

proportionnelle à la concentration des gaz dissous et ne semble pas limitée. Nous avons donc émis l'hypothèse que le gaz agit sur des sites particuliers, présents en quantités limitées : le gaz inerte se lierait spécifiquement à des récepteurs membranaires en modifiant leur activité – on parle de modulateurs allostériques. Si les molécules de gaz se lient effectivement à de telles protéines membranaires, elles agiraient comme une drogue : des molécules pharmacologiques empêchant la fixation des gaz sur ces récepteurs devraient en masquer l'effet. Pour le savoir, nous devons préciser le mécanisme d'action de l'azote sous pression.

Depuis le début des années 2000, nous étudions les mécanismes de neurotransmission dans les ganglions de la base, des structures du cerveau impliquées dans la régulation des processus moteurs et cognitifs (voir l'encadré des pages 34 et 35). Or ces mécanismes sont perturbés par les gaz inertes sous pression. Les ganglions de la base contiennent plusieurs types de neurones : des neurones GABAergiques, libérant du GABA (l'acide gamma amino butyrique), un neuromédiateur inhibiteur, qui ralentit l'activité des neurones où il se fixe ; des neurones dopaminergiques, ayant des récepteurs du GABA et libérant de la dopamine excitatrice ou inhibitrice selon le récepteur où elle se fixe ; des neurones glutamatergiques excitateurs libérant du glutamate. En outre, les ganglions de la base sont divisés en plusieurs noyaux : la substance noire *pars reticulata* et *pars compacta*, le striatum et le thalamus. Les neurones GABAergiques de la substance noire *pars reticulata* émettent des projections vers les neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta* et vers les neurones glutamatergiques du thalamus (c'est la voie nigrothalamique). Les neurones dopaminergiques de la *pars compacta* se terminent dans le striatum, définissant la voie dite nigrostriée. Enfin, les neurones glutamatergiques du thalamus sont reliés au cortex : c'est la voie thalamocorticale. Or la voie nigrostriée, la voie nigrothalamique et la voie thalamocorticale modulent les fonctions motrices et cognitives.

Des effets inverses

En 2001 et 2002, grâce à des méthodes de dosage des substances neurochimiques libérées dans ces régions du cerveau de rat, nous avons montré que la pression en mélange hélium-oxygène (sans gaz narcotique) active directement les récepteurs GABA des neurones GABAergiques de la substance noire *pars reticulata* et de la substance noire *pars compacta* ; l'inhibition que ces neurones exercent sur les neurones dopaminergiques de la substance noire et sur les neurones glutamatergiques du thalamus est levée, si bien que les concentrations de dopamine dans le striatum augmentent et, par conséquent, l'activité motrice. À l'inverse, l'azote active les récepteurs GABA des neurones dopaminergiques de la voie nigrostriée entraînant une inhibition de ces neurones et des neurones glutamatergiques. Moins de dopamine est libérée, ce qui entraîne une diminution de l'activité motrice.

Ainsi, la pression et les gaz narcotiques ont des effets opposés dans les ganglions de la base du rat. L'azote favoriserait la neurotransmission GABA de la substance noire, entraînant une hypoactivité motrice. Ce serait une des causes de la narcose à l'azote. La pression par elle-même augmenterait l'activité motrice et corticale : cela expliquerait le syndrome nerveux

des hautes pressions. Qui plus est, en 2002, nous avons montré que les effets de la pression et de l'azote dépendent de l'agencement des unités constitutives des récepteurs GABA des neurones GABAergiques et des neurones dopaminergiques. Certaines associations de sous-unités sont davantage sensibles à la pression (on les trouve surtout dans les récepteurs GABA des neurones GABAergiques), d'autres à l'azote (sur les récepteurs GABA des neurones dopaminergiques).

Plusieurs médiateurs perturbés

Les gaz inertes sous pression agissent aussi sur d'autres neurotransmissions. Sous pression d'hélium, les acides glutamique et aspartique et la sérotonine – des neurotransmetteurs excitateurs qui modifient l'activité des ganglions de la base – sont libérés. Cependant, alors que l'augmentation de la libération de dopamine est proportionnelle à la pression, la libération de ces neurotransmetteurs peut être soudaine. En outre, en 2005, nous avons montré qu'avec des gaz narcotiques, tel l'azote, l'augmentation de pression déclenche, outre la diminution de dopamine, une perturbation des libérations d'acide glutamique et de sérotonine ; les concentrations d'acide aspartique ne changent pas. Bien entendu, les effets des gaz inertes sous pression ne se limiteraient pas à ces seuls neurotransmetteurs. Plusieurs modifications neurochimiques existeraient, perturbant les fonctions motrices et cognitives de la personne narcosée.

De surcroît, quand une personne subit souvent les effets de la narcose, les réactions neurochimiques se modifieraient durablement. En 2005, nous avons observé chez l'animal, après plusieurs expositions à une narcose modérée (équivalente à celle que l'homme subit vers 30 mètres de profondeur), que la dopamine augmente dans le striatum au lieu de diminuer. Le gaz qui agit sur les récepteurs GABA modifierait leur activité ou leur répartition au fil des plongées. Nous cherchons aujourd'hui à savoir si ces processus sont irréversibles ou non.

Le mécanisme protéique d'action spécifique des gaz inertes sous pression n'exclut pas le mécanisme lipidique d'action diffuse. Ainsi, la narcose perturberait l'activité des neurones comme le fait un agent pharmacologique. Nous voulons désormais déterminer si les narcoses intenses et fréquentes sont toxiques pour les neurones. Pour limiter les accidents de plongée, il est important de préciser les mécanismes neurochimiques provoqués par ces gaz inertes sous pression. Mais, n'oubliez pas, si les poissons qui vous entourent commencent à changer de couleurs et de formes, remontez doucement vers la surface : les symptômes de la narcose disparaîtront quand l'azote aura été éliminé de votre cerveau...

Jean-Claude ROSTAIN est neurophysiologiste et neurochimiste au CNRS, dans l'unité de recherche Physiopathologie et action thérapeutique des gaz sous pression de l'Université de la Méditerranée à Marseille.

B. BROUSSOLLE et J.-L. MELIET, *Physiologie et médecine de la plongée*, Ellipse, 2006.

P. BENNETT et J.-C. ROSTAIN, *Inert gas narcosis*, in *Physiology and Medicine of Diving* et *The high pressure nervous syndrome*, in *Physiology and Medicine of Diving* cinquième édition, Saunders, London, pp. 300-357, 2003.



1906-2006

INSTITUT OCÉANOGRAPHIQUE

Fondation Albert I^{er}, Prince de Monaco

La Fondation a 100 ans

Le 14 avril 1906 à Monaco, SAS le Prince Albert I^{er} de Monaco crée la Fondation Institut océanographique.

La Fondation est un organisme de droit français comprenant l'Institut océanographique de Paris et le Musée océanographique de Monaco.

Elle a pour vocation l'étude et l'enseignement de l'océanographie et la diffusion des connaissances.



195 rue St Jacques
75 005 Paris
www.oceano.org



avenue St Martin
MC 98 000 Monaco
www.oceano.mc



La Fondation, reconnue d'utilité publique dès 1906,
peut recevoir des dons et des legs

Les exploits de *Hubble*

En espérant une dernière révision du télescope Hubble, les astronomes font le bilan de ses 16 années d'exploitation.

Mario Livio

P eu de télescopes ont eu autant de retentissement sur la recherche astronomique que le télescope spatial *Hubble*. Pourtant, son influence n'est pas celle qu'on lui attribue généralement. Il n'a pas permis de grandes découvertes, mais il a transformé en quasi-certitudes des hypothèses formulées d'après les résultats obtenus sur Terre. Il a conduit les théoriciens à revoir leurs modèles afin d'en élaborer de nouveaux, plus précis, expliquant les phénomènes astrophysiques avec beaucoup plus de détails. En bref, l'influence du télescope *Hubble* a été considérable, non pas parce qu'il s'est démarqué des autres instruments et techniques, mais, au contraire, parce qu'il a su s'intégrer à l'ensemble des dispositifs existants.

En avril 2006, le télescope a fêté son seizième anniversaire dans l'espace. Seize années au cours desquelles il a fourni aux astronomes une profusion de détails, et livré un aperçu des merveilles de l'Univers. Mais ses prouesses ont récemment été éclipsées par le débat relatif à son avenir. Avec le redémarrage des missions de la navette spatiale, les astronomes espèrent qu'une mission sera dédiée à la maintenance de *Hubble*. Si les astronautes ne le remettent pas en état, le télescope cessera de « vivre »

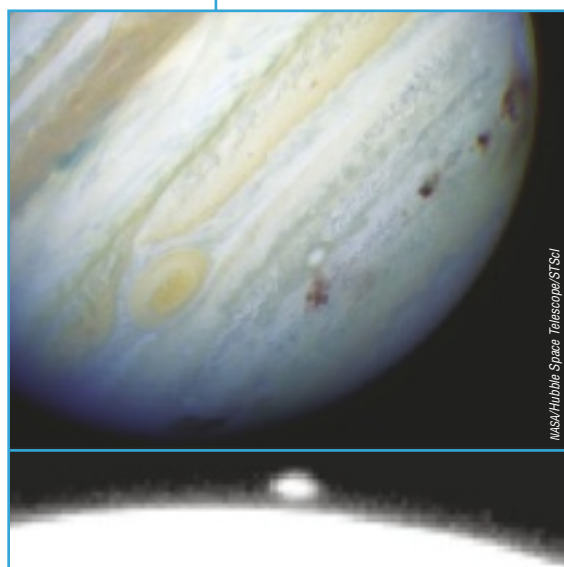
dès le milieu de 2008. L'imminence de cette échéance m'a incité à faire le point sur dix ans et demi de bons et loyaux services.

J'ai sélectionné les dix contributions qui me semblent les plus fascinantes : de la découverte des objets les plus petits, telles les planètes, jusqu'aux galaxies et à l'Univers dans sa globalité. Sélection personnelle et, je l'admets, certainement partielle. Il est quasi impossible de résumer toutes les contributions de *Hubble*. Au moment où j'écris ces lignes, son système d'archivage contient plus de 27 téraoctets de données et grossit à un rythme de 390 gigaoctets par mois. Ces données ont conduit à la publication de 6300 articles scientifiques. Qui plus est, le télescope ne cesse de produire de nouveaux résultats. En collaboration avec d'autres observatoires, *Hubble* a découvert, l'année dernière, deux nouveaux satellites de Pluton, une étonnante galaxie massive dans l'Univers primordial, et le compagnon planétaire d'une naine brune, elle-même à peine plus lourde qu'une planète. Grâce à *Hubble*, nous avons vu, pour la première fois, ce que nous devions nous contenter d'imaginer jusqu'à présent.

Durant la première mission d'entretien de *Hubble*, en décembre 1993, les astronautes Story Musgrave (*sur le bras déplié*), Jeffrey Hoffman (*dans la soute*) et leurs compagnons ont réglé le miroir initialement non fonctionnel, permettant au satellite de nous envoyer une moisson d'images.



1 Le grand crash de la comète



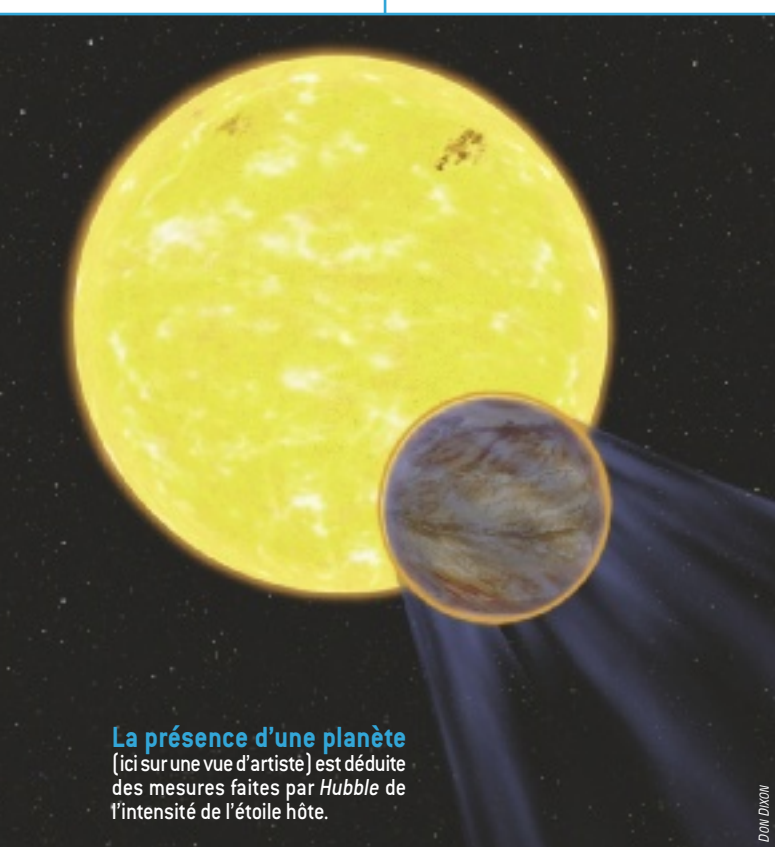
NASA/Hubble Space Telescope/STScI

Huit sites d'impact (certains se chevauchent ou sont à peine visibles) ont été repérés sur cette image de l'hémisphère Sud de Jupiter prise le 22 juillet 1994. En bas, un panache ressemblant à un champignon nucléaire, au-dessus de l'horizon de la planète, six minutes après l'impact du 16 juillet.

D'un point de vue cosmique, l'impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter fut anecdotique : la surface couverte de cratères des planètes rocheuses témoigne déjà du fait que le Système solaire est un champ de tir. En revanche, d'un point de vue plus humain, la collision a représenté une expérience exceptionnelle : une comète ne s'écraserait sur une planète qu'une fois tous les 1000 ans en moyenne.

Un an avant les déboires de Shoemaker-Levy 9, les images de *Hubble* avaient montré que la comète s'était scindée en une vingtaine de fragments, un « collier de perles ». Le premier fragment a percuté l'atmosphère de Jupiter le 16 juillet 1994, et le reste au cours de la semaine suivante. Les images ont montré des panaches ressemblant à des champignons nucléaires et s'élevant au-dessus de l'horizon de Jupiter, avant de retomber en moins de dix minutes après l'impact. Les « cicatrices » dues à ces impacts ont persisté durant des mois. La rareté des images suffirait à les rendre précieuses, mais ces clichés ont en plus soulevé la question de la composition de l'atmosphère de Jupiter. Sur un des sites de percussion, des ondes se sont propagées vers l'extérieur à une vitesse de 450 mètres par seconde. Il s'agirait d'ondes de gravité, et on pourrait comparer le système à celui d'un morceau de bois qu'on tente de maintenir sous l'eau et qui jaillit hors de l'eau avant d'y retomber. Si tel est le cas, les propriétés des ondes semblent indiquer que le rapport de l'oxygène sur l'hydrogène dans la couche de l'atmosphère jovienne où l'onde s'est propagée serait dix fois plus élevé que dans le Soleil. Or si Jupiter s'est formé par la fragmentation gravitationnelle du disque primordial de gaz et de poussière, comme le postulent certaines théories, il devrait avoir la même composition que le disque, et une composition similaire à celle du Soleil. La question reste ouverte.

2 Les planètes extrasolaires



La présence d'une planète (ici sur une vue d'artiste) est déduite des mesures faites par *Hubble* de l'intensité de l'étoile hôte.

Don Dixon

En 2001, la Société américaine d'astronomie a demandé aux planétologues de dire ce qui, selon eux, avait été la découverte principale des dix dernières années. Ils ont choisi la détection de planètes extérieures au Système solaire. Aujourd'hui les chercheurs en ont détecté environ 180. La plupart ont été trouvées grâce à des télescopes au sol qui suivaient les faibles oscillations que l'attraction gravitationnelle d'une planète exerce sur son étoile hôte. Cependant, ces observations ne donnent que la taille et l'ellipticité de l'orbite de la planète ainsi qu'une limite inférieure de sa masse.

Hubble a pris le relais en se focalisant sur le sous-ensemble des planètes dont le plan orbital est aligné avec notre ligne de visée, de telle sorte qu'en passant périodiquement devant leur étoile, elles en réduisent l'éclat, un événement que l'on nomme transit. *Hubble* a observé le premier transit planétaire, celui du compagnon de l'étoile HD 209458 ; on a ainsi obtenu l'information la plus détaillée dont on dispose pour une planète située en dehors du Système solaire. Elle est 30 pour cent plus légère que Jupiter, bien que son diamètre soit 30 pour cent supérieur, mais la cause de cet embonpoint reste encore inconnue. Les données de *Hubble* sont si précises qu'elles auraient révélé de grands anneaux ou des satellites massifs autour de la planète... s'ils avaient existé. Mais ce n'est pas le cas. Encore plus impressionnant, *Hubble* a fait les premières mesures de la composition d'un système stellaire voisin. L'atmosphère contient du sodium, du carbone et de l'oxygène, et l'hydrogène s'en échappe en créant une sorte de queue cométaire. Ces observations serviront aux astronomes qui recherchent des signes chimiques de vie dans l'Univers.

3 Agonies stellaires

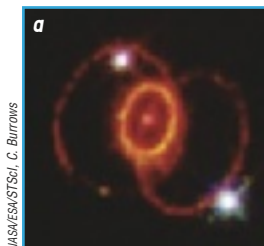
La théorie prédit qu'une étoile dont la masse est comprise entre 8 et 25 fois celle du Soleil terminera sa vie dans une explosion de supernova. Quand l'étoile a épuisé son combustible utilisable, elle perd le combat qu'elle a mené toute sa vie durant : éviter de s'effondrer sous son propre poids. Son cœur s'effondre pour former une étoile à neutrons (un vestige extrêmement dense et inerte) et les couches de gaz externes sont éjectées à une vitesse égale à cinq pour cent de celle de la lumière.

Toutefois, cette théorie a été très difficile à valider, car aucune supernova n'a explosé dans notre galaxie depuis 1680. À défaut, les astronomes ont suivi l'explosion, le 23 février 1987, d'une supernova dans le Grand Nuage de Magellan, une des galaxies satellites de la Voie lactée. *Hubble* n'était pas encore fonctionnel, mais trois ans plus tard, il a commencé à suivre la progression de l'événement. Il a rapidement détecté un système de trois anneaux autour de l'étoile qui avait explosé. L'anneau central semble représenter le rétrécissement d'un nuage de gaz en forme de sablier, et les anneaux plus larges représentent les bords de deux lobes en forme de goutte, apparus quelques dizaines de milliers d'années avant l'explosion. En 1994, *Hubble* a commencé à observer des taches devenir plus brillantes le long de l'anneau central, comme cela est prédit par la théorie : c'est le moment où la matière éjectée de la supernova a heurté l'anneau. Depuis, *Hubble* livre des informations sur la fin de la vie de cette étoile.

Contrairement à leurs homologues plus massives, les étoiles de type solaire mourraient plus gracieusement, en éjectant leurs couches gazeuses externes dans un processus non explosif qui durerait une dizaine de milliers d'années. Quand le cœur central brûlant de l'étoile est mis à nu, son rayonnement ionise le gaz éjecté, le faisant briller dans le vert (émis par l'oxygène ionisé) et le rouge (l'hydrogène ionisé). Le résultat est ce que l'on appelle, un peu à tort, une nébuleuse planétaire. On en connaît environ 2000 aujourd'hui. *Hubble* a révélé des formes extrêmement complexes avec une précision inégalée.

Certaines des nébuleuses présentent un jeu d'anneaux concentriques, qui indiquerait un processus d'éjection périodique. La période entre deux épisodes d'éjection (environ 500 ans) est trop longue pour être expliquée par des pulsations dynamiques (durant lesquelles l'étoile se contracte et se dilate, tirillée entre la gravité et la pression du gaz) et trop courte pour correspondre à des pulsations thermiques (où l'étoile est hors équilibre). La nature précise des anneaux observés reste à élucider.

Quand l'onde de choc de la supernova 1987 A a percuté un anneau de gaz préexistant, des taches brillantes sont apparues [a, observation de Hubble, b vue d'artiste].

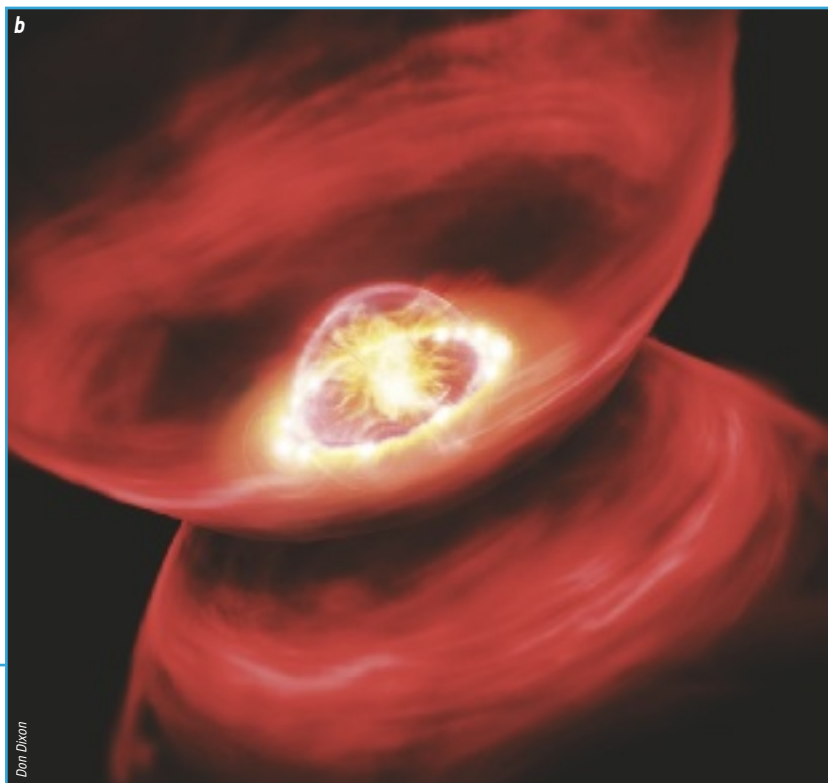


NASA/ESA/STScI, C. BUTTONS



NASA/ESA/HEIDT/STScI/AURA

La nébuleuse de l'Œil de Chat est l'une des nébuleuses planétaires parmi les plus complexes, sans doute alimentée par une étoile de type solaire en fin de vie.



Don Dixon

4 Naissances cosmiques

Depuis longtemps, les astronomes savent que des jets de gaz étroits sont caractéristiques de la naissance d'étoiles. Une étoile naissante peut émettre une paire de jets collimatés longs de plusieurs années-lumière. On ignore le mécanisme de ces émissions. Selon l'hypothèse la plus solide, un champ magnétique à grande échelle confère sa structure au disque de gaz et de poussière entourant l'étoile jeune. La matière ionisée circulant le long des lignes de champ magnétique serait projetée vers l'extérieur comme des perles sur des fils en rotation. Les observations de *Hubble* ont étayé ce modèle théorique en apportant la première preuve directe que ces jets sont effectivement issus du centre du disque.

Selon une autre hypothèse, invalidée par *Hubble*, les disques circumstellaires auraient été profondément enchâssés dans leurs nuages parents et auraient donc été impossibles à voir. En fait, *Hubble* a révélé des dizaines de disques protoplanétaires. En particulier, par un jeu de contraste, il a permis d'étudier en détail ceux dont la silhouette se profile devant les nébuleuses. Il apparaît que la moitié au moins de ces jeunes étoiles ont de tels disques, ce qui démontre que les matières premières de la formation planétaire sont omniprésentes dans la galaxie.



NASA, J. Bally, H. Throop, C. O'Dell

Ressemblant à des amibes déformées, des disques de poussière entourent les étoiles embryonnaires de la nébuleuse d'Orion. Chaque image représente 2,4 unités astronomiques au carré.

5 Archéologie galactique

Les astronomes pensent que les grandes galaxies, telles la Voie lactée et Andromède, ont grossi en absorbant d'autres galaxies plus petites. Les traces de ce passé confus devraient être inscrites dans l'arrangement, l'âge, la composition et la vitesse de leurs étoiles. *Hubble* a contribué à déchiffrer cette histoire, par exemple grâce à ses observations du « halo » stellaire d'Andromède, le nuage sphérique ténu d'étoiles et d'amas stellaires qui entoure le disque galactique principal. Les astronomes ont ainsi trouvé que les étoiles du halo ont des âges variés : les plus anciennes ont entre 11 et 13,5 milliards d'années ; les plus jeunes entre 6 et 8 milliards d'années. Ces dernières sont des enfants dans une maison de retraite ! Elles seraient venues d'une galaxie plus jeune (par exemple d'une galaxie satellite qui aurait été assimilée) ou d'une région plus jeune d'Andromède elle-même (à savoir le disque, qui aurait été perturbé par le passage d'une autre galaxie ou la collision avec une galaxie). Le halo de la Voie lactée ne contient pas beaucoup d'étoiles aussi « jeunes ». Ainsi, bien qu'Andromède et la Voie lactée aient des formes comparables, les images de *Hubble* suggèrent que les deux galaxies ont un passé très différent.

Des étoiles étonnamment jeunes sont visibles sur cette photographie de la banlieue d'Andromède (voir le cartouche). Elles résulteraient d'une collision entre galaxies. Plusieurs galaxies apparaissent à l'arrière-plan sur cette image.



6 Des trous noirs supermassifs à foison



Depuis les années 1960, les astronomes pensent que les quasars et autres noyaux galactiques actifs (les noyaux brillants et violents des galaxies) sont alimentés par des trous noirs géants qui dévorent la matière. Les observations de *Hubble* ont renforcé ce scénario. Presque toutes les galaxies observées en détail présentent un trou noir en leur cœur. Deux découvertes ont été particulièrement révélatrices. Tout d'abord, les images à haute résolution des quasars montrent qu'ils résident dans des galaxies elliptiques brillantes ou dans des galaxies en interaction, ce qui suggère qu'un certain nombre d'événements doivent se succéder selon une séquence donnée pour que le trou noir central soit alimenté. En outre, la masse du trou noir géant est étroitement liée à celle du bulbe sphérique d'étoiles qui entoure le centre galactique. Cela suggère que la formation d'une galaxie et d'un trou noir, ainsi que leur évolution sont étroitement liées.

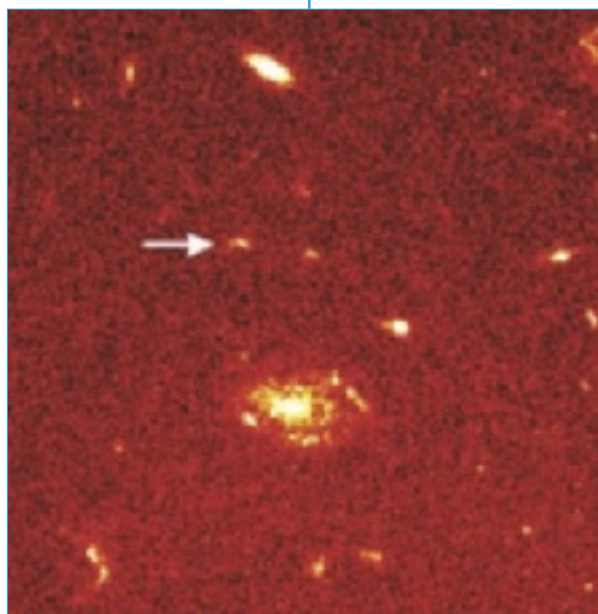
Ce jet de plasma, dont on pense qu'il serait produit par un trou noir de trois milliards de masses solaires, est émis par la galaxie M87.

7 Les plus grandes explosions

Les sursauts gamma sont de courtes flambées de rayonnement gamma qui durent de quelques millisecondes à quelques dizaines de minutes. Il y en a deux catégories, selon qu'ils durent plus ou moins de deux secondes ; les plus longs produisent des photons de plus basse énergie. D'après les données de l'Observatoire Compton de rayons gamma, du satellite à rayons X *BeppoSAX* et des observatoires au sol, les astrophysiciens ont attribué les sursauts de longue durée à l'effondrement du cœur d'étoiles massives à courte durée de vie, en un mot à un type de supernova. Mais on s'interroge : pourquoi seule une petite fraction des supernovae produit-elle des sursauts gamma ?

Hubble a montré que, tandis qu'on trouve des supernovae dans toutes les régions de formation stellaire, les sursauts gamma de longue durée sont concentrés dans les régions les plus brillantes où se trouvent les étoiles les plus massives. De plus, comparés aux galaxies hôtes des supernovae, les hôtes des sursauts gamma sont beaucoup plus faibles, plus irréguliers et moins riches en éléments lourds. Cela est important, car les étoiles massives pauvres en éléments lourds engendrent des vents stellaires plus faibles que ceux créés par leurs contreparties riches en éléments lourds. Durant leur vie, ces étoiles conservent l'essentiel de leur masse et quand elles disparaissent, elles sont plus lourdes. L'effondrement de leur cœur produit non pas une étoile à neutrons, mais plutôt un trou noir. En fait, les astronomes attribuent les sursauts gamma longs à des jets collimatés engendrés par des trous noirs en rotation rapide. Le facteur qui semble indiquer si l'effondrement d'un cœur donnera naissance ou non à un sursaut gamma serait la masse du progéniteur et sa vitesse de rotation au moment de la mort de l'étoile.

L'identification des sursauts gamma courts a été plus difficile. C'est seulement en 2005 qu'ils ont livré leurs secrets



La galaxie hôte du sursaut gamma 971214 ressemble à une petite tache (à la pointe de la flèche).

grâce aux satellites *HETE 2* et *Swift*. *Hubble* et l'Observatoire X *Chandra* ont montré que ces sursauts libèrent globalement moins d'énergie que les sursauts plus longs, et qu'ils se produisent dans des galaxies hôtes de types variés, y compris dans des galaxies elliptiques où il n'y a plus de formation d'étoiles. Apparemment, les sursauts courts ne sont pas associés à des étoiles massives de courte durée de vie, mais plutôt à leurs vestiges stellaires. Selon l'hypothèse la plus vraisemblable, ces sursauts courts se produisent durant la coalescence de deux étoiles à neutrons.

8 Le bord de l'espace

Une des principales préoccupations des astronomes est de remonter le plus loin possible dans le temps, jusqu'au Big Bang, pour comprendre comment notre galaxie et ses précurseurs se sont formés. Pour imaginer ce à quoi a ressemblé la Voie lactée depuis sa formation, les astronomes ont pris des clichés de galaxies à tous les stades de leur vie, de la petite enfance au grand âge. À cette fin, *Hubble* a, avec d'autres observatoires, cherché à repérer les galaxies les plus lointaines et donc les plus vieilles, en réalisant des expositions longues de petites portions du ciel : ce sont les programmes de recherche Champ profond de *Hubble*, Champ ultraprofond de *Hubble*, et GOODS (*Great Observatories Origins Deep Survey*).

Ces images extrêmement sensibles ont dévoilé des galaxies qui existaient quand l'Univers n'avait que quelques millions d'années, soit environ cinq pour cent de son âge actuel. Ces galaxies étaient plus petites et de forme plus irrégulière que les galaxies modernes, comme on s'y attendrait si les galaxies d'aujourd'hui se formaient par agglomération de galaxies plus petites (par opposition au morcellement de galaxies plus grosses). Pour remonter encore plus loin dans le temps, un successeur de *Hubble* est actuellement en construction : le télescope spatial *James Webb*.

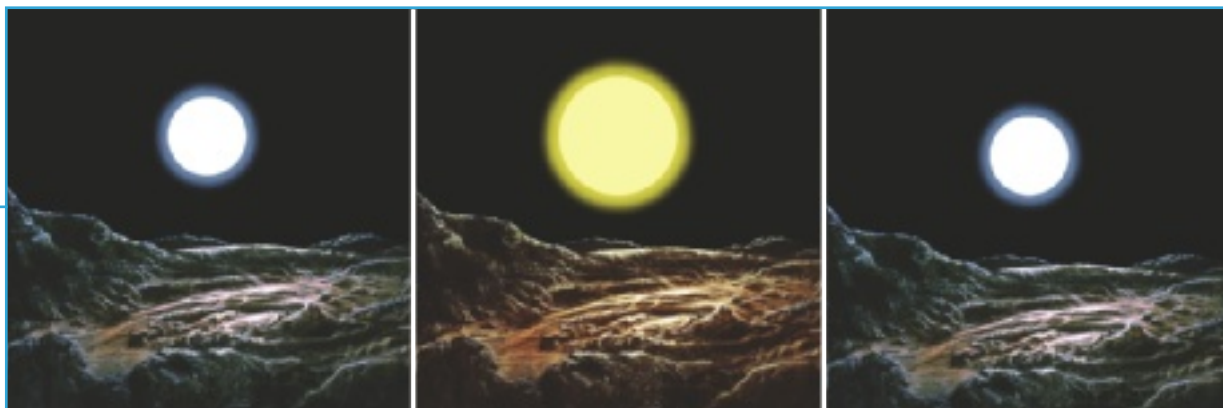
Les observations du champ profond ont également suivi les augmentations et les diminutions du taux de formation des étoiles dans l'Univers à l'échelle du temps cosmique. Ce



NASA, ESA, S. Beckwith (STScI)

Des milliards de fois moins intenses que ce que l'œil peut détecter, des galaxies distantes sont disséminées dans tout le champ profond de *Hubble*.

taux semble avoir atteint son maximum il y a environ sept milliards d'années, et avoir été divisé par dix depuis. Lorsque l'Univers n'avait qu'un milliard d'années, le taux de formation des étoiles était apparemment déjà élevé : environ un tiers de sa valeur maximale.



Don Dixon

9 L'âge de l'Univers

Les observations réalisées par Edwin Hubble et d'autres dans les années 1920 ont montré que nous vivons dans un Univers en expansion. Les galaxies s'éloignent les unes des autres, ce qui implique que la trame de l'Univers s'étire. La constante de Hubble (H_0) mesure le taux d'expansion actuel : c'est le paramètre clef pour déterminer l'âge de l'Univers. Le raisonnement est simple : H_0 est la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent ; ainsi, en négligeant toute

accélération ou décélération, l'inverse de H_0 donne le moment où toutes les galaxies devaient être réunies. La valeur de H_0 joue également un rôle dans la croissance des galaxies, la production des éléments légers et la durée des différentes phases de l'évolution cosmique. Il n'est donc pas étonnant que la mesure précise de la constante de Hubble ait été l'un des principaux objectifs du télescope du même nom.

En pratique, trouver cette valeur impliquait d'établir la distance des galaxies les plus proches, une tâche difficile qui a produit son lot de contro-

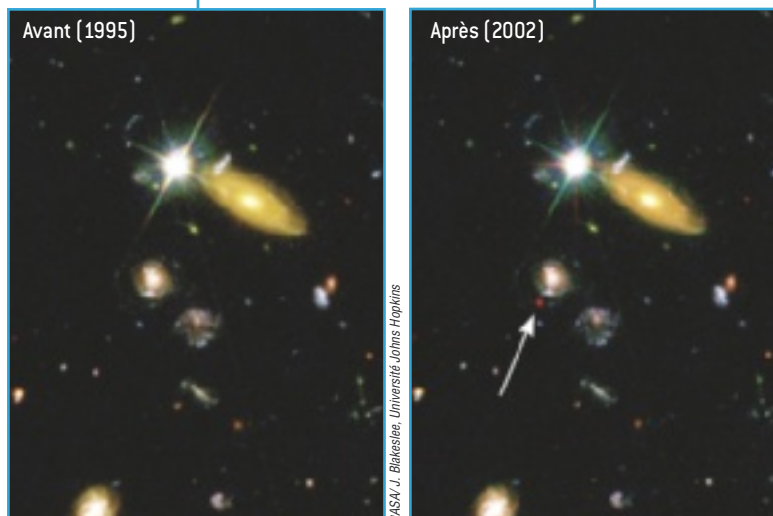
Des étoiles variables céphéides, telle celle de cette vue d'artiste, sont très utiles pour déterminer les distances intergalactiques.

verses durant le XX^e siècle. Le télescope a étudié les étoiles variables céphéides (des étoiles dont les pulsations caractéristiques révèlent la brillance intrinsèque et donc la distance) dans 31 galaxies. La valeur de H_0 qui résulte de cette étude est précise à environ dix pour cent près. Avec les mesures du fond diffus cosmologique, la valeur de la constante de Hubble indique que l'Univers est vieux de 13,7 milliards d'années.

10 L'accélération de l'Univers

En 1998, deux équipes ont fait sensation en annonçant que l'expansion de l'Univers s'accélère. Les astronomes avaient jusque-là considéré qu'elle ralentissait, car les galaxies s'attirent mutuellement par effet de gravitation, ce qui devrait retarder leur éloignement. Le moteur de cette accélération est sans doute le plus grand mystère de la physique actuelle. Selon l'hypothèse la plus répandue, l'Univers contiendrait un constituant non détecté, nommé énergie sombre. Des observations croisées de *Hubble*, des télescopes au sol et le fond diffus cosmologique suggèrent que cette énergie constituerait environ les trois quarts de la densité d'énergie totale de l'Univers.

Cette accélération a commencé il y a environ cinq milliards d'années ; auparavant, l'expansion ralentissait. En 2004, *Hubble* a découvert 16 supernovae distantes qui couvrent cette transition cruciale. Ces observations ont également posé des contraintes plus pertinentes sur la nature de l'énergie sombre. La possibilité la plus simple (mais à certains égards la plus mystérieuse) est qu'il s'agit d'une forme d'énergie contenue dans tout l'espace, y compris dans le vide. Le rôle de *Hubble* dans l'étude de l'énergie sombre est peut-être ce qui pourrait pousser la NASA à garder *Hubble* en fonctionnement. Pour le moment, c'est un instrument indispensable pour la recherche des supernovae qui permettront de comprendre ce qu'est l'énergie sombre.



Une supernova éloignée, découverte en comparant des images à différents instants, a révélé une transition entre une décélération cosmique et une accélération.

Mario LIVIO travaille actuellement à l'Institut scientifique du télescope spatial, à Baltimore.

<http://hubblesite.org>

L'Union des professeurs de physique et chimie (UdPPC) organise à Besançon ses 54^{es} Journées nationales du vendredi 27 au lundi 30 octobre 2006



Le centenaire de l'UdPPC

L'Union des physiciens (UdP, devenue UdPPC) fut créée à Pâques 1906, dans le but de mettre en œuvre et développer le caractère expérimental de l'enseignement des sciences.

Le temps est le thème majeur des conférences plénières, données par :

Claude COHEN-TANNOUDJI (ENS Paris, prix Nobel de physique 1997),
Jean-Marc GAUDIN (Genève),
Michel de LABACHELERIE (Besançon),
Etienne KLEIN (CEA Saclay),
Etienne GUYON (ESPCI),
Gabriel CHARDIN (CEA Saclay),
Daniel SIMON (Lyon),
Jean-Marie VIGOUREUX (Besançon).

Plus de trente ateliers scientifiques, pédagogiques et culturels sont programmés, avec la participation des laboratoires de recherche de l'Université de Franche-Comté.

Des expositions : matériels pédagogiques, ouvrages scientifiques et expériences didactiques seront présentés.

Des visites scientifiques et culturelles permettront de découvrir les richesses et le dynamisme de la Franche-Comté.

Inscriptions et programme détaillé :
<http://besancon.udppc.asso.fr>

Les télescopes géants

Des télescopes dont le miroir atteint 100 mètres de diamètre verront le jour d'ici une quinzaine d'années. Ils permettront notamment d'observer des planètes extrasolaires ressemblant à la Terre.

Roberto Gilmozzi

Monter de nuit sur la plateforme qui abrite les quatre télescopes de huit mètres de diamètre du VLT (pour *Very Large Telescope*, ou Très grand télescope), à l'observatoire européen du mont Paranal, au Chili, est une expérience magique. L'immense ciel étoilé au-dessus de la tête, les reliefs du désert à peine discernables sous l'horizon opalescent, mais aussi les mouvements silencieux et réguliers des télescopes de 430 tonnes aux noms étranges – *Antu*, *Kuyen*, *Melipal* et *Yepun*, soit le Soleil, la Lune, la Croix du Sud et Vénus en langue mapuche –, tout invite à la rêverie.

Le VLT, l'ensemble de télescopes le plus performant du monde, est une entreprise collective qui réunit de nombreuses nations. Comme les autres grands télescopes actuels, tels l'Observatoire *Keck* ou le télescope spatial *Hubble*, le VLT est un fleuron de la technique, issu des efforts conjugués de millions de personnes.

Cependant, le VLT avait à peine été construit que les astronomes ont commencé à se préoccuper de ses successeurs. Comme tous les nouveaux instruments scientifiques, les télescopes de huit à dix mètres de diamètre actuellement en activité ont apporté bien plus que des réponses aux questions pour lesquelles ils ont été conçus. Leurs découvertes ont soulevé de nouvelles questions, plus fondamentales. Étudier les

VLT sans optique adaptative
Diamètre des miroirs : 8,20 mètres
Résolution : 0,4 seconde d'arc
Temps de pose : 620 secondes

L'optique adaptative permet au télescope européen VLT de passer de taches indistinctes à une image plus détaillée que celle du télescope spatial *Hubble*. Cette résolution n'est cependant rien à côté du luxe de détails qu'offrirait le télescope géant OWL (ces simulations sont fondées sur une image prise par le VLT de la région de formation d'étoiles NGC 3603).

Saint-Etienne (France)
European Southern Observatory (ESO)