

Astronomie

la lettre de l'Académie des Sciences

n° 9/automne 2003

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie

Astronomie



Sommaire

Éditorial

Le cerveau, un enjeu majeur pour le 21^{ème} siècle

Nicole Le Douarin
page 2

Dossier

Une astronomie foisonnante

Pierre Léna
page 3

Les planètes extrasolaires

Michel Mayor
page 6

Les outils de l'observation

Guy Monnet
page 8

Un univers de galaxies, dont nous sommes

Danielle Alloin
page 10

Cordes, particules et cosmologie : un avant Big Bang est-il concevable ?

Entretien avec Gabriele Veneziano
par Paul Caro
page 12

Vers une éthique de l'espace

Alain Poupodou
page 14

Question d'actualité

Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes

Lucien Laubier
page 15

La vie des séances

Les oscillations des neutrinos : une fenêtre vers une nouvelle physique

Jean Iliopoulos
page 17

La souris génétiquement modifiée comme modèle d'études de la fonction des gènes ainsi que de pathologies humaines

Emiliana Borelli
page 17

La vie de l'Académie

La DRI, 1995-2003

Yves Quéré
page 18

Fondation Louis D.

page 19

La grande médaille d'or 2003 de l'Académie des sciences

page 19

Carnet

page 20

Editorial

La Neurosciences est une des disciplines centrales de la Biologie. Avec la biologie cellulaire qui explore la structure et le fonctionnement de l'unité de base de tout être vivant et la biologie du développement qui tente d'éclairer les mystères de la genèse des organismes à partir d'une cellule, rien n'est plus essentiel pour l'homme que de comprendre comment fonctionne son

Le cerveau, un enjeu majeur pour le 21^{ème} siècle

cerveau, cet organe, encore très largement énigmatique, qui lui donne un pouvoir inégalé sur la nature, sur la planète qu'il finira peut-être par rendre inhabitable.

Étudier le cerveau est d'autant plus excitant que nous disposons aujourd'hui pour le faire de moyens jamais égalés.

La biologie moléculaire, la génétique avec la séquence complète du génome humain sont à la disposition des chercheurs qui étudient le développement, la maturation et le fonctionnement du cerveau. Les apports de la physique et de l'informatique permettent d'explorer par l'image, et en temps réel, l'activité de zones centrales lors de démarches sensorimotrices et cognitives précises. Ces informations, inimaginables il y a seulement vingt ans, qui peuvent être obtenues chez l'homme d'une manière ni invasive, ni traumatique, ouvrent une voie d'exploration du cerveau remarquable à bien des égards. En effet, l'imagerie cérébrale fournit des informations d'ordre à la fois anatomique et métabolique. Elle concourt à établir une « cartographie » du cerveau qui révèle la ségrégation fonctionnelle des réseaux neuronaux impliqués dans l'accomplissement de tâches définies. En cela, elle complète remarquablement les données fournies

par l'anatomie microscopique classique et par l'électrophysiologie, de même qu'elle permet d'établir un lien avec la neuropsychologie et l'étude du comportement.

L'électrophysiologie a joué, au cours du vingtième siècle, un rôle majeur dans la connaissance du fonctionnement des neurones, et des synapses. Elle permet aujourd'hui d'aborder un aspect plus global de la physiologie du système nerveux : le fonctionnement intégré des réseaux neuronaux. Il devient ainsi possible, à partir des activités coordonnées d'assemblées de neurones, de voir émerger des propriétés collectives liées à des comportements complexes chez l'animal vigile et notamment chez les Primates.

Ce type d'analyse, on le comprend, vise à mettre en évidence l'organisation fonctionnelle du cerveau à un niveau intégré, macroscopique. On se rapproche ainsi de la réalité fonctionnelle responsable des activités cognitives, telles que la conscience, la mémoire et les apprentissages avec pour horizon la compréhension des mécanismes qui sous-tendent une fonction propre à l'homme : le langage articulé. Comment se situe la France dans l'essor incomparable que connaît aujourd'hui la recherche en biologie et particulièrement en neurosciences dans les pays où se fait la science ?

Dès les années 1950, grâce à l'action ciblée de la DGRST, « Dynamique du neurone », les neurosciences se sont remarquablement développées en France. Les travaux français ont contribué à établir des données désormais classiques concernant la synapse tant au niveau structural qu'à celui des mécanismes élémentaires de la transmission de l'influx nerveux ; ils ont joué un rôle important dans la mise en évidence des réseaux neuronaux intracérébraux et ont contribué à la promotion de modèles d'invertébrés qui se sont révélés féconds. C'est en France que le premier récepteur synaptique à un neurotransmetteur (le récepteur nicotinique à l'acétylcholine) a été identifié et purifié. Cette découverte fut à l'origine d'une voie de recherche particulièrement fructueuse. Les chercheurs français ont occupé une place de choix lorsqu'il devint possible d'établir le rôle des neuropeptides et de neuromédiateurs comme la dopamine, la sérotonine. Ils ont produit des travaux de tout premier plan concernant les activités électriques de base du cerveau en état de veille et de sommeil. C'est en France qu'a été découvert le sommeil dit « paradoxal » qui accompagne le rêve. Notre pays a donc occupé une place d'excellence dans la

compétition internationale dans ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui la physiologie fonctionnelle cognitive.

Une Société française de neurosciences compte quelques deux mille adhérents ; elle s'appuie sur environ trois cent cinquante laboratoires spécialisés au CNRS, dans les Universités, à l'INSERM, à l'INRA et dans le département des sciences de la vie du CEA.

Cela constitue une réserve de talents et de compétence qui devrait servir de noyau pour un nouveau départ dans les nouvelles directions des neurosciences intégratives et fonctionnelles.

Mais, s'il est vrai que les États-Unis, l'Allemagne et le Japon par exemple ont pris le parti de développer vigoureusement ces

nouvelles orientations, rien de tel ne s'est produit en France. Malgré les efforts de quelques groupes d'avant garde, ces nouvelles orientations n'ont pas reçu le support

qu'elles méritent. Il s'en est suivi un déclin des études consacrées aux grandes fonctions du cerveau, au codage et au traitement des informations sensorielles, à la mémoire, aux états de vigilance, aux mécanismes qui sous-tendent les actions coordonnées, etc...

Or l'allongement de la durée de la vie, ainsi que diverses maladies neurodégénératives s'accompagnent des dérèglements majeurs de ces fonctions. Contre ceux-ci, la médecine reste encore impuissante. Au déficit de recherche fondamentale s'ajoute donc un manque de recherches cliniques, pharmaceutiques et biotechnologiques. Le comité RST qui a fonctionné ces dernières années a commandé un rapport destiné à une mise au point sur les problématiques nouvelles et sur l'état de la recherche en neurosciences en France. Ce rapport, rédigé par d'éminents spécialistes sous la responsabilité de notre confrère Henri Korn, va paraître dans le mois qui vient. Il apportera une documentation riche et exhaustive sur les problématiques actuelles et les moyens disponibles pour les aborder. Il ne se borne pas à l'aspect scientifique de la question mais évoque aussi les problèmes posés par l'incidence croissante, dans la population, des maladies neurodégénératives. Du point de vue scientifique, il prend acte des points forts et des déficits de notre recherche.

Alors qu'il met en évidence un regrettable déclin des réalisations françaises en neurosciences, il formule des recommandations claires et précises pour y remédier. L'intérêt que l'Académie des sciences porte à ce domaine se manifestera aussi par l'organisation d'un Colloque international qui se tiendra à l'Institut de France les 10, 11 et 12 mai 2004 ■



par Nicole Le Douarin

Secrétaire perpétuelle de l'Académie des sciences, professeur honoraire au Collège de France.

Une astronomie foisonnante



Le Docteur Festus de Rodolphe Töpffer.

Vous nous faites rêver ! Que de conversations, de conférences, de soirées devant le ciel qui se terminent par ce commentaire ! De Cyrano à Fontenelle, de Pascal à Laplace, d'Arago à Camille Flammarion, de Carl Sagan à Hubert Reeves, cet immense espace du ciel ne cesse de séduire l'imagination des foules comme celle des savants. Toute une génération a grandi avec l'image de la Terre, photographiée par les astronautes d'Apollo, se levant sur l'horizon lunaire. Au-delà des connaissances scientifiques, cette image portait en elle une interrogation profonde sur la place qu'occupe dans l'univers notre petite Terre et la fragile humanité qu'elle porte, sur notre singularité ou notre banalité. A cette interrogation, le siècle écoulé n'a apporté aucune réponse définitive, mais il en a révolutionné presque totalement le cadre de pensée, le décor et les arrière-plans, il a transformé *ce petit cachot où [l'homme] se trouve logé* cher à Blaise Pascal.



1 Membre de l'Académie des sciences, professeur à l'université Denis Diderot.

Par **Pierre Léna**¹

Plaçons-nous un instant au milieu du siècle passé, il y a cinquante ans. Les germes de cette révolution sont en place. Les univers-îles imaginés par Immanuel Kant ont pris corps dans les photographies de galaxies, l'identification de leurs

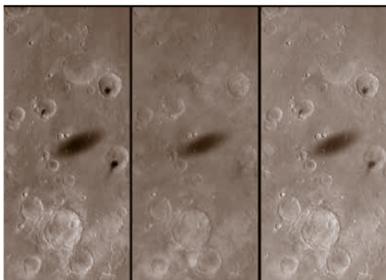
étoiles a permis d'en mesurer les distances. Avec des valeurs exprimées en millions d'années-lumière, de vertigineuses profondeurs d'espace et de temps se sont ouvertes. Par la fuite observée de quelques dizaines de ces ga-

laxies, Edwin Hubble avait découvert vingt ans plus tôt l'expansion de l'univers proche, entraînant par cette observation capitale l'essor d'une cosmologie jusque-là confinée à des spéculations. Peu après, en comprenant la fusion

Dossier

nucléaire de l'hydrogène, Hans Bethe avait identifié la source d'énergie des étoiles, sur la nature de laquelle avaient buté les plus grands physiciens du XIX^{ème} siècle. Au même moment Georges Lemaître formulait correctement la cosmologie d'un atome primitif, qui deviendra le *big-bang*. Quant à notre système solaire, ses planètes à la composition incertaine n'étaient connues que par des images floues, l'histoire de sa formation demeurait largement une énigme. Newton avait fait un aveu de son impuissance : « *Le hasard aveugle n'aurait jamais pu conduire à des planètes se mouvant dans le même sens sur des orbites coplanaires... une si merveilleuse uniformité ne peut être que le résultat de la providence* ». Faute d'autres preuves, seule la puissante intuition de Laplace sur une nébuleuse primitive pouvait guider la réflexion.

Pourtant une révolution silencieuse, née chez les physiciens, avait grandi avec le siècle et allait donner à l'astrophysique le plus vigoureux élan de sa longue histoire. La mécanique quantique avait créé l'outil nécessaire pour comprendre l'organisation intime de la matière, et son interaction avec la lumière. La relativité générale avait totalement transformé la compréhension de la gravitation : or matière, lumière et gravitation sont les trois acteurs dont le jeu mutuel bâtit la quasi-totalité des phénomènes cosmiques et ce que nos instruments nous en révèlent. Il fallait encore ajouter une formidable hypothèse, sur le succès de laquelle on ne s'interrogera jamais assez : de même que Newton avait inféré l'universalité de la gravitation de l'action entre la Terre et la Lune, de même l'astro-



Sur le sol de la planète Mars, l'ombre de son satellite Phobos défile sur des dunes de sable clair ou sombre. Les éclipses de soleil sont fréquentes sur Mars. Photo Jet Propulsion Laboratory, NASA.

physique contemporaine suppose que la physique a les mêmes lois toujours et partout dans l'univers. Tout était prêt pour prévoir, interpréter, guider les observations.

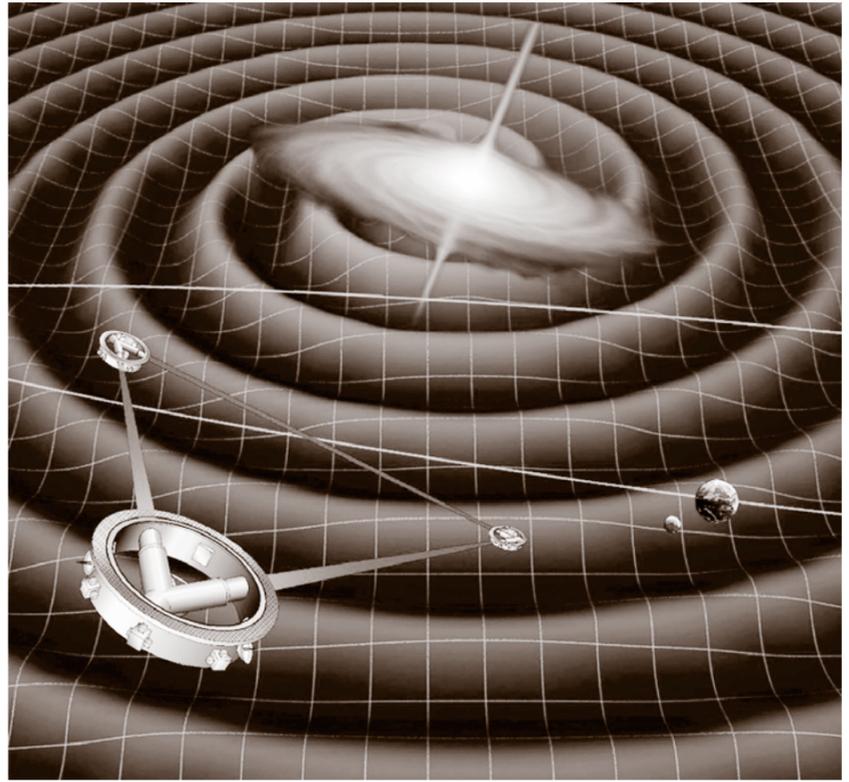
Encore fallait-il en faire, puisque faute d'expérimentation directe, l'astronomie ne se nourrit que d'elles ! La paix de 1945 permit l'ouverture du télescope optique californien de 5 mètres au Mont Palomar ; le développement du radar, né pendant la bataille d'Angleterre, suscitait la radioastronomie, qui multiplia aussitôt les découvertes ; enfin, le contexte de la guerre froide allait entraîner la course à l'espace.

Armée de solides bases physiques et d'un irrésistible élan technologique, l'astrophysique était désormais mûre pour un nouvel âge d'or, celui des années 1950-2000 dont tout indique qu'il n'est pas près de s'achever.

Durant ces années, la puissance des moyens d'observation a conduit à la découverte de toutes sortes d'objets et de phénomènes dont l'existence, parfois prédite, semblait défier toute confirmation par l'observation : c'est ainsi qu'aux classiques étoiles et planètes se sont ajoutés les étoiles à neutrons ou pulsars, les trous noirs, les disques et jets d'accrétion, les exoplanètes, les noyaux actifs de galaxies, les sursauts gamma, les galaxies ultra-lumineuses infrarouges, les cocons de formation d'étoiles, les mirages gravitationnels, l'émission d'ondes gravitationnelles, le fonds de rayonnement cosmologique... Chacun d'entre eux ouvre une nouvelle page du grand livre d'images du cosmos, chacun d'entre eux est matière à de subtils développements de la physique, qui trouve dans l'univers un laboratoire où toutes les conditions de température, de pression, de gravité, où n'importe quelles échelles de temps ou d'espace se rencontrent.

Dans notre système solaire, exploré à bout portant par les sondes spatiales, les découvertes ont totalement modifié, ou plutôt créé, le paysage d'aujourd'hui : Saturne était la seule à posséder un anneau, Jupiter, Uranus et Neptune en ont acquis. Jupiter avait 12 satellites connus, il en a aujourd'hui 61. Les volcans d'Io, les glaces et peut-être les océans d'Europe, la surface de Titan, les noyaux cométaires faits de neige et d'hydrocarbures, le mouvement chaotique d'Hyperion, l'érosion fluviale sur Mars sont autant de découvertes qui dessinent une extraordinaire diversité. Au-delà de l'orbite de Neptune, dans la ceinture de Kuiper, des centaines d'objets primitifs, dont les plus massifs atteignent la taille de la Lune, complètent désormais notre système planétaire. Aujourd'hui comprise dans ses grandes lignes, l'histoire de notre système solaire, vieux de près de cinq milliards d'années, est écrite dans ces objets, dans la proportion d'isotopes de leurs atomes, dans la diversité de leurs paysages criblés d'impacts météoritiques, dans la surface de roches bombardées par le vent solaire.

La fascination de nos contemporains se porte naturellement vers la cosmologie et les questions d'origine. Nous disposons aujourd'hui d'un solide modèle – appelé standard – pour décrire un Univers évoluant sur 13,7 milliards d'années, partant d'un état dense et chaud



Projet de mission spatiale pour la détection des ondes gravitationnelles, vers 2020. Trois satellites indépendants sont placés dans l'espace, formant un triangle équilatéral de 5 millions de km de côtés. Leur distance est constamment mesurée par laser et le passage d'une onde gravitationnelle modifie cette distance d'une quantité minuscule, mais mesurable. Dessin : Agence spatiale européenne

qualifié de *big-bang*, formant des galaxies puis des étoiles, enfin des planètes autour de celles-ci. Avec ce modèle s'est imposée la conception majeure d'un Univers en évolution, qui est loin d'aller vers *la mort thermique* que lui prédisait trop rapidement la thermodynamique du XIX^{ème} siècle. Tandis que l'expansion dilue progressivement, et peut-être indéfiniment, matière et rayonnement dans l'espace, l'accrétion gravitationnelle ne cesse de produire des îlots d'entropie décroissante, où naît la complexité des structures, celle des molécules et de leur organisation. Un scénario convaincant, validé par des mesures de plus en plus précises, décrit désormais la formation des protons et des neutrons à partir de la soupe primitive de quarks, puis celle de l'hydrogène et de l'hélium et enfin, dans le cœur des étoiles et par réactions nucléaires, celle de la centaine d'éléments chimiques du tableau périodique. Nous savons désormais d'où viennent ces atomes d'oxygène, de carbone ou d'azote dont est fait notre corps, qui selon la belle formule d'Hubert Reeves est littéralement *poussière d'étoiles*.

Le milieu interstellaire, cet espace qui au sein des galaxies sépare les étoiles, s'est révélé d'une étonnante richesse. Les nuages de gaz et de poussières qui le constituent sont en constante transformation, sous l'effet de l'omniprésente gravitation et sous celui du rayonnement stellaire dans lequel ils baignent. La chimie qui s'y déroule à l'échelle de quelques mois-lumière conduit à la formation de molécules -on en connaît plus d'une centaine parfois riches de plusieurs dizaines d'atomes-, d'agrégats moléculaires comme le fullérène, de cristaux de glaces d'eau ou d'ammoniaque mais aussi de nanodiamants. L'image de la nébuleuse de l'Aigle, avec

ses « piliers de la création », prise vers 1990 par le télescope spatial Hubble et partout diffusée, est sans doute l'une des plus belles, des plus évocatrices aussi, avec ses nuages en colonnes de matière sombre qui, sous le feu bleuté des projecteurs stellaires qui les entourent, prennent des fluorescences opales. La formation d'étoiles s'y déroule suivant un scénario dont les grandes étapes sont désormais comprises, grâce au développement de l'observation dans l'infrarouge. Au sein de ces nuages, en quelques centaines de milliers d'années, un disque se condense progressivement, une ou plusieurs étoiles surgissent en son centre, tandis que la matière qui subsiste donne naissance à leur cortège planétaire, où se condensent les molécules.

A partir de 1995, la découverte d'exoplanètes – planètes en orbite autour d'autres étoiles que notre Soleil, a été l'un des couronnements du vingtième siècle astronomique, et une ouverture en beauté pour le suivant. Situées dans notre banlieue galactique, leur nombre connu dépasse aujourd'hui la centaine, toutes sont massives comme Jupiter ou Saturne car seules celles-ci sont perceptibles à des instruments encore trop peu sensibles.

Au mitan du XX^{ème} siècle, on sait que la fusion nucléaire au cœur des étoiles est leur source principale d'énergie, transportée ensuite dans l'univers par leur lumière. Mais le rendement de cette conversion est faible : à l'issue de ses quelques neuf milliards d'années de rayonnement, le Soleil n'aura transformé en lumière qu'à peine un pourcent de sa masse ! Avec la découverte des quasars (1963) et celle des noyaux actifs de galaxies est apparu un autre mécanisme de transformation d'énergie, bien plus

C'est alors qu'appuyé du menton à la dernière étoile, il voit au fond du ciel de grandes choses pures qui tournent au plaisir. Saint-John Perse

efficace : la conversion directe, en rayonnement lumineux, de l'énergie gravitationnelle que libère une masse de matière tombant en chute libre vers le cœur dense d'une galaxie. Produisant des rayonnements couvrant toute l'étendue du spectre électromagnétique, ces phénomènes d'accrétion gravitationnelle, violemment non linéaires, mobilisent toute l'énergie des physiciens pour les comprendre et les modéliser. Au passage, l'observation de ces rayonnements a conduit à attribuer aux galaxies dont ils sont issus un cœur si massif et si compact qu'il ne peut être constitué que d'un trou noir, d'une masse égale à plusieurs millions de fois celle du Soleil. La matière y est dans un état que la physique ne sait pas encore décrire, nulle lumière ne peut s'en échapper, et seul l'environnement du trou noir violemment perturbé par sa gravité est détectable par l'observation.

Qu'attendre désormais de l'astronomie ? Quelles interrogations demeurent après l'exceptionnelle moisson des cinq décennies écoulées, après la réussite du modèle standard de la cosmologie ?

La première question, celle qui touche au plus près nos représentations du monde et de nous-même, est sans doute celle de la vie dans l'univers. Avec la découverte de la première exoplanète en 1995, une interrogation plus que millénaire est entrée dans le domaine de la connaissance scientifique. Même si détecter voire faire l'image de planètes semblables à la Terre, dotées d'eau liquide, n'est sans doute plus qu'une question d'années, rien ne nous permet d'y affirmer la présence certaine ou probable de vie, a fortiori de vie consciente. La vie est-elle un déploiement naturel de la combinatoire moléculaire dès lors que les conditions physiques adéquates sont réunies – une éventualité bien satisfaisante pour la raison-, ou bien

un événement exceptionnel voire unique ? Comme le remarque Martin Rees, même si notre Terre était la seule à porter la vie, les quelques milliards d'années qui restent à cette Terre et à ses humains laissent encore bien des portes ouvertes à leur évolution et à leur dispersion éventuelle dans la Galaxie, au vu du peu de temps qu'il fallut pour passer des primates à Michel-Ange, François d'Assise ou Einstein.

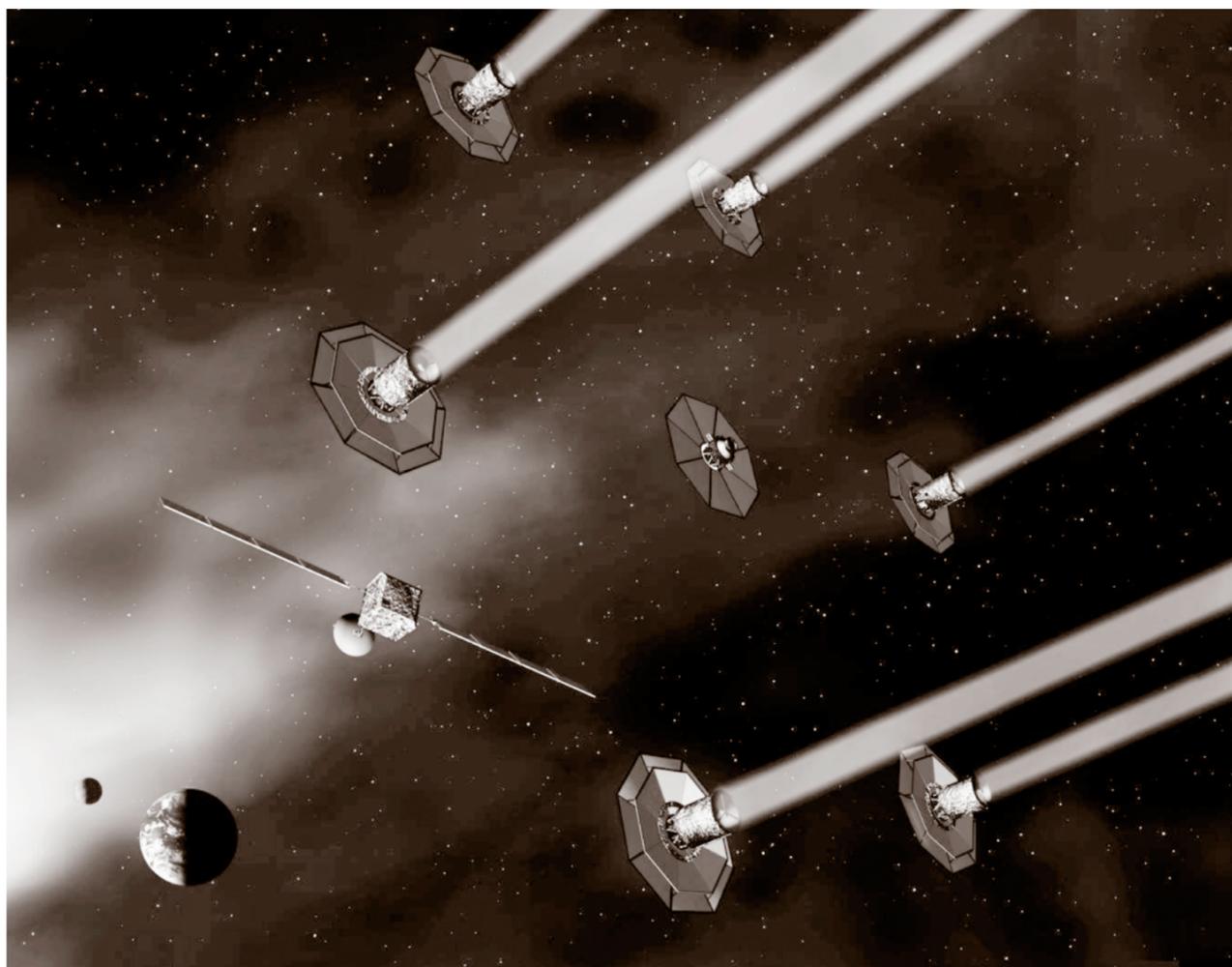
La seconde question, celle qui attire et passionne les meilleurs étudiants et tant des meilleurs physiciens, ne pêche guère par modestie : il s'agit d'affiner la cosmologie au point de disposer d'une descrip-

tion, aussi complète et aussi privée d'arbitraire que possible, de l'univers entier dans ses états passés et actuels. Le terme « univers entier » est ici terriblement ambigu : s'agit-il de l'univers observé, de l'univers éventuellement observable, ou bien de tout ce dont les lois de la physique autorisent ou prescrivent l'existence, que nous l'observions ou non ? L'idée d'univers parallèles ou multivers ouvre à des vertiges d'interrogations : notre coin d'univers, avec son *big-bang* local, serait alors aussi provincial pour l'ensemble que notre système solaire l'est pour les autres systèmes planétaires. Les théories de super symétrie, l'existence de cordes cosmiques

vont toutes vers la recherche d'une théorie unifiée de l'univers, qui dériverait ses propriétés et celles de ses objets les plus exotiques, tels les trous noirs, sans faire appel à des ingrédients juxtaposés (gravitation, force électrofaible, force nucléaire, mécanique quantique).

L'histoire de l'astronomie, et singulièrement celle des dernières décennies, nous apprend que l'univers recèle, comme Hamlet le disait à Horatio, bien davantage que nous ne sommes capables d'en imaginer. Aussi la balle revient-elle dans le camp de ceux que Saint-John Perse appelait *les opticiens en cave*

Mission Darwin de l'ESA.



Les Pléiades.



et les philosophes polisseurs de verre, ceux qui construisent des télescopes : non seulement les miroirs hectométriques qui quitteront bientôt les bureaux d'étude pour collecter la lumière depuis les déserts du globe, mais encore ces détecteurs, qu'on peut bien appeler aussi télescopes, éparpillés sur des millions de kilomètres dans l'espace à l'affût des ondes gravitationnelles ou disposés au fond des mers pour y traquer les neutrinos. Dans quelques décennies peut-être, doté de toutes les ressources d'une technologie aux perfectionnements incessants, l'homme découvrira-t-il que son image du monde était incroyablement rudimentaire ? ■

Les planètes extrasolaires



par **Michel Mayor**¹

La pluralité des mondes, déjà hypothèse des philosophes grecs, est devenue un domaine vigoureux de l'astronomie d'aujourd'hui. Au cours des huit dernières années, quelques 120 planètes ont été découvertes en orbite autour d'étoiles analogues de notre Soleil. Bien que ces découvertes aient considérablement stimulé la communauté des astronomes et le grand public, il faut remarquer que la détection de planètes extrasolaires était attendue, celles-ci étant un sous-produit supposé de la formation stellaire. L'effondrement gravitationnel des nuages de matière interstellaire implique une augmentation de plus de 10^{20} de la densité du gaz pour atteindre la densité moyenne d'une étoile. Fragmentation du nuage et turbulence sont les ingrédients de la forte rotation propre des étoiles jeunes mais aussi de la formation de structures à même d'absorber l'excès considérable de moment cinétique du gaz en contraction. On sait, par exemple, que plus de 60 % des étoiles de masse voisine de celle de notre Soleil sont dans des systèmes stellaires multiples (étoiles binaires pour la plupart).

Les étoiles jeunes sont aussi connues pour être entourées dans leur immense majorité de disques de matière en rotation (gaz et poussières). Ces disques

¹ Associé étranger de l'Académie des sciences, directeur de l'Observatoire de Genève.

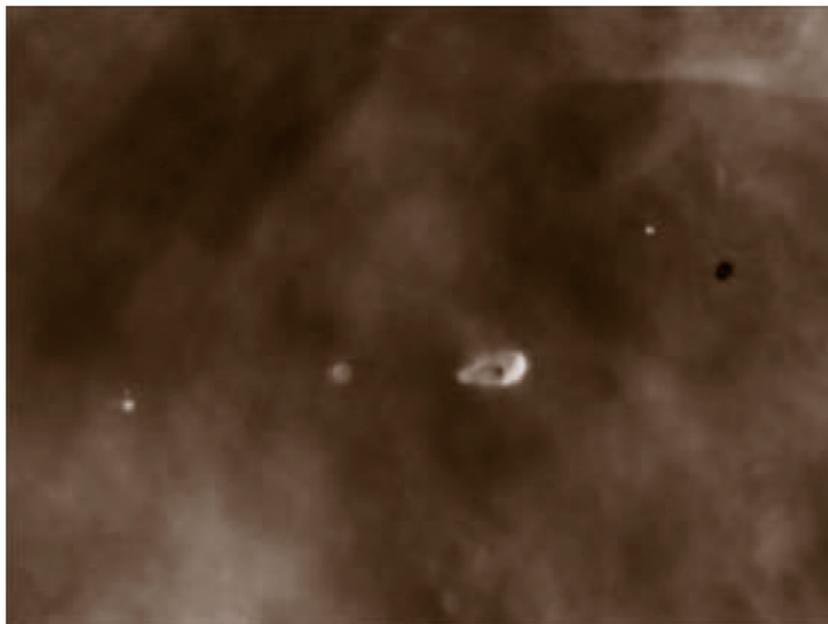


Fig. 1 : Disques de matière, appelés proplyds, observé par le Hubble Space Telescope dans le nuage interstellaire d'Orion. Les disques sont orientés au hasard dans l'espace et donc vus sous des angles différents.

(fig. 1) ont été, par exemple, détectés autour des étoiles nouvellement formées dans la nébuleuse d'Orion, site d'intense formation stellaire. Ces disques d'accrétion de gaz et poussières disparaîtront en quelques millions d'années, une échelle de temps courte comparée par exemple aux quelques 4 600 millions d'années du Soleil.

Proposé dans les années 1950 par le physicien russe Safronov, le scénario standard de la formation planétaire est celui de l'agglomération graduelle de particules de poussières ou de grains de glace ; agglomération qui formera graduellement des planétésimaux de tailles croissantes puis des planètes. La formation des planètes géantes gazeuses, dans un tel scénario, implique une formation rapide, pendant la durée de vie du disque

d'accrétion. Si l'agglomération de particules de glace à 5 unités astronomiques, ou au-delà, est capable de fournir un noyau de quelques 10 masses terrestres alors l'attraction gravitationnelle devient suffisante pour capturer une enveloppe gazeuse au dépend du disque d'accrétion et, par là, atteindre rapidement des masses planétaires analogues à celle de Jupiter, soit $\sim 10^{-3}$ masse du Soleil ou ~ 300 masses terrestres. Le scénario d'agglomération décrit ci-dessus n'est pas le seul qui ait été proposé pour la formation planétaire. Certains chercheurs actuels explorent la possibilité de la formation planétaire par instabilités gravitationnelles du disque d'accrétion lui-même. Dans les deux cas, les planètes apparaissent comme des sous-produits, probablement fréquents, de la formation stellaire.

La faiblesse relative de l'éclat d'une planète comparé à celui d'une étoile (10^{-9} si on compare Jupiter au Soleil), combiné à leur proximité angulaire sur le ciel rend la détection directe très difficile. Une démarche directe qui, pour l'instant, n'a pas donné de résultat. La recherche des exoplanètes s'est donc orientée vers des démarches indirectes, en premier lieu les méthodes visant à mettre en évidence le mouvement de l'étoile autour du centre de gravité du système étoile-planète.

La recherche de l'oscillation de la position de l'étoile sur la voûte céleste, tentée depuis le sol dès le milieu du 20^{ème} siècle n'a pas donné de résultat. Par contre, la variation de la vitesse stellaire, mesurée via l'effet Doppler, a permis la découverte de quelques 120 planètes (ou systèmes planétaires).

Le développement de spectrographes et de méthodes spécifiques a permis la mesure des variations des vitesses stellaires avec une précision de l'ordre d'un mètre par seconde, soit donc un décalage relatif des raies spectrales stellaires de quelques 10^{-9} . En 1995, la découverte à l'Observatoire de Haute-Provence, d'une planète de masse jovienne en orbite autour d'une étoile similaire à notre Soleil, l'étoile 51 Pégase, a été tout d'abord la confirmation de l'existence de planètes extrasolaires mais elle a été surtout à l'origine d'une rediscussion des mécanismes de formation planétaire. En effet, la période de révolution de cette planète de 4,23 jours semblait en contradiction avec la formation attendue des planètes géantes gazeuses au-delà de 5 UA (la limite de sublimation des grains de glace dans le disque d'accrétion).

Ce fut l'occasion de redécouvrir les travaux théoriques qui prédisaient une forte interaction gravitationnelle entre la planète nouvellement formée et le disque d'accrétion. Cette interaction gravita-

tionnelle a une échelle de temps nettement plus courte que la vie du disque d'accrétion. Elle produit une migration orbitale et une évolution de l'excentricité de l'orbite. Si les grandes lignes de ce phénomène sont admises, ce sujet reste encore ouvert sur de nombreuses questions. En particulier on observe une accumulation de planètes (dites "Jupiter chauds") sur des orbites ayant des périodes comprises entre 3 et 5 jours. Quelle est la nature du ou des mécanismes susceptibles de stopper la migration ?

Si l'on devait résumer en une phrase l'impact de ces premières découvertes, il faudrait mentionner la diversité des systèmes exoplanétaires. Avant 1995, on ne disposait que d'un modèle de système planétaire, notre propre système solaire avec ses planètes géantes gazeuses au-delà de 5 UA et ayant des orbites quasi circulaires. Les systèmes exoplanétaires nous révèlent une tout autre réalité avec des planètes géantes gazeuses ayant des orbites comprises entre 2,5 jours et plusieurs années, des excentricités orbitales parfois très élevées et des masses aussi fortes que 10 à peut-être 20 fois la masse de Jupiter.

L'analyse des propriétés statistiques des exoplanètes, distribution des éléments orbitaux et distribution des compositions chimiques des étoiles hôtes, sont autant de contraintes pour l'élaboration et les tests des scénarii de formation planétaire. Parmi ces propriétés mentionnons par exemple la très forte corrélation entre la composition chimique des étoiles de type solaire et la probabilité qu'elles aient une planète géante. La netteté de la relation observée (presque un effet de seuil) est surprenante. Il semble que l'existence de cette relation liant la présence de planète géante à la composition chimique de l'étoile ne puisse s'expliquer par un mécanisme d'accrétion de matière enrichie en éléments chimiques lourds dans l'atmosphère stellaire mais résulte de la composition primordiale du nuage interstellaire. Il est évident que la formation planétaire via un scénario d'agglomération de poussières et/ou grains de glace est d'autant plus efficace que les éléments chimiques constitutifs de ces grains sont abondants. Par contre, une telle observation semble difficilement compatible avec le scénario de formation planétaire par instabilité gravitationnelle du disque d'accrétion.

Parmi les systèmes planétaires découverts, une dizaine abritent deux voire trois planètes géantes. Si certains systèmes sont fortement hiérarchisés avec un grand rapport de périodes, d'autres sont constitués de planètes avec des orbites résonnantes. Un exemple de tel système est illustré sur la (fig. 2) Les fluctuations

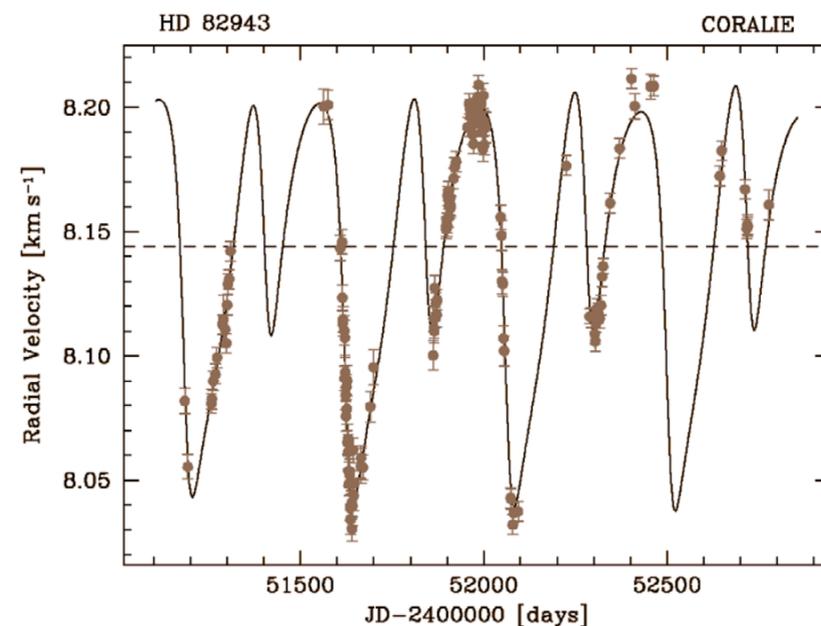


Fig. 2 : Variation, jour après jour, de la vitesse radiale (en km/s), par rapport à la Terre, de l'étoile HD82943: ces oscillations sont dues à la présence de deux planètes de périodes orbitales différentes, dont la courbe permet de fixer les masses.

de la vitesse de l'étoile HD82943 indiquent la présence de deux planètes telles que leurs périodes sont dans un rapport très proche de deux. La constitution de systèmes exoplanétaires résonnants se fait lors de la migration orbitale induite par l'interaction avec le disque d'accrétion.

Lors de la découverte de la planète en orbite autour de 51 Pégase, s'est posée la question de la nature physique de cet étrange objet ayant une masse jovienne mais une période de seulement 4,2 jours. Pour ces systèmes à très courtes périodes, donc ayant des demi-grands axes de l'ordre d'une dizaine de rayons stellaires, la probabilité de transits planétaires est de l'ordre de 10 %.

Le 9 septembre 1999, le premier transit exoplanétaire était observé apportant par là même la preuve que ces "Jupiters chauds" étaient bien des planètes géantes gazeuses. En effet, l'analyse de la courbe de l'éclat de l'étoile révèle une dépression de l'ordre du pour cent qui nous donne immédiatement accès au rayon planétaire et, par là, à la densité moyenne de la planète.

Ce transit planétaire a été l'occasion de nombreuses mesures complémentaires. Des mesures qui ont, par exemple, permis l'estimation de la teneur en sodium dans l'atmosphère de la planète et du taux d'évaporation de cette atmosphère.

Peut-on évaluer les étapes prochaines des découvertes dans le domaine des systèmes planétaires ? Il suffit tout d'abord de remarquer que toutes les planètes détectées à ce jour ont des masses supérieures à environ 30 fois la masse de la Terre (~0,1 masse de Jupiter). Si nous commençons à entrevoir les propriétés et les fréquences d'occurrence des planètes géantes gazeuses, par contre, tout est à découvrir pour ce qui est des planètes telluriques, ces planètes rocheuses analogues de la Terre. La spectroscopie Doppler n'est pas à même de détecter de telles petites planètes (la limite n'est pas instrumentale mais provient des instabilités et anisotropies des surfaces planétaires qui limitent la précision accessible). La méthode la plus prometteuse pour la détection des planètes telluriques est celle des transits planétaires. Un Jupiter passant devant le disque d'une étoile de type solaire induit une baisse de 1 % de son éclat. Le transit de l'analogue d'une Terre ne fera baisser la luminosité stellaire que de 10⁻⁴. Une telle baisse infime de la luminosité n'est pas mesurable au travers de l'atmosphère terrestre mais peut l'être depuis l'espace. Une première opportunité de telles découvertes se présentera avec la mission spatiale COROT que lancera le CNES en 2005. Des missions spatiales similaires mais plus ambitieuses telles la mission KEPLER (NASA) ou la mission EDDINGTON (ESA) seront lancées en 2007 et 2008 respectivement. La durée (plusieurs années), le nombre d'étoiles mesurées (plus de 10⁵) et la sensibilité de ces instruments sont autant d'atouts pour la détection de milliers de planètes dont, on l'espère, plusieurs dizaines de planètes telluriques dans la zone habitable, c'est-à-dire des planètes telles que la température à leur surface soit adéquate pour le développement éventuel de la chimie de la Vie.

En parallèle à ces missions spatiales visant la détection des analogues de la Terre, d'importants développements d'instruments visent à réaliser des images (et donc des spectres) d'exoplanètes. L'interféromètre du Mont Paranal, développé par l'ESO, contribuera d'ici quelques années à cette recherche mais il est certain que l'espace sera à même d'offrir de plus amples possibilités. L'imagerie des exoplanètes sera un thème central des observations du successeur du Hubble Space Telescope et des interféromètres spatiaux en cours d'étude, tel celui de la mission DARWIN de l'ESA. Cette mission vise non seulement l'imagerie des exoplanètes mais encore à analyser leur spectre atmosphérique et par là à chercher des signatures chimiques du développement de la Vie. Un enjeu enthousiasmant pour une question qui déborde du cadre de l'astronomie : sommes-nous seuls dans l'Univers ? ■

Les outils de l'observation



par **Guy Monnet**¹

Science d'observation par excellence, l'astrophysique s'appuie sur des moyens d'investigation de plus en plus puissants. Pour collecter la lumière, leur principale source d'information, et établir les propriétés physiques des objets célestes observés, les astronomes utilisent des télescopes, suivis d'instruments qui analysent cette lumière. Des logiciels élaborés coordonnent les observations, de la préparation à la collecte et au traitement de données. En outre naît aujourd'hui une astrophysique non photonique où l'on détecte des particules cosmiques, des neutrinos, bientôt des ondes gravitationnelles. Il existe enfin une approche où des astres sont simulés dans un ordinateur : on peut par exemple suivre l'interaction entre deux galaxies en collision, rajoutant une dimension expérimentale, fût-elle virtuelle, à la pure observation.

Les plateformes d'observation : sur Terre ou dans l'espace ?

Observer le ciel sur la totalité du domaine électromagnétique, des rayons gamma aux ondes radio, est essentiel pour comprendre notre Univers, sa formation, son évolution passée et future. De cette large gamme qui couvre quelques 60 octaves,

Fig. 1 : Un observatoire au sol : les 4 télescopes de 8 m de diamètre situés dans le désert de l'Atacama et constituant le très grand Télescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO).



Fig. 2 : Un observatoire dans l'espace : le satellite *Integral* de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) qui observe le ciel en rayons gamma.



seule une faible fraction est observable à partir du sol terrestre, essentiellement le domaine optique de 0,3 μm de longueur d'onde à 1 μm , prolongé par des fenêtres infrarouges, plus le domaine radio de 0,6 mm environ à une trentaine de mètres. L'utilisation de plateformes spatiales donne, elle, accès au spectre entier. Elle est irremplaçable pour les domaines "exotiques", rayons gamma, rayons X, ultraviolet, infrarouge moyen et lointain, non accessibles du sol. Elle offre aussi des images parfaitement piquées en l'absence de turbulence atmosphérique, alors qu'au sol une qualité d'image de 0,5 seconde d'angle correspond déjà à une bonne nuit sur un site astronomique excellent et qu'il est exceptionnel d'atteindre 0,2 seconde d'angle. Enfin, l'absence de nuages et de cycles nyctéméraux permet des observations continues de très longue durée.

¹ Astronome, Observatoire européen austral (ESO), Garching b. Muenchen, Allemagne

Il y a plus de choses dans le Ciel et sur la Terre, Horatio, que n'en a rêvé votre philosophie. (Shakespeare, Hamlet)

Il n'est donc pas étonnant que les observatoires spatiaux viennent concurrencer les télescopes au sol sur leur propre terrain. Ainsi, le *Hubble Space Telescope* (HST), doté d'un miroir de 2,4 mètres de diamètre et en orbite autour de la Terre, réalise en routine des images de 0,1 seconde d'arc de résolution dans le domaine optique. Le *James Webb Space Telescope* (JWST) de 6,5 mètres de diamètre sera lancé dans une dizaine d'années. Placé à grande distance de la Terre et refroidi naturellement à -210° , il sera des milliers de fois plus sensible que les télescopes au sol dans l'infrarouge dit thermique, à $3 \mu\text{m}$ et au-delà. On pourrait alors s'attendre à ce que l'essentiel des observations astronomiques soit maintenant basé dans l'espace plutôt qu'au sol, au lieu du partage actuel quasiment équilibré tant en investissements qu'en résultats scientifiques. La raison en est d'abord économique dès lors qu'à diamètre égal un observatoire spatial coûte des dizaines de fois plus que son équivalent au sol. De plus les instruments sol peuvent plus rapidement s'adapter à de nouveaux domaines d'investigation et disposer des derniers progrès technologiques. Il y a donc plutôt une complémentarité sol espace où la génération actuelle de télescopes sol de 8-10 mètres de diamètre permet, grâce à sa surface collectrice, l'analyse spectrale d'étoiles dont le HST a fait l'image. Dans la prochaine décennie, des télescopes au sol de 30 mètres de diamètre ou plus, feront de même pour les galaxies extrêmement lointaines que détectera le JWST.

Les grands télescopes optiques au sol : des géants à l'œil perçant

Composant emblématique de l'astronomie, le télescope joue deux rôles essentiels. Collecteur de lumière, il accroît le faible flux lumineux reçu du ciel en proportion de sa surface. Un télescope de 8 m de diamètre recueille deux millions de fois plus de photons par seconde que l'œil humain, notre télescope naturel. Il offre aussi une finesse ultime d'image en proportion de sa taille; ainsi un diamètre de 8 m permet en principe une qualité d'image remarquable, de l'ordre du centième de seconde

d'angle dans le domaine visible. La turbulence atmosphérique dégrade cependant des dizaines de fois cette performance théorique en déformant le front d'onde lumineux. Ce gain paraît donc à première vue illusoire. Fort heureusement, une technique relativement récente, l'optique adaptative, permet de l'atteindre : un miroir placé sur le trajet de la lumière se déforme plusieurs centaines de fois par seconde pour compenser les distorsions du front d'onde et fournit en sortie une image corrigée. La simplicité du concept ne doit pas occulter sa difficulté technique. En pratique, sur les grands télescopes de 8-10 m, on obtient ainsi des images quasi-parfaites pour des longueurs d'onde de l'ordre de $2 \mu\text{m}$ ou plus; en deçà, on n'atteint pour l'instant que des corrections très partielles. Assurer -au moins- ces performances sur les géants de 30 mètres de diamètre ou plus qui se dessinent à l'horizon représente un immense défi technique. Une autre approche, l'interférométrie, permet

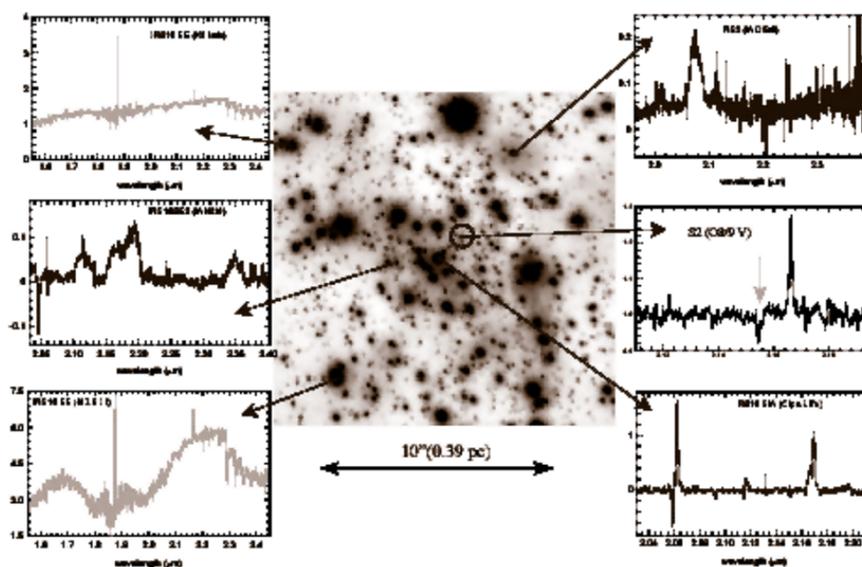
cependant d'ores et déjà d'obtenir une qualité d'image encore meilleure, atteignant le millième de seconde d'arc dans le visible et le proche infrarouge. Illustrant qu'un tout peut-être plus grand que la somme de ses parties, la lumière d'un astre provenant de plusieurs télescopes, typiquement écartés d'une centaine de mètres, est recombinaison de façon cohérente. C'est une technique très difficile, mais qui offre la résolution angulaire qu'aurait un collecteur unique géant qui remplirait tout l'espace couvert par ce réseau dilué de télescopes. Elle est utilisée depuis longtemps en ondes radioélectriques; c'est la base de la réalisation d'ALMA, un réseau de 64 antennes radio développé actuellement au Chili par l'alliance des continents européens et nord-américains. Dans les prochaines décennies, des interféromètres spatiaux constitués de télescopes naviguant en formation sur des bases kilométriques apporteront également des avancées considérables dans ce domaine.

La course à l'efficacité des instruments

Avec un coût consolidé typique de 1€ par seconde d'observation sur un grand télescope optique, il importe d'en optimiser les instruments, imageurs et spectromètres, et ce d'autant plus que la faiblesse des sources impose le plus souvent des temps d'intégration de plusieurs heures. Les détecteurs modernes, systèmes à couplage de charges (CCD), analogues aux détecteurs de nos caméras vidéo, pour le domaine visible et réseaux de diodes pour l'infrarouge, fournissent des données numérisées, offrent de très grands formats et une efficacité de détection proche de l'unité. Leur quasi-absence de bruit permet de frôler la détection de photons individuels. Pour l'analyse spectrale des astres, on utilise des modes instrumentaux adaptés aux caractéristiques des sources observées. Dans le mode multi objets, des fibres optiques ou des fentes placées sur chaque source permettent d'observer des centaines d'entre elles simultanément. Ce mode est particulièrement efficace pour étudier les amas de galaxies ou la tapisserie cosmique des galaxies lointaines. Dans le mode intégral (fig. 3), un découpeur d'images hache un petit champ de quelques secondes d'arc de côté et permet d'obtenir un spectre pour chaque point du champ. Ce mode est adapté aux sources compactes, depuis les petits corps du système solaire jusqu'aux galaxies lointaines en passant par les régions de formation stellaire et les coeurs de galaxies proches. Il permet également des gains en rapidité de l'ordre de cent.

Un pouvoir collecteur de plus en plus étendu, une acuité meilleure et des instruments toujours plus performants au service de grandes plateformes d'observation au sol et dans l'espace ont permis le développement considérable de l'astrophysique observationnelle au cours du siècle passé. Le présent devrait voir entre autres des images de la surface de planètes extrasolaires avec peut-être des indices de vie, la détection des toutes premières étoiles qui se soient formées dans notre Univers... et sans doute de nombreuses surprises. ■

Fig. 3 : Quelques-uns des 1024 spectres d'étoiles proches du centre de notre Galaxie obtenus simultanément avec l'instrument SPIFFI au VLT.



Un univers de galaxies, dont nous sommes

par **Danielle Alloin**¹

Les galaxies, objets célestes

Les de matière dans l'Univers, les galaxies présentent une variété de formes : elliptiques, spirales telle notre Galaxie, naines ou géantes. Une galaxie rassemble 1 à 100 milliards d'étoiles, maintenues par la gravité : une sorte de tissu déformable mais résistant. Dans notre Galaxie, un photon de lumière émis par une étoile située sur un bord arrive à l'autre bord après un voyage de 100 000 ans. Outre les étoiles, faciles à détecter puisqu'elles émettent une partie de leur lumière dans une fenêtre de l'atmosphère terrestre, une galaxie contient de la matière interstellaire froide – poussières, molécules, gaz atomique neutre – détectée dans les rayonnements infrarouge, millimétrique et centimétrique. Dans une galaxie spirale, la masse de l'ensemble des étoiles est environ cent fois plus importante que la masse de cette matière. Ces composantes constituent l'essentiel de la matière dite « visible » d'une galaxie, celle qui émet les photons de lumière conduisant à de superbes images (fig. 1). Dans une galaxie on trouve aussi des objets n'émettant guère de lumière, étoiles naines blanches refroidies, planètes.

¹ Directeur de recherches au CNRS, Responsable scientifique du Centre de recherches de l'Observatoire européen austral (ESO) à Santiago, Chili

Dans tous les cas, il s'agit de matière baryonique, faite des mêmes neutrons et protons qui constituent les atomes familiers : hydrogène, oxygène, azote, carbone...

Il existe également une composante « invisible », appelée matière noire, dont la présence est détectée par ses effets gravitationnels. La *matière noire* constitue environ 90 % de la masse d'une galaxie, autant dire l'essentiel. Elle se trouve répartie dans un halo, au sein duquel la galaxie « visible » avec ses étoiles et ses nuages de matériau moléculaire s'est développée. Dans une galaxie, le halo de matière noire est largement responsable du confinement gravitationnel des étoiles. Dans un amas ou dans un groupe de galaxies, où de même 90 % de la masse se rencontre sous forme de matière noire répartie dans une vaste poche qui englobe les galaxies visibles, elle confine les galaxies. Les modèles cosmologiques suggèrent que ces poches de matière noire, isolées à une époque où l'Univers avait un âge d'environ un milliard d'années, sont dues à l'amplification par la gravité des fluctuations primordiales du *big-bang*. La matière qui constitue ces poches est dite non baryonique. Un problème actuel des plus fascinants est de dévoiler sa nature ! Il est tentant de spéculer que les conditions extrêmes de l'Univers primordial (impossibles encore à simuler en laboratoire) ont pu engendrer toutes sortes de particules : neutrinos massifs, parti-

cules exotiques très peu interactives appelées WIMPs, pépites de quarks, mini trous noirs... Avec des expériences dédiées, et un peu de chance, nous pouvons espérer détecter ces reliques de l'Univers primordial. Alors que nous baignons dans le milieu qu'elles constituent - dix fois plus massif que l'Univers « visible » - pour le moment aucune d'entre elles n'a encore été détectée. C'est l'un des grands défis de la physique expérimentale.

Les galaxies, sites de transformation de la matière

Reprenons le fil de l'histoire de l'Univers : un milliard d'années après le *Big-Bang*, des poches se forment dans l'espace, faites de matière noire (matière non baryonique générée à l'instant du *Big-Bang*) et d'environ 10 % de matière baryonique (générée un dix-milliardième de seconde après le *Big-Bang*).

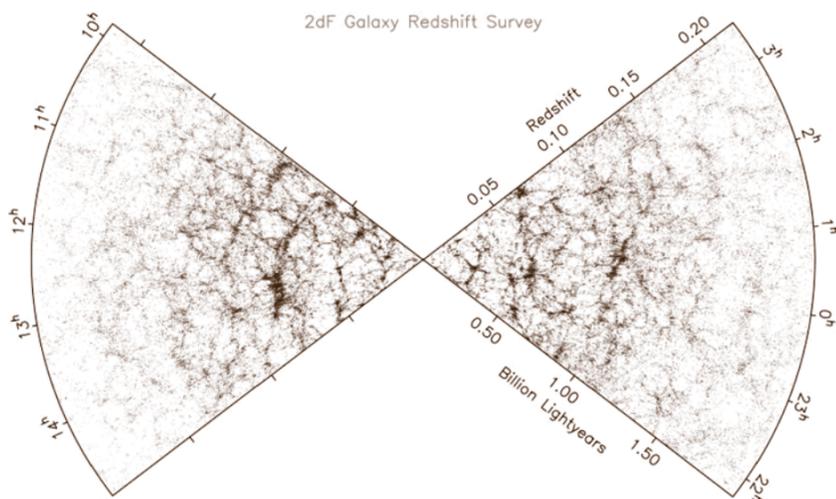
Sous l'effet de la gravité, la matière peut s'effondrer dans la partie centrale d'une poche et former un trou noir massif. Ce processus, encore mal connu, conduit à un fracassement extraordinaire de la matière et à la mise en place d'un champ gravitationnel intense. Le trou noir doit son nom au fait que son attraction gravitationnelle empêche les photons de s'échapper de son horizon propre. La matière environnante, attirée par le champ, libère une énorme quantité d'énergie gravitationnelle. Les trous noirs massifs se rencontrent dans le noyau –

région centrale- des galaxies. Ils sont parfois « actifs », parfois « dormants ». Les noyaux actifs de galaxie (aussi appelés *quasars*, *blazars*, *liners*, selon la masse du trou noir massif, son niveau d'interaction avec le milieu environnant, et son orientation) correspondent à des trous noirs dont la masse est comprise entre un million et un milliard de masses solaires. Un trou noir d'un milliard de masses solaires possède un horizon dont le rayon est d'environ 20 fois l'orbite de la Terre autour du Soleil : un milliard de Soleils empilés dans ce volume ! La présence des trous noirs massifs est révélée par l'énergie libérée dans leur voisinage immédiat, la dureté du rayonnement (rayons X et ultraviolet) et les mouvements à grande vitesse du gaz alentour (dizaines de milliers de km/s). Une évolution plus douce peut intervenir dans ces poches de matière : la formation stellaire concerne la matière baryonique et se produit à l'intérieur de la poche de matière, par contraste avec le trou noir massif très localisé. Cette formation conduit à la structuration des galaxies telles que nous les observons, jeunes et lointaines ou vieilles et proches. Au sein d'une poche de matière noire, la matière baryonique échappe localement à l'expansion de l'Univers : la gravité reprend un rôle dominant et engendre des effondrements au sein des nuages de gaz. Là, la matière se réchauffe et donc libère de l'énergie par rayonnement : ces régions les plus denses se



Fig. 1 : Galaxies spirales en interaction, NGC6872/IC4970, situées à une distance d'environ 200 millions d'années-lumière de notre Galaxie. Une telle interaction stimule fortement la formation d'étoiles.
Source : Observatoire européen austral, VLT/Paranal

Fig. 2 : Relevé des galaxies dans une partie de l'Univers local. Les observations étant réalisées depuis la Terre, celle-ci se trouve à l'apex des cônes, déployées selon différentes directions dans l'espace. La profondeur du relevé (vitesse d'expansion maximale au bord extérieur des cônes) est à un décalage spectral (redshift) de 0,2: les galaxies les plus lointaines dans ce diagramme nous informent sur l'Univers alors qu'il avait un âge de 11,6 milliards d'années. Chaque point représente une galaxie: on observe les grandes bulles de vide sur les parois desquelles se répartissent les galaxies et les amas de galaxies.
Source : Equipe du relevé 2dF de galaxies, effectué au télescope Anglo-Australien (2003)



refroidissent, en conséquence l'effondrement gravitationnel se poursuit jusqu'à la formation d'étoiles. L'allumage des réactions thermonucléaires au cœur de celles-ci libère alors suffisamment d'énergie pour stopper l'effondrement. Ainsi, la formation stellaire contribue à accroître la densité de la matière -sans pour autant créer de puits gravitationnel extrême-, à générer presque tous les atomes autres que l'hydrogène (sauf la faible fraction d'hélium primordial généré lors du *Big-Bang*) et à libérer l'énergie qui fait briller les étoiles. L'évolution chimique de l'Univers, la formation des

planètes, et l'apparition même de la vie, sont des événements résultant de la formation stellaire.

Les galaxies, témoins cosmologiques

Les poches initiales de matière noire ayant eu pour germes les fluctuations primordiales du *Big-Bang*, elles sont entraînées dans le développement de ces fluctuations au cours de l'expansion. Les galaxies et trous noirs massifs qui se sont formés dans les poches de matière noire sont donc des marqueurs de cette expansion et de l'évolution des grandes struc-

tures, depuis leur origine (le *Big-Bang*, instant 0) jusqu'à l'âge actuel de l'Univers (environ 13,5 milliards d'années). En ce qui concerne le premier effet, c'est précisément la découverte du mouvement d'éloignement des galaxies qui a conduit à l'idée de l'expansion de l'Univers -ensuite confirmée par l'observation du rayonnement cosmologique diffus à 2,7 Kelvin.

Le second effet concerne la distribution de la matière dans l'espace à différents âges de l'Univers. Pour cela, de grands relevés des positions et vitesses (donc distance) des galaxies et des noyaux actifs ont été conduits: soit des sondages très profonds limités à une petite région du ciel, soit des sondages moins profonds couvrant une grande région du ciel, susceptibles de révéler l'évolution temporelle. On observe alors que les galaxies, presque toujours rassemblées en amas ou groupes (de quelques centaines à quelques dizaines de galaxies), se répartissent sur les parois de gigantesques bulles, vides de matière. Ces parois sont vues en projection comme des filaments: ce sont les grandes structures de l'Univers. Les super-amas de galaxies sont localisés aux points de contact entre bulles (nœuds d'intersection des filaments). Ces structures sont prédites par la cosmologie du *Big-Bang*: de superbes simulations numériques en montrent l'apparition et l'évolution. Il est donc important de les observer dans la réalité (fig. 2), et de suivre leur évolution en remontant le temps vers les premiers âges de l'Univers pour mieux contraindre les paramètres cosmologiques. Du point de vue des observations, le défi est d'accroître l'extension de ces sondages. Le cadre cosmologique de la formation des galaxies semble bien établi aujourd'hui, il reste cependant nombre de questions à résoudre avant d'avoir une représentation fine des phénomènes observés. Par exemple, il n'existe pas de consensus quant à l'époque et au scénario détaillé de la formation des galaxies: la grande diversité de leurs tailles, de leurs types, de leurs formes, suggère que plusieurs processus physiques ont été en compétition, au moment de leur formation et ultérieurement au cours de leur évolution. Le scénario expliquant le mieux les observations est celui d'une formation hiérarchique: au début, de petites galaxies se seraient formées en grand nombre puis, sous l'effet d'interactions gravitationnelles - probables étant donnée leur proximité -, elles auraient fusionné pour former les galaxies géantes. La fusion de galaxies conduit à former beaucoup d'étoiles, ce que peut révéler l'observation. Mais à cette époque lointaine les galaxies nous apparaissent comme bien peu lumineuses. L'effet de lentille gravitationnelle vient à notre secours: un corps massif, par exemple un amas, situé entre nous et une galaxie

lointaine peut amplifier la lumière de celle-ci et nous la rendre observable, jouant le rôle d'un « télescope naturel ». Grâce à cela, les télescopes géants photographient des objets présentant un décalage spectral de δ , donc observés un milliard d'années après le *Big-bang*: si les théories cosmologiques sont correctes, nous remontons presque à la naissance des galaxies actuelles!

Un autre problème intéressant est celui de la formation des trous noirs massifs. Celle-ci est difficile à simuler avec les outils disponibles car leur naissance se déroule sur des échelles spatiales très petites par rapport aux échelles de simulation utilisées pour les galaxies. Nous ignorons si les trous noirs massifs se forment d'emblée -à partir d'une poche de matière noire-, ou bien par effondrement ultérieur de la matière au sein de galaxies déjà existantes, ou bien lors de l'interaction gravitationnelle entre galaxies. Des comparaisons entre la répartition spatiale des galaxies et celle des noyaux actifs, à des âges successifs de l'Univers, apporteront des éléments de réponse. La période la plus intéressante, correspondant à des décalages spectraux entre δ et $\delta + 7$, commence tout juste à être explorée avec les outils appropriés: satellites observant en rayons X pour détecter les noyaux actifs sans effet d'écran par leur propre composante de poussières, télescopes millimétriques pour observer les galaxies dont les régions de formation stellaire pourraient être masquées par la poussière.

Il est difficile - voire présomptueux - de prédire le devenir de l'Univers! Sommes-nous si certains d'avoir établi un modèle physique de la réalité englobant une totalité et non pas seulement un « petit coin » de l'Univers? Cependant, quelques prédictions limitées peuvent être faites en ce qui concerne les galaxies, résultant de notre compréhension de l'évolution stellaire. En tant qu'objets lumineux, les galaxies vont s'éteindre au cours des milliards d'années à venir. Les étoiles majoritaires de faible masse, telles le Soleil, évoluent vers des résidus de matière dense qui ne rayonnent plus. Ces « cendres éteintes » piègent la matière qui ne sera plus recyclée dans la formation de nouvelles étoiles: l'émission de photons se tarit et la formation d'atomes plus lourds que l'hydrogène est stoppée. Mais en tant qu'objets exerçant une attraction gravitationnelle, les galaxies vont perdurer. Leurs masses seront de moins en moins susceptibles de se modifier lors d'interactions gravitationnelles entre elles, car la probabilité de telles interactions va décroître puisque l'expansion de l'Univers va se poursuivre, très probablement, à l'infini. Alors, un Univers infini et obscur? ■

Cordes, particules et cosmologie : un avant Big-Bang est-il concevable ?



Entretien avec Gabriele Veneziano¹

par Paul Caro²

Question :

Vous avez été à l'origine en 1968 de la théorie des cordes. Dans quel sens a-t-elle modifié notre vision des particules élémentaires ?

On connaît dans la Nature quatre types de forces : la force gravitationnelle, les forces électromagnétiques (Maxwell au XIX^{ème} siècle a unifié l'électricité et le magnétisme), la force faible (qui contrôle la fusion nucléaire dans les étoiles, ou la radioactivité), et la force forte ou nucléaire (qui tient ensemble protons et neutrons dans les noyaux). Ces quatre

interactions, dans la théorie conventionnelle, sont décrites au niveau microscopique par l'échange entre particules « élémentaires » d'autres particules « élémentaires » appelées particules « vecteurs » qui varient selon le type d'interaction. Toutes ces particules, vecteur ou non, sont pointiformes, c'est à dire qu'elles n'ont pas de dimensions spatiales (mises à part les incertitudes dues à la mécanique quantique).

La théorie des cordes remplace ces objets sans dimensions par des structures unidimensionnelles, filiformes, que l'on appelle « cordes ». Cela semble être un pas innocent mais il entraîne des conséquences très profondes. Par exemple, dans la théorie conventionnelle, on doit donner pour chaque particule connue ses propriétés séparément, on doit faire un sorte de catalogue des particules au fur et à mesure que l'on en découvre. La théorie des cordes est beaucoup plus économique au point de vue conceptuel : on pense que deux types de cordes, cordes ouvertes (avec des extrémités) et cordes fermées (sans extrémités, c'est à dire avec la forme d'une boucle) suffisent. Ces deux types de cordes avec leurs vibrations décrivent

toutes les particules élémentaires, engendrant ainsi une nouvelle classification de celles-ci. Les cordes sans extrémités correspondent aux vecteurs des interactions de type gravitationnel. Les autres interactions sont portées par des cordes avec des extrémités.

Est-ce que dans cette approche la distinction entre fermions et bosons avec des spins demi-entiers ou entiers est conservée ?

Oui, tout à fait. Dans la première version de la théorie des cordes, il n'y avait que des particules à spin entier. Mais peu après on a réussi à formuler une nouvelle théorie, qui s'appelle la théorie des supercordes, dans laquelle il y a les bosons et les fermions qui, comme on le sait, obéissent à des statistiques différentes. Si on essaie de mettre bosons et fermions ensemble dans une théorie des cordes, une symétrie en découle automatiquement entre le monde des fermions et celui des bosons. Par exemple, il y a des cordes ouvertes et des cordes fermées pour les fermions aussi. C'était la première fois qu'une structure symétrique entre bosons et fermions dérivait d'une approche théorique. Ce que l'on

appelle maintenant la supersymétrie n'est pas encore vérifiée expérimentalement mais elle retient l'attention de la communauté des théoriciens comme de celle des expérimentateurs qui la chercheront très activement avec les nouveaux accélérateurs comme le LHC (Large Hadron Collider) au CERN.

Au delà de « l'économie conceptuelle » les cordes par leur taille finie, par rapport au point sans dimension, arrivent à résoudre des problèmes très importants auxquels s'est confrontée la théorie plus conventionnelle comme, par exemple, le problème des infinis. Ce problème a l'air d'un déjà-vu : en 1900 Planck avait introduit sa constante h dans le cas de l'émission de radiations par un corps noir pour obtenir une quantité d'énergie finie. Dans le même esprit l'introduction par la théorie des cordes d'une longueur fondamentale, la taille caractéristique l de la corde qui vaut approximativement 10^{-34} m, permet de trouver une solution au problème des infinis dans la théorie quantique des champs conventionnelle (la divergence dite ultra-violette) et donc de se passer de la nécessité d'éliminer des infinis à travers des procédures mathématiques un peu douteuses.

¹ Associé étranger de l'Académie des sciences, professeur à la Division théorique du CERN.

² Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS.

En outre, si l'on peut par ces moyens « magiques » faire disparaître des infinis pour les interactions électromagnétiques, faibles et nucléaires, on ne peut pas en faire autant pour les interactions gravitationnelles. Personne n'a jamais réussi à éliminer les infinis dans la théorie quantique de la gravitation. Avec les cordes cela devient possible. C'est la raison pour laquelle les théoriciens prennent au sérieux la théorie des cordes. Pour la première fois on peut mettre ensemble, sans créer des incompatibilités, les deux piliers de la physique du siècle dernier, la mécanique quantique d'une part, et la théorie de la gravitation d'Einstein, d'autre part.

Quels problèmes pose la question des dimensions des cordes ?

En effet ce mariage entre la théorie quantique d'un côté et la théorie de la gravitation de l'autre n'est pas automatique. Pour la cohérence interne de la théorie on a besoin de rajouter d'autres dimensions spatiales qui peuvent être si petites que l'on en observe seulement des conséquences indirectes. Aux énergies ordinaires, même celles des accélérateurs, ces dimensions ne donnent pratiquement aucun effet observable, mais elles sont nécessaires au plan théorique. Dans le cas des supercordes, on a besoin de six dimensions supplémentaires très très petites, leur taille étant de l'ordre de grandeur de celle des cordes, l . Ce qui explique que pour beaucoup de phénomènes, pourvu que l'on travaille à des énergies suffisamment basses, on ne peut pas faire la différence entre une corde et un point, ou voir les effets de ces dimensions supplémentaires. Mais pour des énergies élevées, telles que celles qui sont associées aux premiers instants de l'Univers, cette longueur l peut jouer un rôle très important...

Quelles sont les implications de la théorie des cordes pour la cosmologie ?

La cosmologie c'est l'ultime frontière de la physique parce que les quatre forces entrent en jeu simultanément. Il y a de grands mystères dans la cosmologie : l'Univers, que nous étudions aujourd'hui par des mesures de plus en plus précises, est très homogène à grande échelle. Il y a bien sûr des structures dans l'Univers : des planètes, des étoiles, des galaxies, des amas de galaxies, mais elles se ressemblent partout dans l'Univers. En plus, il y a un rayonnement fossile, la radiation à 2,7 K, qui est très homogène : elle est la même dans toutes les directions du ciel à une part pour cent mille près. Or il est très difficile d'expliquer cette homogénéité dans une cosmologie conventionnelle. Deux choses font des difficultés : d'abord c'est qu'il

il y a eu un début au temps. Tout commence avec le *big-bang* à $t = 0$. Il n'y a rien avant : $t < 0$ n'est pas bien défini. Et, deuxième chose, l'Univers est depuis $t = 0$ dans un état d'expansion décélérée, c'est à dire une expansion rapide d'abord puis progressivement plus douce.

Or, l'Univers que l'on observe aujourd'hui, a une taille d'environ 10^{26} m. Dans la cosmologie conventionnelle sa taille initiale, tout de suite après le *big-bang*, était bien sûr petite mais pourtant énorme par rapport à la distance que la lumière, avec sa vitesse grande mais finie, avait pu parcourir depuis $t = 0$. La lumière n'a parcouru qu'une distance de 10^{32} m alors que l'Univers, lui, mesure déjà un centimètre. L'Univers à ce stade consiste donc de $(10^{30})^3 = 10^{90}$ régions (la puissance 3 étant liée au fait que on doit passer des dimensions linéaires au volume) qui n'ont jamais eu le temps de communiquer entre elles ! S'il y avait à ce moment là une quelconque inhomogénéité, il n'y avait aucun moyen de l'éliminer par la suite. Il faut donc en conclure que les conditions initiales étaient très très homogènes. A priori, la probabilité d'un tel état initial est très faible, pratiquement nulle.

Il y a deux possibilités pour résoudre ce problème. On peut, tout en gardant une origine du temps, abandonner l'idée d'une expansion toujours décélérée et dire que, dans l'histoire primordiale de l'Univers, il y a eu une période d'expansion accélérée. Ou alors, deuxième hypothèse, dire que $t = 0$ n'était pas le début du temps : il y a eu quelque chose avant qui a produit le *big-bang* ou quelque chose qui lui ressemble.

Dans le premier cas, on a conçu les modèles inflationnistes standards, où, très peu après $t = 0$, l'Univers était très petit, plus petit que la distance parcourue par la lumière.

Dans le deuxième cas, si on admet que $t = 0$ n'est pas le début des choses, on a plus de « temps » à disposition pour homogénéiser l'Univers bien avant le *big-bang* !

La raison pour laquelle on a postulé un début du temps est bien claire si l'on applique la théorie classique d'Einstein de la gravitation. En remontant en arrière dans le temps on arrive à une singularité, un instant ($t = 0$ par convention) pour lequel plusieurs grandeurs physiques tendent vers l'infini et donc, aller au delà, mathématiquement cela n'a pas de sens. Mais tout près de $t = 0$ les phéno-

mènes quantiques ne peuvent pas être négligés. Il existe un temps critique, d'environ 10^{-43} secondes, que l'on appelle le temps de Planck, qui définit la limite de validité de la théorie classique. Entre $t = 0$ et $t = 10^{-43}$ secondes on ne peut pas faire confiance à la théorie classique, on sait que les effets quantiques sont importants. Avant la théorie des cordes, on n'avait pas les moyens de mettre ensemble la théorie quantique et la gravitation. On s'est donc contenté de la théorie classique et de la nécessité, dans cette théorie, d'un début du temps. C'était une hypothèse pas vraiment justifiée théoriquement, une sorte de dogme..., accepté peut-être un peu trop rapidement.

Avec la théorie des cordes, on peut faire d'autres propositions. La singularité du *big-bang* correspond à un instant où toutes les tailles tendent vers zéro, mais cela n'a pas trop de sens dans une théorie où tout objet a une taille finie. Des expériences de pensée suggèrent que l'on peut avec les cordes éliminer la singularité. Dans ces nouveaux modèles cosmologiques il y a d'abord une évolution d'un état primordial vers le *big-bang* avant de continuer avec la cosmologie classique du *big-bang* vers l'Univers d'aujourd'hui. La chose la plus difficile est de mettre ensemble ces deux phases qui sont séparées par une brève période de grande courbure de l'espace, de grande densité, de grande température. Même si « grand » ne veut pas dire « infini », les problèmes techniques pour décrire cette « transition » restent formidables. Il y aura, pendant cinq mois fin 2003, un « workshop » à Santa Barbara en Californie sur la cosmologie des cordes où ces questions vont sûrement être discutées. En outre, plusieurs groupes proposent différents « scénarios » sur ce qu'aurait pu être l'Univers avant le *big-bang*. Au lieu d'être de la pure métaphysique l'évolution de l'Univers avant le *big-bang*, s'il y a eu un avant *big-bang*, implique des conséquences pour l'Univers d'aujourd'hui et pour les observations actuelles ou à court terme.

Quelles sont les mesures expérimentales qui peuvent prouver cette théorie ?

Je pense que la cosmologie est le meilleur domaine d'où extraire des prévisions pour tester la théorie. Il y a d'autres possibilités mais, comme il est difficile d'aller à des énergies suffisamment grandes avec des accélérateurs, on doit se contenter d'observer des conséquences indirectes, par exemple des fluctuations des constantes de la nature comme la constante de Newton ou de Coulomb ou la constante de structure fine. D'après la théorie des cordes elles pourraient varier dans l'espace et dans le temps. Si on trouvait, par exemple, que

la constante de structure fine varie un peu dans le temps, cela appuierait la théorie des cordes.

Par contre, par son expansion, l'Univers représente lui-même l'accélérateur le plus puissant que l'on puisse imaginer. Les photons observés aujourd'hui étaient si énergétiques dans l'Univers primordial que la théorie des cordes a pu laisser des traces sur leur propriétés. Or, à cause d'un phénomène bien connu de « congélation » de certaines quantités pendant les très longues périodes cosmologiques, ces propriétés sont encore observables aujourd'hui. On pense par exemple que la structure de l'Univers à grande échelle, telle que les galaxies et leurs amas, résulte de l'évolution de certaines inhomogénéités de nature quantique présentes juste après le *big-bang* pendant la phase d'inflation. Par contre, dans un modèle qui inclut un épisode inflationniste avant le *big-bang*, les observations actuelles nous donnent des informations sur cette préhistoire.

Est-ce qu'il y a des expériences qui peuvent mettre la théorie en difficultés ?

Je pense que oui même si ce n'est probablement pas pour tout de suite. Voici quelques exemples :

Dans l'inflation standard la production d'ondes gravitationnelles est trop faible pour être observée. Par contre la théorie pré-*big-bang* prédit un fond stochastique d'ondes gravitationnelles qui serait mesurable dans la deuxième phase de développement des interféromètres gravitationnels du type de VIRGO (collaboration franco-italienne à Pise) ou de LIGO (projet américain), la sensibilité des détecteurs de la première phase n'étant pas encore suffisante. Ensuite, il y a dans la cosmologie pré-*big-bang* un mécanisme pour générer des champs magnétiques à l'échelle des galaxies, ce qui n'est pas le cas dans la cosmologie inflationniste classique. Ces champs magnétiques ont bien été observés, mais leur origine reste mystérieuse. La mesure des inhomogénéités dans la température du rayonnement cosmique est un troisième critère. L'inflation standard a ses prédictions qui sont pour l'instant bien vérifiées. La cosmologie pré-*big-bang* fait des prédictions légèrement différentes notamment au niveau de la polarisation du rayonnement.

Il y a donc toute une batterie de tests potentiels qui peuvent mettre en crise l'un ou l'autre modèle ■

Vers une éthique de l'espace



par **Alain Pompidou**¹

L'éthique de la politique spatiale est l'un des thèmes traités par la Commission Mondiale d'Éthique des Connaissances Scientifiques et des Technologies de l'Unesco : la COMEST. En effet, comme tout nouveau défi, les avancées rapides des technologies spatiales comportent de nouveaux risques. L'objectif d'une éthique de l'espace est avant tout de préserver la place de l'être humain, mais aussi de répondre aux inquiétudes de l'opinion :

¹ Professeur, CHU Cochin Port-Royal, Membre de l'Académie des technologies, Rapporteur de la COMEST de l'Unesco

cela suppose une démarche objective, indépendante et transparente, dégagée de toute connotation émotionnelle. Fondée sur une vision large, l'éthique des sciences et des techniques est à la fois morale de l'action et pensée du risque.

L'espace comme questionnement éthique conduit à poser les questions de la place de l'être humain dans l'Univers, de l'organisation de liens entre la planète Terre et les autres systèmes qui l'entourent, la protection des générations futures face à la conquête spatiale.

L'astronaute doit être considéré comme un "envoyé de l'humanité". La dissémination de produits biologiques obtenus en micro-gravité et soumis à des champs électromagnétiques intenses doit susciter des mesures de précaution. Quant au

retour sur Terre d'échantillons prélevés sur d'autres planètes, il soulève la question des formes de vies comparables ou non à celles existants sur Terre.

L'espace comme dimension conduit à s'interroger sur les conséquences de l'exploitation de celui-ci. Trois principes sont désormais reconnus : la non-appropriation de l'espace, la liberté d'accès et l'affectation au bénéfice de l'humanité.

Afin d'éviter l'accumulation des débris, seules peuvent être envisagées des mesures préventives. Elles doivent nécessairement être adoptées par toutes les puissances spatiales afin d'éviter les risques de distorsion de concurrence en matière d'utilisation des lanceurs. Outre l'effet mécanique des impacts liés aux débris, ceux-ci contribuent à la pollution lumineuse de l'espace circumterrestre.

Au même titre que la pollution électromagnétique, elle gêne les observations astronomiques à partir de la Terre.

L'espace comme outil : tout en maintenant les possibilités d'accès aux données spatiales, il importe d'en sauvegarder l'acquisition en distinguant les données scientifiques, partagées largement par la communauté des chercheurs et les données environnementales qui doivent conduire à des procédures d'échanges, notamment aux fins de protection de l'environnement planétaire, de prévisions météorologiques ou de prévention et de gestion des catastrophes naturelles. Quant aux données commerciales, notamment pour les communications et l'observation de la Terre, il importe d'éviter toute dérive de leur utilisation et notamment tout risque d'abus de position dominante.

L'espace comme perception conduit, grâce à une formation et à une communication appropriées, à sortir du contexte émotionnel en suscitant des points de vues critiques, tout en maintenant la part de rêve, mobilisatrice des activités spatiales.

L'émergence d'une éthique spatiale, la "spatio-éthique", représente un défi pour les Nations et pour l'humanité. Elle constitue, à l'échelle de la société de notre planète, une nouvelle approche stratégique de la prise de décision et de l'identification des enjeux de l'exploration spatiale ■



Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes



par **Lucien Laubier**¹

A lors que, depuis 1950, la production mondiale des pêches maritimes augmentait à raison de 6 % l'an, depuis une trentaine d'années, cette proportion est tombée en dessous de 2 %; depuis 1990, la pêche mondiale est stable autour de 90 millions de tonnes. La pleine exploitation des ressources a modifié les perspectives de la pêche. L'analyse des pêcheries mondiales, communautaires ou nationales met en évidence quatre phénomènes liés à la surpêche : une surexploitation des ressources, des capacités de capture excédentaires, une détérioration des écosystèmes, enfin une récurrence des conflits. Différentes solutions émergent, déjà testées par quelques pays. Les caractéristiques biologiques variées des espèces exploitées et la variabilité naturelle confirment la vanité d'une solution unique.

En 1970, la Communauté européenne comprenait six pays, tous déficitaires en produits de la mer : il n'est pas surprenant que l'objectif de la satisfaction des besoins du consommateur ait marqué les premières années de politique structurelle de la pêche. Cette période est caractérisée par des aides communautaires à la construction de navires de pêche.

Rapidement, la Communauté a pris conscience du besoin d'ajustement des capacités de captures avec les ressources, qui s'est traduit dans la Politique commune de la pêche adoptée en 1983 par un gel de la puissance motrice installée (premier Plan d'orientation pluriannuel -POP 1983-1986). Un second POP (1987-1991) a taxé la flotte française d'une réduction en puissance de 2,45 %. Pour y parvenir, un plan national de restructuration a incité 900 bateaux, âgés de plus de vingt ans et de moins de onze mètres de longueur, à sortir de la flotte en 1991. Le troisième POP (1992-1996) a confirmé la nécessité d'une réduction de la puissance. Un nouveau plan gou-

vernemental a permis de réaliser des sorties de flotte devenues inéluctables dans des conditions socialement tolérables.

Cependant, la politique suivie par l'Union européenne, basée sur la communautarisation des ressources, le partage des plafonds de capture sur une base historique et le rationnement de l'effort de pêche, s'est révélée insuffisante pour arrêter le déclin des principales pêcheries. Les mécanismes communautaires de prise de décision privilégient la défense des intérêts à court terme et les mesures de conservation adoptées divergent régulièrement des avis scientifiques. Le niveau de surexploitation est devenu tel que la prévention d'un déclin pérenne du recrutement est désormais devenue la priorité, au détriment de l'optimisation de la productivité des stocks.

Qu'est-ce que la surexploitation des stocks exploités ?

Le mécanisme conduisant à la surexploitation des stocks est aujourd'hui bien compris des économistes. La dynamique de surpêche s'explique par la nature à la fois commune et renouvelable des ressources vivantes de la mer. La surexploitation a pour origine l'accroissement des capacités de capture, qui finissent par excéder la productivité des stocks et que les programmes de sortie de flotte de la Commission européenne n'ont pas réussi à contenir. Ces dysfonctionnements ont une origine économique : les surcapacités qui affectent le secteur résultent des externalités négatives qui, à partir d'un certain seuil de rareté, deviennent significatives.

Sans régulation de l'accès, ces externalités creusent l'écart entre la productivité marginale sociale et la productivité marginale privée de l'effort de pêche. Cet écart incite au développement de capacités de capture disproportionnées par rapport à la productivité naturelle des stocks, phénomène aggravé par les aides publiques. La surcapacité, à son tour, stimule la dégradation des stocks et la multiplication des conflits. La maîtrise des forces économiques à l'origine de la surpêche suppose que les institutions régissant l'accès soient préalablement ajustées aux nouvelles conditions de rareté des ressources : clarification du régime de propriété, mise en place de mécanismes d'allocation de droits individuels de pêche et organes d'aménagement.

La gestion durable des pêches

La gestion durable des pêches vise à assurer l'obtention d'avantages optimaux pour les utilisateurs locaux, l'État ou la région, grâce à une utilisation « raisonnable » des ressources halieutiques auxquelles ils ont accès. Pour y parvenir, il est indispensable

- 1/ que des objectifs de production tenant compte des mécanismes naturels et des aspects socio-économiques aient été fixés,
- 2/ que le partage de la production naturelle ait fait l'objet d'accords,
- 3/ que la production soit efficacement contrôlée,
- 4/ que des institutions adéquates assurent la collecte de l'information auprès des usagers, l'élaboration des mesures appropriées, la prise de décision et le contrôle de leur stricte application.

La notion de développement durable a été au cœur des débats de la Conférence de Rio de Janeiro en 1992. Le thème de la « pêche responsable » a conduit la FAO à publier en 1995 un « Code de conduite pour une pêche responsable » qui prescrit l'application d'une approche de précaution : pour chaque stock, deux indicateurs doivent être estimés : le seuil de biomasse de reproducteurs en dessous duquel la probabilité de baisse du recrutement est forte (Blim) et la mortalité par pêche au-delà de laquelle le risque de réduire l'abondance des reproducteurs en dessous de Blim est élevé (Flim) ; ces deux valeurs ne peuvent malheureusement pas être déterminées actuellement avec une certitude suffisante, et les halieutes adoptent une biomasse plus élevée que Blim, dite de précaution (Bpa) et une mortalité par pêche moins élevée que Flim, dite Fpa.

Drague à volet à coquilles Saint-Jacques. (Photo Ifremer)



¹ Correspondant de l'Académie des sciences, professeur à l'université de la Méditerranée, directeur de l'Institut océanographique, Paris

Question d'actualité

Les mécanismes communautaires

En l'absence de mécanismes de régulation de l'accès, les méthodes indirectes de contrôle de la mortalité par pêche, telle la fixation annuelle de Totaux Admissibles de Captures (TAC), s'avèrent insuffisantes. Face à l'amélioration rapide de l'efficacité des navires, c'est désormais l'effort de pêche lui-même qu'il convient de réguler. La situation généralisée de surexploitation des pêcheries européennes s'explique par des causes variées : divergence dans les objectifs de gestion, accès aux ressources mal contrôlé, divergences d'intérêt entre les différents métiers, insuffisance des bases scientifiques, notamment en matière économique, biais dans les processus de décision, enfin déficit d'application des mesures. L'analyse des procédures décisionnelles au sein de l'Union européenne illustre la complexité d'un système dans lequel le souci de protection de l'environnement marin est pris en considération, notamment en ce qui concerne les animaux emblématiques (tortues marines, oiseaux de mer, Cétacés). La Politique commune de la pêche, décidée par le Conseil des ministres sur la base des propositions de la Commission européenne, elle-même ayant recours aux avis scientifiques annuels du Conseil international pour l'exploration de la mer, fait désormais intervenir le Parlement européen, ainsi que les ONG environnementalistes. Des oppositions se font jour entre professionnels sur une éventuelle renationalisation d'une partie de la Zone Économique Exclusive, ou la suppression de droits historiques dans la bande des 12 milles.

Les modèles démographiques appliqués à la gestion des stocks

L'analyse des principaux modèles démographiques utilisés pour la gestion des pêches montre les possibilités et les limites du travail accompli. La recherche est parvenue à construire un ensemble d'indicateurs robustes quant à l'état des ressources et des pêcheries. Dans la majorité des cas, des avis sur les risques de déclin de l'abondance, des rendements individuels et de la production totale des stocks, et la menace qu'ils font peser sur leurs capacités de reproduction, ont été émis. En aucun cas, le mauvais état actuel des pêcheries communautaires ne peut être imputé à une connaissance insuffisante des ressources, comme en témoigne l'évaluation du potentiel halieutique réalisée il y a trente ans par la FAO, comparée à la situation actuelle. Ce sont avant tout les carences des mécanismes de régulation de l'accès qui contrecarrent la bonne utilisation des connaissances disponibles. Avec des instruments de régulation de l'accès adaptés, le suivi de l'état des stocks serait très simplifié et la

qualité des avis grandement améliorée. L'expérience montre que les diagnostics erronés ont souvent pour origine la mauvaise qualité ou un traitement insuffisant des statistiques de la pêche commerciale. Or, toutes les méthodes indirectes de gestion des pêches reposent sur une connaissance intégrale des captures et des rejets en mer...

Quelques exemples concrets

Quelques pêcheries choisies afin d'illustrer la diversité des situations rencontrées ont été analysées. La pêcherie d'anchois du golfe de Gascogne fournit un bon exemple d'une approche nouvelle, combinant la biologie des pêches et l'océanographie. Le cas de la légine de l'océan Austral illustre un cas, heureusement rare, où le braconnage organisé en haute mer rend vaine toute tentative de gestion, au détriment des États qui respectent la réglementation. La grande sensibilité des populations de poissons de profondeur, comme l'empeur et les macrouridés, constitue un cas particulier lié à la grande longévité de ces espèces. L'exploitation de la morue et du merlu dans les eaux européennes illustre les préoccupations scientifiques actuelles en matière de préservation d'une biomasse limite pour assurer le recrutement et la survie de ces espèces, dont la biologie est déjà marquée par la surexploitation (avancement de l'âge et de la taille de maturité). Dans ces deux pêcheries, les surcapacités de pêche n'ont pas été suffisamment réduites et la carence des contrôles internationaux n'a fait qu'amplifier l'état de surexploitation de ces stocks. La pêcherie de thon rouge fournit un bon exemple d'un stock partagé à l'échelle d'un grand bassin océanique, l'Atlantique Nord, et ses mers adjacentes. L'avenir de cette pêcherie dépend de l'action politique, afin de garantir le respect des mesures de gestion et l'obtention de données de capture et d'effort de pêche fiables. Dans un cas au moins, celui de la pêcherie de coquilles Saint-Jacques de la baie de Saint-Brieuc, un ensemble de mesures de gestion semble avoir permis le début de la reconstitution d'un stock : il s'agit, il est vrai, d'une espèce sédentaire, dont l'abondance peut être évaluée directement et qui vit dans une zone géographique restreinte, ce qui favorise les relations régulières entre les professionnels, l'administration et les scientifiques ; pour autant, cet exemple est encourageant. Les pêches en estuaire des jeunes anguilles (civelles) illustrent le cas, heureusement rare, où les aménagements de toute nature qu'ont subi les cours d'eau, milieu de vie des adultes, contribuent à la réduction des stocks dans une mesure comparable à la surpêche. Enfin, les pêches méditerranéennes ne pouvaient être omises dans un tel rapport, en particulier à

cause de l'existence sur le littoral français d'organisations professionnelles dont l'origine est fort ancienne, les prudhomies.

Et l'aquaculture ?

L'aquaculture est susceptible de produire des ressources complémentaires, mais produit des rejets divers qui peuvent dépasser la capacité d'assimilation du milieu marin. Par ailleurs, malgré sa rapide progression, à peu près conforme aux prévisions faites il y a une trentaine d'années, elle n'est pas en mesure de se substituer totalement à la pêche dans un avenir proche, tant en ce qui concerne la très grande diversité des espèces sauvages exploitées (plus de 3000 espèces, contre quelques dizaines en aquaculture) que vis-à-vis des problèmes de disponibilité des espaces marins nécessaires. Bien qu'il s'agisse d'une activité à part entière qui fournit près de 40 % de la production d'animaux aquatiques par la pêche, elle n'apporte aucune solution à la conservation des ressources vivantes sauvages et de l'environnement soumis à une pression anthropique croissante.

La pêche et l'environnement

En fonction des engins utilisés, la pêche exerce de nombreux impacts. Les uns concernent les espèces exploitées elles-mêmes (raréfaction, sélection de formes par la pêche, sélection de certaines caractéristiques biologiques, éradication de certaines espèces, etc.). D'autres agissent sur les peuplements, les habitats et les écosystèmes dans leur ensemble. Inversement, des espèces accidentellement introduites peuvent avoir un impact significatif (compétition sur la ressource trophique, modification du fonctionnement de l'écosystème), comme la crépidule introduite sur les côtes françaises à la fin des années 40.

Quelles solutions ?

Il existe différentes méthodes pour réguler l'accès à la ressource. Les mesures administratives consistent à imposer des normes aux exploitants, alors que les mesures économiques ont pour objet d'inciter ces derniers à adopter des comportements conformes aux conditions et aux objectifs de durabilité économique et sociale de la pêche. La surcapitalisation, induite par les carences actuelles et à laquelle contribuent les aides publiques, a conduit à une surpêche généralisée. Le contrôle économique de la pression de pêche suppose l'instauration de droits de pêche — de préférence individuels — définis, soit sur les captures (quotas), soit sur les moyens de capture (licences), et dont le volume total est ajusté en permanence à la productivité des stocks. Comme pour l'environnement, deux mécanismes peuvent permettre de réaliser un tel

ajustement : la taxation (homologue du principe pollueur/payeur), ou le marché de droits individuels de pêche (homologue des droits à polluer). Quels que soient les instruments de régulation adoptés, leur adoption suppose un traitement convenable de la transition (partage des coûts immédiats, étapes et rythme).

Bien entendu, la communication et le dialogue devront jouer un rôle majeur dans cette évolution. Professionnels, administratifs, scientifiques, doivent apprendre à dialoguer en permanence.

Le Conseil européen de décembre 2002

La Commission a proposé en mai 2002 une réforme de la Politique commune de la pêche portant sur la réduction administrative de la flotte et la suppression totale des aides publiques à la pêche (les sommes ainsi libérées étant affectées au financement de plans sociaux au profit des pêcheurs en reconversion). Les implications sociales de ces propositions (perte en Europe de 28.000 emplois sur quatre ans) ont suscité une vive émotion au sein de la profession et l'opposition de plusieurs pays. Le compromis adopté par le Conseil du 21 décembre 2002 autorise les États membres à subventionner la construction de nouveaux navires jusqu'à la fin 2004, sous réserve de la destruction de bateaux plus anciens de puissance comparable. Les réductions de l'effort de pêche décidées pour des espèces en déclin rapide comme la morue sont inférieures aux propositions initiales de la Commission.

Ces nouvelles dispositions n'apporteront qu'une amélioration partielle et temporaire. Il importe de se préoccuper dès maintenant de la conception de nouveaux régimes de régulation de l'accès susceptibles d'assurer la durabilité écologique, économique et sociale de la pêche, ainsi que des mesures appropriées de traitement de la nécessaire transition qui conditionnent leur adoption.

Il est de l'intérêt de tous les acteurs de la pêche comme de la société que les indispensables réformes soient entreprises. Cela ne pourra se faire que de manière graduelle. Encore faut-il pour modifier les comportements, qu'une incitation nouvelle soit donnée, combinant une information transparente avec une déconcentration à un niveau approprié, privilégiant la négociation et le dialogue entre tous les partenaires ■

Le rapport paraîtra en novembre 2003 (Académie des sciences, *La surexploitation des ressources marines vivantes*, rapport RST n° 17), aux Éditions Tec & Doc, 14, rue de Provigny 94 236 Cachan Cedex, [http : www.Lavoisier.fr](http://www.Lavoisier.fr).

Les oscillations des neutrinos : une fenêtre vers une nouvelle physique

par **Jean Iliopoulos**¹

Depuis que l'homme contemple les étoiles, il se trouve submergé dans un rayonnement intense de neutrinos célestes. Malgré cette abondance, les neutrinos sont restés les plus élusives et, peut-être les plus mystérieuses des particules élémentaires. Leur existence fut postulée par Pauli en 1932, afin d'expliquer une violation apparente de la conservation de l'énergie dans les désintégrations β , mais ils restèrent inobservables durant de longues années. En effet, leurs interactions avec la matière sont tellement faibles qu'ils peuvent traverser la terre entière sans être ralentis. C'est en 1954 que les réacteurs nucléaires ont fourni pour la première

fois un flux de neutrinos suffisamment important pour permettre leur mise en évidence directe. Peu à peu, les physiciens ont appris à les apprivoiser. À l'aide des grands accélérateurs de particules, ils ont pu construire d'intenses faisceaux de neutrinos de haute énergie qui permettent leur étude systématique. On a ainsi appris qu'il en existe trois espèces différentes et l'on pensait que leur masse était égale à zéro. Un des premiers résultats du collisionneur LEP au CERN fut justement le comptage absolu du nombre d'espèces de neutrinos.

Or, des découvertes récentes sont venues nous montrer que la réalité est, en fait, plus complexe. Elles ont eu pour origine une étude détaillée des neutrinos solaires. Les réactions nucléaires qui

sont à l'origine de l'énergie du soleil produisent un grand nombre de neutrinos par seconde. La réaction principale est la fusion de l'hydrogène en hélium et, par elle seule, le flux des neutrinos qui arrivent sur terre est de l'ordre de 10^{12} par cm^2 et par seconde. Ils sont difficiles à observer, car leur énergie est très faible, de l'ordre de quelques centaines de kilo-electronvolts. Il a fallu construire d'énormes détecteurs spécialisés, des merveilles de la technologie, et les enfouir à plus d'un kilomètre de profondeur, pour les protéger du bruit de fond du rayonnement cosmique. Les résultats, corroborés par des expériences sur les neutrinos des réacteurs et des accélérateurs terrestres, ont bouleversé nos

idées simplistes : non seulement les neutrinos ont des masses non-nulles, mais, de plus, les espèces ne sont pas bien distinctes. Au cours de leur propagation, ils peuvent se transformer les uns en les autres, en oscillations perpétuelles entre les trois espèces. Magnifique exemple des lois fondamentales de la mécanique quantique à des échelles de longueur d'onde totalement nouvelles. Les valeurs précises de leurs masses ne sont pas encore connues, elles sont plus faibles que tout ce que l'on a pu mesurer. Plusieurs physiciens pensent qu'elles peuvent nous montrer le chemin vers une nouvelle physique. Décidément les neutrinos n'ont pas encore fini de dévoiler tous leurs mystères ■

La souris génétiquement modifiée comme modèle d'études de la fonction des gènes ainsi que de pathologies humaines

par **Emiliana Borrelli**¹

Les progrès des connaissances en biologie moléculaire et cellulaire nous ont permis des avancées remarquables dans la manipulation génétique de différents organismes. Aujourd'hui, il est possible d'éliminer l'expression d'un gène, d'en induire son expression ectopique, et même d'induire l'ablation de cellules *in vivo*. Ces approches vont nous conduire à une connaissance très approfondie du rôle de protéines ciblées dans un contexte physiologique, au cours du développement de l'organisme et de la différenciation cellulaire. De plus, les manipulations génétiques nous permettent de simuler *in vivo* des altérations de

l'expression de gènes ou de la physiologie cellulaire, caractéristiques de pathologies humaines. Sans compter l'intérêt scientifique d'une telle approche, la création et l'analyse de ces modèles pourront donc nous être utiles pour le développement de nouvelles thérapies pharmacologiques et cellulaires.

Le modèle de choix de nos études est la souris génétiquement modifiée. Nous avons utilisé ce modèle pour affiner nos connaissances sur le fonctionnement de deux types cellulaires du système nerveux central, les neurones dopaminergiques et les cellules gliales oligodendrocytaires.

L'ablation sélective du récepteur dopaminergique de type D2 *in vivo* par la technique de recombinaison homologue nous a permis d'éclaircir le rôle propre de ce récepteur à l'intérieur de la famille des récepteurs dopaminergiques. L'analyse des souris déficitaires pour le ré-

cepteur D2, au niveau comportemental et moléculaire, nous a renseignée sur son activité d'autorécepteur, donc de molécule capable de contrôler la synthèse et la libération de dopamine. Cette fonction clef, à l'intérieur du système dopaminergique, intervient chaque fois que ce système neuromodulateur est sollicité. De plus nous avons démontré que l'activité D2 n'est pas remplaçable par d'autres récepteurs de la même famille. Un autre résultat intéressant est que le récepteur D2 est fortement impliqué dans le contrôle de la locomotion ainsi que dans la réponse aux stupéfiants. Ces résultats ont des implications importantes dans la recherche médicale, tout autant celles qui concernent la maladie de Parkinson, que l'addiction aux drogues.

Le deuxième modèle transgénique que nous avons développé permet l'ablation inductible, cette fois non pas d'un gène

mais d'un type cellulaire *in vivo*. Nous avons appliqué ce système à l'étude des oligodendrocytes, les cellules du système nerveux central (SNC) responsables de la formation de la gaine de myéline. Dans ce modèle, nous pouvons étudier l'origine de ces cellules et leur fonction dans le développement du SNC. L'analyse de ces animaux nous a permis de révéler que l'ablation d'oligodendrocytes dans la période post-natale produit des altérations graves du développement du cervelet. Ce modèle nous permettra aussi d'analyser, après des périodes d'ablation courte, la capacité des oligodendrocytes à être régénérés, là où sont localisées les cellules souches ainsi que d'étudier quelles sont les molécules qui peuvent aider à leur régénération. Ces résultats pourront apporter leur aide aux études sur des maladies humaines telle la sclérose en plaques ou les leukodystrophies ■

¹ Membre de l'Académie des sciences, directeur de recherche CNRS, laboratoire de physique théorique, École normale supérieure de Paris.

² Directeur de recherche à l'INSERM, Institut de génétique et biologie moléculaire et cellulaire, Illkirch.



La DRI

1995-2003

Par Yves Quéré¹

Au travers de ses relations internationales, l'Académie des sciences est animée d'une quadruple ambition :

- 1) rendre notre institution présente sur les lieux où, de par le monde, se débattent et se décident les actions interacadémiques ;
- 2) jouer un rôle de vitrine pour la science française ;
- 3) soutenir les actions de coopération scientifique et technique ;
- 4) participer à l'aide que les Académies plus anciennes se doivent d'apporter aux plus jeunes.

À côté des Comités dédiés à des actions précises, comme le CODHOS ou le COPED, la DRI a tenu là, depuis sa création en 1985 par notre regretté Confrère André Guinier, une place importante. Résumons ici son action – soutenue efficacement par le Ministère des Affaires étrangères – sur les huit dernières années.

Actions interacadémiques

Outre les liens solides qui ont été établis directement avec certaines Académies (Brésil, Canada, Chine, Espagne, États-Unis, Inde, Iran, Israël, Italie, Mexique, Pays-Bas, Royaume-Uni, Russie, Suède, etc. ...) – notamment par l'organisation d'un bon nombre de Colloques bilatéraux, – notre Académie s'est fortement investie dans certaines actions multilatérales, estimant que seul un effort concerté et global peut donner à la science son vrai rôle, à l'échelle mon-

diale, en termes de culture (s'agissant des individus) et de développement stable (s'agissant des sociétés).

C'est ainsi que l'Académie des sciences s'est vivement investie dans des fédérations comme l'ALLEA (les Académies européennes) qu'elle a contribué à créer, ou comme l'IAP (InterAcademy Panel : les Académies du monde) dont le DRI est devenu co-Président, ou comme l'IAC (InterAcademy Council), émanation de l'IAP qui rédige des rapports d'expertise scientifique et technique d'échelle globale. Notre Académie a été à maintes reprises l'hôte de réunions des divers Comités exécutifs ou Bureaux de ces fédérations, de même qu'elle a été invitée à participer à des travaux de réorganisation académique (Japon, Canada, Allemagne...) ou à la mise sur pieds de réseaux d'Académies (IAC, Amérique latine, Sud-Est asiatique).

Illustration de réalisations scientifiques ou pédagogiques françaises

Seule, ou le plus souvent par l'intermédiaire de nos Ambassades, la DRI a eu de nombreuses occasions d'organiser des cycles de Conférences d'Académiciens en divers pays. De même a-t-elle créé un circuit de présentation de savants français aux grands Prix internationaux – obtenant là des résultats substantiels – et organisé des rencontres régulières pour les Ambassadeurs ou les Attachés scientifiques en poste à Paris.

C'est sans doute dans le domaine de l'enseignement des sciences à l'école que l'action de notre Académie est la plus connue à l'étranger. D'innombrables contacts ont été pris par des Académies ou des Ministères étrangers avec le groupe Main à la pâte et avec la DRI en vue de s'inspirer de l'action de notre Académie. Les ancrages les plus forts, dans ce domaine, ont été établis avec le Canada, le Chili, la Colombie, la Hongrie, l'Italie, la Malaisie, le Mexique, la Suisse... mais surtout avec le Brésil, la Chine et les États-Unis. Un nombre croissant d'Académies prennent en effet conscience qu'une propagation convaincante, en direction de la jeunesse, des idées et des méthodes scientifiques doit jouer un rôle crucial dans le développement moral, social et économique des sociétés.

Actions pour la coopération

Ces actions sont le fait des Ministères et des Agences concernés, mais l'Académie est un des lieux où elles peuvent, le mieux, être présentées et discutées. C'est là un des rôles du CARIST, Comité créé par Jacques Friedel et dont la DRI organise les réunions. De même entretient-elle des liens souvent étroits avec les Services scientifiques, chargés de la Coopération, de bon nombre d'Ambassades de France, le DRI participant d'ailleurs désormais à la sélection de nos Attachés scientifiques.

Aide aux jeunes Académies

Il s'agit là d'un pari reposant plus sur des convictions, et sur des exemples encourageants (Costa-Rica, Népal...) que sur des bases dûment établies. Qui, en effet, saura définir le niveau critique de développement, pour un pays, justifiant la création d'une Académie des sciences ? Mais en même temps, qui ne reconnaîtra que, dans bien des pays en développement, l'existence d'une instance respectée, fondée sur une qualité scientifique internationalement reconnue, indépendante des pouvoirs et stable dans le temps, peut rendre d'éminents services, en termes d'aide experte aux dirigeants, d'enseignement scientifique, d'établissement de règles sanitaires, ou de frein à la fuite des cerveaux ?

C'est dans cette optique que notre Académie a établi des relations privilégiées et confiantes avec un certain nombre d'Académies jeunes et vaillantes, comme celles du Sénégal, d'Afrique du Sud ou de Bolivie, ou qu'elle a entamé une collaboration avec des pays qui envisagent de créer une Académie mais hésitent à en établir les statuts et à en définir le noyau initial. (Mali, Côte d'Ivoire, Vietnam...)

Il n'y a pas de paradoxe à constater que les problèmes d'une jeune Académie sont parfois aussi, exprimés différemment, ceux d'une plus ancienne ; et qu'échanger des idées au sujet de celle-là peut utilement aider à repenser les traditions et les modes de fonctionnement de celle-ci ■

¹ Membre de l'Académie des sciences, co-président de l'IAP.

Fondation Louis D.

Les lauréats des grands prix, scientifique et humanitaire 2003, dotés de 750 000 euros chacun, viennent d'être désignés.

Créée en janvier 2000, sous l'égide de l'Institut de France, la Fondation Louis D. décerne chaque année deux grands prix dotés chacun de 750 000 euros.

La Fondation Louis D. a pour objet de soutenir des associations, fondations, personnes morales ou O.N.G ayant une action à caractère caritatif ou culturel, ou dont le but est d'encourager la recherche scientifique.

Le prix scientifique, doté de 750 000 euros, destiné à aider un laboratoire, une équipe ou une institution engagée dans la recherche, récompense cette année des travaux sur : « l'imagerie du cerveau et ses applications ». Le conseil d'administration de la Fondation Louis D., après délibération d'un comité de sélection (1) placé sous la présidence de M. Étienne-Émile Baulieu, président de l'Académie des sciences, a désigné, parmi les candidats sélectionnés, les docteurs Denis Le Bihan et Stanislas Dehaene, et leur équipe, de l'unité de neuro-anatomie fonctionnelle du service hospitalier Frédéric Joliot (CEA/INSERM) à Orsay.

Le docteur Denis Le Bihan est un physicien et un médecin (neuroradiologue) qui a fait des contributions re-

marquables dans le développement de nouvelles méthodes d'imagerie permettant, entre autres, l'étude du fonctionnement du cerveau humain, notamment en imagerie par résonance magnétique (IRM).

De son côté, le docteur Stanislas Dehaene, directeur de l'unité inserm 562 de neuro-imagerie cognitive à Orsay mène ses recherches dans l'examen des bases cérébrales de fonctions cognitives particulièrement développées dans l'espèce humaine : le calcul, la compréhension du langage, et la planification consciente

(1) Membres du comité de sélection du prix scientifique, représentants des académies mentionnées :

- D^r Michael I. Posner de la National Academy of Sciences (États-Unis)
- Pr. Lars Terenius de la Royal Swedish Academy of Sciences (Suède)
- Pr. Anatoly Grigoriev de la Russian Academy of sciences (Fédération de Russie)
- D^r Hiroshi Shibasaki du Science Council of Japan (Japon)
- Pr. Jan Van Gijn de la Royal Netherlands Academy of Arts and

- Sciences (Pays-Bas)
- Pr. Giacomo Rizzolatti de l'Accademia Nazionale Dei Lincei (Italie)
- Pr. Hans-Konrad Müller-Hermelink de la Deutsche Akademie Der Naturforscher Leopoldina (Allemagne)
- Pr. Brian Worthington de l'Academy of Medical Sciences (Grande-Bretagne)
- M^{me} Nicole Le Douarin, secrétaire perpétuelle de l'Académie des sciences (Institut de France)

Le Prix humanitaire, doté de 750 000 €, est destiné à récompenser des associations, fondations, personnes morales ou O.N.G., à l'exclusion de toute personne physique, ayant une action à caractère caritatif.

Cette année, le prix est attribué à la Fondation Abbé Pierre pour le logement des défavorisés. En effet, la Fondation contribue au financement d'un réseau d'une vingtaine de « pensions de famille », dites « maisons relais » par les pouvoirs publics, pour l'accueil de personnes en difficultés n'ayant pas ou plus de réseau social suffisant. Le prix de la fondation Louis D. permettra en outre la création de deux

maisons, à Metz et à Marseille. Membres du comité de sélection du prix humanitaire :

- M. Jean CLUZEL, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences morales et politiques
- M. Jean-Pierre CAILLARD, président-directeur-général du groupe de presse Centre France – La Montagne
- M. Michel DIDIER, professeur au Conservatoire national des arts et métiers (CNAM)
- M. Patrick HENAULT, ambassadeur chargé des droits de l'homme au ministère des Affaires étrangères
- M. Claude MALHURET, ancien Ministre, maire de Vichy
- M. Henri PIGEAT, président de l'Institut international de la Communication
- M. Yves POULIQUEN, de l'Académie française, professeur de médecine
- M^{me} Michèle PUYBASSET, présidente de la Commission d'accès aux documents administratifs (CADA)

La remise officielle des grands prix de la Fondation Louis D., aura lieu le lundi 20 octobre 2003, à 11 heures, en grande salle des séances.

À cette occasion, les lauréats présenteront leurs travaux et réalisations ■

La Grande médaille d'or 2003 de l'Académie des sciences

La grande médaille d'or 2003 de l'Académie des sciences 2003 a été décernée à David Sabatini, né en 1931 en Argentine. De nationalité américaine, David Sabatini a fait ses études de médecine à Buenos Aires puis a préparé son Ph D sous la direction du Professeur Eduardo de Robertis, un des pionniers de la microscopie électronique. Dès 1960 il met en évidence deux mécanismes fondamentaux : le rôle de l'appareil de Golgi dans la biogenèse des granules sécrétoires et le phénomène d'exocytose. En 1961, David Sabatini part aux États-

Unis pour y poursuivre sa formation scientifique. A l'Université de Yale, il réalise les premiers travaux qui l'ont rendu célèbre. Il révolutionne la microscopie électronique en mettant au point une nouvelle méthode de fixation des tissus qui conserve remarquablement la structure fine des cellules et de leurs constituants. Il rejoint le laboratoire de George Pallade à l'Université Rockefeller à New-York et accomplit des travaux de tout premier plan. Sa fameuse théorie du « signal » a été à la base de presque un demi siècle de recherches sur la bioge-

nèse des protéines. En effet, elle permet de comprendre comment les protéines synthétisées au niveau des ribosomes sont dirigées ou bien dans des compartiments limités par des membranes ou bien dans le cytoplasme. En collaboration avec Gunther Blobel, il démontre que l'insertion des protéines dans la membrane du réticulum endoplasmique est due à la possession, par ces protéines, d'un peptide transitoire hydrophobe auquel ils ont donné le nom de « peptide signal »

A partir de 1973 un département de

biologie cellulaire très actif et renommé à l'École de médecine de l'Université de New où il poursuit encore ses recherches actuellement. David Sabatini est un biologiste cellulaire dont la carrière a été jalonnée par une série de découvertes d'une importance considérable. Il a su associer d'une manière exceptionnellement productive la biochimie et l'analyse structurale fine des constituants de la cellule pour mettre en lumière les mécanismes de la biogenèse des protéines et les relations fonctionnelles entre les organites de la cellule eucaryote ■

Claude Hélène (29 janvier 1938- 11 février 2003)

Membre de l'Académie des sciences, section de biologie cellulaire et moléculaire
Professeur au Muséum national d'histoire naturelle
Directeur de l'Unité 201 de l'INSERM, de 1980 à 2001

Claude Hélène a consacré la plupart de ses travaux à l'étude des mécanismes de reconnaissance entre les acides nucléiques et les protéines, la richesse et l'originalité de son œuvre devant beaucoup à sa triple approche physique, chimique et biologique. Utilisant des oligonucléotides synthétiques, en particulier antisens, il a apporté une contribution majeure à l'étude du contrôle de l'expression des gènes et, plus récemment, à l'identification de

molécules capables de reconnaître les télomères, impliqués dans la longévité cellulaire. Un grand nombre de ses découvertes ont ouvert de nouvelles perspectives thérapeutiques.

Claude Hélène était une personnalité très attachante, unanimement respectée de ses pairs et de ses étudiants; sa disparition affecte durement tous ceux qui l'ont connu.

Remarquable chercheur scientifique, enseignant exceptionnel et homme de cœur, le Professeur Claude Hélène nous a quittés dans sa 65^e année.

Pierre Douzou avait dit de lui en 1988 à l'occasion de son entrée à l'Académie des sciences: « Pour moi, vous êtes l'émouvante illustration de la réussite d'un garçon de condition initialement modeste, qui a su profiter des vertus de l'enseignement pour cultiver ses propres qualités, puis qui a su s'épanouir par l'effort bien dosé. Vous êtes la fierté de ceux qui vous entourent et vous aiment. Vous êtes enfin l'honneur du Muséum que vous avez si bien servi et que vous servirez longtemps encore. »

Jean Brossel (15 août 1918 4 février 2003)

Par B. C. et C. C.-T.

Membre de l'Académie des sciences, section de physique.
Professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie.
Ancien Directeur du laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure.

Jean Brossel, ancien élève de l'École Normale Supérieure, est l'un des éminents chercheurs qui ont su reconstruire l'école de physique française au lendemain de la guerre. Expérimentateur d'exceptionnel talent, il a été avec Alfred Kastler le pionnier de la technique de pompage optique. Il a également été l'inventeur de la méthode de la double résonance magnétique et optique en physique atomique. Ces méthodes optiques ont connu par la suite un développement foisonnant avec l'avènement des sources laser. La prestigieuse école française de physique atomique doit énormément à Jean Brossel.

L'œuvre de Jean Brossel

Le Professeur Jean Brossel qui vient de nous quitter a joué un rôle exceptionnel dans le développement de la physique française et internationale.

Jean Brossel sort de l'E.N.S. (École Normale Supérieure) avec l'agrégation de physique en 1945. Il travaille pendant cinq années dans des laboratoires anglais et américains avant de revenir soutenir sa thèse d'État à Paris à l'automne 1951, sur les expériences qu'il avait réalisées au MIT.

Attaché de recherches, puis maître de recherches au CNRS de 1951 à 1955, il est alors nommé professeur à la Faculté des sciences de Paris puis à l'université Paris 6 (Pierre et Marie Curie) où il enseigne jusqu'à sa retraite en 1985. Co-directeur du laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'E.N.S. jusqu'à la retraite d'Alfred Kastler en 1972, puis directeur de ce laboratoire, il est également directeur du département de physique de l'E.N.S. de 1973 à 1985.

Élu à l'Académie des sciences en 1977, Jean Brossel a reçu de nombreuses distinctions honorifiques dont nous ne retiendrons que les deux plus importantes, en 1960, le Prix Holweck décerné

Agrégé de sciences physiques à l'École Normale Supérieure en 1962, Claude Hélène obtient le titre de Docteur ès science en 1966 après avoir préparé sa thèse sous la tutelle de Charles Sadron. Nommé Directeur de recherches au CNRS en 1974, il succède à Charles Sadron à la direction du laboratoire de biophysique moléculaire d'Orléans.

Nommé Professeur au Muséum national d'Histoire naturelle à la suite de Charles Sadron, il dirige le laboratoire de biophysique du Muséum à partir de 1976. Il donne une dimension internationale à ce laboratoire, laboratoire associé à l'INSERM et au CNRS, et il y développe des collaborations avec l'Industrie et notamment les laboratoires pharmaceutiques. Membre du Comité de rédaction de prestigieuses revues internationales et membre du Conseil d'administration de différentes sociétés dont Aventis, Urogene et Chrysalon il a également été directeur scientifique de Rhône Poulenc de 1990 à 1999.

conjointement par les sociétés de physique anglaise et française et en 1984, la Médaille d'Or du CNRS.

Le laboratoire fondé en 1951, et co-dirigé par Alfred Kastler et Jean Brossel a joué un rôle éminent dans le développement de la physique atomique et de l'optique quantique en France et à l'étranger. La complicité intellectuelle et la complémentarité des tempéraments de ces deux scientifiques ont été essentielles pour ce succès, et Alfred Kastler n'a cessé d'exprimer, en public comme en privé, ses regrets que Jean Brossel n'ait pas partagé avec lui le Prix Nobel qui lui a été décerné en 1966.

Les méthodes optiques introduites par Alfred Kastler et Jean Brossel permettent tout d'abord d'orienter les moments magnétiques atomiques en excitant les atomes avec une lumière résonnante polarisée. C'est le principe du pompage optique. Si les atomes sont soumis de plus à une onde hertzienne qui induit la résonance magnétique, cette résonance est détectée par une modification de la lumière émise ou absorbée par les atomes. Cette méthode de double résonance combine la précision des mesures de fréquence des ondes hertziennes avec la sensibilité bien supérieure de la détection en optique.

Membre de l'Académie des sciences depuis 1988, Claude Hélène était Officier de l'Ordre national du Mérite, Officier de la Légion d'Honneur. Il avait obtenu le Prix Lacassagne décerné par la Ligue française contre le cancer, le Prix de la fondation de la Maison de la Chimie. Il était Docteur honoris causa de l'université de Liège et de l'université catholique de Leuven

À l'interface de la chimie, de la physico-chimie et de la biologie, les travaux de Claude Hélène, ont contribué au développement de la biophysique depuis près de 40 ans et leurs applications continueront de profiter aux domaines de la biologie, de la biotechnologie et de la médecine dans les années à venir.

Le colloque « Acides nucléiques: des bases à la génomique » qui s'est tenu du 6 au 8 février 2003 au Muséum, à réuni de nombreux collègues et amis autour de Claude Hélène pour un hommage à ses remarquables contributions sur la chimie des acides nucléiques ■

Ces méthodes ont permis rapidement d'obtenir une moisson de développements nouveaux dans toute une série de domaines: spectroscopie de haute résolution, horloges atomiques et standards de fréquence, magnétomètres de haute sensibilité, orientation des noyaux, sans compter toutes les études d'effets nouveaux dans les interactions atomes-lumière. L'avènement des sources laser accordables au début des années 70 a produit une explosion des recherches dans ce domaine qui se poursuit actuellement et qui explique le renouveau de ce champ de la physique.

En définitive, Jean Brossel et Alfred Kastler ont formé une école de pensée et un centre d'excellence scientifique, dont le rayonnement national et international est exceptionnel. Le professeur Jean Brossel s'est dévoué sans compter pour attirer et former les meilleurs étudiants en jouant un rôle pionnier dans la création des enseignements de troisième cycle préparatoires à la recherche. Il a eu également une influence profonde sur le développement de la physique en France par le rôle qu'il a joué à la direction du département de physique de l'ENS ainsi que dans les commissions du CNRS et de l'Université ■



la lettre
de l'Académie des Sciences
n° 9 / automne 2003

Publication de l'Académie des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS
Tel: 01 44 41 43 68
Fax: 01 44 41 43 84
http: www.academie-sciences.fr

Directeur de publication:
Nicole Le Douarin

Directoire:
Nicole Le Douarin
Jean Dercourt

Rédacteur en chef:
Jean-Didier Vincent

Secrétariat général de rédaction:
Marie-Christine Brissot

Conception graphique
Direction artistique
Nicolas Guilbert

Photographies & dessins:
p.p. 13, 20
photos N. Guilbert
pp. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14
photos (DR).

Comité de rédaction:
Jean-François Bach, Roger Balian,
Jack Blachère, Édouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro,
Jules Hoffmann, Alain Pompidou, Pierre
Potier, Érich Spitz,
Jean-Christophe Yoccoz

Photogravure & impression:
Edipro/Printreference™
01 41 40 49 00

n° de C.P.: 0108 B 06337