INTRODUCTION A L'ASTRONOMIE

par Jean-Pierre Rivet
CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur
(jean-pierre.rivet@oca.eu)

10 novembre 2011
(En cours d'élaboration)

"La nature a des lois simples, mais le langage qui permet de les décrire doit être riche."

(Pierre-Simon de Laplace, le 20 janvier 1795)

Avertissement et guide de lecture

Ce qui suit n'a en aucune façon la prétention d'être un cours d'astronomie complet et structuré. Ce n'est qu'un ensemble de points de repère et d'éléments de culture générale en astronomie et en mécanique céleste.

Certaines parties écrites en petits caractères pourront être abordées en seconde lecture. Elles renferment en effet des considérations importantes, mais plus délicates à appréhender, et plus techniques.

Le premier chapitre est consacré à des rappels de notions élémentaires sur les angles, la trigonométrie, et sur le système Terre-Soleil-Lune. Il peut être omis en première lecture.

Chaque chapitre se termine par une synthèse "minimale" des connaissances essentielles du chapitre. Le but de cette synthèse est de récapituler les informations pour mémoire, mais sa lecture ne saurait se substituer à une lecture complète du chapitre.

L'ouvrage est complété par une liste alphabétique de noms propres liés à l'histoire de l'astronomie, avec pour chacun une très brève notice biographique (Chapitre 10). Cette liste est suivie par un glossaire expliquant certains termes couramment utilisés en astronomie (Chapitre 11).

Figure également en fin de ce document au Chapitre 12, une liste chronologique (incomplète et arbitraire) d'événements importants qui ont jalonné l'histoire de l'astronomie.

Table des matières

1 Rappel de notions de base **7**
1.1 Rappels de géométrie . . . 7
1.1.1 Angle entre deux demi-droites . . . 7
1.1.2 Angle entre deux droites . . . 9
1.1.3 Angle entre deux plans . . . 9
1.1.4 Angle de rotation . . . 9
1.1.5 Bases de trigonométrie . . . 10
1.1.6 Applications : diamètre apparent et parallaxe . . . 10
1.2 Rappels sur le système Terre-Soleil-Lune . . . 17
1.2.1 La rotation propre de la Terre . . . 17
1.2.2 Le mouvement orbital de la Terre autour du Soleil . . . 18
1.2.3 Le mouvement orbital de la Lune autour de la Terre . . . 18
1.2.4 Les saisons et la durée du jour et de la nuit. . . . 20
1.2.5 Les éclipses de Lune et de Soleil . . . 29
1.3 Synthèse . . . 31

2 Les objets du ciel **33**
2.1 Le ciel à l'œil nu . . . 33
2.1.1 Les objets artificiels . . . 33
2.1.2 Les étoiles et constellations . . . 33
2.1.3 Les planètes, le Soleil et la Lune . . . 34
2.1.4 Les objets temporairement visibles . . . 34
2.1.5 La Voie Lactée . . . 35
2.2 Le ciel au travers d'un instrument . . . 35
2.2.1 Les planètes lointaines et les petits corps du système solaire. . . . 35
2.2.2 Les amas ouverts ou amas galactiques . . . 35
2.2.3 Les amas globulaires . . . 35
2.2.4 Les nébuleuses . . . 36
2.2.5 Les galaxies et amas de galaxies . . . 36
2.2.6 Les quasars . . . 36
2.3 Les objets non visibles . . . 37
2.4 Synthèse . . . 53

3 Repères historiques et "sociologiques" **55**
3.1 Racines profondes de l'astronomie . . . 55
3.2 L'époque antique . . . 56
3.3 Le moyen âge . . . 57
3.4 La Renaissance : la fin du géocentrisme . . . 57

3.5 L'ère de la mécanique céleste . . . 58
3.6 L'avènement de l'astrophysique . . . 59
3.7 L'époque de l'astronomie spatiale . . . 60
3.8 Synthèse . . . 61

4 Le temps et l'espace 63
4.1 Le temps en astronomie . . . 63
4.1.1 Les calendriers . . . 63
4.1.2 Les définitions de la seconde . . . 65
4.1.3 Les échelles de temps . . . 66
4.2 L'espace en astronomie . . . 71
4.2.1 Les unités de mesure des distances en astronomie . . . 71
4.2.2 Les systèmes de repérage spatial . . . 71
4.3 Synthèse . . . 85

5 Les bases de la mécanique céleste 87
5.1 Les interactions fondamentales . . . 87
5.2 La mécanique de Newton et Galilée . . . 89
5.2.1 La notion de référentiel . . . 89
5.2.2 La notion de référentiel galiléen . . . 89
5.2.3 Les lois fondamentales de la mécanique classique . . . 90
5.3 Les lois de Kepler . . . 90
5.3.1 Rappel historique . . . 90
5.4 Le problème à un corps . . . 91
5.4.1 Démonstration des lois de Kepler . . . 91
5.4.2 Les six éléments orbitaux . . . 93
5.4.3 EXERCICE : La masse du Soleil (version I) . . . 97
5.5 Le problème à deux corps . . . 99
5.5.1 EXERCICE : La masse du Soleil (version II) . . . 101
5.6 Le problème à N corps . . . 103
5.7 Synthèse . . . 105

6 Le système solaire en quelques images 107
6.1 Vue d'ensemble . . . 107
6.2 Vues individuelles . . . 107
6.3 Synthèse . . . 137

7 Le Soleil 139
7.1 L'étoile Soleil . . . 139
7.1.1 Caractéristiques physiques . . . 139
7.1.2 La source de l'énergie solaire . . . 140
7.1.3 Le destin du Soleil . . . 141
7.1.4 L'activité solaire . . . 142
7.1.5 La composition chimique du Soleil . . . 142
7.2 Structure du Soleil . . . 142
7.2.1 Vision globale . . . 142
7.2.2 Le cœur nucléaire . . . 143
7.2.3 La zone radiative . . . 144
7.2.4 La zone convective . . . 144

7.2.5 La photosphère . . . 145
7.2.6 La chromosphère . . . 145
7.2.7 La couronne solaire . . . 145
7.3 Le Soleil et la Terre . . . 146
7.3.1 Le Soleil source de vie . . . 146
7.3.2 Le Soleil source d'énergie . . . 146
7.3.3 Le Soleil source de danger . . . 146
7.3.4 Le Soleil pour mesurer le temps . . . 147
7.3.5 Les aurores boréales et les orages géomagnétiques . . . 147
7.4 Synthèse . . . 159

8 Les instruments de l'Astronomie 161
8.1 Les sources d'information de l'astronome . . . 161
8.2 Les instruments collecteurs de lumière . . . 162
8.2.1 La lunette de Galilée . . . 163
8.2.2 La lunette de Kepler . . . 164
8.2.3 Le télescope de Newton . . . 164
8.2.4 Le télescope de Cassegrain . . . 165
8.2.5 Comparatif . . . 165
8.3 Les instruments d'analyse de la lumière . . . 166
8.3.1 Les spectrographes . . . 166
8.3.2 Les polarimètres . . . 166
8.4 Les récepteurs . . . 167
8.5 Synthèse . . . 173

9 Pour en savoir plus... 175
9.1 Sites Internet . . . 175
9.2 Bibliographie . . . 176

10 Personnages célèbres 179

11 Glossaire 183

12 Chronologie 193
12.1 L'époque antique et le géocentrisme . . . 193
12.2 Le moyen-âge . . . 194
12.3 La renaissance et l'héliocentrisme . . . 194
12.4 L'âge d'or de la mécanique céleste . . . 195
12.5 L'ère de l'astrophysique et de la cosmologie . . . 196
12.6 L'ère de l'astronomie spatiale . . . 196

Chapitre 1

Rappel de notions de base

Ce chapitre est consacré à quelques rappels simples sur des notions de base en géométrie et en cosmographie du système Terre-Soleil-Lune. Ces notions très élémentaires sont parfois maîtrisées de manière floue par les étudiants, ce qui peut gêner la compréhension des bases de l'astronomie. Cela dit, l'étude de ce chapitre peut être remise en seconde lecture. Il peut aussi être consulté en cours de lecture des chapitres suivants, pour d'éventuelles mises au point et précisions.

1.1 Rappels de géométrie

L'astronomie fait appel très fréquemment à quelques éléments simples de géométrie comme les notions d'angle, de mesure d'angle et de trigonométrie. Il parait donc sage de consacrer la première section de ce chapitre à quelques rappels sur les angles.

Plusieurs objets géométriques sont susceptibles de former des angles. Le cas le plus simple est l'angle entre deux demi-droites [1] ou entre deux vecteurs, mais on peut aussi définir l'angle entre deux droites ou entre deux plans. On examine en détail ci-après le cas de l'angle entre deux demi-droites.

1.1.1 Angle entre deux demi-droites

Considérons deux demi-droites OA et OB, de même origine O, comprises dans un plan P. Définir de manière univoque la mesure de l'angle $(\widehat{OA, OB})$ que forment ces demi-droites nécessite de préciser trois choses :

- une convention de signe,
- une unité de mesure,
- les valeurs extrêmes que peut prendre la mesure d'un angle.

Définir le signe d'une mesure d'angle est chose plus subtile qu'il n'y parait de prime abord. Il convient en effet de distinguer le cas de la géométrie plane et le cas de la géométrie *dans l'espace*. Examinons d'abord le cas d'un problème de géométrie plane, c'est-à-dire dont tous les objets géométriques sont contenus dans un même plan, que l'on ne considère *pas* comme immergé dans un espace de dimension plus élevée. Dans un tel problème, il existe une infinité de façons de faire tourner la demi-droite OA pour la superposer à la demi-droite OB. En effet, la rotation qui conduit OA à se superposer à OB peut se voir

1. Une demi-droite est la partie d'une droite comprise entre l'un de ces points appelé "origine" et l'une de ses extrémités (située à l'infini en principe).

ajouter un nombre entier de tours complets sans que le résultat final soit changé. Une rotation de 1/3 de tour, par exemple, n'est en rien différent d'une rotation de 4/3 de tour ou de 7/3 de tour. Cela dit, parmi toutes ces rotations équivalentes, une seule est inférieure à un demi-tour, dans un sens ou l'autre. On définit ainsi habituellement le signe de l'angle $(\widehat{OA, OB})$ comme étant positif si cette rotation "minimale" se fait dans le sens *contraire* des aiguilles d'une montre, et négatif dans l'autre cas (voir la figure 1.1). Cette convention de signe porte le nom de "convention trigonométrique".

Dans un problème de géométrie "dans l'espace", cas le plus fréquent en astronomie, les choses se compliquent quelque peu. En effet, le plan commun contenant des demi-droites OA et OB se trouve maintenant immergé dans un espace à trois dimensions, ce qui implique que l'on peut le regarder *par dessus* aussi bien que par *dessous*. En d'autres termes, un plan en géométrie plane n'a qu'une seule face, alors qu'en géométrie dans l'espace, il a deux faces qui sont *a priori* équivalentes. La convention de signe précédemment définie donnerait ainsi deux résultats opposés pour le même couple de demi-droites, selon que l'on regarde le plan commun P d'un côté ou de l'autre. Le problème se contourne tout naturellement en mentionnant laquelle des faces devra être "regardée" pour appliquer la convention trigonométrique. En d'autres termes, l'on devra préciser, parmi les deux vecteurs unitaires perpendiculaires au plan P, lequel pointe vers l'observateur chargé d'appliquer la convention trigonométrique. On parle alors de "plan orienté", pour signifier que le plan en question n'a plus deux faces équivalentes, mais une "face" et un "pile", en quelque sorte.

Définir une unité de mesure d'angle revient à attribuer par convention une valeur numérique particulière au tour complet. Le cas le plus connu est le "degré", définit par le fait qu'un tour complet a la valeur 360. Il existe bien sûr plusieurs autres unités de mesure des angles. La table 1.1 résume la définition des plus courantes d'entre elles. Il est à noter

Nom	1 tour	1/2 tour	1/4 tour	Domaine d'utilisation
degré	360°	180°	90°	universel
grade	$400\,gr$	$200\,gr$	$100\,gr$	cartographie
radian	$2\pi\,rd$	$\pi\,rd$	$\frac{\pi}{2}\,rd$	mathématique
heure	$24\,h$	$12\,h$	$6\,h$	astronomie

TABLE 1.1 – *Les principales unités de mesure des angles et leurs domaines d'application.*

que dans ce contexte, l'heure est une unité de mesure d'*angle* et non de *temps*. L'origine de cette homonymie sera discutée en Section 4.1.3.

Les confusions entre ces différentes unités sont sources de nombreuses erreurs, surtout dans le maniement des calculettes électroniques.

Une autre source d'erreurs fréquentes réside dans les méthodes de subdivision de ces unités. En effet, si le système de subdivision décimal ("milli", "micro", "nano", etc.) et l'écriture sous forme de chiffres décimaux "à virgule" prédomine pour le radian et le grade, il n'en est pas de même pour le degré ou l'heure. Pour ces derniers en effet, le système de subdivision décimal coexiste (pas toujours pacifiquement !) avec le système *sexagésimal* hérité de la civilisation Babylonienne. Selon ce système, une valeur non entière ne se subdivise plus en dixième, centième, millième, ..., mais en *minutes* (1/60) et *secondes* (1/3600). Une valeur d'angle non entière en degrés pourra donc s'écrire sous la forme d'un

chiffre à virgule[2] comme par exemple $4,5^o$ ou comme un nombre de degrés, minutes et secondes comme par exemple $4^o30'00''$. Pour ce qui est des mesures d'angle en heures, le problème est identique. Une valeur d'angle non entière en heures pourra s'écrire sous la forme d'un nombre à virgule comme par exemple $7,1\,h$ ou comme un nombre d'heures, minutes et secondes comme par exemple $7h06m00s$. Notons qu'ici, les minutes et secondes sont des fractions sexagésimales d'*heure* et non de *degré*. On les nommera donc des minutes et secondes d'*heure*, par opposition aux minutes et secondes de *degré*[3]. On les différencie en employant des notations distinctes : (^{o}, $'$, $''$) pour les degrés, minutes et secondes de degré, et (h, m, s) pour les heures, minutes et secondes d'heure. Le plus grand respect de ces conventions est de rigueur pour éviter les confusions.

La dernière chose à préciser pour définir de manière totalement non-ambiguë la mesure d'un angle, est la plage de valeurs que peut prendre cette mesure, et ce, pour lever l'ambiguïté liée au fait qu'un angle n'est défini qu'à un nombre entier de tours près. Il est d'usage d'imposer à une mesure d'angle de rester entre moins un demi-tour et plus un demi-tour (par exemple entre -180° et $+180^o$), ce qui rend univoque la mesure d'un angle entre deux demi-droites. On peut aussi adopter l'intervalle s'étalant de 0 à 1 tour (par exemple de 0° à 360° pour une mesure en degrés).

1.1.2 Angle entre deux droites

Pour des demi-droites, il existe une seule rotation de moins d'un demi-tour, qui permette de passer de l'une à l'autre. Pour les droites par contre, il en existe toujours *deux*, sur lesquelles une seulement est inférieure à un quart de tour, dans un sens ou dans l'autre. Donc, pour obtenir une définition non-ambiguë de la mesure de l'angle entre deux droites, il suffit d'imposer à la valeur de l'angle de rester entre moins un quart de tour et plus un quart de tour (par exemple entre -90° et $+90^o$).

1.1.3 Angle entre deux plans

Considérons deux plans Π et Π' non parallèles, donc sécants. Appelons O un des points de la droite d'intersection de ces deux plans, et D et D' les deux droites orthogonales respectivement à Π et Π', passant par O. L'angle entre les deux plans est par définition égal à l'angle entre les deux droites D et D', ce qui nous ramène au cas précédent.

1.1.4 Angle de rotation

Lorsqu'on étudie non plus des objets abstraits statiques (droites, plans,...), mais des objets matériels en mouvement de rotation autour d'un axe, on ne peut plus se contenter de définir la mesure de l'angle dont a tourné l'objet à un nombre entier de tours près. En effet, même si une pièce mécanique qui a effectué exactement un tour complet retrouve son état de départ, il peut ne pas en être de même pour son environnement. Exemple : quand la grande aiguille d'une montre a fait un tour complet, la petite n'a fait qu'un douzième de tour, et l'ensemble du mécanisme est dans un état différent. Il est donc d'usage de ne pas limiter les valeurs d'un angle de rotation à un intervalle fini, mais d'autoriser toutes les valeurs positives ou négatives possibles.

2. Rappelons que la virgule décimale devient un point décimal dans la littérature anglo-saxonne.

3. Il est courant d'utiliser les termes de “minutes d'arc” et de “secondes d'arc” pour désigner des minutes et secondes de degré.

1.1.5 Bases de trigonométrie

La trigonométrie est la discipline des mathématiques qui permet de relier les angles et les longueurs dans des figures géométriques plus ou moins compliquées. Pour ce faire, la trigonométrie introduit quatre fonctions élémentaires d'un angle α donné : le *sinus*, le *cosinus*, la *tangente* et la *cotangente*. La figure 1.2-a rappelle graphiquement la définition de ces lignes au moyen du "cercle trigonométrique" de rayon unité. En trigonométrie, l'unité préférée pour la mesure des angles est le *radian*.

Le sinus et le cosinus sont définis pour toute valeur réelle de l'angle α. La tangente n'est définie que pour des angles différents de $-\pi/2$ et de $+\pi/2$ (à 2π près), et la cotangente, qui n'est autre que l'inverse de la tangente, n'est définie que pour des angles différents de 0 et π (à 2π près).

A titre d'exemple, la trigonométrie permet de relier facilement l'angle d'un triangle rectangle à ses différents côtés, par les formules suivantes (voir figure 1.2-b) :

$$\sin\alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypothénuse}}, \quad \cos\alpha = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypothénuse}}, \quad \tan\alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \frac{1}{\text{cotan}\alpha}.$$

Notons une chose fort utile : si l'angle α est "petit", disons inférieur à $0.1\,rd$, les lignes trigonométriques ci-dessus possèdent des expressions approximatives simples :

$$\sin\alpha \simeq \alpha, \quad \cos\alpha \simeq 1 - \frac{\alpha^2}{2}, \quad \tan\alpha \simeq \alpha.$$

ATTENTION !!! Ces expressions ne sont valables que si l'angle α est exprimé en radians.

1.1.6 Applications : diamètre apparent et parallaxe

Le diamètre apparent d'un objet

On se propose de résoudre le problème suivant, fréquent en astronomie : sous quel angle α un observateur placé en O voit-il un objet AB de taille d, placé à une distance D de son œil (voir la figure 1.3) ? Cet angle porte le nom de "diamètre apparent" de l'objet. La réponse à cette question est fournie par la trigonométrie. En effet, en raisonnant sur le triangle (OHA), rectangle en H, il es facile de montrer que :

$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{d}{2D},$$

ce qui revient à dire :

$$\alpha = 2\text{arctan}(\frac{d}{2D}),$$

en utilisant la fonction "arctangente" qui est la réciproque de la tangente.

Notons que si l'angle α, mesuré en radians, est petit (cas le plus fréquent en astronomie), alors la formule se simplifie pour donner :

$$\alpha \simeq \frac{d}{D}.$$

ATTENTION !!! Cette formule donne l'angle α en *radians*.

La parallaxe d'une étoile

Au cours de son mouvement annuel autour du Soleil, la Terre est amenée à décrire une orbite elliptique de demi-grand axe[4] $a \simeq 150$ millions de kilomètres autour du Soleil. De ce fait, une étoile pas trop éloignée semblera, au cours de l'année, décrire dans le ciel une petite ellipse, même si l'étoile elle-même est (quasiment) immobile[5]. La raison de ce mouvement apparent est la suivante : au cours de l'année, la droite Terre-Etoile empruntée par la lumière de l'étoile, décrit un cône dont le sommet est l'étoile, et la base l'orbite terrestre. La lumière de l'étoile semble donc nous parvenir de directions légèrement différentes à différents moments de l'année. La figure 1.4 illustre ce fait dans le cas simplifié d'une étoile qui serait "à l'aplomb" du Soleil, et d'une orbite terrestre qui serait un cercle de rayon a (c'est proche de la réalité, car l'orbite terrestre est un ellipse très peu excentrique, donc très voisine d'un cercle). Dans ce cas simple, la droite Terre-Etoile décrit un cône droit à base circulaire. Son demi-angle au sommet β sera appelé la "parallaxe" de l'étoile. Sa mesure permet d'évaluer la distance D de l'étoile au Soleil par la relation :

$$D = \frac{a}{\tan \beta}.$$

Comme en pratique, l'angle β reste très petit (inférieur à 0.7 secondes d'arc même pour les étoiles les plus proches), on utilisera la formule approchée :

$$D \simeq \frac{a}{\beta},$$

où β doit être exprimé en *radians*. Cette méthode de mesure des distances reste limitée aux étoiles proches, car la parallaxe β des objets lointains est trop faible pour être mesurable.

C'est cette méthode qu'utilisa l'astronome allemand Bessel en 1838, pour évaluer pour la première fois la distance d'une étoile (61-Cygni). Il trouva une parallaxe $\beta = 0.31''$ qui conduit à une distance $D = 10.5$ *a.l.* (1 *a.l.* = 1 Année-Lumière = $9.46\,10^{12}$ km ; voir la section 4.2.1). La valeur actuellement retenue pour cette parallaxe est de $0.294''$, ce qui diffère fort peu de la valeur mesurée par Bessel en 1838, avec les moyens techniques de l'époque !

En comparant les figures 1.3 et 1.4, il apparaît clairement que l'angle β n'est autre que la moitié de l'angle sous lequel on verrait le grand axe de l'orbite terrestre ($2a$) depuis l'étoile considérée. En d'autres termes, c'est la moitié du diamètre apparent de l'orbite terrestre vue depuis l'étoile. Comme cet angle est très petit, il est très peu différent de l'angle sous lequel on verrait le *demi*-grand axe (a) de l'orbite terrestre depuis l'étoile, ce qui constitue la définition usuelle de la parallaxe β d'une étoile. Comme on le verra en Section 4.2.1, cette notion de parallaxe a conduit à la définition d'une unité de mesure de distance, le "parsec" (pc), bien adaptée aux distances interstellaires.

4. Le demi-grand axe d'une ellipse est la moitié de sa plus grande dimension.

5. Les étoiles peuvent avoir un très lent mouvement propre (réel), mais il est en général tellement lent qu'il reste relativement faible à l'échelle d'une année.

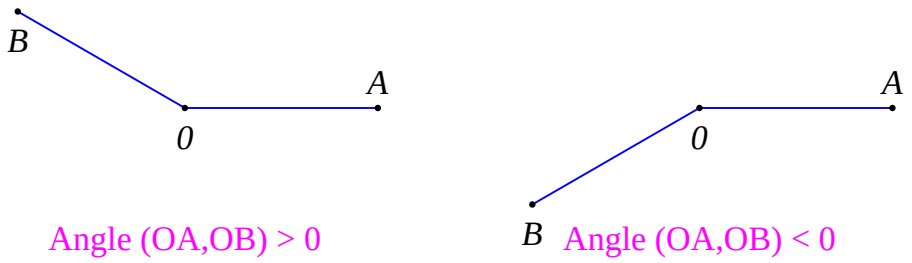


FIGURE 1.1 – *Convention trigonométrique pour le signe des angles : l'angle* $(\widehat{OA, OB})$ *est positif si la seule rotation de moins d'un demi-tour qui amène* OA *sur* OB *se fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, et négatif dans le cas contraire.*

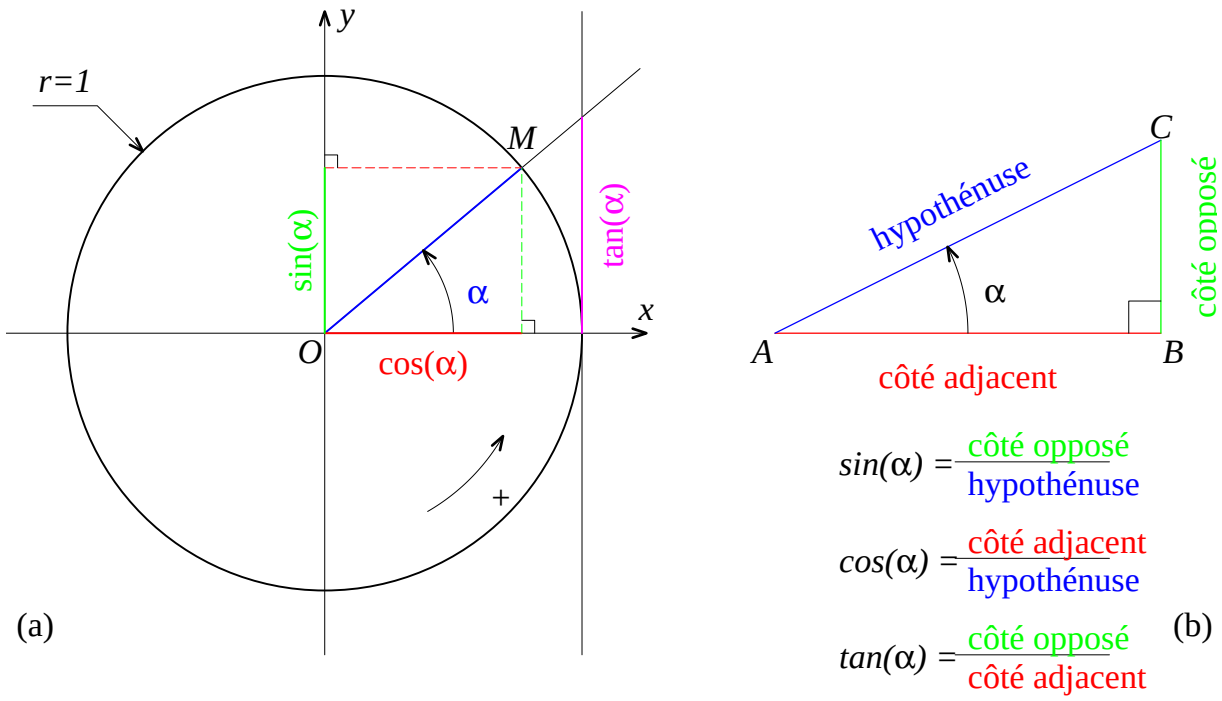


FIGURE 1.2 – *Trigonométrie de base : (a) le cercle trigonométrique et la définition des principales lignes trigonométriques ; (b) les règles trigonométriques dans le triangle rectangle.*

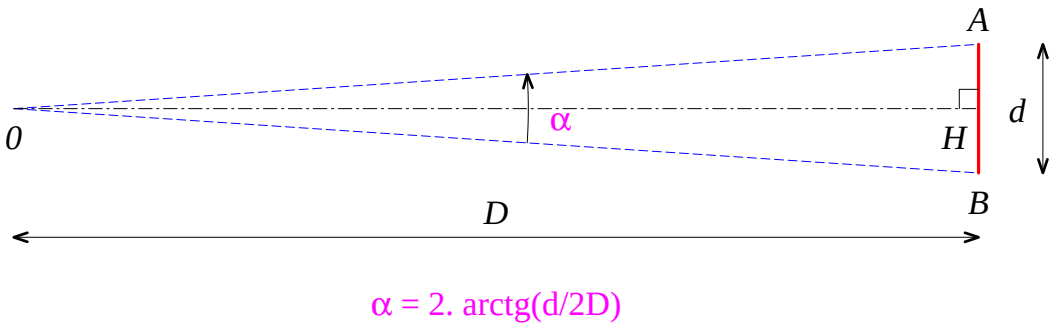


FIGURE 1.3 – *La notion de diamètre apparent : sous quel angle un observateur placé en O voit-il un objet AB de taille donnée d situé à une distance donnée D de son œil ?*

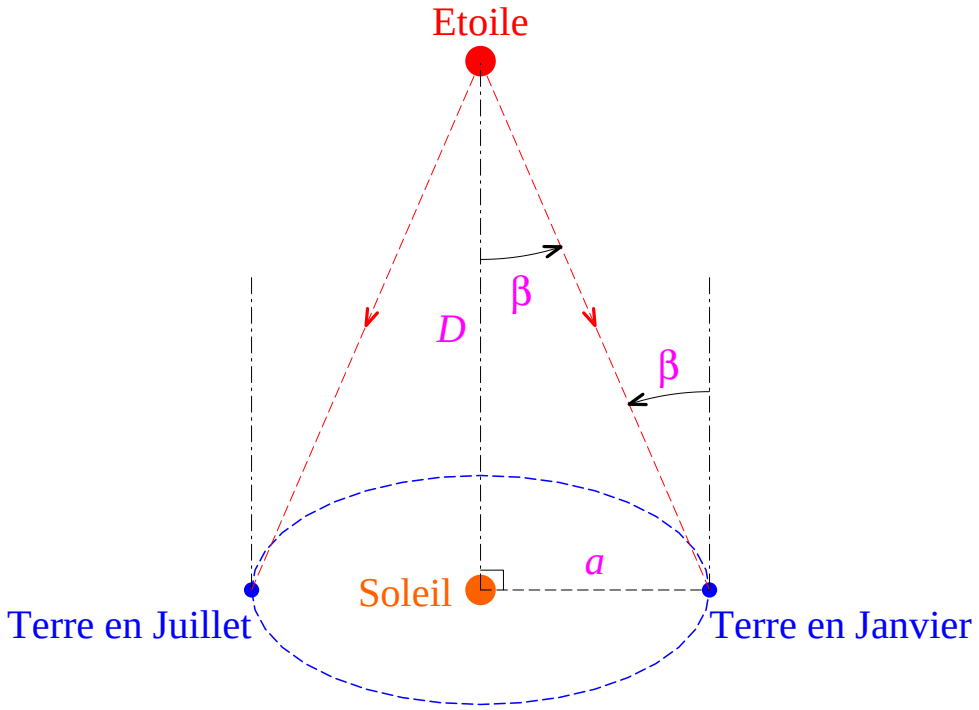


FIGURE 1.4 – *La notion de parallaxe d'une étoile : cas simplifié où l'étoile est "à l'aplomb" du Soleil, et où l'on assimile l'orbite terrestre à un cercle de rayon a. Dans ce cas, le cône décrit par la direction Etoile-Terre est un cône droit à base circulaire, de demi-angle au sommet β. La distance Etoile-Soleil D se déduit de la trigonométrie de base : $D = a/\tan\beta$. Comme l'angle β est très petit même pour l'étoile la plus proche, l'expression de D se réduit à $D = a/\beta$.*

1.2 Rappels sur le système Terre-Soleil-Lune

Le Soleil et la Lune sont les deux objets les plus brillants du ciel, donc les plus faciles à repérer. De plus, les influences lumineuses et gravitationnelles du Soleil et de la Lune sont tellement importants sur Terre, qu'elles y conditionnent de très nombreux phénomènes physiques, météorologiques et biologiques.

Par exemple, le phénomène de récurrence du jour et de la nuit, qui rythme la biologie de la plupart des espèces animales et végétale, est une conséquence de la rotation de la Terre sur elle-même par rapport au Soleil. Cette rotation qui se fait en moyenne en $24\,h$, conditionne également les fluctuations circadiennes de la température et de l'hygrométrie sur Terre.

Citons aussi le phénomène des marées océaniques (et terrestres !) qui sont dues aux interactions gravitationnelles et inertielles de la Terre avec la Lune et, en une moindre proportion, avec le Soleil. Cette double interaction est responsable du cycle à peu près semi-diurne des marées hautes et basses, et du cycle à peu près semi-mensuel des amplitudes de marée (les marées de mortes-eaux, et les grandes marées).

Citons enfin le phénomène des saisons climatiques et botaniques qui est très directement lié à la position de la Terre sur son orbite autour du Soleil.

On examine ci-après ces trois échelles naturelles de temps que sont la récurrence du midi solaire (qui donne le jour solaire moyen), la récurrence de la Pleine Lune (qui donne le mois synodique moyen) et la récurrence de l'équinoxe de printemps (qui donne l'année tropique).

1.2.1 La rotation propre de la Terre

La Terre est animée d'un mouvement très régulier de rotation sur elle-même, autour de l'axe géographique des pôles Sud et Nord. Cette axe reste à peu près parallèle à lui-même, au moins sur de courtes échelles de temps. Le plan qui lui est perpendiculaire et qui coupe la Terre en deux hémisphères égales n'est autre que le "Plan Equatorial". Tout comme l'axe des pôles, il reste à peu près parallèle à lui-même, au moins sur des échelles de temps de l'ordre de l'année.

La vitesse de rotation est d'un tour en une durée de $23h56m04s$, appelée le "jour sidéral". En d'autres termes, si l'on se reporte à un point de repère réputé *fixe* comme une étoile lointaine, on peut définir le jour sidéral comme l'intervalle de temps séparant deux passages de cette étoile au méridien (c'est-à-dire au plein Sud) d'un lieu terrestre donné. Cette durée est remarquablement constante, au moins à l'échelle humaine.

NOTA : Le mouvement propre réel de la Terre est en réalité est un peu plus complexe. D'abord, les pôles terrestres ne sont pas des points fixes par rapport à la surface de la Terre. Ils se déplacent au cours de l'année dans un carré d'une vingtaine de mètres de côté. Les causes de ce mouvement sont multiples, et toutes ne sont pas parfaitement modélisées à l'heure actuelle.

De plus, l'axe de rotation instantané de la Terre se déplace par rapport aux étoiles fixes selon un mouvement complexe rappelant celui de l'axe d'une toupie. L'axe en question décrit un cône d'environ 23° de demi-angle au sommet, autour d'une direction moyenne, en 27 500 ans (mouvement de précession appelé "précession des équinoxes"). Actuellement, le pôle Nord terrestre est dirigé vers une étoile de la Petite-Ourse appelée "l'Etoile Polaire" (*Stella Polaris*), mais ça n'était pas le cas il y a 2000 ans, et ce ne le sera plus dans 2000 ans. A ce mouvement se superpose un léger mouvement d'oscillation appelé "nutation". C'est l'interaction Terre-Lune et la non-sphéricité de la Terre qui sont à l'origine de ces mouvements.

Enfin, la perte d'énergie causée par l'incessant flux et reflux océanique dû aux marées a pour conséquence de ralentir imperceptiblement la vitesse de rotation propre de la Terre. Ce ralentissement est tel que la durée du jour sidéral s'allonge à peu près de 1.78 millisecondes par siècle.

La rotation sur elle-même de la Terre par rapport aux étoiles fixes en $23h56m04s$ n'est pas le cycle le plus influent sur Terre (sauf pour les astronomes). En revanche, la rotation propre de la Terre par rapport au *Soleil* est le phénomène de base qui rythme toute l'activité biologique et civile sur Terre. On peut définir la période de cette rotation comme l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du *Soleil* (et non d'une étoile fixe) au méridien d'un lieu (c'est-à-dire au plein Sud). Cette durée, appelée "Jour Solaire", varie au cours de l'année car elle dépend à la fois de la rotation propre de la Terre sur elle-même (très uniforme) *et* de son mouvement orbital autour du Soleil, qui lui, n'est pas totalement uniforme. La valeur *moyenne* annuelle de cette durée porte naturellement le nom de "Jour Solaire Moyen" et vaut $24h00m00s$. C'est cette période très importante pour l'activité humaine, qui a servi à définir les unités de temps usuelles comme le jour et l'heure (voir la section 4.1.3).

1.2.2 Le mouvement orbital de la Terre autour du Soleil

Le centre de gravité de la Terre [6] tourne autour du Soleil sur une orbite plane elliptique (voir Chapitres 5 et 6). L'excentricité très faible de cette orbite (0.00167) la rend très voisine d'un cercle. Le plan de cette orbite porte le nom de "Plan Ecliptique". Le plan écliptique et le plan équatorial terrestre forment un angle de $23^o27'$ environ, et ils se coupent selon une direction appelée "direction vernale" notée traditionnellement γ (voir Figure 1.5). Cette direction serait totalement fixe si le plan équatorial terrestre (donc l'axe des pôles qui lui est perpendiculaire) restait toujours parallèle à lui-même, ce qui est presque le cas, mais pas tout-à-fait (voir le *NOTA* ci-dessus). En réalité, cette direction vernale tourne très lentement dans le plan écliptique par rapport aux étoiles fixes (un tour en 27 500 ans). Compte tenu de la lenteur de ce mouvement, on considérera la direction vernale comme fixe dans tout ce qui suit, et on s'en servira comme d'une direction de référence.

La rotation de la Terre autour du Soleil, mesurée par rapport à la direction vernale n'est pas parfaitement uniforme car l'orbite terrestre n'est pas tout-à-fait circulaire (conséquence de la deuxième loi de Kepler encore appelée "Loi des Aires ; voir Section 5.2.3). C'est une des causes de l'irrégularité du Jour Solaire, mentionnée en Section 1.2.1. C'est aussi la cause de l'inégalité de la durée des saisons, phénomène connu depuis l'antiquité. Le début de chaque saison est défini par une valeur donnée de l'angle formé par la direction Soleil-Terre par rapport à la direction vernale γ. Cet angle porte le nom de "longitude écliptique" et se note ℓ (voir la section 4.2.2). La table 1.2 donne les valeurs de la longitude écliptique de la Terre pour le début de chaque saison, ainsi que la durée de chacune.

La durée d'un tour complet de la Terre par rapport à la direction vernale est appelée "année tropique" et vaut $365,24219$ jours. C'est la période naturelle de récurrence des saisons.

NOTA : Si l'on tient compte du fait que la direction vernale tourne très lentement par rapport aux étoiles fixes, on peut aussi définir la période de rotation orbitale de la Terre par rapport aux étoiles fixes, et non plus par rapport à la direction vernale. La durée obtenue est appelée "année sidérale" et vaut $365,25637\,j$.

1.2.3 Le mouvement orbital de la Lune autour de la Terre

La Lune tourne autour de la Terre dans un plan incliné d'environ $5^o09'$ sur le plan écliptique (plan de l'orbite terrestre). Son mouvement orbital, perturbé par de nombreux

6. En fait, le centre de gravité du système Terre-Lune.

Saison	ℓ	durée
Printemps	180°	$92.81\,j$
Eté	270°	$93.62\,j$
Automne	0°	$89.82\,j$
Hiver	90°	$89.00\,j$

TABLE 1.2 – *Table donnant le longitude écliptique de la Terre au début de chaque saison, ainsi que la durée de chacune.*

phénomènes, est d'une grande complexité dans le détail, même si de prime abord son orbite parait quasiment circulaire. Son mouvement est assez irrégulier. Sa période de révolution moyenne, mesurée par rapport à des étoiles fixes, porte le nom de "mois sidéral", et vaut $27.32\,j$. Cette rotation, combinée au mouvement de la Terre autour du Soleil et au fait que ce dernier n'éclaire qu'une moitié de la Lune, produit le fameux phénomène des "phases de la Lune". La figure 1.7 donne une explication simplifiée de ce phénomène. Lorsque le système Terre-Soleil-Lune est au plus proche de l'alignement dans l'ordre Soleil-Terre-Lune, la Lune nous montre son hémisphère éclairé en entier : c'est la "Pleine Lune". Si le système est au plus proche de l'alignement dans l'ordre Soleil-Lune-Terre, la Lune nous montre son hémisphère non éclairé : c'est la "Nouvelle Lune". Ces deux situations de quasi-alignement portent collectivement le nom de "Sysigie".

Entre ces deux situations, le Lune nous montre une partie de son hémisphère éclairé, et une partie de son hémisphère non éclairé. Elle nous apparaît donc sous une succession de formes qui sont dans l'ordre (voir figure 1.7) :

- La **Nouvelle Lune** (NL) : La Lune n'est pas visible.
- Le Ménisque Croissant (MC) : La Lune apparaît comme un ménisque dont la concavité est dirigée vers l'Est, et qui croît de jour en jour pour se rapprocher d'un demi-disque.
- Le **Premier Quartier** (PQ) : La Lune apparaît comme un demi-cercle dont la partie rectiligne est dirigée vers l'Est.
- La Lune gibbeuse croissante (GC) : La Lune apparaît comme une lentille bi-convexe, qui croît de jour en jour pour se rapprocher du disque complet.
- La **Pleine Lune** (PL) : La Lune apparaît comme un disque complet.
- La Lune gibbeuse décroissante (GD) : La Lune apparaît comme une lentille bi-convexe, qui décroît de jour en jour pour se rapprocher d'un demi-disque.
- Le **Dernier Quartier** (DQ) : La Lune apparaît comme un demi-cercle dont la partie rectiligne est dirigée vers l'Ouest.
- Le Ménisque Décroissant (MD) : La Lune apparaît comme un ménisque dont la concavité est dirigée vers l'Ouest, et qui décroît pour se rapprocher de la Nouvelle Lune, totalement obscure.

L'intervalle séparant deux phases de Nouvelle Lune porte le nom de "mois synodique". Cette durée est irrégulière, et diffère de la durée du "mois sidéral" définie plus haut. En effet, le mois sidéral concerne la rotation orbitale de la Lune, mesurée par rapport à la direction d'une étoile fixe, alors que le mois synodique, concerne la succession des phases de la Lune, donc sa rotation orbitale mesurée par rapport à la direction Terre-Soleil. La durée du mois synodique fluctue largement. Sa valeur moyenne, le "mois synodique moyen" vaut

$29.530589\,j$. Le mois synodique porte aussi le nom de "lunaison".

En plus de son mouvement orbital autour de la Terre, la Lune tourne sur elle-même. Cette rotation est synchronisée sur son mouvement de révolution orbital autour de la Terre, de telle sorte que la Lune nous montre toujours la même face (à peu de choses près).

Les durées du jour solaire moyen ($24\,h$), de l'année tropique ($365,24219\,j$) et du mois synodique moyen ($29.530556\,j$) sont les échelles de temps de base de l'activité humaine et naturelle sur Terre. C'est la raison pour laquelle ils ont servi de base à la construction de la plupart des calendriers connus (voir Section 4.1.1).

1.2.4 Les saisons et la durée du jour et de la nuit.

L'inégalité du jour et de la nuit et le phénomène des saisons ont pour origine commune le fait que le plan écliptique (plan de l'orbite terrestre) et le plan équatorial terrestre (plan perpendiculaire à l'axe des pôles) ne sont pas parallèles, mais forment un angle de $23^o27'$. La figure 1.5 représente la Terre en quatre positions sur son orbite autour du Soleil. Ces quatre positions (équinoxe de printemps, solstice d'été, équinoxe d'automne, solstice d'hiver) correspondent avec le début des quatre saisons.

Les équinoxes

A l'équinoxe de printemps (position *EP* sur la figure 1.5), le Soleil est dans la direction vernale, vu depuis la Terre. De ce fait, le Soleil, qui par définition appartient au plan écliptique (noté *Eq* sur la figure), se trouve, lors des équinoxes, appartenir *aussi* au plan équatorial (noté *Eq* sur la figure). En effet, à cette date, la direction Terre-Soleil est confondue avec la direction vernale, qui n'est autre que l'intersection (donc le lieu des points communs) du plan écliptique et du plan équatorial.

De plus, l'axe Sud-Nord de rotation de la Terre est exactement dans le plan séparant la Terre en une hémisphère éclairée (zone diurne, en jaune sur la figure) et une hémisphère non éclairée (zone nocturne, en noir sur la figure). De ce fait, au cours d'un tour de la Terre sur elle-même, tous les points de la Terre passent autant de temps en zone diurne (jour) qu'en zone nocturne (nuit). Il y a égalité de la durée du jour et de la nuit, d'où le nom "équinoxe" (du latin *equi* : égal, et *nox* : nuit). Ce phénomène est encore plus facilement visible en figure 1.6, qui représente la même chose que la figure 1.5, mais vu de dessus. Les cercles respectivement rouge, vert et mauve représentent la trajectoire de villes qui seraient respectivement à l'équateur, à 45° de latitude Nord et sur le cercle polaire arctique. On constate que des fractions égales de ces cercles se trouvent en zone diurne et en zone nocturne : il y a égalité de la durée du jour et de celle de la nuit *en tout point de la Terre*. Ce phénomène se reproduit à l'équinoxe d'automne (position *EA* sur les figures 1.5 et 1.6).

Les solstices

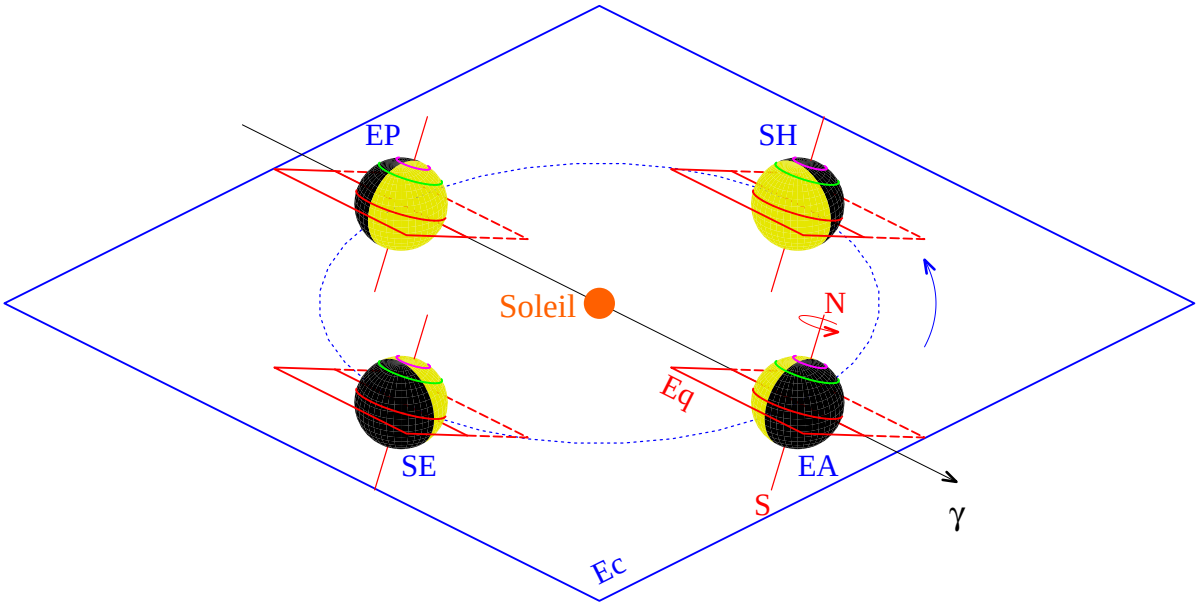
Au solstice d'été (position *SE* sur les figures 1.5 et 1.6), la Terre montre au Soleil son hémisphère Nord plus que son hémisphère Sud. En effet le Soleil est au Nord du plan équatorial terrestre. Le solstice d'été est même le moment précis où le Soleil est au plus haut au nord du plan équatorial. Etant au plus haut, il a dû monter avant la date précise du solstice, s'arrêter exactement au solstice, puis redescendra après. C'est l'origine étymologique du mot "solstice" (du latin *sol* : "le Soleil" et *stare* : "s'arrêter").

L'examen de la figure 1.6 montre que le solstice d'été est le moment pour lequel les jours sont les plus longs pour toutes les localités de l'hémisphère Nord. Le cercle vert 45eme parallèle Nord) possède une plus grande portion dans la zone diurne (en jaune) que dans la zone nocturne (en noir), ce qui veut dire qu'au cours d'une rotation complète de la Terre sur elle-même, une localité située sur ce 45eme parallèle Nord passera un temps plus long dans la zone diurne que dans zone nocturne. De plus, une localité située sur le cercle polaire arctique (cercle mauve) ou plus au Nord, passera la totalité du cycle de $24\,h$ dans la zone diurne. Le Soleil ne se couche plus : c'est le fameux "Soleil de minuit". C'est l'été dans l'hémisphère Nord.

Dans l'hémisphère Sud, les choses sont inverses : les nuits ont atteint leur durée maximale, et les jours leur durée minimale. C'est l'hiver dans l'hémisphère Sud. Les localités situées sur le cercle polaire austral ou plus au Sud encore, ne voient pas le Soleil se lever. C'est la "nuit polaire".

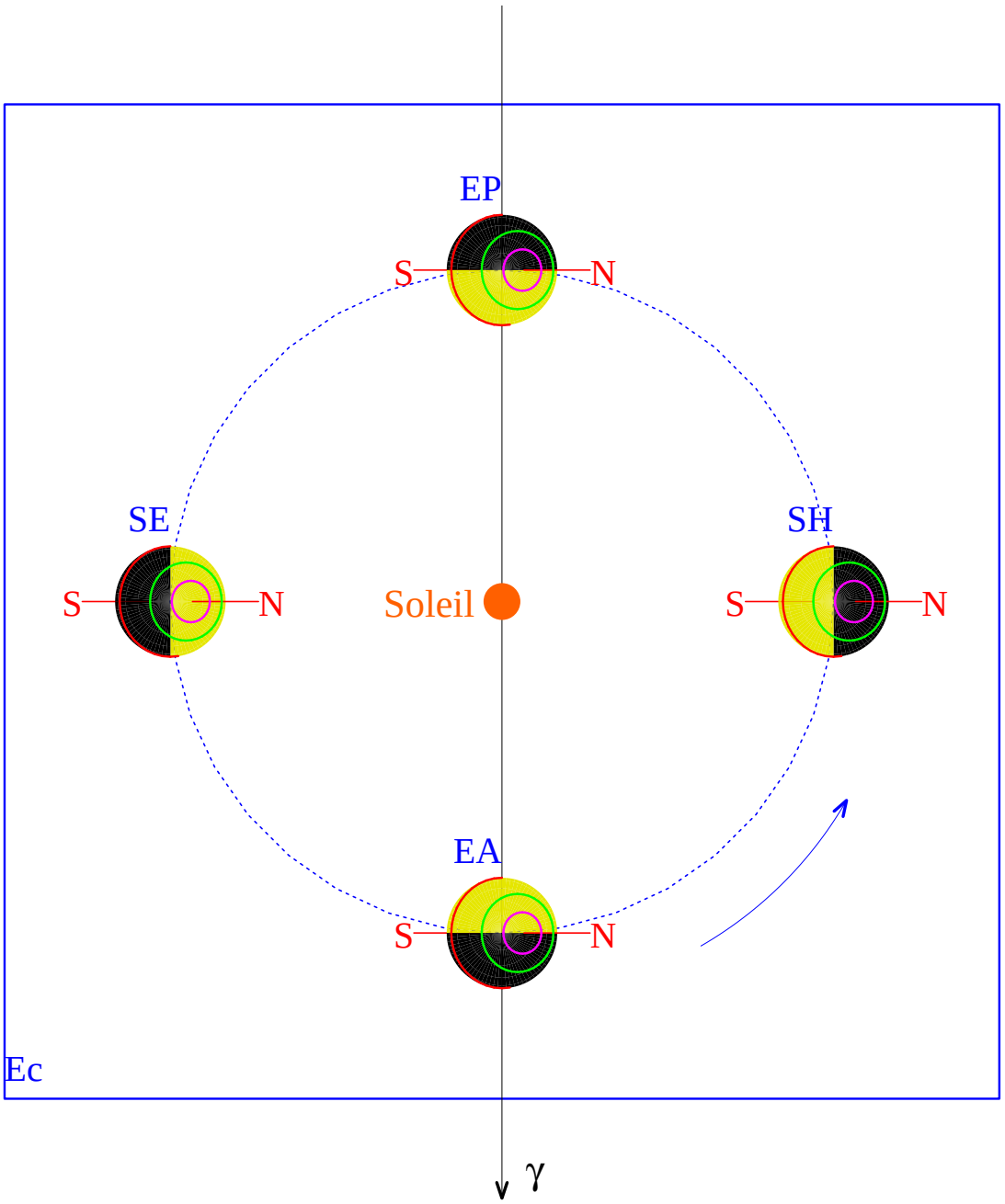
Au solstice d'hiver (position *SH* sur les figures 1.5 et 1.6), la Terre montre au Soleil son hémisphère Sud, et la situation est exactement inverse par rapport au solstice d'été. Les nuits sont les plus longues dans l'hémisphère Nord, et les plus courtes dans l'hémisphère Sud. Le Soleil ne se lève jamais sur le cercle polaire arctique et au delà. Le Soleil de Minuit est visible sur le cercle polaire austral et au delà.

Cette alternance de saisons où les jours sont courts avec des saisons où ils sont longs conduit aux phénomènes météorologiques d'été et d'hiver, avec les conséquences que l'on sait sur les cycles botaniques et zoologiques.



NOTA: Les proportions ne sont pas respectées.

FIGURE 1.5 – *Le système Terre-Soleil vu en perspective. Le cadre bleu (*Ec*) représente une portion du "plan écliptique", c'est-à-dire le plan moyen de l'orbite terrestre. La Terre est représentée en quatre points de son orbite annuelle autour du Soleil : à l'Equinoxe de Printemps (*EP*) ; au Solstice d'Eté (*SE*) ; à l'Equinoxe d'Automne (*EA*) ; au Solstice d'Hiver (*SH*). La direction vernale (direction du Soleil vu depuis la Terre à l'équinoxe de printemps) est repérée par le symbole* γ*. Sur chaque globe terrestre figurent l'équateur (en rouge), le* 45eme *parallèle Nord (en vert) et le cercle polaire arctique (en mauve). Sur chaque position est aussi représenté en rouge l'axe de rotation de la Terre et le "plan équatorial" (*Eq*) qui lui est perpendiculaire. Ce dernier fait un angle de* $23^o27'$ *avec le plan écliptique (en bleu). Ces deux plans se coupent selon une droite toujours parallèle à la direction vernale qui demeure quasiment fixe sur de courtes échelles de temps.*



NOTA: Les proportions ne sont pas respectées.

FIGURE 1.6 – *Le système Terre-Soleil vu de "dessus" (c'est-à-dire perpendiculairement au plan de l'orbite terrestre). La Terre est représentée comme sur la figure précédente en quatre positions (*EP, SE, EA *et* SH*). L'équateur, le* 45eme *parallèle Nord et le cercle polaire arctique sont dessinés respectivement en rouge, en vert et en mauve. Comme la Terre tourne sur elle-même à vitesse constante, la portion du cercle vert (*45eme *parallèle Nord), qui se trouve dans la partie illuminée (en jaune), par opposition à celle qui se trouve dans la partie obscure (en noir), donne une idée visuelle des durées de passage dans la lumière et dans l'ombre pour une ville située à cette latitude. Cela donne donc une idée visuelle des durées respectives du jour et de la nuit.*

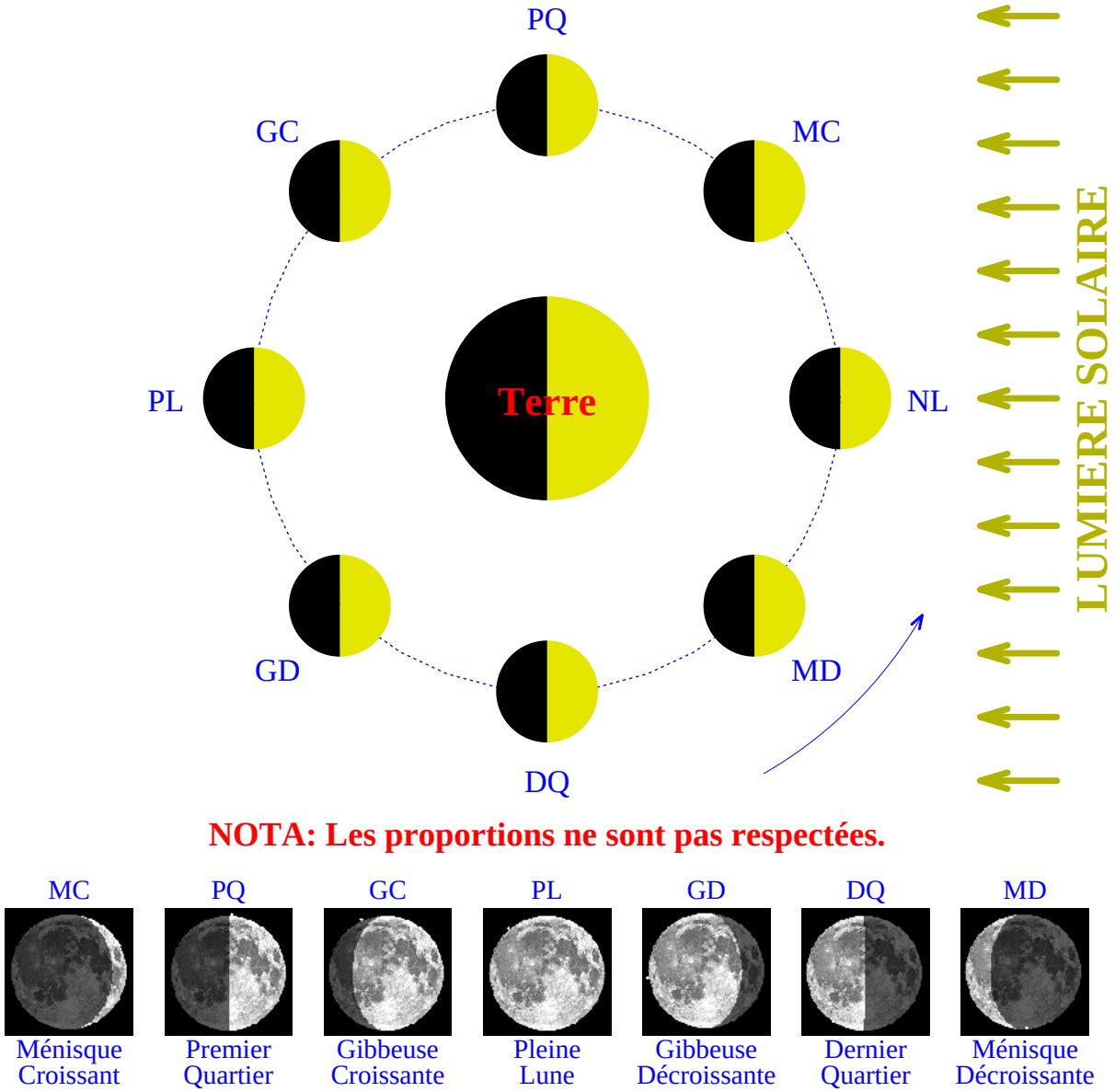


FIGURE 1.7 – *Le système Terre-Lune vu de "dessus" (c'est-à-dire perpendiculairement au plan de l'orbite lunaire). La Lune est représentée sur son orbite dans huit positions correspondant aux quatre phases principales : la Nouvelle Lune (*NL*), le Premier Quartier (*PQ*), la Pleine Lune (*PL*) et le Dernier Quartier (*DQ*). Quatre phases intermédiaires sont aussi représentées : le Ménisque Croissant (*MC*), la Lune Gibbeuse Croissante (*GC*), la Lune Gibbeuse décroissante (*GD*) et le Ménisque décroissant (*MD*).*

1.2.5 Les éclipses de Lune et de Soleil

Il se trouve, par un hasard sans doute, que le Soleil et la Lune ont à peu près le même diamètre apparent, vu depuis la Terre. Comme le plan de l'orbite terrestre et celui de l'orbite lunaire sont voisins (seulement $5^o09'$ entre les deux), il peut arriver que la Lune passe entre le Soleil et la Terre, au point de nous cacher partiellement ou totalement le disque solaire. Ce phénomène s'appelle une "éclipse de Soleil". Ces phénomènes rares, d'une immense beauté, offrent aux scientifiques la possibilité de voir la couronne solaire (voir Chapitre 7), zone complexe, proche du Soleil, trop peu lumineuse pour être vue quand le Soleil n'est pas occulté par la Lune.

De même, si la Lune venait à passer derrière la Terre, cette dernière pourrait lui faire de l'ombre, et rendre le disque lunaire partiellement ou totalement invisible. Cette situation est une "éclipse de Lune". Ces phénomènes sont moins rares mais moins riches que les éclipses de Soleil. A la différence des éclipses de Soleil qui ne sont visibles que sur une étroite bande de terrain (quelques dizaines de kilomètres de large), les éclipses de Lune sont visibles en tous les points de la Terre pour lesquels il fait nuit au moment de l'alignement, ce qui représente en gros la moitié de la surface terrestre.

Il faut noter que les éclipses de Soleil, par définition, ne peuvent se produire que pendant la phase de Nouvelle Lune. De même, et pour la même raison, les éclipses de Lune ne peuvent se produire que pendant les phases de Pleine Lune. On peut alors se demander pourquoi il n'y a pas une éclipse de Soleil à chaque Nouvelle Lune, et une éclipse de Lune à chaque Pleine Lune. La réponse tient au fait que l'orbite de la Lune est dans un plan incliné de $5^o09'$ sur le plan de l'orbite terrestre. L'intersection de ces deux plans non parallèles porte le nom de "ligne des nœuds". Tant que la Lune n'est pas sur la ligne des nœuds, cette droite commune aux deux plans, elle est forcément un peu au dessus ou un peu au dessous du plan écliptique (le plan de l'orbite terrestre), ce qui lui interdit de cacher le Soleil ou de subir l'ombre de la Terre. Les éclipses ne peuvent donc se produire que lorsque la Lune traverse le plan écliptique, d'où le nom "écliptique", pour désigner le plan dans lequel la Lune doit se trouver pour produire des éclipses.

NOTA : Le terme "occultation solaire" est le terme scientifique exact pour désigner ce qu'on appelle communément une éclipse de Soleil. En revanche le terme "éclipse de Lune" est correct scientifiquement. La raison est la suivante : le terme générique "éclipse" désigne en astronomie le passage d'un corps dans le cône d'ombre d'un autre. Par contre, le terme générique "occultation" désigne en astronomie le masquage physique d'un corps par un autre. Une éclipse de Lune est donc bien une éclipse au sens astronomique (la Lune passe dans l'ombre de la Terre), alors qu'une "éclipse" de Soleil est en fait une occultation, selon la stricte terminologie astronomique (la Lune masque le Soleil).

1.3 Synthèse

Les angles

Plusieurs types d'objets peuvent former des angles : les demi-droites, les droites, les plans. Pour obtenir une détermination non-ambiguë de la valeur d'un angle, il faut choisir une convention de signe (par exemple la convention trigonométrique usuelle), choisir une unité (degré, grade, radian, heure), et convenir des valeurs extrêmes que peut rendre la mesure (± 1 demi tour pour des demi-droites, ± 1 quart de tour pour des droites ou des plans).

Les unités d'angle les plus courantes sont :

- **Le degré** : 1 tour = 360° (universel).
- **Le grade** : 1 tour = $400\,gr$ (cartographie).
- **Le radian** : 1 tour = $2\pi\,rd$ (mathématique).
- **L'heure** : 1 tour = $24\,h$ (astronomie).

Les subdivisions sont décimales pour les mesures d'angle en grades et en radians. Elles peuvent être décimales ou sexagésimales (minute = 1/60, seconde = 1/3600) pour les mesures d'angle en degrés et heures. La convention typographique illustrée par les exemples suivants permet d'éviter les confusions :

- **Angle en degrés en notation décimale** : 18.62^o.
- **Angle en degrés en notation sexagésimale** : $18^o37'12''$.
- **Angle en heures en notation décimale** : $1.241h$.
- **Angle en heures en notation sexagésimale** : $1h\,14m\,28s$.

Les symboles ^{o}, $'$ et $''$ désignent les degrés, minutes et secondes de degré (encore appelées les minutes et secondes *d'arc*). Les symboles h, m, s désignent les heures, minutes et secondes d'heure.

La trigonométrie permet de relier les angles à des rapports de distance. Par exemple, dans un triangle rectangle, les trois côtés peuvent se relier à l'un des angles par les formules :

$$\sin\alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypothénuse}}, \quad \cos\alpha = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypothénuse}}, \quad \tan\alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \frac{1}{\text{cotan}\alpha}.$$

La notion de diamètre apparent

Le diamètre apparent d'un objet (disons un disque de diamètre réel d) vu à une distance D est un angle qui s'obtient par la formule $\alpha = \frac{1}{2}\arctan(\frac{d}{2D})$, qui devient $\alpha \simeq \frac{d}{D}$ (en radians), si l'angle en question est petit.

La notion de parallaxe d'une étoile

La parallaxe d'une étoile est l'angle sous lequel on verrait, depuis l'étoile, le demi-grand axe de l'orbite terrestre (149.6 millions de kilomètres). En d'autres termes, c'est la moitié du diamètre apparent de l'orbite terrestre, vue depuis l'étoile.

Le système Terre-Soleil-Lune

La Terre tourne autour du Soleil dans le plan écliptique, et met $365,24219\,j$ (une année tropique) pour repasser dans une direction-repère appelée "direction vernale", qui reste à peu près fixe à l'échelle d'une année.

La Terre tourne sur elle-même en $23h56m04s$ par rapport aux étoiles fixes (jour sidéral) ou en $24h00m00s$ en moyenne, par rapport au Soleil (jour solaire moyen). Cette rotation se fait autour de l'axe des pôles terrestres Sud-Nord. Le plan équatorial (perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre) fait un angle de $23^o27'$ avec le plan écliptique. L'intersection du plan équatorial et du plan écliptique n'est autre que la direction vernale.

La Lune tourne autour de la Terre en $27.32\,j$ par rapport aux étoiles fixes (mois sidéral) et en $29.530556\,j$ par rapport au Soleil (mois synodique). Selon la configuration du système Terre-Soleil-Lune, on voit depuis la Terre la Lune selon plusieurs phases : *Nouvelle Lune* (la Lune ne nous montre que sa face sombre), *Premier quartier* (la Lune nous montre la moitié de sa face sombre et la moitié de sa face éclairée), *Pleine Lune* (la Lune ne nous montre que sa face éclairée), *Dernier Quartier* (la Lune nous montre la moitié de sa face sombre et la moitié de sa face éclairée).

Les saisons

Selon la position de la Terre sur son orbite, l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud peuvent connaître des conditions d'éclairement différentes. Ce fait est une conséquence de l'inclinaison du plan équatorial terrestre par rapport au plan écliptique ($23^o27'$).

Lors des équinoxes, les deux hémisphères sont identiquement éclairés, et de plus, les jours sont égaux aux nuits, partout sur Terre.

Lors du solstice d'été, l'hémisphère Nord est maximalement éclairé, et l'hémisphère Sud minimalement. Les nuits ont leur longueur minimale dans l'hémisphère Nord, et maximale dans l'hémisphère Sud. C'est le début de l'été boréal et de l'hiver austral.

Lors du solstice d'hiver, la situation est exactement inverse.

Les éclipses

Il y a éclipse de Lune quand cette dernière passe totalement ou partiellement dans le cône d'ombre de la Terre. Cela ne peut se produire que lors des phases de Pleine Lune.

Il y a éclipse de Soleil (occultation pour les puristes) quand la Lune nous cache totalement ou partiellement le Soleil. Cela ne peut se produire que lors des phases de Nouvelle Lune.

C'est l'inclinaison de l'orbite lunaire par rapport au plan écliptique qui fait que les éclipses de Lune et de Soleil ne se produisent pas à chaque Pleine Lune ou Nouvelle Lune.

Chapitre 2

Les objets du ciel

2.1 Le ciel à l'œil nu

L'observation visuelle à l'œil nu d'un ciel nocturne de bonne qualité (par exemple une nuit d'hiver en montagne) permet de remarquer un certain nombre de choses importantes.

2.1.1 Les objets artificiels

Les objets brillants dans le ciel ne sont pas tous astronomiques. Outre les avions en haute altitude, reconnaissables par leur clignotement, il circule dans notre ciel une foule d'objets artificiels (satellites, restes de fusée, stations spatiales, etc.) dont certains sont très facilement visibles à l'œil nu. Citons par exemple la Station Spatiale Internationale (ISS) qui est visible comme une étoile relativement brillante, animée d'un mouvement lent mais nettement perceptible. Elle est visible de nuit, parfois pendant plusieurs minutes, tant que sa trajectoire (quasi-circulaire, à environ 400 km d'altitude) reste éclairée par le Soleil.

Certains satellites, notamment ceux de la famille des satellites de télécommunications "Iridium", peuvent être jusqu'à 500 fois plus lumineux que les plus brillantes des étoiles, ce qui les rend visibles parfois même en plein jour. L'explication est simple : ces satellites ont deux grands panneaux solaires qui agissent comme des miroirs nous renvoyant les rayons solaires. Comme ces satellites tournent sur eux-mêmes, ils ne nous renvoient la lumière solaire que sous forme de brefs éclairs très brillants.

Le site WEB `http://www.heavens-above.com` (voir la section 9.1) permet de savoir à l'avance quels objets artificiels seront visibles d'un lieu donné, à une date donnée.

2.1.2 Les étoiles et constellations

Les étoiles, d'intensité variée, semblent former des dessins que l'on nomme "constellations", qui se déplacent au cours d'une nuit, et de nuit en nuit sans se déformer, de l'Est vers l'Ouest. Ce mouvement apparent est en fait la conséquence de la rotation propre de la Terre, et de sa révolution annuelle autour du Soleil.

En fait, les étoiles sont moins fixes qu'il n'y parait à première vue. Elles ont un mouvement propre, mais qui est si lent qu'il n'est pas perceptible à l'œil nu à l'échelle d'une vie humaine.

Les étoiles, à la différence des autres corps célestes (planètes, satellites, astéroïdes, etc) sont définies par le fait qu'elles sont le siège de réactions thermonucléaires qui les rendent

intrinsèquement lumineuses.

Notons que ces dessins géométriques que les étoiles semblent former, les constellations, ne reflètent pas une réalité physique, et deux étoiles contiguës dans le dessin d'une constellation peuvent fort bien être éloignées l'une de l'autre, et ne paraître proches que si on les voit depuis la Terre, par effet de perspective.

2.1.3 Les planètes, le Soleil et la Lune

Parmi ces constellations, des points lumineux qui peuvent à première vue se confondre avec des étoiles, semblent se déplacer lentement au fil des jours. Ceux sont les cinq planètes de notre système solaire qui sont assez proches de nous pour être visibles à l'œil nu. Leur luminosité provient de la lumière solaire qu'elles nous renvoient, car elles n'émettent pas intrinsèquement de lumière visible.

Précédant ou suivant de peu le Soleil dans sa course, l'on peut voir Mercure, quand le ciel est clair sur un horizon dégagé, et bien plus facilement en général, Vénus, très brillante. Chacune de ces deux planètes peut être visible le soir, ou le matin, ou pas du tout selon le moment. Vénus, qui est une planète et non une étoile, a longtemps été appelée à tort "Étoile du Berger".

Mars, lorsqu'elle est visible, se présente comme un point brillant comparable à une étoile moyennement lumineuse, de couleur orange.

Jupiter, quand elle est visible, se distingue des étoiles par son importante luminosité. Saturne en revanche, peut se confondre avec une étoile pour un œil non averti.

Un autre corps, connu de tous, semble se déplacer rapidement sur la toile de fond des constellations. Il s'agit de la Lune, qui nous montre toujours la même face. Selon sa position par rapport à la Terre et au Soleil, elle nous apparaît sous différentes phases : la Nouvelle Lune, le Premier Quartier, la Pleine Lune, le Dernier Quartier, qui alternent selon un rythme d'environ $29.5\,j$ en moyenne.

Le Soleil est à ajouter à la liste des objets mobiles récurrents, même s'il n'est visible que de jour (et pour cause !).

2.1.4 Les objets temporairement visibles

En plus des objets célestes familiers comme les étoiles, les planètes, la Lune et le Soleil, le ciel nous offre parfois des spectacles éphémères et peu prévisibles, comme les étoiles filantes (traînées lumineuses laissées par des corps solides qui brûlent en pénétrant dans l'atmosphère).

Toujours occasionnelles, mais moins éphémères que les étoiles filantes, les comètes et leur(s) queue(s) de matière sublimée par la chaleur solaire nous offrent un spectacle qui peut être de toute beauté pendant plusieurs jours. La comète Hale-Bopp, qui est passée au plus près du Soleil au printemps 1997 nous a laissé de superbes images. La comète de Halley, qui repasse près du Soleil tous les 76 ans environ, a marqué les esprits au point de provoquer des paniques lors de son avant-dernier passage en 1910.

Pour illustrer ces propos, le lecteur est convié à visiter la série de planches hors-texte du chapitre 6, qui regroupe des images de certains corps du système solaire, comme le Soleil, la Lune, les planètes, l'astéroïde Toutatis, et la comète de Halley.

2.1.5 La Voie Lactée

Enfin, terminons ce tour d'horizon par la Voie Lactée, cette zone laiteuse très ténue que l'on ne perçoit que les nuits sans Lune et par temps clair. Cette traînée blanche qui traverse le ciel n'est autre que notre propre galaxie, vue de l'intérieur !

2.2 Le ciel au travers d'un instrument

Si l'on aide l'œil à collecter plus de lumière en le faisant précéder d'un instrument astronomique (lunette ou télescope) qui joue le rôle d'entonnoir à lumière, de nouveaux objets deviennent visibles.

2.2.1 Les planètes lointaines et les petits corps du système solaire.

Les planètes du système solaire visibles à l'œil nu, le sont sous la forme de simples points brillants. Aucun détail de leur surface n'est visible sans l'aide d'un instrument astronomique. Il en est de même pour leurs satellites et anneaux. Un instrument, même de taille modeste permet de voir par exemple les quatre plus gros satellites de Jupiter (les satellites dits "galiléens"), ainsi que sa fameuse tache rouge (un énorme tourbillon à la surface gazeuse de Jupiter), les anneaux de Saturne et ses plus gros satellites, la calotte glacière de Mars, les phases de Vénus, et beaucoup d'autres détails.

Les planètes Uranus et Neptune ainsi que le couple Pluton-Charon ne sont pas visibles à l'œil nu. Un bon instrument est nécessaire pour les apercevoir, et les détails de la surface d'Uranus et Neptune n'ont pu être obtenus que par des sondes *Voyager* ou par le télescope spatial *Hubble*.

Les petits corps du système solaire, comme les astéroïdes ou les noyaux cométaires lorsqu'ils sont loin du Soleil, ne sont visibles que sur des photographies du ciel prises avec de puissants télescopes. Obtenir les détails de leur surface nécessite soit l'envoi de sondes comme *NEAR* qui a survolé l'astéroïde Eros, soit l'utilisation de radio-télescopes (comme celui d'Arecibo, à Porto Rico) en mode "radar" (émission d'onde, et réception d'un écho).

2.2.2 Les amas ouverts ou amas galactiques

On observe par endroit des regroupements de quelques dizaines d'étoiles relativement peu serrées, et qui semblent se trouver principalement dans le plan moyen de notre galaxie. On les nomme "amas ouverts" ou "amas galactiques". Ceux sont en général des étoiles plutôt jeunes. Un exemple célèbre est l'amas des Pléiades, dont les composantes les plus brillantes sont déjà visibles à l'œil nu (Figure 2.1). L'astronome français Charles Messier, qui s'était attelé au XVIIIeme siècle à la tâche de cataloguer tous les objets diffus du ciel pouvant prêter à confusion avec des comètes, avait attribué le numéro 45 à ce superbe amas d'étoiles. On le nomme de ce fait souvent "M45", *M* pour Messier, 45 pour son numéro d'ordre dans le catalogue publié par Messier en 1782.

2.2.3 Les amas globulaires

On trouve aussi des taches diffuses relativement symétriques, dont une analyse visuelle montre qu'elles sont des regroupements d'un très grand nombre d'étoiles, dans un volume quasiment sphérique, avec un centre plus brillant. Ces regroupements sont appelés "amas globulaires" à cause de leur forme. Ils comptent plusieurs centaines de milliers d'étoiles

souvent relativement âgées, dans un volume sphérique dont le diamètre est de l'ordre de la centaine d'années-lumière (voir la section 4.2.1 pour la définition de cette unité de mesure de distance). Ces amas sont répartis dans le halo galactique, c'est-à-dire dans une zone vaguement sphérique entourant le centre de notre galaxie. Le grand amas d'Hercule, catalogué par Messier sous le nom "M13" en est un des plus célèbres exemples (Figure 2.2).

2.2.4 Les nébuleuses

L'examen de la zone centrale de la très reconnaissable constellation d'Orion révèle presque à l'œil nu une grande structure cotonneuse filamenteuses qui porte le nom de "nébuleuse d'Orion" ou M42 selon le catalogue de Messier (Figure 2.3). C'est un immense nuage de gaz d'une trentaine d'années-lumière, qui se situe dans notre galaxie, et qui est rendu luminescent par les étoiles brillantes qui y baignent. Dans ce genre de nuage, des étoiles sont susceptibles de naître. Ce bel objet est un exemple de ce que l'on appelle une "nébuleuse diffuse".

L'explosion violente d'une étoile massive en fin de vie, comme celle que les astronomes chinois virent s'allumer le 16 juillet 1054, et rester assez brillante pour être visible en plein jour pendant environ trois semaines, porte le nom de "supernova". Ces explosions laissent à leur place un immense nuage de matière stellaire dispersée, qui entre aussi dans la catégorie des nébuleuses. A titre d'exemple, la nébuleuse du Crabe, cataloguée sous le nom M1, (Figure 2.4), est le reste de l'explosion de la supernova qui s'est produite dans notre galaxie en l'an 1054.

A la fin de la phase de combustion nucléaire stable d'une étoile moyenne, il arrive qu'il se produise une éjection de ses couches périphériques, sous la forme d'un immense nuage annulaire. Ce genre d'objet, qui entre aussi dans la catégorie des nébuleuses, porte le nom de "nébuleuse planétaire". La nébuleuse de la Lyre, M57 (Figure 2.5), en est un bon prototype. Elle mesure environ 1.5 années-lumière de diamètre, et se trouve aussi dans notre galaxie.

Il existe d'autres types de nébuleuses, mais leur présentation sortirait du cadre de ce cours.

2.2.5 Les galaxies et amas de galaxies

Enfin, il existe des objets flous, visibles avec des télescopes de taille modeste, qui n'appartiennent pas à notre galaxie. Ceux sont par exemple d'autres galaxies voisines, comme la célèbre "Galaxie du Tourbillon", dénommée M51 par Messier (Figure 2.6). Les galaxies sont de gigantesques familles de plusieurs centaines de milliards d'étoiles, regroupées dans des zones de formes diverses souvent aplaties, qui peuvent dépasser les 100 000 années-lumière de diamètre.

Elles sont souvent regroupées en amas de galaxies, tout comme les étoiles sont groupées en amas d'étoiles. Le grand amas de la Vierge (Figure 2.7) est l'exemple le plus célèbre d'amas de galaxies. Il regroupe environ 2000 galaxies, dans une zone d'environ 3 millions d'années-lumière. Les amas de galaxies peuvent eux-mêmes être regroupés en super-amas.

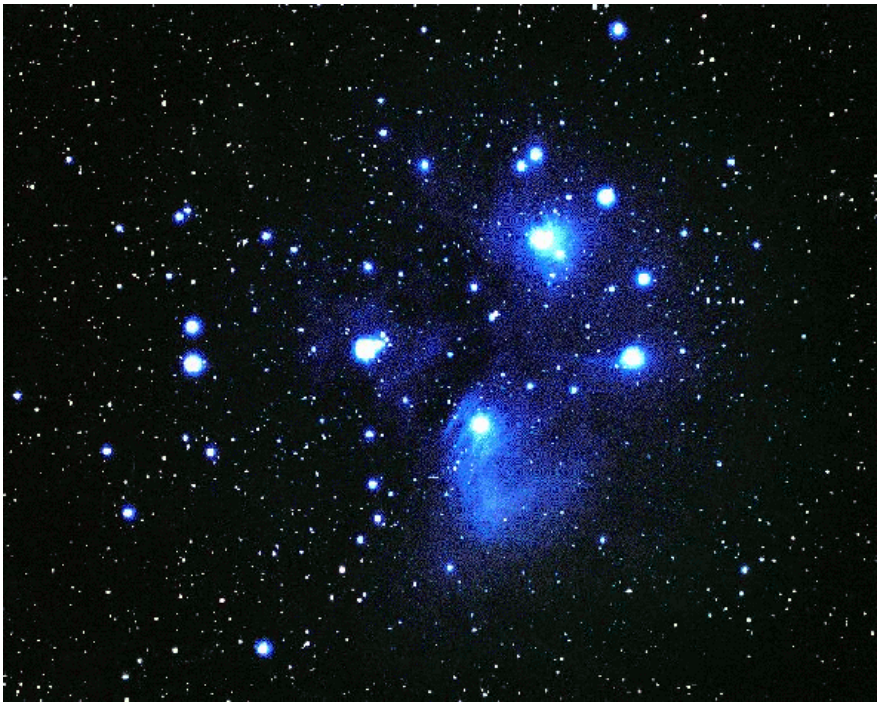
2.2.6 Les quasars

Les débuts de la radioastronomie ont permis de découvrir des objets étranges, dont certains ont une contrepartie visible : les "quasars". Ceux sont des objets relativement petits, dont certains ressemblent à première vue à de simples étoiles (d'où le nom de

"quasar", contraction de *QUASi stellAR*), mais qui émettent plus d'énergie qu'une galaxie entière (soit plusieurs centaines de milliards d'étoiles). Ces fantastiques émetteurs d'énergie sont restés longtemps des mystères. On pense maintenant qu'il s'agite de noyaux actifs de galaxie, qui cachent en leur centre un "trou noir", sorte de reste d'étoile hyper dense, qui aspire par son puissant champ de gravité toute la matière avoisinante. Cette matière, violemment accélérée par le trou noir central, émettrait pendant sa chute une gigantesque quantité d'énergie, d'où l'incroyable luminosité de ces objets relativement petits.

2.3 Les objets non visibles

Il existe dans l'Univers des objets qui sont non visibles soit parce qu'ils ne peuvent émettre aucun rayonnement (les trous noirs) soit parce qu'ils émettent surtout des radiations non visibles, comme des ondes radio, ou des rayons X ou γ (les pulsars, certains quasars, etc.). La radio-astronomie et l'astronomie spatiale nous ont révélé ces êtres cosmiques étranges, mais nous ne les décrirons pas ici pour ne pas avoir à entrer dans des considérations trop complexes.



(Photo: Jason Ware.)
(Source: ftp://www.seds.org/messier/Pics/More/m45jw.gif)

AMAS OUVERT DES PLÉIADES (M45)

Ascension Droite :	**03h47m00s**	**Constellation :**	**Taurus**
Déclinaison :	**+24°07'**	**Distance :**	**380 a.l.**
Magnitude :	**1.6**		
Dim. apparentes :	**110'**		
Dim. réelles :	**12 a.l.**		
Découverte :	**Hesiod, -1000**		
Numéro NGC :	**----**		

FIGURE 2.1 – *L'amas ouvert (ou galactique) des Pléiades (M45).*

(Photo: Jason Ware.)
(Source: ftp://www.seds.org/messier/Pics/More/m13jw.gif)

AMAS GLOBULAIRE D'HERCULE (M13)

Ascension Droite :	**16h41m42s**	**Constellation :**	**Hercules**
Déclinaison :	**+36°28'**	**Distance :**	**22 800 a.l.**
Magnitude :	**5.8**	**Nb. d'étoiles :**	**environ 10^6**
Dim. apparentes :	**16.6'**		
Dim. réelles :	**110 a.l.**		
Découverte :	**Ed. Halley, 1714**		
Numéro NGC :	**6205**		

FIGURE 2.2 – *Le grand amas globulaire d'Hercule (M13).*

(Photo: D. Malin, Anglo-Australian Observatory.)
(Source: ftp://www.seds.org/messier/JpgSm/m42.jpg)

NÉBULEUSE D'ORION (M42)

Ascension Droite :	**05h35m24s**	**Constellation :**	**Orion**
Déclinaison :	**-05°27'**	**Distance :**	**1600 a.l.**
Magnitude :	**4.0**	**Nature :**	**Nébuleuse diffuse**
Dim. apparentes :	**85x60'**		
Dim. réelles :	**39x28 a.l.**		
Découverte :	**N.C. Fabri de Peiresc, 1610**		
Numéro NGC :	**1976**		

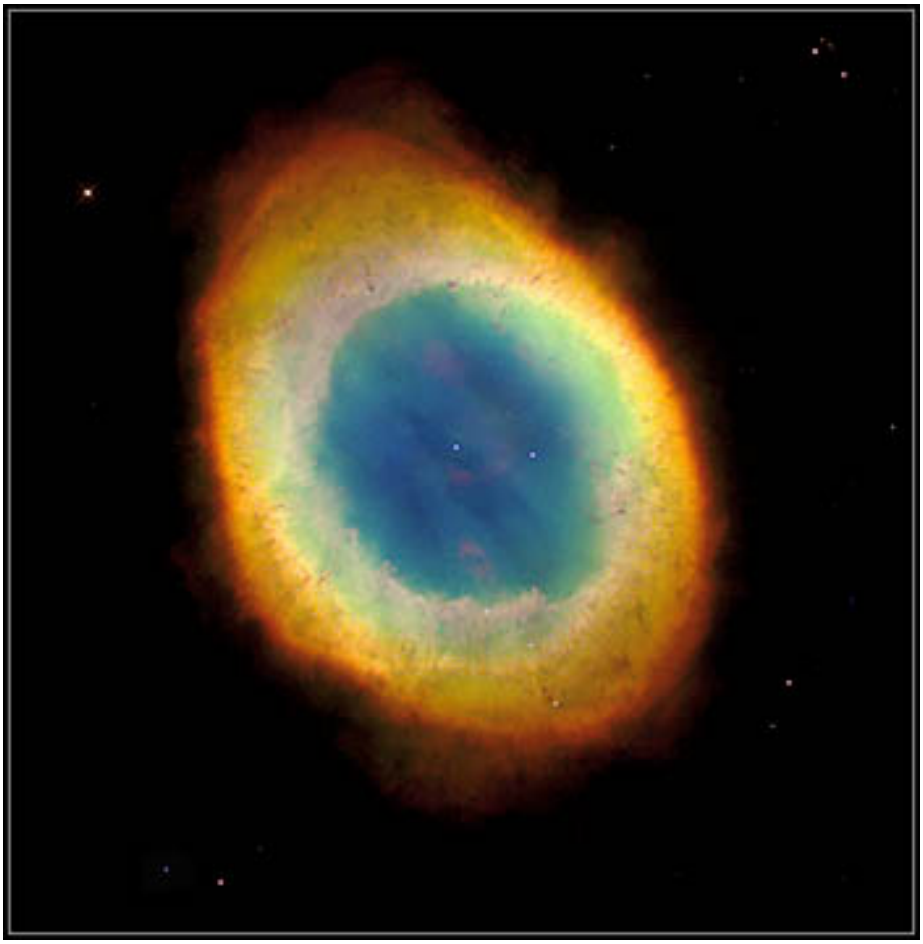
FIGURE 2.3 – *La nébuleuse diffuse d'Orion (M42).*

(Photo: Paul Scowen, Mont Palomar.)
(Source: ftp://www.seds.org/messier/Pics/More/m1_3c_sm.gif)

NÉBULEUSE DU CRABE (M1)

Ascension Droite :	**05h34m30s**	**Constellation :**	**Taurus**
Déclinaison :	**+22°01'**	**Distance :**	**6 300 a.l.**
Magnitude :	**8.4**	**Nature :**	**Reste de la supernova observée par les astronomes chinois pendant 23 jours en juillet 1054.**
Dim. apparentes :	**6x4'**		
Dim. réelles :	**11x7 a.l.**		
Découverte :	**J. Bevis, 1731**		
Numéro NGC :	**1952**		

FIGURE 2.4 – *La nébuleuse du Crabe (M1).*



(Photo: Hubble Space Telescope WFPC2.)
(Source: ftp://www.seds.org/messier/Pics/More/m57h9901.jpg)

NÉBULEUSE DE LA LYRE (M57)

Ascension Droite :	**18h53m36s**	**Constellation :**	**Lyra**
Déclinaison :	**+33°02'**	**Distance :**	**4 100 a.l.**
Magnitude :	**8.8**	**Nature :**	
Dim. apparentes :	**1.4x1.0'**		
Dim. réelles :	**1.7x1.2 a.l.**		
Découverte :	**A. Daquier de Pellepoix, 17??**		
Numéro NGC :	**6720**		

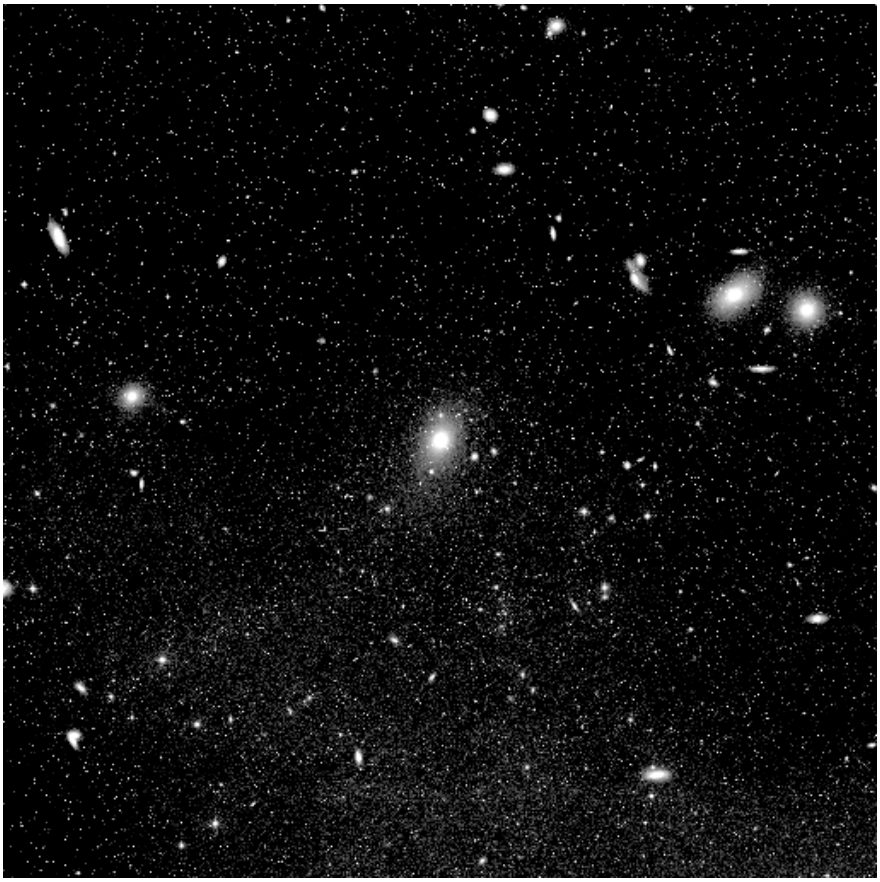
FIGURE 2.5 – *La nébuleuse planétaire de la Lyre (M57).*

(Photo: Isaac Newton Telescope, La Palma.)
(Source: ftp://www.seds.org/messier/more/m51wfc_c.gif)

GALAXIE DU TOURBILLON (M51)

Ascension Droite :	**13h29m54s**	**Constellation :**	**Canes Venatici**
Déclinaison :	**+47°12'**	**Distance :**	**37 10^6 a.l.**
Magnitude :	**8.4**		
Dim. apparentes :	**11x7'**		
Dim. réelles :	**120 000x75 000 a.l.**		
Découverte :	**Ch. Messier, 13/10/1773**		
Numéro NGC :	**5194**		

FIGURE 2.6 – *La galaxie spirale du Tourbillon (M51).*



(Photo: R.E. White III)
(Source: http://www.astr.ua.edu/white/mug/cluster/virgo_o1.gif)

AMAS DE GALAXIES DE LA VIERGE

Ascension Droite :	**12h30m48s**	**Constellation :**	**Virgo**
Déclinaison :	**+12°24'**	**Distance :**	**6 10^7 a.l.**
Magnitude :		**Nature :**	
Dim. apparentes :	**3°**		
Dim. réelles :	**3 10^6 a.l.**		
Découverte :	**Ch. Messier, 1781**		
Numéro NGC :			

FIGURE 2.7 – *Le grand amas de galaxies de la Vierge.*

2.4 Synthèse

Le ciel, qu'il soit vu à l'œil nu ou au travers d'instruments de plus ou moins grande puissance, offre le spectacle de nombreux objets qu'il convient de distinguer.

A l'œil nu

A l'œil nu, le ciel nous montre les objets suivants :

- **Des objets artificiels** : Un certain nombre d'objets d'origine humaine peuvent être assez lumineux pour être visibles à l'œil nu dans le ciel nocturne (voir diurne), pour peut qu'un rayon de soleil vienne les frapper. Citons la *Station Spatiale Internationale* (ISS) que l'on peut voir parfois pendant plusieurs secondes, et les satellites de télécommunication *Iridium* qui peuvent produire des flashs lumineux brefs mais puissants.
- **Les étoiles** : Elles sont fixes ou presque, et leur seul mouvement du lever au coucher est en fait la conséquence de la rotation terrestre sur elle-même et autour du Soleil. Les étoiles, à la différences des planètes et autres corps célestes, sont le siège de réactions thermonucléaires qui les rendent intrinsèquement lumineuses.
- **Les planètes, le Soleil et la Lune** : Cinq planètes sont visibles à l'œil nu : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne. Elles se déplacent au fil des mois par rapport aux dessins des constellations. Le Soleil, notre étoile, se déplace aussi par rapport aux constellations. La Lune, notre satellite naturel, est le corps céleste qui a le mouvement le plus rapide par rapport aux étoiles fixes.
- **Les objets temporaires** : Les étoiles filantes sont des traînées lumineuses éphémères et peu prédictibles, qui résultent de la combustion dans l'atmosphère de corps solides en chute sur la Terre.
  Les comètes offrent des spectacles plus durables et tout aussi spectaculaires. Leur queue est dûe à la sublimation de leur matière au passage près du Soleil.
- **La Voie Lactée** : C'est notre propre galaxie, vue de l'intérieur et par la tranche. Elle comporte près de 200 milliards d'étoiles.

Au travers d'un instrument

Un instrument astronomique révèle entre autre les objets suivants :

- **Les planètes lointaines et les petits corps du système solaire** : Les planètes Uranus et Neptune, ainsi que le couple Pluton-Charon ne sont visibles qu'au travers d'instruments astronomiques. Il en est de même des astéroïdes et des comètes lorsqu'elles sont loin du Soleil.
- **Les amas ouverts (ou amas galactiques)** : ceux sont des regroupements peu nombreux et peu denses d'étoiles souvent relativement jeunes. On les trouve surtout au voisinage du plan moyen de notre galaxie.
- **Les amas globulaires** : Ceux sont des regroupements denses et très nombreux d'étoiles relativement âgées. On les trouve dans le halo galactique, qui est une zone vaguement sphérique entourant le centre de notre galaxie.
- **Les nébuleuses** : Ceux sont des nuages de gaz ou de poussières d'origines diverses, qui apparaissent comme des masses cotonneuses diffuses et filamenteuses, de formes diverses.
- **Les galaxies** : Ceux sont de gigantesques regroupements de plusieurs centaines de milliards d'étoiles, dans des zones de formes variées, et de tailles pouvant atteindre

plusieurs centaines de milliers d'années-lumière.

– **Les amas et super-amas de galaxies** : Comme les étoiles sont souvent regroupées en amas, les galaxies peuvent être groupées en amas de plusieurs milliers de galaxies, eux-mêmes regroupés en amas d'amas de galaxies (super-amas).

Chapitre 3

Repères historiques et “sociologiques”

3.1 Racines profondes de l’astronomie

On a coutume de dire que la médecine et l’astronomie sont les plus anciennes pratiques scientifiques de l’humanité. En effet, la plupart des civilisations qui nous ont laissé des traces matérielles semblent avoir pratiqué la médecine et l’astronomie. Une des raisons de l’intérêt précoce des hommes pour le ciel réside sans doute dans le fait que le ciel est un spectacle accessible par tous, et qui offre une régularité immuable et apparemment parfaite. Qui plus est, de nombreux phénomènes terrestres (rythmes biologiques diurnes, retour des saisons climatiques) semblaient synchronisés approximativement par rapport aux phénomènes astronomiques (mouvement diurne apparent du Soleil, mouvement annuel apparent des étoiles et constellations). La perfection des mouvements célestes et leur corrélation avec les rythmes de la nature sont sans doute à l’origine du statut mystique de l’astronomie. Innombrables sont les croyances, légendes, coutumes, mythes, religions et pratiques divinatoires qui prennent le ciel pour théâtre, et ce de tout temps, depuis l’aube de l’humanité jusqu’à notre époque moderne.

Assez rapidement, l’astronomie est passée du rang de pratique mystique au rang de technique. Selon toute vraisemblance en effet, les hommes ont vite vu dans le ciel le moyen de se repérer dans le temps et l’espace. Les marins phéniciens savaient s’orienter en mer grâce aux étoiles et au Soleil. C’est probablement une des origines de leur suprématie maritime sur le bassin méditerranéen. Pour ce qui est du temps, les cycles astronomiques ont rapidement conduit à la définition et à l’utilisation courante d’étalons de temps pour rythmer la vie des sociétés. Le cycle des saisons (c’est-à-dire des solstices et équinoxes), a donné la notion d’année, le cycle des phases de la Lune a donné le mois (ou lunaison), et enfin l’alternance des jours et des nuits a donné naissance à la notion de journée, et à ses subdivisons variables d’une civilisation à l’autre. Motivées par le soucis de rythmer, sur le long terme, la vie sociale et religieuse [1], de nombreuses civilisations ont été conduites à définir des calendriers, c’est-à-dire des points de repères dans le temps (voir la section 4.1). Ce travail de définition des repères temporels a toujours été la charge des astronomes, qui étaient bien souvent des autorités religieuses.

Il faut attendre l’antiquité greco-romaine pour que l’astronomie cesse de n’être qu’une technique pour devenir une science, avec une volonté d’explication des phénomènes célestes

1. De nombreuses religions définissent les dates des fêtes principales par des événements astronomiques.

et non plus uniquement un but utilitaire, religieux ou technique.

3.2 L'époque antique

La civilisation grecque est connue pour avoir été le berceau de la géométrie en tant que science, et ce n'est sans doute pas un hasard si elle a été aussi une civilisation particulièrement active en astronomie, puisqu'on lui doit entre autre les premières ébauches de cosmologies scientifiques. Les astronomes grecs ne se sont pas contentés, comme les Babyloniens, d'accumuler des données et mesures astronomiques ; ils ont cherché à expliquer les mouvements des astres, en essayant de les faire découler d'une nécessité (c'est-à-dire d'un principe) plus que d'un hasard.

Les astronomes grecs avaient remarqué que les étoiles semblaient former des figures géométriques fixes, qui, au cours de la nuit, tournaient en bloc autour d'un point (qui n'était pas à l'époque l'Étoile Polaire actuelle !). Ils avaient remarqué que ce mouvement d'ensemble s'effectuait dans un ordre parfait et immuable [2]. Ils avaient cependant remarqué quelques apparentes imperfections dans cet ordre. En effet, outre les phénomènes exceptionnels comme les passages de comètes ou les explosions de supernovæ, le ciel quotidien vu à l'œil nu présente sept irrégularités, c'est-à-dire sept astres qui semblent se déplacer au fil des jours par rapport au ballet régulier des constellations. Il s'agit bien sûr du Soleil, de la Lune, et de cinq astres moins lumineux que les grecs qualifièrent d'errants. Le mot grec *planetos* ($\pi\lambda\alpha\nu\eta\tau o\sigma$) qui veut précisément dire "errant", est ainsi à l'origine du mot "planète". Ces cinq astres errants n'étaient autres que les cinq planètes du système solaire visibles à l'œil nu, à savoir Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne [3]. Ils avaient remarqué que le mouvement apparent de la Lune par rapport aux étoiles est nettement plus rapide que celui des planètes, et que le mouvement de ces dernières présentait parfois des phases de "marche-arrière", connues sous le nom de *mouvement rétrograde*. Ils avaient aussi observé que Mercure et Vénus ne s'éloignent pas beaucoup du Soleil. Ils savaient aussi que les planètes paraissaient plus ou moins lumineuses selon l'époque.

En bons géomètres, les Grecs ont tenté d'expliquer leurs observations en attribuant aux corps célestes des mouvements ayant des propriétés géométriques simples. Une des premières tentatives dans cette direction est dûe à Eudoxe de Cnide ($\simeq$-408 à -355). Selon son modèle, les astres étaient répartis sur une série de 27 sphères concentriques centrées sur la Terre (à une exception près, l'époque antique grecque a été dominée par la vision géocentrique de l'Univers). Chaque sphère était animée d'un mouvement de rotation à vitesse constante autour d'un axe solidaire de la sphère suivante, jusqu'à la sphère la plus externe, la "sphère des fixes" porteuse des étoiles, qui elle, tournait d'un tour en une journée autour de l'axe du monde (l'axe des pôles terrestres). Les planètes étaient disposées chacune sur l'équateur d'une des sphères internes, et la Lune, la plus rapidement mobile, était sur l'équateur de la sphère la plus interne. Ce modèle, qui fut perfectionné successivement par Calippe et Aristote jusqu'à inclure 56 sphères, a finalement été abandonné au profit de modèles dits *ptoléméens*, basés sur des combinaisons de mouvements circulaires.

2. Il est à noter que le mot "cosmos" est un mot grec qui contient l'idée de beauté et d'ordre. Il a également donné le mot français "cosmétique".

3. Ces sept irrégularités célestes (Lune, Mars, Mercure, Jupiter, Vénus, Saturne, Soleil) sont à l'origine des noms des jours de la semaine, à l'exception du Dimanche (en langue française) qui est un apport du catholicisme (en latin *dies domenica*, jour du Seigneur), et du Vendredi (dans les langues anglo-saxonnes) *Friday, Freitag, Vrijdag...* qui proviendraient de *Freia*, déesse de l'amour dans les mythologies saxonnes.

En effet, selon les principes de la mécanique d'Aristote, le mouvement "parfait" ne pouvait être que le mouvement circulaire uniforme, au même titre que la figure géométrique parfaite était le cercle. C'est Apollonius de Perge ($\simeq$-260 à -170) qui est à l'origine du premier modèle planétaire conforme à la mécanique d'Aristote, c'est-à-dire décrivant les mouvements des astres en termes de combinaisons de mouvements circulaires uniformes. Cette mécanique céleste des mouvements circulaires connut son ultime perfection 140 ans après J.C., grâce à Ptolémée et sa *Grande Syntaxe Mathématique*[4] qui attribuait aux corps célestes de complexes mouvements épicycliques. Cette théorie, qui ne rendait compte des observations qu'au prix de quelques "acrobaties" intellectuelles, a cependant survécu plus d'un millénaire, jusqu'à la Renaissance et les travaux de Copernic.

Un seule exception dans un courant de pensée exclusivement géocentriste : l'école fondée en 280 avant J.C. par Aristarque de Samos qui osa soutenir une thèse héliocentriste selon laquelle la Terre, sphérique, tournerait sur elle-même tout en se déplaçant autour du Soleil. Une pareille audace lui valu la réprimande publique. Il proposa même la première évaluation de la distance Terre-Soleil, qu'il sous-estima d'un facteur 20.

A peu près à la même époque, le mathématicien grec Erathostène de Cyrène parvint à mesurer le rayon de la Terre en observant, en deux lieux différents et au même moment, la différence d'inclinaison des rayons solaires.

Ce panorama rapide de l'astronomie antique serait par trop incomplet si on omettait de mentionner l'impressionnant travail de l'astronome grec Hipparque qui, 129 ans avant J.C., a établi le premier catalogue d'étoiles (850 étoiles), et a introduit la notion de "grandeur" pour qualifier la notion subjective de luminosité d'une étoile. Au cours de sa carrière, il a également mis en évidence la précession des équinoxes et mesuré la durée de l'année tropique (voir Section 4.1.1) à mieux que 7 minutes près.

3.3 Le moyen âge

Le moyen âge a été principalement marqué par les travaux des astronomes arabes, qui se sont attachés à amasser d'énormes quantités d'observations et de mesures, plus qu'à construire des modèles cosmologiques. Citons par exemple le traité d'astronomie d'Al Farghani datant du IXeme siècle, et qui sera utilisé jusqu'à la Renaissance.

Signalons également l'observation par les astronomes chinois de l'explosion d'une supernova en juillet 1054 dans la constellation du Taureau. Les restes de cette explosion donnèrent la célèbre nébuleuse du Crabe.

3.4 La Renaissance : la fin du géocentrisme

Dès le début du XVIeme siècle, les perfectionnements de l'observation astronomique et surtout de l'horlogerie mirent en péril croissant les théories géocentriques. Ce fut l'astronome polonais Copernic qui mit fin à près de deux millénaires de géocentrisme quelques mois avant sa mort, en 1543, en publiant son célèbre traité *De Revolutionibus Orbium Cælestium*. Ce traité, qui présentait la Terre comme tournant autour du Soleil, était habilement précédé par une introduction présentant l'héliocentrisme comme une simple hypothèse de calcul. Il ne provoqua donc pas tout de suite de débat théologique. Ce n'est que plusieurs décennies plus tard, en Italie, que les autorités catholiques comprirent la portée

4. L'œuvre de Ptolémée est parvenue jusqu'à nous sous le nom d'*Almageste*, grâce aux astronomes arabes du Moyen âge.

de l'ouvrage et réagirent en condamnant officiellement les thèses héliocentristes en 1616. La répression menée par l'Inquisition fut des plus brutales. Citons l'audacieux Giordano Bruno qui assimila le Soleil à une simple étoile et proclama la pluralité des mondes, ce qui lui valut d'être brûlé vif à Rome en 1600. Citons aussi Galilée qui fut jugé en 1633 et,... réhabilité officiellement par le pape Jean-Paul II en 1994 !

L'Inquisition ne parvint pas à éviter les conséquences scientifiques énormes des travaux de Copernic. En effet, en discréditant les principes de la mécanique d'Aristote basée sur l'omniprésence des mouvements circulaires, Copernic avait implicitement posé le problème de construire de nouvelles lois pour la mécanique. C'est ce que firent Galilée [5] entre 1600 et 1610, puis Descartes vers 1630, en suggérant que le mouvement le plus naturel d'un corps en l'absence de toute action extérieure devait être rectiligne uniforme plutôt que circulaire comme on le pensait depuis Aristote. Le pas suivant fut franchi par le physicien anglais Newton qui découvrit en 1665 l'attraction gravitationnelle et son caractère universel, et qui jeta les bases mathématiques de la mécanique classique. Il réussit à en déduire mathématiquement les fameuses lois établies entre 1601 et 1618 par l'astronome allemand Kepler sur la nature des mouvements planétaires [6] (voir en Section 5). Newton publia ces résultats en 1687 dans son célèbre ouvrage *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, qui peut être considéré comme la fondation physique et mathématique de la mécanique classique. Par ailleurs, les travaux de Newton en optique sont aussi à la base de la spectroscopie et de l'invention du télescope (1671).

3.5 L'ère de la mécanique céleste

Le XVIIIeme siècle vit le développement spectaculaire de la mécanique céleste sur la base des principes dégagés par Newton et Galilée. Le mathématicien français Lagrange développa un outillage formel élégant et performant pour résoudre les délicats problèmes mathématiques de la mécanique céleste. Le physicien français Laplace est à l'origine de la première théorie de la formation du système solaire (1796). Il est aussi célèbre pour ses travaux sur les mouvements des planètes et sur la théorie des probabilités (1812). C'est lui qui introduisit le terme de "mécanique céleste". De l'autre côté de la Manche, l'astronome anglais Bradley découvrit en 1727 un infime mouvement annuel des étoiles, qu'il explique par le mouvement de la Terre autour du Soleil, combiné avec le caractère fini de la vitesse de la lumière. Par cette découverte, il confirme d'une part la vision copernicienne du système solaire, et d'autre part l'existence d'une vitesse de la lumière finie, qui avait été mise en évidence en 1676 par l'astronome danois Rømer grâce à l'observation minutieuse des avances et retards des satellites de Jupiter. Bradley découvre en 1748 la nutation de l'axe de rotation de la Terre (voir Section 4.2.2), ce qui constitue une confirmation subtile des lois de la gravitation de Newton.

Parallèlement aux développements théoriques de la mécanique céleste, les techniques instrumentales d'observation astronomique ont également connu un rapide progrès qui a entraîné une importante moisson de résultats. Par exemple, l'astronome anglais Herschel découvrit la planète Uranus en 1781. Toujours grâce aux progrès de l'instrumentation,

5. C'est en 1609 que Galilée eut l'idée d'utiliser à des fins astronomiques un objet optique qui depuis, porte le nom de "Lunette de Galilée". Cet instrument d'optique, ancêtre des lunettes astronomiques actuelles, avait été inventé plus de vingt ans avant par Giambattista Dellaporta.

6. Kepler avait établi les trois lois qui portent son nom par une laborieuse et minutieuse synthèse empirique des observations planétaires de l'astronome danois Tycho Brahé qui, ironie de la Science, n'était pas lui-même partisan des thèses héliocentristes de Copernic.

l'astronome français Messier put établir son célèbre catalogue d'objets étendus (nébuleuses, galaxies amas, ...).

La mécanique céleste atteignit son sommet au XIXeme siècle lorsque, perfectionnée par de grands mathématiciens comme Gauss, Cauchy, Bessel ou Jacobi, elle permit de découvrir la planète Neptune par le calcul : En observant les légères perturbations que montrait l'orbite d'Uranus, le jeune astronome anglais Adams prédit en 1843 les caractéristiques et la position que devrait avoir une planète pour produire les perturbations observées. Il ne fut pas pris au sérieux par ses aînés. En 1846, l'astronome français Le Verrier fit le même calcul indépendamment, envoya les résultats à l'Observatoire de Berlin où son collaborateur Galle put observer une planète inconnue, le soir du 23 septembre 1846, à moins d'un degré de la position prédite par Le Verrier. La nouvelle planète, baptisée Neptune devint le symbole de la consécration de la mécanique céleste. Malgré ce succès écrasant, une légère imperfection de l'orbite de Mercure résistait encore à l'analyse. Ce phénomène, inexplicable par le mécanique céleste classique, allait fournir au siècle suivant la première vérification expérimentale de la théorie de la Relativité Générale.

Signalons aussi une avancée peut-être peu spectaculaire mais lourde de conséquences que l'on doit à l'astronome allemand Bessel : En 1838, il évalue pour la première fois la distance d'une étoile (61-Cygni), en mesurant sa *parallaxe* (voir Section 1.1.6). Cette première mesure, suivie de nombreuses autres, allait donner au ciel une troisième dimension : la profondeur.

Parallèlement aux percées théoriques en mécanique céleste, la science des instruments poursuivait son développement. Un grand nombre d'observatoires encore en activité de nos jours ont été construits et équipés au cours de ce XIXeme siècle. Les progrès de la physique, de la spectroscopie et de la photographie annonçaient déjà l'avènement de l'astrophysique.

3.6 L'avènement de l'astrophysique

Etudier les corps célestes comme des objets physiques à part entière et ne plus se contenter de suivre leurs mouvements : telle pourrait être la devise des astrophysiciens. Mais comment atteindre ce but quand l'objet à étudier est à plusieurs millions voire milliards de kilomètres, hors de portée de toute expérience ou prélèvement ? Les progrès de la physique et notamment de la spectroscopie et de la polarimétrie allaient fournir une solution à ce problème, dès le millieu du XIXeme siècle. A ce titre, le physicien allemand Fraunhoffer peut être considéré comme un des précurseurs de la démarche astrophysique : il eut l'idée en 1824 de décomposer la lumière solaire (comme le ferait un arc-en-ciel) et découvrit des couleurs manquantes, c'est-à-dire des raies sombres striant le spectre coloré. L'explication de ce phénomène est dûe aux physiciens allemands Kirchoff et Bunsen qui comprirent que ces raies sombres correspondaient à la présence de certains éléments chimiques dans le Soleil. Ils jetèrent ainsi les bases de l'analyse chimique à distance par spectroscopie, qui est une des techniques de base de l'astrophysique moderne. Pour ce qui est de l'évaluation des températures à distance, elle ne fut possible que grâce à la connaissance des lois du rayonnement des corps chauds, lois dûes au physiciens Kirchoff, Boltzmann, Wien, et plus tard Planck.

Armés de techniques issues de la physique comme la spectroscopie et la photométrie, les astronomes du début du XXeme siècle se sont lancés dans de nombreuses études sur la physique du Soleil et des étoiles, sur leur évolution, sur la source de leur énergie, sur la

physique des galaxies et des milieux interstellaires. Une énumération détaillée dépasserait largement le cadre de ce document. On ne citera que quatre faits marquants :

- L'introduction de la théorie de la Relativité par Einstein en 1905 et 1916, théorie qui a fourni un cadre de travail pour la cosmologie moderne.
- L'introduction d'une méthode de classement physique des étoiles dûe aux astronomes Hertzprung et Russel en 1905.
- La découverte par Hubble de l'expansion de l'Univers, en 1929.
- L'explication nucléaire de l'origine de l'énergie solaire par les physiciens Weiszäcker et Bethe en 1938.

3.7 L'époque de l'astronomie spatiale

L'astronomie de la seconde moitié du XXeme siècle a été marquée par deux conquêtes importantes : la conquête de l'espace, et la conquête de tout le spectre électromagnétique. En effet, jusqu'à la fin de la première moitié du siècle, les observations astronomiques se faisaient toutes dans le domaine de la lumière visible, qui ne représente qu'une petite portion des ondes électromagnétiques. L'apparition de détecteurs sensibles aux rayons infrarouges, ultraviolets et même aux rayons X et γ, ainsi que la possibilité de s'élever au dessus de l'atmosphère a permis d'élargir le domaine des longueurs d'onde accessibles et donc d'accéder à de plus en plus d'informations. De même, la découverte par Jansky en 1931 d'ondes radio en provenance de l'espace a ouvert un nouveau champ d'investigation : la radio-astronomie, avec son cortège d'objets célestes nouveaux, comme les quasars, les pulsars, etc.

La conquête de l'espace a permis, quant à elle, d'envoyer des sondes au confins du système solaire, d'explorer *in situ* un certain nombre de corps célestes comme la Lune, Mars ou Vénus, et même d'envoyer quelques hommes sur notre satellite (20 juillet 1969). Les engins astronomiques spatiaux comme le satellite Hipparcos, le télescope spatial Hubble, ou les observatoires solaires spatiaux comme SoHO ou YOKHOH permettent d'avoir de l'Univers une vision d'une acuité sans précédent.

L'aube du XXIeme siècle devrait voir naître une nouvelle forme d'astronomie basée non plus sur la détection des ondes électromagnétiques comme la lumière ou les ondes radio, mais sur la détection des ondes gravitationnelles, si elles existent. Ces ondes sont des prédictions de la théorie de la Relativité Générale d'Einstein, mais leurs effets sont tellement faible qu'elles n'ont pas encore pu être détectées de manière sûre. Pour y remédier, un gigantesque détecteur, l'interféromètre VIRGO, est en construction à Cascina, dans la banlieue de Pise. Dès 2004, il devrait entrer en activité, et l'espère-t-on, détecter ces ondes d'un genre nouveau. L'exploitation de l'information astrophysique contenue dans ces ondes devrait apporter une moisson de connaissances jusqu'alors inaccessibles, sur des objets célestes lointains et massifs mais peu lumineux.

3.8 Synthèse

L'histoire de l'astronomie, la plus vieille des sciences, peut se découper en plusieurs phases :

- **L'époque pré-hellénique** : l'astronomie est essentiellement une activité mystique, religieuse puis technique. L'astronomie y est utilisée à des fins de repérage dans le temps (calendriers et cadrans solaires babyloniens, -5000), et dans l'espace (marins phéniciens). De nombreuses observations sont faites, mais on ne connaît pas ou peu de tentatives scientifiques pour expliquer les phénomènes du ciel.
- **L'époque antique** : L'astronomie devient une science, par le fait qu'au delà des observations, il y a des tentatives d'explication de l'origine et des mouvements des corps célestes. Ces explications sont presque exclusivement géocentriques (à l'exception d'Aristarque de Samos, environ -290). Elles sont basées sur des mécanismes de sphères concentriques (Eudoxe de Cnide, environ -400), ou sur des compositions de mouvements circulaires uniformes (Apollonius de Perge, environ -200, jusqu'à Ptolémée, environ +140). L'époque antique est aussi l'époque des premières mesures de la Terre et des corps voisins : par exemple, en -250 environ, Erathostène de Cyrène mesure la circonférence terrestre par l'angle entre deux ombres simultanées, l'une à Alexandrie, l'autre à Syène (Assouan).
- **Le moyen âge** : C'est une période peu féconde du point de vue astronomique, en occident du moins. L'astronomie arabe par contre, a assuré la transmission de l'héritage astronomique grec, et l'a enrichi de nouvelles techniques et de nouvelles mesures.
- **La Renaissance** : L'héliocentrisme détrône le géocentrisme antique (Copernic, 1543), et la mécanique de Galilée (1609) et Newton (1687) remplace les jeux de sphères et de cercles de la mécanique d'Aristote. Kepler décrit le mouvement elliptique des planètes (1609 et 1618) grâce aux observations de Tycho Brahé. Newton découvre la gravitation (1665). C'est également l'époque des premières observations astronomiques avec des instruments d'optique (lunette de Galilée en 1609, et télescope de Newton en 1671).
- **L'ère de la mécanique céleste** Le XVIIIeme siècle vit le succès de la mécanique céleste : Les idées de Galilée et Newton sont utilisées pour atteindre une précision sans précédent dans la prédiction des mouvements des corps du système solaire, ce qui, au siècle suivant, conduisit finalement Adams et Le Verrier à découvrir la planète Neptune par le calcul (1843). Les techniques instrumentales progressent aussi et conduisent à la découverte de nouveaux objets (Herschel découvre la planète Uranus en 1781, Messier publie son catalogue d'objets diffus en 1782, Piazzi découvre le premier astéroïde en 1800).
- **L'avènement de l'astrophysique** Les progrès rapides de la physique, de la chimie et de l'optique ondulatoire ont fourni aux astronomes du début du XIXeme siècle, de nouveaux outils d'investigation leur permettant de s'intéresser à la nature physique des objets du ciel, sans se limiter à la seule prédiction de leur position. Fraunhoffer, en 1824, obtient le premier spectre de la lumière solaire, ouvrant la voie à la spectroscopie solaire et stellaire, technique astronomique donnant des renseignements précis sur la physique des étoiles (température, composition, etc).
  Le XXeme siècle vit naître les nouvelles théories fondatrices de la physique moderne : la mécanique quantique, et les théories de la relativité restreinte (1905) et générale (1916), qui ouvrirent la voie à la cosmologie moderne (théorie du "Big-Bang"). Les

progrès de la physique nucléaire ont conduit à l'identification de la source de l'énergie du Soleil et des étoiles (Bethe et Weiszäcker, 1938). C'est aussi l'ère des progrès technologiques et des grands télescopes, qui ont révolutionné notre vision de l'Univers. Ils permirent par exemple à Hubble de découvrir l'expansion de l'Univers en 1929.

– **L'époque spatiale** Au milieu du XXeme siècle, les progrès de l'aéronautique ont conduit à la visite de notre satellite, la Lune (20 juillet 1969), ouvrant ainsi la voie à la conquête de l'espace, et à l'astronomie embarquée à bord de sondes d'exploration. Parallèlement à cette conquête de l'espace, les astronomes se lancent aussi à la conquête du spectre électromagnétique : ne se contentant plus de recevoir et analyser la lumière visible, ils apprennent à capter les rayons infrarouges et ultraviolets, les ondes radio, les rayons X et γ, pour scruter les confins de notre Univers avec une précision sans cesse croissante. L'aube du XXIeme siècle devrait voir naître une nouvelle astronomie basée sur la détection non plus des ondes électromagnétiques, mais des ondes gravitationnelles, si elles existent.

Chapitre 4

Le temps et l'espace

4.1 Le temps en astronomie

Comme cela a été écrit en Section 3.1, le soin de prendre des repères dans le temps, à court et long terme a toujours été une des tâches des astronomes. La plus ancienne de ces tâches concerne le repérage à long terme, c'est-à-dire la construction de calendriers.

4.1.1 Les calendriers

La construction d'un calendrier simple d'emploi mais dont les divisions restent à long terme en accord avec les cycles astronomiques pose un problème épineux. En effet, une lunaison de $29.530589\,j$ (intervalle moyen entre deux phases de nouvelle lune) ne contient pas un nombre entier de jours solaires moyens. De même, une année tropique de $365.24219\,j$ (intervalle entre deux solstices) ne comporte ni un nombre entier de jours solaires moyens, ni un nombre entier de lunaisons. Or, la commodité d'utilisation d'un calendrier impose que ses divisions (années, mois, jours) soient telles que les années comportent un nombre entier (pas forcément fixe) de jours, et que les mois comportent aussi un nombre entier (pas forcément fixe) de jours, avec des règles de gestion des irrégularités qui garantissent qu'au long terme, le cycle des jours, des mois et des années reste en moyenne en accord avec le cycle diurne, le cycle lunaire, et le cycle des saisons. Notons que le regroupement des jours en semaines de 7 jours n'a pas de raison astronomique, même si elle a une origine astronomique. Cette pratique remonte à l'époque antique (voir la note en bas de page en Section 3.2).

Chaque civilisation a défini et utilisé des calendriers plus ou moins ingénieux pour se conformer aux exigences de simplicité et d'accord avec le ciel. Les premiers calendriers étaient lunaires, c'est-à-dire mettant l'accent sur l'accord du mois moyen avec la lunaison, plus que sur l'accord de l'année moyenne avec l'année tropique qui rythme les saisons. Par la suite, des calendriers plus sophistiqués ont permis de retrouver les deux accords simultanément. On retrouve l'usage de calendriers chez les Babyloniens, les Chinois et les Égyptiens près de cinq millénaires avant notre ère. Depuis cette époque jusqu'à nos jours, un grand nombre de calendriers à caractère laïque ou religieux ont été utilisés (calendriers chinois, copte, hébreu, aztèque, musulman, grec, julien, grégorien, révolutionnaire, ...). Les étudier tous serait fastidieux. Nous nous limiterons à la description de quatre d'entre eux : le calendrier julien, le calendrier grégorien (celui qui est en vigueur dans la plupart des pays actuellement), le calendrier musulman et le calendrier hébreu. Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter la référence [1].

Le calendrier julien

Par soucis d'homogénéisation et de simplification des calendriers existants, Jules César instaura en 45 avant J.C. un système de calendrier qui, après quelques réformes a donné le calendrier julien qui fut en vigueur jusqu'en 1582. Ce calendrier fait alterner trois années normales de $365\,j$ et une année dite "bissextile" de $366\,j$, ce qui conduit à une valeur moyenne de l'année de $365,25\,j$, suffisamment proche de l'année tropique ($365,24219\,j$) pour les besoins de l'époque. Par contre, la durée du mois n'est qu'une médiocre approximation de la lunaison : ce fut le compromis choisi par Jules César, qui voulut éviter les complications excessives des calendriers anciens (par exemple le calendrier hébreu), qui s'efforcent, en plus, de garder en phase les mois et le cycle lunaire.

Dans le calendrier julien, Les années bissextiles comportaient à l'origine 6 mois de 31 jours alternés avec 6 mois de 30 jours. Pour les années normales, le mois de février ne comptait que 29 jours. C'était le sixième jours avant le début du mois de mars (*sexto ante calendas martii*) qui était doublé lors des années bissextiles, d'où le nom de *bis-sextile*. Quelques années plus tard, on ajouta un jour au mois d'août, qui depuis, comporte donc 31 jours, pour que ce mois, consacré à l'empereur Auguste compte autant de jours que le mois de Juillet consacré à Jules César. Le jour en question à été prélevé sur le mois de février, qui depuis, ne comporte plus que 28 jours, ou 29 pour les années bissextiles, au lieu de 29 ou 30. Ce calendrier a rapidement été adopté dans la plupart des pays de l'actuelle Europe. Son utilisation en l'état dura jusqu'en 1582, époque pour laquelle l'écart entre l'année julienne de $365.25\,j$ et l'année tropique de $365.24219\,j$ s'était accumulé au point de produire un décalage de 10 jours environ (l'équinoxe de printemps se produisait vers le 10 mars !). C'est le pape Grégoire XIII qui y mit bon ordre en introduisant le calendrier grégorien.

Le calendrier grégorien

Pour résorber le décalage, le Pape Grégoire XIII décréta que le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 serait le vendredi 15 octobre 1582. Par ailleurs, pour éviter que ce décalage ne se reproduise ultérieurement, il modifia le cycle des années bissextiles pour qu'il n'y en ait plus que 97 par tranche de 400 ans au lieu de 1 par tranche de 4 ans (soit 100 par tranche de 400). La valeur moyenne de l'année grégorienne ainsi obtenue est donc de $365.2425\,j$, ce qui est une bien meilleure approximation de l'année tropique de $365.24219\,j$ que ne l'était l'année julienne de $365.25\,j$. La règle pour décider quelles seraient les années bissextiles est la suivante : seront bissextiles les années dont le millésime est divisible par 4 (comme pour le calendrier julien), *sauf* trois années séculaires (millésime divisible par 100) sur quatre, à savoir celles dont le millésime n'est pas divisible par 400. Ainsi, 1700, 1800, 1900 ne furent *pas* bissextiles alors qu'elles auraient dû l'être selon le calendrier julien. L'an 2000 par contre, sera bien bissextile, car divisible par 400.

C'est le calendrier grégorien qui est en vigueur actuellement dans la plupart des pays, au moins pour les activités civiles. Il est à noter cependant, que la plupart des religions ont conservé l'usage de calendriers traditionnels pour définir leurs fêtes. Par exemple, la religion orthodoxe a conservé l'usage du calendrier julien. De ce fait, la fête de Noël de la religion orthodoxe se situe le 25 décembre *du calendrier julien*, ce qui correspond au 7 janvier de notre calendrier grégorien.

Le calendrier musulman

Ce calendrier, utilisé pour fixer les fêtes de la religion musulmane, est un calendrier lunaire seulement, ce qui signifie que la durée moyenne du mois ($29.530556\,j$) est une bonne approximation de la lunaison. En revanche, la durée moyenne de l'année musulmane ($354.37\,j$) diffère de presque 11 jours par rapport à l'année tropique. Le calendrier musulman se décale donc chaque année par rapport au rythme des saisons, et donc par rapport à notre calendrier grégorien [1]. Les années de ce calendrier sont composées de 6 mois de 30 jours alternés avec 6 mois de 29 jours, pour donner des années de 354 jours (années ordinaires). Certaines années, le dernier mois de l'année comporte 30 jours au lieu de 29, ce qui donne des années de 355 jours (années abondantes). Les années ordinaires et les années abondantes alternent selon un cycle de 30 ans à raison de 19 années ordinaires pour 11 années abondantes. La date origine de ce calendrier est l'Hégire, qui correspond historiquement au départ de Mahomet de la Mecque, le 16 juillet 622 de l'ère chrétienne.

Le calendrier hébraïque

Ce calendrier, nettement plus complexe que ceux précédemment cités a l'avantage de conserver au long terme un bon accord à la fois avec la succession des saisons et la succession des phases de la Lune. En d'autres termes, la valeur moyenne du mois ($29.530594\,j$) est une fort bonne approximation de la lunaison, et la valeur moyenne de l'année ($365.2468\,j$) reste une approximation acceptable de l'année tropique. Le prix à payer pour ce double accord est une complexité accrue dans la succession des mois et années. Deux catégories d'années alternent de manière précise mais irrégulière selon un cycle de 19 ans : 12 années communes de 12 mois, et 7 années embolismiques de 13 mois, pour lesquelles le sixième mois, *Adar*, est répété (*Adar I* et *Adar II*). Pour les années communes, 6 mois de 30 jours alternent avec 6 mois de 29 jours pour donner des années "régulières" de 354 jours. Certaines années communes, le deuxième et le troisième mois de l'année (*'Hechvan* et *Kislev*), qui devraient compter respectivement 29 et 30 jours, peuvent en compter 29 et 29, ce qui conduit à une année de 353 jours qui est dite "défective". Ils peuvent aussi en compter 30 et 30, ce qui conduit à une année de 355 jours, qui est dite "abondante". La même chose existe pour les années embolismiques qui comportent un mois de 30 jours de plus (*Adar I*). Les années embolismiques "défectives", "régulières" et "abondantes" comporteront donc respectivement 383, 384 et 385 jours. ces différents types d'années alternent selon des règles compliquées, motivées par des contraintes religieuses, dont la description complète sortirait du cadre de ce document. La date origine de ce calendrier est différente de la date origine du calendrier grégorien : elle correspond à la date présumée de la création du Monde selon la Torah [2], en l'an -3761 du calendrier civil actuel. De ce fait, l'an 5760 du calendrier hébraïque débutera le samedi 11 septembre 1999 de notre calendrier. Pour plus de renseignement sur le calendrier hébraïque, le lecteur pourra consulter la référence [19].

4.1.2 Les définitions de la seconde

Comme on vient de le voir, les calendriers astronomiques fournissent aux hommes des repères temporels à long terme, c'est-à-dire adaptés à la description de durées comparables

1. C'est ce qui explique que le mois de Ramadan, pendant lequel les musulmans doivent respecter des règles de vie strictes, se décale chaque année et ne tombe jamais à la même date par rapport à notre calendrier.

2. Livre fondateur de la religion juive.

à la durée de vie des individus voire même des civilisations. L'astronomie fournit aussi des repères à court terme, susceptibles de cadencer la vie quotidienne jusque dans ses événements les plus brefs.

L'utilisation de phénomènes astronomiques pour définir des étalons de temps a duré jusqu'au milieu du XXeme siècle. Jusqu'à cette époque, La seconde était définie comme la 86400eme partie du jour solaire moyen, c'est-à-dire la moyenne annuelle de l'intervalle de temps séparant deux passages consécutifs du Soleil à son point culminant dans le ciel. La division du jour solaire moyen en 24 heures de 60 minutes de 60 secondes est un héritage de l'époque antique. Cette définition de la seconde basée sur le mouvement de rotation de la Terre a cessé d'être pleinement satisfaisante lorsque la précision des théories et des mesures astronomiques eut atteint un niveau suffisant pour permettre la mise en évidence, en 1952, de très légères irrégularités dans les mouvements de la Terre.

Il est à remarquer que la définition de la seconde a conduit indirectement à la définition d'une unité de longueur, bien avant que la notion de vitesse de la lumière ne soit bien maîtrisée. En effet, avec l'avènement de l'horlogerie mécanique, les horlogers ont essayé de réaliser des balanciers dont la demi-période soit aussi proche que possible de la seconde. La longueur d'un tel balancier a été une des premières définitions du mètre, et également du *yard* anglais ($0.9144\,m$).

Le balancier, base de l'horlogerie mécanique, est un des exemples de réalisation matérielle non astronomique de l'étalon de temps. Ce genre de réalisation permet une utilisation plus commode de l'étalon pour la mesure courante du temps, à condition que la mesure ne porte que sur des durées relativement courtes. En effet, ce genre d'étalon secondaire mécanique n'a ni la précision ni la stabilité à long terme que peut posséder l'étalon astronomique. Il en fut de même pour tous les autres mécanismes de mesure du temps conçus par l'homme à partir de phénomènes physiques non astronomiques dépendant du temps (clepsydres, sabliers, oscillateurs mécaniques...), et ce, jusqu'à l'époque moderne qui vit le triomphe de la physique du solide et de la physique atomique. En effet, seuls les systèmes qui utilisent les vibrations des atomes comme base de temps arrivent à rivaliser avec la précision et la stabilité des étalons de temps astronomiques. C'est en 1955, au *National Physical Laboratory* (Grande-Bretagne), que L. Essen et J.V.L. Parry réussirent à construire le premier étalon de temps atomique suffisamment fiable, précis et stable pour détrôner les étalons astronomiques.

Actuellement, depuis la treizième Conférence Générale des Poids et Mesures de 1967, la seconde est définie comme la durée de 9 192 631 770 périodes d'oscillation de la radiation émise ou absorbée par un atome de Césium 133, lors d'une transition entre les niveaux hyperfins de son état fondamental. Cette définition de la seconde est liée à un atome dont on se sert comme diapason en quelque sorte. Elle s'est avérée plus précise et surtout plus stable dans le temps que les définitions astronomiques. Cette nouvelle définition de la seconde allait conduire, lors de la quatorzième Conférence Générale des Poids et Mesures en octobre 1971, à la définition d'une nouvelle échelle de temps : le Temps Atomique International.

4.1.3 Les échelles de temps

Il existe plusieurs manières de définir "l'heure qu'il est" en astronomie. Elles sont basées sur des phénomènes physiques récurrents comme la rotation de la Terre par rapport au Soleil ou aux étoiles fixes, ou encore comme la vibration d'un atome. Nous allons décrire ci-après les plus courantes, en omettant d'autres échelles de temps tout aussi importantes,

mais à usage plus professionnel. Comme pour la question des calendriers, le lecteur curieux trouvera intérêt à la consultation de la référence [1].

Dans ce qui suit, on se placera dans une vision non-relativiste (pré-Einsteinienne) de l'espace et du temps. On supposera donc que le temps existe et qu'il est défini de manière unique pour tout observateur, quelquesoit sa position, sa vitesse, et les conditions physiques dans lesquelles il se trouve. Cette nature universelle de la notion de temps a été sérieusement remise en cause en 1905 par la théorie de la Relativité Restreinte d'Albert Einstein, et plus profondément encore par la théorie de sa Relativité Générale (1916). Par soucis de simplicité, nous ne rentrerons pas non plus dans les considérations philosophiques sur l'existence et le bien fondé du concept même de temps. Nous nous bornerons à donner un sens à la notion de *mesure du temps*, donc de repérage dans le temps d'un événement.

Notions de base

Le repérage d'un événement dans le temps nécessite de définir une *échelle de temps*, c'est-à-dire un phénomène physique accessible, qui dépende du temps d'une manière connue aussi précisément que possible, et auquel on puisse comparer l'intervalle séparant deux événements. Généralement, l'état du phénomène physique en question peut être décrit par une grandeur angulaire, exprimée en radians (l'angle de rotation de quelque-chose, ou la phase d'une vibration), qui doit croître aussi linéairement et régulièrement que possible avec le temps. La mesure de l'intervalle de temps séparant deux événements se ramène ainsi à une mesure d'angle, ou plutôt à une mesure de la variation de l'angle en question entre les deux événements. Notons que pour passer de la mesure d'un intervalle de temps à la mesure d'une date absolue, il suffit de disposer d'un événement origine auquel on attribue la date 0.

NOTA : L'utilisation des angles pour mesurer le temps a conduit à une ambiguité de langage qui gêne parfois la compréhension et peut prêter à confusion. Il est en effet fréquent d'anoncer la mesure de certains angles, non pas en radians, en grades ou en degrés, mais en *heures*, sur la base de l'équivalence suivante $360^o \leftrightarrow 24\,heures$, soit 15° pour $1\,h$. Cette utilisation d'une unité apparentée au temps pour mesurer un angle est une conséquence directe du fait que l'angle de rotation apparent du Soleil par rapport à un lieu terrestre a longtemps servi à mesurer le temps sur la base d'un tour pour 24 heures. Plus gênant encore, on utilise le système sexagésimal des Babyloniens pour subdiviser le degré en 60 minutes, et la minute en 60 secondes. Or, on fait de même pour l'heure, qu'elle soit vue comme une unité de temps ou d'angle : l'heure est elle aussi divisée en 60 minutes de 60 secondes. Il est donc impératif, quand on annonce la valeur d'un angle en minutes, de préciser s'il s'agit de minutes d'arc (un soixantième de degré), ou d'une minute d'heure (un soixantième d'heure). Il en est bien sûr de même pour les secondes. Il existe donc deux notations écrites distinctes pour éviter les confusions : un angle exprimé en degrés s'écrira par exemple : $4^o\,21'\,37''$, alors qu'un angle exprimé en heures s'écrira : $1^h\,23^m\,56^s$ (voir Section 1.1).

Plus la croissance de l'angle associé à une échelle de temps est linéaire (c'est-à-dire régulière) avec le temps, plus l'échelle de temps sera précise. Pour mettre en évidence expérimentalement les irrégularités d'une échelle de temps, il faut disposer d'une autre échelle de temps "réputée plus précise". C'est la connaissance approfondie des lois physiques qui gouvernent les phénomènes physiques sous-jacents à chaque échelle de temps, qui permet de dire qu'une échelle de temps est plus précise qu'une autre.

Il existe de nombreuses échelles de temps différentes, basées sur différents angles. On décrit ci-après quelques échelles de temps parmi les plus utilisées.

Le Temps solaire vrai local

Le temps solaire vrai local en un lieu terrestre donné et à un instant donné est défini comme étant l'angle horaire du Soleil en ce lieu et à cet instant, exprimé en heures, minutes et secondes sur la base $24\,h \Leftrightarrow 360^o$. L'angle horaire du Soleil est défini comme l'angle entre le plan méridien du lieu et le plan contenant l'axe de la Terre et le Soleil à l'instant en question. Cet angle est compté positivement quand le Soleil est à l'Ouest du plan méridien du lieu ; il vaut 00 heure au midi solaire vrai, c'est-à-dire quand le Soleil passe dans le plan méridien du lieu.

A condition d'y ajouter $12\,h$ (pour qu'il soit 12 heure et non 00 heure lors du midi solaire), ce temps est celui donné par la plupart des cadrans solaires astronomiques.

Ce temps est qualifié de "solaire" parce qu'il est directement lié au mouvement apparent du Soleil. Il est "local" en ce sens qu'il est relatif au méridien du lieu terrestre d'observation (le midi solaire vrai à Greenwich se produit $29\,min\ 12\,sec$ plus tard qu'à Nice). Il est enfin qualifié de "vrai" car il n'est pas corrigé de ses irrégularités. En effet, l'intervalle de temps entre deux passages du Soleil au méridien d'un même lieu ne vaut pas toujours exactement $24\,h$. Cette irrégularité est dûe à la fois au fait que la Terre tourne autour du Soleil sur une orbite elliptique et non circulaire, et au fait que l'axe de rotation de la Terre sur elle-même n'est pas perpendiculaire au plan de son orbite. En quelque sorte, le temps solaire vrai est un temps qui ne s'écoule pas régulièrement. C'est la raison pour laquelle l'heure lue directement sur un cadran solaire, sans appliquer autre chose que des corrections de fuseau horaire, semble entachée d'erreurs pouvant dépasser 15 minutes.

Le temps solaire moyen local

C'est le temps solaire vrai, débarrassé par effet de moyenne des irrégularités annuelles citées ci-dessus. Ce serait l'angle horaire du Soleil si l'orbite terrestre était rigoureusement circulaire, et si l'axe de rotation de la Terre sur elle-même était perpendiculaire au plan écliptique, au lieu d'être incliné de $23^o\ 26'$.

Cette irrégularité, ou plus précisément la différence "temps solaire moyen − temps solaire vrai" porte le nom d'Equation du Temps. La figure 4.1 donne la valeur de cette correction au cours de l'année. On constate qu'elle oscille en gros entre -16 minutes et $+14$ minutes, ce qui n'est pas négligeable. C'est cette correction qu'il faut ajouter à la lecture d'un cadran solaire astronomique pour obtenir le temps solaire moyen, duquel on tire l'heure légale (celle des montres et horloges) par adjonction de la longitude ouest du lieu (soustraction de la longitude Est) et de la correction de fuseau horaire (en France métropolitaine, $+1\,h$ en hiver et $+2\,h$ en été).

Le temps civil local

C'est le temps solaire moyen local augmenté de $12\,h$, pour que le passage du Soleil au méridien se situe aux environs de 12 heure au lieu de 00 heure.

Le temps universel UT

C'est le temps civil du méridien de Greenwich. Le vocable "Temps Universel" et l'abréviation "UT" ont été standardisés par l'UAI (Union Astronomique Internationale), en remplacement du vocable "Greenwich Mean Time" et de son abréviation "GMT" dont l'usage est à proscrire.

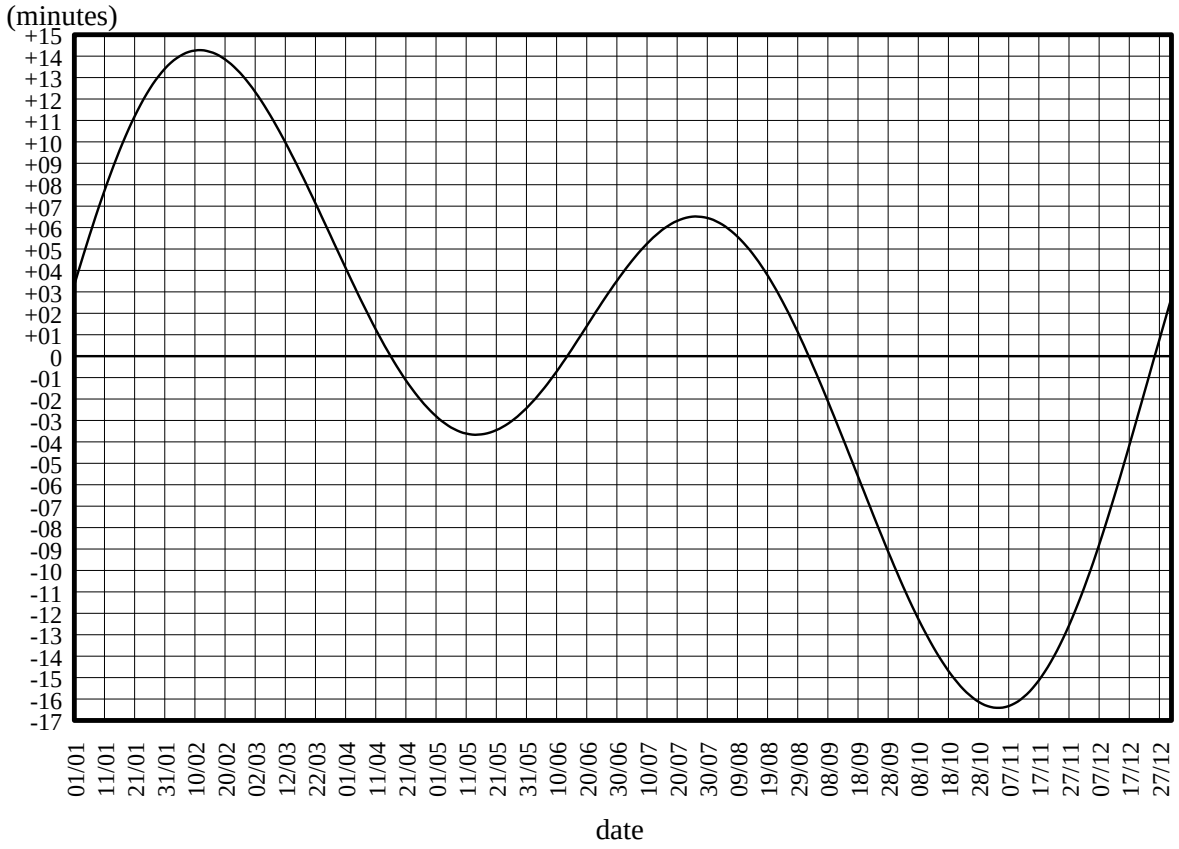


FIGURE 4.1 – *L'Equation du Temps (correction à ajouter au temps solaire vrai pour obtenir le temps solaire moyen).*

Le temps universel UT1

C'est une variante du temps universel UT, dont la définition est identique à celle de UT, à ceci près que la notion de méridien qui intervient dans la définition fait référence au *véritable* axe de rotation instantané de la Terre et non à un axe moyen.

Le temps atomique international TAI

C'est une échelle de temps qui n'est pas définie astronomiquement, mais atomiquement. Le phénomène physique qui définit le TAI n'est plus la rotation d'un corps céleste, mais la vibration de l'atome de Césium 133 (voir Section 4.1.2). C'est l'échelle de temps la plus régulière et la plus stable actuellement réalisable.

Le temps universel coordonné UTC

La rotation de la Terre sur elle-même est progressivement ralentie à cause de la dissipation visqueuse d'énergie dûe aux mouvements de marée. De ce fait, la durée du jour solaire moyen augmente d'environ $1.78\,ms/siecle$. Il s'en suit que le temps universel UT1 semble "retarder" par rapport au temps atomique. Le Temps Universel Coordonné UTC est un artifice qui a été introduit pour a fournir une échelle de temps qui a la stabilité du temps atomique internationale, tout en restant au long terme en accord approximatif avec le temps UT1 d'origine astronomique. Plus précisément, le temps universel coordonné UTC n'est autre que le temps atomique international TAI, diminué d'un nombre entier de secondes pour être toujours en accord avec le temps universel UT1 à moins d'une seconde près. Compte tenu du ralentissement lent et irrégulier du temps UT1, il faut de temps en temps retrancher une seconde supplémentaire au TAI pour qu'il reste en accord approximatif avec le temps UT1 d'origine astronomique. C'est l'IERS (International Earth Rotation Service) qui décide quand retrancher les secondes en question. Cela s'est produit par exemple le 1er janvier 1999 à $00\,h\ 59\,m\ 59\,s$, heure de Paris, ce qui conduit, depuis cette date, à un décalage total de $32\,s$ entre le temps TAI et le temps UTC, et ce, jusqu'à la prochaine décision d'ajout d'une seconde. Le temps UTC est celui utilisé par le système de positionnement GPS (Global Positioning System). Il a la régularité métrologique du temps atomique, tout en gardant un bon accord avec les mouvements astronomiques. Il est à la base de la définition du temps légal dans la plupart des pays.

Le temps légal

C'est le temps universel coordonné, décalé d'un nombre entier d'heures variable selon les pays, les saisons et les fuseaux horaires. En France par exemple, l'heure légale est l'heure UTC additionnée d'une heure en hiver, et de deux heures en été.

Le temps sidéral local

L'échelle de temps sidéral reflète la rotation *propre* de la Terre sur elle-même, indépendamment de son mouvement orbital autour du Soleil. Plus précisément, le temps sidéral à un instant donné et en un lieu terrestre donné est l'angle entre le plan méridien contenant la direction vernale (direction du Soleil lors de l'équinoxe de printemps) et le plan méridien du lieu, exprimé en heures, minutes et secondes sur la base $24\,h \Leftrightarrow 360^o$. Cet angle est compté positivement quand le plan méridien du lieu est à l'Ouest de la direction vernale. Cette mesure du temps est directement liée au mouvement de rotation de la Terre sur

elle-même par rapport à une direction fixe (ou presque fixe) : la direction vernale, et non plus par rapport au Soleil. Il faut une durée de $23\,h\ 56\,m\ 04\,s$ pour que le temps sidéral augmente de 360° (soit $24\,h$). Ce décalage d'environ 4 minutes par jour vient du fait que la seconde, et par conséquent la minute et l'heure, ont été définies à partir de la période de rotation moyenne de la Terre *par rapport au Soleil*, alors que le temps sidéral fait référence à la période de rotation de la Terre *par rapport à une direction (quasi-)fixe*. Le temps sidéral est celui utilisé pour le pointage des instruments astronomiques.

NOTA : A cause du phénomène de précession des équinoxes, la direction vernale est en faite animée d'un lent mouvement de dérive qui lui fait faire un tour complet en 25 770 ans environ. Un autre mouvement moins ample mais plus rapide, la nutation, se superpose à la lente dérive dûe à la précession. De ce fait, il faut en principe préciser par rapport à quel point vernal on a mesure le temps sidéral, et cela donne lieu à plusieurs variantes de la même échelle de temps.

4.2 L'espace en astronomie

4.2.1 Les unités de mesure des distances en astronomie

Les distances intervenant en astronomie sont immenses, au point que les unités de mesure usuelles (mètre, kilomètre...) ne sont pas adaptées à leur description. Un certain nombre d'unités spécifiquement astronomiques ont été introduites dans ce but. On définit ci-après les plus courantes :

- **l'Unité Astronomique (ua)** : Elle est définie comme étant le demi-grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil, c'est-à-dire la moyenne de la distance maximale et de la distance minimale de la Terre au Soleil. En 1992, l'IERS (International Earth Rotation Service) a fixé sa valeur précise à : $1\ ua = 149\,597\,870\,610\ m$, soit environ **150 millions de kilomètres**.
- **l'Année-Lumière (al)** : Elle est définie par la distance parcourue en une année julienne (365.25 jours) par la lumière dans le vide, à la vitesse $c = 299\,792\,458\ m/s$. Sa valeur est donc : $1\ al = 9.460\,730\,472\,5808\ 10^{15}\,m$, soit environ **9500 milliards de kilomètres**.
- **le Parsec (pc)** : Il est définie comme étant la distance à laquelle on verrait un objet de $1\,ua$ sous un angle de une seconde d'arc (la seconde d'arc est la 3600eme partie du degré). Le mot "parsec" est la contraction de "parallaxe-seconde" (voir la section 1.1.6 pour une définition de la notion de parallaxe). Compte tenu de la valeurs précise de l'Unité Astronomique fixée par l'IERS en 1992, la valeur du Parsec est donc : $1\ pc = 3.085\,677\,5807\ 10^{16}\ m$, soit environ **31000 milliards de kilomètres**, Notons que la parallaxe d'une étoile est la très légère variation annuelle de sa position apparente dûe au fait qu'elle est vue, au cours de l'année, depuis différents points de l'orbite terrestre. L'astronome allemand F. Bessel fut le premier, en 1838, à mesurer la parallaxe d'une étoile (61-Cygni), et donc sa distance.

La table 4.1 donne les règles de conversion mutuelle entre le kilomètre, l'Unité Astronomique (selon IERS 1992), l'Année-Lumière et le Parsec.

4.2.2 Les systèmes de repérage spatial

Le repérage dans l'espace d'un objet céleste quelconque nécessite que l'on définisse précisément de manière conventionnelle le point (origine) par rapport auquel on veut repérer l'objet, ainsi que trois directions de référence orthogonales entre elles. Notons

	km	ua	al	pc
1 km =	1 km	6.684 587 1241 10^{-9} ua	1.057 000 834 02 10^{-13} al	3.240 779 2903 10^{-14} pc
1 ua =	149 597 870.610 km	1 ua	1.581 250 7406 10^{-5} al	4.848 136 8111 10^{-6} pc
1 al =	9.460 730 472 5808 10^{12} km	63 241.077 10 ua	1 al	0.306 601 393 87 pc
1 pc =	3.085 677 5807 10^{13} km	206 264.806 248 ua	3.261 563 7763 al	1 pc

TABLE 4.1 – *Table de conversion entre les diverses unités de longueur utilisées en astronomie.*

qu'en général, on a coutume de privilégier une de ces trois directions, et de nommer "plan de base" le plan engendré par les deux autres. Cette notion de plan de base permet de donner des noms simples aux différents systèmes de repérage utilisés en astronomie. On décrit ci-après les plus fréquemment utilisés :

- **Repérage horizontal** : Le plan de base est le plan horizontal du lieu d'observation. Les trois directions de référence sont respectivement la verticale locale (Zénith), le Sud local et l'Est local (voir Figure 4.2). Le point d'origine est le lieu d'observation (système topocentrique). Dans ce repère, la position d'un point M peut être fixée soit par ses coordonnées cartésiennes (X, Y, Z), qui sont les projections du point M sur les trois directions de référence, soit par ses coordonnées sphériques (R, a, h) : R est la distance de l'objet à l'origine ; a est l'azimut, mesuré en degrés à partir du Sud, croissant vers l'Ouest ; h est la hauteur, mesurée en degrés à partir de l'horizontale, croissant vers le Zénith. Il arrive que l'on utilise non pas la hauteur h mais son complément à l'angle droit appelé "distance zénithale", qui est nulle au Zénith et vaut 180° au Nadir (opposé du Zénith). Notons qu'une pratique anglo-saxonne (qui se généralise en astronomie) veut que l'on mesure l'azimut par rapport au *Nord* (positif verst l'Est), et non pas par rapport au Sud. Comme les deux conventions subsistent encore actuellement, il **convient d'etre prudent et de vérifier la convention choisie**. Notons qu'on appelle aussi ce système de coordonnées le **repérage alt-azimutal** ou encore le **repérage azimutal**.
- **Repérage équatorial** : Le plan de base est le plan équatorial terrestre. Les trois directions de référence sont respectivement la direction du pôle Nord terrestre, la "direction vernale" [3] ou "point vernal" γ (direction "Terre→Soleil" lors de l'équinoxe de printemps) et une direction orthogonale aux deux précédentes (voir Figure 4.3). Le point d'origine peut être le centre de la Terre (système géocentrique) ou le lieu d'observation (système topocentrique). Dans ce type de repère, la position d'un point M peut être fixée soit par ses coordonnées cartésiennes (X, Y, Z), qui sont les projections du point M sur les trois directions de référence, soit par ses coordonnées sphériques (R, α, δ) : R est la distance de l'objet à l'origine ; α est l'ascension droite, mesurée à partir de la direction vernale, croissant dans le sens de rotation terrestre ; δ est la déclinaison, mesurée à partir de l'équateur, croissant vers le pôle Nord. Il est de coutume d'exprimer l'ascension droite non pas en degrés, mais en heures sur la base $24\,h \Leftrightarrow 360^o$ (voir la note en Section 4.1.3 sur l'utilisation de l'heure comme unité d'angle). La déclinaison, en revanche reste traditionnellement exprimée en degrés.
  Signalons qu'il existe deux autres variantes du repérage équatorial : le repérage horaire (voir Figure 4.4) et le repérage géographiques (voir Figure 4.5). Le repérage horaire utilise une direction-origine qui n'est plus le point vernal, mais la direction du méridien local. L'ascension droite est remplacée par l'angle horaire, mesuré de

3. Le mot "vernal" vient du latin *vers* : le printemps.

manière *rétrograde*. C'est le repérage utilisé pour le pointage des instruments astronomiques.
Le repérage géographique est utilisé pour le repérage de points à la surface de la Terre. Il se base sur la direction du méridien de Greenwich comme direction-origine. L'ascension droite devient la longitude et la déclinaison devient la latitude. On spécifie le signe de la longitude soit par les lettres "E" (Est) et "O" (Ouest), soit par les signes, "+" et "-". En général (mais pas toujours), le signe "+" correspond aux longitudes Est et le signe "-" aux longitudes Ouest (norme ISO 6709). La lettre "O" est parfois remplacée par "W" pour *West* (Ouest en anglais). Pour la latitude, le signe est spécifié soit par les lettres "N" (Nord) et "S" (Sud), soit par les signes, "+" et "-". Le signe "+" correspond aux latitudes Nord et le signe "-" aux latitudes Sud.
Compte tenu du fait que la Terre n'est pas sphérique (et pas complètement rigide non plus), il y a des points subtiles dans la manière précise de définir la latitude et le longitude. Ces subtilités qui relèvent de la géodésie ne sont pas abordées dans cet ouvrage d'introduction.

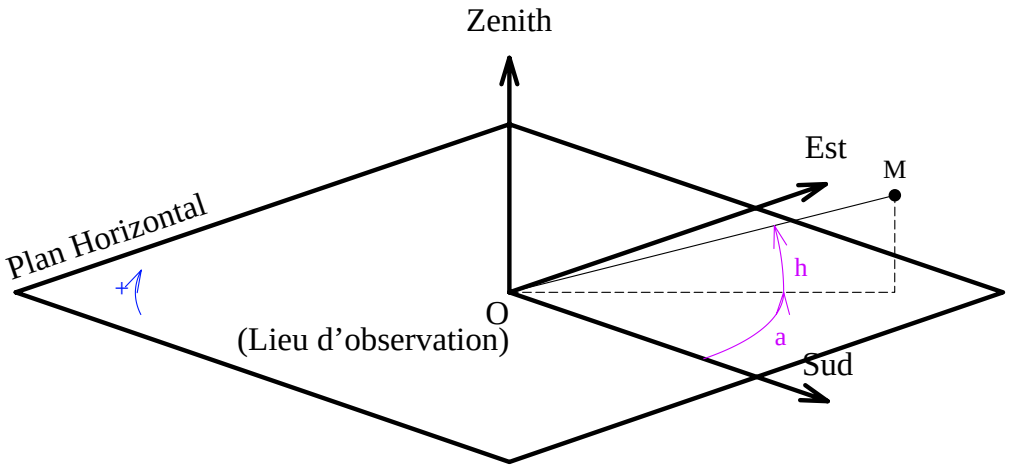
– **Repérage écliptique** : Le plan de base est le plan écliptique[4] c'est-à-dire le plan de l'orbite terrestre autour du Soleil. Les trois directions de référence sont respectivement la direction du pôle Nord écliptique (celle des deux directions orthogonales au plan écliptique, qui fait le plus petit angle avec la direction du Nord terrestre), la direction vernale γ (voir définition plus haut) et une direction orthogonale aux deux précédentes (voir Figure 4.6). Le point d'origine peut être le centre du Soleil (système héliocentrique), le centre de la Terre (système géocentrique) ou même le lieu d'observation (système topocentrique). Dans ce type de repère, la position d'un point M peut être fixée soit par ses coordonnées cartésiennes (X, Y, Z), qui sont les projections du point M sur les trois directions de référence, soit par ses coordonnées sphériques (R, l, λ) : R est la distance de l'objet à l'origine ; l est la longitude écliptique, mesurée en degrés à partir de la direction vernale, croissant dans le sens de rotation terrestre ; λ est la latitude écliptique mesurée en degrés à partir de l'écliptique, croissant vers le Nord écliptique.

Il existe d'autres repérages spécifiques utilisés dans certaines branches de l'astronomie. Nous ne les détaillerons pas ici pour ne pas alourdir l'exposé.

NOTA 1 : Lorsque le repérage équatorial géocentrique se fait non plus par rapport à la direction vernale, mais par rapport à la direction du méridien de Greenwich, alors le repérage prend le nom de "repérage terrestre". L'ascension droite et le déclinaison prennent alors les noms de "longitude" et "latitude".
NOTA 2 : Lorsque le repérage équatorial topocentrique se fait non plus par rapport à la direction vernale, mais par rapport à la direction du méridien du lieu d'observation, alors le repérage prend le nom de "repérage horaire". L'ascension droite devient "l'angle horaire" (au signe près) et la déclinaison garde son nom.
NOTA 3 : Signalons une difficulté concernant les repérages équatoriaux et écliptiques : par suite, entre autre, de la non-sphéricité de la Terre et de l'interaction Terre-Lune, la direction de l'axe de rotation de la Terre ne reste pas fixe. Elle est animée d'un mouvement lent et régulier (la précession des équinoxes) qui s'effectue sur une période approximative de 25 770 ans, et d'un mouvement oscillant plus rapide mais de faible amplitude et de moyenne nulle (la nutation). Il s'en suit que le plan équatorial et la direction vernale qui servent à définir les repérages équatoriaux et écliptiques ne sont pas fixes. Pour pouvoir cependant comparer les coordonnées équatoriales ou écliptiques d'un même corps, il faut mentionner par rapport à quel plan équatorial et quelle direction vernale sont rapportées lesdites coordonnées. Le plan équatorial de référence peut être le plan équatorial vrai à une date donnée ou le plan équatorial moyen (débarrassé

4. Le mot "écliptique" vient de la notion d'éclipse. Le plan écliptique est en effet le plan dans lequel doit se trouver la Lune pour pouvoir produire une éclipse.

du mouvement de nutation) à la même date. De plus, la date en question peut être la date d'observation ou une date standard de référence (souvent 1900, 1950, 2000, ...). Les catalogues d'objets célestes donnent très souvent les coordonnées équatoriales rapportées à l'équateur moyen de l'époque 1950 ou 2000. Les variations par rapport à la date d'observation doivent être prises en compte si une certaine précision sur α et δ est requise.



LE REPERAGE HORIZONTAL

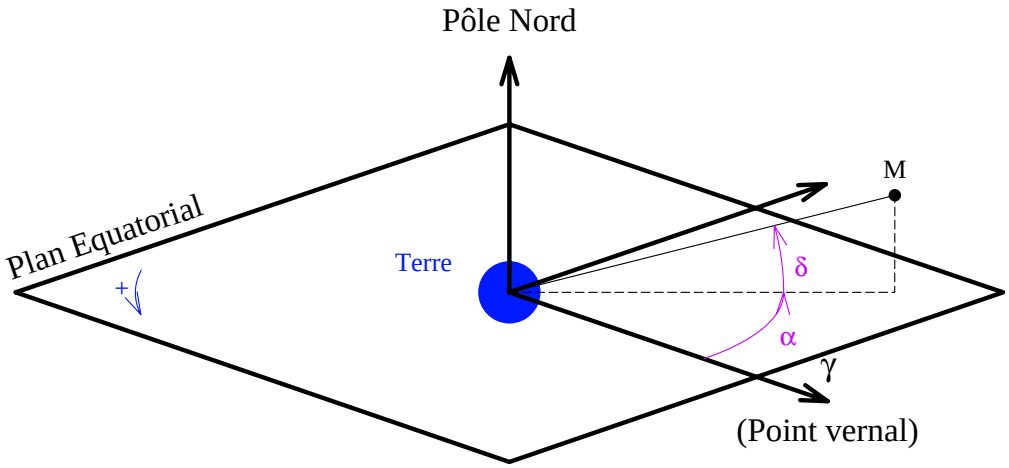
- a : **Azimut** (en degrés, minutes et secondes).
- h : **Hauteur** (en degrés, minutes et secondes).

NOTA:

Le repérage horizontal est généralement topocentrique.

L'origine d'azimut peut être soit le Sud soit le Nord géographique.

FIGURE 4.2 – *Le repérage horizontal topocentrique. La flèche courbe accompagnée du signe "+" précise la convention de signe pour l'azimut (convention non trigonométrique).*



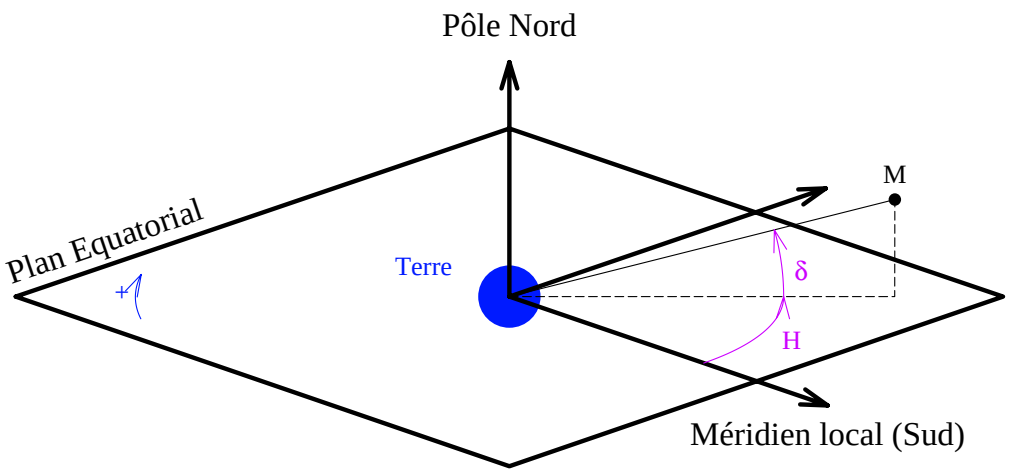
LE REPERAGE EQUATORIAL

- α : **Ascension droite** (en heures, minutes et secondes).
- δ : **Déclinaison** (en degrés, minutes et secondes).

NOTA:

Le repérage équatorial peut être géocentrique ou topocentrique.

FIGURE 4.3 – *Le repérage équatorial géocentrique. La flèche courbe accompagnée du signe "+" précise la convention de signe pour l'ascension droite.*



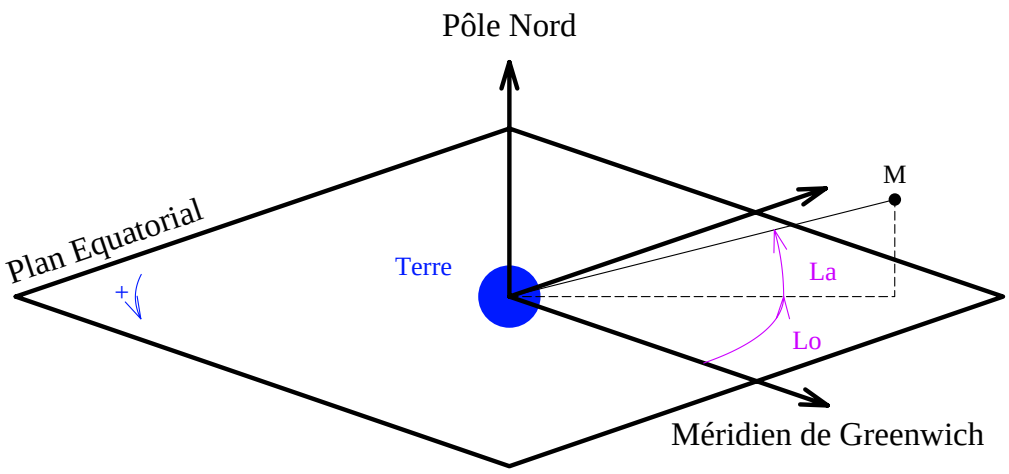
LE REPERAGE HORAIRE

- H : **Angle horaire** (en heures, minutes et secondes).
- δ : **Déclinaison** (en degrés, minutes et secondes).

NOTA:

Le repérage horaire peut être géocentrique ou topocentrique.

FIGURE 4.4 – *Le repérage horaire géocentrique. C'est une variante du repérage équatorial, dont la direction-origine dans le plan équatorial est celle du méridien local et non plus du point vernal. La flèche courbe accompagnée du signe "+" précise la convention de signe pour l'angle horaire (convention non trigonométrique).*



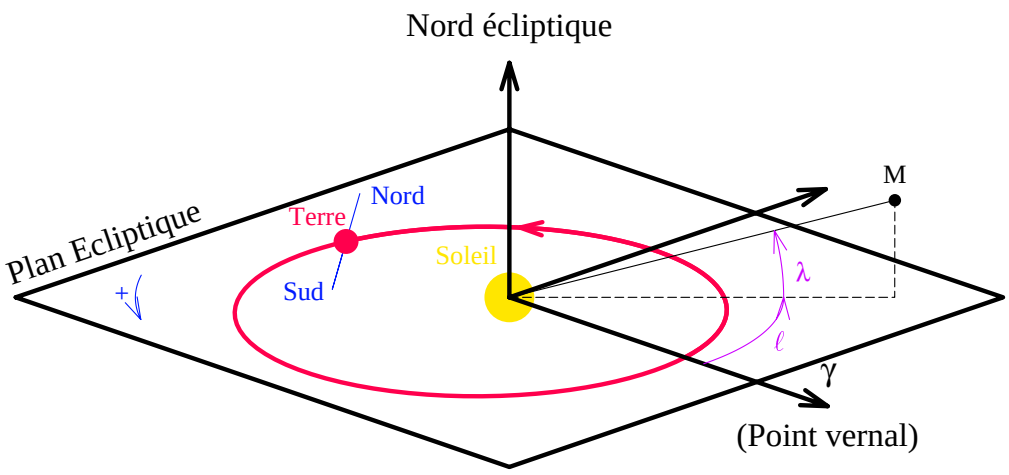
LE REPERAGE GEOGRAPHIQUE

- Lo: **Longitude** (en heures, minutes et secondes).
- La: **latitude** (en degrés, minutes et secondes).

NOTA:

Le repérage géographique est toujours géocentrique.

FIGURE 4.5 – *Le repérage géographique. C'est encore une variante du repérage équatorial, réserve en général au repérage de localités à la surface de la Terre. La direction-origine est celle du méridien de Greenwich. La flèche courbe accompagnée du signe "+" précise la convention de signe pour la longitude (convention trigonométrique).*



LE REPERAGE ECLIPTIQUE

- ℓ **: Longitude écliptique** (en degrés, minutes et secondes).
- λ **: Latitude écliptique** (en degrés, minutes et secondes).

NOTA:

Le repérage écliptique peut être héliocentrique, géocentrique ou topocentrique.

FIGURE 4.6 – *Le repérage écliptique héliocentrique. La flèche courbe accompagnée du signe "+" précise la convention de signe pour la longitude écliptique.*

4.3 Synthèse

Les calendriers

Les calendriers sont des systèmes de repérage temporel à long terme, basés sur des divisions du temps en jours, mois et années. Ces divisions doivent reposer sur des nombres entiers pour être "facilement" utilisables (un nombre entier de mois par an et de jours par mois). Pour des raisons civiles et/ou religieuses, les calendriers doivent aussi rester synchronisés par rapport aux rythmes astronomiques (la récurrence du midi solaire, de la nouvelle lune et des équinoxes). Ces trois rythmes astronomiques fondamentaux n'étant pas multiples les uns des autres, il est nécessaire d'introduire des irrégularités dans la succession des jours, mois et années pour garantir ce synchronisme. Il existe de très nombreux calendriers, parmi lesquels :

- **Le calendrier julien** : en vigueur en occident de -45 à 1582. C'est un calendrier solaire seulement (pas de synchronisation entre les mois et les lunaisons). Il est basé sur des cycles de 4 ans comportant 3 années ordinaires de 365 jours et une année bissextile de 366 jours. Les millésimes divisibles par 4 sont bissextiles.
- **Le calendrier grégorien** : issu de la réforme calendaire du pape Grégoire XIII, il est en vigueur depuis 1582. Il est actuellement le calendrier civil dans la majeure partie du monde industrialisé. Il est basé sur des cycles de 400 ans comportant 97 années bissextiles et 303 années ordinaires. Les années bissextiles sont celles du calendrier julien, *sauf* les millésimes divisibles par 100 sans l'être par 400, qui ne sont *pas* bissextiles, alors qu'ils l'auraient été selon le calendrier julien.
- **Le calendrier musulman** : C'est un calendrier lunaire seulement (pas de synchronisation entre les années du calendrier et le cycle des saisons). L'origine de ce calendrier est l'Hégire en l'an 622 de l'ère chrétienne.
- **Le calendrier hébraïque** : C'est un calendrier luni-solaire qui reste synchrone avec le cycle des lunaisons et avec le cycle des saisons, au prix d'une certaine complexité. La date origine de ce calendrier est la date présumée de la Création du Monde selon la Torah, soit en -3761 de l'ère chrétienne.

Les échelles de temps

Une échelle de temps est un phénomène physique caractérisé par un angle qui croît aussi régulièrement que possible avec le temps, et qui puisse être utilisé pour mesurer l'intervalle de temps qui sépare deux événements. La valeur de l'angle est alors annoncée en heures et subdivisions sexagésimales plutôt qu'en degrés, selon l'équivalence $360^o \leftrightarrow 24\,h$. On rappelle ci-après les principales échelles de temps :

- **Le temps solaire local vrai** : l'angle utilisé est l'angle horaire du Soleil, c'est-à-dire l'angle entre le plan contenant l'axe des pôles terrestres et passant par le Soleil, et le plan contenant ce même axe et le lieu d'observation (plan méridien local).
- **Le temps solaire local moyen** : l'angle utilisé est l'angle horaire du Soleil, moyenné sur une année. Par cette moyenne, l'angle en question est débarrassé des irrégularités périodiques dûes à l'ellipticité de l'orbite terrestre, et à l'inclinaison de l'axe des pôles. Jusqu'en 1967, la seconde de temps était définie comme la 86400eme partie du jour solaire moyen.
- **Le temps universel (UT)** : c'est le temps solaire moyen sur le méridien de Greenwich, qui sert de référence de longitude.

- **Le temps universel (UT1)** : c'est une variante du temps universel, pour laquelle l'angle horaire est mesuré autour de l'axe de rotation instantané de la Terre.
- **Le temps atomique international (TAI)** : l'angle utilisé n'est plus d'origine astronomique. C'est l'angle de phase de la vibration émise par un atome de Césium 133. C'est l'échelle de temps la plus stable connue actuellement. Depuis 1967, la seconde de temps n'est plus définie astronomiquement, mais par rapport à la période de cette vibration atomique.
- **Le temps universel coordonné (UTC)** : C'est le TAI, auquel on a retranché un nombre entier de secondes (32 actuellement) pour qu'il reste à moins d'une seconde du temps universel UT1. C'est l'heure légale de l'horloge parlante.
- **Le temps sidéral local** : l'angle utilisé est l'angle entre le méridien local et une direction fixe (ou presque), appelée direction vernale.

Les unités de mesure de distance en astronomie

- **l'Unité Astronomique (ua)** : c'est le demi-grand axe de l'orbite terrestre, soit $1\,ua = 150\,10^6\,km$ environ.
- **L'Année-Lumière (al)** : c'est la distance parcourue par la lumière en un an, soit $1\,al = 9.5\,10^{12}\,km$ environ.
- **le Parsec (pc)** : c'est la distance à laquelle on verrait le demi-grand axe de l'orbite terrestre sous un angle de 1 seconde d'arc, soit $1\,pc = 31\,10^{12}\,km$ environ.

Les systèmes de repérage spatial

Un système de repérage spatial est caractérisé par un plan de référence orienté, un point-origine et une direction-origine dans ce plan. Un point est alors repéré par sa distance à l'origine, et par deux angles. Le repère est topocentrique si son origine est le lieu d'observation, géocentrique si c'est le centre de la Terre, ou héliocentrique si c'est le centre du Soleil. Les principaux types de repères sont :

- **Le repérage horizontal** : le plan de référence est le plan horizontal local. La direction-origine est le sud local. Les deux angles sont l'azimut a et la hauteur h.
- **Le repérage équatorial** : le plan de référence est le plan de l'équateur terrestre. La direction-origine est la direction vernale. Les deux angles sont l'ascension droite α et la déclinaison δ.
- **Le repérage écliptique** : le plan de base est le plan écliptique (plan de l'orbite terrestre). La direction-origine est la direction vernale. Les deux angles sont la longitude écliptique l et la latitude écliptique λ.

Chapitre 5

Les bases de la mécanique céleste

La mécanique céleste est la discipline qui traite des mouvements des corps célestes, et plus particulièrement, des corps du système solaire. L'étude de ces mouvements nécessite que l'on connaisse deux choses : d'une part les causes de ces mouvements, c'est-à-dire les forces en présence, et d'autre part les lois physiques qui relient les causes (les forces) aux effets (les mouvements), c'est-à-dire les principes fondamentaux de la mécanique.

Dans ce qui suit, on décrit les forces (interactions fondamentales) présentes dans la nature, ainsi que les lois de la mécanique de Newton et Galilée. On rappelle ensuite les lois de kepler, puis on les démontre en appliquant les lois de la mécanique au cas simple d'une particule ponctuelle soumise exclusivement au champ de gravité d'une autre particule ponctuelle *fixe* (problème dit "à un corps"). On étend ensuite le même raisonnement au cas où les deux particules ponctuelles sont mobiles (problème dit "à deux corps"). On termine par quelques idées sur le cas plus réaliste de plusieurs particules mobiles non ponctuelles et en interaction.

5.1 Les interactions fondamentales

Dans l'état actuel des connaissances, on admet qu'il existe dans la nature quatre interactions fondamentales [1] qui jouent chacune un rôle particulier dans l'équilibre de la nature. En voici la liste :

- L'interaction forte : Elle agit au niveau des constituants de la matière nucléaire, c'est-à-dire sur des distances très courtes, de l'ordre de la taille des protons et neutrons qui constituent les noyaux des atomes. C'est cette interaction qui est responsable de la cohésion des nucléons (protons et neutrons) dans les noyaux atomiques, en empêchant les protons de se séparer sous l'effet de la répulsion électrostatique énorme qui existe entre deux particules très proches et de même charge. Sans cette interaction, les noyaux, donc les atomes et donc toute la matière structurée de sauraient exister.
- L'interaction faible : Elle est responsable de la radioactivité β. Sa portée est en gros mille fois plus faible que celle de l'interaction forte, et son intensité un million de fois plus faible approximativement.
- L'interaction électromagnétique : Elle est de portée infinie et agit entre toutes les

1. On sait maintenant qu'en fait, deux de ces interactions sont parentes, comme si l'une et l'autre n'étaient que deux apparences d'une même interaction encore plus fondamentale. Pour simplifier l'exposé, on considérera ces deux interactions comme indépendantes.

particules chargées. C'est cette interaction qui est responsable de la cohésion des atomes (noyau positif et électrons négatifs), et indirectement de la cohésion des molécules, des interactions attractives ou répulsives entre molécules (forces de van der Waals) et donc de la cohérence de la matière macroscopique telle que nous la connaissons. Sans cette interaction, les atomes ne garderaient pas leur cortège électronique, et ne pourraient donc pas donner lieu à de la matière consistante et à une chimie.

– L'interaction gravitationnelle : Elle est de portée infinie et agit sur toutes les particules massives [2] A l'échelle atomique ou moléculaire, cette interaction est totalement négligeable en général par rapport à l'interaction électromagnétique. En revanche, à l'échelle d'objets macroscopiques non chargés, elle devient prédominante. C'est cette interaction qui nous lie à la Terre en nous rendant pesants ; c'est aussi elle qui est responsable de la cohésion du système solaire, et d'une manière générale de la cohésion de l'Univers à grande échelle. Sans cette interaction, les étoiles ne pourraient pas se former, et l'Univers serait une mixture homogène et froide d'hydrogène et d'hélium.

Pour comparer plus quantitativement ces quatre interactions, on va donner une forme mathématique unique à leur effet. La forme en question n'est qu'une approximation dite "approximation statique newtonienne". On quantifiera donc l'effet d'une interaction par l'énergie potentielle $V(r)$ qu'elle confère à un couple de particules écartées d'une distance r. Au moins à un certain niveau d'approximation, les quatre interactions produisent une énergie potentielle $V(r)$ de la forme :

$$V(r) = \hbar c \alpha \, \frac{1}{r} \, e^{-\frac{r}{\lambda}}.$$

Dans cette expression, $\hbar = h/2\pi = 1.054\ 10^{-34}\ kg\, m^2\, s^{-1}$ est la constante de Planck et $c = 299\,792\,458\ m\, s^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide. Le coefficient α est un nombre sans dimension appelé constante de structure, qui dépend de l'interaction considérée, et éventuellement des particules interagissantes, et qui mesure la "force" de l'interaction. Le coefficient λ a la dimension d'une longueur : c'est la *portée* de l'interaction [3]. Si, comme on le fait en physique des particules, on assimile une interaction à une sorte d'échange d'une particule messagère appelée boson intermédiaire, alors la portée de l'interaction est directement liée à la masse m de son boson intermédiaire par la relation :

$$\lambda = \frac{\hbar}{mc}.$$

Ayant défini la force (constante de structure) α et la portée λ des interactions, on peut dresser un tableau récapitulatif et comparatif des quatre interactions (Table 5.1).

Dans tout ce qui va suivre, on concentrera l'effort sur la mécanique céleste, domaine pour lequel seule l'interaction gravitationnelle entre en jeu. On exprimera comme suit la force gravitationnelle $\vec{F}_{a\to b}$ exercée par une particule ponctuelle A de masse m_a sur une particule ponctuelle B de masse m_b :

$$\vec{F}_{a\to b} = -\mathcal{G}\, \frac{m_a m_b}{r^2}\ \vec{u}_{a\to b}, \tag{5.1}$$

2. En fait, selon la théorie de la Relativité Générale, la gravitation serait même susceptible d'agir sur les photons, réputés de masse nulle, en courbant leurs trajectoires. C'est l'effet de lentille gravitationnelle.

3. Si la portée λ est infinie, comme dans le cas des interactions électromagnétiques et gravitationnelles, alors le terme exponentiel disparaît et l'on retrouve la forme habituelle en $1/r$.

	Forte	Faible	Electromag.	Gravitation
Boson int.	Π	$W^{\pm}$, Z^o	Photon	Graviton (?)
Masse	$\simeq 140\ MeV$	$\simeq 100\ GeV$	0 (?)	0 (?)
λ	$\simeq 1.4\ 10^{-15}\ m$	$\simeq 2\ 10^{-18}\ m$	∞	∞
α	10	10^{-5}	$\frac{1}{137}$	$\simeq 6\ 10^{-39}$
Rôle	Cohésion nucléaire	Radioactivité β	Cohérence de la matière, chimie	Cohérence de l'Univers

TABLE 5.1 – *Tableau comparatif des quatre interactions fondamentales. La constante de structure α est donnée pour une paire de protons dans les cas de l'interaction électromagnétique, et de l'interaction gravitationnelle.*

où $\vec{u}_{a\to b}$ est le vecteur unitaire pointant de A vers B, où r est la distance de A à B, et où $\mathcal{G}$ est la constante de gravitation universelle : $\mathcal{G} = 6.672\ 10^{-11}\ kg^{-1}\, m^3\, s^{-2}$. La formule (5.1) est connue sous le nom de "formule de Newton", car elle a été établie par Newton lors qu'il eut compris que la force qui attire une pomme à terre et la force qui attire la Lune vers la Terre pour lui donner un mouvement circulaire et non rectiligne, sont une seule et même force, qui s'exerce universellement entre deux corps massifs quelconques. Pour être précis, il aurait fallu appeler masses gravitationnelles les coefficients m_a et m_b qui interviennent dans l'expression (5.1) de la force de gravitation.

5.2 La mécanique de Newton et Galilée

Tout ce qui va suivre se placera dans le cadre de la mécanique classique de Newton et Galilée. Il ne sera fait usage ni de la Théorie de la Relativité d'Einstein, ni des concepts de la mécanique quantique.

Pour énoncer de manière condensée et moderne les lois de la mécanique classique, il convient d'abord de définir la notion de référentiel, puis de référentiel galiléen, et enfin d'énoncer les lois de la mécanique de Newton dans un référentiel galiléen quelconque.

5.2.1 La notion de référentiel

On appellera *référentiel* tout ensemble physique constitué par une horloge et trois directions matérielles concourantes rigidement liées entre elles (par exemple trois arêtes perpendiculaires d'une salle d'expérience ou d'une voiture de train).

5.2.2 La notion de référentiel galiléen

On appellera *référentiel galiléen* ou *référentiel inertiel* tout référentiel dans lequel le mouvement libre d'une particule matérielle (soumise à aucune force) est forcément rectiligne uniforme.

Il est à noter que cette notion est un absolu, c'est-à-dire une abstraction mathématique. En pratique, tout comme un gaz dit "parfait" n'est parfait qu'avec une certaine précision finie, un référentiel dit "galiléen" n'est galiléen qu'avec une certaine précision, la précision

avec laquelle on arrive à s'assurer qu'un mouvement dans ce référentiel est bien rectiligne uniforme.

Un corollaire de cette définition est que si un référentiel $\mathcal{R}'$ est animé d'un mouvement de translation uniforme par rapport à un référentiel galiléen $\mathcal{R}_0$, alors le référentiel $\mathcal{R}'$ est lui aussi galiléen

Le postulat de base de ce qu'on appelle souvent "la Relativité de Galilée" par opposition à la Relativité d'Einstein, est que les lois de la *mécanique*[4] doivent être les mêmes dans tous les référentiels galiléens.

5.2.3 Les lois fondamentales de la mécanique classique

Les lois fondamentales de la mécanique classique peuvent s'énoncer de manière axiomatique comme suit :

1. Dans tout référentiel galiléen, une particule ponctuelle soumise à une force $\vec{F}$ voit son mouvement animé d'une accélération $\vec{a}$ proportionnelle à la force $\vec{F}$. Le facteur de proportionnalité m tel que :
$$\vec{F} = m\vec{a}, \tag{5.2}$$
sera appelé la masse inertielle de la particule ponctuelle.
2. Si une particule A exerce une force $\vec{F}_{a\to b}$ sur une particule B, alors la particule B exerce sur la particule A une force $\vec{F}_{b\to a}$ valant exactement $-\vec{F}_{a\to b}$ (principe d'action et réaction).
3. Pour tout corps matériel, la masse inertielle (celle qui intervient dans l'équation (5.2)) est égale à la masse gravitationnelle (celle qui intervient dans l'équation (5.1)). Ceci permet de n'employer que le mot *masse* pour désigner les deux coefficients.

Un corollaire immédiat du premier axiome est qu'une particule soumis à aucune force extérieure aura, dans un référentiel galiléen, un mouvement rectiligne uniforme.

L'égalité entre la masse inertielle et la masse gravitationnelle était déjà admise et vérifiée expérimentalement à l'époque de Galilée et Newton. Elle a été vérifiée depuis avec une bien plus grande précision. Cette égalité constitue une des hypothèses fondatrices de la théorie de la Relativité Générale d'Einstein.

Formellement, les relations (5.1) et (5.2) sont suffisantes pour construire toute la mécanique céleste et expliquer les mouvements les plus subtils des corps célestes, à une seule exception : la lente et insignifiante irrégularité du mouvement de Mercure, qui, elle, relève de la théorie de la Relativité Générale.

5.3 Les lois de Kepler

Avant de se lancer dans l'application céleste des principes de la mécanique de Newton, on va rappeler les trois lois de Kepler ainsi que les circonstances de leur découverte.

5.3.1 Rappel historique

L'astronome danois Tycho Brahé a laissé à la fin de sa vie une somme considérable de résultats d'observation concernant les mouvements des planètes et surtout de Mars.

4. Einstein, en 1905, étendra ce principe à toutes les lois de la Physique, sans les limiter à la mécanique. Ce sera une des bases de sa théorie de la Relativité Restreinte.

Il fit venir à lui, à Prague, le jeune astronome allemand Johann Kepler. Ce dernier prit possession en 1601 des carnets d'observations de Tycho Brahé, et tenta de rendre compte de ses observations en appliquant dans un cadre résolument héliocentriste des concepts et des techniques héritées de la pensée de Ptolémée et de la physique d'Aristote. Comme on le sait, ses tentatives furent vaines, mais lui permirent quand même de remarquer dans les mouvements des planètes un certain nombre de faits marquants qui allaient devenir les trois lois de Kepler. Il publia les deux premières en 1609 dans un ouvrage intitulé *Astronomia Nova*, et la troisième en 1618 dans autre ouvrage intitulé *Harmonice Mundi*.

Ces lois sont les suivantes :

1. Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe un foyer [5].
2. Le mouvement des planètes autour du Soleil est tel que le segment joignant le Soleil à la planète balaye des aires égales en des temps égaux (loi des aires) [6].
3. Les périodes de révolution des planètes, élevées au carré, sont proportionnelles aux cubes des demi-grand axes de leurs orbites.

Ça n'est qu'en 1683 que Newton, aidé par le mathématicien Hooke réussit à démontrer les trois lois de Kepler par l'application théorique des principes de la mécanique qu'il venait de découvrir.

Dans ce qui suit, on va donner une version moderne de la démonstration des lois de Kepler.

5.4 Le problème à un corps

5.4.1 Démonstration des lois de Kepler

On se place dans un référentiel galiléen $\mathcal{R}_0$ donné. On considère une particule ponctuelle de masse m, soumise à l'attraction gravitationnelle d'une autre particule ponctuelle de masse M, que l'on supposera *fixée* au point-origine O. Le calcul simple présenté ci-après rend compte approximativement du mouvement d'une planète autour d'une étoile beaucoup plus massive qu'elle (donc quasiment fixe).

On note $\vec{r}$ le vecteur joignant l'origine à la particule mobile, et r sa norme. La loi fondamentale de la mécanique (5.2) peut alors s'écrire comme suit :

$$m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{mM\mathcal{G}}{r^2}\,\frac{\vec{r}}{r}, \tag{5.3}$$

qui constitue l'équation du mouvement de la particule mobile. Notons que le facteur $\vec{r}/r$ qui intervient ci-dessus est le vecteur unitaire (de norme égale à 1) parallèle à $\vec{r}$.

On va commencer par montrer que la trajectoire de la particule est plane. Pour ce faire, considérons la quantité (moment cinétique en O) $\vec{\sigma} = m\vec{r}\wedge\dfrac{d\vec{r}}{dt}$ où le symbole "$\wedge$" désigne le produit vectoriel. La dérivation de $\vec{\sigma}$ par rapport au temps donne :

$$\frac{d\vec{\sigma}}{dt} = m\vec{r}\wedge\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}.$$

5. La version moderne de cette loi stipule que les orbites doivent être des coniques planes (l'intersection d'un cône et d'un plan). Cela permet de rendre également compte du mouvement de certaines comètes dont les trajectoires sont des paraboles ou des hyperboles. L'ellipse n'est qu'un cas particulier de conique plane.

6. Cette loi des aires, connue aujourd'hui sous le nom de "deuxième loi de Kepler" fut historiquement la première découverte.

En utilisant (5.3), on montre facilement que

$$\frac{d\vec{\sigma}}{dt} = \vec{0},$$

car $\vec{r} \wedge \vec{r} = \vec{0}$. Il s'en suit que le moment cinétique $\vec{\sigma}$ est un vecteur *conservé*, c'est-à-dire qui reste constant en norme *comme en direction*. Comme deux vecteurs quelconques sont toujours orthogonaux à leur produit vectoriel, le vecteur $\vec{r}$ est en permanence orthogonal au vecteur fixe $\vec{\sigma}$. Par conséquence, la particule mobile ne peut que se déplacer dans un plan orthogonal à la direction du moment cinétique $\vec{\sigma}$ et passant par O.

Ayant démontré que la trajectoire est plane, on va utiliser un repérage polaire pour la particule mobile. On note θ l'angle dans le plan de la trajectoire, entre une direction fixe arbitraire et $\vec{r}$. Le couple (r, θ) constitue les coordonnées polaires de la particule mobile. Si on note σ le module (constant) de $\vec{\sigma}$, il découle de la définition même de $\vec{\sigma}$ que :

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \sigma, \tag{5.4}$$

ce qui n'est autre que la *seconde loi de Kepler* ! En effet, l'équation (5.4) peut se réécrire sous forme différentielle comme suit :

$$\frac{1}{2} r^2 d\theta = \frac{\sigma}{2} dt,$$

ce qui donne, par intégration entre t_1 et $t_1 + \Delta t$, d'une part, et t_2 et $t_2 + \Delta t$ d'autre part :

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} \frac{1}{2} r^2 d\theta = \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} \frac{1}{2} r^2 d\theta$$

et ce, quelque soit t_1 ,t_2 et Δt. Or, il est facile de se convaincre que ces deux intégrales représentent respectivement les aires balayées par $\vec{r}$ pendant une durée Δt à partie de t_1 et t_2 respectivement. Il s'en suit que *Les aires balayées pendant des temps égaux sont égales.*

Pour établir la première loi de Kepler, on projette l'équation du mouvement (5.3) sur la direction radiale instantanée. Après simplification par m, il vient :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - r\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 = -\frac{\mathcal{G}M}{r^2}, \tag{5.5}$$

Si on ne cherche qu'à déterminer la nature géométrique de la trajectoire, en d'autres termes si on s'intéresse plus à la fonction $r(\theta)$ qu'à la fonction $r(t)$, alors un artifice de calcul dû au mathématicien Binet permet de résoudre facilement le problème. Cet artifice consiste à introduire une nouvelle fonction $u(\theta)$ définie comme étant égale à $1/r(\theta)$. En utilisant (5.4) et un peu de calcul différentiel élémentaire, il est facile de montrer que :

$$\frac{d\theta}{dt} = \sigma u^2, \quad \text{et} \quad \frac{d^2 r}{dt^2} = -\sigma^2 u^2 \frac{d^2 u}{d\theta^2}.$$

L'équation (5.5) se réduit alors à :

$$\frac{d^2 u}{d\theta^2} + u = \frac{M\mathcal{G}}{\sigma^2},$$

dont la solution la plus générale est de la forme :

$$u(\theta) = \frac{M\mathcal{G}}{\sigma^2} + \epsilon \cos(\theta - \theta_0),$$

où ϵ et θ_0 sont deux constantes d'intégration. En posant $e = \epsilon\sigma^2/M\mathcal{G}$ et $p = \frac{\sigma^2}{M\mathcal{G}}$, on obtient pour r :

$$r(\theta) = \frac{p}{1 + e\cos(\theta - \theta_0)}, \tag{5.6}$$

qui n'est autre que l'équation polaire la plus générale d'une conique plane [7] par rapport à un de ses foyers. Le coefficient p porte le nom de paramètre de la conique, et le coefficient e le nom d'excentricité. Il s'en suit une version généralisée de la première loi de Kepler : *Les trajectoires sont des coniques planes dont le centre attractif occupe un des foyers.* Une conique plane peut être soit un cercle si $e = 0$, une ellipse si $0 < e < 1$, une parabole si $e = 1$, ou une hyperbole si $1 < e$.

L'obtention de la troisième loi de Kepler nécessite de faire un peu de géométrie sur les ellipses, qui sont des coniques d'excentricité comprise entre 0 et 1. Tout d'abord, on appelle *demi-grand axe* la demi-somme des distances minimales et maximales entre un point de l'ellipse et un de ses foyers. Un simple calcul basé sur la forme (5.6) montre que le demi-grand axe vaut $a = p(1 - e^2)^{-1}$. Or il est connu que la surface de l'ellipse vaut $S = \pi a^2(1 - e^2)^{1/2}$, soit encore, en fonction de p et e : $S = \pi p^2(1 - e^2)^{-3/2}$. Compte tenu de la loi des aires (première loi de Kepler), la période T du mouvement (temps nécessaire pour un tour complet) doit valoir $T = \frac{2}{\sigma} S$, soit encore $T = \frac{2\pi}{\sigma} p^2(1 - e^2)^{-3/2}$. On constate alors facilement que $T^2/a^3 = 4\pi^2 p/\sigma^2$. En utilisant la définition de p, à savoir $p = \sigma^2/M\mathcal{G}$, on aboutit finalement à :

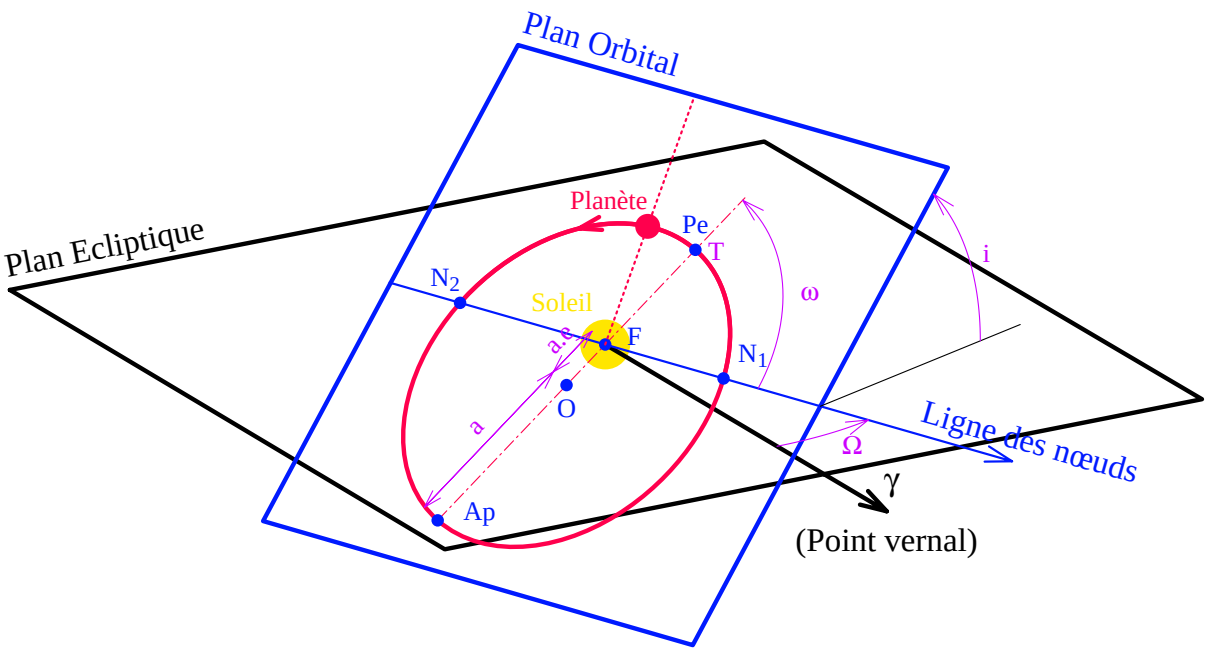
$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{M\mathcal{G}}, \tag{5.7}$$

ce qui peut s'énoncer sous la forme de la troisième loi de Kepler : *Les carrés des périodes des orbites des planètes croissent comme les cubes de leurs demi-grand axes.*

5.4.2 Les six éléments orbitaux

Autour d'un même centre attracteur (le Soleil pour les planètes ou la Terre pour la Lune et les satellites artificiels), il peut y avoir une infinité d'orbites kepleriennes. Pour les différencier, on est amené à définir six nombres qui suffisent à caractériser parfaitement *une* orbite donnée parmi toutes les autres. Un dessin valant mieux qu'un long discours, la figure 5.1 définit clairement ces six éléments orbitaux dans le cas de l'orbite d'une planète autour du Soleil. Pour l'orbite d'un satellite de la Terre, le problème est le même ; seul change le plan de référence qui devient le plan équatorial terrestre au lieu du plan écliptique. Des définitions analogues sur le principe existent aussi pour la position d'une exoplanète autour de son étoile, ou pour la position du compagnon autour de l'étoile centrale, dans le cas d'une étoile binaire.

7. Une conique plane est par définition l'intersection d'un cône à base circulaire et d'un plan.



LES 6 ELEMENTS ORBITAUX

- i : **Inclinaison du plan orbital.**
- Ω : **Longitude du nœud ascendant (N_1).**
- ω : **Argument du périhélie.**
- T : **Date de passage au périhélie.**
- a : **Demi-grand axe.**
- e : **Excentricité.**

FIGURE 5.1 – *Définition des six éléments orbitaux qui permettent de caractériser une orbite donnée parmi l'infinité d'orbites possibles autour d'un même corps attracteur. Pe et Ap désignent respectivement le périhélie et l'aphélie de l'orbite. N_1 et N_1 sont respectivement les nœuds ascendants et descendants de l'orbite. En plus des paramètres purement géométriques a, e i, Ω et ω, qui définissent l'orbite elliptique en tant que courbe dans l'espace, il faut donner un élément cinématique pour différentier différents mouvements kepleriens ayant lieu sur la même orbite géométrique. Pour cela, on donne souvent la date T à laquelle le corps passe par son périhélie.*

5.4.3 EXERCICE : La masse du Soleil (version I)

NOTA : Dans ce premier exercice, on ne tiendra pas compte de la masse des planètes, et on négligera de plus les interactions entre différentes planètes, de manière à se ramener au *problème à 1 corps*.
Le tableau ci-dessous donne la période de révolution *sidérale* T (en jours) et le demi-grand axe A (en millions de kilomètres) pour les huit grosses planètes du Système Solaire.

1. Remplir la quatrième colonne en calculant A^3/T^2 pour chaque planète.
2. En utilisant la troisième loi de Kepler du problème à 1 corps : $\frac{A^3}{T^2} = \frac{G\,M}{4\pi^2}$, remplir la cinquième colonne en calculant la masse M du Soleil en kg. On donne : $\mathcal{G} = 6.67259\,10^{-11}\ m^3 s^{-2} kg^{-1}$.
3. Calculer la valeur moyenne $< M >$ et l'écart-type $\sqrt{< M^2 > - < M >^2}$ des résultats trouvés.
4. Calculer la dispersion des résultats en pourcentage et conclure.

Planète	T (j)	A $(10^6\,km)$	A^3/T^2	M $(\times 10^{30}\,kg)$
Mercure	87.969	57.91		
Venus	224.70	108.2		
Terre	365.26	149.6		
Mars	686.98	227.94		
Jupiter	4332.71	778.33		
Saturne	10759.50	1427.0		
Uranus	30688.5	2869.6		
Neptune	60182.3	4496.6		
Valeur moyenne de M :				
Écart-type de M :				
Dispersion relative (en %) :				

SOLUTION

Planète	T (j)	A $(10^6\,km)$	A^3/T^2	M $(\times 10^{30}\,kg)$
Mercure	87.969	57.91	25.09582	1.98902
Venus	224.70	108.2	25.08855	1.98844
Terre	365.26	149.6	25.09519	1.98897
Mars	686.98	227.94	25.09420	1.98889
Jupiter	4332.71	778.33	25.11725	1.99072
Saturne	10759.50	1427.0	25.10081	1.98942
Uranus	30688.5	2869.6	25.09070	1.98861
Neptune	60182.3	4496.6	25.10240	1.98954
Valeur moyenne de M :				1.98920
Écart-type de M :				0.00067
Dispersion relative (en %) :				0.033 %

La dispersion, faible mais mesurable, de ces valeurs de M provient essentiellement des influences mutuelles entre les planètes, ainsi que de la masse des planètes qui a été négligée par rapport à la masse du Soleil pour se placer dans le cadre du problème à 1 corps.

5.5 Le problème à deux corps

Quand il ne s'agit plus d'une planète en orbite autour d'une étoile beaucoup plus massive, mais d'une paire d'étoiles de masses comparables qui se tournent autour (étoiles doubles), le modèle simple "à un corps" de la section 5.4 cesse d'être applicable. En effet, on ne peut plus considérer le corps attracteur comme fixe. On est alors amené à traiter le problème dit "à deux corps", qui prend en compte les mouvements des deux corps sans en considérer un comme attracteur et l'autre comme attiré.

On va montrer que l'on peut très simplement se ramener au problème à un seul corps par un artifice algébrique simple. Appelons A et B les deux corps en question, dont les masses sont respectivement m_a et m_b. Notons de même $\vec{r}_a$ et $\vec{r}_b$ les vecteurs-position des deux corps par rapport à une origine quelconque. Les lois de la mécanique de Newton appliquées à ces deux corps s'écrivent donc :

$$\begin{cases} m_a \dfrac{d^2\vec{r}_a}{dt^2} = -\dfrac{m_a m_b \mathcal{G}}{\|\vec{r}_a - \vec{r}_b\|^2} \dfrac{(\vec{r}_a - \vec{r}_b)}{\|\vec{r}_a - \vec{r}_b\|} \\ \\ m_b \dfrac{d^2\vec{r}_b}{dt^2} = -\dfrac{m_a m_b \mathcal{G}}{\|\vec{r}_b - \vec{r}_a\|^2} \dfrac{(\vec{r}_b - \vec{r}_a)}{\|\vec{r}_b - \vec{r}_a\|}. \end{cases} \tag{5.8}$$

On remarque que les expressions figurant dans le membre de droit de ces deux équations sont opposées (c'est le principe d'action et réaction ; voir la section 5.2.3). Par conséquence, si on additionne membre à membre ces deux équations on obtient :

$$\frac{d^2}{dt^2}(m_a\vec{r}_a + m_b\vec{r}_b) = 0.$$

Introduisons $\vec{R} = \frac{m_a\vec{r}_a + m_b\vec{r}_b}{m_a + m_b}$ le vecteur-position du centre de masse du système (A, B), ainsi que $M = m_a + m_b$ la masse totale du système (A, B). L'équation ci-dessus devient alors :

$$M\frac{d^2\vec{R}}{dt^2} = \vec{0}, \tag{5.9}$$

qui n'est autre que l'équation du mouvement qu'aurait un corps de masse M soumis à une force nulle. Il en découle immédiatement que dans le cas le plus général, *le centre de masse du système (A, B) est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.*

Considérons de nouveau le système d'équations (5.8), et soustrayons membre à membre les deux équations, après les avoir divisées respectivement par m_a et m_b. On obtient ainsi :

$$\frac{d^2}{dt^2}(\vec{r}_b - \vec{r}_a) = -\frac{M\mathcal{G}}{\|\vec{r}_b - \vec{r}_a\|^2} \frac{(\vec{r}_b - \vec{r}_a)}{\|\vec{r}_b - \vec{r}_a\|}.$$

Introduisons le vecteur $\vec{r} = \vec{r}_b - \vec{r}_a$ qui joint le corps A au corps B, ainsi que la quantité $\mu = (\frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_b})^{-1}$ que l'on nomme en général *masse réduite* du système (A, B). L'équation ci-dessus devient alors :

$$\mu\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{\mu M\mathcal{G}}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \tag{5.10}$$

qui est complètement analogue à l'équation (5.3) du problème à un corps (voir la section 5.4).

En résumé, pour résoudre le "problème à deux corps" pour deux objets ponctuels de masses m_a et m_b, il suffit de résoudre le "problème à un corps" pour un objet fictif de

masse $\mu = (\frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_b})^{-1}$ soumis au champ de gravitation d'un corps attracteur fictif fixe [8] de masse $M = m_a + m_b$.

La variable réduite $\vec{r}$ obéit donc aux lois de Kepler, et la variable $\vec{R}$ obéit aux lois simples du mouvement rectiligne uniforme. On peut enfin obtenir les variables de départ $\vec{r}_a$ et $\vec{r}_b$ à partir de $\vec{r}$ et $\vec{R}$ par les relations ci-dessous :

$$\begin{cases} \vec{r}_a = \vec{R} - \frac{\mu}{m_a}\vec{r} \\ \\ \vec{r}_b = \vec{R} + \frac{\mu}{m_b}\vec{r}. \end{cases} \tag{5.11}$$

On a donc ramené le problème à deux corps de masses m_1 et m_2 au mouvement rectiligne uniforme de leur centre de masse d'une part, et d'autre part au problème à un corps de masse $\mu = (\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_1})^{-1}$ en orbite autour d'un centre attracteur fixe de masse $M = m_1 + m_2$. d'une particule libre et un problème à un corps. Cette opération est souvent appelée *la réduction du problème à deux corps.*

8. ou du moins en mouvement rectiligne uniforme, ce qui revient au même car on peut toujours annuler ce mouvement uniforme par un simple changement de référentiel galiléen.

5.5.1 EXERCICE : La masse du Soleil (version II)

NOTA : Dans ce second exercice, on tiendra compte de la masse (certes faible) des planètes, et on négligera encore les interactions entre différentes planètes, de manière à se ramener au *problème à 2 corps*.
Le tableau ci-dessous donne la période de révolution *sidérale* T (en jours) et le demi-grand axe A (en millions de kilomètres) pour les huit grosses planètes du Système Solaire. La masse des planètes (en $\times 10^{24}\ kg$) est donnée entre parenthèses en première colonne. Pour les planètes dont les satellites ont une masse notable, comme la Terre et les planètes Joviennes, c'est la masse du système planète-satellites qui est donnée.

1. Remplir la quatrième colonne en calculant A^3/T^2 pour chaque planète.
2. En utilisant la troisième loi de Kepler du problème à 2 corps : $\frac{A^3}{T^2} = \frac{G\,(M+m)}{4\pi^2}$, remplir la cinquième colonne en calculant la masse M du Soleil en kg. On donne : $\mathcal{G} = 6.67259\,10^{-11}\ m^3 s^{-2} kg^{-1}$.
3. Calculer la valeur moyenne $< M >$ et l'écart-type $\sqrt{< M^2 > - < M >^2}$ des résultats trouvés.
4. Calculer la dispersion des résultats en pourcentage et conclure.

Planète	T (j)	A $(10^6\,km)$	A^3/T^2	M $(\times 10^{30}\,kg)$
Mercure (0.330)	87.969	57.91		
Venus (4.868)	224.70	108.2		
Terre (6.047)	365.26	149.6		
Mars (0.642)	686.98	227.94		
Jupiter (1899.)	4332.71	778.33		
Saturne (568.6)	10759.50	1427.0		
Uranus (86.84)	30688.5	2869.6		
Neptune (102.5)	60182.3	4496.6		
Valeur moyenne de M :				
Écart-type de M :				
Dispersion relative (en %) :				

SOLUTION

Planète	T (j)	A $(10^6\,km)$	A^3/T^2	M $(\times 10^{30}\,kg)$
Mercure (0.330)	87.969	57.91	25.09582	1.98902
Venus (4.868)	224.70	108.2	25.08855	1.98844
Terre (6.047)	365.26	149.6	25.09519	1.98896
Mars (0.642)	686.98	227.94	25.09420	1.98889
Jupiter (1899.)	4332.71	778.33	25.11725	1.98882
Saturne (568.6)	10759.50	1427.0	25.10081	1.98885
Uranus (86.84)	30688.5	2869.6	25.09070	1.98853
Neptune (102.5)	60182.3	4496.6	25.10240	1.98944
Valeur moyenne de M :				1.98887
Écart-type de M :				0.00028
Dispersion relative (en %) :				0.014 %

La dispersion résiduelle, après correction de la masse des planètes, provient essentiellement des perturbations dûes à l'influence mutuelle des planètes.

5.6 Le problème à N corps

Le système solaire ne saurait se réduire à deux corps ponctuels. En effet, les corps du système solaire ne sont pas ponctuels, ni même à symétrie rigoureusement sphérique ce qui reviendrait au même. Plus grave encore, le système solaire compte nettement plus que deux corps. Or, s'il on tente de poursuivre la progression qui nous a conduit du problème à un corps au problème à deux corps, on constate que le paysage mathématique change radicalement dès que l'on arrive à trois corps, et *a fortiori* si on veut traiter le cas général à N corps. Certes, on sait toujours écrire les N équations qui régissent le mouvement des N corps, puisqu'il suffit pour cela d'appliquer N fois les lois de la mécanique de Newton. Cependant, on ne sait plus résoudre les équations ainsi écrites autrement que de manière approchée ou numérique. Pire encore, les travaux des mathématiciens du début de ce siècle ont montré que le comportement des solutions de ces équations pouvait dans certains cas devenir chaotique, c'est-à-dire difficile à prédire au long terme, même avec un ordinateur (un peu comme la météorologie).

On sait cependant appliquer des méthodes approchées dans les cas simples où les différentes planètes sont assez petites par rapport au Soleil et suffisamment éloignées entre elles pour que l'effet dominant sur chacune soit l'attraction du Soleil, et non les attractions des autres planètes. C'est le cas du système solaire. Dans ce cas, on peut considérer chaque planète comme quasiment seule avec le Soleil, et traiter l'effet des autres planètes comme des petites corrections. Les orbites des planètes obéissent alors quasiment aux lois de Kepler, avec cependant d'infimes et lentes variations de la géométrie des orbites : les paramètres géométriques qui permettent de définir et de différencier les orbites (demi-grand axe, excentricité, inclinaison, orientation du grand axe, ...) sont sujets à de lentes variations appelées *termes séculaires* parce qu'elles ne deviennent sensibles qu'au fil des siècles.

Il arrive cependant, par exemple pour certains petits corps comme les astéroïdes et les comètes, que les effets infimes dûs à la présence des autres corps, se cumulent par résonance et s'amplifient pour en arriver à changer notablement l'orbite du corps, par exemple en augmentant son excentricité. Ces modifications qui ne sont plus infimes peuvent amener le corps à frôler, voire à percuter un autre corps du système solaire, ce qui peut conduire à un changement complet et définitif de trajectoire (effet de rencontre proche).

Le cas du système Soleil-Terre-Lune est très complexe. En effet ce système comporte plus de deux corps, mais surtout la Lune est suffisamment près de la Terre pour que l'on ne puisse plus considérer ni la Terre ni la Lune comme ponctuelles. Interviennent alors les effets subtiles de marée et de précession qui rendent le mouvement lunaire bien difficile à calculer avec précision.

5.7 Synthèse

Les interactions fondamentales

Depuis l'échelle sub-nucléaire jusqu'à l'échelle globale de l'Univers, le monde physique est structuré par des forces qui découlent de quatre interactions fondamentales :

- **L'interaction faible** : Elle est responsable de la cohésion des neutrons. Sa portée est extrêmement faible (de l'ordre de $10^{-18}\,m$). Elle n'est donc pas directement sensible à l'échelle humaine.
- **L'interaction forte** : Elle est responsable de la cohésion des noyaux atomiques malgré la répulsion électrostatique des protons. Sa portée est très faible (de l'ordre de $10^{-15}\,m$). Elle n'est donc pas directement sensible à l'échelle humaine.
- **L'interaction électromagnétique** : Elle est responsable de la cohésion des atomes, des molécules et cristaux, ainsi que de toutes les liaisons chimiques. Elle ne concerne que les corps chargés, et peut être attractive ou répulsive. Sa portée est infinie, ce qui la rend sensible à l'échelle humaine.
- **L'interaction gravitationnelle** : Elle est responsable de la cohésion et de la formation des objets astronomiques (étoiles, amas d'étoiles, galaxies, etc.). Elle concerne tous les objets ayant une masse (d'où son qualificatif d'attraction universelle). Elle est toujours attractive. Sa portée est infinie, ce qui la rend sensible à l'échelle humaine. C'est en général la seule interaction prise en compte dans le cadre de la mécanique céleste. Deux corps de masse m et M, séparés par une distance r exercent l'un sur l'autre une force gravitationnelle attractive d'intensité $F = \mathcal{G}\frac{mM}{r^2}$. $\mathcal{G}$ est la constante de gravitation. Elle vaut $6.67\,10^{-11}\,kg^{-1}m^3s^{-2}$. Les coefficients m et M sont appelés les "masses gravitationnelles" des deux corps.

La mécanique de Newton et de Galilée

On appelle "référentiel" tout système de mesure de position et de temps. Un référentiel est donc constitué de trois axes rigidement liés, pour la mesure de positions dans l'espace, et d'une horloge pour la mesure des dates.
La relativité de Galilée qui sert de cadre à la mécanique de Newton repose sur les axiomes suivants :

- Il existe une famille de référentiels privilégiés (les référentiels galiléens), définis par le fait que tout corps isolé (soumis à aucune force) s'y meut en ligne droite à vitesse constante.
- Les lois de la mécanique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens.
- Deux référentiels galiléens quelconques sont toujours en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre.

Les lois de la mécanique de Newton (1687) peuvent se résumer ainsi :

- Dans tout référentiel galiléen, la force $\vec{F}$ subie par un corps et l'accélération $\vec{a}$ qui en résulte, vérifient la relation :
$$\vec{F} = m\,\vec{a}.$$
Le coefficient m est appelé la "masse inertielle" du corps.
- Lorsque un corps A exerce une force $\vec{F}$ sur un corps B, ce dernier exerce une force $-\vec{F}$ sur A (principe d'action-réaction).
- La masse inertielle et la masse gravitationnelle d'un corps sont égales.

Le problème à un corps : les lois de Kepler

On considère un corps attracteur O de masse M, suffisamment importante pour que ce dernier puisse être considéré comme fixe dans un référentiel galiléen. Le mouvement d'un corps ponctuel léger, soumis à la seule attraction gravitationnelle de O, obéit aux lois suivantes :

- La trajectoire du corps est une conique plane (première loi de Kepler, 1609).
- Le rayon liant le centre attractif O au corps gravitant balaye des aires égales en des temps égaux (deuxième loi de Kepler, 1609).
- Pour des orbites elliptiques, le demi-grand axe a et la période de révolution T vérifient la relation :
$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mathcal{G}M}$$
(troisième loi de Kepler, 1618).

Le problème à deux corps

Quand le corps attractif et le corps gravitant n'ont pas des masses infiniment différentes, il n'y a plus lieu de leur faire jouer un rôle différent, et les deux objets doivent être supposés mobiles (d'où le nom de problème à deux corps). Ce cas plus réaliste peut se ramener au problème à un seul corps en remarquant que le centre de gravité G des deux corps est immobile (dans un référentiel galiléen particulier), et que le vecteur joignant les deux corps obéit aux équations du problème à un seul corps, à condition de remplacer la masse M du corps attracteur par la somme des masses des deux corps.

Le problème à N corps

Contrairement aux problèmes à un et deux corps, le problème à plusieurs corps ne peut pas se résoudre mathématiquement de manière exacte. Dans un cas favorable comme celui du système solaire, où chaque planète subit essentiellement la force du Soleil, on traite le problème de manière approchée, en supposant que chaque planète décrit une orbite quasiment semblable à celle du problème à deux corps, mais avec des paramètres (demi-grand axe, excentricité, inclinaison, etc.), lentement variables dans le temps (variations dites "séculaires").

Chapitre 6

Le système solaire en quelques images

6.1 Vue d'ensemble

La figure 6.1 est un montage rassemblant sur la même vue les principales planètes du système solaire avec des proportions respectées.

On y distingue Mercure, Vénus, la Terre et Mars, que l'on nomme "planètes telluriques" parce qu'elles ont des ressemblances structurelles avec la Terre : elles sont nettement plus petites que les autres planètes du système solaire, elles ont une croûte solide et ont donc une surface clairement identifiable. Elles ont un petit nombre de satellites (0, 1 ou 2). Leurs atmosphères (sauf pour Mercure qui en est dépourvue) sont des atmosphères dites "secondaires", c'est-à-dire qui sont apparues après la formation de la planète elle-même, par exemple par dégazage des roches déjà crées. Leur composition chimique ne reflète pas la composition probable du milieu protoplanétaire dans lequel est né le système solaire.

L'image montre aussi Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, que l'on nomme "planètes joviennes" parce qu'elles ont des ressemblances structurelles avec Jupiter : elle sont nettement plus grosses que les planètes telluriques. Elles sont essentiellement gazeuses, avec donc une frontière floue entre la planète et son atmosphère. Les atmosphère sont dites "primaires" en ce sens qu'elles se sont probablement formées en même temps que la planète elle-même, à partir de la matière protoplanétaire. Leur composition chimique (essentiellement de l'Hydrogène moléculaire et de l'Hélium) est proche de celle du milieu protoplanétaire. Elles sont entourées par des anneaux plus ou moins ténus et par de nombreux satellites.

Pluton figure également sur la vue d'ensemble, bien que depuis 2006, les astronomes modernes ne considèrent plus cet objet comme une planète, mais plutôt comme un corps de la deuxième ceinture d'astéroïdes (la ceinture de Kuiper, externe à l'orbite de Neptune).

6.2 Vues individuelles

Les figures qui suivent contiennent une image et des données numériques pour quelques corps du système solaire :

- Le Soleil.
- Les planètes telluriques Mercure, Vénus, la Terre et Mars.

- L'astéroïde Toutatis, choisi arbitrairement [1] comme représentant des petits corps de la ceinture principale d'astéroïdes, située à peu près entre les orbites de Mars et de Jupiter.
- Les planètes joviennes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.
- Pluton et son satellite Charon, choisis comme représentants des corps de la ceinture de Kuiper (au delà de l'orbite de Neptune).
- La comète de Halley.

Les données numériques fournies sont les suivantes :

- **Demi-grand axe** : moyenne entre la distance maximale et minimale au Soleil (ou à la Terre pour le cas de la Lune).
- **Révolution** : période de révolution *sidérale* (par rapport aux étoiles fixes) de l'objet autour du Soleil (ou de la Terre pour le cas de la Lune).
- **Inclinaison** : angle entre le plan de l'orbite du corps et le plan de l'orbite terrestre (plan écliptique).
- **Excentricité** : excentricité de l'orbite elliptique du corps. Plus ce nombre est voisin de 0, plus l'orbite est circulaire. quand ce nombre s'écarte de 0 et s'approche de 1, l'orbite elliptique devient de plus en plus allongée, et s'écarte de plus en plus du cercle.
- **Rotation** : période de rotation *sidérale* (par rapport aux étoiles fixes) de l'objet sur lui-même. Pour les planètes joviennes (gazeuses) qui ne tournent pas comme un solide, la période donnée correspond à la rotation du champ magnétique, donc de la partie centrale du corps (système III). Pour le Soleil, la valeur donnée est une valeur moyenne (la zone équatoriale tourne plus vite).
- **Satellites** : nombre de satellites actuellement connus, suivi de leurs noms, classés en fonction de leur masse, par ordre décroissant, et jusqu'au quatrième seulement.
- **Découverte** : nom de l'auteur de la découverte et date (à l'exception des corps connus depuis l'antiquité).
- 1ere **sonde** : nom du premier vaisseau spatial qui se soit approché du corps ou qui l'ait étudié, suivi du nom du pays créateur du vaisseau et de la date des premières données.
- **Masse** : masse du corps hors satellites.
- **Rayon** : rayon *moyen* du corps (il ne s'agit pas du rayon équatorial). Pour la comète de Halley, il s'agit d'une estimation du rayon du noyau, hors chevelure.
- **Atmosphère** : principaux constituants de l'atmosphère du corps, s'il en a une, classés selon leur abondance molaire par ordre décroissant.
- **Température** : température de surface, ou température de la zone visible pour les planètes joviennes (essentiellement gazeuses). Pour le Soleil, il s'agit de la température de la photosphère.
- **Pression** : pression atmosphérique au "sol" (seulement pour les planètes telluriques (non gazeuses).

1. Raison du choix : l'astéroïde Toutatis a été découvert au télescope de Schmidt (Plateau de Calern) de l'Observatoire de la Côte d'Azur.

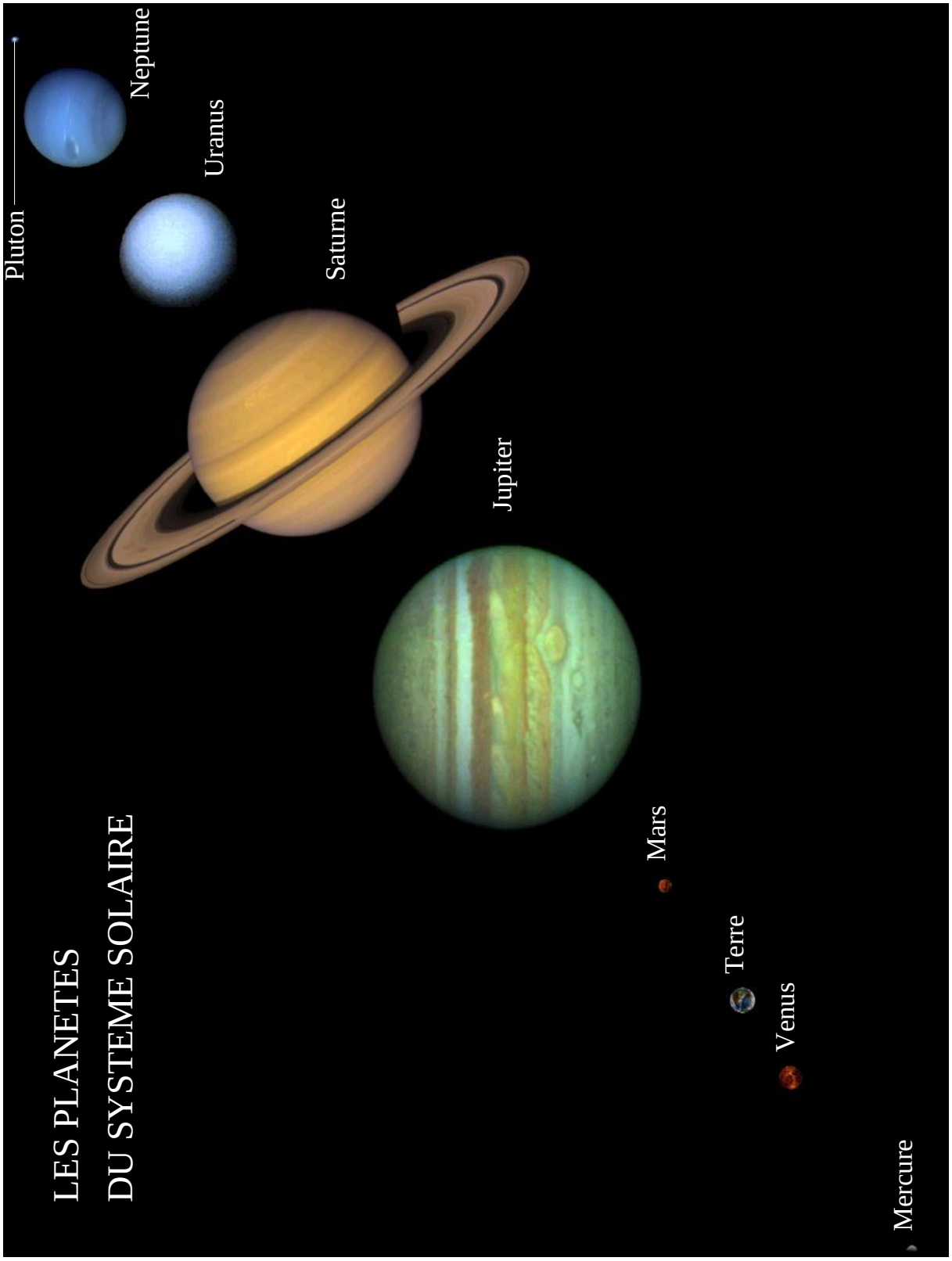
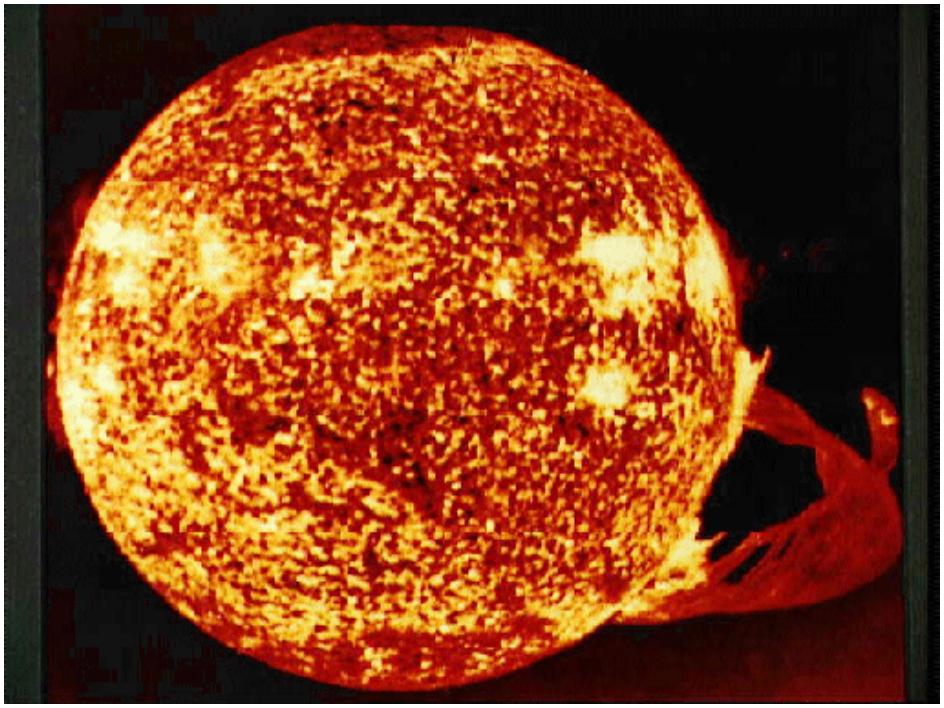


FIGURE 6.1 – *Montage photographique représentant sur une même image les principales planètes du système solaire approximativement à la même échelle.*

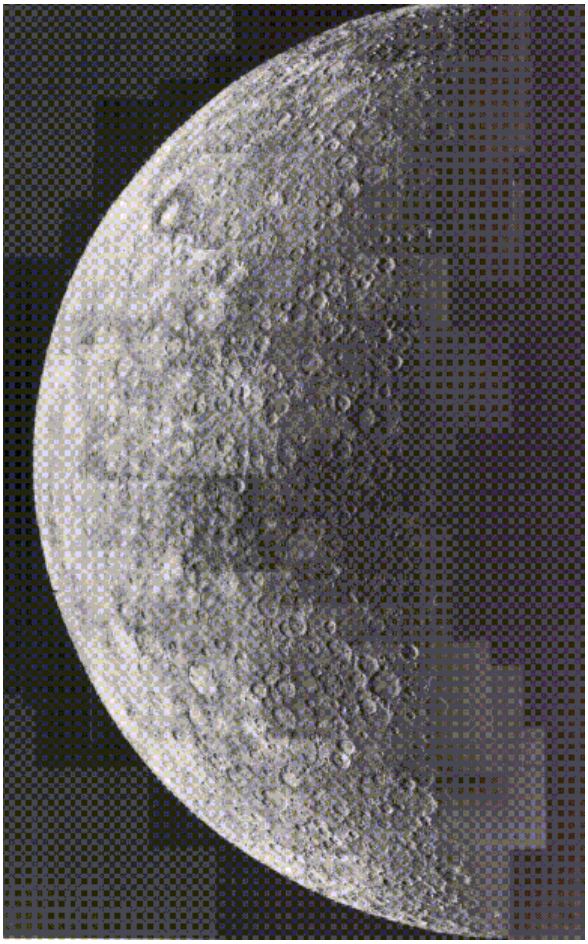


(Photo: ?)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/sun/sun.gif)

LE SOLEIL

Luminosité :	**3.826 10^{26} W**	**Masse :**	**1.989 10^{30} kg**
Age :	**4.5 10^{9} ans**	**Rayon :**	**695 980 km**
Rotation :	**~27 jours**	**Densité moy. :**	**1.4 g/cm^3**
Type spectral :	**G2 V**	**Température :**	**5500 ^{o}C**
Sondes :	**SOHO (USA), YOHKOH (Japon)**		

FIGURE 6.2 – *Le Soleil, une étoile ordinaire.*



(Photo: Sonde Mariner 10, 20/03/1974.)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/mercury/mercury.gif)

MERCURE

Demi-grand axe :	**57.9 10^6 km**	**Masse :**	**0.330 10^{24} kg**
Révolution :	**87.97 jours**	**Rayon :**	**2 439 km**
Inclinaison :	**7.00 ^{o}**	**Atmosphère :**	**---**
Excentricité :	**0.206**	**Température :**	**-170 ^{o}C à 440 ^{o}C**
Rotation :	**58.65 jours**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**0**		
Découverte :	**Antiquité**		
1ère sonde :	**Mariner 10 (USA, 20/03/1974)**		

FIGURE 6.3 – *La planète Mercure.*

(Photo: Sonde Magellan, 1992.)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/venus/globe.gif)

VÉNUS

Demi-grand axe :	**108.2 10^6 km**	**Masse :**	**4.868 10^{24} kg**
Révolution :	**224.7 jours**	**Rayon :**	**6 052 km**
Inclinaison :	**3.39 ^{o}**	**Atmosphère :**	**CO_2, N_2, ...**
Excentricité :	**0.007**	**Température :**	**470 ^{o}C**
Rotation :	**-243.0 jours**	**Pression :**	**92 Atm**
Satellites :	**0**		
Découverte :	**Antiquité**		
1ère sonde :	**Mariner 2 (USA, 14/12/1962)**		

FIGURE 6.4 – *La planète Vénus.*

(Photo: Mission Apollo 17, 07/12/1972.)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/earth/apollo17_earth.jpg)

LA TERRE

Demi-grand axe :	**149.6 10^6 km**	**Masse :**	**5.976 10^{24} kg**
Révolution :	**365.25 jours**	**Rayon :**	**6 371 km**
Inclinaison :	**0.0 ^{o}**	**Atmosphère :**	**N_2, O_2, ...**
Excentricité :	**0.017**	**Température :**	**20 ^{o}C**
Rotation :	**23.93 heures**	**Pression :**	**1 Atm**
Satellites :	**1 (La Lune)**		
Découverte :	**---**		
1ère sonde :	**---**		

FIGURE 6.5 – *La planète Terre.*

(Photo: ?)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/moon/luna.gif)

LA LUNE

Demi-grand axe :	**0.384 10^6 km**	**Masse :**	**0.0735 10^{24} kg**
Révolution :	**27.32 jours**	**Rayon :**	**1 737 km**
Inclinaison :	**5.4 ^{o}**	**Atmosphère :**	**---**
Excentricité :	**0.055**	**Température :**	**---**
Rotation :	**27.32 jours**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**0**		
Découverte :	**---**		
1ère sonde :	**Luna 1 (URSS, 02/01/1959)**		

FIGURE 6.6 – *La Lune.*

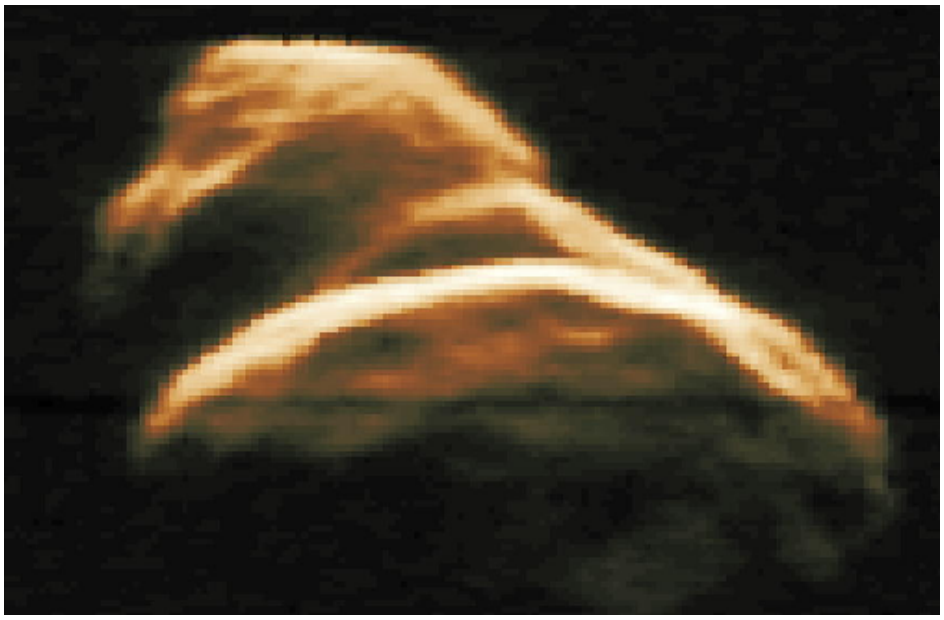
(Photo: ?)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/mars/mars1.gif)

MARS

Demi-grand axe :	**227.9 10^6 km**	**Masse :**	**0.642 10^{24} kg**
Révolution :	**686.98 jours**	**Rayon :**	**3 390 km**
Inclinaison :	**1.85 ^{o}**	**Atmosphère :**	**CO_2, N_2, ...**
Excentricité :	**0.093**	**Température :**	**-120 ^{o}C à 0 ^{o}C**
Rotation :	**24.62 heures**	**Pression :**	**0.008 Atm**
Satellites :	**2 (Phobos, Déimos)**		
Découverte :	**Antiquité**		
1ère sonde :	**Mariner 4 (USA, 14/07/1965)**		

FIGURE 6.7 – *La planète Mars.*

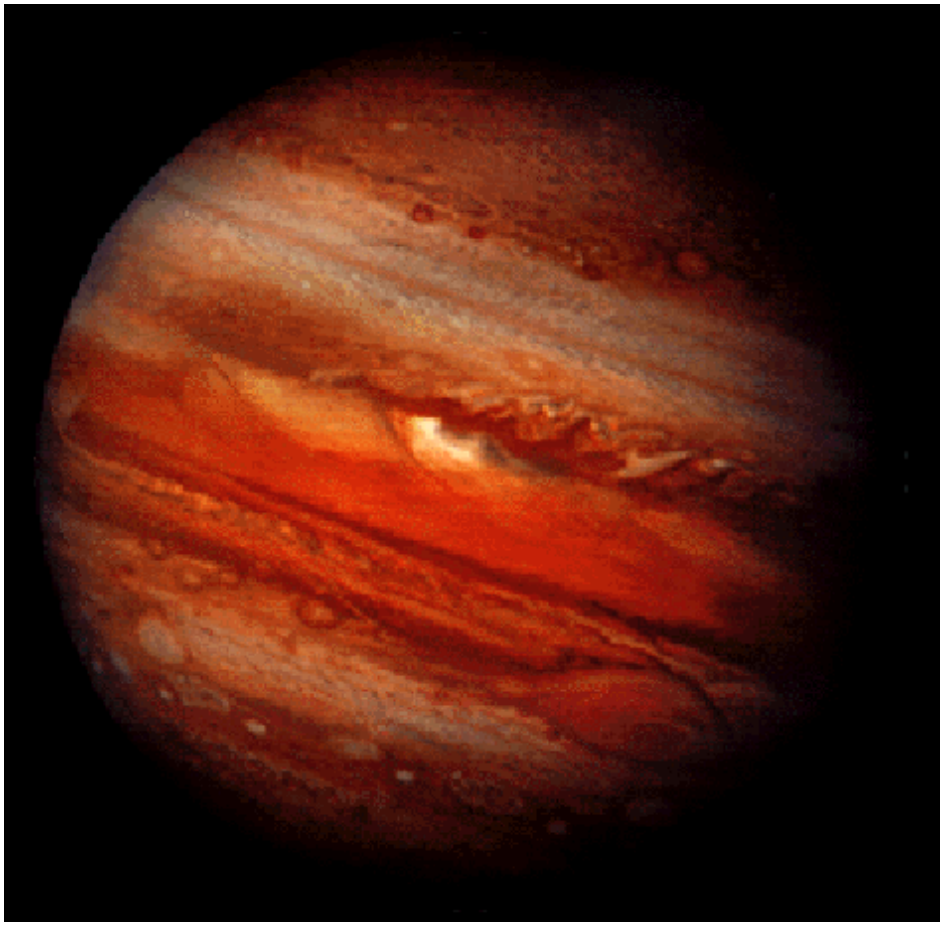
(Photo: Image Radar Arecibo 08/12/1992.)
(Source: http://www.eecs.wsu.edu/~hudson/Research/Asteroids/P46426.jpg)



(4179) TOUTATIS

Demi-grand axe :	**375.5 10^6 km**	**Masse :**	**~ 5. 10^{13} kg**
Révolution :	**3.98 ans**	**Rayon :**	**~ 4.6x2.4x1.9 km**
Inclinaison :	**0.47 ^{o}**	**Atmosphère :**	**---**
Excentricité :	**0.634**	**Température :**	**---**
Rotation :	**130 heures**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**0**		
Découverte :	**C. Pollas et al. 04/01/1989**		
1ère sonde :	**---**		

FIGURE 6.8 – *L'astéroïde Toutatis.*

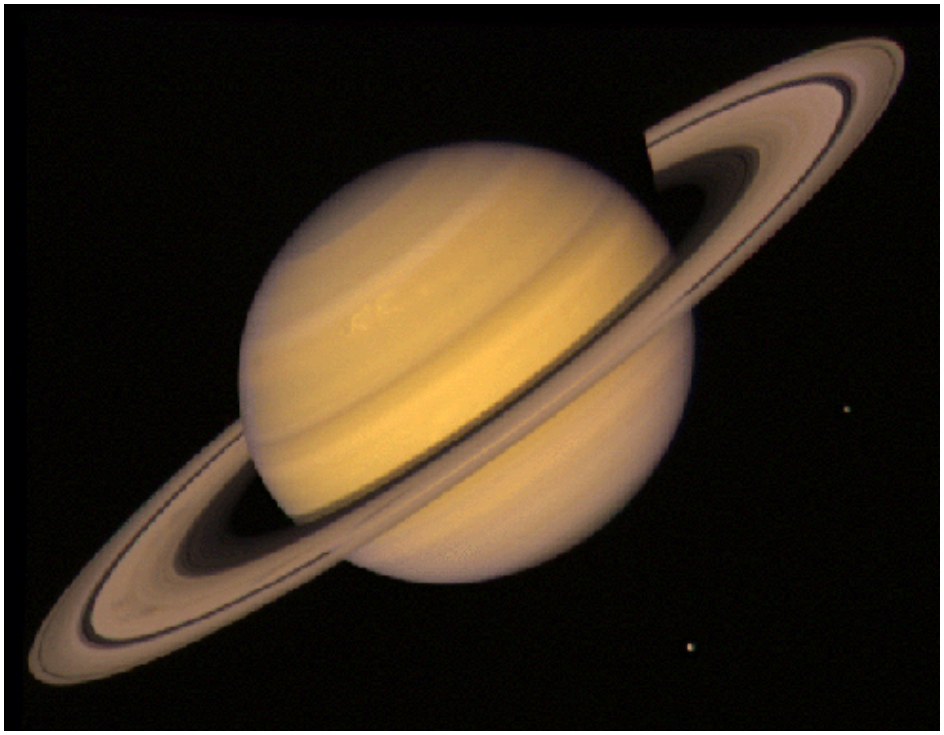


(Photo: ?)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/jupiter/jupiter.gif)

JUPITER

Demi-grand axe :	**778.3 10^6 km**	**Masse :**	**1 899 10^{24} kg**
Révolution :	**11.86 ans**	**Rayon :**	**69 911 km**
Inclinaison :	**1.31 ^{o}**	**Atmosphère :**	**H_2, He, ...**
Excentricité :	**0.048**	**Température :**	**-110 ^{o}C**
Rotation :	**9.925 heures**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**62 en 2010 (Ganymède, Callisto, Io, Europe, ...)**		
Découverte :	**Antiquité**		
1ère sonde :	**Voyager 1 (USA, 05/03/1979)**		

FIGURE 6.9 – *La planète Jupiter.*

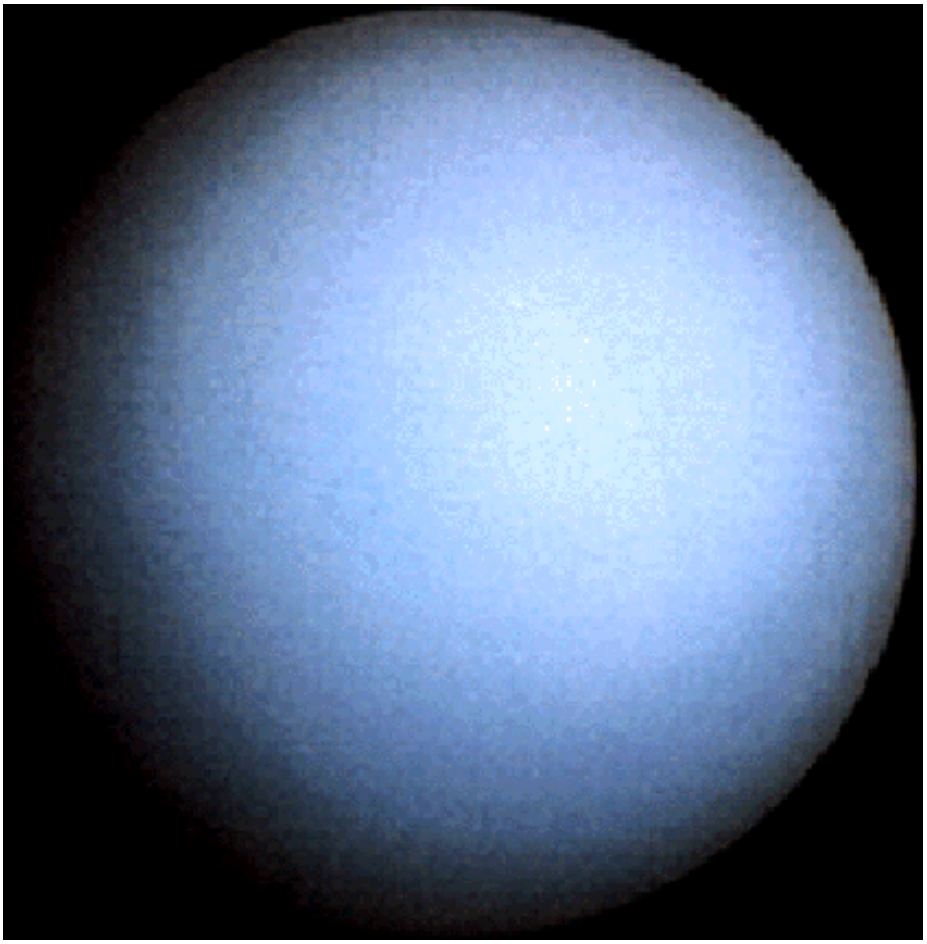


(Photo: Sonde Voyager 2, 25/08/1981.)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/saturn/saturn.gif)

SATURNE

Demi-grand axe :	**1 427. 10^6 km**	**Masse :**	**568.5 10^{24} kg**
Révolution :	**29.46 ans**	**Rayon :**	**58 232 km**
Inclinaison :	**2.49 ^{o}**	**Atmosphère :**	**H_2, He, ...**
Excentricité :	**0.056**	**Température :**	**-140 ^{o}C**
Rotation :	**10.66 heures**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**48 en 2006 (Titan, Rhéa, Japet, Dioné, ...)**		
Découverte :	**Antiquité**		
1ère sonde :	**Voyager 1 (USA, 12/11/1980)**		

FIGURE 6.10 – *La planète Saturne.*

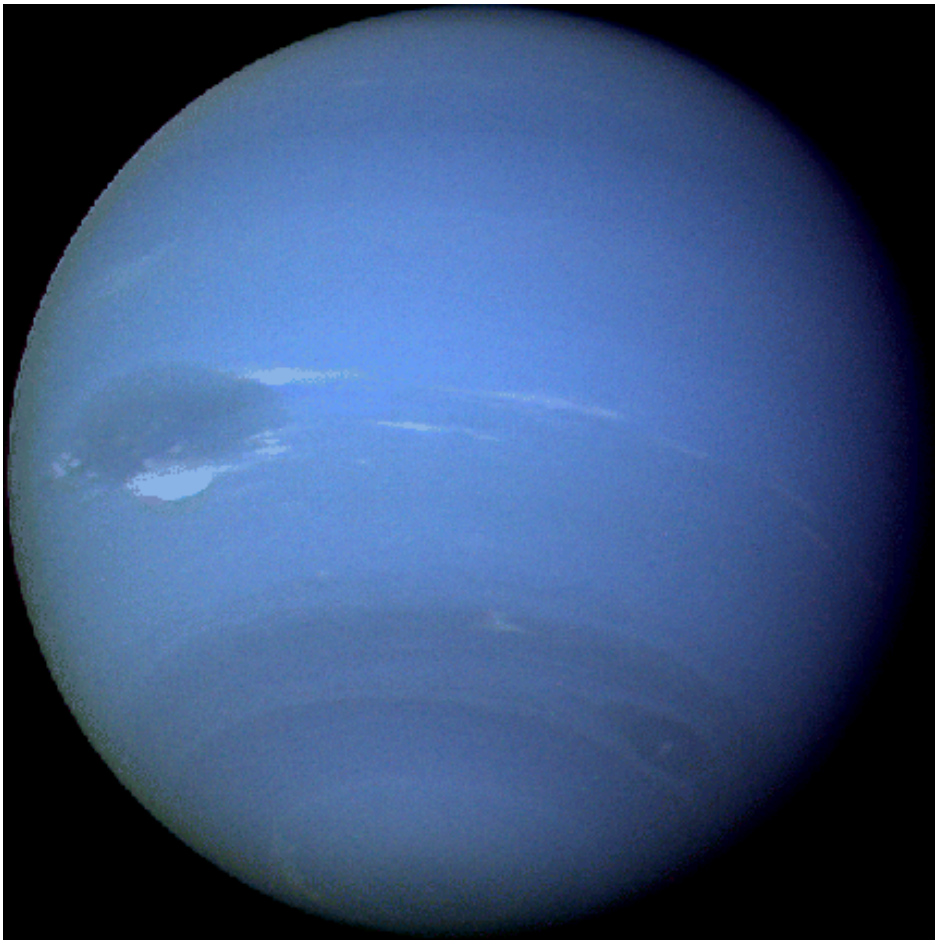


(Photo: Hubble Space Telescope.)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/uranus/ura.gif)

URANUS

Demi-grand axe :	**2 870. 10^6 km**	**Masse :**	**86.83 10^{24} kg**
Révolution :	**84.01 ans**	**Rayon :**	**25 362 km**
Inclinaison :	**0.77 ^{o}**	**Atmosphère :**	**H_2, He, CH_4, ...**
Excentricité :	**0.047**	**Température :**	**-170 ^{o}C**
Rotation :	**-17.24 heures**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**27 en 2010 (Titania, Obéron, Ariel, Umbriel, ...)**		
Découverte :	**W. Herschel, 13/03/1781**		
1ère sonde :	**Voyager 2 (USA, 01/1986)**		

FIGURE 6.11 – *La planète Uranus.*



(Photo: Sonde Voyager 2, 25/08/1989.)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/neptune/neptune.gif)

NEPTUNE

Demi-grand axe :	**4 497. 10^6 km**	**Masse :**	**102.4 10^{24} kg**
Révolution :	**164.8 ans**	**Rayon :**	**24 622 km**
Inclinaison :	**1.77 ^{o}**	**Atmosphère :**	**H_2, He, CH_4, ...**
Excentricité :	**0.009**	**Température :**	**-200 ^{o}C**
Rotation :	**16.11 heures**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**13 en 2010 (Triton, Protée, Néréide, Larissa, ...)**		
Découverte :	**U. Le Verrier, 23/09/1846**		
1ère sonde :	**Voyager 2 (USA, 25/08/1989)**		

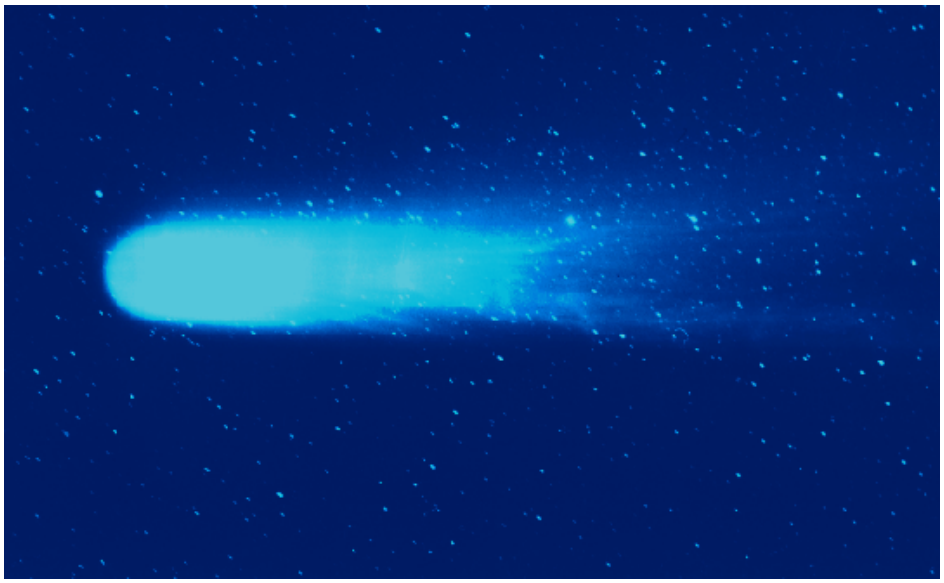
FIGURE 6.12 – *La planète Neptune.*

(Photo: Hubble Space Telescope, 21/02/1994.)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/planets/pluto/PlutoCharon.gif)

PLUTON ET CHARON

Demi-grand axe :	**5 900. 10^6 km**	**Masse :**	**0.012 10^{24} kg**
Révolution :	**247.7 ans**	**Rayon :**	**1 195 km**
Inclinaison :	**17.2 ^{o}**	**Atmosphère :**	**CH_4, N_2, ...**
Excentricité :	**0.250**	**Température :**	**?**
Rotation :	**-153.3 heures**	**Pression :**	**?**
Satellites :	**1 (Charon)**		
Découverte :	**C. Tombaugh, 18/02/1930**		
1ère sonde :	**---**		

FIGURE 6.13 – *Le couple Pluton–Charon.*



(Photo: SAAO, 15/03/1986)
(Source: ftp://seds.lpl.arizona.edu/pub/images/comets/19860315.gif)

LA COMÈTE DE HALLEY

Demi-grand axe :	**2685. 10^6 km**	**Masse :**	**~ 7. 10^{14} kg (?)**
Révolution :	**76.0 ans**	**Rayon :**	**~ 5.5 km**
Inclinaison :	**162.2 ^{o}**	**Atmosphère :**	**---**
Excentricité :	**0.967**	**Température :**	**---**
Rotation :	**---**	**Pression :**	**---**
Satellites :	**0**		
Découverte :	**E. Halley, 1682**		
1ère sonde :	**Giotto (ESA, 1986)**		

FIGURE 6.14 – *La comète de Halley.*

6.3 Synthèse

Le système solaire regroupe l'ensemble des corps qui sont sous l'influence gravitationnelle du Soleil, c'est-à-dire, qui sont suffisamment près du Soleil pour ressentir le champ de gravitation du Soleil plus intensément que celui des étoiles voisines.

L'essentiel des gros corps du système solaire tournent à peu près dans un même plan, à quelque degrés près, dans le même sens, et sur des orbites presque circulaires [2].

Le système solaire est constitué par :

- Le Soleil, étoile en milieu de vie, modérément grosse, modérément chaude (voir le chapitre 7).
- Les planètes telluriques (Mercure, Vénus, la Terre, Mars), qui se caractérisent par leur nature rocheuse, leur petite taille, leur faible nombre de satellites (0 pour Mercure et Vénus, 1 pour la Terre, 2 pour Mars), par leur richesse en corps réfractaires (silicates, métaux), et par leurs atmosphères secondaires (issue par exemple du dégazage des roches).
- La ceinture principale d'astéroïdes, qui se situe entre Mars et Jupiter. Elle regroupe des corps de petite taille (le plus gros, Cérès mesure environ 1000 km).
- Les planètes joviennes (Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune), qui se caractérisent par leur nature gazeuse, leur grande taille, leur grand nombre de satellites et autres corps gravitant (anneaux), et leur richesse en Hydrogène, Hélium et en éléments volatils.
- La ceinture de Kuiper, qui se situe au delà de l'orbite de Neptune (Pluton et son satellite Charon en sont des membres), qui est peuplée de corps cométaires (masses de glace avec inclusions réfractaires, qui se subliment lorsque leur orbite est assez elliptique pour les conduire près du Soleil, ce qui produit leur fameuse chevelure ; les inclusions réfractaires libérées lors de la sublimation de la matrice de glace forment des essaims de météorites responsables des pluies d'étoiles filantes comme les léonides, lorsque la Terre vient ultérieurement à les traverser).
- Le nuage de Oort, vaste zone à peu près sphérique d'environ 50 000 ua entourant le Soleil, et peuplée probablement de quelque 100 milliards de comètes à longue période comme la célèbre comète Hale-Bopp.

2. à l'exception de Mercure et Pluton qui ont des orbites nettement plus elliptiques et inclinées.

Chapitre 7

Le Soleil

7.1 L'étoile Soleil

Le Soleil est une étoile somme toute assez banale, parmi les 200 milliards d'étoiles que compte notre galaxie : "La Voie Lactée". Notre galaxie est en gros un disque aplati d'environ de 15 000 *parsec* de rayon [1], et le Soleil se trouve à environ 8000 *parsec* du centre de la galaxie dans un de ses bras spiraux.

C'est bien sûr l'étoile la plus proche de nous (la suivante, "Proxima Centauri" est environ 300 000 fois plus loin). C'est donc celle que l'humanité a le plus étudié. C'est la seule qui apparaisse depuis la Terre sous la forme d'un petit disque et non sous la forme d'un simple point, comme c'est le cas des autres étoiles, même vues au travers des plus puissants télescopes terrestres.

La température effective de la surface visible du Soleil est d'environ 5500^oC. Cela en fait une étoile de température moyenne, intermédiaire entre les étoiles chaudes (jusqu'à $50\,000^oC$) dont la couleur dominante tire sur le bleu, et les étoiles froides (moins de 3000^oC) dont la couleur dominante tire sur le rouge.

Par sa masse et son rayon, le Soleil est aussi une étoile moyenne, intermédiaire entre les géantes rouges et les naines blanches. Il est à peu près à la moitié de sa vie, que l'on estime à 10 milliards d'années environ.

L'œil humain, comme l'œil de la plupart des animaux, est sensible aux lumières (ondes électromagnétiques) dont la longueur d'onde s'échelonne entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge) [2]. C'est ce que l'on nomme le "domaine visible". C'est aussi dans ce domaine que le Soleil rayonne son maximum de lumière. Cela n'est sans doute pas un hasard...

Le Soleil est une boule de gaz composée essentiellement (mais pas uniquement) d'Hydrogène et d'Hélium. Il tourne sur lui-même, mais avec des vitesses différentes aux pôles et à l'équateur (il n'est pas rigide). Il est le siège de phénomènes magnétiques extrêmement complexes.

7.1.1 Caractéristiques physiques

La table 7.1 résume quelques données de base sur le Soleil. Elle est forcément très incomplète, vue l'énorme masse de données dont disposent les astronomes au sujet du Soleil.

1. Rappelons que le parsec est une unité de mesure de distance en astronomie qui vaut un peu plus de 30 000 milliards de kilomètres (voir la Table 4.1).
2. Un nm (nanomètre) représente un milliardième de mètre, soit un millionième de millimètre.

Masse	1.989 10^{30} kg (soit environ 333 000 fois la Terre)
Diamètre	1 391 960 km (soit environ 109 fois la Terre)
Distance moyenne à la Terre	149.6 10^6 km (soit environ 8.3 minutes-lumière)
Diamètre apparent	$32'$ (c'est-à-dire une pièce de 1 centime d'Euro à 1.70 m)
Densité moyenne	1.409 g/cm^3 (à peine plus que l'eau sur Terre)
Densité au centre	151.3 g/cm^3 (beaucoup plus dense que du plomb)
Température de surface	5507^oC
Température du cœur	15.57 10^6 ^oC
Age	environ 4.49 ± 0.05 milliards d'années
Luminosité	3.854 10^{26} $Watt$ (à comparer aux 100 $Watt$ d'une lampe)
Puissance moyenne reçue sur Terre	1370 $Watt/m^2$
Rotation à l'équateur	26.9 $jours$
Rotation aux pôles	35 $jours$

TABLE 7.1 – *Données physiques sur le Soleil.*

7.1.2 La source de l'énergie solaire

En 1842, le physicien Mayer qui fut un des fondateurs de la thermodynamique, avait avancé l'hypothèse que l'énergie rayonnée par le Soleil devait provenir de l'échauffement dû aux incessantes chutes de météorites sur le Soleil. Cette idée fut bien vite abandonnée. Une idée bien plus astucieuse allait naître en 1853 : le physicien allemand Helmholtz imagina que le Soleil était encore en train de se contracter à l'heure actuelle, et donc en train de chauffer tout comme de l'air que l'on comprime dans une pompe à bicyclette. Malheureusement, cette explication ne suffisait pas à expliquer l'énorme quantité d'énergie que le Soleil émet depuis 4.5 milliards d'années. Ce n'est qu'en 1926 que le physicien anglais Eddington émit l'idée qu'une réaction nucléaire transformant de l'Hydrogène en Hélium devait se produire en permanence au cœur du Soleil. Le mécanisme nucléaire détaillé fut complètement élucidé en 1938 par les physiciens Bethe et Weizsäcker.

C'est donc une réaction non pas chimique mais *nucléaire* qui convertit l'Hydrogène en Hélium, libérant une fantastique énergie qui est rayonnée jusqu'à nous. C'est une réaction qui est voisine de celle qui se produit dans la bombe atomique thermonucléaire dite "bombe H", aux effets dévastateurs bien connus. Cette réaction nucléaire produit aussi une grande quantité de neutrinos, qui sont des particules élémentaires extrêmement ténues, difficiles à détecter, et qui peuvent traverser la matière sans être absorbés. A grand renfort de détecteurs géants, on est parvenu à les détecter à leur arrivée sur Terre, ce qui nous a renseigné sur les conditions physiques qui règnent au cœur du Soleil.

Il est important à ce stade de préciser quelques ordres de grandeur : A chaque seconde, 600 millions de tonnes d'Hydrogène sont transformés en Hélium au cœur du Soleil. Sur ces 600 millions de tonnes, un peu plus de 4 millions de tonnes sont convertis en énergie pure, selon la célèbre loi d'équivalence de la masse et de l'énergie due à Einstein : $E = mc^2$, ce qui conduit à une puissance émise de $3.8\,10^{26}$ W. Cette fabuleuse énergie transite vers la surface du Soleil par différents mécanismes que l'on détaille dans la suite. A la surface, cette

énergie est rayonnée vers l'espace (entre autre vers nous) de manière électromagnétique, c'est à dire sous formes d'ondes lumineuses infrarouges, visibles et ultraviolettes, sous forme d'ondes radio et de rayons X. Au niveau de la Terre, hors atmosphère, le flux énergétique reçu du Soleil est d'environ 1370 W/m^2.

Il est à noter que ce fonctionnement du Soleil n'est pas un cas particulier : on pense que toutes les étoiles qui sont dans leur âge "adulte" (fonctionnement stable et régulier) fonctionnent de la même manière.

7.1.3 Le destin du Soleil

On pense que le Soleil s'est formé il y a environ 4.65 milliards d'années à partir d'un immense nuage de gaz (principalement de l'Hydrogène) et de poussières, appelé "nébuleuse primitive". Les astrophysiciens modernes ont reconstitué le scénario le plus plausible pour cette naissance : Une partie du nuage primitif s'est effondré sur lui-même, créant ainsi une sorte d'immense "grumeau" appelé "protoétoile". La cause de cet effondrement est simple : en effet, tous les grains de poussière de cette partie du nuage s'attirent mutuellement à cause de la force d'attraction universelle découverte en 1665 par Newton (voir section 3.4), et tombent donc les uns sur les autres. Au cours de cette phase d'effondrement qui a duré environ un millier d'années, le gaz et les poussières se sont comprimés et échauffés. Au delà de cette brève phase de formation, la protoétoile a continué de se comprimer et de se réchauffer lentement, pendant quelques millions d'années, jusqu'à ce que la température au cœur ait atteint les quelques 15 millions de degrés nécessaires à l'allumage des réactions thermonucléaires qui sont à l'origine de la fabuleuse énergie du Soleil. Une centaine de millions d'années sont encore nécessaires pour que la jeune étoile Soleil arrive à "l'âge adulte", caractérisé par un fonctionnement stable et constant. Cette phase "adulte" a débuté il y a environ 4.5 milliards d'années, et devrait durer encore 5 milliards d'années.

Au terme de sa vie adulte, le combustible nucléaire qui alimente le Soleil en énergie arrivera à épuisement. Le cœur du Soleil se comprimera alors que ses couches externes se dilateront jusqu'à englober la planète Mercure, puis Vénus, puis la Terre, puis enfin Mars. Le Soleil sera devenu une "géante rouge", gigantesque mais relativement froide en surface (quelques milliers de degrés), avec un cœur ultra-comprimé et surchauffé, siège de nouvelles réactions nucléaires. Au cours de cette phase de sa vie, le Soleil éjectera une grande quantité de matière dans l'espace avoisinant, et perdra donc beaucoup de sa masse. A la fin de cette phase, et au termes de péripéties complexes et hypothétiques, il est probable que le Soleil expulsera progressivement ou brutalement toutes ses couches externes qui formeront une nouvelle nébuleuse. Le cœur deviendra une "naine blanche", qui cessera de se comprimer, puis se refroidira pendant quelques milliards d'années, pour finir par devenir une "naine noire", inerte et trop froide pour briller. Ce sera l'ultime destinée de notre Soleil : devenir un petit corps ultra-dense, froid et sombre.

La majeure partie des corps chimiques synthétisés par les réactions nucléaires au cours de la vie du Soleil auront été projetés dans l'espace, enrichissant le nuage primitif dans lequel le Soleil naquit. Une nouvelle étoile naîtra peut-être de cette matière interstellaire enrichie, un cortège de planètes se formera peut-être comme ce fut le cas autour de notre Soleil, et un nouveau cycle stellaire recommencera. Le Soleil et ses planètes sont nés dans un tel nuage, qui avait été enrichi par la matière synthétisée de manière nucléaire au cœur d'une ancienne étoile et éjectée par celle-ci à la fin de sa vie. Tous les atomes qui composent notre système solaire, y compris nous-mêmes, sont donc les restes d'une ancienne étoile ; C'est pourquoi les astronomes aiment dire que l'homme n'est que poussière d'étoile.

7.1.4 L'activité solaire

Le Soleil n'est pas un objet inerte et figé. De très nombreux phénomènes, dont l'origine réside dans les couplages complexes entre le champ magnétique solaire et sa rotation différentielle [3], font que l'aspect du Soleil varie de jour en jour, parfois même de manière brutale.

Le phénomène lié à l'activité solaire le plus facilement observable est l'apparition et la disparition des taches solaires. Ces taches, que l'on voit depuis la Terre comme des points noirs à la surface du Soleil, sont des zones relativement froides (environ 1000^oC de moins que le reste de la surface), relativement petites (environ la taille de la Terre, ce qui est petit par rapport au Soleil), dans lesquelles le champ magnétique s'est concentré au point de ralentir les mouvements de bouillonnement qui amènent la chaleur solaire vers la surface (d'où la baisse de température). Ces taches apparaissent en nombre variable : leur fréquence moyenne varie selon un cycle d'environ 11 ans, qui rythme l'activité magnétique et mécanique du Soleil. Notons que le mouvement de ces taches solaires ont permis à Galilée de découvrir la rotation du Soleil.

Les protubérances et arches solaires sont des jets de matière solaire ionisée qui est canalisée par des boucles du champ magnétique solaire. Elles constituent une autre manifestation de l'activité solaire. Ces phénomènes sont très spectaculaires mais ne sont visibles que pendant les éclipses, ou avec un instrument muni de filtres optiques très sélectifs.

D'autres phénomènes très violents, d'origine électromagnétique, comme les éruptions solaires et les éjections de matière coronale peuvent être suffisamment énergétique pour avoir des conséquences jusque sur Terre (perturbation des télécommunications, destruction de satellites, etc.).

7.1.5 La composition chimique du Soleil

Le Soleil est essentiellement composé d'Hydrogène et d'Hélium, qui sont les matériaux les plus abondants dans l'Univers. D'autres corps chimiques sont également présents, mais en moindre quantité. Leur présence dans la couche superficielle du Soleil (la photosphère) est détectée et mesurée par l'analyse très précise des couleurs manquantes dans la lumière solaire. Chaque corps chimique est responsable de l'absorbtion d'une couleur ou d'un groupe de couleurs. La décomposition de la lumière solaire par un spectrographe (qui réalise de manière plus quantitative le même effet qu'un arc-en-ciel) permet de mesurer quelles sont les couleurs absorbées et de combien elles sont absorbées, ce qui permet de déterminer les éléments chimiques présents et de connaître leur abondance. Le tableau 7.2 donne l'abondance approximative en pourcentages des principaux constituants du Soleil.

Ce tableau est approximatif et non exhaustif. De nombreux autres éléments sont présents en de moindres quantités.

7.2 Structure du Soleil

7.2.1 Vision globale

Le Soleil est un objet complexe, non homogène, en mouvement, et soumis à d'intenses phénomènes magnétiques. La masse volumique varie considérablement avec la profondeur

3. Étant fluide, le Soleil ne tourne pas en bloc comme un solide. Ses zones équatoriales tournent plus vite que ses zones polaires ; c'est ce que l'on appelle la "rotation différentielle".

Elément	Abondance	Elément	Abondance
Hydrogène	73.46 %	Azote	0.09 %
Hélium	24.85 %	Silicium	0.07 %
Oxygène	0.77 %	Magnésium	0.05 %
Carbone	0.29 %	Soufre	0.04 %
Fer	0.16 %	Autres (Na, Ar, P, Al, Cl, ...)	0.10 %
Néon	0.12 %		

TABLE 7.2 – *Table des abondances des principaux éléments chimiques présents à la surface du Soleil (photosphère), exprimées en pourcentages massiques.*

et atteint des valeurs relativement élevées au centre. La masse volumique moyenne reste cependant assez faible (1.4 g/cm^3). La température est elle aussi très inhomogène. La vitesse de rotation de ce corps non solide varie en fonction de la profondeur et de la latitude. On peut distinguer dans le Soleil plusieurs zones distinctes que l'on décrit ci-après en partant du centre vers l'extérieur. la figure 7.1 montre un schéma simplifié de la structure interne du Soleil.

Il est à noter que les informations données ci-après sur les couches internes du Soleil (cœur, zone radiative, zone convective) ont été obtenues de manière indirecte, car ces couches sont opaques et ne peuvent pas s'étudier par observation directe. Ces informations sont donc peu précises et encore hypothétiques. En revanche, les couches externes (photosphère, chromosphère, couronne) sont visibles et donc accessibles à l'observation directe dans toutes les gammes de longueur d'onde du spectre électromagnétique.

7.2.2 Le cœur nucléaire

La partie centrale du Soleil est le siège des réactions nucléaires qui produisent l'énergie solaire sous forme de rayons γ, c'est-à-dire des photons (grains de lumière) de très haute énergie. La matière (essentiellement de l'Hydrogène et de l'Hélium) est portée à une température d'environ 15 millions de degrés, et la pression est telle que la masse volumique y dépasse les 150 g/cm^3 (à titre de comparaison, la masse volumique du mercure n'est que de 13.6 g/cm^3). Le rayon du cœur solaire est d'environ 250 000 km (soit 0.35 fois le rayon solaire).

Parmi les réactions nucléaires qui transforment de l'Hydrogène en Hélium dans le cœur solaire, le "cycle Proton-Proton" est une des plus actives. La figure 7.2 en donne un schéma simplifié. Les réactions nucléaires qui ont lieu au centre du Soleil, comme le cycle Proton-Proton, produisent, en plus des rayons γ, un important flux de neutrinos. Ces neutrinos, particules élémentaires très difficiles à détecter, emportent une quantité d'énergie qui représente environ 3% de l'énergie totale rayonnée par le Soleil. Leur détection à leur arrivée sur Terre est une précieuse source d'informations sur le cœur nucléaire du Soleil. Ces particules interagissent extrêmement peu avec la matière, ce qui rend leur détection très difficile. D'immenses détecteurs souterrains ont été construits pour parvenir à cette détection. Citons pour mémoire un des plus anciens : le détecteur de R. Davis. Il est constitué par une immense cuve de 400 m^3 de perchloréthylène (C_2Cl_4) installée à 1500 m sous terre, au fond d'une ancienne mine d'or du Dakota.

La fabuleuse énergie libérée par les réactions nucléaires se produisant au cœur du Soleil doit s'acheminer vers la surface pour y être évacuée par rayonnement. Avant d'aller plus avant dans la description des couches plus externes qui véhiculent cette énergie, il

parait utile de rappeler quelques principes physiques de base concernant le transfert de la chaleur : D'une manière générale, on connaît trois sortes de phénomènes permettant de transporter de l'énergie thermique :

- **Le transfert conductif** ou conduction thermique : l'énergie d'agitation thermique des atomes se transmet de proche en proche par collision, sans mouvement global de matière. C'est le mécanisme dominant dans les matériaux solides opaques.
- **Le transfert convectif** ou convection thermique : l'énergie thermique est transportée par des mouvements de parcelles macroscopiques de matière. Ces mouvements de matière peuvent être forcés par une cause extérieure comme un brassage mécanique (convection forcée, ou advection), ou se produire spontanément quand des contrastes de densité découlent des contrastes de température (convection spontanée ou naturelle). C'est le mécanisme qui se produit dans une pièce chauffée par le bas : l'air chaud produit au bas de la pièce par le dispositif de chauffage est plus léger et monte vers le plafond, emportant de l'énergie thermique. L'air froid présent près du plafond est plus dense et de ce fait descend vers le sol. Cette combinaison de masses d'air montantes et descendantes produit de grands tourbillons appelés "cellules convectives", qui transportent la chaleur du bas vers le haut.
- **Le transfert radiatif** : Tout corps chauffé émet des radiations électromagnétiques qui véhiculent de l'énergie thermique vers tout corps récepteur susceptible de les absorber et donc de s'échauffer. Ce mode de transfert thermique ne nécessite pas la présence de matière comme c'est le cas pour la conduction ou la convection. Il peut transporter de l'énergie à travers des zones vides de matière. C'est par ce mécanisme que la chaleur solaire traverse les 149 millions de kilomètres de vide qui nous séparent du Soleil.

Pour ce qui est du Soleil, le mécanisme de transfert conductif joue un rôle mineur, selon toute vraisemblance. L'énergie de la fournaise nucléaire est donc acheminée vers la surface par rayonnement puis par convection.

7.2.3 La zone radiative

La zone radiative s'étend jusqu'à environ 500 000 kilomètres du centre du Soleil (exactement jusqu'à 0.287 fois le rayon solaire). Comme son nom l'indique, l'énergie solaire traverse cette zone principalement sous forme de radiations électromagnétiques, c'est-à-dire sous forme de photons (grains de lumière transportant de l'énergie). Ces photons subissent au cours de leur trajet un tel nombre de collisions avec les atomes du milieu ambiant (environ une à chaque centimètre), que même en se déplaçant à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s), ils mettent près d'un million d'années en moyenne pour traverser la zone radiative et arriver à la base de la zone convective.

7.2.4 La zone convective

Au delà de la zone radiative, la matière est devenue suffisamment "mobile" pour que le transport de l'énergie se fasse principalement par convection. Le passage de l'énergie solaire au travers de ces 200 000 derniers kilomètres ne dure que quelques mois, à comparer au million d'années nécessaires pour traverser la zone radiative. Dans cette zone, d'énormes masses de matière chauffée par la zone radiative remontent vers la surface du Soleil pour y céder de la chaleur, et, une fois refroidies, replongent vers la base de la zone convective pour y être réchauffées à nouveau.

La température moyenne des couches internes du Soleil (radiative et convective) varie avec la profondeur. Elle passe des $15\,10^6\,K$ du cœur, aux $5700\,K$ de la surface (photosphère).

7.2.5 La photosphère

La photosphère est la partie visible du Soleil (voir Figure 7.3). C'est en quelque sorte son "atmosphère". C'est la première couche transparente du Soleil, les couches plus profondes étant opaques. Elle ne représente que $200\,km$ environ. Cette couche est accessible à l'observation directe, contrairement aux couches plus profondes que l'on ne connaît que par des méthodes indirectes mêlant la modélisation théorique et l'héliosismologie. Cette couche est chauffée par la matière de la zone convective. La température y est d'environ $5700\,K$, et l'énergie apportée par la convection y est transformée en rayonnement électromagnétique principalement infrarouge, visible et proche ultraviolet. La densité de la matière y est comparable à celle qui règne dans la haute atmosphère terrestre.

7.2.6 La chromosphère

Au dessus de la brillante photosphère se trouve une couche de gaz encore moins dense, d'environ 1000 à 2000 kilomètres d'épaisseur, connue sous le nom de "chromosphère" (voir Figure 7.4). Dans cette couche, la température passe des quelques $4300\,K$ qui règnent dans la haute photosphère à près de $10000\,k$ au sommet de la chromosphère. La densité de la matière y est assez faible pour que l'énergie magnétique puisse jouer un rôle prépondérant par rapport à l'énergie mécanique. La structure fine de cette zone est donc dominée par des phénomènes d'ordre magnétique.

7.2.7 La couronne solaire

Au delà de la chromosphère se trouve la couronne solaire (voir Figure 7.5). C'est une zone encore moins dense mais beaucoup plus chaude, puisque la température y atteint $10^6\ K$. Les mécanismes physiques, vraisemblablement magnétiques, qui sont responsables de cette remontée de la température font encore actuellement l'objet d'actives recherches.

Cette zone très irrégulière et spectaculaire s'étend loin du disque solaire, jusqu'à plusieurs diamètres solaires, et même au delà, dans tout le système solaire, sous la forme du vent solaire. Le vent solaire est un flux irrégulier de particules émises à grande vitesse par le Soleil, et qui peut être vu comme un prolongement de la couronne solaire.

On ne peut observer la couronne solaire que pendant les éclipses totales de Soleil, lorsque la Lune occulte totalement la photosphère. En effet, en l'absence du masquage par la lune, la très forte luminosité de la photosphère empêche l'observation de la couronne, beaucoup moins lumineuse. C'est la raison pour laquelle les scientifiques spécialistes de la couronne solaire n'hésitent pas à organiser des missions en tout point du globe où une éclipse est visible, afin de pouvoir bénéficier de ces trop rares instants. Les astronomes moins patients utilisent un instrument appelé coronographe inventé en 1931 par B. Lyot. Il s'agit d'une lunette astronomique munie d'un dispositif masquant la photosphère solaire et produisant ainsi une éclipse artificielle.

7.3 Le Soleil et la Terre

Le Soleil et la Terre sont liés par des liens étroits, de nature biologique, sociologique, physique et technique. Commençons par le fait que sans lui, la vie sur Terre ne serait pas ce qu'elle est.

7.3.1 Le Soleil source de vie

La majeure partie de ce qui vit sur Terre doit son existence à la lumière solaire. En effet, les rayonnements ultraviolets qu'elle contient permettent aux plantes vertes de pratiquer la photosynthèse, c'est-à-dire de fabriquer les matière organiques nécessaires à leur croissance et à leur vie à partir du gaz carbonique atmosphérique, de l'eau, et des sels minéraux puisés dans la terre. Ces plantes vertes sont indispensables à la survie de la plupart des espèces animales, d'une part en tant que productrices d'Oxygène, et d'autre part en tant que point de départ des chaînes alimentaires.

7.3.2 Le Soleil source d'énergie

La plupart des formes d'énergies exploitées sur Terre ont pour origine l'énergie du Soleil, de manière plus ou moins directe.

Les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) proviennent de la lente décomposition sous pression de couches détritiques végétales datant de plusieurs millions d'années. Or, ces végétaux doivent leur existence à la lumière solaire. C'est en effet elle qui a permis par photosynthèse, la réduction du carbone présent sous forme oxydée dans le dioxyde de carbone atmosphérique. Ce carbone, présent dans les combustibles fossiles, nous restitue de l'énergie lorsque nous l'oxydons à nouveau par combustion.

L'énergie éolienne provient du déplacement des masses d'air, dont le moteur est le jeu des contrastes de températures, qui est lui-même dû au chauffage solaire.

L'énergie hydraulique est due aux écoulements d'eau depuis des zones de haute altitude vers des zones d'altitude plus basse. C'est ensuite l'énergie du Soleil qui évapore l'eau arrivée en basse altitude, ce qui lui permet de remonter vers les zones élevées, pour s'y redéposer sous forme de pluie ou de neige. C'est donc encore l'énergie solaire qui est le moteur de base de la production d'énergie hydraulique.

En revanche, certaines énergies ne proviennent pas du Soleil. Par exemple, l'énergie nucléaire de nos centrales de production électrique provient de la fission des noyaux d'atomes d'Uranium, qui doivent leur existence non pas au Soleil, mais à l'étoile précédente, qui a vraisemblablement achevé sa vie en libérant dans le milieu interstellaire le fruit de sa nucléosynthèse sous forme d'un nuage de matière dans lequel s'est formé notre système solaire, y compris notre Terre et son uranium. L'énergie hydrothermale et l'énergie marémotrice sont dans le même cas.

7.3.3 Le Soleil source de danger

La lumière solaire, et notamment sa composante ultraviolette est source de vie sur Terre. Outre son action sur les végétaux, la lumière solaire est également utile directement par le fait qu'elle participe à la fixation du calcium sur les os. Cependant, la lumière solaire reçue de manière exagérée peut infliger de sévères dommages à la peau et même, selon les théories actuelles, augmenter la fréquence de certains cancers de la peau.

Par ailleurs, le Soleil représente un grave danger pour les yeux. Regarder le Soleil directement, même à l'œil nu, peut conduire à de graves lésions irréversibles de la rétine. Ce danger est particulièrement présent pendant la phase de partialité d'une éclipse, car la forte baisse de luminosité qui en résulte diminue l'inconfort de l'éblouissement sans réduire le risque de lésion. L'observation d'une éclipse de Soleil doit se faire au travers de filtres appropriés, par exemple des verres de soudeur à l'arc d'indice 14 minimum. De plus, **l'observation du Soleil au travers d'instruments optiques même de faible puissance, est extrêmement dangereuse et peut conduire à une cécité définitive**.

Le flux de particules chargées à haute énergie émis en permanence par le Soleil parvient jusqu'à la Terre. Elles sont alors piégées en grande partie par le champ magnétique terrestre, dans des zones appelées "ceinture de van Allen". Ce piégeage est moins efficace dans les régions circumpolaires, où ces particules atteignent la haute atmosphère. Elles représentent alors un danger potentiel difficile à évaluer, pour le personnel navigant à bord de vols long courrier dont la route survole les pôles.

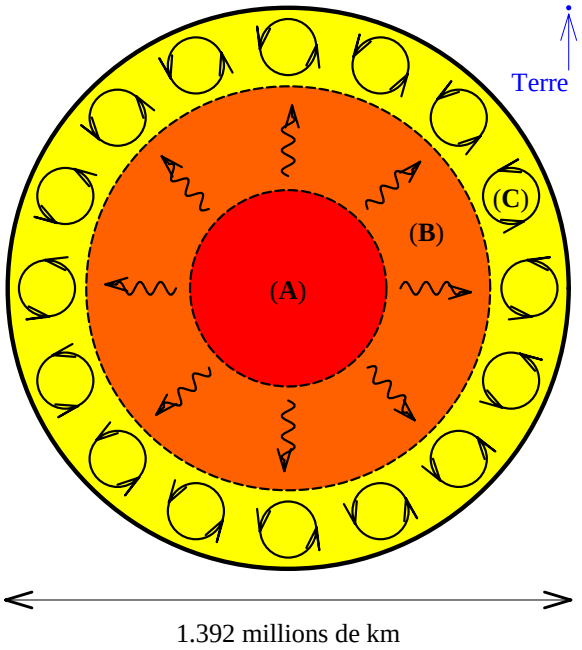
7.3.4 Le Soleil pour mesurer le temps

On rappelle ici que le cycle diurne du passage du Soleil au méridien est à l'origine des premières définitions astronomiques de la seconde. Le mouvement solaire a été pendant longtemps le meilleur moyen de repérage dans le temps à court terme. Il existe de multiples sortes de cadrans solaires dont l'usage remonte à l'antiquité, et dont la description exhaustive serait hors du propos de ce cours. Citons tout de même le dispositif le plus courant : le cadran solaire "astronomique". Il s'agit d'une tige rigide (le style) dûment fixée pour être parallèle à l'axe des pôles géographiques de la Terre, et d'une mire graduée formée d'une famille de droites concourantes et d'hyperboles. La position de l'ombre du style par rapport à cette mire donne le temps solaire vrai local, duquel on déduit le temps légal par adjonction des corrections de longitude et d'équation du temps (voir la section 4.1.3).

7.3.5 Les aurores boréales et les orages géomagnétiques

Parmi les phénomènes liés à l'interaction Terre-Soleil, le plus esthétique est sans doute l'aurore boréale. Le Soleil émet en permanence dans toutes les directions un flux de particules chargées diverses qui constitue le vent solaire. Ces particules chargées, lorsqu'elles arrivent aux abords de la Terre, subissent l'effet du champ magnétique terrestre qui incurve leurs trajectoires et les fait spiraler le long de ses lignes de champ. Ce mouvement hélicoïdal conduit les particules vers les pôles magnétiques terrestres, où elles entrent en collision avec les molécules constituant notre atmosphère. Ces molécules, excitées énergétiquement par les collisions, retombent sur leur état fondamental en émettant des photons, donc de la lumière. Ceux sont ces lumières émises qui constituent les aurores boréales. Leur aspect peut être très variable, et peut revêtir l'apparence de superbes draperies lumineuses.

Lorsque ces bouffées de particules chargées sont particulièrement violentes, il peut arriver qu'elles provoquent de brusques variations du champ magnétique terrestre, qui se traduisent au niveau de l'activité humaine par des perturbations des communications radioélectriques ou téléphoniques.



LA STRUCTURE INTERNE DU SOLEIL

(A): Cœur nucléaire

(B): Zone radiative

(C): Zone convective

FIGURE 7.1 – *La structure interne du Soleil. A titre de comparaison, La Terre est représentée en haut à droite à la même échelle.*

Etape I

$$\begin{cases} {}^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \text{neutrino} \quad (99.6\ \%) \\ {}^{1}H + e^{-} + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + \text{neutrino} \quad (0.4\ \%) \end{cases}$$

Etape II

$${}^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \text{photon } \gamma$$

Etape III

$$\begin{cases} {}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H \quad (85\ \%) \\ {}^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \text{photon } \gamma \quad (15\ \%) \end{cases}$$

Etape IV

$${}^{7}Be + e^{-} \rightarrow {}^{7}Li + \text{neutrino}$$

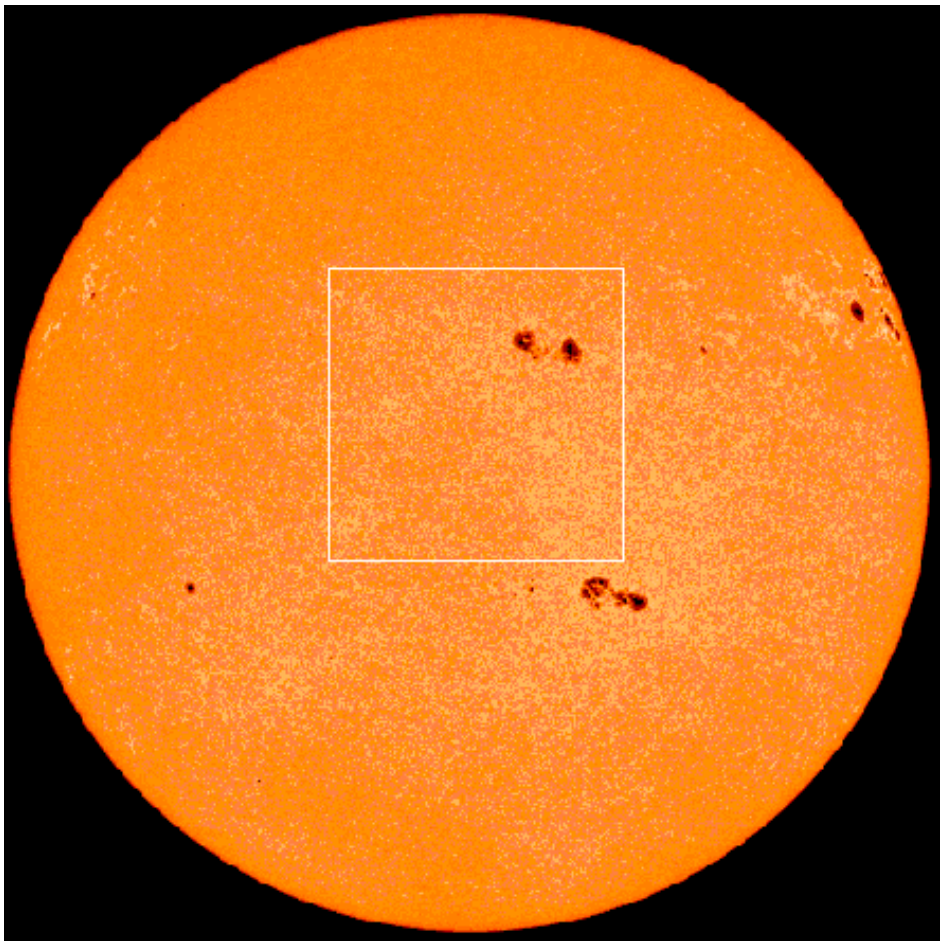
Etape V

$${}^{7}Li + {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$$

LE CYCLE "PROTON-PROTON" DANS LE CŒUR SOLAIRE

FIGURE 7.2 – *Le "cycle Proton-Proton" est une des principales réactions nucléaires qui transforment l'Hydrogène en Hélium dans le cœur solaire. La figure en donne une vision simplifiée. On y remarque des émissions de neutrinos et d'énergie sous la forme de photons γ (particules d'énergie lumineuse de très haute énergie).*

(Photo: MDI, Sonde SOHO)
(Source: http://sohowww.estec.esa.nl/data/summary/gif/990604/smdi_igram_fd_19990604_0136.gif)



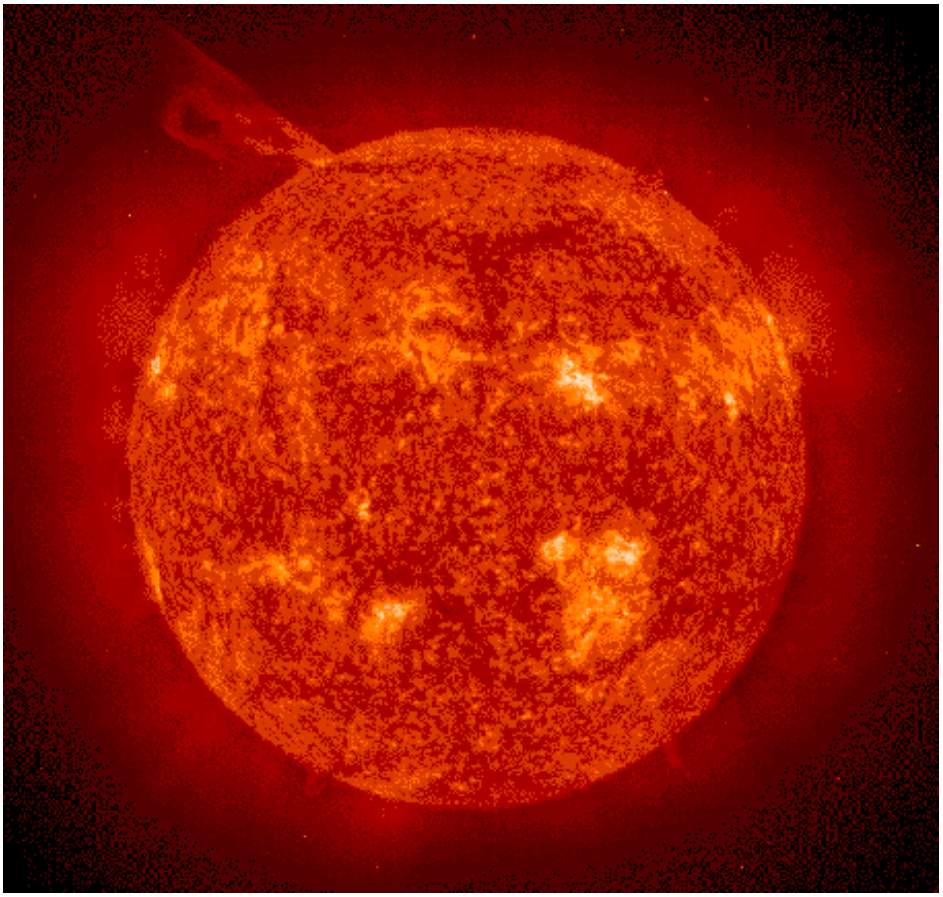
LA PHOTOSPHÈRE

prise le 4 juin 1999 à 01h36 UTC

par l'instrument MDI (Michelson Doppler Imager)

à bord de la sonde SOHO

FIGURE 7.3 – *La photosphère solaire prise par la sonde SoHO. Des taches solaires sont nettement visibles.*



(Photo: EIT, Sonde SOHO)
(Source: http://sohowww.estec.esa.nl/data/summary/gif/990604/seit_00304_fd_19990604_1919.gif)

LA CHROMOSPHÈRE

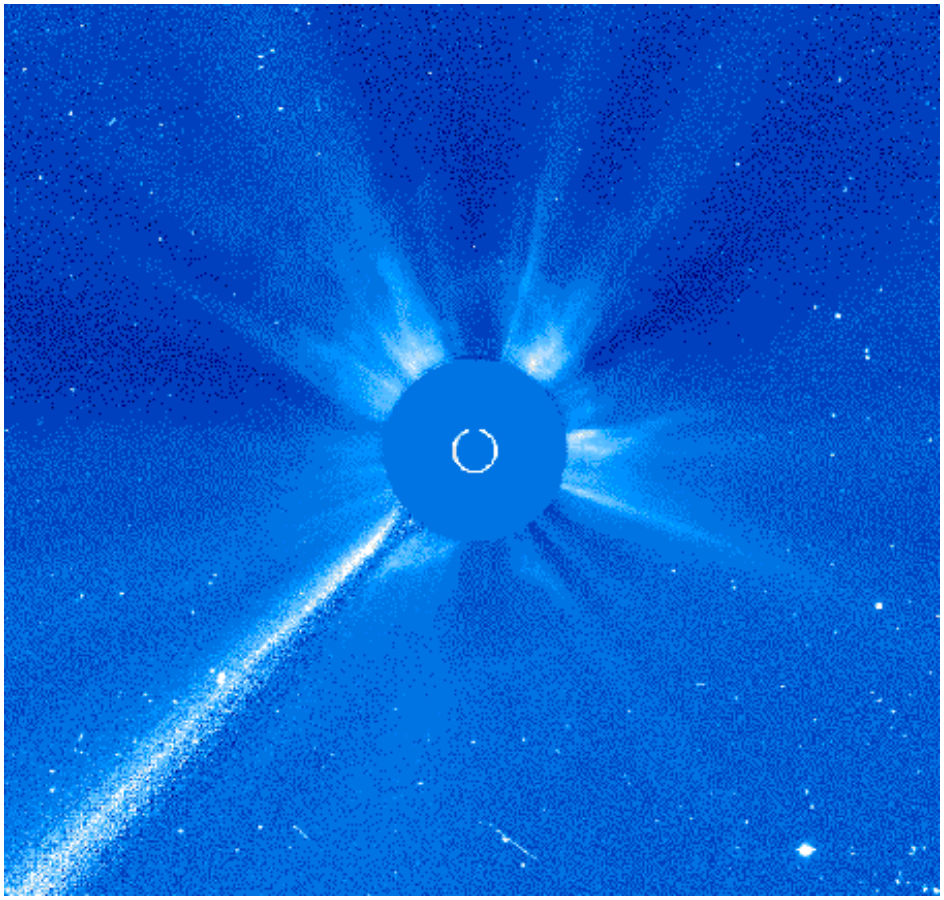
prise le 4 juin 1999 à 19h19 UTC

par l'instrument EIT (Extreme UV Imaging Telescope)

à bord de la sonde SOHO

FIGURE 7.4 – *La chromosphère solaire prise par la sonde SoHO dans l'ultraviolet (*$324\,nm$*). Une protubérance solaire est visible.*

(Photo: LASCO, Sonde SOHO)
(Source: http://sohowww.estec.esa.nl/data/summary/gif/990604/slas_c3wlc_fd_19990604_0242.gif)



LA COURONNE

prise le 4 juin 1999 à 02h42 UTC

par l'instrument LASCO (Large Angle Spectrometric Coronograph)

à bord de la sonde SOHO

FIGURE 7.5 – *La couronne solaire prise par la sonde SoHO. Le cercle blanc figure le diamètre solaire.*

7.4 Synthèse

Le Soleil est une des 200 milliards d'étoiles qui peuplent notre galaxie, la Voie Lactée. C'est une étoile moyenne par sa masse ($2\,10^{30}\,kg$), son diamètre ($1.4\,10^{6}\,km$), sa luminosité ($3.8\,10^{26}\,W$) et sa température de surface ($5507^{o}C$), qui lui confère sa couleur intermédiaire entre le bleu des étoiles chaudes et le rouge des étoiles froides. C'est l'étoile la plus proche de nous donc la mieux étudiée.

Le Soleil est essentiellement composé d'Hydrogène et d'Hélium, mais contient aussi en plus faibles proportions de nombreux autres éléments (Oxygène, Carbone, Azote, Magnésium, Fer, Sodium, etc.).

Le Soleil a déjà vécu environ la moitié de sa vie, que l'on estime entre 9 et 10 milliards d'années au total. A la fin de sa vie, lorsqu'il aura épuisé son combustible nucléaire, le Soleil gonflera pour devenir une géante rouge, jusqu'à englober l'orbite de Mars. Puis, il éjectera sa matière périphérique, et son cœur se condensera pour devenir une naine blanche, puis se refroidira pour devenir une "naine noire", inerte et ultra-dense.

La source de l'énergie du Soleil et des étoiles similaires est un ensemble de réactions thermonucléaires, dont la principale revient à la fabrication d'Hélium à partir d'Hydrogène.

Structure du Soleil

La partie interne du Soleil comporte :

- **Un cœur actif** : il est siège des réactions de fusion thermonucléaire qui produisent l'énergie solaire. La température y est de l'ordre de $15\,10^{6}\,K$.
- **Une zone radiative** : l'énergie produite dans le cœur est évacuée par des rayonnements électromagnétiques (rayons X, ultraviolets), jusqu'aux deux tiers du rayon solaire environ.
- **Une zone convective** : l'énergie, qui est produite par le cœur et acheminée jusqu'aux deux tiers du rayon solaire par des rayonnements électromagnétiques, franchit le dernier tiers de son parcours vers l'extérieur par un mécanisme de convection : de la matière solaire chauffée par l'énergie du cœur devient plus légère et monte vers la surface. Là, elle se refroidit en cédant son énergie à l'extérieur, s'alourdit et retombe vers la base du dernier tiers pour se réchauffer à nouveau.

La partie externe du Soleil comporte :

- **La photosphère** : c'est la première couche qui soit assez peu dense pour être transparente et donc observable avec les dispositifs de protection adéquats. C'est en quelque sorte la couche basse de "l'atmosphère solaire". Elle est extrêmement fine (quelques centaines de Km), et sa température est de l'ordre de $5500^{o}C$. Elle est chauffée par l'énergie du cœur, transportée par la couche radiative, puis par la couche convective.
- **La chromosphère** : c'est une couche plus externe encore, encore moins dense, d'environ 1000 à $2000\,km$ d'épaisseur, où la température remonte jusqu'à $10\,000\,K$ environ. Elle n'est visible que lors des éclipses totales de soleil.
- **La couronne solaire** : c'est une vaste couche irrégulière encore moins dense mais beaucoup plus chaude (de l'ordre du million de degrés). Sous la forme de son prolongement, le vent solaire, elle est sensible à d'énormes distances du Soleil. Elle est visible lors des éclipses totales de Soleil, ou avec un appareillage spécial (coronographe) qui réalise une sorte d'éclipse artificielle.

L'activité solaire

Les couplages complexes entre le champ magnétique solaire et sa rotation différentielle (étant fluide, il ne tourne pas en bloc, et les zones équatoriales tournent plus vite que les zones polaires), sont la source de nombreux phénomènes souvent violents qui constituent l'activité solaire. cette activité montre un regain de vigueur environ tous les 11 ans (cycle solaire). Cette activité se manifeste par des taches sombres sur la photosphère. Elles sont dues à une concentration de champ magnétique qui ralentit les mouvements de convection et diminue d'autant l'approvisionnement local en énergie. Il s'en suit un refroidissement local et donc une zone sombre.

Les protubérances et arches solaires (jets de matière ionisée canalisée par des boucles de champ magnétique) constituent une autre manifestation très spectaculaire de l'activité solaire.

Les éruptions solaires, et les éjections de matière coronale sont des manifestations de l'activité solaire qui peuvent avoir des conséquences jusque sur Terre (télécommunications perturbées, satellites détruits).

Le Soleil et la Terre

L'énergie du Soleil est la source de la plupart des formes d'énergie utilisées sur Terre. Sa composante ultraviolette est le moteur primordial de la photosynthèse, qui nous fournit l'Oxygène et qui assure la croissance des végétaux, base indispensable de toutes les chaînes alimentaires.

Le Soleil est aussi source de danger pour la vie sur Terre, d'une part à cause de ses émissions ultraviolettes, heureusement partiellement filtrées par notre atmosphère et son ozone, d'autre part à cause des flux de particules chargées constituant le vent solaire, heureusement piégées par notre champ magnétique terrestre (ceinture de Van Allen). Ces particules, lorsqu'elles parviennent en contact de l'atmosphère dans les régions polaires, provoquent les superbes aurores boréales en excitant les molécules d'Oxygène atmosphérique. Ce flux de particules à haute énergie, lorsqu'il atteint l'atmosphère terrestre représente un danger potentiel pour le personnel navigant à bord de vols long courrier survolant les pôles.

Chapitre 8

Les instruments de l'Astronomie

8.1 Les sources d'information de l'astronome

A la différence du biologiste ou du géologue qui peuvent avoir un contact direct et donc une action sur au moins certains de ses objets d'étude, l'astronome ne peut pas (ou quasiment pas) mener d'expériences directes sur les objets célestes. Même si l'avènement, somme toute fort récent, de la conquête de l'espace oblige à nuancer ce propos, il n'en reste pas moins que l'énorme majorité [1] des informations recueillies par les astronomes provient de la lumière, ou, plus généralement des ondes électromagnétiques, dont la lumière visible n'est qu'un cas particulier.

Rappelons que les ondes électromagnétiques sont des vibrations des champs électrique et magnétique qui peuvent se propager à la vitesse $c = 299\,792\,458\ m/s$ dans le vide. Selon la fréquence ν de ces vibrations [2], ou, ce qui revient au même selon leur longueur d'onde $\lambda = c/\nu$, les ondes électromagnétiques devront être détectées à l'aide d'appareils différents, et porteront donc traditionnellement des noms différents (voir figure 8.1). L'œil humain n'est sensible qu'a un tout petit domaine de longueur d'ondes, comprises entre $0.4\,\mu m$ et $0.8\,\mu m$. Le reste du spectre électromagnétique n'est accessible qu'au travers de détecteurs spéciaux, dont l'apparition est récente (moins d'un siècle).

On sait aussi depuis le début du XXeme siècle, que l'on peut également voir les ondes électromagnétiques comme des flux de particules élémentaires appelées photons, sans masse mais porteuses d'une énergie individuelle $\epsilon = h.\nu$ où ν est la fréquence de l'onde et h est une constante universelle de la physique appelée "Constante de Planck". Sa valeur numérique est $h = 6.62607\,10^{-34}\ Joule/Hertz$. Si l'on préfère exprimer les énergies en electron-volts (eV), alors sa valeur numérique devient : $h = 4.13566\,10^{-15}\ eV/Hertz$.

La figure 8.1 donne les noms habituellement donnés aux ondes électromagnétiques, selon leur longueur d'onde λ, leur fréquence ν et l'énergie des photons associés (échelles logarithmiques).

Les ondes électromagnétiques (ondes radio, infrarouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X, etc...) étant la principale source d'information de l'astronome, ce dernier a toujours eu à cœur d'extraire un maximum d'information des ondes émises par les corps célestes. Les astronomes sont passés maîtres en l'art de "faire parler la lumière". Pour simplifier le langage et l'exposé, on parlera désormais de "lumière" pour désigner à la fois les infrarouges, la lumière visible et les ultraviolets. L'essentiel de ce qui suit reste vrai pour les autres types d'ondes électromagnétiques.

Depuis le milieu du XXeme siècle, les astronomes savent détecteur quasiment tous les types d'ondes électromagnétiques, et ne sont plus limités à la lumière visible : Les

1. On ne mentionnera pas dans ce document les informations, précieuses mais relativement peu abondantes, obtenues par l'analyse des météorites retrouvées sur Terre ou grâce aux échantillons prélevés par des sondes spatiales.

2. La fréquence d'une vibration est le nombre d'oscillations complètes effectuées par seconde. L'unité de mesure usuelle de la fréquence est le "Hertz" (abrégé : Hz). Une vibration se faisant à raison d'une oscillation complète par seconde aura une fréquence de $1\,Hz$.

grands radio-télescopes (immenses antennes paraboliques mobiles) permettent de recevoir les ondes radio du ciel. Les détecteurs embarqués dans des véhicules spatiaux permettent de percevoir les ultraviolets lointains, les rayons X et les rayons γ. On restreindra cependant la portée de ce chapitre aux seuls instruments d'optique, c'est-à-dire destinés à recevoir la lumière (infrarouge, visible, proche ultraviolet).

Cette quête des informations contenues dans la lumière nécessite de savoir :

1. collecter le plus de lumière possible sans la dégrader,
2. analyser (donc trier) cette lumière aussi finement que possible,
3. percevoir et stocker cette lumière.

Le premier point nécessite de construire des collecteurs de lumière (lunettes astronomiques, télescopes, radio-télescopes) aussi performants que possible.

Le second point nécessite de savoir filtrer la lumière, ou mieux, de savoir séparer les ses différentes composantes (séparation des différentes "couleurs" par spectroscopie, des différentes polarisations par polarimétrie).

Le troisième point nécessite d'utiliser le récepteur adapté à la gamme de longueur d'onde étudiée (œil, plaque photographique, caméra, bolomètre, etc...).

On consacrera donc les sections suivantes à l'étude des maillons de cette chaîne de traitement de la lumière. Pour ne pas alourdir le propos, on ne traitera dans ce qui suit que le cas des instruments "optiques", c'est-à-dire destinés aux ondes lumineuses (proche infrarouge, visible, proche ultraviolet).

8.2 Les instruments collecteurs de lumière

L'œil humain est un fort bon instrument d'optique astronomique. Il assure à la fois la fonction de collecteur de lumière (la pupille), de doseur de lumière (l'iris), d'imageur à focale variable (le cristallin) et de capteur à sensibilité variable (la rétine). L'œil normal peut voir (un opticien dira "accommoder") de $25\,cm$ environ (*punctum proximum*) jusqu'à l'infini (*punctum remotum*). Il est capable de fonctionner sur une très large gamme d'intensités lumineuses (de la pénombre crépusculaire à la pleine lumière du jour). Il est capable de percevoir les détails jusqu'à environ $1'$ d'arc (une pièce de 10 centimes d'euro à 50 mètres environ).

Pendant plus de six millénaires (jusqu'en 1609), il fut les seul instrument d'optique utilisé par les astronomes. Bien que d'une étonnante efficacité, notre œil présente quelques limitations :

- Il ne peut percevoir les lumières trop faibles.
- Il ne peut percevoir de détails trop fins.
- Il n'est sensible qu'à la lumière visible, c'est-à-dire entre $0.4\,\mu m$ et $0.8\,\mu m$.
- Il ne sait pas séparer les couleurs assez finement
- Il n'est pas photométrique (on ne peut pas s'en servir pour faire des mesures précises d'intensité lumineuse).
- Il ne permet pas de faire des temps de pose
- Il ne perçoit pas les phénomènes trop rapides

C'est pour reculer ces limites que l'on a inventé les instruments d'optique astronomique.

Pour s'affranchir de la limitation de l'œil humain vers les faibles luminosités, due à la petitesse de la pupille (au maximum $7\,mm$), il convient de collecter la lumière du ciel par une ouverture nettement plus grande, et de concentrer cette lumière par une pièce

optique *ad hoc* pour la faire pénétrer la pupille de l'œil. Le collecteur agit ainsi comme un "entonnoir à lumière". La pièce optique en question (lentille, miroir) porte ne nom d'objectif (puisque dirigée vers l'objet à étudier). L'objectif formera donc en un lieu appelé plan focal ou foyer une image intensifiée de la zone du ciel visée. Il suffira ensuite de placer dans ce plan la surface sensible d'un capteur (pellicule ou plaque photographique, matrice CCD, tube video...) que l'on choisira doté de la meilleur finesse possible pour permettre la perception du maximum de détails. Pour utiliser l'œil humain comme récepteur, il suffit d'intercaler entre le plan focal et l'œil un oculaire, (puisque dirigé vers l'œil). Cet oculaire qui n'est en fait qu'une loupe perfectionnée destinée à scruter l'image du ciel intensifiée qui se forme dans ledit plan focal.
ATTENTION ! : **A cause précisément de son pouvoir intensifiant, l'utilisation d'un tel instrument d'optique sur une source aussi lumineuse que le Soleil, peut conduire, en l'absence de précautions adéquates, à la destruction instantanée et définitive du capteur. Si le capteur est un œil humain, de graves lésions rétiniennes irréversibles (dégénérescence maculaire) surviennent à coup sûr, avec la cécité partielle ou totale comme issue quasi-certaine. IL EST DONC IMPÉRATIF DE NE JAMAIS REGARDER LE SOLEIL, NI DIRECTEMENT, NI ENCORE MOINS AU TRAVERS D'UN INSTRUMENT D'OPTIQUE MÊME DE TAILLE ET DE PUISSANCE MODESTE.**

On décrit ci-après les principaux types d'instruments astronomiques collecteurs de lumière. Leur schémas de principe sont regroupé sur la figure 8.2.

8.2.1 La lunette de Galilée

Le contexte historique entourant l'invention de la lunette astronomique n'est pas totalement élucidé dans tous les détails. Il semblerait cependant que l'on puisse faire remonter son invention à la seconde partie du XVIeme siècle, par un verrier italien : Giambattista Della Porta. L'objet serait resté plusieurs décennies sous le couvert du secret militaire, vu son importance stratégique évidente. Suite à une divulgation, le principe de cet instrument serait parvenu à la connaissance Galilée qui en aurait construit un exemplaire et l'aurait pointé vers le ciel pour la première fois la nuit de Noël 1609. La moisson de résultats décisifs ne se fit pas attendre.

La lunette dite "de Galilée" (bien qu'inventée par une autre personne) était constituée par une lentille convergente sertie à l'extrémité d'un tube de cuir. A l'autre extrémité, une lentille *divergente* était positionnée à une distance de l'objectif suffisante pour donner une image nette, grossie et non retournée (voir Figure 8.2). L'objectif (la lentille convergente) jouait le rôle de concentrateur de lumière. Le principe est simple : en effet, tout le monde a fait l'expérience de faire brûler un morceau de papier en utilisant une loupe et la lumière solaire. La lumière, en aval de la loupe forme un cône dont la pointe dessine une image petite mais intense du Soleil, suffisamment intense pour enflammer un combustible. C'est la formation de ce cône de lumière par une lentille convergente qui produit l'effet d'entonnoir à lumière. L'oculaire (la lentille divergente) permettait seulement de grossir cette image focale intensifiée et de la rejeter à l'infini pour que l'œil de l'utilisateur puisse l'observer sans fatigue.

Signalons que les lunettes astronomiques modernes ne fonctionnent *pas* sur ce principe, même si on les appelle parfois à tort des "lunettes de Galilée". Ceux sont en fait des "lunettes de Kepler", dont la combinaison optique, quelque peu différente est décrite en section suivante.

8.2.2 La lunette de Kepler

La lunette dite "de Kepler" est une variante améliorée de la lunette de Galilée, qui ne diffère de cette dernière que par son oculaire. Au lieu d'être une lentille divergente placée *en amont* du foyer de l'objectif, l'oculaire est une lentille divergente (une petite loupe de courte distance focale) située *en aval* du foyer (voir Figure 8.2). Le plan focal est de ce fait accessible, ce qui permet d'y placer des repères gradués destinés aux mesures de distances angulaires. Outre cette possibilité de faire de la mesure de distance apparentes, cette combinaison optique s'est avérée être de meilleur qualité optique. Un seul inconvénient qui n'en est pas réellement un : les images sont inversées, ce qui n'est pas vraiment gênant en astronomie. C'est selon cette combinaison que sont construites les lunettes astronomiques modernes.

Le grossissement angulaire d'un tel instrument est extrêmement facile à calculer : Si l'on note F et f les distances focales[3] respectives de l'objectif et de l'oculaire, le grossissement angulaire vaut :

$$\gamma = -\frac{F}{f}.$$

Remarquons le signe "$-$" rappelant le fait que les images sont inversées. Ainsi une lunette dont l'objectif ferait $1\,m$ de distance focale, munie d'un oculaire de $1\,cm$ de distance focale grossirait 100 fois. Sur la plupart des lunette astronomiques, l'oculaire est une pièce interchangeable, pour permettre de choisir le grossissement le mieux adapté. Comme la distance focale d'un oculaire descend rarement en dessous de $6\,mm$, le grossissement *maximal* d'une lunette astronomique est directement proportionnel à sa longueur (focale).

La luminosité d'une lunette (c'est-à-dire son aptitude à former dans son plan focal une image plus ou moins lumineuse d'un même objet) est directement proportionnelle à son rapport d'ouverture, à savoir le rapport de son diamètre par la distance focale de son objectif :

$$A = \frac{D}{F}.$$

En réalité, l'objectif n'est pas une simple lentille, c'est plutôt la juxtaposition de deux lentilles taillées dans des verres différents, pour que les défauts chromatiques[4] de l'une compensent ceux de l'autre.

L'oculaire aussi n'est pas en général une simple lentille. C'est souvent un sous-ensemble complexe, jouant le même rôle qu'une lentille simple, mais constitué en fait de deux à six lentilles assemblées.

8.2.3 Le télescope de Newton

Le succès remporté par l'utilisation astronomique de la lunette de Galilée a motivé les efforts en vue d'en améliorer la qualité. Notamment en matière de "rendu des couleurs". C'est sans doute pour cela que le savant anglais Isaac Newton eut l'idée de réaliser l'effet d'entonnoir à lumière non plus en faisant passer la lumière au travers du verre d'une lentille, mais en la faisant se réfléchir sur la surface d'un miroir creux de profil parabolique. La lumière ainsi concentrée par réflexion doit être interceptée par un petit miroir secondaire

3. La distance focale d'une lentille est la longueur du cône de lumière qu'elle forme lorsqu'elle est éclairée par une source lumineuse à l'infini (par exemple le Soleil).

4. Les défauts ou "aberrations" chromatiques sont de légères différences dans le traitement des différentes couleurs, dues au fait que les verres ne réagissent jamais parfaitement identiquement aux différentes couleurs.

incliné à 45° qui la renverra vers un oculaire situé sur le côté du tube (voir Figure 8.2). Isaac Newton construisit lui-même son prototype de télescope, avec l'aide d'un voisin forgeron pour la construction d'un astucieux support orientable. En guise de miroir. il utilisa une pièce de bronze dûment taillée et polie. Il présenta ce prototype devant l'Académie Royale de Londres en 1671.

Les règles de calcul du grossissement et du rapport d'ouverture sont identiques au cas de la lunette astronomique.

Signalons qu'en Français, on appelle "lunettes astronomiques" tous les collecteurs de lumière ayant une lentille pour objectif, et "télescopes" ceux dont l'objectif est un miroir. En Anglais par contre, les deux types d'instruments portent respectivement les noms de *refractive telescope* et *reflective telescope* pour signifier que dans le premier cas, la lumière est réfractée dans une lentille, alors que dans le second, elle est réfléchie par un miroir.

8.2.4 Le télescope de Cassegrain

Le télescope de Cassegrain se différencie de celui de Newton par le fait que le miroir secondaire, celui qui intercepte le faisceau concentré, ne renvoie pas la lumière sur le côté du tube, mais vers l'arrière, au travers d'un trou percé dans le miroir primaire (voir Figure 8.2). De plus, le miroir secondaire n'est plus plat mais convexe, ce qui permet d'avoir une forte valeur de la distance focale du couple (primaire-secondaire) avec une longueur de tube modeste et donc un encombrement réduit.

Il existe d'autres variantes du télescope de Cassegrain, basées sur des choix optiques légèrement différents (télescopes de Schmidt, de Ritchey-Chrétien, de Maksutov,...). Leur étude dépasserait de loin le cadre de ce cours.

8.2.5 Comparatif

La plupart des instruments modernes d'astronomie professionnelle sont des télescopes et non des lunettes. Cela ne doit pas conduire à conclure que les lunettes existantes sont obsolètes et inutiles. Certains types de travaux sont encore menés préférentiellement sur des lunettes. En effet, ces dernières conservent deux gros avantages :

- Absence du miroir secondaire qui bouche une partie de l'ouverture (obstruction centrale).
- Stabilité et précision du grossissement, ce qui permet des mesures précises d'écarts angulaires.

Les avantages des télescopes sont bien sûr nombreux :

- Possibilité d'atteindre des diamètres bien supérieurs : $8.2\,m$ de diamètre pour les quatre télescopes du "VLT" implantés au Cerro Paranal (Chili), contre $1.02\,m$ pour la grande lunette de l'Observatoire de Yearkes (USA).
- Compacité (le repliement du faisceau par le miroir secondaire autorise des tubes plus courts).
- Absence d'aberrations chromatiques, car la lumière ne traverse pas de verre.
- Utilisation possible un infrarouge (dans les fenêtres de transparence de l'atmosphère), toujours car la lumière ne traverse pas de verre.

La course aux grands diamètres s'arrête aux alentours de $1\,m$ pour les lunettes. En effet, une lentille trop grande donc trop lourde pourrait fléchir voire casser sous son propre poids, vu qu'on doit la maintenir par ses bords uniquement, pour laisser la lumière passer. En revanche, un miroir qui n'est pas traversé par la lumière peut être maintenu mécaniquement

en de multiples points de sa face arrière, ce qui autorise des diamètres bien supérieurs sans problèmes de rupture.

8.3 Les instruments d'analyse de la lumière

Si l'on se contente de mettre directement un récepteur au foyer d'un instrument collecteur de lumière, on n'a accès qu'à deux types d'informations sur la lumière reçue : son intensité et sa direction d'arrivée. De ces données, l'on ne peut tirer que des information sur la position des astres (astrométrie) et sur leur luminosité apparente (photométrie). Si l'on souhaite passer de l'astronomie (la connaissance de la position et des mouvements des astres) à l'astrophysique (la connaissance de la constitution physique des astres), il faut être capable d'extraire de la lumière des informations plus riches que sa direction d'arrivée et son intensité. Cette opération de dissection fine de la lumière est une des avancées de l'astronomie de la seconde moitié du XIXeme siècle et du début du XXeme.

Cette dissection de la lumière, c'est-à-dire le tri de des composantes selon divers critères (polarisation, longueur d'onde) se fait au moyens d'instruments de physique intercalés entre le collecteur de lumière (lunette ou télescope) et le récepteur. On en décrira trois exemples pour ne pas surcharger cet exposé.

8.3.1 Les spectrographes

La lumière blanche naturelle (celle du Soleil) est en fait la superposition d'une infinité de nuances de couleurs différentes allant du rouge au violet. Un appareil qui permet de séparer les différentes composantes chromatiques d'une lumière, porte le nom de "spectroscope" ou de "spectrographe" (selon le récepteur utilisé). L'arc-en-ciel est un spectrographe naturel (fort peu précis cependant).

Le principe de base des spectroscopes repose sur le pouvoir dispersant des prismes ou des réseaux de diffraction [5].

L'analyse spectrale de la lumière d'un corps céleste fournit des renseignements inestimables sur la physique de l'objet en question. Cela donne accès notamment à sa composition chimique, à sa température, sa vitesse de rotation, sa vitesse radiale [6], ainsi qu'à l'intensité du champ magnétique qui règne sur l'objet.

8.3.2 Les polarimètres

Les champs électrique et magnétique sont des vecteurs, non des scalaires. Deux ondes lumineuses de même fréquence, de même intensité et se propageant dans la même direction peuvent différer par l'orientation de leur champ électrique. Une lumière naturelle est un mélange de toutes les orientations possibles. Un polarimètre est l'instrument qui permet de séparer les différentes composantes de polarisation d'une lumière.

Cette séparation des polarisations donne accès au champ magnétique qui règne sur le corps émetteur. Elle fournit également des informations sur la manière précise dont la lumière est renvoyée par une planète ou un astéroïde.

5. Un réseau de diffraction est un support de verre sur lequel sur sont gravés un très grand nombre de sillons parallèles. Ces sillons séparent les couleurs de la lumière, comme le fait la face brillante d'un "compact disc", qui s'irise de couleurs dès qu'on l'éclaire.

6. La vitesse radiale d'un objet est la vitesse avec laquelle il avance ou recule par rapport à l'observateur.

8.4 Les récepteurs

La lumière ainsi collectée puis éventuellement analysée doit enfin être perçue puis stockée. C'est le rôle des récepteurs encore appelés "capteurs photosensibles", ou simplement "capteurs" par abus de langage.

En dehors de l'œil humain, il existe une immense variété de capteurs qui diffèrent par leur technologie, leur sensibilité (la plus petite intensité perceptible), leur finesse de grain ou de discrétisation (la taille du plus petit élément du capteur : grain d'une plaque photo, cellule de la rétine ou pixel d'une caméra) et par leur bande spectrale (la gamme de longueur d'onde qu'ils perçoivent. On ne mentionnera que les plus couramment utilisés en astronomie.

Les pellicules et plaques [7] photographiques sont les plus anciens détecteurs non naturels utilisés par les astronomes. Leur sensibilité, leur stabilité et leur finesse de grain a été en constante amélioration jusqu'à leur remplacement quasi-total, dans les années 80', par des récepteurs électroniques : les matrices CCD encore appelées caméras CCD.

Une matrice CCD (pour *Charge Coupled Device*) est une grille de plusieurs millions de condensateurs microscopiques, gravés sur un substrat de silicium, qui se remplissent d'électricité lorsqu'ils reçoivent de la lumière. La lecture de la charge accumulée par chacun de ces condensateurs durant le temps de pose fournit un signal électrique, qui, dûment amplifié et mis en forme, peut être affiché sur un écran cathodique ou stocké sous forme numérique dans un ordinateur.

Le même genre de dispositif, construit sur des substrats autres que le Silicium, permet de percevoir l'infrarouge moyen, à condition de refroidir très énergiquement le capteur par divers procédés (circulation d'azote liquide, effet Pelletier,...).

7. Pour augmenter la stabilité et la durabilité mécanique des supports photographiques, les émulsions photosensibles à usage astronomique ont très vite été déposées non plus sur des supports souples (film) mais sur des plaques de verre.

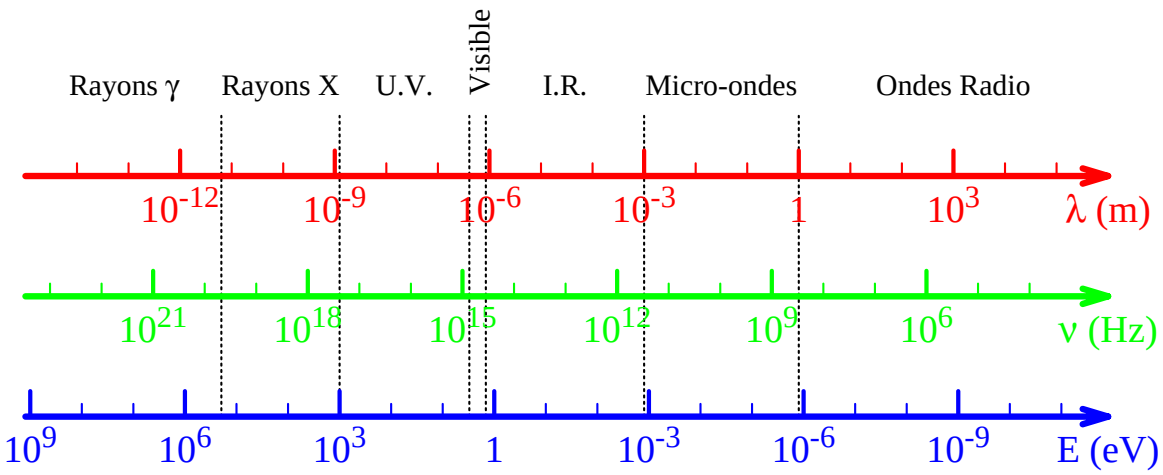


FIGURE 8.1 – *Le spectre des ondes électromagnétiques classées en fonction de leur longueur d'onde (échelle du haut), de leur fréquence (échelle du milieu) et de l'énergie du photon associé (échelle du bas). Les trois échelles sont logarithmiques.*

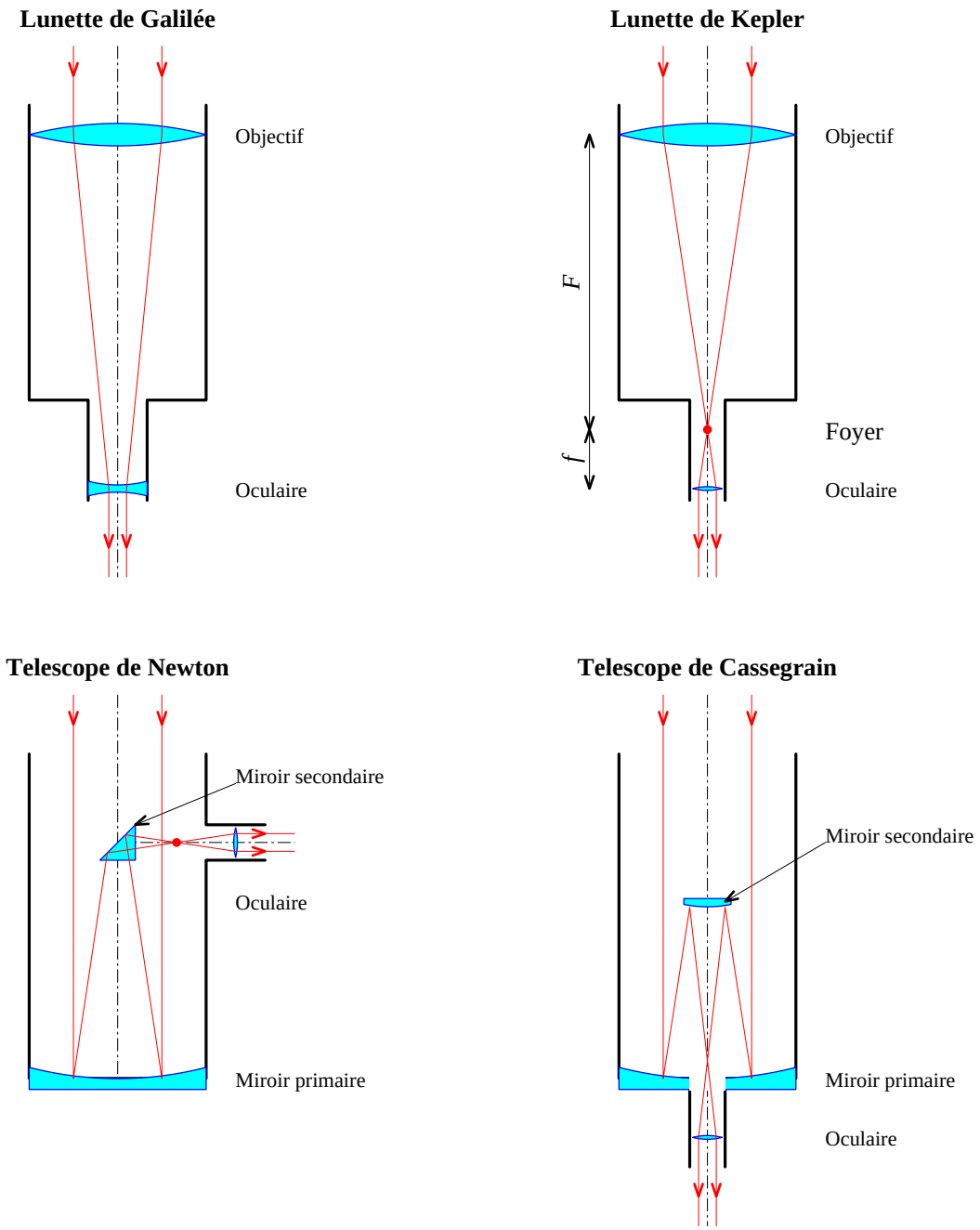


FIGURE 8.2 – *Schéma simplifié des principaux types d'instruments optiques utilisés en astronomie pour collecter la lumière.*

8.5 Synthèse

- Les ondes électromagnétiques constituent la principale source d'information de l'astronome. On les nomme, par ordre croissant de fréquence : ondes radio, micro-ondes, infrarouges, lumière visible ($0.4 - 0.8\,\mu m$), ultraviolet, rayons X, rayons γ, rayons cosmiques.
- L'extraction d'information astronomiques à partir de la lumière des astres nécessite une chaîne optique comprenant un collecteur de lumière (lunette, télescope), éventuellement un dispositif analyseur (spectrographe, polarimètre), et un détecteur (œil, plaque photographique, caméra CCD).
- Les collecteurs de lumière jouent le rôle d'entonnoirs à lumière. Ils concentrent la lumière collectée au travers d'une grande ouverture en lui donnant une forme conique convergente dont la pointe (le foyer) doit se trouver sur le détecteur (œil + oculaire, plaque photo, CCD). La convergence de la lumière peut s'obtenir soit par une lentille (c'est les cas des lunettes) soit par un miroir concave (c'est le cas des télescopes).
- On peut intercaler entre le collecteur de lumière et le récepteur des appareils de physique pour "disséquer" finement la lumière. Cet appareil peut être entre autre un spectrographe (il sépare les différentes composantes de couleur de la lumière) ou un polarimètre (il sépare les différentes composantes de polarisation).
- La décomposition d'une lumière selon ses composantes de couleur (le spectre) donne accès à de nombreuses informations physiques sur l'objet émetteur (composition chimique, température, vitesse de rotation, vitesse radiale, module du champ magnétique...).
- La décomposition d'une lumière selon sa polarisation donne accès aux composantes du champ magnétique, et aux mécanismes de renvoi de la lumière par une planète ou un astéroïdes.
- Les récepteurs diffèrent par leur sensibilité (luminosité minimale perceptible), leur finesse de grain (la taille du plus petit récepteur élémentaire) et leur bande spectrale (plage de longueurs d'ondes perceptibles). Les principaux récepteurs utilisés en astronomie sont l'œil humain, les plaques photographiques et les caméras CCD.

Chapitre 9

Pour en savoir plus...

9.1 Sites Internet

La liste qui suit est fort loin d'être exhaustive, bien entendu. De plus, les sites WEB étant des choses mouvantes, la validité des informations ci-dessous n'est pas garantie sur le long terme.

La plupart de ces sites proposent des liens vers d'autres serveurs traitant de sujets voisins. Une promenade virtuelle au travers de cette arborescence de sites qui s'enchaînent peut être longue mais enrichissante.

- **http ://www.oca.eu** : Serveur WEB de l'Observatoire de la Côte d'Azur.
- **http ://simbad.u-strasbg.fr/simbad/** : Portail WEB de la base de données stellaire du CDS (Centre de Données Stellaires) de l'Observatoire de Strasbourg. On y trouve l'ensemble des connaissances de base sur les étoiles (positions, mouvement propre, parallaxe, magnitudes, etc.).
- **https ://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi** : Portail WEB de la base de données du JPL (Jet Propulsion Laboratory) concernant les petits corps du système solaire (astéroïdes, comètes, etc...).
- **http ://heavens-above.com** : Serveur WEB astronomique offrant entre autre de nombreuses possibilités de calcul des survols d'un lieu donné par les satellites artificiels visibles à l'œil nu (Station Spatiale Internationale ISS, flash des satellites Iridium, etc).
- **http ://www.obsat.com** : Serveur WEB astronomique canadien pour l'aide à l'observation visuelle des satellites artificiels.
- **http ://sohowww.estec.esa.nl** : Serveur WEB consacré à la sonde spatiale SoHO destiné à l'observation du Soleil. On y trouve des images du Soleil transmises par la sonde SoHO au jour le jour (**/data/latestimages.html**).
- **http ://bass2000.obspm.fr/home.php** : Portail WEB de la base de données solaires BASS2000. Très complet.
- **http ://near.jhuapl.edu** : Serveur du "Applied Physics Laboratory" de l'Université John Hopkins (Baltimore, USA), dont une partie est consacrée aux images quotidiennes de l'astéroïde Eros, prises par la sonde NEAR.
- **http ://www.imcce.fr** : Serveur WEB de l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides), anciennement "Bureau des Longitudes" (Paris). On y trouve des données très complètes dans les domaines de la mécanique céleste et le metrologie du temps et de l'espace.
- **http ://hpiers.obspm.fr** : Serveur WEB de l'IERS (International Earth Rotation

Service), qui surveille la rotation terrestre et décide, à l'échelle mondiale, de l'adjonction de secondes intercalaires entre le Temps Atomique International (TAI) et le Temps Universel Coordonné (UTC) pour que ce dernier ne s'écarte jamais de plus d'une seconde du Temps Universel (UT1).

- **http ://www.iap.fr** : Serveur WEB de l'Institut d'Astrophysique de Paris. On y trouve des images et des logiciels astronomiques, ainsi que des actualités comme l'éclipse solaire du 11 août 1999.
- **http ://darc.obspm.fr** : Serveur WEB du Département d'Astrophysique Relativiste et de Cosmologie de l'Observatoire de Meudon. On y trouve des informations sur les trous noirs et autres objets cosmologiques liés à la Relativité d'Einstein.
- **http ://encke.jpl.nasa.gov** : Serveur WEB de la NASA consacré aux observations de comètes.
- **http ://www.esa.int** : Serveur WEB général de l'ESA (European Space Agency).
- **http ://www.nasa.gov** : Serveur WEB général de la NASA (National Aeronautics and Spatial Administration).
- **http ://heasarc.gsfc.nasa.gov** : Serveur WEB du High Energy Astrophysics Science Archive Research Center de la NASA. On y trouve de nombreux documents et images concernant certaines missions spatiales (*http ://heasarc.gsfc.nasa.gov/Images/*).
- **http ://www.stsci.edu** : Serveur WEB du Space Telescope Science Institute. On y trouve des renseignements concernant le télescope spatial Hubble.
- **http ://www.meteo.fr** : Serveur WEB de Meteo France. Bien utile pour préparer une observation astronomique ! !
- **http ://www.ign.fr** : Serveur WEB de l'Institut Géographique National. On y trouve de nombreux renseignements de cartographie, géodésie et nivellement, ainsi qu'une base de données sur les coordonnées des communes de France.
- **http ://www.virgo.infn.it/** : Un des serveurs WEB consacrés au détecteur d'ondes gravitationnelles VIRGO.

9.2 Bibliographie

[1] *Annuaire du Bureau des Longitudes ; Ephémérides Astronomiques*, par le Bureau des Longitudes, chez Masson (Paris, publication annuelle).

[2] *Astronomie Générale*, par A. Danjon, chez Sennac (Paris, 1959).

[3] *Lunettes et télescopes*, par A. Danjon, chez Blanchard (Paris, 1979).

[4] *Encyclopédie Scientifique de l'Univers*, éditée par le Bureau des Longitudes, chez Gauthier-Villars (Paris 1980).

[5] *Aujourd'hui l'Univers*, par J. Audouze, chez Belfond (Paris, 1981).

[6] *Clefs pour l'Astronomie*, par J.C. Pecker, chez Seghers (Paris, 1981).

[7] *Le Grand Atlas de l'Astronomie de l'Encyclopædia Universalis*, sous la direction de J. Audouze et G. Israël, chez Encyclopædia Universalis, (Paris 1983).

[8] *Calculs Astronomiques à l'Usage des Amateurs*, par J. Meeus, édité par la Société Astronomique de France, (Paris, 1986).

[9] *The Sky : a User's Guide*, par D.H. Levy, chez Cambridge University Press (Cambridge, 1991).

[10] *Astronomie : Introduction*, par A. Acker, chez Masson, (Paris, 1992).

[11] *Atlas de la Lune*, par A. Rükl, chez Gründ, (Paris, 1993).

[12] *Le Livre du Ciel : L'Homme et les Etoiles*, par J.L. Heudier, chez Z'Editions, (Nice, 1995).

[13] *Les Planètes*, par D. Benest, aux Editions du Seuil, (Paris, 1996).

[14] *Le Livre de la Lune*, par J.L. Heudier, chez Z'Editions, (Nice, 1996).

[15] *Les Météorites*, dans les *"Carnets d'histoire naturelle"*, chez Bordas, (Paris 1996).

[16] *Invitation aux planètes*, édité par D. Benest et Cl. Froeschlé, chez ESKA, (Paris 1999).

[17] *Astéroïdes, météorites et poussières interplanétaires*, édité par D. Benest et Cl. Froeschlé, chez ESKA, (Paris 1999).

[18] *Dictionnaire de l'Astronomie*, (Encyclopædia Universalis), chez Albin Michel, (Paris, 1999).

[19] *Le calendrier Hébraïque*, par R. Stioui, aux éditions Colbo, (Paris, 1988).

Chapitre 10

Personnages célèbres

- **Adams (John Cough)** : Astronome anglais (1819-1892) qui découvrit par le calcul la planète Neptune en 1843, sans toutefois réussir à la faire observer. Voir la section 3.5.
- **Anaxagore** : Mathématicien grec (-499 à -428) qui comprit que les planètes étaient des solides opaques susceptibles de se faire de l'ombre.
- **Anaximandre** : Mathématicien grec (-611 à -545), disciple de Thalès de Milet. Il modifie la vision du monde de Thalès en plaçant la Terre seule au centre de l'Univers, flottant dans l'espace. Il plaçait les différentes planètes sur des roues de différents diamètres, tournant autour de la Terre.
- **Apollonius de Perge** : Mathématicien grec ($\simeq$-260 à -170) qui fut un des précurseurs des modèles à épicycles et déférents pour la description des mouvements planétaires. Ce type de description allait connaître le sommet de sa perfection grâce à C. Ptolémée environ 150 ans après J.C.
- **Aristarque de Samos** : Astronome grec (-310 à -230) qui fut un précurseur de l'héliocentrisme. Voir la section 3.2. Il tenta la première mesure de la distance Terre-Soleil.
- **Aristote** : Philosophe grec (-384 à -322). Voir la section 3.2.
- **Auzout (Adrien)** : Astronome français (1622-1691) qui inventa en 1667 avec J. Picard le micromètre à fils mobiles.
- **Bessel (Friedrich)** : Astronome et mathématicien allemand (1784-1846) qui effectua, en 1838, la première mesure de la distance d'une étoile en utilisant sa parallaxe. Il s'agissait de l'étoile *61-Cygni* dont il annonça la parallaxe à 0.31" (la valeur actuellement reconnue est de 0.294"). Voir la section 4.2.1. F. Bessel est aussi connu pour avoir déterminé la trajectoire de la comète de Halley, ainsi que pour ses travaux sur les mouvements des planètes. Ces travaux le conduisirent à introduire une nouvelle famille de fonctions mathématiques transcendantes qui portent son nom.
- **Bethe (Hans Albrecht)** : Physicien américain d'origine allemande (1906- ?) qui contribua à proposer l'explication nucléaire moderne pour l'origine de l'énergie solaire. Voir la section 3.6.
- **Boltzmann (Ludwig)** : Physicien allemand (1844-1906) qui a jeté les bases de la physique statistique. Voir la section 3.6.
- **Bradley (James)** : Astronome anglais (1693-1762) qui découvrit l'aberration des étoiles. Voir la section 3.5.
- **Brahé (Tycho)** : Astronome danois (1546-1601) qui observa avec précision les mouvements des planètes. Voir la section 3.4.

- **Bruno (Giordano)** : Philosophe italien (1548-1600) qui fut brûlé vif à Rome pour avoir proclamé la pluralité des mondes. Voir la section 3.4.
- **Bunsen (Robert)** : Physicien allemand (1811-1899) qui contribua aux fondations de la méthode d'analyse chimique à distance par spectroscopie. Voir la section 3.6.
- **Copernic (Nicolas)** : Astronome polonais (1473-1543) auteur de la première théorie cosmologique héliocentrique. Voir la section 3.4.
- **Della Porta (Giambattista)** : Savant italien (1535-1615) auquel on attribue l'invention de la lunette dite "lunette de Galilée" (Galilée fut le premier à l'utiliser à des fins astronomiques).
- **Descartes (René)** : Philosophe, mathématicien et physicien français (1596-1650) qui introduisit le principe d'inertie, la géométrie analytique et l'optique géométrique.
- **Eddington (sir Arthur Stanley)** : Astronome et physicien anglais (1882-1944) qui proposa la première explication réaliste pour l'origine de l'énergie solaire et stellaire.
- **Einstein (Albert)** : Physicien allemand (1879-1955) qui introduisit la Théorie de la Relativité en 1905 et 1916. Voir la section 3.6.
- **Erathostène de Cyrène** : Mathématicien grec (-273 à -192) qui effectua la première mesure du rayon de la Terre. Voir la Section 3.2.
- **Eudoxe de Cnide** : Mathématicien grec (-408 à -355) qui proposa un modèle pour les mouvements des planètes basé sur des sphères concentriques liées les unes aux autres par des axes de rotation inclinés, autour desquels elles tournaient à vitesse uniforme. Chaque planète était liée à un point de l'équateur d'une des sphère.
- **Foucault (Léon)** : Physycien français (1819-1868) qui inventa le gyroscope pour mettre en évidence la rotation de la Terre, et qui mesura en 1850 la vitesse de la lumière par la méthode du miroir tournant. Il est aussi connu pour son pendule pesant installé sous le dome du Panthéon, à Paris, pour montrer la rotation de la Terre, ainsi que pour des travaux sur les courants induits.
- **Fraunhoffer (Joseph von)** : Physicien allemand (1787-1826) qui étudia le premier le spectre de la lumière solaire en 1824. Voir la section 3.6.

  Galilée (Galileo Galilei, dit) : Physicien et astronome italien (1564-1642) partisan des thèse héliocentristes de Copernic, et auteur de la première observation astronomique avec une lunette optique (1609). Voir la section 3.4.
- **Galle (Johann Gottfried)** : Astronome allemand (1812-1910) qui observa la planète Neptune le 23 septembre 1846, sur les indications de Le Verrier. Voir la section 3.5.
- **Halley (Edmund)** : Astronome anglais (1656–1742) qui, lors de son passage de 1682, identifie la comète périodique qui portera son nom (P/Halley). Il est aussi l'auteur des premières cartes du ciel.
- **Helmholtz (Hermann von)** : Physicien allemand (1821-1894) qui proposa une explication (réfuté depuis) pour l'origine de l'énergie solaire. Il est également connu pour avoir mis en lumière le rôle des harmoniques dans le timbre des voix.
- **Herschel (William)** : Astronome anglais d'origine allemande (1738-1822) qui découvrit la planète Uranus en 1781. Voir la section 3.5.
- **Hertzsprung (Einar)** : Astronome danois (1873-1967) qui contribua à créer une classification systématique des étoiles (diagramme d'Hertzsprung-Russel). Voir la section 3.6.

  Hevelius (Johann) : Astronome allemand (1611-1687) qui publia le premier atlas lunaire.

Hipparque : Astronome et mathématicien grec de l'école d'Alexandrie (-190 à -120 av. J.C.) qui fonda la trigonométrie, qui établit le premier catalogue d'étoiles, qui mesura la durée de l'année tropique à mieux que 7 minutes près et qui découvrit la précession des équinoxes. Voir la section 3.2.

- **Hooke (Robert)** : Mathématicien et astronome anglais (1635-1703) qui participa avec Newton à l'élaboration de la théorie du mouvement des planètes, et qui découvrit les lois de l'élasticité.
- **Hubble (Edwin)** : Astrophysicien américain (1889-1953) qui découvrit l'expansion de l'Univers. Voir la section 3.6.
- **Huygens (Christiaan)** : Physicien et astronome néerlandais (1629-1695), qui fut à l'origine de nombreuses découvertes en matière d'horlogerie de précision. Il s'illustre aussi par son hypothèse ondulatoire de la lumière (principe de Huygens-Fresnel). On lui attribue la découverte des anneaux de Saturne.
- **Jansky (Karl)** : Astronome américain (1905-1950) qui fonda la radio-astronomie. Voir la section 3.6.
- **Kant (Emmanuel)** : Philosophe allemand (1724-1804) qui proposa en 1755 une théorie pour l'origine du système solaire.
- **Kepler (Johannes)** : Astronome allemand (1571-1630) qui découvrit les lois régissant les mouvements orbitaux des planètes. Voir la section 3.4. Il publia "*Mysterium Cosmographicum*" en 1596, ouvrage dans lequel il tente de rendre compte des positions des orbites des planètes connues à l'époque, en les plaçant sur des sphères inscrites et conscrites dans et autour des cinq solides de Platon (les cinq polytopes convexes réguliers : le tétraèdre, l'hexaèdre ou cube, l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre). Il publia "*Astronomia Nova*" en 1609, ouvrage dans lequel il fait la synthèse des observations de Tycho Brahé sur le mouvement de la planète Mars. Il y énonce les deux lois régissant des mouvements de Mars qui portent depuis les noms de *première et deuxième lois de Kepler*. Ça n'est qu'en 1618 qu'il publie "*Harmonice Mundi*", ouvrage dans lequel il énonce la fameuse *troisième loi de Kepler* pour les mouvements planétaires.
- **Kirchoff (Gustav)** : Physicien allemand (1824-1887) qui contribua à la fondation de la méthode d'analyse chimique à distance par spectroscopie. Voir la section 3.6.
- **Lagrange (Comte Louis de)** : Astronome et mathématicien français (1736-1813) qui inventa le calcul variationnel et l'appliqua à la mécanique céleste. Voir la section 3.5.
- **Laplace (Pierre-Simon, marquis de)** : Astronome, mathématicien et physicien français (1749-1827) qui proposa la première théorie de la formation du système solaire et étudia en détail les mouvements des planètes. C'est lui qui introduisit le terme de "mécanique céleste". Voir la section 3.5.
- **Le Verrier (Urbain Jean Joseph)** : Astronome français (1811-1877) qui découvrit la Planète Neptune par le calcul en 1846. Voir la rubrique "Galle (Johann)" et la section 3.5.
- **Lyot (Bernard)** : Astronome et opticien français (1897-1952) qui inventa le coronographe solaire.
- **Mayer (Robert von)** : Physicien et médecin allemand (1814-1878) qui proposa en 1845 le principe d'équivalence de l'énergie mécanique et de la chaleur. Il proposa aussi une hypothèse (réfutée depuis) sur l'origine de l'énergie solaire.
- **Messier (Charles)** : Astronome français (1730-1817) qui établit le premier catalogue d'objets célestes diffus (nébuleuses, galaxies, ...). Voir la section 3.5.

- **Newton (Isaac)** : Physicien anglais (1643-1727) qui découvrit les principes de la mécanique classique et les lois de l'attraction universelle. Voir la section 3.4.
- **Oort (Jan Hendrik)** : Astronome néerlandais (1900-1992) qui fut un des pères fondateurs de la radio-astronomie. On lui doit aussi une des premières descriptions exactes de notre galaxie. Il découvrit en 1950 un vaste réservoir de comètes à peu près sphérique d'environ 50 00 ua de rayon, qui porte son nom : le "nuage de Oort".
- **Paraménide** : Philosophe grec (-540 à -450 environ) qui introduisit l'idée d'une Terre sphérique.
- **Penzias (Arno)** : Radio-astronome américain d'origine allemande (1933- ?) qui découvrit avec R. Wilson le rayonnement radio fossile "à 2.7 K", d'origine cosmique, qui constitue une des données de base de la cosmologie.
- **Piazzi (Giuseppe)** : Astronome italien (1746-1826) qui découvrit le premier astéroïde (Cérès) dans la nuit du 31 décembre 1800, à Palerme en Sicile.
- **Picard (Abbé Jean)** : Astronome Français (1620-1682) qui réalisa une des premières mesures exactes du rayon terrestre, et qui inventa en 1667 avec A. Auzout le micromètre à fils mobiles.
- **Planck (Max)** : Physicien allemand (1858-1947) qui initia la théorie des quanta. Voir la section 3.6.
- **Ptolémée (Claude)** : Astronome grec (85 à 168 environ) auteur de l'Almageste, théorie cosmologique géocentrique qui est restée en vigueur jusqu'à la Renaissance. Voir la section 3.2.
- **Rømer (Olaüs)** : Astronome danois (1644-1710) qui effectua la première mesure astronomique de la vitesse de la lumière en observant les retards et avances des occultations des satellites de Jupiter. Voir la section 3.5.
- **Russel (Henry Norris)** : Astronome américain (1877-1957) qui contribua à créer une classification systématique des étoiles (diagramme d'Hertzsprung-Russel). Voir la section 3.6.
- **Thalès de Milet** : Mathématicien grec (-640 à -562) fondateur de l'école ionienne qui comprit que c'est le Soleil qui éclaire la Lune, et qui sut calculer les éclipses de Lune avec une bonne précision. Il voyait la Terre comme un disque flottant sur un océan d'un fluide primordial dont l'évaporation donne l'air.
- **Tombaugh (Clyde)** : Astronome américain (1906-1997) qui découvrit Pluton.
- **Weizsäcker (Carl von)** : Physicien allemand (1912- ?) qui contribua à proposer l'explication nucléaire moderne pour l'origine de l'énergie solaire. Voir la section 3.6.
- **Wien (Wilhelm)** : Physicien allemand (1864-1928) qui découvrit la relation entre la température et la couleur d'un objet. Voir la section 3.6.
- **Wilson (Robert W.)** : Radio-astronome américain (1936- ?) qui découvrit avec A. Penzias le rayonnement radio fossile "à 2.7 K", d'origine cosmique, qui constitue une des données de base de la cosmologie.

Chapitre 11

Glossaire

- **Alidade** : A l'origine, simple bâton destiné à viser les étoiles pour en matérialiser la direction. Par la suite, le mot *alidade* a désigné divers instruments ou parties d'instruments permettant la mesure de hauteurs angulaires.
- **Amas de galaxies** : Regroupement de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de galaxies dans un volume dont les dimensions typiques sont de l'ordre de quelques millions d'années-lumière. Notre galaxie appartient à un tel amas, que l'on nomme "le groupe local".
- **Amas galactique** : Regroupement peu dense de quelques dizaines d'étoiles, souvent relativement jeunes. On trouve de tels amas essentiellement dans le plan moyen de notre galaxie, d'où le nom d'amas "galactique".
- **Amas globulaire** : Regroupement dense de plusieurs centaines de milliers d'étoiles, souvent relativement âgées, dans un volume quasiment sphérique dont le diamètre est de l'ordre de la centaine d'années-lumière. On trouve de tels amas dans tout le halo galactique, zone vaguement sphérique entourant la partie centrale de notre galaxie.
- **Amas ouvert** : Synonyme d'amas galactique (voir la rubrique consacrée à ce terme).
- **Angle horaire (d'un corps céleste)** : Angle entre le plan méridien du lieu terrestre d'observation, et le plan contenant l'axe de la Terre et l'objet céleste en question. Cet angle est souvent exprimé en heures, minutes et secondes sur la base de l'équivalence $24\,h \Leftrightarrow 360^o$. Il est compté positif quand le corps est à l'Ouest du méridien local. L'angle horaire, notée H forme, avec la déclinaison δ les coordonnées horaires du corps céleste.
- **Année anomalistique** : Durée séparant deux passages consécutifs de la Terre à son périhélie. Une année anomalistique vaut $365\,j\ 6\,h\ 13\,m\ 53.\,s$, soit $365.2596\,j$.
- **Année commune** : Année de 12 mois du calendrier hébraïque, par opposition aux années "embolismiques" qui en comportent 13. Il y a 12 années communes et 7 années embolismiques dans le cycle de 19 ans du calendrier luni-solaire hébraïque.
- **Année draconitique** : Durée séparant deux passages consécutifs de la Terre dans la direction du nœud ascendant de l'orbite lunaire (direction Terre-Lune lorsque la Lune traverse, du Sud au Nord, le plan écliptique). Une année draconitique vaut environ $346.6\,j$.
- **Année embolismique** : Année de 13 mois du calendrier hébraïque, par opposition aux années "communes" qui en comportent 12. Il y a 7 années embolismiques et 12 années communes dans le cycle de 19 ans du calendrier luni-solaire hébraïque.
- **Année grégorienne** : Durée moyenne d'une année dans le calendrier grégorien (97

années bissextiles de 366 j pour 303 années normales de 365 j). Cette durée est de 365.2425 j.

- **Année julienne** : Durée moyenne d'une année dans le calendrier julien (une année bissextile de 366 j pour trois années normales de 365 j). Cette durée est de 365.25 j.
- **Année sidérale** : Durée séparant deux instants pour lesquels la direction "Soleil $\rightarrow$ Terre" est la même par rapport aux étoiles fixes. Une année sidérale vaut $365\,j\ 6\,h\ 9\,m\ 9.75\,s$, soit 365.25636 j.
- **Année tropique** : Durée séparant deux équinoxes de printemps consécutifs. Une année tropique vaut $365\,j\ 5\,h\ 48\,m\ 45.97\,s$, soit $365,24219\ j$.
- **Année-lumière** : Unité de mesure de distance en astronomie valant la distance parcourue par la lumière en une année julienne, soit $1\ al = 9.4607304725808\,10^{12}\ km$.
- **Aphélie** : Point de l'orbite d'un corps du système solaire qui se trouve au plus loin du Soleil.
- **Apogée** : Point de l'orbite d'un satellite de la Terre qui se trouve au plus loin de la Terre. Ce terme s'applique à tout satellite, naturel (la Lune) ou artificiel en orbite autour de la Terre.
- **Ascension droite** : Angle entre la direction vernale et la direction d'un corps céleste, projetée dans le plan de l'équateur terrestre. Cet angle est souvent exprimé en heures, minutes et secondes sur la base de l'équivalence $24\,h \Leftrightarrow 360^o$. Il est compté positif quand le corps est à l'Est de la direction vernale. L'ascension droite, notée α, forme avec la déclinaison δ les coordonnées équatoriales du corps céleste.
- **Astéroïde** : Petit corps du système solaire (le plus gros, Cérès, mesure environ $1000\,km$ de diamètre). Les astéroïdes sont regroupés pour la plupart dans la "ceinture principale" (entre les orbites de Mars et Jupiter), et dans la "ceinture de Kuiper", (au delà de l'orbite de Neptune).
- **Azimut** : Angle entre la direction du Sud en un lieu donné, et la direction d'un corps céleste, projetée dans le plan horizontal du lieu. Cet angle est souvent exprimé en degrés, minutes et secondes. Il est compté positif quand le corps céleste est à l'Ouest. L'azimut forme avec la hauteur les coordonnées horizontales ou azimutales du corps céleste.
- **Bande spectrale)** : Ensemble des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre deux limites. On parle par exemple de la bande spectrale de sensibilité d'un détecteur pour signifier l'intervalle des longueurs d'ondes auxquelles il est sensible.
- **Bissextile (année)** : Année de $366\,j$ alternant avec les années communes de $365\,j$ pour donner une valeur moyenne de l'année aussi proche que possible de l'année tropique (intervalle entre deux équinoxes de printemps). Voir la Section 4.1.1.
- **Bonnette** : Partie mécanique située au voisinage du plan focal d'un instrument astronomique, et qui est destinée à la fixation de l'instrumentation (oculaire, caméra, ...).
- **Boson intermédiaire** : Particule responsable d'une interaction fondamentale. Voir la section 5.1.
- **Caméra CCD** : Récepteur lumineux pour l'imagerie, dont la surface sensible est une matrice CCD (voir ce terme).
- **Ceinture de Kuiper** : Zone située au delà de l'orbite de Neptune, peuplée par des astéroïdes et des comètes.
- **Ceinture de van Allen** : Zone où les particules chargées venues du Soleil se retrouvent piégées par le champ magnétique terrestre.

- **Ceinture principale** : Zone vaguement annulaire comprise entre les orbites de Mars et Jupiter, qui est peuplée d'astéroïdes.
- **Comète** : Petit corps du système solaire, formé essentiellement de glace avec des inclusions en matériaux plus réfractaires. Lorsqu'un tel corps passe à proximité du Soleil, la glace se sublime et produit une chevelure parfois spectaculaire même à l'œil nu.
- **Conique plane** : Famille de courbes planes constituée par toutes les intersections possibles d'un cône à base circulaire et d'un plan. Les cercles, les ellipses, les paraboles et le hyperboles sont des coniques planes.
- **Constante de Planck** : Constante universelle de la physique qui permet de relier l'énergie d'un photon (voir ce terme) à la fréquence de l'onde électromagnétique (voir ce terme) associée selon la formule : $Energie = h \times Frequence$. Elle vaut $h = 6.62607\,10^{-34}\ Joule/Hertz$ ou encore $h = 4.13566\,10^{-15}\ eV/Hertz$ pour des énergies exprimées en electron-Volt (voir ce terme).
- **Constante de structure** : Paramètre qui permet de comparer la force relative des quatre interactions fondamentales de l'Univers. Voir la section 5.1.
- **Constellation** : Ensemble d'étoiles qui ne sont pas forcément proches les unes des autres, mais qui semblent, depuis la Terre, former des dessins géométriques. Exemple : la grande Ourse, Orion, Cassiopée, etc.
- **Coordonnées écliptiques (d'un corps céleste)** : Coordonnées sphériques (distance, longitude écliptique, latitude écliptique) d'un corps céleste dans le repérage écliptique Voir la section 4.2.2 et la rubrique "repérage écliptique".
- **Coordonnées équatoriales (d'un corps céleste)** : Coordonnées sphériques (distance, ascension droite, déclinaison) d'un corps céleste dans le repérage équatorial. Voir la section 4.2.2 et la rubrique "repérage équatorial".
- **Coordonnées horaires (d'un corps céleste)** : Coordonnées sphériques (distance, angle horaire, déclinaison) d'un corps céleste dans le repérage équatorial, avec comme origine le plan méridien du lieu d'observation au lieu du point vernal. Voir la section 4.2.2 et la rubrique "repérage horaire".
- **Coordonnées horizontales (d'un corps céleste)** : Coordonnées sphériques (distance, azimut, hauteur) d'un corps céleste dans le repérage horizontal. Voir la section 4.2.2 et la rubrique "repérage horizontal".
- **Coronographe** : Lunette astronomique équipée d'un dispositif cachant la photosphère pour permettre l'étude de la couronne solaire. Ce dispositif fut inventé et réalisé par B. Lyot en 1931.
- **Déclinaison** : Hauteur angulaire d'un corps céleste par rapport au plan équatorial terrestre. Cet angle est souvent exprimé en degrés, minutes et secondes. Il est compté positif quand le corps céleste est au Nord du plan équatorial terrestre. La déclinaison, notée traditionnellement δ forme, avec l'ascension droite α les coordonnées équatoriales du corps céleste.
- **Demi-grand axe** : Valeur moyenne de la distance minimale et de la distance maximale entre un corps (par exemple une planète) en orbite elliptique et le centre autour duquel il gravite (par exemple le Soleil). C'est l'un des six éléments orbitaux qui permettent de spécifier une orbite donnée (voir la rubrique "Éléments orbitaux").
- **Direction vernale** : Voir la rubrique "Point vernal".
- **Distance zénithale** : Complément à 90° de la hauteur (voir la rubrique "Hauteur").
- **Écliptique** : Plan contenant l'orbite de la Terre autour du Soleil. Il est ainsi nommé car c'est le plan dans lequel se passent les éclipses de Lune ou de Soleil (Les éclipses

ne peuvent se produire que si la Lune est au voisinage du plan écliptique).

- **Electron-Volt** : Unité d'énergie adaptée à la physique des particules. Un Electron-Volt (eV) vaut $1.60218\,10^{-19}$ *Joule*. C'est l'énergie qu'acquiert un électron accéléré par une tension de $1\,Volt$.
- **Éléments orbitaux (ou paramètres orbitaux)** : Ensemble de six paramètres qui permettent de définir sans ambiguïté une orbite keplerienne donnée, parmi l'infinité d'orbites kepleriennes qui peuvent exister autour d'un même corps attracteur. Ces paramètres sont l'inclinaison du plan orbital, la longitude du nœud ascendant, la longitude du périhélie, la longitude moyenne du corps à une date donnée, le demi-grand axe et l'excentricité. Voir les rubriques du glossaire consacrées à ces mots, ainsi que la section 5.4.2.
- **Embolismique (année)** : Voir la rubrique "Année embolismique".
- **Equation du temps** : Différence "temps solaire moyen − temps solaire vrai" exprimée en minutes (voir Section 4.1.3). Cette quantité varie au cours de l'année selon la courbe de la figure 4.1 et reflète les irrégularités du mouvement apparent du Soleil, dues au caractère non circulaire de l'orbite de la Terre et à l'obliquité de $23^o\,27'$ de l'axe de rotation de la Terre. C'est cette correction qu'il faut ajouter à la lecture d'un cadran solaire astronomique pour obtenir le temps solaire moyen, duquel on tire l'heure légale (celle des montres et horloges) par adjonction de la longitude ouest du lieu (soustraction de la longitude Est) et de la correction de fuseau horaire (en France, $+1\,h$ en hiver et $+2\,h$ en été).
- **Équinoxe** : Instant pour lequel la déclinaison géocentrique du Soleil s'annule (équinoxe de printemps lorsque la déclinaison s'annule en croissant, et équinoxe d'automne dans le cas contraire). Ce mot vient du latin *equi* (égal) et *nox* (la nuit) : instant qui réalise l'égalité de la nuit et du jour.
- **Étoile** : Corps céleste émettant de l'énergie lumineuse visible, et qui est le siège de réactions de fusion thermonucléaire.
- **Étoile à neutrons** : Étoile suffisamment dense pour que sa matière ne puisse plus subsister sous une forme ordinaire (organisée en atomes et molécules), mais plutôt sous la forme dégénérée de simples neutrons agglomérés. Après l'extinction d'une étoile relativement massive en fin de vie, son cœur se contracte sous son propre poids, et peut finir sous la forme d'une telle étoile à neutrons.
- **Étoile filante** : Trace lumineuse éphémère laissée dans le ciel par un météorite qui brûle dans l'atmosphère.
- **Excentricité** : Nombre sans dimension qui caractérise le degré d'ellipticité (c'est-à-dire de non-circularité) d'une orbite Keplerienne. L'excentricité est nulle pour une orbite circulaire. Elle est strictement comprise entre 0 et 1 pour des orbites elliptiques non circulaires, elle vaut 1 pour les orbites paraboliques, et est strictement supérieure à 1 pour les orbites hyperboliques. C'est l'un des six éléments orbitaux qui permettent de spécifier une orbite donnée (voir la rubrique "Éléments orbitaux").
- **Foyer** : Lieu où se concentre la lumière en aval d'un objectif (lentille ou miroir concave). Du latin *focus* : le feu, car c'est l'endroit où naît le feu dans le cas d'une loupe utilisée avec la lumière solaire pour enflammer un combustible.
- **Galaxie** : Regroupement de plusieurs centaines de milliards d'étoiles en rotation autour d'un centre commun, dans un volume de taille typique de l'ordre de quelques centaines de milliers d'années-lumière. La "Voie Lactée" est la galaxie à laquelle appartient notre Soleil.
- **Géante rouge** : Étoile de grande taille, relativement froide, qui résulte sans doute

de l'inflation d'une étoile ordinaire en fin de vie.

- **Hauteur** : Hauteur angulaire d'un corps céleste par rapport au plan horizontal d'un lieu donné. Cet angle est souvent exprimé en degrés, minutes et secondes. Il est compté positif quand le corps céleste est au dessus du plan horizontal. La hauteur forme avec l'azimut les coordonnées horizontales ou azimutales du corps céleste.
- **Hégire** : Date origine du calendrier musulman. Elle correspond au départ de Mahomet de la Mecque, le 16 juillet 622.
- **Hélek** (*Halakim* au pluriel) : Unité de temps du calendrier hébraïque qui vaut $1/1080^{eme}$ d'heure, soit 3.33... secondes de temps.
- **Heure** : Unité de temps valant 3600 secondes (voir la rubrique "Seconde").
- **Inclinaison** : Inclinaison du plan d'une orbite keplerienne par rapport au plan de référence (le plan écliptique pour les orbites su système solaire). C'est l'un des six éléments orbitaux qui permettent de spécifier une orbite donnée (voir la rubrique "Éléments orbitaux").
- **Interaction électromagnétique** : Une des quatre interactions fondamentales de l'Univers. Elle est de portée infinie. Elle est responsable de la cohésion des atomes, des molécules et des cristaux. Elle est à la base de l'existence des liaisons chimiques et donc de la matière structurée, telle que nous la connaissons. Voir la section 5.1.
- **Interaction gravitationnelle** : Une des quatre interactions fondamentales de l'Univers. Elle est de portée infinie. Elle est responsable de la cohésion de l'Univers, de la pesanteur, de la formation des étoiles et planètes, et de tous les mouvements de la mécanique céleste. Elle est à la base de l'existence de l'Univers structuré tel que nous le connaissons. Voir la section 5.1.
- **Interaction faible** : Une des quatre interactions fondamentales de l'Univers. Elle est de portée finie (de l'ordre de $10^{-18}\ m$) et n'intervient qu'à l'échelle sub-nucléaire. Elle est responsable des phénomènes de radioactivité β. Voir la section 5.1.
- **Interaction forte** : Une des quatre interactions fondamentales de l'Univers. Elle est de portée finie (de l'ordre de $10^{-15}\ m$) et n'intervient qu'à l'échelle nucléaire. Elle est responsable de la cohésion des nucléons (neutrons, protons) dans les noyaux atomiques. Voir la section 5.1.
- **Jour** : Unité de temps valant 24 heures, soit 86400 secondes (voir la rubrique "Seconde").
- **Jour sidéral** : Période de rotation propre de la Terre par rapport aux étoiles fixes (et non par rapport au Soleil). Un jour sidéral dure actuellement $23\,h\ 56\,m\ 4.09\,s$.
- **Jour solaire moyen** : Moyenne annuelle du jour solaire vrai (voir la rubrique "Jour solaire vrai"). Cette durée, ou plus précisément sa 86400eme partie, la seconde, a longtemps servi comme étalon de temps, jusqu'à ce que la technologie permette de construire des étalons de temps non-astronomiques, plus précis et stables.
- **Jour solaire vrai** : Durée séparant deux instants de passage consécutifs du Soleil au Midi d'un lieu, c'est-à-dire dans le plan méridien du lieu. A cause de la non-circularité de l'orbite terrestre et de l'inclinaison de $23^o\,27'$ de l'axe de rotation de la Terre, cette durée varie au cours de l'année.
- **Latitude (d'un lieu géographique)** : Écart angulaire de la direction "Centre de la Terre→lieu" par rapport à l'équateur terrestre. Cet angle est souvent exprimé en degrés, minutes et secondes. Il est compté positif quand le corps est au Nord de l'équateur. Il forme avec la longitude les coordonnées géographiques d'un lieu.
- **Latitude écliptique (d'un corps céleste)** : Écart angulaire de la direction "Soleil → corps céleste" par rapport au plan écliptique. Cet angle est souvent exprimé en

degrés, minutes et secondes. Il est compté positif quand le corps est au Nord de l'écliptique. Il forme avec la longitude écliptique les coordonnées écliptiques d'un corps céleste.

- **Longitude (d'un lieu géographique)** : Angle entre le plan méridien du lieu en question et le plan méridien d'origine (méridien de Greenwich). Cet angle est exprimé en degrés, minutes et secondes ou heures, minutes et secondes. Il est compté positif pour un lieu situé à l'Est du méridien de Greenwich.
- **Longitude écliptique (d'un corps céleste)** : Angle entre la direction vernale et la direction du corps céleste, projetée sur le plan écliptique. Cet angle est exprimé en degrés, minutes et secondes. Il est compté positif vers l'Est écliptique. Il forme avec la latitude écliptique les coordonnées écliptiques d'un corps céleste.
- **Longitude du nœud ascendant** : Longitude du point d'une orbite keplerienne auquel le corps orbitant traverse le plan de référence (le plan écliptique pour une orbite du système solaire). C'est l'un des six éléments orbitaux qui permettent de spécifier une orbite donnée (voir la rubrique "Éléments orbitaux").
- **Longitude composite du périhélie** : Somme de la longitude du nœud ascendant d'une orbite keplerienne et de l'angle entre le nœud ascendant et son périhélie. C'est l'un des six éléments orbitaux qui permettent de spécifier une orbite donnée (voir la rubrique "Éléments orbitaux").
- **Longitude composite moyenne d'une planète à une date donnée** : Somme de la longitude du nœud ascendant d'une orbite keplerienne et de l'angle entre le nœud ascendant et la position moyenne du corps orbitant à la date donnée. La position moyenne du corps est la position qu'aurait réellement ce corps à la date donnée, si l'excentricité de son orbite était nulle. C'est l'un des six éléments orbitaux qui permettent de spécifier une orbite donnée (voir la rubrique "Éléments orbitaux").
- **Lunaison** : Durée séparant deux phases consécutives de nouvelle lune.
- **Masse gravitationnelle** : Coefficient qui intervient dans l'expression de la force de gravitation. Actuellement, tout port à croire que la masse gravitationnelle d'un corps est identique à sa masse inertielle. Voir les sections 5.1 et 5.2.3.
- **Masse inertielle** : Coefficient de proportionnalité entre la force subie par un corps et l'accélération qu'il acquiert. Actuellement, tout port à croire que la masse inertielle d'un corps est identique à sa masse gravitationnelle. Voir les sections 5.2.3 et 5.1.
- **Matrice CCD** : Capteur photosensible constitué par une grille de plusieurs milliers voire millions de mini-condensateurs qui se chargent lorsqu'ils reçoivent de la lumière. La charge électrique que chacun de ces mini-condensateurs réussit à accumuler pendant le temps d'exposition reflète l'intensité lumineuse qu'il a reçue. Cette charge peut être transformée en un signal électrique visualisable sur un écran de télévision. CCD est l'acronyme de "Charge Coupled Device".
- **Méridien (d'un lieu géographique)** : Demi-cercle joignant les pôles de la Terre et passant par le lieu en question.
- **Météore** : Phénomène atmosphérique lumineux, par exemple associé à la chute d'un météorite.
- **Météorite** : Astéroïde ou fragment d'astéroïde tombé sur Terre.
- **Micromètre à fils mobiles** : Appareil destiné à la mesure d'écarts angulaires entre deux astres, qui fut inventé en 1667 par les astronomes A. Auzout et J. Picard. Il est constitué de plusieurs fils fins dont certains sont mobiles par action d'un tambour micrométrique. Ces fils sont placés dans le plan focal d'un instrument astronomique, et servent de "pied à coulisse" dans ce plan focal.

- **Midi solaire vrai (en un lieu)** : Instant pour lequel le Soleil passe dans le plan méridien du lieu, c'est-à-dire au point culminant de sa trajectoire diurne. C'est l'instant pour lequel le temps solaire vrai local vaut 00 heure.
- **Midi solaire moyen (en un lieu)** : Instant pour lequel le temps solaire moyen local vaut 00 heure.
- **Minute** : Unité de temps valant $1/60^{eme}$ d'heure. Voir la section 4.1.3.
- **Minute d'arc** : Unité d'angle valant $1/60^{eme}$ de degré. Voir la section 4.1.3.
- **Nadir** : Direction de la verticale descendante en un lieu donné. C'est la direction opposée au Zénith.
- **Naine blanche** : Étoile petite, chaude et très massive qui reste après qu'une étoile en fin de vie ait éjecté ses couches externes.
- **Nébuleuse** : Objet céleste revêtant l'apparence d'un nuage cotonneux et filamenteux. Il en existe de différentes sortes et de différentes origines (nébuleuses planétaires, issues de l'éjection des couches externes d'une étoile moyenne en fin de vie ; résidus de supernova, nébuleuses diffuses, etc.).
- **Neutrino** : Particule élémentaire de très faible masse (sinon nulle), interagissant très peu avec la matière et donc très difficile à détecter. Elle est émise en grande quantité par les réactions nucléaires qui ont lieu au cœur du Soleil. Sa détection nous renseigne sur la température centrale du Soleil. Son existence avait été prédite par W. Pauli et E. Fermi en 1930, et confirmée expérimentalement en 1958.
- **Nord écliptique** : Celle des deux directions perpendiculaires au plan écliptique, qui fait le plus petit angle avec la direction Sud-Nord de l'axe de la Terre.
- **Nova** (*Novæ* au pluriel) : Couple d'étoiles très dissymétrique, dont la plus petite et la plus dense aspire la matière de la plus grosse, au point d'engendrer d'exploser partiellement. Vue depuis la Terre, l'étoile parait soudain devenir plus brillante, au point parfois de sembler nouvelle (d'où le nom de "nova stella" ou simplement "nova").
- **Nutation** : Mouvement d'oscillation de l'axe de rotation d'une toupie (ou de tout corps en rotation) qui se superpose au mouvement de précession. Voir la rubrique "Précession".
- **Nutation des équinoxes** : Mouvement d'oscillation rapide et de faible amplitude qui affecte la direction de l'axe instantané de rotation de la Terre, et qui se superpose au mouvement lent et ample de précession des équinoxes. Voir la rubrique "Précession des équinoxes".
- **Objectif** : Pièce principale (lentille ou miroir) d'un instrument d'optique qui est dirigée vers l'objet à observer, pour en former une image intensifiée dans son plan focal.
- **Oculaire** : Pièce optique dirigée vers l'œil de l'observateur, qui agit comme une puissante loupe destinée à scruter finement le plan focal d'un instrument d'optique.
- **Onde électromagnétique** : Vibration des champs électriques et magnétiques se propageant à la vitesse $c = 299\,792\,458\ m/s$ dans le vide. La lumière en est un cas particulier.
- **Paramètre (d'une conique plane)** : Quantité qui intervient dans la définition analytique d'une conique plane. Voir la section 5.4.1.
- **Parallaxe** : Très légère variation annuelle de la position apparente (angulaire) d'une étoile, due au fait qu'elle est vue, au cours de l'année, depuis différents points de l'orbite terrestre. Plus précisément, c'est l'angle sous lequel on verrait le demi-grand axe de l'orbite terrestre depuis l'étoile considérée.

- **Parsec** : Unité de mesure de distance en astronomie, qui représente la distance de laquelle on verrait le demi-grand axe de l'orbite terrestre sous un angle de une seconde d'arc, soit $1\ pc = 3.0856775807\,10^{13}\ km$. "parsec" est la contraction de "parallaxe-seconde".
- **Périhélie** : Point de l'orbite d'un corps du système solaire qui se trouve au plus près du Soleil.
- **Périgée** : Point de l'orbite d'un satellite de la Terre qui se trouve au plus prés de la Terre. Ce terme s'applique à tout satellite, naturel (la Lune) ou artificiel en orbite autour de la Terre.
- **Photon** : Particule élémentaire sans masse mais dotée d'une énergie, associé dans le cadre de la Mécanique Quantique à toute onde électromagnétique.
- **Pixel** : Contraction de l'anglais *PIcture ELement*. Ce terme désigne les capteurs élémentaires réunis en grille pour former la partie sensible d'une camera électronique (par exemple une camer CCD).
- **Plan écliptique** : Voir la rubrique "Écliptique".
- **Plan focal** : Plan perpendiculaire à l'axe optique d'une pièce optique (lentille, miroir concave), et contenant le foyer de la pièce optique en question (voir ce terme). C'est dans le plan focal de son objectif qu'un instrument optique astronomique forme une image intensifiée de l'objet céleste qu'il vise.
- **Plan méridien (d'un lieu)** : Plan contenant l'axe des pôles terrestres, et contenant aussi le lieu en question.
- **Planète** : Gros corps gravitant autour d'une étoile (par exemple le Soleil), sur une orbite stable. Le mot "planète" vient du grec *planetos* ($\pi\lambda\nu\eta\tau o\sigma$) qui signifie "errant".
- **Point vernal** : Direction du Soleil vu depuis la Terre à l'instant de l'équinoxe de printemps. Cette direction appartient à la fois au plan écliptique et au plan équatorial terrestre. Cette direction sert d'origine de mesure des angles pour les repérages écliptiques et équatoriaux.
- **Précession** : Lent mouvement de rotation de l'axe de rotation d'une toupie (ou de tout corps en rotation). Sous l'effet de la précession, l'axe de rotation décrit un cône autour de la direction verticale.
- **Précession des équinoxes** : Lent mouvement de rotation de l'axe Sud-Nord de la Terre qui décrit, en 25 770 ans, un cône de $23^o\,27'$ de demi-angle au sommet. L'origine de cette précession est à relier à la non-sphéricité de la Terre, et à l'interaction Terre-Soleil-Lune.
- **Pulsar** : Contraction de "PULsating stAR". C'est une étoile à neutrons en rotation rapide sur elle-même, et qui émet un pinceau d'ondes radio. Ce pinceau d'ondes radio tourne avec l'étoile, et se comporte, vu de la Terre comme le pinceau lumineux d'un phare maritime : il produit un signal pulsant.
- **Rapport d'ouverture** : Rapport D/F du diamètre d'un objectif d'instrument optique, divisé par sa longueur focale. C'est ce rapport qui conditionne la luminosité de l'instrument.
- **Référentiel** : Ensemble physique constitué par trois directions matérielles et une horloge, destiné à servir de cadre pour la définition des mouvements mécaniques. Voir la section 5.2.1.
- **Référentiel galiléen (ou inertiel)** : Référentiel dans lequel le mouvement d'une particule libre (soumise à aucune force) est rectiligne uniforme. Voir la section 5.2.2.
- **Rega** (*Rega'im* au pluriel) : Unité de temps du calendrier hébraïque qui vaut $1/76^{eme}$

de Hélek (voir ce terme dans le glossaire), soit environ 43.86 millisecondes.

- **Repérage écliptique** : Repérage de la position d'un corps céleste par rapport au plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil (plan écliptique). Voir la section 4.2.2.
- **Repérage équatorial** : Repérage de la position d'un corps céleste par rapport au plan équatorial terrestre et à la direction vernale. Voir la section 4.2.2.
- **Repérage horaire** : Repérage de la position d'un corps céleste par rapport au plan équatorial terrestre et à la direction du méridien local. Voir la section 4.2.2.
- **Repérage horizontal** : Repérage de la position d'un corps céleste par rapport au plan horizontal du lieu d'observation et à la direction du Nord local. Voir la section 4.2.2.
- **Seconde** : Unité de temps qui, à l'origine, était définie de manière astronomique comme la 86400eme partie du jour solaire moyen (moyenne sur un an de la durée séparant les instants de passage du Soleil au Midi d'un lieu donné, c'est-à dire dans le plan méridien du lieu). Cette définition astronomique trop irrégulière a été abandonnée pour des définitions d'origine non-astronomique, plus précises et stables. La définition actuellement en vigueur depuis 1967 est d'origine atomique : la seconde est définie comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la vibration de l'atome de Césium 133, correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental. Les autres unités de temps (minute, heure, jour) s'en déduisent simplement.
- **Seconde d'arc** : Unité d'angle valant $1/3600^{eme}$ de degré.
- **Solstice** : Instant pour lequel la déclinaison géocentrique du Soleil est extrémale (maximale lors du solstice d'été, et minimale lors du solstice d'hiver). Ce mot vient du latin *sol* (le Soleil) et *stare* (s'arrêter) : instant pour lequel le Soleil s'arrête de monter et redescend, ou le contraire.
- **Supernova** (*Supernovæ* au pluriel) : Étoile massive qui termine sa vie dans une gigantesque explosion. Vue depuis la Terre, l'étoile semble brutalement devenir beaucoup plus lumineuse, pendant plusieurs jours. Les astronomes chinois ont observé un tel phénomène en juillet 1054 dans la constellation du Taureau. L'étoile en question, modérément brillante, est soudain devenue assez lumineuse pour être visible en plein jour, et ce, pendant environ trois semaines. Les résidus de cette explosion ont formé un nuage (une nébuleuse), connu actuellement sous le nom de "nébuleuse du Crabe".
- **Temps atomique international (TAI)** : Échelle de temps basée sur les vibrations de l'atome de Césium 133. Voir les sections 4.1.2 et 4.1.3, ainsi que la rubrique "Seconde".
- **Temps civil local (en un lieu)** : Temps solaire moyen du lieu, additionné de $12\,h$ pour que le passage du Soleil au méridien de fasse vers 12 heure et non 00 heure. Voir la section 4.1.3.
- **Temps légal** : Temps Universel Coordonné (UTC) décalé d'un nombre entier d'heures dépendant du pays et du fuseau horaire. En France, le temps légal est en avance sur le temps UTC de $1\,h$ en hiver et de $2\,h$ en été. Voir la section 4.1.3.
- **Temps sidéral local (en un lieu)** : Échelle de temps basée sur la rotation propre de la Terre sur elle-même, par rapport à une direction fixe et non au Soleil. Voir la section 4.1.3.
- **Temps solaire vrai local (en un lieu)** : Échelle de temps définie comme étant l'angle horaire du Soleil. Voir la section 4.1.3.
- **Temps solaire moyen local (en un lieu)** : Échelle de temps définie à partir du Temps solaire vrai local, débarrassé de ses irrégularités annuelles liées à l'ellipti-

cité de l'orbite de la Terre et à l'inclinaison de son axe de rotation propre. Voir la section 4.1.3.

- **Temps universel (UT, UT1)** : Échelle de temps définie comme étant le temps civil du méridien de Greenwich. Le temps UT1 est rapporté à la vraie direction instantanée de l'axe de rotation terrestre, alors que le temps UT fait référence à sa position moyenne. Voir la section 4.1.3.
- **Temps universel coordonné (UTC)** : Échelle de temps égale au TAI, décalé d'un nombre entier de secondes pour être proche du temps UT1 à moins d'une seconde. Voir la section 4.1.3.
- **Terme séculaire** : Terme correctif des orbites kepleriennes, qui tient compte des variations lentes (à l'échelle du siècle, d'où le mot "séculaire") des éléments orbitaux, dues aux perturbations causées par les autres corps célestes et par le caractère non ponctuel des corps célestes mis en jeu.
- **Théodolite** : Instrument de mesure des coordonnées horizontales d'une direction.
- **Trou noir** : Objet céleste encore hypothétique dont l'existence est prédite par la théorie de la Relativité Générale d'Einstein. Ce serait un objet suffisamment dense pour que son champ de gravité de surface puisse empêcher l'évasion de toute matière, et même de la lumière. En d'autres termes, la vitesse de libération à la surface de l'objet dépasserait celle de la lumière. Un tel objet ne pouvant pas, par définition, émettre de lumière (d'où son nom), il ne peut être détectable directement. Les perturbations qu'un tel objet provoque dans son voisinage sont par contre détectables, mais ça n'est qu'une détection indirecte du trou noir.
- **Unité Astronomique (u.a.)** : Unité de mesure des distances dans le système solaire, qui représente le demi-grand axe de l'orbite terrestre, soit 1 $ua = 149597870.610\ km$.
- **Vent solaire** : Flux irrégulier de particules émises à grande vitesse par le Soleil.
- **Vernal** : Voir la rubrique "Point vernal".
- **Voie Lactée** : Nom donné à notre galaxie en raison de l'aspect laiteux que revêt la zone du ciel qui correspond à notre galaxie vue dans sa plus grande dimension (par la tranche).
- **Zénith** : Direction de la verticale ascendante en un lieu donné. Une étoile est au Zénith d'un lieu quand elle est exactement à la verticale du lieu. La direction opposée est le Nadir.

Chapitre 12

Chronologie

12.1 L'époque antique et le géocentrisme

- **$\simeq$-600 :** Le mathématicien grec Thalès de Milet (-640 à -562) savait calculer les éclipses de Lune, et avait compris que c'était le Soleil qui éclairait la Lune. Il voyait la Terre comme un disque flottant sur un océan d'un fluide primordial dont l'évaporation donne l'air.
- **$\simeq$-550 :** Le mathématicien grec Anaximandre (-611 à -545), disciple de Thalès, suppose que la Terre flotte dans l'espace, au centre de l'Univers, et que les planètes tournent autour d'elle, sur des roues de différents diamètres.
- **$\simeq$-500 :** Le mathématicien grec Paraménide (-540 à -450 environ) affirme que la Terre est sphérique, ce qui fut confirmé par les récits de voyageurs ayant remarqué un changement d'aspect du ciel au cours de leurs périples.
- **$\simeq$-450 :** Le mathématicien grec Anaxagore (-499 à -428) affirme que les planètes sont des solides opaques susceptibles de se faire de l'ombre. Il introduit ainsi la première explication physique des éclipses de Lune et de Soleil.
- **$\simeq$-360 :** L'astronome Grec Eudoxe de Cnide (-408 à -355) introduit un modèle cosmologique basé sur 27 sphères géocentriques.
- **$\simeq$-290 :** L'astronome grec Aristarque de Samos (-310 à -230) propose le premier modèle héliocentrique, et tente une mesure de la distance Terre-Soleil. Il la trouva 19 fois plus grande que la distance Terre-Lune, alors qu'elle est en réalité 400 fois la distance Terre-Lune.
- **$\simeq$-220 :** Le mathématicien grec Erathostène de Cyrène (-273 à -192) mesure la circonférence terrestre par la différence d'ombre entre le puits de Syène (haute vallée du Nil, tropique du Cancer) et l'obélisque d'Alexandrie (delta du Nil), le jour du solstice d'été. Il trouve un écart angulaire de $7^o12'$ entre les ombres, pour la distance d'environ 5000 stades égyptiens (1 stade = 176 mètres) séparant Syène et Alexandrie. Il en déduisit une longueur d'environ 250 000 stades pour la circonférence de la Terre, ce qui correspond approximativement à 44 000 km, valeur voisine à 10 % près de la valeur admise aujourd'hui.
- **$\simeq$-190 :** L'astronome grec Apollonius de Perge (-260 à -170 environ) propose le premier modèle cosmologique à épicycle et déférent.
- **$\simeq$-129 :** L'astronome grec Hipparque (-190 à -120) établit le premier catalogue d'étoiles (850 étoiles) et propose une échelle d'évaluation de leur éclat. Il met aussi en évidence la précession des équinoxes, et mesure la durée de l'année tropique à mieux que 7 minutes près.

- **$\simeq$+150 :** L'astronome Claude Ptolémée (90 à 168 environ) publie "*La Syntaxe Mathématique*", ouvrage où il décrit son modèle des mouvements planétaires basé sur les mouvements épicycliques à équant. Cet ouvrage nous est parvenu sous le nom d'*Almageste* grâce aux astronomes arabes. Ce modèle, aux prédictions relativement précises, est resté en vigueur pendant plus de treize siècles.

12.2 Le moyen-âge

- **juillet 1054 :** Les astronomes chinois observent et rendent compte de l'explosion de la supernova qui donna naissance à la nébuleuse du Crabe.

12.3 La renaissance et l'héliocentrisme

- **1543 :** L'astronome polonais N. Copernic (1473-1543) publie "*De Revolutionibus Orbium Cælestium*", ouvrage fondateur de l'héliocentrisme.
- **1596 :** L'astronome allemand J. Kepler (1571-1630) publie "*Mysterium Cosmographicum*", ouvrage dans lequel il tente d'expliquer les distances croissantes des six planètes du Système Solaire connues à cette époque en supposant que leurs orbites résident sur des sphères concentriques, imbriquées les unes dans les autres de façon à ce que de chacune soit inscrite dans, et conscrite à un des cinq solides platoniciens : le cube, le tétraèdre, l'hexaèdre, l'octaèdre, l'icosaèdre et le dodécaèdre. (Ces cinq polyèdres sont les seuls polyèdres réguliers existant en dimension trois.)
- **16 février 1600 (date julienne) :** Le philosophe italien Giordano Bruno (1548-1600) est brûlé vif à Rome par l'Église Catholique pour avoir affirmé que le Soleil n'était qu'une étoile comme les autres, elles même étant sans doute entourées d'un cortège de planètes (pluralité des Mondes).
- **1609 :** Le physicien et astronome italien Galileo Galilei (1564-1642) utilise une lunette à des fins astronomiques pour la première fois.
- **1609 :** L'astronome allemand J. Kepler (1571-1630) publie "*Astronomia Nova*", ouvrage dans lequel il énonce ses fameuses premières et deuxièmes lois pour décrire le mouvement de la planète Mars, à partir des très minutieuses observations de l'astronome danois Tycho Brahé (1546-1601).
- **juillet 1610 :** Le physicien et astronome italien Galileo Galilei (1564-1642) découvre, grâce à la lunette astronomique la tache rouge de Jupiter, le relief de la Lune, et les quatre plus gros satellites de Jupiter (satellites dits "galiléens").
- **1616 :** L'Église Catholique condamne officiellement les thèses héliocentriques de Copernic.
- **1618 :** L'astronome allemand J. Kepler (1571-1630) publie "*Harmonice Mundi*", ouvrage dans lequel il énonce sa troisième loi sur le mouvement des planètes.
- **1633 :** Le physicien et astronome italien Galileo Galilei (1564-1642) est jugé par la Sainte Inquisition, et doit abjurer ses théories géocentriques. Il sera réhabilité officiellement par l'Église Catholique... en 1994 par le Pape Jean-Paul II !
- **1644 :** Le philosophe français R. Descartes (1596-1650) propose la première hypothèse scientifique pour la création du système solaire.
- **1657 :** Le physicien et astronome néerlandais C. Huygens découvre et applique à l'horlogerie de précision le principe du pendule pesant rigoureusement isochrone à lames correctrices cycloïdales. Cette découverte marque le début de l'ère de la

chronométrie mécanique de précision.
- **décembre 1665 :** Le physicien Anglais I. Newton (1643-1727) découvre la gravitation universelle.
- **1667 :** Les astronomes A. Auzout (1622-1691) et J. Picard (1620-1682) inventent le micromètre à fils mobiles, qui ouvre la voie à des mesures de positions et d'écarts angulaires d'une précision grandement accrue (quelques secondes d'arc).
- **décembre 1671 :** Le physicien Anglais I. Newton (1643-1727) présente à la *Royal Society* de Londres le premier télescope astronomique qu'il avait construit lui-même.
- **1673 :** Le physicien et astronome néerlandais C. Huygens publie son "*Traité sur les Horloges*" qui résume ses découvertes en matière de chronométrie mécanique de précision.
- **1676 :** L'astronome danois O. Rømer (1644-1710) détermine la vitesse de la lumière en observant les retards et avances des occultations des satellites de Jupiter.
- **1687 :** Le physicien Anglais I. Newton (1643-1727) publie "*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*", ouvrage dans lequel il introduit les lois fondamentales de la mécanique classique.

12.4 L'âge d'or de la mécanique céleste

- **1727 :** L'astronome anglais J. Bradley (1693-1762) découvre "l'aberration des étoiles", conséquence de la finitude de la vitesses de la lumière combinée avec le mouvement orbital de la Terre.
- **1755 :** Le philosophe E. Kant (1724-1804) publie "*Philosophie Naturelle*", ouvrage dans lequel il propose une théorie pour la formation du système solaire par condensation dans un disque de poussière en rotation.
- **13 mars 1781 :** L'astronome anglais W. Herschel (1738-1822) découvre la planète Uranus.
- **1782 :** L'astronome français C. Messier (1730-1817) publie le premier catalogue d'objets diffus (galaxies, amas d'étoiles, nébuleuses), synthèse d'un travail entrepris en 1758.
- **1796 :** l'astronome mathématicien et physicien français P.S. Laplace (1749-1827) publie "*Exposition du système des mondes*", où il propose un mécanisme de formation des planètes.
- **31 décembre 1800 :** L'astronome italien G. Piazzi (1746-1826) découvre le premier astéroïde (Cérès).
- **28 mars 1802 :** L'astronome allemand H. Olbers (1758-1840) découvre le second astéroïde (Pallas).
- **1824 :** le physicien allemand J. von Fraunhoffer (1787-1826) effectue le premier spectre de la lumière solaire.
- **1838 :** L'astronome allemand F. Bessel (1784-1846) effectue la première mesure de la distance d'une étoile par sa parallaxe. Il s'agissait de *61-Cygni*, dont il annonça la parallaxe à 0.31" (la valeur actuellement reconnue est de 0.294").
- **23 septembre 1846 :** L'astronome allemand J. Galle (1812-1910) découvre la planète Neptune, sur les indications de U. Le Verrier qui en avait déduit l'existence et la position par le calcul. Un calcul analogue avait été fait deux ans avant par l'astronome anglais J. Adams (1819-1892).

12.5 L'ère de l'astrophysique et de la cosmologie

- **1905 :** L'astronome danois E. Hertzsprung (1873-1967) et l'astronome américain H. Russel (1877-1957) établissent la première classification d'étoiles sur la base de leur luminosité et de leur type spectral (diagramme d'Hertzsprung-Russel).
- **1905 :** Le physicien allemand A. Einstein (1879-1955) introduit sa théorie de la Relativité restreinte.
- **1916 :** Le physicien allemand A. Einstein (1879-1955) introduit sa théorie de la Relativité générale.
- **1918 :** L'astronome japonais K. Hirayama (1874-1943) regroupe les astéroïdes connus en familles dynamiques.
- **1929 :** L'astronome américain E. Hubble (1889-1953) découvre l'expansion de l'Univers.
- **18 février 1930 :** L'astronome américain C. Tombaugh (1906-1997) découvre Pluton.
- **1931 :** L'astronome américain K. Jansky (1905-1950) fonde la radio-astronomie.
- **1938 :** Les physiciens allemands H.A. Bethe (1906- ?) et C. von Weizsäcker (1912- ?) élucident complètement les mécanismes nucléaires qui sont à la source de l'énergie solaire.
- **1955 :** Les physiciens anglais L. Essen et J.V.L. Parry, au *National Physical Laboratory* construisent la première horloge atomique, sur une idée originale de Rabi (janvier 1945).

12.6 L'ère de l'astronomie spatiale

- **4 octobre 1957 :** L'Union Soviétique lance le premier satellite artificiel : *Spoutnik* ("compagnon" en russe).
- **1959 :** La sonde soviétique *Luna 2* effectue un atterrissage brutal sur la Lune, et la sonde *Luna 3* réalise les premières photos de la face cachée de la Lune.
- **1965 :** La sonde américaine *Mariner 4* s'approche de la planète Mars et en prend les premières photos rapprochées.
- **1965 :** Deux ingénieurs radio-astronomes au "Bell-Laboratories", A. Penzias (1933- ?) et R. Wilson (1936- ?) découvrent par hasard le rayonnement radio fossile dit "rayonnement à 2.7 K", vestige des premiers moments de l'Univers. Cette découverte accidentelle allait fournir une des observations de base de la cosmologie moderne.
- **1967 :** La treizième Conférence Générale des Poids et Mesures définit la seconde comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamentale de l'atome de Césium 133.
- **20 juillet 1969 :** L'astronaute américain N. Amstrong pose le pied sur la Lune.
- **1971 :** La quatorzième Conférence Générale des Poids et Mesures introduit le Temps Atomique Internationale (TAI).
- **1973 :** La sonde américaine *Pioneer 10* approche Jupiter pour la première fois. Elle se dirige actuellement vers l'extérieur du système solaire et sera le premier objet terrestre à quitter le système solaire. Elle porte à son bord un message graphique à l'intention d'éventuelles intelligences non terrestres.
- **1975 :** La sonde soviétique *Venera 9* effectue le premier atterrissage en douceur sur le sol de Vénus et en photographie la surface.
- **20 août 1977 et 5 septembre 1977 :** Lancement des sondes américaines "Voyager

II" et "Voyager I" vers les planètes géantes du système solaire.

- **1994 :** Le pape Jean-Paul II réhabilite officiellement Galilée.
- **5 octobre 1995 :** La première planète extra-solaire ($51 - Pegasi$) est découverte à l'Obervatoire de Haute Provence (France), par les astronomes suisses M. Mayor et D. Queloz.
- **14 février 1996 :** La sonde SoHO, lancée le 2 décembre 1995 de Cap Canaveral, arrive à son poste (le point de Lagrange L1), face au Soleil, et commence sa mission d'observation continue du Soleil.
- **15 octobre 1997 :** La sonde Cassini-Huygens est lancée de Cap Canaveral en direction de Saturne et de son satellite Titan. Le trajet devrait durer 6.7 ans.
- **25 mai 1998 :** Le premier des quatre télescopes du VLT (Very Large Telescope), de $8.2\,m$ de diamètre, reçoit sa première lumière. Le VLT est un groupe d'instruments astronomiques financé par l'ESO (European Southern Observatory), installé sur le mont Paranal (désert de l'Atacama, Chili).
- **3 janvier 1999 :** Lancement de la sonde américaine "Mars Polar Lander" vers la planète Mars.
- **12 février 2001 :** La sonde américaine "NEAR" (lancée le 12 août 1999) se pose en douceur sur l'astéroïde Eros.
- **10 juin 2003 et 7 juillet 2003 :** Lancement des sondes robotisées "Spirit" et "Opportunity" vers la planète Mars.
- ....

Table des figures

1.1 *La convention de signe trigonométrique* 13
1.2 *Les bases de la trigonométrie* 13
1.3 *La notion de diamètre apparent* 15
1.4 *La notion de parallaxe* 15
1.5 *Le système Terre-Soleil en perspective* 23
1.6 *Le système Terre-Soleil vu de "dessus"* 25
1.7 *Le système Terre-Lune vu de "dessus"* 27

2.1 *L'amas ouvert (ou galactique) des Pléiades (M45).* 39
2.2 *Le grand amas globulaire d'Hercule (M13).* 41
2.3 *La nébuleuse diffuse d'Orion (M42).* 43
2.4 *La nébuleuse du Crabe (M1).* 45
2.5 *La nébuleuse planétaire de la Lyre (M57).* 47
2.6 *La galaxie spirale du Tourbillon (M51).* 49
2.7 *Le grand amas de galaxies de la Vierge.* 51

4.1 *l'Equation du temps* 69
4.2 *Le repérage horizontal topocentrique* 75
4.3 *Le repérage équatorial géocentrique* 77
4.4 *Le repérage horaire* 79
4.5 *Le repérage géographique* 81
4.6 *Le repérage écliptique héliocentrique* 83

5.1 *Les six éléments orbitaux* 95

6.1 *Les principales planètes du système solaire.* 109
6.2 *Le Soleil, une étoile ordinaire.* 111
6.3 *La planète Mercure.* 113
6.4 *La planète Vénus.* 115
6.5 *La planète Terre.* 117
6.6 *La Lune.* 119
6.7 *La planète Mars.* 121
6.8 *L'astéroïde Toutatis.* 123
6.9 *La planète Jupiter.* 125
6.10 *La planète Saturne.* 127
6.11 *La planète Uranus.* 129
6.12 *La planète Neptune.* 131
6.13 *Le couple Pluton–Charon.* 133

6.14 *La comète de Halley.* 135

7.1 *La structure interne du Soleil* 149
7.2 *Le cycle Proton-Proton* 151
7.3 *La photosphère solaire* 153
7.4 *La chromosphère solaire* 155
7.5 *La couronne solaire* 157

8.1 *Le spectre électromagnétique* 169
8.2 *Les principaux instruments d'optique astronomique* 171

Liste des tableaux

1.1 Unités de mesure des angles 8
1.2 Début et durée des saisons 19

4.1 Unités de longueur en astronomie 72

5.1 Les interactions fondamentales 89

7.1 Données physiques sur le Soleil 140
7.2 Composition chimique du Soleil 143