



L'EMPIRE DU SOLEIL : L'HOMME FACE À L'UNIVERS

SÉANCE DU 18 DÉCEMBRE 2003

avec Sylvie Vaclair : astrophysicienne, chercheur à l'Observatoire Midi-Pyrénées, professeur à l'Université Paul-Sabatier de Toulouse et Pierre Kerszberg : professeur de Philosophie à l'Université d'État de Pennsylvanie (USA) de 1990 à 2000, à l'Université de Toulouse-Le Mirail depuis 2000.

LYCÉE POLYVALENT « RIVE GAUCHE » DE TOULOUSE

Réservée aux classes de seconde, cette séance a regroupé près de 200 élèves, accompagnés de leurs enseignants en sciences physiques, Sciences et Vie de la Terre ainsi que Lettres Modernes. Les quatre classes étaient issues du lycée Henri Matisse (Cugnaux) et du lycée Polyvalent Rive Gauche (Toulouse).

L'Université des Lycéens est organisée par la Mission Agrobiosciences, en collaboration avec : le Conseil Régional Midi-Pyrénées, la DRAF, le Rectorat, le Centre Régional de Documentation Pédagogique, le cercle Pierre de Fermat, l'École Nationale de Formation Agronomique, le Conseil National des Programmes, le groupe 3A.





L'UNIVERSITÉ DES LYCÉENS

UNE EXPÉRIENCE PILOTE EN MIDI-PYRÉNÉES POUR METTRE LA SCIENCE EN CULTURE

En France et en Europe, la régression des effectifs étudiants dans certaines filières scientifiques préoccupe les pouvoirs publics. Ce phénomène pose à moyen terme le problème du renouvellement des cadres scientifiques et techniques, des enseignants et des chercheurs. De plus, le désintérêt des jeunes à l'égard de la science risque de nuire au débat démocratique sur les choix d'orientation de la recherche et de ses applications. La revalorisation de la place de la science dans la cité est d'ailleurs l'une des priorités du Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation et de la Recherche.

LA CONNAISSANCE ET LA CULTURE SCIENTIFIQUE AU CŒUR DES RAPPORTS ENTRE LA SCIENCE ET LA SOCIÉTÉ

La Mission d'Animation des Agrobiosciences (MAA), créée dans le cadre du Contrat de Plan État-Région Midi-Pyrénées 2000-2006, a pour vocation, au plan régional et national, de favoriser l'information, les échanges et le débat entre la science et la société. Elle est à l'initiative de l'Université des Lycéens : une série de rencontres visant à rapprocher les chercheurs, les professionnels, les lycéens et leurs enseignants. Cette démarche destinée aux lycéens de Midi-Pyrénées, devrait à terme être transposée dans d'autres régions de France, voire d'Europe.

UNE INITIATIVE POUR SENSIBILISER LES JEUNES À LA CULTURE SCIENTIFIQUE

Les principaux objectifs de l'Université des Lycéens sont :

- Inscrire les sciences, les technologies et les techniques dans la culture générale afin de permettre aux jeunes de se forger un esprit critique,
- Redonner du sens aux savoirs scientifiques en montrant les passerelles existant entre les disciplines, les relations entre la science et le contexte socio-économique et culturel, ainsi que les liens entre les savoirs et les métiers,
- Incarner la science à travers l'exemple du parcours de scientifiques venus à la rencontre des élèves pour « raconter » la science et dialoguer.

UNE QUESTION, UNE DISCIPLINE, UNE TRAJECTOIRE

- La découverte d'une discipline scientifique : chaque séance, animée par l'équipe de la MAA, fait intervenir un chercheur, le conférencier principal, qui explore un champ scientifique à travers sa trajectoire individuelle, mais aussi à travers l'histoire collective de sa discipline : les grands enjeux, les questionnements, les perspectives.
- La confrontation des approches et l'interdisciplinarité : en contrepoint du conférencier principal, un intervenant de discipline ou de secteur professionnel apporte son point de vue et réagit aux propos du chercheur.
- Un dialogue avec les lycéens : à l'issue de ces exposés, une heure est consacrée au débat entre les lycéens et les intervenants.

UN ACCOMPAGNEMENT PÉDAGOGIQUE DES CLASSES

- L'édition d'un dossier préparatoire permet aux enseignants de préparer le débat en amont : listes des ressources documentaires, biographies des intervenants, principaux points de repères sur les sujets...
- La diffusion du contenu des séances est assurée par la mise en ligne sur les sites de la MAA www.agrobiosciences.org et de ses partenaires, ainsi que par la diffusion d'un document écrit.

UNE ÉVALUATION DES SÉANCES

La mise en place et la validation d'un protocole d'évaluation sont assurées par des chercheurs de l'équipe de recherche en didactique des sciences, à l'École Nationale de Formation Agronomique, auprès des lycéens : recueil de leurs réactions, appréhension des évolutions de leur opinion et de leur appropriation des connaissances.



LE SUJET

« L'HOMME FACE À L'UNIVERS »

RAPPELS HISTORIQUES

Il y a longtemps, les hommes croyaient que la Terre était au centre du monde. Le ciel l'entourait comme un cocon... Mais voilà qu'au XVI^e siècle l'astronome et philosophe polonais Nicolas Copernic édifie sa théorie du mouvement de la Terre et des planètes. Dans son système héliocentrique (connu sous le nom de système de Copernic), toutes les planètes tournent autour du Soleil. La Terre n'est plus qu'une planète comme les autres, dont la rotation sur elle-même donne l'alternance du jour et de la nuit. Malgré la grande simplicité de son système, Copernic ne réussit pas à faire admettre ses idées à ses contemporains. À côté de ce choc « astronomique » l'œuvre de Copernic marque un tournant immense du progrès scientifique et une rupture dans l'histoire de la pensée humaine, ébranlant la vision médiévale du monde plaçant l'homme au centre d'un univers fait pour lui, s'opposant de front à la théologie chrétienne. Cela explique les réactions violentes qu'elle soulève pendant plus de deux siècles, notamment la condamnation par le pape Clément VIII du philosophe Giordano Bruno, déclaré hérétique et brûlé vif à Rome le 17 février 1600. Récemment, en 1992, le Vatican a réhabilité le physicien et astronome Galilée, forcé par l'Inquisition en 1633, sous la menace de torture, de nier que la Terre tourne autour du soleil.

QU'EST-CE QU'UN ASTROPHYSICIEN AUJOURD'HUI ?

Qu'est-ce qu'il cherche ? Avec quels outils ?

Pour mieux comprendre l'Univers, et pour mieux comprendre comment la vie est apparue sur Terre, l'observation depuis la Terre ne suffit pas. Il faut aller voir de plus près avec des vols habités, des sondes telle que Cassini, du programme américano-européen d'étude de la planète Saturne et de son satellite Titan. Lancée en 1997, la sonde pénétrera dans l'atmosphère de Titan en novembre 2004 pour terminer sa mission en 2008.

FINALEMENT, QUE SAVONS-NOUS DE L'UNIVERS ?

Qu'il n'y a pas de centre du monde, qu'il est composé de milliards de galaxies qui, chacune, regroupe des milliards d'étoiles. Notre étoile, le Soleil, fait elle-même partie d'une galaxie, la Voie Lactée, qui constitue notre environnement immédiat.

POURQUOI OBSERVE-T-ON L'UNIVERS ? COMMENT ?

Mieux comprendre l'Univers, comment il est apparu et ce qu'il deviendra, c'est aussi mieux comprendre la Terre : comment elle est née, de quelle manière elle s'est organisée et quel sera son devenir.

LES GRANDS ENJEUX DE L'ASTROPHYSIQUE

De tous temps, l'homme a cherché à conquérir de nouveaux territoires, sur la Terre, bien entendu, mais aussi depuis plusieurs décennies, dans l'Espace, au sein du système solaire. Découvrira-t-on, un jour, des planètes à même d'abriter des espèces vivantes ? D'autres découvertes comme celle de Copernic pourraient-elles bouleverser notre représentation de l'Univers ?

LA CONFÉRENCE

L'EMPIRE DU SOLEIL : L'HOMME FACE À L'UNIVERS

D'abord, les hommes ont pensé que la Terre était plate. Il a fallu se rendre à l'évidence : elle est ronde. N'empêche, les hommes se consolent : cette boule ne bouge pas, immobile au centre de l'Univers et le Soleil danse sa ronde autour. Patatras, et ce fut plus dur encore, non seulement nous ne sommes pas placés au centre, mais c'est la Terre qui tourne autour de l'astre solaire. Depuis, d'observations en découvertes, cette science récente qu'est l'astrophysique ne cesse de nous apprendre qu'il existe d'autres galaxies que la nôtre ou que des planètes extérieures à notre système solaire sont détectées régulièrement. « L'astrophysique ouvre des horizons par rapport à la manière dont les hommes se situent sur la Terre », rappelle Sylvie Vauclair. D'où viennent les étoiles et comment meurent-elles, comment se constitue une planète telle que la nôtre, quel âge a le Soleil ? C'est à toutes ces questions que s'attache l'astrophysique, en étudiant la matière et la lumière. Ou comment à partir d'un nuage de gaz ou d'un simple rayon de soleil, ces scientifiques obtiennent une foule d'informations sur le cosmos et notre planète.

« Je commencerai par vous expliquer la différence entre l'astronomie et l'astrophysique. L'astronomie est la plus ancienne des sciences. Elle consiste à regarder le ciel, à observer les planètes, les étoiles et les galaxies avec des moyens de plus en plus sophistiqués, pour analyser leurs mouvements au cours du temps.

En revanche, l'astrophysique est beaucoup plus récente : elle est née il y a à peine plus d'un siècle.



SYLVIE VAUCLAIR : LA TÊTE DANS LES ÉTOILES ET LES PIEDS SUR TERRE

Sylvie Vauclair est Astrophysicienne, Docteur ès Sciences Physiques, Chercheur à l'Observatoire Midi-Pyrénées, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse depuis 1981 après avoir enseigné pendant douze années à l'Université de Paris et membre de l'Institut universitaire de France. Ses travaux scientifiques portent sur la formation et l'évolution des éléments chimiques qui composent la matière dans l'Univers : Soleil, Étoiles, Univers Primordial.

Ancienne élève d'Hubert Reeves et d'Evry Schatzman, elle a publié, seule ou en collaboration, une centaine d'articles et d'ouvrages scientifiques, mais aussi des livres accessibles à tous (1). Reconnue au niveau national et international, Sylvie Vauclair assume de nombreuses responsabilités : elle a été présidente du comité scientifique de l'Institut d'Astrophysique de Paris, présidente de la section Midi-Pyrénées de la Société Française de Physique, présidente de la Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique. Membre de l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace et de l'Academia Europea, elle est aussi Chevalier des Palmes Académiques.

Bénéficiant d'une formation musicale approfondie, elle participe à des rencontres associant la science, l'art, la philosophie, la poésie. Passionnée par l'enseignement et le partage des connaissances, elle est membre fondatrice de l'association des amis de la Cité de l'Espace de Toulouse. Elle anime de nombreux cours et conférences de tous niveaux, à destination d'un très large public. Elle est également active dans le cadre des « Exposciences » nationales et internationales.

Enfin, Sylvie Vauclair a participé, sur invitation, à de nombreuses émissions de radio (France-Inter, France-Culture, France-Musiques, France-Bleu, Europe I, Europe II, RTL, Sud-Radio, etc.) et de télévision (TF1, France2 et France3, ainsi que RFI, TLT et autres). Des articles ont été écrits à son sujet dans plusieurs quotidiens et hebdomadaires dont Le Monde, Libération, Ciel et Espace, etc.

Ses actions et ouvrages ont été couronnés par l'Alpha d'Or de l'Espace (1998), le Prix du Cercle d'Oc (1999), ainsi que le Prix du Livre Scientifique d'Orsay (2002).

1. La Symphonie des Étoiles, l'Humanité face au Cosmos (éd. Albin Michel), 1997, réimpression juin 1999, Alpha d'Or de l'Espace 1998, prix du Cercle d'Oc 1999

2. La Chanson du Soleil, l'Intimité de notre Étoile dévoilée par ses vibrations (éd. Albin Michel), 2002, prix du livre scientifique d'Orsay 2002



Un clair de Terre vu de la Lune.
Au premier plan, le sol de la Lune photographié par une des équipes des missions Apollo.

Comme son nom l'indique, il s'agit de la physique de l'astronomie : une science qui étudie de quoi sont constitués les objets célestes (leur structure, leur matière) et comment ils naissent, vivent et meurent. Cette science cherche donc à comprendre de quoi est faite une étoile, par exemple, à savoir depuis combien de temps elle existe, comment elle s'est formée et comment elle va disparaître. Pour cela, toutes les branches de la physique sont nécessaires : la thermodynamique, l'électricité, l'optique, la mécanique, la physique nucléaire...

C'est une science jeune, disais-je, mais qui va vite, très vite : les découvertes faites par les astrophysiciens se sont énormément accélérées ces dernières décennies. Pour s'en rendre compte, il faut un peu revenir à l'histoire.

DE QUOI AVOIR LE TOURNIS

Il y a très longtemps, les hommes pensaient que la Terre était fixe et se situait au centre du monde. Selon eux, le Soleil, les autres étoiles et les planètes

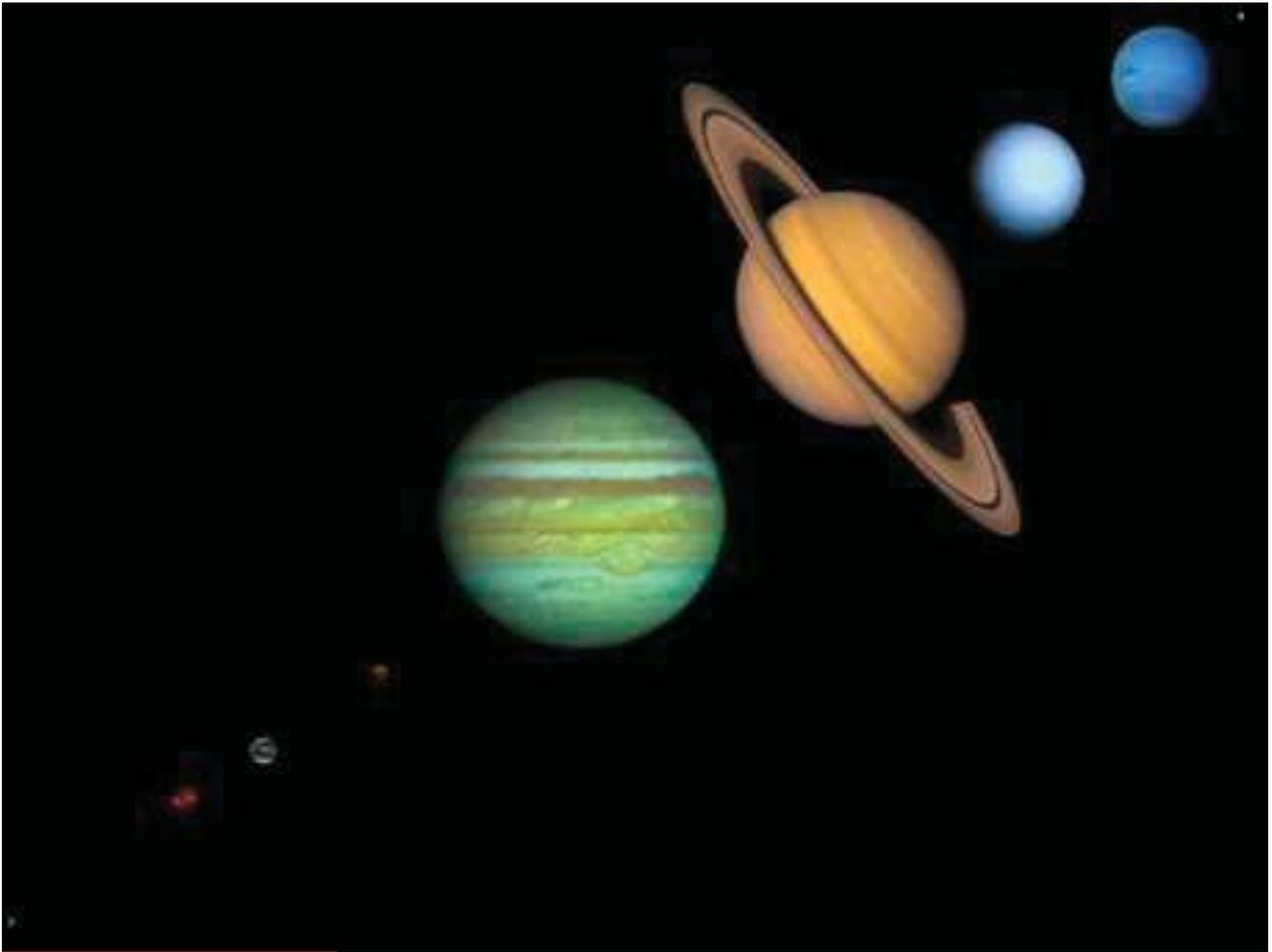
tournaient autour de la Terre. Un philosophe grec, pourtant, du nom de Aristarque de Samos, émet une autre idée, dès le IV^e siècle avant Jésus-Christ. En observant les planètes, Aristarque avait en effet découvert que leur mouvement dans le ciel s'expliquerait beaucoup mieux si la Terre tournait autour du Soleil et non l'inverse. Sauf qu'à l'époque, les hommes n'étaient pas du tout préparés à accepter cette idée. En fait, il a fallu attendre dix-huit siècles pour qu'ils commencent à l'admettre ! C'est en effet Copernic, dans les années 1600, qui est enfin revenu à cette idée que la Terre n'est pas fixe dans l'espace et qu'elle tourne autour du Soleil. En revanche, dans cette conception, Copernic pense que le Soleil ne bouge pas, comme si les hommes avaient besoin de se raccrocher à des repères stables dans l'espace. Ce n'est qu'au début du XX^e siècle qu'on s'est aperçu que le Soleil est une étoile comme les autres, mais très proche de la Terre, qu'il est en mouvement et qu'il fait partie d'un grand ensemble, une galaxie comprenant 200 milliards d'étoiles : la Voie Lactée. Puis on a découvert qu'il y avait dans l'Univers des milliards de galaxies autres que la nôtre, peut-être une infinité d'autres galaxies, puisque nous ne savons pas, aujourd'hui, si l'Univers est fini ou infini. Il n'y a donc pas de centre à l'Univers.

LE VOYAGE DE LA LUMIÈRE

Autre grand bond en avant : c'est au cours du XX^e siècle que l'homme s'est arraché du sol pour aller dans l'espace. Et en l'occurrence, l'homme ne va pas loin... La distance la plus grande qu'il a réussi à franchir, c'est celle de la Terre à la Lune, c'est-à-dire un peu plus de 300 000 km. Mais les astronautes de la station Mir, par exemple, vont mille fois moins loin : ils ne sont qu'à 400 km au-dessus du sol. Loin d'être au milieu des étoiles, ils sont cantonnés dans la « banlieue » de la Terre, mais une banlieue située dans la direction verticale...

Quant au Soleil, 150 millions de km nous en séparent ! C'est là une telle distance que nous avons du mal à l'imaginer. C'est pour cela qu'on utilise une autre unité de distance, qui concerne la lumière.

Pourquoi la lumière ? En fait, quand vous regardez un objet, quel qu'il soit, vous ne le voyez jamais tel qu'il est au moment même où vous le regardez. Car si vous pouvez le voir, c'est parce que la lumière a quitté cet objet, a voyagé vers vous et qu'elle est arrivée sur la rétine de vos yeux. Même si la lumière voyage très vite – elle parcourt 300 000 km par seconde – cela demande malgré tout un peu de temps. C'est évidemment encore plus vrai quand les objets sont très éloignés de nous. Quand vous regardez la Lune, il faut une seconde à la lumière pour venir jusqu'à vous. Vous la voyez donc telle qu'elle était une seconde avant. Pour le Soleil, il faut huit minutes. Et si vous observez la planète Neptune, il faut quatre heures à la lumière pour franchir la distance. Les étoiles sont encore plus loin, et



Les neuf planètes qui tournent autour du Soleil : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton. Les distances réelles entre elles ne sont pas ici représentées. En revanche, leurs dimensions les unes par rapport aux autres sont respectées. Ce qui permet de constater notamment que Jupiter est une planète « géante » du système solaire, de dimension bien plus importante que celle de la Terre.

leur lumière met des années à nous parvenir, voire des dizaines ou des milliers d'années. Quant aux galaxies lointaines, il faut des milliards d'années ! Vous ne voyez donc pas le ciel tel qu'il est en ce moment même, mais tel qu'il était dans le passé. Ce temps nécessaire à la lumière pour traverser l'espace permet ainsi d'avoir une unité de distance plus compréhensible. C'est pourquoi nous mesurons ce qui nous sépare des objets célestes, non pas en km, mais en année-lumière, c'est-à-dire la distance que parcourt la lumière en un an.

Je vous ai dit que depuis le début du xx^e siècle, nous savons que le Soleil est une étoile qui fait partie d'une galaxie contenant 200 milliards d'étoiles, et qu'au-delà de notre système solaire, d'autres systèmes existaient probablement dans l'Univers, c'est-à-dire d'autres planètes tournant autour d'autres étoiles.

Nous en avons la confirmation depuis 1996 : nous commençons en effet à détecter ces autres systèmes planétaires, grâce aux nouvelles technologies et à des instruments de plus en plus précis. Nous ne voyons pas ces planètes, mais nous repérons des signes de leur existence, grâce à un phénomène particulier : quand une grosse planète tourne autour



Ci-dessus :

– Une galaxie spirale vue de face.

A droite :

– Une galaxie spirale vue de biais.

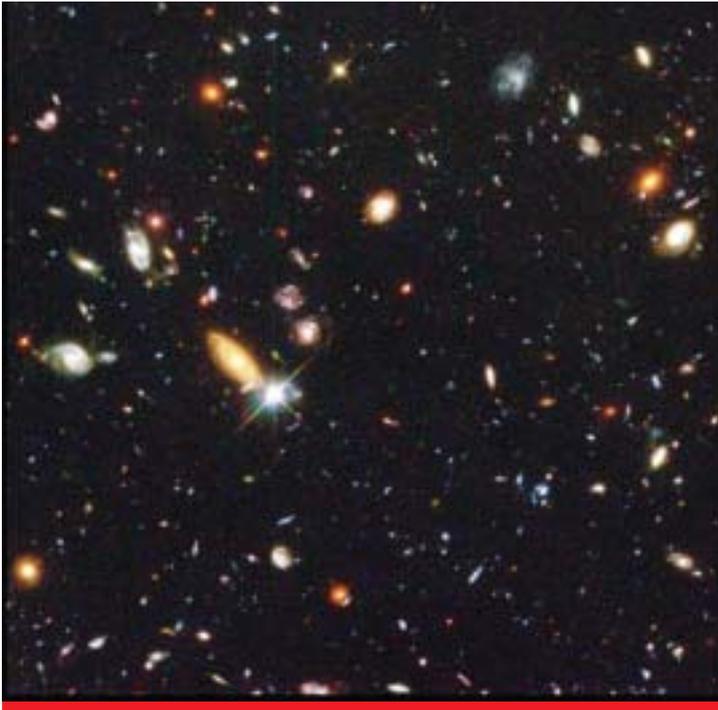
S'il s'agissait de notre propre Galaxie, qui a la même forme, le Soleil serait ainsi situé.



d'une étoile, elle provoque, chez l'étoile, un petit mouvement de rotation. Dès que nous détectons cette sorte de mouvement chez une étoile, nous en déduisons logiquement qu'au moins une planète tourne autour d'elle. 120 « exoplanètes », ou planètes extra-solaires, ont déjà ainsi été repérées. Et actuellement, en moyenne, nous en découvrons une nouvelle par mois. Une précision : nous ne sommes capables de repérer que de grosses planètes, comme le sont Jupiter ou Saturne. Mais d'ici trois ans, nous allons lancer dans l'espace un satellite, « Corot », qui sera capable de détecter des planètes de la taille de la Terre.

« CERTAINES GALAXIES ENTRENT EN COLLISION »

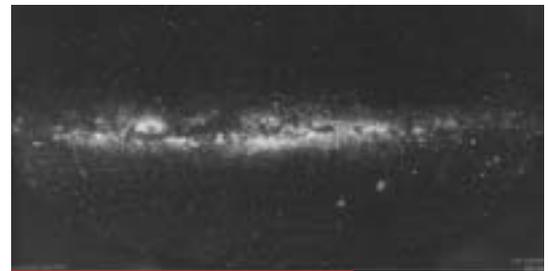
Nous observons également beaucoup de galaxies dans l'Univers, dont plusieurs sont des galaxies dites « spirale », en raison de leur forme. Leur centre, qui est appelé le « bulbe », rassemble un très grand nombre d'étoiles. À partir de ce bulbe, partent des structures courbées, un peu comme des spirales, qui se déroulent comme dans un disque. Si on pouvait observer notre propre Galaxie de l'extérieur, elle aurait cette forme, et le Soleil se situerait environ aux deux-tiers à partir du centre vers l'extérieur, comme une petite étoile à la périphérie de la Galaxie et à l'intérieur d'une spirale.



Une portion du ciel photographiée à l'aide du télescope spatial **Hubble**. Tous les points lumineux, à l'exception du « croisillon » qui figure une étoile proche de nous, sont des galaxies très lointaines.



Une galaxie spirale vue de côté (le disque est vu par la tranche). La région sombre est due à des nuages de gaz – ce sont les nébuleuses – dans lesquels naissent de nouvelles étoiles.



La Voie Lactée (Cette image est composée de plusieurs images juxtaposées).

Il existe des milliards de galaxies dans l'Univers, qui comprennent des centaines de milliards d'étoiles, autour desquelles tournent des planètes. Certaines de ces galaxies entrent en collision entre elles. Concrètement, elles se « rentrent dedans ». C'est un phénomène très fréquent. Car en général, les galaxies ne sont pas isolées : elles sont souvent regroupées dans des amas de galaxies. Certains amas en regroupent une dizaine, d'autres peuvent en réunir des milliers.

Notre Galaxie (la Voie Lactée) fait partie d'un amas de galaxies. Dans cet amas, nous pouvons évoquer Andromède, située près de nous – mais elle est quand même à des millions d'années-lumière ! – et qui est une galaxie spirale, comme la nôtre. Or il faut savoir qu'Andromède se rapproche de nous. Et que si cela continue, elle entrera en collision avec notre Galaxie, mais dans cinq à dix milliards d'années. Ce n'est pas demain !

Venons-en à présent à notre propre Galaxie, la Voie Lactée. Quand vous la regardez depuis la Terre, vous la voyez sous la forme d'une sorte de grande bande blanche qui traverse tout le ciel. Mais il faut imaginer que nous sommes dedans et que ce n'est pas une bande blanche uniforme : elle comporte aussi des parties sombres, qui sont les nébuleuses.

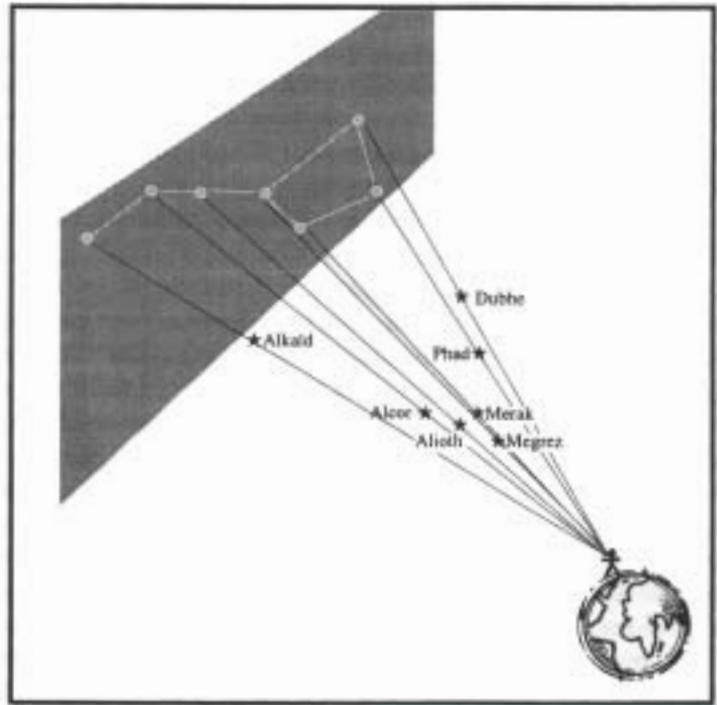
COMMENT MESURER LES DISTANCES ?

Si j'évoque depuis le début les distances de telle étoile ou de telle galaxie, c'est que nous sommes à même de cartographier le ciel et de mesurer ces distances. Comment fait-on ? Les idées sont simples, mais les appliquer est compliqué. La méthode la plus simple, c'est celle qu'utilisent nos deux yeux pour nous permettre de distinguer le relief, par exemple de discerner que tel objet est situé plus loin que tel autre. Car chaque œil voit l'objet dans une

Hubble : ce télescope spatial américano-européen a été mis en orbite autour de la terre en 1990. Il doit son nom à Edwin Powell Hubble, astrophysicien américain qui a prouvé l'existence de galaxies hors de notre système solaire et a conforté la théorie de l'expansion en exprimant l'idée que les galaxies s'éloignent les unes des autres.



La constellation de la Grande Ourse : qui imagine, en la regardant dans le ciel, que ses étoiles se trouvent à des distances très différentes les unes des autres par rapport à la Terre ? Et pourtant... L'étoile Megrez, qui se trouve à peu près à 50 années-lumière de la Terre, est trois fois plus proche de nous que l'étoile Alkaïd. Ces différences de distance font également que nous ne voyons pas les étoiles au même moment : nous voyons Megrez telle qu'elle était il y a cinquante ans, et Alkaïd telle qu'elle était il y a 150 ans.



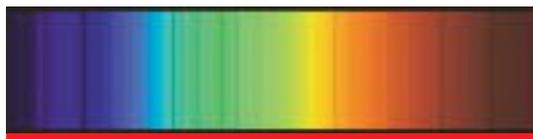
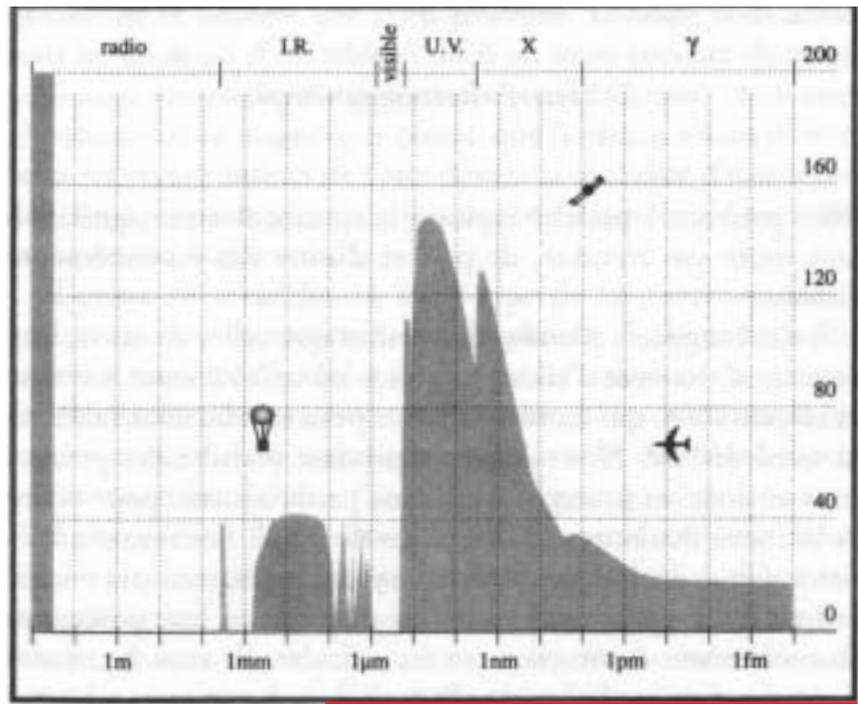
La trigonométrie : cette partie des mathématiques porte sur la mesure des triangles (trigos signifie triangle en grec, et le latin metrus signifie mesure), à l'aide de formules faisant appel au cosinus, au sinus et à la tangente.

direction un peu différente et transmet cette image au cerveau, qui fait « le point », reconstitue une seule image et en déduit la distance de l'objet. Cette méthode qui nous est naturelle est appelée la méthode de « triangulation », utilisée pour mesurer la distance d'un objet éloigné. Par exemple, avec deux longues-vues placées à une certaine distance l'une de l'autre, mais visant le même objet. Il suffit ensuite d'opérer un petit calcul de **trigonométrie** pour obtenir la distance de l'objet. Plus l'objet est éloigné, et plus il faut écarter les deux longues-vues, c'est-à-dire la base du triangle.

Le principe est le même pour calculer les distances des étoiles. Mais comme nous ne pouvons pas le faire à l'aide de deux points différents sur la Terre, car nous ne pourrions pas aller assez loin, nous utilisons la rotation de la Terre autour du Soleil. Si vous observez en effet une étoile d'abord au mois de janvier, puis au mois de juillet, vous constaterez que sa position dans le ciel a changé, ce qui est normal, la Terre s'étant déplacé autour du Soleil. Ce sont ces deux points – l'un en janvier, l'autre en juillet – qui nous permettent d'avoir un écartement à grande échelle. Mais là encore, cette méthode ne convient que pour les étoiles proches. Pour mesurer la distance des objets célestes les plus éloignés, des techniques beaucoup plus complexes nous permettent de reconstituer l'Univers tel qu'on l'observe. C'est ainsi que nous pouvons cartographier le ciel avec la distance réelle que les étoiles ont par rapport à la Terre.

LA VOIE LACTÉE.

Celle-ci doit son nom à sa couleur blanchâtre. Cette même couleur a inspiré le nom de galaxie qui est tiré d'un mot grec désignant le lait. C'est Galilée le premier qui, en 1610, a découvert que la Voie Lactée était constituée d'étoiles, mais celles-ci sont tellement nombreuses qu'on ne les distingue pas les unes des autres à l'œil nu. Il faut imaginer la Voie Lactée comme un grand disque, dont le centre se trouve à environ 30 000 années-lumière de la Terre. Le Soleil et la Terre font partie de ce disque, d'où la fameuse traînée blanchâtre que l'on voit dans le ciel. Mais toutes les autres étoiles que nous distinguons dans le ciel font également partie de la Galaxie. Simplement, étant moins concentrées en dehors du disque, elles sont bien séparées et donc plus visibles. D'après « La symphonie des étoiles », de S. Vauclair. Pages 38-39.



Les raies du spectre solaire.

DANS UN RAYON DE LUMIÈRE

Nous savons donc mesurer les distances. Mais nous avons également bien d'autres informations sur les objets célestes. Tout ce que nous savons d'eux est issu du rayonnement que nous en recevons, et donc de l'étude de la lumière. C'est elle qui nous permet de comprendre le fonctionnement des étoiles. Prenons le Soleil. Vous savez que sa lumière se décompose dans les couleurs de l'arc-en-ciel. C'est ce qu'on appelle le spectre solaire, qui va du rouge au violet. Lorsqu'on étudie ces couleurs de façon plus précise, nous nous rendons compte qu'il y a des couleurs manquantes : à la place, apparaissent des raies sombres, un peu comme un code-barre : celles-ci nous indiquent une foule de choses telles que la température du soleil ou sa composition chimique. En effet, ces raies sont dues au fait que les éléments chimiques du Soleil absorbent, « avalent » la lumière à certaines longueurs d'onde précises.

Cela nous a permis de constater que dans le Soleil, et dans les étoiles en général, il y a tous les éléments chimiques qui sont sur la Terre. Là encore, c'est normal, puisque la Terre et le Soleil ont été formés au départ à partir de la même nébuleuse. De même,

La Terre reçoit sans cesse des rayons venus de l'espace : ondes radio, infrarouge, ultraviolet, rayons X et rayons gamma. Entre l'infrarouge et l'ultraviolet, la mince bande verticale indique les rayons visibles à l'œil, que sont les couleurs de l'arc-en-ciel. Ce tableau représente les rayonnements en fonction de leurs longueurs d'onde, des plus grandes (un mètre) aux plus petites, de mille en mille : millimètre, micromètre, nanomètre, picomètre... En abscisse, figurent les hauteurs au-dessus du sol auxquelles il faut monter pour observer chaque longueur d'onde, en km.

l'étude de ces raies et de leurs longueurs d'onde nous renseigne sur la vitesse du Soleil ou de toute autre étoile : cela nous permet de savoir si l'étoile se rapproche ou s'éloigne de nous.

Mieux encore : ce spectre n'est qu'une toute petite partie des rayonnements qui nous proviennent du Soleil et de l'espace. Car il représente seulement la lumière que nous pouvons voir, du rouge au violet, en passant par le bleu, le vert et le jaune. L'œil humain est en effet incapable de voir les autres rayonnements. C'est-à-dire ceux qui sont au-delà du violet : l'ultraviolet dont une partie nous arrive et nous fait bronzer, mais aussi les rayons X qui servent à faire des radio médicales, les rayons gamma et, à l'autre bout du spectre, ce qui est au-delà du rouge : l'infrarouge, les ondes radio-électriques (ions et électrons), utilisées pour la radio, la télé, ainsi que les micro-ondes, celles-là même qu'utilisent les fours du même nom. Toutes ces ondes se déplacent à la vitesse de la lumière, mais sur des longueurs différentes.

L'ASTRONOMIE : UNE SCIENCE ÉGALEMENT ARABE.

Si les étoiles ont souvent des noms arabes, tels qu'Altaïr ou Megrez, c'est que les Arabes se sont intéressés très tôt à l'étude du ciel. Au Moyen-Age, principalement, époque à laquelle l'Europe est peu active d'un point de vue scientifique, de grands mathématiciens et astronomes reprennent et perfectionnent les connaissances apportées par les Grecs. Construisant des observatoires, notamment à Bagdad, inventant des instruments astronomiques, comme l'astrolabe qui sert à mesurer la position des astres, établissant des catalogues d'étoiles et des tables de mouvements planétaires, ils améliorent la précision des relevés de position des étoiles. Leur science s'est diffusée ensuite en Occident, notamment à travers l'Espagne et à la suite des Croisades.

Ces ondes peuvent être de redoutables agressions et c'est l'atmosphère qui, sur plusieurs centaines de km au-dessus de nous, sert d'écran protecteur et arrête la plupart des rayonnements du ciel. Sinon, il n'y aurait pas de vie terrestre. Les rayons X et gamma détruiraient toutes les molécules. Seuls les rayonnements visibles arrivent jusqu'au sol, ainsi que les UVA, qui nous font bronzer et les ondes radioélectriques. Mais la plupart des ultraviolets ne parviennent pas jusqu'au sol. Il faut aller à 150 km au-dessus du sol pour pouvoir les rencontrer. Quant aux infrarouges, aux rayons X et gamma, ils sont au minimum à 40 km au-dessus de nos têtes.

VIE ET MORT DES ÉTOILES

Nous connaissons l'âge du Soleil : 4,5 milliards d'années. Nous savons également qu'il est à la moitié de son existence. Nous pouvons enfin retracer la manière dont il s'est formé, en observant d'autres étoiles naître quasiment sous nos yeux. Le Soleil s'est constitué à partir d'une nébuleuse, donc d'un nuage de gaz (composé d'hydrogène, d'hélium et de métaux) qui s'est effondré sur lui-même et s'est concentré, peut-être à la suite d'une onde de choc due à une explosion d'étoile... Lorsque ce nuage commence à s'effondrer, il se condense à certains endroits et tourne sur lui-même. Ce mouvement de



Au sein de la nébuleuse d'Orion, les taches blanches sont des embryons d'étoiles, en cours de formation.



Image obtenue en infra-rouge, dans la nébuleuse d'Orion, d'une étoile en train de se former (centre rouge). Autour, en noir, le disque de poussière.

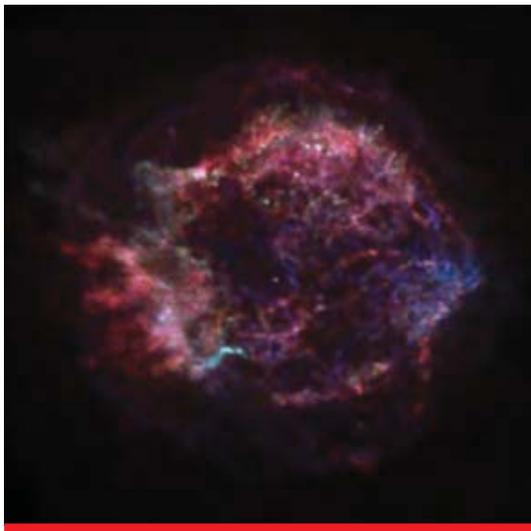
rotation aplatit peu à peu le nuage comme un disque, formant une étoile au centre. Ce centre atteint des températures considérables, qui provoquent à un moment donné des réactions nucléaires : au centre des étoiles, les noyaux d'hydrogène (protons) en fusion se transforment en noyaux d'hélium, ce qui produit de l'énergie sous forme de photons. C'est ce qui se passe actuellement pour le Soleil, qui est en quelque sorte un réacteur nucléaire. Parallèlement, le disque gazeux se fragmente en petits rochers, qui, par collision, s'agglutinent pour donner naissance aux planètes, situées autour de l'étoile.



Mort d'une « petite » étoile telle que le Soleil. Au centre, la « naine blanche » est le cœur de l'ancienne étoile qui s'est contracté et a refroidi. Autour, les gaz ont gonflé et formeront plus tard une autre nébuleuse.



Pour revenir sur Terre, cette image montre que même de nuit, la lumière diffuse, de plus en plus importante au-dessus des villes, empêche d'observer correctement le ciel. Seules les zones de montagne ou de désert sont suffisamment obscures.



Mort d'une étoile de taille plus importante (une supernova) : ce qu'il reste après son explosion, vu en rayons X.

L'étoile termine sa vie quand il n'y a plus d'hydrogène au centre. Mais elle meurt de manière différente selon sa taille. Une petite étoile comme le Soleil se met à gonfler pendant des millions d'années, car l'hélium se met à son tour à fusionner, enrobant peu à peu les planètes, si elles n'ont pas été éjectées avant. Puis l'hélium s'épuise, la température baisse de nouveau, tandis que l'hydrogène libéré va former une nébuleuse ailleurs. C'est une mort lente, en quelque sorte, qui n'arrivera, pour le Soleil, que dans cinq milliards d'années.

En revanche, quand meurt une étoile de dimension plus importante, elle explose en quelques heures : c'est ce qu'on appelle une étoile supernova. On en a observé plusieurs fois dans le ciel : un soir, vous voyez juste une petite étoile et le lendemain, celle-ci est mille fois brillante. C'est qu'elle vient d'exploser. »



LE POINT DU VUE DU PHILOSOPHE DU COSMÉTIQUE... AU COSMOS

Que vient donc faire un philosophe dans cette affaire ? En fait, alors que la science pose la question du « comment ? » pour mieux comprendre le monde, le philosophe, lui ne cesse de demander : « Pourquoi ? », et cela depuis Platon... Pourquoi un ciel nous paraît beau, pourquoi telle hypothèse est considérée comme scientifique, pourquoi la théorie du Big-Bang est-elle privilégiée ?... En posant ces questions, en s'interrogeant sur notre conception du cosmos, en montrant ce qui définit le savoir scientifique, et notamment l'astrophysique, par rapport à la croyance ou aux superstitions, Pierre Kerszberg nous rappelle que toute science est d'abord humaine : elle nous parle de la manière dont fonctionne notre esprit, de ses besoins de simplicité et de beauté. D'où également ce paradoxe : alors que l'esprit humain a pour exigence de se représenter le monde dans sa totalité de manière simple et cohérente, la science n'apporte que des solutions partielles et provisoires. Comment combler ce besoin ? Pas seulement avec la pensée scientifique purement rationnelle mais sans doute, aussi, avec un reste de croyance.

COSMOS, COSMÉTIQUE...

Pour Pierre Kerszberg, « Le philosophe, comme tout le monde, ne peut que s'émerveiller de ce voyage dans le lointain et le souci d'un retour à la Terre ». Un émerveillement devant la beauté d'un ciel étoilé, par exemple. D'ailleurs, explique-t-il, « le mot même de « Cosmos » s'apparente à un autre mot que vous connaissez bien : la cosmétique. Car la racine

PIERRE KERSZBERG

Professeur de philosophie à l'Université de Toulouse-Le Mirail, dont il dirige le département de philosophie, Pierre Kerszberg a effectué une partie de sa formation et de sa carrière à l'étranger : après avoir obtenu son doctorat de philosophie à l'Université de Bruxelles, il enseigne plusieurs années aux Etats-Unis. Auteur de plusieurs ouvrages, Directeur d'une revue intitulée « Kairos » (nom d'un dieu grec qui sert à désigner l'aptitude à saisir l'occasion favorable ou opportune), il est spécialisé dans l'histoire et la philosophie des sciences modernes et contemporaines, plus particulièrement la physique et la cosmologie.

grecque kosmos désigne la beauté, l'ordre, l'ornement, la belle apparence ». Un mot qui, dans l'antiquité grecque, ne s'appliquait pas qu'au ciel, mais servait aussi à évoquer la beauté et l'ordre d'une armée prête à la bataille, et qui pouvait donc impressionner l'ennemi.

Pour ces Anciens, si l'univers est un cosmos, c'est qu'il est beau comme une armée riche et bien déployée, où tout est bien à sa place. « Et de fait, quand on regarde le ciel, nous sommes frappés par la majesté des étoiles, comme si elles étaient superbement rangées ».

Une fascination que les hommes ont toujours eue, quelles que soient l'époque ou la civilisation. D'ailleurs, on trouve cette même référence à la beauté dans d'autres civilisations. Ainsi, les Hébreux parlent dans la Bible des « armées du ciel ». En somme, la première impression que nous fait le ciel depuis l'aube des temps, c'est que le monde est agréable à voir, ordonné, majestueux, imposant.

Reste l'envie de décrire et comprendre ce ciel qui nous entoure. Très tôt, les Grecs utiliseront pour cela les mathématiques, notamment parce que dans leur conception, celles-ci sont un outil d'ordre et de beauté. » Les premiers astronomes grecs, aux IV^e et V^e siècles avant Jésus Christ, ont ainsi été les premiers à fournir des modèles cohérents de l'ensemble des positions des objets célestes, de leur organisa-



tion, en utilisant les mathématiques et en particulier la géométrie dans un souci esthétique. Car les mathématiques permettent également de construire des choses qui frappent par leur ordonnancement ».

D'OÙ VIENT LA SIMPLICITÉ ?

Mais il convient de bien comprendre que c'est toujours l'homme qui projette sur le cosmos cette idée de beauté et d'ordre. C'est lui qui y voit une harmonie et une simplicité. « Il se peut par exemple que si Copernic a déplacé le centre du monde de la Terre au Soleil, il l'a fait pour répondre à un souci de simplicité dans la construction du modèle des cieux. Placer le Soleil, et non la Terre, au centre du monde, lui permettait de calculer les distances entre les corps célestes de manière beaucoup plus simple. Un constat qui peut s'appliquer à toute l'histoire des sciences : toutes les révolutions scientifiques ont été animées par le souci de simplifier une théorie pour mieux comprendre des phénomènes ».

Reste à savoir, toujours selon P. Kerszberg, si cette simplicité vient de notre esprit – nous voudrions que le monde soit simple – ou si c'est une propriété de l'Univers lui-même. Peut-être, en effet, l'Univers est-il simple, et c'est notre esprit qui s'y est adapté. Ou bien, au contraire, c'est l'homme qui a projeté sur le monde une construction de l'esprit. « La solution se trouve sans doute entre les deux. Les exigences de simplicité proviennent de notre esprit, certes, mais celui-ci ne fonctionne pas dans le vide, il n'est pas étranger à son environnement : cette exigence de simplicité doit refléter quelque chose qui est effectivement présent dans le monde ».

LE SAVOIR SCIENTIFIQUE NE PEUT PAS S'ARRÊTER

Une simplicité qui, en tout cas, a toujours permis la progression des sciences. « Il n'y a d'ailleurs aucune limite à l'évolution du savoir scientifique ; et c'est même ce qui le caractérise : par principe, le savoir scientifique ne peut pas s'arrêter dans son progrès. Un important philosophe des sciences du XX^e siècle a trouvé une formule pour décrire ce phénomène. Il nous dit qu'une bonne théorie scientifique est une théorie dont les propositions sont, en principe, réfutables. C'est-à-dire qu'on peut les soumettre au test de l'expérience pour savoir si elles sont valables. À l'inverse, une proposition irréfutable, que personne donc ne peut contester en prouvant le contraire, ne peut pas être une proposition scientifique. » Et Pierre Kerszberg de donner un exemple pour mieux comprendre. « Si je propose, par exemple, l'hypothèse suivante : tous les mercredis, il pleut. Je peux la tester, vous pouvez me prouver le contraire. Cette hypothèse est réfutable. Mais si je dis : la pluie est mouillée, vous ne pouvez rien contester. Ce ne peut pas être le point de départ d'une proposition scientifique. »

C'est cette propriété qui explique qu'on ne peut pas empêcher la science de toujours avancer. Si un

scientifique nous dit : « voilà la théorie définitive de la structure de la matière du cosmos », vous comprenez bien que quelque chose ne va pas, car normalement, sa théorie s'expose à la réfutation, donc à une certaine fragilité, contrairement aux croyances religieuses ou magiques.

ENTRE SCIENCE ET CROYANCE

Or, concernant l'Univers, nous retrouvons ces deux aspects : « un savoir scientifique qui ne cesse de progresser en réfutant d'anciennes théories devenues fausses, une fois testées, mais aussi des croyances religieuses, telles que les nombreux mythes cosmologiques dont on trouve des traces très lointaines, y compris dans les dessins des grottes préhistoriques. Des croyances pour lesquelles l'homme est une partie intégrante du cosmos et ne peut pas s'en dissocier. Son destin est déterminé par le moindre caillou, le moindre papillon, par la pluie, le vent ou tout autre phénomène naturel. L'homme se sent « chez lui » dans l'Univers, dans ces récits anciens sur l'origine et la structure de l'Univers. Il est lui-même déterminé par le ciel. Sa naissance est inséparable de la naissance du monde. Mais inversement, l'homme détermine aussi le cosmos, au moins pour une part. Il y a ainsi une grande proximité entre l'homme et l'Univers dans les récits cosmologiques qui ont précédé les premières formulations scientifiques. Et c'est sans doute pour cette raison, entre autres, que le développement de la pensée rationnelle et scientifique n'a pas été simple : non seulement les efforts de nombreux penseurs furent nécessaires, mais il a fallu encore une grande modestie, pour accepter de n'en expliquer qu'une petite partie ».

UNE GRANDE MODESTIE ET UNE FANTASTIQUE MOTIVATION

C'est là justement une des caractéristiques de la science : « celle-ci est non seulement réfutable, mais elle est aussi toujours partielle. Et quand bien même elle s'est détachée de la pensée mythique, pour laisser place à la physique, puis à l'astrophysique et à la cosmologie, il doit bien y avoir encore des traces de ces croyances dans les théories scientifiques d'aujourd'hui », puisque toutes relèvent finalement de la même motivation. Quelle est la préoccupation humaine qui fait que nous ne pouvons pas penser le cosmos sans nous dire qu'il présente une certaine simplicité qui éveille notre curiosité et qui motive la recherche scientifique ? Que reste-t-il du rapport premier de l'homme à l'Univers dans la curiosité que nous éprouvons encore aujourd'hui à l'égard des corps célestes ? Pour quelle raison, parmi tous les scénarios possibles pour expliquer l'évolution de l'Univers, les cosmologues ont choisi, depuis plus de cinquante ans, l'hypothèse selon laquelle l'Univers est né à partir d'un atome primitif, un Big-Bang ? Le philosophe s'intéresse aux motivations qui ont poussé les scientifiques à privilégier ce modèle, et ce



que sont les autres scénarios, ce qu'on en fait, d'où ils viennent. Sont-ils vraiment réfutés ? Car, en fait, il n'est pas aussi simple de réfuter une théorie pour passer à la suivante. Par exemple, des gens comme Galilée, Kepler ou Descartes, au XVII^e siècle, ont accepté la révolution copernicienne alors même que certains de leurs contemporains pensaient avoir réfuté cette hypothèse. Il a fallu donc une sorte de motivation fantastique, une très grande foi dans la validité de cette théorie, pour qu'elle puisse surmonter les attaques. C'est un fait permanent dans l'histoire des conceptions de l'Univers : d'un point de vue logique, les théories doivent être réfutables. Mais il faut en même temps une conviction très forte pour résister à certaines de ces réfutations. C'est dans cet équilibre fragile que progresse le savoir scientifique. Ainsi, que peut la théorie du Big-Bang ? D'un côté, il faut qu'elle développe sa cohérence interne pour résister aux attaques possibles, d'un autre côté il faut qu'apparaissent de téméraires adversaires pour justement provoquer de tels arguments. C'est de cette manière que la science va progresser, sans qu'on puisse préjuger si la théorie du Big-Bang se maintiendra toujours. »



QUESTIONS ET RÉPONSES

LES SECRETS DE L'UNIVERS : CE QUE L'HOMME SAIT ET CE QU'IL IGNORE TOUJOURS...

Apparemment, l'Univers continue de susciter une curiosité certaine. Beaucoup de questions, ce jour-là, de la part des lycéennes et lycéens présents, des plus pragmatiques – le salaire des chercheurs- jusqu'aux plus philosophiques – pour-quoi y a-t-il des étoiles- en passant par certaines inquiétudes, vite apaisées, sur la mort du Soleil ou le risque d'une collision de notre planète avec une galaxie proche. C'est l'intégralité de ces questions qu'on n'ose pas toujours poser et des réponses apportées par Sylvie Vaclair et Pierre Kerszberg que nous vous proposons de lire.

« Combien gagne un astrophysicien ? »

Sylvie Vaclair : « Il est difficile de répondre, car cela dépend de l'évolution de la carrière. En tout cas, il faut une véritable motivation si l'on veut faire de la recherche scientifique, parce que les études sont longues et approfondies, ce qui n'empêche pas de connaître des difficultés pour trouver un poste. Au bout de ce chemin, vous êtes payés au départ autour de 2 000 € par mois, ce qui est inférieur aux salaires des entreprises privées ».

« Selon les moments, on voit la Lune plus ou moins grosse. À quoi c'est dû ? »

Sylvie Vaclair : « C'est une illusion d'optique. Quand la Lune est à l'horizon, elle vous semble deux fois plus grosse que lorsque vous la voyez plus haut dans le ciel. En fait, c'est parce que vous avez un point de comparaison : quand la Lune est à l'horizon,

à côté d'elle, vous voyez des arbres, des bâtiments, ce qui vous la fait paraître plus grosse. »

« Vous avez dit qu'on avait trouvé 120 planètes, hors du système solaire et je voudrais savoir s'il y a de la vie sur certaines d'entre elles ? »

Sylvie Vaclair : « Pour l'instant, on ne peut pas savoir s'il y a de la vie ailleurs que sur la Terre. En revanche, nous sommes sûrs qu'il n'y a pas de vie comme la nôtre sur les 120 planètes en question, car elles sont pour la plupart comme Jupiter : ce sont des planètes gazeuses, sans surface solide. Il n'y a aucune raison qu'il n'y ait pas d'autres planètes solides comme la Terre et on espère en découvrir bientôt. Cela ne veut pas dire pour autant qu'il y aura de la vie.

C'est une question qui, en tout cas, intéresse énormément les scientifiques aujourd'hui. Une vie comme celle que la Terre connaît est à base d'eau. Nous cherchons donc en premier à savoir s'il y a de l'eau sur d'autres planètes. Mais même si nous trouvons de l'eau, cela ne signifie pas forcément que nous trouverons de la vie. Il y a de l'eau sur Mars, peut-être sur la Lune, mais pas de vie ».

« Comment se fait-il qu'Andromède va entrer en collision avec notre Galaxie et qu'est-ce que cela va faire ? »

Sylvie Vaclair : « L'Univers est en expansion et les galaxies, en fait, s'éloignent de nous comme elles s'éloignent les unes des autres. Mais chaque galaxie a, en plus, un mouvement qui lui est propre. Prenons l'exemple d'un courant d'air : il y a dans l'air des molécules, des poussières qui ont un mouvement aléatoire dans tous les sens, qu'on appelle le « mouvement brownien ». Quand il y a un rayon de lumière dans une pièce, vous voyez les particules qui dansent dans tous les sens. S'il y a en plus un courant d'air, celui-ci emmène toutes les particules, mais ces dernières continuent quand même à aller dans tous les sens, au sein de ce mouvement global. Ce qui fait qu'à un moment donné, l'une de ces particules peut venir malgré tout vers vous. C'est le cas pour Andromède qui se rapproche de notre Galaxie. Mais il n'y aura pas de collision avant des milliards d'années ! »

« Pourquoi y a-t-il des étoiles ? »

Sylvie Vaclair : « C'est une question peut-être pour le philosophe. Leibniz a dit : « Pourquoi quelque chose plutôt que rien ? » La démarche scientifique consiste à essayer de répondre à des questions, en construisant des théories qui permettent d'expliquer des phénomènes. Ces théories en effet sont réfutables, au sens où on les remet en question, qu'elles doivent être nourries de preuves. Mais dès lors qu'on explique quelque chose, il y a toujours d'autres questions qui se posent. C'est cela, l'avancée des connaissances scientifiques : toujours



reposer de nouvelles questions. En fait, on n'expliquera jamais tout. On peut expliquer comment les choses fonctionnent, mais pas pourquoi est-ce ainsi, pourquoi nous sommes là, pourquoi quelque chose existe. Cela, c'est la question du philosophe ».

Pierre Kerszberg : « Absolument. Le philosophe qui observe l'évolution des idées s'aperçoit qu'il y a une différence très nette entre le « pourquoi ? » et le « comment ? ». Pourquoi y a-t-il des étoiles, c'est-à-dire quelque chose, que ce soit un atome, une étoile ou une poussière ?

Depuis Platon, de multiples tentatives de réponses différentes ont été faites dans l'histoire de la philosophie et effectivement, depuis la révolution copernicienne, cela ne relève plus de la science. Avant, quelqu'un comme Aristote disait : « Je ne peux pas comprendre le comment de la nature si, d'abord, je ne réponds pas à la question du pourquoi ». Un exemple de l'évolution des idées qui explique bien le passage de la conception grecque à la nôtre sur la nature : prenez l'œuvre de Galilée au début du XVII^e siècle, un des premiers partisans de Copernic. Il a découvert une loi qui est peut-être la pierre angulaire de toutes les théories scientifiques depuis, c'est celle de la chute des corps. C'est le premier qui a démontré l'expression mathématique qui permet de comprendre le rapport de l'espace parcouru par rapport au temps-lumière parcouru, par exemple pour une pierre qui tombe. Galilée a démontré que l'espace parcouru est proportionnel au carré du temps. Or, s'il avait pu parler à Aristote, ce dernier lui aurait demandé d'abord pourquoi la pierre tombe. Et pour lui, c'est parce qu'elle a le désir de retourner vers le centre du monde, son lieu naturel... »

« Comment est constitué le bulbe d'une galaxie ? »

Sylvie Vauclair : « C'est une question de densité : cela dépend simplement du nombre d'étoiles qu'il y a dedans. Une galaxie est un disque qui tourne. Au départ, ce disque contient du gaz, dans lequel se forment des étoiles. Le gaz est plus dense au centre qu'à l'extérieur, en raison de la gravité qui attire la matière au centre. Et quand il y a plus de matière, elle se transforme plus facilement en étoile, ce qui explique qu'il y en ait plus dans le bulbe et que celui-ci soit plus brillant ».

« Vous avez dit que l'Univers n'a pas de centre. Mais où est le début et où est la fin ? »

Sylvie Vauclair : « C'est la question qui nous vient lorsqu'on imagine le Big-Bang d'une façon trop simpliste. Ce serait comme une explosion à un endroit donné, à la manière d'un ballon qui se gonfle. Il faut oublier cette idée. En fait, le Big-Bang, c'est le début de tout l'espace qu'on connaît et qu'on observe, mais aussi le début du temps. On ne peut pas dire ce qu'il y avait avant : il n'y a pas un avant et un

après. De même, on ne peut pas dire que le Big-Bang a commencé à tel ou tel endroit. C'est tout l'Univers, tout d'un coup, qui est né. C'est très difficile à comprendre ».

« C'est quoi, un trou noir ? »

Sylvie Vauclair : « Un trou noir est une quantité de matière concentrée à l'intérieur d'un très petit rayon. Elle est tellement concentrée que même la lumière ne peut pas en sortir. N'importe quelle masse peut devenir un trou noir, à condition d'être suffisamment concentrée. Prenons le Soleil : il a actuellement un rayon de 700 000 km et une masse de 2.1 030 kg. Soit 2 milliards de milliards de milliards de tonnes. Si le Soleil concentrait cette masse à l'intérieur d'un rayon de 3 km, au lieu de 700 000, ce serait un trou noir.

Vous allez me dire que si la lumière ne peut pas sortir des trous noirs, on ne peut pas les observer. Eh bien si. On pense d'ailleurs avoir la preuve qu'ils existent, y compris peut-être dans notre Galaxie. Car un trou noir n'est jamais isolé : il y a de la matière autour, qui spirale d'abord et finit par tomber dans le trou noir. À ce moment-là, cette matière produit de l'énergie et elle rayonne, souvent avec des rayons X. Or au centre des galaxies, y compris au centre de la nôtre, on observe des points très brillants en rayons X. On pense que ce sont des méga trous noirs, qui ont des masses de plus de 1 million de fois la masse du Soleil. Ce ne seraient pas des phénomènes rares dans l'Univers ».

« Comment se forment les satellites naturels autour des planètes comme la Lune pour la Terre ? »

Sylvie Vauclair : « Nous pensons que la formation de la Lune est tout à fait particulière par rapport aux autres satellites naturels. Les satellites des planètes se forment, semblent-ils, en même temps que la planète : au départ, il y a un nuage de gaz qui tourne et finit par s'effondrer, ce qui génère une étoile au centre, avec un disque de poussière autour. Ces poussières s'agglutinent sous l'influence des mouvements du disque, des collisions et des effets de la gravitation. Cela finit par produire des planètes et parfois des satellites autour. Mais le fait que la matière autour de ces planètes crée ou non des satellites dépend aussi des marées. Celles-ci produisent des déformations de la surface océanique, qui provoquent des renflements deux fois par jour, dues à l'interaction gravitationnelle. Inversement, les satellites subissent aussi des déformations dues à l'effet de marée de la planète. Et elles sont parfois tellement importantes que cela casse le satellite, ou que cela empêche le satellite de se former. Celui-ci peut ainsi rester sous la forme d'anneaux, comme c'est le cas de Saturne.

Quant à la Lune, c'est tout à fait différent. En général, les satellites sont petits par rapport à leur planète.



« Dans les manuels scolaires, on dit aux élèves que les dimensions de l'Univers sont en expansion et qu'il était beaucoup plus petit dans le passé. C'est vrai ? »

Sylvie Vauclair : « Dire que l'Univers est en expansion signifie que la distance moyenne entre les galaxies augmente au cours du temps. Mais il ne faut pas parler des « dimensions » de l'Univers, car celui-ci pourrait être infini. Dans ce cas, on ne peut pas dire qu'il était plus petit dans le passé. Il faut bien distinguer l'Univers qui existe à notre époque de l'Univers « observable ». Ce que nous observons, c'est le passé. Ce n'est pas l'Univers actuel ; Et cet Univers observable, lui, a une limite : celle du Big-Bang ».

Or il n'y a pas beaucoup de différence de taille entre la Lune et la Terre. Nous avons eu beaucoup de mal à l'expliquer. Nous pensons à présent savoir pourquoi. Cela passe par l'étude de la composition biochimique de la Lune. Il semble qu'au moment où les planètes se sont formées, la Terre a dû entrer en collision avec une planète déjà formée mais un peu plus petite, comme la planète Mars. Une partie de la Terre a dû être arrachée et l'autre planète a dû se casser en morceaux. L'ensemble a tourné autour de la Terre et s'est aggloméré pour donner la Lune. C'est très important parce que cette collision a conduit à faire basculer l'axe de rotation de la Terre sur elle-même, ce qui a donné les saisons. Sans cette collision, l'axe de la Terre basculerait probablement de manière aléatoire, comme d'autres planètes. Il semble que ce système de la Terre et de la Lune soit particulièrement stable et c'est sans doute pour cela que la vie a pu se développer sur la Terre ».

« Est-ce qu'il y a de l'énergie dans le vide ? »

Sylvie Vauclair : « C'est une question extrêmement importante par rapport au développement de la physique contemporaine. Mais il faut d'abord savoir ce que l'on appelle le vide. Dans les théories actuelles, ce qu'on appelle le vide, ce n'est pas une situation où il n'y aurait rien. C'est une situation de minimum d'énergie. En clair, il y a une énergie du vide et c'est important pour l'étude de la structure et de l'évolution de l'Univers. Non seulement il y a une énergie dans le vide, mais en plus, le vide peut changer d'état : on peut passer d'un type de vide à un autre type de vide ».

Le mouvement brownien :

celui-ci désigne une agitation constante et désordonnée des particules microscopiques en suspension dans un liquide ou un gaz. Ce phénomène a été découvert par un botaniste écossais, Robert Brown, en 1827, alors qu'il observait une goutte d'eau piégée dans un morceau de quartz depuis des millions d'années. Dans cette goutte, de minuscules particules ne cessaient de s'agiter. Albert Einstein a développé cette théorie en décrivant mathématiquement le phénomène. Aujourd'hui encore, l'étude du mouvement brownien intéresse plusieurs disciplines scientifiques, dont la physique et les mathématiques, pour mieux comprendre les processus aléatoires, tels que les fluctuations boursières.

Leibniz (1646-1716) : à la fois philosophe, juriste, diplomate et savant, l'allemand G. W. Leibniz a fondé en 1700 l'Académie des sciences de Berlin. Il s'est consacré notamment à l'étude des mathématiques et au développement en série des fonctions. Il est l'inventeur, en même temps que Newton, du calcul différentiel et intégral. On lui doit également une machine à calculer, plus perfectionnée que celle mise au point par le Français Blaise Pascal en 1642, et les premières descriptions du principe de calcul binaire.



QUELQUES RESSOURCES DOCUMENTAIRES

HISTOIRE DE LA SCIENCE ASTRONOMIQUE

- *AstronomiA : l'astronomie pédagogique*
<http://users.skynet.be/astromia>
Explication de plusieurs thèmes concernant l'astronomie, de son origine à aujourd'hui : système solaire, corps célestes, planètes, instruments d'observation, conquête spatiale, personnages célèbres...
- BENEST, Daniel. *Les mémoires d'Uranie ou la merveilleuse histoire de l'astronomie*. Burillier, 2003.
Cet ouvrage, accessible à tous, montre comment l'évolution des idées et des techniques d'observation a mené la pensée humaine de l'Antiquité à l'astronomie moderne.
- *Le ciel et la terre : exposition virtuelle*. BNF, 1998
<http://expositions.bnf.fr/ciel/index.htm>
L'homme a de tout temps essayé de trouver sa place dans

l'Univers. Cette exposition virtuelle de la Bibliothèque nationale de France, d'une grande richesse iconographique, retrace l'histoire de cette quête infinie.

- CHARNOZ, Sébastien. *L'histoire du concept de gravitation*.
<http://elbereth.obspm.fr/~charnoz/gravitation.html>
L'auteur, enseignant-chercheur en astrophysique, présente l'évolution de la conception de l'Univers, des Grecs à la relativité générale d'Einstein.
- MAURY, Jean-Pierre. *Comment la terre devint ronde ?* Gallimard, 1989. Découvertes Gallimard
« Il y a bien longtemps, la Terre n'était pas ronde ». Historique des représentations successives de la planète par les hommes et les savants, réflexions sur la relation science et société.
- MINOIS, Georges. *Galilée*. PUF, 2000. Que sais-je ?
Présentation de Galilée (sa vie et son œuvre) et du monde intellectuel et politico-religieux

dans lequel il a évolué.

- *La révolution copernicienne : du géocentrisme à l'héliocentrisme*. Philocours.
<http://www.philocours.com/cours/cours-copernicc5.html>

La révolution copernicienne traitée en trois points par un professeur de philosophie : les systèmes astronomiques de Ptolémée et Copernic ; en quoi la découverte de Copernic est une révolution ; Qu'est-ce qu'une théorie scientifique ?

- VERDET Jean-Paul *Histoire de l'astronomie ancienne et classique*. PUF, 1998. Que sais-je ?
Ptolémée, Copernic, Kepler, Galilée... Le point sur l'évolution de la science astronomique, des Grecs à la découverte de Neptune en 1846.

INTRODUCTION À L'ASTROPHYSIQUE

- *Astrophysique*. CultureSciences-Physique
http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/Entree_par_theme/Astrophysique
CultureSciences-Physique, site d'accompagnement de la physique au lycée, rassemble en une rubrique plusieurs articles sur l'astrophysique.
- AUDOUZE, Jean. *L'Univers*. PUF, 2000. Que sais-je ?
L'auteur décrit les méthodes de l'astrophysique et les conceptions modernes du modèle de l'Univers. Il donne une synthèse des découvertes actuelles en astrophysique.
- AUDOUZE, Jean, VAUCLAIR, Sylvie. *L'astrophysique nucléaire*. PUF, 2003. Que sais-je ?
« Cet ouvrage présente avec une grande clarté les découvertes et les champs de recherche actuels d'un domaine scientifique qui allie l'étude de l'infiniment petit et de l'infiniment grand pour comprendre notre Univers ».



Présentation de l'éditeur.

- Christian Magnan
astrophysicien
<http://www.isteem.univ-montp2.fr/PERSO/magnan/index.html>

Sur son site personnel Christian Magnan, astrophysicien au Collège de France, fait état de ses recherches et livre, dans un style clair et didactique, ses réflexions sur la formation de l'Univers.

- *Découverte de la galaxie la plus proche de notre Voie lactée : communiqué de presse.* CNRS, 4 novembre 2003

http://www2.cnrs.fr/press_e/communiqu/312.htm

Une information du CNRS sur les dernières découvertes.

- GOUGENHEIM, Lucienne.
Méthodes de l'astrophysique : comment connaître et comprendre l'Univers.

Hachette-Éducation, 1981

Après des chapitres consacrés à la gravitation et à la lumière, l'auteur étudie les distances, les dimensions, les masses, les mouvements et les températures des objets que l'astronomie peut identifier. L'ouvrage, d'un accès facile, comporte de belles photographies.

- *La terre dans le système solaire.* CRDP Languedoc-Roussillon, 2001. DVD

Ce DVD regroupe trois films qui abordent les domaines de

l'astronomie, de la planétologie et de l'astrophysique : la formation du système solaire, les mouvements de la Terre et leurs conséquences, la Terre une planète parmi d'autres.

- LENA, Pierre, MIGNARD, François, LEBRUN, François.
Méthodes physiques de l'observation. 2^e éd. EDP Sciences, 2000

Un panorama des outils de l'astrophysicien contemporain : télescopes, spectroscopie, ondes gravitationnelles et neutrinos. Pour enseignant.

- Les derniers développements en astrophysique : de l'infiniment grand à l'infiniment petit. *Découverte : revue du Palais de la découverte*, juin 2003, n° 309

La revue rassemble plusieurs articles de vulgarisation sur les dernières recherches en astrophysique : la recherche de la forme de l'Univers, les neutrinos solaires...

- SEGUIN, Marc, VILLENEUVE, Benoît. *Astronomie et astrophysique : cinq grandes idées pour explorer et comprendre l'univers.* De Boeck, 2002. 2^e éd. avec cédérom

Un livre d'introduction à l'astronomie et à l'astrophysique qui ne fait appel à aucune connaissance préalable mais qui propose en annexes des compléments pour le lecteur désireux d'approfondir des connaissances mathématiques et physiques (astrophysique). Cet ouvrage bien illustré est accompagné d'un cédérom qui présente plus de 300 images astronomiques.

- *Observatoires et instituts astronomiques en France.* SF2A
<http://www2.iap.fr/sf2a>

On trouvera sur le site de la Société française d'astronomie et d'astrophysique la liste « cliquable » de tous les observatoires et instituts astronomiques professionnels français.

- *Univers : rêves et réalités.* IAS

Orsay

<http://www.ias.fr/iasnv/posters.html>

Le site reprend les posters de l'exposition Univers : rêves et réalités qui s'est tenue à Bures-sur-Yvette en 1997. Il décrit les activités principales de l'Institut d'Astrophysique Spatiale à travers 4 modules : la cosmologie, le milieu interstellaire, le système solaire et le soleil.

L'UNIVERS ET SES MYSTÈRES

- BENEDETTI, Frédéric. *Les dates depuis la création de l'univers : du macrocosme au microcosme*

<http://pythacli.chez.tiscali.fr>

L'auteur de ce site, professeur de mathématiques, détaille la chronologie universelle (du Big Bang présumé à la mort du soleil) en passant par la description des principales civilisations.

- BOUQUET, Alain. *Doit-on croire au big bang ?* Le Pommier, 2003

Les petites pommes du savoir La théorie du Big Bang est-elle l'explication la plus aboutie de l'histoire de l'Univers ? Quelles péripéties son élaboration a-t-elle rencontrées ? Et où en sommes-nous maintenant ? L'auteur apporte quelques réponses à ces questions.

- DAVIES, Paul. *Le Big Crunch : les trois dernières minutes de l'Univers.* Hachette, 1998

L'Univers s'effondrera-t-il ?

Récit de sa fin telle que la science peut aujourd'hui l'imaginer.

- DAVOUST, Emmanuel.

Silence au point d'eau : à la recherche de la vie dans l'Univers. Teknea, 1988

Une synthèse des recherches et des questionnements sur l'existence de civilisations extraterrestres ou, au sens large, de la présence de vie dans l'Univers. L'auteur est astronome à l'Observatoire de Toulouse, spécialiste des galaxies en interaction.



- HAWKING, Stephen. *Une brève histoire du temps : du big bang aux trous noirs*. J'ai lu, 2000
L'astrophysicien britannique Stephen Hawking expose pour des lecteurs non spécialistes les récentes découvertes sur la nature du temps et du monde. Tout en prenant en compte la théorie d'Einstein et la mécanique quantique, il tente de développer une nouvelle théorie pour expliquer la création et l'expansion de l'univers.
- Le soleil, l'étoile mystérieuse. *Science et vie junior*, hors série n° 50, octobre 2002
Découverte du soleil à partir d'un voyage au cœur de celui-ci. Hypothèses émises par les scientifiques sur l'existence d'une deuxième étoile dans le système solaire.
- *L'Espace*. France 5
<http://www.france5.fr/espace>
France 5 propose dans sa rubrique Espace des interviews de chercheurs (Alain Blanchard, André Brahic, Jean-Pierre Luminet...) sur les mystères de l'Univers, et des vidéos du CNES sur la conquête spatiale.
- *Limites de recherche : une sombre histoire de matière*. CNDP, 2000. Galilée.
Vidéocassette
« On n'observe qu'entre un et dix pour cent de la masse calculée de l'Univers ». C'est ce qu'affirme le chercheur Michel Spiro. Où est donc la matière « sombre » dans l'espace ? Avec Michel Spiro pour guide, le documentaire part à la recherche de cette matière manquante.
- LUMINET, Jean-Pierre. *L'Univers chiffonné*. Fayard, 2001. Le temps des sciences
L'Univers est-il courbe, refermé sur lui-même ? Les trous noirs débouchent-ils sur des univers parallèles ? L'espace est-il « chiffonné » au point de créer des images fantômes des lointaines galaxies ? Spécialiste des trous noirs et du Big Bang, l'auteur nous entraîne à la recherche des secrets du cosmos.
- MINNE, Philippe. *Bizarre big bang : l'épopée de la physique*. Pour la science/Belin, 2001
Le commencement de notre univers et les questions inhérentes à la cosmologie. Pour enseignant.
- PETIT, Jean-Pierre. *Big bang*. Belin, 1985. Les aventures d'Anselme Lanturlu. BD
Dieu à quatre pattes sur l'univers, en train d'aplanir une immense moquette qui plisse... Dans cette bande dessinée scientifique Jean-Pierre Petit, chercheur et dessinateur, présente de façon humoristique et didactique la création de l'Univers.
- PRANTZOS, Nicolas. *Voyages dans le futur : l'aventure cosmique de l'humanité*. Seuil, 1998
L'auteur, astrophysicien au CNRS, explore notre futur cosmique en liant astucieusement les visions de la science-fiction et les ressources de la science contemporaine.
- REEVES, Hubert. *Poussières d'étoiles*. Seuil, 1994. Point Sciences
« L'unicité de la matière fait que le moindre de nos atomes a, un jour, été créé au sein d'une étoile, et qu'il y retournera un jour. C'est en ce sens que nous sommes tous « poussières d'étoiles », univers miniatures doués de cette faculté mystérieuse qu'est la conscience ». L'auteur donne dans ce livre bien illustré sa vision universelle.
- SILK, Joseph. *Le Big Bang*. LGF, 1999. Biblio-essais
L'auteur explique au grand public le Big Bang, théorie cosmologique admise par la plupart des astronomes et qui donne pour origine de l'Univers une grande explosion.
- THORNE, Kip S. *Trous noirs et distorsions du temps : l'héritage sulfureux d'Einstein*. Flammarion, 2001. Champs
L'auteur explique de manière très claire des notions difficiles (relativité, trous noirs, étoiles à neutrons...) et les cheminement de la recherche scientifique pour aboutir aux découvertes. Un livre qui se lit comme un roman.
- WEINBERG, Steven. *Les trois premières minutes de l'univers*. Seuil, 1988. Points-Science
« En 1965 fut découverte l'existence d'un bruit de fond cosmique d'ondes radio, vite interprétées comme la rumeur affaiblie d'une gigantesque explosion initiale. À partir de là, les physiciens ont pu reconstituer les trois premières minutes de cet univers vieux de dix milliards d'années ! Les voici racontées. » Présentation de l'éditeur

L'UNIVERS ET LA MAGIE DES IMAGES :

- *Hubble Heritage Image Gallery*
<http://heritage.stsci.edu/gallery/gallery.html>
De magnifiques photographies prises par le télescope spatial Hubble. Commentaires en anglais.
- LACHIEZE-REY, Marc, ARDITI, Sylvia. *Cosmos*. Marval/Vilo, 2003
Un livre d'astrophysique qui rassemble les plus belles images du ciel, depuis les planètes proches jusqu'aux lointaines galaxies, dont la lumière met



plusieurs milliards d'années à nous parvenir, et dont certaines étoiles sont déjà mortes.

• Spacewander
<http://www.spacewander.com/FRENCH/french.html>

Un voyage virtuel, à bord d'une fusée interstellaire, dans les profondeurs de l'univers. Les images sont authentiques et proviennent en majorité de la NASA. Douze minutes de rêve aux confins du cosmos.

RÉFLEXIONS SUR LA PLACE DE L'HOMME DANS L'UNIVERS

• AUDOUZE, Jean, CASSÉ, Michel, CARRIÈRE, Jean-Claude. *Conversations sur l'invisible*. Pocket, 2002
Deux astrophysiciens et un homme de lettres échangent leurs réflexions sur « l'invisible » qui nous entoure et nous constitue, des galaxies lointaines aux secrets de nos atomes.

• CASSÉ, Michel, MORIN, Edgar. *Enfants du ciel et de la terre : entre vide, lumière, matière*. Odile Jacob, 2003

Une rencontre entre science et philosophie sur le thème de la cosmologie et des révolutions de la physique moderne sur le vide, la matière et le temps.

• REEVES, Hubert. *L'espace prend la forme de mon regard*. Seuil, 2002. Points- Essais

« Nous sommes les enfants d'un cosmos qui nous a donné naissance après une grossesse de quinze milliards d'années. Comme dans la tradition hindouiste, les pierres et les étoiles sont nos sœurs ». L'astrophysicien donne ici sa vision du monde en poète et métaphysicien.

• RICARD, Matthieu, TRINH, Xuan Thuan. *L'infini dans la paume de la main : du Big Bang à l'éveil*. Pocket, 2002

« En été 1997, dans la vallée pyrénéenne d'Andorre, un Vietnamien né bouddhiste et devenu scientifique et un Français scientifique devenu bouddhiste marchent de nombreuses heures dans la montagne en discutant avec feu les problèmes métaphysiques fondamentaux sur lesquels la science et la religion se sont depuis toujours interrogés. De ces promenades est née l'idée de ce livre... »

• TRINH, Xuan Thuan. *La mélodie secrète : et l'homme créa l'Univers*. Gallimard, 1991. Folio-Essais

Après une synthèse de nos connaissances sur le cosmos, l'auteur essaie de décrypter le sens de l'Univers. Mais cet univers a-t-il un sens ? Sommes-nous là par hasard ou notre présence implique-t-elle l'existence d'un Créateur ? L'Univers : une musique dont la mélodie reste secrète.

• VAUCLAIR, Sylvie. *La symphonie des étoiles : l'humanité face au cosmos*. Albin Michel, 1997

L'auteur mène une réflexion, aussi bien scientifique que poétique ou musicale, sur la place de l'homme dans l'Univers.

• VAUCLAIR, Sylvie. *La chanson du soleil : l'intimité de notre étoile dévoilée par ses vibrations*. Albin Michel, 2002.

L'auteur étudie les vibrations du soleil qui font de notre étoile un gigantesque instrument de musique. Elle continue sa

réflexion sur la place de l'homme dans l'Univers commencée dans *La symphonie des étoiles*.

Bibliographie réalisée par Joëlle Caillard. CRDP Midi-Pyrénées. Novembre 2003