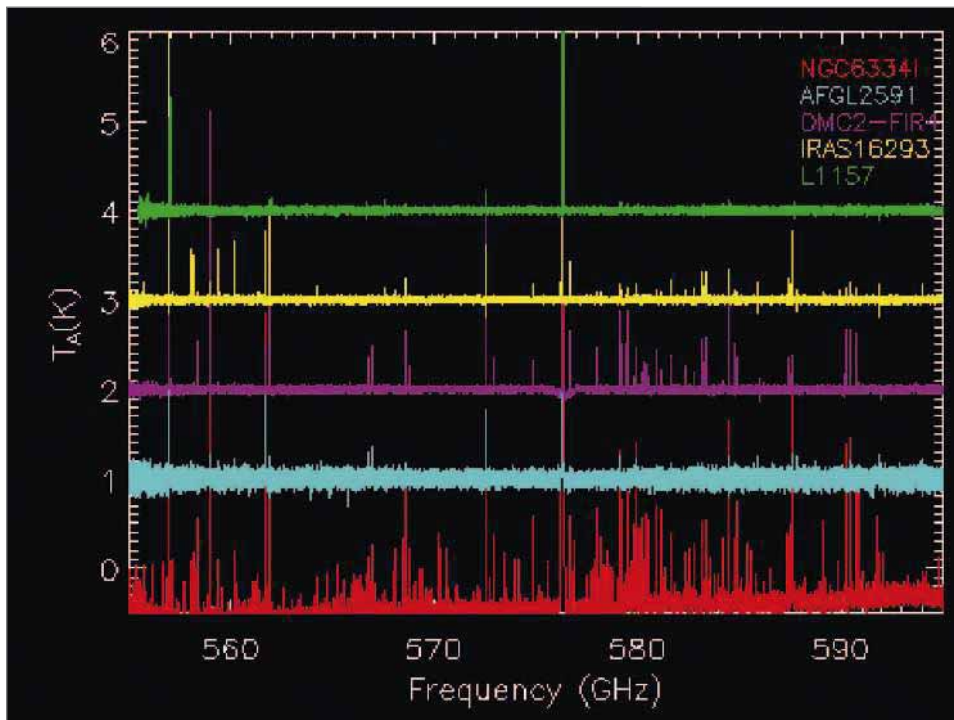


Figure 6: spectre HIFI obtenu en direction de différentes régions de formation d'étoiles dans notre Galaxie. Plusieurs programmes scientifiques exploitent cette capacité de la chimie à être un très bon "dateur", en particulier pour tracer les différentes étapes de la formation des étoiles de toutes masses. Crédits: C. Ceccarelli et le consortium CHESS.

porielle et de conditions physiques des régions observées, allant de nuages moléculaires très froids à des régions d'hydrogène ionisé très chaudes comme celles situées autour des étoiles massives.

Les renseignements obtenus avec l'imagerie ne permettent pas d'accéder aux conditions physico-chimiques qui prévalent dans ces milieux. La spectroscopie permet, grâce à l'observation de raies particulières et l'utilisation de modèles chimiques, de remonter aux conditions physiques (température, densité). Un des résultats importants d'Herschel en spectro-imagerie a été la détection et la variation spatiale de l'ion positif méthylidine (CH^+) dans plusieurs sources galactiques, en particulier dans des étoiles jeunes et dans des régions de photodissociation entourant les étoiles massives (Figure 5). Ce cation avait déjà été observé par le passé mais se pose désormais la question des mécanismes qui conduisent à sa formation.

Le spectroscopie hétérodyne à haute résolution spectrale HIFI permet des études dynamiques des objets étudiés, comme l'étude des flots associés à la formation des étoiles de toutes masses ou celle de la dynamique des chocs dans les régions de formation d'étoiles. La chimie, et surtout l'évolution des différentes espèces au cours du temps, est également un sujet d'étude très développé sur Herschel. La richesse des spectres observés obtenus avec HIFI est très impressionnante, comme illustré en Figure 6 et permet de comprendre que dans ce cas également, des années de

travail seront nécessaires à l'exploitation scientifique de ces nouveaux résultats.

Le satellite Herschel, après quelques mois d'exploitation scientifique, a montré combien, par son fonctionnement optimal, il est une mission majeure pour de nombreux domaines de l'astrophysique dont seules quelques thématiques ont été présentées ici. La communauté française a largement participé à ce succès par des réalisations techniques et une forte implication scientifique. Cette communauté est aujourd'hui très impliquée dans l'exploitation des résultats. Le caractère pionnier de la mission Herschel dans le domaine de l'infrarouge lointain ouvre clairement de nouvelles portes à l'exploration de l'univers, sous forme de nouvelles questions posées, tournées vers les générations futures d'instruments et de chercheurs ■

Pour en savoir plus :

Herschel, l'implication française et les derniers résultats

<http://www.herschel.fr>

Le programme Gould Belt

http://www.herschel.fr/cea/gouldbelt/en/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=23

Le programme HOBYS

http://www.herschel.fr/cea/hobys/en/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=4

Le programme Hi-GAL

<https://hi-gal.ifs-roma.inaf.it/higal/>

Le programme HerMES

<http://astronomy.sussex.ac.uk/~sjo/Hermes/>

L'interféromètre ALMA

<http://www.obs.u-bordeaux1.fr/electronique/ALMA/ALMA.htm>

L'année de l'astronomie 2009

Entretien de **Catherine Cezarsky**¹ par **Paul Caro**²

1. Membre de l'Académie des sciences, haut commissaire à l'énergie atomique, CEA Saclay.
2. Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS.

C *omment a-t-il été décidé que 2009 serait l'année de l'astronomie ?*

Franco Pacini est un astronome italien de renom qui était Président de l'Union astronomique internationale en 2003. Il nous a fait remarquer que cette année 2009, cela ferait exactement 400 ans que Galilée avait tourné sa lunette astronomique vers le ciel. C'était un événement intéressant à célébrer en faisant de 2009 l'année internationale de l'astronomie ! Cela a été proposé au comité exécutif, aux représentants nationaux, etc. Tout le monde a été très enthousiasmé. L'Union astronomique internationale (UAI) organise tous les trois ans une très grande réunion que nous appelons Assemblée générale, qui rassemble à chaque fois 2500 astronomes. C'est vrai-



ment une réunion importante et longue, elle dure presque deux semaines, et c'est là que les décisions afférentes sont prises. Il a été proposé à l'assemblée générale de décider que 2009 serait l'Année mondiale de l'astronomie (AMA), ce qui a été accepté à l'unanimité. À la même réunion, j'ai été élue Présidente de l'Union pour la période 2006-2009, et donc j'ai été amenée à prendre des responsabilités importantes dans la planification, puis l'organisation de l'AMA. Il nous a d'abord fallu en définir les objectifs.

L'astronomie est une science où les collaborations internationales sont très bien établies et fructueuses, nous n'avons pas besoin de l'AMA pour que se lancent des projets internationaux de grande envergure. Nous avons plutôt conçu cette année comme une célébration globale de l'astronomie et de ses contri-

butions à la société et à la culture. Elle viserait notamment à éveiller l'intérêt non seulement pour l'astronomie, mais pour les sciences en général, partout dans le monde, et particulièrement chez les jeunes. Le but était idéalement de faire connaître à chaque citoyen de la planète Terre l'émotion qu'apporte la découverte personnelle, le plaisir de partager des connaissances fondamentales à propos de l'Univers et de la place que nous y occupons, et l'importance de la culture scientifique. Nous avons pris comme devise : « à toi de découvrir l'univers ». Avec mon équipe, nous voulions faire de l'AMA un évènement un peu politique et surtout vraiment mondial, qui réveille des vocations scientifiques dans le monde entier. L'Union astronomique internationale comprenait à ce moment là 66 pays membres, plus quelques astronomes indi-

viduels de quelques autres pays, alors que les Nations unies regroupent 192 nations ; l'AMA était une occasion unique d'introduire l'astronomie dans des pays où elle était encore peu ou pas du tout développée, dans certains pays pas même au niveau des amateurs.

Il nous fallait donc travailler avec d'autres organismes internationaux et nous nous sommes tout naturellement tournés vers l'UNESCO. Ce fut un assez intense effort de lobbying mais nous avons réussi à obtenir en août 2005 que l'UNESCO reconnaisse l'intérêt de cette année consacrée à l'astronomie ; à partir de là elle a agi en partenariat avec l'UAI. Il a ensuite fallu aussi obtenir l'accord des Nations unies, ce qui était plus difficile. Par exemple, certains pays d'Europe avaient décidé qu'ils ne voulaient plus d'années mondiales ! Il a fallu intervenir auprès de très nombreux pays. L'Italie était le meneur de jeu, le Japon a accepté de jouer le rôle de co-proposant. J'étais Directrice générale de l'ESO à l'époque et j'avais la chance d'avoir avec moi à l'ESO deux personnes, Claus Madsen et Eniko Patkos, qui connaissaient bien le système des Nations unies. Nous sommes allés faire une présentation de l'AMA au siège de l'ONU à New York en fin 2007. Nous avons exposé nos objectifs et montré de belles images du ciel, et nous avons obtenu l'appui de l'Assemblée générale, qui a émis une résolution érigeant l'AMA 2009. Cette reconnaissance par l'ONU a été cruciale pour avoir l'effet d'entraînement souhaité dans de nombreux pays. Ensuite il a fallu trouver des sponsors et de l'argent, ce qui fut difficile. Mais nous avons obtenu l'appui d'un industriel

du spatial, Thalès-Alenia Space, d'un constructeur de télescopes amateurs, Celestron, et surtout celui de très nombreux instituts et centres de recherche d'astronomie à travers le monde. Nous avons pu engager un jeune portugais, Pedro Russo, comme coordinateur ; lui-même et une petite équipe, managée par Lars Lindberg Christensen, le très dynamique officier de presse de l'UAI, ont été formidablement efficaces. On a demandé à chaque pays membre de l'UAI de nommer un seul point de contact, pour faciliter la communication, puis nous avons essayé de toucher, par tous les moyens possibles, les pays non membres. *In fine* 148 nations se sont associées à AMA, couvrant presque toute la surface continentale, excepté en Afrique. Pour y arriver, nous avons œuvré de concert avec les astronomes amateurs, qui jusque là avaient peu collaboré avec l'UAI.

Chaque pays avait son propre programme. Celui de la France était particulièrement brillant. Le point de contact en France est Annie Chantal Levasseur, qui collabore avec Françoise Combes. Elles ont mis en place un Comité à l'Académie des sciences qui s'est chargé de labelliser les projets, et il y a eu plus de 300 projets à travers le territoire (voir <http://www.astronomy2009.fr/>). Beaucoup d'astronomes à cette occasion ont donné des conférences grand public. En fait, la France n'avait pas besoin d'aide ! Par contre, beaucoup de pays n'étaient pas aussi bien outillés que la France. Pour les aider nous avons proposé un menu de projets : douze « pierres angulaires » que les pays étaient libres d'adapter ou pas. Par exemple au mois de mai, il y a eu les « cent heures de l'astronomie » : pendant trois nuits le public a été invité à regarder le ciel à travers un télescope. Devant le succès de cette initiative, nous avons refait l'évènement pendant deux nuits en octobre, où Jupiter et les satellites galiléens étaient visibles. Notre coordinateur estime que trois millions de personnes à travers le monde ont vécu cette expérience. En mai, en même temps, l'ESO a réalisé sur 24 heures « le tour du Monde en 80 observatoires », une succession de visites d'observatoires à travers la planète, diffusées sur la toile en temps réel. Il y a eu aussi beaucoup d'images d'astronomie exposées, en particulier des images géantes dans le Métro parisien, aux stations Luxembourg et Montparnasse. Un petit télescope, comparable à celui de Galilée mais avec une bien meilleure performance, conçu par des astronomes, a été mis en vente à 15 euros: 175000 exemplaires ont été vendus, un grand nombre d'entre eux distribués dans les pays en voie de développement. Un projet dédié à la formation des professeurs de lycée a aussi très bien marché. Il y a eu un Colloque sur les femmes astronomes, malheureusement un peu tardif.

En janvier 2010, nous éprouvions un sentiment de tristesse à la clôture des travaux de l'année 2009, mais

il reste un ensemble pérenne d'activités, « Au-delà de 2009 », notamment dans le domaine de l'enseignement de l'astronomie où l'UAI a intensifié fortement son action.

Cette année, un rapport sur l'AMA de 1300 pages a été établi ; il peut être consulté à http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau1007/

Quel a été le rôle de la presse, et de la presse professionnelle, dans cette campagne ?

La couverture de presse a été très variable de pays à pays, et pas extraordinaire en France, excepté pour les revues spécialisées en science. En 2009, toutes les revues scientifiques, y compris *Science* et *Nature*, ont dédié à l'AMA des couvertures et/ou une série d'articles. La presse a été plus suiveuse que meneuse ; c'est vraiment le public et le bouche à oreille, les films, les spectacles de planétarium, les animations, les expositions, qui ont fait le succès de l'AMA. Au bilan (voir rapport final), nous avons estimé que 815 millions de personnes sur le globe ont été touchées par l'AMA.

Et, sur le plan scientifique ?

Sur le plan scientifique, l'année astronomique 2009 a également été faste. L'astronomie connaît actuellement un âge d'or et tous les ans amènent leur moisson de nouveautés et découvertes. Trois satellites astronomiques ont été mis sur orbite en 2009. Tout d'abord, dès le mois de mars, le satellite américain Kepler, qui fait suite à notre Corot pour la recherche de planètes extrasolaires. En mai, l'ASE a lancé en même temps, sur une fusée Ariane, les deux importants satellites que sont Planck et Herschel. Planck doit étudier le rayonnement fossile du Big Bang, à 3K, et ainsi permettre des progrès dans la compréhension de la genèse des grandes structures de l'Univers. Planck, en mesurant le degré de polarisation de ce rayonnement, pourrait amener des informations cruciales sur l'« énergie noire » qui est censée accélérer l'expansion de l'Univers. Herschel est un observatoire dans l'infrarouge lointain, avec un télescope de 3,50 m de diamètre, le plus grand télescope jamais mis sur orbite, qui va compléter les mesures faites par le satellite européen ISO et le satellite américain Spitzer. Les premiers résultats d'Herschel commencent à paraître. En bref : Herschel découvre, dans les nuages moléculaires de notre galaxie, des centaines de cœurs de gaz et de poussière, embryons d'étoiles. Leur répartition en masse est similaire à celle des étoiles, ce qui montre que ce sont les processus en jeu lors de la fragmentation des nuages qui sont déterminants pour fixer la masse des étoiles. Par ailleurs, les galaxies émettent la majorité de leur énergie dans l'infrarouge lointain. Avec Herschel on peut pour la première fois mesurer

la température des gaz et des poussières dans des galaxies lointaines, et ainsi mieux les classer et suivre leur évolution à travers l'histoire de l'univers. Les résultats actuels de ce satellite tendent à montrer que les galaxies du passé diffèrent bien moins qu'on ne le croyait de galaxies plus récentes.

La semaine du lancement de Planck, la NASA a effectué une nouvelle mission vers le célèbre télescope spatial Hubble, et a placé à son foyer deux instruments nouveaux : une caméra et un spectromètre.

Quelles sont les controverses en cours dans le monde de l'astronomie ?

Une controverse persiste depuis longtemps : de quoi est faite la matière « invisible » de l'Univers, la matière noire ? Il y a depuis longtemps des pistes, tant pour la part baryonique que pour la part, majeure, faite de matière d'un autre type, et Herschel d'un côté pour la matière baryonique, le LHC du CERN de l'autre pour la matière non baryonique, pourront peut-être révolutionner le sujet. À moins que... la matière noire ne soit qu'une erreur d'interprétation due à une incompréhension de la théorie de la gravitation. Plus récemment, avec la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers, le mystère s'épaissit, on attribue cette accélération à l'effet d'une « énergie noire », totalement non-comprise. Là encore, la principale controverse porte sur la possibilité ou non qu'une modification de la théorie de la gravitation explique les effets attribués à l'énergie noire ■

Éviter, à l'occasion de la crise financière, de nouvelles méprises concernant les probabilités



Par **Marc Yor**

Membre de l'Académie des sciences,
professeur à l'université Pierre et Marie Curie.

Le développement de toute science, ou plutôt : l'accession au rang de science, de tout domaine de connaissances aux contours restés longtemps flous présente des aspects prométhéens, qui réjouissent les uns : « les modernes », amis du risque et effraient les autres : « les anciens », ennemis du risque. Les probabilités (on dit souvent « la théorie des probabilités », mais cette théorie est bien récente..., ou encore « le calcul des probabilités » mais en mathématiques, tout développement n'est pas réductible à un calcul), dont on peut, assez raisonnablement dater l'accession au rang de science aux alentours de la publication de l'axiomatisation de Kolmogorov, c'est-à-dire 1933 (il y a moins de quatre-vingts ans!) n'échappent pas, en particulier au travers de leurs multiples applications, à ce traditionnel débat des anciens et des modernes. Mais, à ce débat général, s'ajoute en outre, plus ou moins inconsciemment, un questionnement plus particulier, d'ordre philosophico-métaphysique : peut-on maîtriser le hasard ? et ce, grâce à une théorie mathématique ? Bien que jamais posé tout à fait explicitement, ce questionnement figure bel et bien dans les arrières pensées de bon nombre d'observateurs, extérieurs au (petit !) cercle probabiliste. Je réponds tout de suite que cette question de maîtrise est une mauvaise question. Ce n'est pas de cela qu'il s'agit, ou plutôt la science probabiliste est beaucoup plus modeste, comme d'ailleurs toutes les sciences. Elle essaie d'abord, et surtout, de décrire les phénomènes liés au hasard, ou plutôt les conséquences de ces phénomènes. Les grands savants probabilistes sont ceux qui ont découvert des lois universelles mettant en jeu, dans la plupart des situations, le renouvellement avec des distributions¹ identiques, et de façon indépendante au cours du temps, d'un même phénomène aléatoire.

Une question à laquelle ces savants (citons entre autres : De Moivre, Laplace, E. Borel, A. Kolmogorov, P. Lévy, H. Cramer) ont répondu est : lorsque le temps devient grand, que peut-on dire de la moyenne temporelle de cette grandeur aléatoire que l'on cherche à étudier ?

Trois réponses essentielles à cette question ont pour noms :

Loi des grands nombres, théorème central limite, principe des grandes déviations. (Voir l'appendice I).

Laissons de côté momentanément ce petit essai de description de la théorie des probabilités, pour aborder certains aspects, liés aux probabilités, de la crise financière qui secoue la planète depuis trois ans déjà, ce qui nous fera rebondir ensuite sur la maîtrise de l'aléatoire. Depuis quelques mois, pas une journée ne s'écoule sans qu'un article, écrit la plupart du temps par une personne n'ayant aucune connaissance, ni en mathématiques (financières ou non) ni en économie, ne paraisse dans certains quotidiens réputés sérieux.

Le ton de ces articles est souvent d'une assez grande violence, violence d'autant plus grande que l'auteur est plus éloigné des domaines en question.

Que la crise financière soit une crise majeure ne demande pas de grandes démonstrations, mais la prolifération de ces articles, utilisant des termes tels que : criminels contre l'humanité, mercenaires, naïfs, escrocs, et j'en passe... devient choquante (le « mot » suivant du professeur Guesneri, du Collège de France, beaucoup moins violent, correspond peut-être mieux aux événements : « En ce qui concerne la crise financière, les mathématiciens sont innocents, et cela dans les deux interprétations du terme ») et va aboutir, très vraisemblablement, si ce n'est déjà fait, à un rejet global par une grande partie de la population française, voire européenne, ou mondiale, de tous les acteurs du domaine, qui, en fait, n'est autre que le monde économique dans son ensemble.

Le slogan : « tous pourris » précède souvent de peu une étape plus musclée. Est-ce là où nous voulons arriver ? Il est remarquable que la France ait quelques millions de sélectionneurs auto-proclamés de l'équipe de France de football ainsi que beaucoup d'observateurs très perspicaces des bonus de traders, de managers, etc.. et de professeurs de mathématiques. Dans ces deux ou trois domaines, les sélectionneurs critiques brillent par leur incompétence complète. Ne leur demandez surtout pas la différence entre traders, quants, managers. Tout cela est kif-kif. Revenons précisément à notre sujet, et examinons calmement les données de base, comme tout observateur digne de ce nom devrait le faire.

1. Terme équivalent pour : lois de probabilité.

Il y a maintenant 110 ans (!) que Louis Bachelier dans sa thèse (1900) a utilisé le mouvement brownien pour modéliser les cours erratiques de la Bourse. Les graves problèmes actuels, et la mise en question – à juste titre – des différentes modélisations qui ont suivi celle de Bachelier montrent à l'envi que notre compréhension des aléas des marchés est plus que modeste. Ceci devrait amener, ainsi d'ailleurs que le demandait Alan Greenspan, à beaucoup d'humilité. Comparons par exemple la situation avec celle des recherches sur le virus du sida où, en un temps bien plus court, des avancées très importantes ont été faites.

Cependant, dans le domaine économique qui nous importe ici, les conditions d'échanges, de production, les techniques (électroniques, mathématiques,...) bouleversent la situation très fréquemment, si bien qu'il n'existe certainement pas de « super-modèle », valable pendant des décennies. Bien au contraire, si l'on veut pouvoir expliquer un tant soit peu les marchés, il faut actualiser les modèles en permanence. J'en profite pour dresser un petit historique de ces actualisations successives :

- La modélisation de Louis Bachelier, mentionnée plus haut, précède de cinq ans les travaux fondateurs d'Albert Einstein sur le même mouvement brownien (1905), étudié d'un point de vue physique.
- En 1965, Paul Samuelson corrige Bachelier en considérant l'exponentielle du mouvement brownien.
- En 1973, la formule de Black-Scholes, obtenue grâce au calcul stochastique d'Itô, donne le « juste prix » d'une option (dite européenne).
- Les années 70 et 80 voient le début de la théorie du non-arbitrage^{2,3}, dont l'axiome fondateur est : « dans un marché efficient, il n'y a pas de gain sans risque ». Les noms de F. Delbaen et W. Schachermayer sont maintenant attachés à cette théorie.
- Octobre 1987 : le krach boursier amène les banques de la place de Paris, puis, un peu plus tard, des autres places financières, Zürich et Londres en particulier, à demander des formations de qualité concernant la théorie des processus aléatoires. Formations qui seront dûment fournies, de banque à banque, par la communauté probabiliste.

2. Attention : le mot arbitrage est un faux-ami ; il signifie précisément, dans le contexte financier, l'exploitation d'un déséquilibre (temporaire) du marché pour réaliser un gain certain, sans risque, ni apport...

3. Cette recherche théorique est à comparer à l'attitude opposée des techniciens de l'arbitrage statistique : « Nous n'avons que faire de la théorie du non-arbitrage ; notre métier est d'être à l'affût de tout arbitrage possible, et de l'exploiter... ».

4. Y a-t-il un rapprochement à faire avec « le monde flottant » japonais, à l'époque Edo ?

- Avec l'effondrement du bloc socialiste (fin 1989 - début des années 90), les modèles aléatoires incorporent les sauts brutaux des cours qui se manifestent sur les marchés, en remplaçant le mouvement brownien par des processus de Lévy, « bien choisis ».

- 1990 – 2010 : développement des masters de probabilités et finance, dans de nombreuses universités françaises et européennes. Affluence d'étudiants de grande qualité.

- Août 2007 : explosion de la crise financière à Wall Street, due aux subprimes.

- Août 2008, jusqu'à aujourd'hui : déferlement de la crise au niveau mondial.

Cette explosion et ce déferlement amènent à se poser à nouveau les questions fondamentales. Le monde dans lequel nous vivons est d'une grande complexité. La distance – aussi bien temporelle que spatiale – entre les avancées scientifiques et leurs applications s'amenuise de plus en plus.

Que certains s'appuient sur cette complexité pour créer des écrans d'opacité, et mystifier clients, sociétés, états... ne fait aucun doute.

Toutefois, une certitude m'habite, et je le répète : ce n'est pas le slogan « tous pourris » qui résoudra nos problèmes mais, bien au contraire, des efforts de recherche à long terme pour comprendre les nombreux aspects du monde fluctuant⁴ qui est le nôtre, aspects qui, de bien des manières, nous restent étrangers.

Il est d'ailleurs extrêmement intéressant de noter qu'il y a, à l'heure actuelle, un retour du stochasticisme (: tout phénomène est tributaire du hasard) vers le déterminisme (citons déjà A. Einstein : « Dieu ne joue pas aux dés »). Voici deux exemples très récents :

- À ETH Zürich, des chercheurs – à l'origine, physiciens – mettent en doute l'idée assez répandue dans le milieu des mathématiques financières, que l'éclatement des bulles financières pourrait être expliquée par l'existence de martingales « locales », qui ne sont pas des martingales (autrement dit, l'équilibre de telles « martingales » n'est valable que localement dans le temps). Des modèles purement déterministes d'équations différentielles explosives, semblent correspondre à l'éclatement de certaines bulles.

- À Angers, lors du colloque Dynstoch (16-19 juin 2010), la conférence plénière du professeur Shiryaev du Steklov Institute de Moscou a été consacrée à essayer de rapprocher l'axiomatique de Kolmogorov de la notion de collectifs due à Von Mises, qui s'efforçait de répondre à la question : comment évaluer le caractère aléatoire d'une suite de nombres réels ?

Voir l'appendice 2, ci-après. Autrement dit, la crise financière aidant, on revient sérieusement aux questionnements et doutes fondamentaux concernant la nature de l'aléa, lesquels occupaient les savants du hasard au début du XX^e siècle et qui semblaient avoir été réglés une fois pour toutes par l'axiomatisation de Kolmogorov.

Pour conclure, peut être de façon un peu trop rapide et optimiste, questionnée et irriguée par les graves problèmes de la crise actuelle, la recherche probabiliste a encore de beaux jours devant elle.

Appendice 1. Description rapide de la théorie des probabilités

- La loi des grands nombres affirme la convergence de la moyenne arithmétique de N variables aléatoires indépendantes, équidistribuées, et intégrables, vers leur moyenne commune, lorsque N tend vers l'infini. C'est un résultat au premier ordre.
- Le théorème central limite décrit la vitesse à laquelle la convergence ci-dessus a lieu, et que, sous l'hypothèse de moment d'ordre 2, la loi limite est la loi gaussienne. C'est un résultat au second ordre.
- Le principe des grandes déviations examine la petitesse de la probabilité de cette moyenne arithmétique à l'ordre N , prenant les valeurs « en dehors de la moyenne ». L'expression de cette petitesse est beaucoup moins universelle que la validité du théorème central limite, ce qui ne diminue en rien l'importance du principe des grandes déviations, mais sa formulation précise est plus complexe que celles des deux lois fondamentales énoncées précédemment.

Appendice 2. Recherches autour du caractère aléatoire d'une suite

Je ne citerai ici que les noms des principaux auteurs ayant participé à ces recherches, et un résumé très succinct de leurs contributions :

R. von Mises (1919 – 1931) introduit la notion de collectif.

F. Hausdorff (1920) met en doute l'existence de collectifs.

A. Wald (1937) montre l'existence d'une classe non-vide de collectifs !

J. Ville (1939) construit une suite satisfaisant aux axiomes de von Mises, mais trop régulière !

A. Church (1940) valide la notion de collectif, au travers de la théorie des algorithmes.

A. N. Kolmogorov montre que l'on peut restreindre la classe des collectifs de von Mises – Wald- Church, notée $A(MWCh)$ (A , pour aléatoire).

Ainsi, $A(K) \subset A(MWCh)$

Puis, Kolmogorov pose la question :

Existe-t-il une classe $A(?)$ qui serait la classe des suites authentiquement aléatoires ?

P. Martin-Löf (1966) introduit la classe $A(T)$ des suites « effectives », très difficiles à construire.

Levin et Schorr montrent que : $A(C) = A(T)$, où $A(C)$ est la classe des suites chaotiques, obtenues à partir de la théorie de la complexité de Kolmogorov. Signalons encore que J. Ville (1939) a proposé la classe $A(NP)$, NP signifiant (suite) non-prévisible, c'est-à-dire n'admettant pas de stratégie gagnante.

À l'heure actuelle, on dispose de la suite d'inclusions :

$$A(?) \subset A(C) = A(T) \subset A(NP) \subset A(K) \subset A(MWCh)$$

On ne sait toujours pas si $A(T)$ et $A(NP)$ sont identiques, et on ne sait pas définir $A(?)$.

Remerciements :

- Le contenu de l'appendice 2 est tiré précisément de la conférence, déjà citée, du professeur Shiryaev, que je remercie très sincèrement.
- Je remercie également le professeur P. Embrechts de ETH Zürich, pour sa lecture critique d'une version de cette note ; P. Embrechts a d'ailleurs donné à Vienne (Autriche) le 17 juillet 2010, une conférence où il discutait de la notion d'Uncertainty abondamment traitée par l'économiste F. Knight et liée à celle de Randomness. Cet économiste n'est d'ailleurs autre que le père du grand probabiliste F. Knight (1937-2007), auquel on doit -en particulier- la théorie markovienne de la prédiction.
- Je n'ai pu, faute de temps, incorporer un certain nombre de remarques collationnées par le professeur M. Jeanblanc (Université d'Evry). Par ailleurs, une rencontre entre probabilistes et économistes est prévue à l'Académie des sciences, les 11 et 12 octobre 2010, et a pour titre : Mathématiques et risques financiers : regards croisés d'économistes et de mathématiciens ■

L'Académie des sciences s'est associée à l'éditeur De Vive Voix pour une collection de livres audio « L'Académie raconte la science »

Cette nouvelle collection donne la parole aux membres de l'Académie des sciences qui, pendant une heure et dans un langage simple, emmènent les auditeurs loin dans la compréhension de leur discipline. Elle contribue, d'une manière vivante, à placer la science au coeur de notre culture. Une quinzaine de titres sont prévus pour l'instant, les trois premiers parus en mai 2010 étant :

Le cerveau et l'art

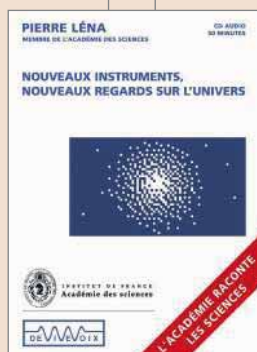
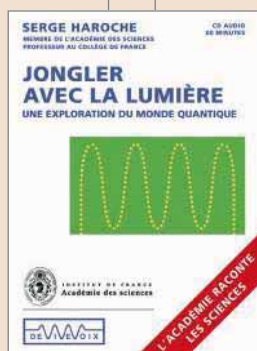
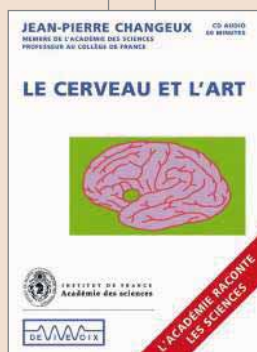
Jean-Pierre Changeux, neurobiologiste, professeur au Collège de France et professeur à l'Institut Pasteur

Comment notre cerveau réagit-il durant la contemplation de l'oeuvre d'art et comment le cerveau de l'artiste peut-il produire une oeuvre d'art ? Les connaissances sur le cerveau ont beaucoup progressé durant les dernières décennies et permettent d'apporter des réponses à ces questions. Jean-Pierre Changeux met en relation ce que nous savons de notre cerveau et l'expérience que nous ressentons devant une oeuvre d'art. Il trace ici les grandes lignes de recherche d'une discipline encore nouvelle qui rapprocherait les sciences biologiques et les sciences humaines dans la grande tradition multidisciplinaire du siècle des Lumières.

Jongler avec la lumière, une exploration du monde quantique

Serge Haroche, physicien, professeur au Collège de France

Depuis le début du XX^e siècle, la physique quantique nous a révélé le monde étrange



de l'infiniment petit. Dans celui-ci, nos certitudes se brouillent. Les particules de matière ou de lumière n'y obéissent pas aux lois qui nous sont familières, elles se manifestent simultanément dans des états différents alors qu'à notre échelle macroscopique, les objets faits de ces mêmes particules obéissent à des lois prévisibles. Les expériences de Serge Haroche consistent à piéger les particules à la lisière des deux mondes, pour comprendre comment notre monde classique émerge du monde quantique. Tout au long de cette exploration, Serge Haroche donne les bases qui nous permettent de l'accompagner dans cet univers quantique.

Nouveaux instruments, nouveaux regards sur l'Univers

Pierre Léna, astrophysicien à l'Observatoire de Paris

Durant les dernières décennies, de nouveaux instruments d'observation et des progrès dans la résolution des images ont donné lieu à des découvertes extraordinaires. Pierre Léna, qui a notamment contribué au développement de l'astronomie infrarouge et à de nouvelles méthodes d'imagerie astronomique à haute résolution, est l'un des grands spécialistes de cette observation. Il décrit ici ces innovations instrumentales et s'attarde sur deux découvertes majeures récentes : le trou noir qui occupe le centre de notre galaxie, et les exoplanètes, ces planètes qui tournent autour d'étoiles autres que le soleil ■

http://www.academie-sciences.fr/publications/autres/cd_de_vive_voix.htm

Présentation des « France-Hong Kong Distinguished Lectures »

Par **Philippe G. Ciarlet**

Membre de l'Académie des sciences, Chair Professor,
Department of Mathematics, City University of Hong Kong,
Tat Chee Avenue.

Peu avant ma venue à City University of Hong Kong (en février 2002), Jean Dercourt, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, m'avait confié la mission de développer, en étroite collaboration avec lui, les relations entre l'Académie des sciences et la communauté scientifique de Hong Kong. À cet effet, nous avons instauré un cycle de "Conférences de prestige", destinées à être données de façon régulière (en principe une fois ou deux fois par an) à City University of Hong Kong par des Membres de l'Académie des sciences.

Chacune de ces conférences est destinée à présenter (en anglais) à un public essentiellement universitaire, mais venu de tous les horizons, aussi bien des développements scientifiques récents que les réflexions générales qui peuvent les accompagner. Ce projet a reçu un accueil particulièrement chaleureux de la part du Consul général de France à Hong Kong, M. Serge Mostura à l'époque, qui a d'ailleurs bien voulu les placer sous l'égide du Consulat général de France. D'un commun accord, nous les avons baptisées "France-Hong Kong Distinguished Lectures". En voici la liste :

1. Philippe Kourilsky, Professeur au Collège de France, le 19 janvier 2005 ; titre "Neglected Diseases : World-wide Problems of Research, Regulation and Ethics", en présence de M. Serge Mostura, de Jean Dercourt, et du Professeur H.K. Chang, Président à l'époque de City University.
2. Claude Cohen-Tannoudji, Prix Nobel de Physique (1997), Professeur au Collège de France, le 1^{er} mars 2006 ; titre "Manipulating Atoms with Light: Achievements and Perspectives".

3. Claude Cohen-Tannoudji, Prix Nobel de Physique (1997), Professeur au Collège de France, le 27 février 2007 ; titre : "Measuring time : Atomic Clocks and Ultracold Atoms".
4. Jean-Marie-Lehn, Prix Nobel de Chimie (1987), Professeur au Collège de France, le 30 octobre 2007 ; titre "From Matter to Life: Chemistry? Chemistry!".
5. Jean-Christophe Yoccoz, Médaille Fields (1994), Professeur au Collège de France, le 5 Novembre 2008 ; titre : "Random Behavior of Deterministic Systems".
6. Jacques Livage, Professeur au Collège de France, le 11 mars 2009 ; titre : "Bio-inspired Nanostructured Materials".
7. Pierre Corvol, Président du Collège de France, le 7 mai 2009 ; titre : "Deciphering the Vascular Tree".
8. Albert Fert, Prix Nobel de Physique (2007), Professeur à l'université de Paris-Sud, le 21 octobre 2009 ; titre : "Spintronics : Electrons, Spins, Computers and Telephones".
9. Jean Salençon, Président de l'Académie des sciences, le 8 septembre 2010 ; titre : "Sustainable and Realistic Commitments for the Supply of Energy".

Toutes ces conférences ont chacune remporté un très grand succès et ont été honorées de la présence du Consul général de France et du Président de City University of Hong Kong qui, à chaque fois, ont bien voulu prononcer une introduction ■

Événements climatiques extrêmes

Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux

Rapport RST n° 29

Sous la coordination de **Henri Décamps**¹

Editions EDP Sciences (avril 2010, 240 pages, 28 euros)

Notre planète est confrontée à des événements extrêmes de plus en plus dévastateurs. À l'échelle mondiale, les 25 catastrophes les plus coûteuses entre 1970 et 2009 sont toutes survenues après 1987, et plus de la moitié d'entre elles depuis 2001. Sur ces 25 catastrophes, 23 étaient liées aux conditions climatiques.

La France n'est pas épargnée: les tempêtes de décembre 1999 y ont provoqué 88 morts, privé 3,5 millions de foyers d'électricité et coûté plus de 9 milliards d'euros. La canicule de 2003 a entraîné près de 15 000 décès surnuméraires du 1er au 20 août. La récente tempête Xynthia, avec ses ruptures de digues, a provoqué 53 morts, s'ajoutant à tant d'autres tragédies survenues dans des zones inondables, et nous interrogeant. Sommes-nous prêts par exemple à affronter une crue comparable à celle de 1910 dans le Paris de demain?

Dans le contexte actuel de changement climatique, nous savons que nous devons nous préparer à des événements extrêmes plus dangereux, quelquefois inédits. Ces événements voient leurs effets amplifiés par le développement urbain, le surpeuplement des zones littorales et l'anthropisation des milieux naturels. Ils représentent de véritables « trappes à pauvreté » pour les pays les plus pauvres de la Planète.

Un réel besoin d'anticipation existe donc: notre pays est-il prêt à y répondre? Participe-t-il suffisamment aux actions internationales visant à réduire les risques? Dispose-t-il d'une information scientifique appropriée?

La France n'est pas moins vulnérable que d'autres pays. Elle doit renforcer ses capacités de prévention, de réponse et de résilience, tant dans le cadre de politiques intégrées de gestion des risques de catastrophes que dans celui de plans d'adaptation au changement climatique. Ce renforcement suppose le développement de systèmes de vigilance couvrant davantage de risques et bénéficiant d'avancées obtenues entre autres dans les domaines de la météorologie et de la santé. Il suppose aussi un aménagement du territoire permettant d'améliorer la viabilité des systèmes écologiques et sociaux – notamment en protégeant leur diversité. Ce renforcement requiert enfin des solutions de couverture financière incitatives pour prévenir les catastrophes, de même que pour les gérer quand elles surviennent. Un effort constant d'éducation du public et des nouvelles générations s'avère indispensable.

Tout ceci passe par des programmes de recherche fédérateurs d'excellence, s'appuyant sur des données de qualité, sur une validation des modèles climatiques et hydrologiques, sur l'intégration dans ces modèles de connaissances issues des sciences biologiques, humaines et sociales. Investir dans de tels programmes s'impose à tous ■

Cultiver la science, la formation continue des professeurs enseignant les sciences

Les lundi 12 et mardi 13 avril derniers, l'Académie des sciences a tenu un colloque de deux jours, Cultiver la science, la formation continue des professeurs enseignant les sciences, prolongeant la réflexion sur la formation initiale engagée lors d'un colloque tenu à Paris en octobre 2007 sur le thème La formation des maîtres à l'enseignement des sciences : quel avenir ?, dont les conclusions ont été publiées en novembre 2007 (Recommandations de l'Académie des sciences sur la formation des professeurs à l'enseignement des sciences). http://www.academie-sciences.fr/actualites/textes/formation_13_11_07.pdf

Ce colloque, organisé par la DEF (Délégation à l'éducation et à l'information), a rassemblé près de 120 participants.

Accueillie au CNAM par Christian Forestier, administrateur général du Conservatoire, cette manifestation a été ouverte par Jean Salençon. C'est Jean Dercourt qui, à l'École nationale de Chimie-Physique-Biologie de Paris

(ENCPB, aujourd'hui Lycée Pierre-Gilles de Gennes), où se déroulaient les échanges et travaux de la seconde journée, en a assuré la clôture, après les allocutions de Jean-Michel Blanquer, Directeur général de l'Enseignement scolaire et Patrick Hetzel, Directeur général de l'Enseignement supérieur et de l'insertion professionnelle.

Ce colloque s'est attaché à dresser un état des lieux de la formation continue existante mise en place par le ministère de l'Éducation nationale et par d'autres acteurs et institutions, à identifier le rôle et la contribution des uns et des autres et à procéder à une comparaison avec la situation dans d'autres pays européens, pour dégager perspectives et préconisations, notamment en direction des pouvoirs publics.

Un document récapitulant l'ensemble des actions de formation continue existantes sur le territoire national a été élaboré préalablement à cette rencontre, puis complété et remanié à cette occasion. Par ailleurs ont été rassemblés les éléments nécessaires à la rédaction d'un Avis et de Recommandations qui, après examen et révision par différentes instances de l'Académie, seront soumis à son approbation pour être adoptées dans les mois à venir ■

