



L'observation de l'univers

REGARDS SUR L'UNIVERS



Le **ciel étoilé** nocturne et le déplacement perceptible au jour le jour de ces points scintillants sur la voûte céleste ont depuis toujours fasciné les hommes. D'abord consacrés comme des dieux, servant aussi à l'établissement des calendriers agraires, les astres sont devenus au fil du temps des objets d'études diverses.

L'observation du ciel a permis aux hommes de se construire une image de l'univers dans lequel ils vivent et les limites de la perception humaine ont été de puissants moteurs de création. Elles ont conduit en effet à l'élaboration d'outils astronomiques de plus en plus sophistiqués, permettant d'observer des corps non visibles à l'œil nu. Du télescope aux lunettes exploitant la lumière, seul rayonnement visible pour l'homme, on est passé, avec la conquête spatiale, à de petits observatoires qui gravitent dans l'espace, explorant toute la gamme des rayonnements électromagnétiques.

L'ASTRONOMIE. DE L'ANTIQUITÉ À NOS JOURS

Associée dans l'Antiquité à l'astrologie qui est une méthode de divination, l'astronomie est l'une des sciences les plus anciennes. Les observations du ciel construisent des mythes et servent à établir les premiers calendriers des cultures. Puis les hommes imaginent à partir de ce qu'ils observent des modèles du monde plus ou moins réalistes, influencés par leurs croyances et frayeurs. Les découvertes de corps célestes se font de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que les outils d'observation se perfectionnent.

LES PREMIERS ASTRONOMES

Trois mille ans avant notre ère, les populations de Mésopotamie, au bord de l'Euphrate, avaient déjà compris l'influence de la position du Soleil dans le ciel sur le calendrier des cultures. À chaque saison correspond en effet un ciel d'observation différent, avec ses constellations particulières. Les Mésopotamiens ont pris ainsi l'habitude de repérer les retours annuels dans le ciel de telle ou telle étoile annonçant la venue d'une nouvelle saison. Ces réapparitions

des étoiles, sur la ligne d'horizon, à l'est, juste avant le lever du Soleil, sont appelées les « **levers héliques** ». À cette connaissance des mouvements stellaires s'est ajoutée celle des éclipses solaires. Après avoir relevé sur des tablettes les dates des éclipses du Soleil pendant des années, les Mésopotamiens ont conclu à la périodicité du phénomène et lui ont attribué un cycle de 18 ans et 11 jours appelé cycle de Saros.

Si les Mésopotamiens interprètent les mouvements des astres comme des messages que leur adressent les dieux, les corps célestes représentent en Égypte, à la même époque, les dieux eux-mêmes vaquant à leurs occupations. C'est en Grèce que, de nombreux siècles plus tard, l'astronomie va faire de très grands progrès. Il ne s'agit plus alors seulement d'observer, mais aussi de comprendre.

La forme de la Terre va ainsi évoluer de disque en sphère, entre Thalès de Milet (625-545 av. J.-C.) et Pythagore (env. 570-480 av. J.-C.). Platon (427-347 av. J.-C.) inspire à son ami Eudoxe (409-356 av. J.-C.) un modèle du monde dans lequel 27 sphères concentriques s'emboîtent, entourant la Terre, et sont animées d'un mouvement de rotation uniforme. Si Aristarque de Samos (env. 310-250 av. J.-C.) propose un modèle héliocentrique du monde, révolutionnaire en ces temps où la Terre était placée au centre de l'Univers, c'est le système géocentrique de Claude Ptolémée (env. 87-170) qui s'imposera et restera en vigueur jusqu'au xv^e siècle. Ptolémée introduit dans le modèle le mouvement circulaire des planètes autour d'une Terre statique, mais cette trajectoire n'est pas centrée sur la Terre.

DE COPERNIC À NEWTON

Il faut attendre **Nicolas Copernic** (1473-1543), astronome polonais, pour que l'astronomie moderne naisse. Ses travaux placent le Soleil au centre de l'univers mais restent résolument rattachés aux modèles compliqués de l'Antiquité.

Tycho Brahe (1546-1601), constatant les erreurs des tables de positions existantes, décide de les refaire entièrement et construit à cette fin

des instruments extrêmement précis pour l'époque. Ses relevés serviront à Galilée pour défendre l'héliocentrisme. Johannes Kepler (1571-1630), scientifique allemand, substitue des orbites elliptiques aux orbites circulaires des planètes prônées depuis des siècles et énonce trois lois toujours en vigueur aujourd'hui en rapport avec ce nouveau type d'orbite.



Galilée (1564-1642), astronome italien, défend le modèle copernicien. Le premier, il applique le principe de la lunette d'approche de marine à l'astronomie et découvre, grâce à elle, le relief de la Lune et les quatre satellites de Jupiter. Mais ces découvertes, comme celles de quelques scientifiques avant lui, heurtent les dogmes catholiques. Si l'Église accepte dans un premier temps ses travaux, Galilée finira sa vie emprisonné chez lui.

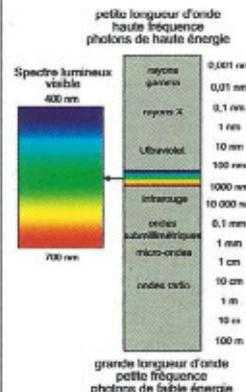
Isaac Newton (1642-1727), savant anglais, démontre les trois lois de Kepler et énonce, outre la célèbre loi de la gravitation, les lois dites de Newton qui serviront de base à la physique classique. Il construit le premier télescope utilisé pour l'astronomie.

Les deux siècles suivant la mort de Newton seront plus féconds en découvertes d'objets célestes qu'en édification de principes physiques universels. Par exemple, Edmund Halley (1656-1742), astronome anglais et ami de Newton, calcule l'orbite de la comète qui portera son nom. William Herschel (1738-1822), astronome amateur, découvre Uranus en 1781. En 1846, Neptune est découverte à son tour, puis Pluton en 1930.

LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Notre principale source d'information sur l'univers est le rayonnement électromagnétique. La lumière, seul rayonnement directement perceptible par l'homme, ne représente qu'une infime partie du spectre électromagnétique, ensemble de tous les rayonnements que l'univers émet. Le rayonnement est caractérisé par l'énergie qu'il véhicule ou par sa longueur d'onde. Énergie et longueur d'onde sont inversement proportionnels : plus un

rayonnement est énergétique, plus sa longueur d'onde est petite. Par ordre d'énergie décroissante, les principales formes du rayonnement de l'univers sont : les rayons gamma, les rayons X, le rayonnement ultraviolet (UV), la lumière visible, le rayonnement infrarouge (IR), les micro-ondes et les ondes radio. Sur Terre, on ne reçoit que le rayonnement visible, certains UV et les ondes radio. Les autres rayonnements ne peuvent traverser l'atmosphère terrestre.



LE RAYONNEMENT X

La longueur d'onde des rayonnements X est comprise entre 0,01 nm et 10 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Produit artificiellement par bombardement d'un faisceau d'électron sur une surface métallique, il est caractérisé par sa capacité à traverser des parois opaques pour la lumière visible, d'où son utilisation en médecine.

LES RAYONS ULTRAVIOLETS

Le rayonnement ultraviolet correspond à des énergies allant de 3 à 120 eV ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) et à des longueurs d'onde s'étendant de 10 à 400 nm. On distingue trois catégories d'UV :

- Les UV A dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 320 nm.
- Les UV B dont la longueur d'onde est comprise entre 320 et 280 nm.
- Les UV C dont la longueur d'onde est comprise entre 280 et 10 nm.

 On considère généralement que plus la longueur d'onde des UV est courte plus le rayonnement est préjudiciable pour les êtres vivants s'il arrive sur Terre en grande quantité. Les UV A sont ainsi les moins nocifs.

LA FENÊTRE DU VISIBLE

La lumière visible par l'œil humain correspond à des ondes électromagnétiques comprises entre 400 et 800 nm, du violet au rouge. Elle ne constitue donc qu'une très faible part de l'immense gamme des ondes électromagnétiques.

Le domaine de l'infrarouge

La fenêtre de l'infrarouge, appelé aussi rayonnement thermique, s'étend de 800 nm à 0,3 mm. Les rayons infrarouges correspondent aux rayons invisibles du feu de braise qui chauffe sans éclairer. **Le rayonnement hertzien** Le domaine des ondes radio est compris entre 1 mm et plusieurs kilomètres. Ce sont les ondes qui interviennent dans nos modes de télécommunication, radio et télévision.

L'ASTROMÉTRIE

L'astrométrie est la branche de l'astronomie qui s'efforce de déterminer exactement la position des astres et d'étudier les mouvements des corps célestes. La connaissance des positions successives des étoiles à différentes époques permet de déterminer leurs propriétés : leurs mouvements propres et leurs parallaxes (angle sous lequel est vue l'orbite de la Terre depuis l'étoile).

Le souci permanent de réduire au maximum les erreurs de mesure élargit l'astrométrie à l'étude des instruments qui relèvent aussi de l'optique et de la physique. Les instruments utilisés en astrométrie sont principalement des dispositifs de mesure d'angles dont la précision a été considérablement améliorée avec l'invention de la lunette astronomique.

Le plus important de ces appareils est le cercle méridien ou lunette méridienne. Il permet de déterminer précisément les coordonnées d'un astre, c'est-à-dire sa position exacte sur la voûte céleste. Les lunettes zénithales ont, elles, été conçues spécialement pour observer les étoiles passant à proximité du zénith. Le sextant, instrument bien connu des marins, sert en astronomie à la mesure de la hauteur des astres au-dessus de l'horizon ou à la mesure de l'écart angulaire entre deux astres.

VUES SUR L'UNIVERS DEPUIS LA TERRE

L'atmosphère terrestre joue le rôle d'écran pour nombre de rayons électromagnétiques célestes. Sur Terre, on ne peut donc observer que des radiations appartenant au domaine optique (la lumière visible) et à la fenêtre radio. L'instrumentation astronomique collecte le rayonnement et le concentre sur un récepteur où il est enregistré. Les sites d'observation terrestres sont implantés sur tout le globe : la majorité d'entre eux se situent dans l'hémisphère Nord et

Les grandes découvertes astronomiques

Hipparque

(190-125 av. J.-C.)
Précision des équinoxes.

Tycho Brahe

(1546 - 1601)



Relevé précis des positions des astres

Galilée



Première lunette astronomique : 1610.

Cassini

(1625-1712)
Distance de la Terre au Soleil.

Hubble

(1889-1953)



Expansion de l'univers.

Le VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 18 télescopes sur 5 continents 1 en orbite (VSOP, VLBI Space Observatory Program), reliés par interférométrie.

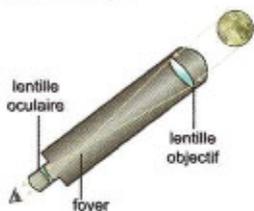


Largeur maximale : 25 000 km
Précision : un millième de seconde d'arc

les meilleurs sont localisés en altitude, loin des villes dont les différentes émissions (radio, mais aussi lumière de l'éclairage public et privé...) perturbent les observations.

LES LUNETTES ET TÉLÉSCOPES

Le télescope et la lunette sont les deux instruments astronomiques utilisés pour recueillir la lumière visible des astres. Ces instruments fonctionnent avec des dispositifs communs : ils comportent tous deux un objectif et un oculaire. Le premier collecte les rayons lumineux issus des astres et les concentre en un point, le second fournit une image agrandie de ce point à l'instar d'une loupe.



La lunette construite en 1609 par Galilée ne peut guère, par son principe, donner naissance à des instruments d'observation puissants. C'est Johannes Kepler qui a fourni le principe de la lunette astronomique, instrument dit « réfracteur de lumière ». L'objectif de la lunette est en effet formé par une lentille de verre ; la lumière qui entre dans cette lentille change de milieu de propagation (elle passe de l'air dans le verre), donc dévie sa direction : elle est réfractée. Les objectifs des lunettes actuelles sont formés d'une combinaison de lentilles différentes pour éviter le phénomène appelé « aberration chromatique » (séparation des différentes ondes lumineuses, donc des couleurs, lors de la réfraction par la lentille). Les lunettes servent surtout aujourd'hui comme instruments de pointage ou guidage des grands télescopes.



Les télescopes sont les grands collecteurs modernes de lumière. Leur objectif est constitué d'un miroir qui réfléchit la lumière. Ainsi, la lumière qui arrive sur le miroir est renvoyée du miroir vers le milieu d'où elle vient. Les miroirs présentent de nombreux avantages par rapport aux lentilles : il n'existe pas d'aberration chromatique, les ondes lumineuses qui s'y réfléchissent n'appartiennent pas seulement au domaine visible, mais aussi aux ultraviolets et à l'infrarouge et leur procédé de fabrication est moins complexe.



Les miroirs des **télescopes** ne sont pas

en général des surfaces planes, ils sont plutôt concaves. La plupart des miroirs, fabriqués en verres spéciaux ou en céramique, sont recouverts d'une fine couche d'aluminium ou d'argent à laquelle se rajoute souvent une couche protectrice de quartz.

LA RÉCEPTION ET L'ENREGISTREMENT DES IMAGES

Si l'œil a été longtemps le seul récepteur des images fournies par les lunettes ou les télescopes, il est le plus souvent remplacé aujourd'hui par des détecteurs photographiques, électroniques ou photoélectriques. La plaque photographique accumule au cours du temps des photons, particules de la lumière. Au bout de plusieurs heures, on arrive ainsi à enregistrer des images d'astres invisibles à l'œil nu. Mais si le flux de lumière est trop faible ou trop intense, il ne s'y imprime rien. Il existe aussi des détecteurs plus sensibles, les photomètres, enregistrant des flux lumineux.

L'utilisation de dispositifs optoélectroniques a permis d'enregistrer des images de meilleure qualité. La caméra électronique, le premier de ces appareils, inventée en 1936, permet de reconstituer une image électronique semblable à l'image lumineuse. L'utilisation des caméras CCD (Charge Coupled Device) s'est généralisée ces dernières années. Ces dispositifs à comptage de photons, où la plaque photographique est remplacée par de minuscules photomultiplicateurs, permettent d'atteindre, dans des temps assez courts, une sensibilité photométrique excellente dans une large gamme de longueurs d'onde.

LA RADIOASTRONOMIE

Les rayonnements radio de l'univers sont captés sur Terre grâce aux radiotélescopes. Ces derniers fonctionnent à peu près comme les télescopes optiques : les ondes sont captées par une surface réfléchissante, appelée miroir, qui les concentre sur une antenne placée en son foyer. Le rayonnement radio, beaucoup plus faible que les rayons lumineux, est ensuite amplifié avant d'être envoyé sur un récepteur et enregistré. Les surfaces réfléchissantes sont le plus souvent de grande dimension et les réflecteurs les plus courants sont paraboliques et orientables.

L'enregistrement simultané par deux réflecteurs (parfois séparés par des milliers de kilomètres) d'ondes radio provenant d'une même source s'appelle l'interférométrie. Elle permet de localiser avec une précision accrue (proportionnelle à la distance entre les deux télescopes) la source du rayonnement. La puissance des ordinateurs actuels permet d'intégrer des données provenant d'un grand nombre de radiotélescopes différents, ce qui accroît la précision dans tous les secteurs célestes.

L'installation dite VLBI (pour Very Long Baseline Interferometry, interférométrie à base très large) fonctionne sur ce principe. Elle comprend 18 télescopes répartis sur les cinq continents et dans le Pacifique (Iles Hawaï), ainsi qu'un télescope spatial nommé VSOP (pour VLBI Space Observatory System, Système d'observation spatiale du

VLBI). La distance maximale entre deux télescopes ainsi obtenue est de 25 000 km, ce qui autorise une précision d'un millième de seconde d'arc (la seconde d'arc est la soixantième partie de la minute d'arc, elle-même soixantième partie de degré), 100 fois supérieure à celle du satellite Hubble.

L'ASTRONOMIE DANS L'ESPACE

Pour observer les rayonnements qui n'atteignent pas la surface de la Terre à cause de l'atmosphère, il a fallu installer des instruments astronomiques à bord des ballons stratosphériques, fusées et satellites envoyés dans l'espace depuis les années 1970. L'observation satellitaire s'est aussi doublée d'une observation locale grâce aux sondes et aux robots automatiques envoyés autour ou sur les planètes, comètes, satellites naturels, etc.

LES TÉLÉSCOPES EN ORBITE



Après l'envoi dans l'espace des premiers télescopes optiques tels le télescope **Hubble** ou le satellite Hipparcos, qui avaient pour objet l'étude des astres très peu lumineux et la mesure des positions des étoiles, des télescopes nouveaux ont été lancés pour observer toutes les sources célestes de rayonnement gamma, X ou infrarouge.

Les satellites d'observation en rayonnement X

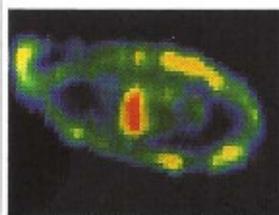
Le rayonnement X a pour origine l'interaction d'électrons de grande énergie avec le milieu environnant : plasma ou champ magnétique (le plasma est un gaz composé d'ions et d'électrons, de très haute température, qui entoure le plus souvent le cœur des étoiles). Il faut s'élever à au moins 50 km d'altitude au-dessus de la Terre pour observer sans perturbations les rayons X célestes. Le choix de l'orbite du satellite d'observation est donc primordial pour éviter qu'il ne se trouve au sein des ceintures de radiations qui entourent la Terre, constituées d'ions piégés par le champ magnétique terrestre. Ces particules chargées peuvent en effet endommager les sources d'énergie des instruments embarqués et parasiter le signal enregistré.

Les télescopes qui permettent l'observation des rayons X contiennent des miroirs spéciaux qui sont inclinés de manière à ce que les rayons X ne frappent pas leur surface à angle droit. En effet, les rayons X ne sont pas réfléchis si leur angle d'incidence est droit. Il leur faut une incidence dite rasante.

En 1970 a été lancé le premier satellite d'observation en rayonnement X, SAS-1 Uhuru, par les États-Unis. Aujourd'hui deux grands satellites se partagent l'espace d'observation des rayons X : le premier, Chandra, est américain ; le deuxième, XMM (X-ray Multi Mirror),

est européen. Leurs caractéristiques sont complémentaires et les données recueillies sont mises en commun au sein de la communauté scientifique mondiale après un délai d'exclusivité d'un an.

Les satellites d'observation des rayons infrarouges



Un fond diffus de rayonnement infrarouge, résidu de sa naissance, emplit l'Univers, et la majorité de la lumière des galaxies distantes nous arrive aujourd'hui dans le domaine de l'infrarouge (ici, vue infrarouge d'**Andromède** en fausses couleurs). Pour observer ce domaine infrarouge, il a fallu s'affranchir de problèmes techniques liés au bruit thermique des détecteurs du rayonnement : en effet, les détecteurs émettent eux-mêmes du rayonnement infrarouge qu'il faut distinguer de celui que l'on veut étudier.



Le satellite **IRAS** (Infrared Astronomical Satellite), lancé au début des années 1980, a permis de détecter nombre de galaxies et de corps célestes invisibles dans le domaine optique. Lancé en 1995, le satellite ISO (Infrared Space Observatory) a tout particulièrement exploré les émissions infrarouges plus lointaines.

Les sondes spatiales

Entre 1962 et aujourd'hui, toutes les planètes du système solaire, exceptée Pluton, la plus lointaine, ont été survolées par des sondes. À bord de ces véhicules spatiaux se trouvaient des instruments d'optique tels que des caméras, des spectromètres, des magnétomètres, etc. Des sondes sont également passées à proximité de comètes ou d'astéroïdes. Un des exemples les plus connus est la mission **Pathfinder**, permettant en 1996 le largage sur Mars d'une sonde qui a pris des photographies de la surface martienne et a étudié de nombreuses propriétés du sol grâce au robot Sojourner.

RAYONS GAMMA ET COSMOLOGIE

Les rayons gamma correspondent à un rayonnement de très faible longueur

d'onde mais d'énergie très élevée. Ils ne peuvent être détectés qu'en dehors de l'atmosphère terrestre et le faible flux de rayonnement perçu rend difficile la construction d'instruments adaptés.

L'étude de ces rayons permet, entre autres, de mieux connaître l'origine des particules de très haute énergie, appelées rayons cosmiques, la composition des matériaux formant les galaxies ou encore les mécanismes de formation des étoiles au cœur de



nuages interstellaires de poussières et de gaz.



Grâce aux satellites d'observation tels que **GRO-Compton** (Gamma Ray Observatory), un phénomène particulier a été découvert : des explosions très brèves et très intenses qui libèrent en une dizaine de secondes autant d'énergie que le Soleil pendant ses 10 milliards d'années de vie. Ces explosions sont appelées « sursauts gamma ». Leur origine est encore inconnue mais fait l'objet de recherches importantes.

LA DÉCOUVERTE DE NEPTUNE

Après la découverte d'Uranus au **xvii** siècle, les scientifiques ont eu du mal à accorder la trajectoire de cette planète avec celle qu'ils avaient calculée grâce aux nouvelles lois de mécanique céleste. Deux hypothèses émergent alors pour expliquer cette différence : soit la loi de la gravitation n'est pas universelle car elle ne s'applique pas à Uranus, soit un corps massif, proche de la planète, perturbe son orbite. François Arago (1786-1853), physicien français alors directeur de l'observatoire de Paris, demande à Urbain Le Verrier d'étudier l'orbite d'Uranus. Ce dernier émet l'hypothèse d'une huitième planète et la situe précisément sur la voûte céleste. Les Allemands possédant à cette époque une cartographie très précise du ciel, Le Verrier leur demande de rechercher cette planète. Le 23 septembre 1846, le jour même de la réception du courrier de Le Verrier, Johann Galle découvre la nouvelle planète à l'observatoire de Berlin. Elle sera baptisée Neptune par le bureau des longitudes de Paris.