

300 questions à un astronome

Anton Vos

Préface de Michel Mayor

Cet ouvrage contient tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'astronomie sans même avoir songé à le demander. Durant quatre ans, de 1999 à 2002, l'Observatoire astronomique de l'Université de Genève a ouvert un site Internet dans lequel le public était invité à poser toutes les questions qu'il souhaitait sur les planètes, les étoiles, les galaxies et bien d'autres objets exotiques de l'univers. Les réponses ont toutes été rédigées par les spécialistes de l'Observatoire, une trentaine ayant participé à l'exercice. Tous les types de questions – 300 en tout – s'y côtoient, des plus naïves – qui ne sont généralement pas les moins pertinentes – aux plus complexes. Anton Vos, journaliste scientifique, s'est chargé de la compilation et de la réécriture des textes pour qu'ils paraissent dans un langage accessible à tous.

Anton Vos est journaliste scientifique et physicien de formation. Il a codirigé la rubrique «Sciences» du quotidien *Le Temps* entre 1998 et 2004 et travaille actuellement pour le magazine *Campus* de l'Université de Genève.



UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Cet ouvrage est publié avec la Passerelle
et l'Observatoire astronomique de l'Université de Genève.

300 questions
à un astronome

300 questions à un astronome

Anton Vos

Préface de Michel Mayor

Illustrations de Matyo

La Collection «focus science» est dirigée par Anton Vos

Et pourtant, elle tourne!

François Rothen

Le huitième jour de la création

Jacques Neiryck

Fluide vital

Pierre Zweieracker

Science est conscience

Jacques Neiryck

Mise en page: Ulrike Seeliger

Impression: Imprimeries Réunies Lausanne s.a., Renens

Les Presses polytechniques et universitaires romandes sont une fondation scientifique dont le but est principalement la diffusion des travaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ainsi que d'autres universités et écoles d'ingénieurs francophones. Le catalogue de leurs publications peut être obtenu par courrier aux Presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL – Centre Midi, CH-1015 Lausanne, par E-Mail à ppur@epfl.ch, par téléphone au (0)21 693 41 40, ou par fax au (0)21 693 40 27.

www.ppur.org

Première édition

ISBN 2-88074-656-6

© 2005, Presses polytechniques et universitaires romandes,

CH – 1015 Lausanne

Imprimé en Suisse

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

PRÉFACE

L'astronomie suscite un énorme intérêt d'une large part du public. Certes ceci n'est pas nouveau, il suffit de se rappeler le succès impressionnant de *Astronomie populaire* de Camille Flammarion voici déjà plus de 125 ans. Aujourd'hui, cette curiosité se trouve renforcée par la beauté exceptionnelle du cosmos révélée par les images acquises notamment par le télescope spatial *Hubble*. Au-dessus des turbulences de l'atmosphère terrestre, cet appareil nous offre des vues grandioses comme, par exemple, les sites de formation stellaire ou des nébuleuses planétaires. Internet permet, à qui le souhaite, un accès libre à ces trésors. De même, les vues d'une grande netteté révélées par ces sondes spatiales qui survolent des objets de notre système solaire concourent aussi à notre émerveillement et suscitent des questions.

Il est des époques où l'évolution des idées propres à un domaine subit de soudaines accélérations. Le XVI^e siècle, celui de la révolution copernicienne, en fait certes partie. Mais le XX^e, à n'en point douter, restera lui aussi une période marquante de l'astronomie. Et à plus d'un titre. C'est d'abord le siècle où, pour la première fois, le scientifique dispose d'un «outil», la théorie de la relativité générale développée par Albert Einstein, qui permet une approche scientifique pour l'étude de la structure de l'univers et de son évolution. Depuis, la cosmologie observationnelle a connu des succès qui resteront parmi les faits historiques les plus importants dans la progression de la connaissance. Je pense notamment à la découverte de l'expansion de l'univers en 1929 par Edwin Hubble et à celle du rayonnement fossile à 3,7 degrés Kelvin par Arno Penzias et Robert Wilson en 1965. Ce sont les deux confirmations les plus convaincantes du modèle dit du big bang.

L'autre avancée majeure qui distingue le XX^e siècle, à mon sens, concerne les étoiles. Cette période nous a ouvert les yeux sur leur fonctionnement et leur évolution. Rappelons que ce n'est qu'en 1938 que Hans Bethe identifie pour la première fois la source de l'énergie de notre Soleil et ouvre ainsi la voie pour l'étude de l'évolution de ces astres. Plus tard, en 1957, paraît un article fondateur de la nucléosynthèse (la théorie de la formation des différents atomes). On découvre alors que la quasi-totalité des atomes (hormis l'hydrogène et l'hélium) trouvent en fait leur origine dans la fournaise nucléaire des cœurs stellaires. De plus,

ce n'est qu'au XX^e siècle que l'on a compris (et observé) que des étoiles se formaient encore dans la Voie Lactée et que l'on a pu analyser les mécanismes de leur formation et de leur mort. Enfin, on s'est rendu compte il y a 10 ans seulement, avec la découverte du compagnon de 51Peg, qu'il existe d'autres soleils que le nôtre autour desquels gravitent des planètes. Une réalité à laquelle les plus grands noms de l'astronomie ne croyaient pas jusque dans les années 1950.

Ces découvertes majeures, qui permettent de mieux situer l'homme dans l'univers que ce soit dans l'espace ou dans le temps, devraient faire partie de la culture générale de notre société. Mais, assez curieusement, il n'existe pas d'enseignement d'astronomie au cours des quelque 10 ans de l'école obligatoire. Certes, des professeurs passionnés abordent certains aspects de cette discipline dans les cours de physique. Mais le résultat est là: essayez d'aborder une timide explication sur un sujet astronomique lors d'une réunion avec des non-scientifiques et immédiatement on vous dit gentiment: «de toute manière je ne comprends rien à tout cela!» Et pourtant, il n'est pas nécessaire d'être physicien pour comprendre. Puissent ces *300 Questions à un astronome* permettre à ceux qui le souhaitent de partager les acquis de l'astrophysique de notre époque.

Michel Mayor
*Professeur à l'Observatoire astronomique
de l'Université de Genève*

SOMMAIRE

Préface	v
Avant-propos	ix
1 <u>La Terre</u>	<u>1</u>
2 <u>La Lune</u>	<u>11</u>
3 <u>Le Soleil</u>	<u>29</u>
4 <u>Les astéroïdes et les comètes</u>	<u>41</u>
5 <u>Les planètes</u>	<u>51</u>
6 <u>Les étoiles</u>	<u>73</u>
7 <u>Les planètes extrasolaires</u>	<u>83</u>
8 <u>Les galaxies</u>	<u>89</u>
9 <u>L'univers</u>	<u>97</u>
10 <u>La relativité générale</u>	<u>113</u>
11 <u>Les trous noirs</u>	<u>119</u>
12 <u>Le temps</u>	<u>135</u>
13 <u>Les techniques de mesure</u>	<u>143</u>
14 <u>L'histoire</u>	<u>153</u>
15 <u>L'astronautique</u>	<u>159</u>
Index	171

AVANT-PROPOS

Ce livre est né sur Internet. En effet, entre 1999 et 2002, sur le site de l'Observatoire astronomique de l'Université de Genève, un espace a été ouvert au public où celui-ci pouvait poser des questions directement aux astronomes. Le plus rapidement possible, c'est-à-dire après un délai de quelques jours seulement, les réponses des experts étaient publiées, permettant aux internautes de réagir avec de nouvelles interrogations. Assez vite, une quantité impressionnante de matériel rédactionnel s'est accumulé. Deux ans après l'expérience Internet, l'idée d'un livre a germé.

Entre la version électronique et en papier, l'ouvrage a connu un certain nombre de modifications, autant sur le fond que sur la forme. Le style d'écriture a été sensiblement uniformisé et le contenu mis à jour. En effet, les connaissances en astronomie progressent si rapidement que quelques années ont suffi parfois pour que certaines réponses, ou éléments de réponses, soient devenues obsolètes.

Le résultat est celui que vous tenez entre vos mains. Il se laisse lire de la manière que vous désirez. Vous pouvez le picorer, le parcourir, le commencer par la fin, par le milieu ou, plus traditionnellement par le début. Un sommaire vous guidera à travers les grands thèmes de l'astronomie et un index en fin d'ouvrage vous permettra de trouver certains concepts plus précis.

Une trentaine de scientifiques ont joué le jeu pour répondre au près de 300 questions retenues ici. L'identité des auteurs apparaît à la fin des réponses sous forme d'initiales. Voici la liste complète des auteurs, par ordre alphabétique:

Raoul Behrend (<i>rb</i>)	Roger Fux (<i>rf</i>)
Stéphane Berthet (<i>sb</i>)	Michel Grenon (<i>mg</i>)
Gilbert Burki (<i>gb</i>)	Didier Greusard (<i>dg</i>)
Bastien Confino (<i>bc</i>)	Francesco Kienzle (<i>fk</i>)
Noël Cramer (<i>nc</i>)	André Maeder (<i>am</i>)
Pierre Dubath (<i>pd</i>)	Georges Meynet (<i>gm</i>)
Daniel Erspamer (<i>de</i>)	Nami Mowlavi (<i>nm</i>)
Laurent Eyer (<i>le</i>)	Dominique Naef (<i>dn</i>)
Marc Freitag (<i>mf</i>)	Bernard Nicolet (<i>bn</i>)
Daniel Friedli (<i>df</i>)	Pierre North (<i>pn</i>)

Stéphane Paltani (*sp*)
Daniel Pfenniger (*dp*)
Frédéric Pont (*fp*)
Didier Raboud (*dr*)

Grégoire Ribordy (*gr*)
Frédéric Royer (*fr*)
Marc Turler (*mt*)
Stéphane Udry

Le projet Internet a été géré par Didier Raboud, actuellement responsable du Service de communication de l'Université de Genève. La réécriture des questions et des réponses a été réalisée par Anton Vos, journaliste scientifique.

Contacts:

Observatoire astronomique de l'Université de Genève
51, chemin des Maillettes
CH-1290 Sauverny
Suisse
Tél: (+41) 022/379 22 00
www.unige.ch/sciences/astro/

Service de communication de l'Université de Genève
Université de Genève
Rue Général-Dufour 24
CH-1211 Genève 4
Tél (+41) 022/379 77 17
www.unige.ch/presse

1 LA TERRE

Pourquoi la Terre est bleue quand on la regarde depuis l'espace ?

Si la Terre apparaît bleue de l'espace, c'est que 71% de sa surface est recouverte d'eau. Ce sont donc les océans, qui représentent le trait dominant de la surface de notre planète et qui la colorent en bleu. *dr*

Pourquoi, si l'atmosphère absorbe toutes les couleurs sauf le bleu, la Terre est-elle pleine de couleurs ?

Il est faux de dire que l'atmosphère absorbe toutes les couleurs sauf le bleu. Si tel était le cas, la couleur presque unique sur la Terre serait effectivement le bleu. En fait, les molécules et poussières de l'atmosphère absorbent et surtout diffusent davantage le bleu que le vert ou le rouge. Ce phénomène permet de comprendre pourquoi le ciel est bleu et pourquoi le Soleil peut devenir rouge lorsqu'il se lève ou se couche.

Le Soleil émet des rayons visibles de toutes les couleurs, mais aussi des rayons invisibles pour l'œil humain comme les ultraviolets et les infrarouges. L'atmosphère de la Terre arrête la plupart des ultraviolets (grâce à la couche d'ozone) et des infrarouges (grâce à l'humidité de l'air). Elle laisse en revanche passer en grande partie la lumière visible, mais de manière inégale suivant la couleur.

On peut voir l'atmosphère comme un ensemble de boules transparentes agitées dans tous les sens et la lumière du Soleil comme un jet de petites billes de toutes les couleurs. Alors que les subtiles billes rouges ou vertes réussissent à se faufiler sans trop entrer en collision avec les boules atmosphériques, les pataudes billes bleues n'ont pas cette aptitude et ricochent dans toutes les directions. Du coup, celles qui finissent par arriver au niveau du sol – elles sont encore très nombreuses – semblent provenir, non plus du Soleil, mais de tous les points du ciel. C'est pourquoi le ciel apparaît entièrement bleu durant les journées ensoleillées.

Le matin ou le soir, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, la couche atmosphérique que les billes doivent traverser est bien plus épaisse qu'à midi. Les billes bleues ricochent tellement qu'elles n'atteignent même plus le sol. Les vertes commencent elles aussi à être arrêtées. Seules les rouges réussissent encore à passer et à nous offrir ces spectacles magnifiques de levers et couchers de Soleil. *df*

Comment la Terre est-elle née? De quelle matière est-elle issue ?

La Terre est née dans un disque de gaz et de poussières entourant le jeune Soleil, il y a 4,56 milliards d'années. A cette époque, la composition du mélange gaz-poussières est de 70% d'hydrogène, de 28% d'hélium et de 2% d'éléments plus lourds (oxygène, carbone, azote, néon, fer, silicium, etc). L'hydrogène et l'hélium ont été formés durant le big bang, 9 milliards d'années auparavant, alors que les éléments plus lourds ont été synthétisés dans le cœur d'étoiles ayant existé avant la naissance du Soleil.

Le disque de gaz originel a commencé par s'échauffer en se comprimant sous l'effet de sa propre gravitation. La température régnant dans la région de formation de la Terre atteint 1300° C. Les poussières ne sont pas supportées par le gaz – contrairement aux gouttes de pluies ou aux grêlons dans l'atmosphère terrestre. Elles se condensent donc dans le plan de la nébuleuse protosolaire, s'agglutinent par collision puis, sous l'effet de la gravitation, forment des agrégats de plus en plus massifs.

Après 10 000 ans d'évolution, le diamètre de ces petites planètes, dites planétésimes, atteint déjà entre 10 et 100 km, puis 1000 km après 100 000 ans. Ces petits astres fusionnent alors pour donner naissance soit aux planètes telluriques, comme Mercure, Vénus, la Terre et Mars, soit aux noyaux des planètes géantes comme Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Dans la zone de formation de la Terre, seuls les composés chimiques réfractaires, comme les métaux, les oxydes métalliques et les silicates, peuvent se condenser et être incorporés dans les planétésimes qui constitueront notre planète.

A la distance de Jupiter et au-delà, la température est assez basse pour que l'eau (sous forme de glace) puisse s'accumuler sur les noyaux rocheux et les faire croître. Et ce jusqu'à ce que la masse de la planète soit suffisante pour attirer et piéger l'hydrogène et l'hélium sous l'effet de l'attraction gravitationnelle. C'est ainsi que sont apparues les planètes géantes, gazeuses en surface et solides en leur centre. Le reste du disque de gaz qui n'a pas participé à la formation des planètes est finalement évaporé par le Soleil.

La Terre, une fois formée, commence son existence en fondant, principalement sous l'effet de la radioactivité qui est beaucoup plus intense qu'aujourd'hui. Les métaux lourds comme le fer et le nickel coulent vers son centre et forment ainsi son noyau. Les silicates montent à la surface et constituent le manteau. C'est probablement à cette époque qu'une collision entre la Terre primitive et une planète de la taille de Mars se produit. De cet accident spectaculaire naît la Lune, fabriquée à partir des éléments arrachés au manteau terrestre. Ce scénario explique la chimie de la surface lunaire et l'absence de cœur métallique au centre de notre satellite.

Malgré cet épisode, la future planète bleue poursuit sa genèse. L'activité volcanique terrestre ramène en surface les matériaux les moins fusibles et les moins denses qui commencent à former les premiers éléments discontinus de la croûte, qui est encore fine. Ce n'est qu'il y a 2,5 milliards

d'années, lorsque survient un changement de type de convection dans le manteau, que la croûte telle que nous la connaissons va se constituer en plaques et s'épaissir progressivement. La convection rapide du manteau supérieur, actuellement épais de 670 km, mais initialement d'au moins 1000 km, et le volcanisme intense qui lui est associé, permettent, en plus de recycler les matériaux météoritiques qui tombent sur Terre, un dégazage qui produit l'eau des océans et l'atmosphère primitive. Cette dernière est constituée à 95% de CO₂ et 3% de N₂, mais ne contient pas d'O₂. *mg*

La Terre a-t-elle toujours été ronde ?

A cette interrogation, on est tenté de répondre par la question inverse: La Terre n'a-t-elle jamais été ronde? En effet, notre planète s'approche de la sphéricité, mais n'y parvient pas parfaitement car elle est légèrement aplatie aux pôles. Le diamètre terrestre à l'équateur est égal à 12 756 km alors que celui aux pôles ne vaut que 12 713 km. Cet aplatissement est dû à la rotation de la planète sur elle-même. C'est l'effet de la force centrifuge qui crée ce léger «bourrelet» équatorial.

Cela dit, est-ce que la Terre a toujours été presque ronde? Notre planète s'est formée avec le système solaire, il y a environ 4,6 milliards d'années. La matière, qui entoure alors le Soleil sous la forme d'un disque gazeux, se condense en petits grains, qui grossissent par accrétion pour donner des myriades de petits corps de quelques kilomètres de diamètre (les planétésimes). Ces objets subissent entre eux de nombreuses collisions qui provoquent des amalgames au point de former des corps de plus en plus gros, jusqu'à des planètes entières.

La Terre est donc née ainsi, sa genèse n'étant qu'une suite de collisions et de bombardements météoritiques. Aristote pensait que l'omniprésence de la sphère dans la nature résultait de son haut degré de perfection. La forme sphérique des planètes est liée en réalité au modelage de l'objet par la force gravitationnelle et dépend de sa taille et de sa densité. Plus la taille est grande et la densité élevée, plus les hétérogénéités de la surface par rapport à la symétrie sphérique seront faibles. C'est pour cela que les planètes ont une forme sphérique alors que les astéroïdes non. *fr*

Comment se fait-il qu'une grande partie de l'intérieur de la Terre soit liquide ?

Durant sa formation, la Terre a subi nombre d'impacts de planétésimes (petites planètes de 10 à 1000 km de diamètre), eux-mêmes déjà en partie fondus à cause de l'énergie nucléaire dissipée par des isotopes radioactifs de courte vie actuellement éteints. Lors de ces impacts, la température de surface peut atteindre localement 15 000 voire 20 000° C, en raison de la libération de l'énergie cinétique. Cela n'est toutefois pas suffisant

pour amener l'ensemble de la Terre au point de fusion car la pression – qui s'oppose à la fusion – devient rapidement trop forte dans les parties plus profondes du globe.

En fait, c'est la fission des isotopes radioactifs, de courte et longue vie, beaucoup plus abondants à cette époque que maintenant, qui a fait lentement monter les températures internes jusqu'au point de fusion du fer (entre 1700° C et 2000° C). Cela s'est produit dans une zone proche de la surface, de 400 à 800 km de profondeur (là où la pression n'est pas trop forte pour inhiber la fusion). Le fer et le nickel liquides ont ensuite coulé vers le centre pour former le noyau métallique de notre planète. De ce processus, nommé la «catastrophe du fer», a résulté la différenciation en manteau et noyau terrestres. Le noyau s'est refroidi très lentement et s'est cristallisé à partir du centre vers le bord.

Quant aux éléments radioactifs concentrés dans le manteau, ils ont provoqué la fusion complète du manteau supérieur jusqu'à une profondeur de plus de 670 km. Le dégazage complet des laves a produit l'atmosphère et les océans en moins de 100 millions d'années. *mg*

Comment l'eau est-elle apparue sur Terre et quel est son rôle dans la formation de l'atmosphère ?

Notre planète, à l'origine, est largement déshydratée car elle a été formée par l'accrétion de planétésimes, eux-mêmes constitués de grains dégazés et déshydratés. Il y a 4,56 milliards d'années, la température de la nébuleuse dont est issue la Terre varie entre 800 et 1300° C. Ces conditions empêchent toute condensation de composés comme les molécules organiques et, plus particulièrement, l'eau. Cette dernière ne peut se trouver sous forme de liquide qu'au-delà de l'orbite de Mars et sous forme de glace qu'au-delà de celle de Jupiter.

Entre Mars et Jupiter, toutefois, subsistent des astéroïdes métalliques ou rocheux, qui sont les restes d'une planète avortée. Dans la partie extérieure de cette ceinture d'astéroïdes, on trouve des objets qui n'ont jamais été inclus dans des planétésimes de grande taille, à savoir les météorites chondritiques. Ces dernières, épargnées par les chaleurs excessives que la radioactivité fait naître dans des astres dont le diamètre dépasse les 120 km, sont encore riches en composés organiques et en eau (15% environ).

Les objets de cette région du système solaire voient régulièrement leurs mouvements perturbés par Jupiter. Leurs orbites peuvent devenir suffisamment excentriques pour croiser celles des planètes telluriques. Ce sont en fait les anciens impacts des météorites chondritiques carbonacées sur la Terre en formation qui ont apporté la majeure partie de son eau et de son atmosphère. Les comètes, elles aussi déviées de leurs trajectoires par Jupiter et Saturne en direction du centre ou de l'extérieur du système solaire, n'ont apporté au plus que 5% de l'eau. Elles ont en revanche amené de nombreuses molécules organiques précurseurs des acides aminés.

Un tel scénario s'appuie notamment sur la mesure du rapport d'abondance deutérium/hydrogène (le deutérium étant un atome d'hydrogène dont le noyau compte un neutron en plus du proton). Cette valeur diffère selon la température de formation de la molécule d'eau. Il y a sur Terre 5,5 fois plus de deutérium que dans le Soleil ou dans la nébuleuse primitive, mais 6 fois moins que dans les comètes. La valeur terrestre est en revanche identique à celle observée dans les météorites chondritiques. *mg*

Qu'est-ce qu'on entend par structuration verticale de l'atmosphère ?

L'atmosphère se divise verticalement en différentes couches chimiquement et thermiquement distinctes.

Du point de vue thermique, la première couche est la troposphère, qui s'étend du niveau du sol à la tropopause dont l'altitude est de 9 km au pôle, 11 km aux latitudes intermédiaires (comme la Suisse) et 16 km à l'équateur. C'est la zone qui comporte des nuages et des turbulences et où la température baisse de 1 degré tous les 160 m, jusqu'à -55°C .

Vient ensuite la stratosphère, qui s'étend de la tropopause jusqu'à une altitude de 50 km environ. La température y atteint $+20^{\circ}\text{C}$ au maximum, là où l'absorption par l'ozone de la lumière ultraviolette émise par le Soleil est la plus forte.

De 70 à 85 km, on entre dans la mésosphère. La température y chute de -50 à -120°C . Au-dessus, jusqu'à 500 km, la thermosphère voit la température remonter rapidement jusqu'à 230°C en raison de l'absorption des rayons ultraviolets par les molécules d' O_2 . Finalement, tout en haut, l'exosphère fait le lien avec l'espace interplanétaire. Toute la partie située au-dessus de 70 km est également appelée ionosphère, car les molécules sont partiellement ionisées.

Chimiquement, l'atmosphère suit une autre stratification. On distingue l'homosphère, de 0 à 80 km, de l'hétérosphère, qui est au-dessus. Dans la première, la composition chimique est constante, sauf pour la teneur en vapeur d'eau qui décroît rapidement avec l'altitude. Dans la seconde, la composition varie avec l'altitude. Les molécules d'azote sont dominantes jusqu'à 200 km, l'oxygène prend le relais entre 200 et 800 km, l'hélium entre 800 et 1500 km et finalement l'hydrogène au-dessus. La couche la plus riche en ozone (O_3) est située vers 30 km d'altitude. *mg*

Sommes-nous plus lourds aux pôles qu'à l'équateur ?

Oui, et ce pour deux raisons. Premièrement, la force centrifuge, qui est engendrée par la rotation de la Terre sur elle-même et qui s'oppose à la gravitation, est nulle aux pôles alors qu'elle est maximale à l'équateur. Sur l'équateur, l'attraction terrestre est 295 fois plus intense que la force centrifuge. Cette dernière «allège» donc de 237 grammes une personne de 70 kg.

Secondement, l'aplatissement du globe, également lié à la rotation terrestre, accentue encore un peu cette différence. Etant plus proche du centre de la Terre, l'homme assis sur un des pôles subit une accélération terrestre ($9,865 \text{ m/s}^2$ en moyenne) plus importante que celui situé sur l'équateur (où elle vaut $9,799 \text{ m/s}^2$, sans tenir compte de la contribution de l'accélération centrifuge). Cela correspond, pour le même individu de 70 kg, à une différence supplémentaire de 470 grammes. *pn*



Quelles sont les causes de la marée ?

L'origine des marées sur Terre est essentiellement astronomique. Et la principale responsable en est la Lune. Sa force d'attraction gravitationnelle s'exerce avec plus de force sur les régions terrestres qui lui sont les plus proches que sur les masses du centre de la Terre. Cette différence engendre une légère déformation du globe: les zones terrestres qui font face à la Lune s'éloignent légèrement du cœur de la planète. L'ampleur du phénomène dépend de la viscosité du milieu. C'est pourquoi l'eau des océans, peu visqueuse, réagit plus rapidement que les rives voisines.

Le phénomène est similaire pour l'autre côté de la Terre, mais pour la raison inverse. En effet, la face opposée à la Lune s'éloigne également du centre de la planète parce qu'elle subit une attraction moins forte de la part du satellite. Résultat: les océans se soulèvent non seulement à la verticale de la Lune, mais aussi aux antipodes de ce point. On observe donc deux épisodes de hautes eaux par jour lunaire, qui dure en moyenne 24 h 50.

L'effet de marée est proportionnel à la masse de l'astre qui en est responsable, mais il diminue avec le cube de la distance. Le Soleil exerce donc lui aussi une telle action, mais, en raison de son grand éloignement, elle 2,2 fois plus faible que celle de la Lune. A la nouvelle lune et à la pleine lune, les effets des deux astres s'additionnent et créent les marées

dites de vives-eaux. Aux premier et dernier quartiers, ils s'opposent et donnent naissance aux marées de mortes-eaux. *bn*

Il y a 900 millions d'années, le jour ne durait que 18 h alors qu'il est de 24 heures actuellement. Comment explique-t-on cette différence ?

La rotation de la Terre ralentit. Cela est essentiellement dû à l'effet de marée de la Lune, bien que le Soleil y contribue aussi un peu. Lors de ce processus, une partie de l'énergie de rotation est dissipée sous forme d'énergie de déformation et de frottement, tandis qu'une autre partie est transférée à la Lune. Le résultat est donc un ralentissement de la toupie terrestre.

Plus précisément, l'effet de marée déforme la Terre – pas seulement les océans, mais aussi la croûte et le manteau – en une ellipse dont le grand axe pointe vers la Lune. Pas exactement sur la Lune, en vérité. En effet, la Terre n'est pas parfaitement élastique, mais quelque peu visqueuse et tourne bien plus vite sur elle-même que la Lune sur son orbite. La surface terrestre, une fois soulevée par la force de marée, a donc tendance à suivre la rotation de la planète, et à «dépasser» la Lune, avant de retomber. Si bien que le double renflement provoqué par l'effet de marée (l'un, situé du côté de la lune et dû à un excès de force de gravité, l'autre, situé du côté opposé et causé par la force centrifuge), au lieu de pointer exactement vers le satellite, est en avance sur lui. Cet angle vaut aujourd'hui 8 degrés environ.

Les deux masses que représentent ces renflements continuent pourtant à attirer la Lune et à être attirés par elle. Cela provoque un ralentissement de la rotation terrestre en même temps qu'une accélération de la Lune sur son orbite. Ce phénomène s'appelle un transfert de moment cinétique – le moment cinétique total du système Terre-Lune étant, quant à lui, conservé. Ainsi, notre satellite s'éloigne graduellement de nous selon une orbite qui prend la forme d'une spirale très enroulée.

Une cause supplémentaire du ralentissement de la rotation terrestre est la dissipation de l'énergie de l'onde de marée océanique sur les côtes. On peut en effet assimiler la marée océanique à une onde stationnaire, qui présente des nœuds (où son amplitude est nulle) et des ventres (où elle est maximale). Si les ventres coïncident avec les côtes, comme c'est le cas actuellement pour l'océan Atlantique, alors la dissipation est maximale.

Grâce aux éclipses observées depuis l'Antiquité, on a déduit que dans les trois derniers millénaires, l'allongement du jour s'est monté à environ 2 millisecondes par siècle.

L'étude de la croissance d'anciens coraux permet de pousser l'analyse jusqu'à 420 millions d'années dans le passé. En effet, comme la croissance de ces organismes dépend de l'insolation (donc de l'épaisseur d'eau qui les recouvre) et de la température (donc de la saison de l'an-

née), on peut retracer dans leur structure les cycles lunaires et annuels et même compter le nombre de jours par année. On constate alors que le ralentissement de la rotation terrestre n'a pas toujours été uniforme. Il est important aujourd'hui en raison d'une répartition particulière des continents sur la surface terrestre qui accentue la dissipation d'énergie de rotation par l'effet des marées océaniques, comme on l'a dit. Il était, en revanche, moindre il y a 200 millions d'années, à l'époque où tous les continents étaient réunis en un seul, la Pangée. *pn*

Qu'est-ce que la précession des équinoxes?

La précession des équinoxes désigne le lent pivotement de l'axe de rotation de la Terre le long d'un cône, à l'image de l'axe d'une toupie tournant sur elle-même. En première approximation, la Terre se comporte comme un gyroscope. Son axe de rotation pointe toujours vers le même point de la sphère céleste – près de l'étoile Polaire pour l'hémisphère nord et dans la Croix du Sud pour l'hémisphère austral. Cependant, un gyroscope soumis à un moment de force subit un mouvement de précession, c'est-à-dire que son axe de rotation décrit un cône en une période beaucoup plus longue que celle de sa rotation propre. En d'autres termes, si l'on incline légèrement une toupie reposant sur sa pointe, son propre poids a pour effet de faire tourner son axe.

Or, la Terre est elle aussi soumise à un tel moment de force. Il provient de l'inclinaison constante de son axe de rotation de 23° par rapport à la perpendiculaire de l'écliptique (le plan dans lequel évolue la Terre autour du Soleil) ainsi que de l'aplatissement des pôles. En effet, le renflement équatorial de la Terre subit, de la part de la Lune et du Soleil, une force de gravité très légèrement différente que le centre de la Terre. Ainsi, l'axe du monde décrit-il un cône en une période d'environ 26 000 ans, de sorte que l'étoile Polaire actuelle ne le sera plus dans 2000 ans.

Le phénomène de précession des équinoxes ne modifie pas les saisons, puisque l'angle de l'axe de rotation reste constant. En revanche, les saisons se décalent par rapport à l'endroit où se trouve la Terre sur son orbite autour du Soleil. L'équinoxe de printemps n'a pas lieu de nos jours au même point de l'orbite terrestre que dans l'Antiquité. Aujourd'hui, le Soleil traverse l'équateur céleste (la prolongation sur le ciel du plan de l'équateur terrestre) du sud au nord lorsqu'il est devant la constellation des Poissons. Dans l'Antiquité, il le faisait lorsqu'il passait devant la constellation du Bélier. Et dans quelques siècles, cela se déroulera dans la constellation du Verseau.

Ces considérations signifient également qu'il faut distinguer l'année dite tropique, qui se réfère aux saisons et définit notre calendrier, de l'année sidérale, qui est le temps mis par la Terre pour accomplir une révolution complète autour du Soleil. L'année tropique dure 365 jours, 5 heures, 48 minutes et 45 secondes, tandis que l'année sidérale dure 365 jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes (au 1er janvier 2000). *pn*

Qu'est ce que la longitude? Et pourquoi est-ce que l'heure du lever du Soleil avance quand on se déplace vers l'est ?

La longitude est un angle qui permet de se situer sur la Terre, dans la direction est-ouest, par rapport au méridien de Greenwich. Il varie de 0 à 180 degrés vers l'est et vers l'ouest. Tous les lieux situés sur le méridien de Greenwich sont à une longitude égale à zéro. Et comme la Terre tourne d'ouest en est, le Soleil se lève à l'est. Si la même heure civile règne sur un territoire assez étendu, comme c'est le cas de l'Europe centrale, vous verrez évidemment le Soleil se lever plus tôt si vous vous trouvez en Autriche que si vous vous trouvez dans le Finistère. C'est la raison pour laquelle les fuseaux horaires ont été définis. Ils comportent passablement d'exceptions – dont l'Europe centrale, justement –, mais en règle générale ce sont des zones de 15 degrés d'extension en longitude, ce qui correspond à une heure. Ainsi, à l'extrémité est d'un fuseau horaire donné, le Soleil se lèvera une heure plus tôt qu'à l'extrémité ouest. L'équivalence entre les 15 degrés et l'heure se démontre par une simple règle de trois: 360 degrés sont à 24 heures ce que 15 degrés sont à une heure. *pn*

Le pôle Nord magnétique peut-il bouger ?

Oui. Le champ magnétique de notre planète est engendré par une différence de rotation entre le noyau et la croûte terrestre, par des mouvements de magma dans le manteau, etc. A de très nombreuses occasions, le champ magnétique terrestre s'est inversé ou annulé sans conséquences apparentes pour les habitants du globe. Actuellement, le pôle magnétique (en fait sa direction générale) se situe au nord du Canada. A d'autres époques, le pôle magnétique s'est même retrouvé à l'équateur. *rb*



Un changement du champ magnétique peut-il avoir une influence sur la météo ?

Les effets des variations du champ magnétique terrestre sur la météorologie sont insignifiants à l'échelle de temps humaine. En particulier, ils n'engendrent ni tempêtes, ni vents anormaux. En effet, la couche d'air de 20 km qui régit la météo n'est pratiquement pas ionisée et ne contient presque pas de particules sensibles aux champs magnétiques. Les éventuels effets du champ magnétique sur le comportement de notre atmosphère sont dès lors négligeables, surtout par rapports aux autres paramètres comme la composition chimique de l'air, la couverture de neige, de végétation ou de déserts, les mouvements et les températures des eaux océaniques, l'excentricité de l'orbite terrestre ou encore les poussières volcaniques.

A une autre échelle, le champ magnétique de la Terre baigne dans celui du système solaire. Cette configuration peut certes produire un couplage susceptible de freiner la rotation de notre planète. Toutefois, l'énergie de rotation est bien supérieure à celle de ce couplage magnétique. Il faudrait un temps très grand pour que ce dernier dérègle le mouvement terrestre et influence ainsi les conditions météorologiques. Il n'y a donc pas de soucis à se faire pour le prochain milliard d'années.

Par ailleurs, les champs magnétiques nous protègent du flux de particules émises par le Soleil (électrons, protons et particules alpha). Si ce bouclier disparaissait, les couches atmosphériques de hautes altitudes, à 80 km, pourraient alors voir leur composition et leurs caractéristiques physiques se modifier. La quantité d'ultraviolets qui atteint le sol pourrait changer, entraînant des effets sur la vie végétale et animale. Cependant, l'homme a traversé de nombreuses inversions du champ magnétique sans même s'en rendre compte. *rb*

2 LA LUNE

Comment la Lune s'est-elle formée ?

La théorie actuellement retenue pour expliquer l'origine de la Lune est celle d'une collision très violente entre la Terre, encore très jeune, et un corps de la taille de Mars. Cet événement se serait produit, il y a environ 4,5 milliards d'années, alors que notre planète possédait déjà une croûte, un manteau et un noyau. L'explosion aurait pulvérisé le manteau de l'astre étranger ainsi que celui de la Terre. Les deux noyaux auraient fusionné et les débris des manteaux auraient rapidement formé la Lune. Ce scénario permet d'expliquer au mieux les caractéristiques actuelles du satellite naturel de notre planète, notamment sa faible densité moyenne comparée à celle de la Terre.

Il existe d'autres théories pour expliquer l'origine de la Lune, mais elles souffrent de défauts qui les empêchent de rivaliser avec l'explication ci-dessus. La première d'entre elles est celle de la «co-formation» qui suggère que la Terre et son satellite seraient nés en même temps, à partir du même matériel. Cette théorie est toutefois incapable d'expliquer les différences importantes de densité et de composition chimique existant entre les deux astres.



La deuxième est celle de la «capture», qui suppose que la Terre et la Lune se seraient formées indépendamment l'une de l'autre, à des endroits différents du système solaire. La Terre aurait ensuite «capturé» la Lune dans son champ gravitationnel. La probabilité qu'un tel événement se produise est extrêmement faible et rend ce scénario peu crédible. Par ailleurs, malgré leurs différences, certaines similarités entre la Terre et la Lune militent en faveur d'une formation des deux corps qui ne soit pas trop indépendante l'une de l'autre.

Il existe un dernier scénario, celui de la «fission», selon lequel la Terre, en rotation très rapide, aurait «éjecté» la Lune. Toutefois, rien ne permet d'expliquer pourquoi la Terre aurait eu une rotation initiale aussi rapide et les calculs montrent que l'éjection de la Lune sur une orbite stable est quasi impossible. Par conséquent, ce scénario n'est actuellement plus pris au sérieux. *dr*

Un homme pèse 6 fois moins sur la Lune que sur Terre. Sautera-t-il aussi 6 fois plus haut ?

Oui. Si vous lancez verticalement un corps quelconque avec une vitesse initiale identique, il atteindra une hauteur six fois plus importante sur la Lune que sur Terre. Cela est dû au fait que le poids d'un objet est proportionnel à l'accélération gravifique de l'astre sur lequel on se trouve, alors que la hauteur qu'il peut atteindre est, au contraire, inversement proportionnelle à cette même grandeur. Et l'accélération terrestre est justement six fois plus grande que celle de la Lune. *dr*

Comment a été calculé le rayon de la Lune ?

Le rayon de la Lune peut se calculer en multipliant l'angle sous lequel le rayon de la Lune est vu depuis la Terre par la distance entre les deux astres. La première valeur est facile à mesurer et vaut 15 minutes et 32 secondes d'arc (0,26 degré). Quant à la seconde, elle peut être obtenue à l'aide de la parallaxe. La position angulaire de la Lune, mesurée par rapport aux étoiles, varie en effet de 2 degrés selon qu'on l'observe à un moment précis depuis un bord ou l'autre de la Terre (par exemple à partir du pôle nord ou du pôle sud). On trouve le même résultat en faisant la mesure à un endroit donné sur l'équateur une fois au lever et un autre au coucher de la Lune (abstraction faite du mouvement orbital du satellite). Avec un peu de trigonométrie et en connaissant le diamètre de la Terre, on obtient la distance qui nous sépare de la Lune. C'est de cette manière que les premières mesures ont été réalisées.

Actuellement, on utilise une technique beaucoup plus précise, qui est la télémétrie laser. Un rayon laser pulsé est envoyé sur un des réflecteurs installés sur la Lune (par des missions Apollo ou les sondes Lunakhod,

deux véhicules automobiles russes posés sur le satellite en 1970 et 1973) et l'on mesure le temps mis par le rayon pour effectuer l'aller et retour. Cette technique permet une précision de l'ordre du centimètre.

Néanmoins, il n'est pas indispensable de passer par la détermination de la distance Terre-Lune pour estimer le rapport des diamètres de la Lune et de la Terre. Lors d'une éclipse totale de Lune, et en faisant l'hypothèse assez grossière que le Soleil est infiniment plus lointain que la Lune, la forme de l'ombre de la Terre peut être assimilée à un cylindre. Par conséquent, sa projection sur la Lune a le même diamètre que la Terre elle-même. En observant directement la courbure de l'ombre terrestre lors des phases partielles de l'éclipse, on peut en déduire la taille de la Lune.

Les anciens Grecs ont réalisé ce genre d'exercices (en particulier Aristarque de Samos au III^e siècle avant J.-C. et Hipparque au II^e siècle avant J.-C.) en précisant même que l'ombre portée de la Terre n'est pas un cylindre, mais un cône d'ouverture de $0,5^\circ$. Ils ont ainsi obtenu une valeur pour le rayon de la Lune (Eratosthène de Cyrène avait déjà mesuré la circonférence terrestre au III^e siècle avant notre ère) avec une précision honnête pour l'époque, c'est-à-dire «seulement» 30% trop grande que la réalité. *pn*

La distance Terre-Lune a-t-elle toujours été la même ?

Non. Si la distance Terre-Lune était constante, cela impliquerait que l'orbite lunaire autour de la Terre soit circulaire, or ce n'est pas le cas. En première approximation, on peut dire que la Lune décrit une ellipse autour de la Terre dont l'excentricité est 0,055. Cela signifie que la distance minimale, au périhélie, est de 356 375 km et que la distance maximale, à l'apogée, est de 406 720 km. En réalité, ces valeurs sont des moyennes, car le mouvement lunaire connaît un grand nombre d'irrégularités dues en partie à l'influence du Soleil. De plus, les effets de marée au sein du couple Terre-Lune provoquent un ralentissement de la rotation de la Terre sur elle-même et une accélération de la Lune sur son orbite. Ce phénomène entraîne à son tour une augmentation de la distance Terre-Lune d'environ 2 mètres par siècle. *fr*

Avec quelle précision connaît-on la distance Terre-Lune ?

La distance moyenne Terre-Lune (de centre à centre) est de 384 398 km. En raison de l'excentricité (légèrement variable) de l'orbite lunaire, cette distance peut s'écarter de quelque 20 000 km de cette moyenne. Grâce à la télémétrie laser, il est aujourd'hui possible de mesurer cette distance, à un moment donné, avec une précision de quelques millimètres seulement. *bn*

Qu'est-ce que la télémétrie laser ?

La télémétrie laser permet de mesurer la distance séparant un observateur sur Terre et un réflecteur placé sur la Lune (ou sur n'importe quel satellite artificiel). Le dispositif est constitué d'un laser de forte puissance émettant une lumière monochromatique, d'un réflecteur (installé sur la Lune lors d'une des missions américaines ou russes) et d'un télescope chargé de recueillir la lumière réfléchi. Le tout est piloté par une horloge atomique de haute précision. Par exemple, le laser utilisé à l'Observatoire de Calern, près de Grasse en France, envoie 10 décharges par seconde en direction de la Lune. Le nombre de photons réfléchis est très faible, de l'ordre d'un par 100 tirs. Ces quelques grains de lumière sont alors collectés par un télescope de 1,5 m de diamètre. L'intervalle de temps entre l'émission des décharges lumineuses et la réception du signal en retour dure entre 2,3 et 2,8 secondes et permet de calculer la distance du Satellite. La précision de la mesure est de 7 à 10 picosecondes (millionièmes de milliardièmes de seconde). La marge d'erreur sur la distance est donc de 3 millimètres en moyenne. *mg*

L'orbite de la Lune autour de la Terre est une ellipse.

Où se trouvent les deux foyers de cette ellipse ?

La Lune tourne en effet sur une trajectoire elliptique. Et l'un des foyers est occupé par le centre de la Terre. En fait, l'orbite lunaire diffère peu d'un cercle, l'excentricité ne valant que 0,055. Comme le demi-grand axe de l'ellipse mesure 383 398 km, les deux foyers ne sont éloignés que de 42 600 km environ, soit un peu plus de trois fois le diamètre de la Terre. Si le centre de la Terre occupe le premier, le second est situé à environ 36 000 km de la surface de la Terre, précisément à la même altitude que les satellites géostationnaires, même s'il ne s'agit là que d'une coïncidence. *pn*

Est-ce que la variation de la distance Terre-Lune a une influence sur les marées ?

Comme l'orbite lunaire est en réalité une ellipse et non un cercle, la distance Terre-Lune varie entre 356 475 et 406 720 km. Il est vrai que cela influence l'amplitude des marées, mais ce n'est pas le facteur principal. Les positions respectives de la Lune, du Soleil et de la Terre ont aussi leur importance, puisque le Soleil contribue aux marées à raison de 46%. Ainsi, l'amplitude des marées est maximale lorsque le Soleil et la Lune sont alignés (à la nouvelle et pleine lune), tandis qu'elle est minimale lors des quadratures (premier et dernier quartiers). Les variations de la distance Terre-Lune modulent cette règle simple. Petite précision: la Lune passe par l'apogée et le périgée (le point de sa trajectoire le plus éloigné,

respectivement le plus proche de la Terre) à des moments qui ne correspondent pas à des phases fixes. En effet, l'orientation de l'orbite lunaire est, en première approximation, fixe par rapport à la voûte céleste et n'a aucune raison de tourner avec une période d'une année terrestre. *pn*

Est-ce que la vitesse d'éloignement de la Lune va en augmentant et, si oui, dans combien de temps aura-t-elle définitivement quitté la Terre ?

La vitesse d'éloignement de la Lune va plutôt en diminuant. En effet, si la Lune s'éloigne lentement de la Terre, c'est en raison de l'effet de marée qu'elle exerce sur notre planète. Par son action gravifique, elle déforme sensiblement la Terre et freine sa rotation sur elle-même. Par la même occasion, en raison de la loi de la conservation du moment cinétique, la vitesse de la Lune sur son orbite augmente. Toutefois, la force de marée diminue avec la distance et le système se stabilisera, en théorie, lorsque la période de rotation axiale de la Terre sera égale à la période orbitale de la Lune, c'est-à-dire quand la Terre présentera toujours la même face à la Lune. Toutefois, le Soleil exerce aussi des forces de marée qui compliquent quelque peu la situation. *pn*

Si la Lune s'éloigne, que devient alors la loi de la conservation du moment cinétique ?

Le moment cinétique total est conservé puisque la Lune reste en orbite. Supposons néanmoins que la Lune quitte la Terre à cause d'une perturbation gravitationnelle extérieure (le passage dans le voisinage d'un très gros astéroïde, par exemple). Le système Terre-Lune n'étant dès lors plus isolé, son moment cinétique n'est plus conservé. Il convient d'inclure l'astéroïde et son mouvement dans le bilan du moment cinétique. Celui-ci reste conservé, mais dans un système à trois corps. *pn*

La Terre a-t-elle une chance de survivre à un éventuel départ de la Lune ?

La Terre survivrait au départ de la Lune si quelque événement exceptionnel venait à l'arracher de notre voisinage, mais pas nécessairement la biosphère. La Lune agit comme stabilisateur de l'obliquité (l'angle constant que dessine l'axe de la Terre par rapport au plan de son orbite autour du Soleil et qui définit les saisons) et cette dernière a très peu varié au cours des âges. En l'absence de la Lune, des calculs très détaillés des perturbations dues aux autres planètes montrent que l'obliquité pourrait varier de manière chaotique de plusieurs dizaines de degrés sur quelques millions d'années. Cela entraînerait évidemment de graves altérations climatiques. Cela dit, la vie est tellement tenace qu'elle parviendrait peut-être à s'adapter. *pn*

**Si la Lune s'en allait, peut-on prévoir son futur parcours en solitaire ?
Pourrait-elle être capturée par une autre planète ?**

Tout dépend de l'événement – extrêmement improbable – qui arracherait la Lune à la Terre. Quoi qu'il arrive, l'orbite du satellite restera probablement proche de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre) étant donné qu'il faut une grande énergie pour le quitter. Quant à la capture éventuelle de la Lune par une autre planète, elle demeure très problématique. Un tel événement impliquerait une dissipation d'énergie importante, en raison des vitesses relatives de la Lune et de la nouvelle planète hôte. Pour que cela réussisse, il faudrait un impact direct (qui se solderait par la destruction partielle ou totale de la Lune) ou un effet de marée phénoménal, qui serait sans doute insuffisant pour une capture immédiate. *pn*

**Pourquoi voit-on toujours la même face de la Lune ?
Est-ce le fruit du hasard ou la conséquence d'un phénomène précis ?**

Cette configuration n'est pas due au hasard, mais à un effet de synchronisation. Si les astres étaient des boules sphériques parfaites ne subissant aucune déformation, un tel phénomène n'apparaîtrait pas. Toutefois, le système Terre-Lune n'est pas figé. Il est en constante évolution. Les observations montrent notamment que la Terre tourne de moins en moins vite et que la Lune s'éloigne de la Terre d'un peu moins de 4 cm par an. La cause de ces changements est l'effet de marée qui intervient lorsque deux objets gravitent l'un autour de l'autre. La Lune, par son action gravitationnelle, déforme la Terre. Résultat: notre planète n'est pas sphérique mais plutôt oblongue. Seulement, la Terre tourne sur elle-même plus rapidement que la Lune autour de la Terre, ce qui crée une asymétrie: la position de la Lune et l'axe principal de l'ellipsoïde qu'est en réalité la Terre ne sont pas alignés. Cette configuration engendre une perturbation du mouvement de l'ellipsoïde terrestre et cause son ralentissement.

Cet effet de marée se poursuivra jusqu'au moment où les vitesses angulaires s'égaliseront, c'est-à-dire que la période orbitale de la Lune autour de la Terre vaudra la période de rotation de la Terre sur elle-même. Les forces agissant sur la Terre seront alors symétriques et le système sera stable. C'est ce qui arrivera un jour. Actuellement, l'équilibre est déjà à moitié atteint puisque la synchronisation de la Lune est déjà réalisée en raison du champ de gravitation de la Terre, beaucoup plus intense. C'est pour cela que nous avons toujours vu et que nous verrons toujours la même face de la Lune.

On observe ce même effet dans d'autres lieux du système solaire. Les satellites joviens comme Ganymède ou Europa sont aussi synchronisés et présentent toujours la même face vers Jupiter. Le phénomène se retrouve également dans des systèmes de deux étoiles. *le*



Qu'est-ce que l'albédo ?

L'albédo est la fraction de lumière réfléchiée par un astre. Cette notion est essentiellement appliquée aux corps du système solaire (planètes, lunes, astéroïdes...). Il en existe de deux types. Le premier est appelé l'albédo de Bond. Il mesure le rapport entre la totalité de l'énergie radiante réfléchiée par une planète dans toutes les directions et l'énergie radiante qui lui tombe dessus.

Le second est l'albédo géométrique. Il s'agit du rapport entre l'intensité lumineuse réfléchiée vers l'observateur et celle reçue par la planète pour un angle de phase nul, c'est-à-dire lorsque le Soleil, l'observateur et la planète (ou la Lune) sont alignés. On le définit également comme le rapport entre la brillance du disque planétaire et la brillance qu'aurait un disque parfaitement diffusant (agissant donc comme un écran blanc) et de même taille.

Dans les deux cas, on peut calculer l'albédo sur tout le spectre électromagnétique ou sur un domaine spectral restreint (par exemple la lumière visible).

L'albédo est aussi utilisé dans le contexte des étoiles binaires serrées (c'est-à-dire des couples d'étoiles tournant l'une autour de l'autre à une distance de quelques fois leur rayon), car celles-ci présentent souvent des effets de réflexion mutuelle mesurables. C'est le cas notamment de la binaire à éclipses Algol. *pn*

La Terre possède une surface et un albédo beaucoup plus grands que la Lune. Ce «clair de Terre» est-il suffisant pour qu'un observateur placé sur notre satellite ne se trouve jamais dans une obscurité complète ?

Tout dépend de l'endroit où il se trouve sur la Lune. Pour répondre à cette question, il faut prendre en compte l'albédo géométrique visuel. Celui de la Lune vaut 0,12, et celui de la Terre 0,367, soit trois fois plus. En multipliant ce dernier chiffre avec le rapport des surfaces des disques apparents des deux astres (qui vaut 13,43), on obtient une pleine Terre sur la

Lune ayant une luminosité 40,7 fois plus importante qu'une pleine lune sur Terre. D'ailleurs, ce qu'on appelle la lumière cendrée, c'est-à-dire la faible illumination de la partie sombre du disque lunaire lorsque la Lune est en croissant, est justement due à l'illumination terrestre – depuis la Lune, la Terre est presque pleine à ce moment.

Résultat: un observateur situé sur la face visible de la Lune (d'où il voit toujours la Terre) sera toujours éclairé un tant soit peu, soit par le Soleil, soit par la Terre, soit par les deux. Mais s'il est situé près du bord de l'hémisphère visible, il ne sera éclairé que par un fin croissant terrestre juste avant de l'être (ou juste après l'avoir été) par le Soleil. En revanche, un habitant de la Lune situé sur la face cachée ne verra jamais la Terre et ne pourra donc être éclairé que par le Soleil. Il restera alors dans l'obscurité complète (à la luminosité des étoiles, des planètes et de la lumière zodiacale près) 15 jours terrestres par lunaison. *pn*

Le 22 décembre 1999, la Lune a été particulièrement brillante.

Pourquoi ?

Ce jour-là, la Lune était non seulement pleine, mais se trouvait également au point de son orbite le plus proche de la Terre. La conjonction de ces deux effets a comme conséquence que la Lune était particulièrement brillante ce jour-là. Quantitativement, une pleine lune au périhélie (le point de l'orbite le plus proche de la Terre) est environ 30% plus brillante qu'une pleine lune à l'apogée (le point le plus éloigné). Il est à noter que l'occurrence d'une pleine lune au périhélie n'a rien d'un phénomène rare. La précédente date du 4 novembre 1998 et celle qui a suivi s'est produite le 7 février 2001. *dr*

Pourquoi est-ce que la Lune ou le Soleil paraissent beaucoup plus grosses au lever et au coucher ?

La taille «immense» de la Lune ou du Soleil près de l'horizon n'est qu'une illusion d'optique. Pour les deux astres, le rayon angulaire est d'environ 15 minutes d'arc (un quart de degré), quelle que soit la hauteur au-dessus de l'horizon.

Lorsqu'on regarde près de l'horizon, toutefois, le cerveau compare automatiquement les astres aux détails lointains du paysage, collines ou silhouettes arborisées se trouvant à plusieurs kilomètres (une dizaine environ) de l'observateur. Du coup, pour le système nerveux central, les diamètres des disques solaire ou lunaire deviennent comparables à la taille réelle de ces objets familiers, soit 50 mètres environ.

Lorsqu'on regarde vers le zénith, en revanche, le Soleil ou la Lune se retrouvent seuls dans le ciel. Et là intervient la limite de notre vision binoculaire qui est de 300 mètres – en deçà, nous arrivons à estimer les distances par stéréoscopie visuelle et au-delà en se servant de la perspective,

s'il y en a. A grande hauteur sur l'horizon, sans point de comparaison possible, le cerveau place donc automatiquement la sphère céleste (et les astres qui y évoluent) à 300 mètres de distance. Résultat: notre esprit attribue arbitrairement une valeur de 3 mètres aux diamètres réels du Soleil et de la Lune.

On subit d'ailleurs la même illusion avec les constellations. Lorsque Orion et son baudrier se lèvent en soirée, ils paraissent plus grands qu'au milieu de la nuit lorsqu'ils sont hauts dans le ciel. *bn*

Est-ce que la trajectoire de la Lune dans le ciel concorde avec celle du Soleil ?

La trajectoire apparente de la Lune dans le ciel est proche de celle du Soleil, mais pas identique. Cela vient du fait que le plan de l'orbite lunaire autour de la Terre n'est incliné que de 5 degrés et 09 minutes par rapport à l'écliptique, le plan qui contient l'orbite de la Terre autour du Soleil. Si cette inclinaison était nulle, alors la trajectoire apparente de la Lune dans le ciel serait la même que celle du Soleil, à l'effet de parallaxe près. En effet, même si l'orbite lunaire était dans l'écliptique, la Lune apparaîtrait 1 degré au sud de la trajectoire du Soleil pour un observateur situé au pôle nord et 1 degré au nord pour un observateur situé au pôle sud.

De toute façon, la trajectoire de la Lune ne peut pas être représentée sur une carte céleste car, en plus, le plan de son orbite tourne sur une période de 18,6 ans. *pn*

Est-ce que la Lune a une influence sur la décoloration des bâtiments ? Et notre satellite suit-il une course particulière dans le ciel, comme le Soleil, ou parcourt-il toute la voûte céleste ?

Dans son mouvement apparent dans le ciel, la Lune se déplace à peu près sur la même trajectoire que le Soleil, c'est-à-dire sur l'écliptique. Par conséquent, en pratique, les bâtiments sont «exposés» de la même manière à la Lune qu'au Soleil, c'est-à-dire essentiellement du côté du sud, également de l'est et de l'ouest, mais jamais directement du nord. Ce fait est indépendant des phases lunaires, qui, elles, commandent la quantité de lumière que la Lune nous envoie. Et cette quantité est toujours inférieure (même en pleine lune) au 400 000^e de celle que nous recevons du Soleil. Elle ne peut donc jouer aucun rôle dans la décoloration des bâtiments. *pn*

Est-il possible que la Lune se retrouve deux fois exactement au même endroit dans le ciel et dans la même phase ?

C'est une question qui demande un peu de calcul. Pour trouver la réponse il faut commencer par découvrir le plus petit nombre entier de révolutions

synodiques de la Lune correspondant au plus petit nombre entier d'années sidérales terrestres. Comme les phases lunaires recommencent tous les 29,53059 jours et la Terre effectue un tour complet du Soleil en 365,256 jours, il s'agit, en d'autres termes, de trouver la fraction la plus simple égale au rapport de ces deux valeurs.

On remarque dès lors que 480 années sidérales terrestres correspondent à peu près à 5937 lunaisons, à 0,22 jour près, soit un petit décalage de 5 heures et 20 minutes. Comme cet écart n'implique pas une différence de phase sensible, on peut considérer cette solution comme satisfaisante.

Toutefois, il subsiste un problème: l'orbite lunaire est inclinée par rapport à l'écliptique de 5 degrés 09 minutes. Du coup, les mêmes phases n'ont évidemment pas lieu toujours au même endroit, d'autant plus que le plan orbital subit un mouvement de précession. Donc, si l'on veut que la Lune soit exactement devant le même champ stellaire vu depuis la Terre, il faut encore tenir compte du cycle du Saros, qui est la période du retour de la Lune et du Soleil à leurs positions initiales relativement à la Terre. Ce cycle est de 18 ans et 11 jours, calculé en années tropiques de 365,2422 jours, ce qui représente une durée de 6585,32117 jours. Pour terminer le calcul, il faut maintenant trouver à quel nombre de cycles du Saros correspondent des multiples entiers de lunaisons et d'années sidérales.

Une solution convenable serait de prendre 8 fois 480 années sidérales, une durée égale à 213 cycles du Saros, à 10 jours près. Toutefois, après tout ce temps, l'écart de phase lunaire pour la longitude écliptique voulue n'est plus 0,22 jour, mais 1,76 jour (soit 8 fois 0,22), ce qui commence à devenir sensible même à l'œil nu.

Conclusion: tous les 3840 ans, la Lune se retrouve assez exactement devant le même champ stellaire, mais avec une phase de 1,76 jour trop avancée par rapport à la situation précédente. *pn*

Comment peut-on calculer les dates des pleines lunes des années à venir ?

Le calcul précis des phases de la Lune est très compliqué, car l'orbite de notre satellite n'est pas circulaire et, de plus, elle est violemment perturbée par le Soleil. Si l'on s'en tient à une orbite moyenne circulaire, on obtient des dates approximatives avec une précision maximale de 20 heures. Pour connaître les pleines lunes du XXI^e siècle, suivez la démarche suivante:

a = l'année qui nous intéresse,

j = le nombre de jours qui se sont écoulés depuis le 1^{er} janvier 2000,

p = le nombre de phases complètes (lunaisons) qui ont eu lieu depuis le 1^{er} janvier 2000, par exemple:

$p = 0$ pour la nouvelle lune du 6 janvier 2000,

$p = 0,25$ pour le premier quart qui suit,

$p = 0,5$ pour la pleine lune du 20 janvier 2000, etc.

Sachez qu'il y a 12,368 lunaisons par année.

1. On multiplie $(a-2000)$ par 12,368.
2. De ce résultat, on prend les deux chiffres qui suivent la virgule et on les arrondit au quart inférieur. On obtient ainsi p .
3. On applique la formule suivante: $j = 5,096819 + 29,53058870 \cdot p$.
4. On convertit j , qui est exprimé en jours, en années, mois, jours, heures et minutes, puis on ajoute le décalage horaire saisonnier (+1 heure en hiver, +2 heures en été).
5. Si on tombe sur décembre de l'année précédant celle qui vous intéresse, on passe au point 6.
6. On ajoute 0,25 à p (obtenu au point 2) et on recommence au point 3. On arrête quand la date est au-delà de celle qui est souhaitée. *bn*

Le 31 juillet 2004, la pleine lune était qualifiée de «bleue», qu'est-ce que cela signifie ?

Une «lune bleue» est simplement le nom donné à la seconde pleine lune d'un mois. Comme le mois lunaire (29,53 jours) est plus court que le mois de notre calendrier, il arrive de temps en temps que nous ayons deux pleines lunes au cours d'un même mois. Cela se produit environ tous les trois ans. *dr*

Quelle est la durée entre la nouvelle lune et l'apparition du premier croissant ? Est-ce que cette durée dépend de la position de l'observateur sur la Terre ?

L'appellation «nouvelle lune» est ambiguë, car elle peut signifier à la fois la conjonction de la Lune avec le Soleil et le moment où le croissant apparaît. Le premier événement peut être calculé à la seconde près. Or, la plupart des calendriers se fondent sur le second, à l'exception notable du calendrier chinois qui se recale de manière à ce que les éclipses de Soleil – c'est-à-dire la nouvelle lune selon la première définition – tombent systématiquement au début du mois.

Le temps qui s'écoule entre les deux instants dépend de l'endroit où l'on se trouve sur Terre. Prenons le cas de la première nouvelle lune de l'an 2005. La conjonction a eu lieu le 10 janvier à 12 h 03, temps universel. Pour un observateur situé à une latitude de 70 degrés nord, plongé en pleine nuit polaire, la Lune (proche du Soleil en direction) est restée sous l'horizon jusqu'au 12 janvier.

Pour des latitudes plus proches de l'équateur, l'angle formé par l'horizon et la trajectoire apparente de la Lune joue un rôle important. Enfin les qualités du site – haute altitude, transparence de l'atmosphère, absence

de source lumineuse parasite et météo clémente – sont des facteurs déterminants.

Dans de bonnes conditions, on peut admettre que le nouveau croissant est observable à l'œil nu entre 20 et 40 heures après la conjonction pour des latitudes tropicales ou tempérées. Cette observation est possible beaucoup plus tôt avec un instrument, mais très dangereuse pour la vue.

Le décalage horaire joue aussi un rôle. En Amérique, avec des conditions favorables, ce croissant était observable indubitablement le soir du 11 janvier. En Asie, c'était impossible avant le 12 janvier. *bn*

La Lune se lève chaque jour avec un retard, par rapport au jour précédent, qui change entre 30 minutes et 1 heure. Cette variation dans le retard correspond-elle aux phases de la Lune ou aux saisons ?

Ces variations n'ont rien à voir avec les phases ni avec les saisons. Les levers de Lune ont lieu une demi-heure à une heure plus tard chaque jour à cause du fait que le satellite se déplace d'ouest en est sur son orbite. Et si le retard n'est pas constant, c'est principalement parce que la Lune se déplace au voisinage de l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre) et non de l'équateur céleste (le plan défini par l'équateur terrestre).

Plus précisément, l'orbite de notre satellite est inclinée en moyenne de seulement 5 degrés et 09 minutes par rapport à l'écliptique, mais elle peut s'écarter de l'équateur céleste de près de 29 degrés, vers le nord ou vers le sud. Or, sous les latitudes tempérées, comme en Suisse, un astre se lève d'autant plus tôt et se couche d'autant plus tard qu'il se trouve au nord de l'équateur céleste. À l'inverse, il se lèvera plus tard et se couchera plus tôt s'il se trouve au sud de celui-ci. À la limite, les astres situés suffisamment au nord ne se couchent jamais (l'étoile Polaire et celles qui l'entourent), tandis que ceux situés trop au sud ne se lèvent jamais. Lors de sa course sur son orbite, la Lune change de déclinaison d'un jour à l'autre. Ainsi son lever sera-t-il retardé ou avancé selon qu'elle s'éloigne ou se rapproche du pôle céleste nord.

Une autre cause est l'excentricité de l'orbite lunaire qui vaut 0,055. En raison de la deuxième loi de Kepler, la Lune se déplace plus vite au péri-gée qu'à l'apogée, tendant à allonger, respectivement raccourcir, l'intervalle entre deux levers successifs. *pn*

Quelles sont les différences entre les phases montantes et descendantes et les phases croissantes et décroissantes de la Lune ?

En ce qui concerne une Lune croissante ou décroissante, la définition est claire et sans ambiguïté: elle se réfère à la forme apparente du satellite et à sa luminosité. De la nouvelle (éclat minimum) à la pleine lune (éclat

maximum) on dit qu'elle est croissante car sa partie éclairée grossit de jour en jour. De la pleine à la nouvelle lune, on dit qu'elle est décroissante.

En revanche, les notions de lune montante (ou ascendante) et descendante sont plus ambiguës, car il existe diverses définitions. La plus courante se réfère au changement de position de la Lune dans le ciel de jour en jour. Cette variation dépend de son orbite autour de la Terre et de l'obliquité de l'écliptique (angle entre l'équateur et l'écliptique). En effet, au fil du cycle lunaire (environ 29 jours et demi), la Lune monte ou descend en déclinaison (distance angulaire par rapport à l'équateur céleste). Pour le constater, il suffit de repérer chaque jour la hauteur de la Lune dans le ciel quand elle passe dans la direction du sud. Si cette hauteur augmente, on dit que la Lune est montante et inversement. On peut aussi repérer depuis un lieu donné l'endroit de l'horizon où elle se lève: si cet endroit se déplace au fil des jours vers le nord, la Lune est également montante.

L'amplitude de cette variation de hauteur de la Lune par rapport à l'équateur céleste au cours d'un cycle lunaire varie dans le temps. Il peut passer de ± 18 degrés à ± 28 degrés au cours d'un autre cycle, appelé la nutation lunaire et qui dure environ 18 ans.

Les termes de Lune montante et descendante sont parfois utilisés pour d'autres phénomènes (sans même parler de la confusion avec la Lune croissante et décroissante). On qualifie parfois ainsi le mouvement de la Lune dans le ciel au cours d'un jour ou d'une nuit. Ce déplacement est en fait lié à la rotation terrestre et affecte tous les astres (Soleil, Lune, planètes, étoiles) de la voûte céleste. *gb*

Est-ce vrai que couper les cheveux les nuits de pleine lune améliore leur repousse ainsi que le bien-être de la personne?

Cela est tout à votre honneur que de vous préoccuper du bien-être de vos clients en allant jusqu'à tenir compte de l'hypothétique influence de la Lune sur la pousse des cheveux. Cependant, le seul renseignement que nous puissions vous fournir à ce sujet vous décevra, puisqu'il n'existe pas la moindre preuve que la Lune exerce une quelconque influence sur la pousse des poils ni sur quelque fonction biologique que ce soit. La satisfaction esthétique ou les sentiments romantiques procurés par un beau clair de Lune ont peut-être des répercussions physiologiques chez l'être humain, mais certainement aucune influence directe. Tout aussi légendaire est l'action de la pleine lune sur la fréquence des naissances, d'ailleurs. On sait en effet que cette fréquence est totalement indépendante des phases de la Lune, en dépit des affirmations contraires de bien des sages-femmes.

En revanche, la Lune a certainement joué un rôle dans l'histoire de la vie sur Terre, mais à l'échelle des temps géologiques. *pn*

Pourquoi, lors d'une éclipse totale de Lune, notre satellite naturel prend-il une teinte rouge ?

L'origine des couleurs rouges observables à la surface de notre satellite durant son éclipse est à rechercher dans le rôle que joue l'atmosphère terrestre. La Terre, en tant que sphère solide, bloque la lumière solaire directe et crée l'ombre dans laquelle va se cacher la Lune. Cependant, l'atmosphère de notre planète va réfracter (c'est-à-dire dévier) une certaine quantité de lumière provenant du Soleil à l'intérieur de cette ombre. La lumière traverse donc notre atmosphère et y est filtrée. C'est pourquoi elle est essentiellement rouge, puisque cette couleur (ou longueur d'onde) est moins sujette à la diffusion que les autres et traverse ainsi plus facilement de grandes quantités d'atmosphère. *dr*

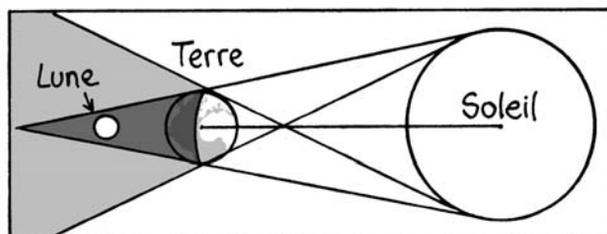
Comment se déroulent les éclipses de Lune et de Soleil ?

Une éclipse de Lune se produit lorsque la Terre s'interpose entre notre satellite naturel et le Soleil.

Et pour qu'une éclipse de Soleil se produise, il faut que la Lune s'interpose entre l'astre du jour et notre planète. La distance du Soleil à la Terre est d'environ 400 fois celle de la Lune à la Terre. Quant au diamètre de la Lune, il est environ 400 fois plus petit que celui du Soleil. Cette extraordinaire coïncidence fait que ces deux astres nous apparaissent dans le ciel sous un diamètre apparent voisin. Ainsi, le disque lunaire peut recouvrir complètement le disque solaire. Ce phénomène est appelé éclipse totale de Soleil. Comme les distances Terre-Soleil et Terre-Lune varient légèrement, le diamètre apparent de la Lune peut être inférieur à celui du Soleil. Le disque lunaire ne parvient alors pas à masquer totalement le disque solaire et le phénomène est appelé éclipse annulaire.

Par ailleurs, si le disque solaire n'est que partiellement masqué par la Lune, l'éclipse est dite partielle.

Finalement, comme le plan de l'orbite lunaire autour de la Terre et celui de la Terre autour du Soleil (plan de l'écliptique) ne coïncident pas, il n'y a pas d'éclipse de Lune à chaque pleine lune, ni d'éclipse de Soleil à chaque nouvelle lune. *dr*



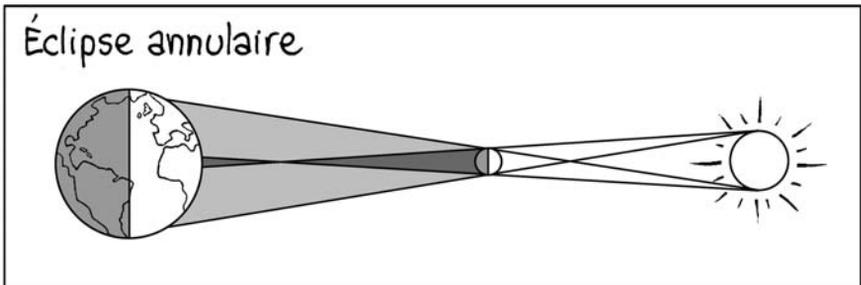
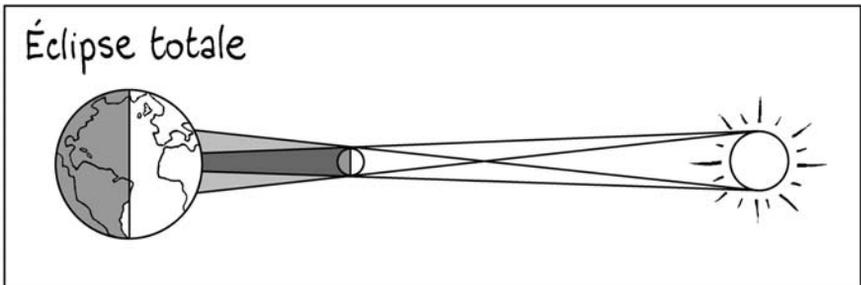
■ ombre ■ pénombre

Comment se fait-il que la trajectoire des rayons lumineux soit déviée autour de la Lune lors d'une éclipse solaire puis retrouve son chemin initial de manière à ce que l'on puisse voir des objets situés derrière elle ?

Lors d'une éclipse totale de Soleil, c'est surtout le Soleil qui incurve les rayons venant des étoiles lointaines. La Lune a un effet semblable mais beaucoup plus faible, voire imperceptible. Cette déflexion donne l'impression que les étoiles sont repoussées par le Soleil, mais c'est une illusion d'optique, comme celle produite par une loupe grossissante, élargissant l'apparence des objets.

Cette déviation des rayons des étoiles passant près du Soleil a lieu en tout temps, mais l'éclat du Soleil nous empêche de voir ou mesurer les étoiles trop proches de lui. Lors d'une éclipse totale, la Lune bloque les rayons solaires et alors la position des étoiles assez brillantes peut être mesurée durant quelques minutes.

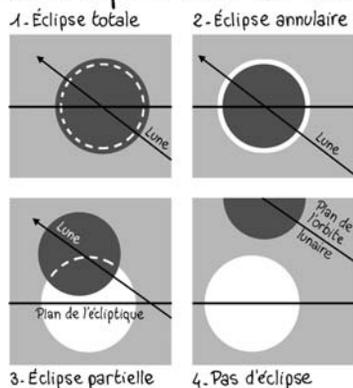
Cette déviation de la lumière est prédite par la théorie de la relativité d'Einstein. *dp*



Peut-on filmer une éclipse de Soleil avec un caméscope et, si oui, peut-on regarder dans le viseur ?

Oui, vous pouvez filmer une éclipse de Soleil avec un caméscope. L'enregistrement vidéo de la phase totale ne requiert aucune précaution particulière. En revanche, celle des phases partielles impose l'utilisation de fil-

Les éclipses vues du ciel



tres adéquats. Il est alors exclu de regarder à travers le viseur du caméscope sans protection. *dr*

Quelle est l'explication du phénomène dit des ombres volantes que l'on observe juste avant ou juste après la totalité d'une éclipse de Soleil ?

L'origine des ombres volantes reste mal comprise. Actuellement l'explication la plus satisfaisante décrit ce phénomène comme un effet de la propagation «mouvementée» de la lumière dans l'atmosphère terrestre. Ces bandes plus ou moins sombres sont produites par des cellules d'air de densités différentes, ayant des indices de réfraction différents, qui jouent le rôle de lentilles. Ces cellules vont parfois focaliser, parfois disperser, la lumière qui sera ainsi redistribuée sur des régions, les bandes, plus ou moins brillantes.

La clé permettant de comprendre les ombres volantes réside dans la réponse à la question suivante: «Pourquoi les planètes scintillent-elles beaucoup moins que les étoiles?» Cette différence de comportement s'explique par un «lissage» de la scintillation des différents points sources qui composent un disque planétaire apparent. Une source lumineuse étendue, comme une planète, ne peut scintiller que si la turbulence atmosphérique est proche de l'observateur. Le disque apparent de la planète est alors globalement affecté et il n'y a plus de «lissage» possible.

Dans le cas d'une éclipse totale de Soleil, l'astre du jour apparaît comme un croissant de taille variable, juste avant ou juste après la phase de totalité. Il s'agit donc d'une source lumineuse d'extension variable. Sa «scintillation» sera régie par des couches atmosphériques turbulentes de différentes altitudes. Plus on se trouve proche de la totalité, plus les couches élevées auront un effet.

Proche de la totalité, le croissant solaire devient similaire à une ligne

infiniment mince. Sa «scintillation» se traduit ainsi par des bandes plus ou moins sombres dont les mouvements sont déterminés par les vents régnant dans les différentes couches atmosphériques impliquées dans la «scintillation». *dr*

3 LE SOLEIL

Le Soleil est-il un astre ou une planète ?

La question est ambiguë. Par définition, tout corps céleste est un astre. Mars, la Terre, un simple astéroïde, une comète ou le Soleil sont tous des astres bien que leur nature soit très différente. En revanche, si l'on demande «le Soleil est-il une étoile ou une planète?», alors il n'y a plus d'équivoque. La différence entre une étoile et une planète réside dans le fait que l'étoile produit de l'énergie en son cœur alors que ce n'est pas le cas pour la planète. La lumière qui nous vient du Soleil est issue des réactions thermonucléaires qui ont lieu en son centre alors que celle qui nous provient des planètes comme Mars ou Vénus n'est simplement que la réflexion des rayons solaires sur leur surface, à l'instar de la Lune.

La raison pour laquelle les étoiles produisent de l'énergie alors que les planètes ne le font pas est une simple question de masse. Les étoiles naissent de la contraction d'un nuage de matière qui s'accompagne d'une augmentation de la température centrale. Si la masse de ce nuage est suffisante, il peut se contracter de manière à ce que la température atteigne 10 millions de degrés au centre, permettant d'enclencher des réactions thermonucléaires et de produire de l'énergie. L'étoile se met alors à rayonner. Il faut, pour amorcer la combustion de l'hydrogène, une quantité de matière supérieure à 8% de la masse du Soleil, soit environ 80 fois la masse Jupiter. En deçà de cette limite, on trouve les naines brunes, c'est-à-dire des étoiles avortées qui ont allumé quelques réactions, mais pas la combustion de l'hydrogène. Elles ne brillent donc pas. Les planètes, elles, ont des masses encore plus faibles. Les planètes géantes comme Jupiter, ou celles que l'on découvre autour d'autres étoiles que le Soleil, ont une masse inférieure à 1,5% de celle de notre Soleil, ou 15 fois la masse Jupiter. *fr*

Quelle est la structure du Soleil et sa composition ?

Le Soleil est une sphère de gaz essentiellement constituée d'hydrogène et d'hélium dont la cohésion est maintenue par l'attraction de la gravité. En son centre, des réactions nucléaires produisent de l'énergie et transforment l'hydrogène en hélium. Sa taille est énorme. Le Soleil a en effet une

masse égale à $2 \cdot 10^{30}$ kg, soit 2 milliards de milliards de milliards de tonnes ou encore plus de 330 000 fois la masse de la Terre (qui pèse $5,6 \cdot 10^{24}$ kg). Son rayon est de 696 000 kilomètres. Si l'on divise son volume par sa masse, on obtient une densité moyenne pour le Soleil égale à 1400 kilos par mètre cube (1,4 gramme par cm cube), soit une densité environ quatre fois inférieure à celle de la Terre.

Pour savoir plus précisément de quels éléments chimiques est constitué le Soleil, une première approche consiste à analyser la lumière qu'il émet par la technique de la spectroscopie. Le spectre de notre étoile est l'arc-en-ciel obtenu après que sa lumière a traversé un prisme. La présence de raies sombres, qui sont des raies d'absorption, permet alors de déduire la présence de certains éléments chimiques dans son atmosphère, comme le sodium, le fer, etc. Une analyse plus détaillée peut même fournir les abondances de ces éléments. C'est grâce à la spectroscopie, jointe à d'autres techniques, que la composition de la surface du Soleil a été mesurée. Il s'agit d'un gaz dont 70% de la masse est constituée d'hydrogène et 28% d'hélium. Les 2% restant comprennent tous les autres éléments chimiques, la moitié étant occupé par l'oxygène.

Pour connaître la nature du centre du Soleil, il faut faire intervenir des lois physiques qui décrivent le comportement de la matière dans différentes conditions et soumise à des forces diverses. La première de ces forces est la gravitation. Le gaz est attiré par la masse du Soleil comme nous le sommes par la masse de la Terre. Cette attraction tend à comprimer sans cesse l'étoile et, si elle ne s'effondre pas, c'est parce qu'elle est contre-carrée par une autre force. Cette dernière est liée aux chocs que les particules de gaz subissent continuellement entre elles. Ces chocs exercent une pression qui deviendra d'autant plus grande que l'on pénétrera à l'intérieur du Soleil.

Connaissant les expressions données par la physique de la force d'attraction gravitationnelle et des forces de pressions, sachant également que ces deux forces doivent s'opposer en tous points à l'intérieur du Soleil, il est possible d'en déduire les conditions qui règnent au centre du Soleil, en supposant que ce dernier soit entièrement constitué de gaz, du bord jusqu'au centre. Résultat: la température centrale se monte à environ 15 millions de degrés et la densité centrale atteint les 150 g/cm^3 . Ce dernier chiffre est considérable. Il représente 18 fois la densité d'une plaque de fer sur Terre. Peut-on encore parler de gaz dans ces conditions? La réponse est oui. Les températures très élevées qui règnent au centre du Soleil permettent de maintenir l'état gazeux même à de telles densités.

Ces conditions favorisent l'activation de réactions de fusion nucléaires. Ces dernières produisent de l'énergie tout en modifiant la composition des régions centrales du Soleil, car elles transforment l'hydrogène en hélium. Des modèles numériques du Soleil indiquent qu'en son cœur 34% de la masse est constitué d'hydrogène et 64% d'hélium. *gm*

Comment se fait-il que l'on observe des molécules d'oxygène (O₂) dans l'atmosphère du Soleil ?

La molécule O₂ est certainement présente dans l'atmosphère solaire, bien qu'en très petites quantités. A tel point qu'elle reste d'ailleurs pratiquement inobservable dans le Soleil ou dans d'autres étoiles. L'oxygène se trouve plutôt dans les molécules de CO (monoxyde de carbone), d'OH (radical hydroxyle) ou encore sous forme atomique. On trouve toutefois dans le Soleil des molécules, comme le radical CH, qui sont plus fragiles que l'O₂. Il y a même un peu d'eau (H₂O) dans les taches solaires dont la température est inférieure à celle du reste de la photosphère.

En fait, la survie des molécules dans une atmosphère stellaire est d'autant moins probable que la température qui y règne est élevée. La présence de ces substances dépend de l'énergie de dissociation propre à chaque molécule (elle vaut 5,08 électronvolts pour l'O₂, mais seulement 3,47 pour le CH), de l'abondance des atomes qui la constitue et de la compétition avec les autres molécules. En effet, la formation de CO, par exemple, utilise des atomes d'oxygène qui, du coup, ne sont plus disponibles pour fabriquer de l'O₂. *pn*

Comment fait-on pour peser le Soleil ?

On détermine la masse du Soleil par l'influence qu'elle exerce sur son entourage. En effet, c'est le Soleil, de loin l'astre le plus massif du système solaire, qui définit les orbites des planètes. Depuis les travaux d'Isaac Newton (1642-1727), on connaît la relation qui existe entre la vitesse d'une planète autour du Soleil, sa distance à l'astre du jour et la masse du Soleil. Cette relation nous apprend que si le Soleil était quatre fois plus massif qu'il n'est réellement, alors la Terre devrait avoir une vitesse de révolution deux fois plus importante qu'elle n'a aujourd'hui.

Connaissant la durée d'une année terrestre et la distance Terre-Soleil, nous sommes donc capable de déterminer la masse du Soleil, qui est égale à 2·10³⁰ kg, soit 2 milliards de milliards de milliards de tonnes. *dr*

Quel est l'aplatissement polaire du Soleil ?

L'aplatissement du Soleil est extrêmement faible. Le rapport entre le rayon équatorial de l'étoile et son rayon polaire est plus petit que 1,00002. *dr*

A quoi correspondent les cycles solaires de onze ans ?

Les cycles solaires se réfèrent à l'activité du Soleil qui passe par un maximum tous les onze ans environ. Tous les mécanismes qui les sous-tendent ne sont pas encore élucidés, mais voici ce que l'on peut dire. Le Soleil est une sphère gazeuse, composée essentiellement d'hydrogène et d'hélium.

Les températures sont telles (de l'ordre de 6000 degrés au niveau de la surface visible appelée photosphère et de 15 millions de degrés au centre), que ce gaz est ionisé, c'est-à-dire que les électrons sont arrachés de leur noyau. On est donc en présence d'un plasma d'électrons et, surtout, de protons, qui est entraîné par la rotation du Soleil sur lui-même – l'astre accomplit un tour complet en 27 jours environ. Ces particules chargées et en mouvement créent un courant électrique qui induit à son tour un champ magnétique.

Si le Soleil tournait comme un corps solide, ce champ magnétique serait semblable à celui de la Terre, avec des lignes de champ s'échappant d'un pôle pour rejoindre l'autre. Mais le Soleil est animé d'une rotation différentielle, c'est-à-dire que sa vitesse varie en fonction de la latitude. L'équateur réalise un tour complet en 26 jours, alors les zones situées à la latitude de 60 degrés l'accomplissent en 31 jours.

La rotation rapide à l'équateur a comme effet d'«enrouler» les lignes de champ et de donner naissance à des régions où le champ magnétique devient suffisamment intense pour perturber le plasma dans son voisinage. Les particules ont notamment beaucoup de peine à traverser ces zones car leurs trajectoires s'enroulent autour des lignes de champ. Conséquence: la densité à l'intérieur de ces régions diminue, les particules ne peuvent plus s'agiter comme bon leur semble, le plasma se refroidit et s'assombrit. Une tache noire apparaît alors, là où les lignes de champ pénètrent dans la surface solaire. En réalité, les taches n'apparaissent noires que par contraste avec le voisinage. Isolées de leur contexte, elles seraient très brillantes car leur température reste élevée, autour de 4000 degrés.

Tous les onze ans environ (la période varie entre 9 et 12,5 ans), la direction du champ magnétique s'inverse. Le moment où les taches sont les plus nombreuses est appelé maximum solaire. Les éruptions se multiplient, ainsi que les aurores polaires sur Terre. Le champ magnétique terrestre est à son tour perturbé par cette activité solaire débordante, et peut-être aussi le climat. D'ailleurs, l'absence prolongée de taches solaires durant un demi-siècle, entre 1650 et 1700 (période dite du minimum de Maunder), a coïncidé avec un climat plus froid.

Quant à savoir pourquoi le cycle dure onze ans et pourquoi apparaissent de temps en temps des irrégularités comme le minimum de Maunder, ce sont des mystères qui restent encore à résoudre. *gm*



Que sont les éruptions solaires ?

Lors des éruptions solaires, l'énergie stockée dans les champs magnétiques associés aux groupes des taches solaires est soudain libérée de manière explosive; des particules sont alors éjectées et des ondes de choc se produisent sur la surface et dans l'atmosphère solaire. La durée totale du phénomène varie entre quelques minutes et quelques heures. *gm*

Lorsque nous calculons le nombre de taches solaires, nos résultats sont souvent inférieurs à ceux des astronomes professionnels. Y a-t-il une explication ?

Dénombrer les taches solaires est une observation importante qui permet de continuer la série historique qui remonte à 1749. La méthode habituelle consiste à compter 1 point par tache isolée et plus 10 points par groupe de taches. Cette technique soulève quelques remarques. Dans ce décompte, on ne tient pas compte du fait qu'une tache soit grande ou petite. De plus, les plus petites taches ne sont comptées que par des observateurs entraînés disposant d'une instrumentation adaptée et, surtout, d'un site ayant une turbulence atmosphérique faible. Finalement, le facteur 10 ne repose pas sur des bases solides. Il pourrait tout aussi bien valoir 5 ou 25. Il n'existe que pour des raisons historiques.

Malgré la simplicité du comptage et l'absence de bases rigoureuses, la méthode a le mérite de refléter tout de même l'activité du Soleil. Il faut donc continuer à l'utiliser. Certes, deux observateurs différents (ou le même observateur au même lieu mais avec des instruments différents) ne compteront pas pareillement les taches et les groupes. Mais pour s'affranchir de ce biais, on peut multiplier la valeur obtenue par un coefficient personnel de sorte que, en moyenne, tout le monde obtienne des résultats semblables. Si vous voyez plus ou moins de taches que les autres personnes (ou que votre interprétation de ce qu'est un groupe de taches diffère de celles des autres observateurs), votre coefficient sera différent de l'unité.

Davantage que la valeur de ce coefficient, c'est sa constance dans le temps qui est importante. En effet, en raison de l'absence de définition claire de ce qu'est un groupe de taches, chacun peut interpréter à sa manière ses propres observations. Mais ce qui compte réellement est de mesurer la variation de l'activité solaire. Et, pour cela, il faut pouvoir garder son coefficient personnel le plus constant possible. Il convient donc d'adopter une technique de comptage et de s'y tenir, même si les résultats semblent trop faibles ou trop forts. *rb*

Combien de temps vivra le Soleil ?

L'évolution complète du Soleil, de sa naissance à sa mort, a une durée estimée à 10 milliards d'années. Il en reste encore 5 environ. *dr*

Est-ce que vous savez vraiment quand le Soleil est né ?

L'âge du Soleil est assez bien déterminé si l'on suppose que le Soleil, les planètes et les autres objets tels les météorites qui existent dans le système solaire se sont formés en même temps. Pour déterminer l'âge du Soleil, il suffit de mesurer celui d'un de ces objets. On utilise pour cela les météorites qui hantent notre système solaire et qui, de temps en temps, tombent sur Terre. On peut alors estimer leur âge en mesurant leur composition chimique restée intacte depuis la formation du système solaire. En effet, certains éléments qu'ils contiennent sont radioactifs, c'est-à-dire qu'ils se transforment (on dit qu'ils se désintègrent) petit à petit en d'autres éléments. C'est le cas notamment de l'uranium. En mesurant la quantité qui en reste dans la météorite, on peut en déduire le temps qu'il a fallu pour arriver à la composition chimique actuelle. Et ces mesures indiquent que le système solaire a un âge de 4,5 milliards d'années.

Ce chiffre est par ailleurs compatible avec nos connaissances du fonctionnement du Soleil. On sait que l'énergie produite au centre du Soleil provient de la combustion de l'hydrogène qui se transforme en hélium. Le Soleil a déjà brûlé à peu près la moitié de son hydrogène en son centre depuis sa naissance, et il lui en reste suffisamment pour vivre encore 5 milliards d'années. *nm*

Dans combien d'années le Soleil va-t-il éclater ?

Le Soleil ne va pas éclater. Il finira son évolution de façon beaucoup plus douce. En effet, dans 5 milliards d'années environ, notre étoile va gonfler et devenir une géante rouge. Elle atteindra alors une taille qui lui permettra d'engloutir l'orbite de la Terre, voire celle de Mars. Puis elle perdra progressivement son enveloppe, qui formera une coquille en expansion appelée nébuleuse planétaire. On trouvera au centre de cette nébuleuse le «cadavre» du Soleil: une naine blanche. Ce type d'étoile a la taille de la Terre et une masse comprise entre une demi-masse solaire et une masse solaire. *dr*

Lorsque le Soleil entamera sa transformation vers l'état de géante rouge, il passera par un processus appelé triple alpha. De quoi s'agit-il ?

Y a-t-il un rapport avec le flash de l'hélium ?

Le processus triple alpha désigne la fusion de l'hélium en carbone et cette fusion débutera pour le Soleil après être devenu une géante rouge, dans quelque 5 milliards d'années. Il faut cependant distinguer le phénomène de formation de la géante rouge de celui de la fusion centrale de l'hélium. Le lien entre les deux n'est qu'indirect.

Actuellement, le Soleil est en train de brûler l'hydrogène situé en son centre. Et en se consumant, l'hydrogène se transforme en hélium. Au bout

d'un certain temps – assez long –, le carburant finit par s'épuiser au centre de l'étoile. Résultat: la production d'énergie nucléaire s'arrête et les régions centrales du Soleil, composées essentiellement d'hélium, s'effondrent sous l'effet de la gravitation. C'est alors aux couches supérieures d'entrer en action, car il reste encore de l'hydrogène autour du cœur d'hélium et jusqu'à la surface du Soleil. D'ailleurs, juste en bordure du noyau, la température atteint les 25 à 40 millions de degrés, ce qui est suffisant pour permettre à l'hydrogène d'y brûler. Le Soleil se présente donc comme une coquille d'hydrogène en fusion entourant un cœur d'hélium qui se contracte. Cette configuration conduit l'étoile à se transformer en une géante rouge.

Le cœur poursuit néanmoins sa contraction sous l'effet de la gravitation. La matière continue de se comprimer et de se réchauffer jusqu'à ce que la température du centre atteigne 100 millions de degrés. Quand ce seuil est atteint, l'hélium se met à brûler à son tour et produit du carbone. Pour les étoiles plus massives que 2 fois le Soleil, ce scénario se déroule sans incident. Pour les étoiles plus légères que cette limite – le Soleil en fait partie –, un phénomène physique particulier se produit dans le cœur qui va mener au «flash de l'hélium».

En fait, les étoiles comme le Soleil sont plus compactes (plus denses) que les étoiles plus massives. Ainsi, lorsque le cœur d'hélium de notre étoile, devenue géante rouge, se mettra à se contracter, la densité y atteindra 100 à 1000 kilos par centimètre cube. Dans ces conditions extrêmes, les lois de la physique deviennent «étranges» et se différencient de celles que l'on connaît à notre échelle. On entre dans le monde de la physique quantique. Et, suivant les lois quantiques, les particules ne peuvent se rapprocher trop près les unes des autres. Pour les électrons, la distance minimale est justement atteinte aux densités de 100 à 1000 kilos par centimètre cube. Dès ce moment, les électrons, plutôt que de se chevaucher, vont se mouvoir de plus en plus vite. On dit alors que les électrons sont «dégénérés». Cela entraîne une pression, appelée «pression de dégénérescence», qui s'oppose à la contraction gravitationnelle sans réussir encore à la contrecarrer. La température centrale continue donc d'augmenter, mais beaucoup plus lentement, et lorsqu'elle atteint 100 millions de degrés, la fusion de l'hélium démarre. Mais le fait que cela ait lieu dans un milieu dégénéré rend cette réaction explosive. Il se produit alors un flash dans le cœur. C'est le «flash de l'hélium».

Pour être complet, il faut signaler que si la dégénérescence au cœur de la géante rouge est très forte, la pression de dégénérescence peut entièrement contrebalancer la force gravitationnelle. Du coup, le cœur ne se contracte plus, la température n'augmente plus et l'étoile n'atteindra jamais la phase de combustion de l'hélium. La matière à l'extérieur de la coquille d'hydrogène en fusion est éjectée dans l'espace par le vent stellaire toujours présent à la surface d'une géante rouge et l'étoile termine

sa vie lorsqu'il ne reste plus que son cœur dégénéré. Elle est alors devenue une naine blanche d'hélium, qui va lentement se refroidir au cours du temps. Ce scénario s'applique à toutes les étoiles qui ont une masse inférieure à la moitié de celle du Soleil. Mais, à ce jour, aucune de ces étoiles dans l'univers n'a encore atteint ce stade de naine blanche car leur espérance de vie est supérieure à l'âge actuel de l'univers.

Le processus triple alpha, quant à lui, désigne la fusion de trois noyaux d'hélium en un noyau de carbone – une particule alpha est un autre nom pour désigner le noyau d'hélium. Ce qui se passe en réalité, ce sont d'abord deux atomes qui fusionnent et produisent un isotope du noyau de béryllium constitué de 4 protons et 4 neutrons: ${}^8\text{Be}$. Ce dernier, contrairement à l'isotope commun du béryllium (le ${}^7\text{Be}$, qui ne compte que trois neutrons), est très instable. Il se désintègre en 10^{-17} seconde (un centième de milliardième de milliardième de seconde) en deux nouveaux noyaux d'hélium. Pour former du carbone, il faut donc qu'un troisième noyau d'hélium fusionne avec le Be juste avant qu'il n'ait eu le temps de disparaître. Cela est possible à une température supérieure à 100 millions de degrés. La réaction triple alpha est donc une suite de deux réactions, ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \Rightarrow {}^8\text{Be}$ suivi de ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \Rightarrow {}^{12}\text{C}$, qui doivent se succéder en moins de 10^{-17} seconde. nm

Combien de temps met le Soleil pour effectuer un tour complet de la galaxie ?

La période de révolution du Soleil autour du centre de la Voie Lactée est de 225 millions d'années. *dr*

Combien de tours le Soleil a-t-il effectué autour du centre de la galaxie depuis sa naissance ?

Pour faire le tour du centre galactique, le Soleil met 225 millions d'années environ. Comme il est âgé de 4,6 milliards d'années, il a parcouru un peu moins de 21 tours jusqu'à présent. Autrement dit, il n'a pas encore 21 ans galactiques. *pn*

Comment mesure-t-on la distance de la Terre au Soleil à partir de la distance Terre-Lune ?

Au début du IIIe siècle avant notre ère déjà, Aristarque de Samos a eu l'idée de se baser sur les phases de la Lune, plus précisément sur les premiers et derniers quartiers, pour calculer la distance de la Terre au Soleil. Lorsqu'on voit la Lune exactement sous forme de quartier, ou de demi-Lune, l'angle Terre-Lune-Soleil est exactement de 90° . L'angle Soleil-Terre-Lune (avec la Terre pour sommet) au même instant dépend de la distance

Terre-Soleil et celle-ci peut être calculée par simple trigonométrie. Si le Soleil était situé à l'infini, cet angle serait de 90 degrés aussi. En revanche, comme le Soleil est un peu plus proche que cela, cet angle est légèrement plus petit.

Une situation idéale est celle où l'on serait capable d'identifier l'instant exact du quartier de Lune, de mesurer l'angle Soleil-Terre-Lune et de connaître la distance Terre-Lune. Dans un tel cas, on serait en présence d'un triangle rectangle avec deux angles et un côté connus. Il est en principe facile d'en déduire la distance Terre-Soleil. Cependant, cette méthode est très fragile. Une minuscule erreur sur l'angle Soleil-Terre-Lune se traduirait par une erreur considérable sur la distance Terre-Soleil, si bien qu'en pratique, cette méthode est inutilisable, comme l'a montré Hipparque un peu plus tard. En effet, l'instant du premier quartier est très difficile à estimer (surtout à l'œil nu), d'autant plus que la Lune n'est pas exactement une sphère, mais comporte une foule d'aspérités. Tout au plus cette méthode a-t-elle permis à Aristarque de déduire que le Soleil devait être au moins vingt fois plus éloigné que la Lune. *pn*

Pourquoi le Soleil nous paraît si haut en été et si bas en hiver ?

La hauteur apparente maximale du Soleil dans le ciel varie selon le cours des saisons et la latitude du lieu d'observation. Le phénomène des saisons se produit sur toutes les planètes dont l'axe de rotation n'est pas perpendiculaire au plan de l'orbite. La Terre effectue sa révolution autour du Soleil dans le plan de l'écliptique et son axe de rotation est incliné par rapport à la perpendiculaire à ce plan de $23,4^\circ$. De cette inclinaison résultent les saisons.

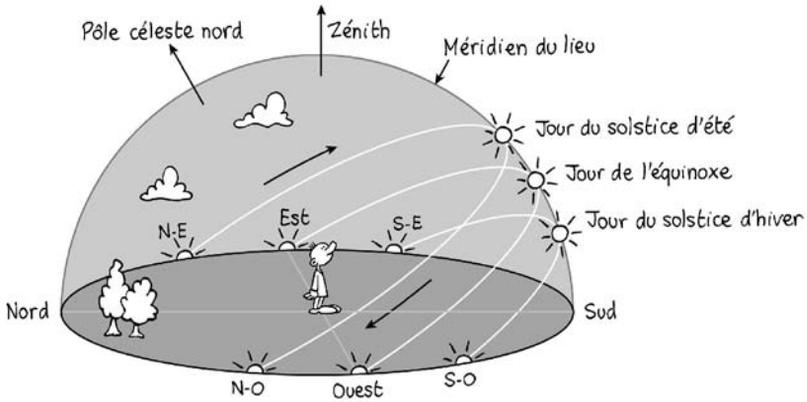
Au solstice d'hiver, dans l'hémisphère nord, le Soleil est au zénith du tropique du Capricorne. Au solstice d'été, il est au zénith du tropique du Cancer, alors qu'aux équinoxes, le Soleil est dans le plan équatorial, au zénith de l'équateur. Si l'on veut donc avoir une chance de trouver le Soleil au zénith au cours de l'année, il faut se trouver dans la zone délimitée par les deux tropiques.

Pour un observateur situé dans l'hémisphère nord, la position du Soleil, au solstice d'été, se trouve sur le tropique céleste nord et au solstice d'hiver sur le tropique céleste sud. La différence de hauteur du Soleil entre les deux solstices est donc $2 \cdot 23,4^\circ = 46,8^\circ$.

La latitude du lieu d'observation se retrouve dans la hauteur maximale que peut atteindre le Soleil à l'équinoxe. Plus on va vers le pôle arctique, plus le Soleil est bas sur l'horizon. Si l est la latitude géographique du lieu, la hauteur maximale du Soleil au-dessus de l'horizon, le jour de l'équinoxe, est $90 - l$.

A Genève (latitude de $+46,2^\circ$), le Soleil culmine à $90 - 46,2 = 43,8^\circ$ au-dessus de l'horizon aux équinoxes de printemps et d'automne, à $90 - 46,2$

+ 23,4 = 67,2° au solstice d'été, et seulement à $90 - 46,2 - 23,43 = 20,4^\circ$ au solstice d'hiver. *fr*



Quelle est la trajectoire et la vitesse du Soleil dans l'espace ?

Le Soleil possède une trajectoire presque circulaire autour du centre de notre galaxie. On peut décomposer ce mouvement en deux parties. Dans la première, on considère tous les constituants (étoiles et gaz) du voisinage solaire, Soleil compris, qui suivent un mouvement circulaire autour du centre galactique. La vitesse de cet ensemble est de 220 km/sec. À l'intérieur de ce groupe, le Soleil possède un mouvement particulier de 19,5 km/sec dans une direction différente. Au total, notre étoile se déplace à une vitesse de 235 km/sec dans la direction de la constellation du Cygne, vers un point tout proche de l'étoile brillante Deneb (aussi appelée alpha Cygni).
gb

Combien de temps met le Soleil pour se déplacer d'un degré ?

Cela dépend de quel angle on parle précisément. Si l'on ne considère que la composante du mouvement de l'astre projeté sur le plan de l'équateur céleste et que l'on suppose un Soleil «moyen», parfaitement régulier, alors un degré est parcouru en $1/360^e$ de jour solaire, donc en 4 minutes exactement, quelle que soit la saison.

En revanche, si l'on parle du Soleil «vrai» et de l'angle sous-tendu par le segment apparent qu'il parcourt, alors la situation est un peu différente. Au voisinage du solstice d'été, par exemple, le fait qu'il ne se déplace pas sur l'équateur céleste, mais sur un petit cercle de la sphère céleste à une déclinaison d'environ 23 degrés, implique qu'il faut diviser le temps ci-dessus par $\cos(23^\circ) = 0,92$. Le temps nécessaire au Soleil pour parcourir un degré devient alors 4 minutes et 21 secondes. De plus, il faudrait tenir

compte du fait que la Terre ne se déplace pas sur une orbite circulaire, mais elliptique. Les jours solaires varient donc très légèrement selon les saisons. *pn*

4 LES ASTÉROÏDES ET LES COMÈTES

Est-ce vrai que la pluie d'étoiles filantes appelée Léonides est visible chaque année vers le 17 novembre? D'où viennent-elles ?

Les Léonides sont en effet observables chaque année autour du 17 novembre. C'est à ce moment que la Terre croise l'orbite de la comète 55P/Tempel-Tuttle. A chacun de ses passages, tous les 33 ans, cette dernière éjecte de grandes quantités de poussières lors de son dégazage sous l'effet du rayonnement solaire.

En fait, le noyau de la comète est comparable à un gros iceberg sale. Lorsqu'il s'approche du Soleil, sa surface glacée devient trop chaude pour rester stable. Une partie de cette surface se transforme en gaz, éjectant à cette occasion les poussières piégées dans la glace. Ce gaz et cette poussière forment une gigantesque atmosphère, appelée chevelure, autour du noyau cométaire. Les poussières s'en échappent facilement, car la gravité du noyau est très faible et la taille de la chevelure est très grande, typiquement de l'ordre de 100 000 km. C'est pourquoi les poussières se retrouvent dispersées le long de la trajectoire de la comète. Les grains de petites tailles peuvent être soufflés par le vent solaire, alors que les plus gros ne sont quasiment pas affectés. Ces derniers restent donc confinés en un étroit ruban qui suit la comète. Chaque particule de ce ruban se trouve sur une orbite héliocentrique légèrement différente de celle de sa voisine et se déplace donc avec une vitesse différente. Ainsi, au cours du temps, le ruban tend à se disperser.

Toutefois, les passages de la comète à proximité du Soleil n'entraînent pas toujours des pluies d'étoiles filantes exceptionnelles dans l'atmosphère terrestre. En effet, juste après le passage de Tempel-Tuttle, le ruban de poussières reste très confiné. Il suffit donc de peu pour que la Terre ne passe pas au travers de sa partie la plus dense ou qu'elle le fasse à un moment défavorable pour la plupart des observateurs. Le dernier passage de Tempel-Tuttle date de 1998. Le maximum de la pluie n'a duré que quelques heures. *dr*

Ne devrait-on pas observer les Léonides deux fois par année ?

Les météorites associées à la comète Tempel-Tuttle ne sont observées qu'une fois par an. La Terre ne peut croiser l'orbite d'une comète qu'au

maximum deux fois par année, à condition toutefois que l'orbite cométaire se trouve dans le même plan que celle de la Terre. Ce qui n'est pas le cas de Tempel-Tuttle. *dr*

Comment se forme une comète ?

Une comète, telle qu'elle est représentée dans les livres d'astronomie, avec sa chevelure et son impressionnante queue, se forme lorsqu'un petit corps glacé, appelé noyau cométaire, s'approche du Soleil. Le système solaire ne se limite pas au Soleil et à ses neuf planètes. Une quantité d'autres corps gravitent autour de notre étoile. Parmi eux, se trouvent de grosses boules de neige sale, situées aux limites du système solaire. Des icebergs cosmiques, en quelque sorte, qui jouent le rôle de noyaux cométaires. Lorsqu'ils s'approchent du Soleil, ils se réchauffent et subliment, c'est-à-dire qu'ils passent directement de l'état solide à l'état gazeux. Cette éjection de gaz entraîne avec elle la poussière qui était emprisonnée dans le noyau. Ces gaz et cette poussière forment alors une gigantesque atmosphère autour du noyau cométaire. C'est la chevelure de la comète. Cette chevelure est alors soufflée par les particules émises par le Soleil, ce qui donne naissance aux queues cométaires.

L'origine des noyaux cométaires, quant à elle, est à trouver parmi les résidus de la formation du système solaire. C'est en fait à partir de tels matériaux que se sont formées certaines des planètes que l'on connaît aujourd'hui. Si les noyaux cométaires actuels n'ont pas été utilisés lors de la formation des planètes, c'est qu'ils ont été rapidement rejetés aux confins du système solaire par des collisions avec les planètes naissantes. *dr*

Quelle est la composition chimique d'un noyau de comète ?

En attendant qu'une sonde se pose sur un noyau de comète (Rosetta, fabriquée par l'Agence spatiale européenne, devrait y parvenir dans une décennie), les seules données sur leur composition proviennent de l'analyse spectroscopique des gaz de la tête et de la queue des comètes. Il n'existe donc que très peu d'informations concernant les éléments non volatils ou les roches de dimension supérieure à quelques millimètres.

A l'heure actuelle, on a détecté dans les comètes des composés oxygénés (H_2O , OH, H_2O^+), carbonés (CO, CO_2 , CO^+ , HCO^+ , C_3 , C_2 , H_2CO), sulfurés (H_2S , SO, SO_2 , OCS, CS), azotés (HCN, CH_3CN , HNC, HC_3N , HNCO, CN, NH_2 , NH), organiques (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6), du méthanol (CH_3OH), de l'acide formique (HCOOH), du sodium (Na), de l'eau deutérée (HDO) ou encore des molécules complexes comme $HC_{13}N$, $HC_{15}N$ ou CS_{34} . On a aussi mesuré la présence d'olivine, une roche silicatée riche en métaux que l'on retrouve abondamment dans le manteau terrestre et les poussières des cocons d'étoile. Parmi tous ces ingrédients, le composé le plus abondant est l'eau.

On admet habituellement que les comètes se sont formées lorsque le nuage protosolaire s'est condensé. Le nuage original n'est pas homogène et les frottements et la pression de radiation contribuent à la ségrégation des molécules. Les plus lourdes occupent l'intérieur du système solaire, les plus légères sont repoussées vers l'extérieur. Les blocs de glace – très floconneux, selon les mesures de la sonde Giotto, puisque leur densité n'est que de 0,2 tonne par mètre cube – récoltent lors de leur périple toutes sortes de poussières et de météorites. A l'approche du Soleil, la glace sublime et forme la tête puis les queues cométaires. Les roches et minerais de plus de quelques millimètres sont assez lourds pour résister au vent et rester sur le noyau. Ainsi, au fur et à mesure des passages près du Soleil, la surface comporte de moins en moins de glace et la comète devient inactive. On présume que la composition des gaz dépend du nombre de passages effectués à proximité du Soleil. *rb*

La courbure de la queue des comètes est-elle due à un effet de dérive ?

Le mouvement des particules des queues cométaires est régi par les lois habituelles de la physique: pression gazeuse, gravitation, pression de radiation et force électromagnétiques. La trajectoire de chaque particule dépend donc de leur masse, de leur taille, de leur charge électrique et de la composition de leur surface. La pression gazeuse n'est importante que dans la région proche du noyau. Les autres forces sont responsables de la formation des diverses queues. Les comètes se transforment donc pour l'occasion en de gigantesque spectromètre de masse et de charge que les astronomes ne manquent pas d'utiliser.

Pour les particules neutres de masse et de densité élevées, le mouvement est caractérisé par une légère courbure de cette queue. Pour les particules neutres de la taille du micromètre, comme la gravitation est complètement balancée par la pression de radiation, leur mouvement est donc rectiligne. Les particules plus petites (le gaz) ont un rapport surface/masse plus défavorable, et elles sont rapidement éjectées du système solaire. *rb*

Pourriez-vous m'indiquer les dimensions de la ceinture de Kuiper et du nuage d'Oort ?

La ceinture de Kuiper correspond à une zone de stockage d'astéroïdes. Elle se situerait vers 40 à 80 unités astronomiques (UA) du Soleil (entre 40 et 80 fois la distance Terre-Soleil). Pluton et son compagnon Charon en sont les plus gros représentants. Plus d'un millier d'autres membres sont déjà connus. Le nuage d'Oort, lui, correspond à un réservoir de comètes. En étudiant le mouvement de ces astres chevelus, des astronomes ont montré qu'il existe une région du système solaire d'où semblent provenir (et revenir) les comètes à orbites quasi-paraboliques. Cette zone se situe

à environ 40 000 UA du Soleil. Elle est souvent associée aux confins du système solaire car, au-delà, des étoiles de passage balaient assez régulièrement ce nuage de débris. *rb*

Pourquoi le nuage d'Oort est-t-il sphérique, alors que le système solaire possède une forme de disque ?

Les innombrables corps glacés composant le nuage d'Oort se sont certainement formés au voisinage du plan de l'écliptique, dans la région d'Uranus et de Neptune. Ils avaient donc à l'origine une distribution spatiale ressemblant à celle d'un disque. C'est par de multiples interactions gravitationnelles avec les planètes géantes externes de notre système planétaire que ces corps ont été éjectés dans les lointaines régions qu'ils occupent aujourd'hui.

A de telles distances du Soleil (jusqu'à 100 000 fois la distance Terre-Soleil), les corps du nuage d'Oort ont vu leurs orbites perturbées par les passages proches d'étoiles et de nuages interstellaires. Ces perturbations aléatoires ont fini par donner naissance à la distribution spatiale actuelle quasi sphérique de la partie externe du nuage d'Oort. *dr*

Pourquoi la forme d'un astéroïde n'est-elle pas sphérique ?

La forme sphérique des corps planétaires ou des lunes – à l'exception de Phobos et de Deimos, considérés comme des astéroïdes capturés par Mars – est due à la force de gravitation. La masse importante de ces corps permet à cette force radiale de longue portée de dominer les forces de cohésion de la matière. Elle peut ainsi façonner l'astre sous la forme la plus équilibrée, à savoir une sphère. Dans le cas des astéroïdes, corps de petites masses, ce sont les forces de cohésion de la matière qui dominent. Elles ont une courte portée et n'exercent aucune influence sur la forme des astéroïdes. Ces derniers peuvent donc avoir des aspects quelconques: il s'agit simplement de gros cailloux. *dr*



Quelle est la contribution des comètes et des météorites à la variation de la masse de la Terre ?

Il n'y a pas de réponse précise concernant la quantité de matière reçue par la Terre sous la forme de météorites. En moyenne, chaque jour, un millier de tonnes de météorites pénètrent dans l'atmosphère. Sur un an, cela représente près de 400 mille tonnes. Parmi elles, on compte environ 10^{12} micrométéorites pesant moins d'un gramme – elles sont vaporisées dans l'atmosphère avant de toucher le sol. Par ailleurs, dix mille météorites, dont la masse vaut entre 1 gramme et quelques tonnes, atteignent le sol chaque année. Dans le même laps de temps, entre une et cinq météorites de 100 tonnes ou plus, capables de former des cratères, tombent sur Terre. Mais, comparées aux $6 \cdot 10^{21}$ tonnes de la masse terrestre, ces quelque $4 \cdot 10^5$ tonnes par an sont négligeables. Toutefois, dans un lointain passé et durant les quelques centaines de millions d'années qui ont suivi la formation du système solaire, ce bombardement était beaucoup plus intense. La Lune en est témoin. Les grands cratères qui marquent sa surface datent d'environ 3,8 milliards d'années. *nc*

Pourquoi les astéroïdes peuvent-ils être dangereux pour la Terre ?

Le danger vient seulement des astéroïdes qui frôlent la Terre et qui pourraient éventuellement la percuter. Les astéroïdes sont de petites planètes dont la taille ne dépasse pas quelques centaines de kilomètres. La plupart d'entre eux se concentrent entre l'orbite de Mars et celle de Jupiter, à une distance moyenne comprise entre 320 millions et 500 millions de kilomètres du Soleil. Cependant, certains astéroïdes ne se cantonnent pas à cette partie du système solaire et leur orbite très excentrique leur permet de s'approcher périodiquement des orbites de la Terre et de Vénus. Parmi ceux qui s'aventurent dans les régions internes du système solaire figurent entre autres Eros (33 km de long et 13 km de large), Icare (1,6 km) et Hermès (800 m).

Probablement au moins un millier d'objets plus grands qu'un kilomètre croisent l'orbite de la Terre et l'un d'eux frappe la Terre tous les 300 000 ans environ. Pour les plus grands, qui sont moins nombreux, les probabilités d'impact sont plus faibles.

La Terre garde toutefois les stigmates de quelques collisions mémorables qu'elle a subies dans le passé. Ainsi, il y a environ 50 000 ans, un astéroïde d'à peu près 30-50 m de diamètre a frappé la Terre et a laissé une des traces les plus connues sur notre planète: le *Meteor Crater* en Arizona, un cratère de 1,2 km de diamètre, profond de 200 m. Plus d'une centaine de cratères ont été identifiés à la surface de la Terre. Autre exemple: au début du siècle, en 1908, un objet d'environ 60 m de diamètre a touché Tunguska, une région inhabitée de Sibérie. Le souffle de l'explosion a couché tous les arbres sur 50 km à la ronde. Et on suppose que

c'est un astéroïde d'une dizaine de kilomètres ou bien une comète semblable à Shoemaker-Levy 9 (celle qui a heurté Jupiter en juillet 1994) qui a contribué à la fin du règne des dinosaures il y a 65 millions d'années.

L'impact d'un astéroïde de grande taille (quelques kilomètres), bien que ce soit un événement rare, peut donc créer un désastre majeur à l'échelle planétaire. *fr*

Comment peut-on calculer la probabilité de collision entre un astéroïde et une planète ?

On peut essayer de répondre à cette question en comparant la chute de météorites au nombre de gouttes de pluie qui tombent sur le pare-brise d'une voiture. Dans ce dernier cas, le résultat dépend de trois facteurs: le nombre de gouttes par unité de volume, l'aire du pare-brise et la vitesse relative des gouttes et du véhicule. Si l'on pose ensuite l'hypothèse que toutes les gouttes qui se situent dans le volume balayé par le pare-brise durant un intervalle de temps donné lui tombent dessus, alors le taux de collision vaut le produit de ces trois facteurs.

Si l'on change la pluie par des astéroïdes, le problème se complique malheureusement un peu. En effet, contrairement aux gouttes, leur nombre dépend de leur taille (les petits sont beaucoup plus nombreux que les grands) et du lieu du système solaire où se trouve la planète qui nous intéresse (les astéroïdes sont principalement confinés entre Mars et Jupiter). Il faut également tenir compte de la gravité de la planète qui attire l'astéroïde lors de la phase d'approche finale et augmente un peu la probabilité de collision. Par ailleurs, les comètes, mais aussi les astéroïdes et les planètes, ne suivent pas des orbites circulaires. La collision peut donc venir de n'importe quelle direction, bien que les risques, en ce qui concerne la Terre, soient légèrement plus élevés du côté sombre (c'est-à-dire opposé au Soleil).

Concrètement, afin de déterminer plus précisément les dangers, des télescopes automatiques sont chargés de repérer les corps du système solaire dont la taille est inférieure à 100 m et qui pénètrent dans le voisinage de la Terre (à une distance d'environ 50 millions de kilomètres). Bien qu'ils soient les plus nombreux, les petits corps de moins de 10 m ne représentent pas un danger majeur pour la vie de notre planète. Leur détection ne constitue donc pas une priorité. Aujourd'hui, aucun objet connu parmi les 250 000 contenus dans les bases de données n'est susceptible d'entrer en collision avec notre globe, dans les deux cents prochaines années.

Les comètes, étant donné leurs trajectoires particulières, échappent à cette cartographie. On estime d'ailleurs «assez probable» qu'un événement comme celui qui a dévasté une grande région en Sibérie à Tunguska en 1908 se répète durant le XXI^e siècle. *rb*

Comment mesurer la masse d'un astéroïde ?

La méthode la plus fréquente consiste à déterminer la composition chimique de l'astéroïde à partir de son spectre – c'est-à-dire de l'analyse de la lumière réfléchie par sa surface – ce qui fournit une estimation de la réflectivité de son sol. En mesurant ensuite son éclat et sa distance, on est alors à même de calculer le diamètre approximatif de l'astéroïde. Connaissant la composition et la dimension de l'objet, on peut en déduire sa masse. Cette méthode se base sur des mesures de laboratoire visant à connaître le plus précisément les caractéristiques chimiques et de couleur des roches composant les astéroïdes. L'analyse des météorites recueillies sur Terre est donc essentielle à la calibration de cette technique. Une telle mesure ne demande qu'une nuit d'observation, mais elle est entachée d'une incertitude importante de 20%.

Dans certains cas, notamment pour les astéroïdes de la ceinture, on peut se baser sur les perturbations de trajectoires que les astéroïdes provoquent sur leurs voisins lors de passages serrés qui surviennent de temps à autre. Cette technique n'est pas facile à mettre en œuvre, car il faut collecter beaucoup de données sur un grand intervalle de temps pour pouvoir distinguer la trajectoire perturbée de celle non perturbée. De plus, les écarts angulaires qu'il s'agit de mesurer sont très petits et ne dépassent pas le millième de degré sur une décennie. C'est pourquoi une telle technique requiert un siècle d'observation pour obtenir une incertitude de l'ordre de 1%. *rb*

Comment détermine-t-on la distance d'un corps céleste, comme un astéroïde, par rapport à la Terre ?

On peut utiliser plusieurs méthodes. La première consiste à l'observation simultanée de l'astre depuis deux endroits distincts du globe. La différence de position apparente par rapport aux étoiles, supposées fixes, fournit la parallaxe de l'objet à partir de laquelle on peut déduire sa distance. Il est dès lors nécessaire de pouvoir situer correctement les deux observateurs dans le système solaire, ce qui revient à noter pour chacun d'eux la longitude, la latitude, l'altitude et l'heure de l'observation. Une telle vision stéréoscopique permet de déduire la distance de la Lune et de quelques astéroïdes qui passent à quelques dizaines de millions de kilomètres de la Terre.

On peut également mesurer directement l'éloignement d'un astre par télémétrie laser dans le cas de la Lune (quelques centimètres de précision). On peut également utiliser les ondes radio pour les planètes (entre quelques mètres et quelques kilomètres de précision) ou radar pour les astéroïdes (quelques mètres de précision).

Finalement, il faut savoir que la localisation d'un astéroïde dans le ciel dépend de sa position sur son orbite et de celle de la Terre sur la sienne. En observant l'objet à plusieurs dates distinctes, on peut donc calculer

certain paramètres de sa trajectoire puis les éphémérides, qui comprennent la distance. En faisant quelques hypothèses simplificatrices (en supposant notamment que les orbites en question sont circulaires, coplanaires et de sens identique), il est possible d'obtenir la distance d'un objet en fonction de sa vitesse de déplacement. Ainsi, deux observations à une heure d'intervalle permettent de calculer le rayon de l'orbite simplifiée de l'astéroïde avec une précision parfois surprenante. *rb*

Il semble qu'il est impossible de dire si la météorite martienne ALH84001 contient ou non des traces de vie. Pourra-t-on répondre à cette question après l'analyse de roches martiennes ramenées sur Terre ?

Les échantillons martiens que l'on projette de ramener sur Terre pourraient en effet n'apporter qu'une réponse ambiguë. Ils auront néanmoins, sur la météorite récoltée ici, l'avantage de ne pas avoir séjourné des millénaires dans un environnement terrestre. Le soupçon de contamination par des bactéries terrestres peut donc être éliminé pour autant que la sonde spatiale ait été soigneusement stérilisée avant son départ. En étant très optimiste, on pourrait même imaginer que de tels échantillons contiennent non de la vie fossile, mais de la vie tout court, autrement dit des microorganismes actifs.

Certes, ni les sondes *Viking* d'il y a 30 ans, ni les petits robots actuels de la Nasa n'ont trouvé de preuve claire de la présence de vie sur Mars. Mais cela ne signifie pas encore qu'elle est totalement absente. On peut toujours incriminer la sensibilité trop faible des instruments apportés sur le sol martien. L'analyse d'échantillons ramenés lors d'une mission sur la planète rouge représentera donc une étape cruciale dans cette quête de la vie extra-terrestre, puisqu'elle pourra être beaucoup plus minutieuse que celles menées par les sondes *Viking* ou les robots *Pathfinder*, *Spirit* et *Opportunity*. *pn*

Comment peut-on s'assurer qu'une météorite en est réellement une ?

Roche, scorie ou météorite? On trouve parfois des cailloux ferrugineux à la surface du sol qui diffèrent par leur couleur rouille et leur densité des autres cailloux de la même région. Le plus souvent, il s'agit de nodules métallifères (de fer et parfois de manganèse) sous forme de sulfures. Ces nodules sont d'origine sédimentaire, formés sur les fonds océaniques à partir d'éléments chimiques en excès dans l'eau de mer. Une fois exposés à l'action de l'érosion, les sulfures, en surface, sont réduits en oxydes de couleur rouille alors qu'ils demeurent parfois intacts au centre (ils ont une couleur jaune pâle dans le cas de la pyrite, FeS).

Dans les régions contenant des gisements de fer comme le Jura ou le Salève, on trouve en outre des dépôts d'oxyde de fer, également d'origine sédimentaire, souvent sous forme de petites sphères (pisolithes). Dans ces

mêmes régions, on rencontre aussi des scories ferrugineuses, traces d'ancienne activité métallurgique d'origine pouvant remonter à l'Age du Fer.

Ce n'est que très exceptionnellement que des météorites métalliques (contenant du fer ou du nickel) sont découvertes. Dans nos régions, elles sont assez rapidement altérées par l'humidité alors qu'elles peuvent rester intactes plusieurs siècles dans les déserts ou les glaces polaires. On peut les reconnaître en les polissant: les météorites métalliques montrent alors des figures de cristallisation croisée, ce qui est la signature d'un refroidissement lent dans l'espace. En outre, les météorites d'une certaine taille ont une surface creusée de petites cupules, un effet de la cavitation par évaporation à chaud lors de l'entrée dans l'atmosphère.

Quoiqu'il en soit, les météorites rocheuses ne sont pas reconnaissables par le non-spécialiste. En cas de doute, les conservateurs de minéralogie des musées d'histoire naturelle de Genève (qui détient une belle collection de météorites), de Neuchâtel ou de Lausanne peuvent identifier l'origine de l'échantillon. *mg*

Dans «On a marché sur la Lune», le professeur Tournesol évoque l'astéroïde Adonis circulant entre la Terre et la Lune. Il s'agirait d'un reste d'une planète ayant circulé jadis entre Mars et Jupiter. Est-ce possible?

A l'époque où Hergé a dessiné Objectif Lune et On a marché sur la Lune, on pensait que les astéroïdes provenaient de la fragmentation d'une planète orbitant entre Mars et Jupiter. Actuellement on pense que les puissants effets gravitationnels de Jupiter ont empêché la formation d'une telle planète. La masse totale des astéroïdes est environ 1000 fois plus petite que celle de la Terre bien que plusieurs centaines de milliers d'entre eux doivent être détectables.

Quoi qu'il en soit, Adonis existe. Il porte le numéro 2101 et a été découvert le 12 février 1936 à Uccle en Belgique par Eugène Joseph Delporte (à ne pas confondre avec Yvan Delporte, scénariste de bandes dessinées, notamment des Schtroumpfs). Le périhélie d'Adonis se situe à 0,44 unité astronomique (1 UA représente la distance Terre-Soleil). Il est donc possible qu'il s'aventure à l'intérieur de l'orbite de la Terre et même de Vénus. Jusque-là, Hergé est parfaitement documenté. Toutefois, Adonis n'a jamais frôlé la Terre.

Il existe en revanche un autre objet, baptisé 1995FF, qui est passé à 0,0029 UA de la Terre et à 0,0013 UA de la Lune le 27 mars 1995. Sa magnitude apparente était de 18, ce qui signifie que l'astéroïde a un diamètre de quelques dizaines de mètres. Seulement, comme la Lune se déplace sur son orbite à 2 km/s et que ces objets passent à des vitesses relatives situées entre 10 et 30 km/s, une collision avec la Terre ou la Lune est très improbable. Finalement, le capitaine Haddock aurait eu bien de la peine à être capté par un objet aussi rapide. Mais le suspense nécessaire au récit méritait bien quelques entorses romanesques. *bn*

5 LES PLANÈTES

Quelles sont les planètes que l'on peut observer à l'œil nu ?

Il est possible d'observer à l'œil nu Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. La principale difficulté réside dans la différenciation entre une planète et une étoile. Un bon truc est d'observer le scintillement de l'astre. L'étoile est ponctuelle et voit sa lumière vaciller. La planète (sphère suffisamment proche de la Terre pour ne pas être ponctuelle) ne scintille pas.

Mercure, la planète la plus proche du Soleil, est difficile à observer car elle se lève et se couche avec lui. Il faut donc tenter votre chance juste après le passage de notre étoile sous l'horizon, le soir ou juste avant son lever, le matin. Vénus est le troisième objet le plus lumineux du ciel (après le Soleil et la Lune). Mars, qui est un peu moins lumineux, se reconnaît à sa couleur rouge et Jupiter et Saturne sont également visibles sans difficulté.

Si le ciel est exceptionnellement pur (en montagne par exemple), il vaut la peine de tenter de repérer Uranus, qui est à la limite de la détection sans instrument. *bc*

D'où viennent les noms des planètes ?

Depuis la Préhistoire et l'Antiquité, les hommes des différentes cultures ont remarqué que certains astres bougeaient par rapport aux constellations: le Soleil, la Lune et cinq planètes, un mot qui signifie «errant» en grec. Les Babyloniens, les Grecs et les Romains ont associé ces corps célestes à des dieux. La culture occidentale suivant la tradition romaine a repris les noms latins en les adaptant légèrement aux langues actuelles.

Jupiter est le roi de l'Olympe (montagne grecque symbolisant le séjour des dieux) et le dieu du ciel dont les colères se manifestent par des orages. La planète est brillante et lente, traduisant ainsi l'idée de majesté.

Vénus, du nom de la déesse de l'amour, est souvent très brillante mais plus capricieuse dans son éclat.

Mercure, le dieu des gens en déplacement (commerçants et voleurs) et messager des dieux, désigne une planète très rapide que l'on ne voit pas souvent.

Mars a obtenu le nom du dieu de la guerre en raison de sa teinte rou-

geâtre, provenant des composés ferreux de son sol et associée au sang répandu lors des conflits.

Quant à Saturne, le père de Jupiter, il est le roi des dieux, déchu par ses enfants, et prête son nom à une planète plus lente et moins brillante que Jupiter.

Uranus est le père de Saturne et la personnification du ciel (*Ouranos* en grec). C'est ainsi que l'astronome allemand Johann Bode proposa d'appeler la sixième planète du système solaire, découverte en 1781 par William Herschel.

Prédite indépendamment par John Couch Adams en 1825 et Urbain Leverrier en 1846 puis découverte par Johann Galle en 1846, la septième planète a reçu le nom de Neptune, dieu de la mer et fils de Saturne.

Pluton, finalement, dieu du monde souterrain, séjour des morts, et fils de Saturne désigne une planète découverte en 1931 par Clyde Tombaugh. *bn*

Comment mesure-t-on la masse d'une planète ?

Pour peser une planète, on peut se servir de ses satellites, tant naturels qu'artificiels. On mesure la taille de l'orbite et la période de révolution. Connaissant la distance de la planète, on déduit le rayon de l'orbite du satellite. En supposant que le satellite est infiniment plus léger que la planète, on calcule facilement la masse de cette dernière avec une haute précision. Après un mois de mesure, on peut obtenir une précision de 0,01%.

Si la planète ne possède pas de satellites connus (c'est le cas de Mercure et de Vénus), on peut estimer sa masse par trois méthodes différentes. La première consiste à estimer la composition chimique et les dimensions de l'astre et d'en déduire la masse. Toutefois, les incertitudes sont assez importantes en raison de la méconnaissance de l'intérieur des planètes, et en particulier de la matière dont est formé le cœur.

On peut aussi analyser les petites variations de trajectoires que les planètes provoquent entre elles, lorsqu'elles sont relativement proches, ou mesurer l'influence qu'elles exercent sur les orbites des astéroïdes et comètes qui entrent dans leur voisinage. Ces petits changements sont directement liés à la masse de la planète. Très fastidieuses, ces mesures peuvent prendre beaucoup de temps.

Dernière possibilité: envoyer une sonde spatiale qui fera office de satellite artificiel et mesurer son orbite, comme décrit plus haut. *rb*

Quels sont les moyens pour mesurer le diamètre et l'orbite des planètes ?

Les diamètres des planètes se mesuraient autrefois au télescope. On obtenait le diamètre angulaire en plaçant un micromètre à fil dans le plan focal de l'instrument. Ensuite, on multipliait cette valeur (exprimée en radians) par la distance de la planète pour obtenir son diamètre linéaire. Actuelle-

ment, les clichés pris par les sondes spatiales permettent de déterminer des mesures directes beaucoup plus précises. Quant à Pluton, qui n'a pas encore été visitée, les astronomes ont analysé les courbes de lumières des éclipses survenant entre cette planète et son satellite Charon.

La méthode la plus efficace et la plus précise pour mesurer les dimensions des orbites planétaires est celle de l'écho radar. Cette technique, qui fournit la distance séparant la planète de la Terre, a même permis de déterminer les reliefs de la surface de Vénus et la forme de certains astéroïdes. Elle est bien adaptée pour les planètes telluriques, mais un peu moins pour les géantes gazeuses. Pour ces dernières, la détermination des dimensions de l'orbite passe par la mesure de leurs positions angulaires dans le ciel. Une estimation qui peut être précisée par l'étude des trajectoires des sondes spatiales qui ont visité ces planètes. *pn*

Quelle est l'origine de la rotation des planètes sur elles-mêmes ?

La question du sens de rotation axiale des planètes du système solaire a longtemps préoccupé les astronomes. Elle n'a d'ailleurs pas encore été résolue de manière satisfaisante. La majorité des planètes tournent sur elles-mêmes dans le même sens que leur rotation autour du Soleil (on parle d'une rotation prograde), alors que seules Vénus et Uranus présentent une rotation axiale rétrograde, telle que le prévoyaient d'ailleurs les toutes premières théories. En effet, dès le XVIII^e siècle, on a imaginé que les planètes ont été formées à partir d'un disque protoplanétaire. Dans un tel cas, et à condition que les orbites des particules de ce disque soient circulaires, la matière de la partie intérieure du disque se meut plus rapidement que celle de la partie plus lointaine, en accord avec les lois de la mécanique de Newton. En suivant ce raisonnement, la planète ainsi formée devrait obligatoirement posséder un mouvement rétrograde.

Toutefois, l'observation et la théorie ne coïncident pas. Plusieurs scénarios ont alors été imaginés pour contourner la difficulté. Pierre Laplace, Daniel Kirkwood, Hervé Faye et Thomas Chamberlin, entre autres scientifiques, se sont succédé, invoquant tour à tour la viscosité du disque protoplanétaire, l'action conjointe de l'effet de marée du Soleil et le temps de contraction des planètes, la forme elliptique et non circulaire des orbites des particules du disque, etc. Sans succès.

Un consensus est enfin obtenu durant la première moitié du XX^e siècle. Les scientifiques se sont mis d'accord sur le fait que le moment cinétique des particules en un lieu donné du disque protoplanétaire a le même signe que celui du disque et doit le conserver après la condensation en une planète. Une telle dynamique génère alors une rotation prograde. Mais une objection souvent invoquée relève que, lors de l'accrétion de matière sur la planète naissante, ce moment cinétique est réparti entre la rotation axiale et le mouvement orbital. Pour les planètes, le moment

cinétique orbital est environ 10 000 fois supérieur à celui de la rotation, et des variations du processus d'accrétion peuvent influencer sur la partition du moment cinétique global. Des simulations numériques récentes montrent que le sens de rotation de la planète formée dépend de l'excentricité des orbites des particules. Et la rotation prograde n'est obtenue que pour une gamme relativement étroite d'excentricités. Le problème n'est pas résolu, et certains chercheurs vont même jusqu'à proposer que le sens de rotation des planètes est le simple fruit du hasard.

Quoi qu'il en soit, des collisions avec de gros astéroïdes et les effets de marée (la déformation des planètes par l'attraction gravitationnelle) ont influencé la rotation des planètes au cours du temps. Les collisions les plus importantes ont sévi durant les premiers 200 millions d'années du système solaire et leur influence sur la rotation a été aléatoire. L'énergie dissipée par les marées, en revanche, tend à égaliser la période de rotation axiale à celle du mouvement orbital. C'est ainsi que la Lune ne nous montre qu'une seule face, et que le couple Pluton-Charon est lui aussi synchronisé.

L'effet de marée varie inversement à la sixième puissance de la distance. Elle affecte donc surtout les planètes intérieures. Ainsi, Mercure complète exactement 1,5 tour sur lui-même par «année» mercurienne. Ce couplage particulier est dû à une déformation fixe de la planète qui «résonne» avec l'effet de marée solaire. La rotation presque synchrone de Vénus serait aussi due à l'effet de marée solaire. Son léger mouvement rétrograde pourrait résulter d'une ancienne collision. En ce qui concerne la Terre, l'effet de marée solaire ne vaut plus qu'un quart environ de la marée lunaire. *nc*

Pourquoi les planètes tournent-elles autour du Soleil en décrivant une ellipse et non un cercle ?

Lorsque deux corps sont en jeu, par exemple une planète tournant autour du Soleil, la forme de l'orbite planétaire est toujours une ellipse – on peut sans autre négliger l'influence gravitationnelle des autres planètes en première approximation. Cela est lié à la loi de Newton. Selon cette dernière, la force de la gravitation décroît comme l'inverse du carré de la distance. Si la nature avait choisi une loi un peu différente, alors les orbites des planètes auraient adopté une autre forme, par exemple celle d'une sorte de rosace, ou auraient été carrément instables.

Or un cercle n'est rien d'autre qu'un cas particulier de l'ellipse. Plus exactement, c'est une ellipse d'excentricité nulle. Un tel cas ne peut pas survenir dans le système solaire. Même si cela devait arriver, les perturbations dues aux autres planètes auraient tôt fait de modifier la forme de cette orbite parfaite. En revanche, il existe des systèmes d'étoiles double où les deux astres sont si proches qu'ils sont synchronisés – c'est-à-dire

que leur période de rotation axiale est égale à leur période orbitale, comme la Lune autour de la Terre – et que leurs orbites sont devenues des cercles par l'effet des marées.

Le même phénomène se retrouve chez certaines planètes récemment découvertes autour d'autres étoiles que le Soleil, que l'on a surnommées «Jupiter chauds» (51 Peg b, la première planète extrasolaire découverte, appartient à cette catégorie). Ces géantes extrasolaires sont très proches de leur astre et leur trajectoire est souvent devenue un cercle en raison de l'effet de marée. *pn*

Quelles sont les planètes dont l'orbite n'est pas quasi circulaire ?

Dans notre système solaire, on peut dire que seules deux des neuf planètes ont une orbite qui n'est pas quasi circulaire. Ce sont Mercure et Pluton. *de*

Quelle est l'origine de l'eau présente sur les planètes du système solaire ?

L'eau des planètes telluriques et celle des satellites de Jupiter et de Saturne n'ont pas la même origine. A l'époque de la formation du système solaire, la température régnant dans la partie de la nébuleuse protoplanétaire située à l'intérieur de l'orbite de Jupiter était trop élevée pour permettre la condensation de l'eau. Sur Terre, Vénus et Mars, l'eau provient donc, en petite partie, des roches lorsque ces planètes étaient encore en fusion et que les manteaux et les noyaux se sont différenciés. Mais la majeure partie du précieux liquide vient du bombardement par météorites hydratées. Ces dernières, à l'origine situées à l'extérieur de la ceinture des astéroïdes (entre Mars et Jupiter), ont des orbites régulièrement perturbées par le passage des planètes géantes gazeuses. Elles peuvent ainsi être déviées vers le centre du système solaire. La plupart sont absorbées par le Soleil et seule une fraction minime heurte les planètes telluriques. Quant aux comètes, elle n'ont contribué qu'à hauteur de 3 ou 5% à l'approvisionnement en eau de la Terre. C'est le rapport deutérium/hydrogène dans l'eau, mesuré dans divers sites du système solaire, qui a permis de retracer l'origine de l'eau sur Terre.

Au-delà de Mars, la température est rapidement passée sous le point de congélation et l'eau a pu se condenser sous forme de givre sur les matériaux qui ont donné naissance aux planètes extérieures et à leurs satellites. Cette eau «indigène» se trouve aujourd'hui à l'intérieur des planètes géantes et sur la surface d'une des lunes de Jupiter, Europa, dont la masse est trop faible pour retenir une atmosphère, mais suffisante pour conserver une carapace de glace. Par ailleurs, l'eau, comme la glace, représente près de 80% de la masse des comètes et des planètes extérieures comme Pluton et Charon. *mg*

Pourquoi l'eau ne peut exister à la fois sous forme de vapeur, de liquide et de glace sur Mercure, Mars et Vénus, alors que c'est possible sur Terre ?

Pour que l'eau puisse exister sous ses trois états (gaz, liquide solide), plusieurs conditions doivent être remplies. La planète doit d'abord être capable de conserver son atmosphère, car, sans elle, il ne peut y avoir ni vapeur d'eau, ni eau liquide. Ceci n'est possible que si la pesanteur est suffisante pour contenir l'agitation thermique des gaz. En d'autres termes, il faut que la vitesse des atomes, chauffés par les photons solaires, soit inférieure à la vitesse d'évasion – c'est-à-dire la célérité minimale pour qu'un corps puisse quitter la planète, soit 11,2 km/s pour la Terre.

Ce sont les particules les plus légères qui sont animées des vitesses les plus importantes et qui s'en vont le plus vite. Ainsi, sur Terre, l'hydrogène libre s'est évaporé en 10 000 ans et l'hélium en un milliard d'années. Mercure est trop proche du Soleil et trop léger pour retenir une atmosphère et donc de l'eau. Quant à Mars, plus léger que la Terre, il a perdu son hydrogène en 1000 ans et son hélium en seulement 10 000 ans.

Deuxième condition: la planète doit être située à la bonne distance du Soleil. Si l'on est trop près, il fait trop chaud et seule la vapeur d'eau est présente. Si l'on est trop loin, au contraire, l'eau reste sous forme de glace (c'est le cas de Mars et des planètes extérieures). A la bonne distance, l'eau peut exister sous ses trois états, pour autant que la pression atmosphérique soit suffisante. La zone qui autorise l'existence d'eau liquide définit l'espace habitable. Elle ne représente que de 0,8% du rayon du système solaire.

Par ailleurs, l'eau doit être à l'abri du rayonnement solaire ultraviolet qui casse la molécule d' H_2O en simples atomes d'oxygène et d'hydrogène. Dans la haute atmosphère terrestre, les atomes d'hydrogène s'évadent facilement, on l'a vu. Ceux d'oxygène peuvent toutefois se recombinaison pour former de l'ozone (O_3) qui permet d'arrêter le rayonnement ultraviolet le plus énergétique (UV-C) avant qu'il ne touche le sol. Du coup, l'eau peut se maintenir indéfiniment sur Terre.

Sur Mars, en revanche, l'atmosphère est si ténue (la pression y est de 6 millibars contre 1013 sur Terre) que les rayons UV-C atteignent le sol. L'eau a ainsi disparu de la surface de la planète rouge en 1 milliard d'années. Elle y subsiste à l'état de glace dans le sous-sol gelé.

Grâce à un énorme effet de serre provoqué par le gaz carbonique (CO_2), qui représente les 96,5% de son atmosphère, la température sur Vénus atteint 450° C au sol. Une telle chaleur empêche l'eau d'exister sous forme liquide. Pas d'océans donc, mais seulement une atmosphère humide à toute altitude. L'eau exposée au rayonnement ultraviolet solaire est rapidement dissociée et quitte la planète. Par ce processus, Vénus a perdu toute son eau en 300 millions d'années seulement, avant même que l'histoire de la vie ne débute sur Terre. *mg*

Pourquoi n'existe-t-il pas de satellite de satellite dans le système solaire ?

Cela s'explique par le peu de stabilité que possèdent les orbites de tels objets. Des satellites de satellites peuvent exister pour un certain temps – la Lune a notamment connu quelques satellites artificiels comme les Lunar Orbiters, les cabines Apollo et les sondes Clementine et Smart-1. Mais, en général, leurs orbites ne sont pas stables à long terme, et cela pour deux raisons.

Premièrement, si le satellite est proche de sa planète, celle-ci exerce une perturbation gravitationnelle telle que l'éventuel satellite du satellite finira par quitter le système ou s'écraser sur un des deux corps.

Deuxièmement, plus le satellite est petit, moins la répartition des masses à l'intérieur suit une symétrie sphérique, car les forces de cohésion de la matière ne sont plus négligeables devant la force de gravitation. Il s'ensuit que son champ de gravitation n'a pas non plus une symétrie sphérique, ce qui rend l'orbite d'un satellite secondaire instable, surtout si son rayon est faible. Si le rayon de l'orbite est grand, le potentiel de gravitation redevient sphérique et l'orbite peut devenir stable, mais, là encore, l'influence de la planète prendra le relais pour déstabiliser l'orbite.

La première explication s'applique aux quatre gros satellites de Jupiter, en tenant compte encore de l'influence gravitationnelle des satellites entre eux. La deuxième concerne davantage la Lune et surtout les plus petits satellites de Jupiter et de Saturne qui orbitent loin de leur planète et qui sont probablement des astéroïdes ou comètes capturés. Pour les lunes de Mars, Phobos et Deimos, les deux explications sont valables.

On pourrait imaginer l'existence d'un satellite de Titan, la plus grosse lune de Saturne, mais il faudrait calculer la durée de vie d'un tel compagnon. Il n'est d'ailleurs pas exclu qu'il existe de tels satellites secondaires autour des planètes lointaines comme Saturne, Uranus et Neptune que les observations des sondes *Voyager* et *Cassini* n'auraient pas pu détecter. *pn*

Voit-on le ciel sur les autres planètes de la même façon que depuis la Terre ?

Les astronautes qui ont circulé en orbite terrestre affirment tous qu'en général, on ne voit pas les étoiles depuis l'espace en plein jour. Pour les voir depuis la navette par exemple, il faut être dans la nuit, afin que les yeux puissent s'adapter à l'obscurité. Sinon, l'éclat de la Terre est trop gênant, ainsi que celui du Soleil, qui apparaît d'ailleurs là-haut plus brillant que depuis le sol. Cela vaut aussi pour un astronaute situé sur la Lune, les satellites de Jupiter, Mercure ou toute autre planète dépourvue d'atmosphère. Depuis le sol de Vénus, il serait impossible d'observer le ciel, puisqu'elle est entourée d'une atmosphère épaisse et nuageuse. Mars, elle, serait un très bon observatoire si l'on excepte les périodes de tempête.

tes de poussière et les quelques nuages glacés qui s'y forment parfois. Quant aux planètes géantes Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune, la question ne se pose pas puisqu'elles ne possèdent pas de surface solide. *pn*

Est-ce que Mercure est toute brûlée ?

Oui. Le jour, la surface de Mercure est exposée à un rayonnement solaire presque sept fois plus intense que sur la Terre, car Mercure se trouve à seulement 58 millions de kilomètres du Soleil en moyenne (au lieu de 150 millions pour la Terre). De plus, il n'y a pratiquement pas d'atmosphère sur Mercure, si bien que le rayonnement ultraviolet arrive à la surface sans être filtré.

A midi à l'équateur et lorsque Mercure est au plus près du Soleil sur son orbite (périhélie), la température du sol atteint 427° C. A la fin de la nuit, la température n'est plus que de -183° C. Un cycle complet jour et nuit sur Mercure dure 176 jours terrestres, c'est-à-dire près de 6 mois. Le sol a donc le temps de se chauffer sous l'action du Soleil pendant la journée et de se refroidir la nuit. *pn*

Est-ce vrai que sur Mercure, le Soleil se lève à l'est, monte dans le ciel, s'arrête, repart en arrière, se recouche, puis se relève à l'est pour venir enfin se coucher à l'ouest ?

Le ballet solaire (lever à l'est, rétrogradation et coucher à l'est, relever à l'est, puis coucher à l'ouest) est presque vérifié sur Mercure, mais pas tout à fait. L'année sur Mercure (c'est-à-dire le temps que met la planète pour effectuer un tour complet du Soleil) dure 88 jours terrestres. Le «jour sidéral» sur Mercure (la durée que met la planète pour faire un tour sur elle-même, indépendamment de sa rotation autour du Soleil, mais par rapport aux étoiles), lui, vaut exactement les $2/3$ de cette valeur, soit un peu plus que 58 jours terrestres.



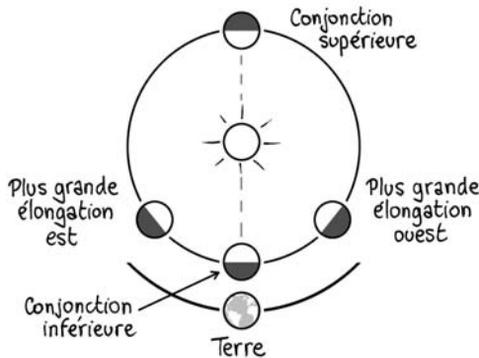
Avec une telle géométrie, si l'orbite de Mercure était un cercle parfait, le «jour solaire» mercurien (la durée entre le lever et le coucher du Soleil) vaudrait donc deux années mercuriennes (176 jours). Mais, en réalité, la trajectoire de la planète est une ellipse dont l'excentricité vaut 0,205. Cela signifie qu'au périhélie – c'est-à-dire lorsque la planète est au plus près du Soleil –, la position apparente de l'étoile s'approche d'un «sur place» sans toutefois entamer un mouvement franchement rétrograde. Pour que cela soit vrai, il aurait fallu que l'excentricité de l'orbite de Mercure dépasse 0,25. *bn*

Pourquoi observe-t-on des phases sur Mercure et sur Vénus et non sur Mars ?

Si on observe des phases sur Mercure et Vénus, c'est parce que leurs orbites sont situées à l'intérieur de celle de la Terre – on les appelle les planètes inférieures. Lorsqu'elles se trouvent exactement entre le Soleil et la Terre, les deux planètes nous présentent leur face sombre. La planète nous est donc invisible et sa phase est dite nouvelle. Lorsque la planète est exactement à l'opposé du Soleil par rapport à la Terre, sa phase est dite pleine car nous pouvons observer l'entier de sa face éclairée. Cette situation ne peut toutefois se produire qu'en plein jour, ce qui empêche l'observation.

D'ailleurs, lorsqu'une planète inférieure apparaît dans le ciel, elle n'est jamais très éloignée du Soleil. Les écarts maximaux sont connus sous les noms de «plus grande élongation est» et de «plus grande élongation ouest».

En revanche, les planètes comme Mars, dites «supérieures» et dont l'orbite est extérieure à celle de la Terre, ne montrent que des phases pleines, ou presque pleines. Ces planètes sont visibles à n'importe quelle distance angulaire du Soleil. *dr*

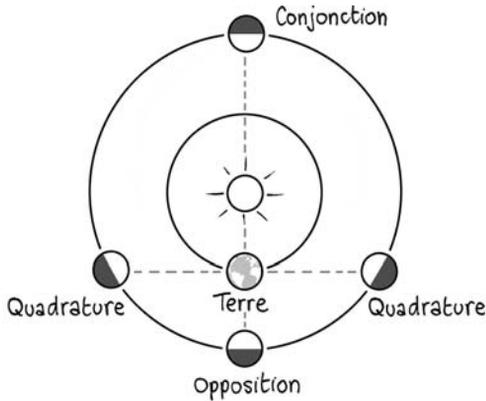


Apparences et phases
des planètes inférieures

Est-ce qu'il pleut sur Vénus?**Si oui, est-ce qu'il pourrait y avoir de la vie ?**

Il pleut sur Vénus, mais ce n'est pas de l'eau qui tombe du ciel. C'est de l'acide sulfurique. La surface de la planète est en effet continuellement cachée par une épaisse couche de nuages située entre 50 km et environ 65 km d'altitude, qui est en réalité un brouillard épais formé de gouttelettes d'acide sulfurique. Cette pluie, très corrosive, n'atteint pas la surface de la planète. Les gouttes s'évaporent à une altitude d'environ 30 km sous l'effet de la chaleur intense qui y règne (plus de 220° C).

Sur le sol de Vénus, la température monte même à 470° C et la pression atmosphérique y est 90 fois plus importante qu'à la surface de notre planète. Ces conditions ne sont évidemment pas favorables à la vie telle que nous la connaissons et il n'existe, de fait, aucune indication qu'une forme quelconque de vie existe sur Vénus. *dr*



Apparences et phases
des planètes supérieures

**La masse de Vénus a été calculée pour la première fois en 1779
par le mathématicien français Joseph-Louis Lagrange.**

Comment y est-il parvenu ?

Le calcul n'est pas facile, car Vénus est dépourvue de satellites. Joseph-Louis Lagrange a donc été obligé d'étudier avec les moyens de son époque les perturbations que le champ gravitationnel de Vénus provoque sur les orbites de Mercure et de la Terre, ses deux plus proches voisines. D'après l'importance de ces perturbations, il a pu déduire la masse de Vénus. Il a notamment observé en détail ce qu'on appelle l'«avance du périhélie de Mercure», qui est une rotation lente (dite séculaire en astronomie) du grand axe de son orbite. Ce mouvement est dû en majeure partie à l'influence gravitationnelle de Vénus et des autres planètes. La relativité générale n'y contribue que pour une part minime. *pn*

Comment s'appelle l'astronome qui a découvert la planète Mars ?

A vrai dire, ce ne peut être qu'Adam ou Eve. Il s'agit en tout cas de la première personne qui a levé son nez au ciel. Mars est en effet bien visible à l'œil nu, surtout lorsqu'elle est à l'opposé du Soleil par rapport à la Terre. Son éclat très brillant et très rouge ne passe pas inaperçu. *pn*



Combien faut-il de temps pour se rendre sur Mars ?

Aujourd'hui, avec les fusées dont on dispose, la durée moyenne d'un voyage vers Mars est de l'ordre de 9 mois. Pour dépenser le moins de carburant possible, on emprunte une orbite dite de Hohmann (du nom de celui qui a conçu cette idée en 1925). Il s'agit d'une ellipse qui est, au départ, tangente à l'orbite de la Terre et, à l'arrivée, tangente à l'orbite de Mars. Cependant, cette dernière est assez excentrique, si bien que la durée du voyage dépend de la position de la planète rouge au moment de l'arrivée. Si elle est au périhélie (point de son orbite le plus proche du Soleil), le voyage est plus court, si elle est proche de l'aphélie (point le plus éloigné du Soleil), le voyage est plus long.

Il faut donc attendre une date – ou une fenêtre de lancement – à laquelle les positions respectives de la Terre et de Mars sont telles qu'à l'arrivée, les positions du vaisseau spatial et de la planète rouge coïncident. La même contrainte existe d'ailleurs pour le retour. La première sonde humaine qui effectuera l'aller-retour vers Mars devra patienter plusieurs mois avant de repartir vers la Terre.

Il est possible d'arriver à destination plus rapidement qu'en suivant une orbite de Hohmann. Mais cela implique de consommer beaucoup plus de carburant aussi bien durant l'accélération initiale qu'au moment de freiner à l'approche de Mars. Dans le futur, des moyens de propulsion d'un type nouveau seront peut-être développés. Le moteur ionique, par exemple (déjà testé sur la petite sonde *Smart-1*), fournit une poussée très faible, mais de manière continue, contrairement aux moteurs chimiques actuels qui produisent une puissance considérable mais sur des temps

très courts (quelques minutes au plus). Ces nouveaux moteurs permettront sans doute de gagner du temps dans les voyages interplanétaires, mais les durées se chiffreront de toute façon toujours en mois. *pn*

Quelles sont les différences entre l'atmosphère terrestre et celles de Mars et Vénus ?

A l'origine, les atmosphères des trois planètes étaient semblables, avec 95% de gaz carbonique (CO_2), 3% d'azote (N_2), des traces de CO et de gaz rares comme l'argon et de néon et de l'eau en quantités variables selon les planètes et l'altitude.

C'est la présence d'eau liquide qui a permis une évolution de l'atmosphère terrestre distincte de celles de Mars et de Vénus. La pluie a lessivé les silicates de calcium et de magnésium, les a transportés en mer où ils ont précipité sous forme de CaCO_3 et de MgCO_3 . Par la suite, ce sont les organismes marins munis de coquille en calcaire qui ont contribué à précipiter massivement le CaCO_3 au fond des océans – le gaz carbonique nécessaire à la formation du CaCO_3 étant pris à l'atmosphère. Le carbone constituant des organismes vivants a, quant à lui, été en partie piégé sous forme de houille sur les continents, et d'hydrocarbures dans les mers fermées.

La photosynthèse réalisée par les organismes marins a de son côté commencé à produire de l'oxygène. Celui-ci, dans un premier temps, a été utilisé pour oxyder le fer dans l'eau de mer. Ces molécules ont alors précipité pour former les gisements exploités de nos jours. Ce n'est qu'il y a 1,8 milliard d'années que l'oxygène a pu se libérer peu à peu dans l'atmosphère. Lorsque la vie a gagné les terres émergées, il y a 550 millions d'années, le taux d'oxygène dans l'atmosphère ne représente que 2%. C'est la photosynthèse par les plantes continentales qui a fait monter cette teneur à la valeur actuelle.

Aujourd'hui, l'atmosphère terrestre contient 78% de N_2 , 21% d' O_2 , 0,9% d'Argon et plus que 0,035% de CO_2 . La quantité de gaz carbonique piégé dans les sédiments est énorme. Elle représente l'équivalent de 55 à 60 atmosphères terrestres actuelles. *mg*

Y a-t-il eu de la vie sur Mars ?

On ne sait pas encore s'il y a eu de la vie sur Mars. Certains pensent qu'une forme de vie bactérienne se serait développée sur la planète rouge en se basant sur de prétendus fossiles découverts dans une météorite martienne tombée sur Terre il y a environ 10 000 ans (ALH84001). Les arguments avancés ne sont toutefois pas définitifs.

Pour en avoir le cœur net, il faudrait bien sûr aller vérifier sur place. Il n'est toutefois pas totalement exclu que des microbes terrestres aient pu

voyager jusqu'à Mars dans des roches arrachées à notre planète par l'impact d'une grosse météorite. Ainsi, si l'on trouve des vestiges de vie microbienne sur Mars, ils pourraient aussi trouver leur origine sur Terre. A moins que la vie soit apparue sur Mars avant de féconder la Terre par le même mécanisme.

Il semble de plus en plus vraisemblable que de grandes quantités d'eau soient présentes sur Mars, mais seulement sous forme de glace et dans les profondeurs du sol. On sait par ailleurs que les calottes polaires contiennent de la glace ainsi que de la neige carbonique – il fait très froid sur Mars, presque toujours moins de 0° C et la plupart du temps plusieurs dizaines de degrés au-dessous. Des clichés pris par la sonde *Mars Global Surveyor* et *Mars Express* semblent indiquer que de brèves coulées d'eau liquide auraient eu lieu récemment, mais cela reste controversé. Certains estiment toutefois qu'il s'agirait plutôt de dioxyde de carbone liquide. Il se pourrait bien, en revanche, qu'il y ait eu de l'eau liquide sur Mars dans un passé lointain, quand l'atmosphère était plus dense. La plus grande partie aurait gelé et le reste se serait ensuite évaporé, et la vie avec, si elle a eu l'occasion de se développer. *pn*

Est-ce possible que la vie terrestre soit apparue au départ sur Mars et qu'elle ait été transmise à la Terre par l'intermédiaire de météorites ?

Il faut savoir que les conditions climatiques ont toujours été plus défavorables à l'émergence de la vie sur Mars que sur Terre. Les atmosphères d'origine étaient semblables, avec 95% de gaz carbonique (CO₂), 3% d'azote (N₂), un peu de NH₃ et de CH₄, mais sans oxygène libre. En revanche, celle de la Terre a évolué, contrairement à celle de Mars, jusqu'à pouvoir soutenir la vie. L'absence d'océans sur Mars n'offre pas de milieu favorable à l'émergence de la vie. Sur la planète rouge, l'eau a cessé de ruisseler il y a 4,2 milliards d'années et le dernier océan s'est évaporé il y a 3,6 milliards d'années, au moment où la vie a débuté sur Terre. L'eau qui a subsisté dans le sous-sol martien a gelé jusqu'à des profondeurs de 2,7 kilomètres sous la surface, ne permettant aucune activité biologique.

Par ailleurs, la présence de bactéries fossiles dans une météorite supposée d'origine martienne (ALH84001) n'a jamais fait l'unanimité parmi les scientifiques. Les agrégats observés qui ont été associés à une activité bactérienne ont été cristallisés à une température d'environ 500 degrés, incompatible avec le développement de la vie. D'autres processus de formation, abiotiques, peuvent sans difficulté expliquer les formations observées. Par la suite, ALH84001 a été datée à 4,2 milliards d'années, un âge qui coïncide avec une phase d'intense bombardement météoritique au cours de laquelle aucune forme de vie n'était possible. *mg*

Est-ce qu'un jour les humains pourront vivre sur Mars ?

Vivre sur Mars serait difficile pour l'homme. Nous serions obligés d'y circuler en scaphandre ou de rester dans des bases pressurisées à l'intérieur desquelles l'air terrestre serait reproduit. En effet, l'atmosphère martienne ne contient pratiquement que du dioxyde de carbone (CO₂). Elle est donc irrespirable. Quant à la pression, elle est extrêmement faible, environ 7 millibars, c'est-à-dire moins du centième de celle qui règne sur Terre, ce qui la rend tout aussi impropre à la vie humaine. Cette faible pression atmosphérique empêche également l'eau liquide d'exister sur Mars. Dans de telles conditions, soit elle gèle, soit elle s'évapore très rapidement.

Pour d'éventuels astronautes, vivre sur Mars serait donc pratiquement aussi difficile que sur la Lune. Avec le désavantage qu'en cas de problèmes techniques, il faut compter plusieurs mois pour revenir de Mars, alors que notre satellite n'est éloigné que de trois jours de voyage. *pn*

Quelle est la nature des anneaux de Saturne ?

Bien que les astronomes connaissent de nombreux détails sur la nature des anneaux de Saturne, leur origine est encore méconnue. On hésite entre le scénario de la collision entre un satellite et une comète, et celui de la formation manquée de satellites.

Première précision: les anneaux ne peuvent être constitués d'une seule pièce. En effet, les forces agissant sur les parties internes ne sont pas les mêmes que celles s'exerçant sur les zones plus éloignées. Ces différences créeraient des tensions suffisantes pour froisser et déchirer immédiatement cette feuille très mince – l'épaisseur des anneaux ne dépasse pas les quelques centaines de mètres pour un diamètre de plus de 900 000 km.

L'anneau est donc constitué de petits blocs de pierre et de glace. Ceux qui sont proches de la planète ont une révolution plus rapide que ceux qui en sont éloignés. Cette différence de vitesse provoque des petits chocs entre les constituants de l'anneau, dissipe de l'énergie et entraîne à terme la destruction de l'anneau. Par chance pour les amateurs d'astronomie, un autre mécanisme ralentit cette désagrégation. L'alternance de cercles de matière et de cercles vides diminue sensiblement ces frottements, permettant aux anneaux de persister plus longtemps. L'effet est augmenté par le fait que chacun de ces petits anneaux a tendance à se contracter sous l'effet de sa propre gravité, baissant encore les possibilités de collisions.

Les lunes de Saturne troublent cependant ce bel équilibre en déformant les cercles. Ces perturbations engendrent des frictions responsables de la disparition de matière dans la région où transitent les satellites. *rb*

Les anneaux de Saturne tournent-ils dans le même sens que la planète?

Si oui, à quelle vitesse ?

Les anneaux de Saturne sont constitués de millions et de millions de particules ou de blocs solides qui tournent autour de cette planète géante comme une multitude de petites lunes. Leurs tailles sont comprises entre celle d'un grain de sable et d'une maison. Elles tournent toutes dans le même sens, qui est celui de rotation de Saturne sur elle-même. En revanche, ces particules ne se déplacent pas toutes à la même vitesse. Les plus proches de la planète géante sont aussi les plus rapides. Le bord interne de l'anneau A (situé à 122 200 km de Saturne) tourne avec une vitesse de 17,63 kilomètres à la seconde, alors que le bord externe de ce même anneau (situé à 136 800 km de Saturne) tourne à la vitesse de 16,66 km/s. *dr*

Pourquoi les anneaux de Saturne sont-ils si étalés dans l'espace ?

Supposons que les anneaux proviennent de la fragmentation d'un unique objet, qui se serait trouvé à l'intérieur de la limite de Roche, c'est-à-dire suffisamment près de la planète pour que les forces de marée excèdent ses forces de cohésion interne. En principe, cela conduit à la formation d'un anneau fin. Toutefois, les collisions entre particules entraînent des échanges de moment cinétique qui, à leur tour, provoquent un étalement radial. Ce dernier n'est arrêté que par l'influence gravitationnelle des plus gros fragments, appelés satellites «bergers», qui confinent les anneaux par effet de résonance. *pn*

Combien y a-t-il d'anneaux à la planète Saturne ?

Les télescopes à la surface de la Terre permettent de détecter 3 anneaux autour de Saturne. Ils sont désignés par des lettres: A pour l'anneau externe, B pour celui du milieu, qui est le plus brillant, et C pour l'anneau interne. La sonde spatiale *Voyager 1* a toutefois révélé en 1980 que chacun de ces anneaux était en réalité divisé en une douzaine de plus petits. On sait désormais aussi qu'il existe quatre anneaux supplémentaires: le D qui se situe à l'intérieur du C, le F qui est à l'extérieur du A, le G encore plus à l'extérieur et le E, qui est le plus externe. *dr*

Quel est le diamètre du plus grand anneau de la planète Saturne ?

Le plus grand anneau de Saturne, c'est-à-dire celui qui se situe le plus à l'extérieur du système, est l'anneau E. Son bord externe se trouve approximativement à 480 000 kilomètres du centre de Saturne. *dr*

Quelle est la durée de vie des anneaux ?

La durée de vie des anneaux est très difficile à estimer. On pense aujourd'hui que les anneaux planétaires (que ce soient ceux de Saturne, de Jupiter, d'Uranus ou de Neptune) ont des durées de vie courtes par rapport à l'âge du système solaire, qui est de 4,55 milliards d'années. En particulier, on estime que les anneaux de Saturne ne survivront pas plus de 100 millions d'années. *dr*

Pourquoi les anneaux de Saturne sont-ils si connus ?

Certainement parce qu'ils sont visibles avec des moyens relativement modestes. Galilée a détecté en 1610 des « cornes » à la planète Saturne. C'est l'astronome néerlandais Christiaan Huygens qui a découvert en 1654 la nature annulaire de ces objets. Le Français d'origine génoise Giovanni Cassini a discerné deux anneaux concentriques et *Voyager I* et *II* en ont détecté des milliers au début des années 1980. L'aspect esthétique et changeant des anneaux de cette planète a sans doute contribué à sa notoriété. *bn*

Pourquoi la Terre ne possède-t-elle pas d'anneaux ?

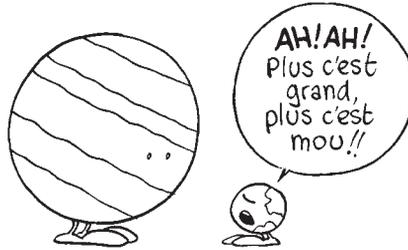
Parce que la Terre est près de 100 fois moins massive que Saturne. Lors de la formation du système solaire et grâce à leur importante attraction gravifique, les planètes géantes ont pu piéger beaucoup plus de matière dans leur disque équatorial que la Terre. Par ailleurs, en deçà d'une limite dite de Roche, les forces de marée provoquées par la planète surpassent les forces internes assurant la cohésion d'un satellite. Dans le cas de Saturne, ces effets de marée ont empêché la formation d'une lune ou peut-être réduit en miette une lune déjà existante, mais qui s'est trop rapprochée.

Bien qu'une grande masse planétaire soit une condition nécessaire pour posséder des anneaux, elle n'est cependant pas suffisante. En effet, Jupiter, malgré ses 318 masses terrestres, dispose certes d'anneaux, mais fort discrets. *bn*

Pourquoi, au-delà de Jupiter, n'y a-t-il plus de planètes rocheuses ou telluriques ?

Les planètes géantes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ne sont pas entièrement gazeuses. Elles contiennent encore des éléments rocheux et des métaux dans leur centre. Leur formation a en effet débuté par la constitution, à partir des poussières du disque protoplanétaire, d'un noyau dont la composition est similaire à celle des planètes telluriques, mais de masse inférieure. Une fois formé, ce noyau est capable, grâce sa propre

gravitation, d'attirer les particules de glace d'eau jusqu'à tripler sa masse. Ce cœur composé de métaux, de roches et de glace est alors assez massif pour capturer et retenir les gaz légers, comme l'hydrogène et l'hélium, et des gaz rares comme le néon, l'argon, le krypton, etc. Cette accumulation dure aussi longtemps que la nébuleuse solaire n'est pas dissipée sous l'effet de l'irradiation du Soleil, soit durant les 30 premiers millions d'années. L'ensemble du processus crée des planètes géantes sans surface solide, mais dont le noyau, métallique et rocheux, est recouvert de glace et d'hydrogène solide, le tout supportant une épaisse atmosphère. *mg*



Pourquoi les planètes joviennes (les géantes gazeuses) tournent-elles aussi vite sur elles-mêmes ?

Plusieurs effets semblent jouer de concert. Le premier est lié à la vitesse des particules capturées par la planète au cours de sa formation. La célérité des gaz et des poussières dépend de leur distance au Soleil autour duquel ils orbitent. Les plus proches de l'astre sont les plus rapides, les plus éloignées sont les plus lentes. Si la planète en formation est lourde, l'étendue de sa zone de capture sera d'autant plus grande. Elle accumulera donc du gaz et des poussières avec un moment cinétique plus élevé qu'une petite planète. Cela se traduit par une accélération angulaire.

Le deuxième effet est dû à la dynamique interne de la planète. Si l'on considère cette dernière comme une boule homogène en rotation uniforme et isolée de toutes interactions extérieures, alors les particules «lourdes» descendent vers le centre, tandis que les «légères» migrent vers la surface. Du coup, le moment d'inertie, qui caractérise la répartition de la masse, diminue. Mais comme le moment cinétique, c'est-à-dire la quantité de rotation, ne change pas, la vitesse angulaire est obligée de croître. Pour les planètes gazeuses, le contraste de densité entre la périphérie et le centre est très élevé. Pour les planètes solides, il est plus faible.

Finalement, l'équilibre des géantes gazeuses est maintenu par la pression thermique du gaz. Le rayonnement de la planète, essentiellement infrarouge, entraîne une baisse de température qui conduit à son tour à une contraction de la planète et donc à une accélération angulaire supplémentaire. Pour les planètes telluriques comme la Terre ou Mars, la

masse volumique ne dépend que très peu de la température. Les phénomènes de contraction et d'accélération sont donc insignifiants. *rb*

Combien de satellites compte Jupiter ?

Une septantaine de satellites de Jupiter sont connus, mais on en trouve régulièrement des nouveaux. Les quatre plus gros ont été découverts par Galilée: Io (3630 km de diamètre), Europe (3138 km), Ganymède (5262 km) et Callisto (4800 km). Leurs distances au centre de Jupiter sont respectivement de 422 000 km, 671 000 km, 1 070 000 km et 883 000 km (le rayon équatorial de Jupiter est de 71 492 km). *rb*

S'il y a un océan sous la croûte de glace d'Europe, comment peut-il être liquide ?

Europe, une des lunes de Jupiter, apparaît en effet comme une sphère de glace. Les images prises par les sondes *Voyager* et plus récemment par *Galileo* montrent que cette glace est fracturée comme la banquise terrestre et que ces motifs évoluent au cours du temps. Une des hypothèses pour expliquer cette observation est la présence de liquide sous une épaisse couche de glace. Il pourrait s'agir d'eau. Certains rêvent même que la vie s'y soit développée dans un océan tempéré. Toutefois, toute la question est de savoir d'où vient la chaleur nécessaire pour qu'un éventuel océan d'eau reste liquide sur Europe.

Elle ne peut venir du volcanisme. En effet, le volcanisme des corps isolés dans l'espace tire son énergie de la désintégration radioactive de certains éléments. Le réservoir de chaleur est donc proportionnel au volume de l'astre et les déperditions sont fonctions de sa surface. Plus le satellite est grand, plus il peut conserver longtemps un volcanisme actif. Cependant, les corps du système solaire qui possèdent une taille similaire à Europe, comme l'astéroïde Cérés ou la Lune, ont tous arrêté leur volcanisme depuis bien longtemps. Conclusion: les volcans hyperactifs de Io, les supposés océans d'Europe et l'atmosphère de Titan (une des lunes de Saturne) profitent forcément d'une autre source d'énergie.

Le problème, c'est que la chaleur ne peut pas provenir non plus de la seule proximité de Jupiter ou de Saturne. Certes, les lunes assez grosses et assez proches de leur planète mère – c'est le cas d'Europe – sont soumises à des forces de marée qui provoquent des déformations plus ou moins importantes. Et comme la matière n'est pas parfaitement élastique, ces étirements produisent de la chaleur. Toutefois, l'énergie dégagée par ces effets de marées ont eu, avec le temps, comme résultat de synchroniser la rotation du satellite avec sa révolution autour de la planète – comme la Lune, qui nous montre toujours la même face –, de rendre son orbite circulaire et de l'aligner dans le plan équatorial de la planète. C'est

ce qui s'est déjà produit avec les quatre principaux satellites de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto). Et dans une telle configuration d'équilibre, justement, les forces de marées disparaissent.

L'énergie, en fait, provient d'une perturbation de cet équilibre, causée par les autres satellites qui interagissent mutuellement et régulièrement. En effet, lorsque les lunes passent à proximité les unes des autres, leurs attractions gravitationnelles modifient leurs trajectoires qui perdent ainsi leur circularité. De plus, les quatre principaux satellites de Jupiter sont en configuration de résonance. Cela signifie que toute modification de l'orbite d'un satellite est accompagnée d'une réorganisation des trois autres. Cela laisse beaucoup d'énergie disponible pour Io et Europe.

Io, le satellite le plus rapide et le plus proche de Jupiter, est celui qui dissipe le plus d'énergie de cette manière. Son orbite est perturbée par Europe et sa grande proximité avec la géante gazeuse provoque l'apparition des nombreux volcans qui percent sa surface et qui éjectent de la lave à près de 300 km d'altitude.

Sur Europe, dont la course est troublée à la fois par Io et par Ganymède, la production d'énergie est moindre car le satellite est plus éloigné de Jupiter. Le fait qu'Europe soit recouverte de glace constitue une protection pour l'éventuel océan qu'elle recouvre, l'empêchant ainsi de s'évaporer. Toutefois, une configuration des satellites un peu différente pourrait fracturer cette couche ou l'épaissir, ce qui revient à dire que la vie, si elle a jamais existé, ne pourrait plus être maintenue longtemps sur ce satellite. *rb*



Qu'est-ce qui pourrait vivre sous le manteau de glace d'Europe, un des satellites de Jupiter ?

Les mécanismes ayant présidé à l'apparition de la vie sur notre propre planète sont encore très mal compris. En conséquence de quoi il semble pour le moins hasardeux de prédire sur quelles autres planètes ou satel-

lites des formes de vie ont pu voir le jour également. On peut toutefois prudemment admettre que des conditions physico-chimiques proches de celles liées à la présence d'êtres vivants sur Terre sont nécessaires à leur existence sur d'autres astres. Mais il est peu probable qu'elles soient suffisantes.

Les images de la surface d'Europe, prises par la sonde *Galileo*, évoquent une banquise fracturée, comme remodelée par des courants sous-jacents. Si un océan d'eau liquide (et donc relativement chaude) existe à quelques kilomètres de profondeur, les conditions qui y règnent sont peut-être semblables à celles de certains milieux terrestres, certes extrêmes, mais abritant pourtant de la vie bactérienne. L'analogie ne nous mène cependant pas plus loin car, dans le cas de la Terre, ces micro-organismes sont probablement les descendants d'espèces ayant vécu dans d'autres biotopes, absents d'Europe. Quoique cette affirmation soit elle-même sujet à débat.

Dans ce genre de domaine, où la science rencontre les fantasmes et les conceptions métaphysiques dans l'esprit de presque chacun, il est essentiel de garder la tête froide et d'éviter de prendre ses rêves les plus fous pour des réalités. Au moins faut-il être conscient que les connaissances scientifiques, si elles catalysent notre imagination, ne peuvent être invoquées pour en étayer toutes les créations. *mf*

Qu'est-ce que le phénomène de résonance des satellites de Jupiter ?

Une résonance orbitale a lieu lorsque deux objets tournant autour d'un troisième ont des périodes de révolution dont le rapport est une fraction entière simple. Dans un tel cas, ils exercent une influence gravitationnelle périodique l'un sur l'autre, capable de déstabiliser l'orbite de l'un des deux corps. La résonance peut aussi avoir l'effet opposé. Elle permet la stabilisation d'orbites et à protéger certains corps de perturbations gravitationnelles. Ainsi Pluton est protégé de l'éjection de son orbite par une résonance 3:2 avec la planète géante Neptune. Idem pour les lunes joviennes. Le rapport entre les périodes de Io et d'Europe est de 1:2, tout comme celui entre Europe et Ganymède. Le rapport entre Ganymède et Callisto, en revanche, est de 3:7. Toute perturbation sur un satellite se répercute finalement sur les trois autres. La nature a choisi 2:5 pour Jupiter et Saturne. *rb*

Par qui et quand a été découverte la planète Pluton ?

Pluton a été découverte en 1930 par Clyde W. Tombaugh (1906-1997) de l'observatoire Lowell en Arizona. *dr*

Est-il possible que Pluton et Neptune entrent en collision, puisque leurs deux orbites se croisent ?

Non, il n'y a aucune chance pour que ces deux planètes entrent en collision. En effet, pour trois tours de Neptune autour du Soleil, Pluton en fait deux. Sur de telles orbites, dites «résonnantes», les deux planètes ne se trouvent jamais en même temps à la même distance du Soleil. Autrement dit, elles ne peuvent jamais entrer en collision. De plus, l'orbite de Pluton est fortement inclinée ($17,1^\circ$) par rapport à celles des autres planètes du système solaire, dont Neptune. Cette caractéristique contribue aussi à maintenir une grande distance entre ces deux corps. On peut montrer que la séparation minimale entre Neptune et Pluton est de 2 milliards de kilomètres.

Notons encore que depuis le 11 février 1999, Pluton est redevenue, pour 228 ans, la planète la plus lointaine du système solaire. Elle avait perdu cette particularité au profit de Neptune le 21 janvier 1979. *dr*



Est-ce vrai que la dixième planète s'appelle Koré ?

Dans l'Antiquité, seulement cinq planètes de notre système solaire étaient connues des astronomes: Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, qui, avec le Soleil et la Lune, étaient les seuls corps errants dans la sphère des étoiles fixes et ont ainsi donné leur nom aux jours de la semaine. Depuis le XVI^e siècle jusqu'à nos jours, une pléthore d'objets est venue peupler le système solaire connu et le nombre de planètes est désormais porté à neuf depuis la découverte de Pluton en 1930.

L'existence d'une planète au-delà de l'orbite de Pluton a été avancée pour rendre compte des perturbations observées sur les mouvements d'Uranus et de Neptune, perturbations que la présence de Pluton seule n'arrivait pas à expliquer. Elle est désignée sous le terme de planète X pour traduire à la fois son caractère énigmatique et le rang de dixième planète qu'elle occuperait au sein du système solaire. Toutefois, les recherches visant à la mettre en évidence sont restées vaines. On a en revanche

découvert depuis 1992 des astéroïdes transneptuniens. On attribue l'existence de ces astéroïdes à la présence d'une vaste région au-delà de l'orbite de Neptune peuplée de planètesimaux (astéroïdes et noyaux cométaires): la ceinture de Kuiper.

Une découverte réalisée en mars 2004 a récemment relancé le débat sur la dixième planète. Une équipe américaine a en effet détecté un objet, baptisé Sedna, dont la taille est à mi-chemin entre le diamètre de Pluton (1800 km) et celui du plus gros objet de ceinture de Kuiper connu jusqu'alors (1250 km). A l'heure actuelle, tout le monde s'accorde toutefois sur le fait que Sedna ne répond pas à la définition de planète.

La recherche d'un dixième membre au sein du cortège planétaire n'est pas terminée pour autant. Elle se poursuit non seulement aux confins du système solaire, mais également près du Soleil. Des travaux théoriques montrent en effet que la présence d'une planète intramercuriale, entre l'orbite de Mercure et le Soleil, est possible, mais aucune observation n'a jusqu'à présent accrédité cette hypothèse. *fr*

Quelles peuvent être les conséquences liées à l'alignement des planètes du système solaire en termes de catastrophes naturelles ou de déplacement du centre de gravité de la terre ?

Si toutes les planètes étaient alignées avec la Terre et que, de plus, elles étaient en même temps à leur plus courte distance possible de notre planète, leur effet de marée combiné serait 14 000 fois plus faible que celui dû à la Lune. Conclusion: ne vous attendez à rien de particulier pour le jour où cela arrive. *dr*

6 LES ÉTOILES

Pourquoi voit-on les étoiles briller dans le ciel pendant la nuit ?

Les étoiles ont besoin de la nuit pour briller: le jour, la présence du Soleil ôte toute possibilité de les observer. En effet, l'atmosphère terrestre diffuse la lumière du Soleil pour nous donner un ciel d'un bleu quasi uniforme qui noie la faible lueur des étoiles incapables de rivaliser.

C'est donc la nuit tombée que les astronomes travaillent le mieux, mais les conditions ne sont pas toujours idéales. En effet, la lumière des villes, de plus en plus étendues et brillantes, illumine le ciel et ne laissent plus passer que l'éclat des étoiles les plus brillantes. C'est donc sur un ciel bien noir, loin de toute source de lumière intense, que se détachent le mieux les étoiles. *fr*

Quelle est la grandeur de la plus grande étoile ?

Cela dépend de ce qu'on entend par «grandeur». Si l'on parle d'éclat apparent – de magnitude apparente –, alors l'étoile la plus brillante du ciel est Sirius. C'est une étoile dite de première grandeur, selon l'échelle ancienne qui classe les étoiles de la première à la sixième grandeur, cette dernière représentant la limite de visibilité à l'œil nu. L'échelle des magnitudes, plus récente et définie de manière plus rigoureuse, est logarithmique mais calquée sur l'ancienne notion de grandeur, si bien qu'une étoile de première grandeur correspond à une magnitude inférieure à 1. Sirius a une magnitude négative de $-1,46$.

En revanche, si l'on prend le mot grandeur dans le sens du rayon ou du diamètre de l'étoile, alors la réponse n'est pas aisée. Il est en effet très difficile de mesurer un diamètre stellaire avec précision. Bételgeuse, une supergéante rouge dans la constellation d'Orion, a un diamètre de l'ordre du milliard de km, même s'il varie un peu. Si elle se trouvait à la place du Soleil, elle engloberait les orbites de toutes les planètes du système solaire interne jusqu'à Mars. On peut aussi citer l'étoile *mu Cephei*, une supergéante rouge de taille semblable à Bételgeuse, mais plus froide et plus distante.

Il est encore possible de hiérarchiser les étoiles en fonction de leur masse. Là aussi, il est difficile de désigner celle qui détient le record dans notre galaxie, faute de pouvoir mesurer les masses avec précision, sauf

dans le cas des étoiles doubles. En se basant sur des arguments théoriques, on suppose que les étoiles les plus massives possèdent environ 120 fois la masse du Soleil. Un bon exemple est *éta Carinae*, une étoile chaude et très massive de l'hémisphère céleste sud, dont la masse doit être voisine de 100 masses solaires. *sb*



Pourquoi les étoiles scintillent-elles alors que les planètes paraissent stables ?

Le scintillement est causé par des réfractions multiples et aléatoires de la lumière dans les couches turbulentes de l'atmosphère terrestre. Si les étoiles scintillent alors que les planètes ne le font pas, c'est que les étoiles sont suffisamment éloignées de nous pour n'apparaître que comme des points. Les planètes, incomparablement plus proches, se présentent comme des disques. Ainsi les variations de lumière, causées par l'atmosphère terrestre, se compensent pour les divers points des disques planétaires. L'image des planètes est ainsi plus stable. *dr*

Qu'est-ce que l'astrométrie ?

L'astrométrie est la branche de l'astronomie qui s'occupe de mesurer avec grande précision les positions des astres dans le ciel. Par exemple, la mesure de la vitesse apparente avec laquelle les étoiles se déplacent dans le ciel est réalisée par les astrométristes. Ce sont eux également qui mesurent le faible déplacement apparent de certaines étoiles proches, dû à la modification de la ligne de visée lorsque la Terre parcourt son orbite au cours d'une année, et qu'on appelle «parallaxe trigonométrique». La précision atteinte actuellement par les astrométristes est de l'ordre du millième de seconde d'arc (inférieur au millionième de degré). Le satellite GAIA qui devrait être lancé vers 2012 pourrait encore améliorer cette précision d'un facteur mille. La mesure de la parallaxe est à la base de notre connaissance de l'échelle des distances cosmiques. *nc*

Pourquoi les étoiles sont-elles de différentes couleurs ?

Les couleurs des étoiles dépendent de leur température. Contrairement aux couleurs de nos robinets, les étoiles blanches-bleuâtres sont les plus chaudes et les rouges les plus froides. Notre Soleil, avec sa température de 6000 degrés, aurait une couleur jaunâtre s'il était vu de loin. La couleur d'une étoile correspond au domaine spectral où elle émet le maximum de sa lumière. On peut estimer la température d'une étoile par la loi dite de déplacement de Wien qui établit que la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission lumineuse multipliée par la température est égale à une constante: $\lambda \cdot T = 0,2898 \text{ [cm } ^\circ\text{K]}$. *nc*

Quelles sont les étoiles les plus proches de la Terre ?

Actuellement, les quelques étoiles les plus proches sont indiquées dans le tableau suivant.

Etoile	Magnitude	Parallaxe (secondes d'arc)	Distance (années-lumière)
Proxima Centauri	11,01	0,7723	4,223
Alpha Centauri A	-0,01	0,7421	4,395
Alpha Centauri B	1,35	0,7421	4,395
Etoile de Barnard	9,54	0,5493	5,938
Wolf 359	13,53	0,425	7,67
Lalande 21185	7,49	0,3925	8,309
UV Ceti A	12,52	0,381	8,56
UV Ceti B	13,02	0,381	8,56
Sirius A	-1,47	0,3792	8,601
Sirius B	8,44	0,377	8,65

La parallaxe est une méthode géométrique de triangulation. La position de l'étoile dans le ciel est mesurée tout au long de l'année, lorsque la Terre se trouve en différents points de son orbite autour du Soleil. La petite différence angulaire obtenue entre deux mesures écartées de six mois correspond donc à l'angle sous-tendu par le grand axe de l'orbite terrestre en regardant depuis l'étoile. On peut en déduire la distance de l'étoile par simple triangulation.

Plusieurs étoiles de cette liste font partie d'un système double. C'est le cas notamment de Sirius et de son compagnon. Les parallaxes de ces deux étoiles sont fournies respectivement par le satellite européen Hipparcos et par des mesures faites du sol, ce qui explique la légère différence entre les valeurs. En réalité, elles ne diffèrent pas de manière significative et peuvent être considérées comme identiques. *pn*

Pourquoi les étoiles produisent-elles de l'énergie ?

Les étoiles produisent leur énergie par des réactions thermonucléaires qui ont lieu en leur centre. Elles sont constituées d'au moins 70% d'hydrogène, d'environ 20% d'hélium et de quelques pourcents seulement de tous les éléments restants. Durant la première phase de leur vie, l'énergie est produite par la fusion d'atomes d'hydrogène pour former de l'hélium, de manière semblable à une bombe thermonucléaire. La différence est que cette réaction est continue et modérée au cœur de l'étoile. Plus précisément, la vitesse à laquelle les noyaux d'hydrogène – des protons, en fait – se déplacent sous l'effet de la température (15,8 millions de degrés au centre du Soleil) permet occasionnellement à deux de ces particules de surmonter la force de répulsion électrostatique et de fusionner en libérant de l'énergie. Dans la réalité, un noyau d'hélium est fabriqué à partir de 4 noyaux d'hydrogène au cours d'un enchaînement de réactions différentes. Un enchaînement dont la configuration dépend elle-même de la masse de l'étoile. *nc*

Qu'est-ce que la magnitude absolue et apparente ?

Les astronomes ont pris l'habitude d'exprimer la luminosité d'une étoile en termes de magnitudes selon une échelle logarithmique (qui est aussi la manière dont notre œil fonctionne). La magnitude apparente 1 avait déjà été choisie comme étant celle des plus brillantes étoiles visibles à l'œil nu dans le ciel par l'astronome Hipparque de la Grèce antique. Celui-ci a classé les étoiles moins brillantes selon des magnitudes croissantes. Aujourd'hui, on définit une échelle de magnitudes (m) à partir des rapports d'intensité lumineuse (F). Si nous comparons deux étoiles, ces grandeurs sont reliées par l'équation suivante:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10}(F_1/F_2)$$

En d'autres termes, une différence de 5 magnitudes entre deux étoiles signifie que l'une d'elles est exactement 100 fois plus brillante que l'autre.

Sur l'échelle des magnitudes apparentes, définie par les astronomes, le zéro fixé par convention correspond approximativement aux étoiles les plus brillantes du ciel. On parle ici de magnitudes «visuelles», mesurées dans le domaine spectral auquel notre œil est sensible. La magnitude croît avec une luminosité décroissante. Les étoiles les plus faibles visibles à l'œil nu ont une magnitude apparente d'environ 6 alors que les objets les plus faibles détectés par les télescopes ont une magnitude de 30. Le Soleil, lui, détient évidemment le record d'éclat avec une magnitude de $-26,78$.

Pour pouvoir comparer différents types d'étoiles entre elles et exprimer leur luminosité intrinsèque, les astronomes utilisent la notion de magnitude absolue. Il s'agit de la magnitude qu'aurait l'étoile si elle était placée à la distance de 10 parsecs, c'est-à-dire à 32,6 années-lumière. Notre

Soleil, par exemple, a une magnitude absolue de 4,82. Les magnitudes absolues des étoiles vont de -7 pour les plus brillantes à environ 18 pour les plus faibles. *nc*

A quelle distance de la Terre faut-il se déplacer pour que la forme des constellations commence à changer de manière visible?

Est-ce qu'il suffit d'aller sur Mars ?

Avec un télescope, ou un satellite comme Hipparcos, on parvient à observer une déformation des constellations liée au déplacement de la Terre sur son orbite. Mais ce sont des variations minimes, inférieures à une seconde d'arc (moins de 0,0003 degré). Comme l'œil humain n'a qu'une résolution d'environ une minute d'arc, il ne serait capable de détecter un déplacement d'*alpha Centauri*, une des étoiles les plus proches, qu'à la condition de se déplacer de 80 unités astronomiques, c'est-à-dire à une distance correspondant au grand axe de l'orbite de Pluton. Mais pour que l'effet soit franchement visible, une distance au moins 10 fois plus grande serait nécessaire, soit une vingtaine de fois le rayon du système solaire. Et rien que pour Sirius, dans la constellation du Grand Chien, il faudrait doubler cette distance. *pn*



Quelle est la distance moyenne entre les deux astres d'un système d'étoiles doubles ?

Cette distance est extrêmement variable selon les cas. Elle peut être si petite que les surfaces des deux étoiles se touchent – c'est le cas des binaires de type *W Uma* – ou valoir plusieurs dizaines d'unités astronomiques, soit plusieurs milliards de kilomètres.

On considère qu'une étoile est double s'il y a interaction gravitationnelle durable entre les deux composantes du système et que leur orbite est stable. Si les deux étoiles sont trop séparées, le couple sera vite rompu par les perturbations dues aux astres voisins. *pn*

Quelle est la distance séparant les deux étoiles d'Albireo dans la constellation du Cygne? Est-elle représentative des étoiles doubles ?

Les deux astres qui composent le système d'Albireo ne forment probablement pas un couple physique. D'après le satellite européen Hipparcos, tous deux sont à la même distance de notre système solaire, à savoir 382 années-lumière, mais leurs déplacements propres sur la sphère céleste ne sont pas parallèles. Par ailleurs, les deux étoiles sont séparées d'une distance d'au moins 4040 unités astronomiques, soit 604 milliards de kilomètres (une centaine de fois le rayon du système solaire) et, depuis 1832, aucun mouvement orbital n'a pu être mis en évidence. Ce dernier point n'est pas si étonnant puisqu'un tel couple, s'il était stable, présenterait une période orbitale de plus de 100 000 ans. En général, les étoiles doubles ont des périodes beaucoup plus courtes. Elles sont de l'ordre de quelques jours à quelques années pour les binaires dites spectroscopiques et de quelques décennies à quelques siècles pour les doubles visuelles qui ont été mesurées avec suffisamment de précision. *pn*

Pourquoi le rayon des étoiles de la «séquence principale» (la phase très stable de leur vie lors de laquelle elles consomment l'hydrogène de leur noyau) est-il d'autant plus grand que leur masse est importante?

Si l'on suppose que les étoiles de la séquence principale possèdent toutes la même densité, alors il semble évident que le rayon augmente avec la masse. Ce qui est moins trivial, c'est qu'en réalité, la densité moyenne n'est pas constante d'un astre à l'autre. Plus une étoile est massive, moins elle est dense. A tel point que pour l'ensemble des étoiles similaires au Soleil, le rayon croît presque proportionnellement à la masse. Ainsi, une étoile deux fois plus massive que notre astre du jour aura aussi un rayon à peu près deux fois plus grand. Et donc une densité presque quatre fois moins élevée.

Les caractéristiques des étoiles de la séquence principale, et en particulier leur rayon, sont déterminées par des considérations d'équilibre hydrostatique et thermique. Imaginons une telle étoile à laquelle on ajouterait subitement – par la pensée – une masse supplémentaire. Supposons également que, dans un premier temps, son rayon reste inchangé. Cette quantité de matière nouvellement arrivée provoque alors, comme l'indique la loi des gaz parfaits, une augmentation de la pression régnant à l'intérieur de l'astre et, partant, de la température.

Par ailleurs, l'énergie des étoiles est fournie par la combustion de l'hydrogène en son centre, qui se transforme en hélium. Il se trouve que le résultat de cette réaction de fusion thermonucléaire est très sensible à la température: une augmentation de cette dernière conduit à la production d'un surplus d'énergie thermonucléaire. Une partie de ce surplus est absorbée par l'étoile qui le convertit en une force d'expansion. Le rayon

de l'astre croît alors jusqu'à ce qu'il atteigne un nouvel état d'équilibre. L'autre partie du surplus est évacuée par la surface sous la forme d'une augmentation de la luminosité. *nm*

Comment s'explique le gonflement d'une étoile lorsqu'elle quitte la séquence principale pour devenir une géante rouge ?

Lorsqu'une étoile a entièrement brûlé l'hydrogène qui se trouvait en son centre, elle quitte une phase précise de sa vie appelée séquence principale et devient, en quelques centaines de milliers d'années, une géante rouge. En fait, de l'hydrogène continue à se consumer dans une épaisse coquille entourant un cœur d'hélium. La température de cette zone interne, et donc la quantité d'énergie qu'elle dégage par la fusion de l'hydrogène résiduel, n'arrête pas d'augmenter.

Tant que la quantité d'énergie émise à sa surface (qui correspond à la luminosité de l'étoile) est égale à celle produite par les réactions thermonucléaires internes, cette enveloppe interne de l'étoile se trouve en équilibre thermique et sa structure ne se modifie pas au cours du temps. En revanche, si l'énergie provenant de la fusion devient supérieure à celle qui est irradiée, l'enveloppe accumule cette différence et n'a d'autre choix que de réajuster sa structure. Le surplus d'énergie conduit en fait à une dilatation de l'enveloppe.

Dans le cas des étoiles évoluant sur la séquence principale, comme le Soleil, la dilatation de l'enveloppe s'accompagne d'une plus grande «transparence» de la matière au rayonnement. La luminosité en surface augmente donc, puisque l'énergie traverse plus facilement l'enveloppe, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint. Durant ce processus, le rayon de l'étoile n'augmente que légèrement. C'est ainsi que le Soleil a vu son rayon croître d'environ 10% durant les 4,5 derniers milliards d'années en raison de la hausse de sa température centrale et donc de la production d'énergie thermonucléaire.

Toutefois, lorsque l'étoile quitte la séquence principale, les choses peuvent se dérouler autrement. La matière de l'enveloppe, en se dilatant, devient plus «opaque» au rayonnement lorsqu'une fraction de plus en plus importante de l'enveloppe se refroidit. Les noyaux des éléments, qui étaient entièrement ionisés jusque-là, se recombinent alors avec les électrons du plasma. Or cette opération requiert de l'énergie, ponctionnée sur celle produite par les réactions thermonucléaires. Ces dernières ne peuvent donc plus contribuer intégralement à la luminosité de surface. Résultat: la différence entre l'énergie injectée dans l'enveloppe et celle irradiée à la surface de celle-ci s'accroît, éloignant de plus en plus le système de son état d'équilibre. Il devient même instable et le processus s'emballe. Un nouveau mode de transport de l'énergie s'installe: il s'agit de la convection. L'énergie n'est plus seulement transportée par radiation,

mais également par le mélange de la matière (à l'instar de l'eau en ébullition). Cela permet à l'étoile d'atteindre une nouvelle configuration d'équilibre thermique. Elle est devenue une géante rouge. *nm*

On dit que les crues du Nil sont liées à l'étoile de Sirius.

Mais, quelle est la cause réelle de ces crues ?

La crue du Nil est liée à la saison des pluies qui sévit dans le haut bassin de ce fleuve, dans la région du Lac Victoria, dans le sud du Soudan. Elle atteint la contrée du Caire vers la fin du mois de juin, donc au solstice d'été dans notre hémisphère. La périodicité de ces crues est liée à l'année des saisons ou année tropique sur laquelle est calqué notre calendrier.

Par ailleurs, la Terre réalise environ 366,25 tours sur elle-même lors de chacune de ses orbites, qui correspondent donc à autant de jours sidéraux par année. Mais comme notre planète effectue en même temps un tour complet du Soleil, on n'observe que 365,25 culminations du Soleil, ou encore jours solaires, sur lesquels sont réglées nos montres. Autrement dit, le Soleil est chaque jour en retard de 4 minutes (3 minutes et 56,09 secondes, pour être précis) sur les étoiles par rapport au jour précédent. Cela signifie donc que l'on voit les étoiles se lever dans le ciel chaque jour 4 minutes plus tôt. Au bout d'une année, le jour manquant est rattrapé.

Sirius (Sothis pour les Egyptiens), la plus brillante étoile du ciel, se couche de plus en plus tôt au printemps puis disparaît. Quelque temps plus tard, elle réapparaît fugacement le matin juste avant le lever du Soleil. C'est le «lever héliaque» de Sirius. Entre 1500 et 500 avant J.-C., ce lever précédait de peu la crue du Nil. La réapparition simultanée de l'étoile la plus brillante et de l'eau avait donc une signification hautement symbolique.

Cependant, cette coïncidence n'a pas perduré. La Terre, qui tourne comme une toupie et dont l'axe polaire décrit un cône en 25 770 ans, subit un mouvement de précession. Chaque année le solstice d'été avance de 22 minutes par rapport à l'année sidérale. Mais comme notre calendrier est calqué sur les saisons – sur les équinoxes et les solstices –, ce sont les levers héliaques qui ont l'air de retarder de 22 minutes par année, ou de deux semaines par millénaire. A la latitude du Caire, le lever héliaque de Sirius a aujourd'hui lieu en août alors que la crue surviendrait toujours vers le 25 juin, si le barrage d'Assouan n'avait pas été construit. Avec six bonnes semaines de décalage, le lien entre les deux événements est donc rompu. *bn*

Existe-t-il un moyen de donner un nom à une étoile que l'on voudrait offrir ?

Dans la mythologie grecque, les dieux de l'Olympe accordaient une place de choix aux héros ayant accompli des faits prestigieux, en allumant dans

le ciel une constellation à leur image. De nos jours, les étoiles possèdent une quantité de noms et de numéros qui les identifient. Ainsi, Sirius n'est qu'un nom parmi la cinquantaine (dont *Canis Majoris*, HIP 32349, γ CMA, l'étoile du chien...) qui désignent l'étoile la plus brillante du ciel.

Mais la seule autorité ayant le droit d'attribuer des noms à tout objet céleste est l'Union astronomique internationale (UAI). Et cette dernière ne vend pas d'étoiles que l'on pourrait baptiser à son gré. Tous ceux qui prétendent le contraire, à coups de faux certificats, se rendent coupables d'une arnaque destinée uniquement à soutirer des sommes astronomiques. *fr*

Est-il vrai que l'écliptique, ou la course apparente du Soleil dans le ciel, croise davantage que les 12 constellations traditionnelle ?

En effet, la ligne de l'écliptique ne traverse pas que les 12 constellations traditionnelles du zodiaque. L'astrologie oublie l'importante constellation d'*Ophiuchus* – le Serpenteaire. La définition des constellations dans le ciel, et l'attribution de leurs noms, sont issues de processus arbitraires, tout comme le traçage des frontières entre les constellations. Leur signification ne dépasse pas les cadres de la mythologie et des croyances. Elles sont utiles, toutefois, pour situer approximativement un emplacement dans le ciel – de manière semblable à un pays dans un atlas géographique. Elles ont également joué un rôle dans l'histoire en indiquant les saisons selon leur visibilité nocturne. *nc*

Comment explique-t-on le décalage d'un mois qui existe entre le signe astrologique et la constellation du même nom ?

Il s'agit là d'une des plus célèbres absurdités de l'astrologie. Le décalage d'un mois entre la constellation et le signe du zodiaque correspondant est dû à la précession des équinoxes. L'axe du monde réalise en effet une lente rotation, à l'instar de la toupie. Ainsi, au lieu de pointer en permanence vers un point fixe (aujourd'hui ce dernier correspond à l'étoile Polaire, qui ne mérite son nom que provisoirement), il balaie lentement un cône à raison d'un tour tous les 26 000 ans. Or les signes du zodiaque du calendrier sont définis à partir des saisons et non de la position des constellations dans le ciel, d'où ils tirent pourtant leur nom. Cette précession des équinoxes a comme résultat que le Soleil ne se trouve pas dans la même constellation, pour une saison donnée, aujourd'hui que dans l'Antiquité, l'époque où les règles de l'astrologie ont été plus ou moins fixées. L'écart, qui se monte aujourd'hui à un signe environ, ne fera que s'accroître avec le temps: le signe du Bélier correspond actuellement à la constellation des Poissons, puis entrera dans celle du Verseau. *pn*

Est-il possible que l'on répertorie de nouveaux objets sous le nom de Messier ?

Le catalogue Messier est un catalogue astronomique d'objets d'aspect diffus créé en 1774 par Charles Messier, à l'origine afin d'aider les chercheurs de comètes à ne pas confondre celles-ci avec ces objets étranges. Il n'y aura jamais de suite à cette liste, car seuls les objets répertoriés par l'astronome français en font partie, par définition. En revanche, il existe d'autres catalogues plus récents qui réunissent le même genre d'objets, comme le catalogue NGC. Les objets que l'on découvre actuellement sont en général désignés par leurs coordonnées célestes. *pn*

Quel est l'objet Messier le plus proche de la Terre ?

L'objet Messier le plus proche de la Terre est l'amas ouvert des Pléiades (M45). Il est distant de 132 parsecs selon les estimations les plus récentes, soit 430 années-lumière. *pn*

7 LES PLANÈTES EXTRASOLAIRES

Qu'est-ce qu'une planète extrasolaire ?

Une planète extrasolaire est une planète qui tourne autour d'une étoile autre que le Soleil, c'est-à-dire en dehors de notre système solaire. En une décennie, environ 150 de ces planètes ont été détectées. *su*

Combien de planètes extrasolaires ont été découvertes à ce jour ?

Depuis octobre 1995, et la découverte de la première planète extrasolaire autour de 51 Peg par Didier Queloz et Michel Mayor de l'Observatoire de Genève, environ 150 autres planètes ont été découvertes autour d'étoiles de type solaire. *su*

Comment fait-on pour découvrir des planètes extrasolaires ?

Les planètes extrasolaires sont entre 1 et 10 milliards de fois moins lumineuses que les étoiles autour desquelles elles gravitent. Il est encore impossible à l'heure actuelle de les observer directement. Ce que l'on peut détecter, en revanche, c'est le mouvement réflexe de l'étoile, dû à la présence de la planète. Tout comme le lanceur de marteau qui tourne avec son projectile, l'étoile et sa planète effectuent une danse autour du centre de gravité du système. Les astronomes qui chassent les planètes extrasolaires cherchent donc à mesurer de petits changements de vitesses dans le mouvement des étoiles. *su*

Est-il possible que le mouvement réflexe que l'on mesure sur certaines étoiles soit le résultat non pas d'une, mais de plusieurs planètes extrasolaires ?

La plupart des planètes extrasolaires détectées à ce jour semblent, pour le moment, «seules» en orbite autour de leur étoile mère. Nos appareils d'observation, de plus en plus perfectionnés, permettent de mesurer en premier lieu les planètes les plus massives et les plus proches de leur Soleil. S'il existe dans le même système un deuxième corps, son effet sur l'étoile s'additionnera simplement au premier, dans les cas où l'on peut

négliger l'interaction gravitationnelle entre eux. Cependant, si cette deuxième planète est plus légère et plus éloignée, elle sera plus difficile à découvrir. Quoi qu'il en soit, quelques systèmes multiplanétaires ont déjà été détectés. On en compte aujourd'hui une quinzaine regroupant environ le 20% des planètes connues. L'un d'entre eux comprend quatre planètes et plusieurs autres contiennent trois planètes. On pense en trouver beaucoup d'autres car pour plus de la moitié des planètes seules, on devine déjà l'influence d'un compagnon supplémentaire. Pour s'en assurer, il faut attendre qu'au moins une orbite complète de la planète extérieure soit accomplie pour pouvoir calculer sa période. La masse de la planète est déduite ensuite de cette période et de l'amplitude du changement de vitesse radiale qu'elle provoque sur l'étoile. *su*

Tous les soleils sont des étoiles. Mais est-ce que toutes les étoiles sont des soleils? Autrement dit, est-ce que toutes les étoiles abritent des systèmes planétaires ?

Depuis environ 10 ans, des planètes dites extrasolaires sont régulièrement détectées autour d'étoiles semblables à notre Soleil. Par ailleurs, selon les modèles théoriques généralement acceptés, elles représentent des produits naturels et attendus de la formation des étoiles. Les planètes sont donc probablement très courantes dans l'univers. Cependant, toutes les étoiles n'en possèdent pas forcément. Par exemple, des étoiles doubles très proches pourraient mutuellement empêcher le développement de planètes autour de l'une ou de l'autre. Un même genre de perturbation semble être actif dans les régions denses d'amas d'étoiles où la présence de voisins stellaires proches empêche les planètes de se former. En outre, un astre comme le Soleil devient, en fin de vie, très gros et très lumineux, brûlant tout ce qui est à sa portée. En résumé, en l'état de notre connaissance, nous pensons que des planètes gravitent probablement autour d'un très grand nombre d'étoiles. Ce nombre reste cependant encore très mal défini. *su*

Est-il possible qu'une planète puisse évoluer sur une orbite stable autour d'une étoile double ?

Une planète peut avoir une orbite stable autour de l'une des étoiles d'un système double. La taille de la zone de stabilité dépend de la distance entre les deux astres. D'ailleurs, plusieurs planètes extrasolaires découvertes à ce jour gravitent autour de l'une des composantes d'un système double. C'est le cas par exemple de Gl 86 (une binaire spectroscopique) et 16 Cyg B (une binaire visuelle). Par ailleurs, des simulations numériques ont également montré que des zones de stabilité existent non seulement autour de chacune des étoiles du système, mais aussi autour du système

double en entier. De plus, des observations récentes avec le télescope spatial Hubble ont mis en évidence des disques circum-binaires entourant des couples d'étoiles très jeunes. De tels disques sont de parfaites pépinières de planètes. *su*

Si l'on trouve une planète habitable, à qui appartiendra t-elle ?

La question pour l'instant n'est pas d'actualité. Les étoiles les plus proches du Soleil sont très éloignées de nous. Notre première voisine planétaire se trouve à environ 10 années-lumière d'ici, soit la distance parcourue par la lumière en 10 ans, ce qui correspond à 95 000 000 000 000 kilomètres. Même en se déplaçant très, très vite, c'est encore beaucoup trop loin pour nous. Si, dans le futur, les progrès techniques et scientifiques (tout en sachant que la vitesse de la lumière est une vitesse maximale en physique) permettent un jour de tels déplacements, alors la question se reposera de façon pertinente. De toute façon, celui qui se déplacera jusqu'à la planète aura beaucoup plus de chance de se l'approprier que celui qui la contempera de très loin à travers son télescope. *su*

Est-ce qu'un jour on pourra vivre sur une planète extrasolaire, et dans combien de temps ?

Bien que l'existence de planètes extrasolaires fasse partie des croyances populaires depuis longtemps, ce n'est que récemment que les astronomes en ont découvert pour la première fois. Pour l'instant, les planètes détectées sont des géantes gazeuses, semblables à Jupiter. Elles sont donc très probablement inappropriées au développement ou même à la survie d'une vie organique comme la nôtre. Cependant, notre compréhension de la formation de ces planètes prévoit également l'existence de planètes de type terrestre qui, si elles ne sont pas encore détectables par les techniques actuelles, pourraient se révéler être des compagnons très communs d'étoiles semblables au Soleil.

La détection de ces planètes telluriques, comme on les appelle, devrait être possible dans une dizaine d'années environ, avec le lancement de satellites photométriques capables de mesurer très précisément la quantité de lumière provenant d'une étoile. Ces satellites pourront détecter, dans les cas géométriquement favorables, des variations de luminosité aussi faibles que l'occultation très partielle d'un astre par une planète semblable à notre Terre. Les scientifiques s'attendent à ce que le projet *Eddington* de l'Agence spatiale européenne (ESA), par exemple, permette la détection d'environ 1000 planètes terrestres. Une centaine d'entre elles pourraient se trouver à une distance adéquate de leur étoile mère pour permettre la présence d'eau sous forme liquide et donc le développement potentiel d'une forme de vie semblable à la nôtre.

Une telle forme de vie pourrait même être détectée d'ici une vingtaine d'années seulement lorsqu'on sera capable de mesurer de l'oxygène libre (de l'ozone) dans l'atmosphère des ces planètes. Une telle prouesse est possible grâce à des techniques d'interférométrie, combinant la lumière de plusieurs grands télescopes placés dans l'espace entre la Terre et Jupiter. C'est d'ailleurs le but affiché des projets *Darwin* de l'ESA et TPF de la NASA.

Il est donc raisonnable d'imaginer que certaines planètes extrasolaires pourraient abriter ou accueillir une vie organique comme la nôtre. Cependant, l'obstacle majeur qui se dresse devant une éventuelle colonisation de ces nouveaux mondes est leur distance. Les étoiles les plus proches autour desquelles les planètes sont cherchées (et découvertes) se situent entre 10 et 100 années-lumière de nous. Une fusée se déplaçant à une vitesse d'un centième de la vitesse de la lumière – ce qui est bien plus rapide que les vitesses atteintes par les sondes spatiales actuelles – mettra entre 1000 et 10 000 ans avant d'arriver sur la planète convoitée.

Cette estimation repose sur notre compréhension de la physique et de l'univers basée sur la relativité générale, impliquant l'existence d'une vitesse limite, celle de la lumière dans le vide. Il n'est pas exclu, bien que très improbable, que cette vision soit incomplète voire inexacte. La colonisation des étoiles par l'homme demanderait donc une reformulation profonde de notre conception actuelle de l'univers. *su*



A-t-on découvert des planètes dans l'un des 110 objets Messier ?

Aucune planète n'a été découverte dans les 110 objets Messiers. Une partie de ceux-ci sont des nébuleuses ou des galaxies autour desquels il n'est pas question de trouver des planètes. On commence toutefois à chercher des planètes autour d'étoiles faisant partie de certains amas ouverts ou globulaires, mais sans résultats pour l'instant. *pn*

Des astronomes auraient découvert, notamment dans Orion, des systèmes planétaires «sans centre». De quoi s'agit-il ?

Plusieurs groupes de chercheurs ont en effet annoncé la détection de planètes flottant librement dans l'espace. Toutes ces découvertes reposent sur le même type d'observations. Il s'agit, d'une part, d'images de très jeunes amas d'étoiles réalisées dans l'infrarouge. A partir de tels clichés, on obtient pour chaque source lumineuse une mesure de la brillance apparente ainsi que de la couleur. Dans le cas d'Orion, l'amas jeune s'appelle *sigma Orionis*. Les astronomes connaissent avec une bonne précision sa distance. Du coup, à partir de la brillance apparente, ils ont pu calculer la brillance absolue des différentes sources identifiées sur l'image.

D'autre part, il existe des modèles théoriques décrivant l'évolution des astres de faible masse, comme les planètes, par exemple. Ils permettent, en principe, d'en prédire, pour une masse et un âge donnés, la brillance absolue et la couleur.

Dans le cas d'amas d'étoiles jeunes, on connaît l'âge – il est de moins de 10 millions d'années pour *sigma Orionis*. La brillance absolue ainsi que la couleur, elles, sont obtenues à l'aide de clichés infrarouges. La seule inconnue est la masse qui est déduite en comparant les mesures avec les prédictions des modèles théoriques. C'est ainsi que ces chercheurs sont arrivés à la conclusion que certaines des sources mesurées avaient des masses si faibles qu'elles pouvaient être considérées comme des planètes.

Ces observations souffrent néanmoins d'un certain nombre de points faibles. D'abord, la détermination de la masse est réalisée à partir de modèles théoriques qui peuvent être imprécis, voire faux. Ensuite, on suppose que les sources mesurées font réellement partie des amas que l'on observe, ce qui n'est pas absolument sûr. Certaines d'entre elles se situent peut-être devant ou derrière l'amas. Du coup, si la distance attribuée à ces objets est fautive, leur brillance absolue l'est également. En fait, la masse d'un tel objet a récemment pu être déterminée directement via son mouvement orbital ce qui a permis de la comparer avec sa masse photométrique. Cette dernière s'est avérée deux fois plus faible que la masse dynamique. Il est donc fort possible qu'un certain nombre de ces «planètes» soient en fait des astres plus massifs, c'est-à-dire des naines brunes. Pour s'en sortir, les auteurs de ces études utilisent des arguments statistiques afin de démontrer qu'au moins une partie de ces sources peuvent être associées à des planètes «flottantes».

Si c'est le cas, ces planètes dérivent donc librement dans l'espace et ne sont pas rattachées à une étoile. On peut d'ailleurs se demander si ces objets méritent le nom de planète. L'Union astronomique internationale estime même que ces objets ne doivent pas être appelés ainsi, justement en raison du fait qu'ils n'orbitent pas autour d'un autre astre. Selon les experts qui se sont penchés sur la question, ils devraient plutôt être baptisées «sous-naines brunes».

Quoi qu'il en soit, les astronomes ont beaucoup de peine à s'imaginer comment ces astres ont pu se former. Ils avancent malgré tout deux scénarios possibles. Le premier, le plus vraisemblable, suppose que ces planètes se sont formées normalement autour d'une étoile avant d'en être éjectées, à cause d'un passage relativement proche d'une autre étoile de l'amas, par exemple. Le second admet que ces objets se sont formés là où ils se trouvent actuellement. Une hypothèse assez difficile à envisager car toutes les tentatives d'explication des processus de formation des planètes présupposent la présence d'un disque autour d'une étoile. Mais les astronomes n'excluent pas totalement une autre voie, ne serait-ce qu'en raison du fait qu'ils ne savent pas encore expliquer et comprendre complètement la formation de notre propre système solaire. *dn*

8 LES GALAXIES

Combien de galaxies peut-on voir à l'œil nu dans le ciel ?

Dans l'hémisphère nord, on ne peut voir qu'une seule galaxie à l'œil nu, la galaxie d'Andromède, juste perceptible comme une petite tache floue et allongée. Il s'agit d'une grande galaxie spirale assez semblable à la nôtre, éloignée d'environ 2 millions d'années-lumière. Dans l'hémisphère sud, il y en a deux autres: le Grand Nuage et le Petit Nuage de Magellan. Ce sont des galaxies naines irrégulières (le Grand Nuage a tout de même une structure proche des spirales barrées), qui apparaissent à l'œil comme des morceaux de Voie Lactée. Elles sont distantes respectivement de 160 000 et 190 000 années-lumière, soit un peu plus que le diamètre de notre galaxie. *pn*

Pourquoi la Voie Lactée est-elle très plate alors que le Soleil, qui est aussi composé de gaz, est plutôt sphérique ?

Cela est dû principalement à la vitesse de rotation de ces deux entités. Tout corps céleste possède une vitesse d'évasion – c'est-à-dire la vitesse minimale qu'il faudrait à un objet pour échapper à son attraction gravitationnelle –, qui dépend de sa masse et de son rayon. Si la vitesse de rotation de l'astre est inférieure à sa vitesse d'évasion, le système adopte une forme proche d'un ellipsoïde de révolution (plus précisément un sphéroïde oblat), qui est intermédiaire entre la sphère et le disque plat. S'il tourne plus vite que sa vitesse d'évasion, il devient instable et se disloque.

La vitesse de rotation à l'équateur du Soleil vaut 1,7 km/s. Ce qui est beaucoup moins que la vitesse d'évasion qui est de 620 km/s environ. C'est pourquoi la forme du Soleil est très proche de la sphère. Pour la galaxie, en revanche, la vitesse d'évasion de 400 km/s est comparable à sa vitesse de rotation de 200 km/s, d'où sa forme de disque.

Il existe théoriquement d'autres formes d'équilibre possibles, comme les ellipsoïdes à trois axes différents, ou des formes de poires. Mais leur probabilité d'existence est faible. Cependant certaines galaxies elliptiques sont connues pour ressembler plutôt à des ellipsoïdes à trois axes et, si l'on en observe attentivement d'autres, elles se démarquent des ellipsoï-

des parfaits, adoptant plutôt des formes rappelant le losange ou le rectangle. La famille des ellipsoïdes n'a donc rien d'universel. *dp*

Quelle est la taille des Nuages de Magellan ?

Les Nuages de Magellan ont une dimension angulaire de l'ordre de 600 minutes d'arc pour le Grand et de 250 minutes d'arc pour le Petit. En connaissant la distance de ces objets et à l'aide d'un peu de trigonométrie, on peut en déduire la dimension linéaire, c'est-à-dire sa taille réelle. Le Grand Nuage est distant de 179 000 années-lumière (la lumière qu'il émet met 179 000 ans pour nous parvenir) et son diamètre en mesure en moyenne 30 000. Le Petit, éloigné de 210 années-lumière, n'en mesure que 20 000 de long, sur 11 000 de large. A titre de comparaison, notre galaxie mesure environ 100 000 années-lumière de diamètre. *dg*

Quelle est la galaxie la plus proche de la nôtre ?

Si l'on considère les galaxies de taille comparable à la Voie Lactée, la plus proche est Andromède, située à environ 2,36 millions d'années-lumière. Cependant, il existe également une multitude de galaxies plus petites, appelées galaxies naines, dont la plus proche connue est la naine sphéroïdale du Sagittaire, située à 50 000 années-lumière du centre de notre galaxie, soit seulement deux fois la distance qui sépare le Soleil de ce même centre. Cette galaxie est en fait en train de se faire engloutir par la Voie Lactée. Elle n'a été découverte qu'en 1994, car elle se trouve à l'opposé du Soleil par rapport au centre galactique. Elle est donc masquée par les régions denses de la Voie Lactée.

Les Grand et Petit Nuages de Magellan, situés à environ 160 000 et 190 000 années-lumière, constituent d'autres exemples de telles galaxies satellites. *rf*

La Voie Lactée est-elle un satellite d'une autre galaxie ?

Notre galaxie fait partie d'un groupe d'une trentaine d'autres, appelé l'Amas Local, dont fait également partie Andromède (M31) et la galaxie du Triangle (M33). Elles sont toutes en interaction gravitationnelle les unes avec les autres, mais on ne peut pas encore parler de rotation. L'Amas Local est trop jeune (son âge est d'environ 12 milliards d'années) pour que plusieurs révolutions aient déjà pu avoir lieu. *dp*

Comment classe-t-on les galaxies ?

La classification des galaxies, dite de Hubble du nom de son inventeur, se base essentiellement sur leur aspect visuel. Très schématiquement, on rencontre quatre sortes de galaxies: les galaxies elliptiques (E), qui ont

une forme d'ellipse; les galaxies spirales normales (S), qui présentent des bras spiraux; les galaxies spirales barrées (SB), dont les bras spiraux ne semblent pas partir du centre de la galaxie comme dans le cas d'une spirale normale, mais sont reliés par une sorte de barre; et les galaxies lenticulaires (So) qui représentent une transition entre les elliptiques et les spirales.

Les galaxies elliptiques se subdivisent encore en sous-catégories, selon leur «aplatissement», s'échelonnant de E0 (presque ronde) à E7 (très aplatie). Idem pour les galaxies spirales, barrées ou non, qui se distinguent par le degré d'enroulement de leurs bras. Sa ou SBa désignent celles dont les bras sont très enroulés sur eux-mêmes, Sb ou SBb les intermédiaires et Sc ou SBc celles dont les bras sont peu enroulés. *dg*

Que sont l'Amas Local et l'Amas de la Vierge ?

L'Amas Local est un groupe de galaxies dont les membres les plus importants sont notre propre Voie Lactée et la galaxie d'Andromède – aussi appelée M 31, la seule galaxie visible à l'œil nu dans l'hémisphère nord. Viennent ensuite, par ordre de taille et de masse décroissantes, la galaxie spirale du Triangle (M33) et le Grand Nuage de Magellan, qui est une galaxie satellite de la nôtre. Les autres membres de l'Amas Local sont des petites galaxies elliptiques ou irrégulières, ainsi que des galaxies naines sphéroïdales. La taille de l'Amas Local est d'environ 3 millions d'années-lumière, c'est-à-dire 30 fois le diamètre de la Voie Lactée.

L'Amas de la Vierge est l'amas de galaxies le plus proche de nous. Il est distant de 50-60 millions d'années-lumière et couvre une surface de 120 degrés carrés sur le ciel. Il contient plusieurs milliers de galaxies dont la plus massive est M87, une elliptique géante. La forme de l'amas est irrégulière et ne présente pas de concentration centrale. En revanche, il représente lui-même le centre du Super Amas Local, qui contient également l'Amas Local et dont le diamètre dépasse les 100 millions d'années-lumière.

Ces deux descriptions illustrent le fait que l'univers n'est pas rempli uniformément de galaxies mais qu'il est structuré à différentes échelles. Les galaxies sont groupées par amas, qui sont eux-mêmes regroupés en superamas. A une échelle encore plus grande, la distribution des galaxies continue de suivre une structure particulière. Elle forme un réseau de filaments entourant de grandes régions d'espace relativement vide. *dr*

Beaucoup de galaxies s'appellent NGC suivi d'un chiffre.

Que signifient ces trois lettres ?

NGC signifie *New General Catalog*. Il s'agit d'un catalogue qui, contrairement à ce que son nom indique, date du XIX^e siècle. Il a été dressé par l'astronome dano-irlandais John Louis Emil Dreyer en 1888, et regroupe

quelque 7840 objets dont une grande majorité sont des galaxies. Cette liste comporte toutefois un certain nombre d'erreurs. Une nouvelle version a donc été réalisée, portant le nom de *Revised New General Catalog* (RNGC). *dg*

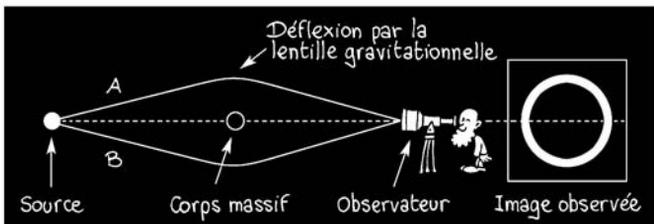


Les quasars représentent-ils la fin de l'évolution des galaxies ?

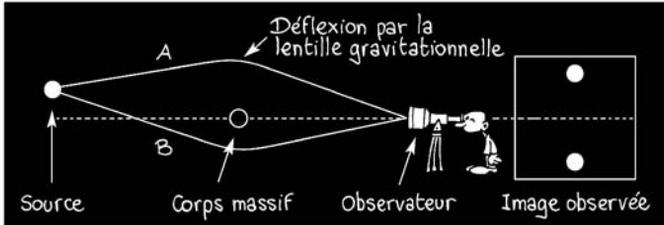
Non, un quasar est noyau actif de galaxie, c'est-à-dire un cœur de galaxie particulièrement lumineux et dont la luminosité varie rapidement au cours du temps. Il y a plus de quasars à grande distance que localement, ce qui suggère que les quasars étaient plus nombreux dans le passé de l'univers. Ils sont donc plutôt associés au début de l'évolution des galaxies qu'à leur fin. *mt*

Comment est-ce possible que les lentilles gravitationnelles permettent de voir certaines galaxies plusieurs fois dans le ciel ?

Lorsqu'un faisceau lumineux passe à proximité d'un corps massif, comme une galaxie ou un amas de galaxies, il est dévié. La déflexion du faisceau lumineux est à l'origine du phénomène qu'on appelle lentille gravitationnelle. Le résultat optique d'une telle lentille gravitationnelle peut être très différent selon la géométrie de la situation. Si la source lumineuse ponctuelle (un quasar très lointain, par exemple), le corps massif (un amas de galaxies que l'on imagine sphérique) et l'observateur (un terrien, disons) sont parfaitement alignés, c'est-à-dire dans une configuration de symétrie axiale, alors on observe dans le télescope un anneau, appelé l'anneau d'Einstein. En effet, les chemins optiques possibles menant du quasar à la Terre peuvent passer par tous les côtés du corps massif.



Si la source ponctuelle se situe hors de cet axe, alors le nombre de chemins optiques possibles diminue drastiquement. En supposant que le quasar est décalé vers le haut (pour simplifier) par rapport au corps massif, alors il n'apparaîtra plus dans le télescope que deux sources ponctuelles distinctes et alignées verticalement. Les seuls rayons capables de relier le quasar à la Terre passent en dessus et en dessous de l'amas de galaxie central. Il n'existe pas d'autre possibilité.



D'une manière générale, c'est l'absence de symétrie axiale qui crée des images multiples d'une même source. Des situations plus compliquées, avec des corps massifs particulièrement étendus servant de lentille, peuvent produire un nombre plus grand d'images. La Croix d'Einstein, dans laquelle on voit quatre fois le quasar QSO 2237+0305, en est un exemple connu. Par ailleurs, lorsque les objets qui subissent l'effet d'une lentille gravitationnelle sont eux-mêmes étendus, comme une galaxie, ils peuvent apparaître fortement déformés et prendre l'aspect d'arcs. Seul un calcul très compliqué est à même de prédire le nombre d'images et leur éclat dans une configuration donnée. *sp*



Qu'est-ce que l'objet de Minkowski ?

L'objet de Minkowski se trouve près du centre de l'amas de galaxies Abell 194, tout proche de la galaxie elliptique NGC 541. Il est enfoui dans un pont de matière lumineuse reliant cette dernière galaxie à NGC 545/547. Depuis un article publié par van Breugel, Filippenko, Heckman et Miley en 1985, on considère que l'objet de Minkowski est une galaxie irrégulière

subissant une flambée de formation stellaire. L'interaction entre un jet de particules émis à très grande vitesse par NGC 541 et le gaz présent dans l'objet de Minkowski serait à l'origine de cette intense formation stellaire. *dr*

Qu'est-ce exactement qu'une nébuleuse à absorption ou obscure ?

Une nébuleuse est un nuage de gaz et de poussières interstellaires. On rencontre trois types de nébuleuses: les nébuleuses diffuses, les nébuleuses obscures et les nébuleuses planétaires. Ces dernières, contrairement aux deux autres, sont associées au stade final de l'évolution stellaire. Ce sont des enveloppes gazeuses sphériques éjectées par les étoiles en fin de vie qui se diluent progressivement dans l'espace.

Les nébuleuses diffuses sont souvent l'endroit où se forment les étoiles. Certaines des jeunes étoiles qui y naissent sont souvent très massives et si chaudes que leurs radiations de haute énergie peuvent exciter le gaz de la nébuleuse (principalement l'hydrogène) et le faire briller. Une telle nébuleuse est dite en émission, comme la nébuleuse d'Orion. Si les étoiles ne sont pas suffisamment chaudes, leur lumière est réfléchiée par la poussière et peut être vue sous la forme d'une nébuleuse en réflexion de couleur blanche ou bleutée, comme autour des étoiles de l'amas des Pléiades.

Les nébuleuses obscures, quant à elles, n'émettent pas de lumière. L'un des exemples les plus connus est celle de la Tête de Cheval dans la constellation d'Orion. Ce type de nébuleuse, composée de poussières ou de gaz froid, n'est visible que par le fait qu'elles absorbent la lumière des astres situés en arrière-plan et se détachent ainsi comme des ombres chinoises sur le ciel. Les poussières qui la composent ont un diamètre moyen de 1 micromètre (un millième de millimètre) et leur concentration est 100 fois plus importante dans les nébuleuses obscures que dans le reste du milieu interstellaire, même si elle ne dépasse qu'à peine le milliardième de gramme par km^3 . *fr*

Il paraît qu'un satellite pourrait traverser la nébuleuse de l'Aigle (M16) sans s'en rendre compte, tellement sa densité est faible. Quelle est alors la différence de densité entre ce nuage et le reste de l'espace ?

Le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume à l'intérieur des nébuleuses obscures ou nuages moléculaires comme la nébuleuse de l'Aigle (M16) peut facilement être 10 000 ou 100 000 fois supérieur à celui du gaz très dilué baignant la galaxie (un atome d'hydrogène par cm^3). Le contraste de densité est donc comparable à celui existant entre l'air (1 kg/m^3) et le plomb ($11\,000 \text{ kg/m}^3$). Toutefois, 10 000 molécules par cm^3 , la densité de M16, représentent toujours un gaz encore bien plus raréfié que les meilleurs vides que l'on parvient à produire en laboratoire et qui

descendent à seulement 10 millions de molécules par cm^3 . Malgré le vide extraordinaire du milieu interstellaire, ces rares atomes mêlés à des poussières de suies accumulées le long de la ligne de vue sur les distances astronomiques finissent par rendre certaines directions du ciel comme M16 complètement opaques. *dp*

9 L'UNIVERS

Quelle est la taille de l'univers ?

On ne connaît pas la taille de l'univers. En revanche, on sait que les objets les plus éloignés que l'on connaisse sont à une distance de plusieurs milliards d'années-lumière. En fait, l'univers peut être encore bien plus grand que cela et peut-être même infini. *sp*

Quelle est la structure de l'univers ?

L'univers observable nous apparaît homogène et isotrope lorsque qu'on le regarde à très grande échelle, de l'ordre du milliard d'années-lumière. Isotrope signifie qu'il est identique quelle que soit la direction dans laquelle on regarde; et homogène que les conditions physiques sont identiques en tout point de l'univers. Aux échelles inférieures à la centaine de millions d'années-lumière, l'univers est en revanche très structuré, donc très inhomogène, avec la présence de grands groupes denses de galaxies, appelés «amas de galaxies», séparés par de grandes zones où elles sont très peu abondantes. *sp*

De quoi est formé l'univers ?

En nombre de particules, l'univers est dominé par les photons, c'est-à-dire les grains de lumière, et les neutrinos, qui sont des particules extrêmement ténues formées en très grand nombre dans les étoiles. En termes de masse, en revanche, la quasi-totalité des objets visibles dans le ciel sont composés de protons et de neutrons. C'est ce que l'on appelle la matière baryonique. Elle compose l'essentiel de la Terre, par exemple les électrons, qui sont présents en nombre comparable, ont une masse beaucoup plus faible.

Cependant, en étudiant l'univers très lointain, les astronomes se sont rendus compte, par des mesures indirectes, qu'il existe une très grande quantité de matière qui nous est invisible car elle ne participe pas à la formation des étoiles. Cette matière sombre possède une masse totale plusieurs fois supérieure à celle des baryons. On ne connaît pas sa composition, mais on suppose qu'elle pourrait être formée de particules prédites

par certaines théories de physique, mais qui n'ont encore jamais été observées sur Terre.

En outre, il est possible qu'une quantité d'énergie plus grande encore soit présente dans l'univers sous la forme d'«énergie sombre». Plusieurs modèles s'affrontent pour en expliquer l'existence, dont la fameuse «constante cosmologique» d'Einstein.

En résumé, on pense aujourd'hui que les particules qui constituent les étoiles et les planètes ne représentent que 3 à 4% de l'énergie totale contenue dans notre univers. Entre 25 et 30% de cette énergie existerait sous forme de particules encore inconnues, et environ 70% sous forme d'énergie sombre. *sp*

Le nombre d'atomes composant l'univers est-il fini et quantifiable ? Est-ce que ce nombre varie en fonction du temps ?

On ne peut pour l'instant qu'estimer le nombre d'atomes existant dans l'univers observable. Dans ce dernier, on compte approximativement 100 milliards (10^{11}) de galaxies rassemblant chacune environ la masse de 200 milliards ($2 \cdot 10^{11}$) d'étoiles pesant en moyenne $2 \cdot 10^{30}$ kg. Comme chaque kilogramme de matière contient environ $5 \cdot 10^{26}$ atomes, alors le nombre total d'atomes dans l'univers observable vaut le produit de tous ces grands nombres, soit $2 \cdot 10^{79}$. Ce nombre dépend du temps car le rayon de l'univers observable grandit à la vitesse de la lumière, alors que la vitesse d'expansion de l'univers en entier, qui varie d'un modèle théorique à l'autre, est moins grande. *dp*

Qu'est-ce qu'on entend par «le vide» ? L'univers est-il entouré par du vide ?

La notion classique de vide est à distinguer de celle, philosophique, de néant, qui est une absence totale de quoique ce soit. En science, on entend par vide l'absence de matière uniquement. Cette dernière se définit par des particules élémentaires qui peuvent, suivant les circonstances, être plus ou moins bien localisées dans l'espace. Mais l'espace est aussi un objet physique, puisqu'il est mesurable. Il est partiellement occupé par la matière et partiellement par le vide qui est l'espace qui reste. Ni le vide ni l'espace ne sont assimilables au néant.

En fait, le vide des scientifiques est «plein», non seulement d'espace, mais aussi de champs de forces variés, comme ceux de la gravitation, de l'électromagnétisme ou des forces nucléaires. Depuis longtemps, les scientifiques essaient d'unifier ces champs de forces en une seule théorie. Pour l'instant personne n'y est parvenu. Les chercheurs n'ont trouvé que des simplifications partielles et ils restent donc avec les concepts élémentaires et indissociables que sont les champs de forces, les particules et l'espace.

Quant à savoir si de l'espace peut exister en dehors de l'univers, c'est une question à laquelle on ne peut pas répondre, car elle contredit la définition de l'univers. Ce dernier est non seulement toute la matière, mais aussi tout l'espace la contenant ainsi que tous ses champs de forces. *dp*

Pourquoi les astres tournent-ils sur eux-mêmes, les planètes autour du Soleil, la galaxie sur elle-même ?

Ceci pose le problème fondamental de l'origine de la rotation. A première vue, si l'univers initial n'a pas de rotation propre et que chaque morceau de l'univers est purement en expansion, sans rotation locale, il n'y a aucune raison que des astres tournants se forment. En réalité, à un certain moment au cours de l'expansion de l'univers, l'instabilité gravitationnelle s'est déclenchée. La gravité est devenue plus forte que la pression thermique (qui tend à homogénéiser). Résultat: la tendance à l'écroulement sur soi-même a dominé. Les petites fluctuations initiales de densité de matière ont ensuite été très fortement amplifiées au cours du temps, donnant finalement naissance à tous les astres et structures que nous connaissons.

Il en va de même des petites fluctuations de rotation. Des «tourbillons» de toutes tailles se forment et s'amplifient spontanément, un peu comme les tourbillons dans une rivière. La quantité totale de rotation reste très petite, mais quasiment tous les astres tournent. On peut dire que pour chaque astre tournant dans un sens, il en existe un autre qui tourne dans le sens opposé, de sorte que la rotation totale s'annule. *dp*

Que sait-on de la topologie de l'univers ?

La relativité générale décrit les propriétés locales de l'univers. Elle est donc insensible à sa topologie, qui est une propriété globale, et ne peut donc pas apporter d'éléments de réponse à ce sujet. Il n'en reste pas moins que chaque modèle d'univers a besoin d'une topologie. Pour l'instant, rien ne permet d'affirmer que la situation la plus simple n'est pas suffisante. Aussi, on part généralement du principe que notre univers est partout homogène et isotrope et sans trous, ni aucune autre sorte de complexité. On ne peut toutefois pas non plus exclure d'autres topologies.

C'est pourquoi des physiciens ont commencé à étudier des situations beaucoup plus compliquées et tenté de déterminer les phénomènes que l'on devrait observer si elles correspondaient à la réalité. Ainsi, les mesures récentes du rayonnement cosmologique par le satellite américain *W-MAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) contiennent peut-être la signature d'un univers constitué de sortes de polyèdres réguliers couvrant l'espace-temps, mais cela n'est pas encore très clair. Une signature indubitable d'une topologie compliquée serait, par exemple, la détection d'un même

objet astrophysique dans plusieurs directions différentes (et éloignées les unes des autres) du ciel. *sp*

L'univers est-il plan ?

On ne sait toujours pas si l'univers est courbé ou plan (euclidien). Cependant, s'il est courbé, il ne l'est que très peu. Les meilleures mesures actuelles réalisées par le satellite américain *W-MAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) sont en effet très proches de ce qui est attendu pour un univers euclidien, sans toutefois pouvoir exclure une éventuelle courbure. Une réponse définitive à cette question devrait être fournie bientôt grâce aux satellites *W-MAP* et *Planck* (qui devrait être lancé par l'Agence spatiale européenne début 2007) dont les mesures vont grandement améliorer l'estimation de cette courbure. *sp*

Peut-il exister une courbure de l'espace ou de l'espace-temps qui soit indépendante de celle de la relativité générale d'Einstein ?

On peut toujours imaginer ce genre de choses. La théorie de la relativité générale stipule qu'il existe une relation stricte entre la courbure de l'espace-temps et la présence d'énergie. Par conséquent, il n'y a pas de moyen de courber l'espace-temps sans énergie. Toutefois, la «constante cosmologique» introduite dans la théorie représente en quelque sorte une courbure «naturelle» de l'espace-temps. A l'origine, cette constante, qu'on a également baptisée «énergie du vide», n'existait pas. Elle a été rajoutée par Einstein par la suite. Quoi qu'il en soit, à l'heure actuelle, il n'existe aucune raison de penser que la théorie de la relativité générale est insuffisante ou incomplète. *sp*

Est-il vrai qu'au temps zéro il y avait une très grande boule de feu et une très grande énergie ?

L'idée de la boule de feu peut se comprendre intuitivement en inversant l'expansion par la pensée: les galaxies se rapprochent et se dissolvent en gaz, tout comme les étoiles qui les constituent. On obtient alors un plasma (un gaz ionisé) de plus en plus chaud. A mesure que l'on s'approche du fameux «temps zéro», la température de ce plasma tend vers l'infini de manière asymptotique. Ce «temps zéro» constitue ce qu'on appelle une singularité. Elle est concevable mathématiquement, mais guère physiquement. On ignore donc ce qui s'est passé en ce point-là – si tant est qu'il ait existé.

Il n'en reste pas moins que l'image de la boule de feu est trompeuse car il ne faut pas oublier que tout est compris dedans, y compris l'espace. Le scénario du big bang, ce n'est pas de la matière qui se disperse dans

un espace préexistant, comme lors d'une explosion, mais c'est l'espace lui-même qui se dilate avec comme conséquence l'élongation de la longueur d'onde de la lumière qui s'y propage. *pn*

Est-ce que la théorie du big bang est vraie ?

La théorie du big bang n'est pas nécessairement vraie au sens absolu, mais elle est pour l'instant celle qui explique le mieux les observations. Elle est appuyée essentiellement par trois observations: le décalage vers le rouge du rayonnement des galaxies (loi de Hubble), les abondances primordiales des éléments légers (hydrogène et son isotope lourd le deutérium, l'hélium et son isotope léger ^3He , le lithium) et le rayonnement radio et millimétrique correspondant à une température de 2,7 degrés Kelvin (le rayonnement cosmologique).

Une quatrième observation est venue récemment appuyer la vraisemblance du scénario du big bang: on a pu mesurer la température du rayonnement cosmologique dans des galaxies lointaines (témoins d'une époque précoce de l'univers) et prouver qu'il y est plus chaud qu'ici, comme le prévoit la théorie. *pn*

Pourquoi la nuit est-elle noire ? Le ciel ne devrait-il pas être tapissé de toutes les étoiles qui le composent et offrir un fond lumineux comme en plein jour ?

Il s'agit là du fameux paradoxe de Cheseaux-Olbers. Le noir de la nuit est précisément un argument en faveur du big bang. Et ce pour deux raisons. D'abord, plus on regarde loin dans l'espace, plus on regarde dans le passé. Il n'est donc pas possible de voir des étoiles jusqu'à l'infini. A partir d'un certain point, nous observons des contrées si éloignées qu'elles correspondent à une époque où les étoiles n'existaient pas encore. Ensuite, le rayonnement qui vient de très loin, même s'il a été émis à l'origine par des phénomènes très lumineux, a perdu une partie considérable de son énergie initiale en chemin. Il est décalé vers le rouge, c'est-à-dire qu'au lieu d'être dans la partie visible du spectre, il nous apparaît dans la zone infrarouge. Pour que la nuit soit lumineuse, il aurait fallu que l'univers ait été statique et éternel (y compris dans le passé), et que la durée de vie des étoiles ait été beaucoup plus longue. Elles auraient ainsi pu saturer l'espace de leur rayonnement. *pn*

Pourquoi ne sait-on pas exactement en quelle année s'est produit le big bang ?

Dans toutes les sciences, on mesure des quantités. Et toute mesure est entachée d'incertitudes. Par exemple on peut mesurer la longueur d'un

jour. Ainsi, le temps qu'il faut pour que la Terre fasse un tour sur elle-même est d'environ 86 400 secondes avec des variations quotidiennes typiques de 0,001 seconde. Dans ce cas, les horloges atomiques permettent d'atteindre une précision largement supérieure aux fluctuations naturelles. Elles arrivent en fait à mesurer des phénomènes avec une précision de plus de 0,000 000 000 000 1% sur des durées de quelques semaines.

Si ce type de mesure est très précis, d'autres le sont beaucoup moins. En astronomie, il est courant de calculer des distances avec une précision de seulement 30%. Il arrive souvent, par exemple, que l'on parle de galaxies éloignées de 200 à 300 millions d'années-lumière. Pour en venir au big bang, mesurer son âge n'est pas une mince affaire. A l'époque, il n'existait aucune horloge ou autre objet qui puisse nous aider aujourd'hui. La seule manière pour y parvenir est d'imaginer des modèles s'approchant au mieux des observations astronomiques. Actuellement, on admet que l'âge du big bang se situe dans une fourchette de 13 à 14 milliards d'années. Pour connaître l'année de naissance du big bang, il faudrait développer un moyen de mesure près d'un milliard de fois plus précis. La science a encore bien du travail devant elle. *dp*



Une galaxie située à 10 milliards d'années-lumière apparaît comme elle était il y a 10 milliards d'années. Mais, à cette époque, elle était beaucoup plus proche de la Terre. Pourquoi n'a-t-on pas reçu sa lumière avant?

Pour comprendre pourquoi il a fallu 10 milliards d'années pour que la lumière arrive d'une galaxie qui était initialement très proche de nous, il faut inclure dans la question la «vitesse» initiale des objets. Cette dernière était à l'époque proche de celle de la lumière. Résultat: un signal lumineux qui nous parvient d'une galaxie doit non seulement parcourir la distance qui la sépare de nous, mais aussi rattraper sa cible, c'est-à-dire nous, qui se meut à peine moins rapidement en raison de l'expansion de l'univers. Le chemin finalement parcouru est ainsi bien plus long que la distance géométrique initiale. *dp*

Si l'âge de l'univers est d'environ 15 milliards d'années, comment peut-on observer des étoiles situées à plus de 15 milliards d'années-lumière ?

Si l'âge de l'univers est d'environ 15 milliards d'années, alors on ne peut pas observer d'étoiles situées à plus de 15 milliards d'années-lumière. Observer une étoile ou une galaxie, c'est recevoir la lumière qu'elle a émise. Si une étoile est à un million d'années-lumière, cela signifie que la lumière met un million d'années à nous parvenir. Son image n'apparaîtra dans notre ciel qu'un million d'années après qu'elle est née, le temps pour sa lumière de nous parvenir. Par conséquent, on ne peut observer aucune étoile ou galaxie plus lointaine en années-lumière que le temps écoulé depuis le big bang : même la première lumière qu'elle a émise ne nous est pas encore parvenue. Elle a beau exister depuis longtemps là-bas, elle est encore invisible pour nous.

Il ne faut pas pour autant conclure que la taille de l'univers est de 15 milliards d'années-lumière environ. Cela correspond à la taille de l'univers observable, mais il y a probablement encore beaucoup de galaxies au-delà de cette limite. *fp*

Comment peut-on découvrir une galaxie située à une distance de 26 milliards d'années-lumière, alors que notre univers n'est âgé que de 15 milliards années?

Certaines observations astronomiques indiquent très clairement que depuis environ 15 milliards d'années, notre univers est en continuelle expansion. Au début, toutes les galaxies que nous pouvons observer aujourd'hui jusqu'à des distances presque inimaginables se trouvaient réunies dans un très petit volume. C'est cet instant que l'on nomme le big bang, qu'il ne faut pas comprendre comme une explosion, mais plutôt comme le début d'un gonflement de la trame même de l'univers. Les galaxies s'éloignent les unes des autres, non pas parce qu'elles se déplacent, mais parce que l'espace lui-même «enfle» au cours du temps.

Tout se passe comme si la Terre et cette lointaine galaxie étaient attachées à un ruban élastique qui ne cesse de s'étirer. La lumière qui nous parvient aujourd'hui a quitté la galaxie, il y a des milliards d'années, à une époque où toutes les distances étaient fortement réduites (comme sur un ruban relâché). Ensuite, pendant ce long voyage à la vitesse de la lumière, l'espace n'a cessé d'enfler et les distances d'augmenter (comme sur un ruban qui s'étire). La lumière de cette galaxie a donc parcouru une distance bien plus courte que les 26 milliards d'années-lumière actuels. *pd*

Est-il vrai que si l'on calcule l'âge de certaines étoiles à partir du taux de deutérium, il excède celui de l'univers obtenu avec la constante de Hubble? Est-ce que cela remet en cause la théorie du big bang?

Tout d'abord, il faut s'entendre sur ce qu'est «une remise en cause de la théorie du big bang». Le big bang est davantage une sorte de scénario qu'une théorie physique proprement dite, comme l'est la mécanique quantique ou la relativité générale. Ce scénario, ou ce modèle, est précisément une tentative de rendre compte des observations. A ce titre, il est fait pour être remis en cause, ou en tout cas mis au défi. La science est un processus d'apprentissage et tout modèle est appelé à évoluer et à s'adapter aux nouvelles connaissances. Si l'on s'aperçoit que le modèle est vraiment trop bancal, on le remplace par un autre, radicalement différent. Cela s'est notamment passé ainsi avec le modèle géocentrique de Ptolémée (qui pose la Terre au centre de l'univers). Celui-ci expliquait assez bien le mouvement apparent des planètes, mais a dû être remplacé par le modèle héliocentrique (avec le Soleil au centre) en raison de son caractère inutilement compliqué. Cela dit, le modèle du big bang reste le meilleur que nous possédions à l'heure actuelle pour décrire l'origine de l'univers. Et il n'a pratiquement pas de concurrent.

Le calcul de l'âge de l'univers et de ses constituants est très difficile à réaliser. L'expansion de l'univers est un fait incontesté. La constante de Hubble est néanmoins entachée d'une incertitude de 10 à 20%. Quant au deutérium, il ne peut servir à la datation des plus anciennes étoiles car il est détruit dans celles-ci. Cet élément a toutefois un grand intérêt cosmologique car il a été formé quelques minutes après le big bang et il est donc intéressant de comparer son abondance avec celle prédite par la théorie. Il est présent dans la matière interstellaire, mais la mesure de son abondance primordiale est très délicate.

Les plus anciennes étoiles peuvent toutefois être datées avec d'autres méthodes. Pour celles que l'on trouve dans le halo de notre galaxie, on peut mesurer les abondances d'uranium et de thorium. Pour celles qui sont contenues dans les amas globulaires plus lointains, on se sert du diagramme luminosité-couleur de l'amas dont elles font partie. On obtient des âges de l'ordre de 14 milliards d'années, mais, une fois de plus, avec des incertitudes de l'ordre de 20%. Avec de telles marges d'erreur, les affirmations selon lesquelles l'âge de l'univers déduit de la constante de Hubble serait plus petit que celui des étoiles n'ont aucun fondement sérieux. *pn*

Qu'y a-t-il au-delà de notre univers? Est-il possible qu'il existe des univers parallèles que nous pourrions un jour découvrir?

La question de ce que l'on trouve au-delà de notre univers n'a pas de sens. Elle démontre que l'intuition humaine n'est pas équipée pour appré-

hender ces phénomènes qui sont si éloignés de notre expérience quotidienne. Deux cas se présentent: soit l'univers est infini, alors il n'existe évidemment pas d'au-delà. Soit il est fini, alors il est replié sur lui-même. Dans cette situation, se demander ce qu'il y a «au-delà» de l'univers revient à se demander ce qu'il y a au-delà du pôle Nord.

Si les scientifiques se méfient de l'intuition, ils n'en laissent pas moins divaguer leur imagination. Certains d'entre eux postulent en effet l'existence d'un super univers qui compterait un nombre très important d'univers dont le nôtre. Mais, par définition, deux univers distincts ne peuvent pas interagir entre eux. Ce qui fait que ce genre de scénarios ne pourra jamais dépasser le stade de la spéculation.

D'autres théories suggèrent que ce que nous appelons «notre univers» ne soit qu'une toute petite région d'un univers plus grand comportant d'autres coins d'espace semblables au nôtre. Peut-être que, dans un tel cas, deux de ces régions pourraient interagir. Mais ces spéculations sont beaucoup trop éloignées des faits expérimentaux pour être considérées autrement que comme des divertissements. *sp*

Le point d'origine au moment de l'explosion du big bang avait une densité infinie. Comment a-t-il pu exploser puisque la gravité était elle aussi infinie ? Le big bang respecte-t-il la gravitation universelle ?

La prudence est de mise lorsqu'on évoque la théorie du big bang. Il faut bien distinguer ce qui est corroboré par les observations (l'expansion de l'univers, l'existence d'une phase extrêmement dense et chaude dans le passé de l'univers, etc.) de ce qui n'est encore que spéculatif. Méfions-nous aussi des mots employés, dont le choix a parfois été maladroit (à commencer par le terme même de big bang) et qui peuvent évoquer des images mentales très souvent inadéquates.

Ainsi, l'expansion actuelle et passée de l'univers suggère naturellement l'existence d'un «instant initial» lors duquel la densité de matière aurait été infinie. Il faut toutefois insister sur le fait que cette extrapolation au «temps zéro» n'est justifiée ni par l'observation, ni même théoriquement. En effet, aucune donnée d'observation accessible actuellement ne dépend de manière critique de l'existence d'un univers originel ultradense.

Le modèle du big bang est donc un scénario possible, en accord avec nos connaissances sur la gravitation puisqu'il se base sur la relativité générale, théorie qui décrit justement l'action de la gravitation. Cependant, contrairement à ce que son nom laisse entendre, il ne traite pas de l'origine de l'univers. En effet, dans des conditions d'extrêmes densité, comme celles qui auraient régné lors du big bang, la relativité générale devient inapplicable. A cette échelle, elle se révèle incompatible avec une autre théorie essentielle pour la compréhension de la nature, à savoir la physique quantique. Bien que les travaux théoriques spéculatifs cherchant

à comprendre le «début» du big bang abondent, on ne peut pas affirmer catégoriquement que l'univers a eu un commencement et encore moins un état de densité infinie. Il existe d'ailleurs d'autres hypothèses qui proposent par exemple un univers stationnaire qui aurait toujours existé et qui se serait brusquement mis à gonfler pour donner naissance à l'univers actuel. Et pourquoi pas?

Précisons encore que même si l'on utilise les lois de la relativité générale pour remonter dans le temps – en négligeant le fait qu'elles ne sont plus valables au-delà d'une certaine limite dans le passé –, on ne tombera pas sur une contradiction avec la gravitation universelle. Certes, au fur et à mesure que l'on s'approche de l'instant initial, la densité de matière ou d'énergie augmentera sans limites. Mais il faut aussi tenir compte du fait que, parallèlement, la vitesse d'éloignement mutuelle des particules augmente elle aussi. A tel point qu'à aucun moment, la force gravitationnelle n'est en mesure d'arrêter l'expansion.

En revanche, une telle configuration pourrait se produire dans le futur. En effet, la gravitation ralentit continuellement les galaxies et certains ont imaginé qu'elle puisse un jour arrêter l'expansion et provoquer une compression. L'univers pourrait alors finir par s'effondrer sur lui-même. Un tel scénario n'est cependant pas soutenu par les dernières observations qui semblent indiquer que l'expansion est trop rapide pour que la gravitation puisse jamais y mettre fin complètement. *mf*

On affirme que le big bang était une explosion d'une structure infiniment petite et que l'espace actuel est infini. Mais, même si on le rétrécit au minimum, l'infini restera toujours infini...

Effectivement, soit l'univers est de taille finie, soit il est infini, mais il ne peut pas passer d'une taille initiale finie à une taille infinie.

Dans l'hypothèse que la théorie de la relativité générale décrit correctement la naissance de l'univers et que celui-ci a une taille finie, alors sa taille initiale devait forcément être infiniment petite. D'autres lois de la physique, telles que celles de la physique quantique, auraient alors probablement modifié la structure de l'univers aux tout premiers instants et empêché l'apparition de ce qu'on appelle une singularité (une densité d'énergie infinie en un point).

En revanche, si l'univers est infini actuellement, alors il l'était dès sa naissance. Il présentait néanmoins une densité d'énergie gigantesque par rapport à celle qui règne aujourd'hui. C'est l'hypothèse d'un univers infini qui est privilégiée par les scientifiques. *sp*

Existe-t-il des recherches scientifiques sur ce qui se passe avant le temps de Planck ?

Il existe, bien entendu, des recherches sur les premiers instants de l'univers. Cependant, plus que n'importe quel autre domaine de la physique, elles sont extrêmement spéculatives. La raison est que nous ignorons les lois de la physique qui régnaient à cette époque.

A partir de quelques secondes après le big bang, la relativité générale semble très bien rendre compte de l'évolution de l'univers. D'ailleurs, s'il était entièrement régi par la relativité générale, le problème du «temps avant le big bang» n'existerait pas. En effet, le temps serait créé en même temps que le reste de l'espace. Il n'y aurait donc pas d'«avant le big bang» de la même manière qu'il n'y a pas d'«à côté du big bang». L'univers aurait donc un âge fini, et il existerait un temps précis de début de l'univers.

Cependant, la physique quantique voit son influence grandir au fur et à mesure qu'on se rapproche du big bang et il est en fait très peu probable que la théorie relativiste puisse s'appliquer aux tout premiers instants. Il existe beaucoup d'efforts pour fusionner ces deux théories en une seule, la gravitation quantique, mais celle-ci n'existe toujours pas. Cela n'empêche pas les cosmologistes de faire travailler leur imagination et de spéculer sur le passé.

Une de ces théories est celle de Stephen Hawking et James Hartle. L'idée est qu'à un moment donné, les quatre dimensions de l'espace-temps étaient toutes spatiales, contrairement à aujourd'hui où seulement trois le sont, la quatrième étant le temps. Dans cette configuration, le temps ne s'écoulerait pas. Or les objets quantiques ont la propriété de changer considérablement sans circonstances extérieures (comme dans le cas de l'effet tunnel). Ainsi, une de ces dimensions de type espace se serait transformée «graduellement» (c'est-à-dire en environ 10^{-43} seconde, le temps de Planck) en dimension de type temps, et donc le temps aurait commencé à s'écouler.

L'avantage de cette idée est que le temps apparaît dans un «flou quantique». Du coup, il est impossible de définir un commencement à l'univers – il n'y a pas de $t = 0$ – contrairement à l'explication relativiste. En revanche, cela signifie aussi que l'univers a vécu jusqu'à présent un temps fini, ce qui est aussi le cas dans l'explication relativiste.

Le défaut de cette théorie est que l'on ne sait pas du tout comment une dimension de type espace peut se transformer en une dimension de type temps. L'idée n'est toutefois pas si saugrenue que ça car, en relativité, la différence entre dimensions de type espace et temps est assez faible. *sp*

Les photons de très haute énergie, X et gamma, qui sont apparus lorsque l'univers était encore très chaud, n'interagissent pas avec la matière.

Peuvent-ils représenter une partie importante de l'énergie manquante?

L'univers est loin d'être transparent aux rayons gamma de haute et très haute énergie. Les photons très énergétiques interagissent en effet avec les particules chargées. Ils peuvent par exemple se transformer spontanément en paires d'électrons et d'anti-électrons (et même en d'autres particules plus exotiques si l'énergie du photon est suffisante) s'ils passent à proximité d'un proton. Ils sont donc rapidement absorbés par la matière dense. Il faut savoir que pour qu'il puisse émettre des photons gamma, l'univers devait avoir une température extrêmement élevée. Et à cette époque, sa densité était très loin du quasi-vide actuel. Dans ces conditions, les interactions entre protons et photons étaient très fréquentes. Il était donc impossible aux photons gamma de s'échapper. En revanche, on pense que d'autres particules, comme les neutrinos, ont pu effectivement s'échapper bien avant les photons. *sp*

Quelle serait la vitesse théorique de l'expansion de l'univers si la seule matière existante était la matière visible ?

On ne connaît pas cette valeur, car elle dépend des mécanismes physiques à l'origine du big bang – qui sont encore inconnus – et des conditions initiales de l'univers. *sp*

Comment a-t-on déduit de la quantité de matière observable que la vitesse actuelle de l'expansion de l'univers est trop faible ?

Ce que l'on a découvert, ce n'est pas que la vitesse d'expansion est trop faible, mais que la matière n'est pas suffisamment dense. Explications. On obtient une première estimation, très approximative, de la densité de l'univers en comptant le nombre d'étoiles et de galaxies. On peut également y parvenir en mesurant la dispersion de vitesse des galaxies. Leurs mouvements renseignent en effet sur la quantité de masse totale présente dans les amas qu'elles composent. On s'aperçoit alors que le résultat obtenu par la seconde technique excède la masse observable par un facteur trop important pour être seulement dû à des erreurs de mesure. Une partie de cette différence peut être expliquée par la présence de gaz intergalactique, mais cela reste largement insuffisant pour combler le fossé. C'est pourquoi a été émise l'hypothèse que les amas de galaxies renferment une certaine quantité de masse cachée.

En réalité, la différence entre la masse observable et celle que renferme réellement l'univers est encore plus importante que cela. En effet, l'analyse du rayonnement de fond cosmologique montre que l'univers est «plat» (ou quasiment plat), c'est-à-dire que sa courbure est nulle. Cela

implique que sa densité de masse (ou d'énergie) doit être identique à une «densité critique» que l'on peut calculer. Or la masse visible ne contribue à cette valeur que pour quelques pourcents. En additionnant toutes les formes de masse, on n'atteint qu'environ 30% de la densité critique. Comme l'univers semble être plat, ces 70% manquants doivent exister sous une forme encore plus étrange que l'on appelle «énergie noire». *sp*

L'expansion de l'univers est connue. Mais est-ce que les galaxies sont elles aussi en expansion ?

L'expansion de l'univers, découverte par l'astronome Hubble, est très bien décrite dans le cadre d'un modèle d'univers homogène. Dans la réalité cependant, l'univers est très loin d'être homogène si l'on regarde à un certain niveau de détails. Il faut dire qu'en sciences, un modèle est un peu comme un habit qui épouse la forme du corps sans jamais être identique au corps. En physique, il s'approche donc de la réalité sans jamais la décrire complètement. En fait, on lui demande de ressembler juste ce qu'il faut à la partie de la réalité que l'on désire décrire.

Ainsi le modèle homogène d'univers en expansion décrit seulement le comportement de l'univers dans ses grandes lignes. Il est en revanche parfaitement silencieux en ce qui concerne la formation des galaxies. Donc la question devient: Quel est ce niveau au-dessous duquel l'expansion uniforme n'est plus respectée, et pourquoi?

Selon l'explication standard, si des «fluctuations primordiales» minimes de la densité de la matière apparaissent dans les débuts de l'univers, alors ces contrastes de densité croissent au cours du temps. Ils le font selon une loi calculable facilement pour des fluctuations de petite amplitude, mais très difficilement, même par ordinateur, quand les amplitudes des fluctuations deviennent grandes. Ces fluctuations ont d'abord une étendue spatiale modeste puis, au cours de l'expansion, elles grandissent. Actuellement, les plus grandes structures ainsi formées font plusieurs centaines de millions d'années-lumière. Elles sont elles-mêmes constituées des structures plus petites et plus denses telles que les amas de galaxies et les galaxies. En résumé, l'univers à petite échelle est hiérarchisé, donc très différent du modèle d'univers à grande échelle.

Les galaxies, elles, sont des systèmes liés par la gravitation, comme une roche est un système lié par des forces moléculaires. A priori il n'y a pas de raison que l'expansion universelle agisse à leur niveau, car la force dominante en jeu les déconnecte des autres parties de l'univers. Pourtant on peut toujours douter et essayer de mesurer si les objets comme les galaxies ou le système solaire obéissent malgré tout à la loi de Hubble.

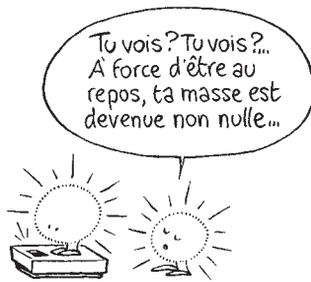
Quoi qu'il en soit, cette expansion serait de toute façon minime. La constante de Hubble est de l'ordre de 60 km/(s-mégaparsec). Elle exprime

d'abord un taux d'accélération: Pour chaque mégaparsec supplémentaire (ou 3,26 millions d'années-lumière), la vitesse d'éloignement des galaxies croît de 60 km/s. Cette valeur représente toutefois aussi un taux d'expansion. En d'autres termes, en transformant les mégaparsecs en kilomètres et les secondes en années, cette constante indique que les objets pour lesquels la loi de Hubble s'applique croissent de 0,06 milliardième de leur taille par année.

Des mesures très précises ont été réalisées au niveau du laboratoire, de la Terre, de la distance Terre-Lune et du système solaire. A ma connaissance, aussi finement que l'on ait pu mesurer, il n'y a pas d'évidence pour une expansion systématique de type cosmologique dans les systèmes plus petits que les amas de galaxies. *dp*

Des scientifiques pensent que les neutrinos possèdent une masse au repos non nulle. Ces particules contribuent-elles à la masse de l'univers et pourraient-elles provoquer sa contraction?

Pour l'instant, les scientifiques ne connaissent que certaines indications concernant la différence de masse entre des neutrinos de type distinct. Il s'agit d'une différence de masse très petite, ce qui suggère que la masse des neutrinos est elle aussi extrêmement faible. Trop petite en tout cas par rapport à la masse qu'ils devraient avoir théoriquement pour produire un univers fermé, dont l'évolution se terminerait par un *big crunch* final. *am*



Au sujet de l'expansion de l'univers, on parle toujours de la dilatation des dimensions spatiales. Le temps n'est-il pas affecté? Cela a-t-il un sens de parler des «premières» secondes du big bang?

Le temps n'est pas affecté par l'expansion. Cette dernière n'affecte que les dimensions spatiales. Dans la théorie de la relativité générale, cet aspect apparaît dans la métrique de Robertson-Walker, qui représente un espace-temps homogène et isotrope en bon accord avec les observations cosmologiques. En fait, une expansion du temps est un phénomène qui ne peut pas avoir lieu, ou alors seulement d'une manière indécidable. Si le temps

se mettait soudainement à s'écouler deux fois plus lentement dans tout l'univers, aucune expérience de physique ne nous permettrait de mettre ce phénomène en évidence. Il nous faudra deux fois plus de temps pour aller au travail, mais nos montres avanceraient elles aussi deux fois moins vite, tout comme l'influx nerveux ou le rythme cardiaque. En définitive, chacun continuerait simplement à mesurer le même temps que d'habitude.

En d'autres termes, cela signifie qu'il nous est impossible de mesurer de façon absolue la vitesse d'écoulement du temps. C'est pour cette raison que l'on introduit dans la théorie de la relativité restreinte le concept de «temps propre». Chaque créature, objet ou particule possède son temps propre dont il est impossible de savoir à quelle vitesse il s'écoule. La seule chose que l'on peut faire, c'est comparer l'écoulement de deux temps propres différents. On arrive à la fameuse histoire des jumeaux. Si le premier embarque sur une fusée qui se déplace à 86% de la vitesse de la lumière, alors son temps propre s'écoule deux fois plus lentement que celui du second, sans qu'il ne ressente le moindre ralentissement.

Ainsi, s'il avait existé un chronomètre pour mesurer le temps à la naissance du big bang, sa trotteuse aurait avancé d'une seconde au bout de ce que les physiciens appellent la première seconde de l'univers. *sp*

Des chercheurs proposent l'existence d'univers parallèles imbriqués les uns dans les autres afin d'expliquer des phénomènes encore inexplicables, comme la masse manquante de l'univers. Que faut-il en penser ?

Le modèle standard de la cosmologie, le big bang, ne répond pas à toutes les questions que se posent les astrophysiciens. Aussi, un certain nombre de chercheurs explorent d'autres modèles de cosmologie. Ceci est tout à fait normal et même souhaitable puisque de grandes découvertes ont été réalisées de cette manière – la relativité générale en est un bon exemple. Mais la plupart de ces théories ne sont pas acceptées par la communauté scientifique même lorsqu'elles sont séduisantes et qu'elles permettent d'expliquer certains phénomènes difficiles à comprendre.

Les théories «alternatives» se comptent par dizaines. En choisir une parmi d'autres nécessite, autant que possible, d'utiliser des critères objectifs. Le premier d'entre eux est qu'une nouvelle théorie doit pouvoir expliquer un phénomène qui défie les connaissances scientifiques du moment. Mais elle doit, en même temps, reproduire avec la même justesse toutes les autres observations que la théorie classique est déjà parvenu à expliquer. C'est souvent sur ce point que les théories alternatives montrent des faiblesses et peinent à convaincre la communauté scientifique.

Un autre critère est l'économie de nouveaux concepts. Si on en invente à chaque nouveau problème, on n'explique en définitive rien du tout. D'ailleurs, un nouveau concept ne sera bien accueilli par la communauté scientifique que s'il permet une avancée considérable.

Il faut par ailleurs que la théorie alternative soit capable de prédire un phénomène encore inconnu, qui puisse être testé. C'est ce que l'on appelle la «falsifiabilité». En d'autres termes, une bonne théorie fournit à ses opposants les armes pour la démolir. Mais si elle survit aux assauts des chercheurs, elle n'en deviendra que plus forte. Par exemple, l'existence du rayonnement cosmologique a été prédite par la théorie du big bang bien des années avant sa découverte.

En réalité, l'acceptation ou non d'une théorie sera jugée par la communauté scientifique non seulement sur ces critères objectifs, mais aussi sur des considérations sociales et humaines. Il lui arrive d'ailleurs de se tromper et de prendre du temps avant d'adopter une théorie révolutionnaire qui deviendra par la suite le modèle standard. *sp*

Peut-on envisager que notre univers fasse partie d'une structure moléculaire d'un objet (un caillou, par exemple), lui-même étant posé sur une planète appartenant à un autre univers et ainsi de suite ?

Tout est possible si c'est invérifiable. Cela dit, une théorie simple pour expliquer le monde observable doit toujours être préférée à une théorie plus compliquée. Cette préférence de la simplicité est connue sous le nom de Rasoir d'Occam (ou Ockham), du nom du moine franciscain et philosophe Guillaume d'Ockham, à qui l'on attribue ce principe énoncé au XV^e siècle: «Les choses essentielles ne doivent pas être multipliées sans nécessité.» *mt*

10 LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Est-ce que la théorie de la relativité d'Einstein peut être remise en cause ?

La théorie d'Einstein peut en effet être remise en cause. N'importe quelle théorie, aussi précise soit-elle, possède des limites (que l'on ne connaît pas forcément encore) dans sa description du monde. Mais pour qu'une telle remise en question soit acceptée par la communauté scientifique, il faut qu'elle s'appuie sur des observations fiables et convaincantes. De plus, ces observations doivent être reproductibles. Une théorie détrônera celle d'Einstein lorsqu'elle aura fait la preuve qu'elle est plus «juste» que cette dernière. Plus «juste» signifiant qu'elle est mieux à même de rendre compte du monde physique qui nous entoure. *dr*

La lumière voyage-t-elle dans le temps? Met-elle réellement 1 seconde pour parcourir 300 000 km ou cela n'est-il vrai qu'à notre échelle ?

La lumière parcourt toujours 300 000 km par seconde dans le vide. Pour des observateurs se déplaçant à de grandes vitesses les uns par rapport aux autres, ce qui change, ce n'est pas la vitesse de la lumière, mais la durée de la seconde et la longueur d'un kilomètre.

Notre description de la lumière avec nos mesures actuelles de temps et d'espace est qu'elle se déplace dans l'espace et dans le temps. Il n'est cependant pas exclu que nous considérerons dans quelques décennies que tout cela n'est qu'une illusion et que la nature réelle de la lumière est intemporelle. *mt*

Que se passerait-il si l'on voyageait plus vite que la lumière ?

Il nous est absolument impossible de dépasser la vitesse de la lumière. Ce n'est pas un problème de technologie, mais de loi de la physique (de même qu'il est impossible, par exemple, de faire une machine à mouvement perpétuel). Par conséquent, cette question n'a pas de réponse.

En revanche, les physiciens ont tenté d'imaginer à quoi pourraient ressembler des particules capables malgré tout de dépasser cette limite. Ils les ont appelées tachyons et leur existence est pour l'instant uniquement

une possibilité théorique. La «matière» dont ces particules sont fabriquées devraient avoir des propriétés très différentes de celle qui constitue l'ensemble de l'univers observable. Techniquement, les tachyons devraient posséder une masse au repos «imaginaire», ce terme devant être pris dans le sens de la théorie mathématique des nombres complexes. Cependant, on ne sait pas si une masse imaginaire peut avoir un sens.

Face à la vitesse de la lumière, ils sont néanmoins confrontés au même type de problèmes que les particules conventionnelles, si ce n'est qu'il est inversé: les tachyons ne peuvent pas se déplacer à des vitesses inférieures à celle des photons. Et si on veut les ralentir, il faut leur fournir de l'énergie au lieu de leur en soustraire. Un tachyon considéré «au repos» se déplacerait en fait à une vitesse infinie.

Une autre propriété surprenante de ces tachyons est qu'ils remontent le cours du temps. Du coup, s'ils pouvaient interagir avec la matière normale, ils violeraient le principe de causalité – celui-ci est le principe de base de la physique, qui veut que la cause précède toujours l'effet. En d'autres termes, on pourrait recevoir la réponse à un message tachyonique avant que celui-ci ait été envoyé (notons que la relativité, restreinte ou générale, en dépit des nombreuses bizarreries que l'on y trouve, respecte parfaitement le principe de causalité). Ceci est la principale raison pour laquelle la grande majorité des physiciens pensent que les tachyons n'existent pas. *sp*

DIALOGUE TACHYONIQUE :



Einstein a-t-il démontré que la vitesse de la lumière était constante dans le vide ou n'est-ce qu'un de ses postulats ?

Einstein n'a pas prouvé que la vitesse de la lumière dans le vide est une constante. D'une manière générale, la science ne prouve jamais, mais tente de donner les meilleures explications possibles aux phénomènes observables. La constance de la vitesse de la lumière est donc bien le postulat de base de la théorie de la relativité restreinte.

L'origine de l'idée de la constance de la vitesse de la lumière se trouve déjà dans les équations de Maxwell, qui décrivent l'électromagnétisme. En effet, ces équations prédisent que les ondes de champ électromagnétique (c'est-à-dire la lumière) se déplacent à une vitesse très précise, qui est la vitesse de la lumière. Les équations, en revanche, ne disent pas par rapport à quoi cette vitesse doit être mesurée. Les physiciens du milieu du siècle passé ont alors pensé que la lumière se déplaçait dans un milieu particulier, appelé «éther», qui remplissait l'univers tout entier, sans que l'on pût remarquer sa présence. Or l'expérience de Michelson et Morley a montré par la suite que l'hypothèse de l'éther était fausse.

En l'absence d'un référentiel absolu (rôle que devait jouer l'éther), l'idée d'une vitesse absolue contredit le principe de relativité dit de Galilée, qui veut que toutes les vitesses dépendent des observateurs. Il ne restait alors plus que deux possibilités. La première était que les équations de Maxwell étaient complètement fausses, malgré les très nombreuses expériences qui semblaient montrer le contraire. La deuxième était que la relativité de Galilée était fausse, et que la vitesse de la lumière était constante pour n'importe quel observateur. C'est ce qu'a postulé Einstein pour résoudre le paradoxe. Il a donc proposé un autre principe de relativité, la relativité restreinte, dont la seule différence notable avec le principe de relativité de Galilée est le postulat de la constance de la vitesse de la lumière. Les conséquences sur la physique sont étonnantes.

Le principe de relativité restreinte est de nos jours extrêmement bien vérifié. Le fonctionnement des accélérateurs de particules en dépend d'ailleurs intégralement. *sp*

Les physiciens affirment que la lumière ne possède aucune masse. Mais pourquoi diable est-elle sensible à la gravitation, comme dans le cas des trous noirs et des lentilles gravitationnelles ?

Toute masse déforme l'univers. Et un photon passant à proximité d'un objet massif ne fait que suivre une ligne courbée par ce dernier, indépendamment du fait que le photon ait une masse ou non.



Cela dit, s'il est vrai que les grains de lumière n'ont pas de masse, il faut néanmoins bien distinguer la masse que l'on appelle «au repos», qui est nulle, de son énergie, qui ne l'est pas. Et la célèbre équation d'Einstein $E = m \cdot c^2$ nous indique que, comme le photon a une énergie, on peut lui associer une masse $m = E/c^2$. En fait, les particules ayant une «masse au repos» nulle, comme les photons, se déplacent constamment à la vitesse de la lumière. En d'autres termes, ils ne sont jamais au repos. *sp*

Un objet qui approche de la vitesse de la lumière voit son poids augmenter. Mais, puisque tous les astres sont en mouvement, par rapport à quel point de référence fixe peut-on mesurer sa vitesse?

Cette question soulève un point important de la théorie de la relativité d'Einstein. La réponse se trouve justement dans le nom de cette théorie, la relativité. En effet, Einstein abolit l'idée qu'il existe un point de référence absolu qui ne bouge pas et par rapport auquel on peut définir un temps absolu, une longueur absolue ou une masse absolue. On peut cependant définir un point de référence privilégié pour tout objet dans l'univers. Celui-ci est le référentiel se déplaçant à la même vitesse et dans la même direction que l'objet en question. Le temps mesuré dans ce référentiel privilégié est minimal et est appelé le temps propre. Similairement, la dimension de l'objet y est maximale, c'est sa dimension propre, et sa masse (son poids) y est minimale, c'est sa masse au repos.

Tout observateur se déplaçant à grande vitesse (proche de celle de la lumière) par rapport à cet objet observera que le temps s'écoule plus lentement pour cet objet et que sa masse est apparemment plus grande. De plus, l'objet apparaîtra déformé sur une photographie avec une longueur plus courte le long de la trajectoire de l'objet. Ces effets de «dilatation du temps», de «contraction des longueurs» et d'«augmentation de masse» dépendent de la vitesse relative de l'observateur par rapport à l'objet observé. Il n'y a donc pas de changement de temps, de longueur et de masse d'une manière absolue. La «relativité» consiste simplement dans le fait que des observateurs différents vont mesurer des intervalles de temps, des longueurs et des masses différents pour un seul et même objet étudié. *mt*

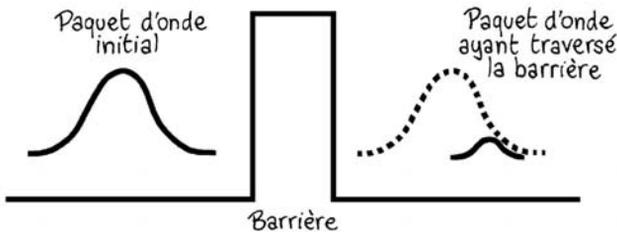
Le phénomène appelé «effet tunnel» permettrait de dépasser la vitesse de la lumière, ce qui contredirait les théories d'Einstein. Est-ce vrai ?

Non, mais l'explication du phénomène fait appel aux règles surprenantes du monde de la physique quantique. Commençons par une image. Au minigolf, un joueur doit frapper la balle au moyen d'une canne pour l'envoyer dans un trou. Pour augmenter la difficulté, une bosse sépare souvent le point de départ et le trou. Une balle gravissant un tel obstacle

voit son énergie cinétique se transformer progressivement en énergie potentielle. Si son énergie initiale est insuffisante, elle s'arrête avant d'atteindre le sommet et repart en sens inverse. Toutefois, si cette balle se comportait selon les lois de la physique quantique, qui régit le monde microscopique, elle aurait malgré tout une certaine probabilité de passer la barrière que constitue cette bosse. C'est cet effet que les physiciens nomment « effet tunnel ».

Pour tenter de déterminer le temps que met un « objet » quantique pour traverser une barrière par effet tunnel, les physiciens ont réalisé une expérience similaire à celle du minigolf. Ils ont pris deux balles quantiques – des photons – et leur ont fait parcourir la même distance. Un des deux photons devait en outre traverser un miroir (bien que la probabilité qu'il soit réfléchi est très haute, le photon a quand même une petite chance de le traverser). En mesurant le temps d'arrivée de ces deux photons, ils ont observé que celui qui a traversé le miroir arrivait en avance.

Cela n'indique toutefois pas que le photon voyage à l'intérieur de l'obstacle plus vite que la vitesse de la lumière. En fait, contrairement à ce qui se passe avec une balle de golf, il n'est pas possible de définir précisément la position d'un photon. On parle plutôt de paquet d'onde, en définissant la région de l'espace où il a une probabilité non nulle de se trouver. La probabilité de le trouver en un certain point lors d'une mesure dépend ainsi de la hauteur du paquet en ce point. Lorsqu'un tel paquet d'onde atteint une barrière, sa tête a une probabilité plus importante de la traverser par effet tunnel que son corps ou sa queue. Le paquet passant par la barrière change de forme et son centre se trouve ainsi en avance par rapport au centre du paquet ayant voyagé dans le vide, donnant ainsi l'illusion qu'il a voyagé plus vite. En réalité, ce paquet transmis se trouve toujours « à l'intérieur » de l'autre paquet. La théorie d'Einstein n'est donc pas violée: l'effet tunnel ne permet pas de communiquer plus vite que la vitesse de la lumière. *gr*



11 LES TROUS NOIRS

Qu'est-ce qu'un trou noir ?

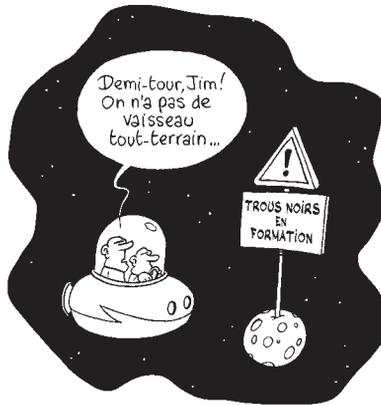
Le trou noir est le résultat de l'effondrement de la matière sur elle-même dans les cas où la force de gravitation prend le dessus sur toutes les autres forces de répulsion qui pourraient la contrecarrer. On peut tenter de comprendre le phénomène en partant d'une étoile à neutron. Cet astre doit son nom au fait que la densité y est telle que les électrons et les protons ont fusionné pour former des neutrons. Il est en équilibre, car sa force de gravité est compensée par la pression qu'exercent les neutrons lorsqu'ils sont comprimés les uns contre les autres. Si l'on ajoute encore de la matière sur cette étoile à neutron, sa gravité va augmenter. Lorsque sa masse dépasse environ trois fois celle du Soleil, la pression des neutrons ne parvient plus à s'opposer à la gravité et l'étoile s'effondre sur elle-même. Plus rien, plus aucune force ne peut arrêter cet écrasement.

Au bout d'un moment, l'astre se contracte au-delà d'un rayon limite, appelé rayon de Schwarzschild, qui définit une sphère de l'intérieur de laquelle plus rien ne peut s'échapper, puisqu'il faudrait une vitesse égale à celle de la lumière pour quitter sa surface. En effet, pour échapper à l'attraction de n'importe quel astre massif, il faut s'en éloigner à une vitesse minimale. Une fusée doit ainsi dépasser 11 km/s pour quitter définitivement la Terre. Il lui faudrait atteindre 22 km/s si la Terre, tout en conservant sa masse, avait un diamètre quatre fois plus petit. Et cette vitesse de libération devrait égaler celle de la lumière si la masse de la Terre était concentrée dans une sphère d'un centimètre de diamètre. Autrement dit, si la Terre avait la taille d'une bille, rien ne pourrait s'en échapper. Pas même la lumière. La Terre disparaîtrait de l'univers. Elle ne signalerait sa présence que par sa gravité.

Si le rayon de Schwarzschild pour la Terre est de l'ordre du centimètre, il vaut 3 kilomètres pour le Soleil. Et pour un trou noir de trois masses solaires, il est de 9 kilomètres. La sphère définie par le rayon limite est appelée horizon des événements. Il s'agit d'une limite théorique qui n'est en rien matérialisée mais qui ne laisse filtrer aucune information. Aucun photon, qu'il soit visible, radio, X, gamma ne peut quitter l'horizon des événements. Le trou noir est donc invisible. *dr*

Quelle est la composition d'un trou noir ?

Toute l'information sur la composition de la matière qui tombe dans un trou noir est perdue. Un trou noir ne conserve de l'ensemble des propriétés de la matière qui y tombe que la masse, la charge électrique et le moment cinétique (une mesure de la rotation). Cela signifie qu'un trou noir formé uniquement de glace au chocolat, sera exactement identique à un trou noir formé de gaz interstellaire pour autant que leur masse, leur charge électrique et leur rotation soient les mêmes. On ne peut donc pas parler de la composition d'un trou noir, vu que la matière y est (théoriquement) complètement écrasée en un point de densité infinie. *mt*



Quelle est la taille d'un trou noir ?

La taille d'un trou noir est définie par la distance entre son noyau, de taille théoriquement nulle, et son horizon. Cette distance, qui s'appelle le rayon de Schwarzschild, est directement proportionnelle à la masse du trou noir. Si le rayon de Schwarzschild est de 3 kilomètres pour un trou noir de la masse du Soleil, il sera de 30 kilomètres pour un trou noir de 10 fois la masse du Soleil, et ainsi de suite. *mt*

Comment mesure-t-on la masse d'un trou noir ?

La masse d'un trou noir est estimée à partir de la vitesse des corps (étoiles, nuage de gaz, etc.) qui lui tournent autour. D'après la troisième loi de Kepler, cette vitesse est proportionnelle à la masse de l'objet central et à la distance à cet objet. Ainsi, en mesurant la vitesse du corps en rotation autour du trou noir et en estimant la distance entre ce corps et le trou noir, on peut facilement calculer la masse du trou noir. *mt*

Est-ce que la masse d'un trou noir est proportionnelle aux objets qu'il a avalés ?

La masse d'un trou noir est égale à la masse totale de la matière qui est tombée dedans soit lors de la formation du trou noir, soit par la suite. Ainsi, lorsqu'un corps de 1 kg tombe dans un trou noir, la masse du trou noir augmente de 1 kg. *mt*

Comment peut-on expliquer l'existence d'un trou noir avant qu'il n'ait avalé le premier objet situé à sa portée gravitationnelle ?

Un trou noir de masse nulle ne peut pas exister. Cela n'a pas de sens. Un trou noir ne peut se former que lorsque de la matière est extrêmement comprimée, comme c'est le cas au centre des étoiles massives en fin de vie (juste avant l'explosion de l'étoile en supernova). *mt*

Existe-t-il des photos de trous noirs ?

Le trou noir lui-même n'est pas observable car il est trop petit et n'émet pas de lumière. Sa présence ne se manifeste que lorsqu'il entre en contact avec de la matière. Cette dernière peut provenir d'une étoile très proche (systèmes binaires) ou être constituée, dans le cas des galaxies ayant un noyau actif (les quasars, par exemple), de gaz qui tombe sur les trous noirs supermassifs situés au centre. Les seules images directes de l'activité des trous noirs sont celles de jets de matière émis à très grande vitesse dans deux directions opposées. Cette éjection est très probablement alignée le long de l'axe de rotation du trou noir. Quant aux rayons X, ils permettent de voir la matière fortement échauffée au centre d'un disque de matière (gaz et poussière) entourant le trou noir. Ces disques d'accrétion ne sont vus que comme des sources ponctuelles car ils sont trop petits et distants pour qu'on puisse reconnaître leur forme. Cependant, les variations rapides de la luminosité de ces sources nous permettent de déterminer la vitesse de rotation de cette matière et d'en déduire la distance à laquelle elle se trouve du trou noir. *mt*

Est-il possible de représenter un trou noir ?

On peut représenter la courbure de l'espace-temps autour d'un trou noir en considérant que l'espace-temps n'a que deux dimensions au lieu de quatre. La courbure serait alors semblable à un tourbillon dans l'eau ou à une tornade dans l'air. *mt*

Comment se fait-il que les trous noirs soient en rotation ?

Si l'étoile tourne sur elle-même avant d'exploser en supernova, elle for-

mera une étoile à neutron ou un trou noir tournant également sur lui-même. *mt*

Si l'on place un laser près d'un trou noir et si on le dirige dans la direction opposée, la lumière devrait ralentir, s'arrêter et repartir en arrière. Dans ce cas, la vitesse de la lumière est-elle toujours une constante ?

La trajectoire de la lumière est effectivement déviée aux abords d'un objet massif comme le Soleil ou un trou noir. En revanche, sa vitesse reste inchangée. Tout au plus la lumière perdra-t-elle de l'énergie en essayant de s'éloigner d'un trou noir.

La théorie de la relativité générale d'Einstein montre que toute forme d'énergie est sujette à la gravitation. Ainsi, la lumière, bien que dépourvue de masse propre, possède une certaine énergie qui subit l'attraction gravitationnelle de corps massifs proches. Einstein remplace le concept newtonien d'une force gravitationnelle agissant dans un espace «plat» par l'idée que les corps célestes se déplacent librement dans un espace-temps à quatre dimensions, courbé localement par la présence d'une forte concentration de masse comme celle du Soleil ou d'un trou noir. A seulement deux dimensions, cette courbure peut se représenter par le creux formé par une bille au centre d'un drap tendu (le drap représente l'espace-temps et la bille l'objet massif). La lumière suit toujours le chemin le plus direct dans l'espace-temps. Ce chemin ne sera pas une droite, mais une courbe dans un espace-temps déformé par la présence d'un objet massif.

Il faut savoir aussi que la lumière ne peut s'échapper d'un trou noir. Il lui faudrait une vitesse supérieure à la sienne pour arriver à sortir du puits de l'espace-temps formé par l'énorme concentration de masse. La lumière reste donc piégée à l'intérieur de l'horizon du trou noir et rien de ce qui se passe dedans ne pourra jamais être transmis vers l'extérieur, ce qui nous prive de toute information sur l'intimité de ces objets exotiques. A priori, il n'y a aucune raison que la lumière emprisonnée ait une vitesse différente de 300 000 km/s, mais dans ce cas, elle est contrainte à tourner en rond à l'intérieur de l'horizon du trou noir.

En revanche, si un rayon laser est émis juste à l'extérieur de cette limite et dans une direction opposée au trou noir, il va réussir à sortir du puits de l'espace-temps et sa vitesse sera toujours la même, soit 300 000 km/s. Il n'y aura aucun ralentissement de la lumière. Cependant, un faisceau laser initialement bleu, va apparaître rouge, voire infrarouge à un observateur distant. Ce décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle correspond à une perte d'énergie de la lumière, car l'énergie transportée par une «particule» de lumière (un photon) est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, qui augmente du bleu vers le rouge. Ce n'est donc pas la vitesse de la lumière qui est affectée par la gravitation, mais uniquement son énergie, qui ne dépend pas de la vitesse. *mt*

Quelles sont les différences entre un trou noir de Schwarzschild et un trou noir de Kerr ?

Vers 1915, Karl Schwarzschild a réussi à trouver la solution des équations de la relativité générale d'Einstein dans le cas simple d'un trou noir sans rotation, alors qu'il a fallu attendre 1963 pour que Roy Kerr trouve la solution s'appliquant à un trou noir en rotation. Mis à part leur mouvement propre, les différences les plus importantes entre ces deux objets sont les suivantes: la matière peut suivre une orbite circulaire stable autour d'un trou noir de Kerr à plus faible distance de celui-ci que dans le cas d'un trou noir de Schwarzschild. De plus, pour un trou noir de Kerr, la singularité (là où toute la matière est concentrée) est un cercle et non plus un point. Il possède également plusieurs horizons et une «ergosphère» dont il est possible de sortir, mais à l'intérieur de laquelle tout corps, et même la lumière, est obligé de tourner dans le même sens que le trou noir. *mt*

Est-il possible de créer un trou noir en laboratoire ?

Un trou noir peut se former dans certaines conditions au cœur d'étoiles massives (de plus de 10 fois la masse du Soleil) en fin de vie. Ceci est possible grâce à la forte compression de la matière centrale sous le poids des couches externes de l'étoile. En laboratoire, il semble tout à fait utopique de pouvoir former et, surtout, de conserver un trou noir.

Le problème est qu'il faut arriver à comprimer de la matière à l'extrême. Une compression suffisante ne semble être réalisable que lors de collisions de particules à très haute énergie comme celles réalisées au CERN à Genève. Pour l'heure, les énergies mises en jeu ne sont pas suffisantes pour former un mini-trou noir (à partir d'un plasma quark-gluon). Mais peut-être que, dans quelques années, cela sera possible.

Le problème de la conservation d'un tel trou noir vient, lui, du fait qu'il aurait une durée de vie infiniment courte. En effet, selon une théorie – pas encore vérifiée – conçue par le physicien Stephen Hawking, tout trou s'évapore entièrement dans un temps proportionnel à sa masse m , élevée à la puissance cubique (m^3). Pour un trou noir de la masse du Soleil, ce temps d'évaporation est quasi infiniment long puisqu'il vaut 10^{75} secondes, soit environ 10^{57} fois l'âge actuel de l'univers. En revanche, pour un trou noir de 1 kg, ce temps n'est plus que de 10^{-16} secondes, soit un dixième de milliardième de milliardième de seconde.

Pour notre mini-trou noir de laboratoire, ce temps serait encore (environ 10^{75} fois) plus court, ce qui rend impossible sa détection. Ainsi, nous n'aurons probablement jamais la possibilité d'étudier un véritable trou noir en laboratoire. Heureusement, car cela serait sans nul doute très dangereux. Cependant, des chercheurs sont en train d'étudier la possibilité de fabriquer des systèmes optiques qui se comporteraient de manière similaire. Ces «trous noirs optiques» auraient par exemple la propriété de pouvoir ralentir la lumière passant près de leur «horizon». Ces systèmes ne

font que reproduire certaines des propriétés des trous noirs, sans en être de vrais. *mt*

Est-il possible qu'une étoile d'une masse inférieure à huit fois la masse du Soleil explose en supernova et forme une étoile à neutron ou un trou noir?

Des étoiles d'une masse inférieure à environ 8 fois la masse du Soleil ne vont pas exploser en supernova à la fin de leur vie et ne pourront pas former d'étoiles à neutrons et encore moins des trous noirs. Les conditions idéales pour que se forme un trou noir plutôt qu'une étoile à neutrons lors d'une explosion en supernova sont encore mal connues. Dans l'état actuel de nos connaissances, il semblerait que seules des étoiles de plus de 20 à 25 fois la masse du Soleil peuvent former des trous noirs. Ces valeurs dépendent probablement de la rotation de l'étoile et de sa composition chimique, notamment en éléments lourds comme le carbone, l'oxygène ou le fer.

Un trou noir peut également se former à partir d'une étoile à neutrons lorsque celle-ci est suffisamment proche d'une étoile massive pour lui arracher de la matière. L'étoile à neutrons va alors grossir et lorsqu'elle aura atteint la limite d'environ 3 fois la masse du Soleil, elle va s'effondrer sur elle-même en formant ainsi un trou noir. Quant aux trous noirs supermassifs hantant les centres de galaxies, ils se forment probablement à partir de trous noirs stellaires qui grossissent rapidement en avalant la matière qui passe trop près d'eux sous forme de gaz, de poussière ou même d'étoiles entières. Il faut dire que le centre des galaxies est beaucoup plus dense en gaz et en étoiles que le voisinage solaire, ce qui favorise le grossissement rapide des trous noirs. *mt*

Est-ce que la Terre sera aspirée un jour par un trou noir ?

Non, il est quasiment impossible que cela arrive un jour. Il ne faut pas penser que les trous noirs engloutissent tout comme un tourbillon. En fait, ils se comportent exactement comme d'autres corps massifs à condition que l'on ne s'en approche pas trop. Ainsi, si l'on remplaçait le Soleil par un trou noir de même masse, l'orbite de la Terre et celles des autres planètes ne seraient absolument pas modifiées.

En fait, la rencontre entre la Terre et un trou noir est encore moins probable qu'une collision entre deux étoiles. En effet, si le Soleil avait la taille d'une orange, l'étoile la plus proche serait une autre orange éloignée d'environ 2500 km, soit environ la distance séparant Genève et Moscou. Peu de chances, donc, que ces deux agrumes se retrouvent par hasard. En conservant la même échelle, la Terre aurait la taille d'une tête d'épingle (1 mm) et un éventuel trou noir (si sa masse est de 10 fois celle du Soleil)

serait 200 fois plus petit. De plus, le nombre de trous noirs dans la galaxie est beaucoup plus faible que celui des étoiles. Le plus proche de la Terre se situe probablement beaucoup plus loin que l'étoile la plus proche. Quant aux trous noirs supermassifs (plusieurs millions de fois la masse du Soleil), ils sont formés au cœur des galaxies et y restent. Il ne faut donc pas que la perspective d'une telle rencontre empêche qui que ce soit de dormir. *mt*

Si un trou noir rencontrait notre galaxie, pourrait-on survivre ?

Les trous noirs sont bien plus inoffensifs que ce que l'on prétend. Si le Soleil devenait un trou noir, la trajectoire de la Terre ne serait absolument pas modifiée. Nous continuerions à tourner normalement autour de l'astre central sans être englouti. En réalité, tout corps particulièrement massif, même le Soleil, peut être dangereux si l'on s'en approche trop. Si des astronautes à bord d'une navette spatiale s'approchent à moins de 1 million de kilomètres de notre étoile – la distance Terre-Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres –, ils ne pourraient plus s'échapper et finiraient par être engloutis. Le problème avec les trous noirs, c'est qu'aucune fusée ni aucun mécanisme physique ne permettrait d'en sortir si on s'en approchait de trop près.

Il y a certainement de nombreux trous noirs dans notre galaxie. L'un d'entre eux possède même une masse de l'ordre du million de fois celle du Soleil. Mais au vu des distances entre les objets dans une galaxie, il n'y a aucun risque que l'on passe à proximité. *sp*



A combien d'années-lumière se trouve le trou noir le plus proche ?

Tout d'abord, même si la plupart des astrophysiciens pensent que les trous noirs existent, ils n'en ont pas la preuve absolue. Dans notre galaxie, nous connaissons actuellement une dizaine de candidats, c'est-à-dire des objets dont on a de bonnes raisons de supposer que ce sont des trous

noirs. Le plus proche se trouve à quelques milliers d'années-lumière de la Terre, mais il pourrait y en avoir beaucoup plus. Les trous noirs sont en effet très difficiles à détecter et leur présence n'est remarquée que par des indices indirects, comme les mouvements d'une étoile qui tourne autour de lui par exemple. *sp*

Quelle est la masse du trou noir situé au centre de notre galaxie ?

Peut-on observer son entourage ?

Le centre de la Voie Lactée n'est pas directement observable à la lumière visible car il est masqué par la présence d'épais nuages de gaz et de poussière. Ces poussières absorbent la lumière visible, mais laissent passer plus facilement la lumière infrarouge.

Depuis quelques années, il est possible d'observer dans cette gamme de lumière des étoiles individuelles exactement au centre de notre galaxie. Certaines de ces étoiles se déplacent d'une année à l'autre et l'on peut déterminer leur vitesse, qui peut atteindre environ 1000 km/s. Grâce à la mesure de ces très grandes vitesses et à celle de la distance de ces étoiles à la source radio située au centre de la galaxie (appelée Sagittarius A*), il est très facile de calculer la masse de l'objet central, c'est-à-dire le trou noir associé à Sagittarius A*. En effet, le calcul est tout à fait similaire à celui utilisé pour déterminer la masse du Soleil à partir de la distance et de la vitesse des planètes. La masse du trou noir au centre de notre galaxie serait de 3,6 millions de fois la masse du Soleil. *mt*

Comment peut-on localiser un trou noir dans l'univers ?

Comme le trou noir lui-même n'émet pas de rayonnement observable, il n'est pas détectable de manière directe. En revanche, il possède une masse qui, dans certaines situations, peut être mesurée indirectement. Les résultats les plus convaincants sont obtenus à partir de systèmes d'étoiles binaires émettant des rayons X. Ces astres sont composés d'une étoile normale qui semble tourner autour d'un objet invisible. On peut néanmoins déduire la masse minimale de ce dernier en fonction de la période de rotation et de la masse de l'étoile. Dans certains cas, la valeur obtenue est plusieurs fois supérieure à la masse du Soleil et trop élevée pour correspondre à une étoile à neutrons. Comme les seuls objets de petite taille suffisamment massifs que nous connaissons sont les trous noirs, on en déduit que c'est autour d'un tel astre que tourne l'étoile.

Un autre cas de figure qui pourrait témoigner de la présence d'un trou noir est celui des quasars. Ces objets sont extrêmement lumineux (jusqu'à 10 000 fois la luminosité de notre galaxie), mais aussi très petits, plus petits même que notre système solaire. On pense actuellement que le moteur d'un quasar est un trou noir. En effet, la matière qui tombe sur un

trou noir est très violemment chauffée avant d'être engloutie. Durant sa chute, elle émet donc un très fort rayonnement. Et plus l'objet central est massif, plus la luminosité est élevée. Selon les estimations des astronomes, la masse du trou noir situé au centre de certains quasars pourrait atteindre 10 milliards de fois la masse du Soleil. C'est énorme, mais on ne connaît pas d'autres mécanismes pour expliquer la formidable puissance de ces objets.

Finalement, on peut aussi déduire la présence de trous noirs isolés au moyen de l'effet de lentille gravitationnelle. Si un trou noir passe exactement sur la ligne qui relie un observateur à une étoile lointaine, la lumière de cette dernière sera déviée et elle apparaîtra soudainement plus brillante. Plusieurs expériences ont eu lieu dans ce sens.

En fait, même si tous les indices concernant la présence de trous noirs sont indirects, la grande majorité des astrophysiciens sont convaincus de leur existence. *sp*

Est-il possible que nous soyons nous-mêmes à l'intérieur d'un trou noir, puisque toute chose qui passe près de ces trous y est aspirée ?

Il ne faut pas voir les trous noirs comme des «aspirateurs» de l'univers qui engloutissent tout. A moins d'être extrêmement proche d'un trou noir, on n'est pas plus attiré par un trou noir que par tout autre forme de matière de masse identique (étoiles, amas d'étoiles, nuages de gaz, etc.). Ainsi, si l'on remplaçait le Soleil par un trou noir de même masse, l'orbite de la Terre resterait la même.

Cela dit, on peut effectivement se poser la question de savoir si l'on est à l'intérieur d'un trou noir. Mais si tel était le cas, il faudrait que tout l'univers soit à l'intérieur d'un trou noir géant. Aussi curieux que cela puisse sembler, cette question n'est pas si farfelue et mérite une explication.

On mesure la taille d'un trou noir par la distance entre le centre du trou noir et son horizon. Cette distance s'appelle le rayon de Schwarzschild et l'horizon est une sphère creuse, qui représente une barrière infranchissable pour tout ce qui se trouve à l'intérieur de cette sphère. Une propriété des trous noirs est que leur taille R est directement proportionnelle à leur masse M . Or, la densité moyenne D de la matière à l'intérieur de l'horizon du trou noir – c'est elle qui permettra de définir s'il est possible qu'il contienne un univers comme le nôtre – est elle aussi proportionnelle à M , mais inversement proportionnelle à R^3 , soit $D \sim M/R^3$. Si l'on réduit cette dernière expression, il découle que la densité moyenne D à l'intérieur d'un trou noir est inversement proportionnelle à la masse du trou noir au carré, soit $1/M^2$.

Tout cela pour dire que s'il est vrai que des trous noirs de quelques fois la masse du Soleil sont extrêmement denses, des trous noirs considérablement plus massifs peuvent présenter une densité beaucoup moins

élevée. La densité moyenne actuelle de l'univers est d'environ 10^{-29} g/cm³, ce qui correspond à un vide des milliards de fois plus poussés que les vides les plus extrêmes que l'on peut réaliser en laboratoire. Un trou noir de cette densité aurait une taille juste un peu plus grande que la taille de l'univers observable actuellement. Il est donc théoriquement possible que tout notre univers soit encapsulé dans un gigantesque trou noir d'un autre univers inaccessible.

Inutile de préciser que cette idée est complètement spéculative et qu'il est impossible de savoir s'il se pourrait que notre univers soit à l'intérieur d'un gigantesque trou noir d'une masse d'environ 10^{23} fois la masse du Soleil. Ce qui est sûr, c'est que si tel était le cas, l'expansion de l'univers observée actuellement ne pourrait pas se poursuivre au-delà de l'horizon de ce supertrou noir, car rien venant de l'intérieur ne peut franchir cet horizon. Or des observations récentes semblent montrer que l'expansion de l'univers est loin de ralentir et tend plutôt à s'accélérer avec le temps, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse d'un «trou noir univers». *mt*

Est-il vrai que l'énergie d'un quasar est issue de l'échauffement de matière tombant dans un trou noir ? Si oui, par quel mécanisme cette matière s'échauffe-t-elle ?

De la matière tombant tout droit dans un trou noir ne va pas s'échauffer ni rayonner. Cependant, en général, la matière passant près d'un trou noir va se mettre à tourner autour de celui-ci à cause de sa forte attraction gravitationnelle. Cette matière (essentiellement du gaz) forme alors un disque en rotation que l'on appelle un disque d'accrétion. Ce dernier ne se comporte pas comme un disque de musique. Les régions internes tournent beaucoup plus vite que les régions externes, provoquant beaucoup de frictions. Ce sont ces dernières qui vont échauffer la matière. Comme tout corps chaud émet du rayonnement (selon la loi de Planck du rayonnement du corps noir), les régions internes du disque, qui sont les plus chaudes, émettront de la lumière ultraviolette, voire des rayons X, alors que les régions plus externes et plus froides du disque émettront de la lumière visible, ou infrarouge. Toute l'énergie dissipée sous forme de rayonnement est soutirée à l'énergie de rotation du disque. Ainsi, la matière spirale progressivement vers le trou noir, qui va peu à peu l'engloutir.

Cette théorie est assez unanimement admise pour expliquer le rayonnement dans le domaine ultraviolet et visible des quasars. Cependant, elle ne permet pas d'expliquer les rapides et fortes variations d'intensité du rayonnement typique des quasars. Les phénomènes se déroulant autour du trou noir d'un quasar sont certainement beaucoup plus compliqués que ce modèle simple. *mt*

Admettons que deux astronautes dans un vaisseau spatial rencontrent un trou noir. Le premier décide de quitter la navette et de s'approcher de l'objet, alors que le deuxième reste en arrière.

Quels phénomènes vont-ils vivre ?

L'astronaute qui s'approche d'un trou noir se place en orbite autour de lui, comme il le ferait autour de n'importe quel corps massif. La seule particularité est qu'il tourne autour d'un astre invisible. En revanche, s'il s'approche trop de l'horizon des événements – la limite de non-retour définie par le rayon de Schwarzschild –, il tombe sur le trou noir sans aucun espoir d'en ressortir. S'il arrive les pieds en avant, il est atrocement étiré dans le sens de sa hauteur et effroyablement écrasé dans le sens de la largeur. Il subit également une accélération si terrible qu'il est chauffé au point d'être partiellement transformé en rayonnement. C'est pour cette raison d'ailleurs que les régions entourant un trou noir sont source de lumière. Il faut préciser, pour la gouverne de l'intrépide astronaute, qu'à moins de 3000 kilomètres d'un trou noir de 10 masses solaires (dont l'horizon des événements est de 30 kilomètres), les forces de marées sont déjà suffisantes pour le déchiQUETER.

On peut néanmoins postuler que l'astronaute ait pris soin d'utiliser une petite sonde indestructible, munie d'une horloge extrêmement précise. Imaginons également qu'il possède un émetteur de lumière dont la fréquence (la couleur) est connue et qu'il la dirige vers son camarade resté à bord du vaisseau spatial. Ce dernier est confortablement installé en orbite stable autour du trou noir à une distance suffisante pour que les effets de la gravité soient supportables. Depuis son poste de pilotage, il peut observer au télescope l'horloge de son copain ainsi que mesurer la fréquence de la lumière qu'il émet au cours de sa chute. Lorsque la sonde s'approche du trou noir, la lumière parvient à l'observateur avec une couleur de plus en plus rouge. Le simple fait d'être aussi proche du trou noir entraîne une diminution de la fréquence des ondes lumineuses. Les photons sont en effet attirés par la gravité. Ils ne sont pas ralentis (un photon voyage toujours à la vitesse de la lumière), mais ils perdent de l'énergie en essayant d'échapper à l'attraction. Or l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa fréquence de radiation. Perdre de l'énergie signifie donc une diminution de la fréquence, c'est-à-dire un décalage vers le rouge.

Résultat: plus la sonde s'approche de l'horizon des événements, moins la lumière qu'il émet possède de l'énergie en parvenant à l'observateur en orbite. D'une lumière visible bleue initiale, elle devient rouge, infrarouge, radio, et ainsi de suite. Lorsque la sonde arrive enfin à l'horizon des événements, la fréquence de la lumière reçue en orbite devient nulle. Elle est indétectable. L'astronaute ne voit pas son camarade atteindre l'horizon des événements. Il s'est «éteint» avant.

Il n'y a pas que l'énergie de la lumière qui est influencée par la proximité du trou noir. Le temps aussi subit des changements. Observée depuis le télescope de la navette, l'horloge de la petite sonde ralentit à mesure qu'elle s'approche du trou noir. En arrivant à l'horizon des événements, l'horloge s'est même arrêtée. Autrement dit, l'astronaute resté en orbite devra attendre un temps infini pour voir son camarade «toucher» la surface du trou noir.

Bref, depuis son vaisseau spatial, l'observateur voit la sonde s'approcher de plus en plus lentement de l'horizon du trou noir tout en devenant de plus en plus rouge. En fait, pour lui, la sonde non seulement n'atteindra jamais cet horizon, mais, de plus, elle s'éteindra progressivement en s'en approchant.

En revanche, du point de vue de l'astronaute installé dans sa sonde indestructible, l'horloge continue à fonctionner à un rythme normal et la source de lumière à émettre des photons de bonne couleur. Il s'approche encore. Rien ne change. Finalement il traverse l'horizon des événements sans rien remarquer de spécial – ce n'est après tout qu'une frontière imaginaire, un concept théorique. L'infortuné ne remarque même pas spécialement être entré dans le trou noir. Jusqu'au moment où il voudra en ressortir. C'est là que ses ennuis commenceront, puisque cette possibilité lui est dès lors interdite. Ce qu'il verra à l'intérieur du trou noir? Aucune idée. Et on n'en saura jamais rien. *dr*

Comment cela se fait-il que le temps se modifie drastiquement aux abords d'un trou noir ?

La modification du temps près de l'horizon du trou noir est une conséquence de la déformation de l'espace-temps par la présence de la forte concentration de masse du trou noir. La lumière doit parcourir un chemin plus long dans cet espace courbé et l'information véhiculée par un rayon lumineux nous parviendra avec un certain retard. Tout se comporte donc comme si le temps avait ralenti aux abords du trou noir. Cependant, cela n'est qu'un effet observationnel pour une personne restée à distance du trou noir. Un expérimentateur imaginaire aux abords du trou noir ne pourra pas observer de ralentissement. L'effet est relatif dans le sens qu'il dépend de la position de l'observateur.

Le Soleil lui-même génère une légère courbure de l'espace-temps, qui dévie les rayons lumineux passant près de sa surface. On a ainsi pu mesurer en 1970 un ralentissement de 200 microsecondes sur le voyage aller-retour d'un signal radar réfléchi par la surface de Vénus lorsque cette planète se trouvait à l'opposé de la Terre avec la ligne entre ces deux planètes touchant le bord du Soleil. Ce ralentissement – appelé depuis l'«effet Shapiro» – est en excellent accord avec les prédictions d'Einstein. *mt*



On parle de «fontaines blanches» par opposition aux trous noirs. De quoi s'agit-il ?

Une fontaine blanche – qu'on appelle aussi «trou blanc» – est une curiosité issue de la théorie de la relativité générale. Quand on essaie de résoudre les équations qui conduisent au trou noir, on trouve une seconde solution mathématique – tout comme l'équation $x^2 = 4$ possède deux solutions, $x = 2$ et $x = -2$. Si cette solution mathématique correspond à un objet physique existant, cela signifie qu'à chaque trou noir pourrait être associé un trou blanc. Ce dernier, toutefois, pourrait se trouver dans un autre univers. En effet, les solutions «trou noir» et «trou blanc» n'existent que dans des systèmes de coordonnées qui recouvrent deux espaces-temps disjoints. Par ailleurs, à l'opposé de ce qui se passe avec les trous noirs, aucune matière ne peut pénétrer à l'intérieur d'une zone située autour du trou blanc, définie elle aussi par le rayon de Schwarzschild. Contrairement au trou noir, un trou blanc ne peut donc que rejeter de la matière, et en aucun cas en avaler. Aucun élément observationnel ne permet cependant de soutenir cette hypothèse. Bien que résultant d'un développement mathématique correct, il est tout à fait possible que les trous blancs n'existent pas. *sp*

Qu'y a-t-il derrière un trou noir ? Est-il possible qu'ils représentent des passages vers des univers parallèles ou des raccourcis vers d'autres galaxies ?

A priori, il n'existe aucun moyen de ressortir d'un trou noir. Il n'existe pas non plus de «derrière un trou noir». Le sort de loin le plus probable est que l'objet qui traverse l'horizon du trou noir continuera sa chute vertigineuse (à la vitesse de la lumière) vers la singularité centrale où toute la masse du trou noir est concentrée. Elle l'atteindra extrêmement vite et ne pourra pas aller au-delà. Cependant, la théorie de la relativité générale n'exclut pas complètement la possibilité de sortir d'un trou noir si celui-ci faisait partie d'un «trou de ver».

Ce dernier serait une sorte de tunnel dans l'espace-temps, qui relierait un trou noir à un «trou blanc» soit dans le même univers, soit dans un hypothétique univers parallèle.

L'existence de trous de ver ou d'univers parallèles reste pourtant complètement spéculative et entre plutôt dans le domaine de la science-fiction que de la physique. Nous n'avons aucun fait observationnel suggérant la présence d'un trou de ver. L'existence d'une solution mathématique n'est en aucun cas une preuve de l'existence, ni même de la possibilité d'existence de cette solution (en l'occurrence le trou de ver). La nature rejette souvent des solutions mathématiquement possibles; on dit alors que la solution n'est pas physique (les particules de masse négative, par exemple).

Finalement, il faut bien se rendre compte qu'un trou de ver ne se laisserait pas traverser facilement. Les forces de marées, qui tendent à allonger tout corps tombant dans le trou noir, sont d'autant plus grandes que le trou noir est peu massif. A moins d'avoir un trou noir supermassif, ces forces énormes disloqueraient facilement un vaisseau spatial tombant dans le trou noir, ne lui laissant aucune chance de traverser entier le trou de ver. *mt*

La théorie du «trou de ver» est-elle purement spéculative ou existe-t-il des observations lui donnant quelques crédits ?

Tant qu'on n'a pas d'indice direct ou indirect de l'existence d'un phénomène, celui-ci doit être considéré comme spéculatif. Un trou de ver serait un «passage» reliant deux trous noirs (qui ne seraient alors plus des trous noirs, soit dit en passant) et qui a été imaginé par les scientifiques sur la base d'un développement mathématique. Ils sont certes une prédiction, sous réserve de certaines hypothèses encore invérifiées, d'une théorie bien établie – la relativité générale –, mais font pour l'instant partie du domaine de la science spéculative. Aucune observation ne permet d'étayer l'hypothèse de leur existence. *sp*

Comment est-ce possible que le temps soit absorbé par les trous noirs alors qu'il est sensé être immuable ?

Le temps n'est justement pas immuable. On le croyait jusqu'à ce qu'Einstein formule les lois de la relativité restreinte et de la relativité générale. Dans le cadre de ces nouvelles théories, on s'est aperçu que le temps s'écoule d'une manière propre à chaque individu. Bien sûr, dans la vie courante, les différences sont négligeables. Mais dans des situations plus exotiques, en revanche, la vitesse d'écoulement du temps peut être modifiée de manière très importante. C'est le cas par exemple avec des objets se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière – un

phénomène amplement vérifié dans tous les accélérateurs de particules du monde – et avec les trous noirs.

Quoi qu'il en soit, on ne peut pas vraiment dire que les trous noirs «absorbent le temps». Si un astronaute a le malheur de tomber dans un trou noir, il ne remarquera rien de particulier en ce qui concerne l'écoulement du temps, même lorsqu'il franchira l'horizon qui correspond à la surface du trou noir – on néglige ici bien entendu le fait qu'il se fera proprement déchiqueter par le trou noir. Cependant, pour un observateur demeurant à distance raisonnable, tous les phénomènes se passant à proximité du trou noir semblent se dérouler plus lentement. Les secondes indiquées par une horloge s'approchant de la limite de non-retour lui paraîtraient durer des minutes, puis des heures. En d'autres termes, les trous noirs ralentissent le temps dans leur entourage par rapport au temps qui s'écoule loin d'eux. Cet effet est tellement fort que la dernière seconde mettra, aux yeux de l'observateur lointain, une éternité à s'achever. Pour l'horloge, en revanche, chaque seconde que sa trotteuse égraine continue à durer une seconde et sa chute se terminera bien vite. *sp*

Comment calcule-t-on la force de marée d'un trou noir ?

Les «forces de marée» sont un phénomène que l'on rencontre aussi bien dans la théorie de la gravitation de Newton que dans celle d'Einstein. Elles ont pour origine le fait que deux objets situés à proximité d'un corps massif vont subir une attraction sensiblement différente du fait qu'ils ne sont pas exactement placés à la même distance de celui-ci. Ainsi, un objet d'une certaine envergure tournant autour d'une étoile subira une tension interne entre ses parties les plus proches (très attirées) et les plus éloignées (moins attirées) de l'astre. Résultat: Les deux régions aux antipodes ont tendance à s'éloigner l'une de l'autre. Si cette force, dite de marée, est supérieure aux forces de cohésion permettant à l'objet de tenir en un seul morceau, alors celui-ci se cassera. Le calcul montre que la force de marée est proportionnelle à la taille de l'objet et inversement proportionnelle au cube de la distance à l'étoile ou au trou noir.

La théorie de la gravitation d'Einstein interprète l'origine de la force de marée d'une manière assez différente. Pour elle, les objets ne subissent pas de force d'attraction, mais essaient de suivre des trajectoires particulières différentes, appelées «géodésiques», et qui s'écartent l'une de l'autre. C'est de cet écart que provient la force de marée. Pour la calculer, on peut toutefois utiliser exactement la même formule que dans le cas newtonien, pour peu que l'on ne soit pas trop près du trou noir. *sp*

12 LE TEMPS

Pourquoi découpe-t-on le jour en 24 heures et une minute en soixante secondes ?

Le mot «jour» est ambigu. Il peut signifier soit le temps qui sépare deux culminations du Soleil, soit celui qui sépare le lever et le coucher du Soleil. Cela dit, les Egyptiens de l'Antiquité ont remarqué que le nombre 12 est pratique puisqu'il est divisible par 2, 3 et 4. C'est probablement pour cela qu'ils ont découpé le jour et la nuit en douze heures chacun. La durée des heures était donc variable selon la saison.

Les anciens Babyloniens, eux, divisaient le jour (calculé entre deux culmination du Soleil) en six périodes. Les Séleucides de l'époque hellénistique, successeurs d'Alexandre le Grand régnant sur le Proche-Orient au cours du III^e siècle avant J.-C., avaient remarqué qu'à la latitude de Babylone (32,5° nord), la journée d'hiver valait $\frac{2}{3}$ de celle d'été, ce qui n'est pas très précis. Il en a néanmoins résulté que les six périodes prenaient une durée égale. Les cultures mésopotamiennes avaient également remarqué que le nombre 60 est un multiple entre autres de 2, 3, 4, 6, 10 et 12. C'est vraisemblablement ce fait qui les a poussés à la subdivision sexagésimale.

La combinaison de la division du jour en 2 fois 12 heures, donc 24 heures, et la division sexagésimale a abouti dès la fin de l'époque hellénistique au système actuel. Il faut tout de même remarquer que jusqu'au XVIII^e siècle, la mesure du temps à l'aide de sabliers ou de clepsydes, puis d'horloges à poids était rudimentaire. De plus, la division du jour en 24 heures égales ne s'est pas imposée rapidement. Les Romains, y compris ceux qui occupaient le Proche-Orient, divisaient toujours le jour (du lever au coucher du Soleil) en 12 heures (*horae*) et la nuit en 4 veilles (*vigilae*). *bn*

Pourquoi a-t-on décidé de découper la seconde en 9 192 631 770 périodes de vibration de l'atome de césium 133 ?

Historiquement, la durée de la seconde a été fixée comme étant la 3600^e partie de l'heure, elle-même correspondant à la 24^e partie du jour solaire moyen. Au départ, la seconde astronomique était donc définie par la

durée d'une rotation terrestre. Toutefois, l'avènement des horloges atomiques, dans les années 1950-60, a permis de définir un rythme temporel encore plus régulier que la durée d'un jour solaire moyen. Le calcul du temps est désormais basé sur une fréquence d'émission de l'atome de césium, qui est totalement indépendante de la rotation de la Terre. Pour la ramener à la seconde traditionnelle, on dit simplement qu'il faut compter 9 192 631 770 périodes de cette vibration électromagnétique pour faire une seconde. *pn*



Quels étaient les outils astronomiques qui permettaient aux Égyptiens de l'Antiquité d'établir leurs calendriers ?

Les Égyptiens avaient un calendrier résolument solaire. Au départ, ils avaient une année de 360 jours, divisés en 12 mois de 30 jours. Ils ont rapidement ajouté 5 jours dits épagomènes. Ils ont découvert que l'année compte 365 jours en se repérant sur l'étoile Sirius, la plus brillante du ciel. On dit souvent que les étoiles se lèvent – et se couchent ou culminent – chaque jour 4 minutes plus tôt que la veille. Ce n'est pas tout à fait exact. C'est le Soleil qui culmine chaque jour avec un retard de 4 minutes par rapport à la veille (un décalage dû au fait que la Terre tourne autour de son astre en un an). Chaque année, vers la fin du printemps, Sirius se couche donc de plus en plus tôt et finit par devenir invisible, car sa direction est trop proche de celle du Soleil. Elle réapparaît quelque temps plus tard une première fois dans les lueurs du matin. Au 2^e millénaire avant J.-C., cette première réapparition, le lever héliaque de Sirius, coïncidait avec le début de l'inondation du Nil (aux alentours du solstice d'été). Les Égyptiens se sont aperçus très tôt que la période de ce phénomène était de 365 jours et quart. Cela ne les a pas empêchés d'adopter une année de 365 jours exactement. Le quart de jour manquant a fait dériver leur calendrier et il a fallu trois fois le tour de l'année en 4400 ans.

Cela dit, cette culture, qui a été extraordinaire à bien des égards, n'avait pas un intérêt pour l'astronomie comparable aux cultures mésopotamiennes ou chinoises. *bn*

Comment peut-on accorder les calendriers lunaire et solaire ?

Au V^e siècle avant notre ère, un Athénien, Méton, avait remarqué que 19 années tropiques (intervalle moyen de deux retours consécutifs du Soleil à l'équinoxe de printemps) étaient presque égales à 235 lunaisons. En fait, 235 lunaisons excèdent 19 années tropiques de 2 heures environ. Le cycle de Méton de 19 ans est donc assez précis. Or, notons que l'on peut décomposer le chiffre 235 comme suit: $235 = 12 \cdot 19 + 7$. Ainsi, si on veut concilier les cycles lunaire et solaire, il faudrait ajouter sept mois supplémentaires répartis sur 19 ans. C'est à peu près ce que fait le calendrier juif.

Quant à notre calendrier grégorien, il est résolument solaire et le mois, considéré comme le douzième d'une année, n'est qu'une approximation très grossière du cycle lunaire. *bn*

Quels sont les repères de la fixation du calendrier hébraïque dans l'Antiquité ?

L'année solaire juive, dont la durée est fournie par le cycle de Méton, un géomètre athénien du V^e siècle avant J.-C., débute aux alentours de l'équinoxe d'automne. Ce cycle vaut 19 ans car Méton avait remarqué que 19 années tropiques étaient presque égales à 235 lunaisons. Il comporte 12 années régulières de 12 mois et 7 années embolismiques de 13 mois qui se succèdent dans un ordre bien établi.

La durée de la lunaison, elle, varie entre 29,32 et 29,77 jours avec une moyenne de 29,530588 jours. Cette valeur a été déterminée très tôt. Callipe, au IV^e siècle avant J.-C., utilise en effet déjà le nombre de 29,530851. Le calendrier juif, établi par Hillel II au IV^e siècle après J.-C., a calculé, de son côté, une lunaison de 29,530594 jours. L'excès n'est que de 0,59 seconde par lunaison.

L'année moyenne vaut donc $235/19$ lunaisons, soit 365,2468 jours. Cette approximation est meilleure que le calendrier julien en vigueur jusqu'au XV^e siècle. *bn*

Quelle est la différence entre le mois sidéral et le mois lunaire ?

Le mois est une période de temps définie par le mouvement qu'effectue la Lune autour de la Terre. On définit plusieurs types de mois:

- Le mois sidéral est l'intervalle de temps qui sépare deux passages de la Lune en un point défini par rapport aux étoiles qui jouent le rôle de repère fixe. Il vaut 27,32166 jours.
- Le mois synodique est la durée d'une lunaison (le temps qui sépare deux pleines Lunes) et vaut 29,53059 jours.
- Le mois anomalistique est l'intervalle de temps qui sépare deux passages de la Lune au périhélie, le point de son orbite le plus proche de la Terre. Il vaut 27,55464 jours.

- Le mois tropique est la durée qui sépare deux passages de la Lune au point vernal, c'est-à-dire la position du Soleil dans le ciel au moment de l'équinoxe de printemps. Il vaut 27,32158 jours.
- Le mois draconitique est l'intervalle de temps qui sépare deux passages de la Lune au nœud ascendant de son orbite (une des intersections de l'orbite lunaire et du plan de révolution de la Terre autour du Soleil). Il vaut 27,2122 jours.
- Le mois du calendrier n'est qu'une unité artificielle, composée d'un nombre entier de jours. *dr*

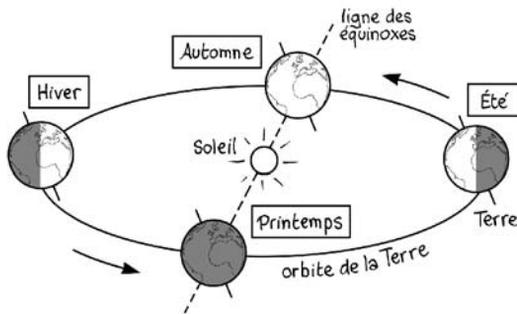
Pourquoi la durée du jour varie-t-elle d'une saison à l'autre ?

Si la durée du jour varie au cours des saisons, c'est que l'axe de rotation de la Terre est incliné. En été, lorsque l'hémisphère nord «penche» vers le Soleil, les régions boréales profitent d'une durée du jour plus importante que celle de la nuit et les régions australes ont les nuits plus longues que les jours.

La situation est évidemment inverse en hiver, lorsque l'hémisphère nord «penche» à l'opposé du Soleil.

Dans sa révolution autour de l'astre du jour, la Terre garde son axe de rotation toujours pointé dans la même direction, mais entre l'été et l'hiver notre planète a parcouru une demi révolution et les points du globe qui étaient «penchés» vers le Soleil en été le sont à l'opposé de l'astre du jour en hiver.

Aux équinoxes, c'est-à-dire à mi-chemin entre les solstices d'été et d'hiver, aucun point du globe ne penche vers le Soleil, bien que la Terre soit toujours inclinée dans la même direction. A ce moment, la durée du jour est donc égale à celle de la nuit: *dr*



Comment calcule-t-on l'«équation du temps» ?

L'«équation du temps» est un terme impropre pour désigner la différence entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen. Le premier est basé

sur le jour solaire vrai, c'est-à-dire la durée entre deux passages consécutifs du Soleil au même méridien. Le deuxième, en revanche, est basé sur le jour solaire moyen, égal à la durée moyenne de tous les jours solaires vrais de l'année. L'équation du temps correspond donc à un écart (E) et non à une équation à résoudre. Elle est formulée de la manière suivante:

$$E = \text{temps moyen} - \text{temps vrai}$$

Cet écart est la somme de deux causes. La première est l'excentricité de l'orbite terrestre. La trajectoire de la Terre autour du Soleil n'est en effet pas un cercle parfait, mais une ellipse, dont l'excentricité vaut 0,01671. Cela entraîne un écart C dit «équation du centre». La deuxième cause est que l'équateur terrestre sur lequel est défini l'angle horaire ne coïncide pas avec l'écliptique, le plan orbital annuel terrestre (ils forment un angle de 23° entre eux). Et cela provoque un retard R . On obtient donc un écart total de:

$$E = C + R$$

Cet écart varie d'un jour de l'année à l'autre. E représente donc une courbe avec une succession de maxima et de minima. Le 11 février, $E = +14$. Cela signifie que le Soleil culmine 14 minutes plus tard qu'en moyenne, ce qui est l'écart positif maximal. En revanche, le 4 novembre, $E = -16$. Ce jour-là, le Soleil est en avance de 16 minutes sur les 12 coups de midi. *bn*

L'«équation du temps» est-elle la même chaque année ?

L'équation du temps, à savoir l'écart entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai, est en effet la même chaque année. A peu près, du moins. Elle est due, d'une part, à l'obliquité de l'écliptique (angle entre plans équatorial et orbital de la Terre), et, d'autre part, à l'excentricité de l'orbite terrestre. L'obliquité varie légèrement à cause de la nutation de l'axe de la Terre, la variation principale – due à la lune – ayant une amplitude de 10 secondes d'arc et une période de 18,6 ans. L'excentricité de l'orbite terrestre, elle, varie aussi légèrement à long terme, à cause des perturbations gravitationnelles des autres planètes. Ces variations sont négligeables en pratique.

Enfin, le fait que l'année civile ne comporte pas un nombre entier de jours fait que l'équation du temps relative à une heure et à un jour donnés d'une année sera relative à une heure un peu différente l'année suivante. Là encore, ce détail n'a guère d'importance quand il s'agit de lire un cadran solaire. *pn*

Le voyage dans le temps est-il réalisable ?

Personne ne sait si les voyages dans le temps sont possibles. Cependant, la relativité générale, qui décrit les propriétés locales de notre univers,

semble permettre, du moins en principe, ce genre de voyage. Dans le cadre de cette théorie, il est en effet possible de «courber» l'espace-temps. Sur le papier, on peut même imaginer qu'une ligne de temps retombe sur elle-même dans le passé. Dans la réalité, cela semble plutôt difficile. Comment fabriquer une machine capable de déformer l'univers? Pour y parvenir, sur des distances importantes, il faudrait une quantité d'énergie extraordinaire, en comparaison de laquelle l'énergie que nous sommes capables de mettre en œuvre sur Terre est insignifiante. Peu de chance donc que l'homme soit capable de construire une telle machine.

Cependant, peut-être existe-t-il déjà dans notre univers de telles machines à remonter dans le temps. Les «trous de ver», une construction composée de deux trous noirs reliés en leur centre, pourraient posséder une telle propriété. Dans le film *Contact*, dont le scénario a été écrit en partie par l'astrophysicien Carl Sagan, Jodie Foster utilise des trous de ver pour effectuer un voyage dans le temps et dans l'espace. Ce genre d'objets est le résultat d'un développement mathématique à partir de la théorie de la relativité générale. Si les trous de ver existent, on ne peut pas exclure la possibilité de les utiliser un jour, bien qu'ils aient le désavantage de ne pas laisser le choix de l'endroit et du temps où l'on va arriver. Pour l'instant, pourtant, aucune trace de trou de ver n'a jamais été détectée dans l'espace. *sp*

Un astronaute qui voyage deux ans à une vitesse proche de celle de la lumière aura vieilli de deux ans. Son frère jumeau resté sur Terre sera, lui, devenu un vieillard. Pourquoi l'un vieillit-il moins vite que l'autre?

Ce problème est connu sous le nom de «paradoxe des jumeaux», qui est un effet troublant de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Selon cette théorie, le temps n'est pas une grandeur physique que l'on peut mesurer de manière absolue, mais dépend de la vitesse relative entre l'observateur et le sujet observé. Ainsi, le temps nous semble ralentir pour des objets se déplaçant par rapport à nous à des vitesses proches de celle de la lumière, soit de 300 000 kilomètres par seconde. Ce phénomène s'appelle la «dilatation du temps» ou le «ralentissement des horloges en mouvement».

En vertu de ce phénomène, il est tout à fait possible que le voyage en fusée aura duré 20 ans pour les habitants de la Terre y compris le jumeau resté à la maison, mais seulement 2 ans pour le jumeau dans la fusée. Le temps de ce dernier aura été ralenti d'un facteur 10 par rapport au temps mesuré sur Terre.

Ce phénomène bizarre a été vérifié expérimentalement en comparant le temps mesuré sur Terre avec celui mesuré par une horloge identique se déplaçant rapidement dans la navette spatiale en orbite. L'horloge de la navette spatiale est en effet retardée à son retour sur Terre par rapport à

l'horloge restée au sol. Il n'y a pas de raison de croire que le vieillissement du corps humain se comporte différemment que le ralentissement d'une horloge de haute précision. *mt*



Comment peut-on calculer le temps par rapport à la vitesse? C'est-à-dire quelle est la différence de temps entre, par exemple, un voyageur qui va à la vitesse de la lumière et un autre qui vit sur Terre ?

Imaginons une horloge à bord d'une fusée se déplaçant à 240 000 km/s, soit à 80% de la vitesse de la lumière. Un cosmonaute dans la fusée regarde l'horloge et envoie un signal à la Terre toutes les 10 secondes. Sur Terre, au centre spatial, les scientifiques reçoivent les signaux du cosmonaute, mais ceux-ci n'arrivent pas toutes les 10 secondes. Ils leur parviennent toutes les 16,7 secondes.

Ce phénomène de relativité restreinte est appelé la «dilatation du temps» ou le «ralentissement des horloges en mouvement».

La formule pour passer d'un intervalle de temps t' mesuré par une horloge en mouvement à un intervalle de temps t mesuré par une horloge au repos est:

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{10}{\sqrt{1 - (0,8)^2}} = \frac{10}{0,6} = 16,7 \text{ (secondes)}$$

v est la vitesse de l'horloge en mouvement = 240 000 km/s,

c est la vitesse de la lumière = 300 000 km/s. *mt*

Peut-on observer la relativité du temps à notre échelle, ailleurs que dans un accélérateur de particules ?

Oui, la relativité du temps est détectable en comparant le temps mesuré par une horloge atomique (très précise) emportée à bord d'un avion de ligne avec le temps mesuré par une horloge identique restée au sol. *mt*

13 LES TECHNIQUES DE MESURE

Peut-on déterminer sa longitude en mer par mauvais temps ?

On peut déterminer sa longitude à une fraction de seconde d'arc près par tout temps grâce au GPS, bien évidemment. Mais la question doit plutôt concerner la méthode dite de Saint-Hilaire qui permet de se positionner en mer grâce à l'observation des astres. La technique est assez sensible. Une erreur de 4 secondes sur l'instant auquel on détermine la hauteur d'un astre correspond à une différence d'une minute d'arc dans la longitude, c'est-à-dire 1 mile nautique (1,852 km) si on est sur l'équateur, ou 0,7 mile nautique à la latitude de la Suisse (1,3 km).

Par mauvais temps, si une trouée permet d'apercevoir un seul astre identifiable, on peut déjà se situer le long d'une droite sur la carte. Si l'on observe deux astres assez éloignés l'un de l'autre dans le ciel (à des azimuts qui diffèrent de 40 à 140 degrés), alors on peut néanmoins définir sa position de manière assez précise.

Si le ciel est totalement bouché, il reste à estimer l'heure du début ou du coucher du Soleil grâce au début ou à la fin du jour. Mais une erreur de 4 minutes sur ces horaires entraîne une erreur de 1 degré sur la longitude. Dans les régions tropicales, cela représente plus de 100 km. *bn*



Comment un navigateur peut-il déduire sa position en mer en mesurant la hauteur d'une étoile au-dessus de l'horizon à une heure donnée ?

Pour faire le point à l'aide d'un sextant, il faut relever la hauteur d'au moins deux astres. Durant la mesure, la précision de l'heure de la mesure (à la seconde près) est aussi primordiale que la précision des hauteurs.

La méthode de Saint-Hilaire (aussi appelée la linéarisation) présume une connaissance au moins grossière (± 500 km environ) de la position. Il est préférable de se baser sur les étoiles, car leur diamètre apparent est négligeable et leurs coordonnées équatoriales varient plus lentement que les coordonnées des planètes. On peut aussi utiliser le bord inférieur ou supérieur du Soleil, mais la Lune est à déconseiller, les corrections ultérieures étant trop compliquées.

Par conséquent, pour faire le point en mer, il est préférable d'emporter avec soi des tables contenant les coordonnées de 50 à 100 étoiles qu'il faut apprendre à repérer, des tables permettant de convertir le temps universel en temps sidéral et éventuellement des éphémérides planétaires.

Le meilleur choix d'étoiles est celles dont la hauteur est comprise entre 15° et 75° . Si l'astre est trop près du zénith, la linéarisation de Saint-Hilaire est trop approximative et si elle est trop basse, la réfraction devient trop importante et incontrôlable.

Après la mesure, il ne faut pas oublier de corriger les erreurs systématiques (la réfraction atmosphérique et le fait que l'œil du marin se situe à une certaine hauteur au-dessus du niveau de la mer), car elles sont plus grandes que l'imprécision d'un bon sextant. *bn*

La position de l'étoile Polaire est-elle fixe dans le ciel ?

Actuellement, l'étoile Polaire n'est pas pile au nord, mais presque. Elle se trouve à 45 minutes d'arc ($3/4$ de degré) seulement de l'axe de rotation de la Terre. Comme la Terre effectue un tour sur elle-même vers l'est par jour sidéral, le mouvement apparent de l'astre est une rotation vers l'ouest. En fait, l'étoile Polaire est presque fixe car le rayon de cette rotation apparente est très petit. Elle donne donc une très bonne approximation de la direction du nord.

Si l'on veut utiliser l'étoile Polaire pour faire le point en mer, il est nécessaire de connaître ses coordonnées équatoriales à la date voulue. α est l'angle qui mesure la position de l'étoile dans sa rotation apparente autour de l'axe Terrestre, la référence étant comme d'habitude Greenwich. Cette valeur varie très rapidement en raison de la proximité du pôle. δ mesure la hauteur de l'étoile par rapport au plan équatorial. Cet angle est donc très proche de 90° . Exemples:

En 2000: $\alpha = 2$ h 30 min et $\delta = 89^\circ 15$,

En 2010: $\alpha = 2$ h 40 min et $\delta = 89^\circ 18$,

En 2020: $\alpha = 2$ h 54 min et $\delta = 89^\circ 21$. *bn*

Depuis quand connaît-on la valeur de l'unité astronomique et comment l'a-t-on mesurée ?

L'usage de l'unité astronomique (UA) remonte au moins à l'époque de Kepler, au XVII^e siècle. Son idée était de s'affranchir des incertitudes dans

les dimensions absolues des orbites planétaires. Il a donc posé que le «rayon moyen» de l'orbite Terrestre vaut 1 UA. Kepler a ensuite déterminé la relation qui existe entre la taille a (en UA) de l'orbite de n'importe quelle planète autour du Soleil et sa période de révolution p (en année) :

$$a^3/p^2 = \text{constante}$$

La valeur de la constante dépend principalement de la masse de l'astre central. Mesurer la révolution p est très facile et l'observation astronomique permet d'obtenir une très bonne approximation de la taille a de l'orbite. Il est toutefois très vite apparu que l'astuce de Kepler pose un problème. En exprimant la taille de l'orbite des planètes en fonction de celle de la Terre autour du Soleil, la moindre incertitude sur cette dernière se répercute sur toutes les autres. Pour éviter ce problème, la valeur de l'UA a été découplée de la Terre et du Soleil pour être figée à une constante estimée par le physicien allemand Carl Friedrich Gauss vers 1800. La valeur a ensuite beaucoup varié selon les époques et les méthodes de mesure. Celle retenue aujourd'hui par les astronomes est de 149 597 870 660 mètres ± 10 mètres.

La dimension de l'orbite Terrestre, qui varie toujours légèrement, se retrouve donc avec une valeur légèrement différente de l'unité. Aujourd'hui, par exemple, elle vaut 1,0000010178. *rb*

En quoi consiste le métier d'astronome ?

L'image d'Épinal que se représentent les gens au sujet des astronomes est illustrée à merveille par le professeur Hippolyte Calys dans l'album de Tintin *L'étoile mystérieuse* : une espèce de savant fou qui passe ses nuits l'œil rivé à l'objectif de son télescope et ses jours plongé dans des pages de calculs. L'image est loin de correspondre à l'ensemble de la communauté astronomique. En effet, lors d'une interview, le professeur Marcel Golay, ancien directeur de l'Observatoire de Genève, souligne le fait que l'astronome d'aujourd'hui passe le plus clair de son temps devant son ordinateur, l'outil avec lequel il effectue ses calculs théoriques, l'analyse de ses données, sa recherche bibliographique, la rédaction de ses articles, etc.

Il n'en reste pas moins que le panel des activités au sein de la communauté astronomique est vaste. Elles requièrent pour la majeure partie des études poussées en mathématiques ou physique. Le fait que l'astronomie soit une science interdisciplinaire a conduit à la mise en place de toutes sortes de collaborations qui font partie de l'activité de l'astronome. De plus, le travail en équipe ne se cantonne généralement pas à l'institut auquel est rattaché l'astronome, mais déborde bien souvent au-delà des frontières sous la forme de collaborations internationales.

D'autre part, les observations astronomiques sont désormais de plus en plus automatisées ou assistées par ordinateur. On peut observer en

télécommandant un instrument ou bien attendre qu'un satellite collecte les données désirées, mais c'est le traitement et l'analyse des résultats qui prennent le plus de temps. *fr*

Qu'est-ce que l'aberration chromatique ?

Lorsque vous observez le passage de la lumière blanche à travers un prisme, vous pouvez remarquer qu'elle se décompose en différentes couleurs. La lumière blanche est en réalité un mélange de toutes les couleurs, celles de l'arc-en-ciel. Or une lentille simple se comporte localement comme un prisme et a tendance à séparer les couleurs. L'image n'est alors nette que pour le bleu, le vert ou le rouge. C'est ce qu'on appelle l'aberration chromatique.

Afin de pallier ce problème qui rend les images floues, on adjoint plusieurs lentilles de nature différentes permettant ainsi de focaliser la plupart des couleurs en un même point. Si l'objectif possède deux lentilles, on parle de système achromatique et s'il en possède trois, de système apochromatique. *bc*

Si l'on veut faire de l'astrophotographie avec des longs temps de pause en été, l'humidité se condense sur l'objectif et les images sont floues.

Existe-t-il un truc pour éviter ce problème ?

Une manière de faire est d'entourer l'objectif d'un cylindre de carton noir, tout en évitant de limiter le champ de prise de vue. Ce petit « truc » est couramment utilisé pour protéger les télescopes d'amateur de la buée. *dr*

Comment faut-il faire pour effectuer les réglages d'un petit télescope amateur et l'aligner sur l'étoile Polaire si celle-ci est invisible depuis sa terrasse ?

Il n'est effectivement pas toujours aisé de manipuler une lunette astronomique ou un télescope. En premier lieu, il est nécessaire de bien comprendre le maniement de la monture, c'est-à-dire les mouvements lents et rapides sur les deux axes. Ceci doit s'effectuer de jour, afin de bien situer les molettes de réglage et de les utiliser plus habilement une fois plongé dans le noir. Ensuite, il est indispensable de régler le chercheur, qui est la petite lunette réticulée posée en parallèle de l'instrument. Pour cela, de jour, centrez un clocher ou un sommet de montagne éloigné dans le télescope. Bloquez la monture sur cet objet puis réglez le chercheur grâce aux trois vis afin que le centre de la croix se trouve sur le sommet de votre cible. Ainsi, de nuit, vous pourrez facilement pointer la Lune ou les planètes grâce au chercheur puis vous rendre compte qu'elles se trouvent directement dans le champ de l'instrument.

En ce qui concerne la mise en station de la monture (alignement avec l'étoile Polaire), elle ne doit pas nécessairement être précise, à moins que vous vouliez pratiquer de l'astrophotographie. Il suffit donc de diriger l'axe des ascensions droites (l'axe le plus bas) vers le nord grâce à une boussole et de l'incliner d'environ 45° avec l'horizontale. Ainsi, cet axe pointera plus ou moins sur l'étoile Polaire sans avoir eu besoin de l'utiliser. *bc*

Quelle est la différence entre une lunette méridienne et une lunette altazimutale ?

Aujourd'hui, les lunettes méridiennes sont extrêmement rares car peu pratiques. Ce sont des instruments que l'on ne peut déplacer que selon l'axe méridional (haut-bas) et non selon l'axe azimutal (gauche-droite). Ainsi, afin d'observer un objet, l'astronome utilisant une telle lunette est obligé d'attendre son passage au méridien.

Une lunette altazimutale, quant à elle, peut se déplacer selon l'axe azimutal (gauche-droite) et selon l'axe de l'altitude (haut-bas). Elle permet donc de pointer n'importe quelle région du ciel, quelle que soit l'heure.

En revanche, si l'on veut suivre les objets observés tout en compensant la rotation de la Terre, il est préférable d'utiliser une monture équatoriale. Il s'agit d'une monture altazimutale dont l'axe des azimuts a été orienté parallèlement à l'axe de rotation de la Terre. Ainsi, en agissant sur cet axe uniquement, on parvient à compenser le mouvement de notre planète.

Plusieurs télescopes ou lunettes astronomiques sont aujourd'hui équipés de montures altazimutales pilotées par ordinateur. En programmant judicieusement les moteurs des deux axes (azimut et altitude), on parvient à suivre les étoiles ou les planètes dans le ciel. Cela permet une structure moins lourde qu'une monture équatoriale, c'est donc ce qui est utilisé dans la construction des grands télescopes comme le VLT (*Very Large Telescope*) au Chili ou le Keck à Hawaï. *bc*

La sonde spatiale Huygens a observé la surface de Titan – la Lune de Saturne couverte d'une épaisse atmosphère – à l'aide d'un détecteur à infrarouge. Comment est-ce possible alors que l'on sait que l'atmosphère terrestre, par exemple, absorbe très fortement ce type de rayonnement ?

L'atmosphère terrestre est très peu transparente aux rayonnements infrarouges (IR) à cause de l'absorption par les bandes de vapeur d'eau (H_2O) et de gaz carbonique (CO_2). Les fenêtres de transmission (parfois partielle) correspondent à des domaines de longueurs d'onde centrés autour de 1200, 1600, 2200 et 3800 nanomètres, ce qui est très restrictif. La quantité de vapeur d'eau décroît néanmoins très rapidement avec l'alti-

tude. Il peut donc être intéressant d'effectuer les mesures en infrarouge à haute altitude. Le mieux étant bien sûr d'utiliser des sondes stratosphériques ou carrément des satellites qui s'affranchissent des limitations de l'atmosphère.

L'atmosphère de Titan, elle, est formée d'azote (N_2), d'argon et de méthane (CH_4), sans eau ni gaz carbonique. Les bandes d'absorption de l'infrarouge du CH_4 sont situées autour de 3000 et de 7000 nm. En revanche, ni le N_2 ni l'argon ne produisent des bandes d'absorption. Comme le domaine de sensibilité des appareils de la mission Huygens, qui s'est posée sur Titan en janvier 2005, s'étend de 300 à 1700 nm, l'atmosphère de la Lune de Saturne lui paraît donc quasi transparente – les aérosols et les gaz provoquent une légère diffusion des infrarouges. *mg*

Est-il possible d'obtenir des images à partir d'une interférométrie réalisée avec deux télescopes ou ne peut-on qu'obtenir des informations monodimensionnelles, comme la mesure de distances ?

L'interférométrie consiste à réunir les ondes lumineuses ou radio (en astronomie du moins) provenant d'une même source mais ayant parcouru des chemins différents. Dès lors, de nombreux cas de figure sont possibles, selon que l'interféromètre suit le mouvement de l'objet ou est fixe, que l'on a accès à la «phase» du signal (résolution temporelle plus fine que la période du signal), etc.

Ainsi, avec seulement deux télescopes, on obtient des franges d'interférence dans une seule direction. Pour obtenir une image bidimensionnelle, on peut utiliser un troisième télescope disposé en triangle ou alors s'arranger pour que l'orientation de l'astre observé change par rapport à l'interféromètre. Cette dernière condition est réalisée naturellement par le mouvement de la sphère céleste.

Couramment utilisée par les radioastronomes avec des antennes distantes de parfois quelques milliers de kilomètres, cette technique a démontré son utilité dans l'infrarouge et les premières applications dans le visible sont déjà prometteuses. Les télescopes VLT (*Very Large Telescope*) installés sur le Mont Paranal au Chili auront une résolution de 0,001 seconde d'arc (0,00003 degré) en mode interférométrique. *rb*

Où se trouve l'Observatoire spatial infrarouge et comment interpréter ses données ?

L'Observatoire spatial infrarouge ISO a été placé le 17 novembre 1995 sur une orbite très excentrique (l'apogée est à 70 600 km et le périégée à 1300 km). Sa période de rotation est d'un peu moins de 24 heures. Le refroidissement des détecteurs était obtenu par évaporation d'hélium liquide dont la réserve s'est épuisée le 8 avril 1998. Le reste du carburant dispo-

nible à bord a servi, le 16 mai 1998, à modifier l'orbite d'ISO en abaissant le périhélie. De cette manière, le freinage par l'atmosphère est accéléré et la rentrée d'ISO dans l'atmosphère est attendue pour les premières décennies du XXI^e siècle.

Les membres des consortiums internationaux de scientifiques en charge du développement des quatre instruments placés à bord d'ISO sont également responsables du traitement des données. Les données collectées ont déjà permis des progrès majeurs dans la plupart des domaines de recherche, allant des comètes à la cosmologie, en passant par les planètes géantes, la naissance et la mort des étoiles. ISO a notamment révélé la présence d'eau presque partout dans l'univers. *mg*

Quelles sont les différences entre les télescopes spatiaux comme Hubble et les télescopes terrestres comme le VLT ?

La principale différence est que les télescopes terrestres, situés à la surface du sol, doivent s'accommoder de la présence de l'atmosphère au-dessus d'eux, ce qui n'est pas le cas des télescopes spatiaux. Cette atmosphère joue le rôle de filtre pour la lumière. Il n'y a que quelques portions du spectre électromagnétique qui atteignent le sol, à savoir les ultraviolets proches, la lumière visible, l'infrarouge proche et le rayonnement radio. L'atmosphère est totalement opaque pour les rayonnements plus énergétiques que l'ultraviolet ainsi que pour le domaine des longueurs d'onde plus grandes que 10 m. L'étude de l'univers dans ces gammes de longueurs d'onde est donc impossible depuis la surface de notre planète, mais réalisable depuis l'espace, bien qu'il ait fallu développer des technologies particulières – on ne collecte pas des photons X ou gamma avec des miroirs en verre, par exemple.

D'autre part, les télescopes placés à la surface de la Terre souffrent inévitablement d'une dégradation des images lorsque la lumière qui leur parvient traverse les différentes couches atmosphériques. Celles-ci limitent le pouvoir de résolution des instruments au sol et il faut faire appel à des technologies de pointe (optiques adaptatives) pour y remédier.

De plus, le fond du ciel est beaucoup plus sombre vu depuis l'espace que depuis la Terre. Il est ainsi théoriquement possible d'observer des objets de plus faible luminosité avec les instruments spatiaux qu'avec les instruments terrestres.

L'espace offre donc plusieurs avantages par rapport au plancher des vaches. Néanmoins, le prix à payer reste encore très élevé. Le coût du télescope spatial Hubble fabriqué par la NASA et l'ESA permettrait de réaliser quatre projets VLT (*Very large Telescope*). C'est pourquoi les observatoires spatiaux tels qu'ISO (sensible dans l'infrarouge), XMM (dans les rayons X) ou encore Integral (dans les rayons gamma), sont essentiellement conçus pour observer l'univers dans des gammes de fréquences

inaccessibles depuis le sol. Cela d'autant plus qu'aujourd'hui, la technologie, avec l'optique adaptative, nous permet depuis le sol de pallier les perturbations atmosphériques.

Finalement, au sol, contrairement à l'espace, les appareils d'analyse de la lumière captée par les télescopes ne sont pas limités par le volume ni la masse. Sur Terre, ils peuvent être équipés d'une instrumentation plus diversifiée, plus sophistiquée et plus performante que celle qui équipe les télescopes spatiaux. Il n'en reste pas moins que les observatoires spatiaux et terrestres sont complémentaires. *dr, sb*

Il est, semble-t-il, possible de participer au programme SETI en utilisant son ordinateur en mode de veille. S'agit-il d'une expérience sérieuse ?

SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) est un programme de recherche de signaux provenant de civilisations extraterrestres. Elle est organisée par l'Université de Berkley, ce qui semble constituer un gage de sérieux. Dans ce domaine, en marge de la science habituelle, il faut distinguer la motivation scientifique et la réalisation technique et les estimer indépendamment l'une de l'autre.

Il est très difficile de quantifier objectivement les chances de réussite, dans un avenir proche, des programmes tels que SETI. La problématique est résumée dans l'équation de Drake qui exprime formellement le nombre de civilisations extraterrestres «communicantes». Mais la plupart des termes de cette formule ont des valeurs extrêmement incertaines, voire totalement inconnues.

Notre existence en tant que telle ne peut être prise comme preuve que l'apparition de civilisations technologiquement avancées est probable. Non seulement une telle conclusion constitue une erreur logique (si nous n'étions pas apparus, nous ne nous poserions pas ce genre de questions), mais encore faut-il préciser que nous ne serions pas capables de détecter des émissions radio telles que celles que nous produisons nous-mêmes si elles provenaient de sources distantes de quelques années-lumière (la distance aux plus proches étoiles). Ces émissions ne seraient en effet pas assez puissantes (ou nos récepteurs pas assez sensibles). Par conséquent, les avis des scientifiques sont partagés quant à la pertinence de ces programmes SETI, certains estimant qu'il s'agit d'un gaspillage de moyens, d'autres, au contraire, que l'enjeu est suffisamment important pour y consacrer quelque temps et argent.

Du point de vue purement technique, le programme SETI est très astucieux et fort bien conçu. Il permet en effet, en utilisant comme ressources informatiques des milliers d'ordinateurs particuliers connectés à Internet, de profiter d'une puissance de calcul extraordinaire. Celle-ci est capable de traitements numériques bien plus poussés que ceux qui sont généralement appliqués aux signaux radio captés par les radiotélescopes, dimi-

nuant ainsi nettement la probabilité qu'un message extraterrestre passe inaperçu. Il s'agit donc d'une véritable prouesse technique et pas seulement d'une opération *marketing* destinée à promouvoir la recherche des extraterrestres auprès du public – même si l'engouement de celui-ci pour ce genre de projet est évidemment une condition incontournable à sa réalisation. *mf*



14 L'HISTOIRE

Hipparque aurait déterminé la distance Terre-Lune par la méthode de la parallaxe. Comment est-ce possible avec les moyens de l'époque alors que pour une distance de 1000 km, la parallaxe n'est même pas de 5 minutes d'arc (0,08 degré) ?

On savait très bien mesurer la parallaxe lunaire dans l'Antiquité, soit en longitude soit en latitude écliptique. En longitude, on tirait parti du changement de position de l'observateur induit par la rotation terrestre. A la latitude d'Alexandrie, le changement de position, perpendiculairement à la distance Terre-Lune, est en moyenne de 11 000 km, entre le moment du lever et celui du coucher de la Lune, ce qui donne une parallaxe horizontale de 49 minutes d'arc (0,8 degré). En d'autres termes, par rapport à son mouvement moyen, la Lune apparaît plus à l'est de 1,6 diamètre lunaire à son lever, plus à l'ouest de la même quantité à son coucher et sans effet de parallaxe lors de son passage au méridien.

La modulation du mouvement apparent de la Lune par effet de parallaxe est donc de ± 50 minutes d'arc (0,8 degré), ce qui est important par rapport à son déplacement semi-nocturne de 6,63 degrés. Cette anomalie est mesurable de nuit par rapport aux étoiles et de jour par rapport au Soleil.

La mesure la plus précise est celle de la parallaxe en latitude. Il faut observer la Lune à sa déclinaison minimale et maximale tout en tenant compte de l'inclinaison de son orbite. La Lune est presque zénithale à Rhodes ou Alexandrie au maximum de déclinaison, avec une parallaxe très petite. Elle est à près de 60 degrés du zénith au minimum de déclinaison. Dans ce cas, la parallaxe déplace sa position vers le sud de 46 minutes d'arc (0,76 degré).

Le triquètre était l'instrument utilisé pour mesurer précisément la hauteur de la Lune. Il est décrit dans l'*Almageste* de Ptolémée, au livre V-12. *mg*

Peut-on expliquer précisément ce qu'est le système de Copernic ?

Le système de Copernic, publié en 1543, remet le Soleil au centre du système solaire comme l'avait déjà proposé Aristarque en 290 av. J.-C. Au lieu d'être immobile, comme on le pensait depuis la publication de l'*Alma-*

geste de Ptolémée en 140 ap. J.-C., la Terre, dans la description copernicienne tout comme dans la réalité, est animée de deux mouvements. L'un est une rotation sur elle-même en 24 heures, qui donne l'illusion que l'ensemble de l'univers tourne autour de nous, et l'autre une translation sur une orbite quasi circulaire autour du Soleil. Avec Copernic, la Terre devient une planète comme les autres et perd son rôle de centre du monde. Les périodes de révolution des planètes autour du Soleil sont ainsi d'autant plus longues qu'elles sont distantes du Soleil.

Avec le système géocentrique hérité d'Aristote, en revanche, les étoiles devaient être situées à une distance finie, sur une sphère dite des fixes, car si elles avaient été placées à des distances infinies, leur vitesse de rotation autour de la Terre aurait dû être également infinie, ce qui était considéré à juste titre comme impossible. Après Copernic, les distances des étoiles sont libérées et leurs vitesses restent finies. L'univers peut enfin être infini. *mg*

Concernant la sphère des fixes dans les modèles de l'Antiquité, est-ce que tous les astronomes pensaient que les étoiles étaient à la même distance ? Comment expliquaient-ils les différences d'intensité lumineuse ?

Il n'y avait pas d'accord sur les propriétés de l'univers au-delà de Saturne ni sur sa finitude. L'adoption d'un univers fini, avec toutes les étoiles à la même distance, est une conséquence de l'adoption du modèle géocentrique. Avec Archimède, Aristarque pensait que la «sphère des fixes était d'une étendue si vaste que – par comparaison – l'orbite circulaire de la Terre n'est pas plus grande que le point central d'une sphère, comparé à sa surface».

Une sphère des fixes à distance finie était requise par Aristote pour éviter que la vitesse de rotation des étoiles situées sur sa surface ne soit infinie dans le cas contraire. L'absence de parallaxe mesurable pour les étoiles, l'invariance des constellations, l'identité de leur période de rotation annuelle, étaient des arguments en faveur d'une sphère avec des étoiles toutes à même distance. La sphère des fixes devait être beaucoup plus distante que celles des planètes car les étoiles scintillent et non les planètes: «Notre regard est assez fort pour parvenir jusqu'aux planètes, mais quand il se tourne vers les étoiles fixes, il tremble, à cause de la distance, parce qu'il doit parcourir un trajet bien trop long» (Aristote, *Du Ciel* II-8).

La nature de la lumière des étoiles était aussi indéfinie. On pensait notamment que leur éclat résultait du frottement des sphères ou de l'incandescence de rochers ignés. Il n'y avait donc pas de raison pour que leurs éclats soient identiques. *mg*

Comment a-t-on déterminé, à l'époque de Kepler, les distances entre les planètes et le Soleil ?

Kepler (1571-1630) a déterminé les orbites de Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne en se fondant sur les observations très précises de son maître Tycho-Brahe. Celui-ci, en utilisant la durée séparant deux oppositions planétaires (alignement Soleil-Terre-planète), a recalculé la durée orbitale («année») de la planète en question. Pour Mars, par exemple, il a obtenu 687 jours. Il savait donc qu'après ce laps de temps, la planète rouge se trouve exactement au même point de son orbite. Ce qui n'est pas le cas de la Terre, puisque cette durée ne correspond pas un nombre entier d'années terrestres. Donc de 687 jours en 687 jours, Mars se retrouve au même point, mais, depuis la Terre, vue sous des angles différents. Il est ainsi possible d'effectuer des triangulations. Kepler a accompli ce travail de longue haleine et en a déduit ses 3 lois :

- 1) Les planètes décrivent des orbites planes qui sont des ellipses; le Soleil est situé sur un foyer.
- 2) La portion de surface balayée par le rayon vecteur Soleil-planète croît proportionnellement au temps (vitesse aréolaire constante).
- 3) Le cube des périodes et le carré des grands axes sont proportionnels.

Grâce à ses 3 fameuses lois, on a pu calculer et prévoir la position des planètes (éphémérides) avec une précision inaccessible jusqu'alors.

Kepler a donné des orbites très précises mais exprimées en unités astronomiques (UA). La valeur de l'UA, correspondant à la distance moyenne Terre-Soleil, était alors mal connue. On avait une bonne carte du système solaire, mais une connaissance imprécise de l'échelle. On sait aujourd'hui que l'UA vaut 149 597 871 km. *bn*



On a, paraît-il, démontré mathématiquement que les équations de Newton pour 3 corps ou plus ne possèdent pas de solutions analytiques. Pourquoi ?

Les systèmes mécaniques sont décrits mathématiquement par ce que l'on appelle des équations différentielles. Ces équations décrivent l'évolution de grandeurs physiques comme la position d'une particule, sa vitesse ou son accélération au cours du temps. Dans un système à n particules, il y a $3n$ équations différentielles (une pour chaque particule et chaque direction dans l'espace). Or ces équations sont fortement couplées. N'importe laquelle contient les positions de toutes les autres particules. Si l'on veut résoudre un tel système, il faut «séparer» les équations, c'est-à-dire les transformer de manière à ôter ces interdépendances. En général, cette séparation est impossible. Il y a juste quelques rares exceptions pour des systèmes très simples. Le problème n'est donc pas de savoir pourquoi le problème à trois corps ne peut pas être résolu, mais bien pourquoi celui à deux corps peut l'être.

Les cas où la séparation est possible sont dits intégrables, car on peut trouver la trajectoire par intégration directe de chaque variable. Il existe en fait un critère qui permet de savoir si le système est intégrable ou pas. Si l'on a n équations différentielles, alors le système sera intégrable si on peut trouver au moins n «constantes du mouvement», c'est-à-dire des grandeurs physiques qui restent inchangées au cours du temps. Pour le problème de Kepler (la trajectoire de la Terre autour du Soleil, en supposant le Soleil fixe) à deux dimensions, on dispose de 2 équations et de 2 constantes du mouvement: l'énergie totale de la particule et son moment cinétique. Cela signifie que l'on peut résoudre le problème. Dans le problème à 3 corps (donc à 9 équations), il est impossible de trouver neuf constantes du mouvement. *sp*

Est-il vrai que la vitesse de la lumière a été calculée à partir d'observations d'une planète comme Saturne ou Jupiter ?

La première estimation de la vitesse de la lumière a été, en effet, réalisée en 1676 par l'astronome danois Olaus Roemer sur la base de ses observations des satellites de Jupiter. Ce chercheur est parti du fait que l'intervalle de temps qui sépare deux éclipses successives du satellite Io est fixe et égal à sa période synodique (Io est éclipsé à chaque révolution, lorsqu'il entre dans l'ombre de Jupiter). Il a également supposé que le signal de l'éclipse de Io se propage vers la Terre à une vitesse finie, celle de la lumière.

Par ailleurs, lors d'une éclipse de Io, Jupiter est en quadrature, c'est-à-dire que l'angle Soleil-Terre-Jupiter est droit. A ce moment, la Terre s'approche de Jupiter pratiquement à sa vitesse orbitale de 30 km/s. Jupiter ne bouge guère, son orbite étant beaucoup plus grande et son mouvement

plus lent. L'éclipse suivante de Io aura lieu, pour un observateur jupitérien, exactement une période synodique plus tard (1,7698604 jour en moyenne). En revanche, pour un observateur terrestre, elle aura lieu avec environ 15 secondes d'avance, parce que la Terre se sera rapprochée de Jupiter entre les deux éclipses. Le signal de la seconde éclipse aura donc moins de chemin à parcourir pour arriver jusqu'à nous. Inversement, à la quadrature opposée, la période apparente de Io s'allonge de 15 secondes. Ce n'est rien d'autre qu'une forme de l'effet Doppler.

Par ce raisonnement, on peut avec un peu de calcul déterminer la vitesse de la lumière si l'on connaît la vitesse de la Terre par rapport à Jupiter. En pratique, l'écart de 15 secondes entre deux éclipses est trop petit pour être mesuré. Pour s'en sortir, il faut cumuler l'effet sur trois mois, entre la quadrature et l'opposition (lorsque l'angle Soleil-Terre-Jupiter est de 180 degrés). Entre ces deux situations, la distance de la Terre à Jupiter aura varié d'environ un rayon de l'orbite terrestre, ce qui représente 8,3 minutes, et Io aura vécu pas moins de 49 éclipses. Grâce à cet écart de temps plus facilement mesurable, Roemer a réussi à déduire une vitesse de la lumière valant environ 225 000 km/s (au lieu de 299 792 km/s). C'est un résultat déjà remarquable pour l'époque puisqu'il ne s'écarte que de 25% de la bonne valeur. Une bonne partie de cet écart provient d'ailleurs de la mauvaise connaissance qu'on avait alors de la taille de l'orbite terrestre. *pn*



15 L'ASTRONAUTIQUE

Que deviennent les satellites mis sur orbite et qui ne fonctionnent plus ?

Beaucoup de satellites mis en orbite sont équipés de petits moteurs d'appoint qui permettent une réorientation sur leur orbite ou même des changements d'orbite. Le fonctionnement de ces moteurs est limité dans le temps par la quantité de carburant emportée à bord. Et lorsqu'un satellite n'est plus fonctionnel, soit par accident, soit lorsque ses systèmes et instruments sont arrivés en fin de vie, il devient un débris spatial. Au fil des années, avec le nombre croissant de satellites mis en orbites, les débris spatiaux sont devenus un problème pris très au sérieux par l'ensemble des grandes agences spatiales mondiales.

Cette dénomination de débris spatial englobe tout objet fabriqué par l'homme, y compris des pièces ou des fragments d'objet orbitant autour de la Terre ou sur le point de rentrer dans l'atmosphère qui n'est plus fonctionnel et ne peut pas, selon toute vraisemblance, remplir ni reprendre les tâches pour lesquelles il a été conçu. La plupart d'entre eux – ceux dont la taille est supérieure ou égale à 10 cm – sont surveillés par radar ou par des télescopes. C'est la gravitation qui nous permet de mettre en orbite des satellites sur différentes altitudes et aussi cette même loi qui contribue à rendre le problème des débris spatiaux délicat. *sb*

Combien y a-t-il de débris spatiaux en orbite ? Sont-ils destinés à retomber sur Terre ?

Depuis le 4 octobre 1957, date du lancement de Spoutnik, plus de 4200 fusées ont placé 5500 satellites en orbite. Aujourd'hui, en plus des quelque 700 satellites encore opérationnels, notre planète est entourée d'un nuage de débris de toutes sortes. Environ 13 000 objets de dimension supérieure à 10 cm sont suivis au radar ou avec des télescopes et catalogués. Il s'agit pour 20% d'entre eux de satellites en fin de vie, 20% d'étages supérieurs de fusées et, pour le reste, ce sont des morceaux de ferraille, des boulons, des écrous, des sangles, un capot de télescope, un gant et un tournevis datant d'une mission Gemini.

Il existe entre 100 000 et 150 000 objets de taille comprise entre 1 et 10 cm et environ 35 millions de plus de 1 mm, essentiellement produits par

l'explosion des étages supérieurs de fusées (le reste de carburant s'échauffe sous l'effet du Soleil, monte en pression et tout finit par sauter). C'est arrivé par exemple, en novembre 1986, avec le vol 16 d'Ariane. On a alors dénombré une myriade de débris: 750 morceaux de plus de 10 cm, 7500 de plus de 1 cm, et 75 000 de plus de 1 mm. Au total, on estime à 3000 tonnes le poids total de matériel en orbite actuellement. Tous les débris peuvent ensuite entrer en collision entre eux et générer une augmentation importante de nouveaux fragments.

A une altitude de 200 km, les frottements dus aux couches tenues de notre atmosphère (freinage aérodynamique) font qu'un satellite perd naturellement et rapidement de l'altitude et se désintègre dans notre atmosphère au bout de quelques jours. Ce freinage naturel est de moins en moins efficace plus on s'élève. Ainsi, à 400 km, l'altitude de la Station spatiale internationale, le temps de vie est d'environ 6 mois (d'où la nécessité d'aller régulièrement rehausser son orbite), à 1000 km d'altitude, il est de 200 ans, à 2000 km, on l'évalue à 1000 ans et, finalement, sur l'orbite géostationnaire à 36 000 km, il est de l'ordre du million d'années. La densité maximale de débris se situe entre 800 et 1500 km. *sb*

Quels sont les risques de collisions entre les satellites fonctionnels et les débris spatiaux ?

Aujourd'hui, dans la plupart des cas, les risques dus aux débris spatiaux sont faibles mais non négligeables. Certains satellites, comme la Station spatiale internationale (ISS), sont néanmoins équipés de blindage. Le niveau de dommage infligé par une collision dépend de la taille du débris, de la vitesse d'impact et de la géométrie du vaisseau spatial. Dans le pire des cas, le satellite peut être détruit, ce qui augmente d'autant la quantité des débris.

La vitesse relative de l'impact entre deux objets dépend de l'angle d'intersection des orbites et, en moyenne, on estime cette vitesse entre 10 et 13 km/s (entre 36 000 et 46 800 km/h). A cette vitesse, une sphère d'aluminium de 1 mm de diamètre possède la même énergie qu'une boule de pétanque lancée à 100 km/h. Les objets dangereux sont ceux de taille intermédiaire entre 1 et 10 cm. Ils sont difficiles à détecter et peuvent causer des dommages importants. Actuellement, la taille maximale des objets pour lesquels on peut se protéger est de 1cm.

Les satellites ERS d'observation de la Terre, par exemple, ont un profil d'environ 30 m². L'ESA a calculé que le temps moyen entre deux collisions potentielles avec un objet de 10 cm et plus est d'environ 4000 ans. En combinant les profils de tous les satellites en orbite, l'ESA estime le risque de collisions destructives à une tous les 10 ans.

Les risques sont donc sérieux si l'on considère que de tels débris peuvent détruire des satellites de plusieurs millions d'euros ou, pire, toucher

l'ISS. Heureusement, il y a relativement peu de fragments dans les orbites basses où évoluent les vols habités. Néanmoins, il existe des exemples où des collisions ont été évitées de justesse par chance ou par des manœuvres d'urgence. Mais ce n'est pas toujours le cas. En 1993, lors de la première mission de maintenance du télescope spatial Hubble, un trou de 1 cm de diamètre a été découvert sur l'antenne. En 1996, le satellite militaire français Cerise a été gravement endommagé. C'était le premier satellite opérationnel à subir une collision avec un fragment (catalogué) de l'étage supérieur d'une fusée Ariane (la vitesse relative entre les deux objets était de 15 km/s, soit 54 000 km/h). A chaque sortie, la navette spatiale, qui circule entre 250 km et 600 km d'altitude, reçoit environ 200 impacts de débris spatiaux qui impliquent un changement régulier des hublots. Le blindage de l'ISS, quant à lui, est conçu pour la protéger des débris de taille inférieure à 1 cm, mais la probabilité pour qu'un objet plus grand heurte la station spatiale est tout de même de 1 tous les 76 ans.

Face à un tel danger, les agences spatiales surveillent les plus gros objets afin d'éviter les collisions. Elles blindent leurs satellites et les rendent passifs lorsqu'ils arrivent en fin de vie. Cela signifie que les appareils sont dégagés sur des orbites cimetières ou forcés à rentrer dans l'atmosphère où ils se consomment. Les étages supérieurs de fusées, eux, sont vidangés de leur carburant. Il existe la possibilité d'effectuer des tirs laser sur les débris pour les vaporiser ou alors les freiner afin de les désorbiter pour qu'il retombe dans l'atmosphère et s'y désintègre. Mais cette mesure n'est pas suffisante pour nettoyer toutes les orbites.

Toutefois, il n'existe pas encore de réglementation internationale dans ce domaine et chacun agit un peu selon son bon vouloir. Par conséquent, il est devenu nécessaire d'imposer des règles au niveau de l'ONU car la situation génère chaque année environ 250 nouveaux objets de plus par an de 10 cm de diamètre. L'*Inter Agency Space Debris Coordination Committee* (IADC, qui regroupe les plus grandes agences nationales) joue un rôle important dans ce contexte. L'espace a apporté bon nombre de bénéfices en science et il est entré dans le quotidien de chacun à travers les

COMMENT DÉCLENCHER
UNE GUERRE SPATIALE...



transmissions par satellite, la télévision, la météorologie, la cartographie ou l'observation de la Terre. Ainsi, aujourd'hui, bon nombre d'activités humaines dépendent des satellites qui gravitent au-dessus de nos têtes. C'est pour cela qu'il est essentiel de prendre les mesures adéquates pour assurer la poursuite de ces activités et assurer la sécurité de l'accès à l'espace. *sb*

Pourquoi l'espace ne peut-il être utilisé comme poubelle géante ? Les trous noirs pourraient être un bon moyen de se débarrasser de tout ça, bien qu'ils soient situés à une bonne distance de la Terre ...

Utiliser l'espace comme poubelle géante peut sembler résoudre bien des problèmes rencontrés sur Terre avec le stockage ou l'incinération des déchets de toutes sortes. Les trous noirs sont toutefois des bennes à ordures trop distantes (le plus proche se trouvant probablement au centre de notre galaxie, à 26 000 années-lumière), mais on pourrait utiliser le Soleil comme incinérateur, notamment pour les objets les plus encombrants tels que les déchets radioactifs.

On peut opposer deux objections à une telle activité. D'abord, le prix d'un lancement spatial est encore trop élevé par rapport à celui du stockage ou de l'incinération sur Terre. La mise en orbite avec une fusée de type Ariane 5 coûtera donc entre 30 000 et 50 000 francs par kilo de déchet. Ensuite, les risques liés à l'explosion de la fusée lors du lancement des déchets dangereux ne sont pas négligeables. Il serait fâcheux de saupoudrer l'atmosphère terrestre de plusieurs tonnes de matériaux radioactifs. *fk*

La mission BepiColombo doit partir pour Mercure en 2012. Qu'est-ce qu'espèrent trouver les astronomes à la surface de cette planète ?

L'objectif de la recherche planétaire est de comprendre l'origine et l'évolution du système solaire. Avec la mission Rosetta, partie le 2 mars 2004 en destination de la comète Churyumov-Gerasimenko, l'Agence spatiale européenne (ESA) conduit un programme qui va analyser une partie de la matière primordiale de notre système solaire qui se trouve dans les zones froides de celui-ci. En revanche, l'exploration de Mercure devrait nous enseigner comment les planètes se sont formées dans la partie interne et la plus chaude de la nébuleuse protosolaire à l'origine de notre système.

Mercury est une planète extrême de notre système solaire. Elle est la plus proche du Soleil et la plus dense de tout le système solaire. Depuis sa formation, elle est sujette aux plus hautes et plus grandes variations de températures que n'importe quel objet du système solaire. Dans sa partie nocturne, il fait entre -180 et -140°C , alors que sur la face éclairée, la chaleur monte entre 300 et 350°C . Les effets de marée, dus à la proxi-

mité du Soleil, ont influencé sa rotation. Quant à sa surface, elle a été altérée durant la phase de refroidissement et sa composition chimique peut avoir été modifiée par des bombardements lors des premiers instants de son histoire.

Beaucoup d'aspects de l'histoire de Mercure restent néanmoins controversés. En effet, cette planète est caractérisée par une surprenante combinaison de propriétés différentes des autres planètes du système solaire. La configuration de sa rotation et de son orbite, la nature et la taille de son cœur, sa topographie, la prédominance de terrains volcaniques la rendent très différente de la Lune, mais plus proche de Mars qu'il n'y paraît. En revanche, sa structure interne semble présenter un grand cœur métallique, plus semblable à celui de la Terre. Par ailleurs, Mercure n'a pas d'atmosphère stable. L'environnement gazeux de la planète, composé de 98% hélium et de 2% hydrogène, est décrit comme une exosphère variable en densité et en composition en fonction de la distance de Mercure par rapport au Soleil. On estime la pression à la surface à environ 10 ou 15 bars.

La mission BepiColombo se place donc dans la logique du programme d'exploration planétaire de l'ESA mais avec en plus un caractère très interdisciplinaire intéressant. Cette mission va non seulement étudier la formation et l'évolution de planètes proches d'une étoile, caractériser dans le détail Mercure (géologie, minéralogie, densité, structure interne, composition chimique de surface, structure et dynamique du champ magnétique, environnement interplanétaire en orbite, etc.), mais aussi tester la théorie de la relativité et même explorer les limites d'autres théories de la gravitation. De par sa proximité avec le Soleil et sa grande vitesse sur son orbite, Mercure est en effet plus affecté par des effets relativistes que toutes autres planètes de notre système solaire. *sb*

Comment devient-on astronaute? Faut-il encore avoir une vue parfaite ?

Pour un Européen, ressortissant d'un des 16 Etats membres (Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Irlande, Italie, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Espagne, Suède, Suisse et Royaume-Uni) de l'Agence spatiale européenne (ESA), la seule opportunité de devenir astronaute est de participer aux campagnes de sélection. Jusqu'alors, il n'y en a eu que deux, la première en 1978 et la seconde en 1990/1991. Actuellement, le corps des astronautes européens est constitué de 13 astronautes et il n'est malheureusement pas question de l'élargir avant 2006/2007 au plus tôt. Le processus de sélection des astronautes est basé sur des critères adaptés aux différents types de missions planifiées. Les candidats astronautes sont présélectionnés dans les Etats membres et finalement choisis par l'ESA. Lors de la campagne 1991/1992, la Suisse avait retenu 5 candidats.

Voici le profil exigé lors de la dernière campagne de recrutement de

l'ESA: Le candidat doit être ressortissant d'un Etat membre de l'ESA. Des études universitaires achevées en sciences naturelles, en sciences de l'ingénieur ou en médecine sont indispensables. Ces études doivent être complétées par trois ans d'expérience professionnelle menées d'une façon indépendante. Des capacités intellectuelles et manuelles (techniques et expérimentales) de même qu'une bonne connaissance de l'anglais sont exigées. L'âge idéal est compris entre 27 et 37 ans. Finalement, il convient de passer une importante série de tests médicaux complets, pour tester les systèmes musculaire, cardiovasculaire et vestibulaire et posséder une excellente vue est indispensable. Pour ceux qui disposent de la nationalité américaine, les chances de devenir astronaute sont un peu plus élevées qu'en Europe puisque la NASA procède régulièrement à des campagnes de sélection (environ tous les deux ans). *sb*

Qu'est-ce que mangent les astronautes dans l'espace ?

Lors des premiers vols spatiaux dans les années 1960, les menus des astronautes étaient très limités et pas toujours très appétissants. Les aliments se présentaient alors sous forme de cubes à croquer, de poudres auxquelles il fallait ajouter de l'eau ou encore de liquides et pâtes dans des tubes en aluminium. Les astronautes s'en étaient d'ailleurs plaint.

Avec l'amélioration des emballages au fil des années, la qualité de la nourriture et des menus s'est vite accrue. A la fin des années 1960, les astronautes ont eu des choix de menu tels que cocktail de crevettes, poulet, légumes, purée de pommes, pudding. Les astronautes des missions Apollo, celles qui ont emmené les premiers hommes sur la Lune, ont été les premiers à disposer d'eau chaude. Cela a facilité la réhydratation des aliments et amélioré considérablement le goût de la nourriture.

Au milieu des années 1970, Skylab, petite station spatiale américaine, offrait plus de place aux astronautes que les précédents véhicules spatiaux. L'équipage pouvait ainsi manger à plusieurs autour d'une table et surtout disposer de beaucoup plus de place pour stocker la nourriture, pour les systèmes de chauffage d'eau ou encore pour conserver au froid les aliments. Se nourrir dans l'espace est alors devenu une opération très conventionnelle, les astronautes utilisant couteaux, fourchettes, cuillères et une paire de ciseaux pour ouvrir les sachets contenant la nourriture.

Aujourd'hui, la nourriture des astronautes ne diffère pas de celle que nous trouvons dans nos assiettes tous les jours. Les menus sont équilibrés et préparés par l'astronaute lui-même avec les conseils d'un diététicien. Les astronautes de la navette disposent donc d'un choix de menu extrêmement large. Néanmoins, tous les sept jours, les menus se répètent. Dans la navette, les astronautes disposent d'eau chaude et d'un four pour préparer leur repas. Pour celui-ci, ils utilisent un plateau spécial qui tient les récipients qui contiennent la nourriture et les empêche de flotter

dans la cabine puisque, contrairement à la maison, ils se trouvent en état d'apesanteur. *sb*

Comment les astronautes se lavent-ils et comment dorment-ils ?

En ce qui concerne la toilette des astronautes, elle est un peu plus sommaire que sur Terre. L'eau est utilisée en petites quantités et dans des endroits prévus à cet effet. Les astronautes se lavent donc les dents, les cheveux, etc. Mais dans la navette spatiale, qui effectue des missions d'une durée maximale de 15 jours, il n'est pas possible prendre de douche, ce qui était en revanche faisable à bord de la station russe MIR ainsi que sur la Station spatiale internationale. Petit détail: dans l'espace, l'eau ne coule pas, elle se présente toujours sous la forme de gouttes parfaitement rondes de différentes tailles. Les astronautes se vaporisent donc le visage ou le corps lorsqu'ils se lavent. Un système aspire ensuite l'eau usée pour la recycler.

Pour dormir, les astronautes ne disposent pas d'une chambre ou d'un endroit particulier. Dans la navette, il y a un espace, un niveau au-dessous du cockpit, où les astronautes mangent, travaillent et dorment. Pour dormir, chaque astronaute a son propre sac de couchage qu'il peut fixer, à l'aide de points d'attache velcro, où il le désire. Comme il n'y a pas de haut et de bas en apesanteur, les astronautes utilisent toutes les parois de leur habitacle pour fixer leur sac de couchage, certains apprécient même de dormir en flottant dans la navette. *sb*

Comment fait-on avancer les fusées ?

Dans le domaine spatial, le rôle d'une fusée est de transporter une charge utile (satellite, sonde, capsule habitée) au-delà de l'atmosphère et de lui donner une vitesse suffisante pour la mettre soit en orbite autour de la Terre, soit l'envoyer dans les confins de l'espace.

Le principe sur lequel est basé le fonctionnement des fusées est celui de l'action et de la réaction. Bien que la propulsion par réaction soit connue et mise en pratique depuis l'Antiquité, elle n'a été interprétée sur le plan théorique qu'à la fin du XVII^e siècle. C'est à cette époque qu'Isaac Newton a énoncé le principe de l'action et de la réaction qui repose sur une loi naturelle, dite de la conservation de la quantité de mouvement. Ce principe signifie qu'à toute action correspond une réaction égale et de sens opposé.

Si la fusée a été employée sporadiquement pendant près de 1500 ans, elle est restée, jusqu'au XX^e siècle, un engin de guerre peu usité ou un objet de divertissement. L'application du principe de la propulsion par réaction aux voyages dans l'espace n'a été proposée qu'à la fin du XIX^e siècle par le Russe Konstantin Tsiolkovski (1857-1935) et les premiers

moteurs-fusées expérimentaux n'ont été construits qu'au début du XX^e siècle. Toutefois, c'est essentiellement par les importants efforts consentis durant les deux guerres mondiales que l'aéronautique est passée du rêve à la réalité. Les pionniers de l'étude des fusées contemporaines ont été Konstantin Tsiolkovski, Robert Goddard (1882-1945) aux Etats-Unis, Robert Esnault-Pelterie (1881-1957) en France, Hermann Oberth et Wernher von Braun (1912-1977) en Allemagne.

Le moteur-fusée constitue un système autonome: il emporte les substances (appelées ergols) nécessaires à son alimentation et est capable de fonctionner dans l'atmosphère comme dans le vide. Son déplacement repose sur l'éjection, en sens opposé, de gaz. Ainsi la fusée éjecte des gaz vers l'arrière et se propulse par réaction. La poussée, la force créée par un moteur-fusée, résulte de l'éjection d'une certaine masse de gaz à une certaine vitesse. Sa valeur est donnée par la relation:

$$\text{Poussée (N)} = \text{débit de masse éjectée (kg/s)} \cdot \text{vitesse d'éjection (m/s)}$$

Dans un moteur-fusée, le carburant est brûlé dans la chambre de combustion qui est équipée dans sa partie inférieure d'une tuyère (canal d'éjection des gaz). La combustion produit de fortes quantités de gaz en expansion qui exercent des forces dans toutes les directions. Celles qui poussent sur les parois latérales de la chambre de combustion s'équilibrent mutuellement. En revanche, celles qui agissent sur la paroi supérieure produisent une force qui n'a pas de contrepartie puisque la tuyère est un canal ouvert vers le bas. La résultante des forces exercées sur la chambre de combustion est donc dirigée vers le haut ce qui propulse la fusée. C'est le même principe qui intervient lorsque l'on gonfle un ballon. Si on le maintient fermé, rien ne se passe. Les forces de pression sur les parois internes du ballon se compensent mutuellement. En revanche, si on ouvre une valve, l'air sort brutalement et crée une poussée qui propulse le ballon.

C'est généralement en faisant interagir deux ergols que l'on obtient la réaction chimique exothermique (qui dégage de la chaleur) et l'éjection de gaz recherchées. Un tel couple porte le nom de propergol. Parmi les ergols, il faut encore distinguer les combustibles (c'est-à-dire les substances réductrices comme l'hydrogène, le kérosène, l'hydrazine, le diméthylhydrazine dissymétrique (UDMH) ou l'aluminium) et les comburants (les substances oxydantes comme l'oxygène, le peroxyde d'azote, l'acide nitrique ou le perchlorate d'ammonium).

Par ailleurs, il existe des fusées à propergols liquides ou solides. Dans le premier cas, certains combustibles et comburants peuvent être conservés à température ambiante (hydrazine, peroxyde d'azote), mais d'autres exigent une température de -200°C (oxygène et hydrogène, par exemple). Les ergols solides, eux, ressemblent à une pâte caoutchouteuse où combustible et comburant sont bien mélangés. Ces derniers peuvent être stockés et brûlés dans le moteur même.

Un lanceur (ou fusée) possède aujourd'hui plusieurs étages pour une raison simple. Cela lui permet de larguer du poids devenu inutile au cours de sa progression vers l'espace et d'optimiser ainsi la propulsion. Au départ, en raison de son poids important (ses réservoirs sont remplis de carburant), il a besoin d'une poussée considérable qui est développée par un premier étage équipé de moteurs lourds. Lorsque celui-ci a atteint sa vitesse maximale et épuisé tout son carburant, il cesse de fonctionner et se sépare du reste du lanceur devenu un poids mort. Le deuxième étage prend alors le relais. Il est pourvu d'un moteur plus léger, mais il doit accélérer une masse devenue beaucoup moins lourde aussi. *sb*

Les extraterrestres peuvent-ils venir nous rendre visite ?

On ne peut pas exclure que les extraterrestres existent et qu'un de leur vaisseau puisse un jour se poser sur Terre, mais on est en droit de douter de la perspective de visites fréquentes et surtout de la possibilité que ces vaisseaux retournent par la suite sur leur planète d'origine. Les distances entre les étoiles sont en effet énormes. La lumière elle-même, dont la vitesse représente une limite infranchissable, met près de 5 ans pour faire le trajet qui sépare le Soleil d'*alpha Centauri*, l'étoile la plus proche. Donc, si l'on suppose que la civilisation extraterrestre la plus proche de nous vive autour d'un astre situé à 10 années-lumière (hypothèse très improbable), il faudrait au moins 20 ans à un équipage pour effectuer l'aller-retour à la vitesse de la lumière. En accord avec la loi de la relativité restreinte, le voyage serait instantané pour les gens à bord du vaisseau, mais, à leur retour sur leur planète, ils trouveraient des gens 20 ans plus vieux qu'au moment de leur départ. Le paradoxe des jumeaux reste valable même pour des jumeaux extraterrestres.

En réalité, le scénario décrit ci-dessus est impossible, car on ne peut pas accélérer instantanément jusqu'à la vitesse de la lumière. Cette dernière est même inatteignable par autre chose que la lumière. L'homme supporte mal des accélérations supérieures à celle de l'attraction terrestre. On suppose que le phénomène est le même pour nos collègues d'outre-espace. Le voyage devra donc s'effectuer en deux temps. Il commencera par une accélération raisonnable durant la première moitié du trajet, suivie par un freinage équivalent pendant la deuxième partie (l'idée étant d'éviter de s'écraser sur la planète hôte, ce qui constituerait un premier contact déplorable avec une nouvelle forme de vie).

Dans ces conditions, pour en revenir aux jumeaux, avec une accélération égale à l'accélération terrestre, le temps nécessaire au trajet vécu par le voyageur serait de 9 ans et demi. Quant au frère resté sur sa planète, il aura vieilli de 24 ans. Cet exemple ne constitue pas encore une preuve de l'impossibilité de tels trajets, mais il illustre bien l'énorme contrainte à l'exploration de l'univers que représente la relativité restreinte. Et il ne

faut pas oublier que s'il existe une vie intelligente ailleurs que sur Terre (ce qui est probable), elle a beaucoup de chance de se trouver bien au-delà de ces 10 années-lumière.

Il reste encore une autre possibilité, offerte par la relativité générale cette fois, mais elle est encore plus spéculative. Deux points très éloignés, situés aux confins de l'univers, pourraient en effet être reliés par un fantastique raccourci, appelé «trou de ver». Le passage au travers de ce raccourci serait instantané, résolvant du même coup les problèmes évoqués plus haut (c'est le moyen de transport qu'utilise Jodie Foster pour son voyage dans le film *Contact*). Il n'existe toutefois strictement aucun indice observationnel suggérant l'existence de ces trous de ver qui restent donc de pures constructions théoriques.

Quoi qu'il en soit, cette forme de voyage est, elle aussi, très probablement irréalisable en pratique. D'abord, les trous de ver (qui sont constitués de deux trous noirs) déchirent tout ce qui les traverse – sauf si leur masse est de l'ordre de celle d'une galaxie –, rendant le voyage peu exploitable. Il est donc impossible que l'homme construise un trou de ver par ses propres moyens. Reste la possibilité qu'ils existent déjà et soient en quelque sorte une propriété de notre univers. Il suffirait alors de consulter la «carte routière des trous de ver» avant chaque voyage. Comme dans le film *Contact*. *sp*

Quelles sont les trajectoires utilisées pour l'envoi dans l'espace de satellites géostationnaires ?

Les satellites terrestres sont envoyés autour de la Terre selon différents types d'orbites (basses, hautes, polaires, géocentriques, etc) afin qu'ils remplissent leur mission au mieux. Pour atteindre l'orbite géostationnaire, on commence par envoyer une fusée en orbite circulaire à basse altitude (à moins de 1000 km d'altitude). A ce stade, on largue un étage pour réduire la masse de la fusée. On allume ensuite le deuxième étage dont la tâche est d'apporter le satellite sur une orbite de transfert géostationnaire. Cette dernière représente une ellipse qui frôle la Terre à son endroit le plus proche (périgée) et possède la bonne altitude à son point le plus éloigné (apogée). Arrivé à l'apogée, le deuxième étage est lâché et le troisième et dernier est enclenché afin de fournir suffisamment d'énergie au satellite pour entrer sur une orbite circulaire.

Les satellites en orbite géostationnaire tournent à la même vitesse que la Terre sur elle-même, puisqu'ils restent toujours au-dessus du même point. Ils bouclent donc une rotation en 23 heures et 56 minutes, soit en $P = 86\,164$ secondes. Connaissant la valeur de la constante universelle de gravitation ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$), la masse de la Terre ($M = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) ainsi que les équations de l'accélération centrifuge ($v^2/r = GM/r^2$) et de la vitesse sur une orbite circulaire ($v = 2\pi r/P$), on peut

déduire l'altitude de l'orbite géostationnaire r . Résultat: $r = 36\,000$ kilomètres. *rb*

Quelle serait la durée de vie d'un astronaute perdu dans l'espace ?

A l'heure actuelle, l'autonomie d'un scaphandre spatial est de l'ordre d'une dizaine d'heures. *pn*

INDEX

- 51 Peg 83
55P/Tempel-Tuttle 41
- aberration chromatique 146
accrétion 3-4, 53-54
Adonis 49
âge de l'univers 102-104
albédo 17
ALH84001 48, 62
Alpha Centauri 75, 77
Amas de la Vierge 91
Amas local 91
Andromède 89-90
anneaux de Saturne 64-66
années
– sidérales 8, 20
– tropiques 8, 20, 137
apesanteur 167
Aristote 3
astrométrie 74
astronaute 165-167
astrophotographie 146-147
atmosphère 1, 3-5, 10, 24, 26, 30-31,
45, 55-56, 62-64, 67, 73-74, 86,
147-149, 162-163
azote 2-3, 5, 62-63, 148
- Bételgeuse 73
big bang 2, 101, 103-108, 111-112
big crunch 110
- Callisto 68-70
carbone 2, 34, 36
ceinture
– d'astéroïdes 4
– de Kuiper 43, 72
champ magnétique 9-10, 32, 33
Charon 43, 53, 55
comète(s) 41-43
constante de Hubble 109
couleurs 1, 24, 75
couple Pluton-Charon 54
courbure de l'espace-temps 100,
121-122, 130, 140
Croix du Sud 8
croûte terrestre 2, 7, 9, 11
crues du Nil 80, 136
cycle(s)
– du Saros 20
– solaires 31-32
- débris spatiaux 161-163
Deimos 44
deutérium 5, 101
dinosaures 46
disque protoplanétaire 53
distance
– Terre-Soleil 24, 31, 36
– Terre-Lune 13-14
- eau 3-6, 31, 42, 48, 55-56, 62-64,
68, 70, 85, 147-149
éclipse 13, 24-26

écliptique 8, 16, 19-20, 22-24, 44
 effet tunnel 116-117

équateur 3, 5, 8, 12, 21, 23, 143

équation du temps 138-139

équinoxes 37

éruptions solaires 33

étoile(s)

– à neutron 119, 124

– binaires 17, 126

– doubles 77-78, 84

– filantes 41

– Polaire 8, 22, 144, 146-147

Europa 16, 55

Europe 68-70

expansion de l'univers 102, 104,
 106, 108-110

extraterrestres 169

fer 2, 4, 30, 48

flash de l'hélium 34-35

fontaines blanches 131

force

– centrifuge 5

– gravitationnelle 2-3, 5-6, 12,
 16, 29, 30, 35, 44, 54, 99, 119

fusées 161-164, 167-168

Ganymède 16, 68-70

gaz carbonique 3, 42, 56, 62-64,
 147-148

géante rouge 34-35, 79-80

glace 4

hélium 2, 29, 31, 34-35, 56, 67, 76,
 78, 101, 165

hydrogène 2, 5, 29, 31, 34-35, 56,
 67, 76, 78, 94, 101, 165, 168

infini 97, 101, 106

interférométrie 148

Io 68-70, 157

jour(s) 7, 135, 138

– mercurien 58-59

– solaire 39

Jupiter 2, 4, 16, 29, 45, 49, 51, 55,
 57-58, 66, 68-71, 85, 155-157

lentille(s) gravitationnelle(s) 25,
 92-93, 115

lever

– héliaque 80

– de Lune 22

loi de Kepler 22

longitude 9, 143

lumière

– cendrée 18

– de la vitesse 169

– infrarouge 1, 101, 108, 128, 147,
 149

– ultraviolette 1, 5, 10, 56, 128, 149

lunaisons 20, 137

lunette 147

magnitude 76

manteau 2-4, 7, 9, 11, 42, 55

marée(s) 6, 8, 14-16, 53-55, 133

Mars 2, 4, 29, 34, 44-45, 48-49, 51,
 55-57, 59, 61, 63-64, 67, 71, 73,
 77, 155, 165

matière sombre 97

Mercure 2, 51-52, 54-60, 71-72, 155,
 164-165

méridien de Greenwich 9

météo 10

méthode de Saint-Hilaire 143-144

mois 137-138

molécules organiques 4, 42

- naine(s)
 – blanche 34, 36
 – brunes 29
 nébuleuse(s) 2, 4-5, 94
 – planétaire 34
 – protoplanétaire 55
 – protosolaire 164
 – solaire 67
 Neptune 2, 44, 52, 57-58, 66, 70-72
 neutrinos 97, 108, 110
 nickel 2, 4, 49
 nouvelle lune 21-22
 noyau(x) 2, 4, 9, 11, 43, 55
 nuage
 – d'Oort 43
 – de Magellan 89-91
 nutation lunaire 23
- océan(s) 1, 3-4, 6, 68, 70
 ombres volantes 26
 orbite lunaire 14, 19-20, 22, 138
 oxygène 2-3, 5, 30-31, 56, 62-63, 86, 168
 ozone 1, 5, 56, 86
- Pangée 8
 paradoxe des jumeaux 140
 parallaxe 12, 153-154
 phases lunaires 22
 Phobos 44
 planètes flottantes 87
 planétésimes 3-4
 pleine lune 18-23, 137
 Pluton 43, 52-53, 55, 70-72, 77
 pôle(s) 3, 5-6, 8, 9
 – magnétique 9
 précession des équinoxes 8, 81
 processus triple alpha 34, 36
 programme SETI 150
 Proxima Centauri 75
- quasar(s) 92, 121, 126, 128
- radioactivité 2-4, 34
 Rasoir d'Occam 112
 rayon de Schwarzschild 119-120, 127, 129, 131
 rayonnement cosmologique 99, 101, 112
 rayons gamma 108
 réactions thermonucléaires 29-30, 76, 79
 relativité restreinte 141
 rotation
 – du Soleil 32
 – terrestre 6-8, 10, 15-16, 23
- saison(s) 8, 22, 37, 138
 Saturne 2, 4, 51-52, 55, 57-58, 64-66, 70-71, 147-148, 154-156
 scintillation 26
 seconde 135
 séquence principale 78-79
 sextant 143
 Shoemaker-Levy 9 46
 Sirius 73, 75, 77, 80-81, 136
 solstice 37
 sphère des fixes 154
 supergéante rouge 73
 supernova 121
 système de Copernic 153
- taches solaires 31-33
 tachyons 113-114
 télémétrie laser 12, 14, 47
 télescopes spatiaux 149
 Titan 57, 68
 topologie 99
 trou
 – blanc 131
 – noir de Kerr 123

– noir de Schwarzschild 123

– de ver 132, 168

Tunguska 45, 46

unité(s) astronomique(s) 144, 155

univers parallèles 104, 111

Uranus 2, 44, 51-53, 57-58, 66, 71

vent solaire 41

Vénus 2, 29, 45, 49, 51-57, 59-60,

62, 71, 130, 155

vide 98, 100, 114

vie 48, 56, 60, 62-64, 68, 70, 85-86

vitesse de la lumière 86, 98, 113-117, 122, 131, 140-141, 156

VLT 149

volcanisme 2-3, 10, 68, 69, 165

vols spatiaux 166

voyage dans le temps 139

zodiaque 81