

QUÉBEC SCIENCE

SUPPLÉMENT JUILLET-AOÛT 1992

DÉCOUVRIR L'UNIVERS

AUX FRONTIÈRES
DE L'ESPACE ET
DE L'ASTROPHYSIQUE

Québec 



Enseignement supérieur
et recherche

LE DEVOIR

IMAGES
DU FUTUR '92

TABLE DES MATIÈRES

- 2 Présentation
- 3 Les explorateurs du cosmos
Jean-Marc Carpentier
- 7 Les télescopes au sol : fenêtres sur le cosmos
René Racine
- 12 L'astronomie stellaire dans l'ultraviolet
François Wesemael et Gilles Fontaine
- 15 Comment naissent les étoiles ?
Pierre Bastien
- 16 La cosmologie : nouveau dialogue sur le système du monde
Eduardo Hardy

La réalisation de ce cahier thématique sur l'espace a été rendue possible grâce au soutien financier du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Science (MESS)

Coordination :

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Science (MESS)
Direction du développement scientifique

Responsable du projet et coordination rédactionnelle :

Benoît Godin, MESS

Collaborateurs :

Pierre Bastien, Jean-Marc Carpentier, Gilles Fontaine, Eduardo Hardy, René Racine, François Wesemael

Recherche iconographique :

Jean-Marc Carpentier

Photographie :

Les images de ce supplément proviennent, sauf indication contraire, de la NASA et de Images du Futur.

Photographie de la page couverture :

Ève-Lucie Bourque / Publiphoto

L'observatoire Canada-France-Hawaii à Hawaii. Les traînées lumineuses dans le ciel sont le résultat d'un déplacement apparent des étoiles, causé par la rotation de la Terre, durant une exposition photographique de plus de deux heures.

Révision linguistique :

France Bordeleau

Réalisation :

Magazine Québec Science
2875, boul. Laurier, Sainte-Foy (Québec)
G1V 2M3 • Tél. : (418) 657-3551
Conception graphique : Richard Hodgson

Impression :

Imprimerie l'Éclaireur

Séparation de couleurs :

Graphiscan ltée

Nous tenons à remercier IMAGES DU FUTUR pour sa collaboration à la réalisation de ce projet.

DÉCOUVRIR L'UNIVERS



L'homme a constamment cherché à étendre son territoire et son habitat, à conquérir de nouveaux horizons. Cette quête s'est d'abord réalisée à l'échelle terrestre. On débat toujours de l'endroit exact où l'homme est apparu, mais selon la théorie soutenue par le plus grand nombre de spécialistes, ce serait probablement quelque part en Afrique. L'homme aurait ensuite conquis le continent eurasiatique, poussé jusqu'à l'Australie et la Nouvelle-Zélande, peuplé les deux Amériques.

Mais la quête se situe aujourd'hui à une toute autre échelle. Depuis plus de trente ans, des dizaines d'hommes et de femmes sont allés dans l'espace. On projette maintenant de construire une station orbitale, et même d'établir des observatoires permanents sur la Lune. Mais nos technologies sont encore loin des rêves des futurologues. La colonisation de Mars n'est pas pour demain, ni les vacances sur la Lune...

S'il y a eu exploration de l'espace par l'homme, on doit humblement affirmer qu'elle se situe davantage au niveau des connaissances, comme le suggère Jean-Marc Carpentier dans son article d'introduction. L'homme a acquis une quantité impressionnante de données qui lui ont permis de mieux comprendre l'origine de l'univers et l'évolution des galaxies.

C'est sur ces découvertes intellectuelles que se penchent quatre scientifiques québécois dans les pages qui suivent. René Racine, de l'Université de Montréal, nous dresse d'abord un portrait des instruments d'observation de l'espace situés au sol et qui exploitent le spectre visible, les ondes radio, les ondes millimétriques et la fenêtre thermique.

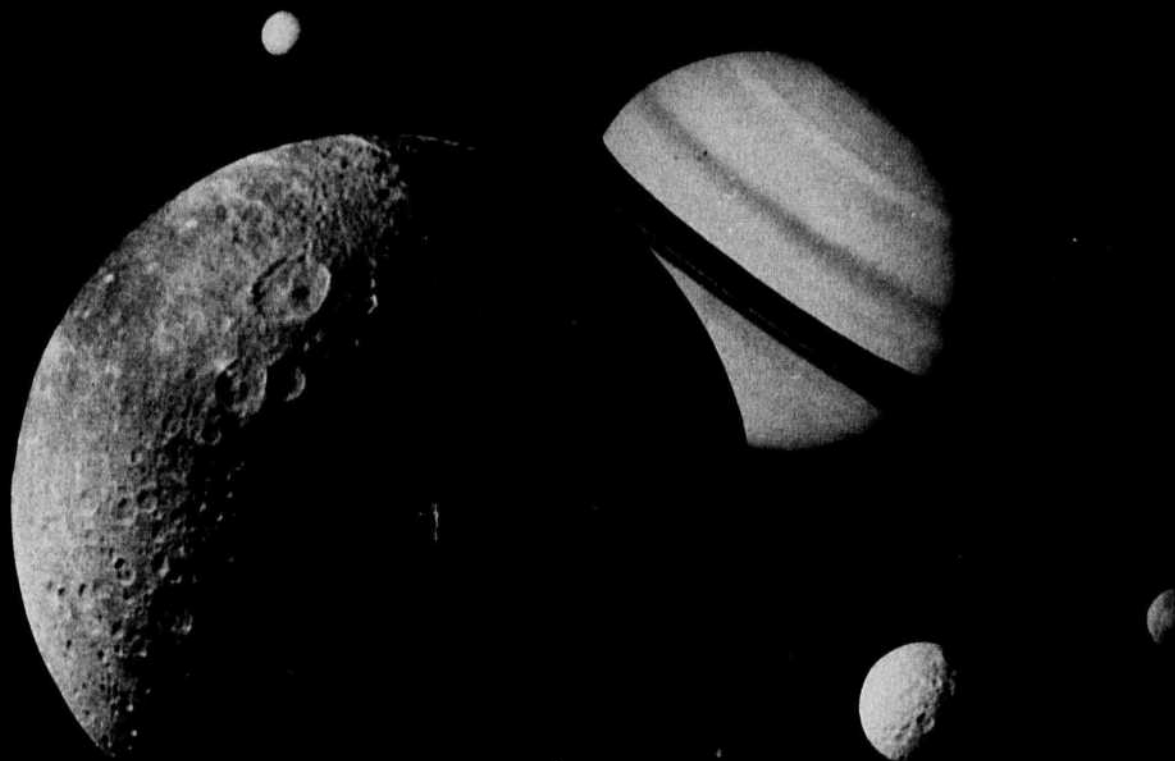
Aux instruments terrestres d'observation s'ajoutent aujourd'hui les instruments d'observation dans l'espace. François Wesemael et Gilles Fontaine, de l'Université de Montréal également, résument les principales connaissances recueillies grâce aux satellites d'observation de l'ultraviolet. Ils nous montrent par exemple comment l'étude des naines blanches a su profiter de ces instruments.

La naine blanche est le stade final de l'évolution des étoiles, le terme d'une longue histoire. C'est de la naissance, de l'évolution et de la mort des étoiles que nous entretient Pierre Bastien, de l'Observatoire du Mont Mégantic. Une histoire qui eût été insaisissable sans les instruments d'observation modernes.

C'est l'ensemble de ces observations qui nous permet d'émettre des hypothèses sur l'origine de l'univers, son évolution, sa structure actuelle et, ultimement, son avenir. Des questions qui intéressent la cosmologie. Eduardo Hardy, de l'Université Laval, nous propose en conclusion un dialogue sur la cosmologie. S'inspirant de la forme des écrits de Galilée, et lui empruntant ses trois personnages, Sagredo, Simplicio et Salviati, il soumet à un dialogue critique la théorie du Big Bang.

1992 est célébrée partout dans le monde comme l'année de la découverte : c'est en effet le 500^e anniversaire de la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb. En même temps, prenant prétexte du 350^e anniversaire de la mort de Galilée et de l'année de l'aéronautique, on célèbre un peu partout l'exploration de l'espace. À Montréal, *Images du Futur* offrira tout l'été aux visiteurs du Vieux-Port une exposition sur l'espace appelée Découvrir l'univers. Le présent cahier s'inscrit dans la foulée de ces événements, en abordant l'espace sous l'oeil de l'astrophysique.

BONNE LECTURE!



LES EXPLORATEURS DU COSMOS

PAR JEAN-MARC CARPENTIER,
COMMUNICATEUR SCIENTIFIQUE

Même si les humains contemplant le ciel étoilé depuis la nuit des temps, ce n'est que tout récemment qu'ils ont pu s'arracher du sol de leur planète natale, la Terre. À l'heure où l'humanité commence à contempler les confins de l'Univers et à en comprendre l'évolution aussi bien passée que future, son exploration physique du monde extraterrestre reste encore aussi timide que spectaculaire.

Il y a à peine trente-cinq ans, en octobre 1957, le lancement du *Sputnik* marquait le début de l'ère spatiale. La décennie des années soixante allait ensuite devenir celle de l'exploration humaine de l'espace. Lancée en 1961 par le voyage inaugural du cosmonaute soviétique Gagarine, elle culminait, en 1969, avec le premier

débarquement de deux astronautes américains sur le sol lunaire. C'était il y a déjà plus de vingt ans.

Mais beaucoup plus que par ces premiers pas bien timides dans le cosmos, c'est par l'intermédiaire de robots sophistiqués que les humains ont véritablement exploré leur voisinage spatial. Au cours des années

soixante-dix, des sondes spatiales soviétiques et américaines ont été lancées vers les différentes planètes de notre système solaire. Elles nous ont révélé des déserts calcinés par le Soleil, à la surface de Mercure. Elles se sont posées sur la planète Mars pour y chercher, sans succès, des traces de vie. Elles ont réussi à survivre

quelques heures dans ce véritable enfer qu'est l'atmosphère de Vénus pour nous donner des images de cette planète jumelle et pourtant si différente de la Terre.

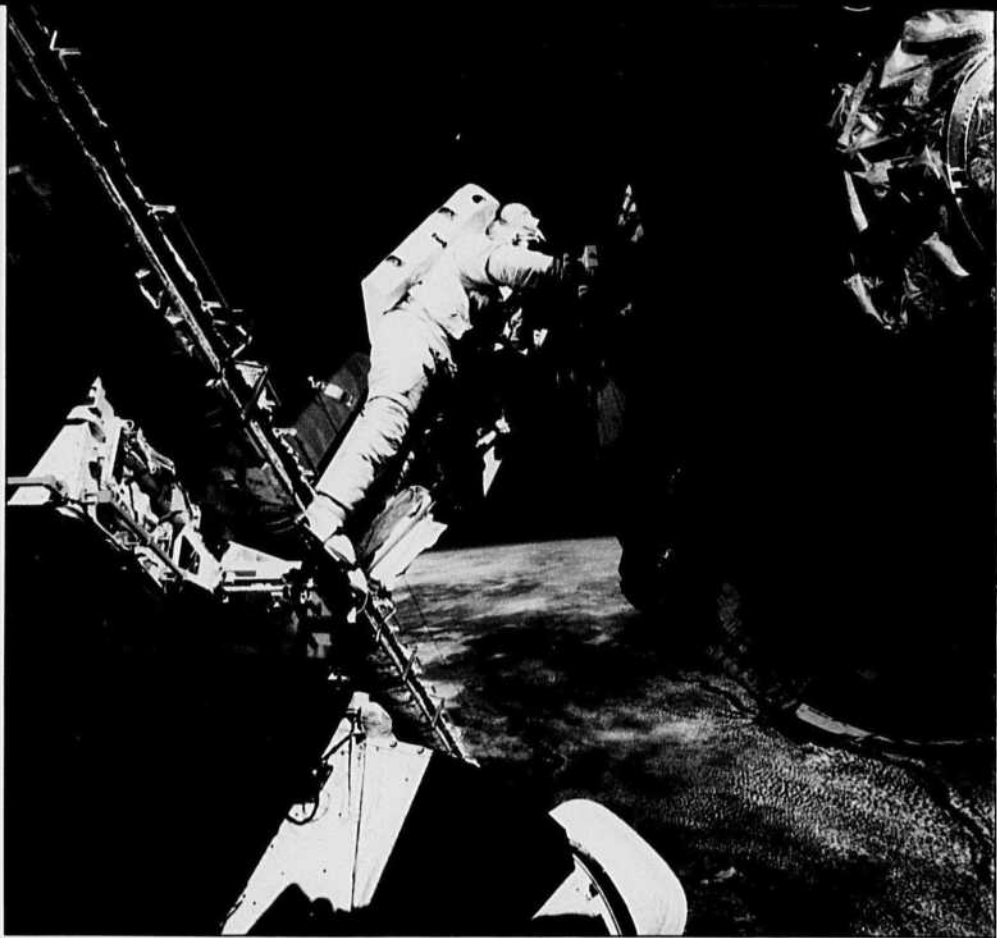
Mais le périple le plus fascinant de toute l'histoire de l'exploration spatiale a sans doute été celui des deux sondes *Voyager* qui ont été lancées en 1977 vers les confins de notre système solaire. Profitant d'un alignement exceptionnel des planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, les sondes automatiques ont visité les quatre planètes en enfilade et nous ont renvoyé plus de 75 000 images détaillées et une multitude de renseignements scientifiques sur ces mondes lointains dont on ne savait que bien peu de choses. La mission *Voyager* a été de loin la plus fructueuse de toute l'histoire spatiale. La plus longue aussi car, même si elle a atteint une vitesse de croisière de 70 000 km/h, la sonde *Voyager 2* a mis douze ans pour accomplir son périple et réussir son rendez-vous avec la planète Neptune à 4,5 milliards de kilomètres de la Terre.

Après avoir terminé sa mission avec succès, la sonde *Voyager 2* poursuit actuellement sa course dans le cosmos. Comme l'univers est surtout fait d'espaces vides, il faudrait à la sonde près de quarante mille ans pour arriver plus près d'une autre étoile que de notre Soleil. D'un point de vue cosmique, la petite sonde *Voyager* serait cependant encore dans notre voisinage immédiat puisqu'il lui faudrait 50 000 fois plus de temps pour traverser complètement notre galaxie, qui contient à elle seule 100 milliards d'étoiles.

On comprend donc facilement qu'on ne puisse s'en remettre à des voyages spatiaux pour explorer l'immensité du cosmos. Il est heureusement possible d'explorer notre univers sans devoir pour autant en franchir les espace infinis. Il suffit de regarder le ciel au moyen de télescopes spatiaux et terrestres et d'utiliser la science pour lever le voile sur ces mondes inconnus. Les autres articles de ce cahier le montrent bien.

La banlieue de la Terre

En fait, la véritable conquête *physique* de l'espace se fait aux environs immé-



Depuis les premiers «pas» timides d'un homme dans l'espace il y a plus de vingt ans, les techniques ont beaucoup évolué et les astronautes peuvent maintenant installer et réparer les satellites.

diats de notre bonne vieille Terre plutôt qu'aux limites de l'univers connu. Les lancements de vaisseaux spatiaux sont devenus coutumiers ; des cosmonautes se sont relayés de façon continue et ont parfois passé plus d'un an à bord des stations orbitales *Saliout* et *Mir*. Parallèlement à ces réalisations spectaculaires, la technologie spatiale nous a donné une multitude d'applications dont nous ne nous étonnons même plus. Les télécommunications par satellite, l'observation de la surface et de l'environnement terrestres, l'exploration des planètes lointaines et l'étude des mystères du cosmos à partir de l'espace sont devenues des réalités quotidiennes.

Même si on rêve vaguement de retourner construire une base permanente à la surface de la Lune et de débarquer un jour sur la planète Mars, c'est en orbite basse, à quelques centaines de kilomètres du sol terrestre, que se situera principalement l'activité spatiale au cours des années quatre-vingt-dix. Vers la fin de la décennie, une grande station spatiale

internationale, dont les États-Unis seront le principal maître d'œuvre, viendra offrir la possibilité de plus longs séjours dans l'espace. Depuis la dernière mission à bord de la station américaine *Skylab* en 1974, seuls les Soviétiques disposent d'un laboratoire spatial capable d'accueillir des astronautes pendant une longue période.

Mais avec l'effondrement du bloc soviétique et l'arrivée de nouvelles puissances spatiales, l'espace n'est plus le terrain d'une guerre de prestige entre deux superpuissances. De plus en plus, les grands projets spatiaux donnent lieu à une nouvelle forme de coopération internationale entre tous les pays industrialisés. C'est le cas de la station orbitale *Freedom* qui, même s'il s'agit d'abord d'un projet américain, repose sur des contributions importantes du Canada, du Japon et de l'Agence spatiale européenne. Une fois achevée en 1999, la station de 40 milliards de dollars américains fournira aux astronautes une base habitée d'une centaine de mètres de longueur.

Le garage de l'espace

Le Canada a décidé de consacrer une partie importante de son effort de développement spatial à la future station en construisant un système d'entretien mobile qui constituera en quelque sorte le garage de la station orbitale. C'est là que des réparations seront faites, que des modifications

seront apportées aux différents équipements utilisés dans l'espace. Ce module robotisé servira également d'atelier de travail extérieur pour les astronautes, qui disposeront de trois bras télémanipulateurs. Le plus puissant d'entre eux mesurera 17,6 m de long et pourra manipuler une navette spatiale chargée, dont la masse dépasse les 100 tonnes.

Le coût de la contribution canadienne à la construction de la station *Freedom* devrait totaliser près de 1,3 milliard de dollars, soit environ le tiers du budget spatial canadien d'ici l'an 2000. En échange de cette contribution, le Canada jouira d'un droit d'utilisation à long terme de 3 % du temps d'équipage total de la station américaine. On prévoit donc qu'une fois tous les deux ans, un astronaute canadien pourra séjourner jusqu'à six mois à bord de la station. Cet astronaute participera à l'exploitation de la station et à l'entretien du système

Roberta Bondar, première astronaute canadienne à aller dans l'espace, y a réalisé des expériences sur la micro-gravité et les maux de dos.



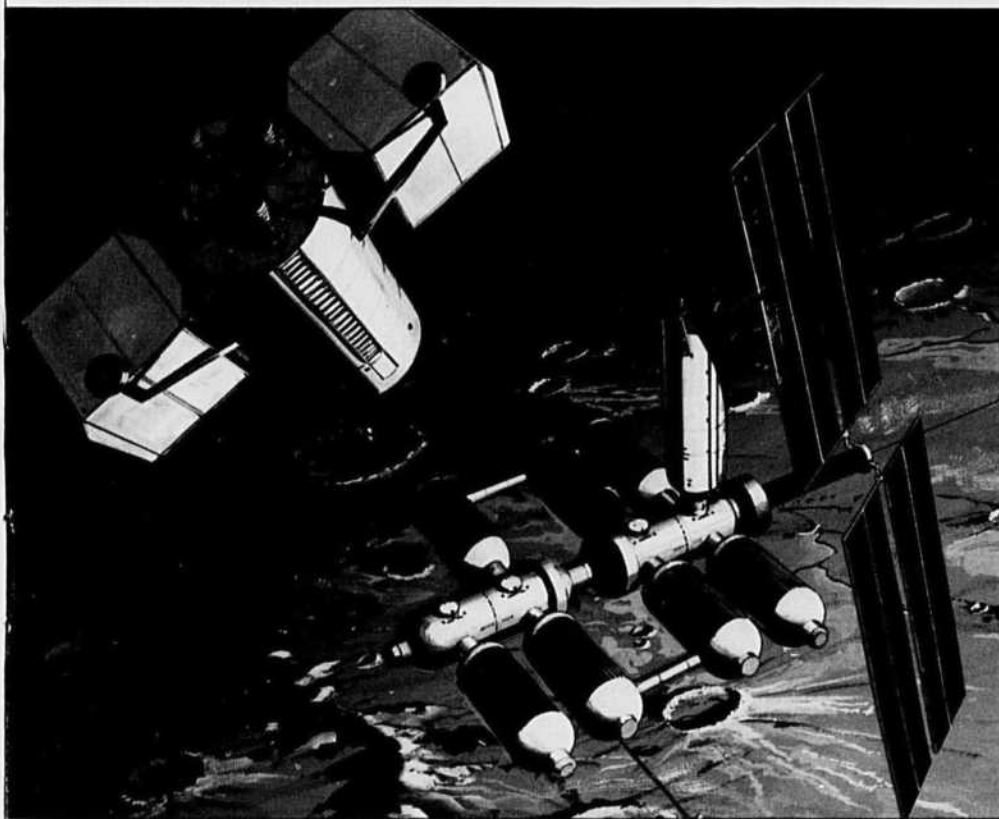
d'entretien mobile tout en effectuant ses propres expériences.

Même si la station *Freedom* ne doit être placée en orbite qu'au tournant du siècle, l'Agence spatiale canadienne possède son propre corps de six astronautes depuis 1984. L'Agence vient de compléter la sélection d'une seconde équipe de quatre astronautes, dont la québécoise Julie Payette, qui vient s'ajouter aux six astronautes recrutés il y a huit ans. La perspective d'une carrière spatiale semble plus alléchante que jamais puisque l'Agence spatiale canadienne a reçu plus de 5 300 candidatures, soit 1 000 de plus qu'à sa première opération de recrutement.

Pour l'instant, seulement deux astronautes ont eu la chance de réaliser leur rêve d'aller en orbite : Marc Garneau en octobre 1984 et Roberta Bondar en janvier 1992. Mais comme on vient de le mentionner, la mise en orbite de la station *Freedom* devrait permettre à des astronautes canadiens de séjourner plus régulièrement dans l'espace. C'est d'ailleurs en vue de réaliser les expériences reliées à ses contributions spatiales et de se préparer à l'utilisation de la station que l'Agence spatiale canadienne poursuit son programme de formation d'astronautes. Une première série d'expériences portera sur les problèmes d'adaptation à la vie en apesanteur. Un deuxième volet a pour objectif de développer des systèmes de robotique qui s'intégreront au centre d'entretien de la future station orbitale. La mission inaugurale de l'astronaute Marc Garneau, en octobre 1984, avait d'ailleurs permis de réaliser une première série d'expériences sur le mal de l'espace et sur la robotique spatiale. L'automne prochain, un autre astronaute canadien, Steve MacLean, poursuivra cette série d'expériences. Il s'affaira surtout à évaluer la performance d'un système de vision artificielle conçu pour aider les astronautes à manier avec précision les bras télécommandés du futur centre d'entretien de la station orbitale.

Vivre dans l'espace

L'excursion spatiale de Roberta Bondar, en janvier dernier, s'est entièrement inscrite dans le cadre d'une mission internationale consacrée aux



Le projet de la future station orbitale lunaire de la NASA.

sciences de la vie et des matériaux. Pendant huit jours de travail intense, Roberta Bondar a travaillé en compagnie de six autres astronautes pour mener à bien toutes les expériences de la mission IML-1 (*International Microgravity Laboratory*). Réalisée au coût de plus d'un demi-milliard de dollars américains, cette mission a réuni plus de 225 scientifiques de 15 pays.

Pour cette mission très spéciale, la navette *Discovery* avait été équipée du laboratoire européen *Spacelab*, qui transforme la soute de la navette en un vaste espace pressurisé où les scientifiques peuvent mener à bien des expériences que l'espace trop exigü de la cabine d'une navette conventionnelle ne leur permettrait pas de réaliser. On a donc pu installer un fauteuil rotatif et un chariot accéléré, mis au point par l'équipe du Dr Douglas Watt, de l'Université McGill, afin d'étudier à loisir les réactions du corps humain à l'apesanteur. On sait qu'environ la moitié des astronautes souffrent de malaises qui sont très semblables au mal de mer. Avec ces appareils, il est possible de créer des accélérations afin d'étudier le rôle de l'oreille interne et des repères visuels dans l'équilibre des astronautes, et de chercher ainsi à comprendre le mal de l'espace, qui résulterait d'un conflit entre les différents réflexes sensoriels et physiologiques qui contrôlent la posture humaine.

Roberta Bondar en a également profité pour étudier les maux de dos, qui affectent les astronautes. Dans l'espace, la colonne vertébrale n'est plus comprimée par le poids du corps et peut s'allonger de plus de 5 cm. On a donc profité de ces conditions très particulières pour prendre, à l'aide d'une caméra stéréoscopique, des séries de photos des vertèbres de plusieurs astronautes. En étudiant les photos, on espère mieux comprendre la mécanique musculaire du dos et trouver un jour des solutions aux maux

de dos qui affectent un grand nombre d'entre nous.

La Terre à redécouvrir

L'espace constitue également un point de vue privilégié pour observer la Terre. Dès le retour de Roberta Bondar, une autre navette prenait le chemin de l'espace en emportant avec elle huit tonnes d'équipements scientifiques conçus pour étudier l'environnement. Cette mission, qui avait surtout pour objectif d'étudier l'atmosphère terrestre, n'était en fait que la première d'une série de dix missions qui seront consacrées à l'étude de la Terre au cours de la prochaine décennie.

En plus d'apporter une contribution scientifique à certaines de ces missions, le Canada participe directement à ce qu'on appelle maintenant

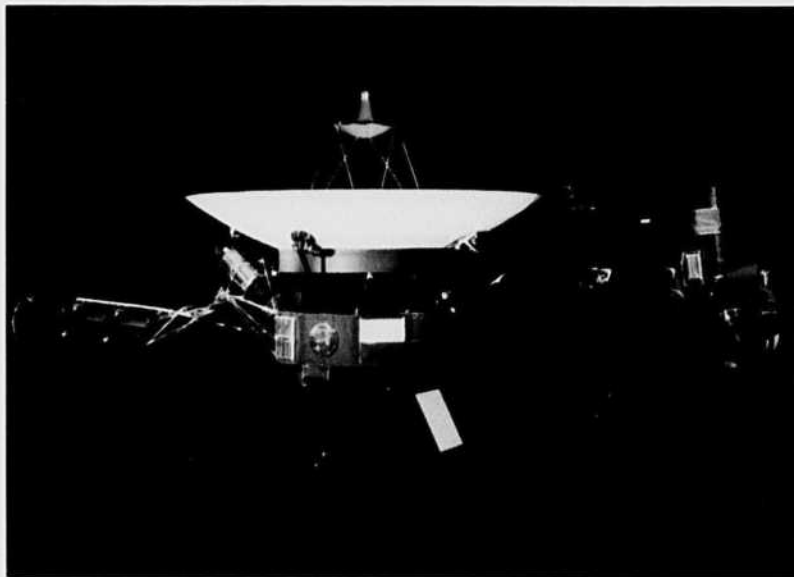
droits d'utilisation des données.

Comme son nom l'indique, le RADARSAT sera doté d'un radar qui lui permettra de donner des images très précises de la surface terrestre de jour comme de nuit, par temps clair ou nuageux. Ce radar sera assez précis pour distinguer les différents types de glace qui flottent sur les océans ou encore mesurer précisément le niveau d'humidité du couvert végétal et même du sol terrestre. Il sera également doté de caméras optiques et de plusieurs autres appareils qui fourniront une grande variété de renseignements sur la surface, l'environnement et l'atmosphère terrestres. Les applications de RADARSAT iront de l'étude des forêts tropicales à la surveillance des glaces de l'Arctique et bénéficieront aux chercheurs en environnement, en foresterie, en agriculture ou encore en géologie.

Au cours de la prochaine décennie, l'essentiel de l'activité spatiale planétaire risque donc de s'orienter vers la Terre et son voisinage immédiat. Mais on n'en abandonne pas pour autant les projets de voyages interplanétaires. Une fois qu'on aura pris solidement pied dans l'espace avec la grande station orbitale *Freedom*, on prévoit retourner sur la Lune pour y installer une base semi-permanente. À plus long terme, dans quelques décennies, on envisage même un voyage habité vers la planète Mars. La complexité d'une telle mission, qui devrait durer plus de deux ans, est sans com-

mune mesure avec le défi posé par un voyage vers la Lune, simple satellite de la Terre.

D'ici le jour où des pieds humains fouleront le sol martien, le chemin que la technologie spatiale nous aura permis de franchir vers la compréhension de notre planète et de l'univers dans son ensemble aura sans doute été encore plus phénoménal. C'est cette connaissance de l'univers que nous livrent des scientifiques québécois dans les pages qui suivent.



La sonde Voyager nous a fait parvenir des images saisissantes de plusieurs planètes de notre système solaire.

la « Mission vers la planète Terre » en construisant le satellite de télédétection RADARSAT, qui doit être lancé en 1994. Le satellite d'un demi-milliard de dollars est actuellement en construction dans les ateliers de Spar Aérospatiale, en banlieue de Montréal. Ce projet repose sur une entente majeure entre le gouvernement fédéral et quatre provinces, dont le Québec, qui participent financièrement au projet en échange de retombées contractuelles et de

LES TÉLESCOPES AU SOL : FENÊTRES SUR LE COSMOS

PAR **RENÉ RACINE**, PROFESSEUR D'ASTROPHYSIQUE,
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL



Eve-Lucie Bourque / Publiphoto

On ne connaît les astres que par la lumière qu'on en reçoit. Leur éloignement fait que l'astronome ne peut sonder son objet d'étude, le disséquer et le palper sous toutes ses coutures pour essayer d'en comprendre la structure et le fonctionnement.

Sauf pour quelques très proches voisins, dont nos engins peuvent échantillonner la surface, la seule information que nous ayons sur les astres nous provient sous forme de rayonnement ou de particules exotiques comme les neutrinos et les rayons cosmiques.

L'astronomie d'observation est donc une science de l'image. Les télescopes forment une kaléidoscopie astronomique dont la richesse croissante révèle un peu mieux chaque jour les secrets des étoiles, des galaxies, de l'Univers. Chaque télescope ouvre

ainsi sur l'Univers une fenêtre qui laisse filtrer un rayonnement particulier (lumière visible, ondes radio, radiation thermique ou ultraviolette, rayons X et rayons gamma très énergétiques) et offre un panorama privilégié du cosmos.

La lumière visible

L'œil nu a été le premier « instrument astronomique ». Mais il a ses limites. Les astres sont lointains et les quelques millimètres d'ouverture de notre pupille laissent passer bien peu de

lumière. L'objet le plus lointain que l'œil nu puisse percevoir est la nébuleuse d'Andromède, la plus proche des grandes galaxies voisines. La lumière, qui traverse l'espace à une vitesse de 300 000 km par seconde, met deux millions d'années pour venir d'Andromède. L'image qui nous en arrive aujourd'hui est donc déjà vieille de deux millions d'années et nous montre la nébuleuse telle qu'elle était lorsque les premiers humains émergeaient timidement de la savane africaine.

Regarder au loin, c'est en fait remonter dans le temps, puisque l'âge des images que nous recueillons est égal au temps qu'il a fallu à la lumière pour arriver jusqu'à la Terre. La lumière nous parvient en effet de la Lune en une seconde, du Soleil en huit minutes et de Pluton, notre plus lointaine planète, en cinq heures et demie. Il lui faut quatre ans pour nous venir de l'étoile la plus proche (Proxima, dans la constellation du Centaure) et soixante mille années pour traverser la cité stellaire qu'est notre galaxie, la Voie lactée. Comme l'âge de l'Univers est estimé à quelque 15 ou 20 milliards d'années (voir le texte d'E. Hardy), il nous faut des télescopes capables de pénétrer 10 000 fois plus loin que l'œil nu pour explorer les frontières du cosmos et « voir » le début des temps. Pour capter un rayonnement aussi faible, un tel appareil doit avoir une ouverture de 8 à 10 mètres de diamètre, soit 2 000 fois plus grande que celle de notre pupille, et être équipé de récepteurs d'images 10 fois plus sensibles que notre rétine.

Même si nous commençons à peine à réaliser de tels appareils, le chemin parcouru est fantastique, depuis les premières lunettes astronomiques de quelques centimètres d'ouverture réalisées par l'astronome italien Galilée il y a près de quatre cents ans (tableau 1). Les progrès technologiques ont permis en moyenne de doubler tous les quarante ans le diamètre des télescopes optiques. Il atteignait un mètre à la fin du XIX^e siècle, puis deux mètres vers 1920 – lorsque, brièvement, le Canada a détenu le plus grand télescope – puis de 4 à 5 mètres entre 1950 et 1970. Depuis, la course aux grands télescopes a marqué une certaine pause. Voyons pourquoi.



La grande galaxie d'Andromède (M31).

TABLEAU 1
Les plus grands télescopes optiques au fil des ans : 1610-1992

| Année | Instigateur | Site | Ouverture (cm) |
|-------|---------------|---------------------------------|----------------|
| 1610 | Galilée | Padoue, Italie | 2 |
| 1650 | J. Hévélius | Danzig, Pologne | 5 |
| 1670 | J. Cassini | Paris, France | 8 |
| 1670 | I. Newton | Cambridge, Royaume-Uni | 10 |
| 1740 | W. Short | Londres, Royaume-Uni | 10 |
| 1800 | W. Hershel | Bath, Royaume-Uni | 45 |
| 1840 | Lord Rosse | Parsonstown, Irlande | 90 |
| 1897 | G.E. Hale | Lac Geneva, Wisconsin, É.-U. | 100 |
| 1908 | G.E. Hale | Mont Wilson, Californie, É.-U. | 150 |
| 1918 | J.S. Plaskett | Victoria, Canada | 180 |
| 1918 | G.E. Hale | Mont Wilson, Californie, É.-U. | 250 |
| 1948 | G.E. Hale | Mont Palomar, Californie, É.-U. | 508 |
| 1976 | — | Mont Patsukov, URSS | 600 |
| 1992 | J. Nelson | Mauna Kea, Hawaï | 1000 |

La réalisation de grands télescopes pose des défis technologiques énormes. Pour donner des images précises, les surfaces optiques des grands miroirs des télescopes doivent être taillées et supportées avec une marge d'erreur ne dépassant pas une petite fraction de la longueur d'onde de la lumière visible (qui est d'un demi-millième de mm). Cette marge d'erreur équivaut à l'épaisseur d'un

cheveu sur une surface lisse grande comme l'île de Montréal... Pour que la masse de l'optique ne surcharge pas la structure mécanique du télescope, il faut amincir les miroirs ou même les segmenter en plusieurs éléments. Mais cet amincissement les rend très flexibles, ce qui nécessite des systèmes de support actifs complexes, capables de corriger les fléchissements qui résultent des mouvements du télescope.

Autrefois rigides et statiques, les pièces mécaniques qui supportent l'optique des grands télescopes modernes sont maintenant devenues actives et répondent continuellement à des moteurs fins et à des « micro-actuateurs ». Ceux-ci sont pilotés par des ordinateurs qui analysent en temps réel les images fournies par le télescope et qui rectifient continuellement les réglages pour affiner la qualité de l'image. Ces technologies, dites d'optique active, permettront bientôt, espère-t-on, de corriger aussi les perturbations introduites par l'atmosphère hétérogène et turbulente de la Terre. C'est comme si on apaisait la surface d'un ruisseau pour mieux voir les pierres qui reposent au fond. Il deviendra alors possible, pour les fréquences non absorbées par l'atmosphère, d'obtenir des images aussi bonnes que si elles avaient été captées par un coûteux observatoire spatial.

Le développement de récepteurs d'images toujours plus sensibles et précis est également venu multiplier la puissance des télescopes conventionnels. Avec l'émulsion photographique, récepteur de choix il y a vingt ans encore, il faut plusieurs dizaines de photons (particules ou quantas de lumière) pour imprégner un seul grain de la pellicule. Aussi a-t-elle été graduellement remplacée, entre 1950 et 1980, par la photocathode, capable de convertir de 10 à 20 % des photons en signaux électroniques. Depuis 1980, les cibles au silicium, aussi appelées CCD (charge-coupled devices), ont à leur tour remplacé les photocathodes comme récepteurs d'image privilégiés des astronomes assoiffés de lumière. Elles ont en effet une efficacité de conversion photon-électron (ou efficacité quantique) approchant la limite théorique de 100 %. Cette course à l'efficacité quantique ayant maintenant atteint sa limite ultime, la course aux grandes ouvertures a repris, puisque seule cette efficacité est capable d'agrandir encore les frontières du monde observable (tableau 2).

Grandeur des ouvertures, qualité des images, efficacité des récepteurs : tous ces progrès font que la nouvelle génération de télescopes optiques qui entrera en service au tournant du siècle pourra, enfin, porter la vision humaine à la limite de l'Univers.

À la recherche des voix extraterrestres

Pour une civilisation extraterrestre qui désire se faire connaître, les ondes radio constituent le meilleur moyen. Nos radiotélescopes les plus sensibles sont capables de capter les signaux lancés par un émetteur situé n'importe où dans la Voie lactée, qui contient un milliard d'étoiles semblables au Soleil et présumément entourées de leurs cortèges de planètes. Il suffit donc d'écouter. Mais que faire d'autre ? Car même à la vitesse de la lumière, il faudrait des années pour qu'un message atteigne sa destination, ce qui rend toute conversation impraticable.

Et puis comment distinguer un message intelligent parmi la multitude de signaux naturels qui inondent le cosmos ?

La découverte des premiers pulsars radio, en 1969, avait même fait croire, brièvement, à l'existence de « petits hommes verts » en train de s'adresser à l'ensemble de l'Univers.

En fait, la nature artificielle, et donc intelligente, des signaux se reconnaîtrait facilement par la répétition de séries identiques de modulations (phrases musicales, mots, tops de synchronisation d'images) ainsi que par la richesse et la complexité du signal modulé.

Depuis une vingtaine d'années, quelques équipes de chercheurs consacrent une partie de leur temps d'observation à des « séances d'écoute ». Mais pour l'instant, la fenêtre radio reste vide de signaux extraterrestres intelligents. Peut-être n'a-t-on pas encore syntonisé les bonnes fréquences ? Peut-être n'a-t-on pas encore pointé les télescopes dans les bonnes directions ? Peut-être



Bob Burah

Les radiotélescopes nous permettent de faire reculer encore plus loin les frontières de l'Univers

les autres civilisations ne sont-elles pas encore assez évoluées... ou peut-être sont-elles déjà disparues ? Peut-être sommes-nous vraiment seuls ? Qui sait ?

TABLEAU 2
Les projets de très grands télescopes

| Nom | Ouverture (m) | Site | Partenaire |
|--------------------------|---------------|-----------------------------|---|
| Very Large Telescope | 4 x 8,2 | Cerro Paranal, Chili | European Southern Observatory |
| W.M. Keck Observatory II | 10 | Mauna Kea, Hawaii | Université Caltech de Californie |
| Columbus | 8,2 | Mont Graham, Arizona, É.-U. | Université d'Arizona - Smithsonian Institut |
| Gemini-nord | 8 | Mauna Kea, Hawaii | États-Unis - Canada - Royaume-Uni |
| Gemini-sud | 8 | Cerro Pachon, Chili | États-Unis - Canada - Royaume-Uni |
| Subaru Telescope | 8 | Mauna Kea, Hawaii | Japon |
| Magellan | 6,5 | Las Campanas, Chili | Institut Carnegie de Washington |

La fenêtre radio

La lumière visible n'est que l'un des nombreux types de rayonnement électromagnétique qui nous parviennent des astres et du cosmos. C'était le seul rayonnement connu jusqu'en 1931, moment où Karl Jansky, des laboratoires Bell, découvrit que certaines interférences radio revenaient quatre minutes plus tôt chaque jour, soit à des intervalles égaux à la période de rotation de la Terre *par rapport aux étoiles* : leur origine se situait donc au-delà du système solaire ! On sait maintenant que cette première source radio captée par Jansky réside au cœur même de la Voie lactée, à 25 000 années-lumière de nous.

Alors que la lumière des astres est produite par les gaz chauffés à plusieurs milliers de degrés à la surface d'étoiles comme le Soleil, les ondes radio viennent de nuages de gaz interstellaires froids, composés surtout d'hydrogène ainsi que de charges électriques (électrons) oscillant autour de champs magnétiques traversant l'espace. La fenêtre radio nous offre ainsi une perspective nouvelle et complémentaire à la fenêtre optique. Elle nous révèle le magnétisme des pulsars et les puissants jets de particules chargées qui émergent du cœur des galaxies-radio où siègent, croit-on, des trous noirs supermassifs. Elle nous permet de tracer la structure des filaments spiraux d'hydrogène qui dessinent la face des galaxies et où naissent les étoiles nouvelles. Les variations de fréquences de ces ondes nous renseignent également sur les vitesses des nuages entraînés par la force gravitationnelle des galaxies et permettent d'en mesurer les masses.

La carte radio du ciel compte aujourd'hui un nombre de sources comparable à celui de la carte optique. Tout comme dans le visible, on obtient une image radio d'un objet en mesurant point par point, à l'aide d'une antenne et d'un récepteur, l'intensité de la radiation reçue au foyer d'un radiotélescope. L'objectif d'un tel télescope est une grande assiette métallique – comme les antennes de télé par satellite – qui réfléchit et focalise les ondes comme le fait un miroir pour la lumière. Mais alors que la longueur des ondes de lumière visible est d'un demi-millième de millimètre, les ondes radio vont de quel-

L'observatoire du mont Mégantic.

ques centimètres à plusieurs mètres. Or la finesse des images formées par un télescope est proportionnelle au nombre de longueurs d'onde contenues dans le diamètre de son objectif. À diamètre égal, un radiotélescope est donc des milliers de fois moins précis qu'un télescope optique. En radio-astronomie, la course aux télescopes géants est d'abord motivée par la nécessité d'en améliorer la résolution, c'est-à-dire la capacité de discriminer les plus petits détails morphologiques. Le plus grand réflecteur radio-astronomique, celui de l'Université Cornell, installé à Arecibo, à Porto Rico, mesure 300 m de diamètre.

Pour obtenir de meilleurs résultats encore, les radioastronomes ont mis au point une technique dite de *radio-interférométrie* qui permet de combiner les signaux reçus par des télescopes séparés de plusieurs kilomètres. À la fin des années soixante, une équipe d'astronomes et d'ingénieurs du Conseil national de recherche du Canada (CNRC) et de l'Université de Toronto a même inventé le moyen de combiner les signaux *enregistrés* simultanément par des radiotélescopes indépendants, donnant ainsi naissance à l'interférométrie intercontinentale. Cette technique fournit aujourd'hui la plus haute résolution angulaire disponible en astronomie, celle que donnerait un télescope aussi grand que la Terre. On envisage maintenant de placer des antennes en orbite autour du Soleil, agrandis-

sant ainsi le « télescope virtuel » aux dimensions de l'orbite terrestre.

Les micro-ondes, signature de la vie

À la limite inférieure des longueurs d'ondes radio, qui vont du demi-millimètre au centimètre, se trouve le domaine de l'astronomie millimétrique ou des micro-ondes... les mêmes que celles des fours de nos cuisines.

Le four nucléaire qui brûle au cœur des étoiles produit chaleur et lumière en transformant une partie de l'hydrogène (H) primordial de l'étoile en carbone (C), en azote (N) et en oxygène (O). L'étoile qui explose à la fin de sa vie rejette ces molécules dans la froideur du milieu interstellaire. Or H, C, N et O sont précisément les atomes qui, en se recombinaut à basses températures, peuvent former toutes les molécules organiques, des plus simples comme le monoxyde de carbone (CO) et l'eau (H₂O), en passant par les hydrocarbures (C_nH_{2n+2}), les alcools et les molécules aromatiques jusqu'aux molécules biologiques complexes : protéines, enzymes, acides nucléiques.

Comme c'est le cas pour tous les éléments chimiques, chaque molécule émet un *spectre* composé de radiations dont les longueurs d'onde lui sont aussi caractéristiques qu'une empreinte digitale. Une fois identifiée en laboratoire, la « signature spectrale » d'une molécule donnée peut être



J. Bouain / Publiphoto

détectée dans l'espace interstellaire à l'aide de télescopes millimétriques spécialisés. L'Institut Herzberg d'astrophysique du Conseil national de recherche du Canada à Ottawa est l'un des hauts lieux de ces découvertes. Les travaux théoriques et expérimentaux qu'on y poursuit complètent parfaitement les observations faites au télescope James-Clerk-Maxwell (TJCM) de 15 m d'ouverture installé à Hawaï, que le Canada partage avec le Royaume-Uni et les Pays-Bas.

Plusieurs douzaines de molécules et de radicaux organiques – des fragments de molécules – ont déjà été repérés dans de vastes nuages de gaz et de poussière interstellaire opaques à la lumière mais pénétrés par les micro-ondes. Ces molécules sont particulièrement abondantes dans les nuages les plus denses, au sein desquels la force gravitationnelle coagule des concentrations de matière qui donneront éventuellement naissance à de nouvelles étoiles et à leurs cortèges de planètes. Ainsi, en plus de nous renseigner sur la chimie moléculaire spatiale et de nous permettre d'observer les débuts de la gestation stellaire, la fenêtre millimétrique nous apprend que les composés organiques qui abondent dans l'espace où se forment les planètes nouvelles sont ceux-là mêmes qui permettent la synthèse des premiers organismes vivants.

La fenêtre thermique, ou l'astronomie de l'infrarouge

Tout objet émet une radiation. Si sa température est basse (moins de 1 000 °C), il émettra surtout du rayonnement infrarouge (IR), perçu comme une émission de chaleur. L'observation des radiations infrarouges émises par les astres froids (planètes, astéroïdes, étoiles naissantes, cendres d'étoiles éteintes) en révèle ainsi la température. À partir de celle-ci, l'astronome sait déduire plusieurs des propriétés des astres comme leurs dimensions et les matériaux présents en surface.

L'astronomie de l'infrarouge a vraiment pris son essor pendant les années soixante avec l'arrivée de récepteurs très sensibles à la chaleur : photocathodes antimoine-indium, bolomètres au germanium. Depuis quelques années les astronomes disposent

de matrices de diodes sensibles à l'infrarouge qui, comme les films photographiques d'antan et les CCD dans le spectre visible, produisent des images IR des astres.

Les télescopes conventionnels peuvent servir à l'astronomie infrarouge. Des précautions particulières doivent cependant être prises pour éliminer la radiation parasite venant du télescope lui-même qui, à la température ambiante, brille comme un phare dans l'infrarouge. Les miroirs doivent également être d'une réflectivité et d'une propreté exceptionnelles.

L'atmosphère terrestre est aussi une source de radiation thermique importante. Lorsqu'elle est chargée de vapeur d'eau, elle devient opaque à la lumière infrarouge. En fait, la brillance du ciel dans l'infrarouge est presque la même la nuit qu'en plein jour. Les meilleurs sites d'observation sont les hauts sommets, au-delà de 4 000 m d'altitude, où la sécheresse et la froideur de l'atmosphère en augmentent la transparence et réduisent la brillance du ciel. À 4 200 m, le sommet désertique et froid du Mauna Kea, sur l'île d'Hawaï, est reconnu comme le meilleur site astronomique de la planète. Là, le télescope Canada-France-Hawaï et le télescope James-Clerk-Maxwell se complètent parfaitement pour permettre une bonne observation de chacune des fréquences infrarouges que notre atmosphère nous

permet d'observer (environ 40 % du spectre infrarouge).

Des fenêtres qui risquent de se refermer

Les télescopes au sol permettent d'étudier tous les types de radiation en provenance des astres et capables de traverser l'atmosphère. À travers les fenêtres qu'ouvrent ces télescopes, l'humanité peut voir, comprendre et s'émerveiller. Mais cette fenêtre par excellence qu'est l'atmosphère est menacée d'une pollution capable de rendre aveugles tous les télescopes. Les éclairages artificiels masquent la lumière ténue des astres lointains. Les systèmes de télécommunications enrobent la Terre d'un faisceau d'ondes qui interfèrent avec les faibles signaux captés par les radiotélescopes. Et les millions de débris laissés par des milliers de satellites défunts ou défectueux gênent les télescopes au sol et menacent les observatoires spatiaux.

L'humanité est menacée de cécité cosmique. Combien de citoyens n'ont jamais vu la Voie lactée ? Quant aux astronomes, chassés au milieu des déserts, au sommet des montagnes et sur des îles océaniques, ils essaient d'offrir à leurs télescopes des cieux aussi purs que possible. Combien de temps encore sauront-ils trouver des refuges convenables ?

IMAGES DU FUTUR '92



15 mai - 20 sept.
INFORMATION 849-1612

VIEUX-PORT DE MONTRÉAL
Entrée rue Saint-Laurent, métro Place d'Armes.

**EN VEDETTE:
LA CALIFORNIE**

- Hologrammes
- Réalités Virtuelles
- Télévision 3D
- Installations Multimédia
- Cinéma par ordinateur

**« DÉCOUVRIR L'UNIVERS »
« MONTRÉAL, VILLE DU FUTUR »**

Ouvert tous les jours de 10h. à 23h.
(21h. le dimanche)
(excepté les lundis et mardis en mai et sept.) Ouvert le 18 mai et 6 sept.





L'ASTRONOMIE STELLAIRE DANS L'ULTRAVIOLET

PAR **FRANÇOIS WESEMAEL** ET **GILLES FONTAINE**,
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

Pour contrer les limites de l'observation par télescope (voir l'article de René Racine), la technologie nous a livré des instruments d'observation qui voyagent dans l'espace. Les plus récents d'entre eux étudient le spectre ultraviolet. L'étude du rayonnement ultraviolet nous permet de sonder efficacement les propriétés de la matière chaude et tenue située entre les étoiles, d'étudier les propriétés physiques des étoiles les plus chaudes de notre Galaxie et de mesurer les abondances des éléments chimiques les plus répandus dans l'Univers.

Les étoiles, dont les températures de surface vont de quelques milliers à quelques centaines de milliers de degrés, émettent une fraction importante de leur énergie sous forme de rayonnement ultraviolet. Limiter notre observation à la seule lumière visible équivaudrait à ignorer la partie submergée de l'iceberg.

Tout rayonnement électromagnétique est caractérisé par un spectre d'énergie ou, de façon équivalente, par sa longueur d'onde ou sa fréquence. La longueur d'onde de la radiation peut être aussi courte qu'un cent-millionième de cm, soit un Angström (Å), ou atteindre plusieurs mètres. La radiation ultraviolette est coincée entre la radiation X, plus énergétique, et la lumière visible. Cette région comprend plusieurs domaines : l'ultraviolet proche, situé entre 2 000 et 3 100 Å ; l'ultraviolet lointain, entre 911 et 2 000 Å ; et l'ultraviolet extrême (UVE), en deçà de 911 Å.

Pour bien observer ce qui se passe dans l'atmosphère gazeuse des étoiles, il faut capter et mesurer l'ensemble du rayonnement ultraviolet. En effet, les atomes de chaque élément chimique présent dans les étoiles peuvent absorber de la radiation à une multitude de fréquences ou de longueurs d'onde spécifiques. En détectant les radiations absorbées, et donc manquantes, il est possible d'identifier les gaz présents et de connaître leurs conditions physiques particulières. Il se trouve même que les radiations d'absorption les plus intenses de bon nombre d'éléments chimiques importants dans l'Univers se situent dans le domaine du rayonnement ultraviolet. C'est le cas de l'hydrogène, du deutérium, de l'hélium, du carbone, de l'oxygène, de l'azote et de beaucoup d'autres encore.

Certains gaz contenus dans l'atmosphère terrestre absorbent eux aussi le rayonnement ultraviolet et l'empêchent de nous atteindre. Dans l'ultraviolet proche, l'absorption atmosphérique est surtout causée par l'ozone, que l'on retrouve en abondance appréciable jusqu'à des altitudes de 30 à 40 km et qui protège ainsi les êtres vivants des dangers du rayonnement ultraviolet. À plus courtes longueurs d'onde, dans l'ultraviolet lointain et extrême, l'absorption est dominée par l'oxygène et l'azote, sous forme atomique et molé-

Une application : l'étude des naines blanches



Anglo-Australian Telescope Board

Arrivées à la fin de la vie nucléaire, la majorité des étoiles passent par une phase de nébuleuse planétaire ; l'enveloppe stellaire est alors éjectée et une étoile naine blanche est formée. L'étoile centrale est entourée d'une couronne gazeuse incandescante, comme le montre cette photo de la nébuleuse planétaire de l'hélice (NGC 7293), située à 400 années-lumière de nous dans la constellation du Verseau.

L'étude des naines blanches permet d'illustrer la contribution de l'astronomie de l'ultraviolet à l'astrophysique stellaire. Ces étoiles compactes, massives comme des étoiles mais de la dimension des planètes, constituent le point final de l'évolution de la majorité des étoiles de notre galaxie. C'est d'ailleurs sous la forme d'une naine blanche à peine plus grosse que la Terre que notre Soleil finira ses jours d'ici 5 à 6 milliards d'années.

Les naines blanches se forment lors d'une spectaculaire phase d'éjection de masse, suivie d'un lent et inexorable refroidissement, qui dure plusieurs milliards d'années. Elles possèdent ainsi des températures de surface qui varient de plus de 100 000 °C pour les plus chaudes à environ 4 000 °C pour les plus froides. Par ailleurs, leur atmosphère est d'une pureté tout à fait inusitée, étant composée uniquement

d'hydrogène, ou encore d'hélium, dans 20 % des cas.

L'astronomie de l'ultraviolet offre un moyen très puissant pour étudier de telles particularités. En effet, les naines blanches chaudes, dont la température de surface dépasse 10 000 °K, émettent surtout leur énergie sous forme de rayonnement ultraviolet. Une étude détaillée du rayonnement issu de ces étoiles et des propriétés physiques des régions externes où il est formé peut donc être très révélatrice de la physique de ces étoiles. Ces études sont complétées par des modèles numériques, par lesquels on s'efforce de simuler les conditions physiques présentes dans une atmosphère stellaire. La confrontation des observations et des modèles théoriques réalisés sur ordinateur nous éclaire sur la valeur de tels modèles et nous aide à comprendre la physique qui y entre en jeu.

culaire, dont la présence se fait sentir jusqu'à des altitudes de 160 km. Pour capter les ondes ultraviolettes riches en renseignements astronomiques, il est donc impératif de placer ses instruments d'observation au-dessus de l'atmosphère terrestre – dans l'espace.

Une autre considération importante dans l'étude de la radiation ultraviolette d'origine astronomique est l'absorption du milieu interstellaire. En effet, la radiation dont la longueur d'onde est inférieure à 911 Å est absorbée de façon très efficace dans ce milieu. Cela est dû à la présence de l'hydrogène, l'élément chimique le plus abondant de l'Univers, dont l'énergie d'ionisation correspond justement à cette longueur d'onde. Ces courtes longueurs d'onde nous procurent donc le meilleur espoir d'observations dans l'ultraviolet extrême. On a également découvert, dans l'environnement du Soleil, des régions où la densité d'hydrogène interstellaire est suffisamment faible pour permettre la détection de sources UVE dans ces directions. Pour ces raisons, l'astronomie UVE devrait prendre un essor prodigieux au cours des prochaines années.

Une astronomie liée au développement spatial

Les premières tentatives d'observation du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil, à partir de sites terrestres en altitude ou de ballons, se sont soldées par des échecs. L'astronomie de l'ultraviolet n'est véritablement née que lorsque les fusées ont permis d'atteindre des altitudes suffisantes. La brève série d'observatoires astronomiques orbitaux (OAO) de la NASA, qui culmina avec le lancement de *Copernicus* en 1972, a véritablement permis l'essor de cette nouvelle discipline en rendant possible l'acquisition de spectres ultraviolets d'un grand nombre d'étoiles brillantes. En parallèle, plusieurs missions spatiales, de *Gemini* à *Skylab*, en passant par *Apollo-Soyouz*, furent porteuses de récepteurs ultraviolets et permirent des découvertes très intéressantes.

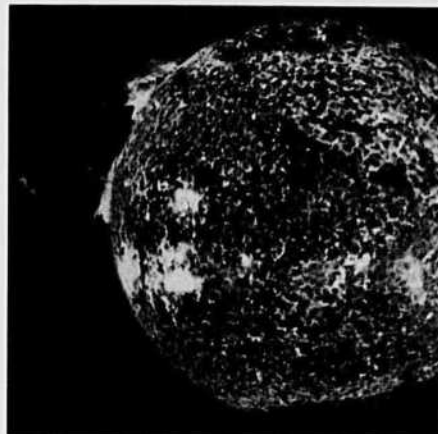
Depuis 1978, la vaste majorité des observations ultraviolettes a été

obtenue à l'aide du satellite *International Ultraviolet Explorer* (IUE), qui est le fruit d'une collaboration active entre l'Agence spatiale européenne (ESA), le Science and Engineering Research Council (SERC) du Royaume-Uni et la NASA. Lancé le 26 janvier 1978, le satellite a été placé sur une orbite qui lui permet de maintenir toujours la même position par rapport à la surface terrestre. Ainsi donc, IUE reste en contact permanent avec l'une des deux stations de contrôle au sol, situées aux États-Unis et en Espagne.

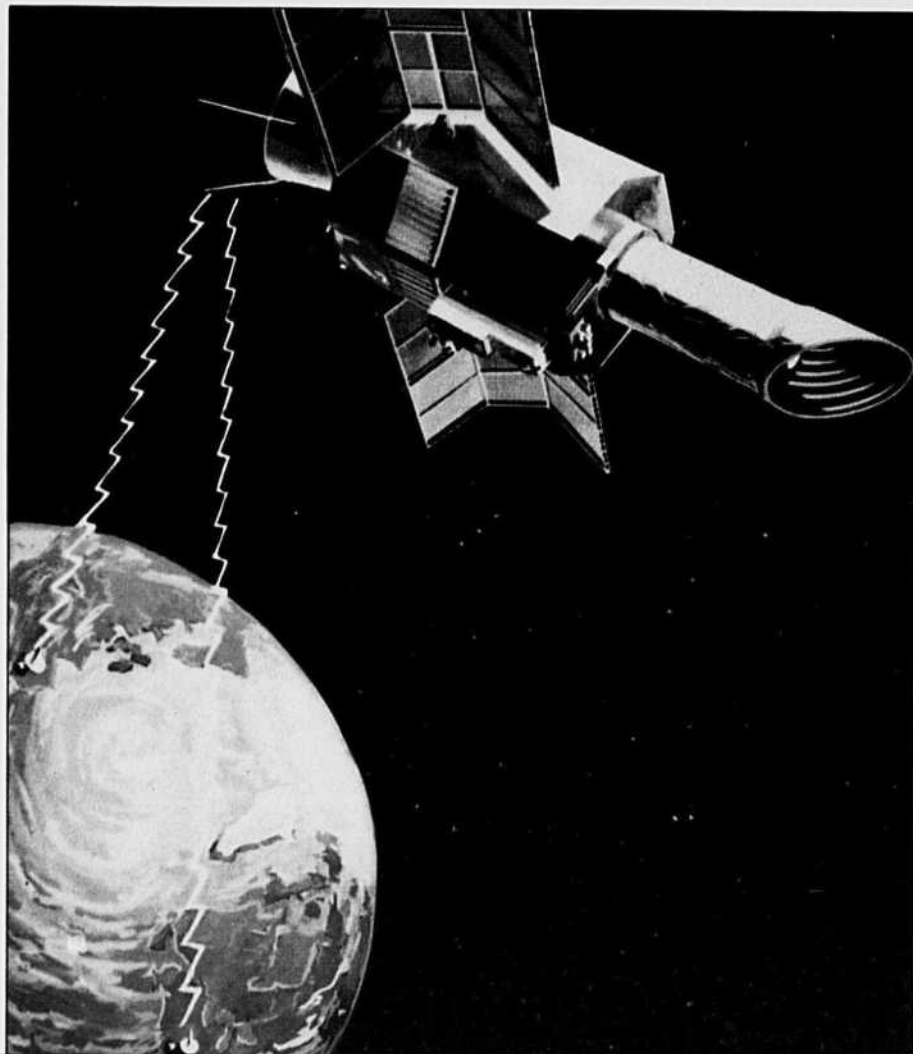
Près de quinze ans après sa mise en orbite, IUE est toujours opérationnel. Sa longévité tout à fait inusitée en fait, sans aucun doute, le satellite le plus productif de la brève histoire de l'astronomie spatiale : il a permis, jusqu'à présent, d'obtenir plus de 70 000 spectres ultraviolets, et près de 2 000 publications scientifiques dans des revues spécialisées ont fait usage de données IUE.

L'astronomie de l'ultraviolet utilise également le télescope spatial *Hubble*, qui est équipé d'un grand miroir de 2,5 m et d'une nouvelle génération de récepteurs de sensibilité accrue. En juin dernier, le satellite *Extreme Ultraviolet Explorer* (EUVE) a

été lancé. Il promet déjà une abondante moisson. À plus long terme, soit vers l'an 2000, le satellite *Far-Ultraviolet Spectroscopic Explorer* (FUSE) permettra, entre autres, des observations dans l'ultraviolet lointain avec une sensibilité 100 000 fois supérieure à celle de *Copernicus*. L'Agence spatiale canadienne étant l'un des partenaires de cette mission, une nouvelle génération d'astronomes canadiens pourra jouir d'un accès privilégié à cet instrument et exploiter davantage cette fenêtre astronomique particulièrement fructueuse.



Éruption solaire prise en ultraviolet.



Le satellite *International Ultraviolet Explorer* (IUE)

Comment naissent les étoiles ?

PAR **Pierre BASTIEN**,

OBSERVATOIRE DU MONT MÉGANTIC ET DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

Les étoiles sont des astres qui évoluent : elles naissent à partir de la matière interstellaire, brillent pendant des millions, voire des milliards d'années, puis meurent en retournant une grande fraction de leur matière au milieu interstellaire. Si on connaît assez bien les grands principes qui guident la vie et la mort des étoiles, leur naissance reste encore entourée de mystère.

Jusqu'aux confins de l'Univers connu, les étoiles peuplent les galaxies. Comme la nôtre, beaucoup de galaxies ont une forme aplatie et des bras spiraux où se concentrent les étoiles ainsi que les nuages de gaz et de poussières microscopiques à partir desquels de nouvelles étoiles se forment constamment. Toutefois, le processus par lequel ces nuages s'effondrent pour constituer des étoiles est très complexe et encore mal compris.

On sait cependant que les étoiles sont formées à partir des nuages les plus denses. Ceux-ci peuvent se fragmenter en unités plus petites qui, dans des conditions physiques appropriées, se condensent pour constituer des étoiles. Ces nuages sont en rotation autour du centre de la galaxie et s'étirent parfois sur près de 100 années-lumière*. La partie du nuage la plus près du centre de la galaxie tourne plus rapidement autour du centre de la galaxie. Cela fait en sorte que le nuage tourne sur lui-même ; du fait, il s'étire et se morcelle.

Une fois formés, ces fragments peuvent entrer en collision et constituer des fragments plus gros encore, qui s'effondrent ensuite sur eux-mêmes. C'est ce qu'on appelle la coagulation, autre phénomène très complexe. Des études de simulation hydrodynamique (dynamique des fluides), réalisées sur ordinateur, ont cependant permis de mettre en évidence plusieurs façons qu'ont les nuages de s'effondrer sur eux-mêmes et de se fragmenter à nouveau.

La partie la plus dense des nuages moléculaires, leur cœur, est souvent allongée, du fait de l'éirement qui résulte du



Disque de poussière de l'étoile β Pic, à 51 années-lumière de nous.

déplacement du nuage dans la Galaxie. Ces nuages allongés forment d'abord deux condensations, qui s'effondrent sur elles-mêmes tout en continuant à se déplacer vers le centre du nuage, où elles entrent éventuellement en collision pour ne former qu'un seul fragment – la future étoile. Mais d'autres scénarios sont possibles.

Si les nuages allongés sont animés d'un mouvement de rotation autour d'un axe perpendiculaire à leur élongation, les deux condensations qui se forment alors n'entreront pas en collision au centre mais commenceront plutôt à tourner l'une autour de l'autre. Elles formeront ainsi un système binaire constitué de deux étoiles en rotation. Si, en plus, on introduit une légère rotation autour de l'axe du nuage allongé, les deux condensations seront chacune entourées d'un disque qui se fragmentera également, ce qui engendrera plusieurs étoiles en rotation autour d'un centre commun.

Les modèles de formation des étoiles nous renseignent également sur le processus de formation des planètes. Plusieurs observations nous révèlent la présence, autour d'étoiles jeunes, de disques qui peuvent conduire à la formation de planètes. En utilisant simultanément plusieurs antennes radio aux ondes millimétriques, il est possible de détecter directement et de cartographier de tels

disques susceptibles de donner naissance à des planètes. De telles observations prennent malheureusement beaucoup de temps et l'on n'a pu en réaliser, à ce jour, que quelques-unes.

Après un certain temps, les poussières contenues dans le disque vont se séparer des gaz moins denses et se concentrer, sous l'effet de la gravité, dans le plan du disque. Les collisions qui s'ensuivent forment des corps de plus en plus gros, dont plusieurs deviendront, après quelques centaines de milliers ou quelques millions d'an-

nées, des protoplanètes.

Quelques disques ont déjà été détectés autour d'étoiles évoluées, mais nous n'avons pas encore observé de planètes en dehors de notre système solaire. La recherche se poursuit intensément et le télescope spatial *Hubble* sera certainement utilisé à cette fin.

En même temps que les planètes commencent à se constituer, l'étoile en formation continue à se contracter et à se réchauffer sous l'effet de la gravité. Lorsque la température atteint quelques millions de degrés, les réactions nucléaires s'amorcent. La fusion de l'hydrogène en hélium libère alors une grande quantité d'énergie. À partir de ce moment, nous avons une étoile qui brille par elle-même en convertissant de la matière en énergie.

Après un processus de formation qui n'aura duré qu'un million d'années tout au plus, l'étoile commence la phase la plus longue de son existence, dont la durée dépend beaucoup de sa masse. La plupart des étoiles que nous pouvons voir dans le ciel en sont à ce stade. Le Soleil y passera environ 10 milliards d'années, dont 4,5 milliards sont déjà écoulés. Nous avons encore de beaux jours devant nous...

* Une année-lumière correspond à la distance que franchit la lumière en un an, soit environ 9 460 500 000 000 km.

LA COSMOLOGIE

NOUVEAU DIALOGUE SUR LE SYSTÈME DU MONDE

PAR **Eduardo HARDY**, PROFESSEUR D'ASTROPHYSIQUE,
UNIVERSITÉ LAVAL

Les personnages : *Sagredo, Simplicio et Salviati*, empruntés au Dialogue sur les deux grands systèmes du monde (1632) de Galileo Galilei (1564-1642) et ressuscités à l'occasion du 350^e anniversaire de la mort de ce dernier.

L'endroit : la grande salle de l'Université – Le dialogue est public.

Un administrateur : Au nom de l'Université, je souhaite la bienvenue au XX^e siècle à nos distingués conférenciers et je profite de l'occasion pour réitérer l'appui inébranlable de notre Université à l'astrophysique.

Sagredo : Merci, *Eccellenza*. Beaucoup d'eau a coulé sous les ponts de la science depuis notre dernier dialogue, au XVII^e siècle. Nous savons maintenant que *Signore Galilei* avait raison de dire que la Terre n'est pas immobile et qu'elle n'est pas au centre de l'Univers. Après son historique « *eppur si muove!* » (et pourtant, elle bouge !), nous avons aussi appris à accepter le fait que notre pauvre petite étoile, le Soleil, qui bouge lui aussi, n'est même pas au centre de la Voie lactée, une galaxie, hélas, parmi des milliards d'autres. La cosmologie, science qui étudie l'origine, la structure et l'évolution de l'Univers, et donc l'espace aux plus grandes dimensions possibles, s'est détachée de la théologie et du domaine de la pure spéculation grâce à l'apport des nouvelles techniques d'observation. C'est le livre de la Nature que nous lisons maintenant, et ce, à l'aide des télescopes !

Il me semble important de commencer par un résumé des résultats qui ont contribué à créer ce qu'on appelle aujourd'hui le modèle « standard » de l'Univers...

Salviati : Belle introduction, *Sagredo!* Mais si vous me le permettez, j'aimerais présenter moi-même ce résumé. D'ailleurs, au cours du long vol qui m'a amené à Québec, j'ai eu le temps d'ordonner les éléments observationnels de ce modèle, connu aussi sous le nom de big bang. Le premier résultat, obtenu en 1929, est l'expansion de



L'origine de l'Univers ou big bang, tel que vu par un artiste.

l'Univers. Ayant reconnu l'existence de ces « îles » qu'on appelle maintenant galaxies et dont la Voie lactée ne constitue qu'un exemple, un avocat du nom de Edwin Hubble (1889-1956), qui fut aussi soldat, boxeur et surtout astronome génial, a fait une découverte qui a bouleversé la science. En effet, il a prouvé que les galaxies s'éloignent de nous à des vitesses directement proportionnelles à leur distance. Autrement dit, deux fois la distance signifie deux fois la vitesse d'éloignement, et ainsi de suite. L'Univers nous échappe !

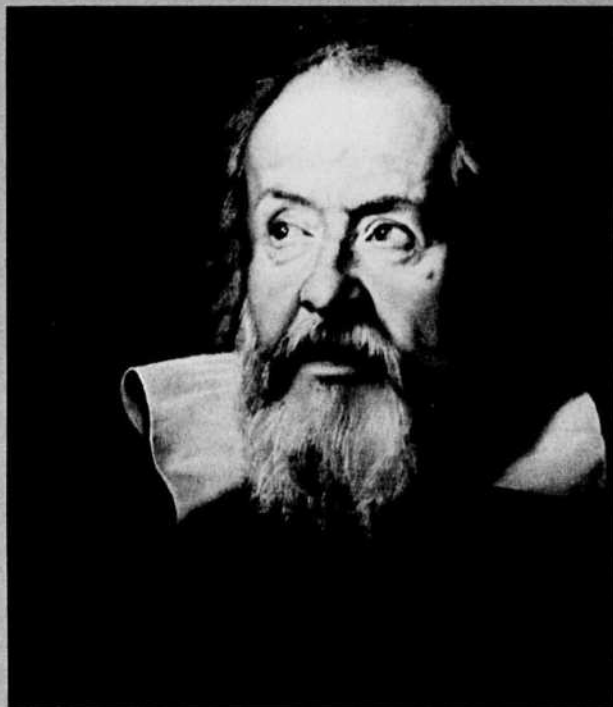
Sagredo : D'où l'expression big bang. En effet, l'Univers se comporte comme si tous ses morceaux (les galaxies) provenaient d'une explosion initiale et s'éloignaient de nous, quelle que soit la direction dans laquelle nous regardions.

Simplicio : Résultat de toute évidence absurde. Je suis très content que *Signore Galilei* soit si occupé avec la célébration du 350^e anniversaire de sa mort, étant donné sa façon de me ridiculiser en public. Mais s'il était ici, il s'opposerait à ce nouvel effort destiné à nous ramener au centre de l'Univers. *Eppur si muove*, chers amis !

Salviati : Mauvaise interprétation, mon cher *Simplicio!* Car il semble bien que l'Univers soit isotrope – que son apparence soit la même dans toute direction, quelle que soit la position relative de l'observateur. C'est pourquoi l'expansion semble toujours centrée sur l'observateur, où qu'il soit. Comme vous le voyez, le big bang est très démocratique : aucun observateur n'est privilégié, et le centre est partout !

J'apporte maintenant plus d'éléments à ma description du modèle standard. Imaginons l'Univers jeune, peu après le big bang. L'énergie observée aujourd'hui est alors concentrée dans

GALILÉE, 1564 - 1642



Yerkes Observatory

Galileo Galilei, dit Galilée (Pisa, 1564 ; Arcetri, 1642), a été un des plus grands scientifiques de l'histoire. On fête cette année le 350^e anniversaire de sa mort. Universellement reconnu comme l'un des fondateurs de la méthode expérimentale, Galilée a fait des contributions fondamentales en mécanique et en astronomie et, avec Kepler et Brahe, a pavé la route qui allait conduire jusqu'à Newton. Contrairement à une bonne partie des savants de son époque, Galilée croyait très peu au principe d'autorité et beaucoup à ce qu'il voyait de ses propres yeux. Les observations astronomiques qu'il a faites à l'aide du premier télescope astronomique, construit par lui-même en 1610 à Venise, ont contribué à l'éventuelle destruction du monde aristotélique et ptolémaïque appuyé jadis par l'Église catholique, qui considérait toute attaque contre cette conception du monde comme une atteinte à son autorité. L'attaque de Galilée contre cette conception archaïque de la réalité physique a été publiée sous forme de dialogue en 1632, en pleine période de contre-réforme religieuse. De là, la célèbre confrontation entre le scientifique et l'Inquisition aboutissant, le 22 juin 1633, à la condamnation de Galilée, qui fut placé en résidence surveillée jusqu'à sa mort. Dans le Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, Salviati représente la nouvelle vision copernicienne de l'Univers, par opposition à la vision savante, mais dépassée, de Simplicio dont le nom, de toute évidence, n'est pas dû au hasard. Sagredo agit jusqu'à un certain point comme « modérateur », mais toujours en finissant par appuyer Salviati. Contrairement à l'habitude de l'époque, Galilée a écrit son Dialogue en italien plutôt qu'en latin, afin de rendre ses idées accessibles au grand public.

un très petit volume ; la température est donc très élevée – la radiation domine dans l'Univers. Avec l'expansion, la température décroît et les particules élémentaires commencent à se combiner pour former les premiers noyaux atomiques et les éléments chimiques les plus légers, comme l'hydrogène, l'hélium et le lithium. L'Univers est déjà vieux de quelques minutes. L'expansion continue et, avec elle, la température de la radiation diminue graduellement. La radiation, formée en grande partie de particules de lumière, est en équilibre avec les particules de matière et donc à la même température qu'elles.

Beaucoup plus tard, quand l'Univers atteint l'âge de cent mille ans environ, des électrons sont attirés par les noyaux pour

former des atomes. La température moyenne de l'Univers, aujourd'hui glaciale à – 270 degrés Celsius, est déjà descendue à quelque 4 000 degrés. La radiation n'est plus affectée par la présence de la matière, et sa température, toujours décroissante, ne dépend à partir de ce moment-là que de l'augmentation graduelle du volume de l'Univers. C'est pourquoi on dit que la radiation et la matière, à ce moment crucial de leur histoire, se sont *découplées*. Il y a donc un lien entre les abondances des éléments chimiques et la température de la radiation observée aujourd'hui.

Sagredo : J'arrête votre long et savant discours, cher Salviati, avant que nos amis ici présents ne tombent dans les bras de Morphée...

Un membre du public (se levant brusquement) : Non, non, laissez-le continuer, c'est très intéressant !

Sagredo : D'accord. Toutes mes excuses au public moderne, mais j'aimerais quand même faire une pause pour résumer ce que Salviati nous a dit jusqu'à maintenant, tout en ajoutant quelques précisions. Il y a en effet trois pistes qui nous mènent au big bang : l'expansion, les abondances des éléments chimiques légers, tels l'hydrogène et l'hélium, et enfin la température de la radiation de fond, que l'on devrait aussi être capable de détecter et de mesurer.

Dans une publication conjointe, en 1948, trois chercheurs aux personnalités bien différentes, Alpher, Herman et Gamow, ont prédit la nature et la température de cette radiation de refroidissement de l'Univers. Leurs résultats théoriques ont été confirmés expérimentalement par Penzias et Wilson en 1965, dans un travail qui leur a valu le prix Nobel en 1978. La confirmation la plus récente est venue des observations effectuées en 1989 grâce au satellite COBE (*Cosmic Background Explorer*).

Simplicio : Mais alors, tout est consistant, tout a été expliqué ! Quel triomphe merveilleux de l'esprit humain ! Face à cette victoire scientifique qui ferme le dernier chapitre de la physique, il ne nous reste qu'à nous lever en signe de respect et à déclarer la séance close. Quant à moi, j'aimerais profiter du reste de l'après-midi pour visiter le Musée de la civilisation.

Salviati : Pas si vite, Simplicio ! Tout n'est pas expliqué, tout n'est pas consistant. Plus nous sondons les mystères de l'Univers à l'aide de télescopes, radiotélescopes et autres satellites, plus nous découvrons de profonds problèmes. Le moment est venu de dresser humblement une longue liste de doléances.

Voici une première inconsistance logique, le problème dit « de l'horizon », qui met en doute rien de moins que le sacrosaint principe de causalité. En effet, les mesures effectuées par le satellite COBE ne sont que les plus récentes et les plus précises de cette radiation micro-onde cosmologique. On sait depuis longtemps que si l'on regarde le ciel dans n'importe quelle direction, en compensant bien sûr pour l'effet dû à notre vitesse d'expansion, on obtient toujours la même température de radiation, avec une très grande précision. Cette température est le résultat de phénomènes d'interaction physique ; elle a été pré-établie au moment où la radiation et la matière se sont séparées, et depuis elle ne dépend plus que de l'expansion de l'Univers. Et pourtant, on peut démontrer que certaines régions n'ont pas eu le temps, entre le big bang et le « découplage » dont nous parlions tout à l'heure, d'entrer en contact causal. Toutes ces régions se situent au-delà de leurs « horizons » respectifs. Elles ne se sont jamais vues ! Autrement dit, la sphère céleste est divisée en quelque 4 000 morceaux qui n'ont jamais été en contact, mais qui ont pourtant tous la même température. C'est comme si une chorale de 4 000 chanteurs exécutait à la perfection l'*Alléluia* de Handel sans que les choristes aient lu la partition, ni répété une seule fois ensemble !

Simplicio : Problème très dramatique, mais artificiel sans doute, qu'on peut éliminer facilement en imposant à chaque morceau de l'Univers des conditions initiales identiques. Ces morceaux n'ont pas eu besoin de communiquer entre eux. Un théologien vous dirait que Dieu, à la création, a donné à chaque endroit de l'Univers les mêmes propriétés physiques, et que votre exemple de l'*Alléluia* est parfaitement choisi !

Sagredo : Vous avez peut-être raison, *Simplicio*. Mais le même théologien pourrait vous suggérer aussi d'arrêter de faire de la science, puisque tout ne serait en fait que le résultat des conditions initiales. À quoi bon alors chercher des explications ? Les connaissances et les conditions initiales ne sont que des vases communicants. Plus on connaît les lois physiques, moins il faut postuler de conditions initiales. Moins on accepte de conditions initiales, plus on doit trouver de lois physiques – des lois qui, en éclairant la réalité, nous permettent de trouver des trésors jusque-là insoupçonnés !

Salviati : Émouvant *Sagredo* ! Et maintenant, je ne peux résister à la tentation de discuter deux autres problèmes, celui de l'âge de l'Univers et celui de la formation des structures...

Sagredo : Ce sont là des problèmes très importants, sans doute, mais avant de vous pencher sur ces nouvelles difficultés, laissez-moi vous parler d'une solution possible au problème de l'horizon, que vous avez si bien exposé. Je vais maintenant décrire une modification du modèle standard, proposée entre autres par Allan Guth en 1980. Cet apport marque l'entrée en force dans le domaine de la cosmologie des physiciens des particules élémentaires, avec leur impressionnant bagage théorique. Le problème de base réside, vous l'avez très bien expliqué, dans le fait que l'Univers qu'on observe aujourd'hui semble provenir d'une région trop vaste de l'Univers jeune pour que toutes ses parties puissent jamais avoir été en contact causal. Or le problème disparaît si l'on postule que l'Univers observé provient d'une région beaucoup plus petite que celle prédite à partir des mesures de l'expansion telle qu'on l'observe maintenant. Mais imaginons que, dans son enfance, l'Univers ait suivi une phase d'expansion très rapide, beaucoup plus rapide que celle observée aujourd'hui. Cette phase « inflationniste » aurait duré très peu de temps, mais assez tout de même pour produire l'Univers visible d'aujourd'hui, en gonflant énormément une petite région, avant de se stabiliser dans sa phase actuelle de lente expansion.

Simplicio : Ah ! Ah ! Je vous ai maintenant ! Vous ne vouliez pas que je postule des conditions initiales et vous voilà vous-même en train de postuler *ad hoc* une phase complète de l'évolution de l'Univers !

Salviati : Critique apparemment méritée. Et pourtant, il y a une justification physique qui rend ce modèle inflationniste très attrayant quand on regarde la situation du point de vue du physicien théorique.

Les expériences physiques permettent de constater l'existence de quatre forces dans la nature : la gravitation et l'électromagnétisme, la force d'attraction nucléaire et celle qui est responsable de la désintégration nucléaire. Or les théories modernes arrivent à la conclusion que cette distinction entre forces ne pouvait probablement pas exister dans les conditions physiques prévalant à l'époque où l'Univers était très jeune et très petit. Les quatre forces auraient alors été fondues en une seule.

Simplicio : J'aime beaucoup cela ! Un Univers parfait, à la façon d'Aristote...

Salviati : Et pourtant d'une perfection douteuse, puisque la force gravitationnelle n'a pas encore été incorporée dans ce schéma dit



Messier 13 dans la constellation d'Hercules : un exemple d'amas globulaire, composé de quelques centaines de milliers d'étoiles, en orbite dans notre galaxie.

(Cliché obtenu avec le télescope de 1,61m du mont Mégantic)

de grande unification. Mais je poursuis. À un certain moment de l'expansion, cette unification des trois autres forces s'est soudainement brisée, produisant ce que les physiciens appellent un changement de phase. Ce processus a été accompagné, je vous demande de l'accepter, d'une formidable accélération de l'expansion. L'inflation laisserait derrière elle un Univers énormément gonflé, et alors rempli de particules, qui continueraient par la suite sa lente et paresseuse expansion, tout en ne provenant que d'une très petite région initiale. Ce qu'il fallait démontrer !

Sagredo : Je note un certain scepticisme dans votre belle explication, *Salviati*. Mais cette hypothèse, liée aux fondements de la physique moderne, devrait nous permettre de faire des prédictions observationnelles.

Salviati : Mon scepticisme, si on peut l'appeler ainsi, provient de la nature spéculative du modèle de grande unification et des conditions qu'on doit poser pour obtenir l'inflation. Mais vous avez raison et, en pratique, l'Univers tout entier devient le seul laboratoire où on peut tester certaines théories fondamentales comme celle que je viens de décrire. D'ailleurs, le modèle inflationniste fait une prédiction précise sur la géométrie de l'Univers et, en conséquence, sur la valeur de la densité totale de masse-énergie qu'on devrait observer. Les astronomes n'ont pu jusqu'à maintenant confirmer cette prédiction et les avis sont partagés. Pour une bonne partie des théoriciens, elle est naturelle et acceptée presque par un acte de foi ; pour plusieurs astronomes d'observation par contre, il ne s'agit que d'un préjugé théorique. En tout cas, les recherches sur ce modèle constituent l'un des champs les plus fertiles de la cosmologie moderne.

Simplicio : Vous aviez essayé de parler, avant que *Sagredo* vous ait si rudement interrompu, de deux autres problèmes, soit celui de l'âge de l'Univers et celui de la formation des structures. J'imagine que vous êtes prêt, *Salviati*, à nous confondre encore plus avec...

Salviati : ... avec plaisir, cher *Simplicio*. Il s'agit de deux problèmes observationnels, qui pourraient marquer le début d'une révision majeure de nos conceptions de l'Univers. Je commence avec le problème de l'âge. Vous êtes probablement d'accord avec moi, *Simplicio*, que l'Univers ne peut pas être plus jeune que ses morceaux. Or nous possédons l'évidence que si l'on utilise certaines données de l'expansion pour mesurer l'âge de l'Univers, en ramenant tous ses morceaux au début, on obtient un âge qui pourrait être inférieur à celui des objets les plus vieux de notre galaxie, les

amas globulaires. Ces objets de forme sphérique, dont un exemple est illustré à la page précédente, sont composés de centaines de milliers d'étoiles nées toutes en même temps, avant même le moment de la naissance supposée de l'Univers. Voici donc une flagrante contradiction logique !

Sagredo : Sans compter le risque d'erreurs possibles dans les méthodes de mesure des âges. Mais si vous le permettez, je dois signaler que l'âge de l'Univers et celui des amas globulaires sont déterminés à l'aide de principes physiques tout à fait différents. La mesure de l'âge de l'Univers, à partir de la cinématique (ou étude du mouvement) de l'expansion, requiert une connaissance du rapport vitesse-distance, c'est-à-dire de la loi de Hubble, dont nous avons déjà parlé. Or la valeur numérique de ce rapport, connu sous le nom de constante de Hubble, nous échappe en raison de notre incapacité de faire des mesures précises des distances aux galaxies. La détermination des distances demeure très probablement la tâche la plus ardue de l'astronomie d'observation. Vous vous souvenez sans doute qu'une des raisons principales de la construction du télescope spatial *Hubble* était la mesure des distances cosmologiques.

Salviati : Mesures qui ne pourront être faites tant qu'on n'aura pas installé sur le télescope *Hubble*, au cours d'un voyage de la navette spatiale, les composantes optiques nécessaires à la correction des défauts de construction de son miroir primaire.

Sagredo : Bien triste histoire, mon ami ! Après soixante années d'efforts, les astronomes n'ont pas encore réussi à se mettre d'accord sur la valeur de la constante de Hubble qui, en fin de compte, mesure le taux d'expansion de l'Univers. Certains affirment que la vitesse d'expansion de l'Univers monte d'environ 50 mètres par heure avec chaque année-lumière d'augmentation de la distance ; d'autres obtiennent le double de cette valeur. Quand on calcule l'âge de l'Univers à partir de ces mesures, on trouve qu'il est peut-être aussi « jeune » que dix milliards d'années ou aussi vieux que vingt milliards d'années.

Salviati : Et les astrophysiciens obtiennent des âges d'environ 15 milliards d'années pour les amas globulaires en utilisant la théorie de l'évolution stellaire, qui repose sur des données de la physique nucléaire. D'une certaine façon, il est rassurant que ces deux méthodes, basées sur des principes physiques différents, donnent des réponses qui ne sont pas si discordantes.

Mais le deuxième problème auquel je faisais référence, celui de la formation des structures, est peut-être plus inquiétant. Comme vous le savez, un des points de départ de la théorie cosmologique est la supposition de l'isotropie et de l'homogénéité de l'Univers. Or, au cours des dix dernières années, on a commencé à faire une véritable cartographie de l'Univers à l'aide des mesures de vitesse pour un grand nombre de galaxies. Comme les vitesses sont proportionnelles à la distance, on peut en déduire un échantillonnage en trois dimensions de l'Univers. Mais la distribution des galaxies est très irrégulière, très loin d'une distribution homogène, comme on peut le voir sur la figure de cette page. Deux choses sont pourtant remarquables.

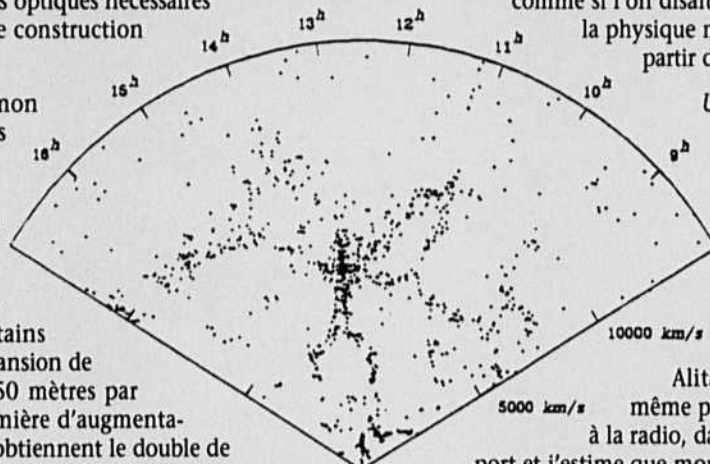
Premièrement, il est difficile de comprendre comment la gravité a réussi à former des structures si irrégulières en un temps si court ; un problème lié d'une certaine façon au problème de

l'âge de l'Univers, que nous avons discuté auparavant. Deuxièmement, et il s'agit du problème de base, les « semences » des structures à grande échelle que nous observons aujourd'hui ont dû être plantées avant l'époque du découplage radiation-matière. Il faudrait alors que les observations de la radiation de fond, dont nous avons parlé si souvent, révèlent des irrégularités. Or on les a cherchées en vain depuis de longues années.

Mais j'ai maintenant l'honneur de vous informer que le 23 avril dernier, le satellite COBE, en échantillonnant cette radiation micro-onde dans toutes les directions à de très petits intervalles angulaires, a finalement réussi à trouver les empreintes digitales de la formation de cet Univers de galaxies si fortement irrégulier. Quelle victoire éclatante pour le big bang et pour l'astronomie spatiale !

Sagredo : La description que vous faites, Salviati, de la cosmologie moderne révèle à la fois une très grande imagination de la part des scientifiques et aussi une très grande confusion.

Salviati : Très juste, mais cette confusion est, je le crois, créatrice. Laissez-moi vous dire que depuis quelques années, des descriptions mathématiques, très spéculatives mais sans violation apparente des principes physiques, démontrent qu'on est capable d'expliquer la formation de l'Univers à partir du vide. C'est comme si l'on disait, avec le langage mathématique de la physique moderne, qu'on a formé l'Univers à partir de rien !



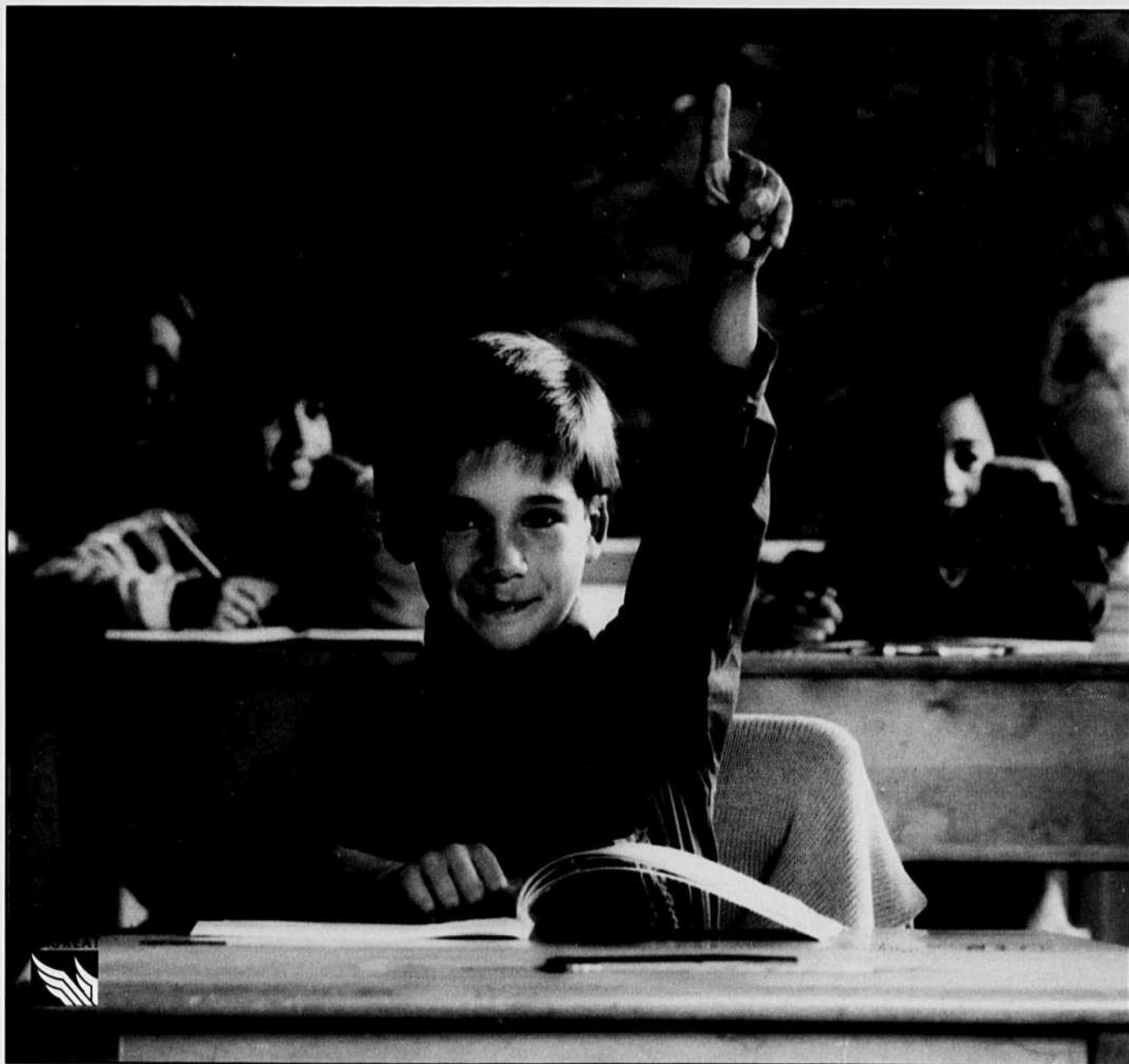
Un vieux professeur de théologie (se levant avec l'aide de deux étudiants) : Nous sommes à l'aube de la théologie mathématique !

Galileo Galilei (entre soudainement dans la salle, très essoufflé, et prenant place près de Sagredo) : Mes excuses, mais Alitalia a pris du retard ! J'ai quand même pu suivre une partie de la discussion à la radio, dans le taxi qui m'amenait de l'aéroport et j'estime que mon âge m'autorise à ajouter quelques mots de sagesse. Pour revenir au modèle inflationniste, tellement en vogue ces temps-ci, il ne faut pas oublier qu'il prédit une densité de masse telle que si l'on se fie aux observations, près de 90 % de la matière réellement présente dans l'Univers nous serait invisible. Il est par contre vrai que l'on possède des évidences assez convaincantes, et tout à fait indépendantes de ce modèle, de l'existence de cette matière « sombre », au moins dans les galaxies et dans les amas de galaxies. Mais il n'en reste pas moins qu'il est très fâcheux de décrire un Univers qu'on ne voit pas et qui serait composé en grande partie de matière dont on ne connaît même pas la nature ! Finalement, les détails théoriques associés au paradigme inflationniste, et à la cosmologie en général, changent aussitôt que l'on découvre une nouvelle inconsistance logique ou observationnelle, ce qui semble arriver assez souvent.

Il s'agit, je le crois malgré tout, d'un signe de progrès. À moins, bien sûr, qu'on ne tente tout simplement d'« ajuster » des observations à des théories qui ne correspondent pas encore parfaitement à la réalité des choses ? Je ne peux donc m'empêcher de poser une vieille question sur un sujet qui était très à la mode à l'époque où j'écrivais encore sur l'astronomie, et dont Simplicio se souviendra sans doute : sommes-nous encore en train de fabriquer des épicycles ?

Le public se précipite vers Galileo pour lui demander son autographe. La séance est levée.

...et si votre télé lui faisait la leçon!



L'éducation fait partie de vos priorités. Vous avez été à la bonne école. Nous aussi. Aux émissions à haute teneur éducative que vous apportez Vidéotron s'ajoutent maintenant des émissions avec lesquelles vous et vos enfants apprenez tout en participant. Dictée, mathématiques, géographie, jeux, pour les petits et les plus grands.

Avec Vidéoway, vos enfants s'amuseront tout en apprenant. Et si jamais vous vouliez bouger, consultez nos banques de renseignements. Vous trouverez de l'information sur les spectacles, les restos, les cinés et même...une gardienne!

Vidéotron et Vidéoway: pour moins de 30 \$ par mois votre télé remplit ses devoirs. Appelez-nous: 282•1001

vidéoway[®]

 **Vidéotron**[®]

**POUR UN NOUVEL
USAGE DE LA TÉLÉ!**