

# SCIENCE ET VIE



NUMÉRO  
HORS-SÉRIE  
150<sup>F</sup>

**L'ASTRONOMIE**

*Amman*

PAR LE  
CAPITAINE DE FRÉGATE PIERRE SIZAIRE

# LE GUIDE DES ÉTOILES ★ LES ALIGNEMENTS DU CIEL

UNE MÉTHODE DE RECONNAISSANCE DES ÉTOILES QUI A FAIT SES PREUVES DEPUIS LONGTEMPS, EN PARTICULIER POUR LA FORMATION DES JEUNES ENSEIGNES DE VAISSEAU

★  
**SIMPLE ET EFFICACE  
ELLE EST VALABLE  
SOUS TOUTES LES LATITUDES**

★  
Une excellente carte du ciel, indiquant l'ensemble des constellations et les principales étoiles visibles à l'œil nu, complète cet ouvrage appelé à rendre les plus grands services à tous ceux que leur profession ou leurs recherches scientifiques conduisent à la contemplation du ciel étoilé

★  
**Format : 13,5x21 - 52 pages - Prix : 160 fr.**

EN VENTE CHEZ VOTRE LIBRAIRE ET

## AUX GRANDES ÉDITIONS FRANÇAISES

35, RUE LA BOÉTIE - PARIS (8<sup>e</sup>)

★  
" RÉPLIQUE MODERNE DU « THÉÂTRE DU MONDE » DE GUILLAUME ET JEAN BLAEU. AMSTERDAM 1647 " DIT LÉON-PAUL FARGUE

★  
CET OUVRAGE D'UNE HAUTE TENUE LITTÉRAIRE ET ARTISTIQUE, ILLUSTRÉ PAR MARIN MARIE DE L'ACADÉMIE DE MARINE, EST À LA PORTÉE DE TOUT AMATEUR CULTIVÉ

★  
TIRAGE LIMITÉ SUR PAPIER DU MARAIS COMPORTANT CINQUANTE-DEUX PAGES DE TEXTE, VINGT-HUIT CARTES CÉLESTES ET QUATRE-VINGTS ILLUSTRATIONS

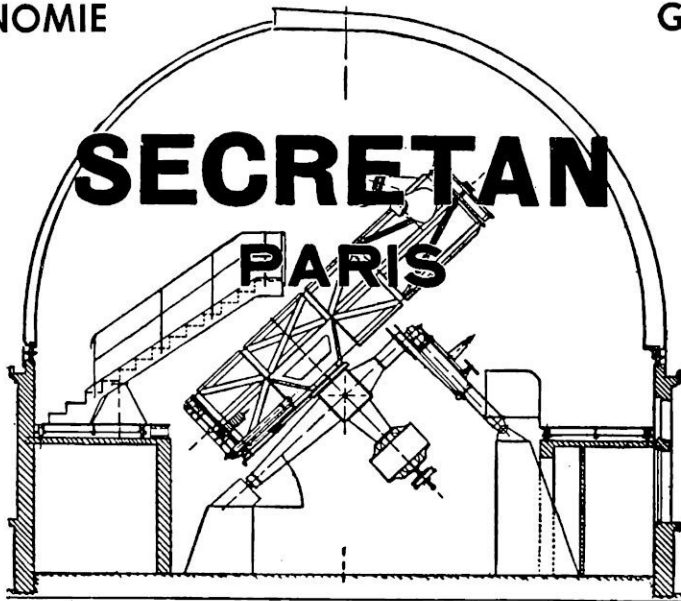
★  
**Format : 24x30 — Prix : 3.000 fr.**

BULLETIN DE SOUSCRIPTION SUR DEMANDE

C. C. P. 4360-28

ASTRONOMIE

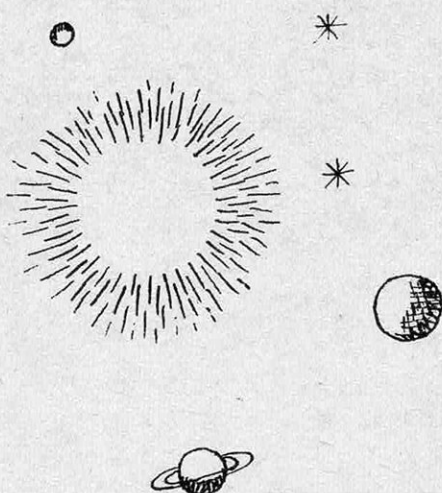
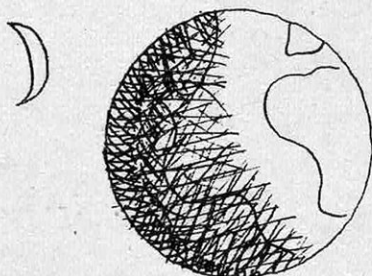
GEODESIE



151, Bd. AUGUSTE-BLANQUI, PARIS XIII - Tél : Gob 34-87

Maison fondée en 1789.

# AIDE-TOI



## LE CIEL T'AIDERA

Sans arrêt nous lançons dans la vie des hommes qui font ou refont brillamment leur chemin.

Ce résultat obtenu en France pour des centaines de milliers d'autres nous pouvons l'obtenir pour vous.

PELMAN a les deux pieds au sol, PELMAN est "positif".

Même si vous êtes né sous une étoile radieuse, nous pensons que la pluie d'or ne tombe pas toute seule. Pour gagner davantage il faut valoir davantage.

La METHODE PELMAN suivie avec profit par les hommes qui veulent *progresser sans perdre de temps* peut bouleverser votre vie quotidienne et vous diriger droit vers la réussite.

Elle est fondée sur la Psychologie et s'adapte admirablement à toutes les professions et à toutes les ambitions justifiées.

Elle ne demande qu'un peu d'attention chaque jour pendant quelques mois. Et des élèves enthousiastes ont pu dire que le prix du célèbre COURS par CORRESPONDANCE était compensé mille fois par le bénéfice moral et matériel qu'ils en ont tiré.

N'avez-vous pas le désir de savoir ce que PELMAN peut vous proposer ? Vous croyez-vous différent des millions d'élèves de toutes conditions sociales qui depuis 60 ans à la surface du Monde sont venus à nous ?

Demandez aujourd'hui-même, notre documentation  
V.I. 24 contre 30 francs en timbres.

## INSTITUT PELMAN

176, Boulev. Haussmann, PARIS-8<sup>e</sup>

Filiales internationales :  
LONDRES, DUBLIN, CALCUTTA,  
AMSTERDAM, JOHANNESBURG,  
MELBOURNE, STOCKHOLM  
DURBAN, NEW-YORK, etc.



La METHODE PELMAN est à la fois sous la haute surveillance et la direction effective de Professeurs de Facultés et d'Hommes d'Affaires de premier plan.

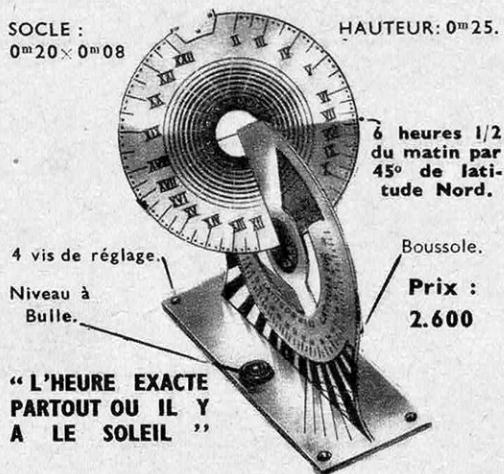
# CADRAN SOLAIRE UNIVERSEL

BREVET T.-H. DE LANGE

MÉTAL INOXYDABLE, TON ARGENTÉ RÉSISTANT  
AUX AGENTS ATMOSPHÉRIQUES ET AUX  
OXYDATIONS DE L'AIR SALIN

SOCLE :  
0<sup>m</sup>20 x 0<sup>m</sup>08

HAUTEUR : 0<sup>m</sup>25.



**GIRARD et BARRÈRE** Géographes-Éditeurs  
17, RUE DE BUCI, PARIS

MADE IN FRANCE Notice détaillée jointe à l'envoi

Vous qui vous intéressez aux merveilles  
du Ciel, devenez Membre de la

## SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE

Fondée en 1887 par l'illustre astronome Camille Flammarion, reconnue d'utilité publique en 1897, elle a pour but de grouper tous ceux qui aiment l'Astronomie en professionnels ou en amateurs. Elle compte près de 5000 membres répartis dans le monde entier.

**Tout le monde peut en faire partie**

Le S. A. F. offre à ses membres, le service de la revue mensuelle “ L'ASTRONOMIE ”, abondamment illustrée, exposant les progrès réalisés par cette belle science et indiquant les observations à effectuer. Elle met à leur disposition : un Observatoire, une Bibliothèque, une Cinémathèque, un Atelier d'Optique, un service de Prêts de Lunettes, des Cours et Conférences avec projections etc...

Chaque mois ont lieu des Séances publiques au cours desquelles sont exposées les récentes conquêtes de l'Astronomie moderne.

Pour recevoir deux numéros specimen de “ L'ASTRONOMIE ” et une magnifique plaquette illustrée des plus belles photographies célestes, “ Un peu d'astronomie pour vous ”, adressez 60 francs (4 timbres à 15 francs) à la

**SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE**

28, rue Serpente, Paris-6°

Permanence de 14 à 18 heures, sauf le dimanche

## LE PROBLÈME N° 1

Scientifique - Politique - Spirituel

JEAN THIBAUD

# PUISSANCE

*de l'atome*

de l'utilisation industrielle et du  
contrôle de l'énergie atomique au  
gouvernement mondial

AUX ÉDITIONS ALBIN MICHEL

22, Rue Huyghens, PARIS (14°)

LA POSITION D'UN GRAND SAVANT FRANÇAIS

VIENT DE PARAÎTRE

UN TÉMOIGNAGE CAPITAL

LE DESSIN TECHNIQUE

LA MÉCANIQUE

L'AUTOMOBILE

L'ÉLECTRICITÉ

# Si

Vous intéressez, demandez à  
L'ÉCOLE CENTRALE

DE MÉCANIQUE

(Cours par correspondance)

8, AVENUE LÉON-HEUZÉY, PARIS 16°

Sa documentation et  
une leçon d'essai  
adressées gratuitement



RÉSULTATS

RAPIDES

NOMBREUX

DÉBOUCHÉS

PRIX TRÈS

ABORDABLES



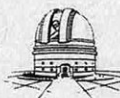
*Omega a la confiance  
du monde*

# *un Exploit* jamais égalé en Horlogerie

Avec un écart de marche de seulement 5/100<sup>e</sup> de seconde par jour la montre Omega N° 5.783.745 détient depuis 17 ans l'unique record de précision de l'Observatoire de Kew-Teddington.

Un concours de réglage en Observatoire comporte des épreuves très sévères. Pendant un temps plus ou moins long (45 jours pour Kew-Teddington) l'exactitude de la montre est vérifiée jour après jour dans les conditions de marche les plus variées : position à plat, verticale, renversée; passage en étuve, en glacière...

Le maintien par Omega, pendant 17 ans consécutifs, d'un record disputé dans des conditions aussi rigoureuses est le résultat d'une fabrication sévèrement contrôlée : chaque Omega bénéficie de 830 contrôles qui lui garantissent "la précision Omega" dont le record de Kew-Teddington constitue le témoignage le plus probant.



**Les observatoires  
jouent un rôle  
de premier plan  
dans la technique horlogère.**

L'heure donnée par les Observatoires est réglée sur le cours des astres. C'est par référence à ce temps sidéral que sont ensuite effectués tous les réglages de précision.

Chaque pays a ainsi ses Observatoires, mais qui n'admettent en général à la vérification que les montres fabriquées sur leur territoire national.

Un seul Observatoire de compétence internationale est ouvert aux chronométriers du monde entier : celui de Kew-Teddington en Angleterre et pour cette raison la compétition y est des plus sévères.

*Momentanément, par suite des restrictions d'importation, seules quelques montres en or sont disponibles chez les concessionnaires de la marque que vous reconnaîtrez à l'emblème ci-contre figurant dans leur vitrine.*



# LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE

24, RUE CHAUCHAT, PARIS-XI<sup>e</sup> - TEL. : TAITBOUT 72-86

## ASTRONOMIE

- Constan.** — COURS D'ASTRONOMIE ET DE NAVIGATION, 3 volumes 1936-1946.  
Tome I Astronomie ..... 500 fr.  
Tome II Navigation ..... 1.000 fr.  
Tome III Compléments et appl. pratiques... 500 fr.
- Couderc (Paul).** — L'ARCHITECTURE DE L'UNIVERS. Préface de J. Perrin, Membre de l'Institut, 3<sup>e</sup> édition entièrement refondue. (14x21) 136 pages avec 17 figures et 10 planches hors-texte, 1947. .... 250 fr.
- Jeans (Sir James), Lemaître (l'Abbé), Sitter (W. de), Eddington (Sir Arthur), Milne (E. A.), Millikan (R. A.).** — DISCUSSION SUR L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS : D'après le Rapport du Meeting du Centenaire de l'Association britannique pour l'Avancement des Sciences (Londres, 1931). Traduction française et Avant-propos par Paul Couderc, In-8 (14x23), de XII-70 pages, 1933. .... 150 fr.
- Tiery (Georges).** — Professeur à l'Université de Genève, Doyen de la Faculté des Sciences, Directeur de l'Observatoire : ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE. L'ÉQUILIBRE RADIATIF DANS LES ÉTOILES. In-8 (16x25) de 464 pages avec 32 fig., 1935 ..... 1.000 fr.
- Lejay.** — DÉVELOPPEMENT MODERNE DE LA GRAVIMÉTRIE. Nouvelles mesures de la pesanteur. La forme de la terre et la structure de son écorce, 244 pages (16x25), 75 figures et planches, 1947 ..... 800 fr.
- Moreux (Abbé).** — ATLAS CÉLESTE. Aspect du ciel visible dans nos régions pour chaque mois de l'année. Nouvelle édition. In-4, 12 cartes du ciel avec explications ..... 150 fr.  
— POUR COMPRENDRE L'ASTRONOMIE. in-16 236 pages avec 100 fig. .... 195 fr.  
— POUR OBSERVER LE CIEL. Astronomie pratique. in-16 260 pages avec 74 fig. .... 195 fr.
- Gauroy (P.).** — Membre de la Société Astronomique de France : DES ASTRES MORTS AUX MONDES EN FEU OU LA VIE GRANDIOSE DES TERRES DU CIEL. (22x14), de 128 pages, couverture en couleurs, avec illustration de l'auteur. .... 120 fr.
- Evans.** — FRONTIÈRES DE L'ASTRONOMIE. (Col. « Pointes de la Science »), 230 pages (12,5x19), 1948 ..... 280 fr.
- Richard-Foy (R.).** — VOYAGES INTERPLANÉTAIRES ET ÉNERGIE ATOMIQUE. (« Sciences d'aujourd'hui »), 1 volume (12x18,5), broch. 80 fr.  
— A TRAVERS LE MONDE SIDÉRAL. Préface de M. E. Picard, de l'Académie française, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences. In-8 (16x25), de VIII-206 pages, 1931 ..... 250 fr.
- Sevin.** — Membre du Comité National d'Astronomie, Lauréat de l'Académie des Sciences (Prix Damoiseau 1941) : LES INTRASONS STELLAIRES. In-8 (16x25) de 24 pages, 1946 ..... 70 fr.

- Bruhat (G.).** — COURS DE PHYSIQUE ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE. Cours d'optique, 3<sup>e</sup> édition, 2<sup>e</sup> tirage, 1947, 776 pages, 665 figures. 1.300 fr.
- Boutry (G.-A.).** — OPTIQUE INSTRUMENTALE. 1946, 540 pages, 412 figures. .... 1.500 fr.
- Devé (Ch.).** — LE TRAVAIL DES VERRERES D'OPTIQUE DE PRÉCISION. 1 volume 540 pages 22x14, 160 figures, broché. .... 1.600 fr.
- Esnault-Pelterie (R.).** — L'ASTRONAUTIQUE. 1 volume 250 pages 16x25, 19 figures, 9 planches hors-texte, 1930 ..... 240 fr.  
— COMPLÉMENT, 1 volume 100 pages 16x25, avec figures et 1 planche hors-texte, 1935. 120 fr.
- Molinier.** — NOTIONS D'ASTRONOMIE à l'usage des aviateurs et des marins, 56 p., 74 fig. 200 fr.
- Déribéré (M.).** — LA PHOTOGRAPHIE A L'INFRAROUGE. Sensibilisation, limites et pratique, photographie des extérieurs, photographie en astronomie, applications : expertises, sciences naturelles, biologie. 176 p., 15x21, 132 illustr. 420 fr.
- Boutaric (A.).** — PRÉCIS DE PHYSIQUE D'APRÈS LES THÉORIES MODERNES. 1 volume 1.072 pages in-8 avec 735 figures, 1 planche en couleurs, 1946 ..... 600 fr.
- Gaudiot.** — COURS DE MÉCANIQUE RATIONNELLE : I. Vecteurs, statique du point et des systèmes, cinématique et dynamique du point, 5<sup>e</sup> éd., 343 p. in-16, 5x25, 262 fig., 1947. .... 680 fr.  
II. Cinématique et dynamique des systèmes, 3<sup>e</sup> éd., 528 p. in-16, 5x25, 279 fig., 1947. .... 890 fr.
- Gueben (G.).** — PHÉNOMÈNES RADIOACTIFS ET INTRODUCTION A LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE. 262 pages 16x25, 107 figures, 1947, broché ..... 1.300 fr.
- Nahmias (M.-E.).** — LE CYCLOTRON. Préface de M. Fr. Joliot-Curie. 256 pages 22x14 avec 22 pl. hors-texte, 1945 ..... 400 fr.
- Bied-Charretton (R.).** — DE LA TURBINE A L'ATOME. Préface de M. Ch. Fabry, membre de l'Institut. 200 pages 23x14, 1933. .... 250 fr.
- Saint-Romain (A. de).** — TECHNIQUE ÉLÉMENTAIRE DE RADAR. Historique et principe. Les tubes à haute fréquence. Les circuits électroniques. Modulation par impulsions et modulation de fréquence. 230 pages 14x22, 137 figures, 1948. .... 840 fr.
- Schneiter (E.).** — LE RADAR. Théorie et réalisation. 136 pages 22x14, avec 86 figures, 1947, broché ..... 400 fr.
- Aschen.** — L'EMPLOI DES TUBES ÉLECTRONIQUES : I. Généralités, circuits, tubes, procédés de modulation, 120 pages, broché. .... 240 fr.  
II. Circuits H. F. Filtrés et circuits accordés. Leur calcul. 168 pages, broché. .... 321 fr.  
III. Circuits basse-fréquence, pièces détachées B. F. Haut-parleurs, réalisations d'amplificateurs, 182 p. broché ..... 465 fr.

Ajouter 10% du montant total de votre commande pour frais d'expédition. Pour toute demande de renseignements, prière de joindre un timbre pour la réponse. C.C.P. 4192-26.

# ***L'ASTRONOMIE***

---

## SOMMAIRE

★ LES GRANDES ÉTAPES DE L'ASTRONOMIE.....	3
★ LES ASTRES ET LEURS MOUVEMENTS .....	13
★ LES INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES .....	28
★ LES MOUVEMENTS DES PLANÈTES ET L'ATTRACTION UNIVERSELLE .....	39
★ LA TERRE ET LA LUNE .....	46
★ LE SOLEIL .....	64
★ LES PLANÈTES .....	76
★ COMÈTES ET MÉTÉORES.....	91
★ LES ÉTOILES .....	96
★ LA VOIE LACTÉE ET LA GALAXIE.....	116
★ LES NÉBULEUSES EXTRAGALACTIQUES .....	126
★ L'ORIGINE DES MONDES .....	135

*Cet ouvrage a été réalisé par SCIENCE ET VIE  
avec la collaboration de J. GAUZIT, astronome à l'Observatoire de Lyon.*



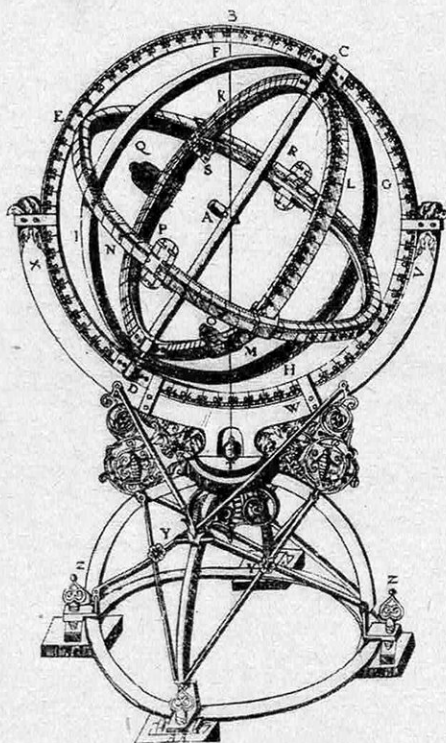
● On a récemment découvert que les étoiles ne rayonnent pas seulement des ondes lumineuses, mais aussi des ondes hertziennes. Ce radiotélescope est utilisé pour l'étude des ondes courtes venant de la Voie Lactée



# LES GRANDES ÉTAPES DE L'ASTRONOMIE

**L'**ASTRONOMIE est la plus ancienne des sciences. Depuis les temps les plus reculés, l'attention des hommes a été attirée par le merveilleux spectacle des nuits étoilées et par leur mystère. La contemplation des cieux est devenue une science dès que l'on a observé systématiquement le lever et le coucher du Soleil, de la Lune et des principales étoiles. Mais nous ne pouvons guère imaginer les difficultés qu'ont rencontrées les hommes primitifs avant d'acquérir les notions qui nous semblent maintenant les plus élémentaires. Par exemple, ce n'est guère que quelques siècles avant notre ère que fut établie la relation de cause à effet entre le jour et l'apparition du Soleil ; auparavant, on croyait à l'existence de vapeurs claires et de vapeurs obscures. Peu à peu, on a déterminé la marche du Soleil sur la voûte céleste par la variation de la longueur des ombres méridiennes ou en repérant les étoiles visibles dans son voisinage juste après son coucher ou avant son lever. On a distingué les planètes, par leurs mouvements par rapport aux étoiles, et l'on a suivi leur marche. On a observé les comètes, les éclipses de Lune et de Soleil. La rotation diurne du ciel a suggéré un moyen de diviser le temps, puis le déplacement des constellations vers l'ouest, d'une saison à l'autre, a mis en évidence la période d'un an, que l'on a combinée aux phases de la Lune pour édifier un calendrier.

À ses débuts et pendant de longs siècles, l'astronomie s'est trouvée liée aux croyances



● La sphère armillaire de Tycho Brahé, assemblage de cercles métalliques orientables utilisé pour les observations astronomiques.

et aux pratiques religieuses. Tantôt on a adoré les astres comme des dieux véritables, tantôt on a imaginé des dieux spéciaux pour régler les mouvements célestes. Chez de nombreux peuples, ce sont les prêtres qui s'occupent de l'astronomie. Les noms des planètes et des jours de la semaine, ceux des constellations nous rappellent cette époque mythologique.

## L'ASTROLOGIE

De même qu'elle était partiellement confondue avec la religion, l'astrologie a été longtemps mêlée intimement à l'astrologie, dont elle n'est parvenue à se débarrasser définitivement qu'il y a deux ou trois siècles.

L'astrologie admettait que les astres exercent une influence prépondérante sur les destinées

des peuples et des individus ; elle prétendait déterminer cette influence et prévoir l'avenir. En réalité, l'astronomie s'occupe bien, dans une certaine mesure, de prévoir l'avenir, notamment de prédire le mouvement précis des astres et même leur évolution physique ; d'autre part, il est bien certain que le mouvement du Soleil règle le jour, la nuit et les saisons, ou encore que les positions relatives du Soleil et de la Lune par rapport à la Terre déterminent les marées des océans. Mais tous les esprits cultivés savent maintenant que l'astrologie est un art mensonger ; et c'est, avant tout, l'astronomie qui a détruit l'astrologie, en faisant perdre à la Terre le rôle de centre du monde, qu'on lui avait faussement attribué autrefois, et en mettant en évidence l'infime importance de



RA,  
DIEU DU SOLEIL.

chacun de nous dans l'immense Univers.

L'astrologie paraît être née en Chaldée, plusieurs dizaines de siècles avant l'ère chrétienne. Initialement, elle ne prétendait prévoir que les événements intéressant la vie du souverain ou l'avenir de l'Etat. De la Chaldée, l'astrologie s'est propagée peu à peu dans l'ensemble de l'Ancien Monde ; en même temps, elle s'est vulgarisée et les astrologues ont étendu leur clientèle jusqu'aux plus simples mortels.

Elle a obtenu un regain de faveur particulièrement marqué pendant le Moyen âge. On vit, pendant des siècles, des astrologues gouverner en maîtres dans

les cours des rois et des empereurs. (Il y avait encore un astrologue attiré à la cour de Louis XIV.) Pourtant, à côté de quelques coïncidences heureuses, combien de démentis apportés à cette pseudo-science. Rappelons deux prédictions célèbres, qui ont terrifié les foules ignorantes : celle de la fin du monde pour septembre 1186, et celle d'un nouveau déluge pour février 1524.

Les prédictions reposaient sur les aspects ou les configurations, c'est-à-dire sur les positions relatives du Soleil, de la Lune et des planètes au moment de la naissance ou à quelque autre période remarquable de la vie d'une personne. Reconnaissons que l'astrologie, en exigeant une étude assez précise du ciel, a contribué au développement de l'astronomie, de la même manière que l'alchimie a favorisé la naissance de la chimie. Mais il est regrettable que nombre de personnes ignorantes lui accordent encore de nos jours une confiance qu'elle ne mérite pas.

## LES DÉBUTS DE L'ASTRONOMIE, EN CHINE, EN CHALDÉE ET EN ÉGYPTE

Comme il est naturel, l'astronomie a débuté par une simple observation du mouvement des astres ; on a admis la stricte réalité des apparences, sans en chercher ni l'explication ni la raison.

Il semble que l'astronomie ait été cultivée en Chine plus de 2 000 ans avant notre ère. Mais les documents datant de cette époque ont disparu, car, en 213 avant J.-C., un empereur chinois fit brûler les livres anciens. L'étude des astres était intimement liée à la religion. Un collège était chargé d'établir le calendrier et de prédire les éclipses.

Les plus anciens documents que l'on ait retrouvés et où il soit question d'astronomie, sont, jusqu'ici, les tablettes assyriennes, vieilles de 5 000 à 6 000 ans.

Quant aux Chaldéens, leurs prêtres observèrent, déjà 1 000 ans avant J.-C., les mouvements des astres avec assez de précision pour pouvoir prédire leur marche ultérieure ; par exemple, ils avaient établi des tables du mouvement de la Lune, qui ne comportaient pas un écart de plus de la moitié du diamètre apparent de la Lune au bout de 400 ans ; ils avaient aussi découvert le « Saros », période de 223 lunaisons (18 ans 11 jours), qui ramène le Soleil, la Terre et la Lune sensiblement dans les mêmes positions relatives et qui assure ainsi la périodicité des éclipses de Lune et de Soleil. Les Chaldéens n'avaient d'ailleurs pas du tout compris la raison des éclipses, mais simplement constaté empiriquement leur périodicité.

Certains ont soutenu que les Egyptiens auraient atteint un degré de science très développé et qu'ils auraient connu déjà des faits qui ont été découverts à nouveau beaucoup plus tard. Il s'agit là d'une affirmation purement gratuite. En fait, on a constaté que les Pyramides, tombeaux des Pharaons, sont orientées. La Pyramide de Giseh, édiflée vers l'an 3 000 avant notre ère, a une orientation exacte à un



**COPERNIC (1473-1543).** — *Astronome et mathématicien polonais, Nicolas Copernic naquit à Thorn et étudia successivement à Cracovie, à Bologne et à Padoue. En 1505, il quitta définitivement l'Italie et en 1512 s'établit à Frauenburg où il éleva un observatoire. Jusqu'à la fin de sa vie, l'astronomie fut son étude favorite. Il démontra que, contrairement aux idées admises jusqu'alors, qui faisaient de notre globe le centre du monde, la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil et qu'il en est de même pour toutes les planètes. Par le bouleversement profond que ses conceptions ont apporté, il est ainsi le créateur de l'astronomie moderne. Il a exposé son système dans son célèbre traité dédié au pape Paul III, De revolutionibus orbium celestium (sur les révolutions des mondes célestes), qu'il acheva en 1531, mais qu'il remania et dont il retarda la publication ; le livre parut finalement en 1543. On rapporte que la première épreuve imprimée parvint à Copernic le jour de sa mort.*

dixième de degré près ; celle de Sakkarah, plus ancienne d'un ou deux siècles, n'est orientée qu'à 4 degrés près. Quant à la prétendue orientation astronomique de certains couloirs, elle est tout à fait douteuse. Ce qui est certain, c'est que les prêtres égyptiens s'étaient acquis, dans l'antiquité, une grande réputation de science, qui attira auprès d'eux les plus illustres philosophes grecs, notamment Thalès, Pythagore et Platon.

## NAISSANCE DE L'ASTRONOMIE MATHÉMATIQUE

Ce sont les philosophes grecs, à partir de **Thalès** (600 environ avant J.-C.), qui tentèrent, les premiers, d'écarter le surnaturel et de trouver des explications rationnelles des phénomènes qu'ils observaient, en particulier des phénomènes célestes. Avant de trouver ces explications, il y eut évidemment beaucoup d'erreurs et de contradictions.

Le premier à soutenir que la Terre est isolée dans l'espace et se comporte donc comme un corps céleste fut **Anaximandre** (610-545 environ avant J.-C.), disciple de Thalès.

Quant à la sphéricité de la Terre, c'est vraisemblablement d'abord **Parménide** (500 environ avant J.-C.), qui l'enseigna. **Platon** (427-347 avant J.-C.) et **Aristote** (384-322 avant J.-C.) adoptèrent l'idée de la rotondité de la Terre et ils fournirent même, en sa faveur, la plupart des preuves qui sont maintenant présentées comme classiques ; mais ils croyaient la Terre immobile au centre de l'univers ; pour eux, le ciel était une boule creuse tournant autour d'un axe passant par le centre de la Terre.

Pourtant, déjà, à cette époque, une école rivale prétendait que la rotation diurne du ciel est une illusion et qu'en réalité la Terre tourne sur elle-même. Ce fut la doctrine de **Philolaüs** (420 environ avant J.-C.), élève de Pythagore, puis d'**Héraclide de Pont** (350 environ avant J.-C.) et enfin d'**Aristarque de Samos**

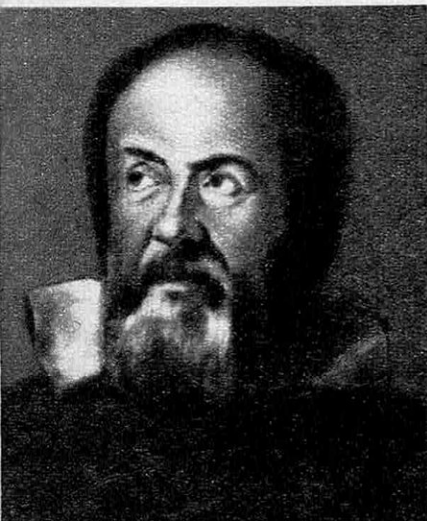
(250 environ avant J.-C.) ; ce dernier enseigna même dit-on, que la Terre n'est pas au centre du monde, mais qu'elle tourne en un an autour du Soleil ; il fut donc un véritable précurseur de Copernic. Mais ces doctrines manquaient de preuves. D'autre part, l'idée même d'un mouvement de la Terre, sensible à nos sens uniquement par le déplacement du ciel, parut invraisemblable. Enfin l'autorité de l'école de Platon et d'Aristote contribua à faire abandonner ces idées et à les laisser tomber dans l'oubli, au profit de la théorie de la Terre immobile, qui régna pendant plus de 2 000 ans.

Pour rendre compte des mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes, dont on connaissait déjà du temps de Platon les irrégularités apparentes, il fallut alors imaginer tout un système ingénieux. Deux types de solutions furent proposés. Ils sont d'ailleurs dominés, tous deux, par une idée générale, qui remonte à Pythagore : on croyait que les astres ne sont soumis à aucune force et que, dans ces conditions, ils devaient tous avoir des mouvements circulaires et uniformes, que l'on considérait comme « seuls dignes de la perfection des corps célestes ».

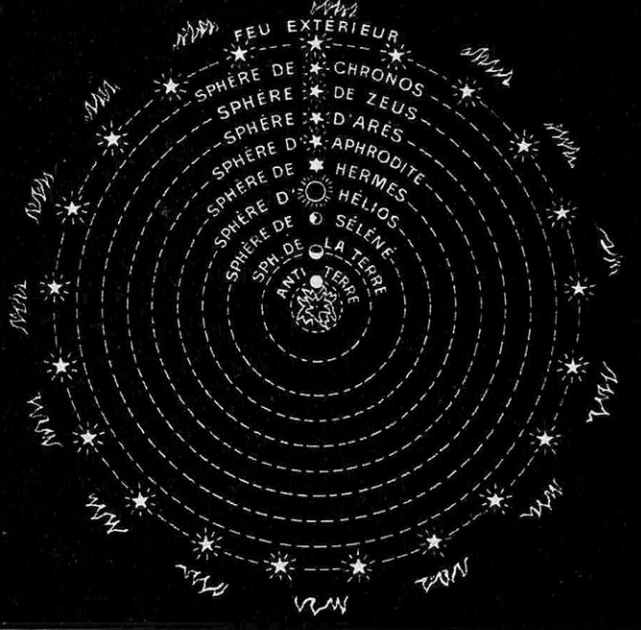
**Euxode** (408-355 avant J.-C.), contemporain et disciple de Platon, fut le promoteur de la **théorie des sphères concentriques**, remarquable au point de vue géométrique. Elle consiste à représenter le mouvement de chaque « astre errant » (Soleil, Lune, planètes) par un système de sphères ayant toutes la Terre pour centre et tournant uniformément, chacune, l'une dans l'autre, autour d'un axe solidaire de chacune d'elles (comme une



THOTH,  
DÉESSE DE LA LUNE.



**GALILÉE** (1564-1642). — Cet illustre mathématicien, physicien et astronome italien, naquit à Pise. Il doit être considéré comme un des fondateurs de la physique et de la mécanique et comme le véritable initiateur de la méthode expérimentale dans la science. Rappelons ses recherches sur la pendule (on dit qu'agé de dix-neuf ans, il observa, dans la cathédrale de Pise, une lampe qui se balançait à la voûte et eut ainsi l'idée d'appliquer le pendule à la mesure du temps) et sur la chute des corps, son invention du thermomètre. En astronomie, il fut le premier à employer la lunette et fit ainsi de nombreuses découvertes : montagnes de la Lune, satellites de Jupiter, taches du Soleil, phases de Vénus, vraie nature de la Voie Lactée, etc. Plusieurs de ces découvertes apportèrent d'éclatantes confirmations au système de Copernic, qu'il défendit vigoureusement. Galilée fut poursuivi comme hérétique et obligé de se retracter solennellement.



**SYSTÈME DE PHILOLAÛS** : Le Soleil, les planètes et la Lune tournent autour du feu central sous la sphère des étoiles. Pour porter à 10 (« nombre parfait ») le nombre des sphères, on admet l'existence d'une « Anti-Terre » plus proche que la Terre du feu central et toujours diamétralement opposée. Feu central et Anti-Terre sont constamment invisibles, la Terre présentant toujours la même face, inhabitée, au feu central.



**SYSTÈME DES SPHÈRES** : Le mouvement de chaque « astre errant » (par opposition avec les « astres fixes », les étoiles, ce sont les planètes, la Lune et aussi le Soleil) est représenté par un système de sphères ayant toutes la Terre pour centre et tournant uniformément l'une dans l'autre, chacune autour d'un axe solidaire de la précédente. Il fallait à Eudoxe vingt-sept sphères, et à Aristote cinquante-cinq sphères.

combinaison de suspensions à la Cardan) ; il fallait ainsi 27 sphères, en y comprenant celle des « étoiles fixes ».

Pour rendre compte plus exactement des mouvements observés des planètes, Aristote perfectionna le système et porta le nombre des sphères à 55. Mais la théorie des sphères concentriques admet que la distance des planètes à la Terre est invariable ; elle ne peut donc pas expliquer leurs variations considérables d'éclat, en supposant, comme on le faisait alors, que les planètes sont lumineuses par elles-mêmes.

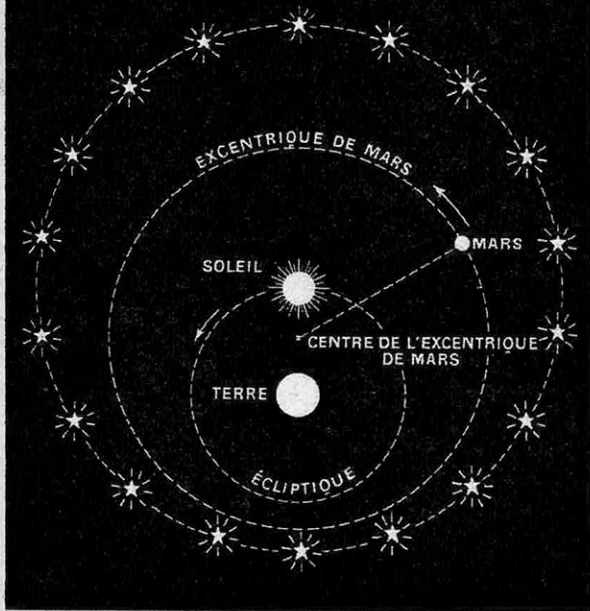
C'est pourquoi on préféra généralement la deuxième solution, qui est celle des **excentriques** et des **épicycles**

Il ne s'agit plus, cette fois, de sphères, mais de cercles, toujours parcourus d'un mouvement uniforme. On fait intervenir tantôt des excentriques, c'est-à-dire des cercles dont le plan contient le centre de la Terre, mais dont le centre se trouve à quelques distances, tantôt la composition de deux mouvements circulaires uniformes : la planète décrit un petit cercle, appelé épicycle, dont le centre se déplace lui-même sur un grand cercle, appelé déférent, autour de la Terre. Nous allons préciser la description de cette théorie à propos du système de Ptolémée.

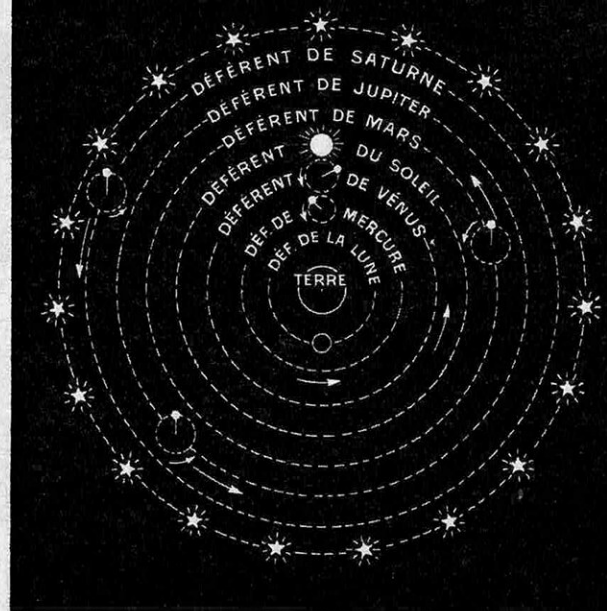
Avant Ptolémée (150 environ après J.-C.), cette théorie fut celle d'**Apollonius de Perge** et d'**Hipparque**.



**TYCHO-BRAHÉ** (1546-1601). — Le célèbre astronome, issu d'une riche famille danoise, naquit à Knudstrup et s'intéressa depuis son adolescence à l'astronomie. On lui doit les observations les plus précises qui aient été réalisées avant l'invention de la lunette et aussi des perfectionnements remarquables des instruments astronomiques. On rapporte que c'est une éclipse totale de Soleil qui fit naître sa vocation, tant il fut frappé d'admiration pour la science qui avait exactement prédit le phénomène. L'observation d'une nova très brillante en 1572 le décida à dresser un catalogue d'étoiles. Sous la protection du roi du Danemark, il fonda en 1576 l'observatoire célèbre d'Uranienbourg, dans l'île de Hven, où il travailla pendant vingt et un ans. A la mort de son protecteur, il se retira à Prague, où il eut Kepler pour élève. C'est grâce aux observations très précises des planètes, qu'il avait réalisées, que ce dernier put découvrir ses célèbres lois. Tycho-Brahé combattit malheureusement Copernic.



**SYSTÈME DES EXCENTRIQUES** : Le système des sphères concentriques ne pouvait rendre compte des variations d'éclat des planètes dont les distances à la Terre demeuraient invariables. Ici on fait intervenir des cercles dont le plan contient le centre de la Terre, mais dont le centre se trouve plus ou moins éloigné. La Terre n'occupe plus le centre exact du monde, ce qui ne manquait pas de choquer les Grecs.



**SYSTÈME DES ÉPICYCLES** : Dans ce système, qui est aussi celui de Ptolémée, la « sphère des fixes » tourne d'un tour par vingt-quatre heures autour de la Terre immobile. Le Soleil et la Lune décrivent d'un mouvement uniforme des cercles légèrement excentrés. Chaque planète décrit un cercle, appelé « épicycle », dont le centre se déplace sur un deuxième cercle, qu'on nomme « déférent », ayant la Terre pour centre.

Hipparque (130 environ avant J.-C.) mérite une mention toute particulière ; il fut le plus grand astronome de l'antiquité. Il étudia avec précision les mouvements de la Lune et du Soleil et détermina assez exactement la durée de l'année. L'apparition d'une nova en 125 avant J.-C. l'amena à dresser le premier catalogue d'étoiles ; on lui doit aussi l'invention de la trigonométrie et de la fixation des positions des lieux sur la Terre par leur latitude et leur longitude.

C'est lui aussi qui eut l'idée de ramener les observations astronomiques à ce qu'elles seraient si on les faisait au centre de la Terre, pour les rendre comparables entre elles en éliminant l'effet de parallaxe.

## LE SYSTÈME DE PTOLÉMÉE

Dans son livre célèbre, appelé l'*Almageste* d'après la traduction que nous en ont donnée les Arabes, Ptolémée exposa la théorie des épicycles pour le Soleil et la Lune et l'étendit aux mouvements des cinq planètes connues. C'est l'ensemble de cette théorie qui est connu sous le nom de « système de Ptolémée ». En voici les idées essentielles :

La Terre est immobile au centre du monde. Les étoiles sont attachées à une sphère, dite **sphère des fixes**, concentrique à la Terre, qui tourne à raison d'un tour par jour sidéral (4 minutes de moins qu'un jour solaire).

Le Soleil et la Lune décrivent des cercles



**KÉPLER** (1571-1630). — L'Allemand Jean Kepler, né près de Weil, dans le Wurtemberg, a illustré son nom par la découverte des trois grandes lois qui décrivent les mouvements des planètes autour du Soleil et qui complètent, en le corrigeant, le système de Copernic. Fils de paysan, pauvre, il eut à lutter toute sa vie contre les difficultés matérielles. Il succéda à Tycho-Brahé comme astronome de l'empereur Rodolphe II. Après six années de labeur incroyable et de continus calculs, il découvrit d'abord ses deux premières lois pour la planète Mars et les vérifia pour les autres planètes. Son tempérament mystique le conduisit ensuite à chercher d'autres « Harmonies du Monde » suivant le titre qu'il a donné à un de ses traités ; mais sa troisième loi, qui exprime une relation entre les dimensions des orbites et les périodes de révolution des planètes, ne lui apparut qu'après d'innombrables calculs, qui exigèrent des années de méditations et de comparaisons.

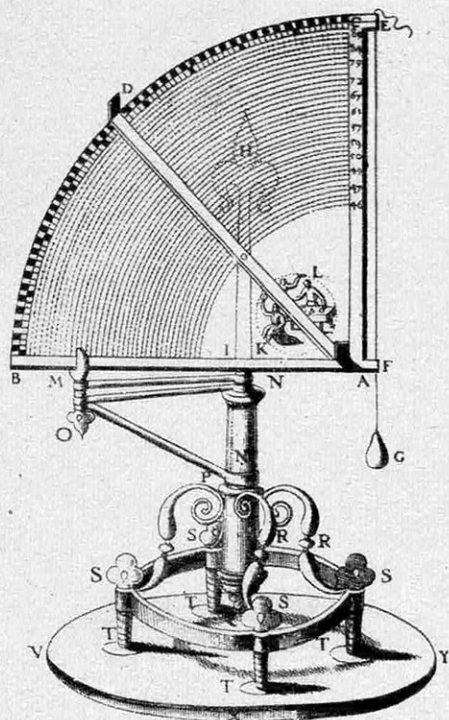
d'un mouvement uniforme, mais ces cercles sont légèrement excentrés. (On expliquait ainsi pourquoi le mouvement apparent du Soleil sur la voûte céleste n'est pas uniforme et pourquoi le diamètre apparent des deux astres varie un peu).

Chaque planète décrit un cercle (épicycle), dont le centre se déplace sur un deuxième cercle (déférent) ayant la Terre pour centre. Dans les cas de Vénus et Mercure, le centre de l'épicycle se trouve sur le rayon joignant la Terre au Soleil. Pour les autres planètes, telles que Mars, le rayon joignant la planète au centre de l'épicycle est toujours parallèle à la direction de la Terre au Soleil.

Ptolémée (1) montra qu'on peut déterminer les rayons des divers cercles de façon à représenter assez bien les mouvements des planètes, tels qu'ils sont observés. En réalité, il fut amené à imaginer certains artifices, par exemple à excentrer les déférents ou encore à admettre que le mouvement de la Lune est uniforme, vu de la Terre, mais qu'il ne l'est pas sur le déférent.

Le système de Ptolémée fut admis pendant quatorze siècles, jusqu'à Copernic. Il n'y eut aucun progrès digne d'être signalé pendant cette longue période.

(1) Signalons aussi que Ptolémée évalua la distance moyenne de la Terre à la Lune ; il la trouva égale à 59 rayons terrestres (au lieu de 60) ; c'est déjà une précision très remarquable.



UN QUADRANT DE TYCHO BRAHÉ.

## LES FONDATEURS DE L'ASTRONOMIE MODERNE : COPERNIC, GALILÉE, KÉPLER, NEWTON

Frappé par les complications du système de Ptolémée, le chanoine et astronome polonais Copernic (1473-1543) a montré que les mouvements des astres peuvent s'expliquer, beaucoup plus simplement que par les mécanismes de Ptolémée, d'après le système suivant :

Les étoiles ne tournent pas autour de la Terre : elles sont immobiles ; mais la Terre tourne sur elle-même en un jour sidéral et sa rotation produit l'impression du mouvement diurne des astres.

Le Soleil est immobile par rapport aux étoiles. Les planètes décrivent des cercles autour du Soleil. La Terre elle-même se com-

porte comme une planète ; elle tourne autour du Soleil en un an et ce mouvement donne l'illusion que le Soleil se déplace autour de la Terre. La Lune tourne autour de la Terre.

Ainsi, à l'exception de la nature réelle des orbites planétaires, qui ne sont pas des cercles, mais des ellipses (d'ailleurs, très voisines de cercles), c'est Copernic qui a établi la nature véritable du système solaire. Ses idées, qui n'apportaient, il est vrai, aucune preuve irréfutable, furent d'abord violemment combattues ; elles le furent même pendant longtemps, puisqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle encore on enseignait, à la Sorbonne, que le mouvement de la Terre autour du Soleil est une hypothèse commode, mais fautive. Par contre, elles



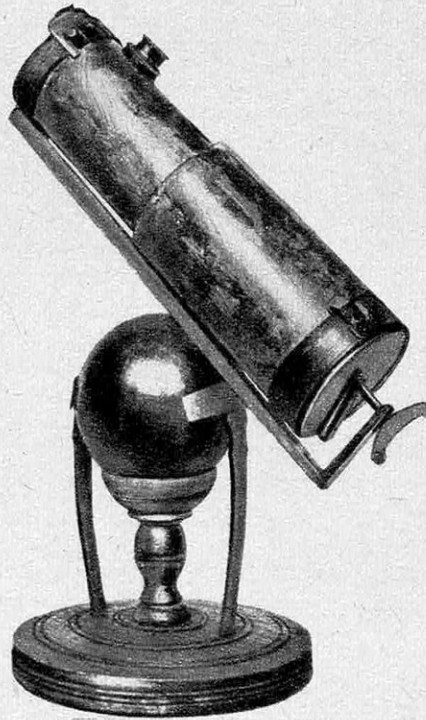
**NEWTON** (1642-1727). — Isaac Newton, né à Woolsthorpe (Angleterre), fut un des plus grands génies de l'humanité. Il a immortalisé son nom par sa découverte de la loi de l'attraction universelle, qui sert de base à toute la mécanique céleste. Cette découverte marque une véritable étape dans l'évolution de la pensée humaine. D'après la légende, c'est l'observation de la chute d'une pomme qui, par une série de raisonnements, le conduisit au principe de l'attraction universelle. C'est aussi à Newton que l'on doit la mise en évidence des principes fondamentaux de la mécanique, déjà entrevus par Galilée, la théorie des marées, l'invention du calcul différentiel (elle provoqua une longue et ardente querelle avec Leibniz qui était parvenu à la même découverte par des voies différentes). Il a contribué par d'autres travaux encore aux progrès de l'astronomie ; c'est lui qui a construit le premier télescope ; il a reconnu la complexité de la lumière blanche et inauguré ainsi l'analyse spectrale. Son corps fut inhumé à Westminster.

furent soutenues par Galilée et par Képler.

**Galilée** (1564-1642), qui est surtout connu du public comme exemple de martyr pour la vérité scientifique, fut le véritable fondateur de la science expérimentale (physique et mécanique). Il ne fut pas l'inventeur de la lunette, mais le premier à s'en servir pour l'observation astronomique (1610) ; il fut ainsi le premier à voir les montagnes de la Lune, les phases de Vénus, les satellites de Jupiter, les taches et la rotation du Soleil, les nuées stellaires de la Voie Lactée. Plusieurs de ces observations furent des arguments en faveur du système de Copernic : ainsi les phases de Vénus, analogues à celles de la Lune et qui avaient été prévues par Copernic ; de même le mouvement des quatre principaux satellites autour de Jupiter, analogue à celui de la Lune autour de la Terre ou à ceux des planètes autour du Soleil.

Pour expliquer la faible variation du diamètre apparent de la Lune, Copernic avait admis que l'orbite de cet astre est un cercle légèrement excentré par rapport à la Terre ; de même, le Soleil ne se trouvait pas exactement au centre des orbites des planètes.

**Képler** (1571-1630) montra qu'en réalité les orbites des planètes sont des ellipses ayant le Soleil pour foyer et il résuma les propriétés de leurs mouvements dans ses **trois célèbres lois**. La découverte de ces lois ne fut d'ailleurs possible que parce que Képler profita des observations précises récemment accu-



MODÈLE DE TÉLESCOPE DE NEWTON.

mulées par l'astronome danois **Tycho Brahé**. Il y avait, par exemple, 8 minutes d'arc d'écart entre les positions prévues par Copernic et celles observées par Tycho Brahé ; cet écart était supérieur aux erreurs de mesures. « Ces 8 minutes, dit Képler, m'ont mis sur la voie pour réformer toute l'astronomie ».

Alors que Képler a fait connaître les lois qui gouvernent les mouvements des planètes, c'est **Newton** (1642-1727) qui a découvert les forces qui produisent ces mouvements. Il a d'abord précisé les principes fondamentaux de la mécanique, qui avaient été entrevus par Galilée et par Képler. Pour soumettre à l'analyse le problème du mouvement des planètes, il inventa le calcul différentiel. Après des années de travail, il publia, en 1687, la loi de **l'attraction universelle**, dans son célèbre livre des **Principes**, dont on a dit qu'il représente « la plus haute production de l'esprit humain » (Lagrange).

L'œuvre de Newton a eu une influence prépondérante sur le développement de l'astronomie. Déjà Newton lui-même a montré que la pesanteur à la surface de la Terre est un cas particulier de l'attraction universelle (épisode célèbre de la pomme tombant d'un arbre) ; il a annoncé, le premier, que la Terre est aplatie aux pôles, et a expliqué le phénomène des marées, la précession des équinoxes, enfin les inégalités des mouvements des planètes, de la Lune et des comètes ; en effet, les planètes s'attirent entre elles et ces forces,

**HERSCHEL** (1738-1822). — *William Herschel doit être regardé comme le fondateur de l'astronomie stellaire. Né à Hanovre, d'une famille pauvre, il alla en Angleterre pour gagner sa vie. Il fut d'abord professeur de musique et organiste, puis fabricant d'instruments d'optique ; il fut le premier à réaliser, de sa main, des télescopes de grande ouverture, il devint astronome et finalement directeur d'observatoire. Il a inauguré l'étude des étoiles variables, celle des étoiles doubles ; il a dressé le premier catalogue de nébuleuses et découvert le mouvement propre du Soleil ; il a reconnu la forme de notre Galaxie, par sa méthode des sondages, qu'il appela des « jauges ». Ce fut aussi lui qui découvrit Uranus, la première planète nouvelle depuis les temps préhistoriques, puis deux satellites de cette planète et deux satellites de Saturne. Son fils John (1792-1871) a continué ses travaux ; il a notamment poursuivi, au Cap de Bonne-Espérance, l'étude des étoiles doubles.*



très faibles par comparaison à celles exercées par le Soleil, sont cependant suffisantes pour apporter des perturbations par rapport aux lois de Képler. C'est la **mécanique céleste** qui s'occupe de prévoir les mouvements des planètes, en tenant compte de ces perturbations. Son développement fut d'abord limité par les progrès du calcul infinitésimal ; elle trouva son épanouissement dans les œuvres d'Euler, de Lagrange et, surtout, de **Laplace** (1749-1827), dont le traité de « Mécanique Céleste » et l'hypothèse cosmogonique sont universellement connus. Son application la plus remarquable a été la découverte par le seul calcul, en 1846, de la planète Neptune par **Leverrier**.

## HERSCHEL ET L'ASTRONOMIE STELLAIRE

Au fur et à mesure que les énigmes relatives au système solaire ont été résolues et que les progrès des lunettes et des télescopes ont permis une étude plus détaillée du ciel, l'intérêt principal des astronomes est passé des planètes aux étoiles.

Parmi les observateurs qui s'efforcèrent de déterminer avec précision la position des étoiles, **Bradley** (1692-1782) mérite une mention spéciale ; on lui doit plus de 60 000 déterminations de positions, l'erreur sur chacune d'elles ne dépassant pas une seconde d'arc. Ces observations lui permirent deux découvertes importantes : celles de l'aberration et de la nutation, que nous exposerons plus loin.

Mais le véritable père de l'astronomie stellaire fut l'astronome anglais **Herschel** (1738-1822), qui discerna les principaux problèmes de cette science et ébaucha magistralement leur étude : mesures photométriques, catalogue des nébuleuses, étude des étoiles doubles, dont il a découvert la nature véritable, mise en évidence du mouvement propre du Soleil par rapport à l'ensemble des étoiles, évaluation de la concentration galactique par sa célèbre méthode des jauges (une jauge con-

siste à dénombrer toutes les étoiles visibles dans un instrument, pour une région du ciel), estimation des dimensions de la Voie Lactée... Signalons aussi que Herschel construisit lui-même de grands télescopes (jusqu'à 96 centimètres d'ouverture) et qu'il découvrit la planète Uranus.

Mais il convient de remarquer que, si Herschel est parvenu à se former une image du monde assez exacte pour son époque, certaines de ses évaluations restaient tout à fait arbitraires. Ainsi la première mesure véritable de la distance d'une étoile, par la méthode désormais classique des parallaxes trigonométriques, date seulement de 1838 (Bessel, puis Struve).

## L'ASTROPHYSIQUE

A partir du XIX<sup>e</sup> siècle, une ère nouvelle s'ouvre pour l'astronomie, par l'application des méthodes de la physique.

La première étape fut l'analyse spectrale. Fraunhofer découvrit, en 1814, la présence, dans le spectre du Soleil, de nombreuses raies sombres, dont Kirchhoff expliqua, en 1859, l'origine. Huggins fut un de ceux qui appliquèrent l'analyse spectrale à l'étude des étoiles ; dès 1864, il montra qu'elles sont formées des corps que nous rencontrons sur la Terre. Ainsi, tandis que l'astronomie de position avait établi que les lois de la gravitation s'étendent à tout l'univers, l'astrophysique prouve l'unité de la matière.

C'est vers 1880 que l'on a commencé à employer systématiquement la photographie pour l'observation du ciel. Cette application de la photographie, soit pour déceler par de longues poses des objets très faibles, soit pour dresser une carte du ciel, soit pour réaliser l'étude spectroscopique des astres, représente un progrès aussi important pour l'astronomie que l'invention de la lunette et, combinée à la construction de télescopes d'ouverture de plus en plus grande, elle a contribué à élargir rapidement notre connaissance de l'univers.

L'analyse précise des spectres permet



**HUBBLE** (1889). — *Astronome américain contemporain, né à Marshfield, Missouri, Hubble étudia d'abord les sciences à Chicago, où il acquit quelque renommée par son talent de boxeur. Il abandonna momentanément les sciences pour aller étudier le droit en Angleterre, à Oxford. Mais peu après son retour en Amérique, attiré par la recherche scientifique et surtout par l'astronomie, il entra à l'observatoire de Yerkes. Ses travaux furent interrompus en 1916 par la guerre ; Hubble vint combattre en Europe. A partir de 1919, il travailla à l'observatoire du Mont Wilson. On lui doit une admirable série de recherches sur les nébuleuses extragalactiques, qui l'ont conduit notamment à la première évaluation de leurs distances et à la découverte de la fameuse loi reliant les vitesses de récession aux distances, loi qui sert de base à la théorie de l'expansion de l'Univers. Hubble a fait aussi d'importants travaux sur les nébuleuses diffuses et sur l'absorption de la lumière dans l'espace interstellaire.*



d'évaluer les températures des étoiles et montra, notamment, la distinction entre étoiles géantes et naines. Ce résultat conduisit à une évaluation spectroscopique des distances stellaires. En même temps, **Eddington** entreprit une étude théorique de la structure interne des étoiles, qui forme une transition entre la physique nucléaire et l'astrophysique ; elle a abouti à une relation remarquable entre la masse et la luminosité des étoiles. On peut dire sans exagération que ce sont les recherches théoriques d'Eddington, qui ont permis de comprendre la nature de ces astres à densité extraordinairement élevée, récemment découverts, auxquels on a donné le nom de naines blanches ; ce sont aussi les recherches d'Eddington qui ont préparé la solution trouvée, il y a cinq ans à peine, des problèmes relatifs à l'origine de l'énergie du Soleil et des étoiles et à l'évolution stellaire, solution dont les importantes conséquences sont encore loin d'avoir été toutes déduites.

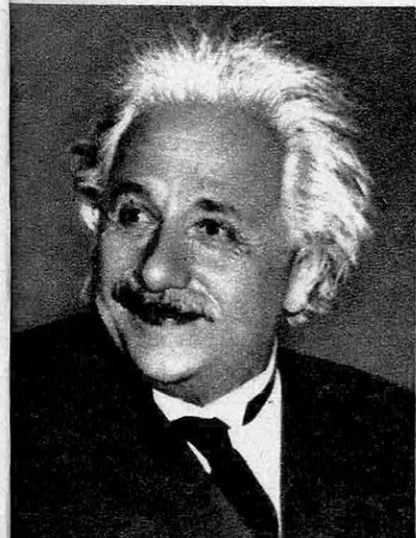
Par ailleurs, tandis que se poursuivait l'étude de la structure et des dimensions de la Galaxie, la découverte d'une matière inter-stellaire, qui produit une absorption non négligeable, obligeait récemment à reprendre les anciennes estimations des dimensions de la Galaxie et montrait son étroite ressemblance avec les nébuleuses extragalactiques, connues depuis longtemps, mais dont la nature exacte n'a été établie qu'en 1924, lorsque **Hubble** a réussi à mesurer, pour la première fois, la distance de la nébuleuse d'Andromède. La mise en évidence de millions de nébuleuses extragalactiques, « univers-îles » qui contiennent chacune des milliards d'étoiles, et dont la distance atteint le demi-milliard d'années-lumière, est une des découvertes les plus remarquables, une de celles qui auront la plus profonde influence sur les conceptions du monde et de l'espace.

Précisément, les conceptions anciennes sur l'espace et le temps ont été profondément ébranlées, vers 1905, par la théorie de la relativité, due au génie d'**Einstein**. Nous parlerons plus loin des vérifications astronomiques

de cette théorie. Une de ses conséquences les plus importantes pour la structure du monde a été l'hypothèse de l'**expansion de l'univers**, par laquelle on a proposé d'expliquer certains caractères spectraux des nébuleuses extragalactiques. Cette hypothèse est admise par la plupart des astronomes, bien qu'elle rencontre quelques opposants illustres.

L'impression dominante que donne l'évolution actuelle de l'astronomie, il importe de le remarquer, est celle de progrès extraordinairement rapides, plus encore que dans la plupart des autres branches de la science. On a pu exprimer cette rapidité sous une forme mathématique, en considérant la variation avec le temps de diverses quantités qui peuvent servir d'indices du progrès astronomique, comme, par exemple, le nombre d'étoiles cataloguées, ou le nombre d'étoiles dont on connaît la distance, la vitesse radiale ou le mouvement propre, ou encore l'erreur moyenne dans la détermination des positions des étoiles. On a montré que la variation est fonction exponentielle du temps, ce qui revient à dire que le gain des connaissances obtenues pendant des périodes successives régulières, par exemple tous les dix ans, est une proportion constante de la somme des connaissances déjà acquises au début de chacune de ces périodes. C'est une constatation extrêmement réconfortante.

Admettons le cas d'un lecteur qui lirait les ouvrages de mise au point d'astronomie à des intervalles réguliers assez espacés, par exemple tous les quinze ou vingt ans. On lui annoncerait des modifications si profondes, d'une fois à l'autre, qu'il en serait déconcerté et se poserait sans doute la question : « Qu'est-ce qui est vrai ? » Ainsi, au lieu de donner confiance, le développement rapide de l'astronomie — et, plus généralement, de la science — risque de créer quelque scepticisme. Nous devons lutter énergiquement contre cette forme de scepticisme. Les contradictions que l'on rencontre parfois sont plus apparentes que réelles, en général. Prenons pour exemple les mouve-



**EINSTEIN** (1879). — *Cet illustre physicien contemporain est né à Ulm et vit depuis de nombreuses années en Amérique. Sa théorie de la relativité est peut-être la synthèse la plus grandiose qu'ait jamais réalisée l'esprit humain. En bouleversant complètement les anciennes conceptions de l'espace et du temps, elle a produit une révolution dans la physique et dans la mécanique, sciences qui paraissaient assises sur des bases inébranlables. Deux étapes marquent l'évolution de cette théorie : en 1905, Einstein donne les fondements de sa « relativité restreinte », comme on a pris l'habitude de la désigner ; dix ans plus tard, en 1915, il développe la « relativité générale », d'une merveilleuse fécondité. Parmi d'autres conséquences inattendues de la théorie de la relativité d'Einstein, la plus surprenante et la plus importante, aussi bien sur le plan théorique que sur le plan pratique, est sans doute l'équivalence, qu'elle met en évidence, entre la masse et l'énergie.*

# NOMS FRANÇAIS ET LATINS DES CONSTELLATIONS

## CONSTELLATIONS BORÉALES

La Petite Ourse.	Ursa Minor.	Le Cocher.	Auriga.
Le Dragon.	Draco.	Le Lynx.	Lynx.
Céphée.	Cepheus.	Le Petit Lion.	Leo Minor.
Cassiopée.	Cassiopeia.	La Chevelure de Béré- nice.	Coma Berenices.
La Girafe.	Camelopardalis.	Le Serpent.	Serpens.
La Grande Ourse.	Ursa Major.	L'Ecu.	Scutum.
Les Chiens de Chasse.	Canes Venatici.	L'Aigle.	Aquila.
Le Bouvier.	Bootes.	La Flèche.	Sagitta.
La Couronne Boréale.	Corona Borealis.	Le Renard.	Vulpecula.
Hercule.	Hercules.	Le Dauphin.	Delphinus.
La Lyre.	Lyra.	Le Petit Cheval.	Equuleus.
Le Cygne.	Cygnus.	Pégase.	Pegasus.
Le Lézard.	Lacerta.	Le Triangle.	Triangulum.
Andromède.	Andromeda.		
Persée.	Perseus.		

## CONSTELLATIONS ÉCLIPTIQUES

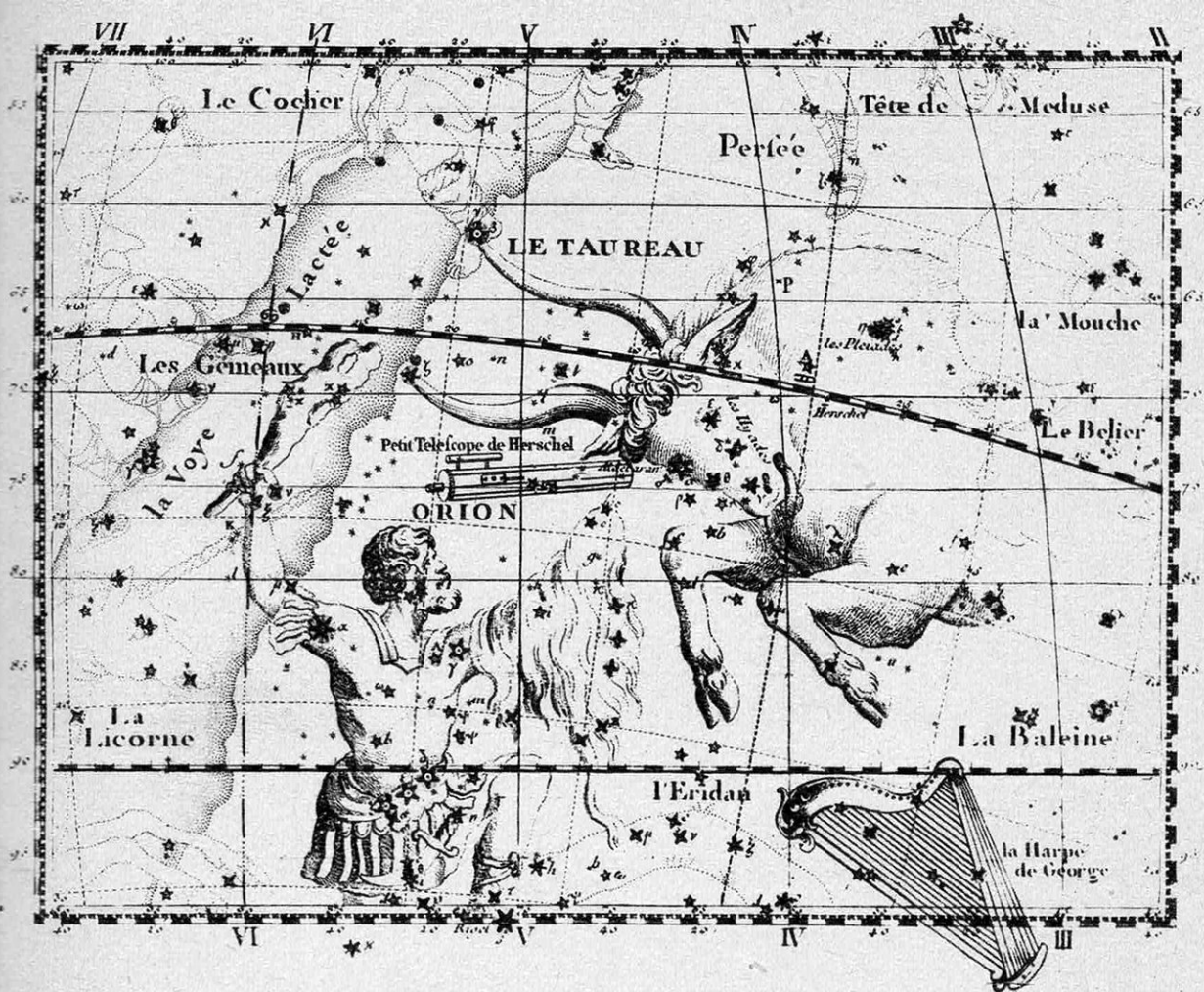
Le Bélier.	Aries.	Le Scorpion.	Scorpius.
Le Taureau.	Taurus.	Ophiuchus.	Ophiuchus.
Les Gémeaux.	Gemini.	Le Sagittaire.	Sagittarius.
Le Cancer.	Cancer.	Le Capricorne.	Capricornus.
Le Lion.	Leo.	Le Verseau.	Aquarius.
La Vierge.	Virgo.	Les Poissons.	Pisces.
La Balance.	Libra.		

## CONSTELLATIONS AUSTRALES

La Baleine.	Cetus.	La Règle.	Norma.
Eridan.	Eridanus.	L'Autel.	Ara.
Orion.	Orion.	Le Télescope.	Telescopium.
La Licorne.	Monoceros.	L'Oiseau Indien.	Indus.
Le Petit Chien.	Canis Minor.	La Grue.	Grus.
L'Hydre.	Hydra.	Le Phénix.	Phoenix.
Le Sextant.	Sextans.	L'Horloge.	Horologium.
La Coupe.	Crater.	Le Peintre.	Pictor.
Le Corbeau.	Corvus.	Les Voiles.	Vela.
Le Loup.	Lupus.	La Croix du Sud.	Crux.
La Couronne Australe.	Corona Australis.	Le Compas.	Circinus.
Le Microscope.	Microscopium.	Le Triangle Austral.	Triangulum Australe
Le Poisson Austral.	Piscis Austrinus.	Le Paon.	Pavo.
Le Sculpteur.	Sculptor.	Le Toucan.	Tucana.
Le Fourneau.	Fornax.	Le Réticule.	Reticulum.
Le Burin.	Caelum.	La Dorade.	Dorado.
La Colombe.	Columba.	Le Poisson Volant.	Volans.
Le Lièvre.	Lepus.	La Carène.	Carina.
Le Grand Chien.	Canis Major.	La Mouche.	Musca.
La Poupe.	Puppis.	L'Oiseau de Paradis.	Apus.
La Boussole.	Pyxis.	L'Octant.	Octans.
La Machine Pneuma- tique.	Antila.	L'Hydre Australe.	Hydrus.
Le Centaure.	Centaurus.	La Table.	Mensa.
		Le Caméléon.	Chamaeleon.

ments des planètes. Les systèmes compliqués imaginés par les Grecs, notamment le système de Ptolémée, présentaient déjà l'intérêt de tenter une explication rationnelle; c'est Copernic qui a trouvé la nature véritable de ces mouvements, bien qu'il ait confondu les orbites avec des cercles; Képler a reconnu qu'il s'agit d'ellipses; mais la théorie de la relativité a montré que l'on n'a pas rigoureu-

sement des ellipses, puisque, dans le cas de la planète Mercure au moins, il se produit une lente déformation de l'orbite. Dans la plupart des problèmes, on procède d'une manière analogue et l'on s'avance vers la vérité par étapes successives. Mais nous sommes parvenus à une époque où ces étapes sont de plus en plus rapides et le deviendront, vraisemblablement, plus encore dans l'avenir.



# LES ASTRES ET LEURS MOUVEMENTS

**L**A Terre est une des neuf planètes qui tournent autour du Soleil, accompagnées elles-mêmes par des corps plus petits, les satellites, dont la Lune est un exemple. Les planètes et leurs satellites ne brillent que parce qu'elle réfléchissent la lumière du Soleil. L'ensemble des neuf planètes et du Soleil forme le système solaire, auquel il faut aussi rattacher les comètes, les météores et le millier de petites planètes, ou astéroïdes, qui tournent elles aussi autour du Soleil.

Le Soleil est, lui-même, une étoile. C'est uniquement parce qu'il est beaucoup plus près de nous qu'il nous semble énormément plus lumineux et plus gros que toutes les autres étoiles ; il est 200 000 fois plus près que la première étoile la plus proche.

Sauf dans le cas des systèmes doubles ou multiples, les distances qui séparent les étoiles

entre elles sont de quelques années-lumière, c'est-à-dire extrêmement grandes par rapport aux dimensions mêmes des étoiles. De la matière très diluée existe entre les étoiles ; elle forme, par endroits, des nébuleuses brillantes ou, au contraire, des nuages obscurcissants.

Toutes les étoiles que nous pouvons voir à l'œil nu ou dans les lunettes font partie d'une immense condensation, qui a la forme d'une lentille et à laquelle on a donné le nom de **Galaxie**. Le Soleil se trouve sensiblement dans le plan de symétrie de la Galaxie, et la Voie Lactée dessine, en perspective sur la voûte céleste, la région où la condensation des étoiles est la plus grande.

Bien au delà de la Galaxie, à des distances qui se mesurent en millions d'années-lumière, on trouve des systèmes analogues à notre

galaxie ; ce sont les nébuleuses extragalactiques, dont la plupart ont une forme caractéristique en spirale, et qui contiennent, comme notre galaxie, des milliards d'étoiles.

## LA SPHÈRE CÉLESTE

Le ciel semble former au-dessus de notre tête, lorsqu'il fait beau, une voûte immense concave, qui est bleue le jour, qui devient sombre la nuit, et sur laquelle les étoiles paraissent fixées comme des points brillants.

Pendant le jour, la lumière et la couleur du ciel proviennent de la diffusion des rayons solaires par l'air qui nous environne ; les molécules d'air diffusent ces rayons dans toutes les directions, comme le ferait une brume très fine ; ce sont le bleu et le violet qui sont surtout diffusés, tandis que, par transmission, c'est surtout le rouge qui passe. C'est pour cette raison que le ciel est bleu, et sa couleur est d'autant plus profonde que l'air est plus pur ; le Soleil et tous les astres, au contraire, deviennent plus rouges quand ils s'approchent de l'horizon, parce que l'épaisseur d'air traversée est plus grande. La lumière du ciel est tellement intense que nous ne voyons pas les étoiles pendant le jour ; pourtant elles sont présentes ; si nous regardons dans une lunette, nous pouvons distinguer les plus brillantes.

## LES CONSTELLATIONS

Dès l'antiquité, on a pris l'habitude de grouper les étoiles en figures ou constellations, dont les noms étaient généralement ceux des héros ou des animaux de la mythologie. La forme géométrique de quelques constellations explique leurs noms ; c'est le cas du Triangle, de la Couronne Boréale, de la Croix du Sud... Pour la plupart, le tracé est tout à fait conventionnel et il a demandé beaucoup d'imagination. Pratiquement, les constellations servent maintenant à désigner certaines régions du ciel. On compte pour l'ensemble du ciel (hémisphères boréal et austral), 88 constellations, dont 70 sont visibles, au moins en partie, dans nos régions.

Quelques étoiles, une cinquantaine au total, ont des noms individuels ; les uns sont des mots grecs, comme Procyon (Avant le Chien), ou latins, comme Régulus (le Petit Roi) ou Capella (la Chèvre) ; les autres ont une origine arabe, comme Véga, Rigel, Algol, etc... Certains forment une abréviation, employée dans la transcription en arabe du Catalogue de Ptolémée ; par exemple, Deneb signifie, en abrégé, la Queue de l'Oiseau.

La plupart du temps on désigne les étoiles les plus brillantes de chaque constellation par une lettre ; en principe, on emploie d'abord les lettres grecques, dans l'ordre de l'alphabet, puis les lettres latines, enfin, si c'est nécessaire, des nombres. Quand plusieurs étoiles sont sensiblement de même éclat dans une constellation, on fait suivre les lettres dans l'ordre des positions dans la figure, en commençant par la tête ; c'est le cas dans la Grande Ourse.

Pour les étoiles faibles, on a dressé des **Catalogues d'étoiles** ; la façon la plus simple de les désigner est d'indiquer leur numéro dans un de ces catalogues ; ainsi l'étoile H. D. 223.737 est celle qui porte ce numéro dans le « Henri Draper Catalogue ».

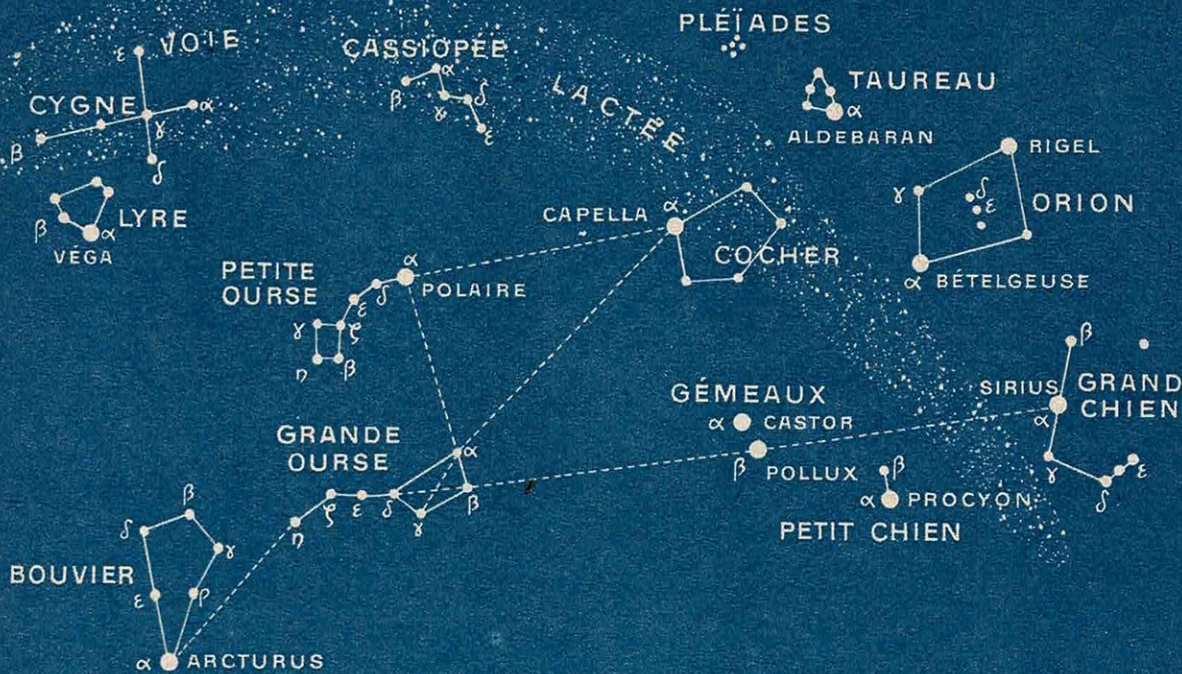
La méthode la plus facile pour identifier les constellations est celle des alignements.

## MAGNITUDES DES ÉTOILES

Les étoiles se distinguent nettement les unes des autres par leur plus ou moins grand éclat apparent, et aussi par leur couleur, qui, nous le verrons, est liée à leur température.

L'échelle qui sert à mesurer l'éclat apparent des étoiles est fondée sur celle qu'employaient, il y a 2 000 ans, les astronomes grecs. Ceux-ci avaient classé les étoiles, d'après leurs grandeurs apparentes (on emploie, de nos jours, le mot **magnitude** plutôt que grandeur), en six classes, en attribuant la première grandeur aux étoiles les plus brillantes et la sixième grandeur aux dernières étoiles visibles à l'œil nu. Notons tout de suite que les plus faibles grandeurs correspondent aux étoiles qui nous semblent les plus brillantes, c'est-à-dire à celles dont nous recevons la plus

LES VINGT ÉTOILES LES PLUS BRILLANTES							
	Magnitude	Spectre	Distance en années-lumière		Magnitude	Spectre	Distance en années-lumière
SIRIUS (α Grand Chien)	-1,58	A0	8,8	ALTAIR (α Aigle)	0,89	A5	15,7
CANOPUS (α Carène)	-0,86	F0	110	BETELGEUSE (α Orion)	0,5 à 1,1	M2	270
α CENTAURE	+0,06	G0	4,3	α CROIX DU SUD	1,05	B1	217
VÉGA (α Lyre)	0,14	A0	26,5	ALDEBARAN (α Taureau)	1,06	K5	57
CAPELLA (α Cocher)	0,21	G0	47	L'ÉPI (α Vierge)	1,21	B2	190
ARCTURUS (α Bouvier)	0,24	K0	38	POLLUX (β Gémeaux)	1,21	K0	30
RIGEL (β Orion)	0,34	B8	540	ANTARES (α Scorpion)	1,22	Ma	160
PROCYON (α Petit Chien)	0,48	F5	10,9	FOMALHAUT (α Poiss. Austral)	1,29	A3	27
ACHERNAR (α Eridan)	0,60	B5	72	DENEB (α Cygne)	1,33	A2	650
β CENTAURE	0,86	B1	163	REGULUS (α Lyon)	1,34	B8	60



## COMMENT IDENTIFIER RAPIDEMENT QUELQUES-UNES DES CONSTELLATIONS

En prolongeant la ligne des deux étoiles  $\alpha$  et  $\beta$  de la Grande Ourse on trouve la Polaire, étoile principale de la Petite Ourse. Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, est sur le prolongement de la Grande Ourse, qui rencontre Pollux et Castor et passe près de Procyon. On trouvera facilement d'autres alignements sur les cartes des pages 18, 19.

grande quantité de lumière. La découverte des lunettes a, bien entendu, conduit à étendre l'échelle au delà de la magnitude 6 ; ainsi on attribue la magnitude 21 aux étoiles les plus faibles qui peuvent être photographiées avec les télescopes actuellement en service.

On a été ainsi amené à définir d'une manière précise l'échelle des magnitudes. On s'est aperçu que cette classification reposait sur une propriété singulière : quand on dit que deux étoiles diffèrent d'une magnitude, les quantités de lumière que nous recevons d'elles ne diffèrent pas d'une valeur constante, mais c'est leur rapport qui est constant. (Les psychologues ont reconnu que l'on trouve une relation analogue entre la sensation et l'excitation pour d'autres sens que la vue ; c'est ce qu'ils expriment par la loi de Fechner). Pour conserver autant que possible l'ancienne classification, on a été conduit à admettre que, lorsque deux étoiles diffèrent d'une magnitude, le rapport des quantités de lumière que nous recevons d'elles, est égal à 2,512. Le choix du nombre 2,512 provient de ce que l'on a  $(2,512)^5 = 100$  ; en effet, une différence de 5 magnitudes correspond à des éclats apparents dans le rapport de 100 à 1.

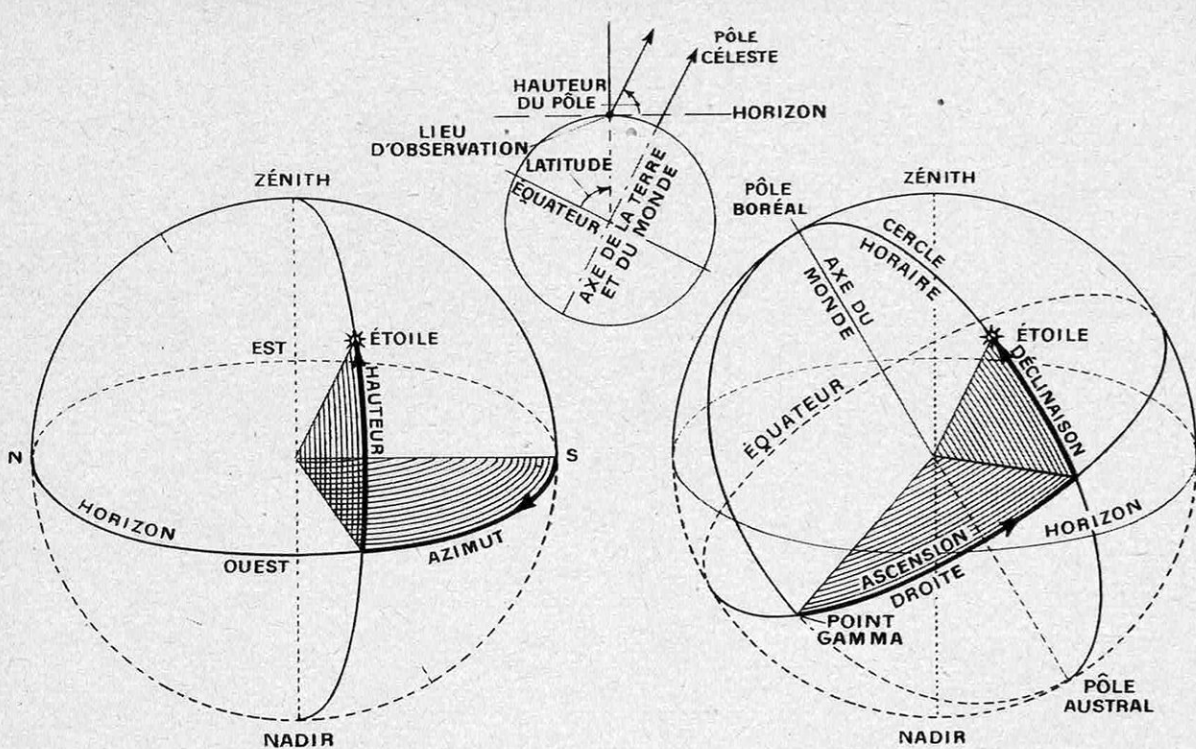
On trouvera les magnitudes de quelques étoiles, en même temps que d'autres données, dans le tableau ci-contre. On remarquera que le choix de l'échelle des magnitudes mène à attribuer une magnitude négative aux deux étoiles les plus brillantes : Sirius et Canope.

## POSITIONS APPARENTES DES ÉTOILES

Chaque étoile a, sur la sphère céleste, une position apparente où elle se projette ; cette position définit seulement la direction de l'étoile.

La distance de deux étoiles sur la sphère céleste s'exprime par un angle et non, évidemment, par une mesure linéaire. (Dans certains cas, on évalue aussi la distance linéaire, par exemple en années-lumière, mais c'est un tout autre problème.) Cet angle est appelé la distance apparente ou la **distance angulaire**. Ainsi la distance angulaire entre les étoiles  $\alpha$  et  $\beta$  (les Gardes) de la Grande Ourse est de 5 degrés. Pour estimer les distances angulaires entre deux étoiles que l'on aperçoit sur la voûte céleste, il est utile de se rappeler que le diamètre apparent du Soleil ou de la pleine Lune est sensiblement égal à un demi-degré.

Au lieu de mesurer la distance angulaire de deux étoiles, on peut aussi définir la position d'un astre par sa distance angulaire à deux lignes de référence. On dit alors que l'on détermine les **coordonnées** de l'astre. Parmi les lignes de référence les plus souvent employées, il y a, pour un observateur terrestre, le cercle horizon et le **méridien céleste**. Ce dernier est le plan vertical qui passe par le pôle céleste nord. On détermine par rapport à ces deux lignes ou plans la **hauteur** d'un astre et son **azimut** (page suivante).



## COMMENT ON REPÈRE LES POSITIONS DES ASTRES SUR LA SPHÈRE CÉLESTE

Dans le système de coordonnées locales (à gauche), la position est définie par la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon et son azimut, mesuré à partir du sud. Ces mesures varient avec le temps et le lieu d'observation. Les coordonnées équatoriales (à droite) sont les plus utilisées par les astronomes; ce sont la déclinaison, angle du rayon visuel de l'observateur avec l'équateur céleste, et l'ascension droite, évaluée en heures, minutes et secondes à partir du point gamma (voir page 23). Ces coordonnées sont invariables, car la sphère céleste semble tourner d'un seul bloc autour de la ligne des pôles terrestres qui est appelée pour cela axe du monde. On voit, sur le petit croquis, qu'en un lieu la hauteur du pôle céleste au-dessus de l'horizon est égale à la latitude de ce lieu.

## MOUVEMENT DIURNE DE LA SPHÈRE CÉLESTE

Nous savons que le Soleil se lève, chaque jour, à l'est, en un point de l'horizon d'ailleurs variable selon la saison; il se déplace et atteint à midi sa position la plus haute au-dessus de l'horizon; il est alors dans le plan méridien, vers le sud. Il continue sa course et descend vers l'horizon ouest, où il finit par disparaître.

La Lune, elle aussi, qu'elle soit visible pendant le jour ou pendant la nuit, se lève à l'est et se couche à l'ouest.

Ces mouvements du Soleil et de la Lune sont une conséquence du mouvement diurne de la sphère céleste, qui tourne sur elle-même de l'est à l'ouest en entraînant avec elle tous les astres qu'elle porte; elle fait un tour complet en un jour.

Ce déplacement des étoiles attire moins notre attention que celui du Soleil, mais il est facile à constater sans avoir besoin d'aucun appareil en regardant le ciel pendant une belle nuit. La sphère céleste entière, avec les étoiles qui semblent fixées sur elle, paraît tourner autour d'un axe, l'axe du monde et chaque étoile semble décrire un cercle ou un arc de cercle.

## ROTATION DE LA TERRE

On a cru autrefois, et pendant très longtemps — jusqu'à Copernic (1453) —, que le Soleil, la Lune et les étoiles tournaient réellement autour de la Terre, qui était donc le centre du monde. Mais on sait maintenant que ce n'est qu'une apparence. En fait, le ciel est immobile et c'est la Terre qui tourne sur elle-même, dans le sens inverse du mouvement apparent de rotation, donc de l'ouest vers l'est.

Les apparences étant les mêmes, comment pouvons-nous reconnaître quel est le mouvement réel? Plusieurs preuves s'accordent pour démontrer que c'est bien la Terre qui tourne, et non le ciel. Les uns font intervenir le bon sens ou l'analogie; Copernic et Galilée ont dû se contenter de preuves de cette nature et ils n'ont pu présenter à leurs contemporains un argument convaincant pour démontrer la rotation de la Terre. On comprend, dans ces conditions, la résistance que leurs idées ont rencontrée: l'idée que la Terre tournait a paru vraiment révolutionnaire; elle faisait, d'une part, perdre à notre globe son importance dans l'univers, à laquelle on croyait depuis les temps ancestraux; de plus, il était difficile d'admettre que notre Terre tourne sur elle-même, à la

vitesse de 1 700 kilomètres à l'heure à l'équateur, sans que les hommes s'en aperçoivent autrement que par la rotation apparente de la sphère céleste. De nos jours, nous avons des preuves directes. Ainsi nous pouvons dire que les **compas gyroscopiques**, utilisés pour guider la marche des navires, sont orientés par la rotation de la Terre et ne fonctionneraient pas si cette rotation n'avait pas lieu. Mais la preuve la plus célèbre est celle du pendule de Foucault.

## LE PENDULE DE FOUCAULT

Cette expérience fameuse a été réalisée pour la première fois à Paris en 1851, par le physicien français Foucault, et elle a été répétée bien des fois depuis.

L'inertie d'un pendule qui oscille maintient son plan d'oscillation invariable, même si son support se déplace. C'est ce que l'on vérifie grossièrement en prenant pour pendule une bille pendue par un fil à un cadre, que l'on place sur une plate-forme qui peut tourner ; on constate que, lorsque le cadre tourne, le plan d'oscillation garde une orientation.



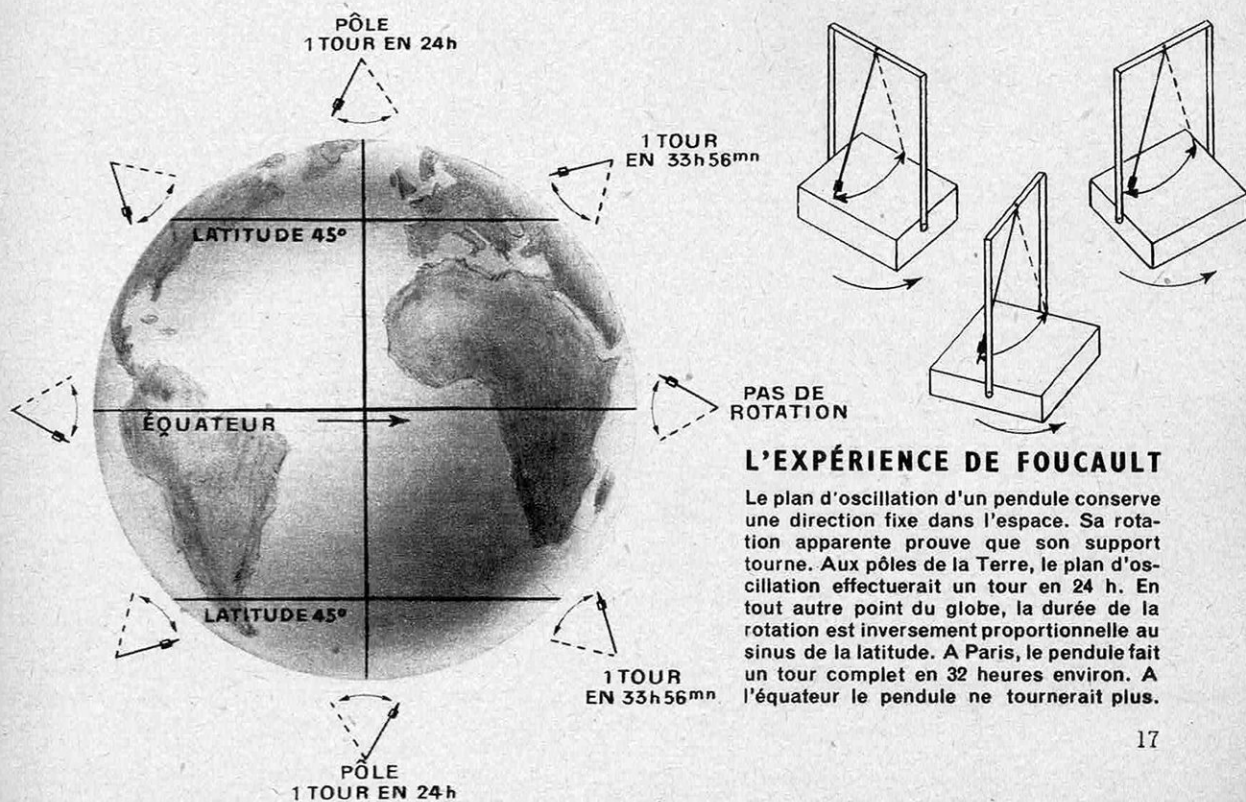
● Traines des étoiles circumpolaires (pose de 2 heures environ). Le trait voisin du centre est dû à la Polaire, à 1° du pôle.

constante, aux frottements près. Pour montrer la rotation de la Terre, on prend un pendule très long et lourd, dont la suspension exerce le moins de frottement possible et permet l'oscillation dans un plan quelconque. Le pendule employé par Foucault était formé d'une boule métallique de 28 kg, suspendue par un fil d'acier de 67 mètres de longueur à la voûte du Panthéon.

On a primitivement écarté le pendule de sa position d'équilibre et on l'a maintenu, au repos, au moyen d'un fil ; en mettant le feu à ce fil, on a laissé osciller le pendule, sans lui communiquer aucune tendance à un mouvement latéral. En oscillant lentement, il venait renverser, vers les deux extrémités de sa course, une arête de sable disposée en cercle

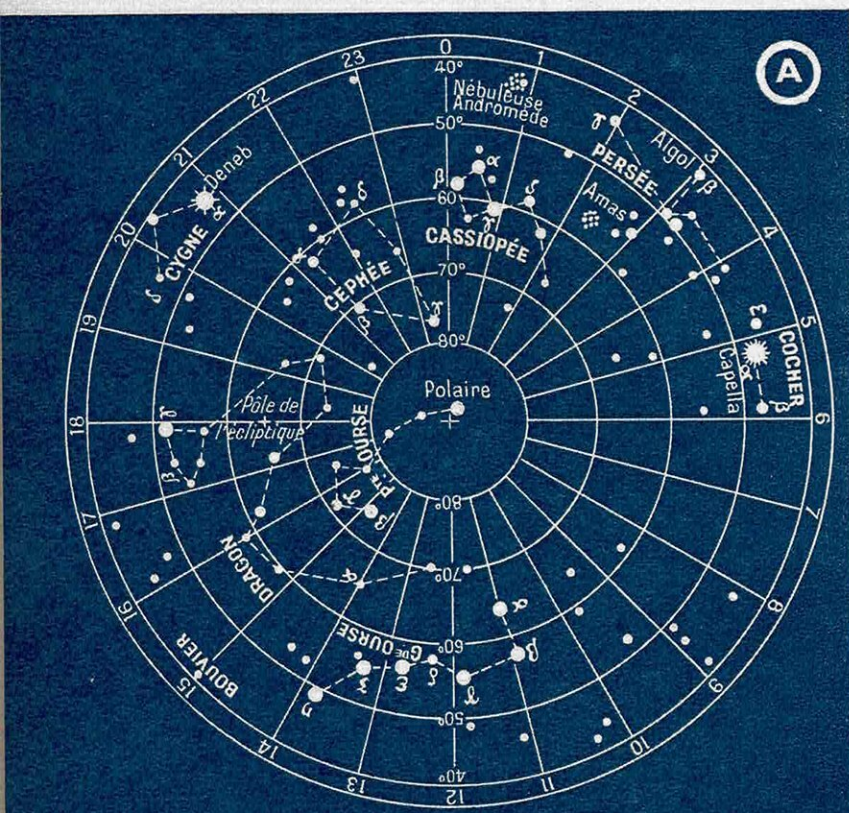
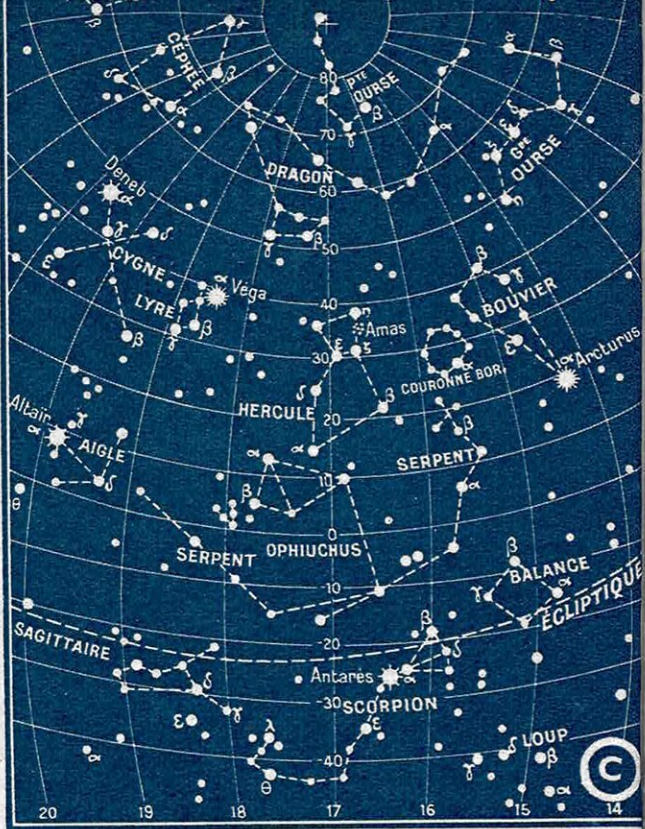
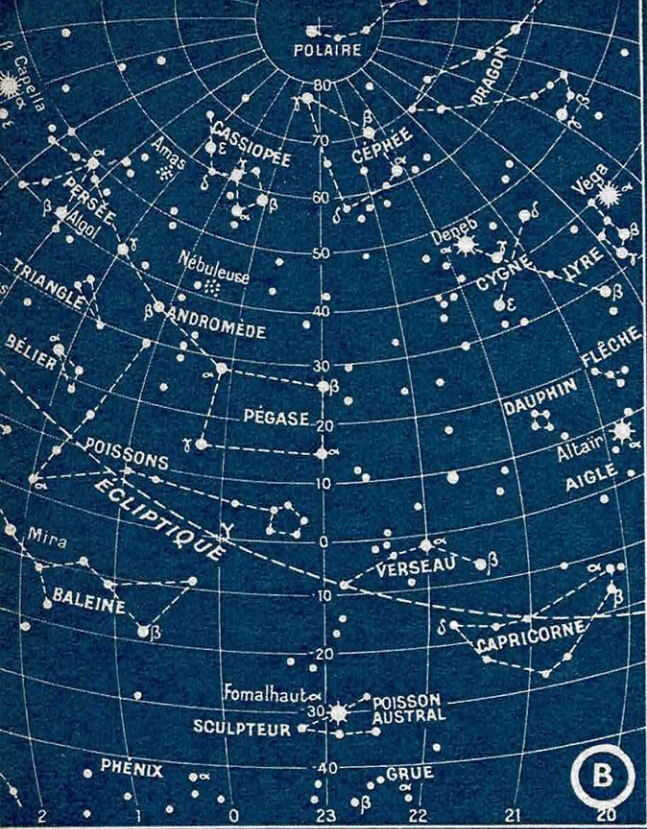
autour de lui, qu'il ébréçait au moyen d'une aiguille fixée à sa partie inférieure. Les personnes qui assistèrent à l'expérience, constatèrent qu'à chaque oscillation le pendule décapitait l'arête du sable en un point différent. On peut donc dire que, ce jour là, **on vit tourner la Terre.**

L'interprétation de l'expérience serait très



## L'EXPÉRIENCE DE FOUCAULT

Le plan d'oscillation d'un pendule conserve une direction fixe dans l'espace. Sa rotation apparente prouve que son support tourne. Aux pôles de la Terre, le plan d'oscillation effectuerait un tour en 24 h. En tout autre point du globe, la durée de la rotation est inversement proportionnelle au sinus de la latitude. A Paris, le pendule fait un tour complet en 32 heures environ. A l'équateur le pendule ne tournerait plus.



**CARTES DU CIEL** Les quadrillages sont formés, d'une part des cercles horaires qui passent tous par le pôle céleste nord (celui marqué zéro passe en outre par le point vernal ou  $\gamma$ ), d'autre part des cercles d'égale déclinaison. La carte A représente la région du ciel ne comprenant que des étoiles qui sont circumpolaires dans nos régions. Sur les autres, la ligne centrale de chaque figure représente le méridien à 21 heures (tenir compte des modifications de l'heure légale) respectivement le 21 octobre, 21 juillet, 21 avril, 21 janvier.

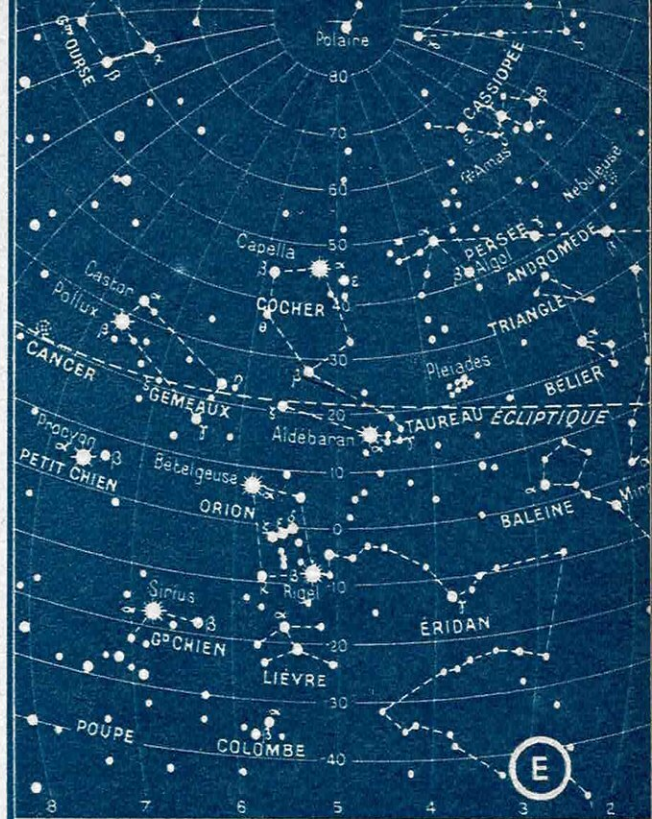
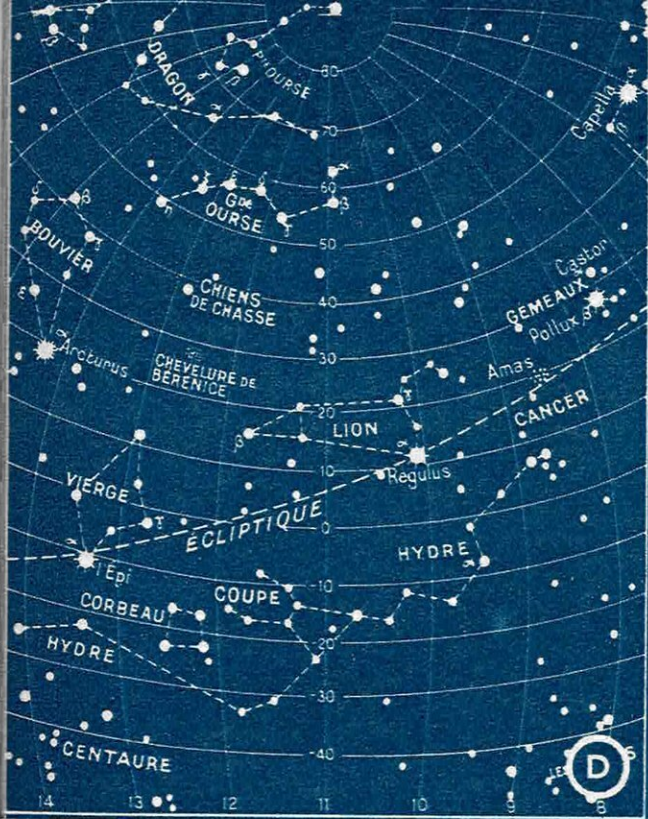
simple si elle pouvait être réalisée au pôle ; le plan du pendule semblerait alors tourner de  $360^\circ$  en un jour. On démontre que pour les autres latitudes la rotation est plus lente. On calcule, par exemple, qu'à Paris une révolution complète doit exiger 32 heures ; c'est ce que l'expérience a confirmé.

**ASCENSION DROITE ET DÉCLINAISON**

Nous sommes donc certains que la Terre tourne sur elle-même, de l'ouest à l'est. L'axe du monde est l'axe de rotation de la Terre. La régularité du mouvement apparent des étoiles est due à l'uniformité de la rotation de la Terre, qui se poursuit dans l'espace depuis des millions d'années.

Les coordonnées locales (hauteur et azimut) d'un astre changent avec le temps et avec la position de l'observateur. Nous allons maintenant montrer comment la connaissance du mouvement diurne permet de définir des coordonnées absolues, dites **coordonnées équatoriales**, qui sont celles le plus souvent utilisées.





Ces coordonnées font intervenir, comme éléments de référence, le pôle et l'équateur célestes.

Les pôles célestes, nord et sud, sont les deux points où l'axe du monde perce la sphère céleste. L'équateur céleste est le grand cercle perpendiculaire à l'axe des pôles.

Considérons alors une étoile sur la sphère céleste et le demi-grand cercle, dit **cercle horaire**, qui contient l'étoile et passe par les deux pôles célestes. Les coordonnées de l'étoile sont définies par : l'**ascension droite**, angle dièdre du cercle horaire de l'étoile avec un cercle horaire pris pour origine, qui contient un point particulier de l'équateur céleste dit **point vernal** ou point gamma ; la **déclinaison**, angle du rayon visuel avec le plan de l'équateur. Ces deux coordonnées sont invariables.

La déclinaison s'exprime en degrés ; on la fait précéder du signe + ou -, suivant que l'étoile est au nord ou au sud de l'équateur. Par contre, on a pris l'habitude de donner l'ascension droite en heures, bien qu'il s'agisse d'un angle, 24 heures étant équivalentes à 360°

## MOUVEMENT DIURNE AUX DIVERSES LATITUDES

Puisque l'axe du monde est perpendiculaire à l'équateur, les cercles décrits par les étoiles dans leur mouvement diurne sont eux mêmes parallèles à l'équateur.

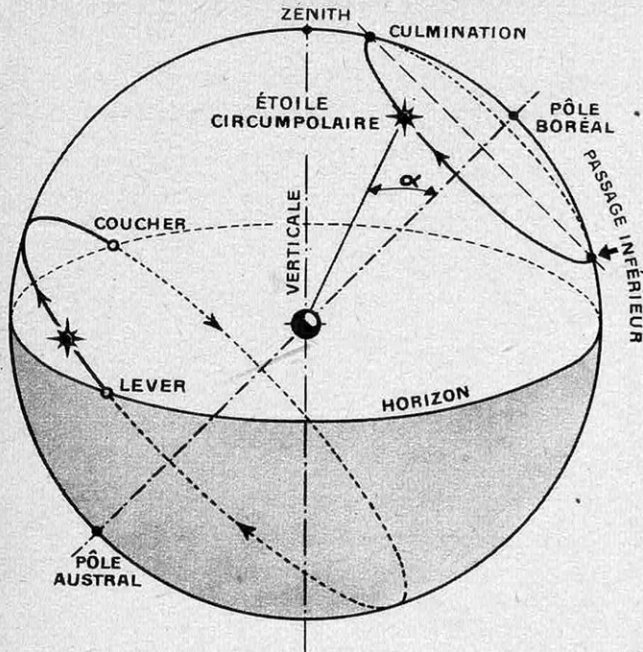
Par conséquent, au pôle, tous les cercles diurnes sont parallèles à l'horizon, puisque le pôle céleste est confondu avec le zénith. Les étoiles ne se lèvent pas et ne se couchent pas ; elles se déplacent parallèlement à l'horizon. Le Soleil lui-même, lorsqu'il est visible, reste jour et nuit au-dessus de l'horizon (soleil de minuit) pendant six mois.

À l'équateur, au contraire, les pôles célestes sont à l'horizon, confondus avec le sud et le nord géographiques. L'équateur céleste est perpendiculaire à l'horizon et passe par le zénith. Tous les cercles diurnes sont perpendiculaires à l'horizon. Si nous négligeons l'effet de la réfraction atmosphérique, qui, comme nous le verrons, semble relever un peu les astres au-dessus de l'horizon, toutes les étoiles restent pendant 12 heures visibles et pendant 12 heures invisibles. De même, les jours et les nuits durent tous 12 heures.

Remarquons que l'équateur est le seul endroit de la Terre où l'on voit toutes les étoiles, d'un pôle céleste à l'autre.

## L'ÉCLIPTIQUE ET LE ZODIAQUE

C'est un fait d'observation bien connu que l'on ne voit pas les mêmes constellations dans le ciel au cours de l'année. Par exemple, la belle étoile bleue Vega ( $\alpha$  Lyre) est voisine du zénith, dans nos régions, au début de la nuit pendant le mois d'août ; si nous l'observons à la même heure pendant les mois suivants, nous la trouvons de plus en plus écartée



## ← MOUVEMENT DIURNE DES ÉTOILES

La sphère céleste fait une rotation complète en 24 h autour de l'axe des pôles de la terre (axe du monde).

Soleil un peu avant son lever ou après son coucher. Ainsi, au mois de mars, la constellation du Taureau et les Pléiades se couchent peu après le Soleil, tandis que le Capricorne se lève avant lui ; le Soleil est donc voisin de la constellation des Poissons.

Il est d'ailleurs évident que non seulement le Soleil se déplace vers l'est d'un jour à l'autre, mais aussi qu'il s'éloigne plus ou moins de l'équateur. En effet, le Soleil monte très haut, en été, au-dessus de l'horizon et les jours sont longs ; en hiver, il est toujours relativement bas et les journées sont courtes.

En mesurant les coordonnées équatoriales du centre du Soleil, comme on mesure celles d'une étoile, on détermine avec précision sa position apparente et son mouvement. On trouve qu'en gros l'ascension droite du Soleil augmente de 4 minutes (1 degré) par jour et que sa déclinaison varie entre  $+ 23^{\circ} 27'$  et  $- 23^{\circ} 27'$ . En un an, le Soleil semble décrire sur la sphère céleste un grand cercle incliné de  $23^{\circ} 27'$  sur l'équateur céleste ; on l'appelle l'**écliptique**

Ce cercle coupe l'équateur en deux points. L'un d'eux est le point vernal ou point  $\gamma$  ; c'est le point où le Soleil coupe l'équateur céleste au premier jour du printemps, en passant du sud vers le nord. Rappelons que le point vernal sert d'origine pour la mesure des ascensions droites. On détermine sa position avec une grande précision. On appelle aussi ce point l'**équinoxe du printemps**, tandis que le point opposé sur le cercle de l'écliptique est l'**équinoxe d'automne**. On a choisi ces mots pour exprimer le fait que, la déclinaison du Soleil étant nulle, la durée du jour est, à ces deux moments,

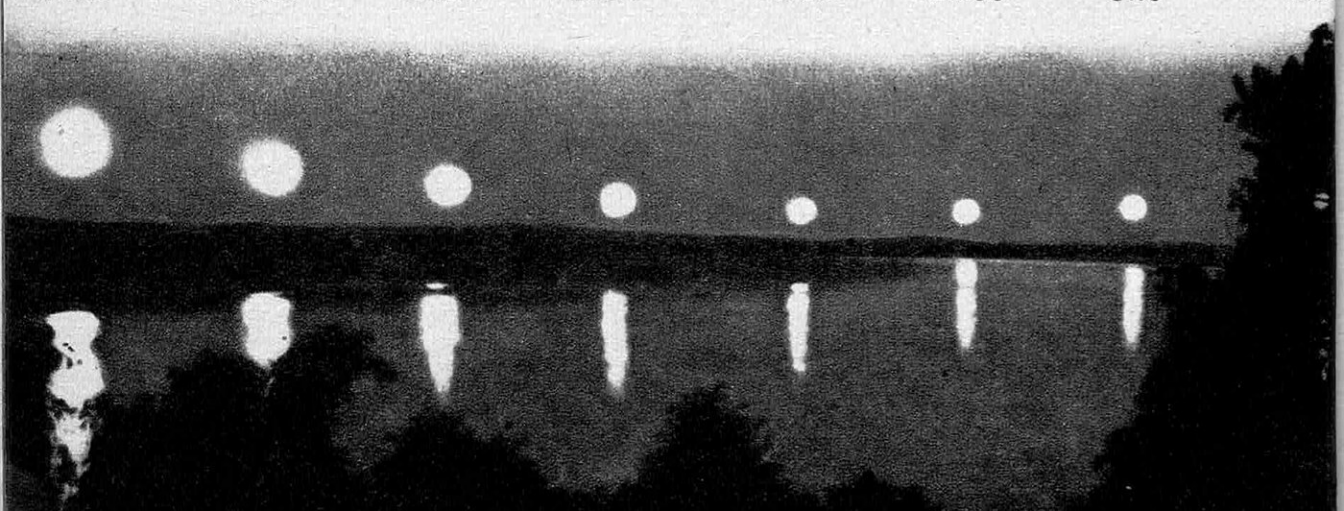
du zénith, vers l'ouest ; en décembre, elle disparaît à l'horizon vers 21 heures. De même, la constellation d'Orion, peut être une des plus splendides du ciel, est visible en décembre au début de la nuit, puis elle apparaît de plus en plus haute dans le ciel chaque soir ; au printemps, elle disparaît déjà à l'ouest au moment où le Soleil se couche. Ainsi, les constellations sont chaque soir à la même heure un peu déplacées vers l'ouest.

Ce mouvement vers l'ouest prouve que le Soleil lui-même se meut vers l'est par rapport aux constellations, puisque les étoiles sont chaque soir en avance par rapport au Soleil. Il retrouve sa place au bout d'un an.

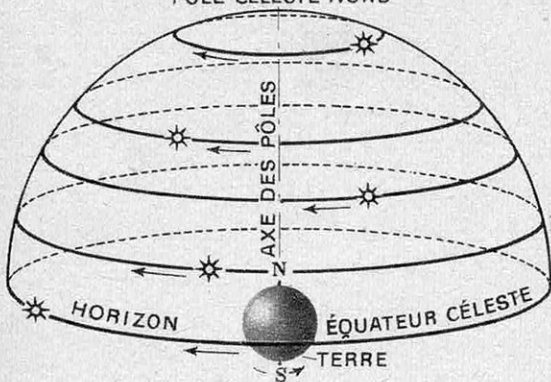
On peut facilement constater ce mouvement du Soleil à travers les constellations. Cette observation avait été faite par les Anciens. On ne peut pas voir simultanément le Soleil, à cause de son éclat, et les étoiles, mais ils avaient noté les constellations voisines du

● Au delà du cercle polaire, le Soleil, pendant plusieurs jours chaque année, s'abaisse sur l'horizon avant minuit pour se relever ensuite. C'est le « Soleil de minuit ». Six mois plus tard, le Soleil ne se lèvera pas, même à midi.

22.10      22.30      22.50      23.10      23.30      23.50      0.10      0.30



PÔLE CÉLESTE NORD

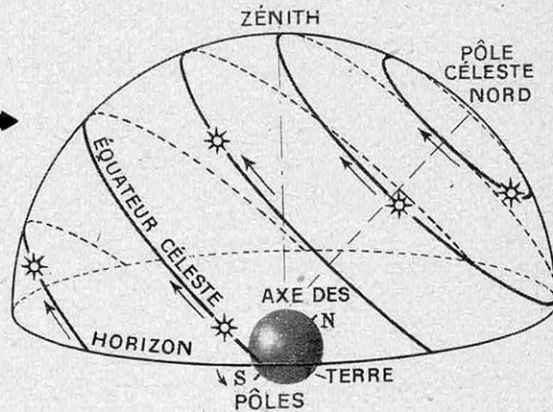


## TRAJECTOIRES APPARENTES DES ÉTOILES SUIVANT LA LATITUDE DE L'OBSERVATEUR

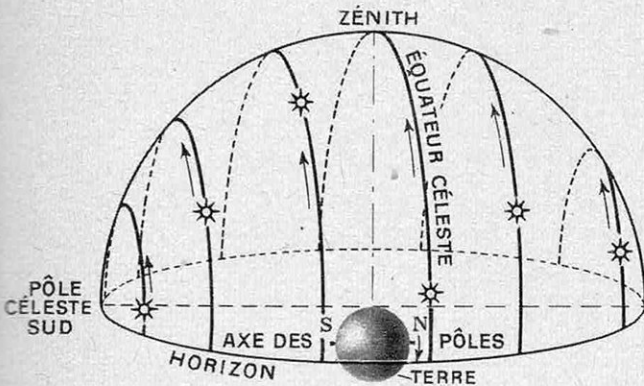
L'inclinaison de l'axe de rotation apparent de la sphère céleste (axe du monde) croît quand l'observateur se rapproche de l'équateur terrestre.

← AU POLE (latitude 90°)

→ A LA LATITUDE 45° nord. →



← A L'EQUATEUR (lat. 0°).



égale à celle de la nuit (équinoxe signifie, en abrégé, que la nuit égale le jour). On a dessiné le tracé de l'écliptique sur les cartes du ciel (page 18). On voit que l'équinoxe d'automne se trouve sensiblement entre l'Epi ( $\alpha$  Vierge et Regulus ( $\alpha$  Lion), et l'équinoxe de printemps juste au sud du Carré de Pégase. Quant aux deux points où la déclinaison du Soleil passe par sa valeur maximum, on leur a donné les noms de **solstice d'été** et **solstice d'hiver**; en latin « sol stat » signifie : le Soleil s'arrête ; en effet, aux périodes des solstices, la déclinaison du Soleil varie très peu d'un jour à l'autre, et c'est le moment où la durée du jour, atteignant sa valeur maximum, reste sensiblement constante (21 ou 22 juin et 21 ou 22 décembre).

Le **Zodiaque** est la bande de la sphère céleste qui s'étend à 8° de part et d'autre de l'écliptique. Le Soleil, évidemment, mais aussi la Lune et les planètes (à l'exception de Vénus et du Pluton) se trouvent toujours dans cette bande. Les Anciens l'ont divisée, perpendiculairement à l'écliptique, en 12 constellations, chacune large de 30°, auxquelles ils ont attribué des symboles ; ce sont les signes du Zodiaque.

L'astrologie accordait une grande importance à ces signes. A cause du déplacement du point vernal sur l'écliptique, dont nous reparlerons, il se trouve que le Soleil est maintenant situé dans la constellation des Poissons au moment de l'équinoxe de printemps, alors que, du temps d'Hipparque, il était dans le Bélier. La lettre  $\gamma$ , par laquelle

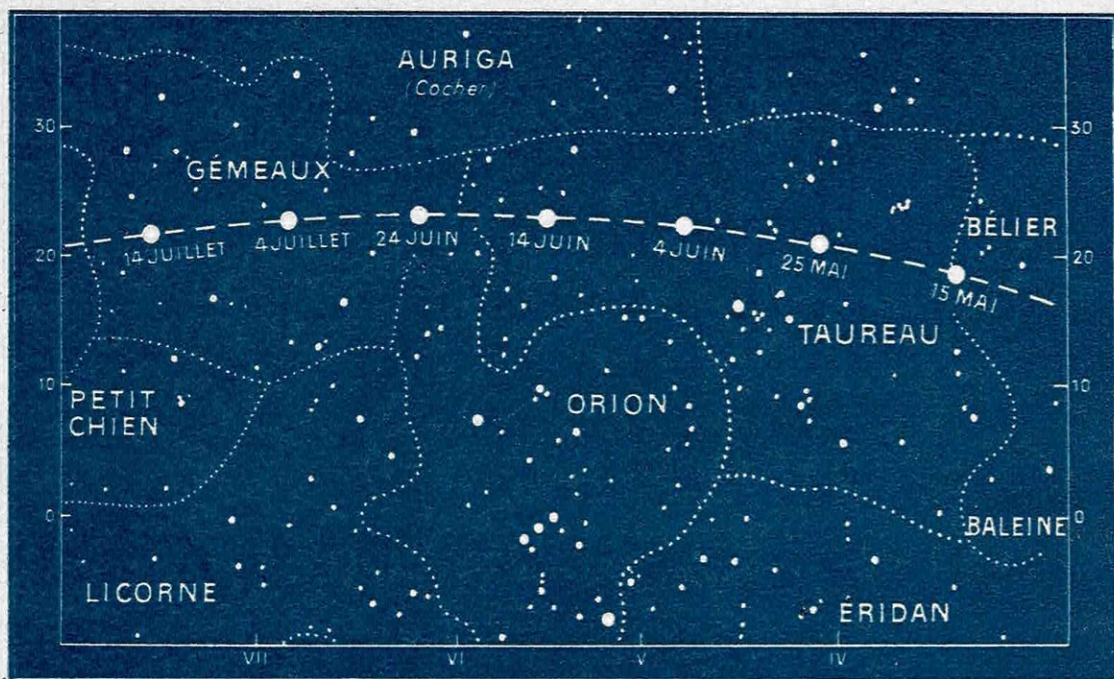
on désigne souvent le point vernal, correspond à une corruption graphique du signe qui représentait le Bélier.

## MOUVEMENT DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL

Ainsi le Soleil semble se déplacer parmi les constellations et décrire en un an le grand cercle de l'écliptique. Les Anciens croyaient que le Soleil, comme les planètes, tournait effectivement autour de la Terre. En réalité, c'est la Terre qui décrit l'écliptique autour du soleil.

Copernic, le premier, a affirmé que la Terre tourne, comme toutes les planètes, autour du Soleil. Mais il n'a pas pu apporter de preuves convaincantes en faveur de son idée, tandis que nous en connaissons maintenant plusieurs. L'une d'elles repose sur les mesures des déplacements des raies dans les spectres des étoiles, dus au mouvement de la Terre autour du Soleil (effet Doppler-Fizeau) ; en effet, suivant la position de la Terre sur son orbite, la vitesse radiale d'une étoile s'ajoute ou se retranche à la vitesse orbitale de la Terre.

Une autre preuve est apportée par l'observation suivante : le diamètre moyen de l'orbite terrestre autour du Soleil étant relativement grand, nous ne voyons pas les étoiles les plus proches dans la même position par rapport aux étoiles lointaines lorsque la Terre se trouve en deux positions diamétralement opposées de sa course annuelle



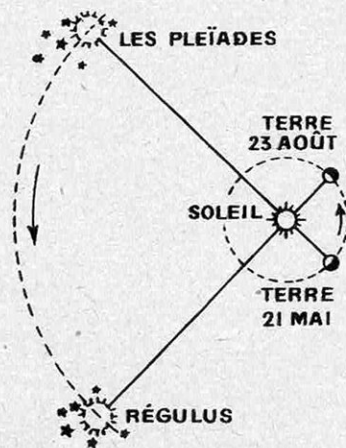
● Le Soleil semble se déplacer lentement vers l'est parmi les constellations. En une année, il semble ainsi décrire un grand cercle de la sphère céleste incliné de  $23^{\circ} 27'$  sur l'équateur. Ce grand cercle a reçu le nom d'écliptique.

(effet de parallaxe). Cette observation est mise à profit pour évaluer les distances des étoiles les plus proches. Le déplacement est toujours très faible, inférieur pour toutes les étoiles à une seconde d'arc. C'est précisément parce que cet effet est inappréciable sans lunettes qu'Aristote et ses élèves, puis, plus tard, Tycho Brahe admirent la théorie de la Terre immobile.

Mais la preuve que l'on présente le plus souvent est celle tirée du phénomène de l'aberration, découvert en 1726 par l'astronome anglais Bradley. L'aberration consiste en un déplacement annuel apparent des étoiles, dû à la composition de la vitesse de la lumière et de la vitesse de la Terre sur son orbite (page 24).

Supposons qu'une étoile se trouve, sur la sphère céleste, dans la direction perpendiculaire au plan de l'écliptique ou, comme on dit, au pôle de l'écliptique. Si la Terre était immobile, la direction de l'étoile serait la direction perpendiculaire à l'écliptique. Mais si la Terre se déplace sur son orbite, à une vitesse de 30 kilomètres par seconde environ, la direction apparente de l'étoile variera avec la position de la Terre ; dans la position 1 (page 24), elle paraîtra déviée vers la droite ; dans la position

3, vers la gauche. Ainsi l'étoile semblera décrire dans le ciel une petite orbite, qui aura exactement même forme que l'orbite de la Terre, l'étoile étant constamment en avance de  $90^{\circ}$  sur le mouvement orbital de la Terre. Le rayon moyen de cette orbite est très petit, sensiblement  $20''$ , 6. Pour une étoile située dans le plan de l'écliptique, l'orbite apparente se réduit à une portion de droite, longue de  $41''$ . Enfin, pour une étoile ayant une position quelconque entre l'écliptique et son pôle, l'orbite apparente est une ellipse plus ou moins aplatie, mais dont le grand axe a toujours la même valeur :  $41''$ .



● Mouvement apparent du Soleil dû à la révolution de la Terre suivant son orbite.

## LA MESURE DU TEMPS

La mesure du temps est liée à la rotation de la Terre autour de son axe. Les astronomes utilisent plusieurs sortes de temps, notamment le temps sidéral et le temps solaire. Un jour sidéral est l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du point vernal au méridien d'un lieu.

Un jour solaire vrai est l'intervalle entre deux passages consécutifs du centre du Soleil au méridien d'un lieu. La Terre

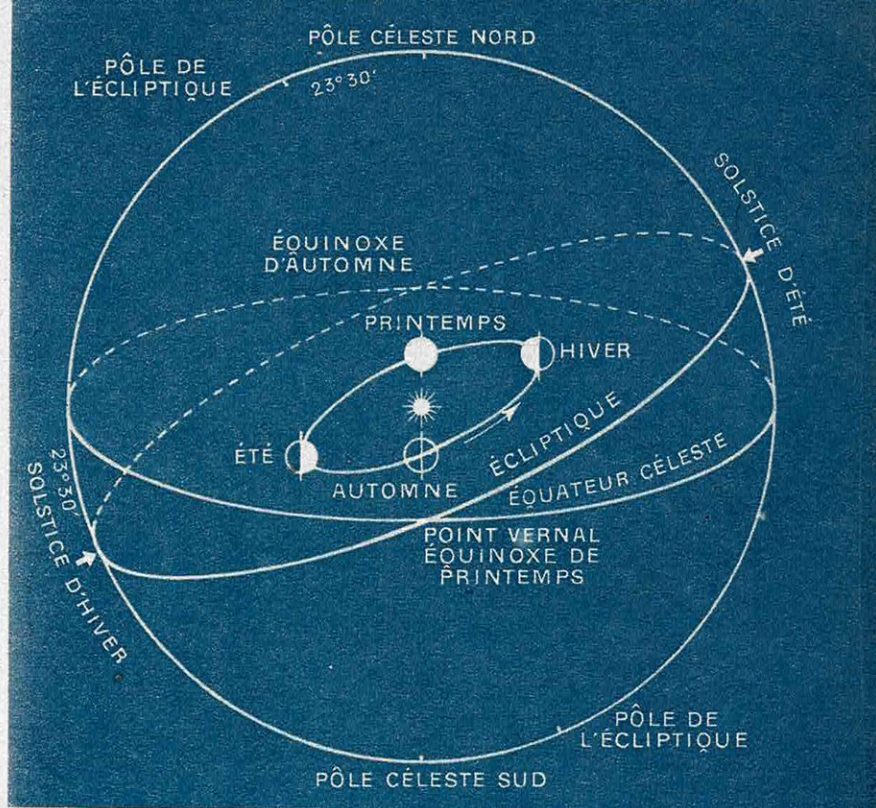
L'écliptique coupe l'équateur céleste au point gamma. L'angle de l'écliptique et de l'équateur est le même que celui de l'équateur avec le plan de l'orbite terrestre.

tournant autour du Soleil, le jour sidéral est plus court de 4 minutes que le jour solaire (exactement de 3 minutes, 55 secondes, 909 de temps solaire). Autrement dit, il y a, en une année, un jour sidéral de plus qu'il n'y a de jours solaires, parce que la révolution de la Terre autour du Soleil supprime un jour solaire.

L'avantage du temps sidéral est le suivant : à l'instant du passage supérieur d'un astre au méridien, le temps sidéral est égal à l'ascension droite de l'astre. En effet, l'horloge sidérale marque zéro heure au moment du passage au méridien du point vernal, origine pour la mesure des ascensions droites.

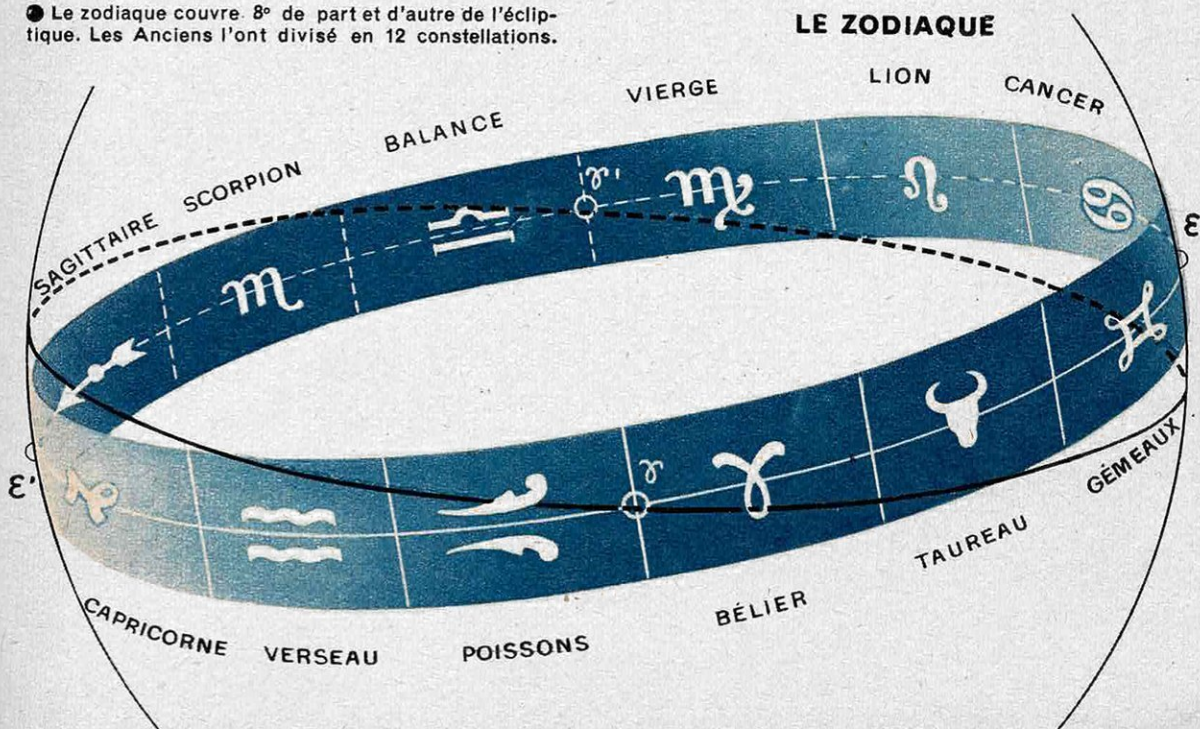
Si une étoile, Sirius par exemple, a une ascension droite égale à 6 h 42 minutes, cela signifie qu'elle passera au méridien 6 h 42 minutes (sidérales) après le point vernal.

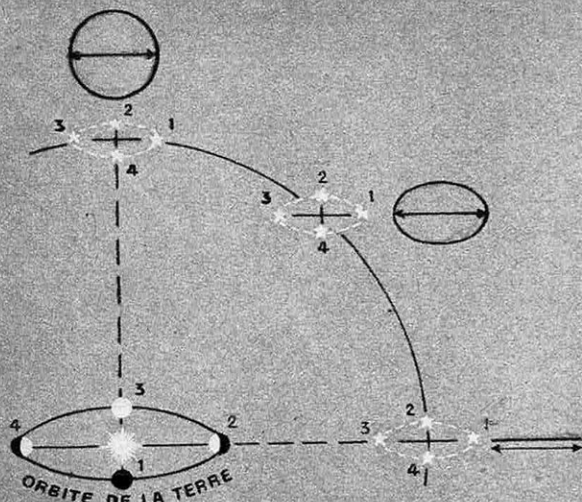
Quant au temps solaire, on n'utilise, dans la pratique, le temps solaire vrai que lorsqu'il s'agit de déterminer exactement la position du Soleil ; mais on ne peut pas régler les horloges en temps solaire vrai, puisque les jours solaires vrais ne sont pas constants (à cause de la nature elliptique de l'orbite de la Terre



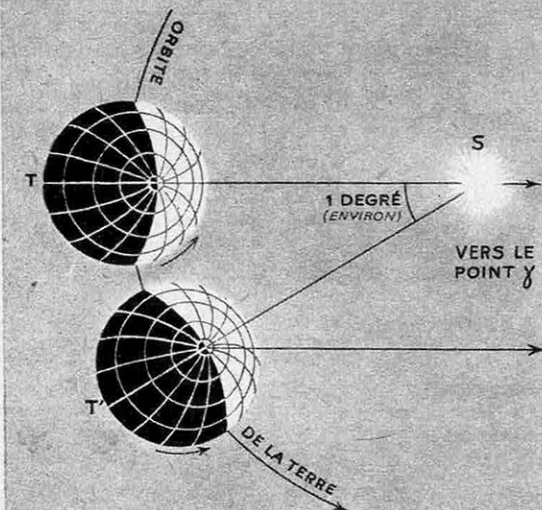
et de ses variations de vitesse). On règle les horloges en **temps solaire moyen** ; celui-ci correspond au mouvement qu'aurait le Soleil s'il se déplaçait d'un mouvement uniforme sur l'équateur céleste, en le décrivant exactement dans le temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs du Soleil au point vernal. Ainsi, le jour solaire moyen a une longueur constante, égale à la moyenne annuelle des jours solaires vrais. On peut connaître, chaque jour, le temps solaire vrai d'après la valeur de

● Le zodiaque couvre 8° de part et d'autre de l'écliptique. Les Anciens l'ont divisé en 12 constellations.





● Par suite de la rotation de la Terre autour du Soleil les étoiles semblent décrire des ellipses sur la sphère céleste. C'est le phénomène de l'aberration annuelle.



● En T, Soleil et point gamma passent ensemble au méridien (21 mars). Le lendemain, la Terre s'étant déplacée, le point gamma y passe avant le soleil.

l'équation du temps, qui est donnée par des tableaux ou des graphiques, et qui est égale à la différence : temps moyen moins temps vrai, à un même instant. L'équation du temps varie peu d'un jour à l'autre et sa variation est sensiblement la même d'une année à l'autre. Sa valeur maximum est de l'ordre de 16 à 17 minutes.

Dans la vie courante, on utilise le temps légal, comme nous l'expliquerons plus loin.

## LES SAISONS

L'écliptique est divisé en 4 parties, correspondant aux saisons, par les deux équinoxes et les deux solstices.

A cause des inégalités du mouvement du Soleil, les durées des saisons ne sont pas égales. Ainsi, actuellement, les durées moyennes des saisons sont :

printemps : 92 jours 20 h ;

été : 93 jours 15 h ;

automne : 89 jours 12 h ;

hiver : 89 jours.

On voit que la saison la plus longue est l'été ; la plus courte, l'hiver, avec un peu plus de quatre jours de moins.

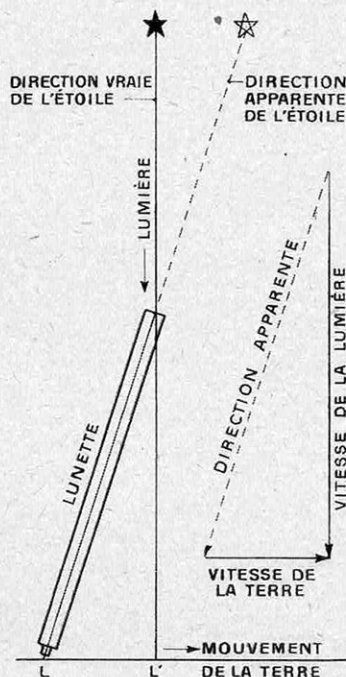
Plusieurs facteurs interviennent pour produire les variations saisonnières de la température. Ainsi, d'une part, en été, la durée du

jour étant plus grande que celle de la nuit, le Soleil nous éclaire pendant un plus grand nombre d'heures qu'en hiver. De plus, le Soleil se trouvant plus haut au-dessus de l'horizon, la chaleur et la lumière tombent moins obliquement sur le sol et sont mieux absorbées. Enfin, les rayons solaires ont à traverser une couche d'air moins épaisse pour nous parvenir.

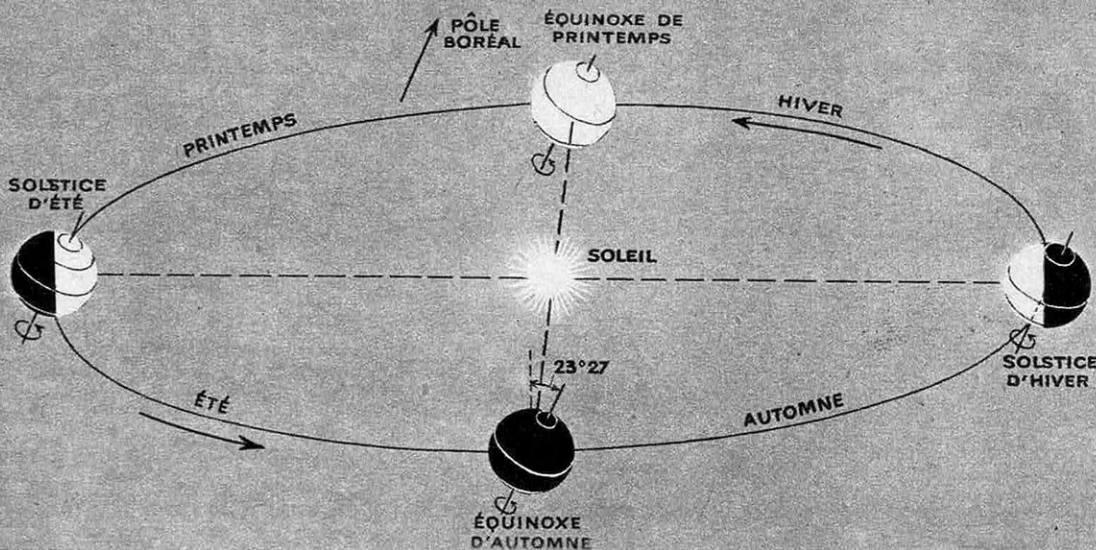
Il est intéressant de remarquer qu'au moment du solstice d'été, le Soleil monte plus près du zénith à Paris qu'à l'équateur et que la durée du jour y est plus longue, de sorte que la quantité de chaleur reçue du Soleil est plus grande, à surface égale. Au pôle même, la quantité de chaleur reçue est presque aussi grande qu'à l'équateur.

Mais la température ne dépend pas uniquement de la quantité de chaleur reçue. S'il y avait stricte proportionnalité, les jours les plus chauds de l'année devraient être ceux du début de l'été, vers le 22 juin, et les plus froids ceux du début de l'hiver, vers le 22 décembre, tandis qu'on les observe, en règle générale, vers le début d'août et de février. Ce retard s'explique par la conservation de la chaleur dans l'atmosphère et dans le sol.

Remarquons aussi que la Terre est un peu plus près du Soleil en hiver qu'en été, mais la différence est faible (3%) ; on en déduit que la quantité de chaleur reçue par la Terre est un peu plus grande (de 6% environ) en hiver qu'en été. Cet effet



La Terre parcourt LL' pendant que la lumière parcourt OL'. La direction apparente fait 20'' environ avec la direction réelle.



● L'orbite de la Terre est divisée en quatre parties légèrement inégales par les deux équinoxes et les deux solstices. Elles correspondent aux quatre saisons dues aux variations de la quantité de chaleur reçue du Soleil, conséquence de l'inclinaison de l'axe de la Terre sur le plan de son orbite. Le printemps commence au passage au point vernal.

contribue à adoucir les variations de températures dans l'hémisphère nord, puisqu'il rend les hivers moins rigoureux et les étés moins chauds.

## MOUVEMENT ET PHASES DE LA LUNE

Le mouvement de la Lune est beaucoup plus facile à observer que celui du Soleil puisque nous voyons, pendant la nuit, à la fois la Lune et les étoiles, par rapport auxquelles nous pouvons évaluer son déplacement, bien plus rapide que celui du Soleil. La Lune retarde vers l'est par rapport aux étoiles, d'une distance angulaire de 30' environ en l'espace d'une heure, soit d'une distance angulaire égale à son propre diamètre.

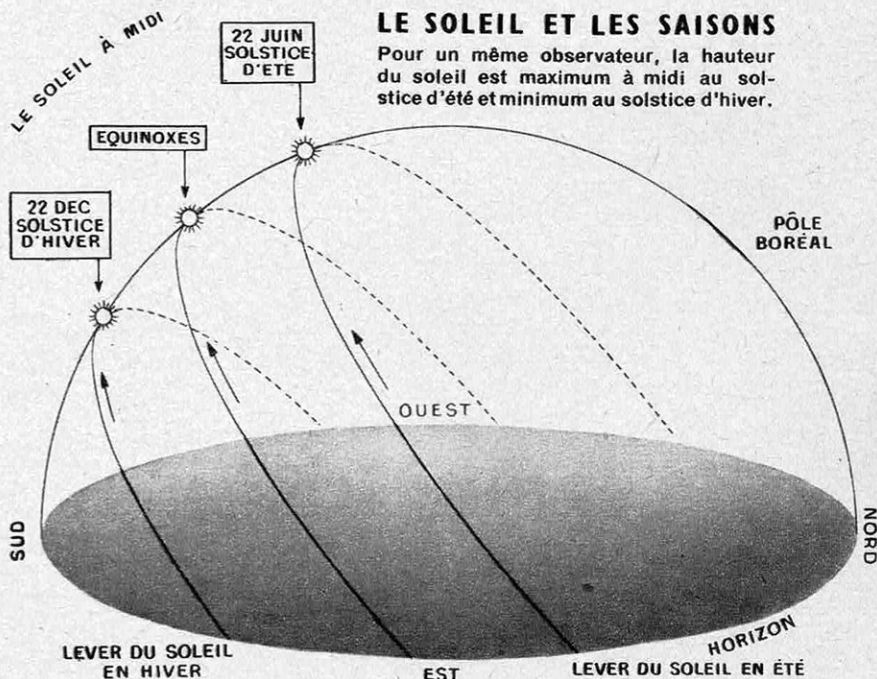
L'observateur le plus distrait remarque aussi que la Lune se lève chaque jour plus tard que la veille (de 50 minutes environ) et que, d'un mois à l'autre, elle culmine plus ou moins haut.

Les variations de position de la Lune d'un jour à l'autre sont accompagnées de variations de son aspect ; ce sont les phases bien connues de la Lune. Le cycle des phases est de 29 jours et demi : une **lunaison**.

La Lune tourne autour de la Terre. C'est notre satellite. La distance moyenne de la Terre

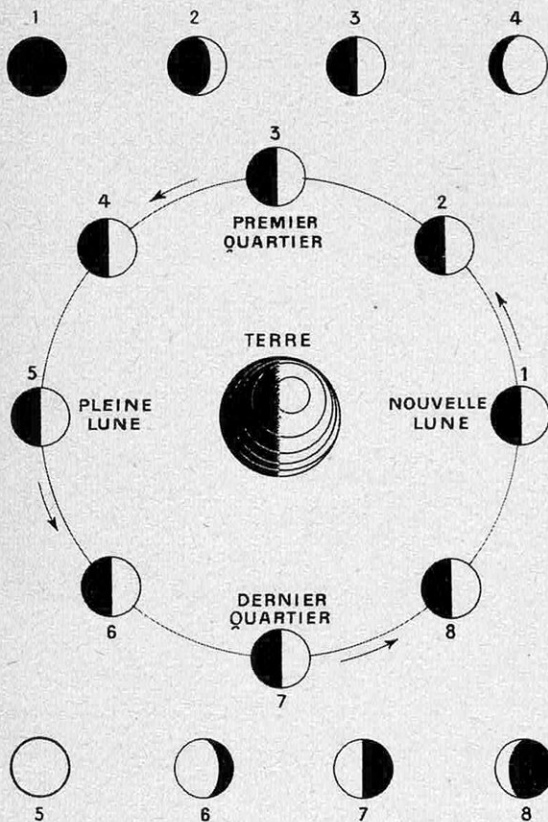
à la Lune est de 384 400 kilomètres. La période de révolution réelle de la Lune sur son orbite, ou révolution sidérale, est plus courte que la lunaison ; elle vaut 27 jours 8 heures. La différence est due à ce que la Lune doit décrire, en plus, dans une lunaison, l'arc dont le Soleil s'est déplacé.

Nous avons dessiné, page 26 comme on le fait ordinairement pour expliquer les phases de la Lune, une figure plane, en admettant que l'orbite de la Lune est située dans le plan de l'écliptique. En réalité, l'orbite de la Lune fait un angle de 5° environ avec l'écliptique ; les éclipses de Lune et de Soleil ne sont possibles que lorsque la Lune est très voisine



## LE SOLEIL ET LES SAISONS

Pour un même observateur, la hauteur du soleil est maximum à midi au solstice d'été et minimum au solstice d'hiver.



## ← MÉCANISME DES PHASES DE LA LUNE

La Lune n'est lumineuse que parce qu'elle réfléchit la lumière du Soleil. Puisqu'elle tourne autour de la Terre, l'hémisphère éclairé est plus ou moins visible. Elle reçoit aussi la lumière réfléchie par la Terre. La « lumière cendrée » est intense à la nouvelle Lune.

ceci n'est pas surprenant, car la lumière est surtout réfléchiée par l'atmosphère terrestre, et c'est la lumière bleue du ciel qui domine.

## LES PLANÈTES

Parmi les astres qui ne suivent pas exactement le mouvement diurne de la sphère céleste et qui, par suite, se déplacent entre les constellations, on trouve — outre le Soleil et la Lune — les planètes, les comètes et les météores.

Le terme planète dérive d'un mot grec qui signifie « astre errant » ; il était appliqué aussi par les Anciens au Soleil et à la Lune. Aujourd'hui, le terme est réservé aux astres qui décrivent une orbite autour du Soleil.

On classe généralement les planètes dans l'ordre de leurs distances au Soleil. On trouve ainsi :

Mercure, Vénus,

La Terre,

Mars, les astéroïdes, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton.

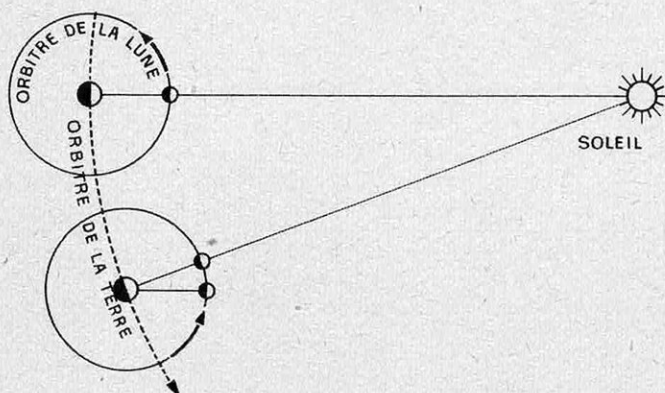
On donne souvent le nom de **planètes inférieures** aux deux premières qui sont plus proches du soleil que de la Terre ; les autres, qui sont plus éloignées, sont les **planètes supérieures**. Les planètes ont des phases comme la Lune ; mais comme on s'en rend compte facilement par examen de la figure page 27, les planètes inférieures montrent toutes les phases, tandis que les planètes supérieures ne sont jamais "nouvelles".

Le mouvement général d'une planète a lieu, par rapport aux constellations, vers l'est, mais la planète décrit certains arcs dans le sens inverse. On dit alors que la planète **rétrograde**. Au moment où le sens de la marche change, le déplacement est très lent ; c'est ce que l'on nomme une **station**. Ces pro-

de l'écliptique. (C'est justement pour exprimer ce fait que l'on a donné ce nom au plan de l'orbite du Soleil).

Le **terminateur** est la ligne qui sépare sur la surface de la Lune la portion éclairée et la portion dans l'ombre ; les « pointes » de la Lune sont toujours dirigées à l'opposé du Soleil.

Parfois, surtout à l'époque de la nouvelle Lune, la partie non éclairée de la Lune est visible, faiblement éclairée. C'est le phénomène de la **lumière cendrée**, dû à ce que la Lune est éclairée par la lumière réfléchiée sur la Terre. On a analysé cette lumière et constaté qu'elle contient une forte proportion de bleu ; c'est une preuve que, si l'on pouvait l'observer d'une autre planète, la Terre apparaîtrait comme un astre nettement bleu ;



## LA DURÉE D'UNE RÉVOLUTION SIDÉRALE DE LA LUNE EST PLUS COURTE QUE NOTRE LUNAISON

La révolution sidérale de la Lune, c'est-à-dire repérée par rapport aux astres, représentant un tour complet autour de la Terre, est de 27 jours 8 heures. Mais pendant ce temps, la Terre tournant autour du Soleil, ce dernier s'est en apparence déplacé sur la sphère céleste. La période de révolution réelle est donc plus courte que la lunaison qui vaut 29 jours et demi et correspond au cycle des phases que nous observons. C'est la lunaison, d'une évaluation plus directe, qui a servi aux Anciens pour établir leur calendrier, et la longueur de notre mois en découle.



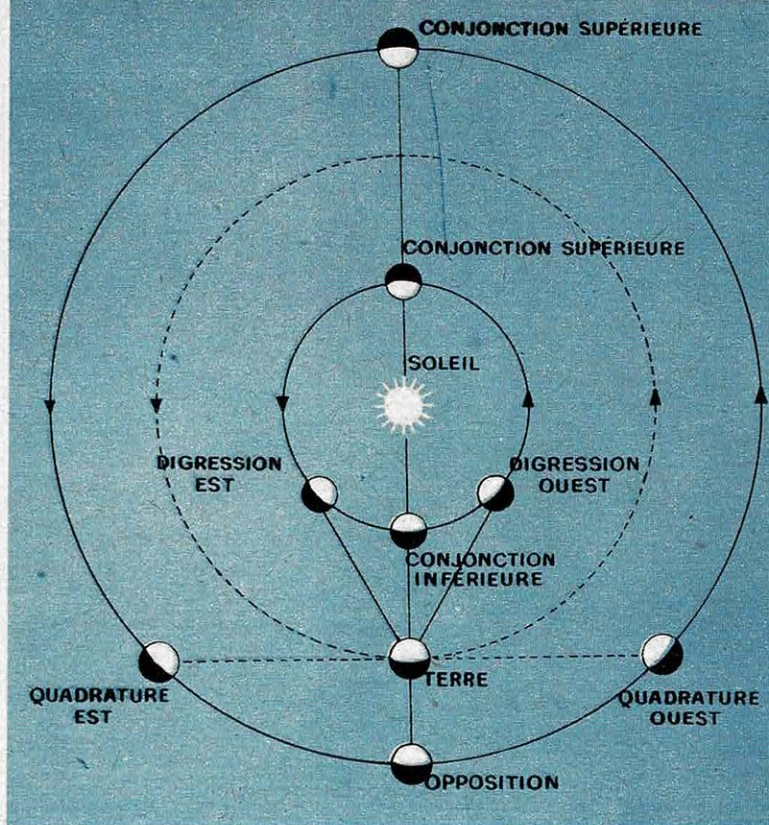
## ASPECTS DES PLANÈTES

On a supposé ici leurs orbites circulaires et situées toutes dans le même plan. La révolution synodique est l'intervalle qui sépare deux conjonctions de même nature.

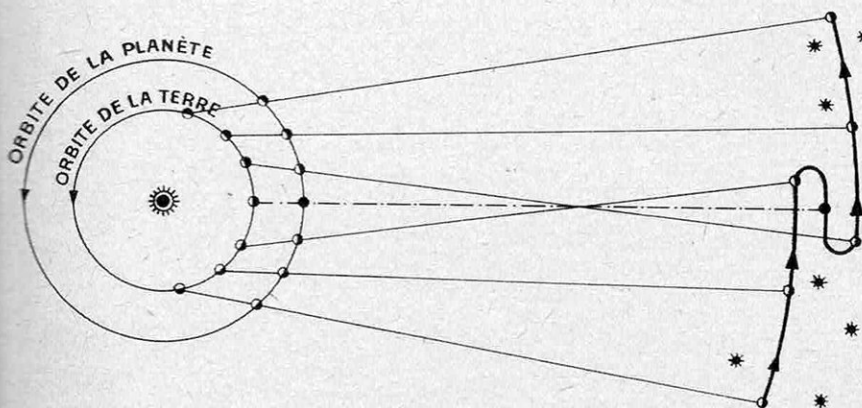
priétés sont dues au fait que le mouvement apparent de la planète résulte de son mouvement réel autour du Soleil et du mouvement propre de la Terre.

L'**élongation** d'une planète est l'angle des directions du Soleil et de la planète. Il est évident que cet angle peut prendre toutes les valeurs, de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  pour une planète supérieure, tandis que pour une planète inférieure il passe par une valeur maximum, que l'on appelle la **digression** de la planète ( $28^\circ$  pour Mercure,  $46^\circ$  pour Vénus). Puisque le mouvement diurne entraîne la sphère céleste à la vitesse de  $15^\circ$  à l'heure, on ne peut donc jamais voir Vénus plus de 3 heures après le coucher ou avant le lever du Soleil, ni Mercure à plus de 1 heure 30 minutes. Comme cette dernière planète est, d'autre part, peu brillante (magnitude 1,1 au maximum d'éclat) elle est toujours assez difficile à observer dans le ciel crépusculaire. Quant à Vénus, elle semble osciller, comme Mercure, autour de la position du Soleil. C'est ainsi qu'elle apparaît tantôt comme « étoile du soir » se couchant après le Soleil, tantôt brillant à l'aube, comme « étoile du matin ». En 1949, Vénus fut étoile du matin au début du mois de janvier, elle devint invisible jusqu'en juin, et elle resta étoile du soir jusqu'à la fin de l'année.

D'ordinaire, au moment de leurs conjonctions inférieures, Mercure et Vénus sont au-



dessus ou au-dessous du plan de l'écliptique, parce que leurs orbites font un petit angle avec ce plan ( $7^\circ$  et  $3^\circ 24'$ ). Parfois, cependant, les planètes « passent » devant le Soleil. La condition pour que cela se réalise est que la Terre se trouve, en même temps que la planète, voisine de la **ligne des nœuds**, droite d'intersection du plan de l'orbite de la planète et de l'écliptique. Les passages de Vénus sont visibles sans lunettes, ceux de Mercure avec une lunette. On a observé les derniers passages de Vénus, en 1874 et 1882, avec beaucoup de soin, pour en déduire la distance de la Terre au Soleil ; mais on a reconnu maintenant que d'autres méthodes sont préférables, et les prochains passages, en 2004 et 2012, n'auront probablement pas beaucoup d'importance.



MOUVEMENT APPARENT DE LA PLANÈTE

## POURQUOI UNE PLANÈTE SEMBLE « RÉTROGRADER »

Alors que le mouvement général d'une planète par rapport aux constellations a lieu vers l'est, elle semble parfois « rétrograder », c'est-à-dire décrire des arcs en sens inverse. C'est que, comme le montre la figure, le mouvement apparent est la résultante de sa rotation et de celle de la Terre autour du Soleil.

# LES INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES

**L**ES lunettes et les télescopes diffèrent par la nature de leurs objectifs ; c'est une lentille — ou plutôt un ensemble de 2 lentilles — dans les **lunettes** (ou **réfracteurs**), et un miroir dans les **télescopes** (ou **réflecteurs**). Dans les deux cas, l'objectif est, de loin, la pièce la plus importante de l'instrument. Il forme, dans son plan focal, une image réelle de la région du ciel visée ; pour l'observation photographique, il suffit donc de placer une plaque dans le plan de cette image ; pour l'observation visuelle, on utilise un oculaire qui joue simplement le rôle d'une loupe et qui permet d'examiner commodément, en l'agrandissant, l'image réelle donnée par l'objectif.

## LES LUNETTES ASTRONOMIQUES

Les objectifs des lunettes ont une distance focale qui varie entre 1 mètre et 20 mètres, et une ouverture (c'est-à-dire un diamètre) de quelques centimètres à 1 mètre.

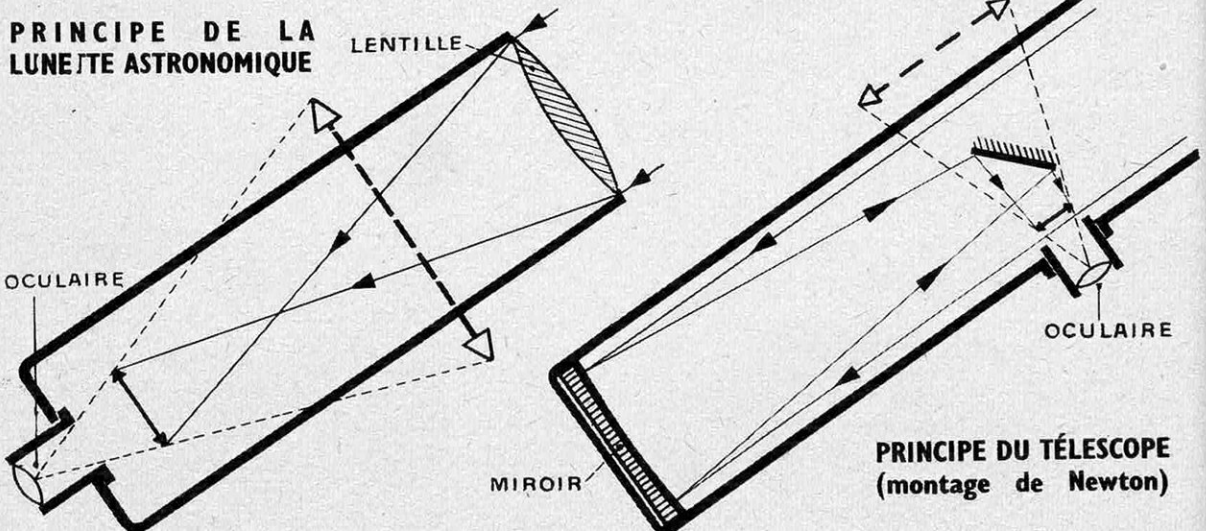
L'objectif est toujours composé de deux lentilles, construites en verres différents, de manière à obtenir une image nette non irisée. On dit que l'on a alors un **objectif achromatique**. On sait, en effet, que la lumière blanche est complexe et qu'elle est décomposée quand elle traverse un prisme de verre. Un objectif formé d'une simple lentille disperse les couleurs comme un prisme et, par suite, donne d'un objet placé infiniment loin, comme c'est pratiquement le cas en astronomie, des images non confondues pour les diverses couleurs. Mais on s'est aperçu qu'en combi-

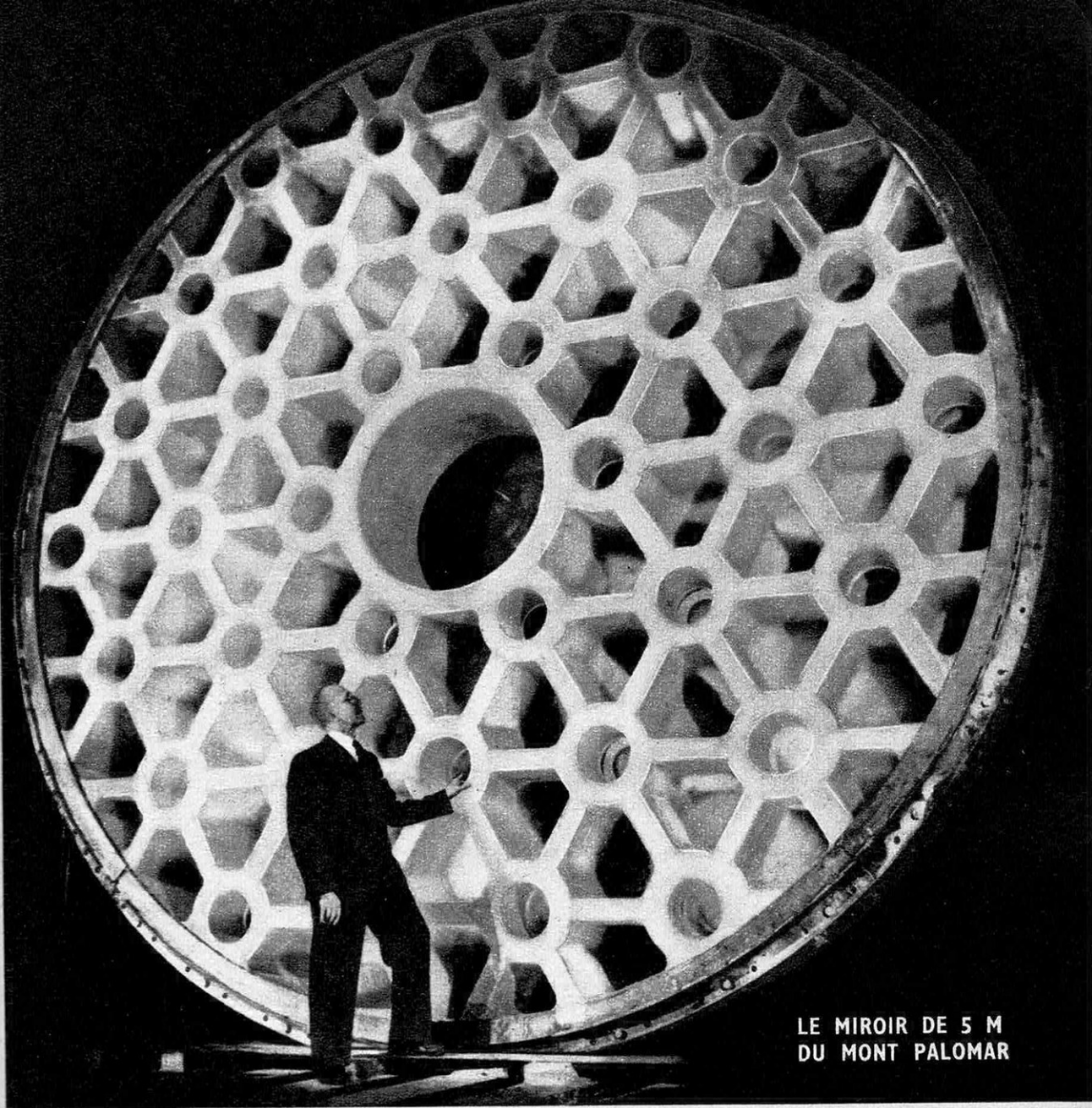
nant deux lentilles formées de verres de compositions différentes convenables (**crow**n et **flint**) et ayant des courbures calculées, on arrive à faire coïncider les images, au moins pour deux couleurs choisies d'avance, parce que les défauts d'irisation sont alors de sens inverses et se compensent sensiblement. Mais il subsiste toujours un peu d'irisation, comme on le constate en visant les planètes ou les étoiles les plus brillantes. Il en résulte que les mêmes appareils ne peuvent pas servir d'habitude pour les observations visuelles et photographiques, car, dans un cas, ce sont les radiations jaunes qui sont les plus actives, et, dans l'autre, les radiations bleues et violettes. Pourtant on réussit à prendre des photographies avec un objectif visuel, soit en disposant une lentille correctrice avant la plaque, soit en employant un filtre jaune et, en même temps, des plaques sensibles à la lumière jaune.

Dans la plupart des cas, l'ouverture relative de ces objectifs est comprise entre  $f/15$  et  $f/20$ , c'est-à-dire que la distance focale vaut 15 à 20 fois le diamètre. Cette règle conduit à construire des instruments très longs, d'un emploi vraiment incommode.

On trouvera dans le tableau page 30 les caractéristiques des 7 plus grandes lunettes du monde. Il convient de rappeler, à propos de cette liste, que c'est l'industrie française qui a fourni les grands disques de verre nécessaires pour la réalisation de 5 de ces objectifs, comme d'ailleurs aussi les disques qui forment quelques-uns des plus grands télescopes actuellement en service.

La plus grande lunette du monde a 102 cen-





LE MIROIR DE 5 M  
DU MONT PALOMAR

timètres de diamètre et une distance focale de 19,3 mètres ; elle a été installée à l'observatoire de Yerkes en 1897. Depuis cette date, la préférence des astronomes s'est portée vers les télescopes. Les efforts dans la construction de nouvelles lunettes ont eu surtout pour but d'améliorer certaines de leurs qualités. Par exemple, on a réalisé, pour photographier des régions étendues du ciel, spécialement la Voie Lactée, des objectifs ayant une plus grande ouverture relative et donnant de bonnes images dans un champ étendu ; ils sont formés de deux paires de lentilles ; le plus grand de ces objectifs a 60 centimètres de diamètre.

## LES TÉLESCOPES

L'objectif est un miroir concave, placé à l'extrémité inférieure du tube qui le porte ; il forme, par réflexion, une image réelle au voisinage de son foyer, qui se trouve généralement vers l'autre extrémité du tube. On a construit autrefois les miroirs en métal ; on les fait maintenant en verre, recouvert d'une mince couche d'argent ou d'aluminium. La couche d'aluminium a l'avantage de se conserver sans s'altérer pendant plus longtemps. Depuis quelques années, on a réalisé des miroirs en verre pyrex ; c'est le cas pour le grand miroir de 5 mètres du Mont Palomar.

## LES PLUS GRANDES LUNETTES DU MONDE.

Diamètre	
192 cm	Observatoire Yerkes de l'Université de Chicago à Williams Bay, Wisconsin (U. S. A.).
91	Observatoire Lick de l'Université de Californie à Mont Hamilton, Californie (U. S. A.).
83	Observatoire de Meudon (France).
80	Observatoire astrophysique de Potsdam (Allemagne).
76	Observatoire Alleghany à Pittsburg, Pennsylvanie (U. S. A.).
76	Observatoire Central, à Poulkovo (Russie)
76	Observatoire de Nice (France).

Le pyrex ayant un très faible coefficient de dilatation, la distance focale du miroir et, par suite, la mise au point sont très peu sensibles aux variations de la température.

Puisque l'image est obtenue par réflexion, il est évident que les télescopes ont, sur les lunettes, l'avantage de ne pas présenter d'effet d'irisation des images. Mais on ne peut pas se contenter d'employer dans les télescopes des miroirs sphériques, car les rayons qui tombent sur les bords du miroir s'écartent notablement du foyer. C'est seulement depuis que l'on a trouvé une méthode pratique pour donner aux miroirs concaves une forme parabolique et pour la vérifier avec une grande rigueur que l'emploi des télescopes s'est généralisé.

Il est généralement incommode d'observer l'image directement au foyer du miroir. On renvoie le plus souvent l'image à un endroit où elle est plus facile à examiner (**montages de Newton et de Cassegrain**). Pour la plupart des télescopes, on peut réaliser, par des jeux de miroirs, diverses valeurs de la distance focale.

En général, la distance focale du miroir vaut environ 5 fois l'ouverture (3,3 fois pour le miroir du Mont Palomar). Ainsi les télescopes sont, à ouverture égale, moins encombrants et moins lourds que les lunettes.

Le tableau page 33 donne la liste des plus grands télescopes du monde. En tête vient le fameux télescope de 5 mètres, récemment installé par les Américains au Mont Palomar (Californie). Pas un seul des instruments cités ne se trouve en Europe. Nous devons pour le moment nous contenter, en France, du télescope de 120 centimètres de l'Observatoire de Haute-Provence (Saint-Michel-l'Observatoire, Basses-Alpes).

Avec les grands télescopes à miroirs paraboliques, les images sont ponctuelles pour les étoiles voisines de l'axe ; mais elles se déforment sur le bord du champ. Pourtant on sait construire des télescopes donnant de bonnes images de champs étendus : on emploie pour cela des miroirs auxiliaires de courbure spéciale. Une autre méthode consiste à combiner un miroir sphérique avec une lame de verre correctrice (télescope de Schmidt)

## LES GRANDES OUVERTURES

L'intérêt des instruments de grande ouverture est double : ils sont plus lumineux et ils ont un meilleur pouvoir séparateur.

Le premier point est évident. Dans le cas d'une étoile, toute la lumière tombant sur l'objectif est finalement — si l'on néglige les pertes — concentrée en un point. Or elle est proportionnelle à la surface de l'objectif. Ainsi, un miroir de 5 mètres de diamètre, comme celui du télescope du Mont Palomar, reçoit d'une étoile, pour la condenser en une image ponctuelle, autant de lumière qu'un million d'yeux humains, puisque le diamètre moyen de l'œil est 5 millimètres. Autrement dit, il doit permettre de voir des étoiles un million de fois plus faibles. Par de longues poses photographiques, on atteindra des étoiles beaucoup plus faibles encore.

Remarquons que, dans le cas où l'on vise un objet étendu, la quantité de lumière qui tombe sur l'objectif est répartie sur toute la surface de l'image dont le diamètre apparent est agrandi, de sorte que la luminosité d'un objet étendu est plus faible à travers une lunette qu'à l'œil nu. Au contraire, la lunette accroît l'éclat des étoiles. Pour cette raison, il est possible de voir dans une lunette des étoiles en plein jour ; celles-ci paraissent beaucoup plus lumineuses, tandis que le fond du ciel a le même éclat.

Quant au **pouvoir séparateur** d'une lunette, il se mesure par la plus petite distance angulaire de deux étoiles vues distinctement dans l'appareil. Or l'image d'une étoile n'est pas un point, mais une petite tache due à la diffraction de la lumière. Le pouvoir séparateur est limité par le diamètre de cette tache. On montre qu'il est inversement proportionnel au diamètre de l'objectif. Avec le télescope du Mont Palomar, à pleine ouverture, on pourra séparer les couples d'étoiles dont la distance angulaire ne sera pas inférieure à  $1/42$  de seconde d'arc.

## LUNETTES OU TÉLESCOPES

Certains avantages des télescopes sont évidents : ils sont rigoureusement achromatiques, à la fois pour les observations visuelles et photographiques. Il est plus facile de cons-

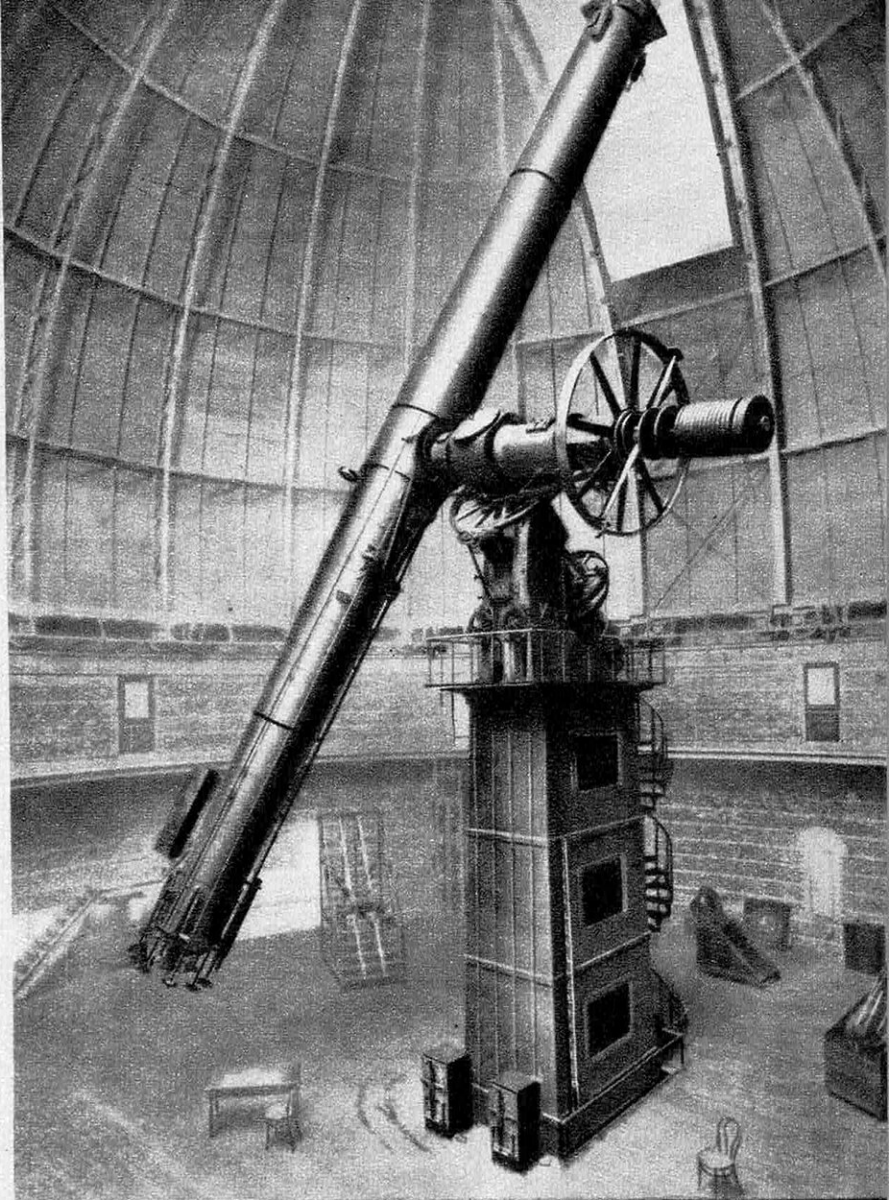
truire des miroirs que des lentilles, d'abord parce qu'il n'y a qu'une surface à travailler, et surtout parce que la matière formant une lentille doit être absolument homogène et sans défaut. D'autre part, les télescopes sont toujours, à diamètre égal, plus courts que les lunettes ; les tubes qui les portent sont moins longs, plus rigides et plus maniables ; les coupoles sont plus petites et moins coûteuses. L'ouverture relative des télescopes étant plus grande, ils sont plus lumineux dans l'observation des objets étendus, par exemple des faibles nébuleuses. Enfin, même s'il était possible de construire des lunettes achromatiques de très grand diamètre, leur poids suffirait pour les déformer et les rendre inutilisables, tandis qu'un grand miroir repose sur des supports qui suppriment les flexions. C'est pour cette raison que l'on a renoncé à réaliser une lunette plus grande que celle de Yerkes.

Voyons maintenant les avantages des lunettes. Elles ne se détériorent pas, tandis que l'on doit refaire périodiquement l'argenture ou l'aluminure des miroirs des télescopes. En moyenne, les pertes de lumière dans les lunettes, par absorption dans les lentilles, sont moindres que les pertes par réflexion sur les miroirs. Les lunettes ont, en règle générale, un champ plan de bonne définition plus grand que les télescopes. Enfin, les variations de la température produisent une variation de la distance focale qui est moins importante pour les lunettes que pour les télescopes.

## LES MONTURES

Nous n'examinerons pas ici les montures des instruments astronomiques spéciaux, tels que, par exemple, la lunette méridienne, ainsi nommée parce qu'elle observe les étoiles uniquement au moment de leur passage dans le plan méridien.

Tous les grands instruments ont une **monture équatoriale** : l'instrument peut tourner autour d'un **axe polaire**, qui est dirigé vers les deux pôles célestes ; il est donc parallèle à



La plus grande lunette du monde est celle de l'observatoire Yerkes (Etats-Unis) : diamètre de l'objectif 102 cm, longueur focale 19,8 m.

l'axe du monde et incliné sur l'horizon d'un angle égal à la latitude du lieu d'observation. Un deuxième axe, appelé **axe de déclinaison**, solidaire de l'axe polaire auquel il est perpendiculaire, porte l'instrument. Chaque axe est muni d'un cercle gradué. Ainsi l'observateur peut pointer l'instrument, à un instant donné, vers un astre dont il connaît les coordonnées équatoriales. Dès lors, on s'arrange de manière à entraîner l'appareil automatiquement, par un mécanisme convenable, dans son mouvement autour de l'axe polaire, de façon qu'il suive exactement l'astre dans son mouvement diurne, ce que vérifie constamment l'observateur.

Il n'existait autrefois qu'un seul modèle de monture équatoriale ; on en utilise maintenant plusieurs types (page 32).

## LES SPECTROSCOPES

Les astronomes ne se contentent pas d'observer les astres ou de les photographier ; ils étudient minutieusement toutes les propriétés de la lumière que nous recevons d'eux. Parmi ces études, une des plus fécondes est l'analyse de la lumière au moyen des spectroscopes, ou des spectrographes (les premiers pour les observations visuelles, les seconds pour les études photographiques).

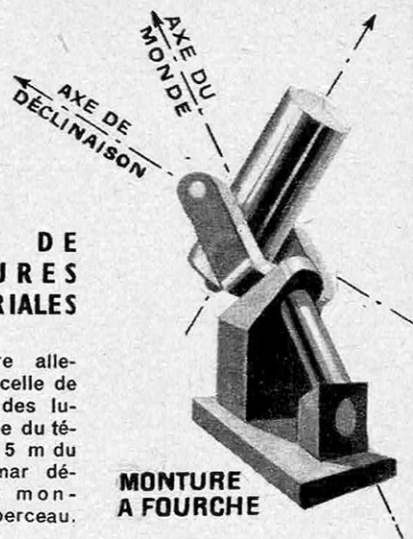
La partie essentielle du spectrographe est un prisme. On fait tomber sur lui un faisceau de rayons parallèles, que l'on obtient par un collimateur : celui-ci est formé par une fente fine, placée dans le plan focal d'un objectif. La lumière réfractée et dispersée par le prisme forme, en sortant de celui-ci, un ensemble de faisceaux parallèles plus ou moins déviés selon la couleur. On reçoit ces faisceaux sur un objectif convergent, qui donne le spectre dans son plan focal.

Quand on dispose d'assez de lumière, on emploie parfois, pour obtenir une plus grande dispersion du spectre, plusieurs prismes que la lumière traverse successivement, ou encore un **réseau**. Ce dernier est formé d'une surface plane sillonnée d'un nombre très grand de traits fins parallèles, régulièrement tracés ; par exemple, on a construit des réseaux portant 500 traits par millimètre et ayant 10 centimètres de large, et même davantage. Les réseaux forment les spectres par diffraction de la lumière ; ils présentent l'inconvénient de ne concentrer en un spectre qu'une partie de la lumière ; ils sont donc moins lumineux que les prismes et, pour cette raison, on ne les emploie en astronomie que dans le cas où l'on étudie des objets très lumineux, par exemple le Soleil.

Pour obtenir les spectres des étoiles, on place généralement le spectroscopie à l'extrémité d'une lunette ou d'un télescope. Dans la

## TYPES DE MONTURES ÉQUATORIALES

La monture allemande est celle de la plupart des lunettes. Celle du télescope de 5 m du Mont Palomar dérive de la monture dite à berceau.

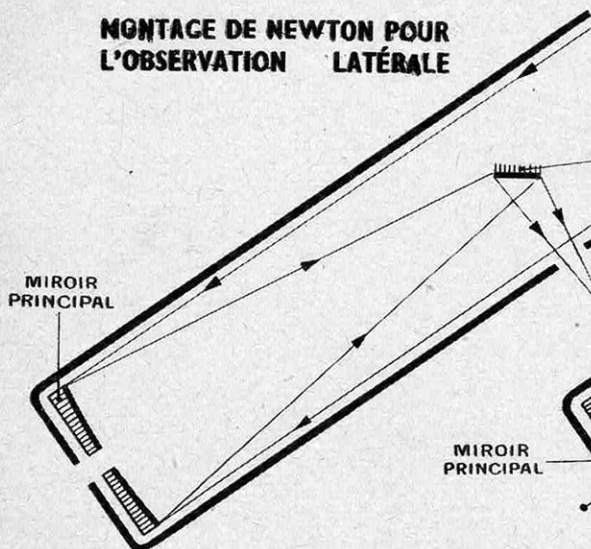


grande majorité des cas, on opère par photographie en enregistrant sur la même plaque le spectre stellaire à étudier et, de part et d'autre de celui-ci, un spectre donné par une source terrestre (spectre de comparaison), par exemple un arc au fer. Comme on connaît bien les longueurs d'ondes précises de ces radiations, il est facile de déterminer, par comparaison, les longueurs d'ondes de tous les détails remarquables dans le spectre observé (1).

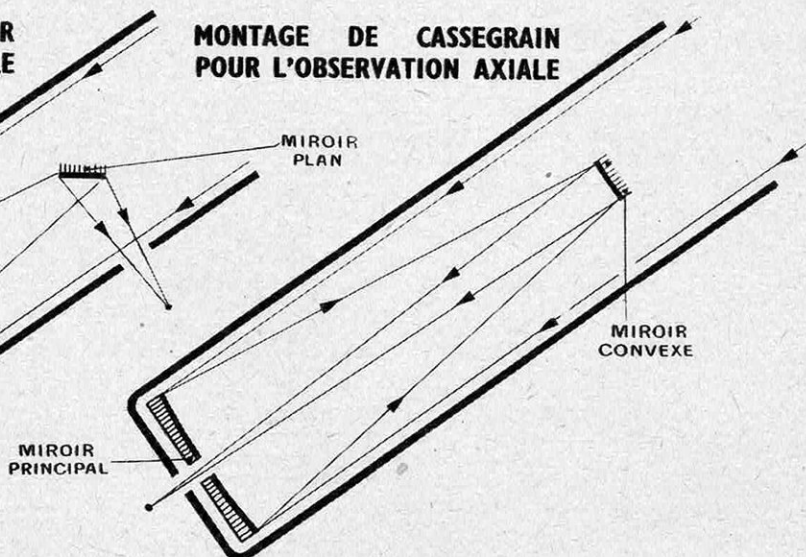
On emploie assez souvent un autre dispositif pour étudier les spectres des étoiles. Remarquons que le but du collimateur, dans un spectroscopie ordinaire, est d'obtenir un faisceau de rayons parallèles ; or les rayons qui viennent d'une étoile forment, eux-mêmes,

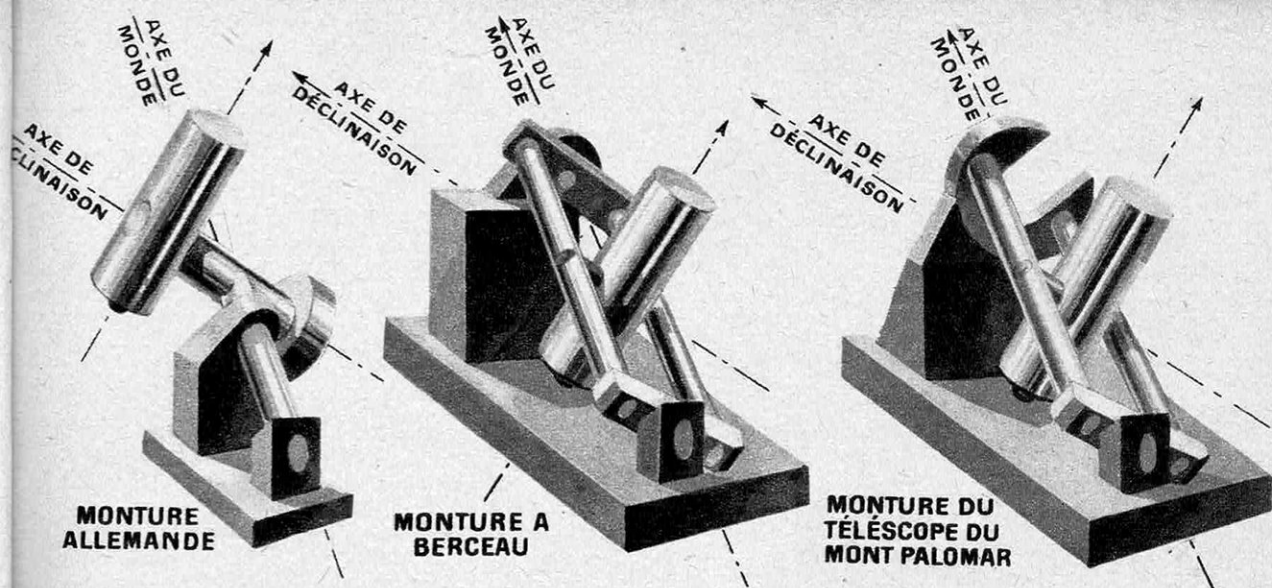
(1) Rappelons que l'on mesure les longueurs d'onde en microns ou, plus souvent, en angstroms ; 1 micron ( $\mu$ ) vaut un millième de millimètre ou  $10^{-4}$  cm. ; 1 angstrom vaut  $10^{-4}$   $\mu$  ou  $10^{-8}$  cm.

### MONTAGE DE NEWTON POUR L'OBSERVATION LATÉRALE



### MONTAGE DE CASEGRAIN POUR L'OBSERVATION AXIALE





un tel faisceau. On peut donc, dans le cas des étoiles, supprimer le collimateur et faire tomber directement les rayons stellaires sur un prisme. On a alors le montage que l'on désigne sous le nom de **prisme-objectif**, et qui, comme son nom l'indique, est formé simplement d'un prisme et d'un objectif. Son avantage est de donner simultanément, sur la même plaque, les spectres d'un grand nombre d'étoiles ; aussi est-il très employé dans les travaux de classification des spectres stellaires. De plus, il fait perdre moins de lumière que les spectrographes ordinaires à fente. Mais il se prête moins bien que ces derniers à la mesure précise des détails des spectres.

## L'INTERPRÉTATION DES SPECTRES

Quand on examine la lumière émise par un corps solide, un liquide ou un gaz très dense incandescents, par exemple le filament d'une lampe électrique, on observe un spectre continu ; il est formé par une bande ininterrompue, qui comprend toutes les radiations, du rouge au violet, et qui s'étend même au delà, dans

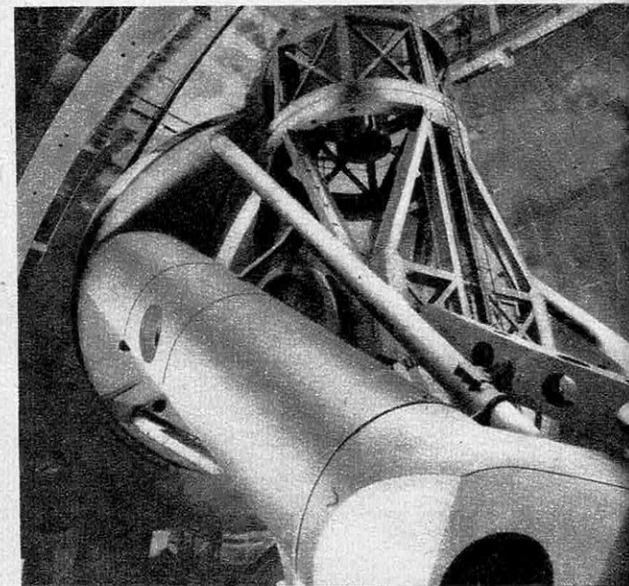
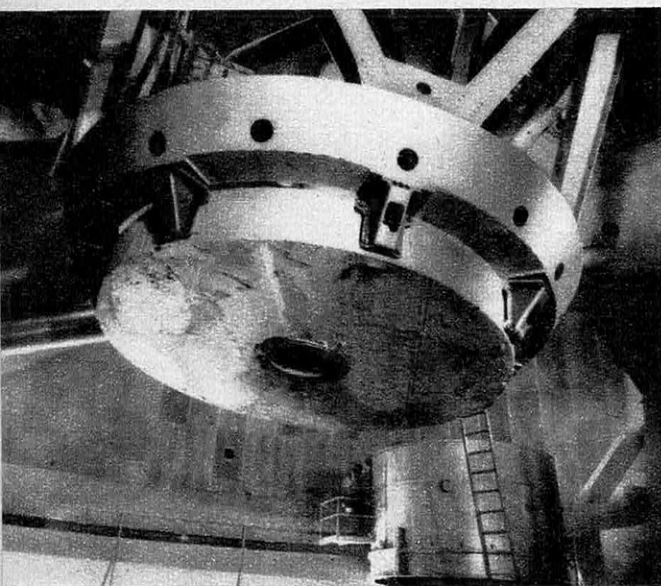
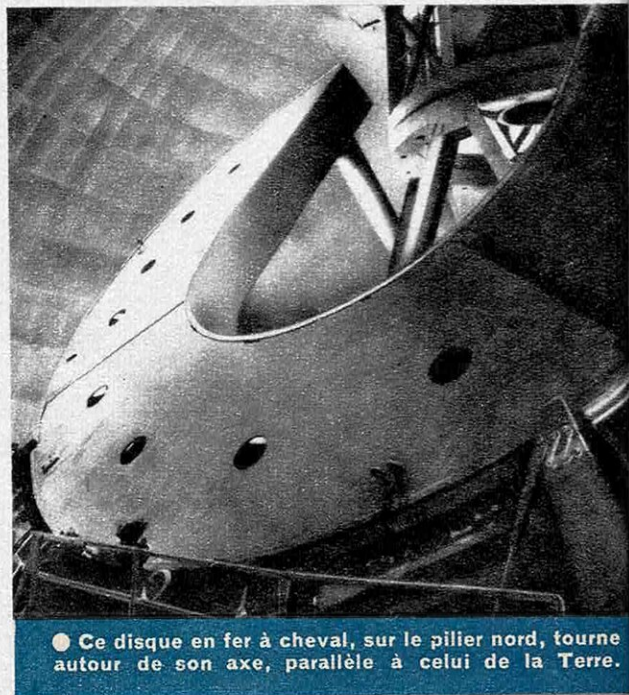
l'infrarouge et l'ultraviolet. Un tel spectre nous renseigne sur la température du corps lumineux. Tout le monde sait, par exemple, que la couleur d'un poêle change quand sa température croît ; la paroi devient d'abord rouge sombre, puis rouge cerise, enfin blanche. Au spectroscopie on observe toujours un spectre continu, mais le changement de couleur correspond à une importante modification de l'intensité relative des diverses régions du spectre : au début, le rouge est intense et le bleu très faible ; puis les radiations bleues deviennent de plus en plus fortes. Pratiquement, on détermine par des mesures précises la courbe qui représente la variation de l'énergie lumineuse en fonction de la longueur d'onde : en la comparant à la courbe obtenue par une source terrestre de température connue, on déduit la température du corps observé. En réalité, la plupart des astres dont on évalue par cette méthode la température superficielle sont plus chauds que les sources terrestres que nous pouvons réaliser. Mais la théorie nous donne la courbe d'énergie pour une valeur quelconque de la température. Ce

## LES PLUS GRANDS TÉLÉSCOPES DU MONDE.

Diamètre	
5,08 m	Observatoire du California Institute of Technology, Mont Palomar, Californie (U. S. A.).
2,54	Observatoire de la Carnegie Institution, Mont Wilson, Californie (U. S. A.).
2,08	Observatoire Mc Donald, Mont Locke, Texas (U. S. A.).
1,87	Observatoire David Dunlap, de l'Université de Toronto, Richmond Hill, Ontario (Canada).
1,87	Observatoire Radcliffe, près de Prétoria (Afrique du Sud).
1,83	Observatoire de Parsonstown (Irlande).
1,83	Observatoire d'astrophysique, Victoria (Colombie Britannique).
1,75	Observatoire Perkins, Delaware, Ohio (U. S. A.).
1,58	Annexe d'Oak Ridge de l'Observatoire de Harvard College près de Harvard, Massachusetts (U.S.A.).
1,52	Annexe australe de l'Observatoire de Harvard College près de Bloemfontein (Afrique du Sud).
1,52	Observatoire de la Carnegie Institution, Mont Wilson, Californie (U. S. A.).
1,52	Observatoire National d'Argentine, Bosque Allegre, près de Cordoba (Argentine).



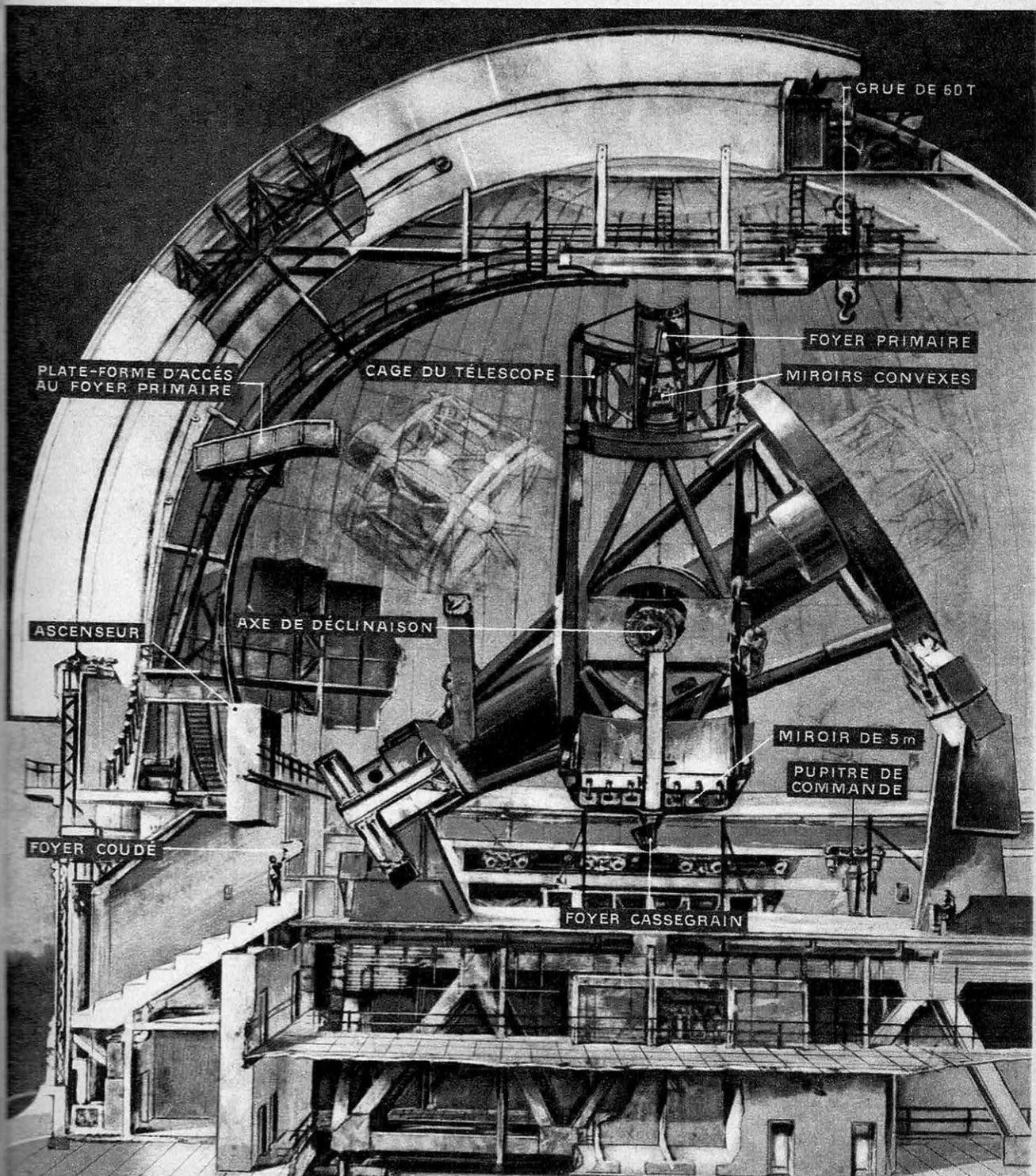
PAR DES COMBINAISONS DE MIROIRS ON PEUT FAIRE VARIER LA DISTANCE FOCALE DU TÉLÉSCOPE

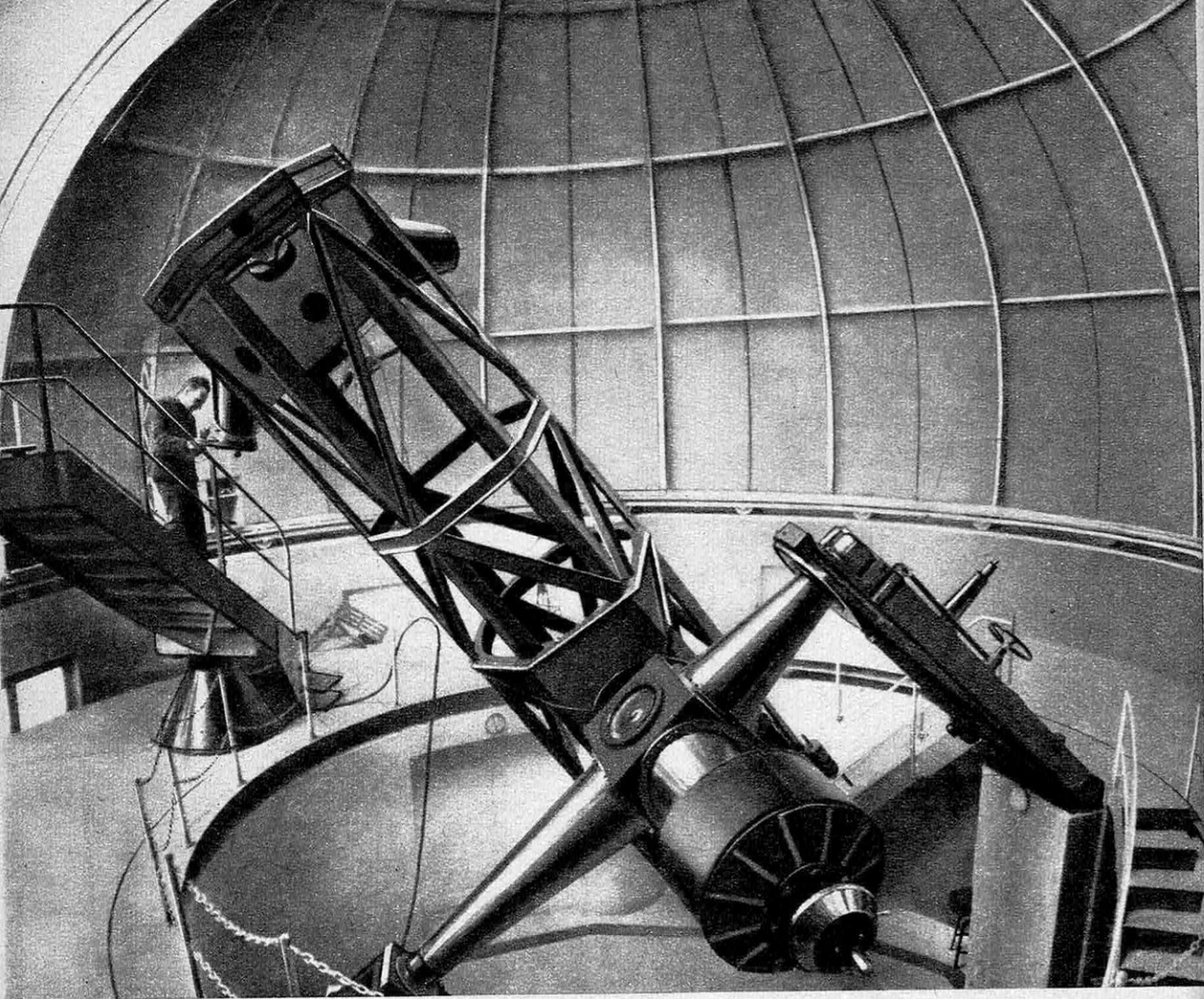




# LE TÉLESCOPE DU MONT PALOMAR

On voit sur ce dessin l'aménagement intérieur de la coupole qui abrite le télescope géant. C'est le seul appareil où l'observateur puisse prendre place dans une cage spéciale à la partie supérieure du tube en treillis pour l'observation directe au foyer principal. Il y accède par une plate-forme latérale desservie par un ascenseur. Le poids total de l'instrument atteint 450 t et pour réduire les frottements sur les paliers on y envoie de l'huile sous une pression telle que l'instrument tout entier flotte sur une mince couche d'huile. L'observatoire du Mont Palomar est installé à une altitude de 2000 m, à 56 km de l'Océan Pacifique, dans d'excellentes conditions de climat et de transparence atmosphérique.





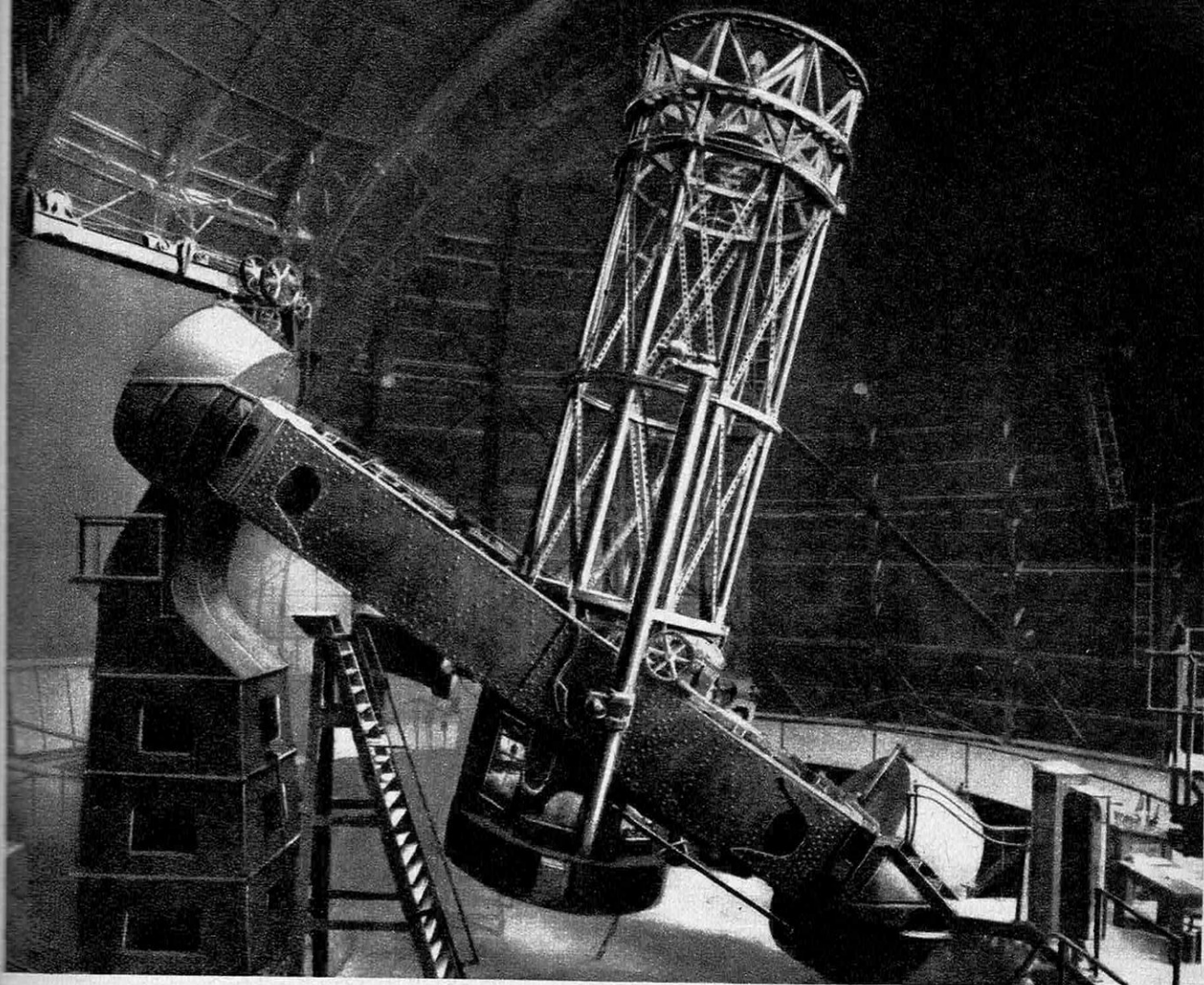
● Le plus grand télescope de France, mis en service en 1942, est celui de Saint-Michel-l'Observatoire, en Haute-Provence. Son ouverture est de 1,20 m. La construction d'un télescope de 1,93 m a été récemment décidée.

sont des mesures de ce genre qui ont montré que la température superficielle du Soleil est voisine de  $6\,000^{\circ}$  et permis d'évaluer la température des étoiles.

Mais on n'observe jamais, en astronomie, de spectre continu. Certains astres, par exemple des nébuleuses, montrent un spectre formé d'un ensemble plus ou moins complexe de raies brillantes ; le plus souvent on observe, au contraire, un spectre continu sillonné de raies noires ou raies d'absorption, parfois de bandes d'absorption ; c'est le cas pour la majorité des étoiles et pour le Soleil. Comment s'expliquent ces apparences ?

On sait maintenant comment les atomes peuvent émettre ou absorber de la lumière. Sauf dans le cas d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz comprimé incandescents, la lumière émise par un corps convenablement excité est composée seulement d'un certain nombre de radiations bien déterminées ; le spectre est donc formé d'un nombre plus ou moins grand de raies brillantes. Ainsi un tube de

verre contenant de l'hydrogène sous basse pression et excité par une décharge électrique émet une lumière qui, dans le spectroscope, se résout en une série de raies, partant d'une raie rouge et se resserrant d'une manière remarquable dans le violet et l'ultraviolet. La théorie sait expliquer complètement les propriétés de ce spectre particulièrement simple et calculer toutes les longueurs d'ondes des raies en fonction des dimensions des atomes d'hydrogène. Tous les éléments, sodium, fer, hydrogène, soufre, etc., peuvent donner ainsi un spectre de raies brillantes dont l'ensemble diffère d'un élément à l'autre et permet de le caractériser. On a donc là un moyen très sûr pour identifier un élément, une fois son spectre étudié au laboratoire, et déceler sa présence dans une étoile ou une nébuleuse lointaine. On obtient, au contraire, un spectre de raies d'absorption chaque fois que la lumière continue d'une source incandescente traverse un gaz plus froid ; les radiations absorbées par le gaz sont précisément celles qu'il émet lui-



● Le télescope Hooker de l'observatoire au mont Wilson, mis en service en 1917, était le plus grand du monde avant la construction du télescope du Mont Palomar. Son ouverture est de 2,54 m et sa distance focale de 12,5 m.

même quand il est excité. Ces conditions sont celles que l'on trouve dans le Soleil et dans la plupart des étoiles : le rayonnement continu de l'énorme sphère centrale incandescente doit traverser l'atmosphère environnante, plus froide, et les éléments présents dans cette atmosphère absorbent certaines radiations, montrant ainsi leurs raies en absorption sur le spectre continu. C'est l'effet d'une **couche renversante**. Ainsi la figure (page 38) montre le spectre de l'étoile Procyon ( $\alpha$  Petit Chien), avec un spectre de comparaison formé des raies du fer et du vanadium. On voit sans hésitation que les raies du fer se retrouvent, en absorption, dans le spectre de l'étoile. Pourtant elles sont un peu déplacées. Il intervient ici un effet qui a une grande importance en astronomie par ses nombreuses applications : l'**effet Doppler**.

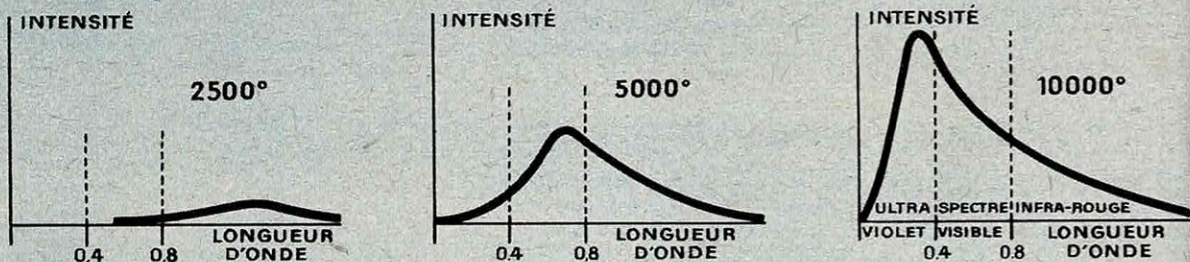
### L'EFFET DOPPLER

La lumière se propage par un mouvement vibratoire. Si nous examinons le spectre d'une source de lumière immobile par rap-

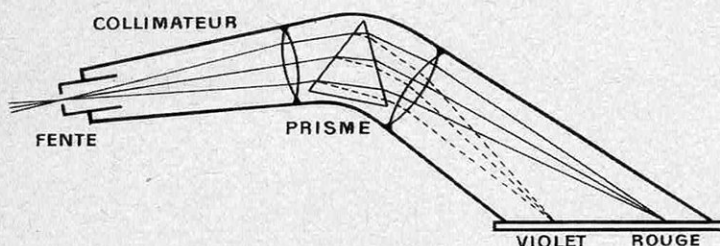
port à nous, nous mesurons facilement les longueurs d'onde des radiations émises. Mais si la source de lumière s'approche de nous, la fréquence des ondes lumineuses nous semble plus grande, c'est-à-dire leurs longueurs d'onde plus courtes ; par conséquent, les radiations se déplacent, dans le spectre, du côté du violet. Au contraire, si la source s'éloigne, les radiations se déplacent vers les grandes longueurs d'ondes, c'est-à-dire vers le rouge. La grandeur du déplacement est liée à la vitesse de la source par une relation simple.

Par exemple, dans le cas de l'étoile Procyon, on constate que le déplacement des raies du spectre par rapport au spectre de comparaison correspond à une vitesse de rapprochement de 30 km/s.

Ainsi le spectrographe permet de déterminer la vitesse d'un astre par rapport à nous. Précisons à ce sujet deux points. D'une part, si l'astre se déplace perpendiculairement aux rayons visuels, ce mouvement ne produit pas d'effet Doppler ; ce dernier ne permet de



● Le rayonnement d'un corps incandescent varie avec sa température. L'énergie est répartie sur un spectre continu, mais le maximum correspond à une radiation d'autant plus courte que la température du corps est plus élevée.



## ← PRINCIPE DU SPECTROSCOPE

Une fente fine placée au foyer d'un objectif est éclairée par la source à analyser. Le faisceau de rayons parallèles ainsi formé est dispersé par un prisme, et un deuxième objectif donne le spectre. On peut l'observer au moyen d'un oculaire ou bien le photographier directement sur une plaque.

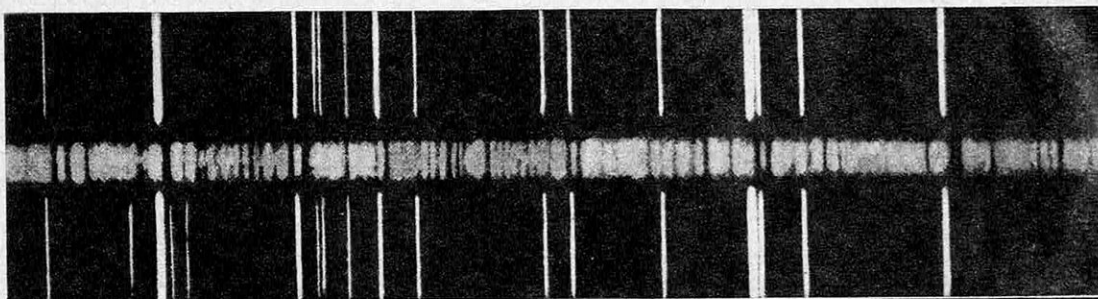
mesurer que la composante de cette vitesse suivant la direction du rayon visuel ou, comme l'on dit en astronomie, la **vitesse radiale**. D'autre part, l'effet est le même si c'est l'astre qui se déplace ou nous mêmes par rapport à l'astre ; par exemple, dans le cas de l'étoile Procyon, la vitesse propre de rapprochement de cette étoile n'est que de 3 km/s, et la vitesse de 30 km/s mesurée par l'effet Doppler est la somme de cette vitesse propre et de la vitesse orbitale de la Terre au moment où le spectre a été obtenu (plus exactement : de la composante de cette vitesse suivant le rayon visuel).

## L'EFFET EINSTEIN

D'autres actions que le déplacement relatif de la source par rapport à l'observateur peuvent intervenir pour produire un déplacement des raies spectrales. Nous citerons, à cause de son importance théorique et de ses applications surprenantes en astronomie, l'effet Einstein qui, prévu par la théorie de la relativité, a été confirmé par les observations. Il

s'agit d'un faible déplacement des raies vers le rouge dans le spectre des corps de grande masse.

On explique maintenant cet effet par la théorie des quanta, d'après laquelle la lumière est émise sous la forme de « grains » ou **photons**. Les corps massifs exercent une attraction sur ces « grains de lumière » ; comme ils le font sur des grains de matière. Par suite, les photons perdent un peu de leur énergie pour vaincre cette attraction et s'échapper des corps massifs. S'il s'agissait de particules matérielles, leur vitesse serait diminuée, mais puisque, d'après la théorie de la relativité, la vitesse de la lumière dans l'espace est invariable, on montre que la seule possibilité est que la fréquence soit diminuée, ce qui revient à dire que la longueur d'onde doit croître. L'accroissement est proportionnel à la masse de la source et inversement proportionnel à son rayon. Nous verrons précisément une application importante de l'effet Einstein à la détermination de la densité de ces astres extraordinairement denses que sont les « naines blanches ».



● Sur ce spectre de l'étoile Procyon, certaines raies d'absorption correspondent à celles du spectre de comparaison. Le petit décalage est dû à la vitesse radiale relative de l'étoile (effet Doppler).

# LES MOUVEMENTS DES PLANÈTES ET L'ATTRACTION UNIVERSELLE

L'ÉTUDE complète des mouvements des planètes pose un très difficile problème de mécanique, dont les développements mathématiques sont fort ardu, à tel point que certaines questions n'ont pas encore reçu de solution pratique. Nous laisserons, bien entendu, ces développements mathématiques de côté. Par contre, nous exposerons en détail les lois générales qui gouvernent ces mouvements et qui sont, elles, extrêmement simples. Les lois de Kepler et la loi de Newton peuvent, en effet, être comprises par tout le monde, bien que leur énoncé précis emprunte déjà aux mathématiques leur langage.

## LES LOIS DE KEPLER

La première loi énonce le fait que « chaque planète décrit une ellipse, dont le Soleil occupe un des foyers ».

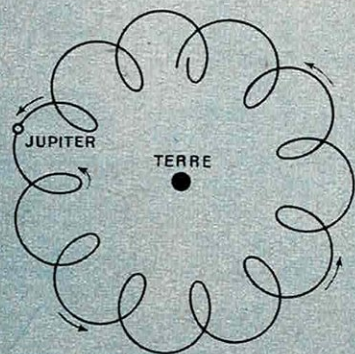
L'ellipse est une courbe très simple : pour tout point de l'ellipse, la somme des distances à deux points fixes est constante ; ces points sont appelés les foyers.

Lorsqu'une planète décrit une ellipse autour du Soleil, le point le plus rapproché du Soleil est le **périhélie**, le plus éloigné est l'**aphélie**, et la droite qui joint les deux points est la **ligne des apsides**. La distance de ces deux points mesure la longueur du grand axe de l'ellipse. Les orbites ont une forme

plus ou moins aplatie qui est déterminée par la valeur de l'**excentricité** de l'ellipse : c'est le rapport de la distance des deux foyers à la longueur du grand axe. Lorsque les deux foyers sont confondus, l'ellipse devient un cercle et l'excentricité est nulle. Au contraire, lorsque l'excentricité croît, les deux foyers sont de plus en plus éloignés l'un de l'autre et l'ellipse a une forme allongée. Pour la plupart des planètes l'excentricité est faible ; par exemple, l'orbite de la Terre a une excentricité de 0,017. L'œil confond une telle ellipse avec un cercle. La distance de la Terre au Soleil varie, en gros, entre 149 millions de kilomètres (périhélie) et 151 millions (aphélie).

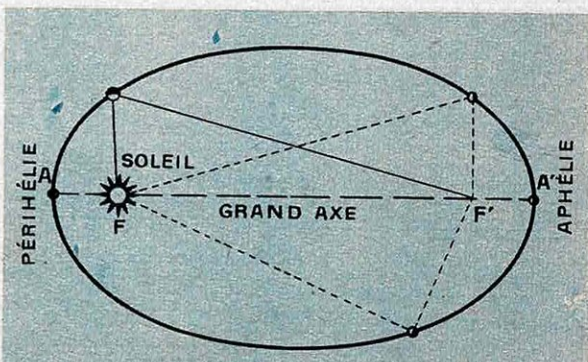
D'après la deuxième loi, dite **loi des aires** : « l'aire balayée par le rayon qui joint le Soleil à une planète est proportionnelle au temps ». Autrement dit, ce rayon balaie des aires égales pendant des intervalles de temps égaux.

Dans le cas d'une orbite circulaire, cette loi exprimerait que le mouvement est uniforme ; dans le cas d'une ellipse, elle exprime, au contraire, que le mouvement est plus rapide vers le périhélie et plus lent vers l'aphélie ; mais le mouvement se rapproche d'autant plus d'un mouvement uniforme que l'orbite a une plus faible excentricité. Par exemple, dans le cas de la Terre, les vitesses à l'aphélie et au périhélie valent respective-



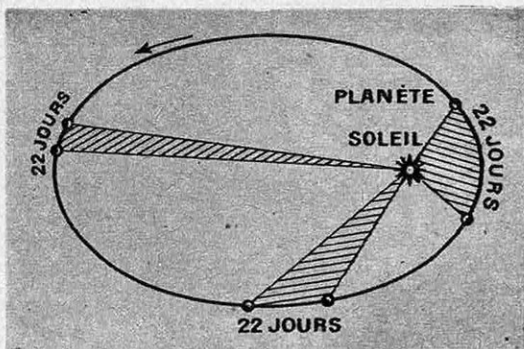
L'ORBITE DE JUPITER VUE DE LA TERRE

Rapportées à la Terre, les orbites des planètes ont des formes compliquées. Copernic eut l'idée de les rapporter au Soleil et Kepler a formulé leurs lois.



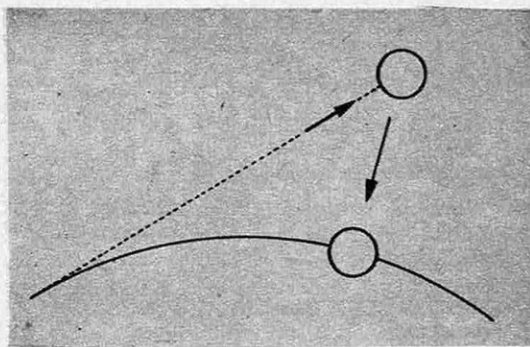
L'ORBITE D'UNE PLANÈTE VUE DU SOLEIL

Toutes les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers. En tout point, la somme des distances aux foyers est constante.



### LA SIGNIFICATION DE LA LOI DES AIRES

Les trois aires hachurées, qui sont balayées pendant des intervalles de temps égaux par le rayon qui joint le Soleil à la planète qu'il attire, ont la même valeur.



### L'ATTRACTION ET LA FORCE CENTRIFUGE

Par inertie, le mobile se déplacerait suivant la tangente à sa trajectoire si l'attraction subie ne le faisait retomber à chaque instant sur son orbite elliptique.

ment 29,3 km/s et 30,3 km/s ; mais pour la planète Pluton, dont l'orbite a une excentricité de 0,25, la vitesse varie entre 3,7 et 6,1 km/s.

Enfin, la troisième loi de Kepler dit que « les carrés des temps des révolutions sidérales de deux planètes sont entre eux comme les cubes des demi-grands axes de leurs orbites ».

Cet énoncé, qui surprend un peu par son caractère étrange, exprime, en réalité, une proportionnalité simple, qui est mise en évidence par la loi de Newton.

## LA LOI DE L'ATTRACTION UNIVERSELLE

La découverte par Kepler de ses fameuses lois donnait une description géométrique du système solaire et des mouvements des planètes, mais ces lois formaient un mystère inexplicable. Il était réservé à Newton de montrer que toute la marche du système solaire est réglée par une seule loi physique ; celle de l'attraction universelle.

À partir des deux premières lois de Kepler, Newton a réussi à montrer que la planète est soumise à une force dirigée vers le Soleil et que cette force varie en raison inverse du carré de la distance. Au moyen de la troisième loi, il déduisit ensuite que la force attractive entre le Soleil et une planète est proportionnelle aux masses de ces deux astres.

D'autre part, Newton a montré que la pesanteur à la surface de la Terre est un cas particulier de l'attraction universelle. Voici, sous une forme simplifiée, son raisonnement : si à un instant donné, la force agissant sur la Lune était supprimée, celle-ci se déplacerait en ligne droite, suivant la tangente : en réalité, la force qui agit sur la Lune maintient celle-ci sur sa trajectoire et l'effet est le même, au bout d'un temps assez petit, que si la Lune retombait sur sa trajectoire. (En termes modernes, on dit : la force d'attraction de la Terre doit exactement compenser la force centri-

fuge). En comparant la quantité dont la Lune doit tomber à la chute d'un corps à la surface de la Terre, Newton a vérifié que la pesanteur n'est pas autre chose que l'attraction produite par la Terre sur les corps voisins de sa surface.

Généralisant alors hardiment, Newton énonça la loi de l'attraction universelle (ou loi de la gravitation) : « deux particules matérielles quelconques s'attirent mutuellement avec une force qui est proportionnelle à chacune des masses et qui varie en raison inverse du carré de la distance ».

La force d'attraction est considérable dans le cas du Soleil et d'une planète, parce que les masses de ces astres sont très grandes. Mais elle est, en général, négligeable pour les corps situés autour de nous. Pourtant on a réussi à la mettre en évidence au laboratoire et à mesurer la constante de proportionnalité, que l'on appelle « constante de l'attraction universelle ». On a pu évaluer ainsi la masse de notre globe à  $5,98 \cdot 10^{27}$  grammes.

## QUELQUES EXEMPLES NUMÉRIQUES

La force d'attraction exercée par le Soleil sur la Terre est de  $3,5 \cdot 10^{21}$  kg-force.

C'est une force extrêmement grande et que notre imagination se représente mal. En réalité, par comparaison à la masse de la Terre, la force est faible, 0,6 dyne par gramme. Prenons, par exemple, à la surface de la Terre, une masse de 1 600 kg ; le poids de cette masse, c'est-à-dire la force d'attraction exercée sur elle par la Terre, est de 1 600 kg-force, tandis que la force d'attraction exercée sur elle par le Soleil est seulement d'un kg-force. Ainsi c'est une force relativement faible qui est exercée par le Soleil sur la Terre et qui maintient celle-ci sur son orbite. Le rapport de la force à la masse est, d'ailleurs, beaucoup plus faible encore pour les planètes lointaines : il est, par exemple, 1 600 fois plus petit environ pour la planète Pluton que pour la Terre,

puisque la distance moyenne de Pluton au Soleil est, en gros, 40 fois celle de la Terre au Soleil ( $40^2 = 1600$ ).

Considérons maintenant le cas de la Lune. L'attraction exercée par la Terre est de  $2,1 \cdot 10^{17}$  kg-force, ou 0,28 dyne par gramme. Elle est donc 2 fois plus faible environ que celle exercée par le Soleil sur la Lune, de sorte que si subitement elle se trouvait arrêtée dans sa marche, la Lune se détacherait de la Terre et se précipiterait sur le Soleil.

L'accélération de la pesanteur est sensiblement la même sur la Terre et sur les trois planètes Saturne, Uranus et Neptune, beaucoup plus grosses, mais moins denses ; par contre, elle est 2,5 fois plus grande à la surface de Jupiter, 28 fois plus grande sur le Soleil et 6 fois plus petite sur la Lune.

## LES ORBITES POSSIBLES

Après avoir démontré sa loi à partir des lois de Kepler, Newton a étudié le problème inverse : admettant la loi de l'attraction universelle, il a cherché à déterminer quelles sont les formes possibles pour l'orbite d'un corps attiré par un autre par la force de gravitation. C'est un problème qui est maintenant classique.

L'orbite relative d'un corps par rapport à l'autre, supposé immobile, est une conique, cercle, ellipse, parabole ou hyperbole. Supposons, par exemple, qu'en un point de sa trajectoire la vitesse d'une planète soit perpendiculaire au rayon qui joint la planète au Soleil. Si cette vitesse est faible, la trajectoire est une ellipse allongée. Si la vitesse croît, l'ellipse se rapproche d'un cercle. Pour une valeur plus grande, l'orbite s'allonge en une ellipse, puis une parabole et enfin une hyperbole. On appelle vitesse parabolique la valeur critique qui correspond exactement à l'orbite parabolique. A notre distance du Soleil, c'est 42 km/s. Nous verrons l'intérêt de cette vitesse dans l'étude des météores.

## LA MÉCANIQUE CÉLESTE

Jusqu'ici nous n'avons considéré que le Soleil et une planète. Quand elle est ainsi limitée au cas de 2 corps, la détermination de l'orbite relative d'un astre par rapport à l'autre se fait facilement et complètement, à partir de la loi de Newton. Mais, dans la réalité, il faut tenir compte de la présence de toutes les autres planètes, qui exercent des attractions non négligeables. Le problème est alors ex-

trêmement compliqué et difficile. La méthode réellement employée consiste à admettre, comme première approximation, l'orbite simple que l'on aurait en ne considérant que la planète étudiée et le Soleil ; puis à calculer ce que l'on appelle les perturbations produites par les autres planètes ; elles sont faibles et, par suite, relativement faciles à évaluer. C'est l'objet de la mécanique céleste de les calculer. Dans d'autres cas, elles ont une grande importance. Ainsi l'action des planètes peut modifier considérablement les trajectoires des comètes ou des astéroïdes.

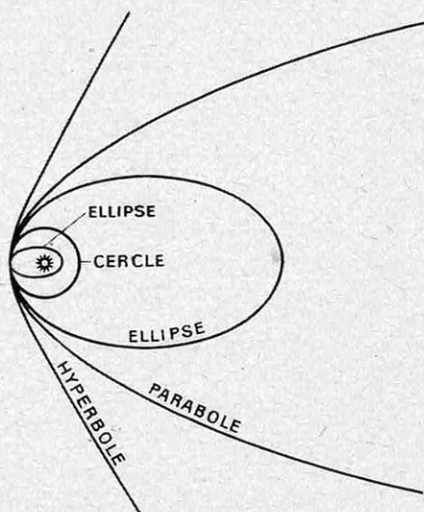
Quant aux systèmes complexes formés de deux corps ou plus de masses comparables, ils posent des problèmes mathématiques très ardues. C'est le cas de la Lune et de la Terre, car la Lune est si proche de notre globe qu'elle exerce sur lui une attraction comparable à celle produite par le Soleil. L'équation qu'il faut écrire pour exprimer le mouvement exact de la Lune est si longue qu'elle couvrirait le volume d'un livre ordinaire de 200 à 300 pages ; et encore n'expliquerait-elle pas quelques irrégularités qui ont été observées et qui peuvent produire un écart de  $14''$  au bout de 250 ans.

## DÉCOUVERTE DE NEPTUNE ET DE PLUTON

La découverte de ces planètes montre deux exemples très remarquables du calcul des perturbations.

Ce sont les observations de la planète Uranus qui ont conduit à la découverte de Neptune. Une orbite d'Uranus fut calculée, en 1821, à l'Observatoire de Paris. On constata d'abord, avec surprise, qu'il était impossible de concilier les anciennes et les récentes

observations ; aucune orbite ne permettait de les représenter simultanément. Il était vraisemblable, pensa-t-on, que les anciennes observations fussent erronées, ou encore que les perturbations dues aux autres planètes eussent produit des écarts considérables. C'est pourquoi on calcula une orbite en ne tenant compte que des récentes observations et en évaluant, de manière précise, l'effet perturbateur des planètes connues. Mais on ne tarda pas à s'apercevoir que, peu à peu, Uranus s'écartait de l'orbite assignée. En 1884, la différence entre les positions prévues et observées dépassait un peu 2 minutes d'arc, erreur inadmissible pour les astronomes.



### FORMES D'ORBITES POSSIBLES

Cercle, ellipse, parabole, hyperbole sont des « coniques ». Le point d'attraction se trouve toujours en un des foyers (ou au centre dans le cas particulier du cercle).

En 1846, Leverrier attaqua le problème. Il montra d'abord que la seule explication possible des écarts observés était la présence d'une planète inconnue au-delà de l'orbite d'Uranus, dont elle perturbait le mouvement. Un examen minutieux de ces écarts lui permit de calculer la position de la planète perturbatrice. Vers le milieu de 1846, il termina ses laborieux calculs, et écrivit à l'astronome Galle, de Berlin, le priant de chercher la nouvelle planète dans une région de la constellation du Verseau, dont l'Observatoire de Berlin possédait une carte récente détaillée. Le 23 septembre 1846, le soir même du jour où il reçut la lettre de Leverrier, Galle trouva la planète à un degré de la position prévue. Ce fut un grand triomphe pour la loi de Newton, sur laquelle les calculs étaient fondés, et que certains commençaient à suspecter ; ce fut aussi un exemple remarquable de ce que l'on a appelé « l'astronomie de l'invisible », c'est-à-dire la recherche des corps célestes sans les voir, d'après l'attraction qu'ils exercent sur les autres astres.

Quant à la planète Pluton, l'histoire de sa découverte ressemble beaucoup à celle de Neptune. On constata, en effet, vers le début du XX<sup>e</sup> siècle, qu'il existait encore de légers écarts entre les positions calculées et observées



#### L'ASTRONOME FRANÇAIS LEVERRIER

Des perturbations de la planète Uranus, il déduisit par de laborieux calculs l'existence de la planète Neptune et calcula sa position.

des planètes lointaines et l'on examina l'hypothèse d'une planète perturbatrice, située au-delà de Neptune. L'orbite de cette planète « transneptunienne » fut déterminée, indépendamment, par deux astronomes, Lowell et Pickering. Mais la mise en évidence de Pluton dans le ciel fut beaucoup plus difficile que celle de Neptune, car son éclat est 500 fois plus faible environ. Ce fut l'œuvre de l'observatoire fondé par Lowell, au début de ce siècle, à Flagstaff, dans l'Arizona, dans le but spécial d'observer les planètes. Les recherches n'aboutirent qu'après la mort (en 1916) de Lowell ; une lunette spéciale de 33 cm d'ouverture fut finalement installée à l'ob-

servatoire ; elle prit, pendant plusieurs mois, des photographies du ciel dans la région de l'écliptique. Pour chaque région on fit deux longues poses, à 2 ou 3 jours d'intervalles ; puis, pour rechercher la planète, on examina soigneusement les plaques au moyen d'un « blink-microscope » : cet appareil, que l'on emploie aussi pour l'étude des mouvements propres des étoiles, permet d'examiner alternativement deux plaques d'une même région du ciel, obtenues avec le même objectif, en passant rapidement de l'une à l'autre 3 ou 4 fois par seconde ; tandis qu'à cause de la persistance des impressions lumineuses les



#### PLUTON, PLANÈTE LA PLUS LOINTAINE DU SYSTÈME SOLAIRE, DÉCOUVERTE EN 1930.

Cette photographie fut prise le 22 mars 1930 à l'aide du télescope de 1,52 m du Mont Wilson. Comme pour Uranus, la position de Pluton avait été calculée d'après les perturbations exercées sur d'autres planètes.



## COMMENT SE PRODUISENT LES MARÉES

L'attraction de la Lune s'exerce plus fortement en A qu'en C, et en C qu'en B. Ces différences donnent aux eaux des mers la forme d'un ellipsoïde de révolution dont le grand axe est dirigé vers la Lune.

étoiles paraissent fixes, un objet qui s'est déplacé dans le ciel entre les deux poses semble sauter alternativement d'une place à l'autre. La planète fut observée en janvier 1930, mais d'autres observations furent nécessaires pour reconnaître qu'il ne s'agissait pas d'un astéroïde, dont la vitesse, faible à certains moments, augmente toujours après quelques semaines. La découverte fut finalement annoncée le 13 mars 1930. La position et le mouvement de la nouvelle planète étaient en accord satisfaisant avec les prédictions de Lowell et de Pickering.

## COMMENT ON DÉTERMINE LES MASSES

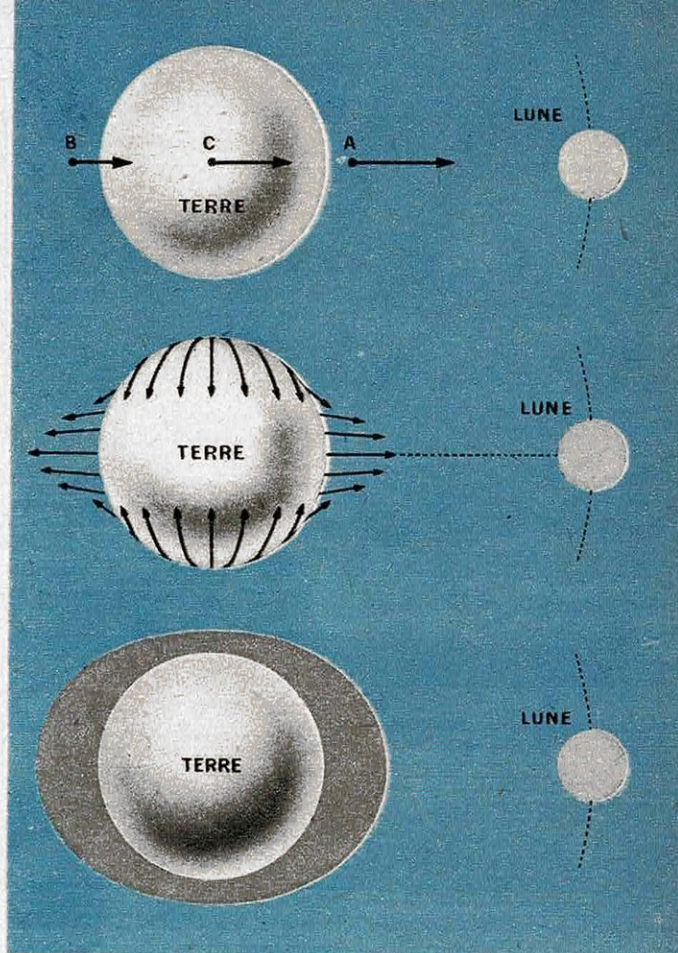
On déduit la masse de la Terre de la détermination expérimentale de la constante de l'attraction universelle.

Puis on calcule la masse du Soleil en exprimant que la force d'attraction de celui-ci sur la Terre équilibre la force centrifuge. Pour évaluer les masses des diverses planètes, la méthode est entièrement différente selon qu'il s'agit, ou non, d'une planète possédant un satellite.

S'il y a au moins un satellite, on écrit, comme dans le cas de la Terre et du Soleil, une équation pour exprimer que la force d'attraction de la planète maintient ce satellite sur son orbite, puis une équation analogue relative au mouvement de la planète autour du Soleil. La comparaison de ces deux équations donne immédiatement le rapport de la masse de la planète à celle du Soleil.

Quant aux planètes qui n'ont pas de satellites connus (Mercure, Vénus, Pluton), leurs masses ne peuvent être calculées que d'après les perturbations qu'elles font subir aux planètes voisines. Ainsi Vénus s'approche de la Terre, de Mars et de Mercure et perturbe leurs mouvements; inversement, le mouvement de Vénus est perturbé par l'action de ces planètes. Cette méthode indirecte est très laborieuse et peu précise. Dans le cas de Mercure, par exemple, on connaît assez mal sa masse, car cette planète est si petite et si proche du Soleil que son effet sur les autres planètes est difficilement appréciable.

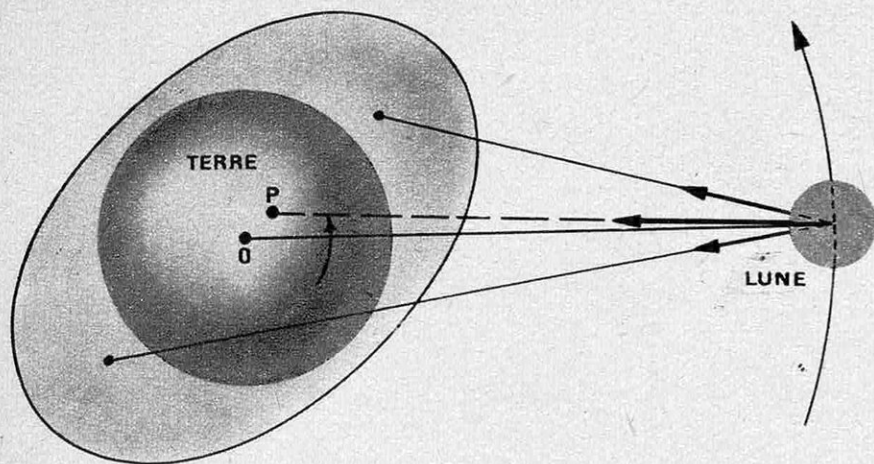
Enfin, les masses des satellites ne peuvent être déterminées que lorsque leur effet d'attraction est suffisant pour être mesuré. C'est à partir des perturbations exercées sur les mouvements de la Terre que l'on évalue la masse de la Lune. Pour les principaux satellites de Jupiter ou de Saturne, on fait intervenir les perturbations exercées par ces satellites les uns sur les autres.



## LES MARÉES

Les marées sont dues essentiellement à l'attraction de la Lune sur l'eau des océans.

Pour expliquer d'une manière simple leur production, admettons, comme l'a fait Newton, que la Terre est entièrement recouverte d'eau (fig. ci-dessus). Dans la région la plus proche de la Lune, l'attraction est plus grande qu'au centre de la Terre; dans la région la plus éloignée, elle est, au contraire, plus faible. Ainsi dans la première région les particules sont attirées plus fortement que l'ensemble de la masse de la Terre et tendent donc à se séparer d'elle; dans la deuxième région, elles sont moins attirées que la masse de la Terre et tendent aussi à se séparer d'elle. Finalement, si nous considérons les différents points de la surface de la Terre, les forces qui agissent sur les océans pour produire les marées sont représentées, en grandeur et direction, par les flèches de la figure. La couche d'eau tend donc à prendre la forme d'un ellipsoïde de révolution ayant son plus grand axe dirigé vers la Lune et tournant lentement autour de la Terre en même temps que la Lune. La Lune tournant, par rapport à la Terre et dans le même sens qu'elle, de 13° environ en 24 h, la période des marées est de 24 h 51 mn, les 51 minutes étant le temps nécessaire pour que la Terre



## LES MARÉES ET LA ROTATION TERRESTRE

La rotation de la Terre entraîne par friction le bourrelet formé par les océans, de sorte que son axe est légèrement en avance sur la direction de la Lune. Les deux bourrelets n'étant pas à la même distance du satellite, il en résulte une dissymétrie dans l'attraction de ce dernier qui s'exerce au total en un point tel que P et non au centre de la Terre.

tourne de  $13^\circ$ . L'axe autour duquel tourne la Terre n'étant généralement pas perpendiculaire au plan passant par la Lune, les deux marées diurnes ont alors des amplitudes différentes.

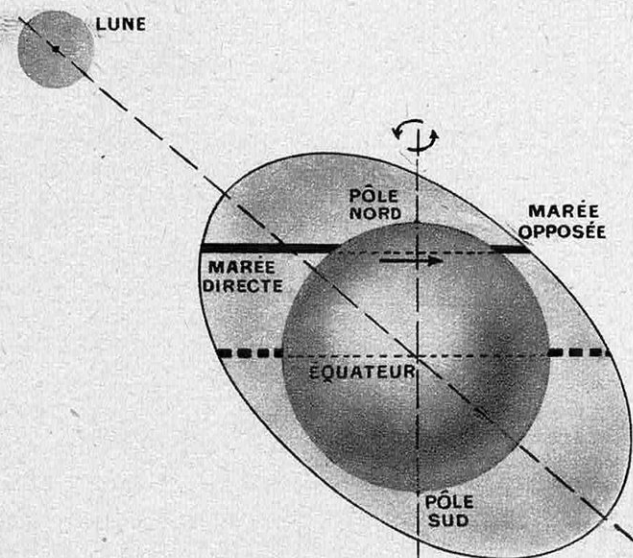
D'autre part, le Soleil lui-même produit des marées, mais, malgré sa masse beaucoup plus grande que celle de la Lune (330000 fois celle de la Terre, 27 millions de fois environ celle de la Lune), son action est plus faible à cause de sa grande distance. Les marées dues au Soleil n'atteignent que les 5/11 de celles dues à la Lune.

Les deux sortes de marées sont en général décalées l'une par rapport à l'autre. Mais au moment où la Lune est en conjonction ou en opposition, c'est-à-dire à la nouvelle et à la pleine Lune, les deux marées s'ajoutent (marées de syzygie ou de vive eau) ; tandis qu'aux périodes des quadratures (premier et dernier quartier), les deux marées s'opposent l'une à l'autre (marées de morte eau).

La variation de la distance de la Lune à la Terre contribue aussi à donner des marées plus ou moins fortes ; cet effet atteint 30%.

Deux fois par an, en général, la nouvelle ou la pleine Lune se produisent au moment où la Lune est à son périégée ; les marées ont alors leur maximum d'amplitude.

Dans la réalité, le phénomène des marées est très complexe. Deux circonstances contribuent à produire des désaccords avec la théorie : d'abord la rotation de la Terre sur elle-même est si rapide que la masse des océans obéit toujours avec un certain retard aux forces qui la poussent ; d'autre part, la profondeur relativement faible des océans et la présence des continents modifient beaucoup les mouvements des flots, l'amplitude des marées pouvant se trouver fortement accrue par l'accumulation des eaux du flux contre un obstacle. Précisons ces points par des chiffres. On appelle **établissement du port** le retard du flux de la marée en un lieu par rapport au passage de la Lune au méridien, ou, plus exactement, la valeur de ce retard pour une marée de vive eau au moment des équinoxes. En France, le plus grand établissement est celui de Dunkerque, 12 h 13 mn, le plus petit celui de Lorient, 3 h 32 mn. Quant à l'amplitude moyenne en vives eaux, elle n'est que de 3 mètres pour les îles Canaries, mais elle atteint 11,5 m sur les côtes de la Manche, à Granville, et 15,4 m dans la baie de Fundy (Canada).



## LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

La théorie de la relativité a été proposée par Einstein pour expliquer le fait extraordinaire que la lumière se propage toujours avec la même vitesse, que sa source soit immobile ou non. D'après cette théorie, très complexe, le temps et l'espace ne peuvent pas être

## ← INÉGALITÉ DES DEUX MARÉES DIURNES

L'axe de rotation de la Terre n'étant généralement pas perpendiculaire à la direction de la Lune, deux marées successives en un même lieu ont des amplitudes nettement différentes. Les deux marées sont toujours sensiblement égales pour les points situés sur l'équateur

## LES ATTRACTIONS DE LA LUNE ET DU SOLEIL S'AJOUTENT AUX GRANDES MARÉES

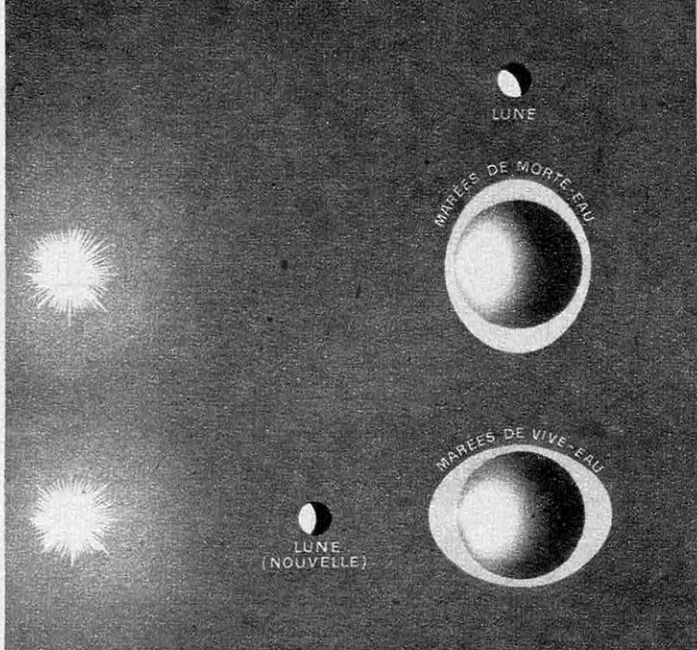
Les marées de vives eaux se produisent à la nouvelle et à la pleine lune quand les actions du soleil et de la lune s'additionnent. Au premier et au dernier quartier, ces actions s'opposent l'une à l'autre (morte eau).

définis d'une manière absolue ; la masse d'un corps est variable avec sa vitesse ; la masse peut se transformer en énergie et, inversement, l'énergie est douée d'inertie.

Tandis que pendant deux siècles on avait pensé que les principes fondamentaux de la mécanique et la loi de la gravitation donnaient une description parfaitement précise de la nature, la théorie de la relativité montre que ces principes et cette loi ne sont pas rigoureux ; en général, il est vrai, les écarts ne sont pas sensibles à l'observation tant que les vitesses relatives mises en jeu ne sont pas très grandes, c'est-à-dire tant qu'elles ne sont pas une fraction appréciable de la vitesse de la lumière.

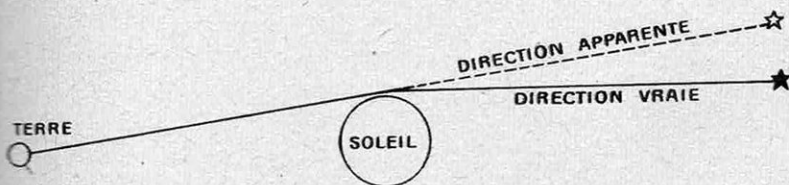
Dans le cas d'une planète qui se meut autour du Soleil, donc dans le cas simple de deux corps, les lois d'Einstein ne conduisent plus, comme celle de Newton, à une orbite elliptique fixe, ayant le Soleil pour foyer ; elles prévoient que l'orbite se déplace lentement dans son plan. La seule planète pour laquelle l'effet prévu soit sensible, jusqu'ici, aux observations, est Mercure, la plus légère et la plus rapide de toutes. Effectivement, le périhélie de Mercure se déplace de 42 secondes d'arc par siècle — on voit la petitesse de l'effet —. La théorie de la relativité rend compte parfaitement de ce déplacement, que l'on avait vainement tenté d'expliquer autrefois, notamment par l'existence d'une planète « intramercurielle », c'est-à-dire plus proche du Soleil que Mercure.

Non seulement la nouvelle théorie a permis d'expliquer des faits déjà connus, mais elle a aussi conduit à prévoir certains phénomènes comme le déplacement apparent vers l'extérieur des étoiles voisines du Soleil, pendant les éclipses. En effet, la lumière passant au voisinage d'un corps massif, comme le Soleil, doit être déviée, comme le serait un projectile matériel ; le déplacement apparent d'une étoile au bord du Soleil a pour valeur maximum  $1''{,}75$  ; les observations ont exactement confirmé le calcul théorique. De plus, la théorie d'Einstein prévoit un déplacement des raies spectrales pour la lumière émise par un corps massif ; la gravitation ralentit, en effet,



les vibrations lumineuses et, par suite, déplace les raies vers le rouge, d'une quantité à peu près négligeable pour la plupart des astres, qui est proportionnelle à la masse et inversement proportionnelle au rayon du corps. Cet effet, dont on ne soupçonnait pas l'existence avant qu'il ait été prévu par Einstein, a été probablement observé dans le cas du Soleil ; il a été confirmé d'une manière convaincante dans le cas de certaines étoiles très denses et notamment des « naines blanches », telles que le Compagnon de Sirius, si bien qu'il est actuellement mis à profit pour calculer la masse des naines blanches et des étoiles très lumineuses et très denses connues sous le nom d'« étoiles de Trumpler ».

En conclusion, les trois effets que nous venons d'indiquer confirment la théorie de la relativité. Mais, en ce qui concerne les mouvements des planètes, la correction que donne l'application des lois d'Einstein par rapport aux principes de la mécanique rationnelle et à la loi de Newton, est toujours extrêmement petite, puisque le seul cas où elle soit juste appréciable à l'observation est celui relatif au mouvement du périhélie de Mercure. Pourtant, lorsque les distances deviennent immenses, une autre correction paraît nécessaire : il semble que, lorsqu'elles sont assez éloignées, les masses exercent entre elles, non une attraction, mais une répulsion, dont nous verrons le rôle à propos de l'expansion de l'univers.



### DÉVIATION DE LA LUMIÈRE

En passant près d'un corps massif comme le Soleil, la lumière d'une étoile est attirée et déviée. Pour un observateur terrestre, l'étoile paraît donc plus éloignée du bord du Soleil qu'en réalité.



● La partie sud du disque lunaire, à son dernier quartier, photographiée au Mont Wilson, à l'aide du télescope de 2,54 m. Les cirques lunaires y sont particulièrement abondants. On distingue vers le haut à gauche les "mers" des Humeurs et des Nuées et légèrement au-dessous du centre le grand cirque de Tycho. Les rayons qui en émanent sont moins apparents au dernier quartier qu'à la pleine lune.

# LA TERRE ET LA LUNE

**N**OUS n'avons pas l'habitude de considérer la Terre comme un astre. Pourtant nous avons vu qu'elle est une planète. Il est donc logique de l'étudier en tant que planète.

Des mesures précises montrent que la Terre n'est pas exactement une sphère. En négligeant le relief terrestre, qui modifie peu la forme générale, on trouve que la Terre a très sensiblement la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati, c'est-à-dire le solide obtenu par la rotation d'une ellipse autour de son petit axe. Elle est, en effet, aplatie vers ses pôles ; mais l'aplatissement est très faible. Les dimensions de la Terre sont les suivantes :

Diamètre équatorial .....	12 756,78 km.
Diamètre polaire .....	12 713,82 km.
Différence .....	42,96 km.

L'aplatissement, c'est-à-dire le rapport de la différence au diamètre équatorial, n'est que de  $1/297$ , en gros  $1/300$ . Le rayon moyen est de 6 371,23 km.

Sur un globe d'un mètre de diamètre, il suffirait que le diamètre polaire soit diminué de 3 millimètres, pour rendre compte de l'aplatissement de la Terre, quant au relief, il se traduirait par des irrégularités de la surface de 0,6 mm au maximum.

L'aplatissement de la Terre est dû à son mouvement de rotation autour de la ligne des pôles.

Rappelons que la longueur du mètre est liée aux dimensions de la Terre, puisque en 1790 la Constituante a décrété que l'unité de longueur, ou mètre, serait la dix-millionième partie du quart d'un méridien terrestre. Donc la longueur d'une ellipse méridienne devrait être de 40 000 kilomètres ; en réalité, on a commis une erreur par défaut, dans la mesure d'un méridien, de 9 152 m et, par suite, le mètre étalon est trop court de  $2/10$  de millimètre environ par rapport au décret de la Constituante.

La circonférence équatoriale de la Terre mesure 40 076,594 km.

## LATITUDE TERRESTRE

Nous savons que l'on définit généralement la position d'un point sur la Terre par sa **latitude** et sa **longitude**. La géographie nous a rendu ces deux mots familiers ; pourtant, il est nécessaire de préciser leurs définitions.

Représentons par une ellipse, dont nous exagérons l'aplatissement, une section de la Terre par un plan méridien (p. 48). La **latitude astronomique** est l'angle de la verticale avec le plan de l'équateur ; elle est

égale à la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon ; on la mesure de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ , positivement vers le nord et négativement vers le sud. La **latitude géographique** fait intervenir l'angle avec le plan de l'équateur de la normale en A à l'ellipsoïde terrestre, c'est-à-dire la perpendiculaire au plan tangent en A. En effet, la verticale AN et la normale en A à l'ellipsoïde ne concordent pas exactement à cause des irrégularités de forme et de densité de la Terre ; le petit angle de ces deux directions porte le nom de **déviations relative de la verticale** ; il ne dépasse pas, en général, 4 à 6'', mais il atteint 67'' aux îles Hawai. Enfin, on définit aussi la **latitude géocentrique** : c'est-à-dire l'angle  $\phi'$  que forme avec le plan de l'équateur la droite joignant le point A au centre de la Terre. Cette droite n'est confondue avec la normale à l'ellipsoïde qu'aux pôles et à l'équateur ; partout ailleurs les deux directions font un petit angle à cause de l'aplatissement de la Terre ; sa valeur maximum est de  $11'1/2$  pour la latitude  $45^\circ$ .

## LONGITUDE ET FUSEAUX HORAIRES

La **longitude** d'un point de la Terre est l'angle du méridien de ce lieu avec un méridien origine ou premier méridien. Par un accord international, le méridien pris pour origine est celui qui passe par l'Observatoire de Greenwich. Les géographes expriment les longitudes en degrés de  $0$  à  $180^\circ$ , et les astronomes en heures, de  $0$  à  $12$  heures ; on ajoute le mot « est » ou « ouest », selon que le point A se trouve à l'est ou à l'ouest du méridien origine.

La figure, page 48, montre que la **longitude** d'un lieu est égale à la différence du temps local à Greenwich et en ce point. L'heure locale diffère donc d'un point à un autre ; la différence est de 9 mn 21 s entre Paris et Greenwich, elle dépasse 47 mn entre Brest et Nice.

On a pendant longtemps employé l'heure locale dans la vie courante. Mais la rapidité des communications a rendu nécessaire l'uniformisation des heures. Depuis 1911, l'**heure légale** est déterminée à la surface du globe à l'aide des fuseaux horaires, qui ont été adoptés par la plupart des nations. En principe, la Terre est divisée en 24 fuseaux de  $15$  degrés, le premier fuseau étant exactement centre sur le méridien de Greenwich. Dans chaque fuseau, les indications des horloges sont identiques et elles diffèrent d'une heure par rapport au fuseau précédent. En réalité, les fuseaux ne sont pas exactement limités par des

méridiens équidistants, mais ils suivent plus ou moins les frontières des pays, car les pays peu étendus en longitude sont généralement rattachés en entier à un seul faisceau. En France et en Algérie, l'heure légale est l'heure de temps moyen de Greenwich, que l'on appelle aussi le **temps universel** ; c'est l'heure de l'Europe occidentale ; c'est aussi celle de la Belgique, l'Espagne, le Luxembourg. L'heure de l'Europe centrale, qui avance d'une heure sur la précédente, est adoptée par l'Allemagne, l'Autriche, le Danemark, la Hongrie, l'Italie, la Norvège, la Pologne, la Suède, la Suisse, la Tchécoslovaquie, la Yougoslavie. En Bulgarie, en Finlande, en Grèce, en Turquie, on a l'heure de l'Europe orientale, qui avance de deux heures sur la nôtre. C'est aussi l'heure adoptée dans l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques jusqu'à la latitude de  $40^\circ$  est. Les pays de grande étendue, comme l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques, les Etats-Unis d'Amérique, le Canada, comprennent plusieurs fuseaux horaires sur leur territoire. Enfin on adopté une **ligne de changement** de date, pour laquelle on a fait la convention suivante : quand on traverse cette ligne en allant vers l'**ouest**, il faut augmenter la date d'un jour, c'est-à-dire sauter un jour ; au contraire, quand on la traverse en allant vers l'**est**, il faut **diminuer** la date d'un jour, autrement dit compter deux fois le même jour.

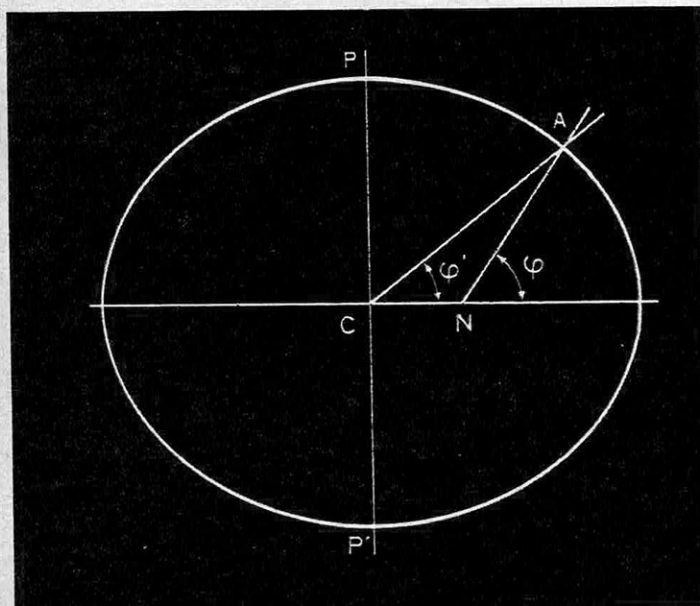
Rappelons que Jules Verne a tiré parti de ces changements de date dans son livre : "Le tour du monde en quatre-vingts jours".

La ligne de changement de date a été dressée arbitrairement, elle passe par des régions peu habitées.

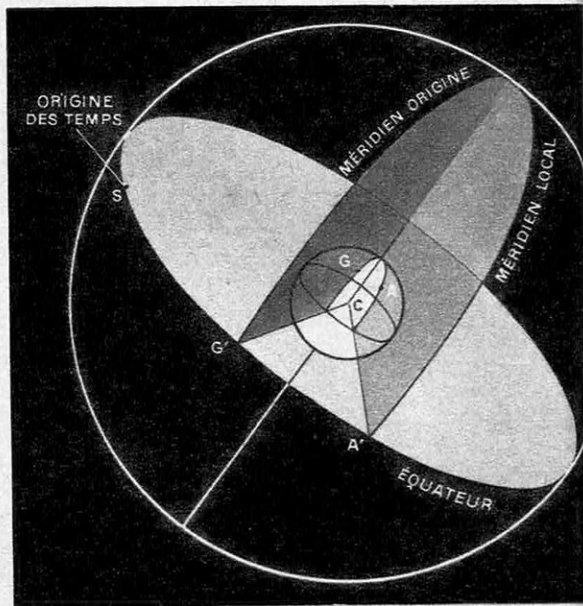
## LES MOUVEMENTS DE LA TERRE

Comme chacun le sait et comme nous l'avons déjà dit, la Terre a, par rapport au Soleil, un double mouvement ; d'une part, elle tourne sur elle-même vers l'est, en 24 heures sidérales, soit 23 h 56 mn 4 s de temps moyen, autour de son axe des pôles. D'autre part, elle accomplit une révolution autour du Soleil en un an sidéral ; comme pour toutes les planètes, son orbite est une ellipse, de faible excentricité. Son axe de rotation n'est pas perpendiculaire au plan de l'orbite de la Terre, mais il fait avec la perpendiculaire à ce plan un angle de  $27^\circ 1/2$  et il reste sensiblement parallèle à une direction fixe pendant toute la révolution.

Une question primordiale au sujet de la rotation de la Terre est de savoir si elle est exactement constante, puisque c'est elle qui nous sert à mesurer le temps. Or on a, depuis quelques années, des soupçons que la vitesse de rotation de la Terre a légèrement diminué. En comparant les dates de divers phénomènes astronomiques tels que les éclipses, les occultations des étoiles par la Lune, par rapport aux dates prévues, il semble que les astres se déplacent dans le ciel un peu plus vite qu'ils ne devraient, et l'on attribue cette avance à une augmentation extrêmement faible de la durée de rotation de la Terre : un à deux millièmes de seconde par siècle. A cette variation progressive se superposeraient aussi, parfois, des variations accidentelles. Diverses causes peuvent produire de telles variations : certains attribuent le très lent ralentissement au frottement des marées et les variations accidentelles à d'éventuelles



● La latitude astronomique est l'angle  $\phi$  de la verticale en A avec l'équateur ;  $\varphi$  est la latitude géocentrique.



● La longitude d'un lieu A est l'angle du méridien au méridien de Greenwich ; S est l'origine des temps.

## HEURES ET DATES →

La surface du globe est divisée en 24 fuseaux horaires. On a supposé sur la figure qu'il était 14 heures à Paris. La date change lorsqu'il est minuit en un lieu et aussi lorsqu'on franchit le méridien de changement de date.

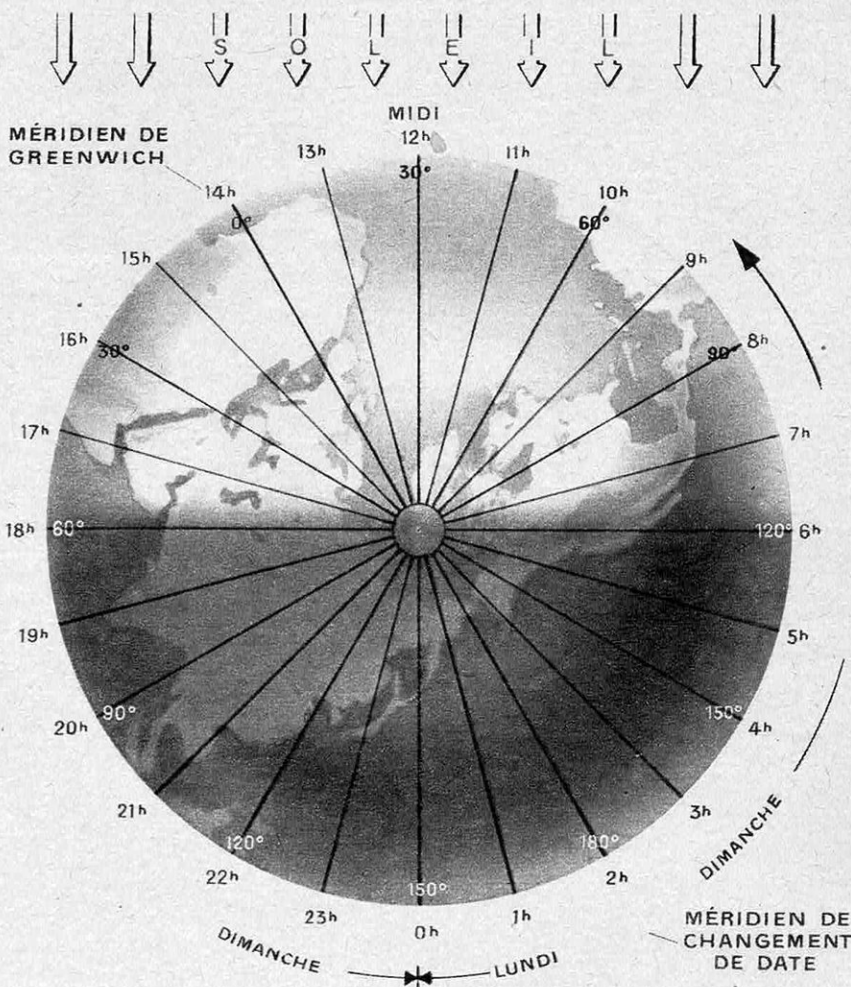
variations du rayon moyen de la Terre, de l'ordre de quelques centimètres.

En ce qui concerne l'orbite de la Terre, précisons que la distance moyenne de la Terre au Soleil vaut 149 675 000 kilomètres. La variation relative de distance au cours de la révolution est faible, puisqu'elle n'atteint que  $\pm 1,7\%$ , soit au total une variation de 3,4%. Mais, à cause de l'énorme distance moyenne, cela représente plus de 5 millions de kilomètres.

## LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

Les mouvements de la Terre sont, en réalité, plus compliqués que nous ne les avons décrits jusqu'ici. L'axe de rotation de la Terre ne peut pas être considéré comme parallèle à une direction fixe pendant un long intervalle de temps ; l'angle de cet axe et du plan de l'écliptique ne change pratiquement pas, mais l'axe tourne lentement, en une période d'environ 26 000 ans. Le mouvement de la Terre présente donc quelques analogies avec celui d'une toupie. On appelle **précession** ce mouvement de l'axe de la Terre ou, ce qui revient au même, du plan de son équateur. Puisque le plan de l'équateur détermine la position des équinoxes, ceux-ci se déplacent, et leur mouvement est appelé « précession des équinoxes ».

Comme pour une toupie, la précession s'explique par l'action des forces qui tendent à modifier la direction de l'axe de rotation. Dans le cas de la Terre, cette action est due à son aplatissement et aux forces d'attraction exercées par la Lune, le Soleil et les planètes. Exagérons (fig. p. 50) le renflement équatorial de la Terre et représentons cette dernière comme une sphère entourée d'une bande équatoriale en saillie. La Lune exerce sur la saillie une force d'attraction qui est plus forte dans la région la plus proche que dans la région la plus éloignée. La Lune tend donc à faire tourner la Terre de manière à amener sa saillie dans le plan passant par le



centre de la Terre et de la Lune. Mais le mouvement rapide de rotation de la Terre empêche cette variation d'inclinaison et il se produit un lent déplacement conique de l'axe de rotation. Les pôles célestes, vers lesquels l'axe de rotation de la Terre est dirigé, semblent ainsi décrire lentement des cercles autour des pôles de l'écliptique, le rayon de ces cercles étant de  $23^{\circ}27'$ . Ainsi le pôle céleste nord est actuellement très proche (à  $1^{\circ}2'$ ) de l'étoile dite Polaire. Mais à l'époque où furent construites les Pyramides d'Égypte, il y a environ 4 000 ans, le pôle était voisin de l'étoile  $\alpha$  Dragon et la Polaire se trouvait alors à  $25^{\circ}$  de ce pôle. Dans 12 000 ans, le pôle sera près de l'étoile Véga ( $\alpha$  Lyre).

Le mouvement des pôles célestes n'est d'ailleurs circulaire qu'en première approximation. Il faut tenir compte, en effet, non seulement de l'influence de la Lune, mais aussi de celle du Soleil et même de celle des planètes. L'action de la Lune est environ deux fois et demi plus importante que celle du Soleil, parce que, comme dans le cas des marées, c'est la différence des attractions sur les diverses portions du globe qui intervient, et non l'attraction totale ; la proximité de la Lune compense la faiblesse de sa masse. Quant aux planètes, leur influence est très

faible, mais non nulle ; elle se traduit par le fait qu'au bout de la période de 26 000 ans, que nous avons indiquée, les pôles célestes ne se retrouveront pas exactement à la même place, parce que le mouvement n'aura pas été rigoureusement circulaire ; autrement dit, d'un cycle à l'autre, le mouvement varie un peu.

En ce qui concerne le deuxième point, puisque la Lune décrit son orbite autour de la Terre en un mois environ, elle passe deux fois par mois dans le plan équatorial et son action est alors nulle ; par conséquent, la valeur de la précession est variable. De plus, la valeur moyenne annuelle n'est pas constante parce que l'orbite de la Lune étant inclinée de 5° environ sur l'écliptique, tantôt cet angle de 5° s'ajoute à l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur (23°27') pour donner un effet plus grand, tantôt il se retranche. Comme le mouvement de la Lune par rapport à l'écliptique présente une période de 19 ans, on retrouve cette période dans la précession. Au lieu de décrire un cercle, le pôle céleste décrit une courbe sinueuse, de part et d'autre du cercle, analogue à celle dessinée dans la figure page 51. La période de l'écart est de 19 ans et son amplitude maximum est de 9'21. Nous avons, dans la figure, exagéré cette amplitude et, d'autre part, nous n'avons dessiné qu'un petit nombre d'ondes ; en réalité, puisqu'une onde dure 19 ans, il y en a, pour tout le cercle, 1 400 environ. Cet effet d'oscillation porte le nom de **nutaton** ; il a été découvert par Bradley.

Examinons maintenant quelques conséquences de la précession :

1° La position apparente des étoiles dans le ciel a changé au cours des siècles. Ainsi certaines étoiles ne sont plus visibles dans nos régions alors qu'elles l'étaient autrefois, ou inversement. Par exemple, on pouvait voir, de nos contrées, il y a 6 000 ans, les étoiles de la Croix du Sud :

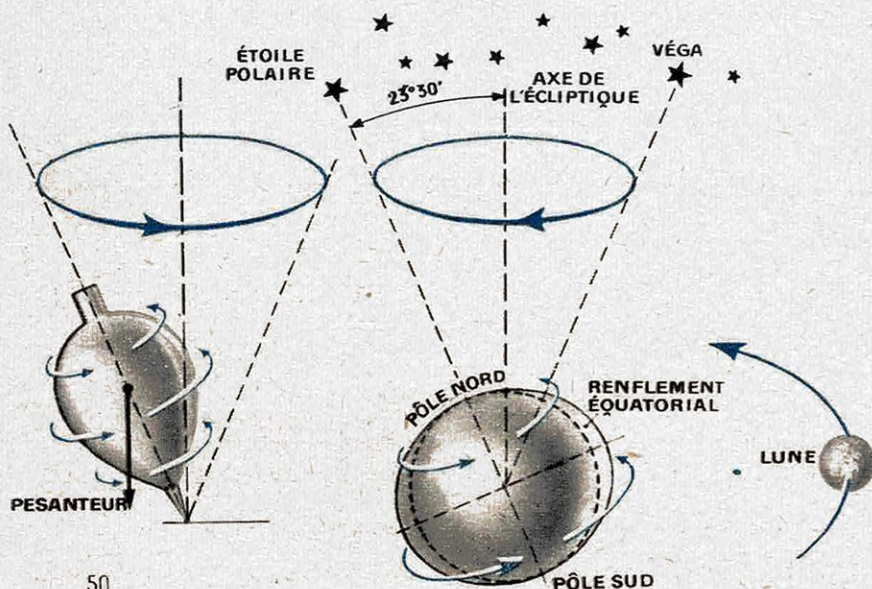
2° Les signes du zodiaque ne concordent plus maintenant avec les constellations de même nom :

3° On définit l'année par la période de révolution de la Terre. L'**année sidérale** est le temps nécessaire pour que la Terre effectue une révolution complète autour du Soleil, par rapport aux étoiles. C'est donc la période réelle de révolution de la Terre. Sa valeur est de 365 jours 6 heures 9 mn 9,5 s de temps solaire moyen, ou, sous forme décimale, 365,25636 jours.

L'**année tropique** est l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du Soleil par le point vernal. C'est l'année tropique qui est d'emploi courant, car c'est elle qui détermine le retour des saisons. Elle est plus courte que l'année sidérale, puisque, à cause de la précession, le point vernal se déplace vers l'ouest sur l'écliptique, à la rencontre du soleil. La durée de l'année tropique est de 365 jours 5 heures 48 mn 46 s de temps solaire moyen, soit 365,24220 jours. Elle diminue actuellement de 0,63 s par siècle. Si on employait l'année sidérale dans la vie courante, c'est-à-dire si on la définissait par la révolution de la Terre, comparée aux étoiles, les saisons seraient progressivement décalées.

## L'INTÉRIEUR DE LA TERRE

La masse de la Terre est  $5,98 \times 10^{27}$  g. D'après la valeur de son volume, on déduit que sa densité moyenne vaut 5,52 fois celle de l'eau. Cette densité est deux fois plus grande que celle des couches superficielles, que l'on évalue, en moyenne, à 2,7. On en conclut que l'intérieur de la Terre a une forte densité. Quant à connaître sa nature, nous ne pouvons la déterminer que par des méthodes indirectes, puisque les sondages ne dépassent guère une profondeur de 4 000 mètres, c'est-à-dire une toute petite fraction du rayon.



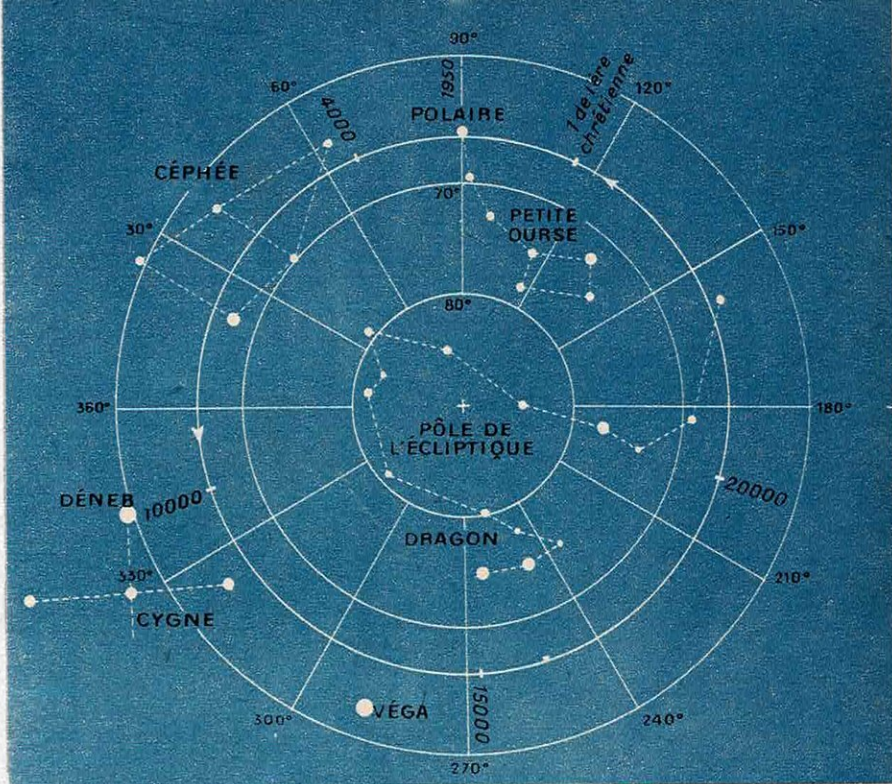
## LA TERRE TOURNE COMME UNE TOUPIE

L'axe de la Terre effectue une rotation lente autour de l'axe de l'écliptique ; de même que celui d'une toupie tourne autour de la verticale de son point d'appui. Mais les sens de ces mouvements sont inverses car la pesanteur terrestre tend à éloigner l'axe de rotation de la verticale, tandis que l'attraction de la Lune sur le renflement équatorial de la Terre tend à rapprocher l'axe de cette dernière de celui de l'écliptique. Dans les deux cas, c'est la « précession ».



## MOUVEMENT DU POLE CÉLESTE DU A LA PRÉCESSION

L'axe des pôles terrestres reste sensiblement parallèle à lui-même dans le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil. Les pôles célestes sont donc apparemment fixes. En réalité, par suite des attractions du Soleil et de la Lune sur le renflement équatorial de la Terre, l'axe des pôles décrit en près de 26 000 ans un cône de révolution autour de l'axe de l'écliptique. Le pôle céleste nord décrit ainsi, parmi le système sensiblement invariable des étoiles, un cercle dont le rayon apparent mesure  $23^{\circ} 27'$ . Dans 13 000 ans environ, il sera éloigné de plus de  $45^{\circ}$  de l'étoile  $\alpha$  Petite Ourse que nous appelons actuellement l'étoile Polaire. Ce mouvement a pour effet de faire tourner les équinoxes (précession des équinoxes).



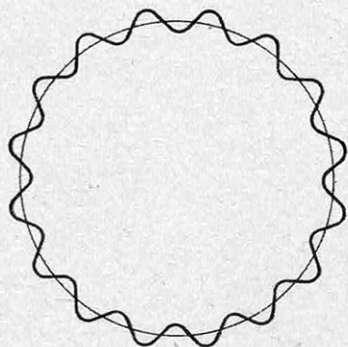
Ces sondages montrent que la température croît à l'intérieur du sol, en moyenne de 3 degrés par cent mètres ; elle est donc voisine de  $100^{\circ}\text{C}$  pour une profondeur de 3 000 mètres. Mais on ne peut certainement pas extrapoler cette règle jusqu'au centre de la Terre. On a des raisons de croire que l'augmentation de la température avec la profondeur est limitée à une couche relativement peu épaisse ; elle serait due à la présence, dans cette couche, de substances radioactives qui, on le sait, donnent un dégagement continu de chaleur. On a calculé que, si tout l'intérieur de notre globe contenait la même proportion de substances radioactives que les roches voisines de la surface, la température de la Terre devrait croître constamment.

Les informations les plus précises sur l'intérieur de la Terre se déduisent de l'étude des séismes. Quand un tremblement de terre se produit dans une région, la perturbation se propage dans le sol par des ondes concentriques, de la même manière que le bruit d'une explosion se propage dans l'air. Loin de l'épicentre, un sismographe enregistre trois sortes d'ondes. Les unes, dites **ondes superficielles**, se propagent à la surface du sol ; ce sont généralement ces ondes qui ont la plus grande amplitude, donc aussi le plus grand effet des-

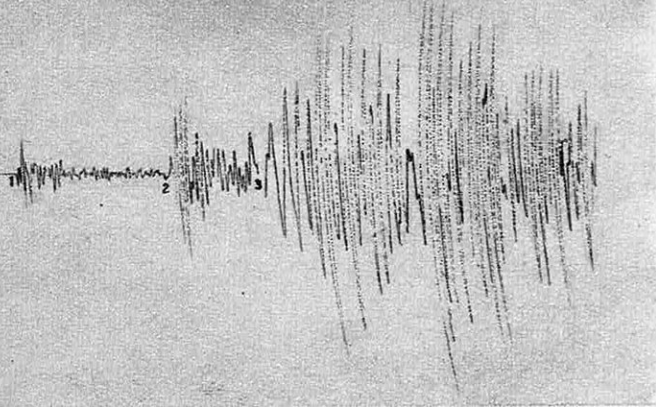
tructeur. Les deux autres ondes, au contraire, se propagent à l'intérieur du globe. Les unes sont dites **ondes longitudinales**, parce que le déplacement a lieu dans le sens de la propagation ; elles transmettent des variations de volume, par compression et dilatation, comme les ondes sonores. Les autres sont appelées **ondes transversales**, parce que le déplacement est perpendiculaire à la direction de la propagation ; elles sont analogues aux ondes qui produisent les rides à la surface de l'eau. Ces diverses ondes arrivent l'une après l'autre en un point de la Terre, car, d'une part, l'onde superficielle ne suit pas le même trajet que les deux autres et, de plus les vitesses de propagation de ces trois sortes d'ondes sont différentes.

Le résultat le plus remarquable est que les ondes transversales ne peuvent pas traverser un noyau central, dont le rayon est sensiblement la moitié de celui de la Terre. Comme les ondes transversales sont fortement amorties dans les liquides, de nombreux géophysiciens pensent que le noyau de la Terre serait liquide.

Une autre conséquence, qui concerne les couches moins profondes, se déduit des mesures de la pesanteur. Au voisinage des grands massifs de montagnes, par exemple de l'Himalaya, ou, au contraire, près des fosses marines profondes, les anomalies de



● La nutation, oscillation du pôle autour du cercle de la précession.



## ENREGISTREMENT D'UN SÉISME LOINTAIN

Les chiffres 1, 2, 3 marquent le début des ondes longitudinales, transversales et superficielles qui ne parviennent pas simultanément à l'appareil enregistreur.

la pesanteur sont moins importantes qu'on pourrait les prévoir. Il faut, pour qu'il en soit ainsi, qu'il existe une sorte de compensation entre les masses superficielles et les masses sous-jacentes : ainsi, au-dessous des masses montagneuses il doit y avoir des masses de densité relativement faible et, au contraire, au-dessous des mers doivent se trouver des masses plus denses. La théorie de la **répartition isostatique** admet que la masse de matière au-dessous d'une surface déterminée quelconque est constante. Pour qu'une telle répartition se soit établie, il faudrait que la croûte terrestre flottât sur une couche déformable très visqueuse.

Aux problèmes précédents se trouvent liés le phénomène de la variation des latitudes et la théorie de la **dérive des continents**.

Plusieurs arguments semblent, en effet, montrer que les continents ne formaient qu'un seul bloc à une époque très reculée et sont déplacés considérablement les uns par rapport aux autres et fragmentés au cours des temps.

Mais la principale objection à cette théorie est que le pôle de la Terre ne subit pas un déplacement systématique. On a constaté un mouvement du pôle ; il se traduit par une variation de la latitude, puisque la latitude d'un lieu est égale à la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon. En des lieux différents on observe donc des variations simultanées de la latitude. Le déplacement du pôle, étudié avec précision depuis quelques années,

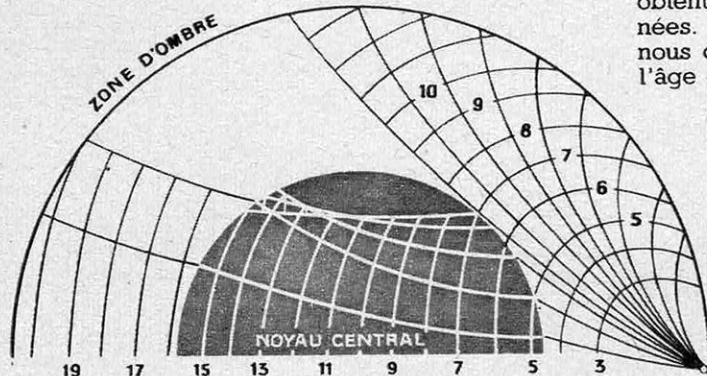
n'est qu'une sorte d'oscillation autour d'une position moyenne, dont le pôle ne s'écarte pas à plus de 15 mètres. Ce déplacement n'est pas dû à une déformation du globe ; la théorie avait prévu son existence avant qu'il ait été observé ; elle montre qu'il doit être attribué en réalité au fait que l'axe de rotation du globe ne coïncide pas exactement avec son axe de symétrie.

## L'ÂGE DE LA TERRE

Ce sont des méthodes géologiques qui ont été les premières à donner quelques idées sur l'âge de la Terre. Mais c'est la physique qui a fourni la méthode la plus sûre et la plus précise ; elle est fondée sur l'étude de la radioactivité des roches.

La désintégration de l'uranium et du thorium a pour terme final un isotope du plomb. Les lois de ces désintégrations sont bien connues. En déterminant la quantité de plomb présente dans un minerai radioactif, on peut calculer depuis combien de temps la désintégration se poursuit et fixer ainsi l'âge du minerai, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé depuis sa cristallisation. Il y a quelques années encore, on adoptait pour l'âge de la Terre la valeur la plus grande trouvée, soit environ deux milliards d'années.

Mais le professeur anglais A. Holmes, qui s'est consacré à ce problème, a mis au point, en 1947, une méthode beaucoup plus sûre puisqu'elle a l'avantage d'éliminer l'âge géologique du minerai. Le principe est le suivant : pour les corps non radioactifs, qui sont stables et ne se transforment pas avec le temps, on constate que la proportion d'isotopes dont ils sont formés est toujours constante ; en comparant entre elles des roches radioactives, qui contiennent des proportions différentes des divers éléments et de leurs isotopes, on détermine leur âge en cherchant à quelle époque tous les minerais contenaient la même proportion d'isotopes. Le résultat obtenu est de 3 milliards 350 millions d'années. Nous adopterons ce nombre comme nous donnant la valeur la plus probable de l'âge de la Terre.



## LES ONDES D'UN SÉISME

Le noyau central réfracte les ondes longitudinales et produit des zones d'ombre où elles ne sont pas ressenties à la surface. Les ondes transversales sont freinées par le noyau. Les chiffres indiquent le temps de propagation de ces ondes en minutes.

## L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

La terre est enveloppée d'une atmosphère composée presque uniquement d'azote et d'oxygène. Au voisinage du sol, l'air sec contient, en volume, 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 1 % environ d'argon et des quantités plus faibles de gaz carbonique, de néon, d'hydrogène, d'hélium et d'autres « gaz rares ».

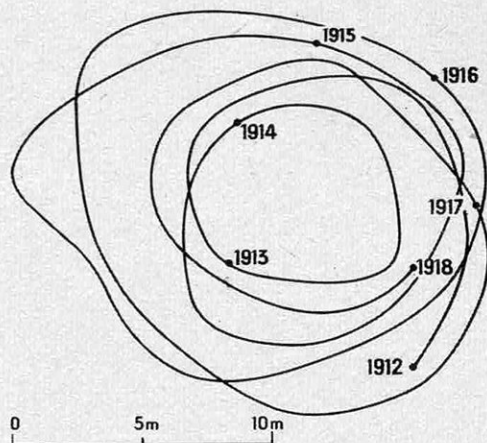
On distingue plusieurs régions dans l'atmosphère :

1° La **troposphère** est la zone voisine du sol, jusqu'à une altitude de 10 à 15 kilomètres. C'est dans cette région que se trouvent les nuages et que se produisent la plupart des phénomènes météorologiques. Elle contient 80 % de la masse totale de l'atmosphère.

2° La **stratosphère** s'étend jusque vers 40 kilomètres. La température y est sensiblement indépendante de l'altitude, voisine de  $-55^{\circ}\text{C}$ . Presque toute cette région est exploitable en ballons-sondes.

Entre 40 et 100 kilomètres d'altitude s'étend une région qui ne porte pas de nom particulier et qui est, jusqu'ici, mal connue parce qu'on ne disposait guère de méthodes, directes ou indirectes, pour l'étudier. Les fusées V2 ont permis d'en commencer récemment l'exploration.

3° A 100 kilomètres débute la région que l'on appelle l'**ionosphère**. Ce mot a été choisi pour attirer l'attention sur la présence de nombreux corpuscules électrisés, ions et électrons, dont l'importance est très grande pour la propagation des ondes électromagné-



## LE POLE NORD ENTRE 1912 ET 1918

Les dates marquent la position au début de chaque année. Ne pas confondre ce mouvement avec le mouvement de précession.

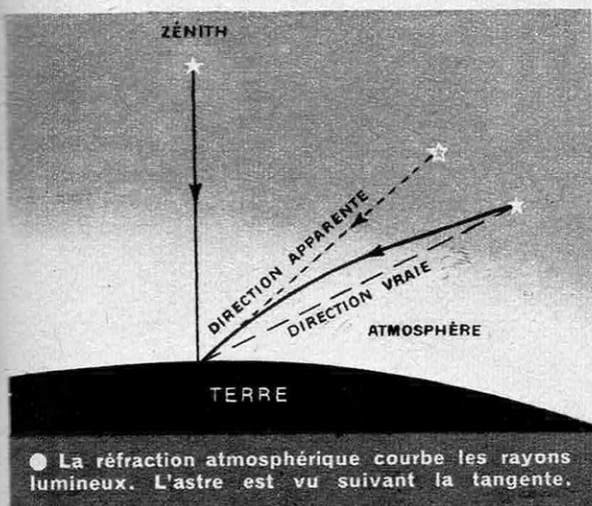
tiques ; en effet, ces corpuscules forment des « couches » sur lesquelles les ondes de radio se réfléchissent comme sur un miroir, ce qui permet leur propagation à grande distance. On désigne les

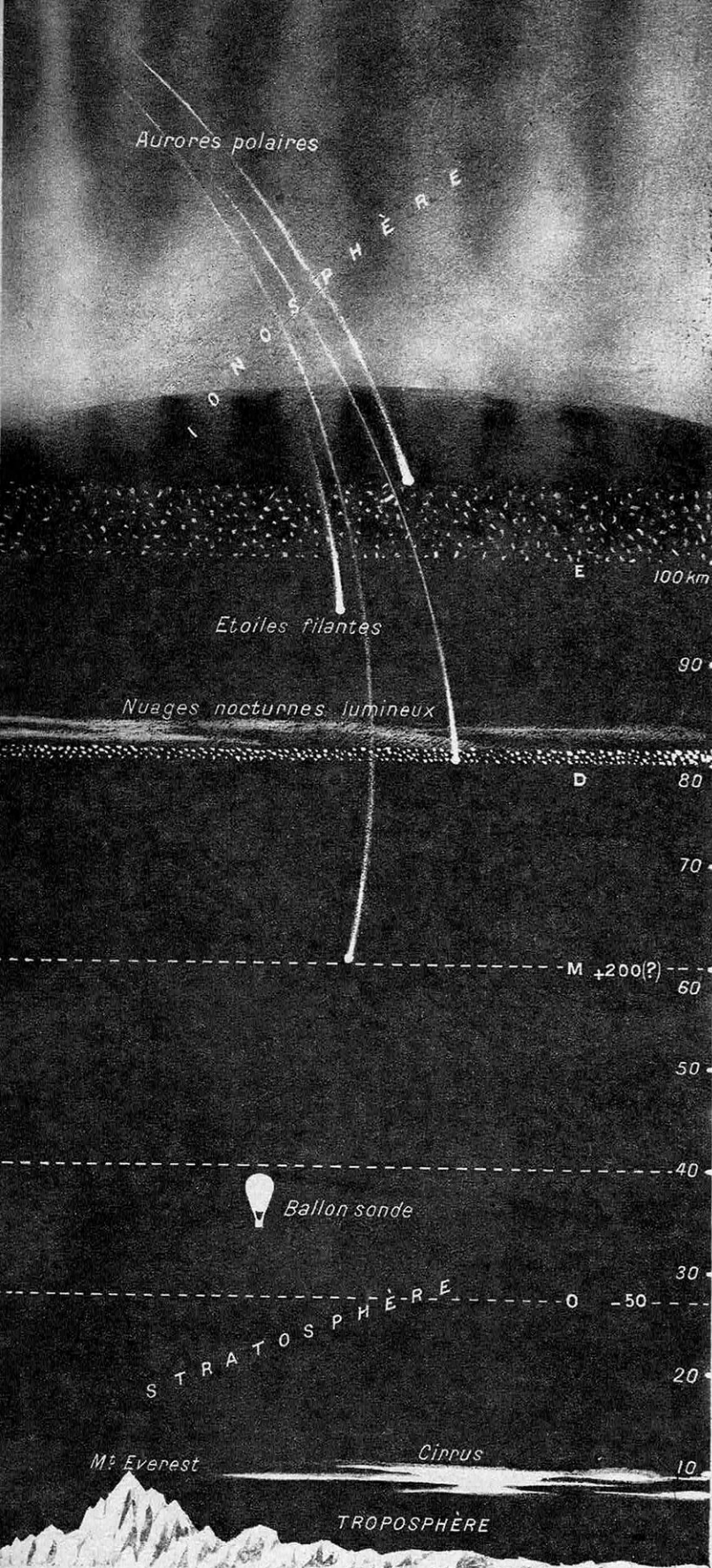
couches électrisées par des lettres ; les deux principales sont la couche E, vers 100 kilomètres d'altitude et la couche F, vers 250 kilomètres.

L'**ionosphère** est aussi la région des **aurores polaires**, qui comptent parmi les phénomènes atmosphériques les plus remarquables. Elles sont dues à une illumination de cette atmosphère par l'arrivée de faisceaux d'électrons émis par le Soleil et dont les trajectoires sont courbées vers les régions polaires par l'action du champ magnétique terrestre.

D'ailleurs, en l'absence d'aurores polaires, le fond du ciel nocturne n'est jamais, par beau temps, complètement noir ; il émet une très faible lumière qui présente des analogies avec les aurores et qui est due principalement à un phénomène de phosphorescence de la haute atmosphère,

Tandis que l'on croyait autrefois la haute atmosphère formée de gaz légers, comme l'hydrogène ou l'hélium, on a maintenant des preuves, notamment par l'analyse spectrale des aurores, que la composition de l'air ne varie guère avec l'altitude ; ceci s'explique par la présence de courants de convection





et de vents très violents. Toutefois, l'oxygène et l'azote de la très haute atmosphère se trouvent presque uniquement à l'état atomique; et non à l'état moléculaire que nous leur connaissons sous les conditions habituelles.

Notre atmosphère produit, sur la lumière des astres qui la traverse, des raies ou bandes d'absorption, que la spectroscopie met en évidence. On les appelle raies ou bandes **telluriques**, pour exprimer le fait qu'elles sont dues à l'atmosphère de la Terre. Certaines ont une grande importance. Ainsi notre atmosphère arrête complètement les radiations ultraviolettes dont la longueur d'onde est inférieure à un peu moins de 0,3 micron et qui sont très nocives. On a reconnu que cette absorption est due à la présence, dans notre atmosphère, d'une très faible quantité d'ozone, qui se forme à partir de l'oxygène sous l'action des rayons ultraviolets, vers une altitude de 20 à 30 kilomètres.

D'autre part, notre atmosphère présente aussi de nombreuses et intenses bandes d'absorption dans la région infrarouge du spectre; elles appartiennent à l'ozone, à la vapeur d'eau et au gaz carbonique. Ces bandes empêchent la Terre de rayonner sa chaleur dans l'espace; ainsi, grâce à elles, notre atmosphère protège la Terre contre le refroidissement, comme les vitres d'une serre.

## LA RÉFRACTION ATMOSPHÉRIQUE ET LA SCINTILLATION

On sait que lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre plus réfringent, il se rapproche de la normale.

Un rayon lumineux qui arrive dans notre atmosphère rencontre des couches d'air de densité croissante et, par suite, de plus en plus réfringentes; il subit donc, lui aussi, une déviation progressive,

### ← COUPE DE L'ATMOSPHÈRE

On a porté à droite les altitudes en kilomètres, et quelques températures. Dans la zone O, la concentration de l'ozone est la plus grande. En M, la température passe par un maximum. D et E sont des couches ionisées; la couche F serait à 250 km, au delà des altitudes notées.

à laquelle on donne le nom de **réfraction atmosphérique**. L'effet de la réfraction est toujours de **faire paraître un astre plus haut au-dessus de l'horizon** qu'il n'est en réalité.

On constate que la réfraction est supérieure, à l'horizon, à 32', c'est-à-dire qu'elle dépasse le diamètre apparent du Soleil ou de la Lune. Au moment où nous voyons un de ces astres « se lever » ou « se coucher » et où leur disque semble juste toucher l'horizon par son bord inférieur, ce bord est, en réalité, à 35' au-dessous du plan de l'horizon et l'astre est tout entier au-dessous de ce plan. Ainsi la réfraction augmente la durée du jour.

On prend pour heure du « lever » ou du « coucher » du Soleil — ou de la Lune — l'instant où le bord supérieur apparaît à l'horizon ; le centre du Soleil est alors à 51' au-dessous du plan de l'horizon (35' dues à la réfraction + 16' de demi-diamètre apparent).

Les mouvements de l'atmosphère produisent la scintillation des étoiles, par un effet analogue à celui qui donne les ondulations de l'air que l'on observe, par exemple, en été au-dessus d'un sol très chaud. Deux actions interviennent : les variations rapides de la densité modifient, à chaque instant, le trajet des rayons ; et d'autre part, il y a interférence des rayons lumineux, qui parviennent à l'observateur par des trajets différents et qui, par suite, tantôt se renforcent, tantôt se détruisent. Les étoiles scintillent davantage près de l'horizon parce que les rayons décrivent un long trajet dans l'atmosphère.

D'habitude les planètes ne scintillent pas. Elles ont un diamètre apparent appréciable, ce qui signifie que les rayons parvenant à l'œil d'un observateur forment un faisceau assez large, pour lequel les effets de scintillation ne sont pas synchrones en général. Malgré ces oscillations, l'ensemble donne

l'impression d'une intensité constante. Parfois, cependant, près de l'horizon, les accidents de réfraction sont assez gros pour que les planètes elles-mêmes scintillent.

Dans les lunettes, la scintillation produit de rapides mouvements d'oscillation des étoiles autour de leur position moyenne ; les images « dansent ». Malheureusement, la scintillation est souvent d'autant plus forte que le ciel est plus pur. Il convient d'établir les observatoires dans des régions où, non seulement la nébulosité, mais aussi la turbulence de l'atmosphère sont faibles.

## LA LUNE

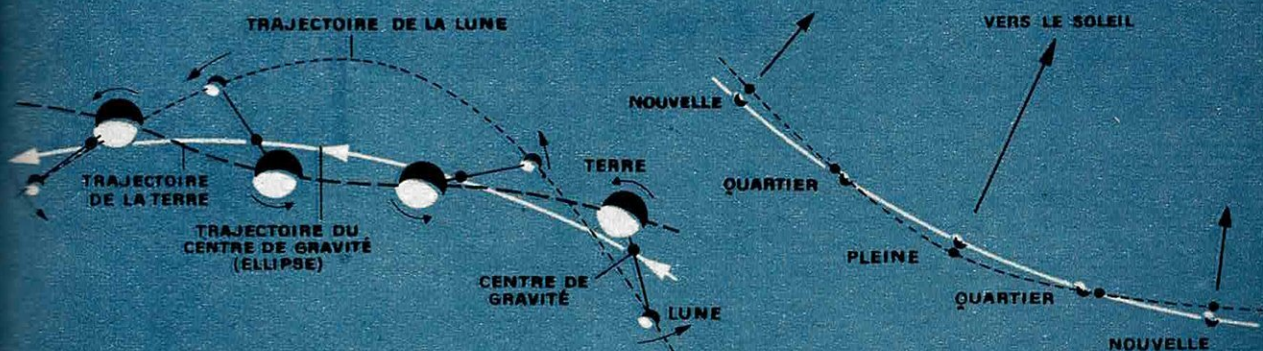
Dans son mouvement de révolution autour du Soleil, la Terre est accompagnée par son satellite, la Lune, dont le rayon vaut environ le quart de celui de la Terre soit 1 736 kilomètres. Son volume est à peu près le 1/50 de celui de la Terre.

La masse de la Lune vaut environ 1/81 de celle de la Terre ; on en déduit sa densité : 0,6 fois celle de la Terre, soit 3,3 fois la densité de l'eau. C'est une densité un peu supérieure à celle de la croûte superficielle de la Terre.

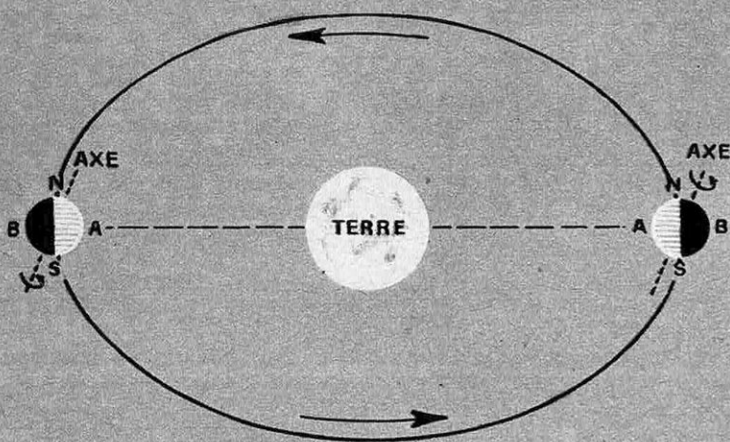
L'intensité de la pesanteur à la surface de la Lune est six fois plus faible que sur la Terre. Cette faible valeur peut contribuer à expliquer notamment l'absence d'atmosphère et le fait que le relief de la Lune est comparativement plus prononcé que celui de la Terre.

## MOUVEMENT PAR RAPPORT AU SOLEIL

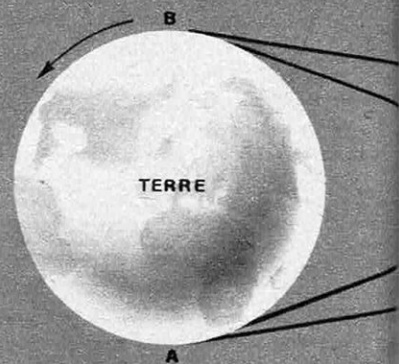
Nous avons dit jusqu'ici que la Terre décrit une ellipse, dont le Soleil occupe un foyer.



● Terre et Lune tournent autour de leur centre de gravité commun, qui décrit une orbite elliptique autour du Soleil. En réalité, les trajectoires de la Terre et de la Lune sont toujours concaves vers le Soleil.



● L'axe de la Lune étant légèrement incliné sur son orbite, on peut distinguer successivement les régions des pôles nord et sud.



● Entraîné dans le mouvement de rotation de A à B. Le contour apparent du globe

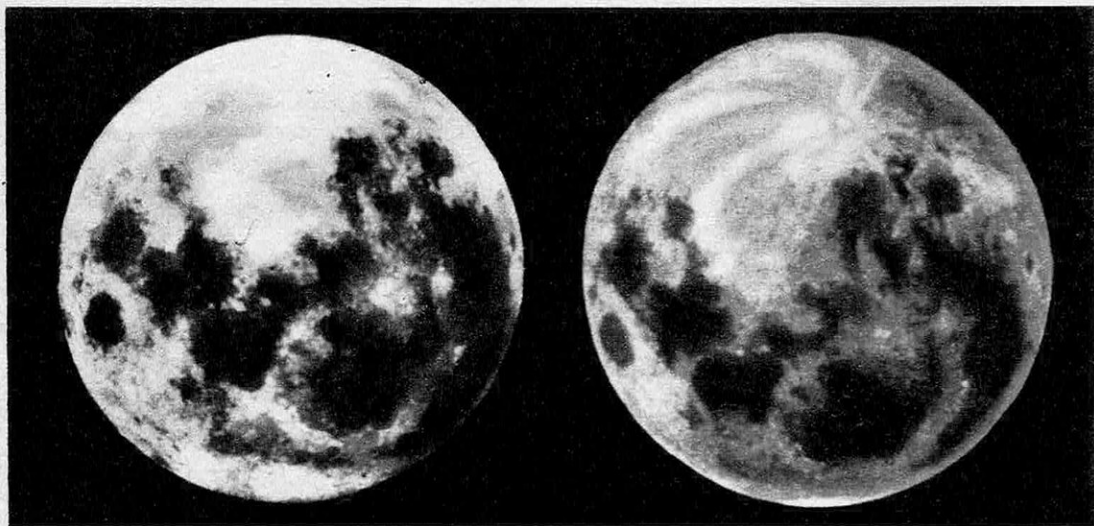
En réalité, le point qui décrit cette ellipse n'est pas le centre de la Terre, mais le centre de gravité du système Terre-Lune, lequel se trouve sur la droite des centres à 4 700 kilomètres du centre de la Terre, c'est-à-dire à son intérieur. Puisque ces deux corps tournent l'un autour de l'autre avec une période de 27 jours 8 heures, chacun d'eux doit avoir pour orbite par rapport au Soleil une ligne sinueuse passant alternativement de part et d'autre de cette ellipse. La figure page 55 exagère beaucoup les écarts par rapport à l'ellipse. En traçant les orbites avec précision, on constate qu'elles sont partout concaves vers le Soleil et jamais convexes, comme on l'avait cru autrefois.

## ROTATION DE LA LUNE

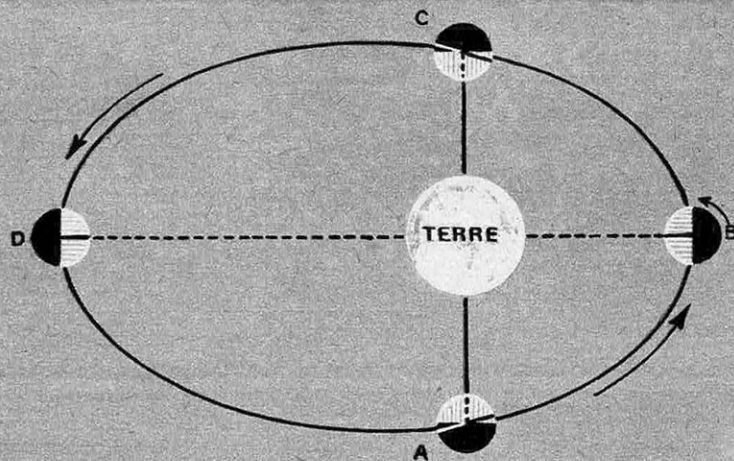
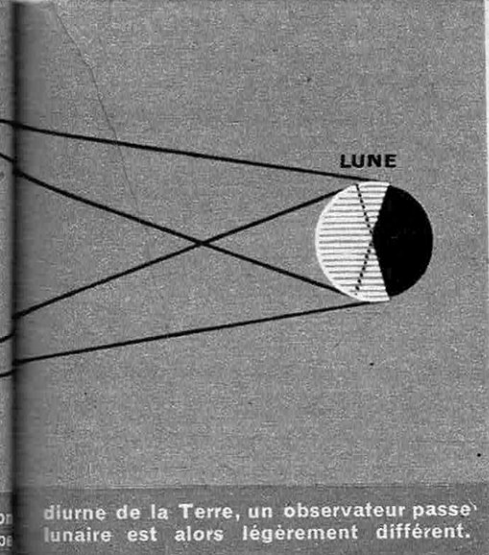
On ne voit, à l'œil nu, aucun détail distinct à la surface de la Lune. Mais l'observation avec des jumelles révèle déjà les principaux

caractères de sa surface et en particulier que **la Lune tourne toujours la même face vers la Terre.**

On en déduit que **la Lune tourne sur elle-même** et que le temps qu'elle met pour tourner **est égal à la période de sa révolution autour de la Terre** ; autrement dit, la durée de rotation de la Lune est égale à sa révolution sidérale, 27 jours 7 heures 43 mn. Le « jour lunaire » est 27 fois plus long que le jour terrestre. On a cherché une explication de cette propriété. Celle qui est généralement admise est la suivante : de même que la Lune exerce sur la Terre des forces qui tendent, par l'action des marées, à déformer sa surface, de même la Terre exerce des forces de marée sur la Lune ; ces forces ont déformé la Lune, tant que, du moins, elle a été assez plastique ; cette déformation a freiné la rotation de la Lune jusqu'à ce que, au bout de quelques millions d'années, la durée de la rotation devienne égale à celle de la révolution.



● Ces deux photographies de la Lune ont été prises à six mois d'intervalle. On voit que la surface observable est sensiblement différente, certains détails caractéristiques se trouvant plus ou moins loin du bord du disque.



● La Lune parcourt ABC plus vite que CDA. Sa rotation étant uniforme, il en résulte un balancement du contour apparent.

D'ailleurs, d'après cette théorie, les marées créées sur la Terre par l'action de la Lune doivent tendre, elles aussi, à freiner la rotation de la Terre pour parvenir à égaliser finalement la durée de rotation de la Terre à la révolution sidérale de la Lune. Un calcul de Jeffreys estime que, dans 50 milliards d'années, la Terre, à son tour, dirigera toujours la même face vers la Lune ; en ces temps, la Lune sera toujours dans le ciel pour un hémisphère et sera toujours invisible pour l'autre.

Bien que la Lune présente toujours vers nous la même face, l'observation précise des détails que nous voyons à sa surface montre que certaines régions, situées près du contour apparent, tantôt sont visibles, tantôt passent derrière ce contour apparent et deviennent invisibles pour nous. A ce léger balancement périodique des détails du bord du disque lunaire on a donné le nom de **librations**. On a reconnu que les librations ont trois causes principales qu'illustrent les figures, ci-dessus.

Au total, au lieu de voir exactement la moitié de la Lune, les librations nous font apercevoir 59 % de sa surface, tandis que 41 % restent toujours invisibles.

## LA SURFACE DE LA LUNE

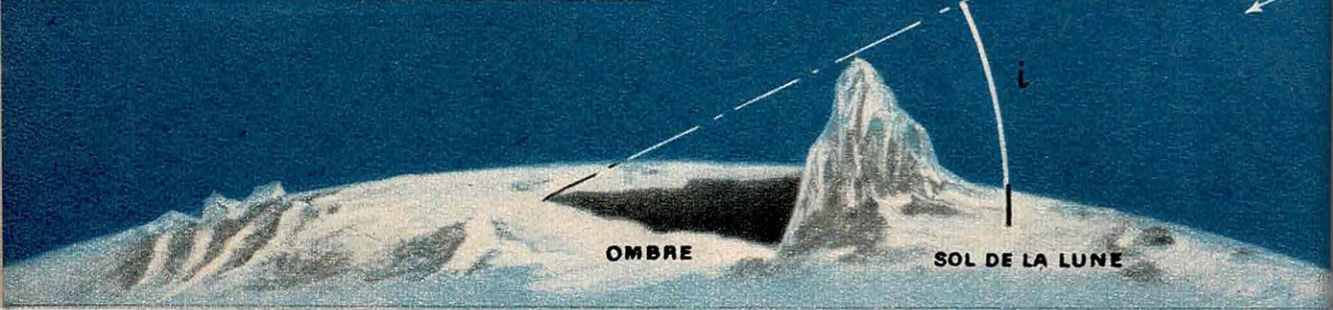
Les télescopes de 2 mètres ou 2,5 m de diamètre permettent aisément de voir à la distance de la Lune des objets d'une centaine de mètres de dimensions ; si donc il y avait sur la Lune des lacs, des rivières, des villes..., nous les aurions aperçus.

Le sol de la Lune est, en général, très accidenté. On y distingue des objets auxquels on a donné, plus ou moins improprement, les noms de mers, montagnes, cratères, rainures, etc. La terminologie bizarre par laquelle on a l'habitude de les désigner confond, dans un même mélange, les noms des savants et philosophes de l'antiquité et ceux de personnages plus ou moins illustres de l'époque moderne ou contemporaine.

Ce qui frappe le plus, quand on observe la Lune, ce sont les formations appelées **cratères** ou cirques lunaires. Leur nombre est très grand, puisqu'on en a dénombré plus de 30 000. Ils ressemblent aux volcans terrestres ; mais ils présentent, par rapport à ceux-ci, deux différences importantes : les cratères terrestres ont un diamètre qui ne dépasse guère 1 à 2 kilomètres, tandis que certains cratères lunaires, comme Ptolémée et Clavius, atteignent 180 et 230 kilomètres de diamètre ; d'autre part, la surface qui forme l'intérieur des cratères lunaires est généralement bien au-dessous de la surface moyenne, de sorte que, comme on l'a dit, les cirques lunaires sont en creux, tandis que les volcans terrestres sont en relief. Par exemple le cirque Théophile, qui a 100 kilomètres de diamètre, a 5 500 mètres de profondeur ; la profondeur du cirque Newton dépasse 7 000 mètres. Quelques cratères possèdent, vers leur centre, un piton conique ou une masse à plusieurs pitons, dont l'altitude ne dépasse pas celle des bords du cratère. D'après un examen attentif, il semble que la surface entière de la Lune est criblée de minuscules cratères. Dans quelques cirques, la surface centrale, au lieu d'être affaissée au-dessous du niveau moyen, atteint ce niveau ou même le dépasse. En de nombreuses régions, les cirques se chevauchent les uns les autres ; on a nettement l'impression que de nouveaux cirques se sont formés par-dessus d'autres plus anciens.

Les « mers » forment de vastes surfaces unies, plus sombres que le reste. Il ne s'agit pas, bien entendu, de mers véritables, puisqu'il n'y a pas d'eau sur la Lune, mais de grandes plaines mesurant jusqu'à 1 100 kilomètres de longueur. Il serait faux de se les représenter comme plates, puisque la courbure de la Lune est bien plus marquée que celle de la Terre. D'ailleurs elles présentent souvent des accidents, comme des pics isolés, de petits cratères, des rainures.

Les **montagnes** forment tantôt des pics isolés, tantôt de véritables chaînes. L'altitude



La longueur de l'ombre portée par une montagne lunaire sur le sol peut se calculer aisément, connaissant la distance de la Terre à la Lune, en mesurant la distance angulaire entre sa base et son extrémité. L'inclinaison des rayons solaires sur la surface du satellite étant connue d'autre part, une construction simple donne la hauteur.

des montagnes de la Lune, que l'on détermine d'après la longueur de l'ombre qu'elles portent, atteint 6 000 mètres dans les Apenins et le Caucase et 8 200 mètres pour le Mont Leibnitz ; elle est donc comparable à celle des plus hautes montagnes terrestres.

Des rayons brillants semblent diverger de certains cratères, jusqu'à des centaines de kilomètres de distance, franchissant sans être déviés les vallées et montagnes. Les plus remarquables et les plus longs sont ceux qui partent du cirque Tycho. On n'en connaît pas la nature. Quant aux sillons, rainures ou crevasses, ils ont parfois un parcours sinueux, mais le plus souvent ils forment des traits presque rectilignes, longs d'une centaine de kilomètres. Ils peuvent se croiser sans s'interrompre et, comme les rayons, semblent se propager sans tenir compte des irrégularités de la surface. Leur largeur, très variable d'une crevasse à l'autre, reste sensiblement la même sur toute la longueur.

En conclusion, la surface de notre satellite est, comme on le voit, très différente de celle de la Terre. On a tenté, par diverses mesures ou observations, de connaître la nature de la matière qui forme cette surface. On a notamment déterminé l'albedo de la Lune, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de lumière réfléchie par la pleine Lune et la quantité de lumière reçue du Soleil ; on trouve une valeur moyenne de 0,07, qui correspond à des roches brunes, mais on observe des écarts notables par rapport à cette valeur moyenne, puisque les « mers » semblent presque aussi foncées que les ombres, et que le cirque d'Aristarque, au contraire, paraît blanc comme la neige.

Mais un problème surtout a provoqué des discussions passionnées : c'est celui qui concerne l'origine du relief lunaire et, en particulier, des cratères.

Le terme « cratère » montre que l'on a d'abord pensé à une origine volcanique, mais il est peut-être aussi impropre que celui de « mers » appliqué aux vastes étendues unies. L'hypothèse d'une origine volcanique a été en faveur pendant plus de deux siècles et elle a encore ses partisans. On lui oppose deux principales objections : les volcans terrestres sont en relief, alors que la plupart des cirques lunaires sont en creux ; d'autre part, les grands cirques lunaires ont des dimensions incomparablement plus vastes que celles des volcans terrestres et la différence considérable de gravité entre la Terre et la Lune ne peut pas expliquer un tel développement des cratères lunaires.

Une deuxième théorie, qui se rattache à l'hypothèse volcanique, admet que les cratères se sont formés à un moment où la Lune était en majeure partie à l'état liquide, sous l'effet d'immenses bulles de gaz et de vapeurs, qui sont venues crever à travers la croûte solide ; cette surface s'est d'abord soulevée, puis effondrée. On explique le piton intérieur des cratères par une poussée ultérieure des laves. Mais cette théorie rend compte difficilement de la dépression finale des cirques.

Enfin, d'après une troisième théorie, ce sont des météores qui, en bombardant la surface de la Lune, ont produit les cratères. Il n'est pas besoin de supposer un bombardement intense, puisque la cadence d'un météore tous les 10 000 ans suffirait pour couvrir de trous la surface de la Lune. On a reconnu que la chute d'obus sur la Terre donne des trous dont le diamètre atteint 100 fois celui du projectile. Pour rendre compte de la forme des cratères, on imagine que la chute du météore a crevé l'écorce solide et provoqué un épanchement de matières éruptives, qui ont formé le fond plat ; enfin, comme dans le cas précédent, une poussée ultérieure peut avoir créé



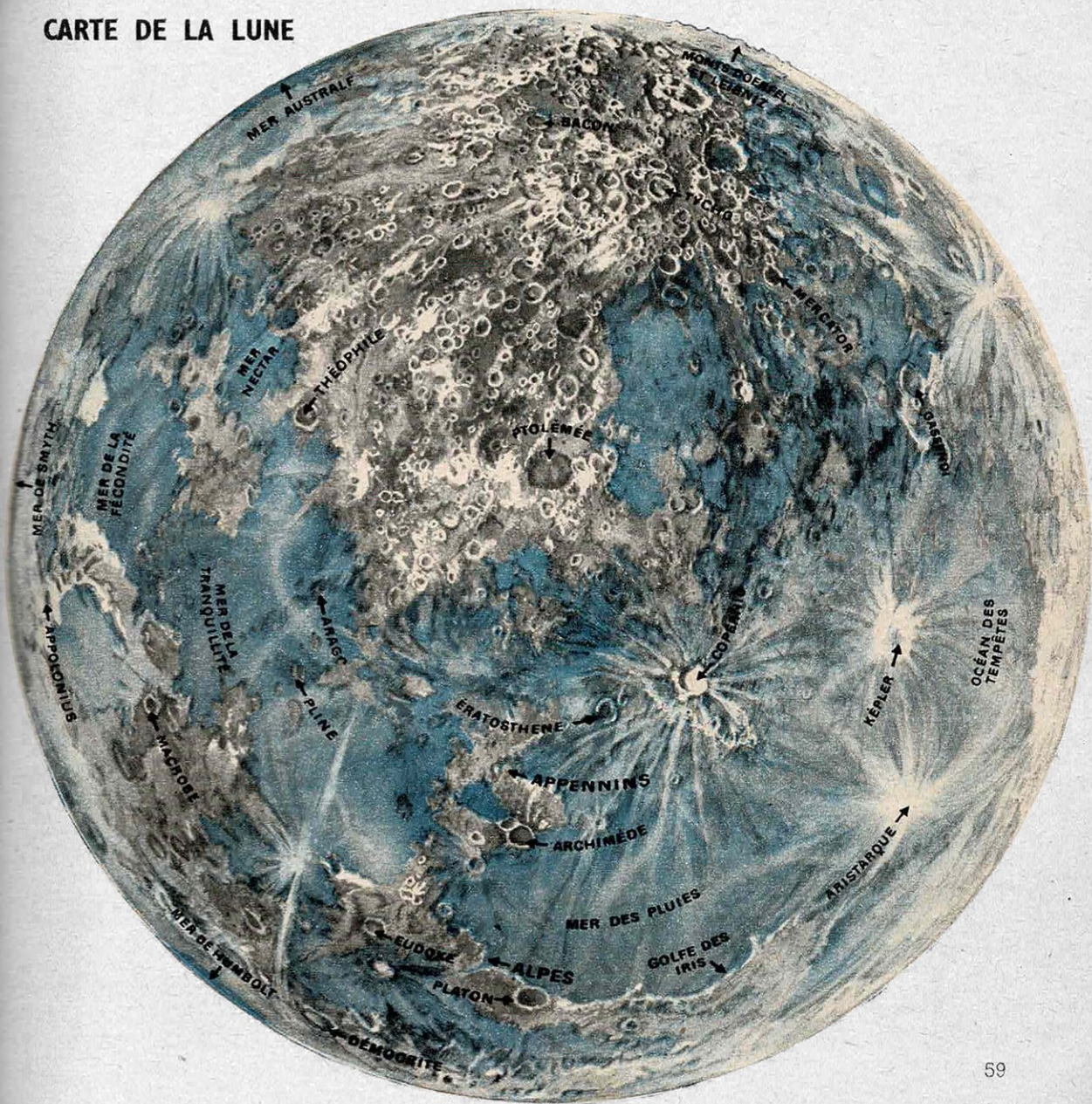
le piton interne. La grave objection opposée à cette théorie est que la surface de la Terre devrait être couverte de cratères analogues à ceux de la Lune. Mais ses partisans font observer, d'une part, que le Meteor Crater, dans l'Arizona, présente de grandes analogies avec les cratères lunaires. D'autre part, ils prétendent que de nombreux cratères ont pu exister autrefois à la surface de la Terre, bien que celle-ci soit partiellement protégée par son épaisse atmosphère, qui freine la chute des météores, mais que les cratères ont été effacés par la sédimentation et par les phénomènes géologiques.

Bien que la balance semble pencher actuellement en faveur de cette dernière théorie, nous ne connaissons pas, jusqu'ici, d'argument décisif qui l'impose.

## LES CONDITIONS PHYSIQUES SUR LA LUNE

La lune n'a pas d'atmosphère appréciable ; on a évalué que la densité de celle-ci ne dépasse sûrement pas 1/100 000 de celle de la Terre, ce qui correspondrait à une pression inférieure au centième de millimètre de mercure. Les raisons qui justifient cette affirmation sont les suivantes : le bord de la Lune est toujours vu absolument net à la lunette. Il en est de même du **terminateur**, ou cercle séparant la partie éclairée de la partie obscure ; il n'y a donc aucune trace de crépuscule. L'analyse au spectroscope de la lumière de la Lune ne révèle aucune absorption attribuable à une atmosphère. Enfin, lorsque la Lune cache une étoile dans son mouvement vers l'est, la

## CARTE DE LA LUNE



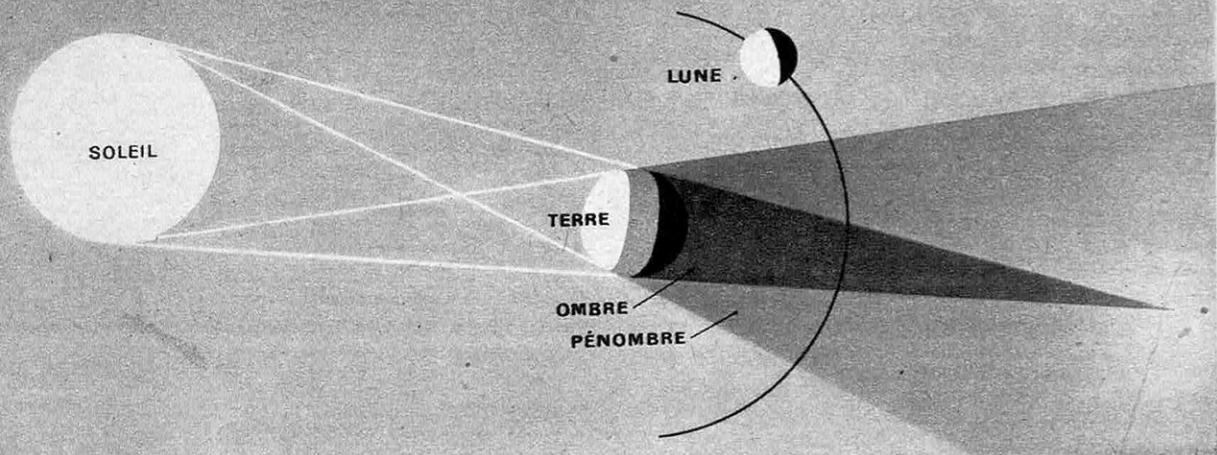
LA LUNE VERS SON  
DERNIER QUARTIER



(Photo Observatoire Lick)

LA LUNE TROIS JOURS APRÈS  
SON PREMIER QUARTIER





● Une éclipse de Lune se produit lorsque la Lune vient à passer dans le cône d'ombre produit par la Terre, qui géométriquement serait long de 217 rayons terrestres. La réfraction par l'atmosphère réduit cette longueur à 42 rayons. La Lune, située à 60 rayons terrestres, reste toujours faiblement éclairée par les rayons réfractés.

disparition ou « occultation » ne montre aucun effet dû à la réfraction.

Puisqu'il n'y a pas d'atmosphère, il n'y a pas d'eau, car celle-ci s'évaporerait immédiatement en l'absence d'atmosphère et se dissiperait ensuite dans l'espace. L'existence de la moindre végétation à la surface de la Lune est donc tout à fait improbable. Pourtant des observateurs ont cru relever des taches de couleur verdâtre, qu'ils ont attribuées à de la végétation. Mais nous ne pouvons considérer ces observations qu'avec beaucoup de défiance.

Les conditions physiques varient beaucoup par l'alternance des jours et des nuits. La température du sol pour les points qui ont le Soleil sensiblement au zénith dépasse 100°. Pendant la nuit, elle tombe à -170° C. Ainsi elle passe du point d'ébullition normal de l'eau presque à la température de l'air liquide. D'autre part, pendant les éclipses de Lune, la température du sol tombe en une heure de +70° C à -80° C. On en déduit que la surface de la Lune n'est pas formée de roches compactes, qui ne pourraient pas se refroidir aussi rapidement, mais qu'elle est couverte de matières poussiéreuses ou de roches pulvérisées. Cette conclusion ne permet pas de décider entre les théories volcaniques et météoriques sur l'origine des cratères, car il peut s'agir aussi bien de laves ou de cendres volcaniques que de poussières provenant des débris des météores.

## LES ÉCLIPSES DE LUNE

Si l'on considère le Soleil éclairant la Terre, il se forme, derrière la Terre, un cône d'ombre et un cône de pénombre. Il y a éclipse de Lune totale ou partielle lorsque la Lune traverse le cône d'ombre. Connaissant les dimensions respectives et les distances du Soleil, de la Terre et de la Lune, on calcule aisément que la largeur du cône d'ombre, au point où la Lune peut le rencontrer, est de plus de 2 fois le diamètre de la Lune. Si la Lune passe par

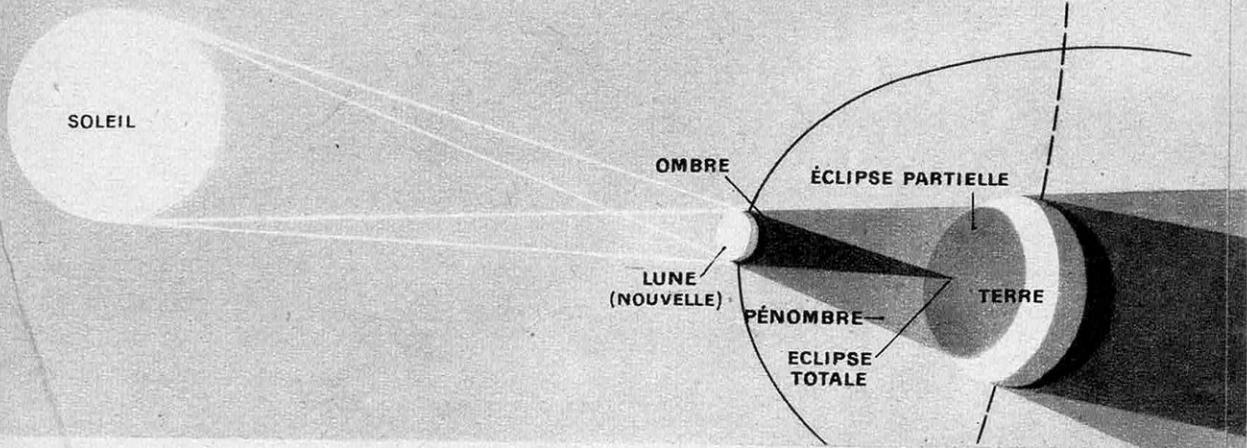
le centre du cercle d'ombre, la durée de l'éclipse est, au total, de 3 h 40 mn, et la phase pendant laquelle la Lune est complètement éclipisée dure elle-même 1 h 40 mn.

Une éclipse de Lune est visible, évidemment, de tous les points où la Lune est au-dessus de l'horizon, c'est-à-dire de tout un hémisphère.

Quand on observe une éclipse de Lune, on constate que la Lune ou la portion de Lune qui se trouve dans le cône d'ombre est toujours faiblement éclairée par une lumière rouge sombre. En effet, les rayons solaires sont réfractés par l'atmosphère terrestre et le cône d'ombre réel est beaucoup plus court que ne le prévoit la géométrie. La Lune est toujours au delà du sommet de ce cône ; la lumière qui l'atteint est surtout de la lumière rouge, parce qu'elle a traversé une grande épaisseur de notre atmosphère.

## LES ÉCLIPSES DE SOLEIL

Dans une éclipse de Soleil, c'est la Lune qui porte ombre sur la Terre et cache la surface du Soleil. Elle se produit donc toujours au moment de la nouvelle Lune. Mais, même lorsque les centres du Soleil, de la Lune et de la Terre sont en ligne droite, on n'a pas toujours une éclipse totale de Soleil. En effet, le diamètre apparent de la Lune est souvent inférieur au diamètre apparent du Soleil ; c'est ce qui se produit dans le cas général, puisque les valeurs moyennes des diamètres apparents sont 31'5" pour la Lune et 31'59" pour le Soleil, ce qui correspond à une éclipse annulaire, puisque le disque du Soleil déborderait celui de la Terre. Mais à cause de la forme elliptique des orbites, ces diamètres apparents varient, pour le Soleil, entre 31'30" et 32'36", pour la Lune, entre 28'22" et 33'50". Il y a donc des moments où nous voyons le disque de la Lune sous un plus grand angle que le disque du Soleil : on pourra avoir alors une éclipse totale. Il y a, en moyenne, 12 éclipses annulaires pour 10 éclipses totales. Les



☛ Une éclipse de Soleil se produit lorsque la Lune se place entre Soleil et Terre. L'ombre se déplace comme la Lune d'ouest en est et l'éclipse n'est observable que sur une étroite bande. Lorsque la longueur du cône d'ombre est inférieure à la distance Lune-Terre, on observe une éclipse annulaire de soleil dans son prolongement

éclipses annulaires ou partielles présentent beaucoup moins d'intérêt scientifique que les éclipses totales.

Tandis que, comme nous l'avons dit, une éclipse de Lune s'aperçoit de tout un hémisphère, on ne voit l'éclipse totale de Soleil que dans la toute petite région du globe qui est intérieure au cône d'ombre. Dans le cas le plus favorable, la section droite de ce cône, à la distance où il touche la Terre, est un cercle de 269 km de diamètre; mais, puisque, dans le cas général, le cône frappe la Terre obliquement, l'ombre sur la Terre est une ellipse, dont le grand axe est plus grand que la section droite. La tache d'ombre se déplace rapidement sur la surface de la Terre. Par rapport au centre de la Terre, sa vitesse est égale, en gros, à la vitesse de la Lune sur son orbite, soit en moyenne 3 370 km/h. Puisque le mouvement de la Lune est dirigé vers l'est, comme la rotation de la Terre, on obtient la vitesse de la tache d'ombre par rapport au sol en retranchant de la valeur précédente la vitesse de rotation du sol (zéro aux pôles, 1 670 km/h à l'équateur).

Connaissant la largeur de l'ombre et sa vitesse, on peut enfin calculer la durée de l'éclipse en un point. Dans les conditions les plus favorables, cette durée est de 7 mn 30 s; en moyenne, elle n'est que de 3 ou 4 minutes. Les prochaines éclipses totales de Soleil auront lieu le 25 février 1952 (Soudan, Perse, Sibérie, durée 3 mn); le 30 juin 1954 (Canada, Scandinavie, Russie, Perse, durée 2,5 mn); le 20 juin 1955 (Ceylan, Siam, Philippines, durée 7,2 mn).

## FRÉQUENCE DES ÉCLIPSES

L'orbite de la Lune, inclinée sur l'écliptique, coupe ce plan en deux points, que l'on appelle les **nœuds** de cette orbite. Les éclipses de Soleil et de Lune ne sont possibles qu'aux moments où le Soleil est voisin de ces nœuds, en même temps que la Lune

L'orbite de la Lune n'étant pas fixe, ces nœuds se déplacent vers l'ouest sur l'écliptique, avec une période de 19 ans environ. Le temps qui sépare deux passages du Soleil par un nœud est donc inférieur à un an; il vaut 343,63 jours: en ce temps, il y a deux périodes favorables aux éclipses, séparées par un intervalle de six mois environ.

Quand on étudie de manière précise les conditions pour qu'une éclipse se produise, on constate qu'elles sont plus strictes pour les éclipses de Lune, qui sont donc les moins fréquentes. Ainsi il se produit, en un an, au moins deux éclipses partielles de Soleil; le nombre maximum d'éclipses possibles en un an est de 7, avec 5 éclipses de soleil et 2 de Lune ou 4 de Soleil et 3 de Lune. Le premier cas s'est présenté en 1935, le deuxième arrivera en 1983. Pendant le XX<sup>e</sup> siècle, on comptera au total 375 éclipses, dont 228 pour le Soleil et 147 pour la Lune, soit, en moyenne, 4 éclipses par an.

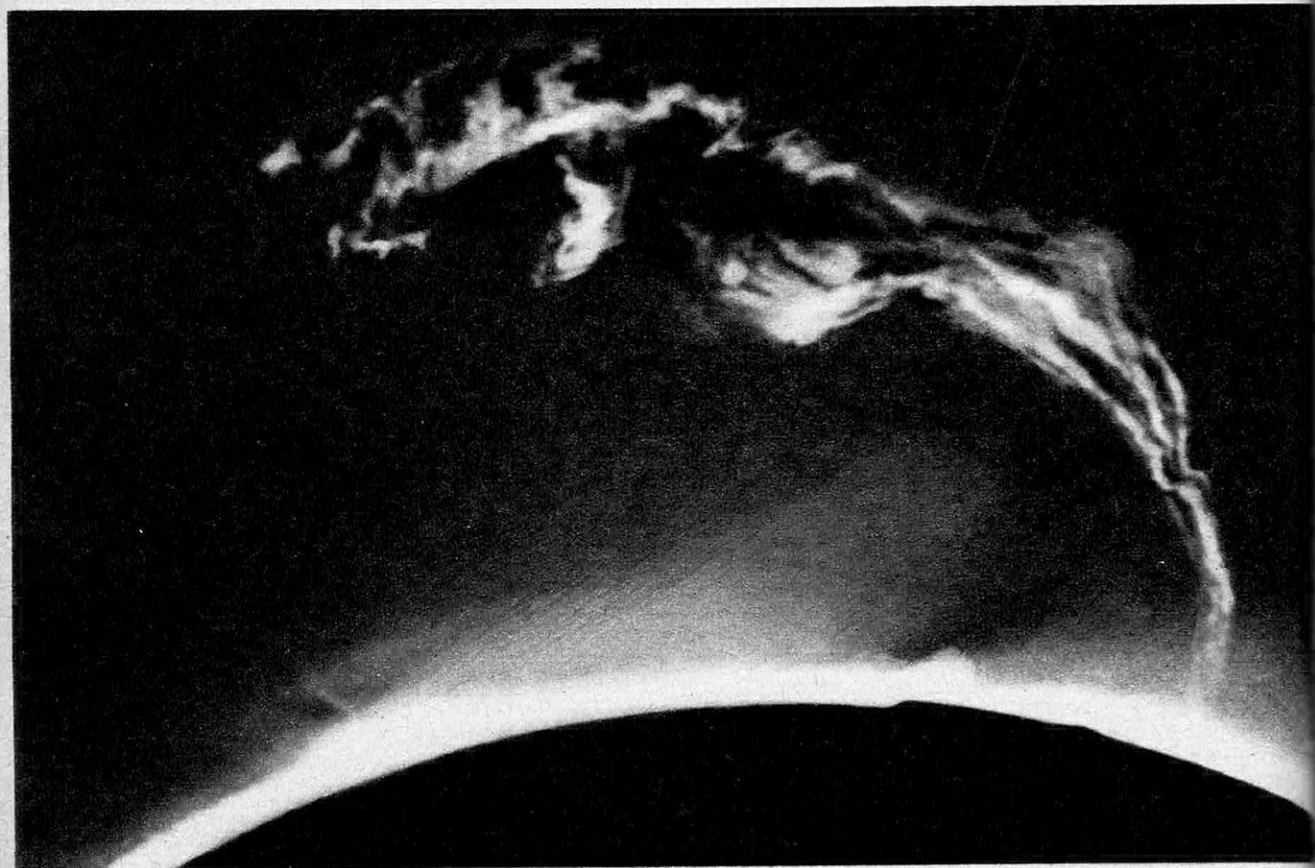
Pour l'ensemble de la Terre, les éclipses de Soleil sont plus fréquentes que celles de Lune. Mais, dans un lieu déterminé, on voit 3 fois moins environ d'éclipses de Soleil que de Lune. Les éclipses totales de Soleil sont, bien entendu, beaucoup plus rares encore. Ainsi, à Paris, une éclipse totale de Soleil a été visible en 1724; la prochaine ne surviendra qu'en 2026.

On constate qu'une période voisine de 6 585 jours, soit 18 ans 11 jours ramène sensiblement le Soleil, la Lune et la ligne des nœuds dans les mêmes positions relatives. Elle était déjà connue des Chaldéens, sous le nom de **saros**. Une éclipse quelconque se reproduit au bout de cette période, avec sensiblement les mêmes caractères et la même durée. Mais, à cause du retard d'une fraction de jour, l'éclipse ne se produit pas chaque fois dans la même région du globe. Ainsi l'éclipse totale du Soleil du 21 septembre 1941 correspondait au retour de l'éclipse totale du 10 septembre 1923, mais l'une était localisée en Asie centrale et l'autre en Californie.

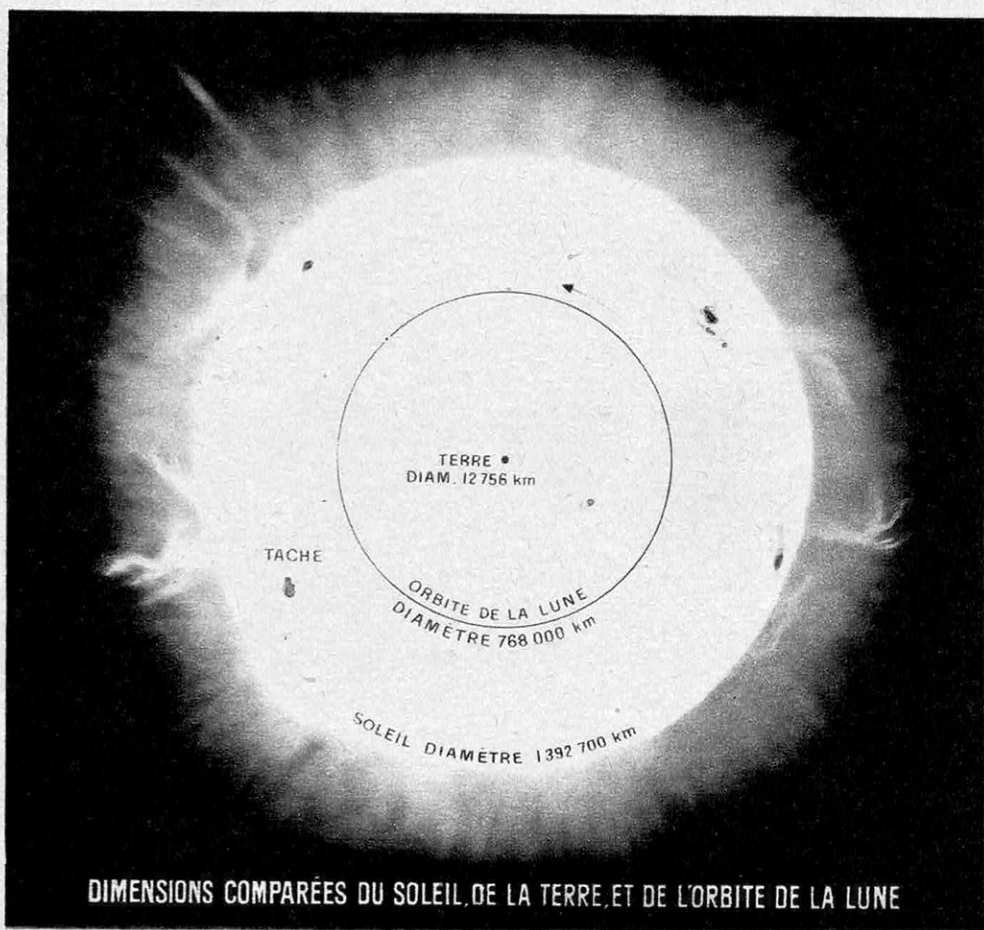
PROTUBÉRANCES  
SOLAIRES



Observatoire McMath-Hulbert, Université de Michigan, U.S.A.



Observatoire de physique solaire de KodaiKANal, Indes.



## LE SOLEIL

**L**E Soleil n'est qu'une étoile comme les autres. Nous montrerons plus loin qu'il n'a rien, en lui-même, de très remarquable et qu'il représente à peu près une étoile naine moyenne en ce qui concerne la luminosité, la masse, le volume, la température, la composition chimique, etc. Mais il a pour nous une importance primordiale, puisque la vie n'est possible sur la Terre que grâce à la lumière et à la chaleur qu'il nous envoie. Il doit son rôle à la distance relativement faible qui le sépare de nous, tandis que toutes les autres étoiles sont tellement éloignées que, malgré leurs dimensions, elles nous apparaissent comme des points dans le ciel, même lorsque nous les examinons dans les télescopes les plus puissants. Rappelons que la lumière du Soleil nous parvient en 500 secondes environ, tandis que celle venant de l'étoile la plus

rapprochée, Proxima du Centaure, voyage pendant 4,3 ans avant de nous parvenir.

Au point de vue astronomique, le Soleil a une extrême importance. Non seulement son attraction gouverne les mouvements des planètes, de la Terre en particulier, mais encore c'est la seule étoile qui soit assez proche de nous pour que nous puissions observer en détails sa surface. Aussi son étude présente-t-elle un très grand intérêt.

### DISTANCE, DIMENSIONS, MASSE DU SOLEIL

La distance de la Terre au Soleil varie autour d'une valeur moyenne, puisque la Terre décrit autour du Soleil une ellipse de faible excentricité, dont le Soleil occupe un des foyers. Cette distance moyenne a une grande

importance en astronomie ; c'est elle qui est prise pour **unité astronomique de distance** lorsqu'il s'agit des astres du système solaire (planètes, comètes, etc.). Comme nous le verrons, la distance de la Terre au Soleil sert aussi de base pour mesurer les distances des étoiles.

D'après les déterminations les plus récentes, la distance moyenne de la Terre au Soleil vaut  $149\,675\,000 \text{ km} \pm 20\,000 \text{ km}$  ; on retient, en gros, **150 millions de kilomètres** ou 23 400 fois le rayon de la Terre.

Le diamètre apparent moyen du Soleil est très sensiblement égal à celui de la Lune, un peu plus grand cependant. Le rayon du Soleil est de  $697\,000 \text{ km}$ , ou 109,1 fois celui de la Terre. Le volume du Soleil est donc  $1,41 \cdot 10^{33} \text{ cm}^3$ . La masse vaut  $332\,000$  fois celle de la Terre, soit  $1,98 \cdot 10^{33}$  grammes.

On voit immédiatement que la densité moyenne du Soleil est nettement plus faible que celle de la Terre ; elle est égale environ au quart de celle-ci ; sa valeur est de 1,41 par rapport à l'eau.

On peut déduire des nombres précédents l'intensité de la pesanteur à la surface du Soleil. On trouve qu'elle est à peu près 28 fois plus grande que sur la Terre.

## INTENSITÉ DU RAYONNEMENT SOLAIRE

La lumière du Soleil donne, par beau temps, sur un écran normal aux rayons, en un lieu où le Soleil est au zénith, un éclaircissement de  $100\,000 \text{ lux}$ , c'est-à-dire l'éclaircissement que produiraient  $100\,000$  bougies à une distance d'un mètre. En réalité, l'atmosphère absorbe toujours, même lorsqu'il fait beau, une portion importante du rayonnement solaire.

On peut aussi exprimer l'intensité du rayonnement solaire, non plus par l'éclaircissement qu'il produit, mais par l'énergie qu'il nous apporte. On définit ainsi la **constante solaire**, qui est la mesure de la quantité d'énergie, évaluée en petites calories, reçue du Soleil par minute et par centimètre carré de la surface terrestre exposée normalement aux rayons solaires, en dehors de l'atmosphère. On trouve  $1,94$  calories par minute et par centimètre carré. L'expression « constante solaire » est mal choisie, puisqu'il semble que cette quantité subisse de faibles variations, de l'ordre de 2 à 3 %, au cours du cycle solaire de 11 ans, dont nous parlerons plus loin.

On peut dire encore que l'énergie solaire reçue par la Terre est équivalente à une puissance de  $1,8$  cheval par mètre carré. Pourtant la puissance reçue par la Terre ne représente qu'une très petite fraction, pas même un demi-milliardième, de la puissance rayonnée par le Soleil dans tout l'espace, qui vaut  $5 \cdot 10^{23} \text{ ch}$ , soit  $8 \text{ ch}$  pour chaque centimètre carré de la surface du Soleil. Rappelons que la température de la surface apparente du Soleil est de  $6\,000^\circ$  environ.

## LA SURFACE DU SOLEIL

Lorsqu'on observe la surface du Soleil, deux caractères frappent immédiatement : le disque solaire semble parfaitement circulaire et il est nettement assombri sur ses bords.

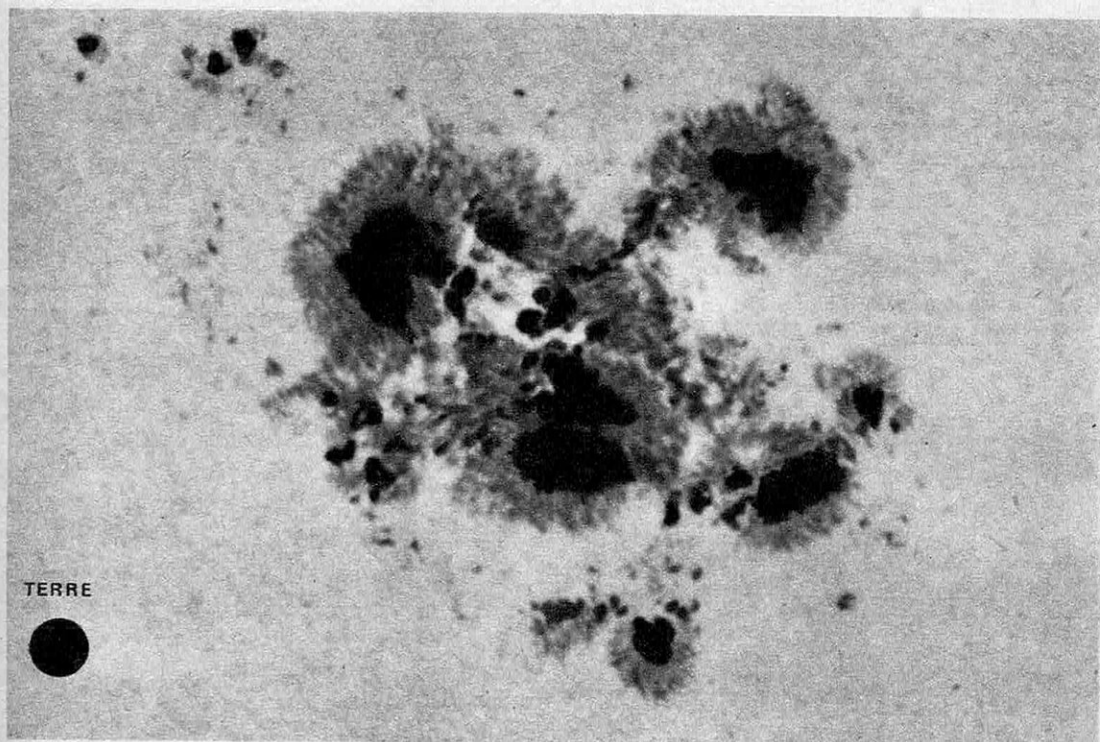
On ne décele, en effet, aucun aplatissement sensible. Une déformation doit exister, puisque le Soleil tourne sur lui-même. Mais, bien que le bord du Soleil paraisse net, il n'est guère défini qu'à une seconde d'arc près et il n'est pas possible de constater un aplatissement inférieur à  $1/2000$ . Dans les observations visuelles, le bord du Soleil paraît toujours trembler, à cause de l'agitation de l'air produite par son échauffement ; dans les photographies, le bord est affecté par l'irradiation.

Quant à l'assombrissement du disque sur les bords, il est très net : à une distance du bord égale au  $1/100$  du rayon, le rayonnement est à peu près deux fois plus faible qu'au centre. L'assombrissement est plus marqué pour les faibles longueurs d'ondes : les bords sont donc relativement plus rouges que le centre. À ce dernier effet correspond une diminution apparente de la température superficielle vers les bords ; la température superficielle de  $6\,000^\circ \text{ K}$ , que nous venons d'indiquer, est celle du centre du disque ; vers les bords, la température semble plus faible d'un millier de degrés. L'assombrissement vers les bords s'explique aisément : la surface lumineuse du Soleil ou **photosphère** est enveloppée d'une atmosphère qui absorbe partiellement les rayons lumineux, comme l'atmosphère terrestre ; or les rayons venant du bord du disque ont à traverser une plus grande épaisseur d'atmosphère que ceux venant de son centre.

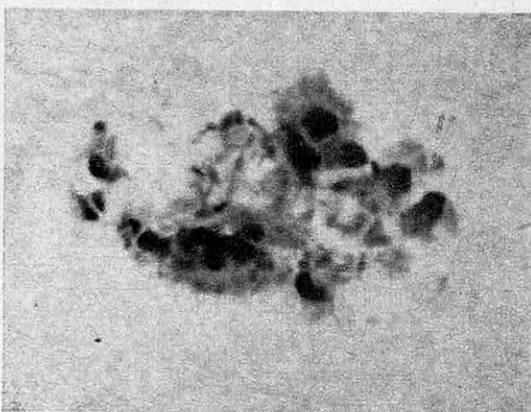
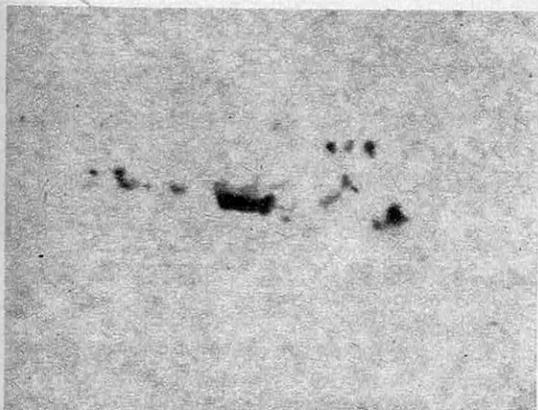
Quand on réalise un fort grossissement, la surface du Soleil montre partout une structure granuleuse : elle est formée d'un ensemble de petites plages brillantes, les **granules** ou « **grains de riz** », qui semblent flotter sur un fond plus sombre. Ces granules ont un diamètre de l'ordre d'un millier de kilomètres et chacun d'eux n'a qu'une durée d'une demi-minute environ. On observe fréquemment sur le disque solaire la présence de taches sombres, les **taches solaires**, et de plages brillantes, les **facules**.

Les taches sont quelquefois assez grosses pour être perceptibles sans lunette, à travers un verre noir. Une tache se compose généralement d'une région centrale sombre, l'**ombre**, et d'une bordure, la **pénombre**, qui a souvent une structure filamenteuse. Les taches solaires n'apparaissent sombres que par contraste ; l'ombre correspond à une région relativement froide ( $4\,000^\circ \text{ K}$ ), qui est 10 fois moins brillante que la photosphère. La forme et les dimensions des taches sont extrêmement variables ; elles varient même pour une tache d'un jour à l'autre. Les plus faibles taches observables n'ont guère qu'un diamètre de  $500 \text{ km}$  ; les plus grosses atteignent  $100\,000 \text{ km}$ , environ 8 fois le diamètre





● Un des plus importants groupes de taches solaires qui ait été photographié. On distingue nettement la partie centrale sombre, la structure filamenteuse de la bordure et les plages brillantes qui environnent les taches.



● La forme et les dimensions d'une tache peuvent varier rapidement. Voici une même tache vue à 24 h d'intervalle. On aura une idée de l'énormité de ces phénomènes d'après le cercle noir qui représente la terre à la même échelle.

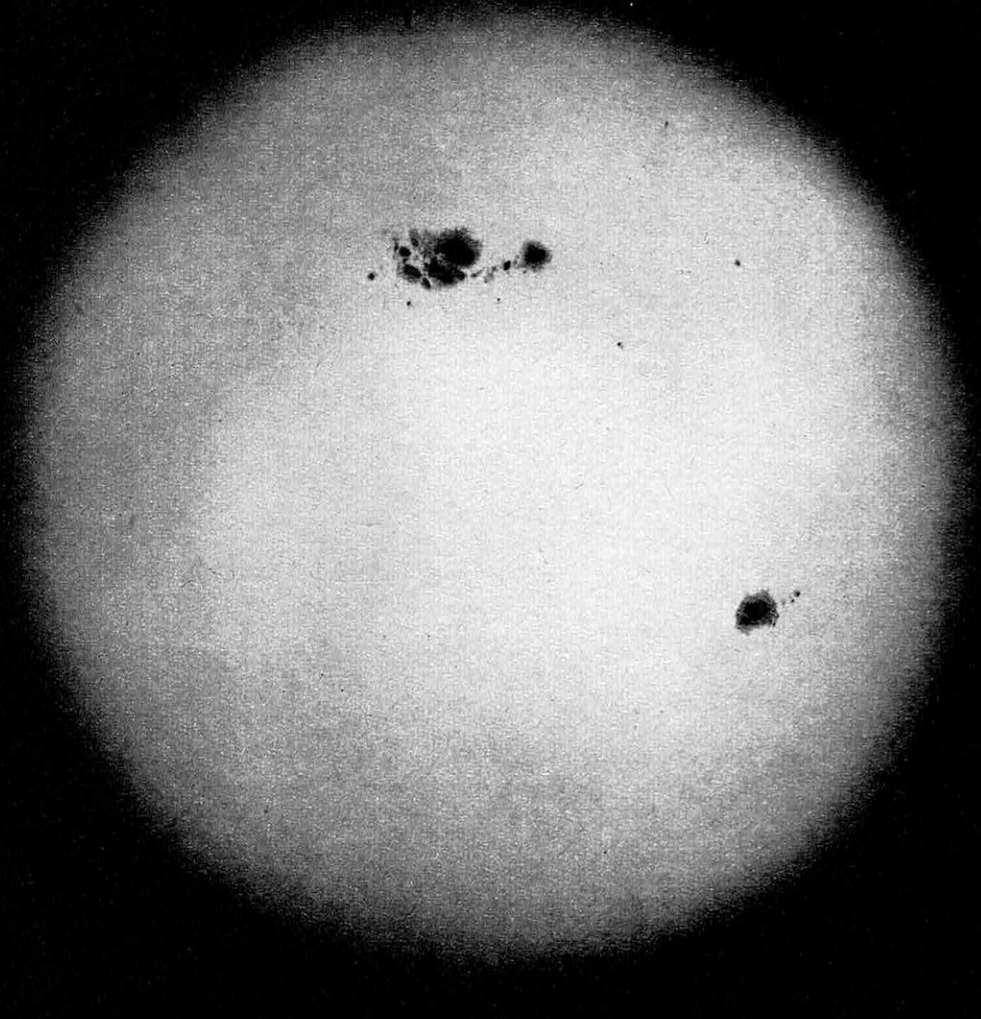
de la Terre. Mais la surface totale des taches ne représente jamais qu'une faible proportion (moins de 1 %) de la surface du disque.

Les taches apparaissent d'habitude par groupes de deux. La durée de persistance d'une tache n'est parfois que de quelques heures ; sa valeur moyenne est de 1 à 2 mois ; le maximum enregistré jusqu'ici est de 18 mois. Les plages brillantes ou facules entourent fréquemment les groupes de taches.

En observant, de jour en jour, les taches du Soleil, on constate qu'elles se déplacent régulièrement du bord est au bord ouest. Ce mouvement apparent est dû à la **rotation du**

**Soleil**, bien qu'en réalité les taches se déplacent elles-mêmes un peu par rapport à la surface du Soleil. La rotation du Soleil a lieu dans le même sens que la révolution de la Terre sur son orbite. L'équateur solaire forme un angle de 7° environ avec le plan de l'écliptique.

Beaucoup de taches ont une durée assez longue pour qu'on les retrouve après une rotation de Soleil. Les observations montrent que la période qui sépare deux passages consécutifs d'une même tache au méridien central du Soleil est, en moyenne, de 27 jours. Mais on a noté depuis déjà longtemps que la



Ph. Observ. du Mt Wilson

## LE DISQUE SOLAIRE ACCUSE UN NET ASSOMBRISSEMENT DES BORDS EN PHOTOGRAPHIE DIRECTE

période de rotation est d'autant plus grande qu'il s'agit de taches plus éloignées de l'équateur. C'est que le Soleil ne tourne pas comme un corps solide : la période de rotation croît de l'équateur au pôle : 24,7 jours à l'équateur et environ 34 jours vers les pôles.

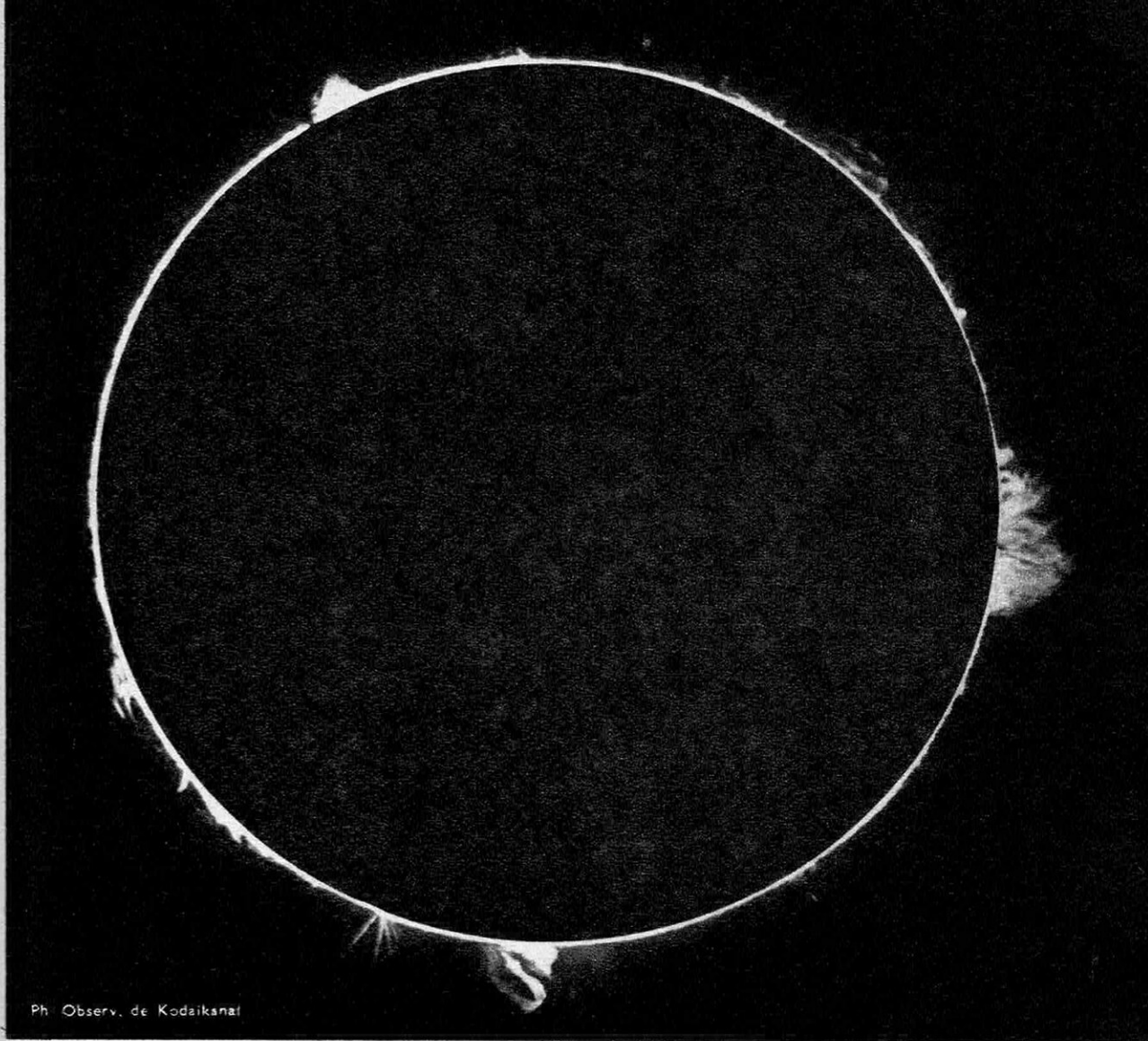
Remarquons que ces chiffres concernent la période de révolution réelle ou **révolution sidérale** : à la valeur moyenne de 25 jours au voisinage de l'équateur correspond une période de révolution synodique, ou **révolution apparente** pour un observateur terrestre, de 27 jours.

### ÉTUDE SPECTROSCOPIQUE DU SOLEIL

Une part importante de nos connaissances relatives au Soleil a été déduite de l'étude spectroscopique de la lumière que nous recevons de lui sur la Terre.

Le spectre du Soleil montre, du rouge au violet, une bande interrompue par des milliers de raies sombres. Ceci prouve que la lumière émise par la photosphère traverse une atmosphère plus froide. Les éléments présents dans cette atmosphère produisent des raies d'absorption dont la position précise permet l'identification de ces éléments. Le spectre du Soleil a été étudié d'abord par Fraunhofer en 1814. A l'Observatoire du Mont Wilson, on a catalogué environ 22 000 raies. On pousse peu à peu l'étude dans l'infrarouge et tout récemment on a réussi à photographier le spectre du Soleil dans l'ultraviolet jusque vers 2 200 Angströms grâce à des spectrographes enregistreurs emportés dans la haute atmosphère par des fusées.

Plus de la moitié des raies sombres du spectre solaire ont été identifiées, c'est-à-dire attribuées avec certitude aux éléments qui les produisent. Les raies observées sont d'ailleurs, en proportion notable, des raies



Ph. Observ. de Kodaikanal

PENDANT UNE ECLIPSE TOTALE, ON PEUT OBSERVER LA CHROMOSPHERE ET LES PROTUBÉRANCES.

ou bandes telluriques, dues à la traversée des rayons solaires dans l'atmosphère terrestre.

Rappelons que le gaz hélium a été découvert d'abord dans le Soleil ; d'où son nom.

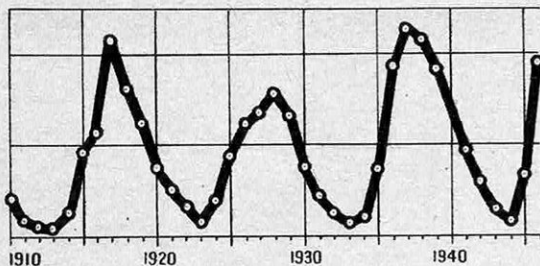
## LES TACHES SOLAIRES

Comme on l'a reconnu depuis plus de 100 ans, le nombre et l'étendue des taches solaires varient périodiquement, avec une période moyenne de 11,2 ans. On a pris l'habitude d'exprimer la fréquence annuelle moyenne des taches à l'aide d'un nombre arbitraire, qui est sensiblement proportionnel à l'aire totale de la surface tachée. Le dernier maximum des taches s'est produit au cours de l'année 1948.

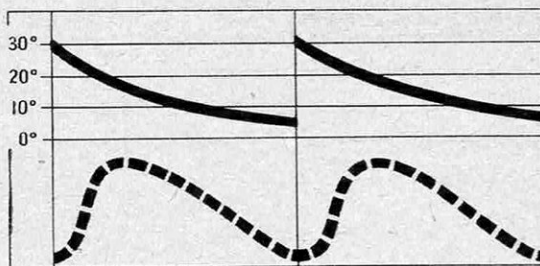
Quand on considère un grand intervalle de temps, on constate que l'intervalle entre deux maximum successifs n'est pas exactement constant, mais qu'il est généralement compris entre 8 et 14 ans.

Au cours d'un cycle solaire, la variation du nombre et de l'importance des taches est accompagnée d'une variation remarquable de leur distribution sur la surface du Soleil. Après un minimum, les premières taches qui apparaissent sont petites et situées vers une latitude solaire de 30° nord ou sud ; puis, au fur et à mesure que le nombre des taches augmente, leur latitude moyenne décroît et elle continue de décroître jusqu'au minimum suivant. C'est ce que mettent en évidence les courbes et le diagramme en papillon de la page 70.

Quelle est la nature des taches solaires ? La température au centre d'une tache est nettement inférieure à la température moyenne de la photosphère. D'autre part, une découverte importante est celle de la présence d'un champ magnétique intense à l'intérieur des taches. On a déterminé la **polarité** des taches, c'est-à-dire leur caractère de pôle magnétique Nord ou Sud. Dans la majorité



● Variations du nombre de taches de 1910 à 1946. Nous nous trouvons actuellement près d'un maximum.



● En même temps que leur nombre (courbe infér.), la latitude moyenne des taches suit un cycle régulier.

des cas, les taches apparaissent par groupes de deux et, dans ces cas, leurs polarités sont contraires. De plus, la tache qui vient la première dans la rotation du Soleil, et qui est généralement la plus importante, a toujours la même polarité dans un hémisphère pendant toute la durée d'un cycle solaire. Les polarités sont inversées dans l'autre hémisphère, et elles s'inversent d'un cycle au suivant, de sorte qu'au point de vue magnétique la période d'un cycle solaire n'est pas de 11,2 ans, mais de deux fois cet intervalle, soit 23 ans environ.

On explique maintenant la plupart des propriétés des taches solaires en admettant qu'elles sont formées par d'immenses tourbillons. Les mouvements sont de sens opposés pour deux taches d'un même groupe. Le tourbillon produit, en son centre, par un effet d'aspiration, une détente des gaz incandescents, qui refroidit ceux-ci. C'est le mouvement tourbillonnaire de la matière ionisée et contenant probablement un excès important de charges électriques d'un même signe, qui crée le champ magnétique observé. Quant à l'origine même des taches solaires, c'est-à-dire à la formation de ces tourbillons, on a proposé de les expliquer par le mode de

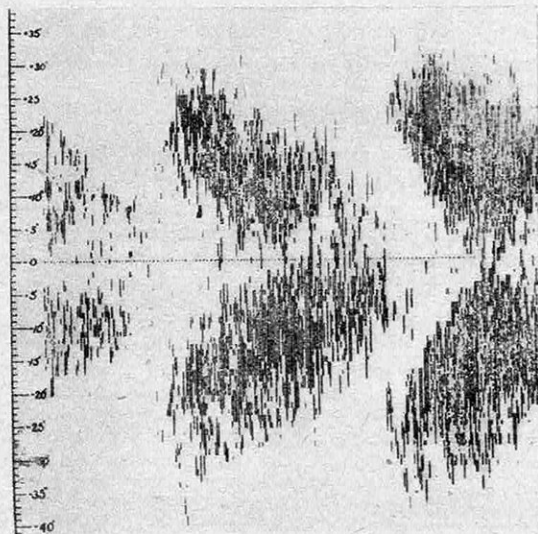
rotation du Soleil et par la variation de sa vitesse angulaire avec la latitude, mais ces explications ne peuvent être regardées, pour le moment, que comme des hypothèses.

## LA CHROMOSPHERE

La chromosphère forme l'atmosphère véritable du Soleil. Elle a une épaisseur d'environ 10 000 km. On l'aperçoit, pendant les éclipses de Soleil, comme un anneau lumineux rouge vif entourant le disque de la Lune ; elle doit, précisément, son nom à sa coloration, qui provient d'une radiation (H $\alpha$ ) émise par l'hydrogène, son principal constituant.

De la chromosphère, qui est en état de perpétuelle agitation, se détachent parfois des flammes rouges, les protubérances, tandis qu'au loin s'étend la partie extérieure de l'atmosphère solaire, la couronne, immense auréole blanche visible seulement pendant les éclipses totales de Soleil. Quant à la couche renversante, à laquelle sont dues les nombreuses raies sombres présentes dans le spectre ordinaire du Soleil, elle ne se distingue qu'assez arbitrairement de la chromosphère, dont elle forme la région interne. Quand on parvient à observer seulement la lumière émise par les gaz de cette atmosphère, on obtient un spectre de raies brillantes reproduisant sensiblement le spectre de raies sombres habituellement observé. C'est, en effet, un tel spectre que l'on observe lorsque, pendant les éclipses totales, la photosphère est cachée par le disque de la Lune. Tant que la Lune ne cache pas complètement la photosphère, on voit le spectre à raies sombres ; à l'instant où la photosphère disparaît, les raies sombres sont brusquement remplacées par les raies brillantes émises par le mince croissant de chromosphère non encore recouvert par la Lune. Comme ce spectre n'est visible que pendant 2 ou 3 secondes, on lui a donné le nom de « spectre-éclair ».

Nos connaissances sur l'atmosphère solaire et ses mouvements ont réalisé de grands pro-



### ◀ DIAGRAMME EN PAPILLON DES TACHES

A chacune correspond un trait. On a porté en abscisse le temps en années et en ordonnée la latitude solaire.



● Ces deux taches de polarité opposée ont été photographiées au Mont Wilson avec la raie  $H\alpha$  de l'hydrogène. Les détails suggèrent les lignes de courant d'un tourbillon, ou de la limaille de fer dans un champ magnétique.

grès depuis que l'on a imaginé des méthodes ingénieuses qui permettent de photographier le disque solaire en n'employant que certaines radiations particulières, comme la raie rouge de l'hydrogène (raie C de Fraunhofer) ou une des raies ultraviolettes du calcium (raie K). Ces méthodes sont de deux types :

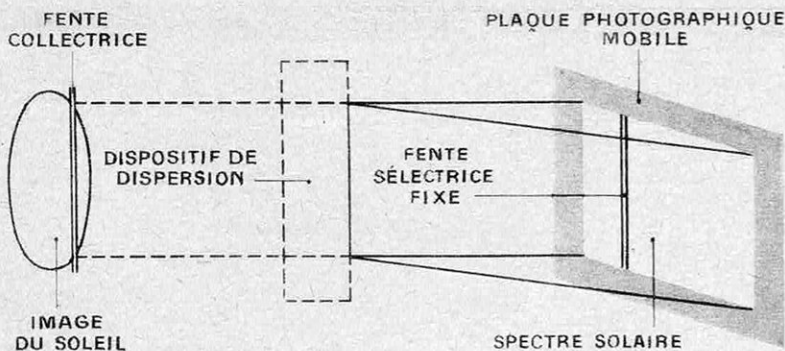
Les unes utilisent le **spectrohéliographe** (page 72) qui a été inventé simultanément, vers 1890, par Deslandres, en France, et par Hale, en Amérique. Les photographies données par les radiations de l'hydrogène ou du calcium, ou d'un autre élément, représentent la distribution des nuages de cet élément dans l'atmosphère solaire et révèlent beaucoup de détails intéressants : par exemple, les régions où ces nuages sont particulièrement chauds — ou, au contraire, froids — apparaissent plus brillantes — ou plus sombres. Hale a appelé « flocculi » les plages brillantes ou sombres que l'on peut observer.

Cette méthode est déjà ancienne : celle du **filtre monochromatique polarisant** (Science et Vie, n° 386, 1949) est au contraire, toute récente ; elle a été imaginée et réalisée, depuis 1940, par M. B. Lyot, astronome à l'Observatoire de Meudon.

Que montrent ces photographies monochromatiques du disque solaire ? Celles données par la raie ultraviolette du calcium montrent généralement des flocculi brillants, particulièrement remarquables près des taches solaires ; souvent ces flocculi apparaissent avant les taches et ne disparaissent qu'après

elles, parfois ils ne sont pas accompagnés de la formation d'une tache. Dans les couches supérieures, les flocculi sont plus gros et plus brillants et ils peuvent couvrir complètement les taches. Quant à l'hydrogène, il forme le plus souvent des flocculi sombres et étirés, qui n'ont pas du tout l'aspect moutonné des spectrohéliogrammes du calcium. Près des taches, les nuages d'hydrogène mettent nettement en évidence le mouvement en tourbillon. Enfin des filaments sombres correspondent aux protubérances.

Tandis que les flocculi sont habituellement de faibles dimensions et dispersés, on distingue parfois, sur les images monochromatiques du disque solaire, d'immenses plages claires, qui subissent de rapides variations de forme et d'intensité ; on les nomme des **éruptions chromosphériques**. Il s'agit de vives lueurs, émises par des masses de gaz plus chaudes que le voisinage immédiat, sans qu'il y ait sortie violente de matière, comme le laisserait supposer l'emploi impropre du mot « éruption ». Le diamètre de ces plages dépasse parfois plusieurs centaines de milliers de kilomètres. Leurs aspects sont très divers et la rapidité de leur croissance est très remarquable, puisqu'elles se développent parfois en quelques minutes. Assez fréquemment, ce développement est discontinu, comme si plusieurs éruptions se succédaient en quelques heures. L'étude des éruptions chromosphériques montre qu'elles sont liées au développement des taches solaires.



## SPECTROHÉLIOGRAPHE

L'image du Soleil est projetée sur la fente d'entrée d'un spectrographe. Une deuxième fente isole les radiations voulues. On a ainsi une image, due à ces seules radiations, de l'étroite région du Soleil projetée sur la fente. En déplaçant simultanément l'image du Soleil et la plaque, on obtient une image complète monochromatique du disque.

Un autre phénomène curieux, en relation avec les taches solaires et les éruptions chromosphériques a été découvert tout récemment ; il s'agit de l'émission, par certaines régions du Soleil, d'ondes radioélectriques courtes (longueurs d'onde de l'ordre du mètre).

## LES PROTUBÉRANCES

Jusqu'en 1868, c'est seulement pendant les éclipses totales de Soleil que l'on a observé les protubérances ; en temps ordinaire, en effet, on ne peut pas les voir, pour la même raison qu'on ne voit pas les étoiles en plein jour, à cause de l'éclat de notre atmosphère qui diffuse la lumière solaire, surtout près du bord du Soleil. Janssen et Lockyer montrèrent qu'on peut les examiner à n'importe quel moment à l'aide d'un spectroscopie très dispersif. Mais on utilise surtout aujourd'hui pour l'étude systématique des protubérances situées sur le pourtour du disque solaire (les seules dont on voit réellement la forme) le spectrohéliographe, ou le filtre monochromatique polarisant, ou encore le coronographe dont nous parlerons plus loin. A la suite du succès obtenu à l'observatoire du Pic-du-Midi par M. B. Lyot, qui est parvenu à réaliser des films pour étudier les mouvements des protubérances, plusieurs autres observatoires consacrent maintenant une part importante de leur activité à prendre de tels films. Ceux qui ont eu le privilège d'assister à la projection de ces films, qui ont exigé une somme énorme

d'ingéniosité, d'habileté, de patience, de travail, restent émerveillés par ce spectacle étrange et grandiose.

Les protubérances montrent de très grandes différences de dimensions, de forme, d'aspect. Les plus petites sont à peine décelables, les plus grandes atteignent une hauteur de 800 000 km, supérieure donc au rayon du Soleil. Mais les hauteurs supérieures à 150 000 km sont rares. Malgré leur grande variété, on a classé les protubérances en cinq types :

1° protubérances actives, qui semblent être attirées par un « centre d'attraction » ou une tache voisine ;

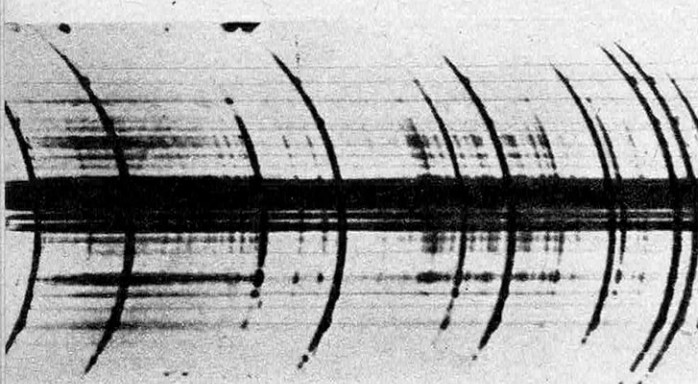
2° protubérances éruptives, qui montent dans une direction sensiblement verticale et se dissipent à de grandes altitudes ;

3° protubérances des taches, associées à des taches plus ou moins voisines et qui ont souvent la forme de boucles analogues aux jets d'eau des fontaines ;

4° protubérances tourbillons, qui ressemblent à des spirales verticales ou à des cordes fortement tordues ;

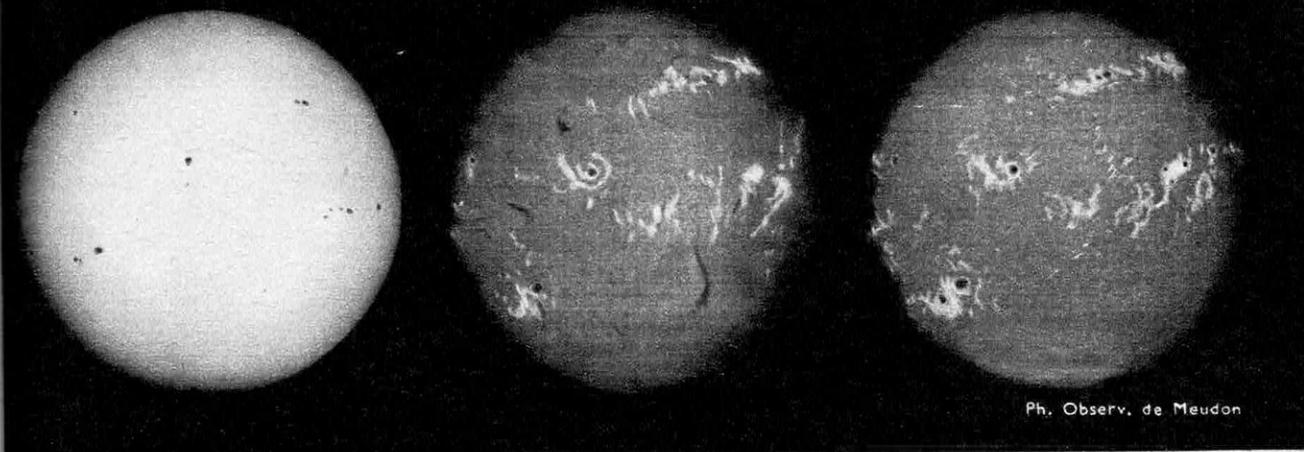
5° protubérances quiescentes qui ne montrent pas de changement notable de forme ou de position en l'espace de quelques minutes.

L'étude cinématographique des protubérances a révélé au cours de ces dernières années la complexité de leurs mouvements, que des photographies éparses n'avaient pas permis de reconnaître. On s'est rendu compte qu'il n'existe pas de protubérances en repos ; toutes sont en mouvements plus ou moins actifs. Ainsi celles du type « quiescent » montrent de nombreux mouvements de circulation interne, analogues aux courants de convection que l'on peut observer dans les nuages « cumulus ». Quant aux protubérances « éruptives », elles apparaissent comme d'immenses nuages de gaz violemment soufflés hors du Soleil et qui se dissolvent autour de lui, comme si la matière qui les forme ne retombait pas. Inversement, un très surprenant spectacle est celui d'une sorte de fontaine lumineuse, dont le point de départ est situé



## ← SPECTRE-ÉCLAIR DE LA CHROMOSPHÈRE.

On distingue aux extrémités des arcs dus aux raies les images des protubérances (U.R.S.S., éclipse de 1936).



Ph. Observ. de Meudon

● A gauche, photographie directe du Soleil ; au centre et à droite, deux spectrohéliogrammes à l'aide des raies-H $\alpha$  de l'hydrogène et K du calcium ionisé qui révèlent certaines particularités de structure invisibles directement.

hors du Soleil ; il semble que la matière lumineuse est créée en ce point, d'où elle retombe vers le Soleil, en filaments et arcs de courbure harmonieuse. On ne sait pas, pour le moment, comment s'explique une telle apparence.

Les protubérances du type « quiescent » sont observables pendant une longue période, qui dépasse souvent plusieurs jours et peut atteindre 3 ou 4 mois : au contraire, les protubérances « éruptives » n'ont qu'une faible durée.

## LA COURONNE SOLAIRE

La couronne solaire est une enveloppe gazeuse très étendue, dans laquelle on distingue des condensations et des filaments. Sa forme est très sensiblement symétrique par rapport à l'axe de rotation du Soleil ; elle s'étend surtout dans la région équatoriale.

Les observations réalisées au cours des éclipses totales montrent que l'intensité globale de la lumière émise par la couronne est comparable à celle de la pleine Lune. Mais l'éclat de la couronne décroît très rapidement à partir du bord du Soleil, de sorte qu'il est pratiquement impossible de photographier l'ensemble de la couronne en une seule pose. La moitié environ de la lumière provient de la **couronne intérieure**, qui ne s'étend pas au-delà de 3' du Soleil, c'est-à-dire à une altitude de 150 000 km ; elle a une couleur jaunâtre. La **couronne externe** est blanche ou gris perle ; elle s'étend parfois, sur les photographies à longues poses, jusqu'à une distance du Soleil égale à 2 ou 3 de ses diamètres.

Pendant longtemps, on n'a réussi à observer et étudier la couronne que pendant les éclipses totales de Soleil ; dans les conditions ordinaires, la lumière solaire diffusée par notre atmosphère rend le ciel, juste au bord du Soleil, des milliers de fois plus lumineux que la couronne interne. Pourtant, depuis quelques années, M. B. Lyot a imaginé et construit un appareil, le **coronographe**, qui permet d'observer la couronne interne en

dehors des éclipses. En principe, la méthode consiste à réaliser une éclipse artificielle du Soleil en cachant exactement son image, dans le plan focal d'une lentille, au moyen d'un disque noir. Mais l'énorme difficulté est d'éliminer, par une technique très habile, que nous ne décrirons pas, la lumière solaire diffusée ou diffractée dans l'appareil lui-même. A la suite des travaux de M. Lyot, des instruments analogues ont été maintenant construits dans plusieurs pays ; on espère en installer dans des observatoires convenablement placés pour réaliser une étude continue de la couronne solaire et des protubérances.

L'analyse de la lumière émise par la couronne met en évidence un spectre continu, auquel se superposent un petit nombre de raies brillantes. La lumière continue provient, au moins en partie, de la diffusion du rayonnement solaire par des particules matérielles, vraisemblablement par des électrons. Quant aux raies brillantes, leur identification pose un problème très difficile. Elles n'appartiennent certainement pas aux spectres émis dans des conditions ordinaires par un élément connu, soit à l'état neutre, soit dans les premiers degrés d'ionisation. C'est pourquoi on les avait attribuées autrefois à un élément hypothétique, que l'on appelait le « coronium » ; mais la théorie atomique moderne ne laisse aucune place pour l'existence d'un tel élément. Il est donc probable que les raies coronales sont produites par un ou plusieurs éléments ordinaires, mais se trouvant dans des conditions physiques spéciales, qui n'ont pas encore été reproduites au laboratoire. Le physicien suédois Edlen a récemment proposé d'identifier ces raies avec les radiations émises par des atomes très fortement ionisés, notamment des atomes de fer, de nickel, de calcium, d'argon, ayant perdu 10 à 15 électrons périphériques.

## LE CYCLE DE 11 ANS

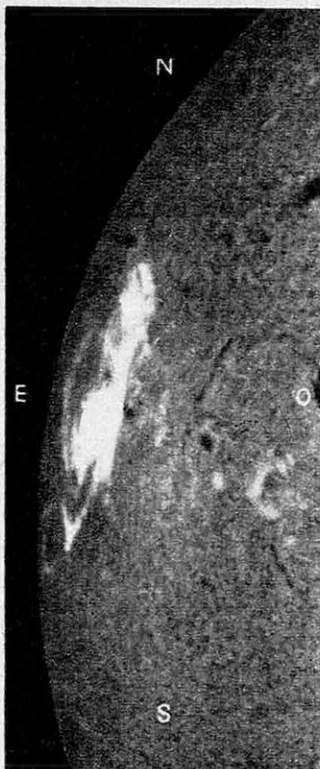
La période de 11 ans environ, qui, comme nous l'avons vu précédemment, est mise en évidence par les variations du nombre et de

l'importance des taches solaires, se retrouve dans un certain nombre de manifestations solaires et mêmes terrestres. Il n'y a pas, dans la grande majorité des cas, de relation entre les taches et les protubérances bien que certains types de protubérances soient le plus souvent observés au voisinage des taches, particulièrement de celles qui sont nouvelles et actives. Pourtant la distribution générale des protubérances suit le cycle solaire : celles que l'on observe dans les « zones royales » varient, en position et en importance, d'une manière analogue à celle des taches et se rapprochent, comme ces dernières, de l'équateur vers la fin d'un cycle ; vers les hautes latitudes, où l'on trouve moins de protubérances, leur fréquence décroît au moment du minimum des taches et, lorsque l'activité solaire augmente, elles se déplacent vers la région des pôles pour y disparaître sensiblement au moment du maximum d'activité des taches.

De même, l'aspect de la couronne solaire se modifie d'une manière systématique au cours d'un cycle de 11 ans. Au moment d'un maximum d'activité des taches, elle est sensiblement circulaire ; la distribution est à peu près uniforme tout autour du disque solaire, sans particularité dans la région des pôles ; on compare parfois la couronne à une fleur de dahlia, à cause de nombreux rayons analogues à des pétales dirigés à partir du centre. Vers la période d'un minimum des taches solaires, au contraire, elle semble comprimée dans la région des pôles, où apparaissent des rayons courbes comme ceux que dessinent les lignes de force vers les pôles d'un aimant, tandis que de longs rayons partent des régions équatoriales et s'étendent jusqu'à de très grandes distances au voisinage du plan équatorial.

D'autre part, les mesures de la constante solaire semblent indiquer que le rayonnement total du Soleil est un peu plus intense au moment d'un maximum des taches ; ce serait le rayonnement ultraviolet qui se trouverait alors renforcé. Mais ces variations sont douteuses.

Sur la Terre, trois sortes de phénomènes, au moins, sont liés au cycle solaire, ou directement aux taches ; ce sont les aurores polaires, les orages magnétiques et les perturbations ionosphériques. On constate que tous les trois sont plus fréquents et plus intenses à l'époque d'un maximum des taches. Les « orages magnétiques » sont de brusques perturbations,



## ← ÉRUPTION CHROMOSPHÉRIQUE

Cette plage large de 100 000 km, émettant de vives lueurs, a été photographiée à l'observatoire de Meudon au spectrohéliographe.

que l'on observe parfois dans les mesures du champ magnétique terrestre ; elles se manifestent par des oscillations désordonnées de l'aiguille des boussoles, donc par des variations de la déclinaison magnétique (angle du méridien géographique et de l'aiguille aimantée), ou encore par des variations erratiques de l'intensité du champ magnétique terrestre. Non seulement on a reconnu que la courbe de fréquence des orages magnétiques suit celle des taches solaires, mais encore on a relevé de nombreux cas indiquant une relation individuelle entre un orage magnétique et une tache de grandes dimensions ; l'orage se produit, en moyenne, 30 heures après le pas-

sage de la tache par le méridien central du Soleil ; fréquemment, l'orage se réveille lorsque, après 27, 3 jours, le Soleil a accompli une révolution synodique et que la tache se trouve, à nouveau, au méridien central.

Le plus souvent, les orages magnétiques, les aurores polaires ainsi que les perturbations ionosphériques surviennent simultanément.

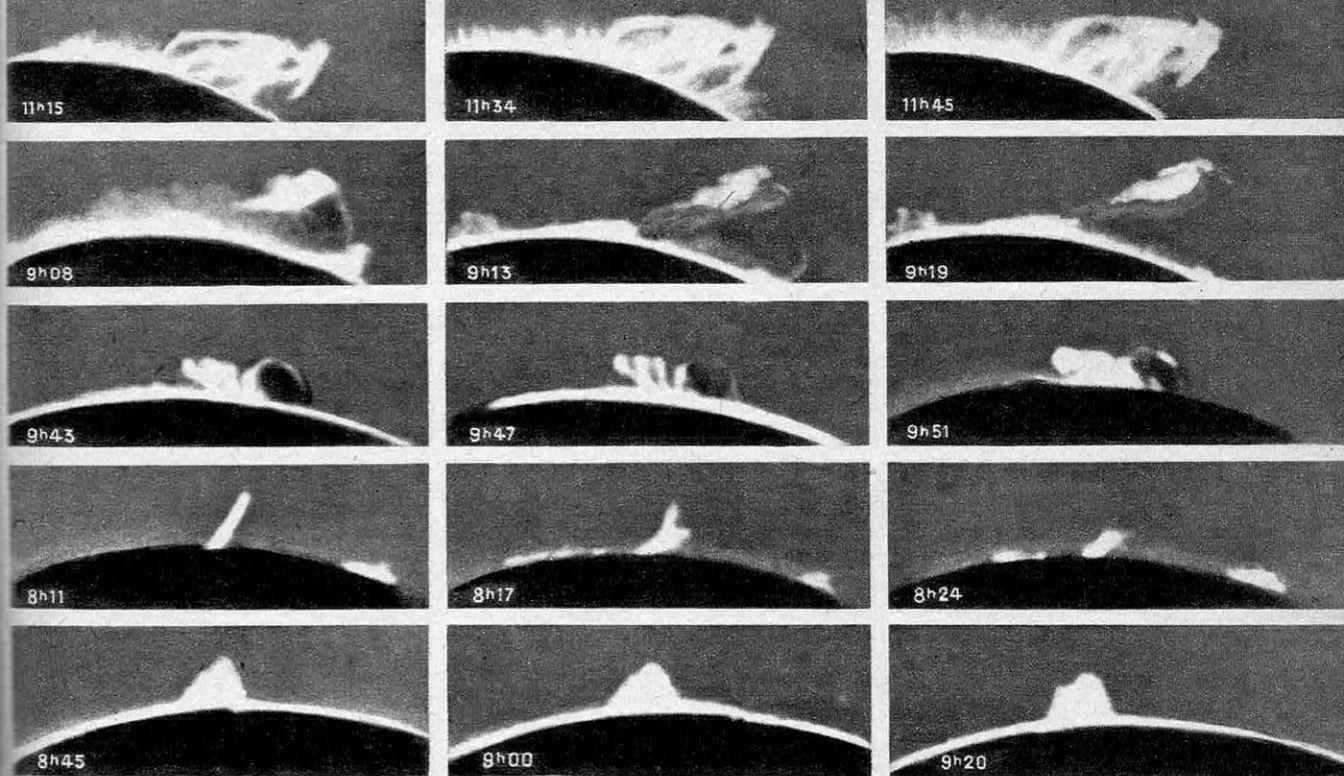
Les premiers sont dus à l'arrivée dans la haute atmosphère de nombreuses particules électrisées, qui y forment de véritables courants, influençant le champ magnétique terrestre.

Ces particules excitent en même temps la luminescence des gaz, à haute altitude, sous forme d'aurores.

On explique la relation de ces phénomènes avec les taches solaires en admettant que les particules électrisées proviennent du Soleil et qu'elles sont émises en abondance par les taches solaires.

Quant aux perturbations ionosphériques, qui provoquent souvent un « évanouissement brusque » des ondes courtes dans les récepteurs de radio, elles proviennent d'une augmentation rapide du nombre des particules électrisées vers une altitude de 60 à 80 km ; on a des preuves certaines que les particules en question n'arrivent pas, cette fois, du Soleil et qu'elles sont formées sur place, par ionisation des gaz présents, sous l'influence d'un rayonnement ultraviolet intense émis par le Soleil lors des éruptions chromosphériques. On constate qu'il y a toujours simultanéité des perturbations ionosphériques et des





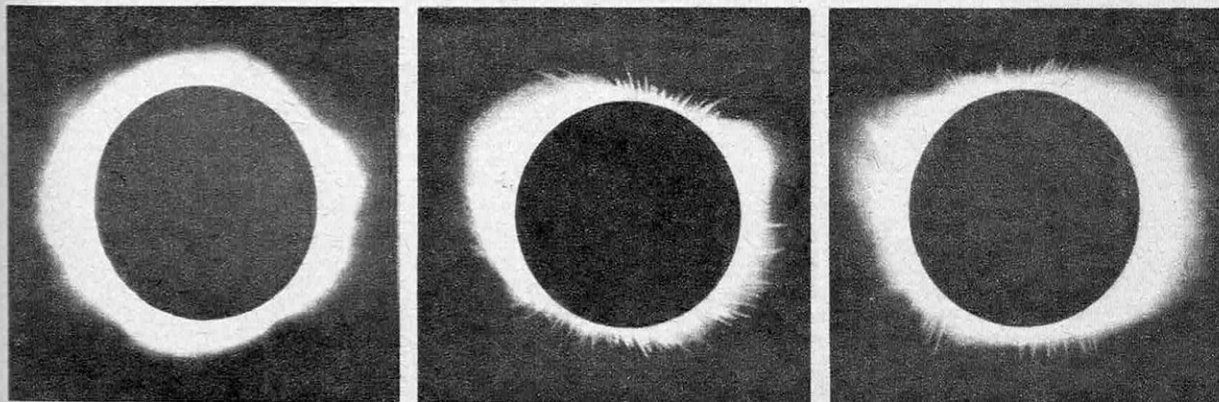
● Les protubérances peuvent être classées en cinq types principaux à chacun desquels correspond une ligne : 1° protubérances actives, attirées par un centre voisin ; 2° éruptives, se dissipant à grande altitude ; 3° des taches, en forme de boucles ; 4° tourbillons, rappelant des spirales ou des cordes ; 5° quiescentes, évoluant lentement.

éruptions chromosphériques ; la coïncidence de ces deux événements est l'exemple le plus frappant, observé jusqu'ici, d'une corrélation entre des phénomènes solaires et terrestres.

On a prétendu trouver de nombreux cas prouvant une corrélation entre les taches solaires et divers phénomènes sur la Terre. Mais il convient, pour le moment, d'être très circonspects sur ce point. Une des questions les plus intéressantes est celle de la relation possible entre les taches solaires et le temps qu'il fait sur la Terre. Jusqu'ici on n'a trouvé

aucune règle précise ; d'après les uns, les maximum des taches correspondraient à des années plus froides, d'après les autres à des années plus humides. On peut espérer que les méthodes nouvelles d'étude du Soleil permettront de trouver un indice plus sensible et moins grossier que les taches solaires pour apprécier l'activité solaire : peut-être, alors, parviendra-t-on à relier celle-ci d'une manière nette aux phénomènes météorologiques et à prévoir ces derniers avec plus de certitude ou pour une période plus éloignée.

● Au cours d'un cycle de onze ans, l'aspect de la couronne solaire se modifie profondément. Au moment d'un maximum d'activité, elle est sensiblement distribuée d'une manière uniforme autour du disque. Au minimum d'activité, elle est comprimée aux pôles où apparaissent des rayons courbes, tandis qu'elle s'étend à l'équateur.



# LES PLANÈTES

**L**E système solaire comprend le Soleil et tout l'ensemble des corps, relativement petits, décrivant, comme la Terre, des orbites autour du Soleil ; il faut donc compter, parmi eux, non seulement les planètes et leurs satellites, mais aussi les comètes et certains météores. Quand on les exprime en kilomètres, les dimensions du système solaire sont très grandes. Nous savons que la distance de la Terre au Soleil est, en gros, de 150 millions de kilomètres, or la planète la plus lointaine, Pluton, est à une distance du Soleil 40 fois plus grande, et la majorité des comètes vont passer, à leur aphélie, plus loin encore. Mais par comparaison aux étoiles les plus proches, ces dimensions sont très petites et les astronomes considèrent vraiment le système solaire comme notre région, et les planètes comme nos voisines.

Une question se présente naturellement à l'esprit : le système solaire est-il unique dans le monde, ou bien existe-t-il parmi les milliards d'étoiles de notre galaxie, d'autres étoiles qui possèdent, comme lui, un cortège de planètes ? A cette question nous ne savons pas encore répondre d'une manière certaine.

Pourtant on a obtenu, ces dernières années, des indices — on pourrait presque dire des preuves — que d'autres systèmes planétaires existent. Pour trois étoiles au moins (61 du Cygne, 70 d'Ophiuchus, Cincinnatti 1244), dont deux sont doubles, on a observé des irré-

gularités de mouvement dont la seule explication paraît être la présence d'un satellite obscur, dont la masse vaudrait respectivement, dans chaque cas, 16, 10 et 30 fois celle de Jupiter : cette masse, faible devant celle des étoiles, serait celle d'une planète.

Nous savons déjà que l'on classe les planètes en « inférieures » et « supérieures », selon qu'elles sont plus près ou plus loin que la Terre du Soleil. Il est intéressant de signaler comment la loi de Bode régit leurs distances moyennes au Soleil. Ecrivons d'abord la suite des nombres :

0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192, 384, 768 obtenus, à partir du deuxième, en doublant le précédent.

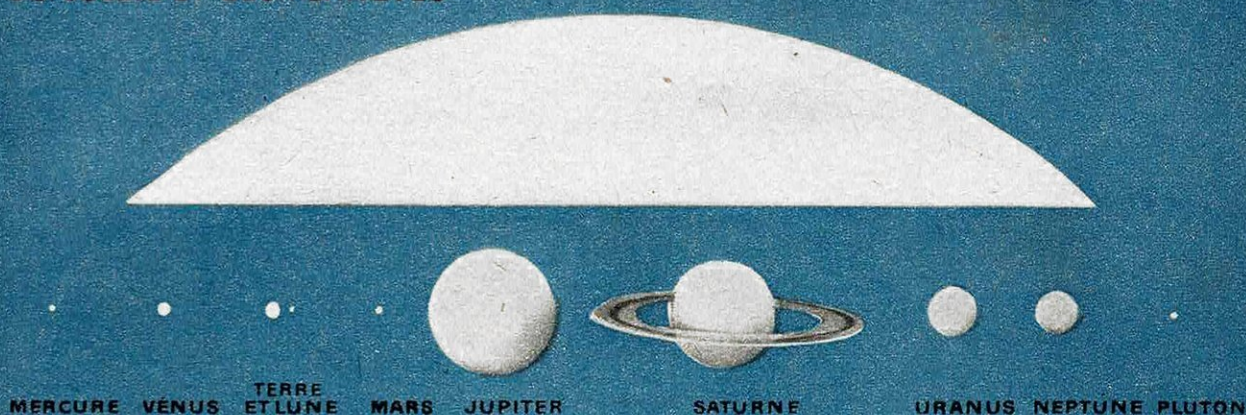
A chacun de ces nombres ajoutons 4 et divisons le total par 10. Nous arrivons à la suite suivante :

0,4, 0,7, 1, 1,6, 2,8, 5,2, 10, 19,6, 38,8, 77,2.

Elle donne approximativement les distances moyennes des planètes au Soleil, exprimées en unités astronomiques (distance moyenne de la Terre au Soleil prise pour unité). En réalité, cette prétendue loi aboutit à un résultat tout à fait faux pour Neptune et Pluton ; on ne lui connaît d'ailleurs pas de signification physique. Il ne faut donc la considérer que comme une règle pratique pour retenir les distances des planètes les plus proches.

LES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE				
	MERCURE	VÉNUS	LA TERRE	MARS
Symbole .....	☿	♀	♁	♂
Distance moyenne au soleil (en unités astronomiques) .....	0,387	0,723	1,000	1,524
Période de révolution.....	87,969 j	224,701 j	365,256 j	686,980 j
Orbite .....	0,206	0,007	0,017	0,093
Diamètre équatorial (comparé à celui de la Terre).....	7°0'	3°24'	0°0'	1°51'
Masse (comparée à celle de la Terre) .....	0,37	0,966	1	0,54
Densité .....	0,04	0,81	1,00	0,11
Gravité à la surface (comparée à celle de la Terre) .....	3,8	4,86	5,52	3,96
Période de rotation .....	0,27	0,85	1,00	0,38
Vitesse orbitale moyenne (en km/s) .....	88,0 j	?	1 j	24,6 h
Inclinaison de l'équateur sur l'orbite .....	47,5	34,7	29,6	24
Magnitude stellaire au moment du maximum d'éclat .....			23°27'	24°
Température maximum à la surface .....	-1,2	-4,3		-2,8
Nombre de satellites .....	410° C	55° C	50° C	10° C
	0	0	1	2

# DIMENSIONS RELATIVES DU SOLEIL ET DES PLANÈTES



## LES MÉTHODES D'ÉTUDE

La méthode la plus naturelle pour étudier les planètes est évidemment de les observer visuellement à travers une lunette ou au télescope. Les détails les plus fins qu'un observateur puisse discerner avec certitude sont déterminés par le pouvoir séparateur de l'instrument et celui-ci varie, on le sait, en raison inverse du diamètre de l'objectif. Ainsi, un objectif de 12 cm doit permettre de distinguer sur Mars, aux oppositions favorables, un objet de 200 km de large ; le télescope du mont Palomar doit séparer deux points distants de 5 km. On devrait donc voir des fleuves un peu larges sur Mars... s'il en existait. Dans la pratique, malheureusement, les troubles atmosphériques ont une

influence croissante quand les faisceaux qui interviennent sont de plus en plus larges ; les images sont brouillées.

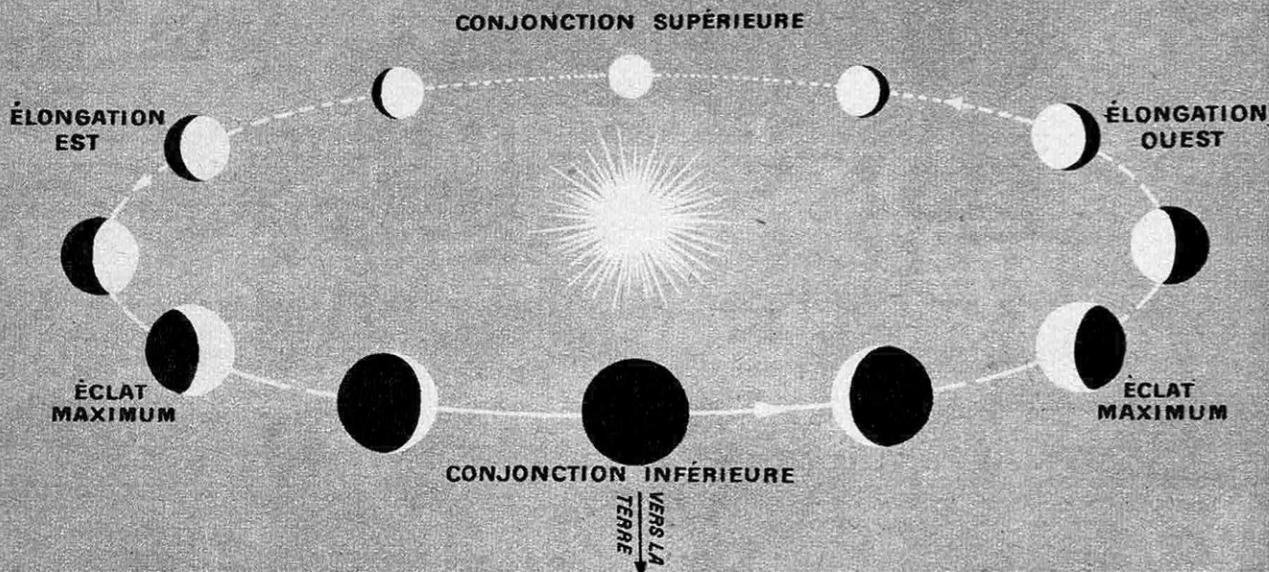
Il y aurait avantage à remplacer les observations visuelles par des photographies, si le « grain » de la plaque n'empêchait généralement de profiter complètement du pouvoir séparateur de l'instrument. Les photographies des planètes obtenues jusqu'ici montrent moins de détails qu'on n'en peut distinguer à l'œil.

Signalons la méthode très originale employée à l'Observatoire du Pic-du-Midi, par MM. Lyot, Camichel et Gentili pour faire disparaître l'effet des grains : elle consiste à prendre plusieurs images d'une planète dans un temps assez court pour que la rotation ne produise pas de changement notable, puis à faire un agrandissement unique en projetant successivement ces images exactement à la même place. Les photographies « composites » que l'on obtient ainsi sont parmi les plus belles et celles qui montrent le plus de détails.

Pour mesurer la température des planètes, on a réalisé des radiomètres si sensibles que le faible rayonnement reçu par un télescope les fait devier. Ce rayonnement se compose du rayonnement solaire réfléchi par la planète et du rayonnement propre : à cause de la faible température de l'astre, ce dernier ne comprend pratiquement que des radiations infrarouges. On le détermine par différence, en interposant sur le trajet des rayons une cuve, qui absorbe les rayons infrarouges et laisse passer les rayons d'origine solaire.

Des résultats très importants sur la constitution des atmosphères des planètes sont obtenus par spectroscopie. En effet, bien que la lumière d'une planète soit de la lumière solaire réfléchie, cette lumière à traversé

JUPITER	SATURNE	URANUS	NEPTUNE	PLUTON
♃	♄	♅	♆	♇
5,203	9,539	19,191	30,071	39,46
11,862 ans	29,458 ans	84,015 ans	164,788 ans	247,697 ans
398,88 j	378,09 j	369,66 j	367,49 j	366,74 j
0,048	0,056	0,047	0,009	0,249
1°18'	2°29'	0°46'	1°47'	17°9'
11,14	9,4	4,0	4,3	
317	94,9	14,7	17,2	0,8
1,34	0,71	1,27	1,58	
2,64	1,17	0,92	1,12	
9,9 h	10,2 h	10,7 h	15,8 h	
13	9,6	6,7	5,4	4,8
3°7'	26°45'	98°	29°	
-2,5	-0,4	+5,7	+7,6	+15
-135° C	-150° C	-180° C	-200° C	-210° C
11	9	5	2	0



● Les phases de Vénus et de Mercure s'accompagnent d'une variation considérable du diamètre apparent de la planète, due à ce que la distance à la Terre varie beaucoup. Ces variations sont très accentuées pour Vénus.

deux fois l'atmosphère de la planète, complètement si elle est réfléchié par le sol, partiellement si elle est réfléchié dans l'atmosphère elle-même ; cette traversée de l'atmosphère peut se traduire par la présence de raies ou bandes d'absorption.

Les astronomes ont appliqué, à l'étude des planètes, d'autres genres de mesures encore. Ils ont notamment déterminé les propriétés polarimétriques de la lumière qu'elles diffusent qui dépendent de la nature de leur surface.

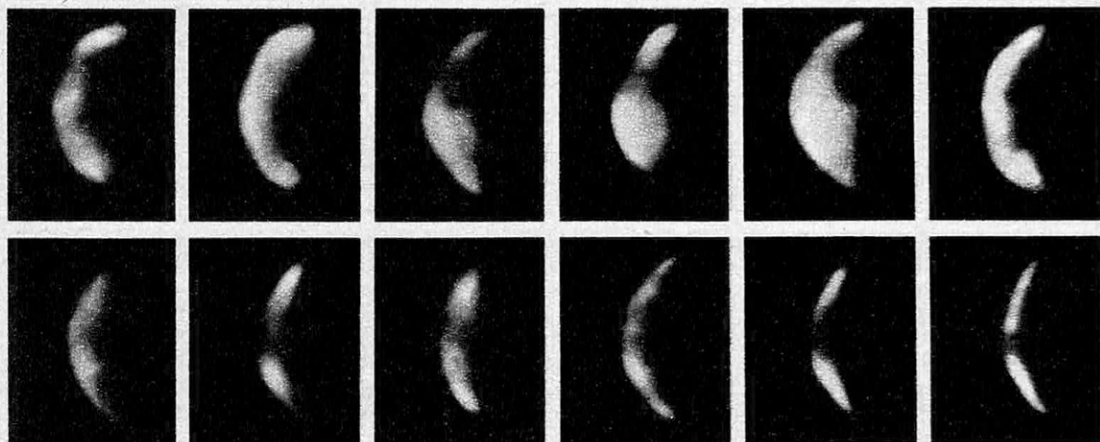
## MERCURE

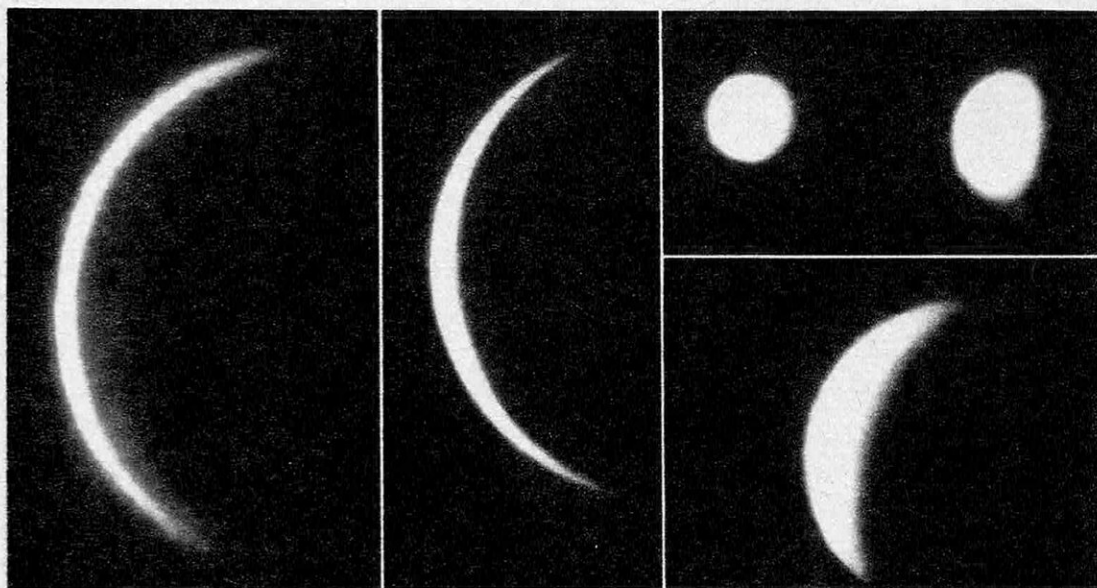
Il est très difficile de voir Mercure, bien que son éclat dépasse par moment celui de Sirius. La difficulté provient de la proximité du Soleil : sa distance angulaire au Soleil n'atteint jamais  $28^\circ$ . Ainsi Mercure, comme Vénus, n'apparaît que peu après le coucher

du Soleil ou peu avant son lever, très bas sur l'horizon, dans une position qui est toujours défavorable aux observations. C'est un des rares astres qu'il y a intérêt à observer en plein jour, au moyen d'une lunette, en s'aidant d'écrans convenables.

Vu dans une lunette, Mercure montre des phases, comme Vénus ou la Lune, ainsi que nous l'avons déjà expliqué. Son diamètre apparent varie entre  $5''$  et  $13''$  et il est difficile à mesurer ; aussi les dimensions de la planète ne sont-elles connues qu'avec une assez faible précision. On distingue à la surface quelques plages sombres. Des observations répétées de ces plages ont permis de déterminer la période de rotation de la planète ; on l'a trouvée égale à 88 jours, c'est-à-dire à la période sidérale de révolution ; en d'autres termes, la planète tourne autour du Soleil en dirigeant vers lui toujours

● Alors que l'examen de Vénus en lumière infrarouge n'a rien montré de remarquable, les photographies ultraviolettes révèlent des bandes obscures parallèles et des nuages brillants dont la position varie rapidement.





● Sur ces photographies des phases successives de Vénus, on voit que la planète est « pleine » quand le diamètre apparent est minimum, c'est-à-dire quand sa distance à la Terre est maximum (250 millions de km).

la même face, aux librations près, de la même manière que la Lune vis-à-vis de la Terre et pour les mêmes raisons.

Au point de vue physique, cette planète ressemble beaucoup plus à la Lune qu'à la Terre. Ses dimensions et sa masse sont un peu plus grandes que celles de la Lune. Son sol a probablement une nature tourmentée et est analogue à celui de la Lune, car il réfléchit la lumière du Soleil de la même manière. Comme pour la Lune, l'atmosphère de Mercure s'est probablement dissipée dans l'espace, à cause de la faible gravité de la planète.

Mercure est la planète la plus chaude du système solaire pour sa face constamment tournée vers le Soleil, et, en même temps, la planète la plus froide pour la face qui reste toujours dans l'ombre. On a trouvé  $410^{\circ}\text{C}$  vers le centre de la face éclairée, température supérieure aux points de fusion du plomb et de l'étain. La face obscure est probablement plus froide que Pluton et voisine du zéro absolu ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). Mercure est la planète qui a la plus grande vitesse orbitale moyenne, environ 48 km/s.

Son orbite, si l'on excepte celle de Pluton, est la plus inclinée sur l'écliptique ( $7^{\circ}$ ) et la plus excentrique. Sa distance au Soleil varie entre 46 et 70 millions de km. Mercure n'a pas de satellite.

## VÉNUS

Vénus est la plus brillante des planètes et même de tous les objets célestes après le Soleil et la Lune. Au moment de son maximum d'éclat, elle est 6 ou 7 fois plus lumineuse que la plus brillante des étoiles, Sirius. Elle est même visible en plein jour, à condition

que l'on sache où elle se trouve. Elle accomplit sa révolution autour du Soleil à une distance moyenne de 107 millions de kilomètres — soit 70 % de la distance Terre-Soleil — sur une orbite de très faible excentricité, qu'elle décrit en 225 jours. Venus, comme Mercure, présente des phases, que Galilée fut le premier à observer en 1610 ; elle accuse en même temps une grande variation de diamètre apparent (de  $11''$  à  $67''$ ). En effet, au moment où le disque entier apparaît, la planète se trouve en conjonction supérieure, et sa distance à la Terre est sensiblement égale à 250 millions de kilomètres ; au contraire, vers le nouveau quartier, elle est en conjonction inférieure, à seulement 42 millions de kilomètres environ. Les variations d'éclat de Vénus sont dues aux variations simultanées de phase et de distance de la Terre. Puisque la planète est « pleine » au moment où sa distance est la plus grande, les deux effets tendent à se compenser. On constate que Vénus a son maximum d'éclat au moment où elle présente la même phase que la Lune 2 jours avant le premier quartier ; elle est alors deux fois et demie plus lumineuse que lorsqu'elle a la forme d'un disque complet.

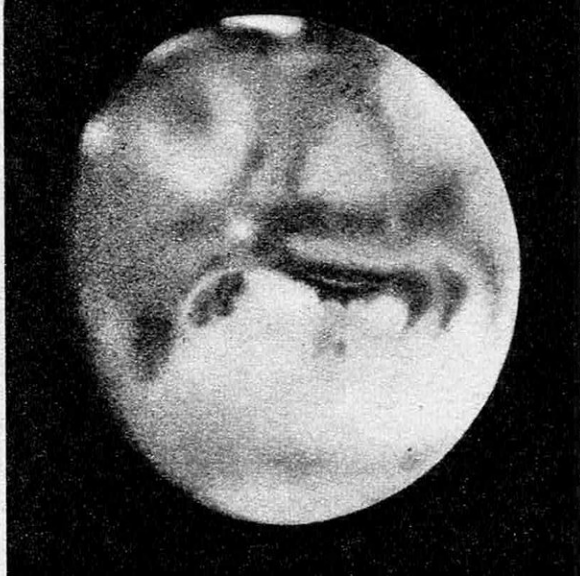
S'il est aisé d'observer les phases, par contre les lunettes ou télescopes, même les plus puissants, ne permettent guère de distinguer de détails sur la surface de la planète, qui paraît toujours d'un blanc à peu près uniforme. Comme on l'a fait pour diverses planètes, on a photographié Vénus à travers différents filtres colorés ; mais tandis que d'ordinaire ce sont les rayons infrarouges qui dessinent le mieux les détails à travers une atmosphère brumeuse, pour Vénus, ce résultat est obtenu par les photographies en lumière

ultraviolette, qui ont décelé des bandes obscures parallèles et des « nuages » brillants, qui d'ailleurs se modifient d'une nuit à l'autre.

Faute d'observer des détails définis sur la surface de la planète, on n'a pas pu déterminer avec certitude sa période de rotation. Nombre d'astronomes pensent qu'elle est voisine de 30 jours.

La couleur blanche de la planète et son éclat ne peuvent s'expliquer que si la lumière que nous observons est réfléchiée par une couche opaque de nuages ; d'après l'épaisseur de l'anneau lumineux entourant le disque noir, qui est observé lorsque Vénus passe devant le Soleil, on a estimé que la couche nuageuse doit s'élever au moins jusqu'à une altitude de 90 km. On croyait autrefois que ces nuages étaient formés, comme sur la Terre, de vapeur d'eau. Or l'analyse spectroscopique de la lumière réfléchiée par Vénus montre qu'il n'y a pas de quantité appréciable de vapeur d'eau, ni d'ailleurs d'oxygène, mais par contre une énorme quantité de gaz carbonique. Quant à la nature des nuages, elle reste, pour le moment, inconnue.

On a trouvé par des mesures bolométriques une température moyenne de 55°C environ pour la face éclairée par le Soleil. Il s'agit de la température de la couche nuageuse. Quant à la température du sol, elle dépasse probablement 100°C, car la couche épaisse de gaz carbonique, comme le verre dans les serres, laisse pénétrer le rayonnement solaire,



MARS VU PAR M. ANTONIADI A MEUDON

mais arrête le rayonnement infrarouge réémis.

Ainsi, contrairement à ce qu'on avait cru autrefois, les conditions physiques qui régissent sur Vénus sont très différentes de celles dans lesquelles nous vivons sur la Terre.

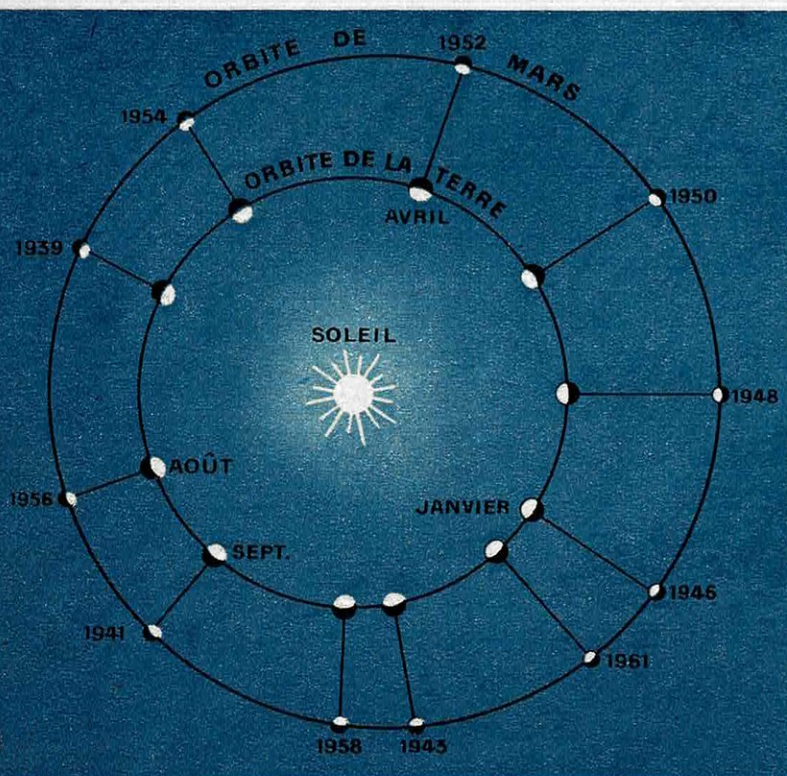
## MARS

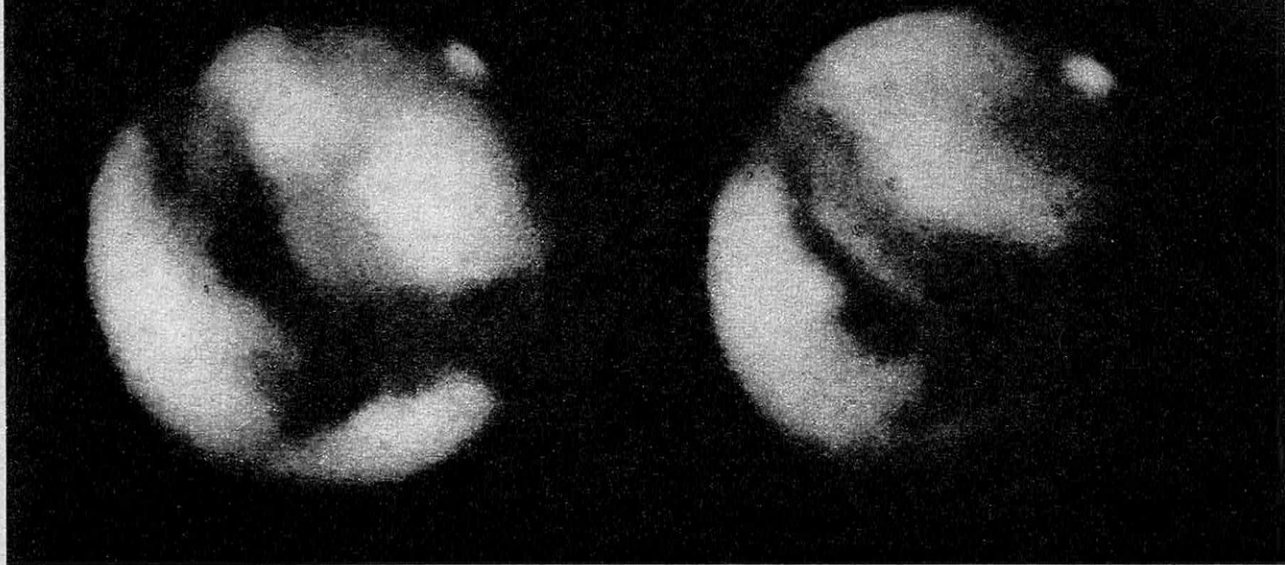
Mars est la première des planètes supérieures, c'est-à-dire de celles ayant une orbite située à l'extérieur de l'orbite de la Terre. Ces planètes sont beaucoup plus faciles à observer que Mercure et Vénus, car elles montrent leurs disques entiers illuminés par le Soleil au moment où elles sont les plus proches de la Terre ; leurs variations de phase sont faibles.

Le diamètre de Mars est à peine supérieur à la moitié de celui de la Terre ; sa masse est presque 10 fois plus petite. Son éclat est très variable : au moment de sa conjonction, Mars a sensiblement l'éclat de l'Etoile Polaire, tandis que lors d'une opposition favorable il est

### ← OPPOSITIONS DE MARS

On voit sur ce croquis, qui montre les oppositions de la planète Mars entre 1939 et 1941, que les oppositions défavorables (quand Mars est près de l'aphélie) se produisent en février-mars. Les oppositions favorables aux observations se produisent en août-septembre, lorsque Mars est voisin du périhélie, à faible distance de la Terre.





**DEUX PHOTOGRAPHIES DE LA PLANÈTE MARS OBTENUES A L'OBSERVATOIRE DU MONT WILSON**

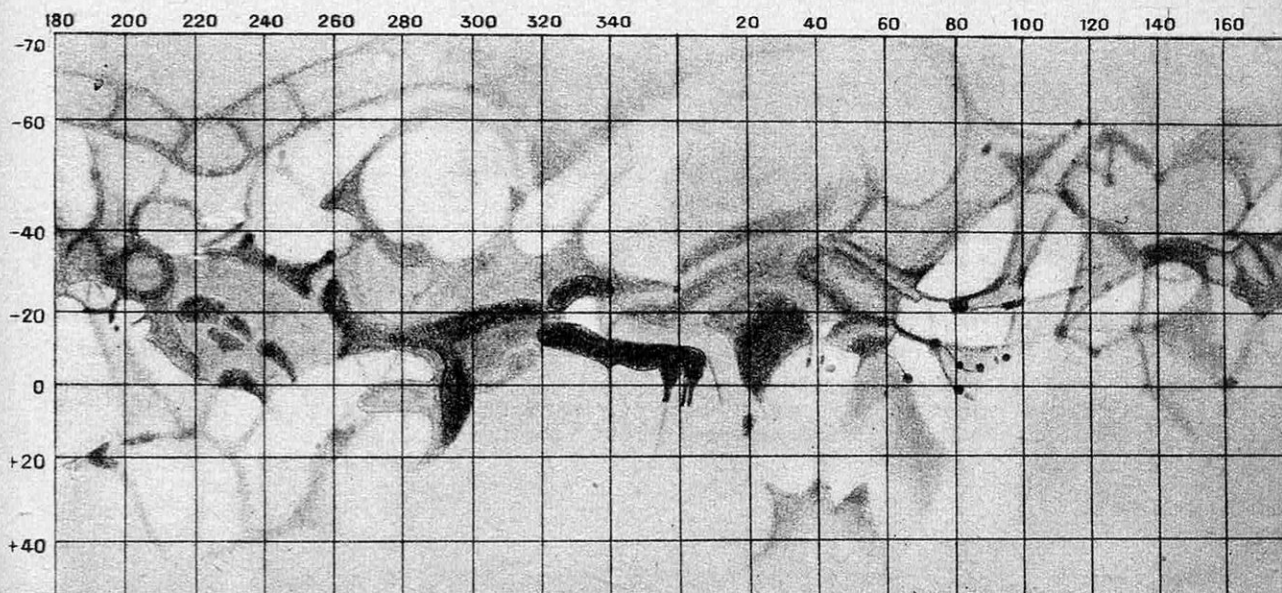
60 fois plus lumineux et dépasse Jupiter. Les oppositions se reproduisent tous les 780 jours, mais elles ne sont pas toutes également favorables car, par suite de l'excentricité de son orbite, Mars passe, à son opposition, à une distance de la Terre qui varie entre 55 et 101 millions de kilomètres et son éclat varie alors sensiblement dans le rapport de 4 à 1. Les oppositions favorables sont celles qui se produisent au voisinage du périhélie de Mars ; elles surviennent en août ou en septembre.

Plus de la moitié de la surface de Mars présente une coloration rouge-orangé sur laquelle se détachent quelques taches sombres, bleu-vertes, certaines assez larges, d'autres formant des bandes fines, à peine perceptibles, que l'on nomme des « canaux ». Pendant les saisons froides, une grande tache blanche couvre les pôles.

L'observation des détails sur la surface de Mars remonte déjà au XVII<sup>e</sup> siècle. On a donc pu déterminer avec une très grande précision la période de rotation de la planète. Elle est sensiblement la même que celle de la Terre, puisqu'elle vaut 24 h 37 mn 22,58 s.

L'équateur de Mars fait un angle de 24° avec le plan de son orbite ; il y a donc des saisons sur Mars, comme sur la Terre. Elles ressemblent aux nôtres, mais sont presque deux fois plus longues. La différence des saisons entre les deux hémisphères est plus prononcée sur Mars que sur la Terre à cause de l'excentricité de l'orbite. En effet, tandis que la distance de la Terre au Soleil ne varie que de 3 % entre l'aphélie et le périhélie, la variation de distance est de 20 % pour Mars. Le principal signe de la variation des saisons est le développement plus ou moins grand des calottes blanches aux régions

● Ce planisphère de Mars, suivant la projection de Mercator, groupe toutes les observations faites au Pic du Midi pendant 1941. Au centre, une formation bizarre rappelle un bec de canard ; la longueur du bec est de 300 km.



polaires. Elles sont indiquées aussi par des variations régulières de couleur qui correspondraient à un développement saisonnier de la végétation...

Ceci nous amène à la question si discutée des « canaux » de Mars et des possibilités de vie à sa surface.

C'est en 1877 que Schiaparelli découvrit les « canali », traits fins qu'il prétendit apercevoir reliant les « mers ». Ce terme a été faussement traduit par celui de « canaux », qui implique l'idée d'une construction artificielle. Leur existence même a donné lieu à de vives controverses : tandis que certains observateurs ne les ont jamais distingués, d'autres ont dessiné leur réseau avec une profusion extraordinaire de détails. Il est certain que nombre d'entre eux doivent être attribués à une illusion d'optique : on constate, en effet, que lorsque l'œil humain s'efforce de distinguer des détails dans un objet qu'il voit mal, il a tendance à joindre les points les plus remarquables par des segments de droite. Il y a quelques années, on a pensé qu'il fallait attribuer tous les « canaux » à cette illusion. Actuellement la question a évolué, car MM. Lyot, Camichel et Gentili, observant Mars à l'Observatoire du Pic-du-Midi dans des conditions très favorables, ont récemment réussi à obtenir des photographies composites sur lesquelles des « canaux » apparaissent, sous des aspects d'ailleurs variés, souvent bien différents des formes géométriques que les observateurs

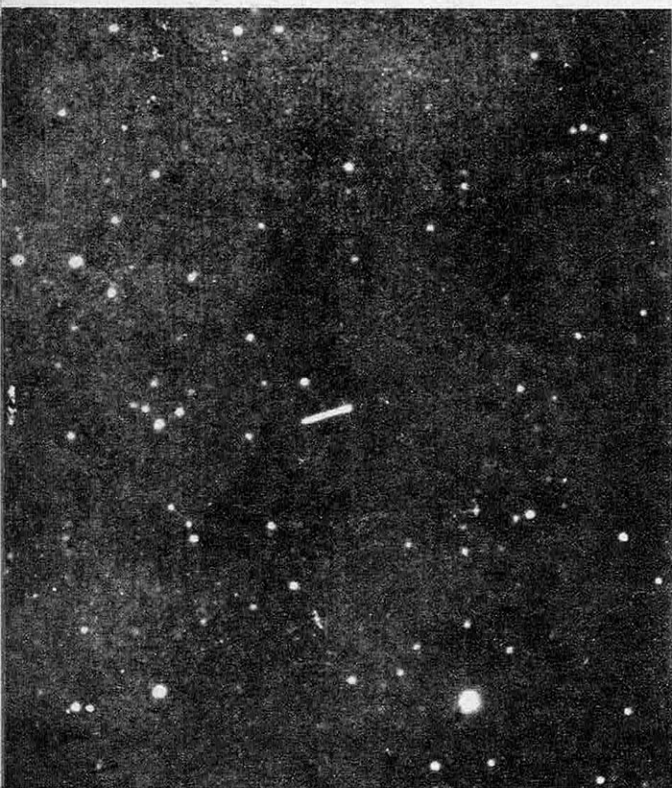
ont tendance à dessiner. Les astronomes américains se proposent, eux aussi, de reprendre les observations à l'aide du télescope du mont Palomar. S'il existe des « canaux », nous ignorons totalement quelle est leur nature.

D'après des considérations théoriques, la température moyenne sur Mars devrait être bien inférieure au point de fusion de la glace : pourtant des mesures bolométriques montrent que la température atteint  $+ 10^{\circ}\text{C}$  à l'équateur, à midi, en été, et qu'elle est voisine de  $- 70^{\circ}\text{C}$  au pôle, en hiver.

Il y a une atmosphère, beaucoup moins dense que la nôtre, dont l'altitude peut être évaluée à 80 km environ. On voit parfois des « nuages » près des pôles, notamment en automne avant la formation des calottes polaires.

Quelle est la composition de cette atmosphère ? Nous ne le savons pas encore. L'analyse spectroscopique n'y trouve pas trace d'oxygène, ni de vapeur d'eau. On peut affirmer que les quantités d'oxygène et de vapeur d'eau, s'il en existe dans l'atmosphère de Mars, sont toutes deux inférieures à 0,15 %, à aires égales, de celles présentes dans notre atmosphère. Il y a donc moins d'oxygène à la surface de Mars qu'il n'y en a dans notre atmosphère à une altitude de 50 km. En ce qui concerne la vapeur d'eau, il est possible que, malgré sa faible quantité, les calottes polaires soient formées de neige ou de glace, mais on évalue alors, d'après la quantité de chaleur qui suffit pour les faire fondre, que leur épaisseur est certainement inférieure à un dixième de millimètre. En réalité, il n'est pas du tout sûr qu'il s'agisse d'une couche déposée sur le sol, car des observations comparées montrent que les calottes sont plus nettes en lumière ultraviolette qu'en infrarouge, tandis qu'un dépôt de neige produirait exactement l'effet inverse. D'après ces observations, les calottes polaires seraient formées, au moins en partie, par de fins cristaux en suspension dans l'atmosphère très froide, comme pour les cirrus de notre atmosphère.

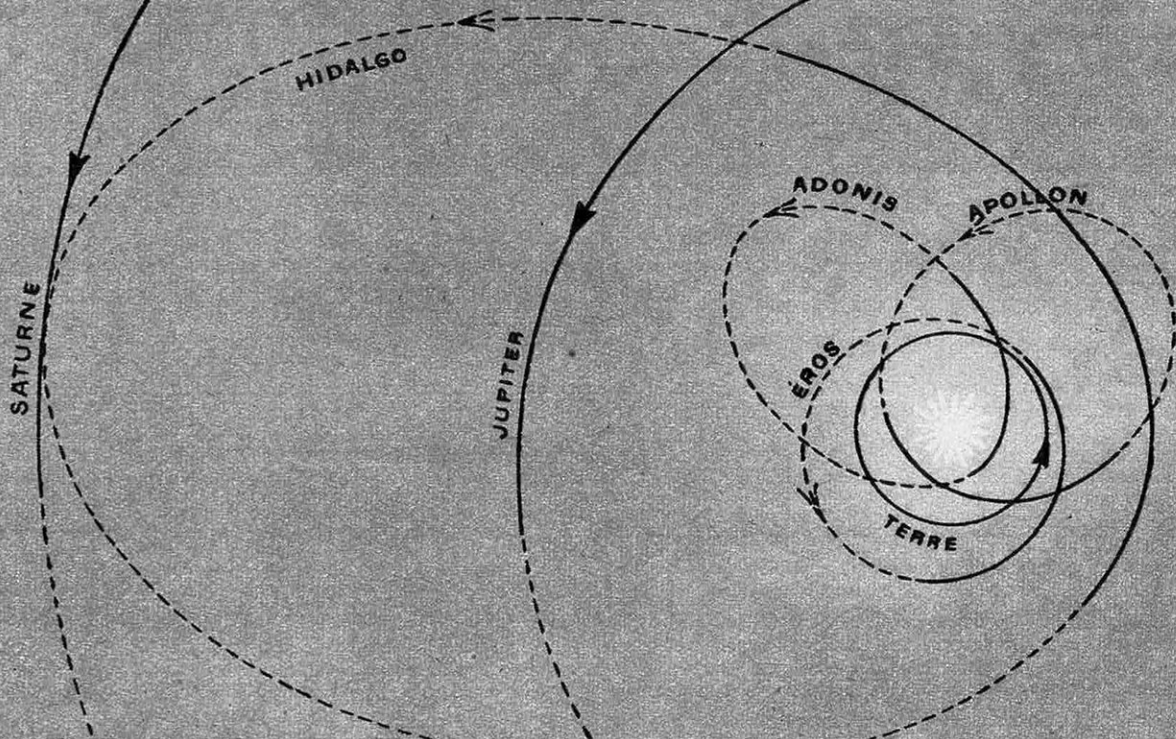
Mars a deux satellites, auxquels on a donné les noms de Phobos et de Deimos, c'est-à-dire la « Crainte » et l'« Epouvante ». Ils sont tous deux très petits (diamètre probablement inférieur à 15 km) et très proches de la planète ; ils ne sont observables qu'avec une lunette puissante. La période de révolution de Phobos n'est que de 7 h 39 mn, donc nettement inférieure à la période de rotation de la planète sur elle-même, si bien que, vu de la surface de Mars, le satellite se lève à l'ouest et se couche à l'est.



#### ← MISE EN ÉVIDENCE D'UN ASTÉROÏDE

Au cours d'une pose de longue durée, les astéroïdes rapides dessinent un petit trait sur la plaque, tandis que les étoiles fixes donnent des images ponctuelles.





● Les orbites des astéroïdes sont plus variées que celles des grandes planètes. Certaines sont sensiblement circulaires et dans le plan de l'écliptique. D'autres font un angle notable avec lui et sont très allongées. Pour Hidalgo, par exemple, l'excentricité est de 0,65 et l'angle du plan de son orbite avec celui de l'écliptique est de 43°.

## LES ASTÉROÏDES

On appelle petites planètes ou astéroïdes un groupe de corps très petits qui tournent autour du Soleil, la plupart entre les orbites de Mars et de Jupiter. Pour la grande majorité d'entre eux, les dimensions sont d'une cinquantaine de kilomètres seulement ou moins encore. Leur nombre est très grand et on en découvre de nouveaux chaque année ; en 1941, on en connaissait 1 500. Un seul, Vesta, est visible à l'œil nu.

Les observations donnent comme diamètre des quatre plus grands astéroïdes connus : 770 km pour Cérés, 480 pour Pallas, 385 pour Vesta et 195 pour Junon. Les dimensions de la plupart des astéroïdes sont trop faibles pour être directement mesurables ; on les déduit approximativement de leur éclat, sans tenir compte des différences possibles du pouvoir réflecteur.

Tous les astéroïdes sont trop petits pour posséder une atmosphère. Leurs masses sont assez mal déterminées ; celle de Cérés serait approximativement égale à  $1/8000^e$  de celle de la Terre. Mais on a pu estimer que la masse totale des astéroïdes est certainement inférieure à celle de la Terre et peut-être même à celle de la Lune.

Les orbites des astéroïdes montrent une beaucoup plus grande variété que celles des grandes planètes. Pour la plupart, la distance moyenne au Soleil est comprise entre 2 et 3,6 unités astronomiques ; la période de révolution a une valeur moyenne de 4,5 ans, mais les valeurs extrêmes sont approximativement 2 ans  $1/2$  et 12 ans.

A cause de la forme très allongée de leurs orbites, certains astéroïdes passent très près de la Terre. Les passages de l'un d'eux, Eros, ont été étudiés avec un soin tout particulier, parce qu'ils ont été employés pour déterminer avec précision la distance moyenne de la Terre au Soleil. Eros a un diamètre de 30 km et passe à 22 millions de kilomètres de la Terre. L'astéroïde qui vient le plus près de la Terre est Hermès, avec 1,5 million de kilomètres.

## JUPITER, LA PLANÈTE GÉANTE

Jupiter est, à la fois, la planète la plus grosse et la plus massive du système solaire. Son diamètre vaut 11 fois celui de la Terre, ou encore le dixième de celui du Soleil. Sa masse dépasse 300 fois celle de la Terre ; à elle seule, elle est très supérieure à la masse de toutes les autres planètes réunies.

La distance moyenne de Jupiter au Soleil est de 5,2 unités astronomiques ; à cause de l'excentricité de l'orbite, la différence des distances au périhélie et à l'aphélie atteint 75 millions de kilomètres. La période de révolution sidérale est de 11,86 ans. Même une lunette de petites dimensions suffit pour montrer quelques détails caractéristiques de Jupiter. On voit généralement les quatre principaux satellites ; on discerne l'aplatissement très net de la planète, dû à son rapide mouvement de rotation ; enfin on aperçoit les principaux détails de la surface, qui sont des bandes parallèles à l'équateur. Une lunette

puissante révèle un grand nombre de détails, aux colorations très variées. Ceux-ci changent de forme avec le temps, ce qui démontre la nature fluide de la surface. Tandis que la plupart de ces taches ne persistent que pendant un intervalle de temps relativement court, l'une d'elles a un caractère presque permanent, puisqu'elle a été signalée déjà en 1878 ; on la nomme la « tache rouge ». D'abord rouge pâle, elle est devenue de couleur rouge brique et s'est étendue sur 45 000 km dans une direction parallèle à l'équateur ; elle est encore observable sous forme d'une tache ovale, de couleur et de forme variables, moins remarquable cependant que pendant les années succédant à sa découverte. Notons que la « tache rouge » s'est déplacée, à un moment donné, d'environ un quart de tour.

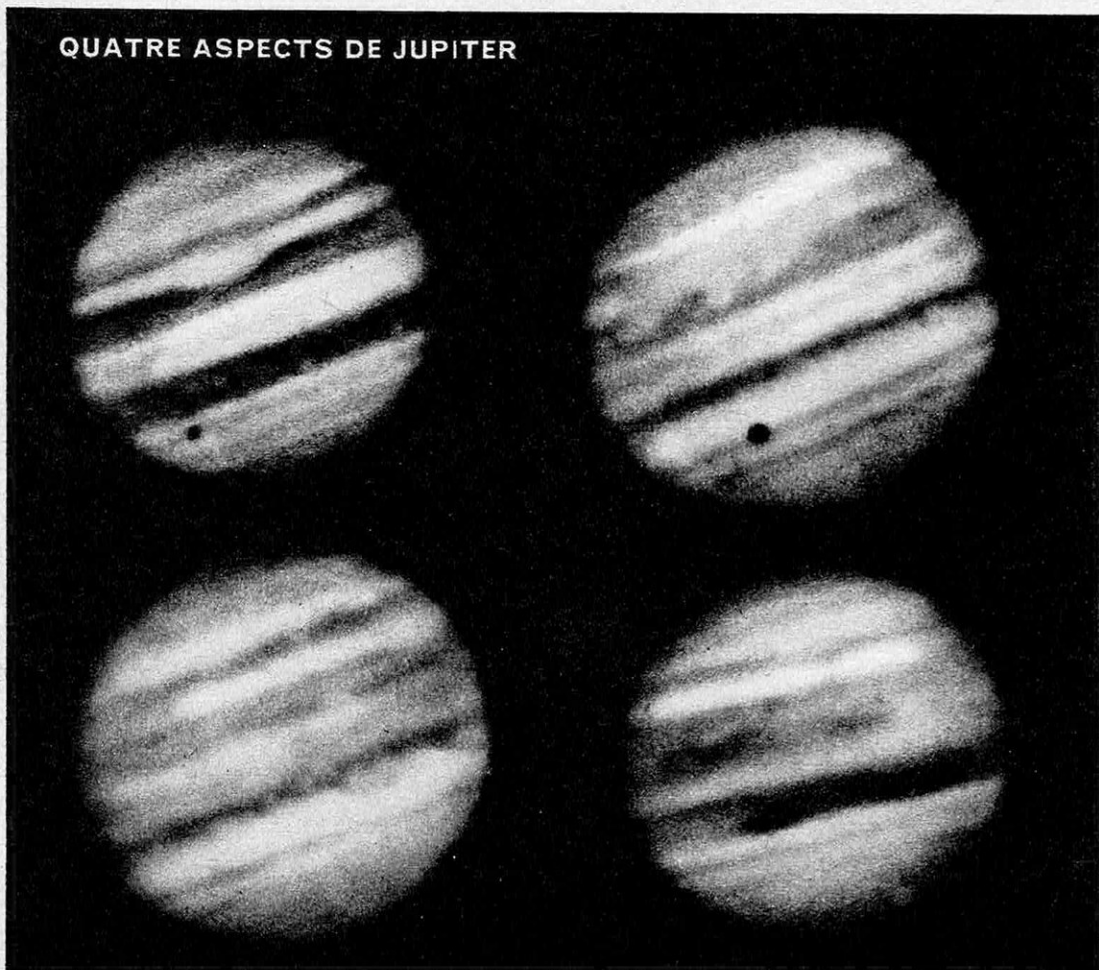
La période de rotation de Jupiter est très courte, voisine de 9 h 50 mn. C'est, de toutes les planètes, celle qui tourne le plus vite. La période de rotation n'est d'ailleurs pas exactement la même pour les divers points du disque. Un point de l'équateur tourne à une vitesse de 40 000 km/h. Cette rotation explique l'aplatissement notable de la pla-

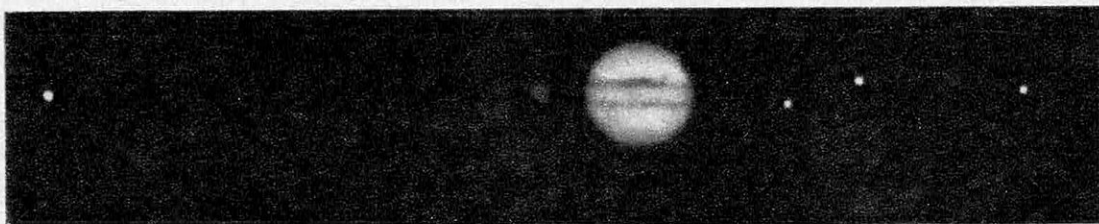
nete ; on a même remarqué que l'aplatissement observé est moindre qu'on ne le prévoirait si l'intérieur de la planète était semblable à celui de la Terre. On pense qu'une part importante du volume de la planète est occupée par une atmosphère gazeuse.

On a cru pendant longtemps que le noyau était fluide, parce qu'il ne s'était pas encore complètement refroidi. Mais la mesure radiométrique directe indique une température moyenne de  $-135^{\circ}\text{C}$ . La surface de la planète est donc extrêmement froide et la valeur trouvée indique qu'elle est chauffée uniquement par la radiation solaire.

Le spectre de Jupiter montre, dans les régions orangé, rouge et infrarouge, un certain nombre de bandes que l'on retrouve d'ailleurs, pour la plupart, dans les spectres des autres grosses planètes lointaines. Ces bandes sont dues au gaz ammoniac et au méthane ; d'après l'intensité de ces bandes, on déduit que la quantité de gaz ammoniac est faible, tandis que celle de méthane est très abondante dans la couche gazeuse de Jupiter qui est traversée par les rayons solaires avant leur réflexion. Il y a probablement aussi, dans cette atmosphère, beaucoup d'hydrogène

#### QUATRE ASPECTS DE JUPITER





## LES SATELLITES DE JUPITER

Satellite	Distance (en fonction du rayon de Jupiter)	Période de révolution	Diamètre (en km)	Magnitude stellaire	Année de la découverte
1 (Io).....	5,9	1 j 18 h 28 mn	3 680	5,6	1610
2 (Europe) .....	9,4	3 j 13 h 14 mn	3 200	5,7	1610
3 (Ganymède) .....	15,0	7 j 3 h 43 mn	5 120	5,0	1610
4 (Callisto) .....	26,4	16 j 16 h 32 mn	5 120	6,3	1610
5 .....	2,5	11 h 57 mn	160 ?	13	1892
6 .....	160	251 j	160 ?	14	1904
7 .....	167	260 j	60 ?	16	1905
8 .....	330	739 j	60 ?	16	1908
9 .....	345	745 j	30 ?	19	1914
10 .....	167	260 j	?	18,8	1939
11 .....	?	700 j	?	18,4	1939

et peut-être de l'azote, mais ni l'un ni l'autre de ces gaz n'ont été reconnus par la spectroscopie.

On comprend alors quelle est la nature des nuages. A la température de  $-135^{\circ}\text{C}$ , l'ammoniac est à l'état solide, mais le méthane est gazeux. Les nuages doivent donc être formés de cristaux d'ammoniac flottant dans une atmosphère composée de méthane et probablement aussi d'hydrogène. Quant aux colorations diverses, notamment à celle de la « tache rouge », il faut peut-être les attribuer à des composés métalliques.

Jupiter est remarquable par sa nombreuse famille de satellites ; on en connaît 11. Ils sont désignés par un numéro, suivant l'ordre dans lequel ils ont été découverts, sauf les quatre premiers, Io, Europe, Ganymède et Callisto, qui ont été vus simultanément par Galilée, en 1610, et que l'on range d'après leur distance à la planète. Ils sont de beaucoup les plus brillants et seraient juste perceptibles pour nos yeux, comme de faibles étoiles, s'ils étaient plus éloignés de la brillante planète. Les deux premiers ont sensiblement la dimension de la Lune ; le troisième et le quatrième ont un diamètre qui dépasse de 50 % celui de la Lune et qui est même supérieur au diamètre de la planète Mercure. On a distingué des détails à leur surface et l'on a pu déterminer leur période de rotation ; elle est égale à leur période de révolution. Ces quatre satellites tournent donc toujours la même face vers la planète, de la même manière que la Lune vis-à-vis de la Terre.

Comme ces quatre satellites se meuvent au voisinage du plan de l'écliptique, ils passent souvent entre la planète et la Terre ; ils apparaissent alors comme un point brillant à la surface de la planète, tandis que leur ombre forme, sur cette surface, une tache sombre. Quand un des satellites passe dans le cône d'ombre à l'arrière de la planète, il y a éclipse. Rappelons que c'est l'observation de ces éclipses qui conduisit l'astronome danois Roemer à reconnaître, le premier, que la lumière ne se propage pas instantanément. Il trouva, en effet, que les époques prévues pour les éclipses pouvaient différer d'une vingtaine de minutes de celles réellement observées. Il expliqua cette différence par l'accroissement de la distance que la lumière doit parcourir pour atteindre la Terre.

Les sept autres satellites sont difficiles à observer, même avec une lunette puissante. Le satellite 5 est le plus voisin de la planète ; il a un mouvement très rapide, sa vitesse dépasse 1 000 km/mn. Quant aux autres satellites, ils sont si petits et si éloignés qu'ils seraient invisibles à l'œil nu pour un observateur situé à la surface de Jupiter, sauf le sixième, qui ressemblerait à une très faible étoile. Les satellites 8, 9 et 11, qui sont les plus éloignés, sont remarquables parce qu'ils tournent autour de Jupiter de l'est à l'ouest, alors que, à quelques exceptions près, tous les astres membres du système solaire décrivent leurs orbites dans le sens inverse qui est aussi le sens de leur rotation. Ce sens général est appelé le

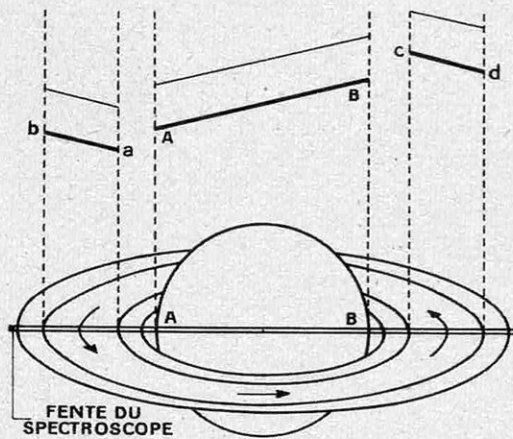
sens « direct », tandis que le sens contraire est dit « rétrograde ». L'existence de satellites animés d'un mouvement rétrograde pose un difficile problème en ce qui concerne l'origine de ces satellites et, de manière plus générale, la cosmogonie du système solaire.

## SATURNE ET SON ANNEAU

Beaucoup d'amateurs d'astronomie considèrent que Saturne est, avec son anneau, le plus bel objet céleste que l'on puisse contempler.

Cette planète était la plus éloignée connue des Anciens. Sa distance moyenne au Soleil est de 9,5 unités astronomiques. Sa plus petite distance à la Terre est de 1 100 millions de kilomètres, presque deux fois plus que pour Jupiter ; sa plus grande distance atteint 1 500 millions de kilomètres, dix fois environ la distance de la terre au Soleil.

La période sidérale de Saturne est de 29,5 ans ; la période synodique est de 378 jours. Remarquons que, lorsqu'on considère des planètes supérieures dont les périodes sont de plus en plus grandes, on trouve des périodes synodiques de plus en plus courtes ; pour une période sidérale infiniment longue, la période synodique deviendrait égale à la durée de l'année sidérale. Saturne a, à l'œil nu, une coloration jaunâtre caractéristique. Une petite lunette suffit pour apercevoir les

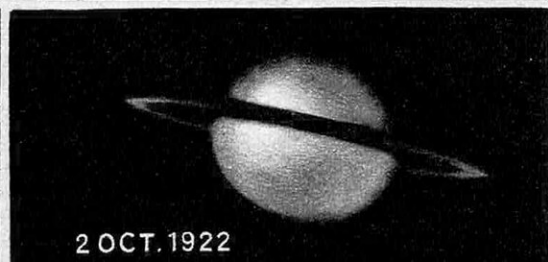


## ROTATION DE SATURNE

Les raies sont inclinées par suite de l'effet Doppler ; A s'approche et B s'éloigne ; b et d, moins déviés que a et c révèlent que le bord interne de l'anneau tourne plus vite que l'autre bord.

anneaux. Ceux-ci sont concentriques à la planète et situés dans son plan équatorial. On a l'impression qu'il y a 3 anneaux séparés. On les appelle généralement l'anneau externe,

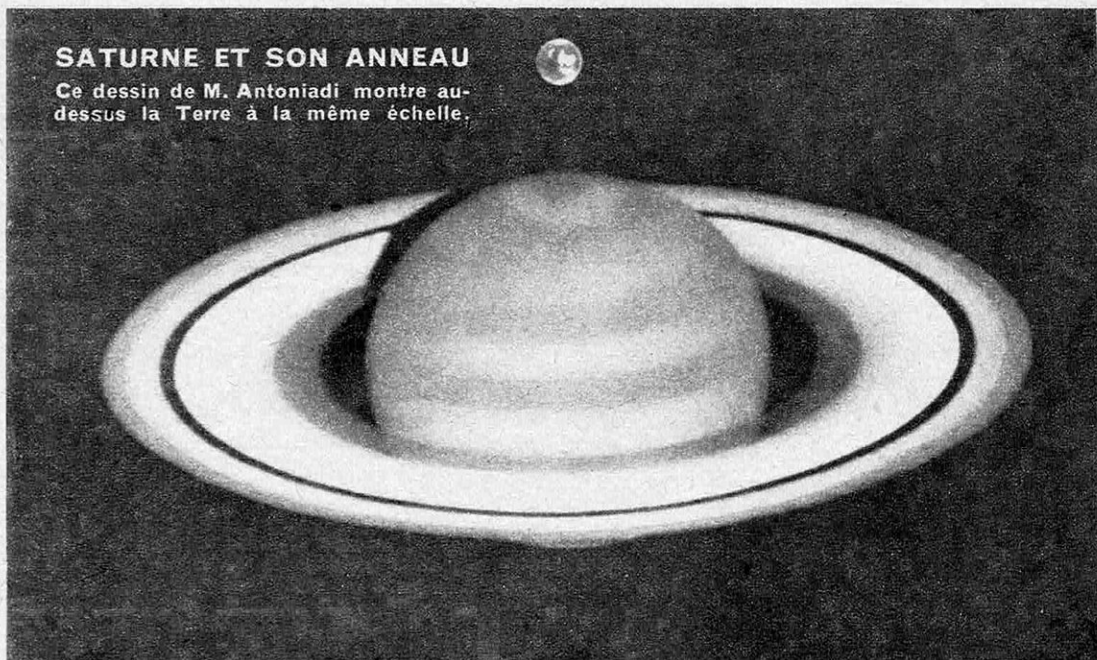
l'anneau interne et l'anneau de crêpe, ou encore anneaux A, B et C. Ils sont circulaires, bien qu'ils apparaissent toujours elliptiques à cause de leur inclinaison sur le rayon visuel. L'anneau externe a un diamètre extérieur de 280 000 km, soit 2,3 fois le diamètre équatorial de la planète. Ainsi, bien qu'il soit situé deux fois plus loin environ, le système de Saturne et de ses anneaux est vu sensiblement sous le même diamètre apparent que Jupiter. L'anneau interne (B) est le plus lumineux ; son bord externe est aussi lumineux que le corps de la planète. Il a un diamètre extérieur de 235 000 km et une largeur de 25 000 km, tandis que la largeur de l'anneau externe est seulement de 15 000 km. Ces deux anneaux paraissent divisés par une région étroite, de 4 500 km, qui porte le nom de « division de Cassini », en souvenir du directeur de l'Observatoire de Paris, qui fut le premier à la signaler. Quant à l'anneau de crêpe, il n'est séparé de l'anneau interne que par une divi-



● Les anneaux de Saturne montrent tantôt leur face nord, tantôt leur face sud. Deux fois par cycle, ils se présentent de profil et sont invisibles parce que leur épaisseur est très faible (probablement pas plus d'une dizaine de km).

## SATURNE ET SON ANNEAU

Ce dessin de M. Antoniadis montre au-dessus la Terre à la même échelle.



sion de 1 500 km et il s'étend jusqu'à une distance de 10 000 km de l'équateur de la planète. Il est difficile à voir ; il se distingue surtout par l'ombre faible qu'il porte sur le disque de Saturne. On a signalé d'autres divisions dans les anneaux A et B, mais elles sont très difficiles à distinguer.

Les anneaux de Saturne sont situés dans le plan de l'équateur ; ils font un angle de 28° environ avec le plan de l'écliptique et conservent la même direction tout le long de l'orbite. Il en résulte que c'est tantôt leur face nord et tantôt leur face sud qui est orientée vers le Soleil et vers la Terre. Deux fois au cours d'un cycle, les anneaux se trouvent dans le plan passant par la Terre : ils se présentent alors de profil et sont invisibles. C'est une preuve que leur épaisseur est très faible, peut-être seulement d'une dizaine de kilomètres. Au

contraire, lorsque les anneaux ont leur inclinaison la plus favorable, ils réfléchissent 1,7 fois plus de lumière que le corps de la planète.

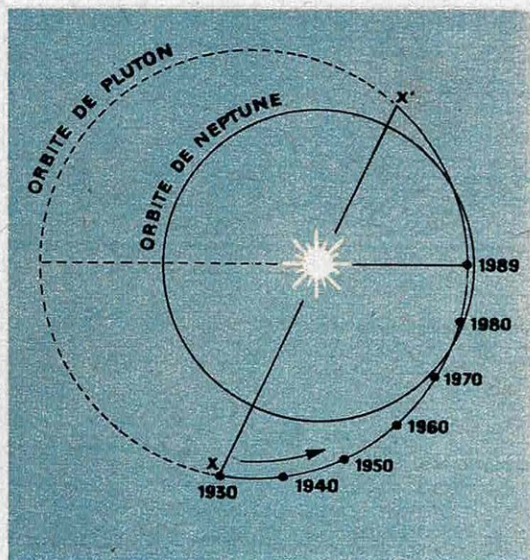
Ce changement d'aspect intrigua beaucoup Galilée et ses successeurs. Lorsque Galilée observa Saturne pour la première fois, avec sa lunette qui n'était pas suffisante pour lui montrer la nature véritable des anneaux, il crut apercevoir deux planètes plus petites, touchant la grande et situées de part et d'autre ; deux ans plus tard, ces planètes disparurent ; elles réapparurent ensuite... En 1655 seulement Huygens reconnut que la planète est entourée d'un anneau.

Quelle est la nature de ces anneaux ? On sait maintenant qu'ils sont formés par une nuée de très petits satellites tournant chacun autour de la planète suivant les lois de la gravitation.

Nous ne voyons pas ces fragments indivi-

## LES SATELLITES DE SATURNE

Noms	Distance (en fonction du rayon de Saturne)	Période de révolution	Diamètre (en km)	Magnitude stellaire	Année de la découverte
Mimas .....	3,1	0 j 22 h 37 mn	640 ?	12,1	1789
Enceladus .....	4,0	1 j 8 h 53 mn	800 ?	11,7	1789
Tethys .....	4,9	1 j 21 h 19 mn	1 300 ?	10,6	1684
Dione .....	6,3	2 j 17 h 41 mn	1 100 ?	10,7	1684
Rhea .....	8,8	4 j 12 h 25 mn	1 700 ?	10,0	1672
Titan .....	20,5	15 j 22 h 41 mn	4 200	8,3	1655
Hyperion .....	24,8	21 j 6 h 38 mn	480 ?	15	1848
Japetus .....	59,7	79 j 7 h 56 mn	16 00 ?	10,8	1671
Phœbe .....	216,8	550 j 10 h 35 mn	320	14	1898



● Les plans des orbites de Neptune et de Pluton se coupent suivant la ligne XX' et font un angle de 17°.

duellement à cause de leurs très petites dimensions et de la grande distance qui nous sépare d'eux. Pendant longtemps on a cru à un anneau solide ou liquide, mais Maxwell montra, par la théorie, en 1857, qu'un tel anneau serait instable et qu'il se fragmenterait sous l'effet des tensions auxquelles il serait soumis. Les observations ont confirmé la nature discontinue des anneaux. On a constaté, d'abord, que les anneaux A et C sont transparents : on a pu, en effet, apercevoir à travers eux, une fois, un des satellites de Saturne, une autre fois une étoile, affaiblis, mais non complètement cachés. D'autre part, des mesures spectroscopiques précises, réalisées par Keeler en 1895, ont démontré que la région interne des anneaux tourne plus vite que la région externe, alors que l'inverse serait vrai qu'il s'agissait d'une surface continue, tournant en bloc. Nous avons déjà vu plusieurs fois comment l'effet Doppler produit un petit déplacement des raies spectrales, dont la mesure permet de déterminer la vitesse de la source par rapport à l'observateur ; le déplacement a lieu vers les grandes ou les petites longueurs d'ondes suivant que la source s'éloigne ou se rapproche. Keeler plaça la fente de son spectroscopie suivant un diamètre de l'image de Saturne, comme le montre la figure page 86 et il trouva que chaque raie spectrale avait la forme dessinée. Le segment A B correspond au corps de la planète dont un bord s'approche de l'observateur, tandis que l'autre s'éloigne. Le segment A B est donc incliné, Les segments a b et c d correspondent aux deux portions de l'anneau, qui, l'une, se rapproche, l'autre, s'éloigne de l'observateur ; ils sont déplacés vers le bleu et vers le rouge respectivement ; mais les déplacements aux bords externes b

et d sont plus petits que pour les bords internes a et c, ce qui prouve que le bord externe tourne moins vite que le bord interne.

La masse totale des anneaux est probablement très faible ; elle ne dépasse peut-être pas la millionième partie de la masse de Saturne.

Saturne n'est pas seulement remarquable par son anneau, mais il présente encore une autre particularité : sa densité moyenne est 0,71, inférieure à celle de l'eau ; c'est la plus faible parmi tous les astres du système solaire. Si nous comparons, par exemple, Saturne à la Terre, son diamètre moyen est 9 fois plus grand, son volume est 750 fois plus grand, mais sa masse est seulement 95 fois plus grande. Il s'agit, comme Jupiter, d'un corps enveloppé d'une épaisse atmosphère opaque. Le spectroscopie montre que cette atmosphère contient, comme celle de Jupiter, de l'ammoniac et du méthane, mais les bandes de l'ammoniac y sont plus faibles et celles du méthane plus intenses.

Le disque de la planète a, en gros, le même aspect que celui de Jupiter, avec des bandes parallèles à l'équateur, mais celles-ci y sont beaucoup moins distinctes. La bande équatoriale est brillante et jaunâtre ; les régions polaires ont une teinte verdâtre, plus sombre.

Saturne a 9 satellites dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau de la page 87. Un seul, Titan, a un diamètre assez grand pour que l'on aperçoive son disque à la lunette. Pour les autres, on évalue approximativement le diamètre d'après l'éclat. Un des satellites, Japetus, est remarquable parce qu'il montre des variations d'éclat qui ont même période que sa révolution ; on en déduit qu'il tourne sur lui-même avec cette même période, donc en dirigeant toujours la même face vers la planète, mais que ses deux faces ont une structure très différente. Quant au satellite le plus lointain, Phoebe, il circule dans le sens rétrograde.

## URANUS ET NEPTUNE

Ces planètes, très semblables, sont les deux dernières, les plus éloignées, du groupe des géantes. Nous avons déjà parlé de la découverte de Neptune par Leverrier ; la planète Uranus, elle, fut découverte fortuitement par Herschel en 1781. Les deux planètes ont environ 4 fois le diamètre de la Terre ; Uranus est un peu plus grosse que Neptune et pourtant cette dernière est la plus massive. Elles sont situées à des distances du Soleil approximativement égales à 20 et 30 unités astronomiques et elles décrivent leurs orbites respectivement en 84 et 165 ans environ.

À cause de leurs très grandes distances, on distingue difficilement quelques détails sur le disque d'Uranus et pratiquement pas sur celui de Neptune. La ressemblance de ces planètes avec Jupiter et Saturne est démontrée, notamment, par la spectroscopie. On retrouve les mêmes bandes que dans les spectres de

Jupiter et de Saturne, mais le caractère déjà signalé pour Saturne se trouve accentué ; les bandes de l'ammoniac sont de plus en plus faibles, celles du méthane de plus en plus fortes. Cette variation accompagne la diminution progressive de la température moyenne (— 135° C pour Jupiter, — 150° pour Saturne, — 180° pour Uranus et moins encore pour Neptune), due à l'éloignement croissant du Soleil.

On l'interprète de la manière suivante : quand la température diminue, la tension de vapeur de l'ammoniac devient plus petite et l'on trouve une quantité de ce gaz de plus en plus faible dans les atmosphères des planètes lointaines ; d'autre part, les cristaux d'ammoniac étant progressivement plus déposés, les nuages et aussi les bandes, si remarquables sur Jupiter, sont de moins en moins nombreux et, par suite, les rayons solaires pénètrent de plus en plus profondément dans l'atmosphère de méthane (et, probablement, d'hydrogène). Dans le cas d'Uranus et de Neptune, les bandes du méthane sont si fortes qu'elles recouvrent presque les régions rouge et jaune de leurs spectres, ce qui explique la coloration verdâtre de ces deux planètes.

C'est par la spectroscopie que l'on a déterminé la période de rotation de ces planètes, faute de détails précis à observer sur leurs disques. La méthode employée est celle que nous avons expliquée à propos de Saturne et de son anneau.

Sur les bords du disque, les raies spectrales sont déplacées d'une quantité dont la mesure donne la vitesse linéaire équatoriale ; connaissant le diamètre des planètes, on en déduit leurs périodes de rotation : 10,7 heures pour Uranus, 15,8 heures pour Neptune. Comme les deux autres planètes géantes, Uranus et Neptune tournent donc

rapidement sur elles-mêmes ; à cause de ce mouvement, elles montrent, elles aussi, un aplatissement très net aux pôles. Ainsi les quatre planètes géantes présentent beaucoup d'analogie entre elles.

Signalons pourtant une particularité d'Uranus : son plan équatorial, qui est aussi le plan dans lequel gravitent ses 5 satellites, est presque perpendiculaire au plan de l'orbite décrite autour du Soleil. Puisque l'angle des deux plans dépasse même un peu 90°, il est logique de considérer le mouvement de rotation d'Uranus comme rétrograde.

Quant à la planète Neptune, elle tourne bien dans le sens direct, mais on a reconnu qu'un au moins de ses deux satellites est animé d'un mouvement rétrograde.

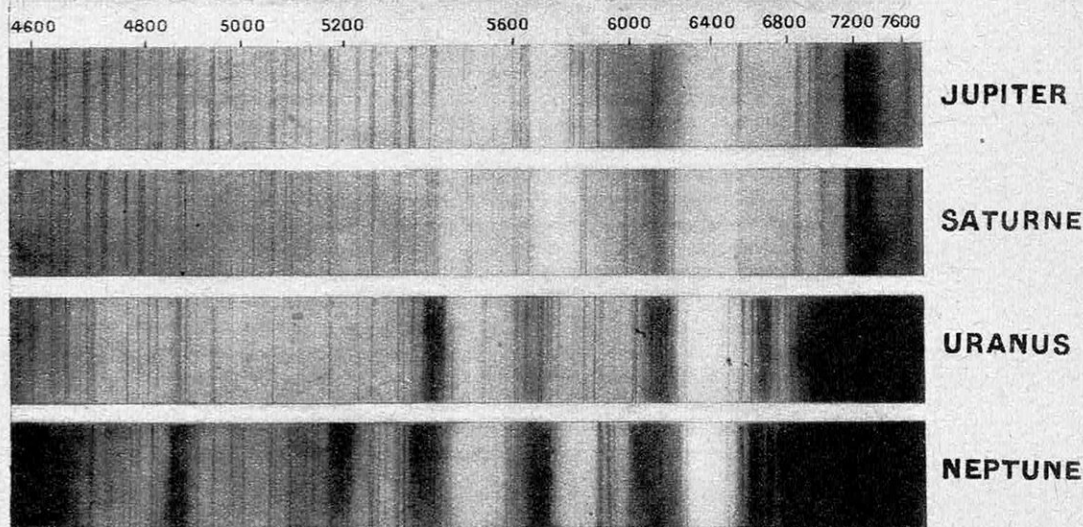
## PLUTON

Nous ne savons que fort peu de choses sur cette planète, dont la découverte remonte seulement à 1930. Elle apparaît, dans une lunette, comme une étoile de magnitude 15, de coloration jaunâtre.

Cette planète est celle dont l'orbite a la plus grande excentricité et fait le plus grand angle avec le plan de l'écliptique. A l'aphélie, sa distance au Soleil est voisine de 50 unités astronomiques, tandis qu'elle est un peu inférieure à 30 unités astronomiques lorsqu'elle passe au périhélie.

Ainsi, lorsqu'il passera au périhélie, vers l'an 1989, Pluton, sera un peu plus proche du Soleil que Neptune ; les orbites des deux planètes se couperaient si elles étaient situées dans le même plan. En fait comme le montre la figure de la page 88, les plans des orbites de Neptune et de Pluton font entre eux un angle de 17°. C'est, nous l'avons vu, d'après les attractions exercées sur les deux autres planètes lointaines, Uranus et Neptune,

## RAIES ET BANDES DANS LES SPECTRES DES GROSSES PLANÈTES



et d'après les perturbations apportées sur leurs orbites que l'on a prévu approximativement la position de Pluton. P. Lowell avait aussi calculé, d'après ces perturbations, la masse de Pluton et obtenu une valeur voisine de 7 fois la masse de la Terre. On a reconnu maintenant que cette valeur est certainement trop grande ; les calculs, qui avaient pour base les perturbations sur l'orbite de Neptune, ne pouvaient pas être précis parce que cette orbite n'est pas encore connue d'une manière exacte, tant que la planète n'a pas effectué une révolution complète depuis sa découverte.

On a montré que la méthode la plus favorable pour évaluer la masse de Pluton consiste à étudier le déplacement de Neptune dans la direction perpendiculaire à son orbite ; à cause de l'angle notable des deux orbites, Pluton a fait sortir Neptune, depuis la découverte de cette planète, du plan moyen de l'orbite d'environ une seconde d'arc ; on en déduit que la masse de Pluton vaut, en gros, 0,8 fois celle de la Terre.

Ainsi Pluton ne ressemble pas aux planètes géantes, mais plutôt aux planètes « terrestres », telles que Mercure, Vénus, la Terre ou Mars. Son seul point de ressemblance avec les planètes géantes est son énorme éloignement du Soleil et sa température très basse, probablement inférieure à  $-200^{\circ}\text{C}$ , qui en est la conséquence.

D'après son éclat, on voit que Pluton a un très faible pouvoir réflecteur, peut être inférieur à celui de la Lune. Il ne s'agit donc pas d'un astre enveloppé d'une atmosphère opaque. La plupart des gaz sont, en effet, liquéfiés ou solidifiés à la température qui règne à la surface de Pluton.

## LA VIE SUR LES PLANÈTES

La question des possibilités de vie sur les planètes se pose tout naturellement comme conclusion de l'étude des planètes. Il y a à peine quelques années on ne pouvait lui donner qu'une réponse très incertaine, ou la part de l'imagination était prépondérante, tandis que les conquêtes récentes de la science permettent maintenant une discussion assez précise.

En présence des conclusions peu favorables à l'existence de la vie sur les planètes, à l'exception de la Terre, certains prétendent que des formes de vie tout à fait différentes de celles que nous connaissons peuvent s'y développer. Mais quand on considère les êtres vivants terrestres, qu'il s'agisse d'animaux ou de plantes, on constate que toutes leurs cellules ont sensiblement la même composition, malgré leur grande diversité de structure ; elles contiennent essentiellement du carbone, de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'azote, et l'on y trouve aussi de faibles quantités de soufre, de phosphore, de potassium, de sodium, de calcium et de quelques autres éléments. Quand on

imagine des formes de vie tout à fait différentes, on peut penser, par exemple, à des cellules où le carbone serait remplacé par le silicium et qui seraient capables de supporter des températures élevées, auxquelles les formes terrestres de vie ne peuvent pas résister. Mais ce point de vue ne paraît pas raisonnable : on trouve partout dans la nature les mêmes éléments et ils obéissent partout aux mêmes lois physiques et chimiques. D'ailleurs, s'il existait des cellules vivantes de composition radicalement différente, pourquoi ne les trouverait-on pas sur la Terre ?

Or, pour les cellules vivantes que nous connaissons, nous savons que certaines conditions sont nécessaires à leur développement. A une température trop basse, nettement inférieure au point de fusion de la glace, il se trouve ralenti. A une température un peu supérieure à  $100^{\circ}\text{C}$ , les cellules sont détruites et nous mettons cette propriété à profit pour anéantir tous germes de vie dans l'autoclave. Une condition plus nécessaire encore semble être la présence d'eau, car c'est elle qui apporte en dissolution aux cellules vivantes les substances qui sont nécessaires à leur croissance.

Si nous considérons maintenant les diverses planètes, les géantes, Jupiter, Saturne, Uranus, et Neptune, sont très froides et leurs atmosphères, chargées de méthane et de gaz ammoniac, sont pestilentielles ; aucune forme de vie ne peut y exister. La plus petite, Mercure, n'a pas d'atmosphère appréciable ; il s'agit d'un astre désert et mort. Finalement, les deux seules planètes sur lesquelles la vie **soit possible**, sont Vénus et Mars. Peut-être, lorsqu'on connaîtra la nature de la substance qui forme les nuages de Vénus, se fera-t-on une opinion plus précise. Pour le moment, il est certain que la température élevée à la surface de Vénus n'est guère favorable à la vie ; d'autre part, nous savons que son atmosphère est très riche en gaz carbonique. On en conclut que, si la vie existe, ce ne peut être que sous une forme végétale très primitive.

Les conditions sur Vénus sont peut-être comparables à celles qui ont régné autrefois sur la Terre, il y a des millions d'années. La décomposition du gaz carbonique par les végétaux ne semble pas y avoir commencé.

Reste enfin Mars ! Son atmosphère est beaucoup moins dense que celle de la Terre et ne contient pratiquement que très peu ou pas d'oxygène et de vapeur d'eau. Les variations de température y sont très grandes. La vie ne peut certainement pas s'y développer avec la richesse et la variété de formes que nous lui connaissons sur la Terre ; elle ne peut y exister que sous un état biologique assez maigre. Peut-être se réduit-elle à la présence de lichens, dont le développement produirait les variations saisonnières de couleur observées à la surface de la planète, bien que ces variations puissent aussi être attribuées à des phénomènes chimiques.





LA COMÈTE DE BROOKS

# COMÈTES ET MÉTÉORES

**C**OMME les planètes, les comètes sont des astres qui parcourent notre système solaire ; elles doivent leur nom, qui signifie « astres chevelus », à leur aspect nébuleux.

Quant aux météores, on les appelle souvent, dans le langage courant, bolides ou étoiles filantes. En réalité, ils n'ont rien à voir avec les étoiles. Ce sont des corpuscules minéraux, de l'ordre du gramme, qui se déplacent rapidement et qui deviennent lumineux par frottement avec notre atmosphère.

## LES COMÈTES

L'apparition d'une comète est, du point de vue astronomique, un spectacle très remarquable.

On distingue généralement, dans ces objets célestes, trois parties : le **noyau**, la **chevelure** et la **queue**.

Le noyau apparaît comme un point brillant, parfois plus lumineux que les plus belles étoiles et visible en plein jour. La chevelure enveloppe le noyau d'une lueur diffuse. Noyau et chevelure forment la **tête**. Quant à la queue, elle est toujours dirigée, non dans la direction opposée à celle du mouvement, mais dans la direction opposée à celle du Soleil. Pour les belles comètes, la tête peut avoir une grosseur com-

parable à celle du Soleil et la longueur de la queue peut dépasser la distance de la Terre au Soleil. La queue de la comète de Halley, en 1910, s'étendait presque à travers tout le ciel visible, d'un horizon à l'autre.

Les grandes comètes spectaculaires sont rares. Par contre, il y a chaque année plusieurs petites comètes, que l'on peut voir ou photographier avec une lunette. En moyenne, pendant ces dernières années, on a observé 5 comètes par an.

On a déterminé avec précision plus de 500



TRAJECTOIRE  
D'UNE COMÈTE

La queue d'une comète est à l'opposé du Soleil, ➡  
recourbée en arrière du mouvement. Son développement atteint son maximum au passage près du Soleil.

## LA COMÈTE DE HALLEY (1910)



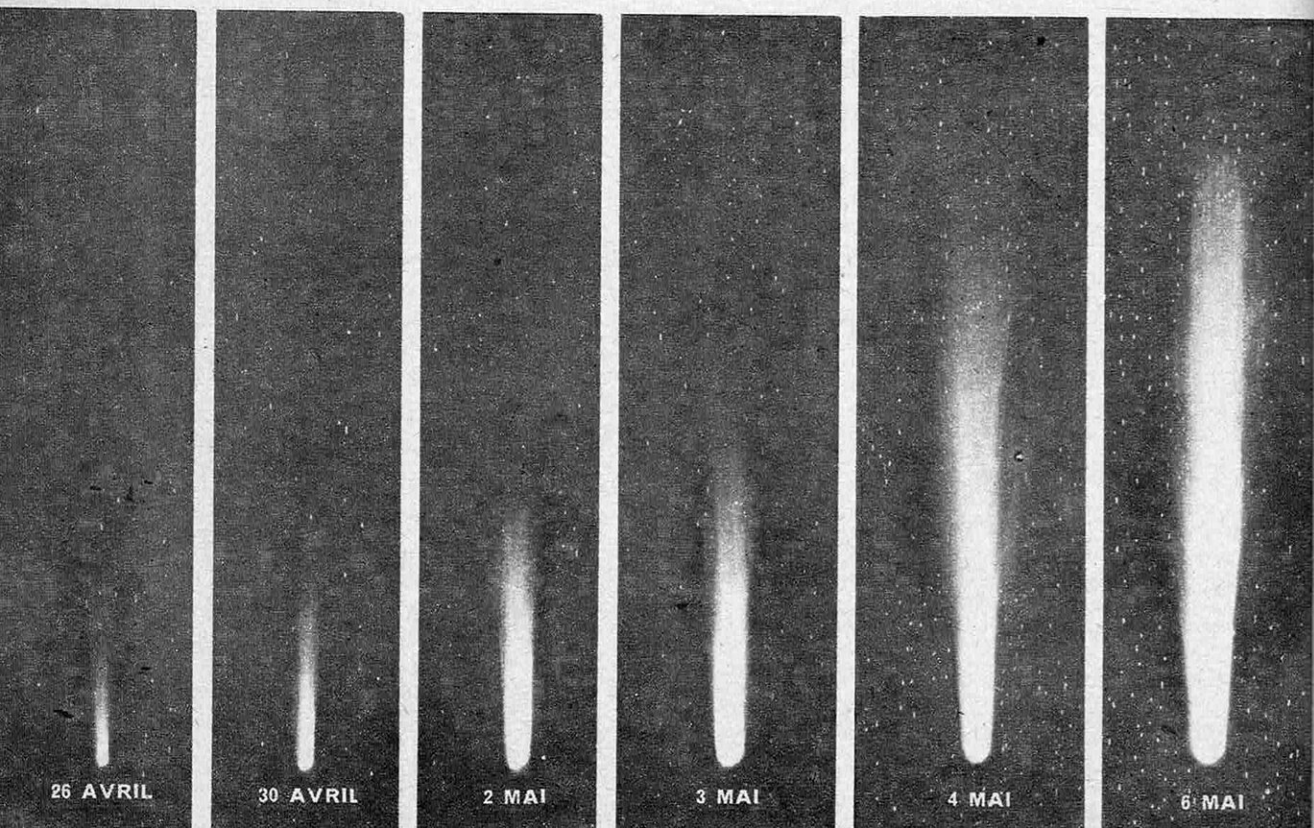
orbites de comètes. Dans 25 % des cas environ, ce sont certainement des ellipses, tandis que dans tous les autres cas on obtient des paraboles ou même, exceptionnellement, des hyperboles. Toutes ces orbites ont le Soleil pour foyer.

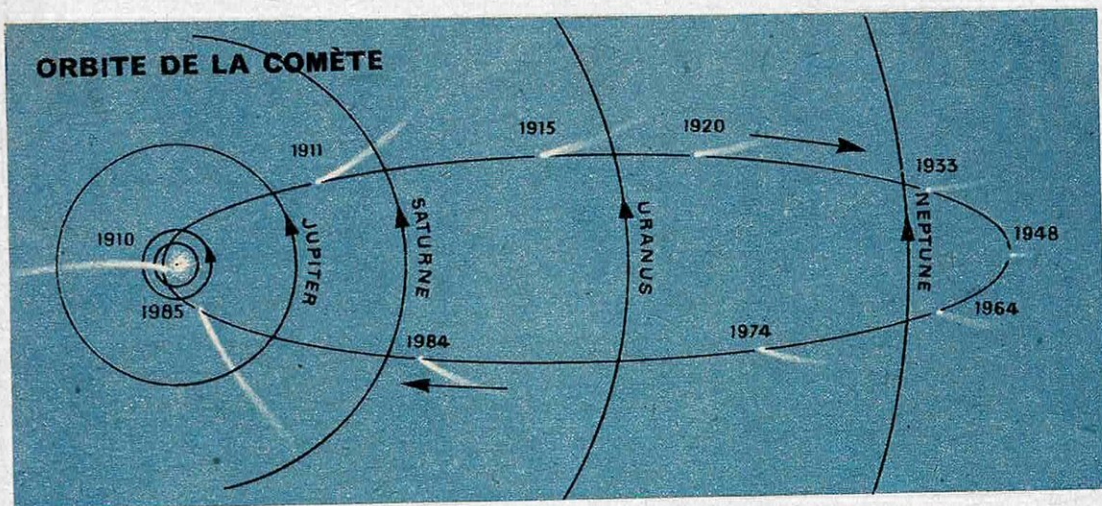
Les comètes dont les orbites sont paraboliques ou hyperboliques disparaissent définitivement. Les autres réapparaissent à intervalles réguliers, ce sont des **comètes périodiques**. On en connaît plus de 100 ; leurs périodes sont comprises entre 3,3 ans et plus de 10 000 ans. La comète dite de Halley, par exemple, est apparue 26 fois au moins, depuis l'an 240 avant J.C. Son retour est prévu pour 1985. La plupart des comètes périodiques ont pour orbites des ellipses très allongées, très différentes donc de celles des planètes, et dont le plan s'écarte notablement de l'écliptique. Pourtant une quarantaine ont des orbites de faible excentricité et voisines de l'écliptique ; elles passent toutes, à l'aphélie, près de l'orbite de Jupiter et l'on admet qu'elles ont été captées par l'action perturbatrice de cette planète.

La lumière des comètes est due, en partie, à la réflexion de la lumière solaire et, pour la part la plus importante, à la luminescence d'un gaz, provoquée également par la lumière solaire.

Il n'est donc pas surprenant de constater que l'éclat et les dimensions des comètes et de leur queue varient avec la distance au Soleil, et que le maximum est atteint au moment où cette distance est minimum.

On admet qu'une comète est formée par un



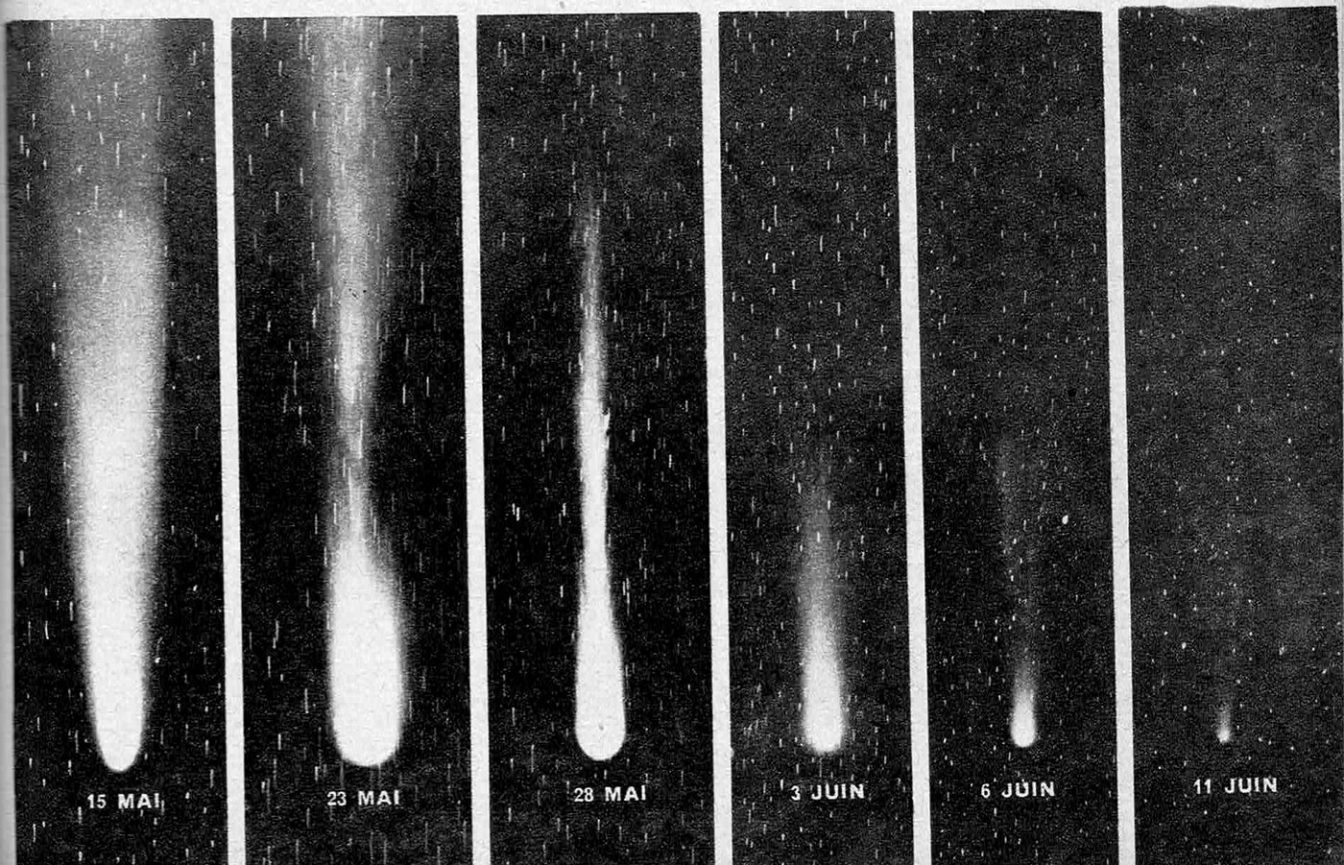


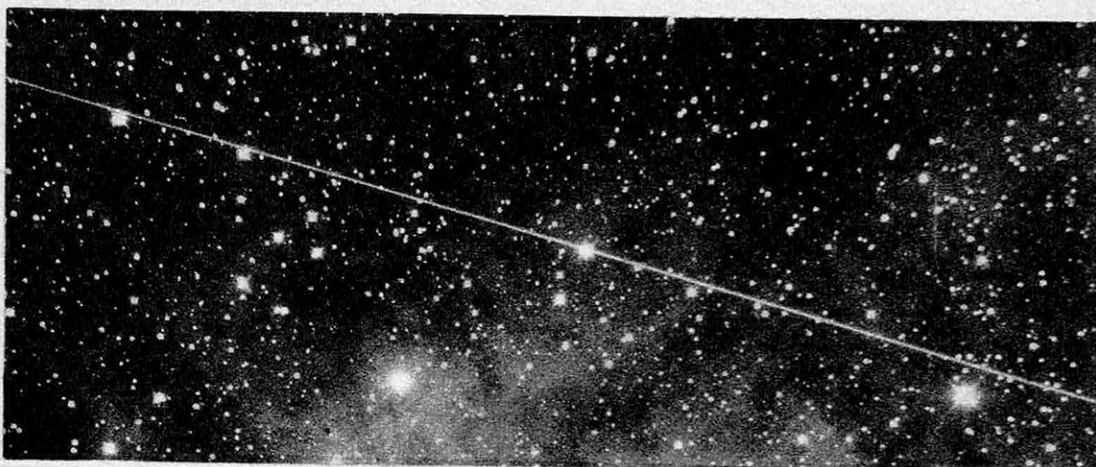
essaim de corps solides relativement petits, maintenus rassemblés par leur attraction mutuelle. Quand cet essaim s'approche du Soleil, des gaz et des poussières s'échappent des morceaux solides et s'illuminent, formant la chevelure et la queue.

La force qui repousse la queue dans la direction opposée au Soleil provient évidemment du Soleil lui-même ; on a ignoré sa nature jusqu'au moment où les physiciens ont montré que la lumière exerce une pression sur les corps qu'elle éclaire (pression de radiation). La très faible densité des comètes est démontrée par plusieurs observations, notamment par la possibilité d'apercevoir des étoiles

brillantes à travers la tête d'une comète. Parfois ces comètes se fragmentent ou disparaissent et peuvent se trouver à l'origine des « pluies d'étoiles filantes ». Un exemple célèbre de dislocation est celui de la comète périodique de Biela. A son retour, en 1846, elle se divisa en deux comètes, qui furent revues en 1852, séparées par environ 2 millions de kilomètres. Plus tard, elles ne réapparurent pas. Mais, en 1872, au moment où, d'après les calculs, la trajectoire de la comète devait sensiblement rencontrer l'orbite de la Terre, on observa une magnifique pluie d'étoiles filantes qui se renouvela en 1885.

Ce sont les attractions opposées du Soleil





● Pendant la longue pose de 3 h 30 nécessaire pour photographier la nébuleuse diffuse dans la constellation de Cassiopée, un météore est passé dans le champ du télescope et a laissé cette traînée sur la plaque (Mont Wilson)

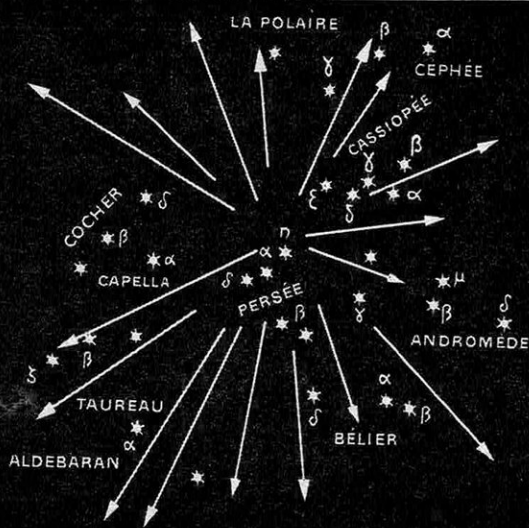
et des grosses planètes qui provoquent cette désagrégation de certaines comètes. Pour d'autres, la perturbation due aux grosses planètes se traduit seulement par une variation de la période de révolution.

La probabilité d'une collision de la Terre avec le noyau d'une comète est extrêmement faible ; quant à la rencontre de la queue ou de la chevelure, c'est un événement qui s'est déjà produit au moins deux fois, par exemple en 1910 dans le cas de la comète de Halley, sans qu'il survienne rien de remarquable sur la Terre ; la queue ou la chevelure d'une comète sont formées en effet de gaz extrêmement raréfiés.

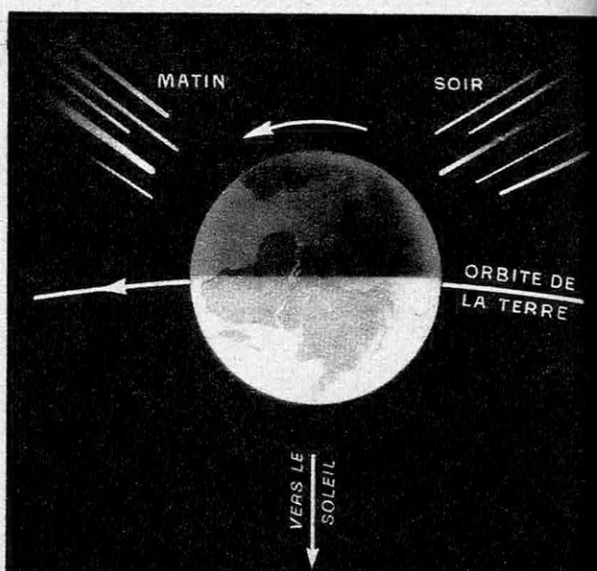
## LES MÉTÉORES

Le langage scientifique a été récemment réformé et le terme « météore » désigne uniquement l'émission de lumière qui accompagne la pénétration de petits corps célestes dans notre atmosphère. On désigne ces corps célestes eux-mêmes sous le nom de « météorites ».

Un observateur qui examine attentivement le ciel nocturne voit, en moyenne, 10 météores par heure. Comme un observateur n'aperçoit que 1/100000 environ des météores apparaissant sur la surface entière de la Terre, on évalue immédiatement que le nombre total



● Vers le début d'août, de nombreuses étoiles filantes semblent émaner de la région de l'étoile Eta Persée, leur « radiant ». C'est l'essaim des Perséides dont l'orbite coïncide avec celle d'une comète (Tuttle 1862).



● A la tombée de la nuit, nous nous trouvons sur le côté de la Terre opposé à son mouvement, et nous ne voyons que les météores qui nous rejoignent ; le matin, sur l'avant, nous en voyons plus.



● Le Météor Crater est une excavation de 1 200 m de diamètre et de 130 m de profondeur au dessous du niveau des terrains environnants, probablement due à la chute d'une météorite géante au cours des temps préhistoriques.

de météores atteignant la Terre par jour est d'une vingtaine de millions. Et le nombre de tout petits météores, visibles seulement dans les lunettes, est beaucoup plus grand encore.

La fréquence des météores est d'ailleurs très variable, en un lieu donné, d'une heure à une autre ou au cours des diverses saisons. Ainsi on voit, en moyenne, deux fois plus de météores vers la fin de la nuit qu'à son début, ce qui s'explique par le mouvement de la Terre sur son orbite. L'altitude du point d'apparition est, en moyenne, de 120 kilomètres ; celle du point de disparition est voisine de 80 kilomètres, mais les grosses météorites peuvent pénétrer beaucoup plus bas.

L'évaluation de la vitesse des météores est très délicate et peu précise. On espère beaucoup, pour l'étude systématique des météores, de l'emploi nouveau et inattendu des méthodes radioélectriques, qui permettent de déceler les météores par n'importe quel temps. Des maintenant on a la certitude qu'une proportion importante des météores sont formés par des corpuscules n'appartenant pas à notre système solaire, leur vitesse par rapport au Soleil dépassant la « vitesse parabolique » (42 km/s comme nous l'avons vu) ; il s'agit de corpuscules qui constituent des nuages de « poussière cosmique », tels que ceux qui obscurcissent certaines régions de la Voie Lactée et que traverse la Terre dans son mouvement à travers l'espace. Tandis que ces derniers météores apparaissent d'une manière tout à fait désordonnée, on constate, fréquemment, qu'au cours d'une nuit ou de plusieurs nuits successives, les trajectoires de nombreux météores paraissent diverger d'un ou de plusieurs points du ciel, appelés **radiants**. En fait, il s'agit de trajectoires parallèles, qu'un effet de perspective fait paraître concourantes. On dit que ces météores appartiennent à un **essaim**. Les plus connus sont les **Perséides**, visibles vers le 10 août, les **Léonides**, vers le 13 novembre, les **Lyrides**, vers le 20 avril.

Ces retours à dates fixes montrent que les

essaims de météores proviennent de corpuscules circulant autour du Soleil sur des trajectoires elliptiques qui passent près de l'orbite de la Terre. Plusieurs de ces trajectoires coïncident avec des orbites de comètes : les Perséides avec la comète Tuttle (1862), les Léonides avec la comète Tempel (1866), etc.

Lorsque les météorites ont une masse assez grande, elles parviennent sans être volatilisées jusqu'au sol. Leur arrivée, tout à fait inopinée et heureusement rare, est souvent accompagnée d'un bruit de tonnerre, qui n'est pas dû à l'éclatement du projectile, mais à l'onde de choc engendrée dans l'air lorsque la vitesse est supérieure à celle du son. Il tombe, en moyenne, 2 000 météorites par an sur la surface entière de la Terre et leur masse moyenne est de 20 kg. Mais la plupart d'entre elles ne sont pas retrouvées ; on n'a guère identifié, à la surface du sol, que 1500 météorites environ. Beaucoup sont formées par un bloc presque pur de fer, avec une faible proportion de nickel ; les autres ont une composition analogue à celle des roches ordinaires (silicates) ; elles sont souvent enveloppées d'une croûte brune, formée par la haute température au cours de leur passage à travers notre atmosphère. La plus grosse météorite connue pèse 60 tonnes ; elle est tombée près de Grootfontein, dans le Sud-Ouest Africain. Mais des météorites plus grosses encore sont tombées sur le sol et s'y sont enfouies. On évalue, par exemple, à quelque 50 000 tonnes la masse de la météorite qui tomba en Sibérie le 30 juin 1908 et dévasta un territoire de 30 kilomètres de rayon. Parfois la météorite se disperse dans sa chute en un très grand nombre de projectiles de faible masse ; ainsi on estime à 100 000 le nombre des bolides tombés à Pultusk, en Pologne, en 1868. Enfin, on attribue à la chute de météorites la formation de certains cratères, analogues à des cirques lunaires, en des régions où une origine volcanique est invraisemblable, par exemple le Meteor Crater, dans l'Arizona.



DANS CET AMAS GLOBULAIRE, DES TEMPS DE POSE CROISSANTS, DE 6, 15, 37,5 ET 94 MINUTES FONT

# LES ÉTOILES

**N**OUS n'avons étudié jusqu'ici que le Soleil et le système solaire, qui n'occupe qu'un espace extrêmement petit par comparaison au vaste univers. Il faut faire un bond énorme pour passer des limites du système solaire aux étoiles les plus proches. Nous ne recevons d'elles qu'une lumière très faible, à peine perceptible ou même tout à fait insensible à l'œil nu pour la majorité d'entre elles ; pourtant, certaines sont des milliers des fois plus lumineuses que le Soleil.

## DISTANCES DES ÉTOILES LES PLUS PROCHES

C'est seulement en 1838 — il y a donc à peine un peu plus de 100 ans — que l'on a réussi à déterminer directement la distance d'une étoile. Le principe de la mesure est le suivant : puisque la Terre décrit autour du Soleil une ellipse dont le grand axe vaut environ 300 millions de kilomètres, les étoiles relativement proches doivent paraître se déplacer au cours d'une année sur la sphère céleste par rapport aux étoiles très lointaines, et décrire une trajectoire apparente elliptique. L'angle sous lequel on voit de la Terre le demi grand axe de cette ellipse est la **parallaxe annuelle** de l'étoile. La figure page 98 montre que cet angle est égal à celui sous lequel un observateur situé sur l'étoile verrait

le rayon moyen de l'orbite terrestre, supposé perpendiculaire au rayon visuel. La parallaxe devient infiniment petite pour les étoiles lointaines ; même pour les étoiles les plus proches, les mesures sont extrêmement délicates, car toutes les parallaxes des étoiles sont inférieures à une seconde d'arc. En 1838, presque simultanément, Struve, Bessel et Henderson parvinrent à mesurer le mouvement parallactique de trois étoiles, Véga, 61 du Cygne et alpha Centaure, et évaluèrent leurs distances. Jusque vers 1900, on ne réussit à mesurer que les parallaxes d'une soixantaine d'étoiles, car les mesures, uniquement visuelles, étaient fort difficiles. Depuis cette date, la seule méthode employée est la méthode photographique, qui est à la fois plus rapide et plus précise ; elle consiste à prendre deux photographies d'une étoile et de la région voisine du ciel, à six mois d'intervalle, puis à comparer la position de l'étoile par rapport à celles de plusieurs des étoiles voisines les plus faibles. On a déterminé ainsi les parallaxes de quelques milliers d'étoiles, d'où l'on déduit aisément, par le calcul, leurs distances.

Pour les astres du système solaire, l'unité astronomique de distance est la distance moyenne de la Terre au Soleil (149 675 000 km). Quand il s'agit des étoiles, les astronomes utilisent le **parsec** et l'**année-lumière**.

APPARAÎTRE DES ÉTOILES DE PLUS EN PLUS FAIBLES, AU TOTAL PLUSIEURS DIZAINES DE MILLIERS.

## LES DOUZE ÉTOILES LES PLUS PROCHE

Etoile	parallaxe	distance en années-lumière	magnitude apparente	magnitude absolue	luminosité (soleil = 1)	classe spectrale	mouvement propre annuel
Proxima du Centaure.....	0,762	4,3	11,3	15,7	0,00004	M 0	3,85
Alpha Centaure { A .....	756	4,3	0,33	4,7	1,0	G 4	3,70
{ B .....	756	4,3	1,70	6,1	0,3	K 1	3,70
Etoile de Barnard .....	543	6,0	9,46	13,1	0,0004	M 5	10,30
Wolf 3 5 9 .....	403	8,1	13,5	16,5	0,00002	M 8	4,67
Lalande 21 185 .....	388	8,4	7,47	10,4	0,005	M 2	4,78
Alpha Grand Chien { A .....	376	8,7	-1,52	1,3	27	A 1	1,32
{ B .....	376	8,7	8,54	11,4	0,002	A 5	1,32
Ross 154 .....	350	9,3	10,5	13,2	0,0004	M 5	0,69
Luy 798-6 .....	328	9,9	12,3	14,9	0,00008	M 6	3,27
Ross 248 .....	314	10,4	12,2	14,7	0,0001	M 6	1,58
Epsilon Eridan .....	303	10,8	-3,75	6,2	0,25	K 2	0,97

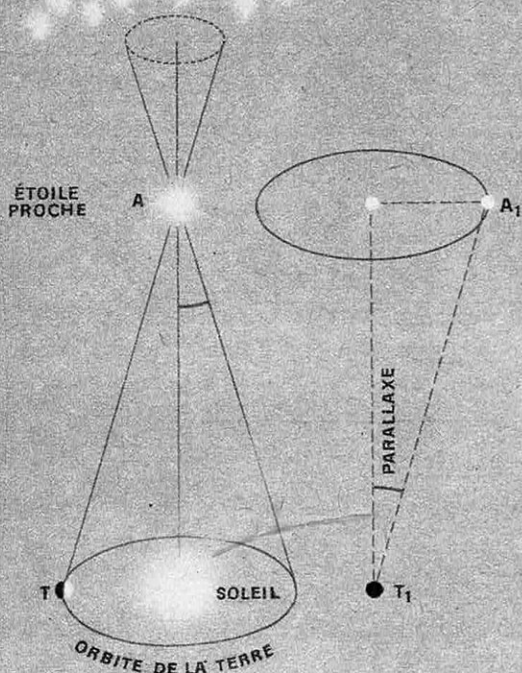
Le **parsec** (abréviation de : parallaxe égale à une seconde) est, par définition, la distance d'une étoile dont la parallaxe serait égale à une seconde d'arc; 1 parsec vaut  $3,087 \times 10^{13}$  km (30 000 milliards de kilomètres). Il suffit de prendre l'inverse de la parallaxe d'une étoile, évaluée en fraction décimale de seconde d'arc, pour obtenir sa distance en parsecs.

L'**année-lumière** est une unité plus familière que le parsec, parce qu'elle fait image : c'est la distance parcourue par la lumière en un an, à la vitesse de 300 000 km/s. On calcule facilement que 1 année-lumière vaut  $9,461 \times 10^{12}$  km (presque 10 000 milliards de kilomètres).

L'étoile la plus proche est Proxima Centaure, à 1,31 parsec, ou plus de 4 années-lumière ;

voisine du pôle céleste sud, elle est invisible dans nos régions. Elle forme un système multiple avec l'étoile alpha Centaure qui est, elle-même, une étoile double et qui a été considérée, jusqu'en 1915, comme l'étoile la plus proche.

La distance qui sépare les étoiles entre elles est tellement grande que nous l'imaginons difficilement. Si l'on traçait une sphère de rayon égal à un parsec il n'y aurait que le système solaire à son intérieur. Faisons une comparaison : représentons le Soleil par une boule d'un centimètre de rayon ; la Terre est alors une très petite boule, presque imperceptible, de 0,2 mm de diamètre, tournant autour du Soleil à une distance de 2 mètres ; la sphère d'un parsec de rayon est alors repré-



sentée par une sphère de plus de 400 km de rayon. Quant au système de alpha et Proxima du Centaure, il serait figuré, à quelque 600 km du Soleil, par deux boules voisines, comparables au Soleil (alpha) et une boule 30 fois plus petite environ (Proxima). Les étoiles sont, on le voit, très clairsemées dans l'espace!

En prenant beaucoup de précautions et de soins, on arrive à réduire l'erreur relative dans la mesure de la parallaxe à moins de 1 % pour les étoiles les plus proches ; mais elle s'élève à 10 % quand la parallaxe est de 0",05 et atteint 50 % pour une parallaxe de 0",01, ce qui signifie que lorsqu'on obtient

## ← PARALLAXE D'UNE ÉTOILE PROCHE

Quand la Terre parcourt son orbite, l'étoile semble décrire une ellipse par rapport aux étoiles lointaines. La parallaxe annuelle permet de calculer sa distance.

pour la distance d'une étoile une valeur de 100 parsecs, on peut seulement affirmer que la distance est comprise entre 67 et 200 parsecs. Les mesures trigonométriques perdent la toute précision. Nous verrons que les astronomes ont imaginé des méthodes indirectes pour évaluer les distances des étoiles, notamment par des mesures spectroscopiques ou par l'étude de certaines étoiles variables (Céphéides).

## COULEURS, TEMPÉRATURES ET SPECTRES

Les étoiles, lorsqu'on les compare entre elles à l'œil nu ou au moyen d'une lunette, accusent de nettes différences de coloration. Certaines, comme Rigel, sont nettement bleues, tandis que d'autres, comme Aldébaran ou Antares, sont rougeâtres. Cette diversité provient de la différence des températures superficielles, l'intensité relative des diverses radiations émises variant avec cette température (page 38). L'étude de la répartition de l'énergie dans le spectre d'une étoile permet donc d'évaluer la température de sa surface. Les valeurs trouvées varient entre 2 500° K pour les étoiles rouges et 30 000 à 50 000° K pour les étoiles bleues. (La lettre K désigne les températures comptées à partir du zéro absolu, — 273° C).

Puisque les plaques photographiques ordinaires sont insensibles à la lumière rouge et sont, au contraire, plus sensibles que l'œil à la lumière bleue ou violette, les étoiles rouges doivent paraître plus faibles, par comparaison aux autres étoiles, sur les photographies qu'elles ne le sont visuellement.

## PRINCIPAUX TYPES DE SPECTRES D'ÉTOILES

ε ORION

B0

SIRIUS

A0

δ Jumeaux

F0

CAPELLA

G0

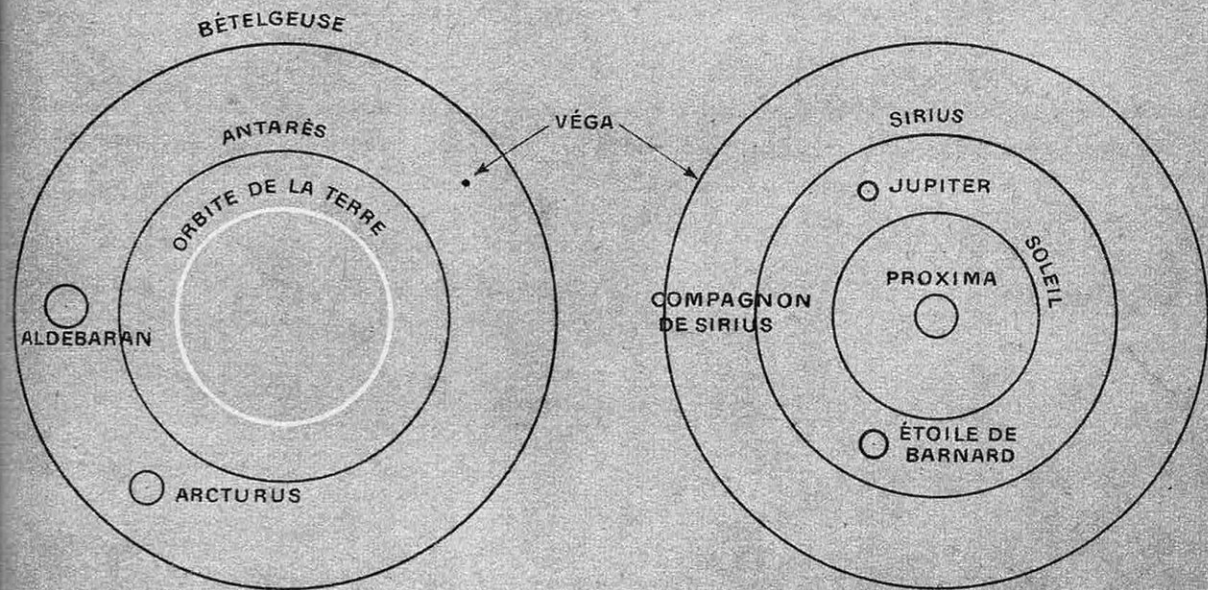
ARCTURUS

K0

BÉTELGEUSE

M0





**Le Soleil est une étoile de dimensions modestes, comparée aux géantes comme Aldébaran dont le diamètre est 35 fois plus grand et le volume 40 000 fois supérieur. Une supergéante du Cocher pourrait contenir l'orbite de Saturne. Au contraire, Proxima du Centaure, une étoile naine rouge, a des dimensions 30 fois plus petites, et le Compagnon de Sirius, une naine blanche très dense a un diamètre qui ne dépasse pas quatre fois celui du globe terrestre.**

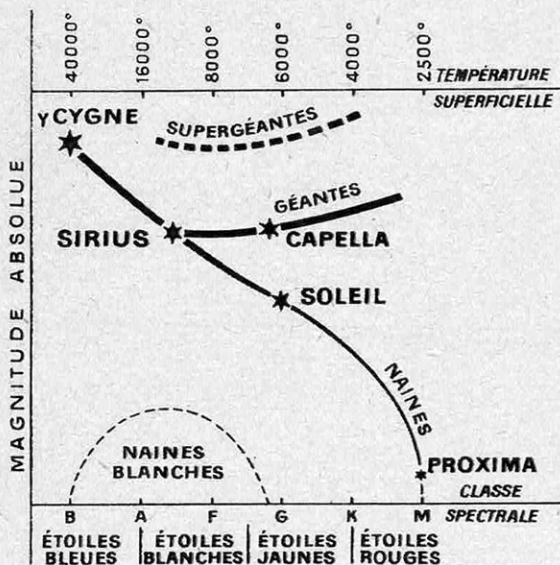
C'est ce que l'on constate. En règle générale, les **magnitudes visuelles** et les **magnitudes photographiques** ne concordent pas ; les échelles de ces magnitudes ont été choisies de façon qu'elles coïncident pour les étoiles blanches, comme Sirius ; pour les autres, il existe un écart, appelé « indice de couleur », qui dépasse 2 magnitudes pour les étoiles rouges. La détermination de cet indice de couleur est souvent employée pour obtenir une indication sur la température des étoiles.

On dispose d'une autre méthode encore pour connaître les températures ; elle repose sur la comparaison des intensités relatives de fines raies sombres, dites raies de Fraunhofer, qui sillonnent leurs spectres continus, comme celui du Soleil, et qui sont dues à l'absorption de la lumière par les atomes ou molécules présents dans les atmosphères des étoiles. Cette étude spectrale a conduit à des résultats remarquables et a permis notamment de diviser les étoiles en **classes spectrales**. En effet, bien que les spectres stellaires présentent une grande variété de détails, on constate, nous allons le voir, une variation progressive de certains caractères. Les classes sont désignées arbitrairement par des lettres majuscules, qui sont, dans l'ordre, B A F G K M ; il y a de plus, dans chaque classe, des subdivisions que l'on exprime par des chiffres de 0 à 9. La classification actuellement adoptée est le résultat d'un travail considérable, au cours duquel l'ordre des lettres et leur choix ont été plusieurs fois changés ; elle repose sur la comparaison des spectres de 225 000 étoiles, tant de l'hémisphère nord que de l'hémisphère austral,

soit pratiquement toutes les étoiles jusqu'aux magnitudes 8 ou 9. On a reconnu maintenant le caractère remarquable suivant : **la classe spectrale d'une étoile dépend essentiellement de sa température superficielle**. Ainsi, tandis que les anciens astronomes croyaient faussement que l'intensité relative des raies dépend de l'abondance des éléments et qu'il y avait des étoiles à hélium, des étoiles à hydrogène ou des étoiles à métaux, on sait aujourd'hui que les variations des spectres indiquent des variations de température — et, à un degré moindre, des variations de pression — plutôt qu'une différence de constitution chimique. La raison en est que, par exemple, les raies de l'hydrogène ne sont intenses que lorsque les atomes d'hydrogène sont portés à des conditions physiques telles qu'ils produisent une forte absorption ; et ce résultat n'est atteint que lorsque la température est suffisamment élevée. En règle générale, la température décroît progressivement de la classe B à la classe M, tandis que le nombre de raies d'absorption augmente.

**Classe B** : étoiles bleues, température superficielle de l'ordre de 30 000° ; les raies, peu nombreuses, appartiennent à l'hydrogène et à l'hélium. Les raies métalliques sont faibles ou absentes parce que, à cause de la température élevée, les métaux s'ionisent et ne pourraient donner des raies intenses que dans la région ultraviolette lointaine, non observable. Exemples : Rigel, les trois étoiles du Baudrier d'Orion, Spica ou l'Épi.

**Classe A** : Etoiles blanches, températures superficielles de 16 000 à 20 000°. Le spectre est caractérisé par les raies de l'hydrogène,



● Le diagramme de Russell traduit une relation remarquable entre luminosité et classe spectrale des étoiles.

larges et diffuses, qui forment une série présente dans la plupart des spectres stellaires, où l'espacement des raies décroît en même temps que la longueur d'onde. Exemples : Sirius, Véga, Castor.

**Classe F** : Étoiles d'un blanc jaunâtre, température de l'ordre de 10 000°. Les raies de l'hydrogène sont moins intenses que dans la classe A et les raies métalliques commencent à apparaître ; les plus intenses sont les deux raies ultraviolettes du calcium ionisé, qui, suivant la nomenclature de Fraunhofer employée pour la spectroscopie solaire, sont désignées par les lettres H et K. Exemples : Procyon, Canope.

**Classe G** : Étoiles jaunes, température voisine de 7 000°. Le Soleil appartient à cette classe. Les raies métalliques sont très nombreuses : certaines, notamment H et K, dépassent nettement en intensité les raies de l'hydrogène. Exemples : le Soleil, Capella.

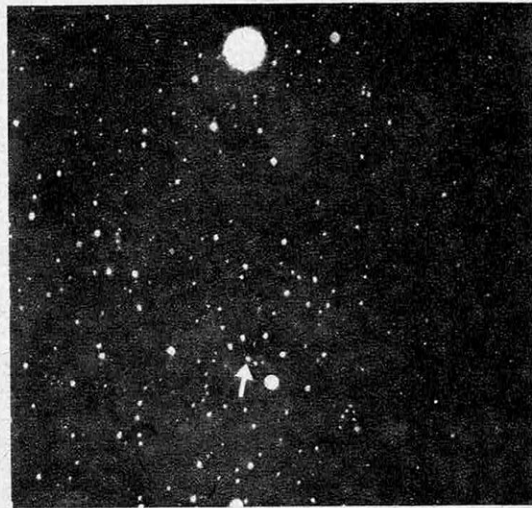
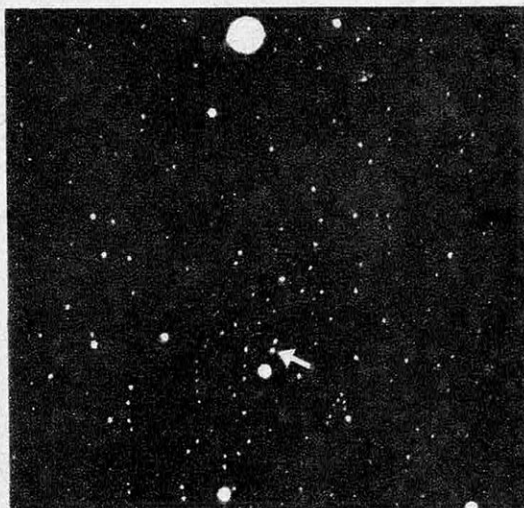
**Classe K** : Couleur jaune ou jaune orangé. Température de l'ordre de 4 000°. Le spectre est analogue à celui de la classe G, mais les raies dues aux métaux neutres croissent en intensité par rapport à celles des métaux ionisés. Quelques bandes caractéristiques de molécules non dissociées en atomes commencent à paraître. Exemples : Arcturus, Aldébaran.

**Classe M** : Étoiles rouges. Température de 3 000° environ. Le spectre a une apparence cannelée, due à la présence de nombreuses bandes d'absorption. L'extrémité violette du spectre est très faible. Exemples : Bételgeuse, Antares.

Un petit nombre d'étoiles ne se rangent pas dans les classes précédentes. On les rattache à une classe O, qui correspond à une température encore plus élevée que la classe B ou, au contraire, à des classes spéciales N, R ou S, caractérisées par des bandes particulières, analogues à celles de la classe M.

Quelques étoiles montrent, superposées au spectre continu, des raies brillantes ou **raies d'émission**, au lieu des raies sombres habituelles. Ce sont, le plus souvent, les raies de l'hydrogène. On trouve de telles raies parmi les étoiles les plus chaudes et parmi les plus froides, tandis qu'elles sont exceptionnelles dans les classes intermédiaires.

Jusque vers 1930, l'étude photographique des spectres stellaires s'est bornée, presque exclusivement, à celle des régions bleue et violette, auxquelles les plaques ordinaires sont sensibles. Les remarquables progrès qui ont étendu la sensibilité des émulsions photo-



● L'étoile de Barnard, de magnitude 9, à une distance de 6 années-lumière, est celle qui effectue les déplacements les plus rapides sur la sphère céleste. Les deux flèches indiquent les positions à un intervalle de 22 ans.



● Les constellations changent lentement de forme. On voit ci-dessus la disposition de la Grande Ourse, telle qu'elle se présente aujourd'hui, telle qu'elle apparaissait il y a 100 000 ans et telle qu'elle sera dans 100 000 ans.

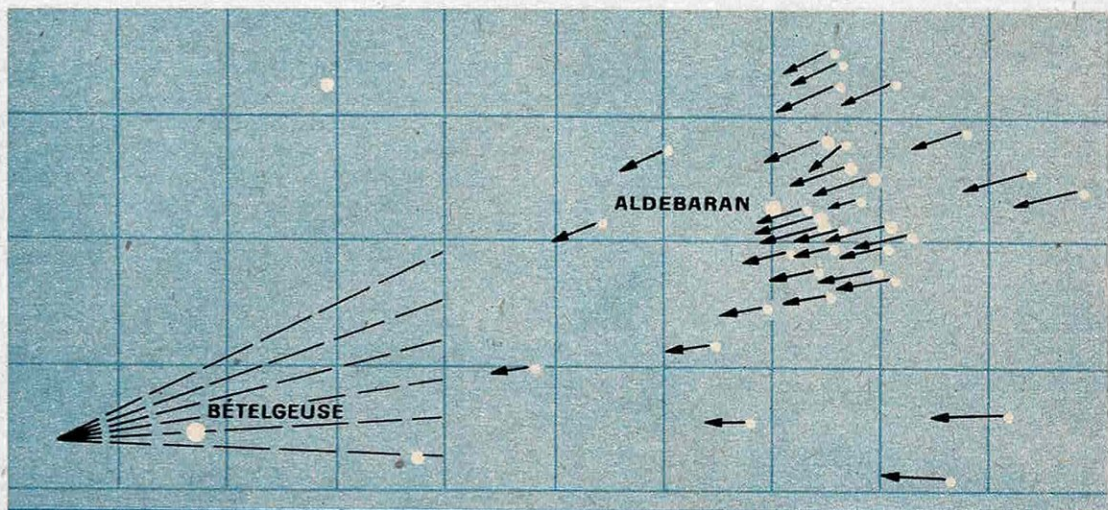
graphiques jusque dans le rouge et l'infrarouge ont permis d'entreprendre l'étude de ces régions spectrales.

Il serait faux, avons-nous dit, de déduire qu'un élément est prédominant dans l'atmosphère d'une étoile parce que ses raies spectrales y sont intenses ; néanmoins, l'intensité de ces raies dépend, en partie, de l'abondance de l'élément correspondant. Par une analyse précise des spectres stellaires, on parvient à évaluer les proportions relatives des divers éléments. L'emploi de ces méthodes est encore trop récent et l'on n'a pas encore abouti à des résultats définitifs. Deux faits importants se dégagent cependant :

d'une part, on ne trouve dans les étoiles, comme dans le Soleil, que les éléments connus sur la Terre ; d'autre part, l'hydrogène est, de loin, l'élément le plus abondant ; il forme, dans la majorité des étoiles, 80 % environ de tous les atomes.

Pour le moment, on n'a aucune raison de penser que la composition des étoiles puisse varier notablement de l'une à l'autre ; elle serait donc sensiblement la même que celle du Soleil.

Il semble exister quelques écarts, mais ils sont à peu près limités à quelques étoiles très chaudes (de la classe O) et aux étoiles très froides (classes M, N, R ou S).



● Dans la constellation du Taureau, une quarantaine d'étoiles formant un courant stellaire s'éloignent de nous animées d'un mouvement parallèle. Elles semblent ainsi converger vers Bételgeuse.

## MAGNITUDES ABSOLUES

Nous constatons, par des exemples tels que celui de Proxima du Centaure, que les étoiles les plus proches ne sont pas les plus brillantes. En effet, la magnitude apparente des étoiles dépend à la fois de leur intensité lumineuse et de leur distance. Pour comparer entre elles les intensités lumineuses des étoiles, les astronomes évaluent leurs **magnitudes absolues** : c'est la magnitude qu'aurait chaque étoile si elle était à une distance toujours la même, arbitrairement choisie égale à 10 parsecs (ou 32,6 années-lumière).

On trouve ainsi + 4,85 pour la magnitude absolue du Soleil. Cela signifie que s'il se trouvait à une distance de 10 parsecs, il serait tout juste visible à l'œil nu, comme une étoile très faible. Au contraire, plusieurs des étoiles les plus brillantes se trouvent à des distances supérieures à 10 parsecs ; on en conclut qu'elles sont beaucoup plus lumineuses que le Soleil (voir tableau page 107). Puisque la magnitude absolue du Soleil dépasse de 10 unités environ celle de l'étoile Rigel (bêta Orion), c'est que le Soleil est 10 000 fois moins lumineux que Rigel. Mais la magnitude absolue du Soleil est elle-même inférieure de 10 unités encore à celle de Proxima du Centaure ; le Soleil est donc 10 000 fois plus lumineux que cette étoile. On a même découvert une étoile dont la magnitude absolue est + 19 ; cette étoile est donc à peu près 1 million de fois moins lumineuse que le Soleil.

En conclusion, nous voyons que les étoiles présentent entre elles de très grandes diffé-

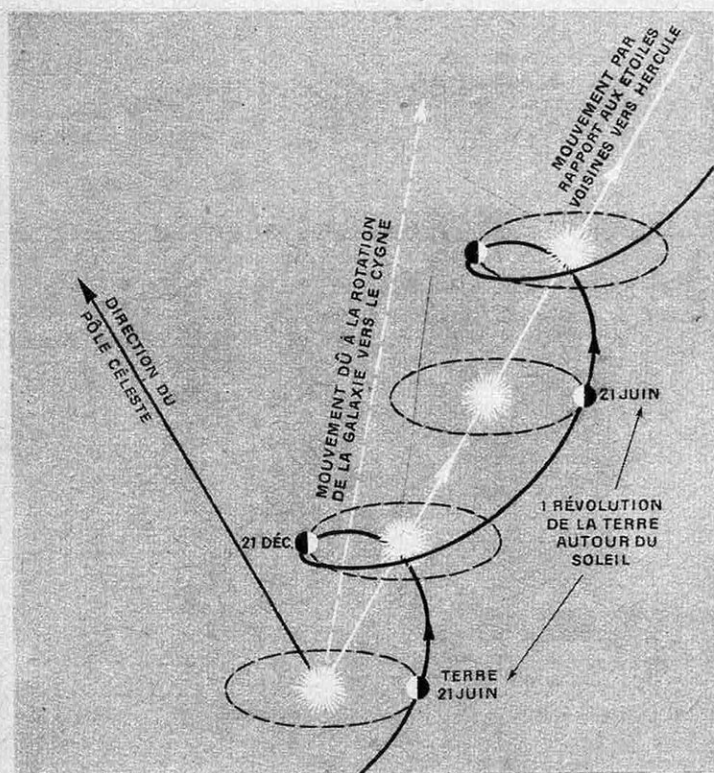
rences d'intensité et que certaines sont au moins un milliard de fois plus lumineuses que d'autres.

## NAINES ET GÉANTES

Malgré cette grande diversité, on constate une propriété très remarquable : les luminosités des étoiles ne sont pas réparties au hasard. En effet, si nous considérons toutes les étoiles dont nous connaissons la magnitude absolue, et si nous représentons la variation de cette grandeur en fonction de la classe spectrale, dans l'ordre B A F G K M des températures décroissantes, nous obtenons une figure, bien connue des astronomes, et qu'ils désignent sous le nom de **diagramme de Russell**, du nom de l'astronome américain qui a eu, le premier, l'idée de cette représentation. A chaque étoile correspond un point ; or, la majorité des points se placent sur une bande étroite, qui traverse à peu près la figure en diagonale et à laquelle on donne le nom de **branche principale**.

Un nombre relativement faible d'étoiles se situent au voisinage d'une deuxième branche, pour laquelle la magnitude absolue est sensiblement la même entre les classes F et M. Cette branche rejoint la première vers le point qui correspond à l'étoile Sirius, de la classe A 0. Puisque ces étoiles sont plus lumineuses que celles, de même classe, de la série principale, on leur donne le nom de **géantes**, tandis que les étoiles de la série principale, du moins celles des classes F à M, sont souvent appelées, par opposition, les **naines**. Le Soleil, qui appartient à la branche principale et se trouve à peu près au milieu du diagramme, doit être considéré comme une étoile jaune naine. L'étoile Capella, qui est de la même classe G 0 que le Soleil, mais sur la branche des géantes, est 100 fois plus lumineuse que lui. L'écart entre géantes et naines est surtout marqué pour les étoiles de faible température : par exemple le rapport des luminosités entre les étoiles naines M 0, comme Proxima du Centaure, et les géantes rouges de la même classe atteint un million.

Quelques étoiles, enfin, ont des caractères qui ne correspondent ni à la branche principale, ni à celle des géantes. Ce sont, d'une part, des étoiles qui sont nettement plus lumineuses encore que les géantes (40 à 50 fois plus) et auxquelles on donne le nom de **supergéantes** (exemples : Antares ou alpha Scorpion, de la classe M 0, Rigel ou bêta Orion, de la classe B 8) ; et, d'autre part, les astres que l'on appelle les **naines blanches**, sur lesquels nous reviendrons et dont la propriété la plus singulière est certainement celle d'avoir une densité moyenne bien supé-



## ← MOUVEMENT DU SOLEIL ET DE LA TERRE

La Terre décrit une spirale car le Soleil se déplace vers l'apex à 20 km/s. En outre, la rotation générale de la Galaxie entraîne le soleil à 280 km/s vers le Cygne.

## MOUVEMENT D'ENSEMBLE DES ÉTOILES

Elles semblent venir d'un point de la sphère céleste (apex) et converger au point opposé. C'est une illusion d'optique due à ce que le Soleil lui-même va vers l'apex.

rière à celle des corps les plus denses que nous connaissons, puisqu'elle dépasse largement 1 000 fois la densité de l'eau.

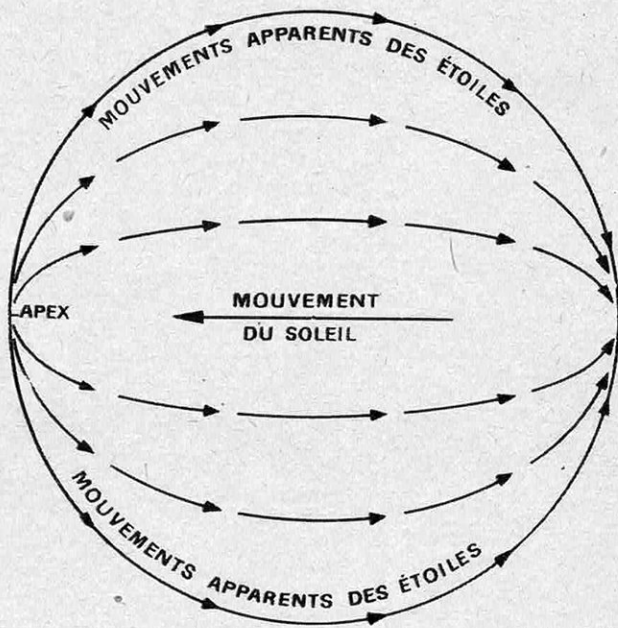
La luminosité d'une étoile dépend essentiellement de deux facteurs : sa température superficielle et sa surface. Puisque deux étoiles, l'une géante, l'autre naine, de même classe spectrale, ont sensiblement la même température superficielle, mais des magnitudes absolues très différentes, il faut qu'elles aient des dimensions très différentes. Quand on connaît la magnitude absolue d'une étoile et sa température, les lois de la physique permettent d'évaluer son diamètre. Or le calcul donne des diamètres énormes pour les étoiles géantes rouges et de petits diamètres pour les naines rouges. On voit donc qu'elles portent bien leurs noms.

Précisons par quelques exemples : prenons d'abord des étoiles de la branche des géantes. Capella ou alpha Cocher, de la classe G 0 comme le Soleil, Arcturus ou alpha Bouvier, de la classe K 0, Aldébaran ou alpha Taureau, de la classe K 5, ont respectivement des diamètres 16, 22 et 35 fois supérieurs à celui du Soleil (donc des volumes comme les cubes de ces nombres, soit 4 000, 10 000 et 40 000 fois environ celui du Soleil). Quant aux supergéantes, elles ont des dimensions encore plus grandes ; ainsi Antarès, ou alpha Scorpion, a un diamètre qui vaut 390 fois celui du Soleil (ou un volume 60 millions de fois plus grand) et l'orbite de la Terre autour du Soleil tiendrait largement à son intérieur. On a même découvert qu'une étoile, epsilon Cocher, a un diamètre 2 000 fois supérieur à celui du Soleil, donc supérieur à celui des orbites de Jupiter et de Saturne. Au contraire, les naines rouges ont des dimensions plus petites que le Soleil, 30 fois plus faibles environ dans le cas de Proxima. Mais les étoiles ayant les plus petites dimensions sont les naines blanches, comme, par exemple, le compagnon de Sirius, dont le diamètre ne dépasse pas 4 fois celui de la Terre.

Les étoiles naines, jaunes et rouges, sont de beaucoup les plus nombreuses ; mais les géantes sont bien plus lumineuses que les naines et forment la majorité des étoiles visibles à l'œil nu.

## MESURE DES DISTANCES PAR SPECTROSCOPIE

En étudiant attentivement les spectres de deux étoiles naines et géantes appartenant à la même classe spectrale, on s'est aperçu qu'ils n'ont pas l'exacte identité que leur classification devrait, semble-t-il, entraîner.

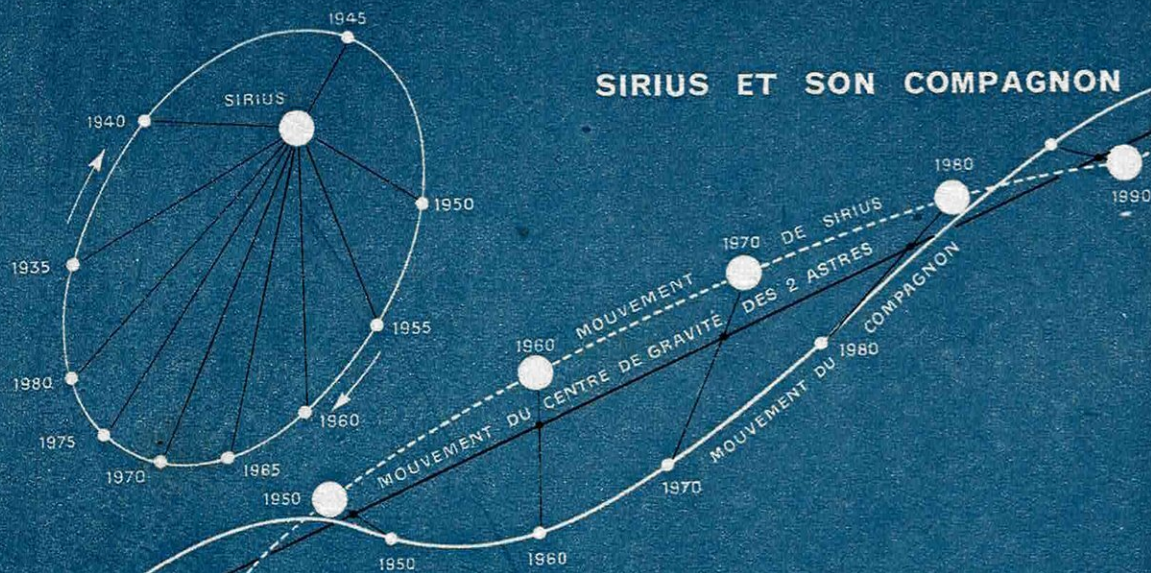


Prenons comme exemple le Soleil, qui est une étoile naine de la classe G 0, et l'étoile zéta Capricorne, de la même classe, mais qui est une supergéante 600 fois plus lumineuse et à diamètre 80 fois plus grand ; les deux spectres montrent une identité presque parfaite, à une exception près : certaines raies, notamment celles dues à l'élément strontium, sont bien plus intenses dans la supergéante que dans la naine.

Le rapport d'intensité de certaines raies spectrales donne donc un moyen pour apprécier la magnitude absolue des étoiles. En étudiant ce rapport pour les étoiles dont la distance a été déjà mesurée par la méthode trigonométrique, les astronomes ont constaté qu'il varie graduellement en fonction de la magnitude absolue des étoiles, c'est-à-dire en fonction de leur intensité lumineuse. C'est à partir de la relation ainsi obtenue qu'ils évaluent maintenant la magnitude absolue ; en comparant ensuite cette magnitude absolue et la magnitude apparente, ils peuvent évaluer la distance. C'est la méthode habituellement employée pour les étoiles lointaines dont on ne peut mesurer directement la parallaxe ; elle a été utilisée pour plusieurs milliers d'étoiles. Il est à remarquer qu'elle donne la distance des étoiles avec une erreur relative probable de 15 % environ, quelle que soit la distance, tandis que, dans le cas des mesures trigonométriques, c'est l'erreur absolue sur la parallaxe qui reste constante, voisine de 0",005. Ainsi les deux méthodes ont sensiblement la même précision quand la distance à évaluer est voisine de 30 parsecs ; pour les étoiles plus proches, la méthode trigonométrique est la meilleure, et pour les étoiles plus lointaines, c'est la méthode spectroscopique. Malheureusement, l'emploi de cette dernière est encore limité aux étoiles dont la distance n'est pas trop grande, puisqu'elle exige que l'on obtienne un spectre assez détaillé.

Le fait que les étoiles naines et géantes

## SIRIUS ET SON COMPAGNON



La figure montre les mouvements des deux étoiles par rapport aux étoiles voisines, et aussi celui du centre de gravité du système. L'ellipse représente le mouvement du Compagnon autour de Sirius (période 50 ans).

appartenant à une même classe spectrale n'ont pas exactement le même spectre est dû principalement à la différence des densités. Une haute température peut compenser une forte densité, mais la compensation n'est pas la même pour toutes les raies spectrales ou tous les éléments.

### MOUVEMENTS PROPRES DES ÉTOILES

Un des caractères qui distinguent les étoiles des planètes est qu'elles sont à peu près fixes sur la sphère céleste, tandis que les planètes changent de position. En réalité, les prétendues « étoiles fixes » se déplacent elles aussi dans l'espace, avec des vitesses comparables à celles des planètes ; mais, à cause des distances énormes qui les séparent de nous, leurs déplacements angulaires sont faibles. Ils peuvent devenir notables pour de longs intervalles de temps ; par exemple, on a reconnu que les quatre étoiles brillantes Sirius, Bételgeuse, Aldébaran et Arcturus se sont éloignées des positions indiquées par Ptolémée d'une quantité comparable au diamètre apparent de la Lune.

On étudie les mouvements propres ou mouvements apparents sur la sphère céleste par photographie. C'est parmi les étoiles proches que l'on trouve les plus grands déplacements. Le plus grand qui ait été observé est celui de l'étoile de Barnard, dont la distance est de 5,96 années-lumière ; son mouvement propre atteint  $10",2$  par an, de sorte qu'en 180 ans l'étoile se déplace sur la sphère céleste d'un angle égal au diamètre apparent de la Lune. Si toutes les étoiles se déplaçaient

aussi rapidement et au hasard, la forme des constellations se modifierait d'une manière appréciable au cours de la vie d'un homme. Mais tel n'est pas le cas. On ne connaît pas 50 étoiles dont le mouvement propre dépasse  $2"$ , par an et 1 200 pour lesquelles il soit supérieur à  $0",5$  par an.

L'étude des mouvements propres révèle parfois que certaines étoiles, voisines sur la sphère céleste par un effet de perspective, sont, en fait, voisines dans l'espace ou, au contraire, se trouvent à de grandes distances les unes des autres. Par exemple, les deux étoiles les plus proches que l'on connaisse, Proxima et alpha Centaure, ont des mouvements propres très sensiblement égaux et parallèles ; on pense que ces deux étoiles forment, malgré leur éloignement relativement grand, un véritable système physique (triple, car alpha Centaure est, elle-même, une étoile double). Prenons un autre cas : considérons les étoiles de la Grande Ourse. Pour mettre en évidence leurs mouvements propres, nous avons présenté, sur la figure page 101, la forme actuelle de la constellation et sa variation en  $\pm 100\,000$  ans ; on voit nettement que, sur les 7 étoiles principales, 5 se déplacent dans le même sens, et la mesure des parallaxes montre que ces étoiles sont effectivement assez voisines dans l'espace ; les deux autres ont un mouvement tout différent, elles n'appartiennent pas au même **courant stellaire**.

On connaît de la sorte plusieurs groupes d'étoiles animées d'un mouvement parallèle. Nous citerons le groupe du Taureau, qui comprend la plupart des Hyades. Il forme un amas d'une quarantaine d'étoiles, voisines

les unes des autres, à une distance moyenne de la Terre égale à 136 années-lumière. Toutes ces étoiles s'éloignent de nous, de sorte que les directions de leurs mouvements propres convergent en un point voisin de Bételgeuse, où elles paraîtront rassemblées dans quelques millions d'années.

Du mouvement propre annuel d'une étoile et de sa distance on peut déduire sa vitesse tangentielle ; la mesure du déplacement des raies dans le spectre donne la vitesse radiale. Par composition de ces deux vitesses, on obtient la vitesse réelle dans l'espace. Les vitesses des étoiles sont de l'ordre d'une cinquantaine de kilomètres par seconde. Certaines étoiles sont plus rapides ; par exemple, Arcturus a une vitesse de 135 km/s.

## LE MOUVEMENT DU SOLEIL

Puisque le Soleil est une étoile, il est probable qu'il a, lui-même, un mouvement comme les autres étoiles. On ne peut le définir que par le rapport à un repère supposé fixe. Ce repère n'est évidemment pas absolu. En pratique, on considère le mouvement du Soleil sous un double aspect :

a) mouvement par rapport aux étoiles voisines : Le Soleil et les étoiles relativement voisines, par exemple celles situées à une distance inférieure à un millier de parsecs, forment un essaim et on étudie le mouvement particulier du Soleil par rapport à cet essaim, sans tenir compte du déplacement global de l'essaim. On montre ainsi que, par rapport aux étoiles voisines, le Soleil se déplace, à la vitesse de 20 km/s environ, vers un point appelé l'**apex** qui se trouve près de l'étoile  $\mu$  de la constellation d'Hercule ;

b) entraînement du Soleil dans la rotation de la Galaxie : la vitesse du Soleil dans ce mouvement atteint 280 km/s.

Nous nous occuperons plus loin de la rotation de la galaxie. Pour le moment, nous nous bornons au premier aspect du problème. L'analyse des mouvements propres des étoiles montre que, dans leur ensemble, elles divergent d'un point de la sphère céleste (apex) et convergent au point opposé ; l'étude

des vitesses radiales met en évidence d'autre part un rapprochement général des étoiles dans la région de l'apex et un éloignement vers le point opposé. C'est par ces deux méthodes différentes et concordantes que l'on a déterminé la vitesse du mouvement du Soleil et sa direction.

Le Soleil se déplace donc, par rapport à l'ensemble des étoiles voisines, à la vitesse de 20 km/s, soit 72 000 km/h, en entraînant avec lui tout son cortège de planètes. En un an, le déplacement vaut 4 fois la distance de la Terre au Soleil. Pour parcourir une distance d'une année-lumière, il lui faudrait 16 000 ans !

## LES ÉTOILES DOUBLES

Une étoile double est formée, comme son nom l'indique, par un système de deux étoiles, que la lunette montre très proches l'une de l'autre.

Il s'agit parfois seulement d'un **couple optique**, c'est-à-dire d'un ensemble de deux étoiles qui paraissent rapprochées par un effet de perspective ; ces couples n'offrent pas d'intérêt particulier. Dans la majorité des cas, les deux étoiles forment un véritable **système physique** ; elles sont attachées l'une à l'autre par la force d'attraction de Newton, comme le sont la Terre et la Lune, ou le Soleil et les planètes.

Le nombre des étoiles doubles est très grand. On pense qu'en moyenne une étoile sur quatre est double. On connaît aussi des systèmes formés de 3, 4, 5 et même 6 étoiles, qui tournent les unes autour des autres. On désigne, d'habitude, la composante la plus brillante par la lettre A, l'autre par la lettre B. Ainsi Sirius A et B forment le système double de Sirius, qui apparaît à l'œil comme une étoile simple. Sirius B est parfois appelé le Compagnon de Sirius. Sa découverte présente un intérêt spécial, car son existence fut démontrée avant que l'on ait réussi à le voir. En effet, on avait noté que Sirius n'a pas un mouvement propre uniforme, comme la plupart des étoiles, mais un mouvement sinueux, que l'on attribua à la présence d'un compagnon obscur. Il a été réellement observé pour la première fois

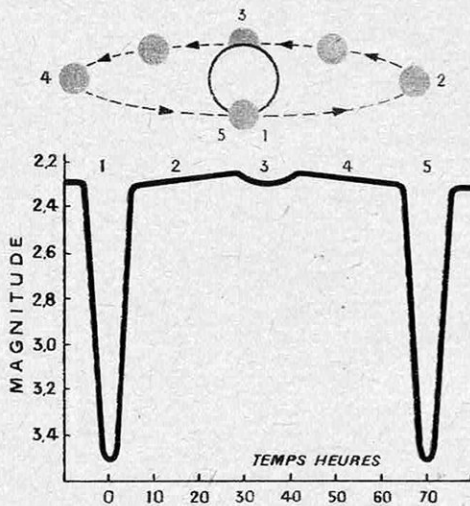
### ENTRE 1908 ET 1920, LE SYSTEME DOUBLE KRUEGER 60 A FAIT LE QUART D'UNE RÉVOLUTION



en 1862. Rappelons que Sirius B est une naine blanche.

On n'a la certitude qu'il s'agit d'un couple physique que lorsqu'on a étudié le mouvement d'une composante par rapport à l'autre par des mesures répétées de la distance angulaire entre les deux composantes et de la direction de la droite qui les joint sur la sphère céleste. De longues observations sont nécessaires, car le mouvement est généralement très lent ; les périodes de révolution sont de plusieurs années, fréquemment supérieures à 100 ans. Quand on dispose d'un assez grand nombre d'observations, on trace l'**orbite apparente** d'une composante autour de l'autre et, par des méthodes que nous n'exposerons pas ici, on passe à l'orbite réelle. Parfois celle-ci est presque circulaire ; le plus souvent elle est très allongée. On trouve souvent pour le grand axe des valeurs comparables aux distances des dernières planètes externes du système solaire.

Les étoiles doubles dont les composantes peuvent être vues et étudiées comme nous venons de le dire sont appelées **étoiles doubles visuelles**. Il existe probablement aussi un grand nombre d'étoiles doubles trop serrées, dont les lunettes ne peuvent pas séparer les composantes. Effectivement, on a découvert des étoiles doubles, dites **doubles spectroscopiques**, dont le caractère n'est révélé que par l'analyse spectrale qui montre la superposition de deux spectres distincts. Ces deux spectres sont décalés, en règle générale, l'un par rapport à l'autre, car sur certaines portions de l'orbite une composante s'appro-



● L'étoile Algol a deux composantes dont la courbe de lumière traduit les éclipses mutuelles.

che vers nous et plus tard s'éloigne (effet Doppler). On étudie le mouvement en traçant la **courbe de vitesse**, dans laquelle on porte en abscisses le temps et en ordonnées la vitesse radiale, déduite du déplacement des raies. Lorsque la courbe de vitesse est une sinusoïde, l'orbite est un cercle ; pour une orbite elliptique, la forme de la courbe de vitesse n'est plus symétrique et permet de déterminer les éléments de l'orbite et son orientation.

Un autre cas intéressant est celui où l'orbite d'un couple d'étoiles se présente de profil ou presque ; une des composantes moins lumineuse cache l'autre au cours de leur révolution. On dit alors que ce sont des **étoiles doubles à éclipses**. L'exemple le plus connu est celui de l'étoile Algol dont les variations lumineuses ont été découvertes en 1783, mais dont le nom, qui signifie « le démon », paraît indiquer que ces variations étaient connues depuis déjà longtemps par les Arabes.

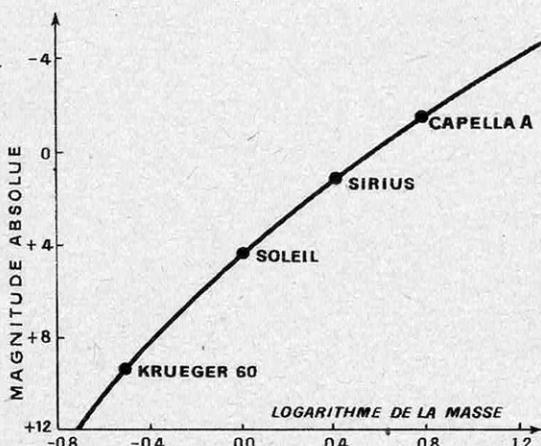
On connaît maintenant plusieurs centaines d'étoiles doubles à éclipses. Dans de nombreux cas, la magnitude continue à varier en dehors des moments correspondant aux éclipses, probablement parce que les étoiles n'ont pas une forme sphérique mais sont déformées en ellipsoïdes, notamment sous l'effet de la force d'attraction qu'elles exercent l'une sur l'autre.

## LA MASSE DES ÉTOILES

L'intérêt principal que présente l'étude des étoiles doubles est la détermination des masses des composantes. En effet, quand on connaît le grand axe de l'orbite, on peut évaluer la somme des masses des deux composantes, par application de la loi de Newton. Si, de plus, on a mesuré le mouvement du couple par rapport aux étoiles voisines, on obtient une autre relation entre les masses et, par suite, la valeur de chacune d'elles.

Cette méthode est, en général, la seule qui permette de calculer **directement** les masses des étoiles. En fait, la détermination n'est possible que pour un faible nombre d'étoiles (500 environ).

En examinant les résultats ainsi obtenus, l'astronome anglais Eddington a découvert



## ◀ RELATION MASSE - MAGNITUDE ABSOLUE

On notera que l'on a porté en abscisses le logarithme de la masse, celle du Soleil étant prise pour unité



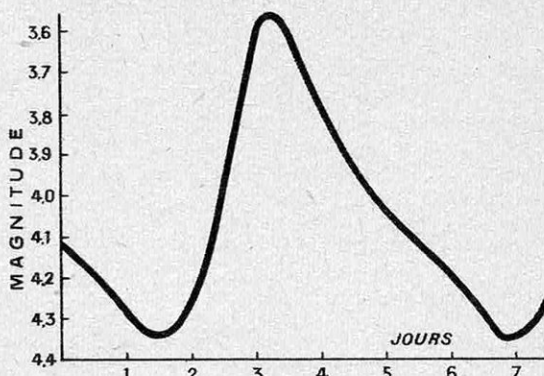
## COURBE DE LUMIÈRE D'UNE CÉPHÉIDE ➔

La magnitude varie régulièrement, en même temps que la couleur : l'étoile rougit à son éclat minimum.

(en 1924) une propriété remarquable : la **magnitude absolue des étoiles varie régulièrement en fonction de leur masse**. La courbe tracée page 106 représente une formule théorique établie en admettant que la matière formant les étoiles se comporte comme un gaz parfait, (c'est-à-dire qui obéit aux lois dites de Mariotte et de Gay-Lussac sur la compressibilité et la dilatation).

Cette hypothèse surprenante avait été adoptée par Eddington dans le cas des étoiles géantes rouges, pour lesquelles elle semble légitime, à cause de la très faible densité moyenne de ces astres. Mais ce fut une surprise de constater que la relation s'applique indistinctement à toutes les étoiles, naines ou géantes — à l'exception des naines blanches —, même à celles qui ont une densité moyenne supérieure à celle de l'eau. Il faut en conclure que l'hypothèse d'Eddington est vraie aussi pour les étoiles denses, ce qui semble tout à fait extraordinaire. Nous verrons plus loin l'explication de cette propriété, due aux très hautes températures qui règnent à l'intérieur des étoiles.

La relation entre la masse et la luminosité est donc pratiquement indépendante de la température ou du spectre de l'étoile. Ainsi, lorsque deux étoiles ont la même intensité lumineuse, elles ont sensiblement la même masse, même si leurs types spectraux sont différents. En rapprochant la relation en question et le diagramme de Russell, qui lie la magnitude absolue au type spectral, il est évident que les étoiles géantes ont une grande masse, tandis que la masse décroît régulièrement quand on passe, dans la branche principale, des étoiles bleues aux étoiles rouges.



On a constaté que la relation d'Eddington s'applique à tous les couples d'étoiles doubles, dont on a déterminé les masses par les méthodes décrites ci-dessus. Les astronomes généralisent et admettent que cette relation est vraie pour toutes les étoiles, à l'exception toujours des naines blanches, et évaluent ainsi la masse de la plupart des étoiles.

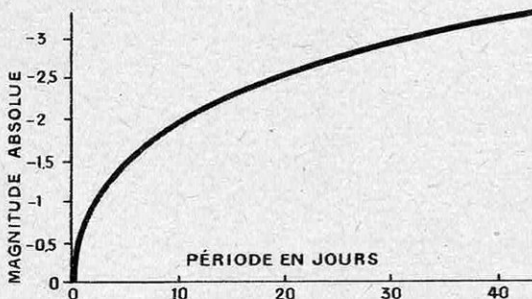
Cette évaluation montre que **la grande majorité des étoiles ont une masse du même ordre de grandeur que le Soleil**, pour préciser comprise entre 1/5 et 5 fois la masse du Soleil. Il en résulte que les étoiles géantes rouges, ayant un très grand volume, ont une densité très faible. Par exemple, la densité moyenne de l'étoile Antarès (alpha Scorpion) est 20 000 fois plus petite que la densité de l'air ordinaire; une telle densité correspond à ce que l'on considérerait, au laboratoire, déjà comme un « bon vide ». Les plus fortes densités, qui atteignent probablement 100 000 fois celles de l'eau, sont celles des naines blanches (qui, rappelons-le, n'obéissent pas à la relation entre la masse et la luminosité).

## LES ÉTOILES VARIABLES

On appelle étoiles variables celles dont l'éclat présente des variations ; très souvent il se produit, en même temps, une variation

## CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES ÉTOILES TYPIQUES

Nom de l'étoile	classe spectrale	magnitude absolue	luminosité (Soleil = 1)	masse (Soleil = 1)	diamètre (Soleil = 1)	densité moyenne (par rapport à l'eau)
<b>1° Étoiles géantes</b>						
Antarès .....	M 0	- 3,2	1660	15	390	0,0000002
Aldébaran .....	K 5	- 0,2	105	4	72	0,00001
Arcturus .....	K 0	- 0,1	96	4	30	0,0001
<b>2° Étoiles de la série principale</b>						
Véga .....	A 0	+ 0,60	50	3	2,6	0,3
Sirius A .....	A 0	+ 1,27	27	2,4	1,9	0,4
Alpha Centaure A .....	G 0	+ 4,73	1,12	1,1	1,3	0,7
Soleil .....	G 0	+ 4,85	1	1	1	1,4
61 du Cygne .....	K 7	+ 8,2		0,5	0,7	2,0
Krueger 60 A .....	M 3	+ 11,8	0,0005	0,25	0,2	50
<b>3° Naines blanches</b>						
Sirius B .....	F	+ 11,2	0,003	1	0,02	30 000



● La relation période-magnitude absolue des Céphéides sert à évaluer les distances des amas très lointains.

de la température et de la classe spectrale. Le changement d'éclat est particulièrement remarquable dans le cas des **novae** ou étoiles temporaires, dont nous parlerons plus loin. Actuellement on compte plus de 15 000 étoiles variables, et ce nombre croît continuellement. Chose remarquable, presque toutes les étoiles variables sont des géantes.

On distingue, parmi les étoiles variables proprement dites (c'est-à-dire celles qui ne sont ni des novae, ni des étoiles doubles à éclipses), celles dont les variations sont **irrégulières** ou **périodiques**. Ce dernier cas est le plus fréquent. Si l'on classe les étoiles variables périodiques d'après leurs périodes, on constate qu'elles se séparent assez nettement en 3 groupes, pour lesquels la période a une valeur voisine d'un demi-jour, d'une semaine et de 280 jours.

Celles du premier groupe sont appelées **variables du type des amas**, parce qu'elles sont particulièrement nombreuses dans les amas globulaires d'étoiles, bien qu'on les trouve aussi dispersées dans le ciel ; elles sont toutes invisibles à l'œil nu.

Au deuxième groupe on a donné le nom de **Céphéides**, d'après celui de l'étoile type delta Céphée, dont la magnitude varie régulièrement de 0,7 unités en 5,37 jours. L'augmentation d'éclat est, en règle générale, plus rapide que la décroissance.

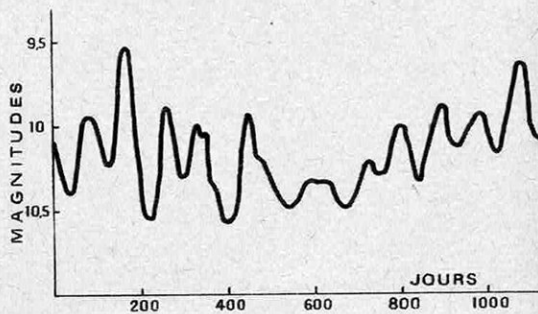
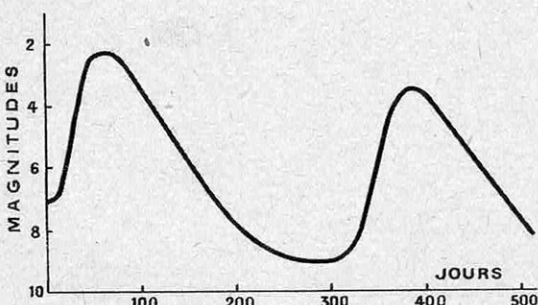
Pendant longtemps on a cru que les Céphéides étaient des étoiles doubles spectro-

scopiques ; les raies de leurs spectres montrent, en effet, un déplacement périodique, lié aux variations d'éclat. Mais cette interprétation conduisait, entre autres absurdités, à une orbite si petite que le « compagnon » supposé se trouvait à l'intérieur de l'étoile principale. On admet maintenant qu'il s'agit d'**étoiles pulsantes**, c'est-à-dire d'étoiles qui subissent des expansions et des contractions périodiques ; le déplacement des raies du spectre correspond à un mouvement d'approche ou de recul de la surface de l'étoile. L'expansion et la contraction sont accompagnées d'une variation de la température et, par suite, de l'intensité lumineuse. La cause de ces mouvements d'expansion et de contraction est encore inconnue.

Une astronome américaine, miss Leavitt, a découvert, en 1910, une loi surprenante ; en étudiant les Céphéides contenues dans le Petit Nuage de Magellan (qui forme, nous le rappellerons plus loin, un nuage isolé d'étoiles près du pôle céleste sud), elle trouva que les plus brillantes sont celles qui ont la plus grande période, ou, de manière plus précise, que leur éclat moyen croît régulièrement en fonction de la période. Or toutes les étoiles contenues dans le Nuage sont pratiquement à la même distance de nous, de sorte que la propriété observée peut s'exprimer par une relation entre la magnitude absolue et la période (figure ci-dessus).

Cette courbe est très utile pour **déterminer la distance d'un objet céleste dans lequel se trouvent des Céphéides**. En effet, si dans un amas lointain d'étoiles, dont on ne peut pas évaluer la distance par les méthodes habituelles, on décèle une Céphéide, il est relativement facile d'obtenir sa période. De la relation précédente, on déduit la magnitude absolue ; puis, d'après la magnitude apparente, la distance de l'amas.

Arrivons maintenant aux étoiles variables dont la période est de l'ordre de quelques centaines de jours. On les appelle les **variables à longue période**. Il s'agit d'étoiles géantes rouges, principalement de la classe spectrale M. La plus connue est Mira Ceti (c'est-à-dire : la Merveilleuse de la Baleine) dont la période vaut, en moyenne, 330 jours, mais peut varier



● Courbes de lumière d'une étoile variable à longue période (Mira Ceti de la constellation de la Baleine, période moyenne 330 jours, différences d'éclat dans le rapport de 1 à 250) et d'une étoile variable irrégulière (R.S. Girafe).

● On voit sur ces photographies l'expansion progressive d'une enveloppe gazeuse autour d'une nova. Il s'agit de Nova Aquilae 1918, photographiée les 20 juillet 1922, 3 septembre 1926 et 14 août 1931 (Obs. du Mont Wilson).

entre 320 et 370 jours. On retrouve un caractère analogue chez beaucoup de variables de ce type. De même, les éclats maximum et minimum varient légèrement d'une période à l'autre. Entre un maximum et un minimum, la différence est beaucoup plus marquée que dans le cas des Céphéides. Pour Mira Ceti, l'intensité lumineuse varie dans le rapport de 1 à 250 environ. La cause de la variation d'éclat de ces étoiles n'est pas connue : ce sont, peut-être, comme les Céphéides, des étoiles pulsantes, bien que la théorie des pulsations ne puisse expliquer tous leurs caractères.

Parmi les étoiles variables irrégulières, nous nous contenterons de signaler comme exemple Bételgeuse (ou alpha Orion).

## LES NOVAE

L'apparition de novae ou étoiles nouvelles a été maintes fois signalée dans l'antiquité ou au moyen âge. On a conservé cette désignation bien que l'on sache maintenant qu'il ne s'agit pas réellement d'étoiles nouvelles, mais d'étoiles qui subissent une augmentation considérable et presque subite d'éclat, suivie d'une diminution plus lente et irrégulière. Pour toutes les novae qui ont été observées depuis le début de ce siècle, l'examen de plaques photographiques anciennes a montré, en effet, qu'avant leurs explosions, elles étaient de faibles étoiles, dont aucun caractère particulier ne semblait devoir attirer l'attention.

Une des novae les plus remarquables fut, sans doute, celle qui brilla en novembre 1572 dans la constellation de Cassiopée et qui fut observée par le célèbre astronome danois Tycho Brahe ; elle atteignit un éclat qui dépassait celui de Vénus et elle fut visible en plein jour ; puis elle diminua d'intensité et, faute de lunettes, elle disparut aux regards en 1574.

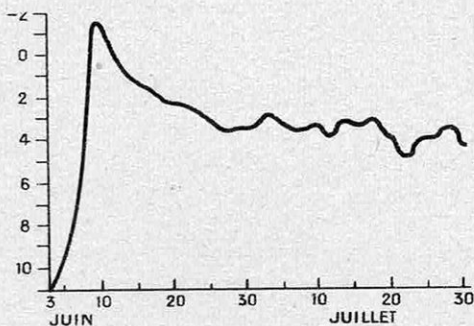
Pour préciser les

idées, nous allons examiner le cas d'une nova moins spectaculaire, mais dont la courbe de lumière est connue avec précision, par exemple Nova Aquilae 1918.

La nova qui brilla au mois de juin 1918 dans la constellation de l'Aigle était, avant son explosion, une étoile faible, de magnitude 10 ou 11, qui montrait de petites variations irrégulières d'intensité. En l'espace de 5 jours, son éclat devint 60 000 fois plus grand ; l'étoile était alors la plus brillante de tout l'hémisphère nord. Puis elle commença très vite à diminuer et vers la fin de l'année la magnitude tomba à 6. Maintenant l'étoile est redevenue aussi faible qu'autrefois.

Quelle est la cause d'un tel feu d'artifice ? Nous ne la connaissons pas encore avec précision. Il semble naturel de penser que l'extraordinaire et éphémère renforcement d'éclat est dû à quelque explosion qui se produit au sein de l'étoile.

Nous citerons, comme première preuve, les variations spectrales qui accompagnent toujours l'émission de lumière, bien qu'il n'y ait pas deux novae qui se comportent exactement de la même manière. Juste avant son maximum d'éclat, Nova Aquilae 1918 avait un spectre du type A, mais dont les raies d'absorption étaient fortement déplacées vers le violet. Ce déplacement doit être interprété, par l'effet Doppler, comme dû à un rapide mouvement vers l'avant des couches absorbantes de gaz situées de notre côté. Immédiatement après le maximum d'éclat, le spectre changea brusquement : des raies d'émission, très larges, se montrèrent à côté des raies d'absorption et le déplacement de ces dernières vers le violet indiquait une vitesse d'approche de 2 000 km/s environ ; en même temps, l'intensité du spectre continu avait nettement diminué. On rend compte de ces caractères en admettant la formation, autour de l'étoile, d'une enveloppe gazeuse très



● A une brusque augmentation d'éclat de Nova Aquilae 1918, fait suite une chute lente.

chaude, en expansion. En se développant, cette couche prend une densité très faible et les conditions physiques tendent à y devenir comparables à celles qui règnent dans les nébuleuses gazeuses.

Plus tard, le spectre continu réapparut.

L'expansion d'une couche gazeuse autour de la nova a été confirmée par l'observation directe. Six mois environ après le maximum d'éclat, on a aperçu, dans les lunettes, une pâle enveloppe verdâtre autour de l'étoile et, depuis lors, on a trouvé que cette enveloppe augmente graduellement de volume, en devenant moins lumineuse : son diamètre croît d'environ 2" d'arc par an. D'après ce déplacement angulaire, on a même pu, puisque l'observation du spectre avait donné la vitesse radiale d'expansion, déduire que la distance de l'étoile est d'environ 1200 années-lumière. Ainsi l'explosion observée en 1918 s'était produite il y a 1200 ans!

## L'INTÉRIEUR DES ÉTOILES

La lumière que nous recevons des étoiles provient de leurs couches superficielles, et l'analyse de cette lumière ne nous permet de connaître que la composition de ces couches externes et les conditions physiques qui y règnent. Nous n'étudions donc directement qu'une fraction infime de leurs masses. Nous pouvons cependant savoir ce qui se passe à leur intérieur, car la matière stellaire jouit de propriétés relativement simples.

Les étoiles sont formées de masses fluides incandescentes, dont la température et la pression croissent rapidement vers le centre. Sous l'effet de ces hautes températures et de ces pressions élevées, la matière ne se comporte plus du tout comme sur la Terre.

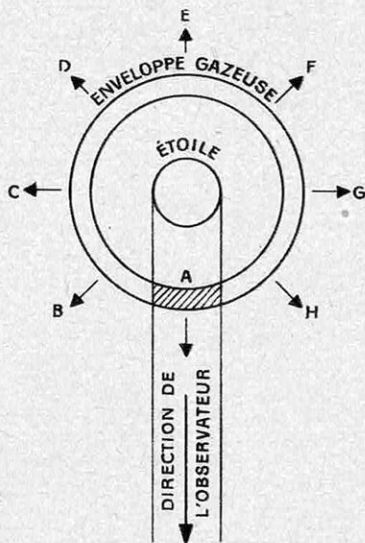
Rappelons que les atomes sont formés d'un noyau, chargé positivement, entouré d'électrons qui sont les grains élémentaires d'électricité négative. Les atomes sont très petits (diamètre de l'ordre de  $10^{-8}$  cm), mais les noyaux des atomes le sont beaucoup moins encore ; suivant une comparaison empruntée à l'astronomie, un noyau n'occupe guère plus de place dans un atome que le Soleil dans un volume d'espace comprenant le système solaire jusqu'à l'orbite de Neptune. Les électrons ne sont pas indissolublement liés aux noyaux des atomes ; diverses actions, par exemple les chocs, peuvent arracher ces électrons. C'est en cet arrachement que consiste l'ionisation. Déjà certains atomes sont ionisés dans les atmosphères des étoiles, comme le montre l'analyse de leurs spectres. A l'intérieur des étoiles, la température très élevée communique aux

atomes des mouvements désordonnés très rapides : d'autre part, la grande pression serre les atomes les uns contre les autres : les chocs des atomes entre eux sont donc nombreux et violents ; ils provoquent une ionisation presque complète, tous les atomes perdant à peu près totalement leurs électrons.

On comprend alors une première propriété de la matière stellaire : elle se comporte comme un gaz, même lorsque sa densité est égale ou supérieure à celle de l'eau. En effet, un gaz ordinaire, non ionisé, approche de l'état liquide lorsque, par compression, les atomes sont amenés à se toucher, c'est-à-dire lorsque le volume du gaz est à peine supérieur au volume occupé par les atomes ou les molécules. Dans la matière stellaire, très fortement ou complètement ionisée, l'espace réel des atomes dénudés est très petit par rapport aux conditions habituelles : cette matière doit donc être compressible jusqu'à des densités bien supérieures à celles des liquides ou des solides ordinaires et avoir encore les propriétés d'un gaz.

Par l'effet de l'ionisation, la matière stellaire jouit d'une autre propriété, aussi surprenante que la première : bien que les noyaux des atomes conservent leur identité et soient donc différents les uns des autres, **la matière stellaire a une densité à peu près indépendante de sa composition**. La masse atomique moyenne d'un gaz ionisé est, en effet, voisine de 2, quel que soit l'élément dont on considère l'ionisation. Prenons, par exemple, le cas du fer, dont la masse atomique est 56 et dont l'atome ordinaire est formé d'un noyau et de 26 électrons ; par ionisation complète, il donne 27 particules, dont la masse atomique moyenne est  $56/27 = 2,1$ . Seuls l'hydrogène et l'hélium donnent, par ionisation, des valeurs plus faibles, mais leur influence est partiellement compensée par le défaut d'ionisation complète des éléments lourds.

D'autre part, dans l'équilibre interne des étoiles intervient la **pression de radiation**, ou pression exercée par la lumière sur les corps qu'elle rencontre. D'ordinaire cette pression est très petite, pourtant c'est



### SCHEMA D'UNE ÉTOILE A ENVELOPPE GAZEUSE

Les raies brillantes du spectre sont larges car les atomes émetteurs ont des vitesses radiales très différentes ; en B et H ils s'approchent de nous et en D et F s'éloignent, tendant à déplacer les raies respectivement vers le violet et le rouge. Les raies d'absorption proviennent seulement des atomes situés dans la région A ; comme ils s'approchent de nous, elles sont donc déplacées vers le violet du spectre.



● Sur cette photographie de la Voie Lactée dans la constellation d'Ophiuchus, obtenue à l'aide du télescope de 2,5 m du Mont Wilson, apparaissent plusieurs milliers d'étoiles. Au centre une nébuleuse obscure en forme d'S.

elle qui, nous l'avons dit, dirige les queues des comètes à l'opposé du Soleil. C'est elle aussi qui, sur le Soleil, supporte la matière de la chromosphère, malgré les forces de gravité. Mais son influence devient énorme à l'intérieur des étoiles, car, tandis que la pression ordinaire d'un gaz est proportionnelle à la température, elle croît comme la puissance 4 de cette température. Elle contribue ainsi, pour une part d'autant plus grande que l'on considère des points plus près du centre des étoiles, à supporter le poids des couches gazeuses externes.

Finalement, les théoriciens sont parvenus à calculer la température, la pression et la densité au centre des étoiles et la variation de ces quantités depuis le bord. On obtient, au centre du Soleil, une température de l'ordre de 20 millions de degrés, une densité de 80 fois celle de l'eau et une pression de 100 milliards de  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Bien qu'ils ne soient pas obtenus par des mesures directes, ces résultats présentent un grand degré de certitude ; pour aussi surprenant que cela paraisse, nous connaissons beaucoup mieux l'intérieur du Soleil et même des étoiles très lointaines que l'état de la matière solide formant le noyau de la Terre.

Un autre résultat mérite l'attention : tandis que les températures superficielles des étoiles s'échelonnent entre 2 000 et 50 000° environ, la température centrale est du même ordre de grandeur pour toutes les étoiles appartenant à la branche principale (15 à 30 millions

de degrés) ; par contre, la température est nettement plus faible (1 à 5 millions de degrés) au centre des géantes rouges.

## LES NAINES BLANCHES

Nous avons déjà, à plusieurs reprises, parlé de naines blanches et nous avons cité comme exemple le compagnon de Sirius. Ces étoiles étranges ont une masse comparable à celle du Soleil, alors que leur volume est plutôt celui d'une planète. Il en résulte que leur densité moyenne atteint une valeur énorme, 30 000 fois environ celle de l'eau dans le cas de Sirius B, supérieure même à 100 000 pour certaines.

Cette matière hyperdense, formée de noyaux atomiques et d'électrons étroitement serrés les uns contre les autres, est très différente de la matière stellaire ordinaire, dont nous avons parlé plus haut. On a affaire à un état particulier de la matière auquel on donne le nom de **matière dégénérée** et dont on a pu expliquer les propriétés surprenantes en appliquant aux particules qui la constituent une analyse statistique spéciale, découverte par la mécanique quantique. (C'est donc le développement de la mécanique quantique qui a permis de comprendre la nature des naines blanches ; inversement, l'observation de ces astres a apporté une confirmation aux spéculations les plus abstraites de la statistique quantique). On montre que la matière dégénérée est compressible, malgré sa grande densité ; la pression à son intérieur





HERCULE

BOUVIER

Arcturus

LION

OPHIUCHUS

SERPENT

VIERGE

Septembre

BALANCE

Octobre

l'Épi

Novembre

CORBEAU

COUPE

Decembre

Antarès

SCORPION

HYDRE FEMELLE

XVII

XVI

XV

XIV

XIII

XII

V

IV

III

II

I

XXIV

PERSÉE

TRIANGLE

COCHER

PLÉIADES

BÉLIER

PÉGASE

TAUREAU

3 Juin

Mai

Aldebaran

POISSONS

use

ORION

Avril

Point γ

Mars

Rigel

BALEINE

ERIDAN

LIEVRE

**LES CONSTELLATIONS VOISINES DE L'ÉQUATEUR CÉLESTE**

COLOMBE

30°

n'est plus donnée, comme dans la matière stellaire ordinaire, par l'équation des gaz parfaits : elle est sensiblement indépendante de la température et varie comme la puissance  $5/3$  de la densité. La matière dégénérée est incapable de rayonner de l'énergie. Si les naines blanches rayonnent faiblement, c'est parce que leur noyau, formé de matière dégénérée, est entouré d'une mince couche gazeuse normale. Dans Sirius B, l'épaisseur de cette couche n'atteint pas la dixième du rayon. Nous comprenons pourquoi l'étoile est beaucoup

moins lumineuse qu'une étoile ordinaire de même masse et, par suite, pourquoi les naines blanches s'écartent nettement de la branche principale dans le diagramme de Russell et se placent aussi en dehors de la courbe qui lie la masse des étoiles à leur luminosité.

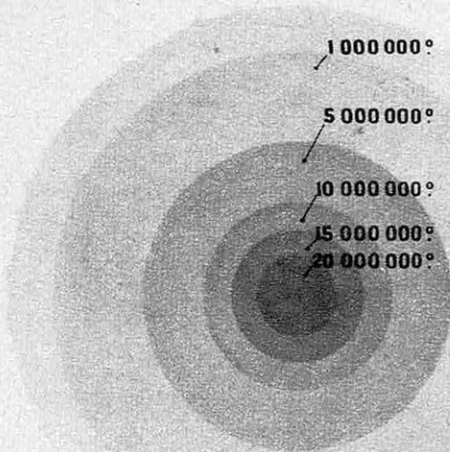
On ne connaît jusqu'ici qu'un faible nombre de naines blanches. Mais il faut remarquer que nous apercevons seulement, à cause de leur faible intensité lumineuse, celles qui sont voisines de nous. On pense qu'en moyenne les naines blanches sont 3 fois plus nombreuses dans l'espace que les géantes de toutes espèces.

Ainsi, un télescope de 2,50 m de diamètre ne décèle, parmi les étoiles de magnitude absolue 12,5, que celles situées à moins de 200 parsecs. Or, parmi les quelque deux cents étoiles situées à une distance inférieure à 10 parsecs, il y a au moins 7 naines blanches, contre 7 étoiles des types A et F et une géante (Pollux).

## ORIGINE DE L'ÉNERGIE

Le Soleil et les étoiles répandent continuellement dans l'espace un flux énorme d'énergie. Ainsi l'énergie qui sort en une seconde de la surface du Soleil représente à peu près dix milliards de fois l'énergie électrique consommée actuellement en France dans une année entière. Et encore le Soleil est une étoile naine !

Quelle est la source de cette énergie ? C'est une question que l'on s'est posée depuis déjà longtemps. Il n'est pas possible qu'elle provienne de réactions chimiques ; on évalue, par exemple, que si le Soleil était formé uniquement de charbon et s'il brûlait dans une



### TEMPÉRATURES ATTEINTES DANS LE SOLEIL.

Au centre, la température calculée est de 20 millions de degrés et la pression de 100 milliards de  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

atmosphère d'oxygène, il serait consommé en quelques milliers d'années. On a cherché si la chute des météores sur le Soleil ne pourrait pas fournir assez d'énergie pour maintenir son rayonnement, mais cette idée a été rapidement abandonnée. Il y a environ 100 ans, on a cru trouver l'explication avec l'hypothèse de la contraction : le Soleil doit se contracter par l'effet de l'attraction de gravitation vers son centre ; le travail de contraction doit se retrouver sous forme de chaleur, produite par la compression des masses gazeuses.

Mais on a facilement calculé qu'une telle contraction ne suffirait à fournir au Soleil l'énergie qu'il rayonne que pendant un temps de 20 millions d'années environ. Ce n'est pas une période suffisante, puisque nous savons que l'âge de la Terre est de 3 milliards d'années, en gros. Les géologues estiment même qu'une durée d'un milliard d'années, au moins, est nécessaire pour expliquer l'évolution de la vie à la surface de la Terre. Il a donc fallu chercher une autre source pour l'énergie.

C'est un peu avant 1940 que le problème a été résolu. On a reconnu maintenant que l'énergie des étoiles et du Soleil provient des **réactions nucléaires** ou **réactions de transmutation** qui se produisent à leur intérieur. On sait provoquer de telles réactions au laboratoire, notamment en lançant, les uns contre les autres, des atomes ou des noyaux d'atomes par des dispositifs appropriés. Au sein des étoiles, ce sont les mouvements frénétiques d'agitation thermique qui projettent les noyaux atomiques les uns vers les autres. Ces noyaux sont chargés d'électricité positive et, par suite, se repoussent mutuellement. Les théories physiques modernes montrent que les températures de quelques millions de degrés, qui règnent au centre des étoiles, sont précisément celles qui sont nécessaires pour donner aux corpuscules l'énergie suffisante pour vaincre les forces de répulsion. Ainsi les réactions nucléaires se réalisent spontanément à l'intérieur des étoiles et libèrent une énergie des milliers de fois plus grande que dans le cas des réactions chimiques. Elles s'accompagnent en effet de variations de masses relativement importantes. Or, l'énergie libérée



par une réaction est proportionnelle à cette variation de masse, et le coefficient de proportionnalité est énorme puisque, d'après la théorie de la relativité, il y a équivalence de la masse et de l'énergie, de sorte qu'un gramme correspond à 25 millions de kWh.

Seules, d'ailleurs, un petit nombre de réactions nucléaires peuvent s'amorcer à l'intérieur des étoiles ; ce sont les réactions de combinaison des protons ou noyaux d'hydrogène avec les noyaux des éléments légers. On a même pu préciser et l'on connaît maintenant de manière exacte les réactions nucléaires qui se produisent au sein des étoiles les plus nombreuses, celles appartenant à la branche principale du diagramme de Russell (figure ci-dessous).

Ces réactions, au nombre de 6, forment ce que l'on appelle le **cycle du carbone** ou plus exactement **cycle du carbone et de l'azote** parce que 4 noyaux d'hydrogène, en se combinant successivement à des noyaux de carbone et d'azote, se trouvent finalement convertis en un noyau d'hélium. Quant aux noyaux de carbone et d'azote, ils sont régénérés et leur rôle est analogue à celui des catalyseurs dans les réactions chimiques ordinaires. Les réactions nucléaires qui se produisent à l'intérieur des étoiles conduisent donc à une lente **transmutation de l'hydrogène en hélium**.

Ce sont ces réactions qui entretiennent le rayonnement des astres et qui, en particulier, créent la lumière et la chaleur nécessaires à la vie.

En réalité, les réactions nucléaires ne donnent pas directement de la lumière, mais des rayons gamma ou rayons X très durs. Ceux-ci sont absorbés par la matière stellaire et réémis sous forme de radiations de plus grande longueur d'onde. Avant de parvenir à la surface de l'astre, les radiations sont ainsi absorbées et réémises un grand nombre de fois. Finalement, le rayonnement émis est sensiblement en équilibre avec la température superficielle.

## ÉVOLUTION DES ÉTOILES

Quand on connaît les réactions nucléaires qui se produisent à l'intérieur des étoiles, on peut examiner leurs effets et prévoir comment elles doivent s'amorcer l'une après l'autre. On peut donc en déduire des conséquences importantes quant à l'évolution des étoiles.

Nous ne développerons pas ici ce pro-

Sous le bombardement des atomes d'hydrogène, le carbone 12 donne successivement des isotopes de l'azote, du carbone et de l'oxygène, et réapparaît finalement accompagné d'hélium. De l'énergie est libérée à chaque stade, sous forme soit de rayon gamma, soit d'un électron positif qui, lorsqu'il rencontre un électron négatif se dématérialise aussitôt avec lui.

blème très complexe, mais nous montrons par un exemple, très important pour nous puisque c'est celui du Soleil, comment les connaissances récemment acquises ont profondément modifié les idées traditionnelles sur l'évolution des étoiles.

On croyait, jusqu'à ces toutes dernières années, que le Soleil se refroidissait lentement, puisque sa contraction, seule source d'énergie que l'on considérait, devait se ralentir progressivement.

Maintenant, puisque l'on sait que la transformation de l'hydrogène en hélium est capable d'entretenir l'extraordinaire dépense d'énergie des étoiles de la branche principale, la contraction ne joue plus un rôle aussi important dans la théorie ; pourtant, c'est elle qui permet aux réactions nucléaires de s'amorcer, en élevant la température au centre des astres.

Mais dans les étoiles de la branche principale, toute l'énergie rayonnée provient exclusivement des réactions du cycle du carbone, par lesquelles l'hydrogène est transformé en hélium.

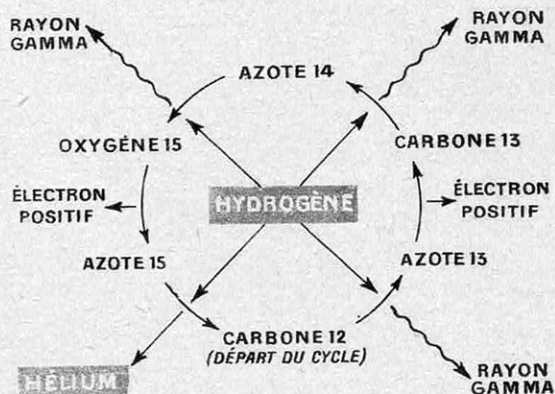
La réserve d'hydrogène contenue dans les étoiles est si grande que l'on évalue, par exemple, la « vie » du soleil à 10 milliards d'années.

Il ne s'agit d'ailleurs pas d'un lent déclin, car on prévoit que la lente transmutation de l'hydrogène en hélium doit avoir pour effet, en augmentant l'opacité de la matière stellaire, de faire croître progressivement la température centrale et, par suite, le rayonnement.

Ainsi les théoriciens sont d'accord pour penser que **notre Soleil est en train de se réchauffer** ; il ne déclinera que beaucoup plus tard. Dans quelques milliards d'années, notre Soleil sera sensiblement 100 fois plus lumineux.

Sa luminosité sera comparable à la luminosité de Sirius.

A ce moment, la température à la surface de la Terre sera voisine de 300° C, et toute vie y aura vraisemblablement disparu. Ainsi la vie est destinée à disparaître sur la Terre, non par le froid, comme on le croyait jusqu'ici, mais par le feu.



# LA VOIE LACTÉE ET LA GALAXIE

**L**a Voie Lactée dessine une bande faiblement lumineuse à travers le ciel. Elle le partage en deux parties égales, suivant un grand cercle qui fait avec l'équateur céleste un angle de  $62^\circ$  environ.

À la lunette, la Voie Lactée apparaît formée d'une multitude d'étoiles individuellement invisibles à l'œil nu ; la photographie révèle l'existence de véritables nuées d'étoiles.

Cette apparente concentration d'étoiles dans le plan moyen de la Voie Lactée s'explique par un effet de perspective sur la sphère céleste. En effet, les étoiles ne sont pas réparties au hasard dans l'espace, mais en un amas très aplati, en forme de lentille, que l'on appelle la **Galaxie**. Sa forme et ses dimensions relatives ont été déterminées par des dénombrements d'étoiles. Le centre de la Galaxie se trouve dans la direction de la constellation du Sagittaire. Son diamètre est de 100 000 années lumière environ, son épaisseur vers le centre voisine de 10 000 années-lumière. Le Soleil se trouve à peu près dans le plan moyen de symétrie, assez loin du centre, à 30 000 années-lumière. Ces dimensions sont celles actuellement adoptées comme les plus probables : en réalité, on connaît un certain nombre d'astres situés en dehors de l'amas précédent dans une sorte d'aurole, dont le diamètre équatorial dépasse 150 000 années-lumière et l'épaisseur 120 000 années-lumière.

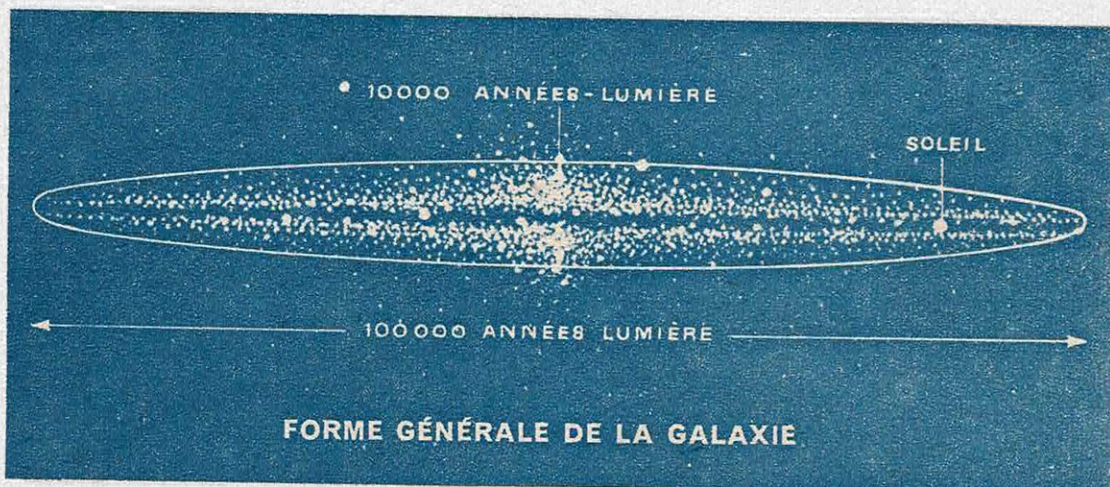
## LES AMAS D'ÉTOILES

En dehors des nuées stellaires de la Voie Lactée, on rencontre ici et là, dans le ciel, d'autres amas d'étoiles, beaucoup plus petits. On distingue deux sortes d'amas : les **amas ouverts** et les **amas globulaires**.

Les premiers contiennent quelques dizaines ou quelques centaines d'étoiles, relativement peu serrées et qui peuvent être séparées à la lunette ou même parfois à l'œil nu, comme c'est le cas pour les étoiles principales des Pléiades. On les appelle aussi **amas galactiques**, parce qu'ils sont tous voisins du plan moyen de la Galaxie. Ils sont mis en évidence soit par leur densité d'étoiles, soit par l'identité, en direction et grandeur, du mouvement de leurs membres. On en connaît plus de 300.

Les étoiles d'un amas sont toutes sensiblement à la même distance de nous. Lorsqu'il est possible de classer les spectres des principales étoiles, on peut tracer un diagramme reliant les classes spectrales aux magnitudes apparentes, analogue donc au diagramme classique de Russell qui fait intervenir les magnitudes absolues. Dans tous les cas, il est facile de reconnaître la ressemblance des diagrammes et, d'après la différence entre les deux échelles de magnitudes, on déduit la distance de l'amas.

En appliquant cette méthode, on a constaté,





(Ph. de Kérolvr.)

## LE CENTRE DE LA GALAXIE : LA VOIE LACTÉE DANS LA CONSTELLATION DU SAGITTAIRE.

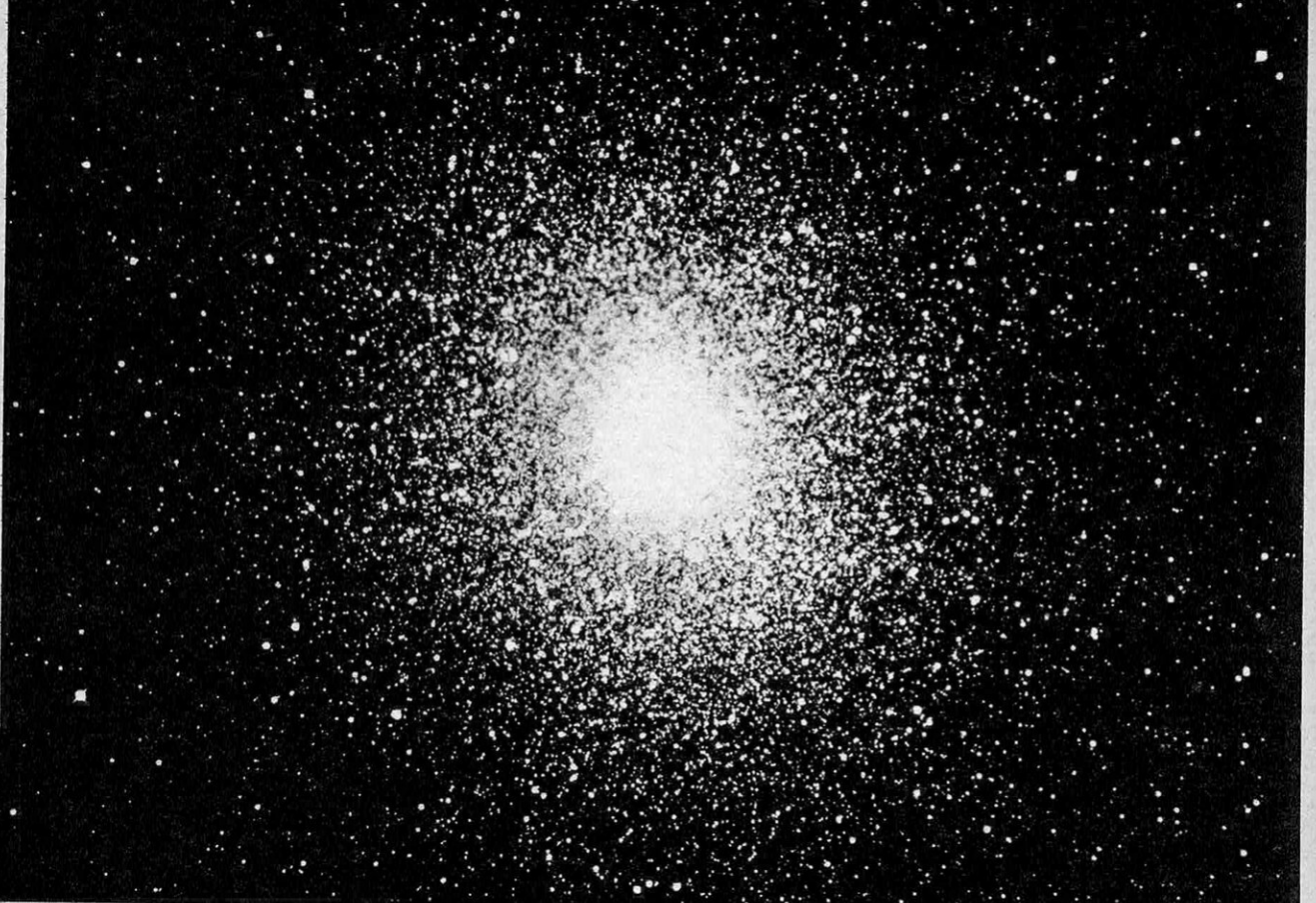
vers 1930, un résultat surprenant : le diamètre linéaire des divers amas, calculé d'après la distance évaluée et le diamètre apparent, augmentait en même temps que la distance de la Terre. Cette propriété inexplicable ne pouvait être attribuée qu'à quelque erreur systématique. On a été forcé d'admettre que la lumière des amas lointains est affaiblie par absorption dans l'espace interstellaire, ce qui les fait paraître plus éloignés qu'ils ne sont en réalité.

L'amas galactique le plus proche est celui des Hyades (108 années-lumière); le plus éloigné est à environ 22 000 années-lumière, soit sensiblement la distance de l'amas globulaire le plus proche. Ainsi les amas galactiques sont relativement proches; il est probable que ceux situés dans les régions loin-

taines de la Galaxie nous sont cachés par la matière dispersée au voisinage du plan moyen de la Galaxie.

Les **amas globulaires** ont une forme ronde; la concentration des étoiles vers le centre y est si grande qu'on ne peut pas les séparer les unes des autres dans la lunette. Le plus connu est l'amas d'Hercule, juste visible à l'œil nu. Les grands télescopes montrent qu'il s'agit d'un groupe extraordinairement dense d'étoiles; on en a compté plus de 40 000 en dehors du noyau central. La limite de l'amas est difficile à définir, car la densité d'étoiles décroît graduellement, mais on apprécie le diamètre apparent total de l'amas à 30', soit l'angle sous lequel nous voyons le Soleil ou la pleine Lune.

On connaît une centaine d'amas globulaires;



L'AMAS GLOBULAIRE D'HERCULE : PLUS DE 40 000 ÉTOILES EN DEHORS DU NOYAU CENTRAL.

ils ont tous une étroite ressemblance avec l'amas d'Hercule. Les deux plus brillants sont dans l'hémisphère sud.

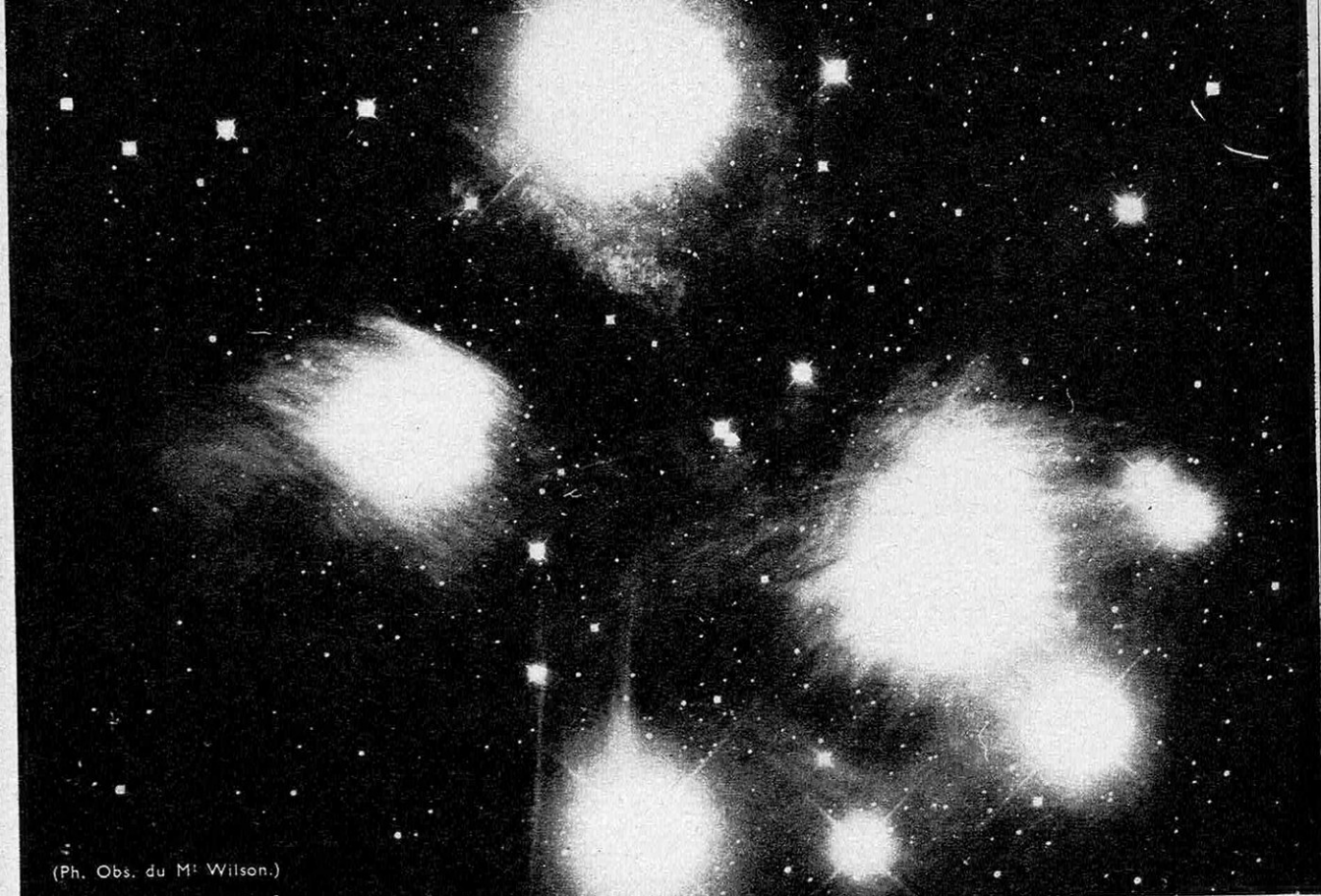
C'est l'astronome américain Shapley qui a déterminé les distances de la plupart des amas globulaires. Ses travaux ont eu, au moment où ils ont été publiés (1917), un grand retentissement, car ils montrent nettement que les amas globulaires, qui pourtant appartiennent à notre Voie Lactée, atteignent des distances bien supérieures à celles qui étaient admises, à cette époque, pour notre Galaxie. Pour trouver ces distances, Shapley profita de la propriété des Céphéides, que nous avons signalée, et il détermina d'abord l'éloignement de la vingtaine d'amas globulaires dans lesquels on distingue des variables de ces types. Les données ainsi obtenues lui permirent de découvrir plusieurs méthodes concordantes pour évaluer les distances des autres amas. Il trouva notamment que la magnitude absolue des 25 plus brillantes étoiles était la même dans tous les amas (il s'agit de supergéantes, mais chaque amas contient aussi, certainement, des naines en nombre immense) ; il admit la même règle pour tous les amas. Il calcula aussi les distances d'après leurs diamètres apparents ou leur éclat total, en admettant des valeurs moyennes pour leurs diamètres linéaires ou le rayonnement lumineux total.

Les deux plus proches amas globulaires sont situés à 22 000 années-lumière ; l'amas d'Hercule est à 34 000 années-lumière ; les plus lointains observés sont à 225 000 années-lumière. Le diamètre linéaire des amas est d'une centaine d'années-lumière ; ils sont donc beaucoup plus petits que la Galaxie. Quant au nombre d'étoiles qu'ils contiennent, il est si élevé que la distance moyenne des étoiles entre elles y est comparable à la distance qui sépare les planètes dans notre système solaire.

Le centre de la Galaxie est aussi le centre de gravité des amas globulaires, autour duquel ils sont concentrés. Ils semblent plus éloignés, en moyenne, que les amas ouverts du plan moyen de la Voie Lactée à cause de leurs très grandes distances et de la concentration de matière absorbante dans ce plan.

## LES NÉBULEUSES GALACTIQUES

Les lunettes permettent de voir ou de photographier dans le ciel, à côté des étoiles et des planètes, des objets lumineux à contours indéfinis, différents des comètes, auxquels on a donné depuis longtemps le nom général de **nébuleuses**. On a reconnu maintenant que certains de ces objets sont extrêmement lointains, bien au delà des limites de notre Galaxie ; ils constituent de véritables mondes



(Ph. Obs. du M<sup>r</sup> Wilson.)

UNE LONGUE POSE MONTRE LES ÉTOILES DES PLÉIADES ENVELOPPÉES DE NÉBULOSITÉS.

stellaires, et beaucoup contiennent, comme notre Galaxie, des milliards d'étoiles. Pour les distinguer nettement, on les nomme des **nébuleuses extragalactiques**; nous les étudierons plus loin. Au contraire, les **nébuleuses galactiques** appartiennent à notre Galaxie; elles ont, nous allons le voir, une nature tout à fait différente. A cause de leur nature, on leur donne aussi le nom de **nébuleuses gazeuses**.

Il existe deux types de nébuleuses galactiques : les nébuleuses planétaires et les nébuleuses diffuses.

Les **nébuleuses planétaires** ont généralement l'aspect d'un petit disque elliptique, plus ou moins semblable à une planète; d'où leur nom, dans lequel il ne faut voir que le rappel d'une vague ressemblance d'aspect. On connaît une centaine de ces objets, tous de très faible luminosité. A leur centre, on aperçoit généralement une étoile très chaude (classe 0). Beaucoup d'auteurs pensent que ces nébuleuses entourent d'anciennes novæ; elles auraient été expulsées au moment de leur explosion.

Comme leur nom l'indique, les **nébuleuses diffuses** ont la forme de nuages lumineux aux contours irréguliers, tantôt comme des nuages denses (exemple : la nébuleuse d'Orion), tantôt comme des traînées de fumée (exemple : la nébuleuse de La Den-

telle, dans la constellation du Cygne). La nébuleuse d'Orion est visible à l'œil nu; dans la lunette, elle paraît comme une masse verdâtre. Pour beaucoup de nébuleuses, la lumière qu'elles émettent est si faible qu'elles sont invisibles dans les lunettes et ne sont décelées que par la photographie, au moyen de longues poses. Les dimensions des nébuleuses sont souvent importantes; ainsi les photographies à longues poses montrent que la nébuleuse d'Orion couvre de ses ramifications toute la constellation.

Le spectre des nébuleuses gazeuses est formé, dans la plupart des cas, d'un certain nombre de **raies brillantes** appartenant à l'hydrogène, à l'hélium, au carbone, à l'azote. L'origine de quelques-unes de ces raies est restée longtemps mystérieuse. Faute de pouvoir attribuer ces raies à aucun des éléments connus, on avait pris l'habitude de les désigner comme des raies du **nebulium**, exactement comme si elles appartenait à quelque élément chimique inconnu sur la Terre. Les connaissances actuelles sur la structure des atomes excluent la possibilité d'un tel élément et l'on a reconnu (depuis 1927) que ces raies sont dues à des éléments ordinaires; par exemple, les plus intenses appartiennent aux spectres de l'oxygène une ou deux fois ionisé. Mais il s'agit de radiations particulières, dites « raies interdites » que l'on

n'obtient pas dans les conditions habituelles au laboratoire, parce qu'elles exigent l'absence presque absolue de chocs sur les atomes excités et, par suite, une densité gazeuse extrêmement faible.

Les nébuleuses galactiques sont, en effet, formées de nuages de gaz très dilué, qui ne devient visible que lorsqu'il se trouve illuminé par une étoile brillante voisine qui provoque sa luminescence.

Quelques nébuleuses diffuses, par exemple celles qui entourent les Pléiades, donnent, non plus un spectre de raies brillantes, mais un spectre à raies d'absorption, analogue à celui d'une étoile. On a reconnu que, dans ce cas, la nébuleuse réfléchit simplement la lumière d'une étoile centrale, qui n'est pas assez chaude et n'émet pas assez de rayons ultraviolets pour provoquer la luminescence du gaz.

## LES " NÉBULEUSES OBSCURES "

Les masses de gaz interstellaire, illuminées au voisinage des étoiles brillantes, peuvent s'étendre, évidemment, à d'autres régions : elles forment alors des nuages absorbants. La présence de ces nébuleuses obscures explique les nombreux « trous noirs » que l'on observe dans la Voie Lactée. On a dénombré plus de 1 500 de ces objets. Les plus nets sont, naturellement, les plus proches : le « sac à charbon » près de la Croix-du-Sud, et les nuages noirs de la constellation d'Ophiuchus sont à 50 années-lumière environ ; ceux du Cygne sont à 250 années-lumière. Les nuages éloignés sont difficiles à étudier.

On a reconnu qu'en réalité la matière se trouve dispersée un peu partout dans la Galaxie, particulièrement au voisinage de son plan moyen et que, d'autre part, elle se présente sous deux formes : **gaz** et **poussière**.

L'existence de gaz interstellaire est démontrée par l'observation, dans les spectres des étoiles lointaines, de raies d'absorption particulières, appelées, à cause de leur origine, **raies interstellaires**. On les reconnaît à ce qu'elles n'accusent pas le même déplacement par effet Doppler que les autres raies dues aux étoiles, puisque le mouvement du gaz interstellaire suivant la direction du rayon visuel n'est pas le même que celui des étoiles. On a jusqu'ici identifié des raies dues au calcium, au sodium, au potassium, au titane et aussi à des composés moléculaires formés de carbone, d'hydrogène, d'azote. D'autres éléments existent probablement dans le gaz interstellaire et peuvent cependant ne pas être identifiés, parce qu'ils ne sont pas capables de produire des raies d'absorption dans la région observable des spectres stellaires. L'étude systématique des raies d'absorption interstellaires est relativement récente ; leur existence a été signalée pour la première fois en 1904 et leur origine interstellaire n'a été reconnue qu'en 1924. Mais elle a conduit déjà à des résultats importants, notamment en ce qui concerne la répar-

tion des nuages de gaz interstellaire dans la Galaxie. Pour certaines étoiles, on a observé des raies interstellaires qui sont dédoublées parce que la lumière traverse successivement des nuages qui ont des vitesses radiales différentes.

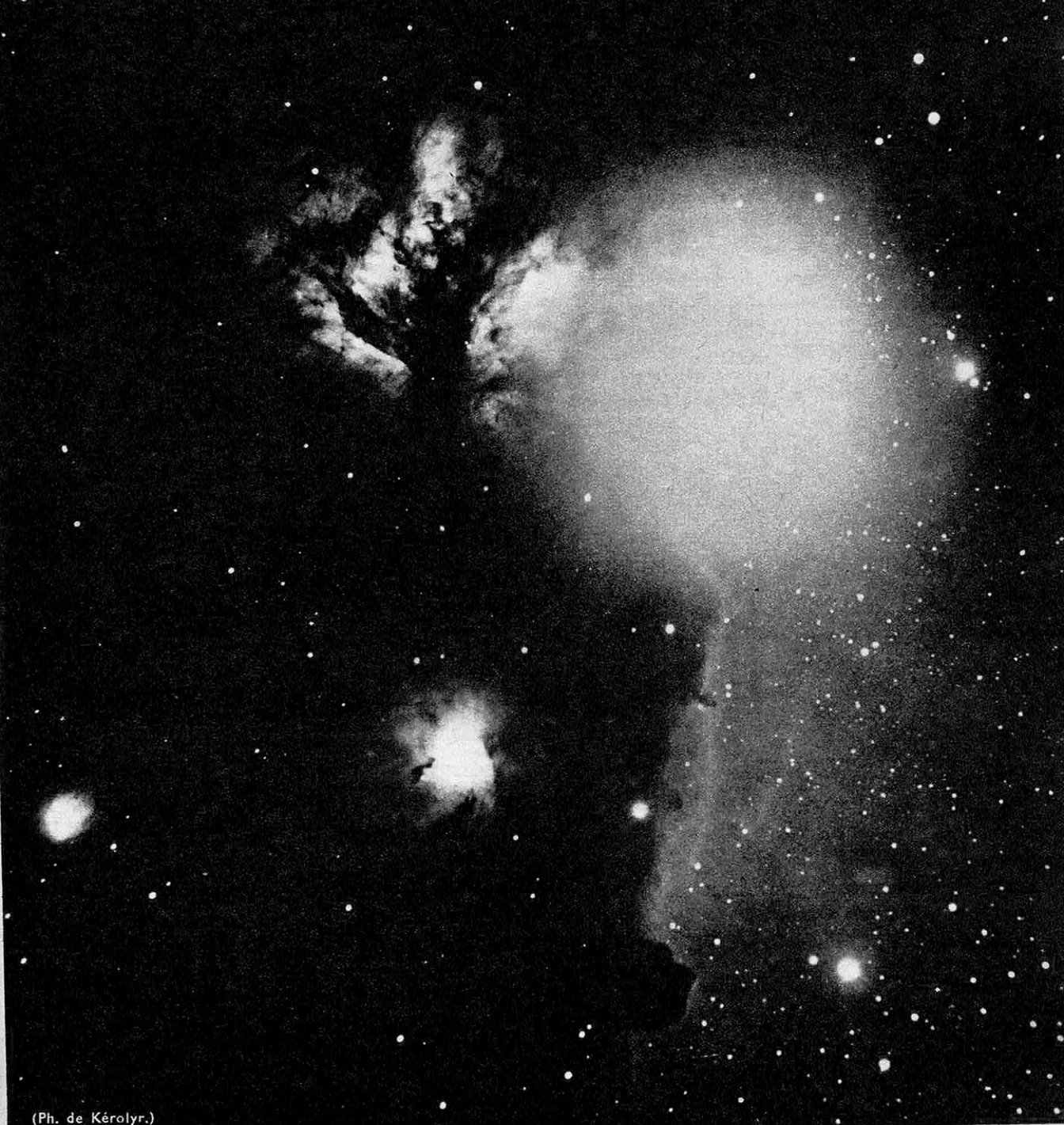
Quant à la présence de poussières entre les étoiles, on en a la preuve par l'absorption générale exercée sur la lumière des objets célestes lointains. En évaluant par plusieurs méthodes les distances de certains groupes d'étoiles, notamment de Céphéides, on a réussi à estimer la perte de lumière due à cette absorption. Le résultat est assez incertain, à cause de la difficulté de ces mesures, et aussi à cause des variations de la densité de la matière absorbante en diverses régions de la Galaxie. Dans la région où la poussière est la plus abondante, vers le plan moyen de la Galaxie, on trouve, en gros, que 50 % de la lumière sont absorbés après un parcours de 3 000 années-lumière.

Les mesures ont montré aussi que l'absorption de la lumière est accompagnée d'un changement de couleur : les étoiles lointaines dont les rayons traversent, pour nous parvenir, une grande épaisseur de matière stellaire, nous paraissent plus rouges, de la même manière que le Soleil et tous les astres lorsque, en se rapprochant de l'horizon, ils sont vus à travers une plus grande épaisseur d'air. Or cet effet de **rougissement** dépend de la dimension des particules diffusantes, ce qui conduit à leur attribuer un diamètre moyen de l'ordre du dixième de micron. Pour certains astronomes, il s'agirait de fines particules métalliques, par exemple de fer.

La densité moyenne de la matière interstellaire dispersée dans la Galaxie a été évaluée à  $10^{-24}$  g/cm<sup>3</sup>, soit un million de fois plus petite environ que la densité du meilleur « vide » que l'on sache réaliser au laboratoire. Un volume grand comme la Terre représenterait à peine 1 kg. Mais comme les distances qui séparent les étoiles entre elles sont très grandes, la masse totale de matière dispersée dans la Galaxie, sous forme de gaz et de poussière, est à peu près égale à la somme des masses de toutes les étoiles. La poussière ne se trouve que par places et, d'après les plus récentes estimations, sa masse totale serait un peu supérieure à la masse du gaz.

Le résultat précédent peut être encore exprimé sous une autre forme : d'après la densité moyenne du gaz interstellaire, on peut dire qu'il y a, dans l'ensemble, **un atome de matière interstellaire par centimètre cube**.

Les rayons qui nous parviennent de la région centrale de la Galaxie parcourent dans son plan moyen un trajet de 30 000 années-lumière et nous arrivent affaiblis dans une telle proportion (un millième à un dix-millième) qu'il n'en reste à peu près rien. Nous ne voyons donc dans cette région que les objets les plus



(Ph. de Kérolyr.)

NÉBULOSITÉS AUTOUR DE ZETA ORION ; EN BAS, LA NÉBULEUSE OBSCURE EN « TÊTE DE CHEVAL ».

brillants et nous ne percevons pas du tout les objets qui sont situés du côté opposé.

En se rendant compte de l'absorption exercée dans l'espace interstellaire, les astronomes ont été amenés à corriger leurs anciennes évaluations des distances des objets lointains, notamment les dimensions de la Galaxie. Ils avaient admis, en effet, que le faible éclat des astres lointains était dû à leurs distances ; il faut tenir compte aussi de l'absorption subie tout le long du trajet.

## LA ROTATION DE LA GALAXIE

Nous avons étudié, jusqu'ici, la forme, les dimensions et la structure de la Galaxie. Il nous reste à parler d'une propriété importante : sa rotation.

En effet, si la Galaxie ne tournait pas sur elle-même, la force d'attraction exercée par le noyau sur les étoiles externes précipiterait ces dernières vers le centre de la Galaxie, exactement de la même manière que, par



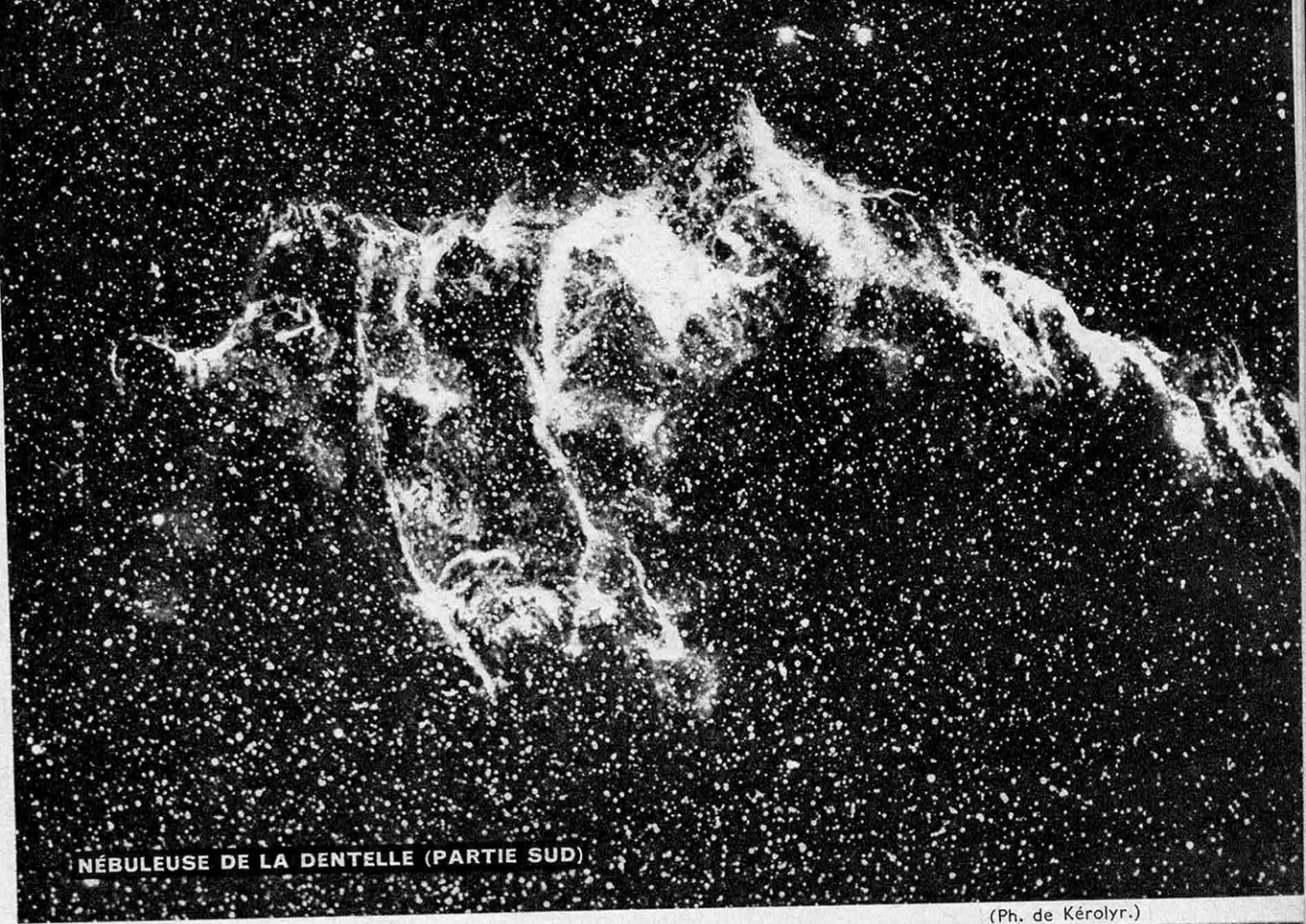
LA GRANDE NÉBULEUSE D'ORION

(Ph. de Kérolyr.)



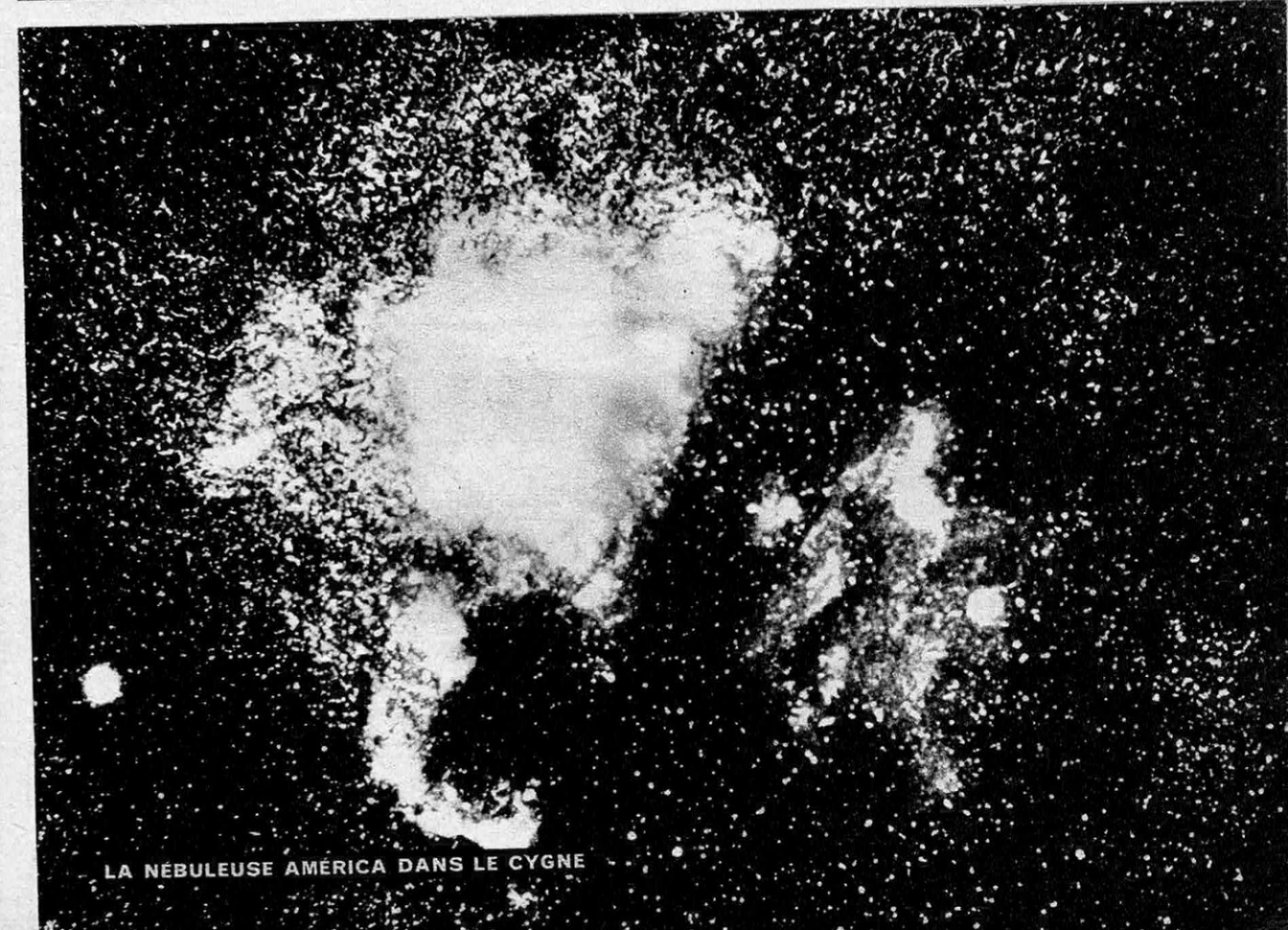
AMAS ET NÉBULOSITÉS DANS LA LICORNE



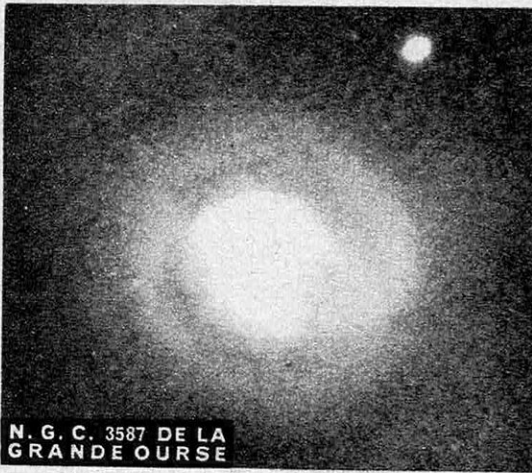


NÉBULEUSE DE LA DENTELLE (PARTIE SUD)

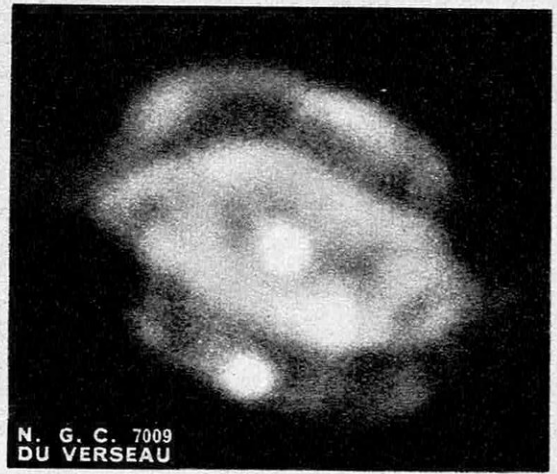
(Ph. de Kérolyr.)



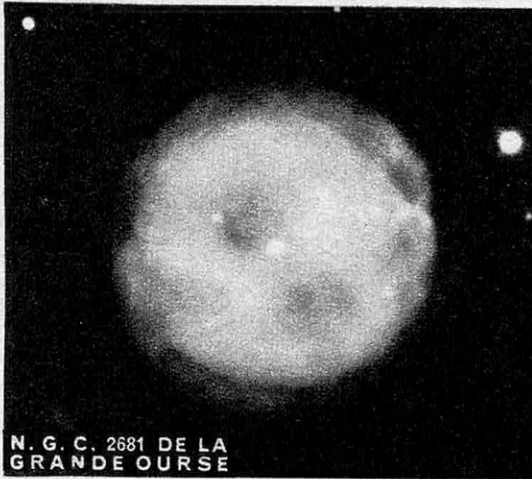
LA NÉBULEUSE AMERICA DANS LE CYGNE



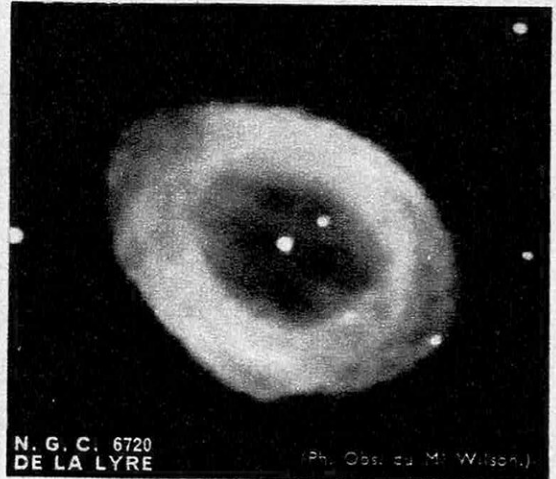
N. G. C. 3587 DE LA  
GRANDE OURSE



N. G. C. 7009  
DU VERSEAU



N. G. C. 2681 DE LA  
GRANDE OURSE



N. G. C. 6720  
DE LA LYRE

Ph. Obs. du M. Wilson.)

QUELQUES EXEMPLES TYPES DE NÉBULEUSES PLANÉTAIRES APPARTENANT A NOTRE GALAXIE.

exemple, la Terre tomberait immédiatement sur le Soleil si elle venait à être arrêtée un instant sur sa trajectoire. La forme aplatie de la Galaxie indique tout de suite qu'il s'agit d'un mouvement rapide autour d'un axe passant par son centre et perpendiculaire au plan moyen.

C'est donc son mouvement de rotation qui assure l'équilibre à notre Galaxie et lui donne sa forme. Mais nous pouvons prévoir que cette forme est lentement modifiée par la rotation ; la Galaxie ne tourne pas en bloc, à la manière d'une roue ou d'un volant ; les régions internes ont un mouvement de rotation plus rapide que les bords. Le cas est analogue à celui du système solaire, où, nous le savons, la vitesse des planètes sur leurs orbites est d'autant plus grande qu'elles sont plus près du Soleil ; ou encore au système des anneaux de Saturne, dont les régions internes tournent plus vite que les externes. Ce caractère se comprend aisément : les étoiles voisines du centre de la Galaxie sont celles sur lesquelles la force d'attraction du noyau est la plus grande ; il faut aussi, pour que la force

centrifuge équilibre cette attraction, que ce soient celles animées du mouvement de rotation le plus rapide.

L'idée de la rotation de la Galaxie a été confirmée par les nombreux points de ressemblance, que l'on a mis peu à peu en évidence, entre notre Galaxie et les nébuleuses extragalactiques particulières, auxquelles on a donné le nom de **nébuleuses spirales** à cause de leur forme, due évidemment à une rotation rapide autour de leur noyau. Nous précisons ces points de ressemblance un peu plus loin, en étudiant les nébuleuses extragalactiques.

C'était un problème très difficile que de démontrer directement la rotation de la Galaxie par des observations. Les astronomes y sont cependant parvenus, par un ensemble de travaux récents qui comptent parmi les plus remarquables de notre époque.

Ils ont précisément tiré profit du fait signalé ci-dessus, à savoir que les vitesses des étoiles décroissent vers l'extérieur de la Galaxie. Un observateur qui se déplace avec le Soleil observera seulement les vitesses rela-

tives, c'est-à-dire la différence entre les mouvements des étoiles qu'il observe et son propre mouvement. Représentons ci-dessous à grande échelle la région voisine du Soleil et les vitesses relatives. Comme on le voit, les étoiles de la Voie Lactée situées dans les directions qui font un angle de  $45^\circ$  et de  $225^\circ$  avec la direction du centre doivent s'éloigner de nous avec la plus grande vitesse; au contraire, dans les directions de  $135^\circ$  et  $315^\circ$ , les étoiles doivent s'approcher le plus rapidement; enfin, dans les directions du centre, à  $90^\circ$ , à  $180^\circ$  et à  $270^\circ$ , les étoiles ne doivent pas avoir de mouvement radial; elles ne doivent donc ni s'approcher ni s'éloigner.

Tel est l'effet qui a été mis en évidence, pour la première fois, par l'astronome hollandais Oort, en 1927. Pour qu'il soit sensible, il faut évidemment faire intervenir un grand nombre d'étoiles, afin d'éliminer l'influence des mouvements particuliers de chaque étoile. Il faut aussi que ces étoiles soient assez lointaines pour que l'action de la **rotation différentielle**, comme on l'appelle, soit mesurable.

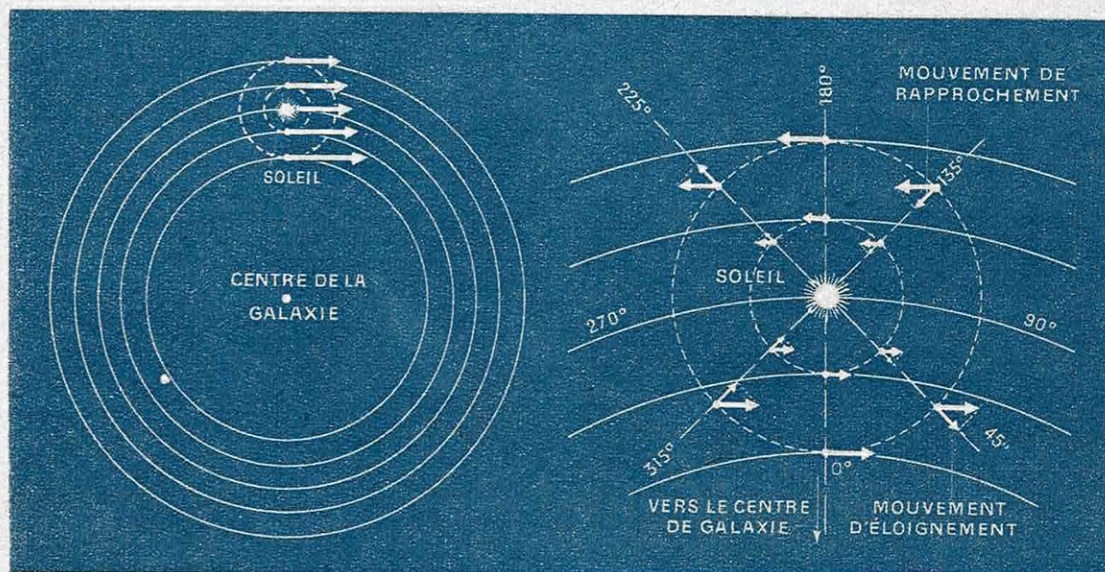
Oort a considéré les étoiles très lumineuses des types O et B, les Céphéides, les nébuleuses planétaires. Il a montré que l'effet cherché existe réellement et qu'il est d'autant plus marqué qu'il s'agit d'astres situés à de plus grandes distances, jusqu'à 10 000 années-lumière.

Les recherches d'Oort ont été confirmées par des travaux plus récents. On obtient ainsi une nouvelle méthode pour apprécier la position du centre de la Galaxie, sa distance au Soleil et le diamètre moyen de la Galaxie.

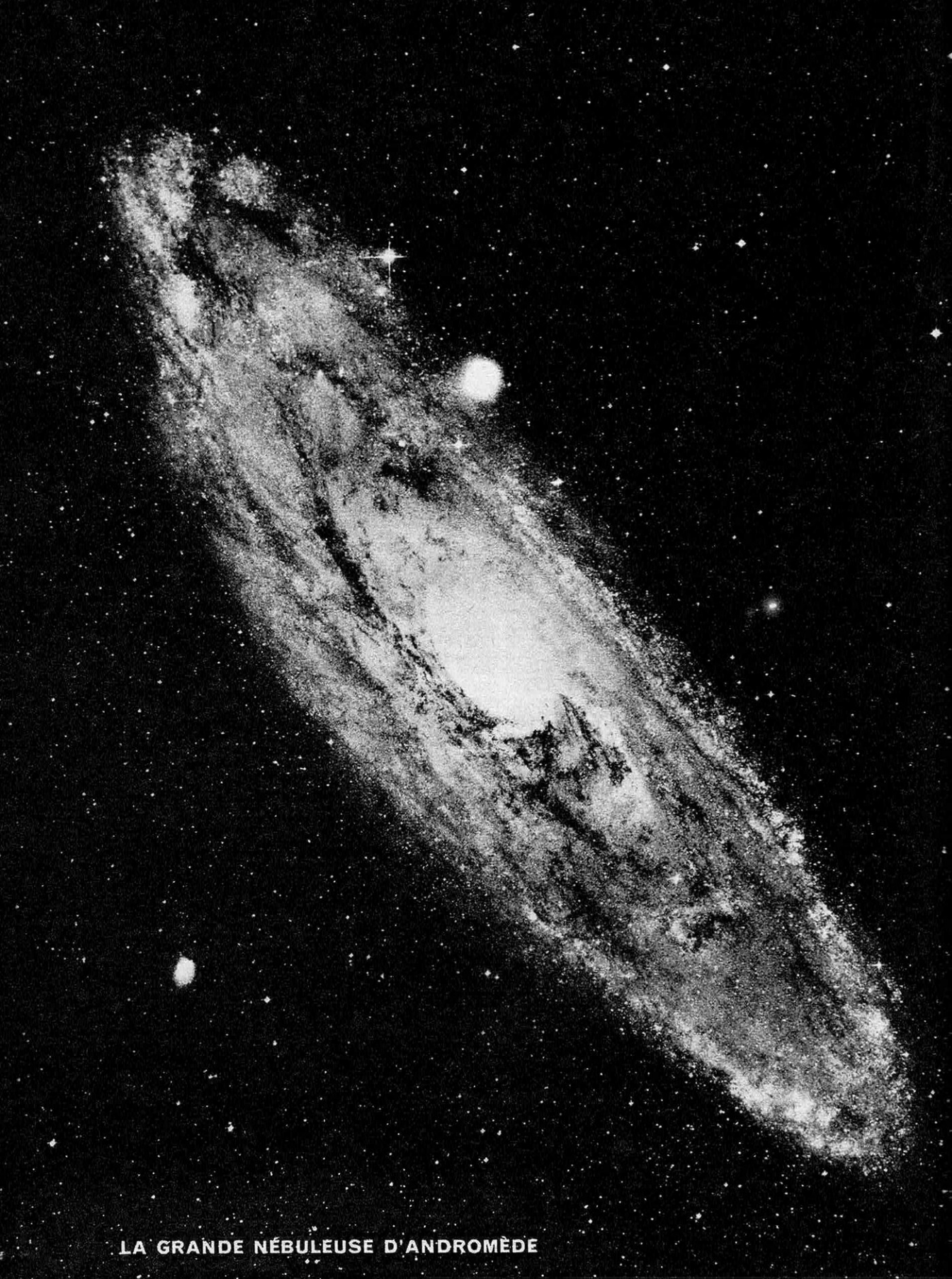
Ces recherches donnent en même temps la

vitesse de la rotation galactique; pour le groupe des étoiles voisines du Soleil, elle est de 200 à 250 km/s, ce qui signifie que, pour ce groupe d'étoiles, la durée d'une rotation complète autour du noyau est de l'ordre de 300 millions d'années. Période énorme par comparaison aux courtes vies humaines, mais petite par rapport à la durée de vie du Soleil et de notre globe, puisque le Soleil et son système de planètes ont dû accomplir 10 fois déjà leur gigantesque voyage autour du noyau de la Galaxie. Dix fois déjà l'immense tourbillon nous a entraînés, et, puisque dans son mouvement le noyau tourne plus vite que les bords, la masse de la Galaxie s'est trouvée brassée, les positions relatives des groupes d'étoiles ont varié, les cieux ont changé d'aspect.

On déduit aussi des recherches précédentes la masse totale de la Galaxie, puisqu'il faut que l'attraction de cette masse équilibre le mouvement de rotation. On trouve une valeur de 100 milliards de fois la masse du Soleil environ, dont une part importante serait concentrée près du noyau. Cela ne signifie d'ailleurs pas du tout que la Galaxie contienne 100 milliards d'étoiles semblables au Soleil. Nous avons déjà dit que la moitié, sensiblement, de la masse de la Galaxie forme les nuages de gaz et de poussière interstellaires. Enfin, la valeur de la masse totale est encore incertaine et nous ne la donnons qu'à titre d'indication. Il est probable que le télescope de 5 m, nouvellement installé au Mont Palomar, permettra, en sondant des régions plus lointaines, de mieux étudier la rotation de la Galaxie; mais il faut compter plusieurs années de travail avant de parvenir à des résultats définitifs.



● Le dessin de gauche montre la variation de la vitesse de rotation des étoiles de la Galaxie avec leur distance au centre : les plus éloignées tournent le plus lentement. A droite, la région voisine du Soleil à plus grande échelle; les flèches montrent les vitesses relatives et les vitesses radiales, projections des premières sur les rayons visuels



LA GRANDE NÉBULEUSE D'ANDROMÈDE

# LES NÉBULEUSES EXTRAGALACTIQUES

**I**L est sans doute utile que nous fassions le point avant de nous lancer, d'un bond nouveau, dans l'espace.

Les Anciens avaient attribué à notre Terre une place prépondérante, celle de centre du monde. Cette idée a été acceptée jusqu'au moment où Copernic a montré que notre globe décrit une orbite autour du Soleil. Les hommes ont alors pensé que c'était le Soleil qui représentait le centre du monde. Mais peu à peu l'idée s'est formée que le Soleil est seulement une étoile comme les autres. Nous avons expliqué comment toutes les étoiles sont groupées en un gigantesque amas, la Galaxie, et comment le Soleil se trouve placé loin du centre de cet amas.

Nous allons voir maintenant qu'il existe des millions d'amas analogues à notre Galaxie. Ce sont les nébuleuses extragalactiques. Ainsi l'astronomie nous donne une écrasante leçon d'humilité.

## LES DIVERS TYPES DE NÉBULEUSES EXTRAGALACTIQUES

Il faut faire, nous l'avons dit, une nette distinction entre les nébuleuses galactiques et extragalactiques. De nombreux savants ont

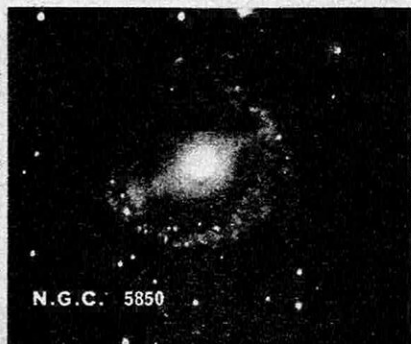
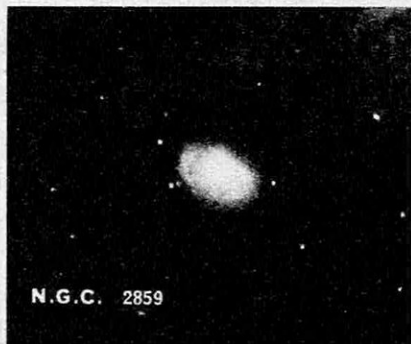
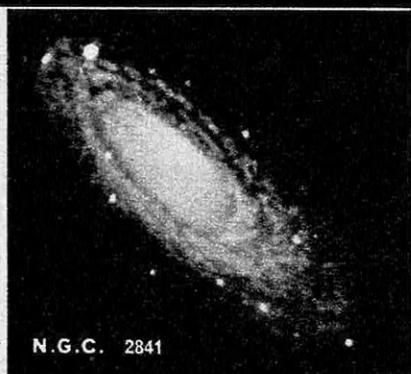
soupçonné cette distinction depuis déjà longtemps, mais ce n'est qu'à partir de 1924, lorsque l'astronome américain Hubble eut réussi le premier à mesurer la distance d'une nébuleuse, celle d'Andromède, que l'on a eu la certitude qu'un grand nombre de nébuleuses étaient des systèmes nettement externes à notre Galaxie. Nous avons vu que les nébuleuses galactiques sont concentrées au voisinage de la Voie Lactée ; au contraire, il semble que les systèmes extragalactiques évitent la Voie Lactée, mais la raison véritable pour laquelle nous ne les voyons pas dans cette région est qu'elles sont cachées par les nébuleuses obscures de notre Galaxie, particulièrement denses près de son plan moyen.

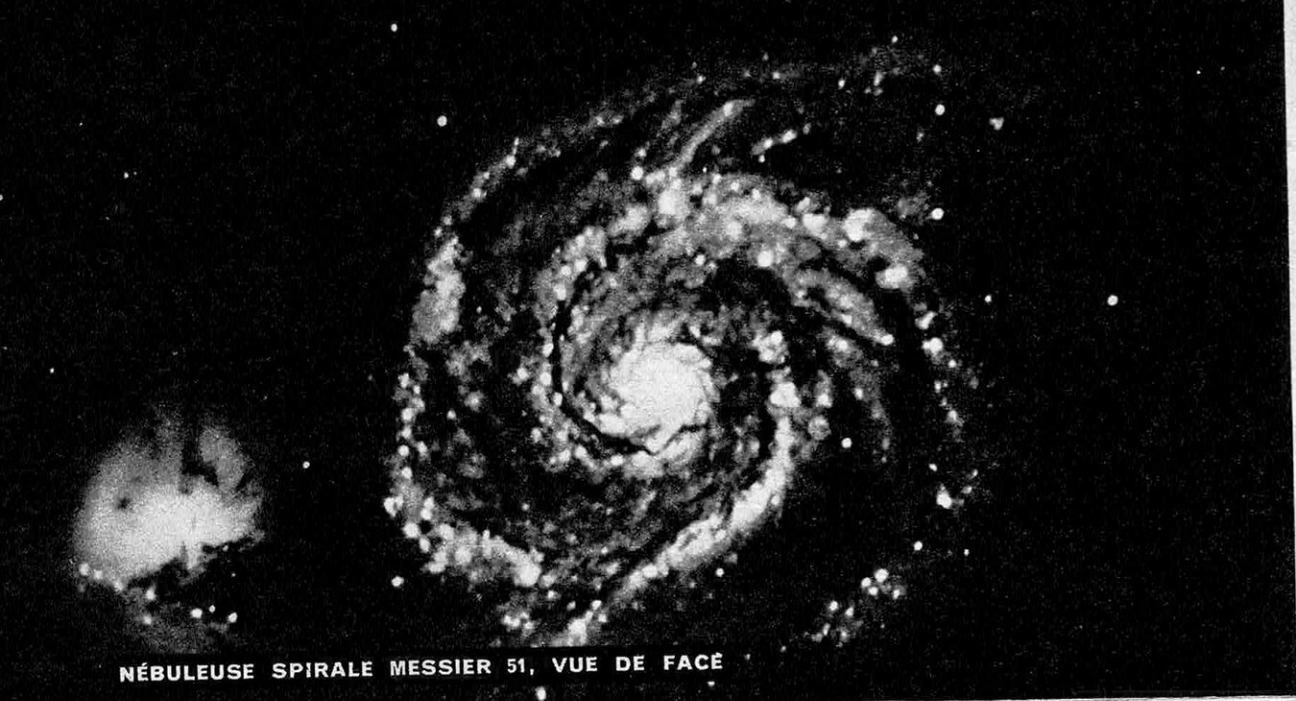
On ne parvient à distinguer des détails que dans les nébuleuses qui sont relativement les plus proches. Or on constate parmi elles une grande variété de formes.

On les classe généralement en nébuleuses spirales (74 %), nébuleuses elliptiques (23 %) et nébuleuses irrégulières (3 %).

Les **nébuleuses spirales** du type normal ont un noyau globulaire, beaucoup plus brillant que les parties externes ; de deux points diamétralement opposés de ce noyau partent deux bras, qui s'enroulent en spirales autour de lui, dans un même plan et dans le même

● Les trois premières nébuleuses spirales sont du type normal. Les trois autres sont des nébuleuses barrées ; les bras moins développés partent des extrémités d'une barre lumineuse qui traverse le noyau central.





NÉBULEUSE SPIRALE MESSIER 51, VUE DE FACE

(Ph. de Kérolyr)



NÉBULEUSE SPIRALE N. G. C. 4565, VUE DE PROFIL

(Ph. de Kérolyr)

sens. Cette forme suggère immédiatement l'idée d'une rotation rapide.

Les détails nous apparaissent plus ou moins bien, suivant que les nébuleuses sont vues de face, sous une incidence oblique ou même par la tranche. Quand une nébuleuse est vue par la tranche, elle prend l'aspect d'une sorte d'aiguille, dix fois plus longue qu'épaisse environ, avec un renflement au centre. Un caractère remarquable est l'apparition générale d'une bande noire dans le sens de la longueur, qui décèle la présence de nuages de poussière cosmique particulièrement abon-

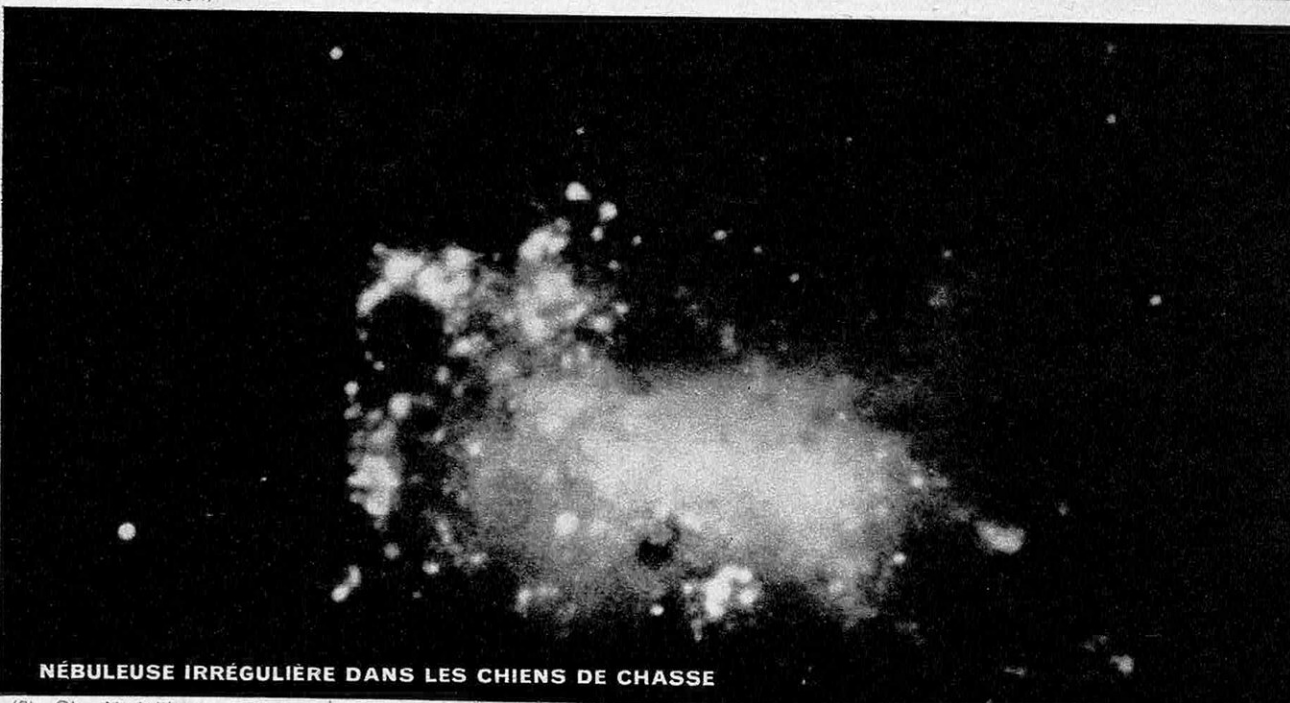
dants dans le plan équatorial. Une minorité de nébuleuses spirales (une sur trois environ) forment un groupe plus particulier ; on les désigne sous le nom de **nébuleuses barrées**. Les bras, beaucoup moins développés, ne partent plus directement du noyau, mais forment les prolongements d'une barre lumineuse qui traverse le noyau.

Les **nébuleuses elliptiques** apparaissent comme des objets ovales, à bords diffus, dans lesquels on n'aperçoit aucun indice de la structure en spirale, ni de la résolution en étoiles.



**NÉBULEUSE ELLIPTIQUE DANS LA GRANDE OURSE**

(Ph. Obs. M<sup>r</sup> Wilson)



**NÉBULEUSE IRRÉGULIÈRE DANS LES CHIENS DE CHASSE**

(Ph. Obs. M<sup>r</sup> Wilson)

Enfin, les **nébuleuses irrégulières** n'ont ni noyau apparent, ni symétrie de rotation. Les plus proches sont les deux Nuages de Magellan. On a distingué, dans plusieurs nébuleuses irrégulières, des amas d'étoiles, des étoiles variables, des nébuleuses gazeuses analogues à ceux de notre Galaxie.

On peut se demander à quoi tiennent ces différences de forme. Les théoriciens les plus compétents pensent qu'elles correspondent aux divers stades de leur évolution et que chaque nébuleuse passerait successivement par les diverses classes. Cette transformation

est, bien sûr, extrêmement lente et exigerait des millions d'années.

Nous allons, pour préciser certains caractères des nébuleuses, donner quelques détails sur la nébuleuse d'Andromède, qui est une spirale, et sur les Nuages de Magellan, qui sont des nébuleuses irrégulières.

### **LA NÉBULEUSE D'ANDROMÈDE**

La grande nébuleuse d'Andromède est l'objet céleste le plus éloigné qui soit visible sans lunette. Puisque sa distance est de 700 000 années-lumière, les rayons que nous

en recevons ont voyagé dans l'espace, avant de nous parvenir, depuis une période qui est au moins 100 fois plus ancienne que celle où l'on a construit les Pyramides d'Égypte. Cette distance est, à peu près, quatre fois plus grande que celle des amas globulaires les plus lointains ; la nébuleuse est donc nettement séparée de notre Galaxie, elle est bien extragalactique.

Le noyau central est la région de beaucoup la plus lumineuse ; c'est lui seul qui apparaît à l'œil nu. Le corps principal, celui que l'on distingue sur les meilleures photographies, s'étend sur un diamètre apparent de 160' ; mais des mesures précises montrent que, en réalité, la nébuleuse s'étend sur une région presque deux fois plus grande, puisque dans le sens de la longueur, on trouve un diamètre apparent de 270', soit environ neuf fois le diamètre apparent de la pleine Lune.

Son diamètre linéaire est de 60 000 années-lumière environ. Ainsi la nébuleuse d'Andromède est plus petite que la Galaxie, dans laquelle nous sommes plongés.

Les grands télescopes ont permis de distinguer, dans les régions externes de la nébuleuse et, tout récemment, dans la région centrale, de très nombreuses étoiles et aussi des nuages lumineux (nébuleuses gazeuses) et des nuages sombres de poussière cosmique. On y a reconnu notamment une cinquantaine d'étoiles variables du type des Céphéides, plus une centaine de novae, des variables à longue période et des amas globulaires.

Il apparaît donc que la nébuleuse d'Andromède ressemble beaucoup à notre Galaxie. Il est vraisemblable que, si l'on pouvait observer notre Galaxie d'un point extérieur convenablement placé, la vue d'ensemble serait tout à fait analogue à celle que nous offre la nébuleuse d'Andromède.

La nébuleuse tourne autour de son noyau, sensiblement de la même manière que notre Galaxie.

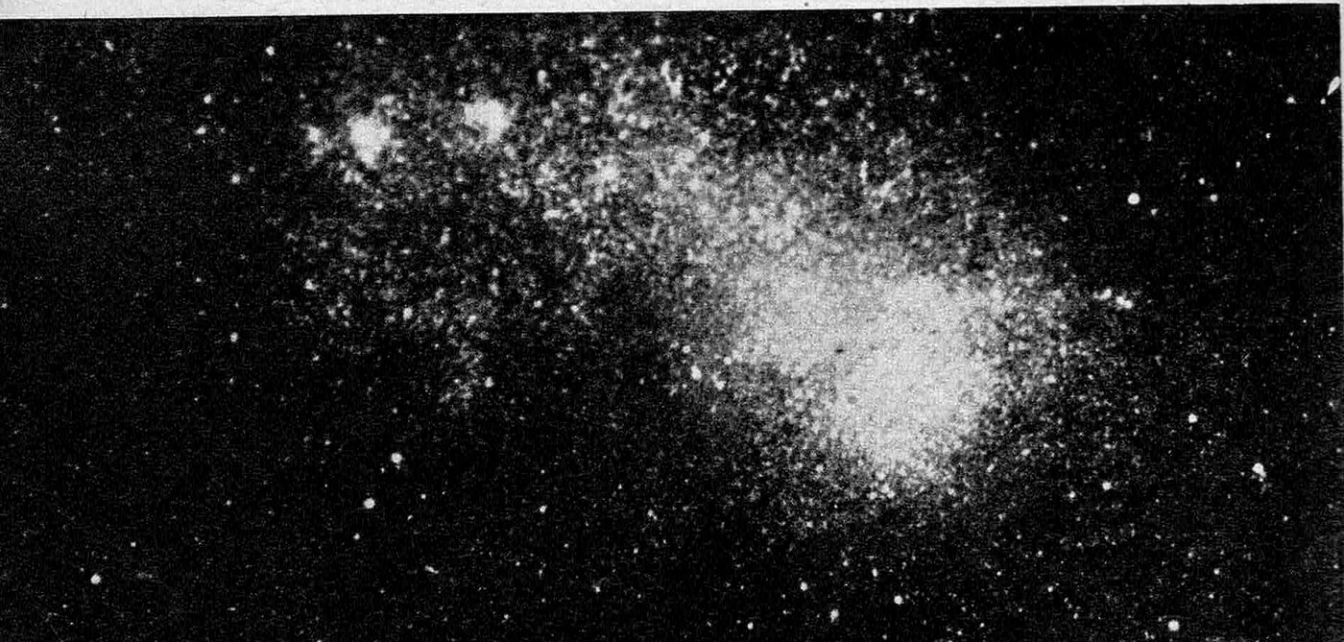
## LES NUAGES DE MAGELLAN

On donne ce nom à deux nébuleuses irrégulières typiques, facilement visibles à l'œil nu, mais qui sont situées trop près du pôle céleste sud pour qu'on les aperçoive de nos régions. Le **Grand Nuage** a une forme irrégulière allongée et le diamètre angulaire de sa région principale dépasse 7 degrés. Le **Petit Nuage** est environ deux fois moins étendu. La distance du premier est de 75 000 années-lumière ; celle du second, de 84 000 années-lumière ; la séparation de leurs centres est d'environ 30 000 années-lumière, donc relativement faible ; les deux nuages forment un système double et agissent l'un sur l'autre par gravité. Ils sont d'ailleurs tous deux voisins de notre Galaxie ; leurs distances au plan moyen de la Galaxie sont de 40 000 et 60 000 années-lumière environ et l'on peut les considérer comme des satellites de notre propre Galaxie.

On n'y distingue aucun signe de la symétrie de rotation que l'on trouve dans les nébuleuses spirales. Ils sont formés d'agglomérations d'étoiles, d'amas d'étoiles et de nébulosités, analogues comme aspect à ceux des nuages d'étoiles de la Voie Lactée. On a distingué, dans ces nuages, en particulier, un très grand nombre d'étoiles variables, surtout de Céphéides.

Les Nuages de Magellan contiennent encore quelques objets qui présentent un intérêt particulier. La nébuleuse gazeuse de la Grande Boucle est la plus grande nébuleuse gazeuse connue ; elle a un diamètre d'environ 120 années-lumière ; si elle se trouvait placée à la

● Le Petit Nuage de Magellan, à 84000 années-lumière du système solaire, est une nébuleuse irrégulière typique. Il est formé d'une agglomération d'étoiles et de nébuleuses analogues à celles rencontrées dans la Voie Lactée.







● La nébuleuse du Crabe, dans la Constellation du Taureau, est probablement formée par les nuages expulsés lors de la désagrégation complète d'une supernova de notre Galaxie, apparue, d'après des livres chinois, en 1054.

même distance que la nébuleuse d'Orion, elle paraîtrait deux cents fois plus brillante que Sirius et donnerait largement assez de lumière pour produire, par les nuits sans Lune, des ombres sur la Terre. On ne connaît aucune nébuleuse qui lui soit comparable dans notre système galactique, mais on rencontre des nébuleuses géantes dans d'autres galaxies.

L'étoile S Dorade, du Grand Nuage, est la plus lumineuse que l'on connaisse ; elle émet un rayonnement cinq cent mille fois plus intense que le Soleil. C'est une étoile variable irrégulière, probablement double.

L'analyse des spectres montre une vitesse radiale d'éloignement considérable, de 270 km/s pour le Grand Nuage et de 170 km/s pour le Petit Nuage. Mais ces nombres ne signifient pas que les nuages s'éloignent réellement de notre Galaxie, ils mesurent surtout notre propre vitesse dans la rotation de la Voie Lactée.

## DISTANCES ET DIMENSIONS

Pour les 150 nébuleuses environ qui sont résolubles en étoiles, on mesure leurs distances, comme nous l'avons dit, par l'étude des étoiles variables, spécialement des Céphéides, des étoiles géantes, des novae, etc. Mais la plupart des nébuleuses sont trop lointaines pour qu'on y distingue aucune étoile

ou même aucun détail. On compare alors leurs magnitudes apparentes totales à la magnitude moyenne de celles dont la distance est connue et qui sont de la même classe. On a constaté, en effet, que les nébuleuses sont peu différentes les unes des autres, alors que le rayonnement des étoiles varie, nous l'avons vu, entre de très larges limites. Enfin, pour les nébuleuses dont on a obtenu un spectre, on déduit la distance de la relation célèbre qui existe entre l'éloignement et le déplacement vers le rouge des raies du spectre, relation que nous expliquerons un peu plus loin et qui a pu être vérifiée d'une manière très approchée.

Pour les nébuleuses les plus faibles perceptibles avec le télescope de 2,50 m du Mont Wilson (magnitude 21), on atteint la distance inconcevable de 500 millions d'années-lumière. Le télescope de 5 m du Mont Palomar doit doubler cette portée.

Pour le diamètre du « corps principal », c'est-à-dire la portion visible sur les photographies obtenues avec les grands télescopes, on trouve 2 000 à 5 000 années-lumière pour les nébuleuses elliptiques, et 7 000 à 10 000 années-lumière pour les spirales. Enfin, le diamètre maximum des nébuleuses irrégulières a une valeur moyenne de 7 000 années-lumière.

## NOVAE ET SUPERNOVAE

On observe dans les galaxies deux sortes de novae :

— les novae ordinaires, de beaucoup les plus nombreuses, qui ressemblent à celles de notre Galaxie ;

— les supernovae, qui se distinguent par leur luminosité nettement plus forte, qui atteint pendant quelque temps 100 millions de fois celle du Soleil (pour les novae ordinaires, le rapport est seulement de 25 000). Au moment de son maximum d'émission, une supernova nous envoie presque autant de lumière que la galaxie entière à laquelle elle appartient.

Pour les rechercher, plusieurs télescopes américains à grande ouverture et grand champ explorent le ciel régulièrement. Par exemple, au Mont Palomar, un télescope de 65 cm d'ouverture et qui a un champ de 9 degrés 1/2, surveille environ 3 000 nébuleuses. Dans les dix-sept premiers mois de travail, il a découvert 3 supernovae.

On pense qu'en moyenne, il apparaît une à deux supernovae par galaxie en mille ans.

La magnitude absolue atteinte par les supernovae a une valeur moyenne de  $-14$ . Si une supernova se trouvait à la distance standard de 10 parsecs (celle à laquelle on suppose ramenées les étoiles, quand on calcule leur magnitude absolue), elle nous enverrait quatre fois plus de lumière que la pleine Lune, alors qu'à cette distance notre Soleil serait à peine visible à l'œil nu.

A-t-on jamais observé une supernova dans notre Galaxie ? C'est possible, mais non certain. On peut, en effet, soupçonner que deux novae galactiques ont été, en réalité, des supernovae. L'une d'elles est celle apparue en 1572, dans la constellation de Cassiopée. On a récemment étudié minutieusement la région où cette étoile apparut, sans rien y découvrir de spécial. Le deuxième cas est celui d'une nova dont l'apparition en 1054 est rapportée par des livres chinois ; elle aussi aurait été plus brillante que Jupiter ; elle était située dans la région de la nébuleuse galactique qui porte le nom de nébuleuse du Crabe, dans la constellation du Taureau. Il est probable que la nébuleuse est formée des nuages expulsés lors de la désagrégation complète de la supernova.

L'explosion d'une supernova constitue le phénomène naturel le plus gigantesque qui ait jamais été observé par l'homme. Son origine est encore plus mystérieuse que celle d'une nova ; il est à peu près certain qu'il faut l'attribuer à une formidable libération d'énergie nucléaire.

## LES AMAS DE NÉBULEUSES

Nous avons déjà signalé qu'on ne voit pas de nébuleuses extragalactiques au voisinage du plan de l'équateur galactique par suite de l'intense absorption de la lumière par la matière interstellaire. Les nébuleuses les plus brillantes se groupent au voisinage des pôles

galactiques. Mais lorsqu'on étend l'étude aux nébuleuses plus éloignées, on trouve que la distribution devient sensiblement uniforme ; autrement dit, le nombre de nébuleuses est, en gros, proportionnel au volume d'espace exploré.

La distance moyenne entre deux nébuleuses est de 1 million et demi d'années-lumière. On note cependant des amas où plusieurs centaines de nébuleuses sont rassemblées à une distance moyenne qui est souvent dix fois plus petite que la valeur précédente.

Une question se pose : notre Galaxie n'appartient-elle pas, elle-même, à un tel amas ? Nous avons dit, en effet, que la distance moyenne entre les nébuleuses est, en dehors des amas, d'un million et demi d'années-lumière. Or nous trouvons, autour de nous, une dizaine de nébuleuses situées à une distance inférieure ou égale à un million d'années-lumière. Il ne s'agit pas, à proprement parler, d'un amas comparable à ceux que nous venons de citer, mais plutôt d'un petit **groupe local**, peut-être situé lui-même en bordure de l'amas de la Vierge, auquel appartiendrait, en particulier, outre les Nuages de Magellan que l'on peut considérer comme des annexes de notre Galaxie, la nébuleuse d'Andromède.

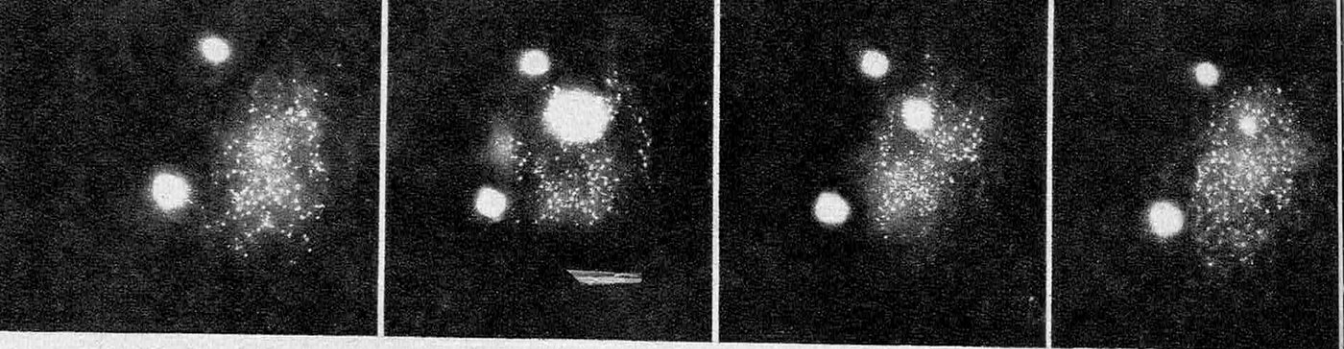
## LA RÉCESSION DES NÉBULEUSES

L'observation des nébuleuses extragalactiques a conduit à la découverte d'un fait inattendu, extraordinaire ; il est si surprenant que, depuis une vingtaine d'années qu'il a été annoncé, il n'est pas encore admis comme réel par certains astronomes, qui tentent de trouver une nouvelle interprétation des observations.

Voici ce fait : les **nébuleuses s'éloignent de nous d'autant plus vite qu'elles sont plus éloignées**.

C'est l'étude des spectres des galaxies qui a conduit à cette conclusion. Pour toutes les nébuleuses, à l'exception des plus proches, les raies d'absorption sont déplacées vers le rouge par rapport à leurs positions habituelles ; ce déplacement est d'autant plus grand que la nébuleuse est plus éloignée. L'interprétation qui vient naturellement à l'esprit est d'attribuer ce déplacement vers le rouge à l'effet Doppler, c'est-à-dire à un mouvement d'éloignement des nébuleuses. Les vitesses que l'on évalue ainsi sont énormes, même pour des astronomes ; plusieurs milliers et même des dizaines de milliers de kilomètres par seconde.

Une loi remarquablement simple, qui est mise en évidence par le diagramme de la page 134, régit ces vitesses : **la vitesse de récession des galaxies est proportionnelle à leur distance**. Cette loi a été vérifiée d'une manière précise ; la vitesse croît de 160 km/s par million d'années-lumière. Les nébuleuses les plus lointaines dont on ait obtenu le spectre, à 280 millions d'années-lumière, s'éloignent vers les profondeurs de l'espace avec une



● Apparition et disparition progressive d'une supernova dans une nébuleuse extragalactique (I.C. 4182). Les photographies ci-dessus ont été prises aux dates suivantes : 10 avril, 28 août et 31 décembre 1937, 8 juin 1938.

vitesse de 45 000 km/s, soit déjà un septième environ de la vitesse de la lumière. Comme cette dernière représente une valeur limite qu'aucun corps matériel ne peut atteindre, on attend avec beaucoup d'impatience le résultat des prochaines investigations.

Avant d'admettre la réalité de ces mouvements, les astronomes ont, bien entendu, examiné si le déplacement du spectre vers le rouge ne pouvait pas être dû à quelque autre effet. Aucune des causes, actuellement connues comme capables de produire un décalage du spectre, ne donne une explication satisfaisante. Ceux qui refusent de croire à la réalité de la fuite des nébuleuses peuvent évidemment supposer qu'intervient une action encore inconnue et qui ne serait perceptible que pour les très grandes distances ; par exemple, puisque les théories modernes font intervenir des " grains de lumière " (ou photons), on peut penser que ces grains subissent dans l'espace une perte d'énergie proportionnelle à la distance ; elle équivaldrait précisément à un déplacement des raies vers le rouge. Mais, il s'agit là d'une pure hypothèse. Finalement, aucun effet actuellement connu, sauf l'effet Doppler, ne paraît pouvoir expliquer le décalage observé.

On espère d'ailleurs mettre en évidence le mouvement de récession des galaxies par d'autres méthodes que la spectroscopie. Un des effets que les astronomes américains se proposent d'étudier avec le télescope du Mont Palomar est celui qui concerne l'influence d'un mouvement d'éloignement sur l'éclat apparent ; quand une source de lumière s'éloigne de nous à une vitesse rapide, elle semble avoir un éclat plus faible que si elle se trouvait, à chaque instant, immobile à la même distance, car nous recevons moins d'énergie pendant chaque seconde. Déjà les nébuleuses observables avec le télescope de 2,50 m doivent paraître affaiblies d'une quantité appréciable. Avec le nouveau télescope, l'effet doit atteindre 40 ou 50 % ; s'il existe, il doit se manifester d'une manière indiscutable.

## L'EXPANSION DE L'UNIVERS

En définitive, nous n'avons aucune raison, dans l'état actuel de nos connaissances, pour ne pas admettre comme réelle la récession

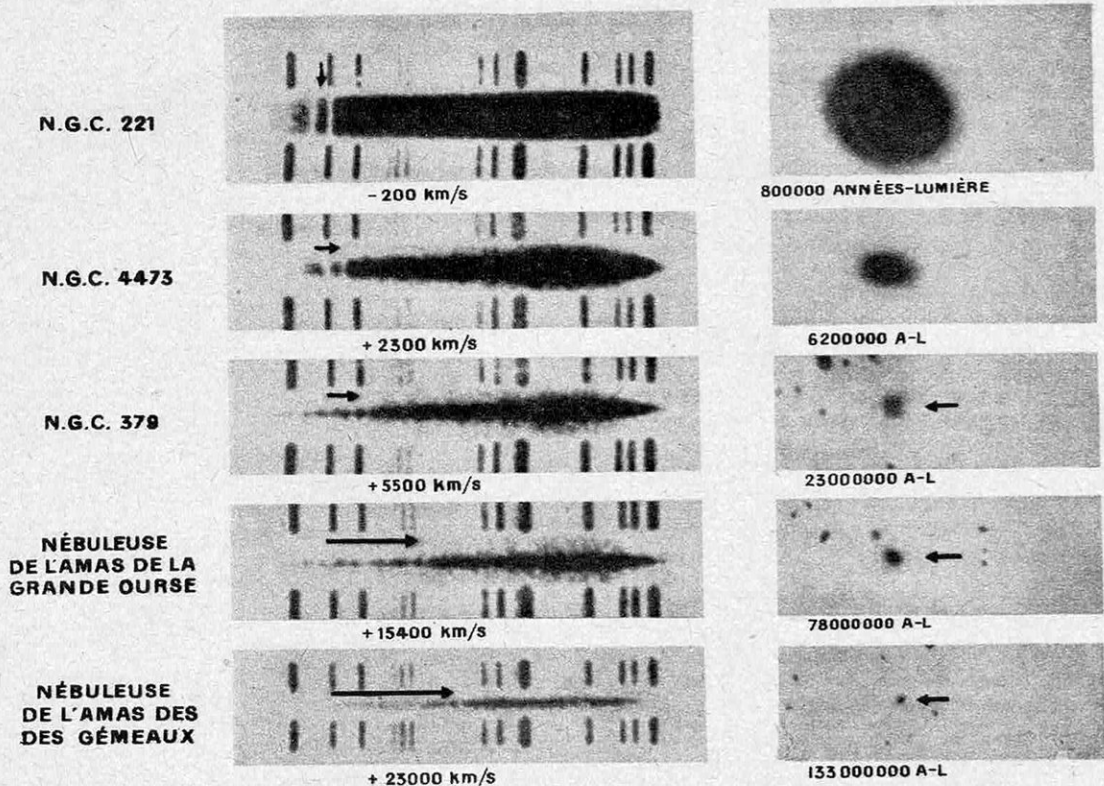
des galaxies. Essayons donc de comprendre les faits.

Tout d'abord, une remarque : nous avons l'impression que les galaxies s'écartent de notre Galaxie. En réalité, notre Galaxie ne joue aucun rôle privilégié. Un observateur qui serait placé dans une autre galaxie verrait les nébuleuses s'écarter de lui exactement de la même manière qu'elles s'écartent de nous. L'expansion est analogue, par exemple, à celle d'un gaz, dont les molécules s'écartent de plus en plus les unes des autres.

Une image simple va nous permettre de comprendre la proportionnalité entre les distances des nébuleuses et leurs vitesses d'éloignement. Quand, par exemple, on a fait éclater une mine dans une carrière, les éclats volent à des vitesses différentes et ceux qui vont le plus vite arrivent le plus loin. Si l'on photographie ces éclats avant leur chute, à un instant donné, on trouve que les plus rapides sont les plus éloignés. On peut ainsi imaginer que, dans un passé très lointain, l'Univers occupait un espace très réduit et qu'il a éclaté. D'après la vitesse de récession des nébuleuses, on déduit que cet événement est survenu il y a environ 2 milliards d'années. Il est très remarquable que cette date de 2 milliards d'années concorde bien avec l'évaluation, par des méthodes diverses, de l'âge de la Terre, ou de l'âge de notre système solaire.

Malgré tout, la fuite vertigineuse des nébuleuses nous surprend. La raison profonde pour laquelle la majorité des astronomes la croient réelle, c'est qu'elle avait été prévue comme possible avant même qu'elle ait été observée. En 1917, Einstein donna, dans sa théorie de la relativité, une formule de la gravitation qui faisait intervenir un « terme cosmique » ; il montra qu'il faut ajouter à la force attractive de Newton, inversement proportionnelle au carré de la distance, une force répulsive proportionnelle à la distance. Cette force est négligeable sur les corps voisins, mais elle devient prépondérante pour les galaxies lointaines.

La théorie de l'expansion de l'Univers, développée par l'abbé Lemaître et l'astronome anglais Eddington, lie directement la vitesse de récession des nébuleuses à la masse totale de l'Univers. On trouve ainsi une valeur de  $2.10^{55}$  g avec une erreur inférieure



● Sur ces spectres de nébuleuses, bordés de spectres de comparaison, la flèche indique la position des raies H et K du calcium. Les nébuleuses correspondantes représentées à droite sont prises toutes à la même échelle.

à 10 %. Cette masse représente  $10^{22}$  fois celle du Soleil. Si l'on admet que chaque nébuleuse contient, en moyenne, une masse de  $10^{11}$  Soleils, l'Univers doit contenir  $10^{11}$  nébuleuses, c'est-à-dire 100 milliards.

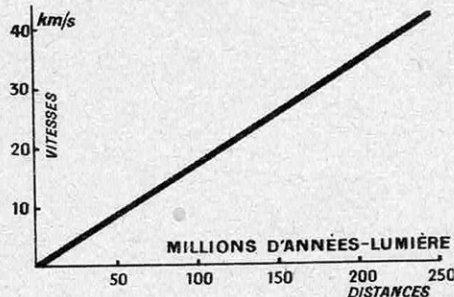
Revenons enfin — sans insister car nous touchons ici des problèmes très difficiles — sur une conséquence de la théorie de l'expansion de l'Univers. Notre Univers est fermé, c'est-à-dire limité. C'est une conception qui heurte notre esprit parce que les mathématiques nous ont habitués à parler de l'infini, et que nous ne pouvons pas admettre qu'il existe quelque part une sorte de barrière, impossible à franchir. Or il n'est pas nécessaire qu'une telle barrière existe pour que notre espace soit limité.

Pour le faire comprendre, nous nous servons à nouveau d'une comparaison : un voyageur, qui ignorerait que la Terre est ronde et qui marcherait toujours dans la même direction, ferait le tour de la Terre. Il se trouve que notre espace est comparable à la surface de la Terre ; comme elle, il est courbe et les lignes droites se referment sur elles-mêmes ;

comme elle, il est fini, bien qu'il n'existe nulle part de borne. En tous cas, si nous acceptons la force de répulsion cosmique, que suppose la théorie de la relativité, nous devons logiquement accepter en même temps la nature fermée de l'espace, qui va de pair avec elle dans la théorie, exactement de même que nous admettons qu'un corps matériel ne peut jamais atteindre une vitesse supérieure à celle de la lumière ou, pour prendre un exemple tout simple, qu'il ne peut pas y avoir sur la surface de la Terre de distance supérieure à 20 000 km.

On a pu évaluer la valeur du « rayon de l'univers » (le tiers de la longueur totale d'une ligne « droite » fermée sur elle-même) à environ 5 milliards d'années-lumière. Ce rayon se dilate et doublera en 1,2 milliards d'années.

A ceux qui renonceront avec regret à l'idée d'un monde illimité, il reste toujours possible d'imaginer que tout notre Univers — celui que nous pouvons connaître — n'est qu'une unité, un atome, d'une construction beaucoup plus vaste.



LA RÉCESSION DES NÉBULEUSES

# L'ORIGINE DES MONDES

**L'**ORIGINE des mondes et leur évolution sont des problèmes qui ont toujours passionné l'humanité, mais les explications imaginées par nos lointains ancêtres pour résoudre ces problèmes nous paraissent maintenant d'une fantaisie puérile. La cosmogonie n'a pu commencer à devenir une science qu'après qu'ont été connues les lois fondamentales de la mécanique et de la physique. Cependant, pour le moment, les théories gardent un caractère nettement spéculatif.

Une question préalable doit être posée : Sommes-nous sûrs que les lois de la mécanique et de la physique, telles que nous les connaissons, sont valables dans toute l'étendue de l'Univers, et aussi dans tout le passé et dans le futur de cet Univers ? Nous sommes bien forcés d'admettre cette validité universelle, faute de quoi nous tomberions dans l'arbitraire et la fantaisie.

Reconnaissons aussi que nous ne possédons pas encore une connaissance parfaite des lois de la nature. Il est probable que celles que nous admettons avec le plus de confiance ne constituent qu'une première approximation, de même que les lois fondamentales de la mécanique de Newton ont dû être complétées par la théorie de la relativité.

Les premières théories cosmogoniques ont tenté d'expliquer l'origine du système solaire. C'est ce problème que nous étudierons en premier lieu.

## ORIGINE DU SYSTÈME SOLAIRE

Il est vraisemblable que les planètes proviennent du Soleil, dont elles se sont séparées pour une cause qu'il reste à découvrir. En effet, le Soleil et les planètes forment un système qui semble isolé dans l'espace. D'autre part, les planètes tournent toutes dans le même sens autour du Soleil et ce sens est aussi celui de la rotation du Soleil sur lui-même ; les trajectoires sont presque circulaires et toutes voisines du plan de l'équateur solaire. Enfin, les satellites eux-mêmes, à quelques exceptions près, tournent autour des planètes dans le même sens que les planètes autour du Soleil.

L'illustre mathématicien Laplace a admis l'existence primitive d'une immense masse gazeuse en rotation, à laquelle il a donné le nom de « nébuleuse » bien qu'elle ressemblât plutôt à une étoile géante, Antares, par exemple, dont l'atmosphère s'étend sur des dimensions comparables à celles qu'occupe le système solaire entier. En se contractant sous l'effet de sa propre gravité, cette nébuleuse

a dû, d'après les lois de la mécanique, tourner de plus en plus vite et prendre, par suite, une forme de plus en plus aplatie. Laplace a supposé que, lorsque la force centrifuge à l'équateur est devenue supérieure à la force de gravité, la nébuleuse a abandonné, dans son plan équatorial, une faible fraction de matière, qui a formé un anneau plat analogue à l'anneau de Saturne ; la contraction se poursuivant, plusieurs anneaux se seraient ainsi formés ; chaque anneau se serait ensuite condensé en une planète gazeuse, qui à son tour, par un mécanisme analogue, mais à plus faible échelle, aurait créé ses satellites.

L'hypothèse de Laplace a été acceptée avec confiance pendant plus d'un siècle ; on a maintenant reconnu qu'elle doit être abandonnée ou réformée. Voici les principaux arguments qu'on peut lui opposer :

1° Une rotation suffisante pour permettre la formation des anneaux aux distances où se trouvent actuellement les planètes aurait dû communiquer au noyau une vitesse de rotation bien supérieure (au moins 100 fois) à celle que possède le Soleil ;

2° Un anneau fluide ne donnerait pas, par sa condensation, une planète, mais une multitude de particules, comme celles qui constituent les anneaux de Saturne, ou un ensemble de petites planètes ou astéroïdes, comme ceux qui se trouvent entre Mars et Jupiter.

3° L'organisation du système solaire est plus complexe qu'on ne le croyait à l'époque de Laplace ; des satellites tournent dans le sens inverse du sens général ; un des satellites de Mars a une période de révolution plus courte que la période de rotation de la planète ; les astéroïdes présentent un enchevêtrement d'orbites, etc.

On a donc cherché d'autres théories, capables d'expliquer la faible énergie de rotation du Soleil. On a pensé à la collision du Soleil avec une autre étoile ou, simplement, au passage d'une étoile dans le voisinage immédiat du Soleil ; les forces d'attraction auraient arraché de la matière aux deux astres, et cette matière se serait ensuite condensée pour former des planètes. On a d'ailleurs imaginé plusieurs formes pour cette théorie de la rencontre. Celle proposée vers 1900 par un astronome et un géologue américains, Moulton et Chamberlin, admet que le passage tout proche d'une étoile a provoqué de gigantesques marées dans la masse du Soleil ; suivant le mécanisme connu des marées terrestres, de la matière s'est trouvée projetée en dehors du Soleil, à la fois dans la direction de l'étoile et dans la direction diamétralement opposée ;

par l'effet du mouvement des deux astres, cette matière progressivement éjectée aurait formé autour du Soleil deux bras, présentant quelques analogies avec ceux d'une nébuleuse spirale. Une partie de cette matière se serait dispersée dans l'espace ou serait retombée sur le Soleil ; le reste se serait condensé d'abord en petits noyaux, puis en planètes. D'après la théorie de Jeans, le Soleil n'avait, à l'époque de sa rencontre avec une autre étoile, qu'un faible mouvement relatif par rapport à cette dernière ; vers celle-ci s'est détaché un immense filament gazeux, en forme de cigare, dont la région centrale, en se refroidissant progressivement, a donné naissance aux planètes. Comme il reste toujours difficile ou même impossible d'expliquer, dans les hypothèses précédentes, la grande vitesse des planètes sur leurs orbites, on a aussi examiné le cas où le Soleil aurait été primitivement une étoile double, dont le compagnon aurait été brisé par une collision, les fragments formant les planètes.

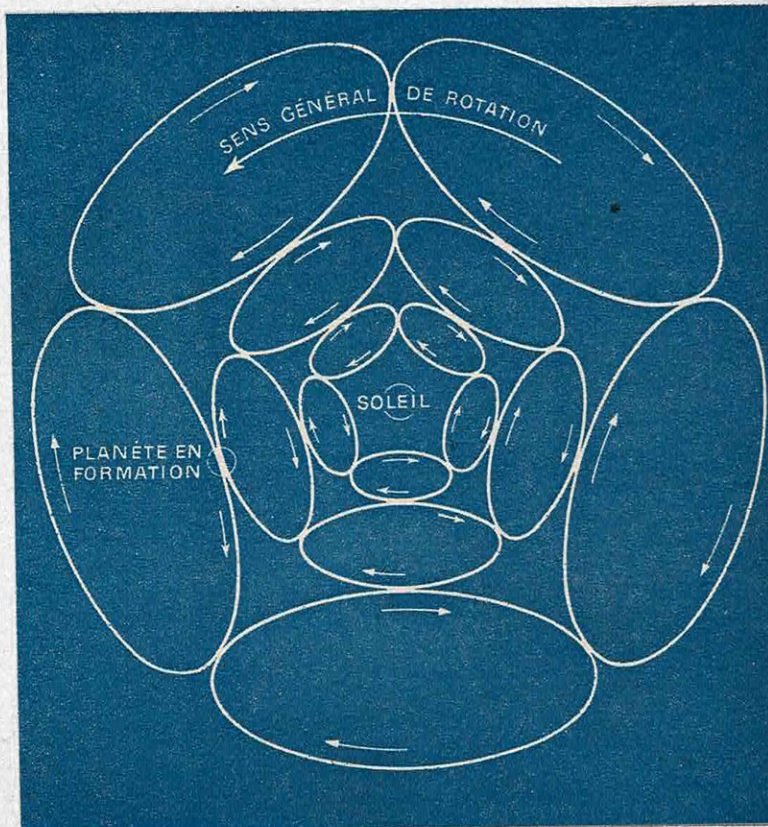
De même que l'hypothèse de Laplace, la théorie de la « collision », sous l'une ou l'autre de ses formes, a recueilli pendant longtemps la faveur générale. Elle aussi se heurte pourtant à de graves objections : les étoiles sont si distantes les unes des autres et leurs vitesses si faibles — relativement — que la probabilité d'une rencontre efficace est extrêmement faible ; il est déjà très surprenant qu'un système planétaire ait pu se former dans notre Galaxie depuis que le monde existe ; le système solaire aurait donc un caractère tout à fait exceptionnel, que des observations récentes semblent contredire, comme nous l'avons vu. Enfin, il reste douteux que la matière gazeuse éjectée par le Soleil puisse jamais se condenser en planètes.

La théorie vers laquelle penche actuellement la préférence de nombreux astronomes est celle qui a été proposée en 1945 par Weizsaecker. Ce savant reprend, en somme, l'idée de la nébuleuse imaginée par Laplace ; plus exactement, il admet que le Soleil a été entouré par une nébuleuse en rotation, de forme aplatie et de faible masse. Cette nébuleuse ne tournait pas en bloc à la façon d'une roue, mais ses particules constituantes tournaient suivant les lois de Kepler, c'est-à-dire que celles situées

vers l'intérieur parcouraient leurs orbites plus vite que celles de l'extérieur, de la même manière que les particules des anneaux de Saturne autour de la planète ou que l'ensemble des planètes autour du Soleil. Les différences de vitesses entre des portions voisines y ont créé des forces de frottement considérables, qui ont eu pour effet, d'une part, de dissiper dans l'espace une portion de la nébuleuse, et, d'autre part, de produire des tourbillons dans la masse restante. Ces tourbillons, très stables, étaient disposés en plusieurs couches concentriques autour du Soleil, présentant des analogies avec des couches de roulements à billes. Ultérieurement enfin, la matière se serait condensée sur les cercles séparant les diverses couches de tourbillons et les noyaux de condensation, en grossissant, auraient formé les planètes. Un résultat remarquable est qu'en admettant des couches de tourbillons composées, chacune, de 5 éléments, la théorie conduit à une disposition des planètes qui concorde très bien, jusqu'à Uranus, avec la loi de Bode.

## ORIGINE DES ÉTOILES

En ce qui concerne la formation des étoiles, l'idée généralement acceptée ressemble à celle déjà proposée par Laplace, qui ignorait l'existence des galaxies, mais qui supposait que le Soleil ou les autres étoiles se sont formés par la concentration d'une matière



### FORMATION DES PLANÈTES D'APRÈS WEIZSAECKER

Les planètes se seraient formées progressivement aux points de contact des divers systèmes tourbillonnaires.



LA NÉBULEUSE SPIRALE N.G.C. 598 DU TRIANGLE, PHOTOGRAPHIÉE AU MONT WILSON (POSE 8 h 50 mn.)

très diffuse. On admet maintenant que cette matière est précisément celle qui constitue les galaxies. On observe, en effet, parmi les galaxies, tous les degrés possibles de condensation. D'autre part, la théorie montre qu'une grande masse de gaz en rotation doit se fragmenter, parce que la force centrifuge dépasse la force de gravité, et que les fragments ainsi formés doivent avoir des masses sensiblement égales à celles que possèdent les étoiles. L'opinion qui prévaut est que cette formation d'étoiles se poursuit encore actuellement dans notre Galaxie, par condensation de la matière interstellaire; certains astronomes ont suggéré que de nombreux « trous noirs » de la Voie Lactée correspondent à de telles étoiles en formation.

Diverses hypothèses ont été envisagées pour expliquer la formation des étoiles doubles, qui sont très nombreuses, notamment celle d'une « rencontre » ancienne des deux composantes; mais on croit plutôt qu'une étoile double proviendrait de la scission d'une étoile simple initiale, trop massive.

## ORIGINE DES GALAXIES

Nous arrivons enfin au problème le plus vaste, celui qui concerne l'origine des galaxies. Nous rencontrons ici deux courants d'idées tout à fait opposés: pour les uns, la matière existait initialement dans l'espace sous une forme extrêmement diffuse et elle s'est condensée en galaxies; les autres, guidés par la théorie de l'expansion de l'Univers, croient à une évolution exactement en sens inverse.

Le mécanisme proposé pour expliquer la formation des galaxies à partir d'une matière uniformément diffuse dans l'espace ressemble à celui qui fait se condenser en gouttelettes la vapeur d'eau à sa sortie d'une chaudière: il est analogue à celui dont nous venons de parler à propos de la condensation en étoiles de la manière d'une galaxie. Dans une masse de gaz ou de poussière, chaque particule attire les particules voisines et tend à former un noyau de condensation; mais un tel noyau n'est stable que s'il résiste à l'ac

tion destructrice des particules environnantes. Or, de même que les étoiles se forment dans les galaxies, la théorie montre que les noyaux qui ont pu se créer avec la matière de toutes les galaxies connues, supposée initialement dispersée dans l'espace total qu'elles occupent, sont précisément des galaxies. En admettant qu'elles sont animées d'un mouvement de rotation, les théoriciens ont tenté d'expliquer ensuite leurs variations progressives de forme.

Les théories expansionnistes admettent que le déplacement vers le rouge des spectres des nébuleuses lointaines est dû au mouvement de ces galaxies, les vitesses étant, comme on l'a vu, proportionnelles aux distances. La conception de l'« Univers en expansion » nous surprend, car elle heurte les idées traditionnelles sur le temps et l'espace ; mais elle est en accord avec la théorie si féconde de la relativité. On montre, en effet, que l'Univers sphérique fini, décrit par cette théorie, ne peut pas être stable, c'est-à-dire qu'il ne peut pas garder des dimensions constantes. Il semble donc logique d'interpréter le rougissement de la lumière des galaxies lointaines par une dilatation de l'Univers. Au taux actuellement mesuré, les distances qui séparent les galaxies entre elles doubleraient en un temps un peu supérieur à un milliard d'années. Si nous admettons une vitesse d'expansion constante et si nous remontons par la pensée vers le passé, nous sommes amenés à imaginer que les dimensions de l'Univers ont été de plus en plus petites... jusqu'à un moment où la condensation de la matière a été telle qu'il est impossible de remonter plus loin. Certains veulent voir là l'origine du monde ou sa « création ». Il est très remarquable que la vitesse observée pour la récession des nébuleuses conduit à fixer la date de cet événement à 2 ou 3 milliards d'années en arrière, en bon accord avec l'estimation de l'« âge » de la Terre.

Avec son **hypothèse de l'atome primitif**, l'abbé Lemaître va plus loin ; selon lui, le monde serait né sous la forme d'un seul atome, qui s'est fragmenté parce qu'il était radioactif. La masse de cet atome était donc égale à celle de tout l'Univers, et ce dernier remplissait initialement l'espace sphérique très petit — astronomiquement parlant — du noyau de cet atome. À l'appui de son hypothèse, l'abbé Lemaître invoque divers arguments ; il rappelle notamment que la radioactivité, loin d'être une propriété spéciale à quelques corps, est un phénomène tout à fait général ; il signale la faveur de plus en plus grande accordée à l'idée que les corps actuels proviennent de transformations radioactives anciennes. D'autre part, la fragmentation de la matière semble conforme au principe général de la dégradation de l'énergie. Enfin, il apparaît impossible que les atomes lourds se soient formés par combinaison des atomes légers ; il est plus vraisemblable qu'ils proviennent de la destruction d'atomes encore

plus lourds. L'atome primitif n'aurait pas été nécessairement celui d'un élément transurannique, mais plutôt un isotope de très grande masse des éléments actuellement connus, peut être simplement du neutron. Enfin les rayons cosmiques dateraient de sa désintégration et circuleraient depuis lors dans le monde fermé.

Si l'hypothèse de l'abbé Lemaître nous séduit, à la fois par sa hardiesse et sa simplicité, elle ne s'impose pas, du point de vue scientifique, dans l'état actuel de nos connaissances. Certains savants, notamment ceux auxquels répugnent les idées d'un commencement du monde et du temps, ont montré que, si un univers relativiste est instable, la solution de l'expansion n'est pas la seule possible. Il se peut que le monde soit parti d'un état d'expansion infinie, qu'il se soit contracté jusqu'à un maximum de condensation, pour repartir ensuite vers une dispersion infinie. Il se peut aussi qu'il oscille périodiquement entre un volume minimum et un volume maximum.

Bien qu'elle présente de nombreuses analogies avec les théories relativistes, la conception défendue par le savant anglais Milne en diffère profondément sur les points essentiels. Pour les partisans de la relativité, l'espace est fini et fermé ; c'est lui qui se dilate, et non les galaxies qui se déplacent par rapport à lui. Pour Milne, au contraire, l'Univers se dilate réellement dans un espace infini, conforme aux vieilles idées classiques, et cette dilatation a pour origine une véritable « explosion » initiale. Il y a là, on le voit, des distinctions subtiles que seul un examen approfondi permet de saisir complètement.

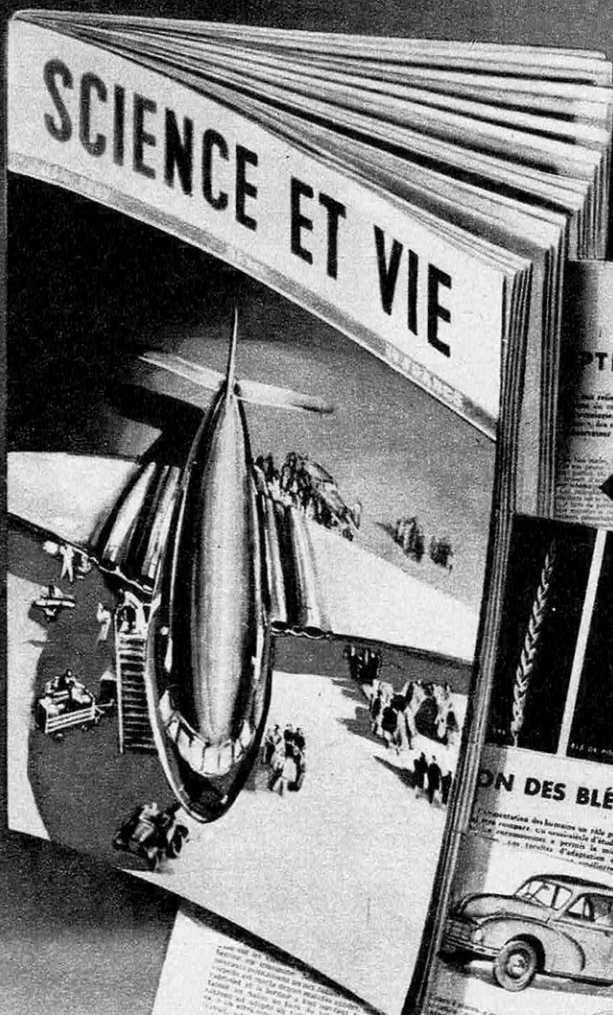
Cet exposé sommaire ne donne qu'une idée très élémentaire des diverses hypothèses cosmogoniques. Il semblera même à certains que quelques-unes de ces hypothèses sont paradoxales ; en réalité, elles sont toutes logiques et rationnelles.

Les pessimistes prétendent que ces théories sont purement et uniquement des jeux de l'esprit qui n'apportent aucune contribution à notre connaissance du monde. Mais on ne doit pas oublier le rôle fondamental joué par l'hypothèse dans le développement de la science, rôle qui a été mis en évidence maintes fois, notamment par de grands savants comme Henri Poincaré. C'est toujours l'idée qui guide l'observation ou l'expérimentation, et, inversement, celles-ci doivent contrôler les élans de l'imagination toujours prête à les devancer et à deviner la suite. Sans doute notre connaissance de l'Univers est trop limitée et trop imparfaite pour que nous puissions encore nous former avec certitude une vue d'ensemble sur l'origine des mondes et leur évolution.

Dès maintenant, cependant, un fait mérite de retenir notre attention : le succès croissant des théories qui admettent, sous une forme ou sous une autre, l'expansion de l'Univers.

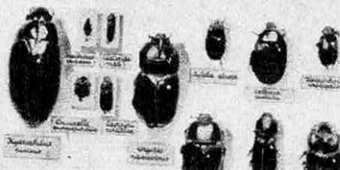


# Au cours de 1949 SCIENCE ET VIE a publié :



## INSECTES

Des études en cours ou en termination...  
de collectionneur... Leur genre...  
l'existence... dans l'eau...  
l'existence... en creusant...  
l'existence... à chaque pas.

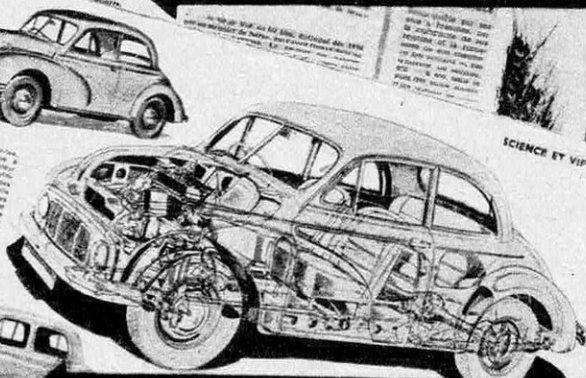


20 Articles sur LES SCIENCES NATURELLES

## ON DES BLÉS

l'existence des blés... se fait...  
par... les...  
l'existence... à partir...  
l'existence... d'adaptation...

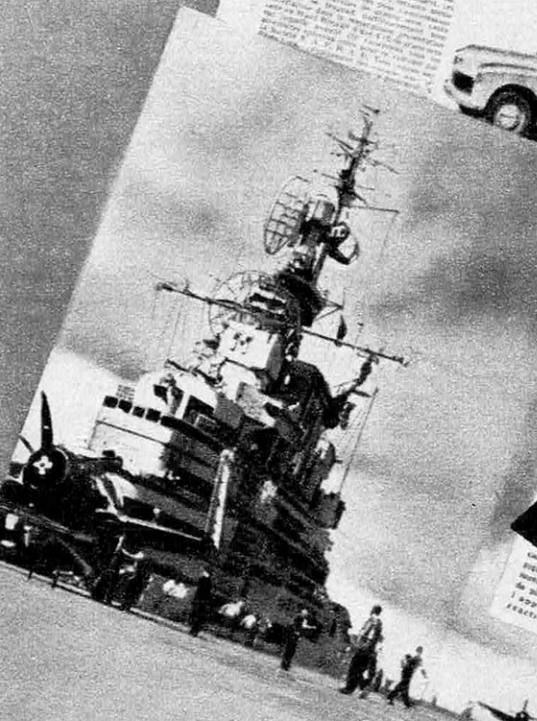
14 Articles sur L'AGRICULTURE



12 Articles sur L'AUTOMOBILE, LA MÉCANIQUE

## LE PORTE-AVIONS STRATÉGIQUE FORTERESSE DE 65 000 TONNES RÈGNERA SUR LES MERS

17 Articles sur LA MARINE ET L'AVIATION ...



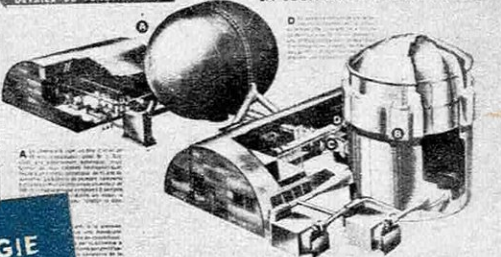


Le matériel de guerre au service d'une rivalité pacifique  
**L'ÉQUIPEMENT MODERNE DES MISSIONS POLAIRES**

Longueurs les régions polaires sont dominées par les conditions et les températures, les plus dures que connaisse le monde. Elles ont imposé à l'homme le développement d'un matériel moderne et sophistiqué pour l'accomplissement de ses missions polaires.

Les missions polaires sont des opérations d'exploration et de recherche scientifique. Elles sont menées dans des conditions extrêmes de froid et de solitude. Le matériel moderne permet de vaincre ces difficultés et d'assurer le succès de ces missions.

**LA SOUFFLERIE DE NORTH AMERICAN**



DÉTAILS DU FONCTIONNEMENT  
A... B... C... D...  
Le fonctionnement de cette soufflerie est basé sur le principe de la compression adiabatique. Elle est utilisée pour générer des courants d'air à haute vitesse et basse température.

**...20 articles sur la MÉDECINE, la PHYSIOLOGIE, 15 sur l'INDUSTRIE et les CHEMINS DE FER, 12 sur le CINÉMA et la PHOTOGRAPHIE, 10 sur l'ÉLECTRICITÉ et la RADIO, 7 sur l'ASTRONOMIE, 5 sur l'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, etc, etc.**

**LA CULTURE DE L'AN...**



**RÉCOLTE PAR AN : 80 MILLIONS DE FRUITS MURISSANT EN VINGT MOIS**

**Les fruits**... **Les légumes**... **Les céréales**... **Les légumes secs**...  
La production agricole est en constante augmentation grâce aux progrès de la technologie et de la culture intensive.

**PROSPECTION DU PÉTROLE ET FORAGE DES PUITS EN MER**

La prospection du pétrole en mer est une opération complexe qui nécessite l'utilisation de plateformes offshore et de navires spécialisés. Le forage des puits permet d'extraire le pétrole des réservoirs souterrains.

**Les Arts ménagers**

Une collection de machines et appareils pour le foyer, illustrés dans un style technique et détaillé.

- MACHINE À TRICER
- MACHINE À Coudre
- ACHATEUR DE VENTILATEUR
- MACHINE À LÉVER
- MÉTALLOLOGUE
- MOULIN À CAFÉ
- SEAU
- JARRE
- PLATEAU
- FRIGIDIFÈRE
- LAVERIE
- ARROSEUR
- SEAU À CHAUFFAGE
- CHIFFONNIÈRE
- MATINÉE
- MÉTALLOLOGUE
- APPAREIL
- LOSTRE
- ÉLECTRICITÉ DU FOYER
- TELEVISION
- COMPLÈMENT DE BIEN
- CHIFFONNIÈRE
- EAU CHAUDE ET LAVAGE
- ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE
- VENTILATEUR
- ÉLECTRICITÉ
- FILTRE À CAFÉ
- REFRIGÉRATOR
- COMPLÈTE DE BIEN
- LAMPES ÉLECTRIQUES
- APPAREILS
- COUVERTURE CHIFFONNIÈRE
- COUVERTURE CHIFFONNIÈRE
- BAIGNEUR ENCRETE
- ÉCLAIRAGE COIFFEURS
- LAVERIE
- LAVERIE
- LAVERIE
- RADIATEUR
- TENDRETTES
- LAMPES
- COMPLÈMENT DE BIEN
- COMPLÈMENT DE BIEN

**A côté de LA SCIENCE**

Un article illustré sur des sujets scientifiques et techniques, incluant des images de machines et de personnes travaillant.

**d'un pont en soufflerie**

**Un concurrent du nylon**

**Traitement des ossements par les hormones**

**Un modèle de cristal de fer**

**L'origine de la soie**

**Location autoroutière des places d'acier**

**Traitement des ossements par les hormones**

**Chefs-d'œuvre de l'horlogerie moderne**

**LA FABRICATION EN SÉRIE DES MONTRES DE HAUTE PRÉCISION**

Le travail en série nécessite une extrême précision, et il peut paraître paradoxal d'être en mesure d'obtenir à l'aide de machines, une telle précision.

**L'ANATOMIE DE LA MONTRE**

**Le mécanisme**

**Le ressort**

**Le système anti-chock**

**Le réglage**

**L'hygiène**

**MONTRES D'HIER ET D'AUJOURD'HUI**

SOLEIL MOUV. QUADRANTE  
HEURE  
LUNE SECONDE  
QUANTIÈME MOIS  
MINUTES DE LA TROUSSE

**DIFFICULTÉ DE LA FABRICATION EN SÉRIE**

Les montres de haute précision sont des œuvres d'art qui nécessitent une grande expertise et des matériaux de qualité.

**LIBRAIRIE-IMPRIMERIE**  
**GAUTHIER-VILLARS**  
 55, Quai des Grands-Augustins,  
 PARIS (6<sup>e</sup>)

Tél. Danton 05-10 + R. C. Seine 99506

Envoi dans toute la France et l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris. (Chèques postaux : Paris 29323.) Frais de port en sus.

- CONSTAN.** — Cours d'Astronomie et de Navigation. 3 volumes 1936-1946. Tome I : 500 fr. — Tome II : 1.000 fr. — Tome III ..... 500 fr.
- COUDERC (Paul)**, ancien Elève de l'Ecole Normale Supérieure, Professeur agrégé de l'Université, Astronome à l'Observatoire de Paris, Prix Nobel de Chimie. — **L'Architecture de l'Univers.** Préface de J. PERRIN, Membre de l'Institut. 3<sup>e</sup> édition entièrement refondue. In-8 (21-14) de xii-136 pages, avec 17 figures et 10 planches hors texte; 1947 ..... 250 fr.
- **Dans le champ solaire.** In-8 de vii-237 pages, avec 35 figures et 36 planches hors texte dont un spectre solaire; 1932 ..... 400 fr.
- JEANS (Sir James), LEMAITRE (l'Abbé), SITTER (W. de), EDDINGTON (Sir Arthur), MILNE (E. A.), MILLIKAN (R. A.)** — **Discussion sur l'Evolution de l'Univers.** D'après le Rapport du Meeting du Centenaire de l'Association britannique pour l'Avancement des Sciences. (Londres, 1931). Traduction française et Avant-propos par Paul Couderc, ancien Elève de l'Ecole Normale Supérieure, Professeur agrégé de l'Université. In-8 (23-14) de xii-70 pages; 1933 ..... 150 fr.

**LES PLUS GRANDS**  
**DISQUES**  
**ASTRONOMIQUES**  
**DU MONDE ENTIER**

ont été fondus par  
**LA VERRERIE D'OPTIQUE**  
**SCIENTIFIQUE**

**PARRA-MANTOIS ET C<sup>ie</sup>**

11, Chemin-de-Ronde  
**LE VÉSINET (Seine-et-Oise)**



**DEVENEZ DESSINATEUR**  
**DE PUBLICITÉ**  
**DE MODE**  
**ou DÉCORATEUR**

Une maquette d'affiche vaut  
 de 25.000 à 80.000 francs.  
 Un dessin de mode  
 de 5.000 à 15.000 francs.  
 Une décoration varie  
 entre 10.000 et 100.000 francs.

Si le dessin vous intéresse, c'est qu'il existe en vous des aptitudes qui ne demandent qu'à s'exercer dans l'une des professions du dessin.

**Chez vous, à temps perdu, au plus bas prix, suivez les cours d'une grande école spécialisée.** Par la suite, vous serez l'ancien élève d'une école réputée de laquelle sont déjà sortis des dessinateurs de grande valeur.

Demandez-nous notre brochure n° S. 409 sur les Métiers d'Art

**ACADÉMIE DES ARTS MODERNES** Direction **L.K. DERRYX**  
 Ecole Sup<sup>a</sup> de Métiers d'Art, 66, Rue de la Pompe, Paris-16<sup>e</sup> - Déclarée au Ministère de l'Éducation Nationale  
 Enseignement sur place et par correspondance



**SOCIÉTÉ D'HORLOGERIE DU DOUBS**  
106, RUE LAFAYETTE — PARIS

La plus importante maison de vente directe en France vous offre les prix les plus bas en supprimant les intermédiaires. Votre satisfaction vous est garantie. En effet tout envoi retourné dans les trois jours sera remboursé ou échangé immédiatement sans discussion.



N° 2611 - **Boîtier chromé**, fond acier inoxydable, verre optique, cordonnet soie, garantie un an ..... **3.985 fr.**  
Avec bracelet reptile **4.585 fr.**  
En plaqué or (sans contre-partie) ..... **5.350 fr.**

N° 2615 - **Boîtier chromé**, fond acier inoxydable, ancre 15 rubis, cordonnet soie, garantie un an ..... **2.997 fr.**  
Avec verre Genève . . . **3.685 fr.**  
Avec bracelet reptile, majoration de..... **600 fr.**

N° 2612 - **Montre de dame**, bracelet reptile, verre optique, boîtier chromé, ancre 15 rubis, garantie un an..... **5.800 fr.**  
Même article en plaqué or (sans contre-partie) et fournitures suisses ..... **7.800 fr.**



N° 2616 - **Boîtier chromé**, fond acier inoxydable, mouvement 15 rubis, carrée, garantie un an ..... **2.950 fr.**  
Avec verre optique très bombé..... **3.550 fr.**

N° 2629 - **Chronomètre**, mouvement suisse, 17 rubis, 2 poussoirs, garantie un an **10.950 fr.**  
Le même antimagnétique et cadran lumineux..... **12.500 fr.**

**UN CADEAU** attend chaque acheteur sur présentation ou envoi de cette annonce. N'attendez pas plus longtemps pour profiter de cette offre exceptionnelle — Une visite s'impose — Si vous ne pouvez vous déplacer, demandez notre magnifique catalogue.