

## APPARENCES BOULEVERSÉES

### APPARENCE DE LA RAISON

Quatre siècles, les yeux dans les cieux p. 2

### APPARENCE DU SAVOIR

L'œil imparfait p. 4

### APPARENCE DE L'HARMONIE

Messagers des étoiles p. 6

### APPARENCE DE L'ÉTERNITÉ

Étoile mère p. 8

### APPARENCE DU RÉEL

L'essentiel invisible p. 10

### APPARENCE DU PERPÉTUEL

L'espace et le temps p. 12

### APPARENCE DE LA SOLITUDE

*Extra-Terra est* p. 14

D'apparences en apparences p. 16

# Quatre siècles, les yeux dans les cieux

Par Roland Lehoucq

«L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer. Quelques mèches rouges, cendres et fumées. Debout sur une escarville mieux refroidie, nous voyons s'éteindre doucement les soleils et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes.

George Lemaître, *L'hypothèse de l'atome primitif*



APPARENCE de la raison

Il y a quatre cents ans, Galilée déclençait un séisme intellectuel dont les répliques se font encore sentir aujourd'hui. En pointant vers le ciel une lunette de sa fabrication, il souleva un coin du voile, commençant à déjouer les apparences célestes. Galilée publie ses observations dans un livre intitulé *Sidereus Nuncius* (Messager du ciel). Il y relate que quatre corps tournent autour de la planète Jupiter, décrit une surface lunaire déformée par des montagnes et une Voie lactée composée de milliers d'étoiles si proches les unes des autres que l'œil nu ne les sépare pas. En totale contradiction avec la pensée d'Aristote, Galilée affirme que la Terre n'est pas le centre unique autour duquel tourne le Soleil, la Lune et les planètes, que la Lune est «terreuse», signifiant par là que Lune et Terre ont quelques propriétés communes, et que les étoiles sont sans aucun doute beaucoup plus nombreuses que celles que nos yeux perçoivent.

Les conclusions de Galilée sont lourdes de conséquences. La découverte des satellites de Jupiter fait vaciller le

système géocentrique en vogue depuis vingt siècles, construit sur l'impression que nous avons d'être le centre de rotation des astres. La nature de la Lune, similaire à celle de la Terre, ne refléterait-elle pas une identité des lois terrestres et des lois célestes ? Mais alors, la connaissance des lois terrestres donne accès à la compréhension des phénomènes célestes : ce qui est ici est comme ce qui est là-bas. L'équation Terre = Ciel est fondatrice de l'astrophysique qui analyse les observations du ciel à l'aune de la physique étudiée et validée en laboratoire. Enfin, s'il existe des étoiles invisibles à l'œil nu, c'est peut-être parce qu'elles ne sont pas toutes à la même distance, certaines pouvant même être à des distances défiant l'imagination. L'Univers serait-il donc infini ? Il ne fait aucun doute que

les premières observations de Galilée à la lunette ont profondément changé nos représentations du monde et ouvert la voie à l'affirmation d'une science moderne fondée sur la raison.

Depuis Galilée les instruments astronomiques ont

bien progressé. Aujourd'hui une douzaine de télescopes ont un diamètre qui dépasse les huit mètres (contre quelques centimètres pour la lunette de Galilée !). Ces nouveaux télescopes se distinguent aussi par l'emploi de techniques innovantes qui ont considérablement amélioré la qualité des images :

l'optique active (déformation de la surface du miroir en temps réel) et l'optique adaptative (correction des altérations de l'image dues à l'atmosphère) sont monnaie courante. De plus, les astrophysiciens se sont dotés d'instruments capables de capter les rayonnements situés en dehors du spectre visible, notamment en infrarouge, en ultraviolet, en radio, en rayons X ou gamma. L'exploitation de ces lumières invisibles à nos yeux a révélé les astres

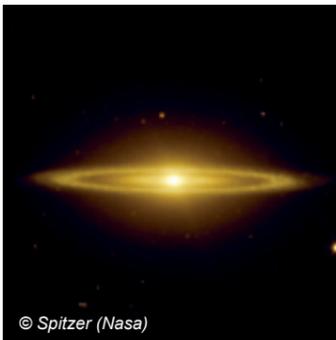
sous un jour nouveau. Cette capacité à observer le ciel dans toutes les longueurs d'onde doit aussi beaucoup à la mise en orbite d'observatoires spatiaux pour s'affranchir des perturbations de l'atmosphère. Aujourd'hui, tous les domaines de longueurs d'onde sont exploités en permanence et corrélés entre eux afin de mieux cerner les mécanismes physiques mis en jeu dans les objets observés.

Ces instruments ont aussi permis de refonder nos représentations du monde. Ainsi, l'astrophysique du XX<sup>e</sup> siècle a montré que l'Univers a une histoire : contrairement aux apparences, il n'est ni statique ni immuable.

La galaxie du Sombrero dans la constellation de la Vierge, vue en différentes longueurs d'onde : infrarouge (haut), visible (milieu), rayons X (bas).



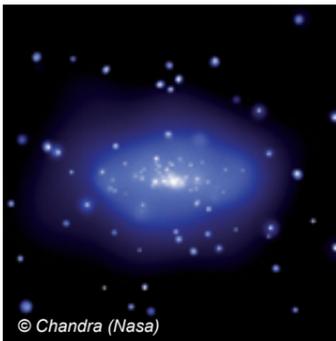
Lunette de Galilée



© Spitzer (Nasa)



© Hubble (Nasa)



© Chandra (Nasa)



La galaxie spirale NGC 1672.

Les galaxies spirales semblent tourner plus vite sur elles-mêmes que ne le laisse supposer la distribution de leur matière lumineuse (étoiles et gaz). C'est l'un des indices qui font penser que l'Univers contient une grande quantité de matière sombre.

Mieux, il est possible de raconter cette histoire ! Ainsi, l'origine de la matière se situe il y a 14 milliards d'années à une époque où, en trois minutes, se formèrent les premiers noyaux légers d'hydrogène et d'hélium. Puis c'est au cœur des étoiles que la saga se poursuit. Là, la compression due à la gravité chauffe le gaz à des températures suffisamment élevées pour que les noyaux légers fusionnent pour en engendrer de plus lourds. Explosant violemment, les étoiles plus massives répandent dans le milieu interstellaire les noyaux nouvellement forgés qui, plus tard, entreront dans la composition des futures étoiles et de leurs éventuelles planètes et habitants. Contrairement aux apparences, nous sommes très intimement liés à l'Univers...



Le 16 mai 2009, deux astronautes de la mission STS-125 naviguent dans l'espace près du télescope Hubble pour des opérations de maintenance.

Plus tard, les astrophysiciens se sont rendus compte que la matière visible, lumineuse, qui constitue les étoiles et le gaz des galaxies, n'est que l'écume de la matière ! De nombreuses observations convergent vers l'idée qu'une partie importante de la masse de l'Univers se compose d'une matière non visible, appelée, faute de mieux, « matière sombre ». D'abord détectée par l'étude de la dynamique des galaxies ou des amas de galaxies, la

cartographie de la matière sombre a progressé grâce à l'utilisation d'un effet prédit par la théorie de la gravitation proposée par Albert Einstein : la trajectoire de la lumière est déviée par une distribution de matière. Cet effet de lentille gravitationnelle a permis de confirmer la présence d'une grande quantité de matière invisible mais pesante. Quant à sa nature exacte, le mystère demeure. Cette matière sombre est peut-être constituée de particules d'un type encore inconnu et la physique des particules rejoint l'astrophysique pour traquer cette mystérieuse matière en laboratoire.

L'espace, déjà courbé par la matière, pourrait réserver d'autres surprises. Les physiciens, toujours en quête de lois plus générales, cherchent à rendre compatibles les deux plus grandes théories du XX<sup>e</sup> siècle, la relativité générale (qui décrit la gravité à l'aide de concepts élégants et vérifiés expérimentalement avec une excellente précision) et le modèle standard de la physique des particules (qui traite très précisément des interactions électromagnétiques et nucléaires). La cohérence mathématique de certaines propositions a un prix : l'espace devrait avoir au moins six dimensions en sus des trois que nous connaissons. Pourquoi n'avons-nous pas encore observé ces dimensions supplémentaires ? Tout simplement parce qu'elles sont repliées sur elles-mêmes à des échelles de taille bien inférieures à celles que peuvent sonder les accélérateurs de particules les plus puissants. Elles sont donc inaccessibles à l'observation, pour le moment...

« Au-delà des apparences cachant une réalité méconnue, l'humanité a généré des représentations dogmatiques du monde dont l'Homme est généralement le centre, dans le but avouable de le rassurer d'une angoissante solitude terrestre et universelle. Hélas, certains de ces dogmes, devenus instruments de pouvoir, ont tenté de maintenir des apparences construites contre l'évidence, jusqu'au sacrifice d'hommes de science remplis de curiosité. »

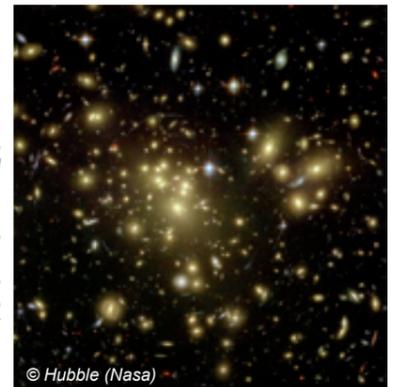
Cécile Ferrari

Roland Lehoucq, astrophysicien au SAP, travaille sur la topologie cosmique. Il participe à de nombreuses actions de communication (livres, expositions, ...).

Il est à l'origine de la structure de ce numéro de Scintillations.

Merci Roland pour ton aide.

On peut étudier des effets de mirage gravitationnel dans l'amas Abell 1689 qui résultent de la déviation de la lumière se propageant dans un espace déformé par la présence d'une importante quantité de matière. Ces observations confirment la présence de matière noire et permettent parfois de révéler des galaxies si lointaines et si faibles qu'elles seraient indétectables autrement.



© Hubble (Nasa)

# L'œil imparfait

Par Christian Guiffès

L'utilisation d'un petit télescope, il a y quatre cents ans, a bouleversé notre vision du monde. L'œil, instrument imparfait, se voyait doté d'un complément qui allait lui permettre de déjouer les apparences du ciel et d'approcher le réel. L'acuité du regard n'a pas cessé de s'améliorer en quatre siècles, depuis la découverte de satellites de Jupiter avec une lunette jusqu'à la détermination de la composition chimique de l'atmosphère de planètes lointaines avec les télescopes du futur.

Les progrès effectués dans la maîtrise de la fabrication des lentilles et miroirs sont précurseurs des avancées dans l'observation du ciel. Galilée, Kepler, Newton, Herschel, pour ne citer qu'eux, sont les premiers acteurs de cette aventure visant à restituer le plus fidèlement possible les images de l'Univers visible. La résolution angulaire d'un télescope, faculté à distinguer deux objets proches dans le ciel, est inversement proportionnelle à son ouverture.

Pour un télescope, cela conduit à construire des miroirs primaires de plus en plus grands. Au sol, l'atmosphère terrestre est une intruse qui vient perturber les images comme en témoigne le scintillement des étoiles.

Pour éviter ce brouillage, la première solution consiste à placer le télescope dans un site présentant les conditions les plus propices pour l'observation, où la qualité d'image sera la meilleure.

Les grands observatoires terrestres sont ainsi placés dans des endroits secs et en altitude. Une autre solution pour éviter les turbulences causées par l'atmosphère est bien sûr de s'en affranchir. Le célèbre télescope spatial Hubble, doté d'un miroir primaire de 2,4 mètres de diamètre, a marqué une étape depuis son lancement en 1990, et chacun a pu admirer la beauté de ses clichés. La résolution obtenue a été soudainement améliorée d'un facteur dix, révélant de façon saisissante les détails de planètes du système solaire, de régions de formation d'étoiles ou encore le cœur de galaxies lointaines. Envoyer des télescopes encore plus grands dans l'espace n'est pas une mince affaire. Il faudra attendre 2014 pour que son successeur, le James Webb Space Telescope (JWST) déploie son miroir de 6,4 mètres, constitué de 18 pétales, et livre ses premières images.

Impatients, les astronomes ont imaginé des moyens pour pallier les brouillages des images causées par la turbulence atmosphérique. Ces techniques appliquées avec succès sur des télescopes géants

au sol, ont permis des progrès remarquables. On peut aujourd'hui distinguer des détails de moins de 50 mètres sur la surface lunaire ou encore déterminer de façon très précise la trajectoire des étoiles autour du trou noir géant situé au centre de notre galaxie, la Voie lactée, outil qui a permis de mesurer la masse de ce trou noir!



**Obtenir des images aussi précises que celles du télescope XMM-Newton mais dans le domaine couvert par le satellite Integral constitue un enjeu scientifique majeur. Dans ce cas, la focalisation des photons requiert une distance de plusieurs dizaines de mètres. La solution consiste à associer deux satellites distincts mais volant en formation, l'un abritant le miroir, l'autre le module de détection doté d'une caméra de grande précision. Cette combinaison permet alors d'obtenir des images d'une finesse inégalée. La pertinence de ce principe a été validée par le projet Simbol-X, malheureusement arrêté récemment pour des raisons budgétaires.**

Un autre moyen d'affiner notre regard et d'accéder à des images encore plus précises est l'emploi de la technique dite « interférométrique » qui consiste à combiner les lumières captées par plusieurs télescopes. La résolution de l'image reconstituée équivaut à celle d'un miroir géant de diamètre égal à la plus grande distance séparant les télescopes. Cette technique, extrêmement délicate

à mettre en œuvre en lumière visible mais utilisée avec succès par les radiotélescopes depuis plusieurs décennies, permet d'atteindre une résolution spatiale de quelques millièmes de seconde d'arc. Ce nouveau facteur gagné en acuité a permis récemment de discerner le nuage de gaz moléculaire entourant une étoile. Dans un futur proche, les scientifiques comptent disposer d'une myriade de télescopes, au sol ou dans l'espace, pour étudier l'atmosphère de planètes jumelles de la Terre et en cartographier la surface.

Si l'observation du ciel dans ce qui nous est le plus familier, la lumière visible, a beaucoup progressé au cours des derniers siècles et peut-être plus

encore dans les deux dernières décennies, elle connaît également une profonde mutation dans d'autres domaines de longueurs d'onde. L'astronomie gamma en est certainement un des plus beaux exemples. Cette lumière, impossible à focaliser jusqu'à présent, a souffert pendant longtemps d'une relative myopie. Ce défaut de vision est maintenant corrigé par la technique dite « du masque codé », instrument « galiléen » de la fin du XX<sup>e</sup> siècle, qui permet de réaliser de véritables images du ciel gamma. Employée avec succès par le satellite Integral, cette technique a permis de comprendre l'émission apparemment diffuse répartie le long du plan de la Galaxie. Le brouillard apparent n'était qu'un leurre et s'est dissipé en faisant apparaître un ensemble de sources isolées : trous noirs, étoiles à neutrons et autres astres extrêmes. Cette technique du masque codé sera également utilisée dans le cadre de la mission sino-française SVOM (Space based multi-band Variable Object Monitor) pour étudier les sursauts gamma.



© VLT (ESO)

*L'étoile T Leporis, située à 500 années-lumière, observée par le Very Large Telescope Interferometer (Chili), a expulsé une partie de son enveloppe. La finesse unique de ce cliché permet de distinguer clairement le disque de l'étoile de la fine coquille de gaz moléculaire qui l'entoure.*

Regarder l'Univers nous donne la vertigineuse illusion d'accéder au savoir. La volonté des scientifiques de déjouer cette apparence s'appuie désormais sur des projets dans tous les domaines de longueurs d'onde, des rayons X de haute énergie aux réseaux de télescopes au sol capables de détecter des traces fugaces laissées par les particules relativistes heurtant l'atmosphère. Dans le prolongement de la démarche de Galilée, nos futurs instruments décupleront l'acuité de notre regard, transformant ce qui nous apparaît aujourd'hui comme une réalité en une somme de nouvelles interrogations, étapes indispensables à une meilleure compréhension de l'Univers.



Christian Guiffès, astrophysicien au Sap, spécialiste des objets compacts de la Galaxie.

## Optique active, optique adaptative

Afin de corriger les distorsions des images causées par la turbulence atmosphérique, les astronomes utilisent deux types de technique. La première consiste à appliquer en temps réel au miroir primaire du télescope de petites déformations compensant les distorsions grâce à un ensemble de vérins, c'est l'optique active. La seconde, dite optique adaptative, utilise une partie de la lumière de l'astre observé ou celle d'une étoile proche pour analyser la perturbation due à l'atmosphère. Dans certains cas, s'il n'y a pas d'étoiles de référence près de l'objet céleste étudié, une étoile artificielle peut même être créée par un puissant laser. Les altérations sont alors très précisément compensées ce qui permet d'atteindre la résolution théorique du télescope.

## La caméra Mégacam

Placée au sommet du Mauna Kea, sur l'île de Hawaï, la caméra Mégacam équipe le foyer primaire du télescope de 3,6 m de diamètre du Canada-France Hawaï telescope (CFHT). Cet œil photographique géant possède 375 millions de pixels, permettant en une seule prise de vue d'observer une région du ciel équivalente à quatre fois la pleine lune, et ceci tout en conservant une très grande finesse d'image. En zoomant sur une image de Mégacam, l'œil curieux découvre, sur ce qui apparaissait comme un fond noir parsemé de quelques points brillants, des galaxies de toutes formes et de toutes couleurs, arabesques de l'espace.

La lune Europa de Jupiter vue par la sonde spatiale Galileo. Ce satellite cache peut-être un océan.  
© Galileo project/JPL-Nasa

# Messagers des étoiles

par Sylvain Chaty

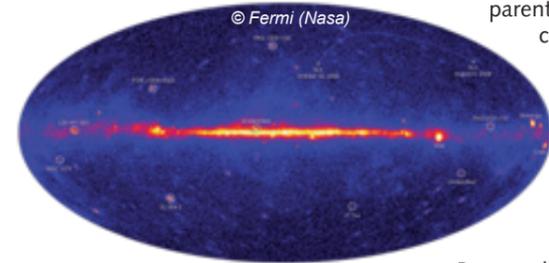
Les hommes du XIX<sup>e</sup> siècle voyaient à peu près le même ciel que les hommes préhistoriques. Il nous semble bien différent aujourd'hui. Notre ciel a-t-il changé ? Certe non, même les étoiles les plus massives, celles qui ont la durée de vie la plus courte, vivent quelques dizaines de millions d'années ; un clin d'œil dans la vie de l'Univers, mais une éternité pour l'humanité.

« Quelle apparence que le ciel l'eut secourue si tard, si elle eût été innocente ? »

Denis Diderot

La Voie lactée à l'observatoire du Mauna Kea (CFHT) © Wally Pacholka (Iwan)

Notre ciel n'a pas changé, ni en un siècle ni en quelques millénaires, mais notre regard, lui, a considérablement évolué. D'une vision statique, bornée à notre œil, nous sommes passés à une vision dynamique, obtenue grâce à une armada de télescopes et de satellites observant l'Univers sous différentes longueurs d'onde et exploitant la multitude des messagers stellaires. Derrière l'apparente harmonie du ciel, nous découvrons la violence des phénomènes cosmiques et leur complexité. Bien au-delà de la seule amélioration de la vision du ciel, ces nouveaux regards bouleversent notre compréhension de l'Univers.



Carte du ciel en rayons gamma, messagers des sources les plus énergétiques de l'Univers. Sur cette carte obtenue grâce au Large Area Telescope (LAT), instrument placé à bord du satellite Fermi, une multitude de sources ont été découvertes au-dessus d'une émission diffuse répartie le long de la Voie lactée. Le satellite Fermi a été lancé le 11 juin 2008.

Prenons l'exemple de la Voie lactée, le disque de notre galaxie vue par la tranche. Elle forme une bande laiteuse traversant le ciel de part et d'autre. Elle était vue de la même façon depuis la nuit des temps, une traînée blanchâtre générant les légendes : un chemin vers le ciel, un puissant jet de lait... Hiver 1609 : Galileo Galilei pointe sa lunette hollandaise sur une région de la Voie lactée. Il révolutionne notre connaissance en montrant qu'elle est composée d'une multitude d'étoiles, indiscernables à l'œil nu. Malgré cette avancée majeure, Galilée ne voyait rien de plus que la lumière visible émise par la Voie lactée. Il a fallu attendre le XX<sup>e</sup> siècle pour découvrir ses différents aspects, vus dans différentes longueurs d'onde : radio, infrarouge puis ultraviolet, et enfin dans les hautes énergies (rayons X et gamma).

Le rayonnement infrarouge est découvert de manière fortuite en 1800 par Sir William Herschel : pour la première fois, il apporte la preuve de l'existence d'une lumière invisible à nos yeux. Ce n'est qu'au début des années soixante que la Voie lactée est observée à ses fréquences. Plusieurs sources brillantes sont découvertes près du plan de la Galaxie, témoignant de la présence de nuages de poussières.



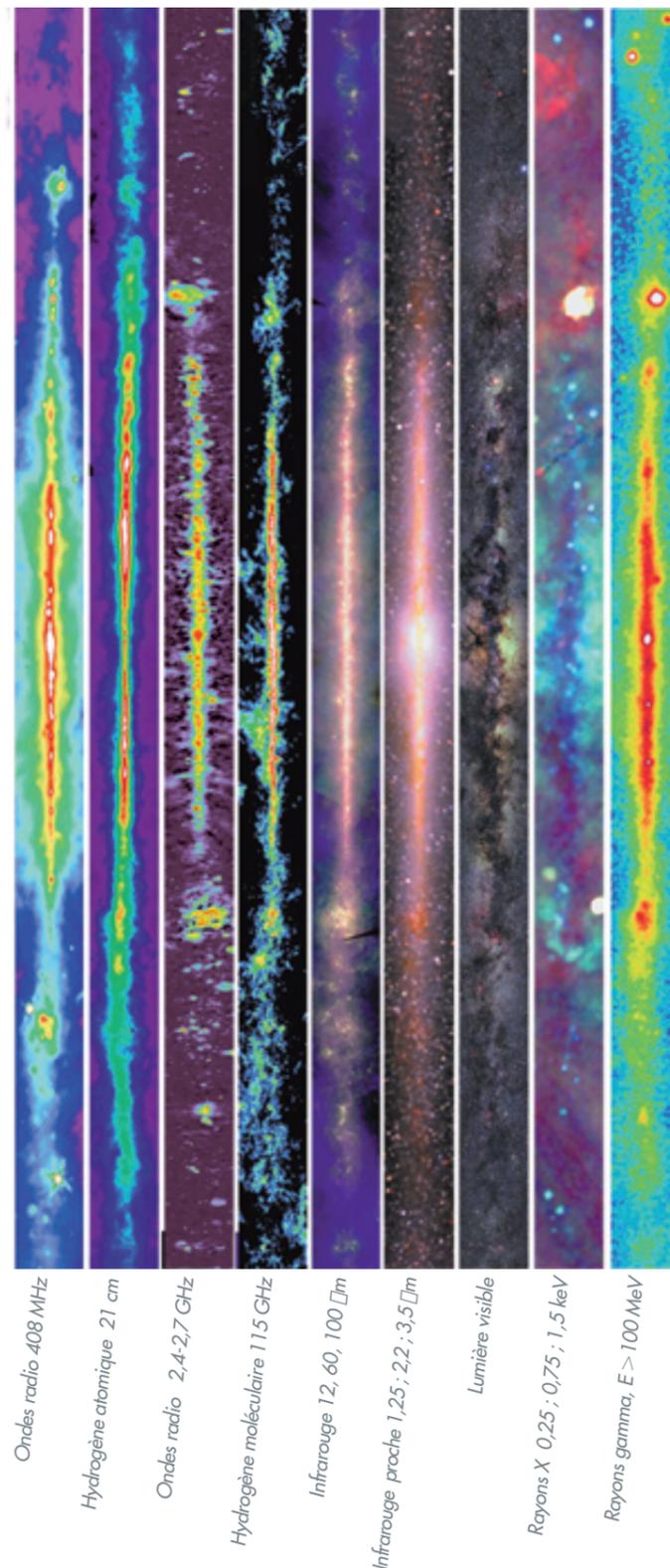
Des ondes dites gravitationnelles sont attendues suite aux déplacements de corps célestes massifs. Plusieurs collaborations internationales vont tenter de les mesurer comme le projet Virgo, en cours d'installation en Italie (ci-dessus).

L'existence des ondes électromagnétiques est prédite par Maxwell en 1865, et confirmée expérimentalement par Hertz en 1888. L'utilisation des ondes radio se développe pour la localisation d'objets et la communication pendant la deuxième guerre mondiale. Après la guerre, la Voie lactée est explorée en ondes radio, permettant de distinguer la présence de gaz, principalement l'hydrogène atomique et moléculaire.

Les rayons X sont découverts par Röntgen à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, découverte qui donnera lieu au premier prix Nobel de physique, en 1901. A la fin des années soixante, la Voie lactée est observée en rayons X. Elle semble complètement différente. Sont visibles un ensemble de sources ponctuelles, principalement des cadavres stellaires attirant la matière d'étoiles se trouvant à proximité : naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs... A plus haute énergie, ce sont les pulsars, des étoiles à neutrons fortement magnétisées en rotation rapide, qui apparaissent, ainsi que les noyaux actifs de galaxie. Ces observations conjointes permettent de révéler les secrets de notre galaxie, comme

la présence du trou noir de presque quatre millions de fois la masse du Soleil, tapi au cœur de la Voie lactée. Il a été mis à jour par l'observation des ondes radio et X, mais son existence n'a été prouvée que par l'observation, en infrarouge, d'étoiles en orbite autour de celui-ci.

## La Voie lactée sous toutes ses couleurs

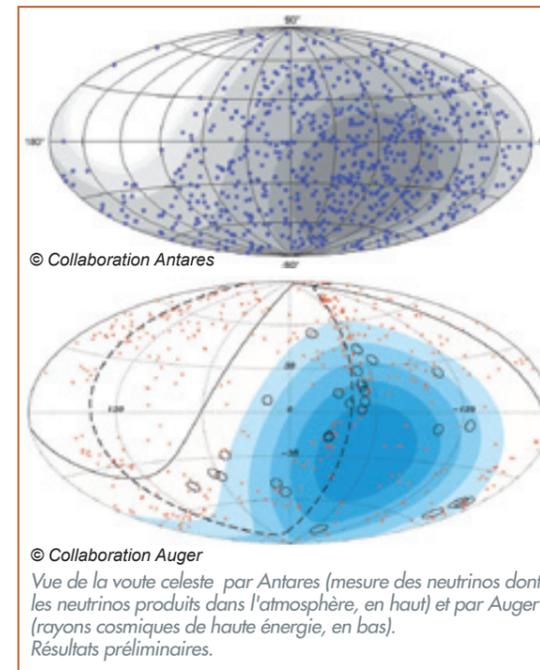


la révolution ne s'arrête pas là. Le photon, vecteur des ondes électromagnétiques, n'est plus le seul messager céleste nous apportant des informations sur l'Univers. Il en existe d'autres, tels les rayons cosmiques, les neutrinos, et même les ondes gravitationnelles. L'observation de ces messagers constitue ce qu'on appelle l'astronomie non-photonique, dont nous connaissons aujourd'hui l'avènement. Les rayons cosmiques sont déjà observés et étudiés sur Terre depuis longtemps. Nous avons aussi mesuré le flux de neutrinos provenant du Soleil et ceux émis lors de l'explosion d'une supernova. Par contre, nous n'avons pas encore acquis la sensibilité nécessaire pour percevoir les tremblements de notre espace-temps, dont la signature serait la détection, sur Terre, d'ondes gravitationnelles. Les observatoires détectant ces différents messagers sont très différents des observatoires de photons, à l'instar des détecteurs sous-marin de neutrinos tournant le dos au ciel (projet Antares), et observant dans la direction de la Terre ! Ces messagers nous apporteront des informations complémentaires essentielles pour comprendre le cœur des astres célestes, ainsi que les collisions entre divers astres.



Le projet international Hess permet de mesurer les rayons gamma de très haute énergie (un million de million d'électronvolts). Ces nouveaux messagers permettant d'étudier les accélérateurs de particules cosmiques présents dans l'Univers

Pris individuellement, chaque messager n'offre qu'une vision incomplète, l'observation de l'ensemble des messagers est nécessaire pour s'approcher de la réalité, souvent complexe et agitée, des astres. Comme pour la Voie lactée, seule la pluralité des regards sur le ciel mènera à la compréhension de notre Univers.



© Collaboration Antares

© Collaboration Auger

Vue de la voûte céleste par Antares (mesure des neutrinos dont les neutrinos produits dans l'atmosphère, en haut) et par Auger (rayons cosmiques de haute énergie, en bas). Résultats préliminaires.

Sylvain Chaty est Maître de conférences au Laboratoire Astrophysique interaction multi-échelles situé à Saclay (UMR AIM). Il est spécialiste des astres de haute énergie de l'Univers.

APPARENCE de l'harmonie

# Étoile mère

par Michel Cassé

*Sub species aeternitatis*, du point de vue de l'éternité, celui de Parménide et de Spinoza, la physique arbore sa charte : stabilité des atomes, des constantes et des lois. Les lois du changement ne changent pas. L'Univers est uni par ses lois physiques intemporelles.

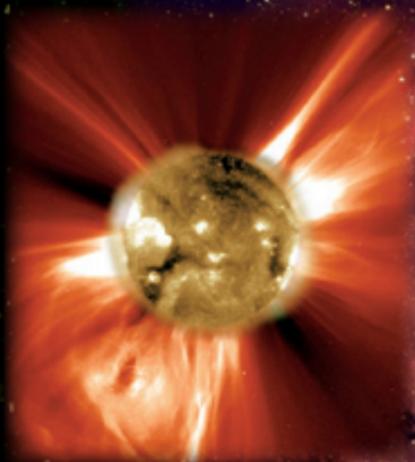
Du point de vue d'Héraclite, la physique est la science du changement, du temps et de la métamorphose : le big bang est l'événement au cours duquel la lumière se matérialise, l'étoile est le lieu où la matière se dématérialise partiellement, se fait lumière.

À l'origine des éléments, trois sources inapparentes : le big bang, créant hydrogène, deutérium, hélium-3 et 4 et lithium-7, les étoiles, sièges de la fusion thermonucléaire et de la capture de neutrons à l'origine des éléments du carbone à l'uranium, et, entre les deux, le rayonnement cosmique, tronçonneur des carbones, azote et oxygène interstellaires, produisant lithium, béryllium et bore. Les deux premiers processus agglomèrent les nucléons, le troisième brise les édifices nucléaires : conjonctions et disjonctions secrètes.

Les atomes sont éternels en tant qu'espèces, mais leur teneur relative varie. La tendance est à la montée de la teneur en métalloïdes et métaux : les étoiles antiques du halo galactique sont quasiment dénuées d'atomes plus complexes que l'hélium, alors que le Soleil, âgé de 4,6 milliards d'années en abrite une quantité non négligeable, de l'ordre du pour cent. Tel est l'indice clair de l'évolution chimique de la Voie lactée.

La bienheureuse matière qui pense dans le noir se penche sur son passé d'étoile et de nuage. Et l'amnésie cosmique, l'homme la rachète par l'astrophysique. L'histoire de la matière est faite de grands principes abstraits comme la corrélation quasi darwinienne de l'abondance d'un noyau avec son énergie de liaison mais aussi de failles secrètes qu'il a fallu découvrir. L'instabilité malade des noyaux atomiques de masse 5 et 8 fait avorter la « création » au nombre 7, quelques minutes après le big bang. La course-poursuite vers la complexité nécessite les étoiles qui sautent l'obstacle en fusionnant trois noyaux d'hélium pour créer le carbone. Qui l'eût cru ?

L'évolution des étoiles implique celle de leur société, les galaxies. Les supernovas, qui mettent un terme brillant à la carrière des étoiles apparaissent comme les moteurs de l'évolution chimique/isotopique de l'Univers. Elles inséminent l'espace des produits de leur alchimie nucléaire (carbone ... fer ... uranium). Et de génération en génération d'étoiles, les nuages, réceptacles des cendres des étoiles défuntes, matrices des étoiles en devenir, s'enrichissent en éléments nécessaires à la vie. Les humanités à naître sont là, dans les cendres des étoiles explosées. Le temps caractéristique de l'évolution galactique est si long, de l'ordre du milliard d'années, que celle-ci passe inaperçue. L'histoire



Le Soleil vu par le satellite SoHo, lieu de formation des éléments légers.

gazeuse et chimique peut être élargie à l'Univers entier en observant les galaxies proches, dans le visible et les lointaines dans l'infrarouge (Herschel). L'homme restitue ainsi les taux de formation d'étoile dans le passé, leur distribution en masse et le taux d'explosion des supernovas dans les galaxies. On traduit le décalage vers le rouge des galaxies extérieures en temps, au moyen du meilleur modèle cosmologique. Ainsi s'ouvre-t-on à l'histoire véritablement universelle de la matière. Et on s'aventure à supputer sur l'avenir cosmique : sauf accident cosmologique la création d'étoiles cessera dans les galaxies qui concentreront

leurs trous noirs et, celles-ci toujours s'écartant, s'éteindront. Plus tard encore, les trous noirs, produits finis de l'évolution stellaire s'évaporeront et il ne restera plus que neutrinos et photons. Les protons réputés



## Une volonté de fer

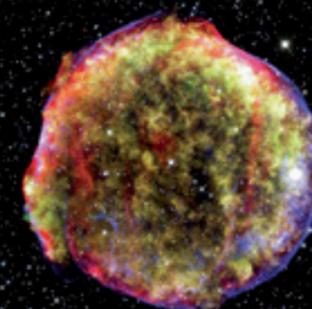
Physique nucléaire, science naturelle de l'évolution

La physique nucléaire est une science de la nature. L'évolution nucléaire précède et conditionne toutes les autres. Il y a corrélation entre l'abondance d'un élément et la solidité de son noyau. À ce jeu, le fer est passé maître et le darwinisme nucléaire nous incite à penser qu'il finira par dominer. Les étoiles et supernovas préparent le règne du fer. Mais c'est faire l'économie d'un principe de limitation, dont nous venons à peine de prendre conscience : le jeu caché des galaxies. Les nuages gazeux sont transformés progressivement en étoiles, et les étoiles en astres occlus, morts. Au début, les galaxies, systèmes fermés, sont toutes en nuages puis en étoiles et, à la fin des fins, en cadavres d'étoiles. Et avant même que le fer ne règne en maître, la galaxie cessera de former des étoiles, faute de gaz. Le fer ne sera pas le roi de la création nucléaire en vertu de la limitation gazière de la galaxie. Aujourd'hui, l'hydrogène règne encore en maître, après 13,7 milliards d'années d'évolution. Contre toute attente on peut dire que l'Univers est nucléairement jeune. Qui l'eût dit ?



instables sur une échelle de temps de  $10^{35}$  ans, seront morts depuis longtemps. L'éternité prend un coup dans l'aile.

Ainsi, la matière n'est plus éternelle. On prend la nucléosynthèse en flagrant délit dans le ciel par le truchement de la radioactivité galactique et l'émission gamma de l'aluminium-26 expulsé par les vents stellaires et les supernovas (mission Integral). Les hommes sont mortels, les sociétés également, et nous en sommes venus à réaliser que le Soleil n'a que l'apparence de l'éternité. Les étoiles meurent, on peut dénombrer les morts mais elles naissent aussi ainsi que les galaxies (Herschel). Nous ne voyons en permanence au moyen de notre détecteur personnel et individuel, la rétine, que des étoiles



© Chandra-Spitzer (Nasa)

Une supernova vue par Chandra et Spitzer, lieu de formation des éléments lourds.

Tout ceci passe au dessus de la tête de l'homme simplement homme, pour lequel le monde est une évidence indéfinie et atemporelle. Mais l'amnésie cosmique est rachetée par la science. Quelques traces de métaux et la matière se met à penser ! C'est du moins ce que l'on peut conclure du seul cas connu. Le lien de parenté caché entre les étoiles et les hommes est maintenant bien établi, il est générique et matériel plus que symbolique. La mère inconnue des atomes, s'est déclarée : Étoile.

## Herschel

Herschel sera le premier télescope à observer l'Univers de la lumière infrarouge jusqu'aux rayonnements submillimétriques. Il est doté d'un miroir primaire de 3,5 m de diamètre (contre seulement 2,4 m pour le télescope spatial Hubble), ce qui en fera le plus grand télescope en orbite. Herschel sera capable d'observer des régions de l'Univers, froides et chargées de poussières, inaccessibles aux autres télescopes. Il étudiera en priorité la genèse des galaxies et l'évolution des étoiles en formation, ainsi que les nuages de gaz et de poussières où naissent les étoiles, les disques protoplanétaires et les molécules organiques complexes dans la chevelure des comètes. Le télescope spatial Herschel a été lancé par l'ESA le 14 mai, conjointement au satellite Planck.



comparables au Soleil, en bonne santé, loin de la naissance et de la mort. Mais les extrémistes spectraux que sont les astrophysiciens scrutent le rayonnement de la douceur (infrarouge et submillimétrique) qui porte témoignage des naissances et celui de la violence (rayons X et gamma) qui émaille les événements explosifs ou déchirants du ciel.

Michel Cassé, astrophysicien au SAp et à l'Institut d'astrophysique de Paris, s'est longtemps intéressé aux origines de la matière avant d'élargir ses réflexions à celles de l'Univers.



APPARENCE de l'éternité

Un cœur nébuleux © Daniel Marquardt, Rosa Observatory

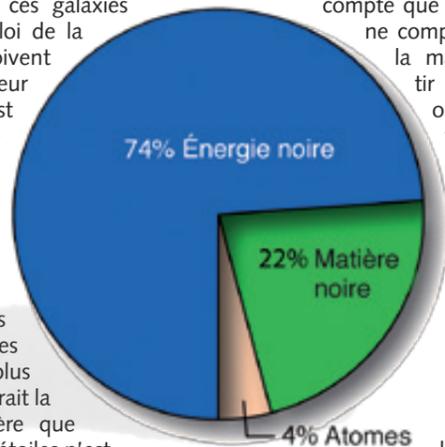
# L'essentiel invisible

par Jean-Baptiste Melin

« L'essentiel est invisible pour les yeux » ? Pourtant, quand on regarde un champ de galaxies, l'Univers semble très simple : des galaxies constituées d'étoiles éclairent le vide cosmique qui les sépare. La nuit, nous pouvons observer cette lumière visible, voir les constituants de l'Univers... ?

© Hubble (Nasa)

Jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle les astronomes considéraient que l'essentiel de la matière dans l'Univers était visible. Dans les années trente, Fritz Zwicky fait une estimation de la masse des amas de galaxies en utilisant les vitesses des galaxies qui les composent. Pour que ces galaxies puissent être liées par la loi de la gravitation, les amas doivent être bien plus massifs que leur masse visible. Ce calcul est à l'origine de l'hypothèse de la matière noire. Cette hypothèse a été confirmée dans les années soixante-dix par l'étude des courbes de rotation des galaxies : les vitesses de rotation des étoiles et du gaz présents dans les disques des galaxies spirales sont beaucoup plus grandes que celles qu'induirait la matière visible. Cette matière que l'on retrouve sous forme d'étoiles n'est donc que la partie émergée de l'iceberg. Les estimations récentes montrent qu'elle représente moins de 1% de la masse totale de l'Univers. La quasi-totalité de la matière dans l'Univers est donc invisible, soit parce qu'elle n'émet pas de lumière, soit parce qu'elle est de nature inconnue : fin d'une apparence.



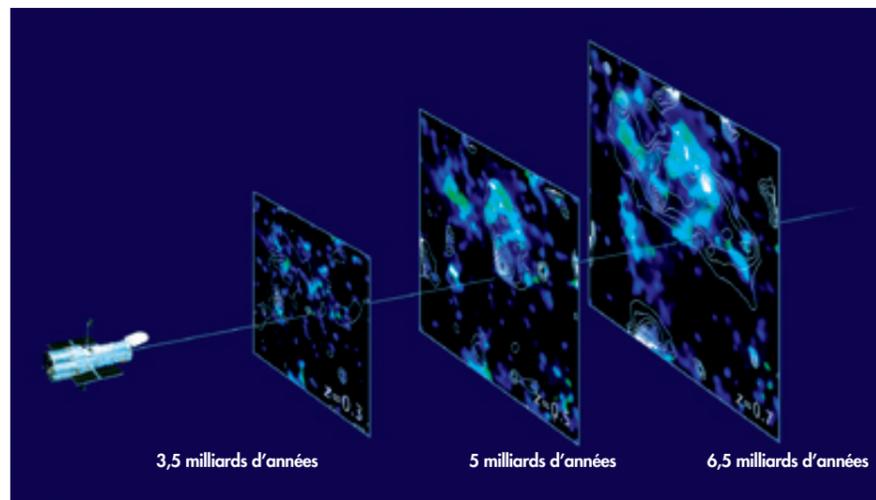
De quelle nature peut-être la matière de l'Univers ? L'hypothèse la plus simple est qu'elle soit du même type que celle qui nous entoure, la matière baryonique (essentiellement des protons et des neutrons). Elle est celle qui constitue le journal que vous tenez dans les mains, celle des atomes dont vous êtes formés et qui composent la Terre, les planètes et les étoiles. La mesure des abondances des éléments légers (hydrogène, deutérium, hélium et lithium) de l'Univers et celle de la température du fond

diffus cosmologique ont permis de déterminer la densité des baryons. Quand on l'a comparée à la densité nécessaire pour que les amas soient liés par la gravitation, on s'est rendu compte que la matière baryonique ne compte que pour 15% de la matière totale ! À partir de cette constatation observationnelle, deux voies de recherche ont été considérées. La première consiste à s'appuyer sur la formulation de la loi de la gravitation de Newton généralisée par Einstein dans le cadre de la relativité générale. Dans ce cas, il ne fait aucun doute que la matière noire existe

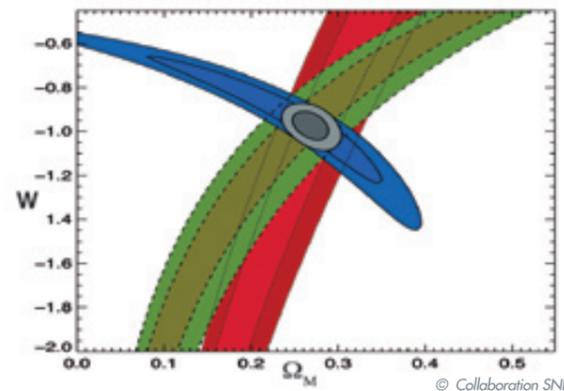
et qu'elle est de type inconnu, non baryonique. La deuxième voie propose de remettre en cause la loi de la gravitation pour se passer de la matière noire. C'est l'approche de la théorie Mond (MODified Newtonian Dynamics) qui explique avec succès les courbes de rotation des galaxies en modifiant la loi de la gravitation. Néanmoins cette théorie rencontre des difficultés à l'échelle des amas et ne parvient pas à expliquer de façon satisfaisante l'observation des pics du spectre de puissance des anisotropies du fond diffus cosmologique (voir encadré sur le CMB). Aujourd'hui, l'essentiel de la communauté scientifique travaille selon la première voie. On appelle wimp (weakly interacting massive particle) la particule de matière noire. Elle est la cible de multiples expériences qui cherchent à la détecter directement et indirectement. L'Irfu s'y attache en particulier à l'aide des expériences comme Edelweiss (Scintillations 75) ou Hess. Fin d'une deuxième apparence : la matière de l'Univers n'est pas du même type que notre matière ordinaire.

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt-dix, on pensait que matière et gravitation suffisaient à expliquer l'évolution de l'Univers mais l'étude des supernovas a bouleversé cette troisième apparence.

En 1929, Edwin Hubble découvrait l'expansion de l'Univers en comparant distances et décalages spectraux d'une cinquantaine de galaxies : les galaxies s'éloignent les unes des autres à des vitesses proportionnelles à leurs distances. La relativité générale prédit que cette vitesse d'expansion varie au cours du temps. Si l'Univers ne contenait que de la



L'étude Cosmos de Hubble a permis de réaliser une carte 3D de la matière noire (Scintillations 75).



Comparaison des mesures faites à partir des supernovas de type Ia (SNLS, en bleu-résultats préliminaires), du fond diffus cosmologique (WMAP, en vert) et de la répartition des galaxies dans l'Univers (SDSS, en rouge). Les mesures portent sur  $\Omega_M$ , fraction du bilan énergétique de l'Univers due à la matière et sur  $w$ , paramètre lié à la variation au cours du temps de la densité d'énergie noire de l'Univers. Les mesures des trois expériences sont concordantes. Leur combinaison (en gris) conduit à une valeur de 25% pour  $\Omega_M$  et de -1 pour  $w$ , ce qui correspond à une densité d'énergie noire constante dans le temps.

matière, l'expansion, retenue par la gravité, serait censée décélérer. Pour étudier cette décélération, on a utilisé les supernovas, des explosions stellaires dont la lumière est très bien caractérisée et suffisamment intense pour être visible sur des distances cosmologiques. Or les flux lumineux mesurés ont été plus faibles qu'attendus, révélant que l'expansion de l'Univers est accélérée et non décélérée. Cette observation ne peut être expliquée que par la présence d'un fluide dont l'effet sur l'expansion est opposé à celui de la matière, l'énergie noire. A priori, il est impossible de la produire et de l'étudier sur Terre

## Mesures du noir

Au cours des cinq dernières années, les études des supernovas de type Ia (Supernovae Legacy Survey - SNLS), du fond diffus cosmologique (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe - WMAP) et des oscillations de baryons (Sloan Digital Sky Survey - SDSS) ont fourni des mesures à quelques pour cent du contenu en matière et énergie noires de l'Univers. Il faut maintenant affiner ces mesures tout en explorant de nouvelles sondes cosmologiques pour vérifier la cohérence globale du modèle du big bang. Parmi ces nouvelles sondes, l'étude des amas de galaxies par le satellite Planck permettra une meilleure compréhension de la formation des structures et, par le dénombrement des amas en fonction du décalage spectral, une meilleure caractérisation des propriétés de la matière et de l'énergie noires de l'Univers.

comme on peut espérer le faire avec la matière noire. On cherche donc à la caractériser en étudiant ses propriétés actuelles mais aussi son évolution en fonction de l'âge de l'Univers. Pour cela, on utilise plusieurs sondes cosmologiques : les supernovas de type Ia, les oscillations baryoniques, le lentillage des galaxies par les structures, l'étude des comptages d'amas de galaxies et du fond diffus cosmologique. Les mesures les plus récentes montrent que l'énergie noire représente environ 70% du contenu en énergie de l'Univers, les 30% restants provenant de la matière noire et baryonique.

L'énigme de la matière et de l'énergie de l'Univers est au cœur du travail de recherche des cosmologues, des recherches pour lesquelles infiniment grand et infiniment petit sont deux centres d'une même problématique.

Jean-Baptiste Melin, physicien au SPP, travaille en cosmologie. Il s'intéresse aux amas de galaxies et participe à l'élaboration et à l'exploitation scientifique du catalogue d'amas de la mission Planck.

Lancé le 14 mai 2009, le satellite Planck observera le fond diffus cosmologique dans neuf bandes de fréquence (de 30 à 857 GHz) avec une résolution allant jusqu'à 5 minutes d'arc.

### Le CMB

Le fond diffus cosmologique (noté CMB pour *cosmic microwave background*) correspond à la première lumière émise dans l'Univers, 380 000 ans après le big bang. Avant cet instant, l'Univers était formé d'un plasma opaque de protons, d'électrons et de photons en équilibre thermique. L'Univers, en se refroidissant, a permis aux électrons de se lier aux noyaux et aux photons de se propager à travers l'espace. Les caractéristiques de ces photons primordiaux ont évolué avec l'expansion de l'Univers et on les observe aujourd'hui aux longueurs d'onde millimétriques.

Le CMB contient une information scientifique extrêmement précieuse car il a imprimé, telle une photo, l'état de la matière aux tous premiers instants de l'Univers. Il est bien compris dans le cadre d'un modèle incluant matière et énergie noires.



APPARENCE du noir

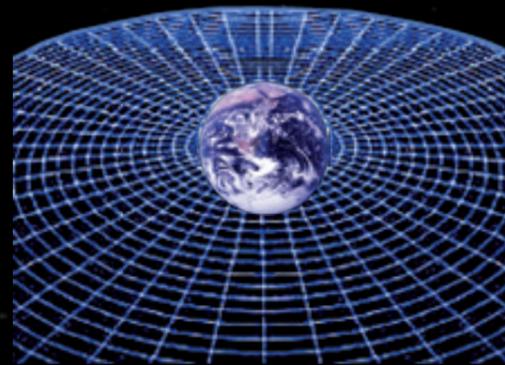
# L'espace et le temps

Par Chiara Caprini

Dès le début du vingtième siècle, les physiciens peuvent sonder le mystère des origines de l'Univers. Cette question est désormais bien encadrée dans le contexte de la physique théorique, après la naissance au début du siècle dernier de la cosmologie physique.

La révolution relativiste constitue le fondement de la cosmologie. L'idée newtonienne d'un temps éternel et d'un espace infini, absolu, est dépassée dans la relativité restreinte, en faveur d'un espace-temps à quatre dimensions dans lequel chaque référentiel<sup>(1)</sup> à vitesse constante est équivalent. La nécessité de rendre la gravitation newtonienne compatible avec la relativité restreinte conduit au postulat de l'équivalence locale entre mouvement accéléré et gravitation : c'est la naissance de la relativité générale comme théorie relativiste de la gravitation. On abandonne alors définitivement la géométrie euclidienne en faveur d'un espace-temps courbe. En 1915, Einstein établit la formulation définitive de ses équations qui relient le champ gravitationnel au contenu en matière-énergie de l'espace-temps.

Les différentes conceptions de l'espace-temps dans les théories de Newton et d'Einstein. Pour Newton, l'espace et le temps sont fixes et immuables, alors que pour Einstein l'espace est déformé et courbé par le contenu en matière-énergie, et le temps s'écoule de façon différente selon l'observateur.



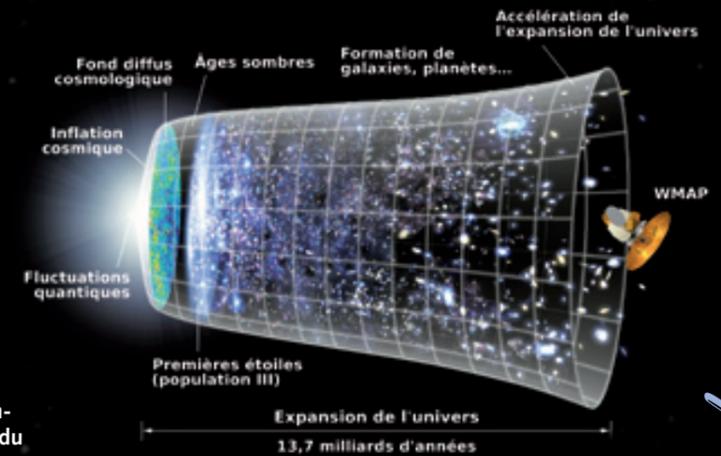
est caractérisé par une densité de matière homogène et isotrope, constante dans l'espace mais aussi constante dans le temps. Cet univers est fini. Il a une géométrie sphérique et la courbure de son espace-temps est fixée positive. Pour rendre son univers stable malgré l'attraction gravitationnelle due à la présence de la matière, Einstein introduit une constante arbitraire dans ses équations, qui joue le rôle d'une force répulsive. Bien que le modèle d'univers d'Einstein soit désormais dépassé, l'existence de cette constante cosmologique est plus que jamais d'actualité : dans le contexte de la théorie quantique des champs, elle représente la contribution du vide quantique au contenu en matière de l'espace-temps, et pourrait être responsable de l'expansion accélérée de l'Univers. L'existence d'une forme d'énergie inconnue, appelée énergie noire, agissant comme une force répulsive et entraînant une expansion accélérée dans la métrique de l'Univers, est l'un des problèmes clés de la cosmologie actuelle.

L'autre aspect du modèle cosmologique d'Einstein qui reste valide et essentiel dans la cosmologie moderne, est l'homogénéité et l'isotropie de la distribution de matière. En gardant cette hypothèse de base, quelques temps après la formulation de la relativité générale, les physiciens Alexander Friedmann et Georges Lemaître envisagèrent que le rayon de courbure de l'espace-temps puisse varier avec le temps. Ils dépassent la notion d'un univers statique et formulent des solutions des équations d'Einstein décrivant un univers dynamique, en expansion ou en contraction, selon les valeurs des paramètres de courbure, de la densité de matière et de la constante cosmologique. Ils jettent ainsi les bases de la théorie du big bang : celui d'un univers en expansion, avec une singularité initiale : les corps célestes s'éloignent alors les uns des autres et l'Univers baigne dans un rayonnement diffus, réminiscence de l'époque primordiale.

Ce modèle cosmologique est maintenant unanimement accepté par la communauté scientifique, grâce à trois preuves expérimentales principales : la confirmation observationnelle de la loi de Hubble, qui établit que les galaxies s'éloignent entre elles avec une vitesse proportionnelle à leur distance ; la mesure du fond diffus cosmologique, le rayonnement électromagnétique émis environ 380 000 ans après le big bang, témoin de l'époque initiale de l'évolution de l'Univers, quand la matière demeurait encore dans l'état ionisée ; et la mesure des abondances des éléments légers tels que l'hélium, qui, selon la théorie de la nucléosynthèse, se seraient formés quelques minutes après le big bang.

Bien que nous comprenions maintenant que l'Univers émerge, une seconde après le big bang, d'un état dense et chaud, et rentre, à partir de ce moment là, dans la période d'expansion connue, il subsiste de grands points d'interrogations, essentiellement concentrés sur la phase initiale. Cette époque est le champ de recherche de la cosmologie quantique, où la physique de l'infiniment grand et celle de l'infiniment petit sont en connexion. Ces recherches ont conduit à des nouvelles théories, dont l'inflation, qui recueille maintenant un large consensus grâce à ses prédictions précises et mesurables sur les anisotropies en température du fond diffus cosmologique. Mais une description satisfaisante de la phase initiale de l'histoire de l'Univers ne pourra s'obtenir qu'en faisant appel à une théorie des interactions des particules élémentaires et ultimement de la gravitation quantique qui est encore en voie de développement. Le mystère des origines demeure.

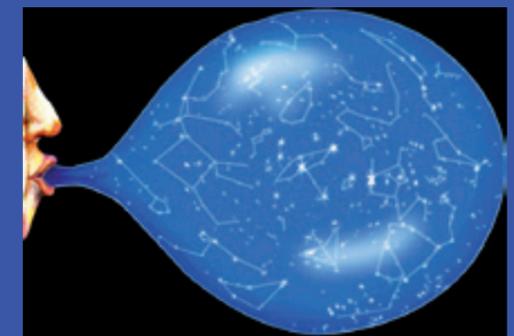
Chiara Caprini est chercheur CNRS à l'Institut de physique théorique du CEA Saclay. Son domaine de recherche est la cosmologie théorique, principalement les champs magnétiques primordiaux et le fond diffus d'ondes gravitationnelles.



Vue d'artiste de l'évolution de l'Univers depuis le big bang jusqu'à présent. La première phase d'expansion accélérée, appelée inflation, a généré les minuscules fluctuations en densité de matière qui se sont après transformées en galaxies et amas de galaxies. Les mêmes fluctuations sont visibles dans le fond diffus cosmologique sous forme de fluctuations en température, mesurées aujourd'hui par le satellite WMAP. A présent, l'Univers se trouve dans une phase d'expansion accélérée due à la présence de l'énergie noire.

## Le modèle du big bang

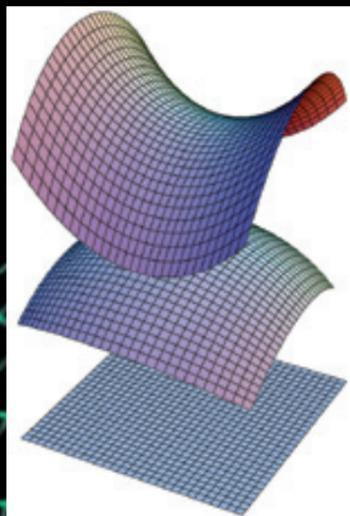
Modèle cosmologique selon lequel l'Univers émerge d'un état initial dense et chaud avant une phase d'expansion que nous observons encore aujourd'hui. Ce terme fut inventé dans les années 1950, au cours d'un programme de la BBC, par



l'astrophysicien Fred Hoyle pour désigner avec ironie\* le concept «d'explosion originelle» introduit dans le modèle cosmologique développé dans les années 1920 par les physiciens Georges Lemaître et Alexander Friedmann. Depuis la découverte du fond diffus cosmologique en 1964, le modèle du big bang est unanimement accepté par la communauté scientifique. Ce modèle n'explique pas l'origine de l'état initial de l'Univers, mais décrit son évolution depuis ce moment.

\*Comment oser traiter BB par le mépris ? (NDLR)

APPARENCE  
du perpétuel



Dans un modèle d'univers homogène et isotrope, l'espace peut prendre trois formes. Pour l'imaginer, on peut faire une analogie à deux dimensions.

En haut, courbure négative : un voyage sur une telle surface vous éloigne de plus en plus de votre point de départ.

Au milieu, courbure positive, géométrie d'une sphère : un voyage vous ramène à votre point de départ. Sans énergie noire, un tel univers finirait par s'effondrer sur lui-même.

En bas, absence de courbure : même sans énergie noire, l'expansion de l'Univers serait sans fin. Il semble que cela soit la forme de notre univers.

Etant donné le lien entre la gravitation et les propriétés structurelles de l'espace-temps, il est naturel de chercher une solution des équations de la relativité générale qui puisse s'appliquer à l'Univers dans sa totalité. Toutefois, le développement de la cosmologie moderne est basé sur une ultérieure innovation : l'abandon de l'idée d'un espace-temps statique et la naissance du concept de l'évolution temporelle de l'Univers. Cette nouvelle conception entraîne inévitablement la notion d'un début.

Le premier modèle d'univers formulé par Einstein au début du siècle dernier est cependant statique. Il

(1) Référentiel : Système d'axes de coordonnées muni d'une horloge destinée à la mesure des distances et du temps.

# Extra-Terra est

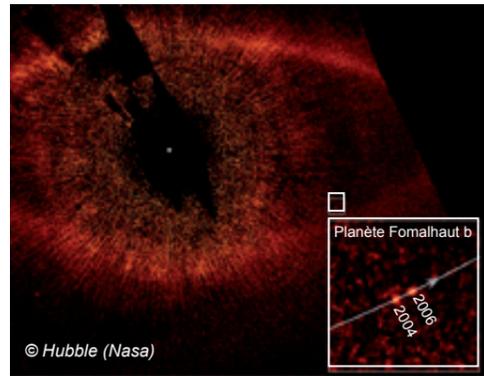
Par Cécile Ferrari

Nous sommes apparemment seuls dans l'Univers. Qu'en savons-nous en fait ? Même si la rencontre directe avec une vie extraterrestre n'est pas pour demain, l'observation d'un nombre croissant de planètes et de leur atmosphère tend à prouver que les conditions nécessaires à la vie existent ailleurs, sans aucun doute.



Notre Univers s'est formé il y a environ 14 milliards d'années, le Soleil et la Terre il y a 4,5 milliards d'années. La vie s'y est développée un milliard d'années plus tard. Elle s'est diversifiée il y a 500 millions d'années et notre cousine Lucy a trois millions d'années. Nos civilisations ont mis moins de 10000 ans pour développer les moyens techniques de l'exploration de la planète Terre et de l'espace environnant le Soleil. Sans doute atteindrons-nous les étoiles voisines dans les 10000 prochaines années. A la vitesse d'un million de kilomètres par heure, dix fois mieux que ce que l'on sait faire actuellement, nous pourrions traverser notre galaxie en quelques millions d'années. Ainsi explorerions-nous des millions, voire des milliards de planètes dans des délais bien plus courts que la vie de notre étoile, le Soleil. Nous ... ou un extraterrestre de la Galaxie? Paradoxalement, nous n'avons ni vu ni entendu personne. Est-ce un témoignage de notre solitude comme Enrico Fermi l'a souligné ? Mais nous savons que tout ce qui existe ou vit, n'est pas toujours ni visible ni audible.

(1) L'unité astronomique (symbole UA) est une unité utilisée pour mesurer les distances, surtout entre les objets du système solaire. De l'ordre de 150 millions de kilomètres, elle est historiquement basée sur la distance entre la Terre et le Soleil.



Fomalhaut est une jeune étoile brillante. Dans l'anneau de débris qui l'entoure, les astronomes ont découvert, par des techniques coronographiques, une planète qui a à peu près trois fois la masse de Jupiter. Cette planète dénommée Fomalhaut b bouge autour de son étoile...

En attendant d'inventer la propulsion nécessaire à cette vaste exploration, il nous faut mieux appréhender les conditions de la formation de la Terre, du développement de la vie et préciser ainsi les chances de la trouver autour des cent milliards d'étoiles de la Galaxie. L'équation de Drake propose d'y quantifier le nombre de civilisations observables. En l'état actuel de nos connaissances, ce chiffre est élevé, bien que soumis à de grandes incertitudes. La vie ailleurs est plausible et ceci confirme le paradoxe. Peut-être cette équation quantifie-t-elle simplement les limites de notre connaissance (et de nos budgets !) ou, comme certains le proposent, une preuve de l'autodestruction inexorable de toute civilisation acquérant un certain niveau technologique. En l'absence de signal reçu, que cherchons-nous désormais ? Pour commencer, les éléments nécessaires à une vie similaire à la nôtre et un scénario.

**De l'eau.** Elle est omniprésente dans notre Système solaire. Liquide, elle semble indispensable à la vie. Elle l'est sur Terre depuis très longtemps.

**Des molécules organiques.** La cellule, brique élémentaire de la vie, préserve de la dilution le plan de reproduction des cellules, l'ADN. Les protéines, formées d'acides aminés, reproduisent ce plan avec l'aide de l'ARN. Toutes sont des molécules organiques composées d'atomes d'hydrogène, d'oxygène ou d'azote attachés à un squelette d'atomes de carbone. Cette matière organique est-elle d'origine extraterrestre ?

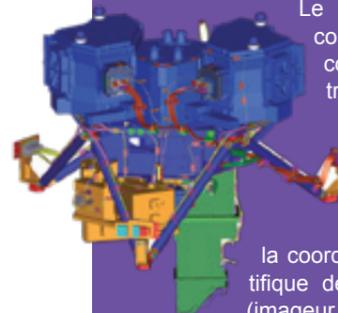
Sont-elles formées par les sources hydrothermales sous-marines découvertes récemment ? L'acide cyanhydrique et le formaldéhyde, précurseurs des acides aminés, sont répandus dans le milieu interstellaire et dans la poussière interplanétaire, la Terre a-t-elle été inséminée ou était-elle autosuffisante ?

**Une atmosphère.** Le carbone peut provenir d'une atmosphère riche en dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>, ou en méthane, CH<sub>4</sub>. Celle-ci maintient une certaine pression au sol et un effet de serre apte à maintenir l'eau à l'état liquide. Elle protège aussi des rayonnements ionisants. Au moment de l'apparition de la vie sur Terre, l'atmosphère était probablement d'origine volcanique, oxydante car riche en azote et CO<sub>2</sub>. Une telle atmosphère est pourtant moins propice à la formation des molécules organiques qu'une atmosphère réductrice de méthane.

**Un scénario.** Pour savoir comment la Terre et son atmosphère ont évolué, il faut comprendre comment les premiers blocs rocheux se sont agglomérés dans le disque protoplanétaire, ont grossi, migré et se sont stabilisés sur leur orbite, dans la zone habitable où l'eau peut rester liquide. Pour remonter le temps et écrire cette histoire, il faut chercher dans l'espace les différentes phases de ce processus, que nous présumons communément répandu. Il faut trouver des planètes qui ressemblent à la Terre, et déterminer la composition de leur atmosphère en fonction de leur âge. Et nous en trouverons ! Dans la Galaxie, à moins d'une centaine d'années-lumière du Soleil, 350 exoplanètes ont déjà été découvertes depuis 1995. Deux nouvelles le sont chaque mois. Les techniques de détection se multiplient au vu de l'enjeu. Les premières planètes détectées, les « Jupiters chauds », observées en ma-

rité par la méthode de la vitesse radiale, sont de la taille de Jupiter et proches de leur étoile, en deçà d'une unité atmosphérique (1 UA<sup>1</sup>).

## Le spectro-imageur Miri



Le spectro-imageur Miri est construit dans le cadre d'une collaboration Nasa/ESA entre le Jet Propulsion Laboratory et un consortium européen (ESA) au sein duquel l'Irfu joue un rôle très important puisque le SAP assure la coordination technique et scientifique de la contribution française (imageur de Miri) et que le SIS, le Sedi et le SACM contribuent au projet.

Refroidis à 7 K, les détecteurs de cet instrument observeront dans le domaine de longueurs d'onde 5-27 μm. L'instrument bénéficiera d'un mode coronographique pour sonder le voisinage proche des étoiles et faire des images des disques de débris et des planètes géantes de gaz avec une résolution spatiale dix fois meilleure que le télescope Spitzer. Il observera leur émission thermique, complétant ainsi l'imagerie faite en infrarouge par d'autres instruments embarqués sur le télescope JWST.

Grâce aux progrès de cette technique, des planètes de la taille d'Uranus sont maintenant découvertes à une distance de plus de 5 UA. La détection de transits planétaires est exploitée par les satellites Corot et Kepler. Les techniques coronographiques et l'observation dans le domaine infrarouge permettent maintenant de fouiller le voisinage des étoiles sans être éblouis. Ainsi le télescope spatial Hubble a-t-il réalisé en 2008 la première image de la planète b de l'étoile Fomalhaut (voir figure). Les gaz CO<sub>2</sub>, CO et la vapeur d'eau de quelques exoplanètes géantes ont d'ores et déjà été détectés. Le James Webb Space Telescope (JWST) prendra la relève en 2014, embarquant le spectro-imageur Miri (voir encadré). Cet instrument observera dans le domaine infrarouge les banlieues froides des systèmes planétaires, à la



Maquette à échelle réduite du miroir composite du JWST

recherche de corps glacés et de débris poussiéreux, mémoires de leur formation. Il mesurera les spectres des exoplanètes géantes, des atmosphères de planètes terrestres ou de la poussière interplanétaire, pour en déterminer masse et composition chimique.

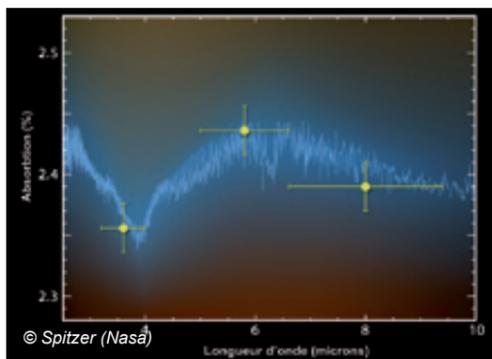
## Molécules de la vie

Les acides aminés sont des molécules qui contiennent deux groupes fonctionnels organiques, le groupe carboxyle -COOH et le groupe amino -NH<sub>2</sub>. La molécule est complétée par un radical dont la diversité conduit à former des centaines d'acides aminés. Vingt-deux acides aminés seulement apparaissent dans les organismes vivants sur Terre. Les acides aminés se lient pour former des polymères de protéines. Une protéine peut contenir des centaines, voire des milliers, de molécules d'acides aminés. L'acide ribonucléique (ARN) et l'acide désoxyribonucléique (ADN) sont deux molécules organiques. Nous recherchons les molécules organiques sur les exoplanètes car elles signent une possibilité de vie ailleurs que sur la Terre.



Le progrès technique, source des grandes découvertes, nous permettra d'ici quelques années de détecter des Terres lointaines. Dans quinze ans, nous serons sans doute toujours seuls mais environnés de mondes habitables. La vie ailleurs devient de plus en plus probable.

Cécile Ferrari est Professeure à l'Université Paris-Diderot et rattachée au Laboratoire Astrophysique interaction multi-échelles situé à Saclay (UMR AIM).



Signature de la molécule d'eau dans l'atmosphère de HD189733B détectée par le Télescope Spitzer

# D'apparences en apparences...

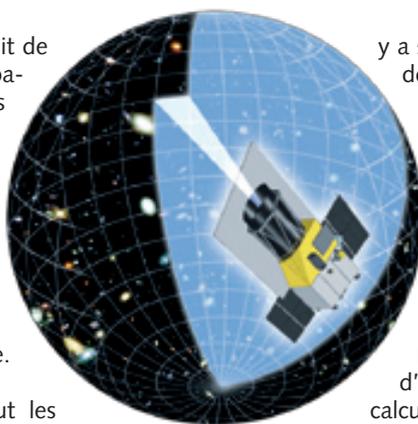
Scintillations

Par Pierre-Olivier Lagage

(1) E-ELT : European extremely large telescope

Le bon sens populaire nous dit de ne pas nous fier aux apparences ; l'habit ne fait pas le moine ! Ces dictons sont particulièrement pertinents pour l'astronomie, qui est avant tout une science liée à l'observation et donc d'apparences ; les régions de la Voie lactée, noires dans le visible, s'avèrent remplies d'étoiles en train de se former en infrarouge.

Ce sont, jusqu'à présent, surtout les avancées technologiques qui ont permis d'aller au-delà des apparences. Ainsi, il y a 400 ans, la lunette utilisée par Galilée a permis de se soustraire des limitations de l'œil. Il



Le projet Euclid-Dune vise à cartographier la matière noire afin de mieux contraindre nos connaissances l'énergie noire.

Il y a 50 ans, l'avènement du spatial a permis de nous soustraire du filtre constitué par l'atmosphère terrestre et d'avoir accès à toutes les lumières de l'Univers, rendant nécessaire le développement de spectro-imageurs innovants dans le domaine des rayons gamma, X et infrarouge. Nous allons disposer dans les années à venir d'une panoplie d'instruments qui vont permettre de voir plus loin, plus précis, plus large...

En plus du développement des moyens d'observations, le développement des calculateurs massivement parallèles va permettre des simulations numériques « multi-échelles », qui prendront en compte le fort couplage entre les différentes échelles de l'Univers (étoiles, galaxies, grandes structures).



Pierre-Olivier Lagage est spécialiste de l'instrumentation infrarouge et de l'étude des disques circumstellaires en relation avec la formation des planètes.

Nous vivons une époque formidable ! Nous approchons d'une compréhension globale de l'histoire de la formation des étoiles et des galaxies (projets Herschel, JWST, SVOM). La réponse à la question de notre apparente solitude semble à portée de main (E-ELT...)¹ et il nous faut bâtir une nouvelle physique dans laquelle les infinis doivent se rejoindre pour résoudre des questions majeures comme le contenu énergétique de l'Univers (projet Euclid, expériences auprès du LHC). L'Irfu est prêt pour ces nouvelles aventures de tout premier plan scientifique et technique.

## Va-et-vient

Pour la période comprise entre octobre 2008 et mai 2009

Tu vas...

Ils partent à la retraite: Jean-Claude Géry (DIR), Alain Magnon (SPHn), Jean Thinel (SIS), Guy Cordéro (Sénac), Michel Cribier (SPP) et Dominique Sauques (Sédi).

Ils prennent un congé... parental d'un an pour Estelle Monmarthe, sabbatique de onze mois pour Sandrine Hernando et sans solde pour Gildas Thomas qui

### Regrets

Jacky Gouet, technicien au SACM, nous a quittés le 31 janvier. Il n'avait que 45 ans et son décès subit et prématuré a suscité une grande émotion parmi ses nombreux collègues et amis de l'Irfu. Il nous laisse le souvenir d'un collègue chaleureux et empreint d'une profonde camaraderie. Ses obsèques ont rassemblé le 13 février une nombreuse délégation du CEA/Saclay.

tente une nouvelle aventure professionnelle, tous trois du Sédi. Pour André Rosowsky du SPP c'est un mi-temps pour création d'entreprise.

Ils partent en détachement... en Autriche auprès de l'AIEA pour Danas Ridikas jusqu'en 2011, à Barcelone pour cinq ans auprès de l'organisation européenne F4E pour Pierre-Yves Chaffard.

Les mutations pour la période concernent Denis Arranger qui quitte le SIS pour l'IRFM à Cadarache et Julien Pancin qui quitte le Sédi pour le Ganil.

... et tu viens

Arrivée à la Dir de Sophie Kerhoas-Cavata qui vient du SPHn pour se charger de la communication de l'Institut, de Pascal Debu qui réintègre l'Irfu à la fin de sa mise à disposition auprès de l'IN2P3 et de Jean-Michel Dumas du Sénac pour se consacrer au projet Fluor C du SHEF.

Jean-Marc Le Goff quitte le SPHn et arrive au SPP sur le projet BAO Radio. Corine Salmon nous vient du SPRE (FAR) pour se charger des études déchets et assainissement au Sénac, Lydia Coudray quitte le secrétariat du Sédi pour celui du Sénac suite au départ de Corinne Césarini à la DAM et le SAP voit le retour de Félix Mirabel à la fin de son détachement à l'ESO au Chili.

Les recrutés : Emmanuel Moulin et Federico Ferri respectivement pour les projets Hess et CMS au SPP, Andry Rakotozafindrabe au SPHn intègre le groupe Alice, au SAP Karl Kosack va travailler sur Hess et CTA tandis que Christian Arcambal rejoint le Ledes. Le SACM accueille quant à lui Luc Maurice pour travailler sur les stations d'essais Supratech et Hassen Jenhani qui va s'intéresser aux coupleurs Ifmif. Au Sédi, Frédéric Château rejoint le Lilas, David Attié le Ldef tandis que Julien Giraud vient renforcer la cellule qualité du Sédi.

Directeur de la publication : Philippe Chomaz Directeur scientifique : Vanina Ruhlmann-Kleider Rédacteur en chef : Jean-Luc Sida

Rédacteurs invités : Christian Gouiffès, Roland Lehoucq, Vanina Ruhlmann-Kleider

Comité éditorial : Maryline Besson, Rémi Chipaux, Olivier Corpacce, Philippe Daniel -Thomas, Antoine Drouart, Christian Gouiffès, Florence Hubert-Delisle, Fabien Jeonneau, Emmanuelle de Laborderie, David Lhuillier, Pierre Manil, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Angèle Séné, Didier Vilanova

Secrétariat : Maryline Besson, Elsa Rodrigues (apprentie) Photographies portraits : Imag'In Irfu-Alain Porcher Mise en page : Christine Marteau

Abonnement : Sophie Chastagner Tél : 01 69 08 75 57 ou sophie.chastagner@cea.fr

Dépôt légal juin 2009