

# **Astronomie Astrophysique**

Tout le catalogue sur  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)




**Agnès Acker**

# **Astronomie Astrophysique**

DUNOD

Illustration de couverture :  
La nébuleuse d'Orion M42 en infrarouge.  
© ESO / J. Emerson/VISTA. Cambridge Astronomical Survey Unit

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	 <p><b>DANGER</b> LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	---	--

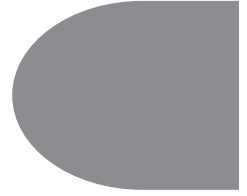
© Dunod, Paris, 2013

ISBN 978-2-10-057640-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# AVANT-PROPOS



*À l'homme de ma vie*

*« Voici les réflexions qui doivent toujours te préoccuper : quelle est la nature de l'Univers ? Quelle est la mienne ? Quels sont les rapports entre ma nature et celle de l'Univers ? »*  
(Pensées pour moi-même – Livre II, IX – Marc Aurèle, 121-180)

La science, et en particulier la recherche astronomique, connaissent un développement prodigieux en ce XXI<sup>e</sup> siècle, et peuvent apporter de robustes éléments de réponse à ces questions existentielles – traversant les siècles. Cet ouvrage souhaite s'inscrire dans cette démarche, en présentant un condensé pertinent des données accumulées depuis les bases posées dès l'Antiquité, jusqu'aux impressionnants résultats d'aujourd'hui, et aux questionnements restant à explorer (l'origine des larges structures de matière baryonique ? des masses de gaz très chaud ? les interactions avec les trous noirs ? la matière noire ?...).

Des images et schémas spécifiques sont abondants, dont 32 planches en couleurs ; le lecteur pourra trouver « en ligne » ou au foyer de son propre télescope d'autres images de haute qualité à insérer dans les divers chapitres. De petits exercices émaillent les pages, en réponse à des questions sur les calculs de masses, vitesses, températures, durées de vie... De nombreux renvois attestent de l'interpénétration des chapitres, car plusieurs phénomènes se déclinent à diverses échelles (exemple des disques d'accrétion et jets bipolaires).

Les premiers chapitres restent très proches de ceux présentés dans les éditions précédentes ; car des concepts et outils de base sont incontournables pour comprendre la matière, le rayonnement, la mécanique, les structures et évolutions des astres isolés ou associés en groupes. Quelques recours aux équations d'équilibre et de transfert nous amènent à déchiffrer le visible pour sonder l'invisible (l'intérieur des étoiles, les phases primordiales de l'Univers), et compléter ainsi la vaste palette des dimensions, masses, densités, températures, luminosités, âges, des astres et du cosmos.

## Remerciements

Des discussions et interactions précieuses ont contribué à l'ouvrage ; j'adresse ma reconnaissance à chacune et chacun, collègues, doctorants, étudiants (dont les amis du DU de l'observatoire de Paris, et membres du « Cercle », en particulier Daniel Levert), lecteurs attentifs (en particulier Jean-Pierre Déchoz, m'ayant permis de corriger des coquilles et erreurs).

Je remercie spécialement mes collègues et amis : Suzy Zahn et ses passionnants dialogues sur la cosmologie moderne ; Hélène Courtois et ses superbes représentations de l'Univers local façonné par de violents courants cosmiques – ainsi que Daniel Pomérade, son complice ; James Lequeux et en particulier ses graphes si généreusement transmis ; Delphine Porquet et ses précieuses informations sur les AGN ; Andrzej Udalski (Varsovie) et

## Avant-propos

les fabuleux résultats de OGLE ; Hans-Ulrich Keller (Stuttgart) pour ses données et graphes rigoureux sur les planètes ; Coralie Neiner pour les multiples facettes des Be et de l'astéromologie ; Fabrice Lamareille ; Aurélien Crida et Frédéric Durillon ; ceux qui partagent leur savoir sur les ondes : Patrick Rocher (IMCCE), Christian Larcher (Comité de Liaison Enseignants-Astronomes), Robert Brugerolles (« gazouillis » des actualités scientifiques) ; mes collègues de l'observatoire de Strasbourg : Nicolas Grosso et ses éclaircissements sur les très jeunes et proto-étoiles, ainsi que Patrick Guillout ; Pierre Fernique (CDS), Jean-Louis Halbwachs (étoiles doubles), Philippe Vonflie (responsable de la bibliothèque), et bien sûr Hervé Wozniak, directeur de l'observatoire.

Grand merci aussi à René Voltz (physique théorique), Françoise Combes, Hélène Roussel et Arnaud Siebert (galaxies), Nadège Meunier (Soleil et Terre), Hans-Ulrich Keller (système solaire). Je remercie les organismes scientifiques qui ont permis l'utilisation de documents et images, en particulier l'Observatoire Européen Austral (ESO, Lars Lindberg Christensen), l'Agence Spatiale Européenne (ESA), la NASA et ses prolifiques missions HST, Chandra, Spitzer...

Je remercie Jean-Michel Acker, maître de l'éditeur d'équations ; les virtuoses du dessin scientifique : Éric Chapelle (Espace Mendez-France, Poitiers), Michel Dumas, Jacques Ganeval, et tout particulièrement Alfred Rihn, ami fidèle qui vient de nous quitter, et sut reproduire avec patience et talent la plupart de mes schémas.

# CLÉS DE LECTURE

Divers symboles et abréviations sont utilisés tout au long du livre, généralement en langue anglaise : leur signification est donnée ci-dessous, et l'index permettra de les retrouver dans le texte.

## Catalogues et relevés

AGK2 = Allgemeine Gesellschaft Katalog 2  
DSS = Digitalized Sky Survey  
FK3 = Fundamental Katalog 3  
GOODS = Great Observatories Origins Deep Survey  
HD = Henri Draper  
HUDF = Hubble Ultra Deep Field  
IC = Index Catalogue  
NGC = New General Catalogue  
SDSS = Sloan Digital redshift Sky Survey  
2dF - 6dF = 2 degree Field - 6 degree Field  
2MASS = Two Micron All Sky Survey

## Instituts, observatoires et télescopes (sol)

ALMA = Atacama Large Millimetric Array  
ATCA = Australia Telescope Compact Array  
CFH = Canada-France-Hawaï  
ESO = European Southern Observatory  
- ISAAC = Infrared Spectrometer and Array Camera  
- NAOS = Nasmyth Adaptive Optics System  
- NTT = New Technology Telescope (La Silla)  
- VLT = Very Large Telescope (Paranal)  
- E-ELT = European Extremely Large Telescope  
IRAM = Institut de Recherches et d'Application des Méthodes de développement  
OHP = Observatoire de Haute-Provence  
- OGLE = Optical Gravitational Lensing Experiment

## Missions spatiales

BATSE = Burst and Transient Source Experiment  
CGRO = Compton Gamma Rays Observatory  
CHANDRA = Chandra (sekhar)  
COBE = COsmic Background Explorer  
DIRBE = Diffuse Infrared Background Experiment  
EXOSAT = European X-ray Observatory Satellite  
GAIA = Global Space Astrometry mission  
HST = Hubble Space Telescope  
- ACS = Advanced Camera for Survey  
- FOS = faint Object Spectrograph  
- NICMOS = Near Infrared Camera & Multi Object Spectrometer  
- STIS = Space Telescope Imaging Spectrograph  
IRAS = InfraRed Astronomical Satellite  
IRST = InfraRed Space Telescope (Japon)  
ISO = InfraRed Space Observatory  
IUE = International Ultraviolet Explorer  
JWST = James Web Space Telescope  
MGS = Mars Global Surveyor  
ROSAT = Röntgen Satellit  
SMM = Solar Maximum Mission  
SOHO = SOLar and Heliospheric Observatory  
SIRTF = SPITZER InfraRed Telescope  
XMM = X-ray Multi-Mirror satellite

## Objets et concepts astronomiques

AGB = Asymptotic Giant Branch  
AGN = Active Galactic Nucleus  
AVO = Astronomical Virtual Observatory  
CMB = Cosmic Microwave Background  
CDM = Cold Dark Matter  
CV = cataclysmic Variable  
DHR = Diagramme Hertzsprung-Russell  
DIBs = Diffuse Interstellar Bands  
EBR = Extragalactic Background Radiation  
IMF = Initial Mass Function  
LPV = Long Period Variable (VLP)  
LSR = Local Standard of Rest  
MC = Magellanic Cloud (L = large, S = small)  
MIS = Milieu Interstellaire  
NEO = Near-Earth-Object

PAH = Polycyclic Aromatic Hydrocarbon  
QUASAR = QUasiStellar Astronomical Radiosource  
RC = Red Clump  
RGB = Red Giant Branch  
RX = Rayons X  
SED = Spectral Energy Distribution  
SFR = Stellar Formation Rate  
SN = SuperNova  
SP = Séquence Principale (MS = Main Sequence)  
TN = Trou Noir  
ULIRG = Ultra Luminous Infrared Galaxy  
WIMP = Weakly Interacting Massive Particule  
YSO = Young Stellar Object

# UNITÉS ET CONSTANTES

*Les unités du système international (SI) sont publiées par le Bureau International des Poids et mesures (dernières valeurs publiées en 1992).*

**Temps** = la seconde : 1 s est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

**Longueur** = le mètre : 1 m est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde.

**Température** = le kelvin. Le point triple de l'eau est atteint pour 273,16 K soit 0,01 °C. Correspondances : 0 K = - 273,15 °C ; 0 °C = 32° Fahrenheit (échelles : 1 K = 1 °C = 1,8 °F).

**Masse** : le kilogramme est l'unité de masse égale à la masse du prototype international du kilogramme en platine irridié conservé au Bureau International.

**Masse atomique** = uma (ou dalton Da) : 1 uma = 1/12 de la masse d'un atome de Carbone 12 =  $1,660\ 56 \times 10^{-27}$  kg =  $10^{-3}$  kg mole<sup>-1</sup>. La masse atomique est proche du nombre de nucléons.

**Énergie** = le joule : 1 J (kg s<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>) est l'énergie nécessaire pour exercer une force de 1 kg/s<sup>2</sup> (1 Newton) sur un mètre, ou pour produire une puissance de 1 Watt pendant 1 seconde (W s). C'est aussi l'énergie nécessaire pour déplacer une charge électrique de 1 Coulomb à travers une différence de potentiel de 1 Volt (C V). Un électron-volt est l'énergie nécessaire pour transporter un électron libre à travers une différence de potentiel de 1 Volt : 1 eV =  $1,6022 \times 10^{-19}$  J.

**Intensité lumineuse** : voir page 107

## Constantes

**Vitesse de la lumière c** = 299 792 458 m s<sup>-1</sup>

**Constante de la gravitation G** =  $6,672\ 59 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> s<sup>-2</sup>

**Constantes atomiques et des particules :**

- **des gaz parfaits**  $\mathfrak{R}$  = 8,3143(4) J mole<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> = 1,986 5 cal mole<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

- **de Planck h** =  $6,626\ 20(5) \times 10^{-34}$  Js

- **de Boltzmann k** =  $1,380\ 62(6) \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>

- **de Stefan-Boltzmann  $\sigma$**  =  $5,669\ 56 \times 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>

- **de Wien** =  $0,289\ 789 \times 10^{-2}$  m K

- **Masse du proton** (au repos) =  $1,672\ 661 \times 10^{-27}$  kg = 1 836 × masse de l'électron  
Énergie équivalente (masse × c<sup>2</sup>) =  $0,9382 \times 10^9$  eV.

## Unités astronomiques

**Unités de longueur = l'unité astronomique** : 1 ua = 149 597 870 700 m.

**L'année de lumière** : 1 al =  $9,460\ 730\ 472\ 5808 \times 10^{15}$  m = 63 241,077 10 ua = 0,306 601 393 87 pc.  
C'est la distance parcourue par la lumière en une année julienne dans un espace-temps vide.

**Le parsec** : 1 pc =  $3,085\ 677\ 5807 \times 10^{16}$  m = 206 264.806 248 ua al = 3,261 563 7763 al.  
C'est la distance d'une étoile dont la parallaxe annuelle est égale à une seconde de degré (voir page 97), c'est-à-dire la distance à laquelle 1 ua est vue sous un angle d'une seconde de degré (soit  $1/206\ 264,806 \sim 4,85 \cdot 10^{-6}$  radian).

**Unités de temps = le jour** : 1 j = 86 400 secondes. L'année julienne = 365,25 jours soit 31 557 600 secondes. L'« origine des temps » ou « époque standard » est J2000, soit le 1 janvier 2000 à 12 h de l'échelle de temps utilisée.

**Unité de masse** = la masse du Soleil : 1  $M_{\odot}$  =  $1,9889 \times 10^{30}$  kg.

**Unité de rayon** = le rayon du Soleil : 1  $R_{\odot}$  = 695 997 km (rayon équat.de la Terre = 6 378 136,3 km).

**Unité de luminosité** = la luminosité (puissance) du Soleil : 1  $L_{\odot}$  =  $3,826\ 10^{26}$  W.



# TABLE DES MATIÈRES



<b>Avant-propos</b>	<b>V</b>
<b>Clés de lecture</b>	<b>VII</b>
<b>Unités et constantes</b>	<b>VIII</b>
<b>Chapitre 1. Imaginer l'Univers</b>	<b>1</b>
1.1 La démarche scientifique	1
1.2 Une découverte par étapes	3
1.2.1 L'Antiquité préhellénique	3
1.2.2 Une vision géocentrique de l'Univers	5
1.2.3 Une vision héliocentrique de l'Univers	8
1.2.4 Les nouvelles cosmologies : la Galaxie Avènement de l'astrophysique	10
1.2.5 L'univers des galaxies	13
1.2.6 Vision actuelle de l'Univers	14
1.3 Les points forts de l'astronomie du <sup>XXI</sup> <sup>e</sup> siècle	15
<b>Chapitre 2. Déciffrer le rayonnement des astres</b>	<b>18</b>
2.1 La lumière : ondes et photons	18
2.1.1 Les ondes lumineuses	18
2.1.2 Les photons : nature corpusculaire de la lumière	23
2.2 Matière et rayonnement	24
2.2.1 Spectres de corps solides incandescents ou gazeux très chauds et comprimés	24
2.2.2 Spectres de corps gazeux	26
2.2.3 Spectres astronomiques	31
2.3 Les méfaits de l'atmosphère terrestre	35
2.3.1 L'extinction	35
2.3.2 Déviation du rayonnement stellaire	37
2.4 Les instruments	40
2.4.1 Description de divers types d'instruments	40
2.4.2 Résolution des instruments – Optique active et adaptative	48
2.4.3 Les récepteurs	50
2.4.4 Des instruments et équipements spécifiques	53
2.4.5 Les instruments multi-objets et les grands relevés	58
2.4.6 Les instruments de l'espace	59
2.4.7 Ondes gravitationnelles, astronomie gamma et « multi-messagers »	65
2.4.8 L'Observatoire Virtuel	69

## Table des matières

<b>Chapitre 3. Positions et mouvements des astres</b>	<b>71</b>
3.1 Les mouvements de la Terre	71
3.1.1 La rotation journalière	71
3.1.2 La révolution annuelle	73
3.1.3 Les perturbations	77
3.1.4 Le mouvement du système solaire dans la Galaxie	85
3.2 Repères et coordonnées	86
3.2.1 Les systèmes de coordonnées	86
3.2.2 Les relations entre coordonnées	89
3.3 Le temps astronomique	91
3.3.1 Le temps basé sur la rotation terrestre	91
3.3.2 Le temps des éphémérides basé sur la révolution annuelle de la Terre	95
3.4 Le mouvement apparent des astres	96
3.4.1 Mouvement apparent du Soleil	96
3.4.2 Mouvements de la Lune	100
3.4.3 Mouvement apparent des planètes	104
3.4.4 Mouvement apparent des étoiles	106
3.5 Les mouvements des étoiles dans la Galaxie	110
3.5.1 Mouvements propres et vitesses radiales	111
3.5.2 Vitesse radiale et rotation galactique	113
<b>Chapitre 4. Connaître les étoiles</b>	<b>116</b>
4.1 Distances	116
4.1.1 Les méthodes basées sur la mécanique céleste	116
4.1.2 Les méthodes photométriques	117
4.2 Luminosités	120
4.2.1 Grandeurs et magnitudes	120
4.2.2 Correction de l'absorption interstellaire	123
4.3 Températures stellaires	123
4.3.1 Types spectraux et température	123
4.3.2 Comment déterminer les températures ?	127
4.3.3 Le diagramme H-R température – luminosité	132
4.4 Dimensions	135
4.4.1 Mesure angulaire du diamètre	135
4.4.2 Calcul du diamètre pour les étoiles à distance connue	138
4.4.3 Calcul du diamètre par l'astérosismologie	138
4.4.4 Calcul du diamètre des étoiles pulsantes	139
4.4.5 Calcul du diamètre des étoiles doubles à éclipses	140
4.5 Rotation des étoiles – Champ magnétique	140
4.5.1 La rotation	140
4.5.2 Le champ magnétique	142

4.6	Masses	144
4.6.1	La masse des étoiles doubles	144
4.6.2	Relation masse - luminosité	146
4.7	Composition chimique	148
4.7.1	Détermination des abondances	148
4.7.2	Résultats : les abondances chimiques	149
4.8	Âges	153
4.8.1	L'évolution stellaire	153
4.8.2	La nucléo-cosmochronologie	153
4.8.3	L'astérosismologie	155
4.8.4	La gyrochronologie	156
4.9	Les étoiles doubles	156
4.9.1	Étoiles doubles visuelles	158
4.9.2	Étoiles doubles spectroscopiques	159
4.9.3	Systèmes binaires à éclipses	163
4.9.4	Étoiles doubles serrées à transfert de masse et cataclysmiques	166
4.9.5	Origine et évolution des étoiles doubles	172
<b>Chapitre 5. Analyser une étoile : le Soleil</b>		<b>175</b>
5.1	Propriétés globales de l'étoile Soleil	175
5.2	Photosphère et activité solaire	179
5.2.1	Granulation et taches : cycles solaires	179
5.2.2	L'origine magnétique des taches	182
5.2.3	Un cycle déterminé par la rotation différentielle	185
5.3	L'intérieur solaire : oscillations et héliosismologie, tacholine	185
5.3.1	Oscillations « p » et « g » pour sonder l'intérieur du Soleil	186
5.3.2	Tacholine et champ magnétique solaire	187
5.4	Chromosphère et couronne	188
5.4.1	La chromosphère	188
5.4.2	La couronne	189
5.5	Relations Terre-Soleil	196
5.5.1	Actions du rayonnement solaire	196
5.5.2	Action des particules : vent solaire, rayons cosmiques	198
5.5.3	Effets sur les variations climatiques	201
5.6	La machine Soleil	204
5.6.1	Valeur et origine de l'énergie solaire	205
5.6.2	Les réactions nucléaires dans le cœur du Soleil	206
5.6.3	Le problème des neutrinos, traceurs du centre nucléaire du Soleil	209

## Table des matières

<b>Chapitre 6. Sonder l'intérieur des étoiles</b>	<b>210</b>
6.1 Contraindre les modèles : l'astérosismologie	210
6.2 Quatre équations pour décrire la structure d'une étoile	213
6.2.1 Conservation/distribution de la masse	214
6.2.2 Équilibre hydrostatique	214
6.2.3 Équilibre énergétique	215
6.2.4 Transfert du rayonnement	216
6.3 Les sources de la pression interne, conditionnant l'équilibre	221
6.3.1 L'énergie thermonucléaire	221
6.3.2 La pression des gaz dégénérés	223
6.4 Suivre la vie d'une étoile à travers le diagramme température-densité (centrales)	230
6.4.1 Du gaz parfait au gaz dégénéré	230
6.4.2 Les tracés de l'évolution des valeurs ( $\rho_c$ , $T_c$ ) selon les masses stellaires	231
6.5 Énergie stellaire par nucléosynthèses	232
6.5.1 Réactions de nucléosynthèses par fusion	232
6.5.2 Réactions d'additions de neutrons	237
<b>Chapitre 7. Suivre l'évolution des étoiles</b>	<b>240</b>
7.1 Les étapes de l'histoire d'une étoile	240
7.1.1 Protoétoiles	240
7.1.2 L'équilibre sur la « séquence principale » (SP)	247
7.1.3 Géantes rouges - Instabilités et pertes de masse	250
7.1.4 Stades finaux : étoiles dégénérées	263
7.2 Les étoiles variables, jalons de la vie des étoiles	270
7.2.1 Variables éruptives	270
7.2.2 Variables périodiques	274
<b>Chapitre 8. Le milieu interstellaire : gaz et poussières</b>	<b>280</b>
8.1 Interaction étoiles – milieu interstellaire. Structure du MIS	281
8.1.1 Écologie du MIS	281
8.1.2 Chauffage et refroidissement du MIS	281
8.1.3 Phases du MIS	283
8.1.4 Nébuleuses diffuses et enveloppes circumstellaires	283
8.2 Les poussières : Extinction – Nature des grains – Analyse du rayonnement	288
8.2.1 Extinction et rougissement	288
8.2.2 Nature des grains	290
8.2.3 Interaction poussières-rayonnement	293

8.3	Les gaz : Analyse du rayonnement – Chimie	296
8.3.1	Spectres d'absorption interstellaires dans les spectres stellaires	297
8.3.2	Spectres propres en émission	297
8.3.3	Chimie interstellaire	306
8.4	Les rayons cosmiques	311
8.5	Annexe - Analyse de raies nébuleuses	312
8.5.1	Excitation/déexcitation des atomes - Radiations	312
8.5.2	Détermination des paramètres physiques des nébuleuses	314
<b>Chapitre 9. Les systèmes planétaires : les petits compagnons d'une étoile</b>		<b>319</b>
LE SYSTÈME SOLAIRE		319
9.1	Les mouvements des planètes	320
9.1.1	Lois de Kepler	320
9.1.2	Paramètres des orbites planétaires	320
9.2	Les propriétés physiques	323
9.2.1	Planètes telluriques et joviennes	324
9.2.2	Dimension, masse, température, énergie	325
9.2.3	Atmosphères planétaires	328
9.3	Les planètes telluriques	331
9.3.1	Mercury	331
9.3.2	Vénus	333
9.3.3	La Terre	336
9.3.4	Mars	342
9.4	Les planètes joviennes	346
9.4.1	Jupiter	348
9.4.2	Saturne	350
9.4.3	Uranus	352
9.4.4	Neptune	353
9.5	Les « petits corps » du système solaire	355
9.5.1	Les planètes naines et les astéroïdes	355
9.5.2	Les comètes	358
9.5.3	Météoroïdes, météores et météorites	362
9.6	Le milieu interplanétaire	364
9.7	Origine et évolution du système solaire	366
9.7.1	Les données d'observation	366
9.7.2	Cosmogonie	368
LES EXOPLANÈTES		371
9.8	Méthodes de détection	371
9.8.1	Imagerie directe – Astrométrie (effet gravitationnel)	371
9.8.2	Variations de vitesses radiales (effet gravitationnel)	372

## Table des matières

9.8.3 Variations photométriques : transit planétaire (effet photométrique)	373
9.8.4 Microlentilles gravitationnelles (effet photométrique)	374
9.8.5 Chronométrage (effet gravitationnel)	375
9.9 Caractéristiques des exoplanètes	375
9.10 La zone d'habitabilité des planètes	376
<b>Chapitre 10. Notre galaxie « La Voie Lactée »</b>	<b>378</b>
10.1 Architecture et cinématique	378
10.1.1 Dimensions et masse	379
10.1.2 Cinématique	381
10.2 Populations stellaires	387
10.2.1 Les disques de la Galaxie	387
10.2.2 Les sphéroïdes de la Galaxie	392
10.2.3 Le super-disque galactique ( <i>Vast Polar Structure VPOS</i> )	393
10.3 Histoire de la Galaxie	395
10.3.1 Formation de la Galaxie	395
10.3.2 L'évolution chimique	397
10.4 Le centre galactique	402
10.4.1 Structure du noyau galactique	402
10.4.2 Modèle et nature de l'objet central	405
10.5 Les amas de la Galaxie	407
10.5.1 Les amas globulaires	407
10.5.2 Les amas ouverts	409
<b>Chapitre 11. Les galaxies et les grandes structures de l'Univers</b>	<b>414</b>
11.1 Indicateurs de distance, rotation des galaxies et expansion de l'espace	414
11.1.1 Indicateurs primaires	415
11.1.2 Indicateurs secondaires	415
11.1.3 Indicateurs tertiaires	415
11.1.4 Rotation des galaxies et critère cinématique de Tully-Fisher	416
11.1.5 Expansion de l'univers des galaxies et critère cosmologique de Hubble	418
11.2 Galaxies spirales et non actives	422
11.2.1 Galaxies « normales » (non actives)	422
11.3 Galaxies infrarouges (starbursts) à sursauts de formation stellaire	427
11.3.1 Les propriétés des galaxies infrarouges	427
11.3.2 Le phénomène « starburst » augmente avec $z$	428
11.4 Galaxies à noyau actif (AGN ou NAG)	430
11.4.1 Galaxies de Seyfert ( <i>Radio-Quiet</i> )	431
11.4.2 Quasars ( <i>Radio-Quiet</i> )	433

11.4.3 LINERs ( <i>Radio-Quiet</i> )	436
11.4.4 BL Lacertae, BLAZAR, FR ( <i>Radio-Loud</i> )	436
11.4.5 Le trou noir central	436
11.5 L'âge des galaxies	438
11.6 Masse des galaxies et « matière noire »	440
11.6.1 Rapport Masse - Luminosité	440
11.6.2 Mouvements et théorème du viriel	442
11.6.3 Matière noire	443
11.7 Amas de galaxies et grandes structures	444
11.7.1 Amas de galaxies	444
11.7.2 Du superamas local aux grandes structures	446
11.8 Le rayonnement extragalactique	448
<b>Chapitre 12. Vers les dimensions cosmologiques</b>	<b>451</b>
12.1 Les fondements	451
12.1.1 Des contraintes théoriques	451
12.1.2 Les bases cosmologiques observées	456
12.2 Les modèles d'univers cosmologiques	461
12.2.1 Les paramètres cosmologiques	461
12.2.2 Des variétés d'univers possibles	462
12.2.3 Univers évolutifs	465
12.3 Contraindre les paramètres cosmologiques par les observations	465
12.3.1 Le diamètre apparent	465
12.3.2 La densité et le paramètre $\Omega_M$	467
12.3.3 Le décalage spectral et les paramètres $\Omega_M$ et $\Omega_\Lambda$	<b>468</b>
12.3.4 Le spectre du fond diffus cosmologique (FDC ou CMB)	468
12.3.5 Conclusions : l'Univers est plat, et l'expansion paraît accélérée	469
12.4 Évolution de la matière, « univers contenu »	471
12.4.1 L'organisation de la matière calculée dans un cadre thermique	471
12.4.2 Un scénario hiérarchique de formation des galaxies, contraint par les observations	477
12.4.3 Le « début » de l'Univers	481
<b>Bibliographie</b>	<b>483</b>
<b>Index</b>	<b>485</b>





# IMAGINER L'UNIVERS

# 1

L'astronomie est la plus ancienne des sciences ; il est probable que, dès que l'homme pré-historique se tint debout, il regarda le ciel, fasciné par la majesté brillante du Soleil et de la Lune, et par la myriade de points scintillants sur la voûte du ciel nocturne. Par ses réflexions, par son ingéniosité, l'homme acquit peu à peu la possibilité de se situer par rapport à l'univers, et de décrire et d'expliquer son fonctionnement.

## 1.1 LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

L'astronomie est avant tout *une vision du monde réel* dont seule une partie nous est accessible. Les données d'observation relatives à la partie observable de cet univers sont confrontées avec un ensemble de lois, lois d'une part cohérentes au point de vue théorique, et d'autre part vérifiées par l'expérience dans les laboratoires terrestres. À partir de là, un *modèle* d'univers est élaboré, et adopté si toutes les prédictions découlant du modèle sont vérifiées par les observations (Figure 1.1). Un modèle est retenu comme scientifiquement valable, si toutes les épreuves de cette démarche ont été passées avec succès. Le modèle est strictement dépendant de la quantité et de la qualité des observations — dépendant de la technologie disponible —, et du niveau des connaissances théoriques. Le modèle d'univers est donc évolutif à travers les civilisations et les âges. À l'époque où les outils mathématiques étaient rudimentaires, et où les observations se faisaient à l'œil nu, la compréhension de l'univers était fort réduite, l'ignorance étant compensée par un appel à la magie, entraînant par exemple les croyances astrologiques.

Actuellement, la science astronomique se base sur une quantité impressionnante d'observations au sol et dans l'espace, confrontées à des modèles et simulations de plus en plus complexes. L'astronomie moderne s'appuie sur les développements les plus poussés des mathématiques, des sciences physiques, aussi bien en physique nucléaire qu'en mécanique quantique. Cette « reine des sciences » n'est plus dogmatique : la « vérité » scientifique n'est pas absolue, elle est toujours en construction, elle se compose des strates des « vérités » énoncées et vérifiées à travers les temps, comme l'illustre l'encadré suivant.

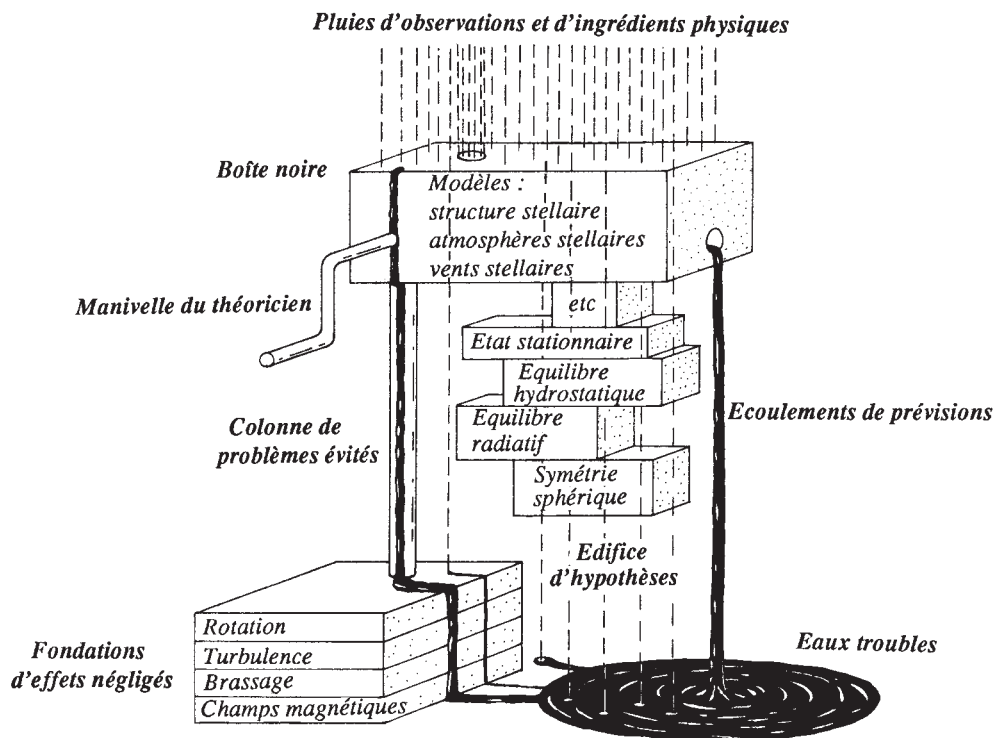


Figure 1.1 La démarche scientifique de l'astronome.

L'ensemble des observations et l'arsenal des lois physiques expérimentées dans les laboratoires terrestres, sont confrontés aux modèles produits par les théoriciens, basés sur des hypothèses (raisonnables), et négligeant (raisonnablement) certains effets secondaires (mais qui rejoignent parfois les paramètres fondant les modèles ; par exemple la rotation). Les prédictions découlant des modèles sont soumises à des vérifications par l'observation, ce qui peut conduire à abandonner certaines théories, ou à les affiner. (Dessin Ganeval, d'après P. Conti).

### Évolution d'un concept : la gravitation

Vers 1690, Isaac Newton a établi la **loi de la gravitation** pour expliquer la chute observée des corps, effectuant la synthèse entre les lois de Galilée relatives aux mouvements des corps terrestres, et les lois de Kepler sur les mouvements des corps célestes, rendant la loi de la gravitation « universelle » ; en ce début du III<sup>e</sup> millénaire, elle trouve encore d'éclatantes confirmations dans la réussite des missions spatiales. Vers 1930, Albert Einstein a étendu la loi de Newton, en a tiré des implications physiques, cosmologiques, en énonçant la **théorie de la relativité générale**, qui relie la géométrie de l'espace-temps à la distribution des masses dans l'espace.

Tant que le « rayon »  $R$  d'espace étudié autour d'une masse  $M$  donnée est supérieur à la valeur  $I = \frac{GM}{c^2}$ , où  $G$  est la constante de la gravitation et  $c$  la vitesse de la lumière (voir le tableau des constantes), on peut appliquer la mécanique newtonienne ; c'est le cas de l'environnement terrestre (si  $R$  est le rayon de la Terre,  $\frac{GM}{Rc^2}$  est égal à  $\sim 10^{-9}$ ).

Par contre, dans le cas d'une étoile à neutrons ou dans le cas de l'univers dans son ensemble, le rapport  $\frac{I}{R}$  est proche de 1, donc l'espace et le temps ne sont plus newtoniens.

Au milieu du  $xx^e$  siècle, Fritz Zwicky nota que l'analyse des mouvements de rotation des galaxies conduisait à une masse gravitationnelle plus grande que celle déduite de la luminosité. Il proposa donc l'existence d'une **matière « noire »** non observable, dont la masse invisible permet de concilier observation et théorie, et en particulier d'expliquer les curieux mirages gravitationnels observés bien plus tard. Autre solution pour se passer de cette matière exotique : on modifie légèrement la loi de Newton pour les faibles champs de gravité, avec la théorie MOND « *Modified Newtonian Dynamics* » proposée dès 1983.

Tout au long des siècles, la gravitation pose des interrogations sans fin, de par sa nature et son action, de portée illimitée. La Relativité Générale indique que l'Univers dans son ensemble est régi par la « **force** » de **gravitation** aux côtés de trois autres forces (unifiées dans les premiers moments de l'histoire de l'Univers). La gravitation s'exerce sur la masse, qui put doter les premières particules élémentaires grâce au mystérieux « **boson de Higgs** », évanescents et furtifs, dont la traque mobilise depuis 2008 d'énormes moyens financiers et de prodigieux équipements (LHC et Tévatron). Des vibrations de l'espace-temps, appelées « **ondes gravitationnelles** » (associées à de possibles *gravitons*) se propagent, engendrées par des masses accélérées lors de violents événements astrophysiques ; leur très difficile détection permettrait de sonder les premiers instants de l'Univers et le cœur des étoiles.

La gravitation reste une pièce maîtresse de l'astrophysique !

## 1.2 UNE DÉCOUVERTE PAR ÉTAPES

Tout au long des siècles, on a progressivement répertorié et décrit les constituants de l'univers, et déterminé pour chacun d'eux une distance, afin de découvrir l'architecture des astres du cosmos. Cinq étapes peuvent jaloner l'histoire de l'astronomie : (1) l'Antiquité de -3000 à -1000 ; (2) la période géocentrique jusqu'en 1500 ; (3) la période héliocentrique jusqu'en 1780, deux périodes fastes où les grands progrès concernaient essentiellement le système solaire. Vers 1850, l'accès aux distances des étoiles introduit de nouvelles dimensions (4), conduisant à la Galaxie, puis aux galaxies à partir de 1920 (5).

Ces étapes correspondent à la découverte de niveaux de structures de plus en plus étendus dans l'univers, imbriqués les uns dans les autres, et sont brièvement présentées ci-dessous à travers les faits marquants de personnages de chaque époque. L'astronomie se construit avec les « briques » apportées par chacun d'eux.

### 1.2.1 L'Antiquité préhellénique

Cette période, étudiée essentiellement par l'*archéoastronomie*, s'étend de -3 000 à -1 000. Les pyramides et temples égyptiens, ainsi que les alignements mégalithiques, de Stonehenge en particulier (Figure 1.2), ont été édifiés selon certains repérages astronomiques. Les observations des positions apparentes variables du Soleil et de la Lune, et des alignements stellaires apparents en forme de constellations, ont permis de définir des unités de temps, nécessaires en particulier pour le développement de l'agriculture et des voyages marins.

*Le temps* est lié depuis l'Antiquité aux mouvements de la Terre, qui devient, de ce fait, l'horloge naturelle des hommes.

Le jour est la durée de la rotation terrestre, divisée en 12 heures de clarté et 12 heures de nuit par les Babyloniens et les Égyptiens. Le cadran solaire, dont la version primitive était le gnomon, constituait la montre d'antan, la journée étant divisée en parties égales grâce à l'observation de l'ombre du style.



Figure 1.2 Disposition des pierres dressées de Stonehenge (Royaume-Uni).

Ces pierres édifiées de -2600 à -1800, permettaient de visualiser certaines directions astronomiques : LS = lever du Soleil ; CS = coucher du Soleil ; E = été ; H = hiver. L'axe de symétrie (bissectrice des angles définis par LSE et CSE, et LSH et CSH) indique la direction nord-sud. Voir le dessin de gauche qui montre le mouvement apparent du Soleil dans nos régions pour les solstices et les équinoxes. (Dessin Ganeval).

Le mois correspond à la durée de la lunaison, durée moyenne séparant deux aspects identiques de la Lune.

La semaine vient des Chaldéens, sa durée (couvrant environ un quart de la lunaison) étant reliée aux phases de la Lune. Mais le nom des jours est lié au nom des planètes, dans leur ordre apparent d'éloignement de la Terre.

Les Anciens ignoraient la nature des astres, ne connaissant ni la définition d'une planète, ni celle d'une étoile ; ils ignoraient les distances correctes, mais les estimaient d'après les durées de révolution apparente. La Lune est l'astre le plus proche, Saturne le plus lointain ; ces astres sont reliés selon un heptagone régulier étoilé, depuis le lundi lunaire au dimanche solaire (Figure 1.3).

Les Anciens avaient remarqué que le ciel nocturne change d'aspect. En observant l'environnement stellaire du Soleil juste après son coucher et juste avant son lever, les premières et les dernières étoiles de la nuit ne sont pas les mêmes tout au long de l'année : le Soleil semble se déplacer en un an devant une bande étoilée, que les Anciens ont divisée en douze « signes » du zodiaque (voir la figure 1.4, qui rappelle qu'en réalité on compte treize « constellations » du zodiaque). Le lever « héliaque » (lever précédant immédiatement le lever du Soleil) d'une étoile donnée du zodiaque marquait le début de chaque mois, et permettait de repérer les saisons, cette observation marquant ainsi une sorte de calendrier.

L'année est la durée de la révolution apparente du Soleil à travers les constellations du zodiaque. Elle commande le cycle de la vie sur Terre, à travers le découpage naturel en saisons. Chez les

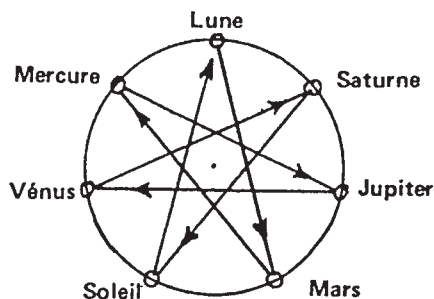


Figure 1.3 Origine du nom des jours de la semaine (dessin Rihn).

Chaldéens, l'année comprenait 354 jours formés de 12 mois alternés de 29 et 30 jours, l'écart étant comblé par un treizième mois tous les trois ans. Pour les Égyptiens un calendrier « vague » comportait des années de 365 jours qui débutaient le jour du lever héliaque de Sirius, dans la constellation *Canis Majoris* ; ce « jour de l'an » se plaçait en été, en pleine chaleur, d'où l'expression *canicule* que nous utilisons encore.

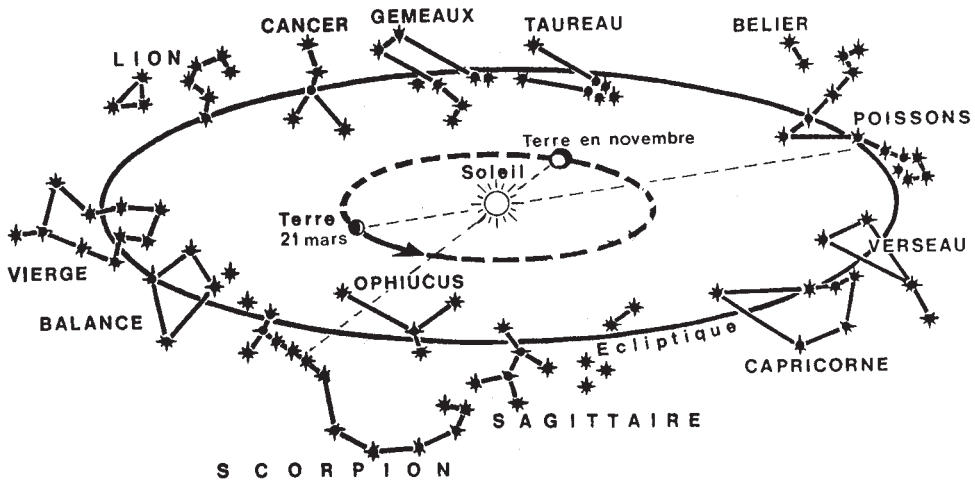


Figure 1.4 Mouvement apparent annuel du Soleil à travers les treize constellations du zodiaque situées le long de la bande écliptique du ciel.

Ce sont les étoiles opposées à la direction du Soleil qui ornent nos ciels nocturnes ; ainsi, en novembre, quand le Soleil « est dans le Scorpion et Ophiucus », ce sont les étoiles du Taureau qui brillent à minuit ; les étoiles visibles à minuit en hiver sont présentes dans la direction du Soleil dans le ciel d'été, mais invisibles à cause de l'atmosphère terrestre lumineuse (le bleu du ciel), sauf peu après le coucher du Soleil et peu avant son lever. (Dessin Ganeval).

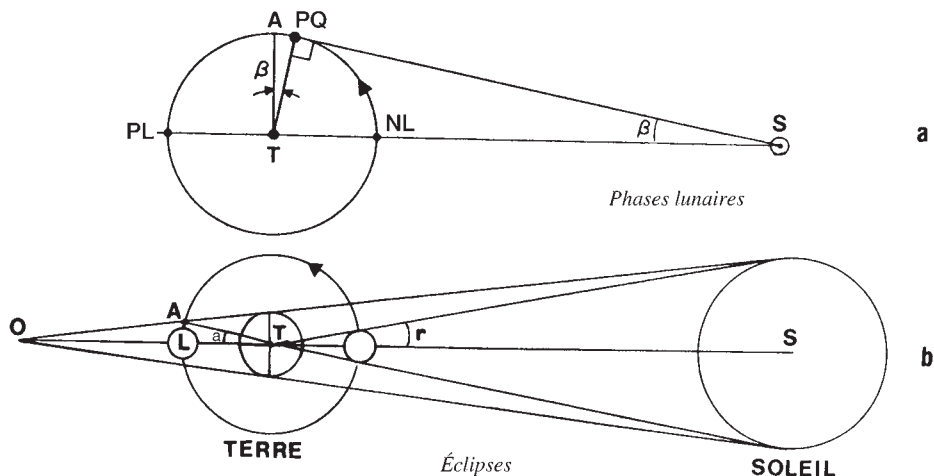
## 1.2.2 Une vision géocentrique de l'Univers

Les connaissances astronomiques se sont développées dans la Grèce ancienne, l'Afrique du Nord et le monde arabe, conduisant à un modèle d'univers géocentrique adopté d'environ -1000 à + 1500. Il est significatif de constater que les grands progrès à cette époque sont le fait d'habitants des régions méditerranéennes, où, dans la douceur des nuits, il faisait bon rêver, contempler et réfléchir...

Pour Thalès (-600), la Terre est plate et flotte sur l'eau sous la voûte du ciel. Anaxagore (-450) suppose que tous les astres sont sphériques, et construit une première théorie des éclipses. Pythagore (-530) et ses disciples, dont Philolaos (-400), Aristote et Eudoxe (-355), imaginent une Terre sphérique, en rotation autour d'un feu central, et entourée de dix sphères concentriques en cristal portant les planètes et les étoiles. La doctrine de « l'harmonie des sphères » établissait une analogie mathématique entre la répartition des astres et les intervalles musicaux : les Anciens pensaient que les immenses sphères portant les astres tournaient plus ou moins vite en produisant ainsi de puissantes notes musicales, dont le ton dépendait du rayon et de la vitesse de la sphère, l'ensemble des sons produisant un accord parfait. C'était déjà l'expression du désir humain d'avoir une vision globale de l'univers, une théorie unifiée...

Aristarque de Samos (-280) propose l'idée révolutionnaire d'un univers non centré sur la Terre, vision héliocentrique du système solaire qui ne fut adoptée que 1 800 ans plus tard. Ce modèle lui permit de calculer pour la première fois une valeur des distances entre la

Terre, le Soleil et la Lune (Figure 1.5) ; il faut ajouter qu'Aristarque avait mesuré un angle  $2\beta$  équivalent à 12 heures au lieu de 35 minutes, d'où un rapport de 19 au lieu de 387 entre les distances au Soleil et à la Lune.



**Figure 1.5 Distances de la Lune et du Soleil déterminées par l'observation (a) des phases lunaires et (b) des éclipses de Lune et de Soleil, méthode inventée par Aristarque de Samos (dessin Rihn).**  
(Voir les phases de la Lune en Figure 3.22)

**(a)** L'observation montre que, après correction du mouvement de la Terre, l'intervalle de temps entre la nouvelle lune (NL) et le premier quartier (PQ) est de 35 minutes plus court que la durée séparant le PQ et la pleine lune (PL). Si 360' correspondent à la durée d'une lunaison, la moitié de cet écart représente un angle  $\beta = 0,148^\circ = 0,002\ 583\ \text{rad} = LT/TS$ . Donc le rapport K entre les distances à la Terre du Soleil et de la Lune vaut 387.

**(b)** Les diamètres apparents de la Lune et du Soleil sont pratiquement égaux à  $r = 16'$ . Par ailleurs, l'angle a, correspondant à la demi-durée d'une éclipse de Lune, vaut 40'. Si  $R_\odot$ , R et  $R_L$  sont les rayons respectivement du Soleil, de la Terre et de la Lune, on peut écrire :

$$(R_\odot - R)/(R - LA) = K, \text{ avec } R_\odot = K.R_L \text{ et } LA = a/LT = a.R_L/r$$

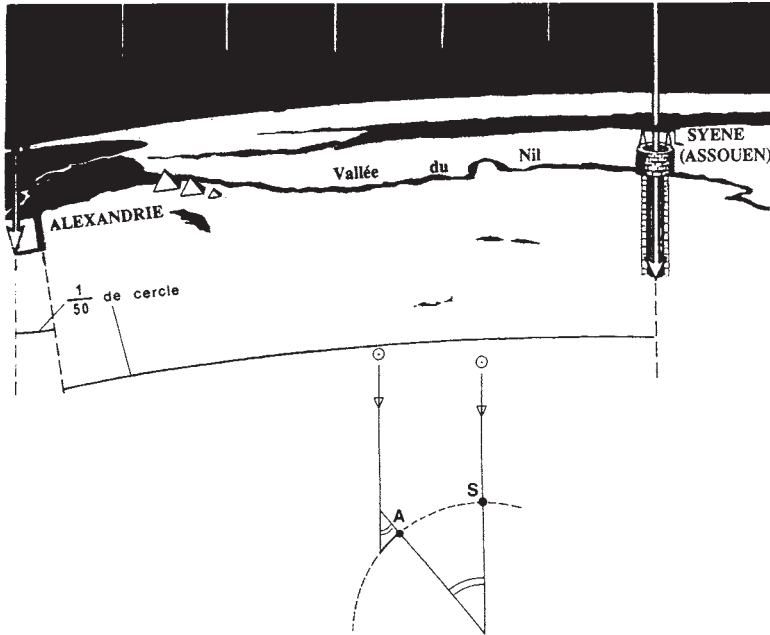
donc :  $R_L (1 + a/r) = R (1 + 1/K)$ , avec  $R_L = TL.r = r.TS/K$

$$TS = R (1 + K)/(r + a) = 150 \text{ millions km, si } R = 6\ 371 \text{ km et } r + a = 0,016\ 3 \text{ rad.}$$

À la même époque, Eratosthène (-250) détermine la valeur du rayon de la Terre, en supposant qu'elle est sphérique (Figure 1.6).

Hipparque (-150) étudie la durée des saisons, calcule la distance de la Lune grâce aux éclipses et, fait remarquable, il découvre le phénomène de *précession des équinoxes*. De plus, il dresse le premier catalogue d'étoiles, classant quelque 800 étoiles selon six « grandeurs » correspondant à leur éclat apparent. Hipparque a rassemblé les étoiles en constellations, ceci dans un but essentiellement pratique : moyens mnémotechniques de se souvenir de la suite de figures célestes servant de calendrier aux agriculteurs (constellations du zodiaque), ou de guides aux anciens marins méditerranéens. Il est certain que les aspects des constellations n'ont aucune ressemblance avec les figures mythologiques dont elles portent le nom. Il semble plutôt qu'à l'aide de ces noms, on pouvait inscrire des histoires dans le ciel, histoires liant par exemple les principales constellations de la ceinture concentrique au pôle Sud : l'histoire de Noé et du déluge est illustrée dans le fleuve Eridan, le Navire, le centaure sacrifiant sur l'autel etc.

**Remarque :** Nous savons aujourd'hui que la Terre tourne autour de l'axe pôle Nord-pôle Sud, entraînant un mouvement apparent des étoiles qui semblent tourner autour de cet axe et décrire des cercles autour des pôles. L'intersection de l'horizon d'un lieu avec une ceinture d'étoiles équidistantes du Pôle marque une direction déterminée sur l'horizon, direction indiquée par le lever ou le coucher de n'importe quelle constellation de cette ceinture. Ceci servait certainement de guide aux navigateurs.



**Figure 1.6 Détermination de la valeur du rayon terrestre par Eratosthène.**

Le jour du solstice d'été, à midi, le Soleil est à la verticale de la ville de Syène et se réfléchit au centre du puits ; le même jour, à Alexandrie, situé à environ 800 km de Syène, on observe à midi une ombre portée par un gnomon définissant un angle d'environ  $1/50$  de cercle. Ces mesures ont permis, deux siècles avant notre ère, de calculer une valeur d'environ 6 400 km pour le rayon terrestre. (Dessin Ganeval).

Ptolémée (150 apr. J.-C.) rassemble dans son œuvre principale, l'*Almageste*, les connaissances de l'époque ; il y décrit un modèle extrêmement raffiné du système solaire (Figure 1.7 a), qui resta en vigueur pendant 1 300 ans.

Al-Battâni (900) établit la durée de l'année et l'excentricité de l'orbite apparente du Soleil. Al-Sufi (950) découvre la « nébuleuse » d'Andromède. En 1054, les Chinois observent la supernova dont les restes deviendront la nébuleuse du Crabe. Ibn al Zergâla (1050) publie les *Tables de Tolède*. Averroès (1150) enseigne à Cordoue et y développe une école de réflexion sur l'univers. Gérard de Crémone (1200) traduit la science grecque et arabe au profit de l'Occident médiéval. Le petit-fils de Gengis Khan (1274) fonde l'observatoire de Maraga en Perse ; Ulug Beg (1400) construit un observatoire à Samarcande. Le Roi Alphonse X de Castille (1252) publie les *Tables alphonsines* de positions stellaires, qui seront corrigées par Regiomontanus (1450).

Thomas d'Aquin (1250), Dominicain, écrit : « Les théories astronomiques sont conçues pour sauver les phénomènes, mais s'avèrent nettement insuffisantes pour décrire la nature physique de l'univers ». Nicolas de Cuse (1450), philosophe allemand, déclare que l'univers est infini et ne peut avoir un centre fixe.



### 1.2.3 Une vision héliocentrique de l'Univers

Copernic (1543) publie son traité *De revolutionibus*, où il propose un modèle héliocentrique simple du système solaire (Figure 1.7b). Les calculs deviennent plus performants grâce à l'introduction des chiffres arabes, et à une table des sinus de 10'' en 10'' construite par Rheticus (1550). Les logarithmes sont inventés en 1614 par Napier (ou Neper, baron de Merchiston), qui, voulant faciliter les calculs des astronomes, s'est basé sur une idée ancienne, comparant les progressions arithmétique et géométrique ; plus tard, Briggs (1626) introduisit les logarithmes décimaux.

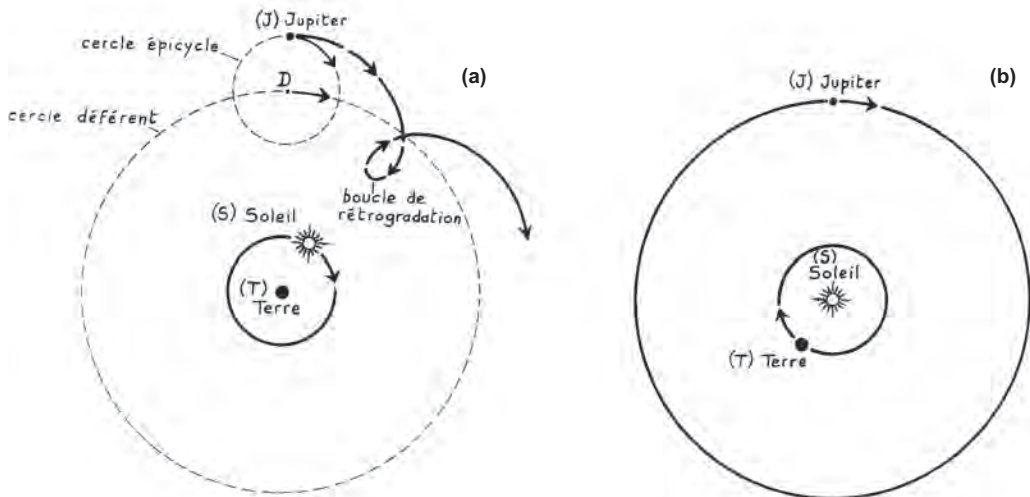


Figure 1.7 Les modèles de Ptolémée et Copernic pour le système solaire.

**(a) – Le modèle géocentrique de Ptolémée**

Afin de représenter au mieux les mouvements compliqués des planètes, Ptolémée (120-170 apr. J.-C.) imagina dans son *Almageste* que la planète J tourne sur un cercle « épicycle » dont le centre D décrit le cercle « déférent » lui-même centré sur la Terre. Les trajectoires planétaires complexes peuvent être reproduites en donnant chaque fois les valeurs convenables aux quatre paramètres : rayons des deux cercles et vitesses de parcours sur les deux cercles.

**(b) – Le modèle héliocentrique de Copernic**

La description est analogue à celle de Ptolémée, mais Copernic (1473-1543) plaça le Soleil au centre du système, ce qui est plus satisfaisant pour l'esprit puisque le Soleil est énorme et brillant. Les trajectoires apparentes des planètes résultent de la combinaison de l'orbite de la Terre autour du Soleil, et de celle de la planète autour du Soleil, orbites qui sont elliptiques — ce qui a été montré par Kepler (1571-1630).

Tycho Brahé (1575) a réuni un ensemble d'observations de qualité (observations à l'œil nu avec une précision de 1 minute d'arc), essentiellement consacrées à la planète Mars, en utilisant de grands quadrants et sextants montés dans son « château des étoiles », sur l'île de Ven située entre le Danemark et la Suède. De plus, en évaluant la parallaxe de certaines comètes, il a prouvé que ce sont des objets célestes, et non des phénomènes terrestres.

Kepler (1600) énonce les trois lois qui décrivent le mouvement des planètes autour du Soleil (Figure 1.8) ; voir le chapitre 3.

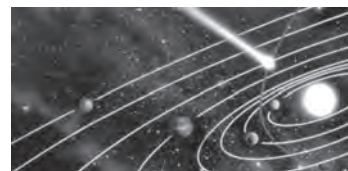


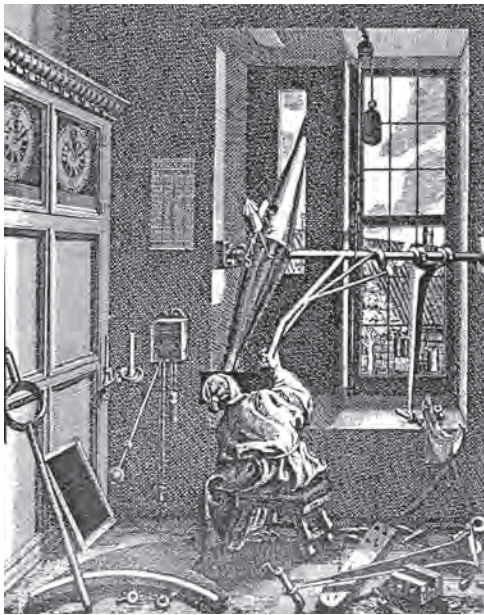
Figure 1.8 Mouvement des planètes autour du Soleil proposé par Kepler.

D'après H. U. Keller, *Kosmos Himmelsjahr*, 2003, éd. Frankh-Kosmos.



Galilée (1620) utilise la lunette optique pour observer les astres ; il découvre le relief lunaire, les quatre satellites principaux de Jupiter, des amas d'étoiles, les taches du Soleil, l'étoile double Mizar... Il énonce le principe d'inertie, et établit des lois du mouvement des corps.

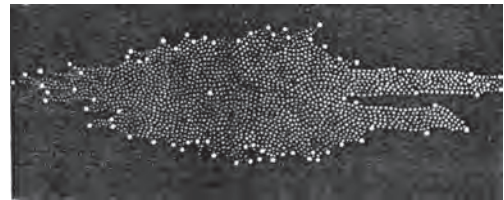
Descartes (1637) publie le *Discours de la méthode*, ainsi que des travaux sur l'optique et la théorie de l'arc-en-ciel ; il cherche à exprimer les phénomènes physiques sous une forme mathématique et à formuler une dynamique planétaire. Hevelius (1647) réalise une carte très complète de la Lune, et travaille à un catalogue stellaire. L'Observatoire de Paris est fondé (1667), avec Cassini et Picard qui détermineront la valeur moyenne du rayon terrestre (6 371,86 km) et de la parallaxe solaire (9,5"). Rømer (1676) mesure à Paris la vitesse de la lumière à partir de l'observation des éclipses de Io (Figure 2.2) ; à Copenhague, il construit la première lunette méridienne (Figure 1.9). Flamsteed (1676) fonde l'Observatoire de Greenwich, pour la détermination des longitudes terrestres nécessaire pour la navigation maritime ; Halley y calcule l'orbite de « sa » comète en 1682 et prédit son retour pour 1759.



1.9

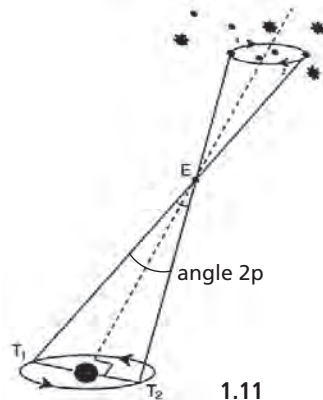
Figure 1.9 Machina domestica

Cet instrument des passages, précurseur de la lunette méridienne, fut installé par Rømer à Copenhague, en 1690. Figure tirée de *Astronomische Messwerkzeuge* de Repsold, d'après Horrebow.



1.10

Figure 1.10 Modèle de la Galaxie proposé par Hershell en 1784.



1.11

Figure 1.11 Détermination de la distance d'étoiles proches par la méthode de parallaxe trigonométrique, imaginée en 1838 par Bessel.

L'angle  $2p$  est d'autant plus grand que l'étoile E est plus proche de l'orbite de la Terre — située en  $T_1$  en été et  $T_2$  en hiver — autour du Soleil. Les distances ne sont pas à l'échelle. Ainsi, pour Sirius dont  $p = 0,4''$ , si  $T_1 T_2$  était de 1 m, la distance de Sirius (étoile E) au Soleil serait de 270 km.

Newton (1687), appelé souvent « l'architecte des forces cosmiques », énonce les lois d'inertie, d'accélération, d'action-réaction, et la loi de la gravitation universelle. Il décompose la lumière blanche en ses couleurs ; il construit le premier télescope.

Bradley (1728) découvre l'aberration en cherchant à mesurer une parallaxe stellaire, et mesure 3 000 positions d'étoiles.

Maupertuis (1736), puis Bouguer et La Condamine (1740), calculent l'aplatissement de la Terre aux pôles. Kant (1755) postule déjà l'hypothèse extragalactique, et construit un modèle de formation du système solaire. Ses travaux furent repris plus tard par Laplace (1796), qui formule l'hypothèse de la « nébuleuse primitive », publie son *Traité de mécanique céleste*, démontre la stabilité du système solaire, et évoque certaines singularités de la gravitation (les « trous noirs »).

Clairaut (1760), puis Lagrange (1780) développent le problème des trois corps et la théorie des perturbations. Lalande (1770) étudie les distances précises dans le système solaire par la mesure de parallaxes.

### 1.2.4 Les nouvelles cosmologies : la Galaxie Avènement de l'astrophysique

À partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, les astronomes déterminent la distance et la distribution des étoiles, à l'aide de télescopes monumentaux, pour accéder à un nouveau niveau de structure astronomique : la galaxie.

Herschel William (1784) construit plusieurs télescopes ; observateur assidu, il publie un catalogue de 434 étoiles doubles ; il détermine l'apex solaire, il découvre Uranus, et plusieurs nébuleuses dont les « nébuleuses planétaires ». Il étudie la distribution des étoiles, et propose une structure nouvelle, la galaxie (Figure 1.10), sorte d'ellipsoïde centré sur le Soleil, modèle qui sera repris et perfectionné par Kapteyn (1905).

Bessel (1838) effectue à l'Observatoire de Königsberg la première mesure de parallaxe, celle de 61 Cygni (parallaxe évaluée alors à 0,316'' et actuellement à 0,294'' ; figure 1.11), ouvrant la voie à la mesure de la distance des étoiles. W. Struve (1840) mesure la parallaxe de Vega (0,26''), et crée une lignée d'astronomes célèbres (son fils Otto, spécialiste des étoiles doubles, et son petit-fils Otto, étudiant l'hydrogène interstellaire).

Grâce aux nouvelles techniques de l'astrophysique, des distances peuvent être déterminées par des méthodes photométriques. La luminosité apparente mesurée  $l$  d'une étoile est proportionnelle à  $L/D^2$ , si  $L$  est la luminosité intrinsèque et  $D$  la distance. Cette distance pourra donc être calculée si la luminosité  $L$  est connue ; or  $L$  est lié à la température, donc au spectre des étoiles, dont l'observation permettra de trouver une valeur de la distance  $D$ .

Cette opération (et d'autres évaluations de distance) a été rendue possible grâce à l'avènement de l'astrophysique observationnelle et théorique. En voici quelques repères : Fraunhofer (1817) réalise les premiers spectres stellaires ; Fizeau (1849) et Foucault (1862) précisent la mesure de la vitesse de la lumière ; Kirchhoff (1859) étudie les spectres discontinus en émission et en absorption ; Pogson (1850) établit l'échelle photométrique des magnitudes stellaires ; Secchi (1868) effectue la première classification de spectres stellaires, étendue (1890) à 10 000 étoiles par Pickering, et Cannon perfectionne plus tard (1924) ce travail pour 225 000 étoiles.

La théorie progresse à travers Balmer (1885) qui explique le spectre visible de l'hydrogène. Schwarzschild (1890) construit la théorie des atmosphères stellaires. Planck (1906) établit les lois de rayonnement du corps noir, faisant la synthèse des travaux antérieurs de Stefan (1879), Boltzmann (1884) et Wien (1893). Hertzsprung et Russell (1913) réalisent le diagramme Luminosité-Température des étoiles. Milne, Eddington, Unsöld, Chandrasekhar, Ambarzoumian (1923 à 1930) étudient la structure interne des étoiles et les processus de l'évolution stellaire.

Les données d'observation de plus en plus nombreuses furent rassemblées dans des catalogues, encore en usage de nos jours. Henry Draper (1890) publie son célèbre catalogue (HD) qui contiendra 225 000 étoiles (1924). Les frères Henry (1889) photographient des étoiles

jusqu'à la magnitude 14, d'où la décision de démarrer la « Carte photographique du ciel ». J. Herschell (1864), fils de W. Herschell, réalise le *General Catalogue* (GC) de 5 000 nébuleuses, qui sera complété par Dreyer (1888) pour former le *New General Catalogue* (NGC) contenant 12 000 nébuleuses. Plus tard (vers 1940), Boss publie le *General Catalogue* de 33 342 étoiles, et Kopf publie son *Dritter Fundamental Katalog* (FK3).

Grâce à toutes ces données et recherches, la distance de nombreuses étoiles put être calculée, et l'architecture de l'univers des étoiles fut mieux comprise, montrant définitivement que les constellations ne sont que des regroupements apparents d'étoiles vues dans la même direction depuis la Terre (Figures 1.12, 1.13 et 1.14).

L'application d'une technique photométrique permit à Shapley (1918) de calculer un modèle de la Galaxie où le Soleil se trouve à près de 30 000 AL du centre galactique (Figure 1.15), agrandissant la taille de la Galaxie d'un ordre de grandeur. Les bras spiraux (Figure 1.16) découverts peu à peu par l'observation d'étoiles bleues et de gaz interstellaire furent expliqués en termes d'ondes de densité par Lindblad (1920).

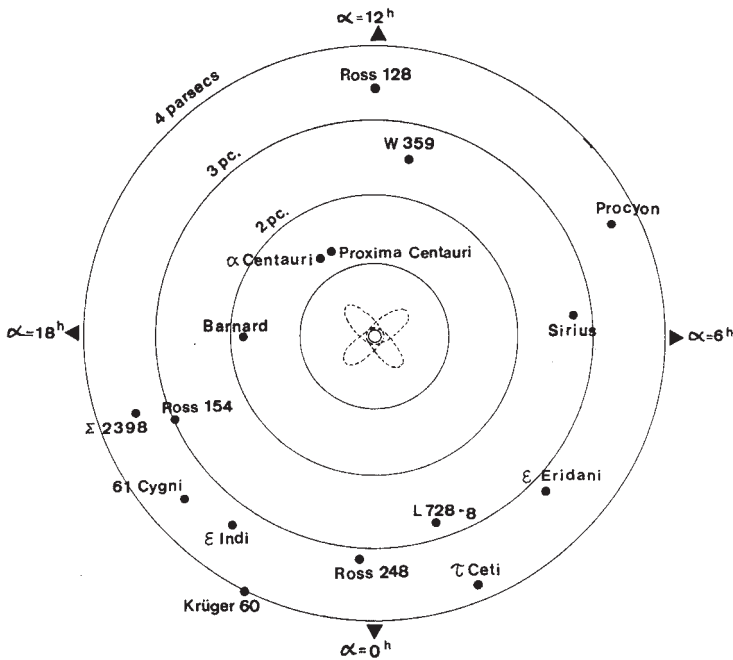


Figure 1.12 Distribution des étoiles proches du système solaire, vues en projection dans le plan équatorial.

Au centre, des orbites cométaires s'étendent jusque près d'un demi-parsec ( $\alpha = 0$  h correspond à la direction du Soleil à l'équinoxe de printemps). (Dessin Rihn)

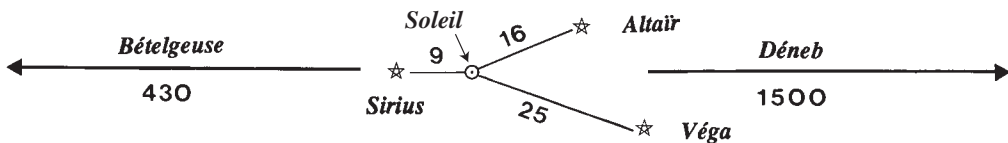


Figure 1.13 Distances comparées (en AL) des étoiles de l'été et des étoiles de l'hiver.

On voit que les étoiles Sirius, Altair et Véga sont relativement proches du Soleil, alors que Deneb, formant avec Vega et Altair le Triangle de l'été, est très éloignée, ainsi que Bételgeuse, étoile rouge brillant en hiver près de Sirius.

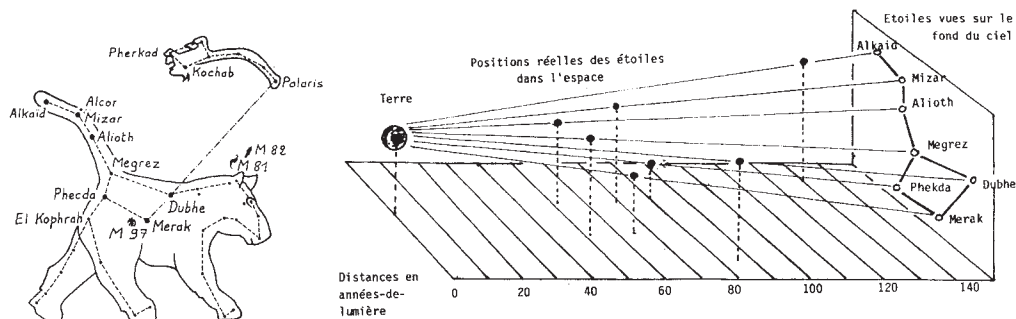


Figure 1.14 Distances des étoiles du « chariot » de la Grande Ourse (Dessin Rihn).

**À gauche** – Les constellations bien connues de la Grande Ourse et de la Petite Ourse sont visibles toute l'année sous nos régions, car situées près du pôle nord céleste. Polaris, étoile polaire car située à  $1^\circ$  du pôle, apparaît dans le prolongement de la ligne joignant les étoiles Merak et Dubhe. Les objets notés M 81, M 82, M 97, sont des galaxies éloignées d'une dizaine de millions d'années-lumière.

**À droite** – Les étoiles qui, vues de la Terre, paraissent regroupées, sont en réalité très éloignées les unes des autres, puisque leur distance va de 50 AL pour Megrez à 130 AL pour Alkaid.

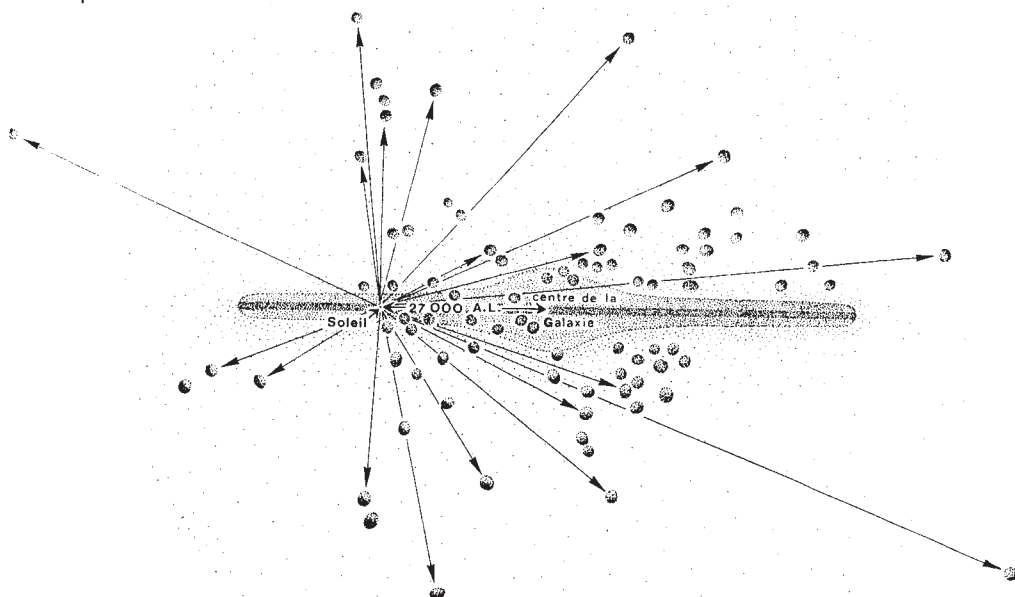


Figure 1.15 Détermination de la distance du centre galactique par une méthode photométrique utilisée par Shapley en 1918.

On schématise cette méthode de la façon suivante : On peut admettre que les amas globulaires brillants sont formés d'environ un million d'étoiles comme le Soleil. Donc leur luminosité réelle  $L$  vaut environ  $10^6$  luminosités solaires. Or, une relation photométrique unit les luminosités apparentes  $I$  et réelles  $L$  et la distance  $D$ .

Par exemple, pour l'amas Messier 13, on a mesuré  $I = 64 \times 10^{-14}$  luminosité solaire, donc on peut calculer que  $D = 25\ 000$  AL.

En mesurant la luminosité apparente de tous les amas globulaires brillants dans le ciel, Shapley a pu calculer leur distance, et les placer sur un modèle de la Galaxie, ce qui a montré que le centre de distribution se trouve à environ  $30\ 000$  AL du Soleil. (Dessin Ganeval).

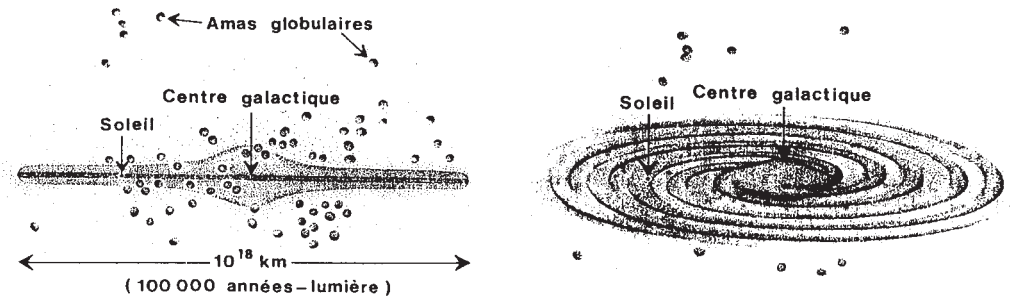


Figure 1.16 Modèle de la Galaxie

À gauche : vue en coupe ; à droite : vue en perspective

La dimension du système solaire (ici marqué « Soleil »), s'étendant sur 12 milliards de kilomètres pour l'orbite de Pluton, par rapport à l'étendue de 100 000 AL du disque galactique, est comparable à une tête d'épingle par rapport à un champ de 80 km de diamètre. La Voie Lactée, qui se déploie en une bande lumineuse dans le ciel, est la vue depuis l'intérieur du disque médian de la Galaxie. Ce modèle est conforté par l'apparence des autres galaxies. (Dessin Ganeval).

### 1.2.5 L'univers des galaxies

Les frontières de l'univers connu ont éclaté avec la découverte des autres galaxies, rendue possible par la construction de nouveaux grands télescopes américains : 2,50 m au Mont-Wilson (1919), 5 m au Mont-Palomar (1950). Des observations de « nébuleuses » extragalactiques avaient déjà été faites par Parsons (Rosse, 1850) et Keeler (1900) ; de nouvelles images ont été réalisées par Ritchey (1920). Slipher (1912) découvre un systématique décalage spectral vers le rouge pour de nombreuses « nébuleuses ». Miss Leavitt (1912) établit une relation entre la luminosité et la période des variables Céphéides du Grand Nuage de Magellan ; cette relation sera recalibrée par Baade (1952). Des novæ sont découvertes dans des « nébuleuses » spirales par Curtiss et Ritchey (1917).

Un grand débat s'est ouvert vers 1920, opposant les thèses plaçant les « spirales » à l'intérieur (thèse de Shapley) ou à l'extérieur (thèse de Curtiss) de la Galaxie. La conclusion est apportée par Hubble (1923) qui découvre une Céphéide dans la « nébuleuse spirale » d'Andromède, plaçant celle-ci à un million d'AL : les « spirales » sont en fait des galaxies. Hubble (1925) réalise une classification morphologique des galaxies, étendue par Sandage et de Vaucouleurs. Hubble (1929) établit une loi entre le décalage spectral et la distance des galaxies, pouvant être interprétée en termes d'expansion de l'univers.

La cosmologie théorique peut se développer, grâce aux théories d'Einstein de la relativité restreinte (1905), puis générale (1915), permettant la construction (1927) de modèles d'univers par Einstein, De Sitter, Lemaître... et la prédiction par Gamov (1948) d'un rayonnement fossile, découvert sous forme de rayonnement cosmologique à 3 K par Penzias et Wilson (1965).

Les observations modernes sondent avec de plus en plus de précision des astres de plus en plus lointains. En 1957, avec le lancement de *Sputnik*, s'est ouverte l'ère spatiale, qui permet de compléter les observations optiques par l'astronomie de l'invisible : télescope spatial Hubble (HST/NASA) en parfait fonctionnement depuis 1994, sondes captant les rayonnements très énergétiques et les ondes infrarouges. À partir de 1970, la radioastronomie s'est développée pour sonder les milieux froids et les très grandes distances.



### 1.2.6 Vision actuelle de l'Univers

L'architecture de l'Univers apparaît comme *une suite de structures imbriquées* les unes dans les autres, et découvertes progressivement (Figure 1.17). Le point de départ est la Terre, planète dont la rotation explique le mouvement diurne du Soleil et des astres. La Terre est une composante du système solaire, en révolution autour du Soleil. Le système solaire appartient à la Galaxie, elle-même membre de l'amas local de galaxies. Les amas de galaxies semblent regroupés à leur tour en « super-amas » soutenant les « grandes structures » de l'Univers.

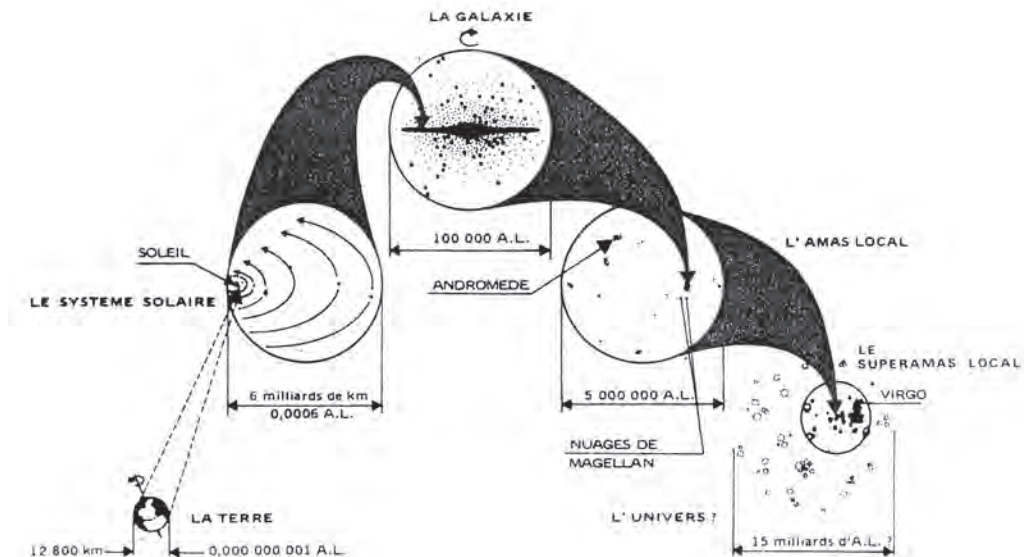


Figure 1.17 Architecture de l'Univers (Dessin Rihn)

Plusieurs structures, découvertes au fil des siècles, s'emboîtent les unes dans les autres, avec les ordres de grandeur suivants :

Échelles	Distance	Unité
Distance du sol français au centre de la Terre	6 400	km
Distance Terre - Lune	384 000	km
Distance Terre - Soleil	150	millions de km
Dimension du système planétaire	12	milliards de km
Distance du Soleil à l'étoile la plus proche	41 000	milliards km (4,3 AL)
Distance du Soleil au centre galactique	27 000	AL
Dimension de notre galaxie	100 000	AL
Distance de notre galaxie à la galaxie d'Andromède	2	millions AL
Dimension probable de l'univers connu	13-14	milliards AL

#### Des limites à préciser

Les limites de l'Univers observable ont été repoussées grâce à l'observation des quasars, objets d'aspect quasi-stellaire, distants de milliards d'années-lumière. On voit donc ces objets comme ils étaient il y a des milliards d'années (la galaxie d'Andromède telle qu'elle était il y a plus de 2 millions d'années) : plus on voit loin, plus on voit jeune ; les télescopes deviennent d'immenses rétroviseurs temporels.