

Table des matières

Introduction	1
1 La lumière	5
1.1 Les outils	5
1.2 La lumière : phénomène ondulatoire	5
1.2.1 Les différentes longueurs d'onde	5
1.2.2 Propagation	9
1.2.3 Les spectres de lumière	10
1.3 La lumière : phénomène corpusculaire	12
1.3.1 Rayonnement du corps noir	12
1.3.2 Le modèle de Bohr	14
1.4 L'effet Doppler-Fizeau	17
2 Le Soleil	23
2.1 Généralité	23
2.2 La structure externe	25
2.3 La structure interne	27
2.4 L'énergie solaire	31
2.5 Le cycle solaire	31
3 Description du système Solaire	35
3.1 Généralités	35
3.2 Les planètes du systèmes solaire	36
3.3 Les autres composants du système solaire	48
4 Petit formulaire relatif au système solaire	53
4.1 De Kepler à Newton	53
4.2 Vitesse de libération, vitesse de satellisation	58
4.3 Position relative des planètes	60
4.4 Période synodique, période sidérale, mouvement apparent . . .	60
4.5 Période de rotation, durée du jour	63

4.6	Axe de rotation de la Terre	64
5	Les étoiles	67
5.1	Magnitude	67
5.1.1	Magnitude apparente	67
5.1.2	Magnitude absolue	69
5.2	Le diagramme Hertzsprung-Russell	70
5.3	Evolution des étoiles	74
5.3.1	Les pouponnières	74
5.3.2	L'effondrement	76
5.3.3	La séquence principale	78
5.3.4	Evolution post-séquence principale d'une étoile de type Soleil	78
5.3.5	Evolution des étoiles plus massives	82
6	Les galaxies	87
6.1	La Voie Lactée	87
6.1.1	Structure générale	87
6.1.2	Le Soleil dans la Voie Lactée	90
6.2	Les autres galaxies	91
6.2.1	Les différents types de galaxie	92
6.2.2	Les galaxies actives	94
6.3	Organisation des galaxies	97
6.4	Expansion de l'Univers	100
7	La mesure des distances dans l'Univers	103
7.1	Les premiers calculs	103
7.2	Introduction et triangulation	104
7.3	La distance des étoiles	106
7.3.1	Les parallaxes trigonométriques	106
7.3.2	Les parallaxes spectroscopiques	109
7.3.3	Les parallaxes dynamiques	110
7.3.4	Distance de certaines étoiles variables	111
7.4	Les distances extragalactiques	114
8	Notions de cosmologie	117
8.1	Un peu de relativité	117
8.1.1	Les limites de la théorie de la gravitation	117
8.1.2	La relativité restreinte	117
8.1.3	La relativité générale	118
8.2	Un univers en expansion	120

8.2.1	Le paradoxe d'Olbers	120
8.2.2	La constante cosmologique d'Einstein	120
8.2.3	Loi de Hubble et facteur d'échelle	121
8.2.4	Le Big-Bang et le rayonnement du fond cosmologique	122
8.2.5	Avant le découplage et matière exotique	124
8.3	Les modèles d'univers	125
8.3.1	Les paramètres des modèles d'univers	125
8.3.2	Les modèles historiques	126
8.3.3	Calcul de distance à partir d'un modèle d'univers	127
8.3.4	Limites des modèles historiques	127
8.3.5	Le nouveau modèle standard	128
9	La formation du système solaire	131
9.1	Introduction	131
9.2	La formation des planètes terrestres	132
9.2.1	Un disque issu de la naissance d'une étoile	133
9.2.2	Un disque de gaz et de grains	133
9.2.3	Chute et sédimentation des grains dans le plan équatorial	137
9.2.4	Formation des planétésimaux	137
9.2.5	Des planétésimaux aux protoplanètes	139
9.2.6	Des protoplanètes aux planètes	141
9.2.7	Des disques post-planétaires	142
9.2.8	En Résumé	142
9.3	La formation des planètes géantes gazeuses	143
9.3.1	Instabilité de gravitationnelle (dite de Jeans)	143
9.3.2	Modèle du coeur Solide	145
9.4	Le bombardement tardif et la migration des planètes géantes	148
10	Les exoplanètes	151
10.1	Introduction	151
10.2	Méthodes de détection	152
10.2.1	Méthodes dynamiques	153
10.2.2	Par transit	155
10.2.3	Avec les lentilles gravitationnelles	156
10.2.4	L'imagerie directe	157
10.3	Les exoplanètes observées	158
10.3.1	Diagramme des masses	158
10.3.2	Diagramme des périodes	159
10.3.3	Diagramme masse/période	159
10.3.4	Diagramme excentricité période	161
10.4	La vie ailleurs que sur Terre	162

10.4.1	Zones habitables	162
10.4.2	Détection de la vie	164
10.5	Missions futures	165
10.5.1	GAIA	165
10.5.2	COROT	166
10.5.3	DARWIN	167
10.5.4	Au sol	167
10.5.5	Dans l'espace plus tard	167

Introduction

L'astronomie et l'astrophysique consistent en l'étude des différents objets et phénomènes observés dans le ciel. Avec le simple outil d'observation qu'est notre œil, dès l'antiquité l'homme avait accès à de nombreuses informations : éclat et direction des étoiles, mouvement des planètes, éclipses de Soleil et de Lune, météores, passage de comète, etc. L'étude de ces objets et en particulier de leur mouvement a conduit au développement de méthodes mathématiques adaptées à l'astronomie, jusqu'à constituer après Newton, un domaine entier : la mécanique céleste.

Depuis moins de 2 siècles (avènement de la spectrographie au XIX^{ème} siècle), les développements des techniques d'observation et la création de nouveaux outils, ont permis l'émergence de l'astrophysique, extension de l'astronomie au domaine de la physique. De nos jours pratiquement toutes les spécialités de la physique, de la chimie, de la biologie trouvent des applications en astronomie. Ainsi sous les mots astronomie ou astrophysique se cachent de nombreuses spécialités : mécanique céleste, planétologie, astrobiologie, cosmologie, pour ne citer que les principales.

Toutes ces connaissances ont montré que le ciel était rempli d'une variété d'objets considérable : de poussière micrométrique ou de gaz (activité cométaire, nébuleuse, etc) pour les plus petits, jusqu'aux galaxies dont le diamètre est de l'ordre de 30 kpc (de l'ordre de 10^{21} km), pour les plus grands. D'autre part la distance à laquelle se trouve ces objets peut aller de quelques centaines de kilomètres (les étoiles filantes), à 3 Gpc (de l'ordre de 10^{26} km) pour les plus lointains (les quasars).

Les échelles de longueur que l'on retrouve en astronomie sont données dans la figure 1, avec en correspondance les unités de distance habituellement utilisées à ces échelles.

En revanche la composition de l'univers est beaucoup plus uniforme, puisqu'il est constitué à 74,41% d'hydrogène (proportion massique). Les autres principaux constituants étant : l'Hélium (13,81 %), l'Oxygène (0,83 %), le Carbone (0,35 %), le Fer, l'Azote, le Néon, etc.

L'objet de ce cours est de décrire les connaissances obtenues jusqu'à nos

10^3 m = 1 km : taille d'une comète ;

10^7 m = 10 000 km : quart du méridien terrestre

10^8 m = 100 000 km : 380 000 km = distance Terre-Lune

10^9 m = 1 000 000 km : 1 400 000 km = diamètre du Soleil ;

10^{11} m : 150 million de km = 1 Unité Astronomique = distance moyenne Terre-Soleil ;

10^{12} m : 5,2 UA = distance Jupiter-Soleil ; 40 UA = ceinture de Kuiper ;

10^{17} m : 4,2 Année Lumière ou 1,26 pc : Alpha du Centaure, étoile la plus proche du Soleil. 1 AL = 0,3 pc (parsec) = 66 000 UA ;

10^{21} m : 30 kpc = 100 000 AL = diamètre de la voie lactée ;

10^{24} m : 30 Mpc , correspondant à un red-shift $z = 0,007$: taille d'un amas de galaxies ;

10^{26} m : 3 Gpc , correspondant à $z = 1,3$: distance des galaxies les plus lointaines observées.



FIGURE 1: *Echelle de longueurs en astronomie*

jours sur les différents objets et structures de l'univers, tout en essayant, dans la mesure du possible, de présenter les différentes méthodes qui ont permis d'obtenir ces connaissances.

En effet, ce qui caractérise l'astronomie en générale est bien le fait que les objets étudiés sont inatteignables (mise à part quelques missions spatiales). Ainsi toutes nos connaissances dérivent de l'information qu'on arrive à soustraire de la lumière nous provenant de ces objets.

Après une brève présentation des instruments utilisés de nos jours pour capter et analyser cette lumière, le premier chapitre (Chap. 1) de ce cours se consacre à la description des informations “cachées” dans la lumière, ou de manière plus précise, dans le rayonnement électromagnétique. Il ne s’agit pas ici d’un cours sur le rayonnement mais de donner quelques notions sur les propriétés élémentaires de celui-ci : propagation, spectres, corps noir, atome de Bohr, effet Doppler-Fizeau.

Une fois ces notions introduites, le voyage dans notre univers peut commencer, en partant de l’étoile la plus proche : le Soleil. Sa structure, ses caractéristiques, son fonctionnement sont décrits dans le chapitre 2. L’environnement proche du Soleil, ou plus exactement son domaine d’influence, appelé le *système solaire*, fait l’objet du chapitre 3. Dans ce chapitre les caractéristiques principales de chaque planète du système solaire sont présentées ainsi que leur environnement. Les autres structures du système solaire, comme la ceinture d’astéroïdes, la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort, y sont aussi décrites.

La distinction entre les étoiles et les planètes remonte à l’antiquité. En effet une observation attentive du ciel la nuit permet rapidement de voir que les planètes du système solaire sont les seuls points lumineux qui se déplacent par rapport aux autres points lumineux que sont les étoiles. De plus ces déplacements correspondent à des mouvements réguliers et périodiques. L’étude et la description de ces mouvements fait l’objet du chapitre 4. On y trouvera entre autre les premières notions de mécanique céleste que forment les fameuses lois de Kepler.

Les étoiles, leur classement, leur activité et évolution sont décrits dans le chapitre 5. Le chapitre 6 est lui dédié aux grandes structures de l’univers et à leur évolution : notre Galaxie, les différents types de galaxies et leur organisation, les modèles d’évolutions de l’univers.

Il existe une information fondamentale en astronomie à laquelle on n’a pas accès directement : c’est la distance à laquelle se trouvent les objets observés. Les différentes connaissances sur les objets et structures de l’univers permettent parfois d’accéder à cette troisième dimension qui nous reste inaccessible lorsqu’on observe depuis la Terre. Quelques méthodes permettant de calculer ces distances sont présentées dans le chapitre 7.

Enfin, le cours se termine par deux chapitres consacrés à deux domaines de recherche très actifs de nos jours : la formation du système solaire (chapitre 9) et les planètes extrasolaires (chapitre 10)

Chapitre 1

La lumière

1.1 Les outils

On pourrait très bien définir l’astronomie comme l’étude de la lumière qui nous vient du ciel. En effet, la «lumière», ou rayonnement électromagnétique est la principale source d’information sur les astres. La matière présente dans l’univers émet (étoiles), absorbe (atmosphère) ou réfléchi (planètes, astéroïdes, etc) de la lumière. Une fois captée par un observateur, l’analyse de cette lumière nous informe sur la matière émettrice ou traversée.

Le premier problème est donc de développer des outils permettant de capter cette lumière et éventuellement de l’analyser. Il y a évidemment l’œil, mais afin d’avoir accès à des objets toujours plus faibles et/ou toujours plus lointains, les lunettes (utilisée pour la première fois en 1609 par Galilée dans un but astronomique), puis les télescopes ont été développés. Enfin, on a voulu avoir accès aussi à d’autres longueurs d’onde, ainsi les radiotélescopes, entre autre, ont été développés.

Pour l’analyse de cette lumière, et en particulier l’étude de son spectre, les spectrographes sont devenus des outils indispensables associés aux télescopes (ou lunettes).

La Figure 1.1 montre ces différents instruments et outils.

1.2 La lumière : phénomène ondulatoire

1.2.1 Les différentes longueurs d’onde

Il faut préciser qu’on va se limiter ici aux propriétés élémentaires du rayonnement électromagnétique, autrement dit la lumière, en considérant soit l’aspect ondulatoire soit l’aspect corpusculaire de la lumière. L’analyse

– la lunette ;



– le télescope,



– le radiotélescope,



– les télescopes spatiaux.



– le spectrographe



FIGURE 1.1: *Les instruments utilisés en astronomie*

de cette lumière s'appelle la spectroscopie. Par exemple la décomposition

de la lumière du Soleil dont le spectre est visible sur la figure 1.2, nous informe sur la température de surface (photosphère) et sur la composition de l'atmosphère du Soleil (chromosphère et couronne).

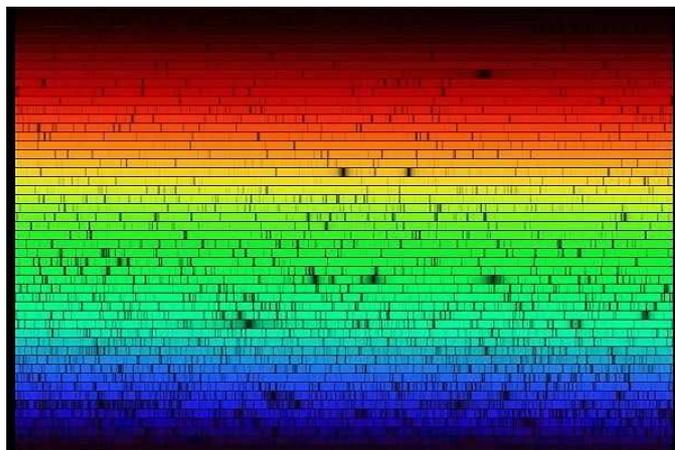


FIGURE 1.2: *Le spectre du Soleil. Crédit : NOAO*

Cependant la figure 1.2 montre la décomposition de la lumière provenant du Soleil dans le domaine des longueurs d'onde visibles à l'œil nu. Hors, la lumière, ou rayonnement électromagnétique, est émise dans un domaine de longueur d'onde beaucoup plus étendu : il y a, vers les petites longueurs d'onde (en deçà du bleu), les rayons gamma, les rayons X, les ultraviolets, et du côté des grandes longueurs d'onde (au delà du rouge), les infra-rouges, les ondes radar et radio.

La table 1.1 montre les différents domaines de longueur d'onde et leurs caractéristiques.

Cependant toutes les longueurs d'ondes venant des astres n'atteignent pas le sol terrestre. En effet, comme le montre la figure 1.3 l'atmosphère a un effet considérable sur l'absorption de certaine longueur d'onde. En particulier elle est un protecteur efficace pour les petites longueurs d'onde qui sont, comme on le verra plus tard, les plus énergétiques donc les plus dangereuses. Cependant l'atmosphère filtre aussi les infra-rouges et les grandes ondes.

L'adaptation de l'homme à son environnement est donc évident. En revanche, il s'avère que pour faire des observations à certaines longueurs d'onde (pour les petites longueurs d'onde en particulier) il est nécessaire d'aller dans l'espace.

	λ	Caractéristiques
Rayons γ	$\lambda < 0,005 \text{ nm}$	rayons émis en masse lors des réactions nucléaires, destructeurs de la vie, arrêtés par l'atmosphère.
Rayons X	$0,005 < \lambda < 20 \text{ nm}$	Rayons très pénétrants, arrêtés par l'atmosphère. Utilisé en médecine.
Ultra-Violets (U.V)	$20 < \lambda < 390 \text{ nm}$	Rayon très énergétiques filtrés par l'atmosphère.
Visibles	$390 < \lambda < 760 \text{ nm}$	L'oeil perçoit une couleur bleue pour les petites longueurs d'onde et rouge pour les grandes.
Infra-rouge (I.R)	$760 \text{ nm} < \lambda < 0,3 \text{ mm}$	Ondes traversant la brume atmosphérique et le gaz interstellaire. Permettant la détection de zones chaudes; applications géographiques et guerrières.
Radio	$0,3 \text{ mm} < \lambda$	Ondes captées avec les radiotélescopes. Les ondes radar ont des longueurs d'onde comprises entre 0,3 mm et 2,5 m.

TABLE 1.1: Les différents domaines de longueurs d'onde et leurs caractéristiques

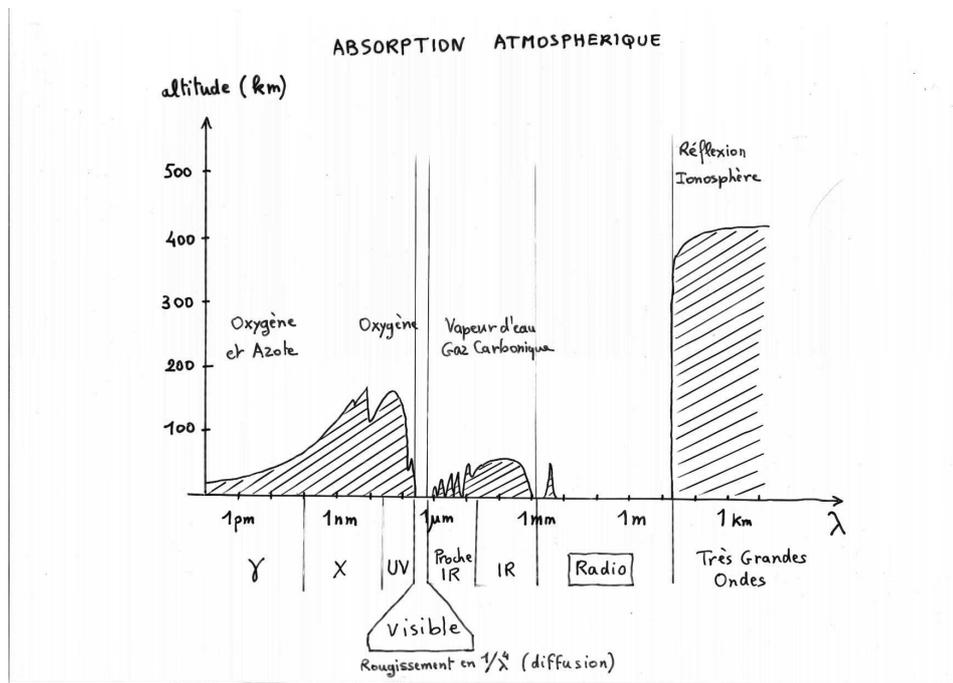


FIGURE 1.3: Crédit : A. Acker 1992

1.2.2 Propagation

Le déplacement de la lumière obéit à plusieurs lois selon la nature du milieu qui reçoit la lumière. On présente ici les propriétés sous leur forme la plus simple, la propagation de la lumière étant un phénomène beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît (voir Feynman ???). Ainsi, les quatre propriétés principales sont :

- dans un milieu homogène la lumière se déplace en ligne droite,
- lorsque la lumière tombe sur un miroir il y a réflexion (fig. 1.4)

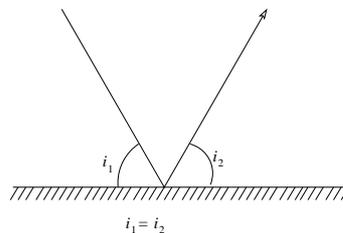


FIGURE 1.4: réflexion

- lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre de nature différente

(on dit d'indice différent) sa direction change, c'est la réfraction. Plus exactement, lorsque la lumière passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 (fig. 1.5), on a :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

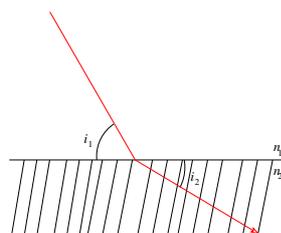


FIGURE 1.5:réfraction

L'indice n d'un milieu dépendant de la longueur d'onde, un faisceau de lumière blanche sera décomposé, les petites longueurs d'onde étant plus déviées que les grandes. C'est le principe du prisme (fig. 1.6)



FIGURE 1.6:Prisme

- enfin la nature ondulatoire de la lumière entraîne des phénomènes d'interférence dus à la déviation de la lumière au bord d'un obstacle. Cette déviation est appelée diffraction. Les interférences dues au bord circulaire d'une lunette (ou d'un télescope) induisent par exemple ce qu'on appelle la tâche d'Airy (Fig. 1.7)

La diffraction induit une limite intrinsèque de précision dans les instruments d'observations. En effet la diffraction fait qu'une étoile devient une tâche d'autant plus grande que l'ouverture de l'instrument est petite et la distance focale est grande.

1.2.3 Les spectres de lumière

Il y a 3 différents types de spectres :

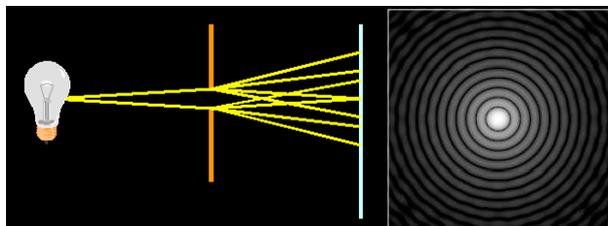


FIGURE 1.7:diffraction

- *le spectre continu* : lorsqu'on décompose la lumière blanche avec un prisme on obtient un spectre continu. Il n'y a pas d'interruption dans les couleurs. Tout corps gazeux ou solide sous haute pression et à haute température donne un spectre continu (Fig. 1.8) ;

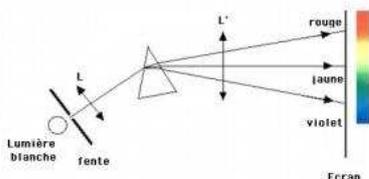


FIGURE 1.8: Spectre continu. crédit : ASM (Observatoire de Paris)

- *le spectre de raies d'émission* : si on analyse la lumière émise par une lampe à vapeur de sodium (gaz peu dense et chaud) avec un prisme on obtient deux raies fines et très intenses dans le jaune. C'est un spectre discontinu caractéristique des atomes du sodium. Chaque élément chimique a un spectre qui le caractérise (Fig. 1.9).

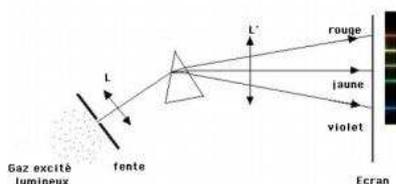


FIGURE 1.9: Spectre continu. crédit : ASM (Observatoire de Paris)

- *le spectre d'absorption* : lorsqu'une lumière blanche passe au travers d'un gaz froid avant un prisme on obtient des raies noires sur le spec-

tre continu de la lumière blanche. C'est un spectre d'absorption. Pour chaque élément chimique, les raies d'absorption se font pour les mêmes longueurs d'onde que les raies d'émission. Un élément absorbe les mêmes radiations qu'il est capable d'émettre.

Exemple : la figure 1.10 montre le spectre de la lumière émise par différentes étoiles, ayant des températures effectives allant de 4000K à 7000K.

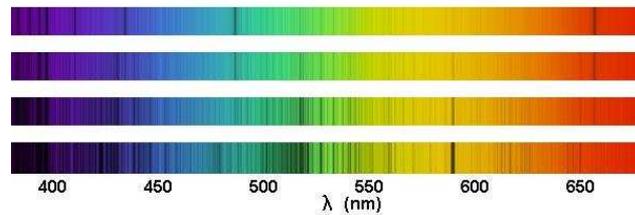


FIGURE 1.10: Exemple de spectre d'absorption pour des étoiles de température allant de 4000 à 7000K crédit : ASM (Observatoire de Paris)

Ces différents spectres sont résumés dans les lois de Kirchoff :

1. un gaz, un solide ou un liquide à pression élevée, si ils sont chauffés, émettent un rayonnement continu qui contient toutes les couleurs,
2. un gaz chaud, à basse pression, émet un rayonnement uniquement pour certaines couleurs bien spécifiques : le spectre de ce gaz présente des raies d'émission,
3. un gaz froid, à basse pression, situé après une source de rayonnement continu, en absorbe certaines couleurs, produisant ainsi un spectre d'absorption.

L'étude de ces spectres a de nombreuses applications : températures des étoiles, composition des atmosphères des étoiles ou des planètes, étude de la matière éjectées des comètes, etc.

1.3 La lumière : phénomène corpusculaire

1.3.1 Rayonnement du corps noir

Il y a un lien entre longueur d'onde et énergie. En effet l'étude du rayonnement électromagnétique ne s'explique pas uniquement suivant une théorie ondulatoire, mais aussi en considérant la lumière comme un courant de corpuscules : les photons. A chaque photon est associé une énergie qui dépend

de sa longueur d'onde (faisant ainsi le lien entre les deux théories), donnée par l'équation de Planck :

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

où $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide et $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ la constante de Planck.

On voit ainsi que les photons les plus énergétiques sont ceux qui ont les plus petites longueurs d'onde. La figure 1.11 montre cette correspondance.

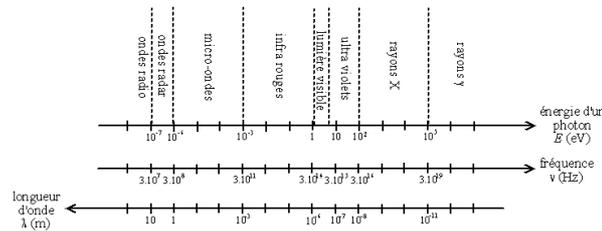


FIGURE 1.11: Correspondance entre longueur d'onde et énergie d'après l'équation de Planck (Eq. 1.1)

Les corps chaud émettent de la lumière. Si on considère un bout de charbon que l'on chauffe du plus en plus, on pourra s'apercevoir qu'il va passer du rouge sombre, au rouge vif, puis orange, jaune, blanc. Il y a donc un lien entre la température d'un corps et la lumière qu'il émet. Pour bien comprendre ce lien, on doit d'abord définir un corps idéal qui se comporte de la même manière pour toutes les longueurs d'onde : un tel corps est appelé *corps noir*. Un corps noir, est un corps qui est capable d'absorber le rayonnement électromagnétique à toutes les longueurs d'onde. Ce sont les corps qui, à température égale, émettent le plus d'énergie sous forme de rayonnement. Une image d'un corps noir est justement un bout de charbon dont la couleur va changer avec la température. On assimile les étoiles à des corps noirs, même si les raies d'absorption sont clairement des signes que ce n'est pas le cas. Cependant, on peut supposer que le spectre continu correspond à l'étoile elle-même qu'on assimile à un corps noir, et les raies d'absorption sont dues à l'atmosphère de l'étoile.

Pour un corps noir le spectre et l'énergie rayonnée pour chaque longueur d'onde ne dépend que de la température. La répartition de l'énergie émise par unité de surface et de temps suivant la longueur d'onde λ est donnée par la loi de Planck :

$$E(\lambda) = \frac{C1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1.2)$$

où λ est donné en cm, T en Kelvin, et avec :

$$\begin{aligned} C_1 &= 2\pi hc^2 = 3,74185 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ C_2 &= \frac{hc}{k_B} = 1,43883 \text{ cm} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

où $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann.

A partir de cette loi on peut déduire les deux lois suivantes :

- **la loi de Stefan** : elle dit que la puissance totale E_0 émise par unité de surface d'un corps noir est proportionnelle à T^4 :

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (1.3)$$

où

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5,67 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$$

est la constante de Stefan.

- **la loi de Wien** : elle donne la longueur λ_m pour laquelle l'émission d'énergie est maximale :

$$\lambda_m T = 2898 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (1.4)$$

La figure 1.12 illustre ces deux lois. En effet, en considérant l'énergie émise en fonction de la longueur d'onde pour des corps noir de différentes températures, la loi de Stefan assure que l'aire entre la courbe et l'axe des abscisses, *i.e.* l'énergie totale, augmente lorsque la température augmente ; tandis que la loi de Wien explique le déplacement vers les petites longueurs d'onde du maximum d'émission de l'énergie lorsque la température augmente (le charbon passe du rouge à l'orange puis au blanc, mais le maximum est dans le bleu, lorsqu'on le chauffe de plus en plus).

1.3.2 Le modèle de Bohr

A quoi correspondent les raies d'absorption ou d'émission observées dans les spectres ? Pourquoi sont elles représentatives des atomes constituant le milieu émetteur ou absorbeur de lumière ? C'est le modèle de Bohr (1913) qui permet de répondre à ces questions. En effet, suivant le modèle planétaire d'Ernest Rutherford (1871-1937) qui décrit l'atome d'hydrogène, les électrons devraient, selon la physique classique, rayonner de l'énergie et finir par s'écraser sur le noyau. Pour remédier à ce scénario Bohr supposa alors qu'il existe certaines orbites où l'électron n'émet pas de rayonnement, devenant ainsi les seules orbites possibles. Ceci arrive chaque fois que le moment de la quantité

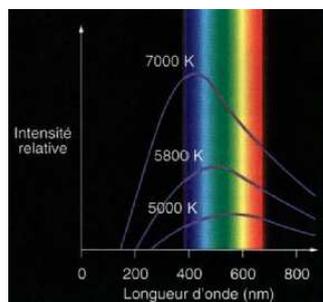


FIGURE 1.12: *Energie émise en fonction de la longueur d'onde pour un corps noir. Les différentes courbes correspondent à différentes températures du corps noir*

de mouvement de l'électron est un multiple entier de $h/2p$ (où h est la constante de Planck) : on numérote par 1, 2, ..., n les trajectoires successives ainsi permises.

Le mot orbite ici n'est pas vraiment approprié. Il permet seulement de mettre une image sur ce qui se passe par analogie avec les planètes. Il est en fait plus rigoureux de parler de niveau d'énergie. Le niveau d'énergie le plus bas, dit niveau fondamental, correspond à l'"orbite" la plus proche du noyau, qui porte le numéro $n = 1$. Plus n est grand, plus l'orbite a un grand rayon et plus l'énergie de l'atome est élevée¹. La valeur de n infinie correspond à une orbite de rayon infini, c'est-à-dire à l'ionisation de l'atome.

Quand un électron passe d'un niveau n à un niveau m plus proche du noyau, il va émettre de l'énergie sous forme de photon dont la longueur d'onde correspond à la différence d'énergie entre les niveaux n et m . Inversement, pour passer du niveau m au niveau n l'électron va absorber un photon dont la longueur d'onde correspond à la différence d'énergie entre les deux niveaux (voir Fig. 1.13).

Ceci explique pourquoi un atome ne peut absorber ou émettre que des quantités d'énergie bien définies, correspondant à des longueurs d'onde précises.

Pour illustrer ce fait, considérons l'atome d'hydrogène. L'atome d'hy-

1. On peut faire l'analogie avec une planète tournant autour du Soleil sur une orbite circulaire. L'énergie totale de la planète correspond à la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle. Comme on le verra plus tard dans le cours (Chap. 4), l'énergie cinétique est positive et décroît vers 0 lorsqu'on s'éloigne du Soleil alors que l'énergie potentielle est négative et augmente vers 0. L'énergie totale va finalement se comporter comme l'énergie potentielle, elle est négative et tend vers 0 lorsqu'on considère des orbites de plus en plus éloignées du Soleil. Ainsi plus une planète se trouve sur une orbite circulaire éloignée du Soleil, plus son énergie est élevée

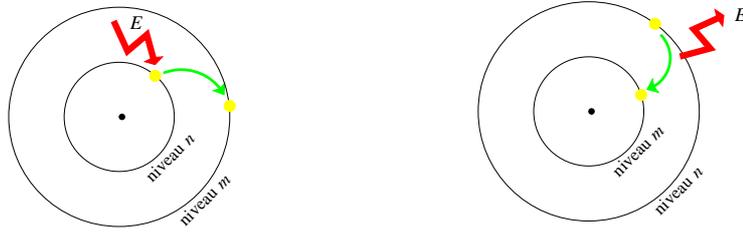


FIGURE 1.13: Absorption (à gauche) et émission d'énergie (à droite) lors d'un changement de niveau d'orbite par un électron.

drogène est le plus simple puisqu'il ne comporte qu'un seul électron. Supposons donc un atome d'hydrogène excité, c'est-à-dire que son électron ne se trouve pas sur l'orbite la plus proche mais sur une orbite plus éloignée.

Lorsque l'électron de l'atome d'hydrogène tombe d'un niveau excité n (orbite loin du noyau) à un niveau de plus basse énergie m (orbite proche du noyau), il y a émission d'un rayonnement qui transporte exactement l'énergie correspondant à la différence d'énergie entre les deux niveaux. La quantité d'énergie émise par l'électron s'écrit donc simplement $|E_m - E_n|$. Du point de vue de l'électron et pour éviter toute confusion, il vaut mieux toujours mettre la valeur absolue et ensuite adapter le signe selon les cas : négatif pour une émission, l'électron se rapproche du noyau, et positif pour une absorption, l'électron s'éloigne. Du point de vue du photon, son énergie est toujours positive, seule son origine diffère : absorption ou émission.

La mécanique quantique montre que pour l'atome d'hydrogène, l'énergie des différents niveaux est définie par l'expression :

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}, \quad (1.5)$$

où n est un entier (il s'agit des différents niveaux), et E_0 l'énergie nécessaire pour ioniser l'atome d'hydrogène à partir de son niveau fondamental, (valeur égale à 13,6 eV pour l'hydrogène).

Le photon ainsi émis a une énergie égale à la différence d'énergie entre les deux orbites soit $|E_n - E_m|$. Cette énergie correspond, par l'équation de Planck ($E = h\nu$), à une onde électromagnétique de fréquence ν bien définie. Le saut d'énergie se manifeste donc par une raie d'émission dans le spectre de l'atome. On a :

$$h\nu = \Delta E = E_m - E_n = E_0 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (1.6)$$

c'est à dire :

$$\frac{1}{\lambda} = R_0 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (1.7)$$

où $R_0 = E_0/hc$ est la constante de Rydberg qui dépend de l'élément considérée.

L'atome d'hydrogène peut aussi absorber de l'énergie, ceci lui permettant de passer d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, par exemple en absorbant un photon. Mais ceci n'est possible que si le photon possède exactement l'énergie nécessaire, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le niveau d'arrivée et le niveau de départ.

Les différents sauts possibles de l'électron entre les différents niveaux ont donné lieu à des séries de raies, chaque série étant associée à un passage d'un niveau n à niveau inférieur fixé m (voir Fig. 1.14). En d'autres termes, une série correspond à toutes les raies d'émission associées aux différentes manières d'arriver à un niveau m à partir d'un niveau plus excité. On a donc les séries suivantes :

- la série de Lyman (L) : passage d'un niveau $n \geq 2$ au niveau fondamental ($m = 1$). L_α correspond au passage du niveau 2 au niveau 1, L_β du niveau 3 au niveau 1, etc. Cette série est émise dans l'U.V pour l'hydrogène.
- la série de Balmer (H) : passage d'un niveau $n \geq 3$ au niveau 2. Seule série émise dans le visible pour l'hydrogène, c'est donc la plus connue ;
- la série de Paschen (P) : passage d'un niveau $n \geq 4$ au niveau 3. Série émise dans l'I.R. pour l'hydrogène ;
- la série de Brackett : passage d'un niveau $n \geq 5$ au niveau 4 ;
- la série de Pfund : passage d'un niveau $n \geq 6$ au niveau 5.

Sur le spectre stellaire de la figure 1.15, on identifie bien un spectre de fond continu dû à l'étoile elle-même assimilée à un corps noir, et dans ce spectre des raies d'absorption, notamment celles correspondant à la série de Balmer de l'hydrogène, venant de l'atmosphère de l'étoile. Le spectre donnant l'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde illustre la loi de Planck pour les corps noir, même si les raies d'absorption déforment notablement le spectre provenant de l'étoile elle-même.

1.4 L'effet Doppler-Fizeau

En générale, les raies d'absorption des spectres des astres observés ne correspondent pas aux raies théoriques obtenues en laboratoire. On observe des décalages entre les raies observées et les raies théoriques. Il peut aussi

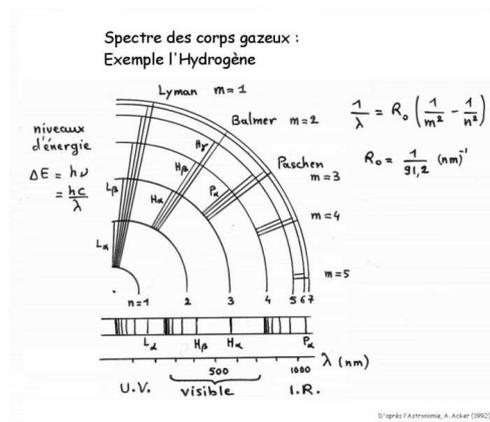


FIGURE 1.14: Illustration des différentes série d'émission de l'atome d'hydrogène.

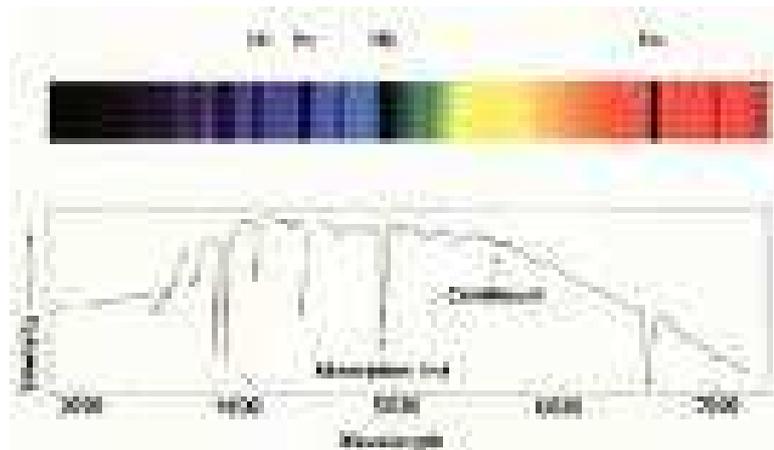


FIGURE 1.15: Spectre d'une étoile. Un spectre de fond continu pouvant être assimilé à un corps noir, sur lequel se superpose des bandes d'absorption correspondant entre autre à la série de Balmer.

exister des dédoublements voire triplement des raies mais on ne parlera ici que des décalages (les doubléments étant dus à l'existence de champs électromagnétiques), qui sont dus, en générale, à l'effet Doppler-Fizeau qui résulte du déplacement entre les astres observés et l'observateur. Nous allons essayer de décrire et de quantifier schématiquement cet effet.

Cet effet s'explique en considérant la lumière comme un phénomène ondulatoire. Il est en autre bien connu, sous le nom d'effet Doppler, pour le son

(qui est aussi un phénomène ondulatoire). En effet chacun a pu s'apercevoir que le son provenant d'une voiture (la source S) se rapprochant de nous (observateur O) va être plus aigu que celui provenant d'une voiture qui s'éloigne. L'effet Doppler est aussi très bien illustré en considérant les vagues à la surface d'un océan. Les vagues correspondent aussi à un phénomène ondulatoire. On peut imaginer que la source S de ces vagues se trouve loin derrière l'horizon. Une barque (l'observateur O) se déplaçant dans le sens des vagues va être moins chahutée qu'une barque allant à la rencontre des vagues.

Dans le cas de la voiture comme dans celui de la barque, lorsqu'il y a un rapprochement entre la source et l'observateur (la voiture se rapproche, la barque va à la rencontre des vagues) il y a une augmentation de la fréquence des ondes perçues qui se traduit par un son plus aigu ou une barque plus agitée par les vagues. Inversement, si la source et l'observateur s'éloignent l'un de l'autre, il y a une diminution de la fréquence qui se traduit par un son plus grave ou une barque moins agitée par les vagues.

Ainsi, pour la voiture comme pour les vagues, on voit qu'un rapprochement ou un éloignement entre l'observateur et la source entraîne un décalage dans les fréquences perçues : les fréquences perçues sont plus grandes que les fréquences émises dans le cas d'un rapprochement (son plus aigu, plus de vagues) ; et inversement elles seront plus petites dans le cas d'un éloignement (son plus grave, moins de vagues).

Pour la lumière l'effet Doppler existe aussi, appelé aussi effet Doppler-Fizeau dans ce cas. Il se traduit par un bleuissement des longueurs d'onde (fréquence plus grande) dans le cas d'un rapprochement et un rougissement (fréquence plus petite) dans le cas d'un éloignement (voir Fig. 1.16).

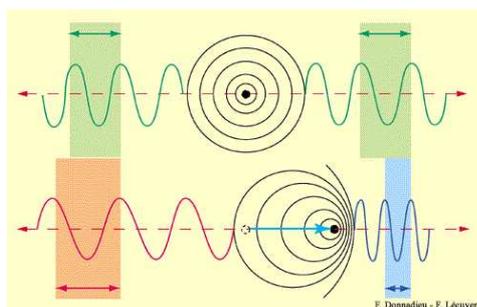


FIGURE 1.16: Effet Doppler-Fizeau pour la lumière : Un rapprochement implique des ondes perçues décalées vers le bleu par rapport aux ondes émises ; un éloignement implique un décalage vers le rouge

La formule que l'on retiendra ici, pour tout mouvement de l'observateur et de la source, est la suivante :

$$\lambda_O \approx \lambda_S \left(1 + \frac{v_r}{c}\right) \quad (1.8)$$

où λ_O est la longueur d'onde perçue mesurée par l'observateur, λ_S est la longueur d'onde émise au niveau de la source, v_r est la vitesse radiale entre la source et l'observateur, comptée positivement dans le cas d'un éloignement et négativement dans le cas d'un rapprochement, et c est la vitesse de la lumière.

Il est très important de retenir que la vitesse v_r qui intervient ici est la vitesse radiale, c'est-à-dire la projection de la vitesse relative entre l'observateur et la source sur la droite qui les rejoint. En effet seuls les rapprochements où les éloignements comptent dans l'effet Doppler. Une voiture qui tourne en rond autour de l'observateur ou une barque qui se déplace parallèlement aux vagues percevra des ondes non affectées par l'effet Doppler.

Ainsi on voit bien que si v_r est négative, donc si la source se rapproche, alors la longueur d'onde perçue va être plus petite que la longueur d'onde émise, ce qui correspond à un bleuissement. Inversement si la source s'éloigne, c'est-à-dire v_r positive, on perçoit un rougissement.

Un des phénomènes les plus spectaculaires observable par l'effet Doppler est l'expansion de l'univers. En effet, la loi de Hubble nous dit que l'univers est en train de s'étendre, ainsi les galaxies s'éloignent les une des autres. Ceci implique que plus une galaxie est lointaine plus elle s'éloigne rapidement de nous, d'où le rougissement des astres lointains observables sur la photo de la figure 1.17. Ceci dit il est vrai que dans ce cas, le décalage de la longueur d'onde est dû à un étirement de l'univers plus qu'à une vitesse d'éloignement. On reparlera plus tard de cet effet.

Une illustration de l'effet Doppler-Fizeau est montré sur la Fig.1.18. On y observe le spectre de l'équateur de Saturne (bande centrale) et de ses anneaux (de part et d'autre de la bande centrale). L'inclinaison des raies d'absorption est reliée à la vitesse de rotation de Saturne sur elle-même. D'autre part, l'inclinaison des raies pour les anneaux montre qu'ils ne forment pas un corps rigide.

Enfin, l'effet Doppler est particulièrement important pour la détection d'exoplanète. En effet un planète tournant autour d'une étoile induit un mouvement de l'étoile autour du barycentre planète-étoile. Ainsi l'étoile va se rapprocher et s'éloigner régulièrement d'un observateur se trouvant éloigné des deux objets mais dans le plan de leur mouvement (on verra dans le chapitre 10 cette méthode un peu plus en détail). Grâce à l'effet Doppler l'observateur peut détecter ce mouvement par un déplacement régulier de certaines raies d'absorption. Ce phénomène est illustré sur la Fig. 1.19.

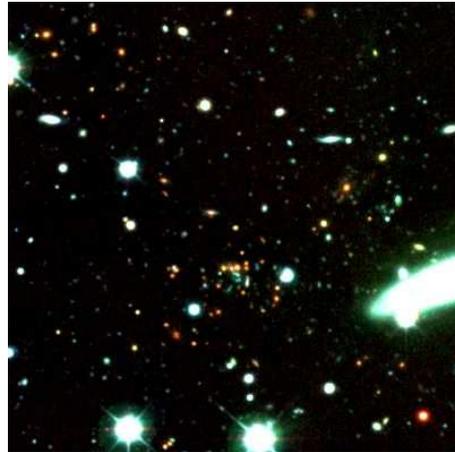


FIGURE 1.17: *Le décalage vers le rouge : plus un point est peu lumineux (plus éloigné) plus il semble rouge.*



FIGURE 1.18: *L'effet Doppler-Fizeau sur la rotation de Saturne et ses anneaux*

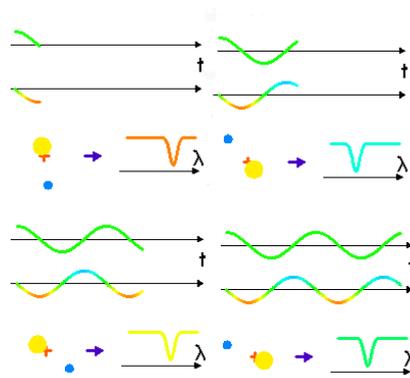


FIGURE 1.19: L'effet Doppler-Fizeau pour une planète extrasolaire. L'étoile et la planète tournent autour de leur centre de gravité. L'observateur, à droite, observe un décalage vers le rouge (l'étoile s'éloigne) ou vers le bleu (l'étoile se rapproche) d'une raie d'absorption se trouvant dans le vert. crédit : ASM/FSU

Chapitre 2

Le Soleil

2.1 Généralité

Le Soleil est l'étoile la plus proche de la terre. Sa distance moyenne (la distance Terre-Soleil varie au cours d'une année) est de 149 595 870 km, qu'on appelle aussi *Unité Astronomique (UA)*.

Une fois la distance Terre-Soleil connue, on peut déterminer :

- connaissant la taille angulaire du Soleil observé depuis la Terre (31'), son diamètre : 1 391 990 km soit plus de 109 fois celui de notre Planète,
- sa masse en utilisant l'équilibre entre la force centrifuge et la force de gravitation appliquées à la Terre, supposée sur une orbite circulaire :

$$\frac{M_{\oplus} v^2}{a} = \frac{G M_{\oplus} M_{\odot}}{a^2} \quad (2.1)$$

où, v est la vitesse de révolution de la Terre, a est la distance Terre-Soleil, M_{\oplus} et M_{\odot} les masses de la Terre et du Soleil respectivement, et G la constante universelle de la gravitation. On trouve ainsi $M_{\odot} = 1,99 \times 10^{30}$ kg, soit 333 000 fois la masse de la Terre,

- sa densité moyenne : 1,41 g.cm⁻³ soit 1/4 celle de la Terre.

La masse du Soleil se répartie en 73% d'hydrogène, 25% d'Hélium, 0,8% de Carbone et 61 autres éléments (1,2% restant). Ces éléments sont détectés essentiellement par leur spectre d'absorption (voit Figure 2.1) identifié dans la lumière émise par le Soleil (notamment les raies du fer et du Calcium).

La masse du Soleil représente 999/1000 de la masse totale du système solaire. De ce fait le Soleil conditionne le mouvement des corps tournant autour de lui comme les planètes, les astéroïdes, les comètes, etc. Son influence est dominante jusqu'à 200 000 UA (au-delà le cœur de la galaxie domine).

Le Soleil tourne autour du centre de la Galaxie à une vitesse de 250 km/s avec le groupe d'étoiles voisin.

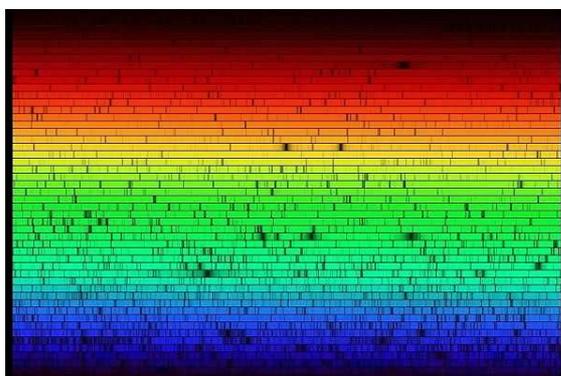


FIGURE 2.1: Spectre de la lumière émise par le Soleil

Le Soleil	
Masse	2×10^{30} kilogrammes = 335.000 masses terrestres
Diamètre	1.4 million kilomètres = 109 diamètres terrestres
Densité	$1\,400 \text{ kg.m}^{-3}$ (eau = $1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$)
Âge approximativement	4 600 millions d'années
Luminosité	
énergie produite	4×10^{23} kilowatts
Température de surface	environ $5\,500^\circ$ ($5\,800 \text{ K}$)
Température centrale	environ 14 millions de degrés
Composition	
Par la masse atomique	74.5% hydrogène, 23.5% hélium, éléments plus lourds
	2%, par exemple oxygène, carbone et azote
Par le nombre d'atomes	94 % d'hydrogène, 6% d'hélium et éléments plus lourds

FIGURE 2.2: Les données physiques du soleil

Le Soleil est animé d'une rotation autour d'un axe incliné de $82^\circ 48' 30''$ sur le plan de l'écliptique, c'est à dire le plan de l'orbite terrestre. Cette rotation est différentielle, plus rapide à l'équateur (25 jours) que dans les hautes latitudes (35 jours). Le Soleil n'est donc pas un corps solide, c'est un corps fluide. Cette caractéristique est connue depuis longtemps grâce à l'observation des tâches solaires. Ce n'est pas non plus un corps gazeux, ou liquide, c'est ce qu'on appelle un plasma, c'est à dire un fluide ionisé. C'est donc un fluide qui réagit en présence de champs électrique ou magnétique.

2.2 La structure externe

La partie observable du Soleil se décompose en trois couches :

- la photosphère (« surface » du Soleil),
- la chromosphère,
- la couronne.

Ces 3 parties définissent l'atmosphère du Soleil.

La photosphère

C'est la photosphère qui est responsable du rayonnement de type « corps noir » du spectre du Soleil. C'est une couche gazeuse de 300 km d'épaisseur à 5 700 K.

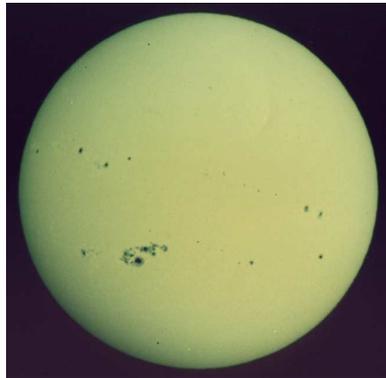


FIGURE 2.3: La photosphère du Soleil

Loin d'être uniforme (voir Figure 2.3), la photosphère est un lieu de bouillonnement permanent où se produisent les tâches solaires (voir Figure 2.4). Les tâches solaires correspondent à des zones plus froides où la température n'est que de 4 500 K. Ces tâches sont liées à des anomalies du champ magnétique solaire qui se produisent suivant un cycle de 11 ans (voir la section 2.5). Les tâches se forment et évoluent jusqu'à disparaître en quelques mois.

Les tâches sont le siège d'éruptions qui peuvent projeter de la matière à plusieurs dizaines de milliers de km au dessus de sa surface, ce sont les protubérances (voir la Figure 2.5

La chromosphère

La chromosphère est une couche de quelques milliers de kilomètres d'épaisseur pratiquement transparente et est responsable des raies d'absorption observ-

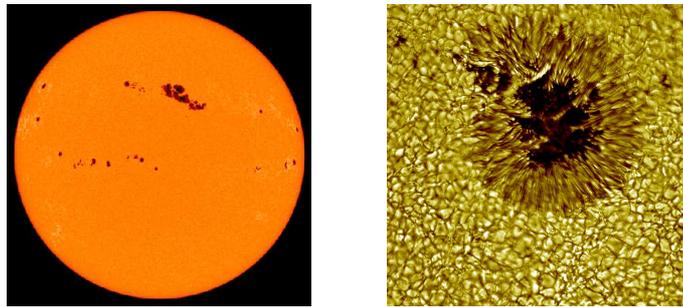


FIGURE 2.4: Les taches solaires Crédit : SOHO

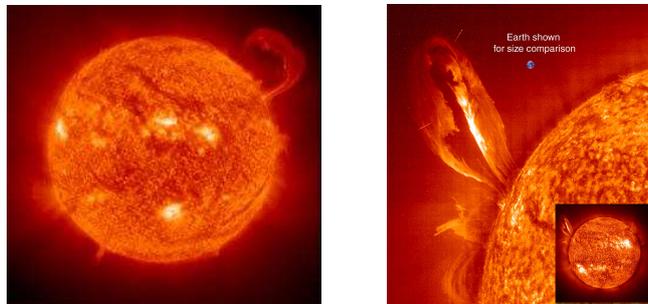


FIGURE 2.5: Les taches solaires Crédit : SOHO

ables sur le spectre continu du Soleil. Ceci a permis, entre autre, de découvrir un nouvel élément : l'Hélium à qui une raie dans le jaune fut attribuée (1868). On peut aussi observer la chromosphère en émission au cours d'éclipses (naturelles ou artificielles). La raie d'émission la plus intense est la raie H_{α} (à 656 nm) ce qui explique la couleur rouge de la chromosphère (voir Figure 2.6).

La température de la chromosphère est de l'ordre de 10 000 K. Son épaisseur varie en raison des spicules, qui sont des jets de gaz chromosphérique d'une durée de vie de 10 mn mais qui peuvent atteindre 10 000 km.

La Figure 2.7 montre différentes phases d'activité du Soleil.

La couronne

La dernière couche est la couronne, qui se trouve au dessus de la transition mouvante où se trouvent les spicules. Elle émet peu de lumière visible (elle n'est visible que pendant les éclipses), mais est une source importante de rayons X. Ce qui fait que la température de la couronne est de l'ordre de 10^6 K. Ceci peut s'expliquer du fait que la couronne a une densité proche de

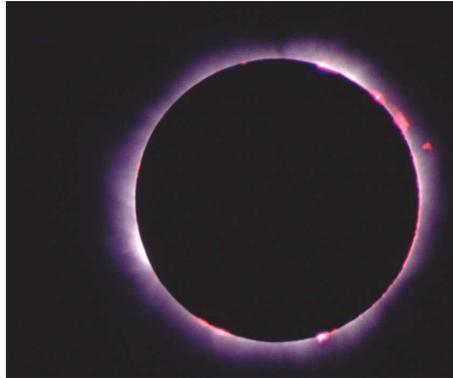


FIGURE 2.6: La photosphère du Soleil

celle du vide, et que les quelques particules qui s'y trouvent ont des vitesses très élevées.

La couronne n'a pas de limite externe. Elle est le lieu d'expression du vent solaire. Le vent solaire est lié à la perte de masse du soleil et varie avec l'activité magnétique solaire (voir Fig. 2.8). Il est plus intense quand les taches sont les plus nombreuses, et est responsable des aurores boréales qui sont dues à la collision entre les particules du vent solaire et la haute atmosphère terrestre. Le vent solaire est dévié par la magnétosphère terrestre ce qui rend les aurores boréales possibles seulement près des pôles. L'existence du vent solaire est aussi prouvée par la direction des queues cométaires opposée au Soleil (voir Fig. 2.9).

2.3 La structure interne

La structure interne du Soleil n'est pas observable directement. Elle est déduite de nos connaissances théoriques sur les réactions du noyau et de telle sorte à ce que les observations finales soient satisfaites (voir la figure 2.10 pour un schéma de la structure interne du Soleil).

Il est important de retenir que l'intérieur Soleil est un environnement en équilibre, c'est-à-dire que les différentes forces de pressions (radiatives ou gravitationnelles) s'équilibrent de telle sorte que la structure interne du Soleil reste stable sur de grandes échelles de temps.

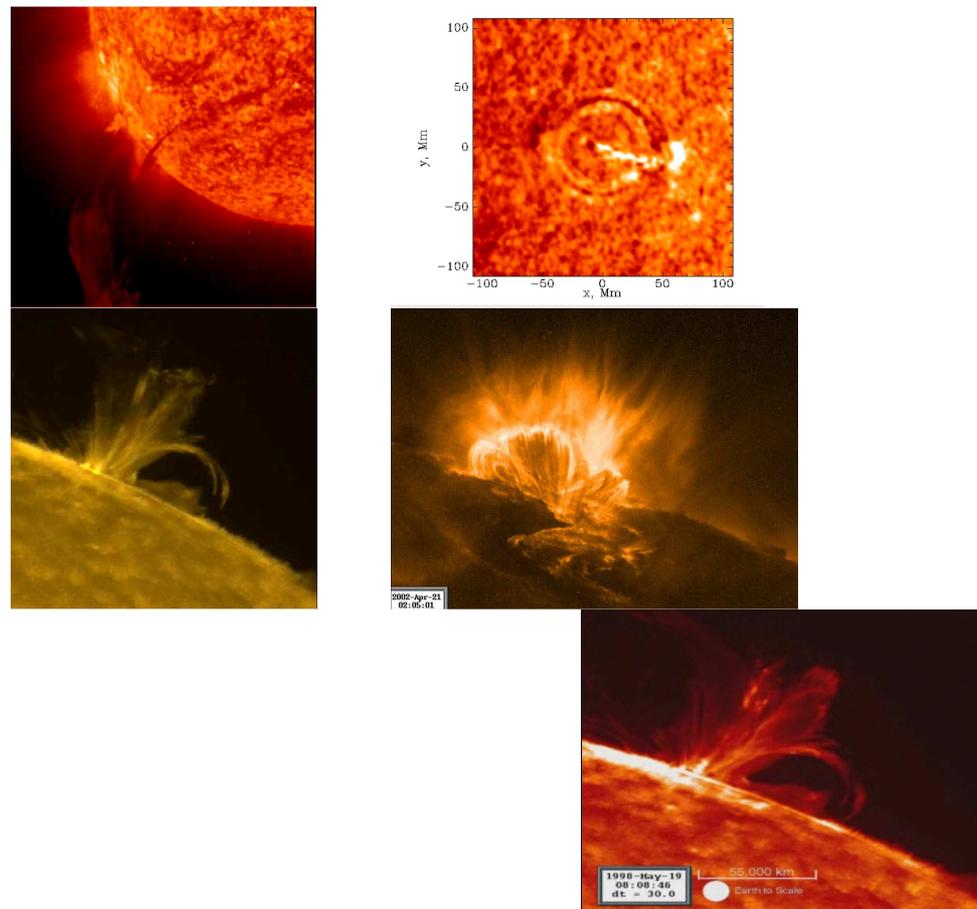


FIGURE 2.7: De gauche à droite et de bas en haut : protubérance (SOHO), onde sismique (SOHO), spicules et pluies (TRACE) spicule et éruption (TRACE)

Cœur nucléaire

Le Soleil est formé d'un *cœur nucléaire* où la température s'élève jusqu'à 15 million de Kelvin. En supposant le centre du Soleil comme un gaz parfait, et connaissant sa masse et sa composition on peut en déduire la pression interne et donc la température. La taille du noyau est de $0,3R_{\odot}$ (où R_{\odot} est le rayon du Soleil). C'est la région où est produite l'énergie solaire.

Couche radiative

A partir du cœur l'énergie est transportée sous forme de rayonnement vers les zones externes. Ce rayonnement engendre ainsi une pression de radiation. Cette pression contrebalance les forces de gravitation, empêchant les

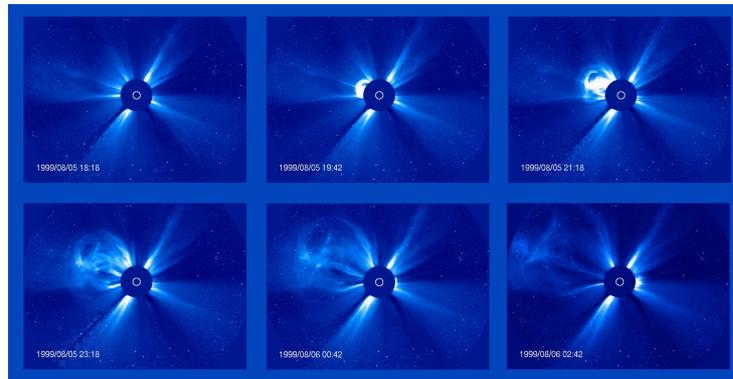


FIGURE 2.8: La couronne : ejection de masse coronale sur une période de huit heures liée à l'activité solaire crédit : SOHO

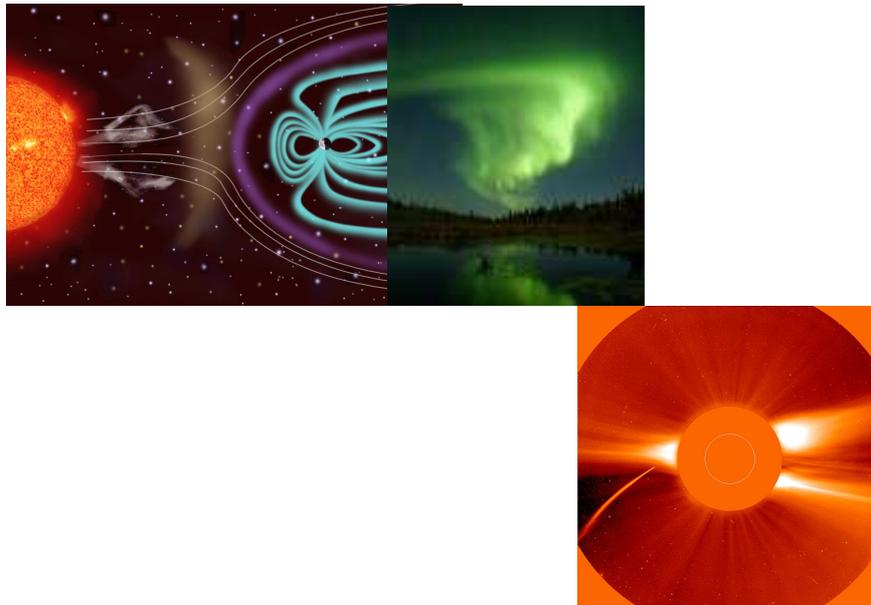


FIGURE 2.9: En haut à gauche : la magnétosphère terrestre protège la Terre du vent solaire (crédit : SOHO/ESA/NASA), en haut à droite : une aurore boréale (crédit : Nori Sakamoto), en bas : une comète vue par SOHO (crédit : SOHO)

couches externes du Soleil de s'effondrer vers le centre. Le Soleil est ainsi un machine en équilibre. Le rayonnement passe du cœur nucléaire à une région dite *radiative*. Dans cette région, l'énergie est transportée par les photons qui se fraient un chemin au milieu de la matière constituant cette couche. Cette

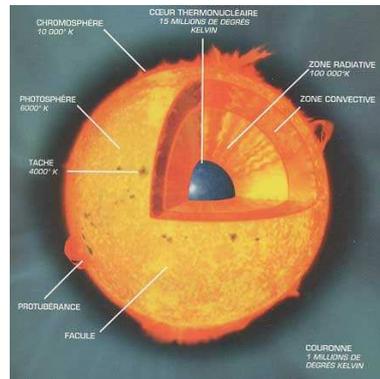


FIGURE 2.10: Structure interne du soleil crédit : Terra Nova

région va de $0,3$ à $0,7 R_{\odot}$, et les photons mettent à peu près $200\,000$ ans à la traverser. La température dans cette région va de 7 à 1 million de degrés.

Couche convective

Ensuite se trouve une région dite *convective* où le milieu est trop opaque, du à la baisse de température, pour permettre le transport par radiation. Ainsi l'accumulation au bord de cette région fini par créer des *courants de convection* qui vont finalement permettre à l'énergie de rejoindre la photosphère en 2 mois. Le rayonnement se fait essentiellement dans le visible est culmine vers 550 nm , correspondant à une température de $5\,760\text{ K}$. Ces tourbillons de convection sont responsables de la granulation visible à la surface du Soleil (voir Fig. 2.11).

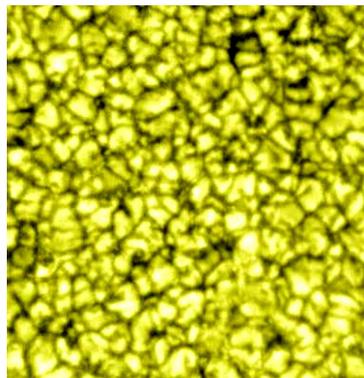


FIGURE 2.11: Granulation à la surface du Soleil vue depuis le Pic du Midi

2.4 L'énergie solaire

Plus on va vers le centre du Soleil, plus la pression et la température augmentent. Ainsi c'est au cœur nucléaire du Soleil qu'est produite son énergie. Cette énergie comme on l'a vue est renvoyée à l'extérieur du Soleil après avoir traversé les zones radiative et convective. A une distance d'1 UA, le Soleil envoie une énergie de $C_{\odot} = 1\,360 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ hors atmosphère. C'est la *constante solaire*. Donc l'énergie totale que le Soleil rayonne dans l'espace est de :

$$L_{\odot} = C_{\odot} 4\pi a^2 = 3,826 \times 10^{26} \text{ W}. \quad (2.2)$$

L_{\odot} est appelé la *luminosité solaire*. Donc par année le Soleil produit une énergie égale à $12 \times 10^{33} \text{ J}\cdot\text{an}^{-1}$.

Le problème de la durée de vie du Soleil a longtemps perturbé les astronomes. En effet, pendant longtemps on ne connaissait pas de mécanisme de production d'énergie suffisamment efficace pour produire une telle quantité d'énergie sur une période suffisamment longue pour permettre au moins le développement de la vie. Il a fallu attendre la fameuse équation d'Einstein $\Delta E = \Delta m c^2$ pour comprendre qu'une telle énergie était disponible sur une période assez longue.

En effet, l'énergie solaire provient d'une fusion nucléaire où 4 noyaux d'hydrogène fusionnent pour former un noyau d'hélium. La masse des 4 noyaux d'hydrogène est de $4 m_p$ alors que celle du noyau d'hélium est de $3,9726 m_p$. Ainsi, si 4 kg d'hydrogène fusionnent alors 3,9726 kg d'hélium sont créés, c'est à dire que 0,0274 kg se sont transformés en énergie.

En utilisant la relation d'Einstein on trouve qu'un kg d'hydrogène fournit $6,16 \times 10^{14} \text{ J}$. Donc pour une année le Soleil va avoir besoin de $2 \times 10^{19} \text{ kg}$ d'hydrogène. Le Soleil est constitué à plus de 70% d'hydrogène, mais seul les 15% d'hydrogène présent dans le noyau seront consommés, ainsi la masse d'hydrogène à disposition est de $2 \times 10^{29} \text{ kg}$. Ainsi on voit que cette masse d'hydrogène à disposition permet de fournir de l'énergie pendant 10 milliards d'années (comme le Soleil a « déjà » 5 milliards d'années il n'en reste « plus que » pour 5 milliard d'années).

2.5 Le cycle solaire

Le nombre de tâches augmente et décroît suivant un cycle périodique moyen de 11 ans (voir Figure 2.12). Il peut varier comme parfois disparaître, ce qui arriva entre 1645 et 1715.

Les tâches du Soleil sont reliées au champ magnétique solaire. Une étude des raies d'absorption localisées sur une tâche montre que le champ magnétique

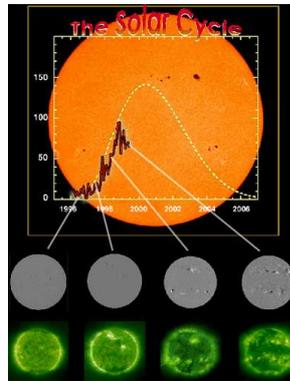


FIGURE 2.12: *Cycle solaire* crédit : SOHO

au niveau des tâches est 500 fois supérieur à celui du Soleil dans son ensemble (effet Zeeman, voir la Figure 2.13).

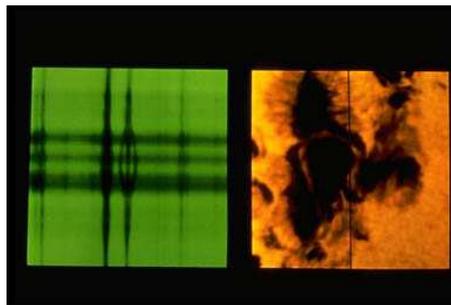


FIGURE 2.13: *Effet Zeeman sur une tâche solaire* crédit : NOAO

Il est supposé que ce cycle est une conséquence de la rotation différentielle sur le champ magnétique. Le champ magnétique produit par les courants de particules chargées à l'intérieur du Soleil est enroulé par la rotation différentielle (voir figure 2.14). Tous les 11 ans environ l'enroulement est tel que le champ devient chaotique et se morcelle. Il fini ensuite par se stabiliser de nouveau pour recommencer un autre cycle, à la différence que les pôles magnétiques du Soleil se sont inversés.

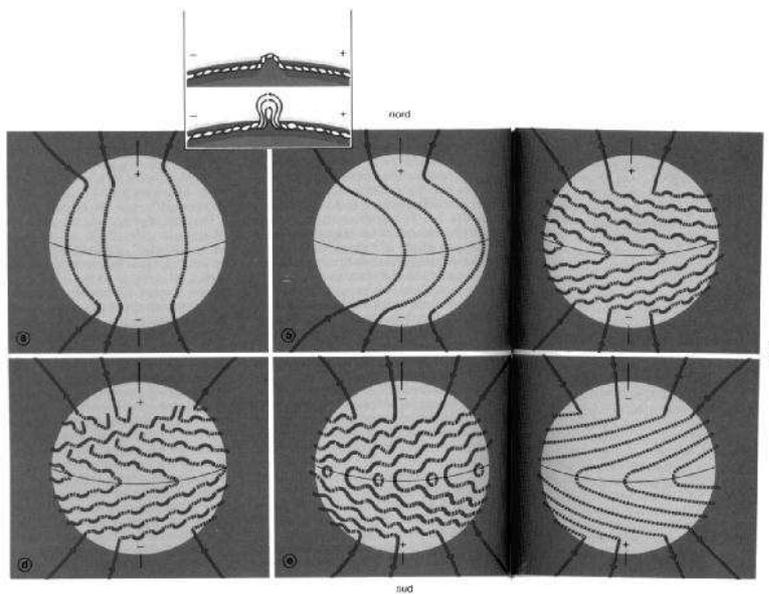


FIGURE 2.14: La rotation différentielle du Soleil est responsable de la déformation des lignes de champ magnétique.

Chapitre 3

Description du système Solaire

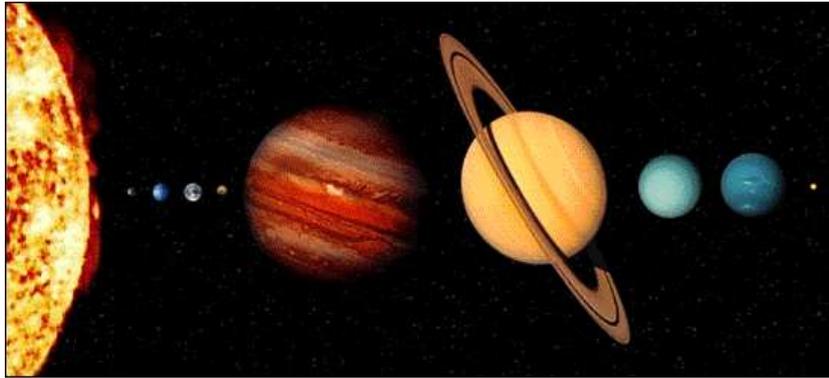


FIGURE 3.1: *Le Soleil et les planètes du système solaire (Mercure, Venus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune + Pluton) en taille relative.*

3.1 Généralités

Le système solaire est le domaine entourant le Soleil dans lequel son influence gravitationnelle est prépondérante sur celle des étoiles les plus proches et surtout du centre galactique. Il correspond sensiblement à une sphère de 200 000 UA de rayon, centrée sur le Soleil et contenant des planètes et leurs satellites, des comètes, des astéroïdes et des poussières interplanétaires.

Le mouvement des différents objets autour du Soleil se fait sur des orbites elliptiques. Lorsqu'on étudie les objets du système solaire, et en particulier leur mouvement, on utilise un repère qui est lié à l'orbite de la Terre à

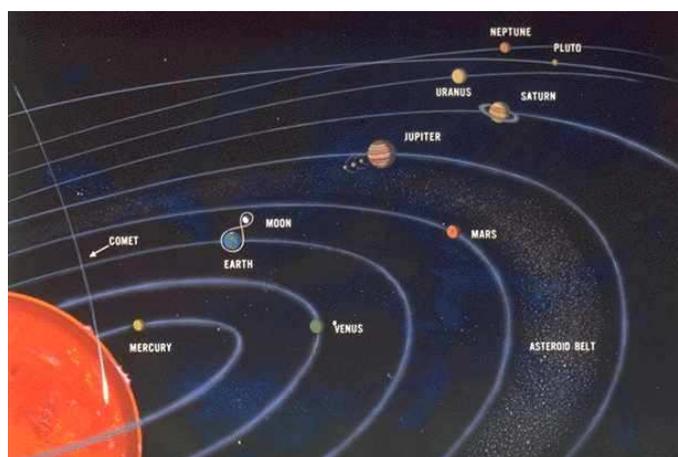


FIGURE 3.2: Schémas du système solaire

crédit : IMP/CNRS.

une époque donnée (souvent 1er Janvier 2000, appelé aussi J2000). dans ces conditions une orbite est définie par 5 paramètres (voir Fig. 3.3) :

- 2 paramètres de forme :
 - a : appelé *demi-grand axe*, défini la taille de l'orbite,
 - e : appelé *excentricité*, défini l'allongement de l'orbite,
- 3 paramètres de position :
 - i : appelé *inclinaison*, défini l'inclinaison du plan de l'orbite par rapport au plan de l'orbite de la Terre (*plan de l'écliptique*),
 - Ω : appelé *longitude du noeud ascendant*, défini la position à laquelle l'objet coupe le plan de l'orbite de la Terre en passant du Sud au Nord,
 - ω : appelé *longitude du périhélie* (le *périhélie* est le point de l'orbite le plus proche du Soleil, le point le plus éloigné s'appelle *aphélie*), défini la position du périhélie sur son plan par rapport au noeud ascendant.

Enfin, le corps est repéré sur son orbite par un angle f appelé *anomalie vraie* (angle entre l'objet et le périhélie).

3.2 Les planètes du systèmes solaire

Le mot planètes vient du grec “planêtês” qui signifie “astres errants”. En effet dès l'antiquité une observation attentive du Ciel permettait de voir que tous les points lumineux du ciel étaient fixes sauf 7 : la Lune, Mars, Mercure, Jupiter, Venus, Saturne et le Soleil. Non seulement ces points n'étaient pas fixes mais leur mouvement était régulier et périodique.

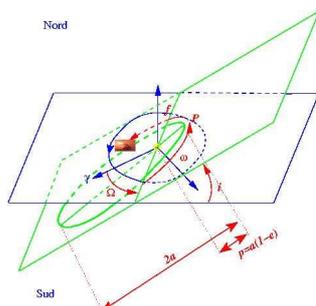


FIGURE 3.3: Eléments orbitaux d'un objet du système solaire

Bien qu'Uranus soit visible à l'oeil nu, sa luminosité était trop faible pour lui permettre de rejoindre le groupe de planètes connues. D'autre part, son faible mouvement apparent a fait qu'Uranus a longtemps été considérée comme une étoile. Ce n'est que le 13 mars 1781 que William Herschel annonce sa découverte en tant que planète à l'aide d'un télescope. Uranus devint la 7ème planète du système solaire (l'héliocentrisme étant passé par là). L'étude de son mouvement montra des irrégularités. La mécanique céleste née depuis le principe de la gravitation universelle établi par Newton (1643-1727), permis à Urbain Le Verrier de montrer en 1845, qu'il devait exister une 8ème planète au-delà d'Uranus et il pu même déterminer l'endroit du ciel où la planète devait se trouver. Ainsi Neptune fu découverte, devenant un des premiers grand succès de la mécanique céleste.

Cependant Neptune aussi avait un mouvement qui ne correspondait pas à ce que la théorie prévoyait : on pensa donc à une nouvelle planète. L'acharnement des observateurs leur permis de découvrir finalement Pluton (en 1930 par Clyde Tombaugh). Cependant, en 1978 la découverte de Charon, satellite de Pluton, permis de calculer la masse de Pluton, et montra ainsi que Pluton était trop peu massive pour affecter le mouvement de Neptune. Ce n'est finalement qu'un réajustement des masses des planètes qui permis de résoudre le problème du mouvement de Neptune.

Plus proche du Soleil, le mouvement du périhélie de Mercure posait aussi un problème et ne pouvait être expliqué par l'influence des autres planètes. On supposa alors l'existence d'une planète plus proche encore du Soleil que Mercure et qui devait être pratiquement inobservable. Cette planète, bien que jamais observée pris le nom de Vulcin. En 1916, ce fut finalement les limites de la mécanique céleste qui permirent de résoudre le problème. En effet, l'avancement du périhélie de Mercure s'explique très bien dans le cadre de la relativité générale.

Ainsi, près du Soleil, jusqu'à une trentaine d'unités astronomiques, le système solaire comporte essentiellement 8 planètes qui tournent toutes dans le même sens autour du Soleil sur des orbites quasi-circulaires et quasi-coplanaires. Ces 8 planètes sont classées en deux groupes :

- 4 planètes dites *telluriques*, dans l'ordre d'éloignement au Soleil : Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Leur densité moyenne est élevée (de 3,96 à 5,52) mais étant très petites, ce sont des planètes peu massives ; elles possèdent toutes une surface solide ou croûte, recouvrant un manteau de silicates et un noyau de fer, mais, sauf pour la Terre, on ne connaît pas bien leur extension ni leur état.
- 4 planètes *gazeuses* ou planètes *géantes* : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, qui ont une densité moyenne faible (de 0,7 à 1,5), mais à l'inverse des planètes telluriques, elles sont de très grande taille donc elles sont massives ; elles sont formées essentiellement d'hydrogène et d'hélium, comme le Soleil. Elles ne possèdent pas de surface solide. Leur atmosphère est marquée par la présence de nuages plus ou moins colorés par des molécules carbonées ou azotées. Ces 4 planètes ont aussi la particularité d'être entourées d'un système d'anneaux plus ou moins complexe, ainsi que de nombreux satellites.

Planète	a	R	P	T	densité	masse	i	e
Planète	(UA)	(km)	(année)	(sideral)	(g.cm ⁻³)	(M_{\oplus})	(°)	
Mercure	0,39	2 440	0,24	58j16h	5,13	0,056	7,00°	0,206
Venus	0,72	6 052	0,62	-243j	4,97	0,817	3,39°	0,007
Terre	1,00	6 378	1	23,93h	5,52	1	0,00°	0,017
Mars	1,52	3 397	1,88	24,62h	3,94	0,108	1,85°	0,093
Jupiter	5,20	71 492	11,86	9,92h	1,33	318	1,30°	0,048
Saturne	9,54	60 268	29,46	10,65h	0,69	95,2	2,49°	0,054
Uranus	19,19	25 559	84,01	-17,24h	1,56	14,6	0,77°	0,047
Neptune	30,07	24 764	164,79	16,11h	2,27	17,3	1,77°	0,000
(Pluton)	39,48	1 151	247,69	-152,29h	2	0,002	17,14°	0,249

FIGURE 3.4: Les planètes en chiffres. a : demi grand-axe, R : rayon, P : période autour du Soleil, T : période de rotation, i : inclinaison par rapport à l'écliptique, e : excentricité.

On va maintenant décrire succinctement les planètes.

Mercure

Petite planète très proche du Soleil, elle n'avait été visitée que par la sonde Mariner 10 en 1974 (voir Fig. 3.5), mais récemment la sonde Messenger est

allée se positionner sur une orbite autour de Mercure afin de pouvoir étudier entre autre l'intérieur de la planète. Mercure n'a pas d'atmosphère et montre une surface complètement cratérisée, cicatrices des multitudes d'impacts météoritiques subis lors de sa formation et qui subsistent encore en l'absence d'érosion.

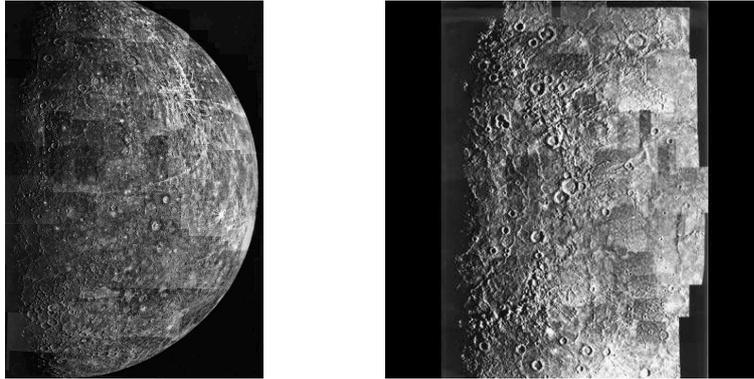


FIGURE 3.5: Mercure vue par Mariner 10. A droite, le basin Caloris crédit : NASA

Mercure tourne très lentement sur elle-même (en 58,66 jours terrestres), mais cette période, combinée avec la période orbitale de 88 jours, donne une durée du jour mercurien égale à 176 jours. De cette durée et de la proximité du Soleil, les températures sont très contrastées : de $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ la nuit à $+430\text{ }^{\circ}\text{C}$ le jour. L'équateur de mercure est très incliné par rapport à son plan orbital.

Vénus

De taille comparable à la Terre, Vénus a une atmosphère très dense et très étendue contenant 96% de gaz carbonique et 3,5% d'azote et donnant une pression énorme de 93 bars au niveau du sol ; elle est surmontée de nuages élevés d'acide sulfurique ; le gaz carbonique provoque un effet de serre intense qui porte à $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ la température au sol ! Ce dernier n'est pas observable directement, caché en permanence par les nuages. Malgré ces conditions extrêmes, le sol de Vénus a été atteint par plusieurs sondes russes de la série Venera vers 1980, qui ont renvoyé des images d'un sol caillouteux. Le relief de Vénus a aussi été cartographié par un radar satellisé (sonde Magellan, voir Fig. 3.6) en 1990, montrant en particulier des volcans apparemment non actifs actuellement, avec des dômes et des coulées de laves basaltiques, et aussi des grands cratères d'impact. A l'occasion de cette cartographie on a

pu aussi établir que la rotation du sol de Vénus s'effectue en 243 jours alors que la circulation nuageuse montre une période de rotation de 4 jours (ces 2 rotations s'effectuent paradoxalement dans le sens opposé au mouvement orbital). En 2005 la sonde Venus-express a été envoyée vers Venus.

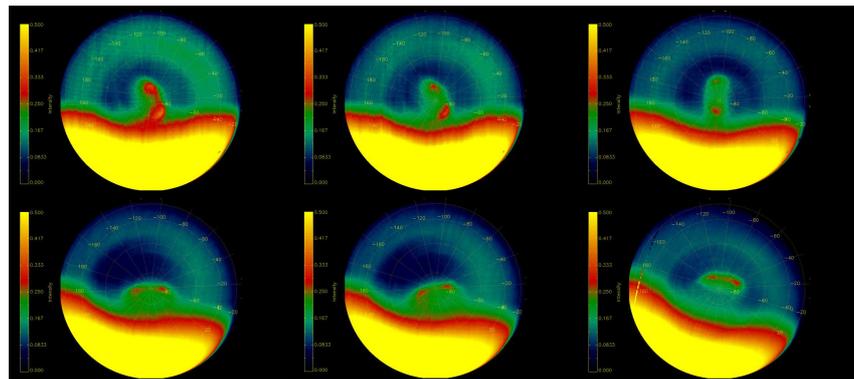


FIGURE 3.6: En haut : Venus vue par un radar de la sonde Magellan (crédit : NASA); en bas : le vortex au pôle sud de Venus vue par la sonde Venus Express (crédit : ESA)

La Terre

Les caractéristiques internes sont supposées suffisamment connues pour ne pas être rappelées ici, elle se distingue cependant par le fait qu'elle semble être la seule planète du système solaire à posséder en permanence à sa surface de l'eau sous forme liquide, avec une atmosphère moyennement dense composée essentiellement d'azote et d'oxygène. Son satellite naturel, la Lune, est un petit corps comparable à la planète Mercure, dépourvu comme lui d'atmosphère, et présentant un sol complètement cratérisé. La Lune tourne

sur elle-même dans le même temps qu'elle tourne autour de la Terre (rotation synchrone en 27,3 jours), présentant ainsi toujours la même face vers la Terre. La face visible est caractérisée par des grands bassins sombres entourés de zones plus claires montagneuses et fortement cratérisées; ces bassins, appelés mers, sont en fait d'anciens cratères d'impact, gigantesques, qui se sont formés il y a plus de 3,5 milliards d'années et submergés alors d'une lave basaltique maintenant recouverte d'une épaisse couche de poussières. La face cachée possède paradoxalement très peu de mers.



FIGURE 3.7: *La Terre et la Lune* crédit : NASA

La Lune est aussi responsable des marées. En fait ce phénomène s'explique par une différence de la force d'attraction de la Lune de part et d'autre de la Terre : la résultante de la force centrifuge et la force gravitationnelle due à la Lune en deux points de la Terre diamétralement opposé va avoir des amplitudes différentes, engendrant une déformation de la Terre (voir Fig. 3.8).

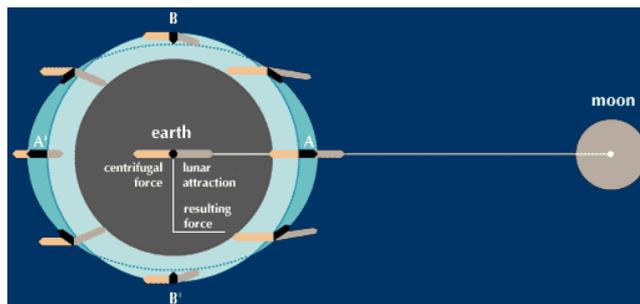


FIGURE 3.8: *Force de marée dues à la Lune.*

De plus la Terre tourne sur elle-même ce qui va engendré une déformation continue du globe terrestre, le bourrelet dû à la marée va être en avance sur la position de la Lune (la Terre tourne plus vite sur elle-même que la Lune

tourne autour de la Terre), ainsi la Lune va aussi exercer une force de rappel conduisant à un ralentissement de la rotation de la Terre et à un éloignement de la Lune par rapport à la Terre.

Mars

Deux fois plus petite que la Terre, elle a une atmosphère composée de 95,3% de gaz carbonique, de 2,7% d'azote et un peu d'argon, mais sa pression au sol est très faible (7 millibars); elle est suffisante quand même pour que des tempêtes soulèvent et déplacent parfois des nuages de sable. Sa rotation sur elle-même en 24,5 heures autour d'un axe incliné de 25 ressemble à celle de la Terre, produisant des saisons analogues mais durant chacune 6 mois environ. Néanmoins, la température à l'équateur varie quotidiennement entre 0 et -70 C. Le sol est criblé de cratères météoritiques mais on y voit aussi plusieurs grands volcans non actifs, dont Olympus mons : le plus grand volcan du système solaire. Des canyons montrent des traces d'écoulements anciens et des zones d'effondrement qui indiquent que de l'eau gelée existe en grande quantité dans le sous-sol, ces effondrements pouvant être provoqués par un dégel épisodique. Des calottes polaires faites de givre de CO₂ croissent et décroissent au rythme des saisons. Plusieurs missions (Viking en 1976, Pathfinder en 1996) ont révélé un sol de sable parsemé de cailloux rougâtres composés notamment d'oxydes de fer. 2 petits satellites, Phobos et Deimos, tournent autour de Mars, probablement issus de la ceinture d'astéroïdes que l'on verra plus loin.

Jupiter

C'est un astre énorme, 318 fois plus massif que la Terre. C'est une planète dont l'influence gravitationnelle est non négligeable sur toutes les autres planètes et sur le Soleil. Elle tourne sur elle-même en moins de 10 heures, cette rotation étant différentielle : plus lente aux pôles qu'à l'équateur. La circulation atmosphérique de Jupiter est complexe, montrant notamment un énorme cyclone permanent de près de 15 000 km de diamètre (appelé "la grande tache rouge"), probablement lié à l'action intense du champ magnétique jovien; celui-ci crée une magnétosphère immense s'étendant sur près de 7 millions de km et est à l'origine aussi d'un puissant rayonnement radio. Jupiter a en outre la particularité d'émettre d'avantage d'énergie rayonnante qu'il n'en reçoit du Soleil; peut-être Jupiter est-il encore en train de se contracter (au rythme de 1mm/an?). Enfin, Jupiter est entourée d'une trentaine de satellites, dont 4 gros découverts par Galilée en 1610 et appelés depuis "satellites galiléens" : ce sont Io, Europe, Ganymède (le plus gros satellite du système

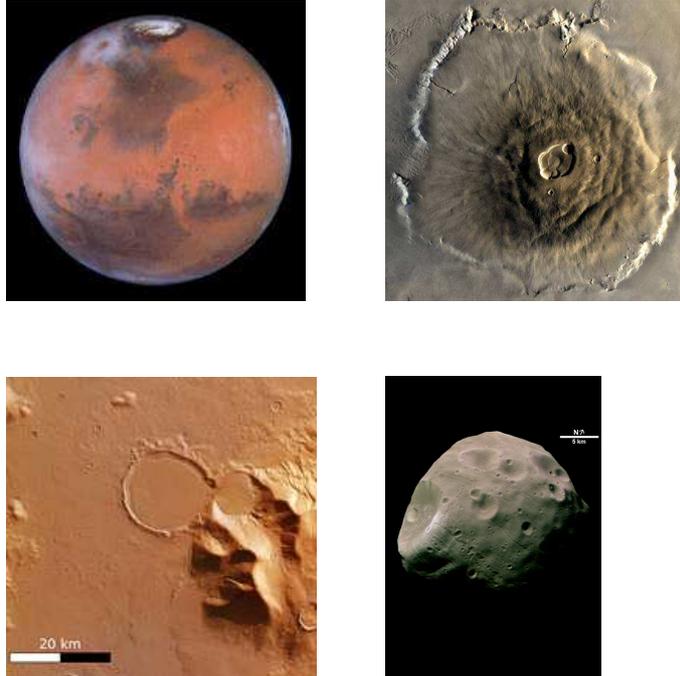


FIGURE 3.9: Mars et sa calotte (en haut à gauche), Olympus-Mons (en haut à droite), écoulement de galcier rocheux dans des cratères d'impacts (en bas à gauche) et le satellite Phobos (en bas à droite) crédit : ESA/NASA

solaire, et même plus gros que la planète Mercure) et Callisto. Ces satellites sont autour de Jupiter comme dans un système solaire en miniature, formés probablement en même temps que Jupiter.

Ce système a été visité par les sondes Pioneer (1975), Voyager (1979) et Galileo (1996); cette dernière, placée en orbite autour de Jupiter, a observé de près le système Jovien, jusqu'à la fin de sa mission en Septembre 2003. Cela a permis de découvrir sur Io une activité volcanique inattendue mais intense, due à l'échauffement provoqué probablement par les marées que Jupiter soulève sur ce petit satellite, désormais recouvert d'éjectats de soufre et de dioxyde de soufre; d'ailleurs, l'anneau de Jupiter pourrait bien être alimenté par ce volcanisme de Io. Les autres satellites semblent être un mélange de glaces d'eau et de roches, avec même sur Europe, des indices de l'existence d'un océan liquide sous-jacent à une épaisse couche de glace dont l'aspect fracturé fait penser à une banquise ayant subi de multiples débâcles.



FIGURE 3.10: *Jupiter, Io et la grande tâche de Jupiter* crédit : NASA/HST

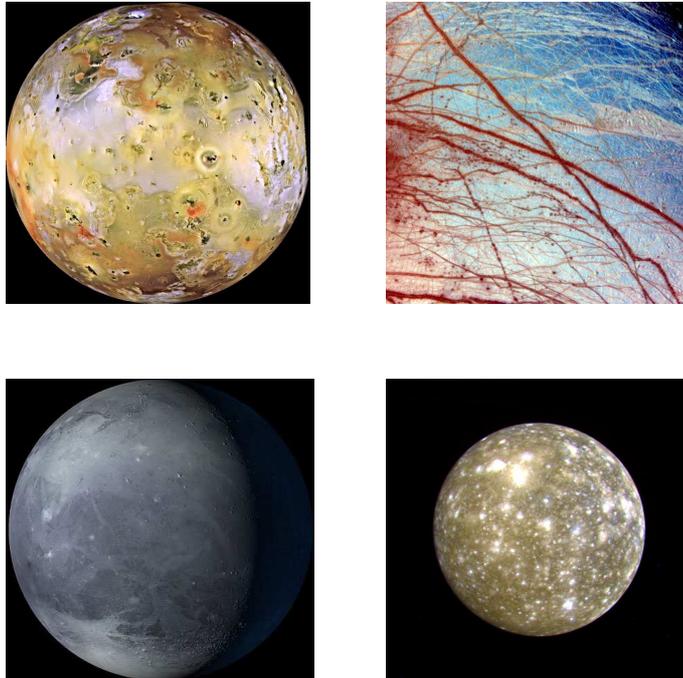


FIGURE 3.11: *Les Galiléens : Io, Europe, Ganimède et Callisto* crédit : NASA

Saturne

C'est la plus spectaculaire avec son système d'anneaux équatoriaux. Elle présente une surface moins contrastée que celle de Jupiter, mais sa rotation différentielle (en 10,25 heures à l'équateur) entraîne des zones de turbulences

analogues. Les anneaux sont en fait une multitude de très petits satellites composés essentiellement de glace d'eau et d'ammoniac, dont les plus gros ne dépassent pas quelques dizaines de mètres. Ce sont probablement les débris d'un objet trop gros pour résister aux forces de marée rencontrées lors d'une approche à moins de 2,45 rayons de la planète (limite de Roche) et qui l'ont fait exploser. Certaines zones de l'anneau sont dépeuplées (par exemple la division de Cassini), à cause des effets de résonances gravitationnelles dues au satellite le plus proche, Mimas.

Parmi la trentaine de satellites connus orbitant Saturne (dont 10 découverts par les sondes Voyager en 1981 et 12 récemment), Titan est le plus gros; il est même plus gros aussi que la planète Mercure, avec cette particularité unique pour les satellites, d'avoir une atmosphère dense au point de ne pas laisser voir sa surface; c'est une atmosphère riche en azote avec un peu d'argon et de méthane. La sonde Cassini, lancée en 1997, s'est satellisée autour Saturne en Juillet 2004 afin d'explorer pendant plusieurs années l'ensemble du système saturnien.

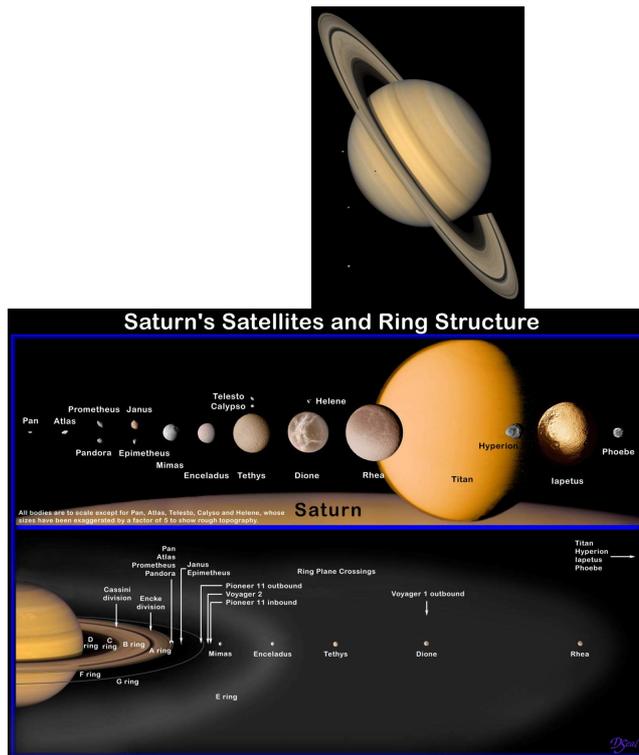


FIGURE 3.12: Saturne et ses satellite

crédit : NASA/JPL/Caltech

Uranus

Elle est singulière car son axe de rotation est quasiment couché dans le plan de son orbite autour du Soleil. Elle tourne sur elle-même autour de cet axe en près de 18 heures, mais cet axe, du fait de sa direction fixe, présente alternativement ses pôles vers le Soleil pendant un jour polaire interminable de 42 ans et suivi d'une nuit polaire toute aussi longue. Une vingtaine de satellites (dont 10 découverts par la sonde Voyager 2 en 1986), tournent autour d'Uranus dans son plan équatorial, quasiment perpendiculaire au plan orbital. Le plus proche d'Uranus, Miranda, a été survolé de près par Voyager 2, montrant en détails une surface chaotique avec failles, rides, vallées et cratères dont l'origine est encore inexpliquée. Enfin Uranus est entouré d'un système de 9 anneaux extrêmement étroits et composés de grosses particules sombres, difficilement visibles ; l'un de ces anneaux semble être confiné entre les orbites de 2 petits satellites, appelés pour cela "satellites bergers".

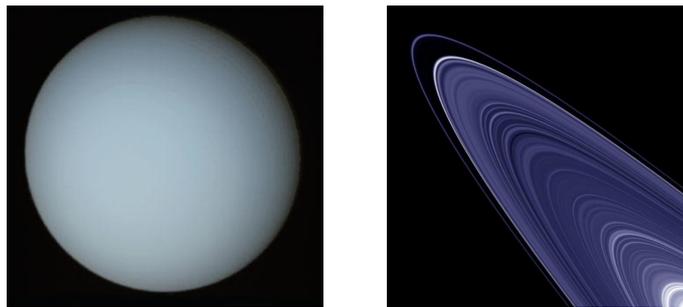


FIGURE 3.13: *Uranus et ses anneaux*

Neptune

Elle ressemble beaucoup à Uranus tant pour sa structure interne que pour son atmosphère, mais sa couleur bleutée plus intense que celle d'Uranus est sans doute due à une proportion plus grande de méthane gazeux qui absorbe les radiations rouges. Elle tourne sur-elle même en un peu plus de 16 h, et laisse apparaître une grande tache sombre de 10000 km de diamètre, peut-être analogue à la grande tache rouge de Jupiter. Des vents violents de plus de 1000 km/h sont alimentés par une énergie interne encore non expliquée. Neptune possède aussi 3 anneaux, mais dont la densité n'est pas constante, produisant une apparence d'arcs brillants espacés de parties sombres. La stabilité d'une telle structure est encore difficile à comprendre. Sur les 8 satellites connus, 6 furent découverts par Voyager 2 en 1989. Survolé par cette

sonde, Triton, le plus gros de ces satellites, a révélé une atmosphère ténue (10 microbars) et un sol rocheux couvert d'eau, d'azote et de méthane gelés (température - 236), avec des indices de phénomènes "criovolcaniques" liés à des changements de phase produits dans ces conditions physiques extrêmes : de l'azote gazeux sous pression jaillirait et retomberait en geysers de cristaux glacés. L'atmosphère de Triton contient du méthane et surtout de l'azote; ce serait ainsi le 3ème corps du système solaire, avec Titan et la Terre, à posséder une atmosphère riche en azote.

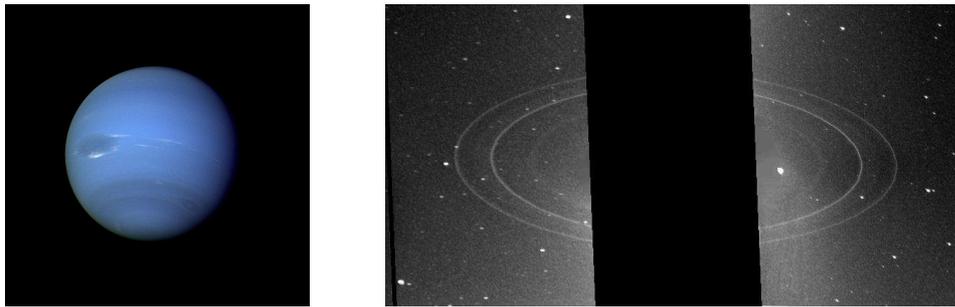


FIGURE 3.14: Neptune et ses anneaux

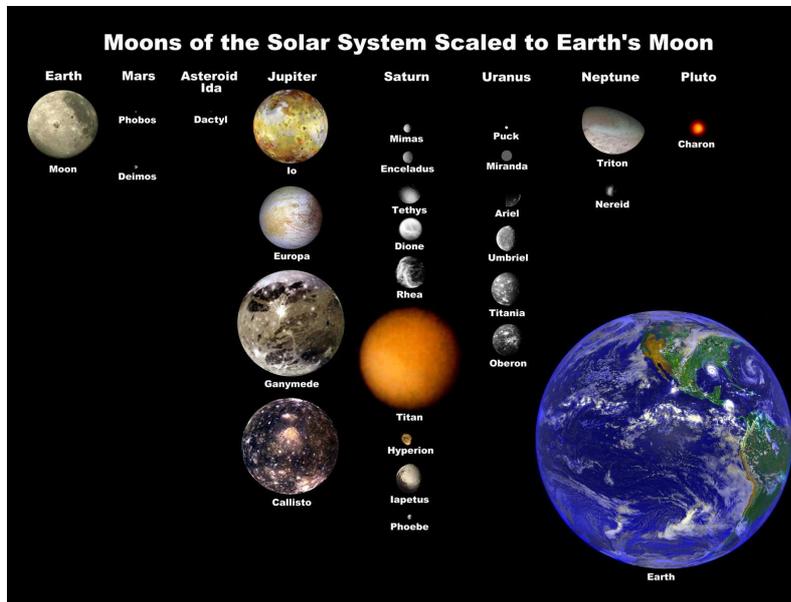


FIGURE 3.15: Les principaux satellite du système solaire en taille relative
 crédit : Wikimedia

3.3 Les autres composants du système solaire

En dehors des huit planètes de système solaire, le système solaire contient essentiellement deux autres catégories d'objets :

- les astéroïdes,
- les comètes.

Les astéroïdes

Les astéroïdes se trouvent principalement entre l'orbite de Mars et de Jupiter et constituent la ceinture d'astéroïdes. Il s'agit d'une multitude de très petits corps rocheux, dont le plus gros, Cérés fait moins de 900 km de diamètre ; près de 40 000 de ces petites planètes sont actuellement répertoriées, ayant des dimensions supérieures à quelques kilomètres pour les plus petits, mais on estime qu'il y aurait plus de 500 000 de ces objets dont la taille dépasserait 1,6 km. Leur masse totale ne dépasserait pas 3/1000 de la masse de la Terre. Ils tournent tous dans le même sens que les planètes autour du Soleil, mais leurs orbites sont davantage excentrées et inclinées. La forme de ces astéroïdes ainsi que leur densité laissent supposer qu'ils se sont formés par accrétion ou parfois par fragmentations dues à des collisions mutuelles. La sonde Near s'est satellisée en 2001 autour de l'astéroïde Eros et, après plusieurs mois d'observations rapprochées, s'est posée en douceur à sa surface. En fait, les astéroïdes seraient les résidus de petites "proto-planètes" qui auraient dû se former entre Mars et Jupiter, mais qui se sont heurtées et fragmentées ; le voisinage de la très influente planète Jupiter n'aurait pas permis de stabiliser ces petits corps dans cette zone du système solaire. Certains de ces astéroïdes ont pu approcher Mars ou Jupiter et être capturés par ces planètes, devenant alors leurs satellites. D'autres ont des orbites les amenant à heurter ces planètes ou même la Terre, se transformant alors en matériau météoritique. L'étude des météorites permet ainsi de connaître la nature des astéroïdes, témoins peu dégradés de la condensation de la nébuleuse proto-solaire : 90% des météorites sont de nature rocheuse ; d'autres météorites dites métalliques (10%) sont presque exclusivement formées de fer et de nickel.

La structure de la ceinture d'astéroïdes est particulièrement complexe. Elle a été sculptée par les perturbations des différentes planètes, en particulier des résonances de mouvement avec Jupiter, engendrant des lacunes (gap) dans la ceinture (voir Fig. 3.17).



FIGURE 3.16: L'astéroïde Eros vu par la sonde Near crédit : NASA

Les comètes

Le second groupe d'objets sont les comètes. Les comètes sont des résidus presque intacts de la formation du système solaire. En effet, on les connaît car certains de ces petits corps (ou noyaux cométaires) deviennent visibles

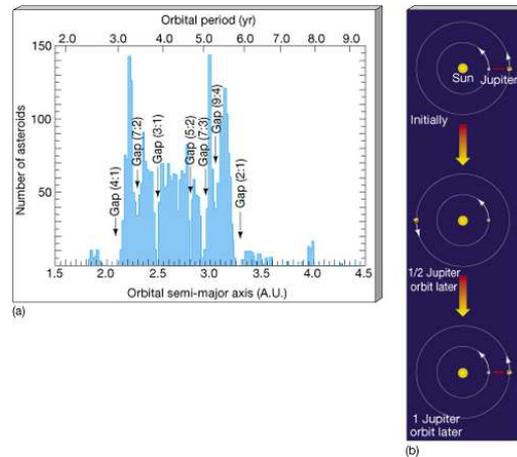


FIGURE 3.17: Les lacunes de la ceinture d'astéroïdes

lorsque leur orbite les amène à se rapprocher suffisamment du Soleil (souvent à moins de 3 UA) : leur réchauffement provoque la sublimation des glaces présentes à leur surface, formant alors une atmosphère autour du noyau ; cette atmosphère est éjectée du noyau par la pression de radiation de la lumière solaire, formant alors une queue (ou chevelure de la comète) dans la direction opposée au Soleil. La quantité de glace étant limitée, les comètes qui éjectent encore de la matière sont donc relativement récentes et viennent probablement d'autres régions plus froides du système solaire.

La sonde Giotto, qui a rencontré la comète de Halley en 1986, a révélé un noyau de 10 km de diamètre ressemblant à une grosse "boule de neige sale". Le dégazage d'une comète produit des gaz et des poussières qui sont dispersés dans la chevelure sur des distances pouvant atteindre plusieurs centaines de millions de km. Les gaz sont essentiellement des molécules ionisées de CO^+ , OH^+ , ou neutres N_2 , CO_2 . Ce dégazage ne se fait pas de manière symétrique, il s'agit en générale de petite portion de la comète qui va éjecter de la matière.

L'origine des comètes pose problème puisqu'elles ont une durée de vie limitée et qu'on en observe continuellement. En 1951, Edgeworth et Kuiper ont montré de manière indépendante qu'il devrait exister un disque d'objets au delà de l'orbite de Neptune. Cette région, qui pris le nom de ceinture de Edgeworth-Kuiper ou ceinture de Kuiper, est une région source probable de certaines comètes (voir fig. 3.19, et fig. 3.20).

Depuis 1992, de nombreux objets, appelés aussi transneptuniens ont été observés dans cette région entre 30 UA et 150 UA. Le premier d'entre eux est Pluton, mais on connaît actuellement plus d'un millier de naines glacées dans cette zone, de rayons supérieurs à 100 km, et l'on pense qu'il y aurait

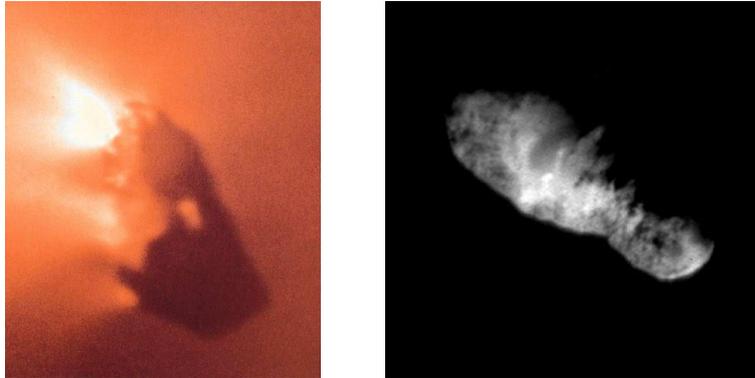


FIGURE 3.18: La comète de Halley et la comète Borrelly crédit : ESA/NASA

encore plusieurs millions de ces petits corps à découvrir. Comme Pluton, ces corps sont des blocs de glaces mélangés probablement à des roches, vestiges condensés de la nébuleuse primitive à l'origine du système solaire.

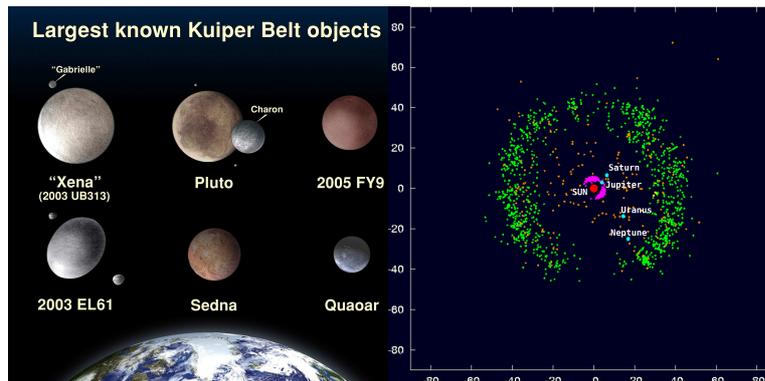


FIGURE 3.19: A gauche : les objets les plus gros de la ceinture de Kuiper (crédit : NASA/ESA) ; à droite : position des objets connus dans le système solaire au-delà de l'orbite de Jupiter (crédit : MPC)

Enfin, très loin du Soleil, au delà de cette ceinture et jusqu'aux quelques 200 000 UA qui limitent la sphère d'influence du Soleil, on trouve un halo sphérique où la matière est probablement condensée en des milliards de très petits corps glacés, mélanges de glaces et de roches, formant le nuage de Oort (voir 3.21). Ce nuage n'a jamais été observé et son existence est déduite de modèle dynamique et de la forme des orbites des comètes observées. Les comètes du nuage de Oort ont probablement été éjectées par les perturbations

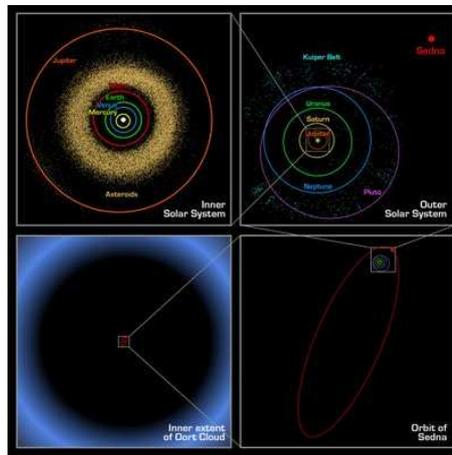


FIGURE 3.20: Le système solaire à différentes échelles

des planètes dans cette région. Elles sont alors sous l'influence aussi de la galaxie et des étoiles proches du Soleil.

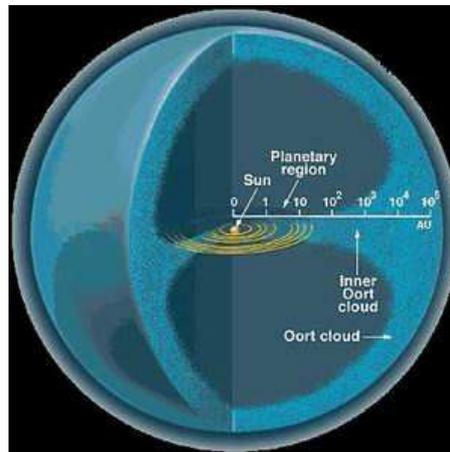


FIGURE 3.21: Le nuage de Oort crédit : Zeta Janus

Chapitre 4

Petit formulaire relatif au système solaire

4.1 De Kepler à Newton

Kepler (1571-1630) utilisa les observations de Tycho Brahe pour montrer que la planète Mars parcourait une orbite elliptique. Il énoncera alors les lois qui portent son nom :

- chaque planète décrit une ellipse dont le Soleil occupe un des foyers (Fig. 4.1) ;

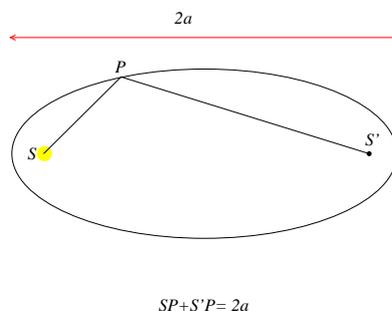


FIGURE 4.1: Les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil est l'un des foyers

- les aires décrites par le rayon vecteur planète-Soleil sont proportionnelles aux temps employés à les décrire (Fig. 4.2) ;
- pour toutes les planètes du système solaire, les demi-grands axes a_P et les périodes de révolution T_P sont reliées par :

$$\frac{T_P^2}{a_P^3} = \text{constante} \quad (4.1)$$

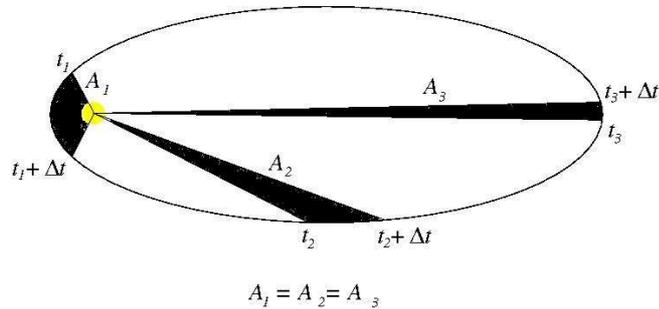


FIGURE 4.2: Loi des aires

Newton (1642-1727) énonce la théorie de la gravitation universelle et définit clairement les notions de masse et de force. Son principe de l'attraction des corps selon l'inverse du carré des distances va expliquer le mouvement des planètes observé par Kepler. Le caractère universel de la gravitation a été mis en évidence dans son oeuvre "Principes mathématiques de philosophie naturelle". Newton a été le premier à comprendre que la pomme qui tombe d'un arbre et la Lune qui tourne autour de la Terre obéissent à une même loi et que leurs mouvements sont en fait de même nature. La loi de la gravitation universelle, l'une des 4 interactions fondamentales, s'énonce ainsi :

Deux points matériels de masse M et m exercent l'un sur l'autre une force attractive directement proportionnelle aux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance r les séparant. Le module F de cette force vaut :

$$F = \frac{G M m}{r^2} \quad (4.2)$$

où G est la constante universelle de la gravitation.

Cette loi suppose la transmission instantanée des forces dans l'espace. La mécanique céleste est alors l'application de la mécanique newtonienne et des principes fondamentaux de la mécanique aux corps du système solaire. La gravitation universelle explique (presque) tout (le mouvement des planètes et autre, autour du Soleil, les marées, la structure de la ceinture d'Astéroïdes, etc.). Elle n'explique pas l'excès d'avance du périhélie de Mercure. Pour expliquer ce dernier point, il est nécessaire de faire appel à la théorie de la relativité générale pour laquelle :

- il n'y a pas de temps absolu
- la notion de référentiel galiléen n'est plus pertinente
- la transmission des forces se fait à la vitesse de la lumière, et non instantanément.

Retournons à la loi universelle de la gravitation. Si \mathbf{r}_S et \mathbf{r}_C sont les vecteurs positions du Soleil S de masse M_\odot et d'un deuxième corps C de masse m dans un repère galiléen, alors ces vecteurs vérifient les équations différentielles suivantes :

$$\begin{aligned} M_\odot \frac{d^2 \mathbf{r}_S}{dt^2} &= \frac{G M_\odot m}{r^3} \mathbf{r} \\ m \frac{d^2 \mathbf{r}_C}{dt^2} &= -\frac{G M_\odot m}{r^3} \mathbf{r} \end{aligned}$$

où $\mathbf{r} = \mathbf{r}_C - \mathbf{r}_S$

On peut ainsi obtenir directement le mouvement de l'objet C par rapport au Soleil :

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_C}{dt^2} = -\frac{G(M_\odot + m)}{r^3} \mathbf{r} \quad (4.3)$$

Après les travaux de Newton, les lois de Kepler ont pu être démontrées et précisées. Ainsi :

- La première loi de Kepler :
Les solutions de l'équation 4.3 correspondent à des coniques (voir Fig. 4.3) :
 - des ellipses : correspondent à un demi-grand axe strictement positif, et un mouvement borné ;
 - des hyperboles : elles correspondent à un demi-grand axe strictement négatif, et des objets qui atteignent des distances infinies avec un vitesse non nulle ;
 - des paraboles : elles correspondent à l'inverse du demi-grand axe égal à zéro et des objets qui atteignent des distances infinies avec une vitesse nulle (à l'infini).
- La deuxième loi de Kepler On peut facilement démontrer la deuxième loi de Kepler, en faisant avant tout un petit rappel sur les produit vectoriel.

Soit \mathbf{u} et \mathbf{v} deux vecteurs non nuls et non colinéaires, alors :

$$\mathbf{u} \wedge \mathbf{v} = uv \sin(\widehat{\mathbf{u}, \mathbf{v}}) \hat{\mathbf{w}} \quad (4.4)$$

où $\hat{\mathbf{w}}$ est un vecteur unitaire orthogonal au plan défini par \mathbf{u} et \mathbf{v} et tel que $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \hat{\mathbf{w}})$ forme un trièdre direct. Dans ce cas, la quantité correspond à l'aire du parallélogramme dont les côtés sont formés par les vecteurs \mathbf{u} et \mathbf{v} (Fig. 4.4).

Considérons l'aire $d\mathcal{A}$ balayée par le vecteur \mathbf{r} (voir Eq. 4.3) pendant un interval de temps dt . On remarque que (voir Fig. 4.5) :

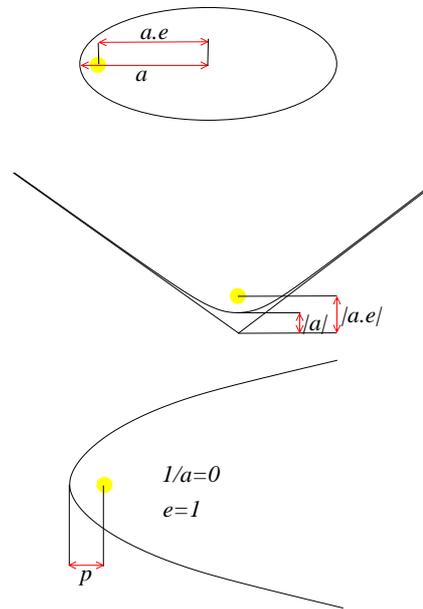


FIGURE 4.3: De haut en bas, l'ellipse, l'hyperbole et la parabole.

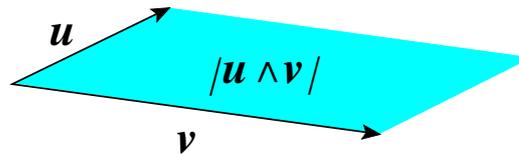


FIGURE 4.4: Signification géométrique du produit vectoriel

$$d\mathcal{A} = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \wedge \dot{\mathbf{r}} dt|, \quad (4.5)$$

où $\dot{\mathbf{r}} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$. Ainsi la dérivée première de l'aire balayée par le rayon vecteur \mathbf{r} est tout simplement :

$$\frac{d\mathcal{A}}{dt} = \frac{1}{2} |\mathbf{r} \wedge \dot{\mathbf{r}}|, \quad (4.6)$$

Si on différencie par rapport au temps, on a :

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{r} \wedge \dot{\mathbf{r}} dt) = \dot{\mathbf{r}} \wedge \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{r} \wedge \ddot{\mathbf{r}}, \quad (4.7)$$

où $\ddot{\mathbf{r}} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$. Or, comme le produit vectoriel de deux vecteurs colinéaires est nul, on a $\dot{\mathbf{r}} \wedge \dot{\mathbf{r}} = 0$. De plus, d'après l'équation 4.3, \mathbf{r} et $\ddot{\mathbf{r}}$ sont aussi colinéaires. Ainsi $\mathbf{r} \wedge \ddot{\mathbf{r}} = 0$.

Donc, le second membre de l'équation 4.7 est nul. On en déduit que $\frac{d\mathcal{A}}{dt} = C = \text{constante}$. Donc, si \mathcal{A} est l'aire balayée par \mathbf{r} pendant un intervalle de temps Δt , on voit bien $\mathcal{A} = C \Delta t$, ce qui correspond bien à la deuxième loi de Kepler.

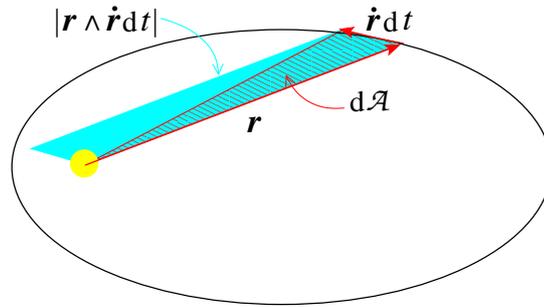


FIGURE 4.5: Aire balayée pendant un intervalle de temps dt .

- La troisième loi de Kepler

L'équation du mouvement d'un corps par rapport au Soleil (Eq. 4.3) admet des solutions particulières qui consistent en des orbites circulaires parcourues à vitesse constante. Nous nous contenterons ici de ce type de solution. Si on considère un corps qui parcourt une orbite circulaire de rayon r à vitesse constante v autour du Soleil, alors l'égalité de la force centrifuge (accélération cinématique) avec la force due à la gravitation universelle (accélération dynamique) nous donne :

$$\frac{v^2}{r} = \frac{G(m + M_{\odot})}{r^2}$$

or, si T est la période orbitale de l'objet autour du Soleil, on a :

$$\frac{4\pi^2 r^2}{r T^2} = \frac{G(m + M_{\odot})}{r^2}$$

donc :

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G(m + M_{\odot})}{4\pi^2}. \quad (4.8)$$

L'équation 4.8 n'est rien d'autre que la troisième loi de Kepler généralisée à n'importe quel problème de 2 corps (il suffit de remplacer les masses et la distance r par les valeurs appropriées). Dans le cas d'orbite non circulaire, on peut montrer que l'équation 4.1 reste valable en remplaçant le rayon de l'orbite circulaire r par le demi-grand axe de l'orbite a .

Pour les planètes du système solaire, la période T qui intervient dans ces relations est la *période sidérale*, c'est-à-dire la période mesurée par rapport à un repère de directions fixes.

Si M_\odot représente la masse du Soleil et m celle d'une planète, on voit qu'en négligeant m par rapport à M , la quantité est la même pour toutes les planètes. En appliquant cette loi à l'orbite de la Terre ($r = 1$ UA, $T = 1$ an = 365,2563 jours) et en adoptant la masse solaire comme unité de masse - i.e. $M_\odot = 1M_\odot$ -, on obtient la valeur de G en unités astronomiques et en année :

$$G = 4\pi^2 \text{ UA}^2 \cdot \text{yr}^{-2} \cdot M_\odot^{-1} \quad (4.9)$$

En négligeant la masse des planètes par rapport à celle du Soleil, on a ainsi pour deux planètes P_1 et P_2 :

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}, \quad (4.10)$$

où a_1 et a_2 sont les demi-grand axes des planètes P_1 et P_2 respectivement, et T_1 et T_2 les périodes sidérales.

Ainsi on peut connaître le rapport des grands axes des orbites planétaires à partir de la mesure des périodes sidérales de leurs mouvements.

Pour un satellite s de masse m_s qui orbite une planète P de masse m_P sur une ellipse de demi-grand axe a_s avec une période T_s , on a de la même façon :

$$\frac{a_s^3}{T_s^2} = \frac{G(m_P + m_s)}{4\pi^2}. \quad (4.11)$$

En négligeant la masse du satellite par rapport à celle de la planète, on voit que l'on peut facilement estimer la masse de la planète.

4.2 Vitesse de libération, vitesse de satellisation

L'énergie totale (énergie cinétique + énergie potentielle) par unité de masse d'un corps de masse m tournant autour d'un corps de masse M est :

$$E = \frac{v^2}{2} - \frac{G(M + m)}{r}. \quad (4.12)$$

Ainsi, en utilisant le fait que l'énergie totale est constante :

- si $E < 0$ on voit que r doit être bornée sinon v^2 devient négatif. Ce cas correspond à une orbite elliptique, et le demi grand axe de l'orbite est définie par

$$E = -\frac{G(M + m)}{2a}; \quad (4.13)$$

- si $E > 0$ on voit que quand $r \rightarrow +\infty$ alors $v \rightarrow \sqrt{2E}$. Ainsi l'objet s'échappe à l'infini avec une vitesse non nulle. Ce cas correspond à une orbite hyperbolique dont le demi-grand axe négatif est défini aussi par l'équation 4.13.
- si $E = 0$ alors quand $r \rightarrow +\infty$, on a $v \rightarrow 0$. L'objet s'échappe vers l'infini avec une vitesse nulle. Ce cas correspond à une orbite parabolique. Le demi-grand axe n'est pas défini dans ce cas là.

Pour libérer un corps de l'attraction gravitationnelle d'un autre, il faut qu'il se trouve au moins sur une orbite parabolique. Ainsi, on doit avoir $E = 0$. On obtient ainsi une vitesse V_{lib} correspondant à la vitesse minimale de libération, ou *vitesse de libération*, à une distance r du corps central. Cette vitesse est donnée par :

$$V_{\text{lib}} = \sqrt{2 \frac{G(M+m)}{r}} \quad (4.14)$$

En supposant la Terre sur une orbite circulaire de rayon $a = r$, c'est-à-dire $E = -\frac{G(M_{\oplus}+M_{\odot})}{2r}$, on peut facilement calculer la vitesse V_{sat} de rotation de la Terre autour du Soleil en utilisant l'équation de l'énergie totale :

$$V_{\text{circ}} = \sqrt{\frac{G(M_{\oplus} + M_{\odot})}{r}}. \quad (4.15)$$

Cette vitesse, i.e. la vitesse requise pour rester sur une orbite circulaire de rayon r autour d'un corps de masse M , est appelée vitesse de satellisation. Pour la Terre autour du Soleil on obtient à peu près $V_{\text{sat}} = 30 \text{ km.s}^{-1}$. La vitesse de libération du système solaire (permettant de sortir du système solaire) depuis l'orbite de la Terre est ainsi $\sqrt{2}$ fois la vitesse de la Terre, soit $42,2 \text{ km.s}^{-1}$.

Des formules semblables s'appliquent pour calculer la vitesse de satellisation et la vitesse de libération à la surface d'une planète de masse m et de rayon r .

Pour la Terre, depuis sa surface, on obtient les valeurs $V_{\text{sat}} = 7,9 \text{ km.s}^{-1}$ et $V_{\text{lib}} = 11,2 \text{ km.s}^{-1}$.

La vitesse de libération à la surface d'une planète permet de déterminer la possibilité pour celle-ci de posséder une atmosphère. Sachant que l'agitation thermique d'un gaz porté à une température θ donne des vitesses de l'ordre de :

$$v(\theta) = \sqrt{\frac{3k\theta}{\mu}},$$

où k est la constante de Boltzmann et μ la masse des particules gazeuses. Ainsi il faut que cette vitesse d'agitation soit inférieure à la vitesse de libération pour que la planète conserve une atmosphère.

4.3 Position relative des planètes

Toutes les planètes tournant autour du Soleil sur des orbites quasi-circulaires et quasi coplanaires, sont à des distances variables de la Terre ; les extrema de distance d'une planète à la Terre se produisent quand le Soleil, la Terre et cette planète sont alignés. Pour une planète extérieure comme Mars ou Jupiter, la distance à la Terre est minimale lorsqu'elle est à l'opposition, c'est-à-dire vue de la Terre dans la direction opposée au Soleil ; elle est maximale à la conjonction (lorsqu'elle est dans la même direction que le Soleil) ; les situations intermédiaires où la planète est vue depuis la Terre dans une direction orthogonale à celle du Soleil sont les deux quadratures (voir Fig. 4.6).

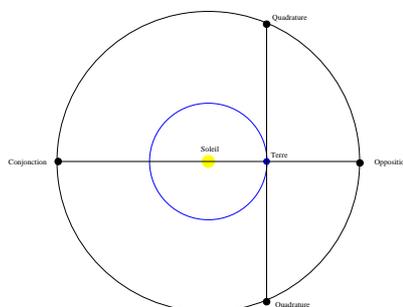


FIGURE 4.6: Position relative Soleil-Terre-planète, pour une planète supérieure.

Pour une planète intérieure comme Vénus, la distance à la Terre est minimale lorsqu'elle est à la conjonction inférieure, c'est-à-dire vue de la Terre devant le Soleil, dans la même direction que le Soleil ; elle est maximale à la conjonction supérieure (lorsqu'elle est derrière le Soleil, dans la même direction que le Soleil) ; les situations intermédiaires où la direction de la planète vue de la Terre s'écarte le plus du Soleil sont les deux plus grandes élongations (voir Fig. 4.7).

4.4 Période synodique, période sidérale, mouvement apparent

Pour toute planète, on appelle période synodique la durée qui sépare deux passages successifs de celle-ci dans un même alignement avec le Soleil (par exemple deux oppositions successives, ou deux conjonctions inférieures successives). En plaçant une planète dans un repère centré au Soleil et tournant avec la Terre, on obtient sa vitesse angulaire θ_{syn} dans ce repère (ou vitesse

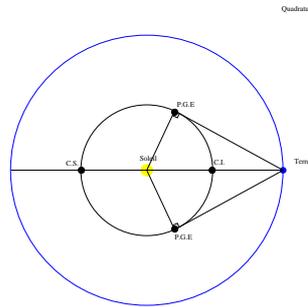


FIGURE 4.7: Position relative Soleil-Terre-planète, pour une planète inférieure (C.I. : conjonction inférieure, C.S. : conjonction supérieure, P.G.E. : plus grande élongation).

angulaire synodique) comme différence de sa vitesse angulaire sidérale θ_P avec celle de la Terre θ_{\oplus} (voir Fig. 4.8). On en déduit cette relation entre la période synodique T_{syn} d'une planète et sa période sidérale T_P , en fonction de la période sidérale T_{\oplus} de la Terre :

$$\theta_{\text{syn}} = \theta_P - \theta_{\oplus}$$

soit

$$\frac{1}{T_{\text{syn}}} = \left| \frac{1}{T_P} - \frac{1}{T_{\oplus}} \right|$$

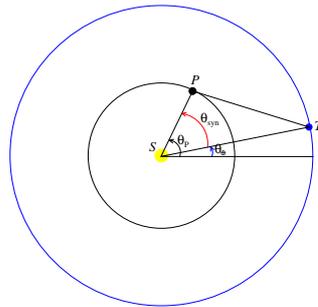


FIGURE 4.8: Fréquence synodique d'une planète.

Du fait que nous observons les planètes depuis une position mobile, la Terre, celles-ci ont un mouvement apparent plus complexe qu'une simple rotation : dans leur mouvement héliocentrique, les planètes tournent dans le sens direct autour du Soleil, à des vitesses d'autant plus faibles qu'elles en sont plus éloignées. La Terre elle-même tournant dans le même sens, rattrape les

planètes extérieures lors de leur opposition, ou est rattrapée par les planètes intérieures au moment de leur conjonction inférieure. Cela se manifeste sur leurs mouvements observés depuis la Terre en suivant leurs déplacements par rapport aux étoiles : au voisinage de ces instants, les planètes ont un mouvement apparent qui s'effectue dans le sens rétrograde (voir Fig. 4.9).

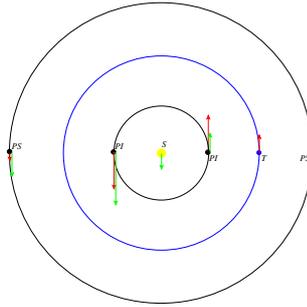


FIGURE 4.9: Mouvement apparent des planètes et du Soleil par rapport à la Terre (en vert). En rouge : en vitesse héliocentrique.

Au contraire, une demie période synodique plus tard, leur mouvement apparent est direct. Entre ces phases de mouvement direct et rétrograde, on observe que les planètes semblent ne plus bouger par rapport aux étoiles : ce sont les stations. L'amplitude angulaire de la rétrogradation comprise entre deux stations successives peut atteindre plus de 15° pour la planète Mars, et cette phase du mouvement dure alors près de 2 mois. Pour rendre compte de ce phénomène, il suffit de représenter le mouvement géocentrique des planètes comme la somme de deux mouvements circulaires, conduisant à une trajectoire en forme d'épicycloïde avec des boucles au voisinage de chaque opposition pour les planètes extérieures, ou de chaque conjonction inférieure pour les planètes intérieures.

Considérant pour simplifier tous les mouvements héliocentriques comme circulaires et coplanaires, les vecteurs \overrightarrow{SP} et \overrightarrow{ST} joignant le Soleil S à la planète P et à la Terre T permettent de calculer le vecteur géocentrique de la planète :

$$\overrightarrow{TP} = \overrightarrow{SP} - \overrightarrow{ST}$$

avec

$$\overrightarrow{SP} = a_P [\cos(\omega_P t) \hat{i} + \sin(\omega_P t) \hat{j}]$$

et

$$\overrightarrow{ST} = a_\oplus [\cos(\omega_\oplus t) \hat{i} + \sin(\omega_\oplus t) \hat{j}]$$

où les vecteurs unitaires \hat{i} et \hat{j} forment une base de directions fixes par rapport aux étoiles dans le plan de l'écliptique, et ω_P et ω_\oplus sont les vitesses radiales de la planète et de la Terre respectivement.

D'après la troisième loi de Kepler on a :

$$\frac{a_P^3}{a_\oplus^3} = \frac{\omega_\oplus^2}{\omega_P^2}$$

ainsi, il est simple de tracer la courbe décrite par la planète P dans le repère $(T; \hat{i}, \hat{j})$ et d'y voir les boucles de rétrogradation. Un calcul des coordonnées polaires (r, δ) de P dans ce repère montrerait aussi les changements de sens de variations de l'angle δ , ainsi que la durée de la phase de rétrogradation et son amplitude en fonction du rapport $\alpha = a_P/a_\oplus$. L'observation de ces boucles de rétrogradation est ainsi un autre moyen de déterminer le rapport des rayons d'orbite des planètes.

4.5 Période de rotation, durée du jour

Enfin le mouvement de rotation des planètes sur elles-mêmes conduit, comme pour les mouvements orbitaux, à la définition de 2 sortes de périodes :

- la *période de rotation sidérale* Θ d'une planète est le temps séparant deux passages successifs d'une même étoile au méridien d'un même lieu situé à la surface de cette planète (sur la Terre, les méridiens sont les grands cercles passant par les pôles de la planète) ;
- la *durée du jour* θ sur cette planète est le temps séparant deux passages successifs du Soleil au méridien d'un même lieu situé à la surface de cette planète.

Sur la Terre par exemple, ces durées sont respectivement de $\Theta_\oplus = 23 \text{ h } 56 \text{ m } 04 \text{ s}$ et de $\theta = 24 \text{ h}$.

Si Ω_P est la vitesse angulaire correspondant à la période de rotation sidérale de la planète sur elle-même et si ω_P est la vitesse angulaire orbitale (sidérale) du Soleil vu de la planète, la quantité $\omega_P - \Omega_P$ représente la vitesse angulaire du Soleil dans un repère lié à la planète, en supposant pour simplifier que ces deux rotations se font autour d'axes parallèles (voir Fig. 4.10).

La durée du jour sur la planète est alors le temps qu'il faut pour que l'angle $(\omega_P - \Omega_P)t$ augmente de 2π d'où, en fonction de la période orbitale sidérale T_P de la planète :

$$\frac{1}{\theta} = \left| \frac{1}{T_P} - \frac{1}{\Theta} \right|$$

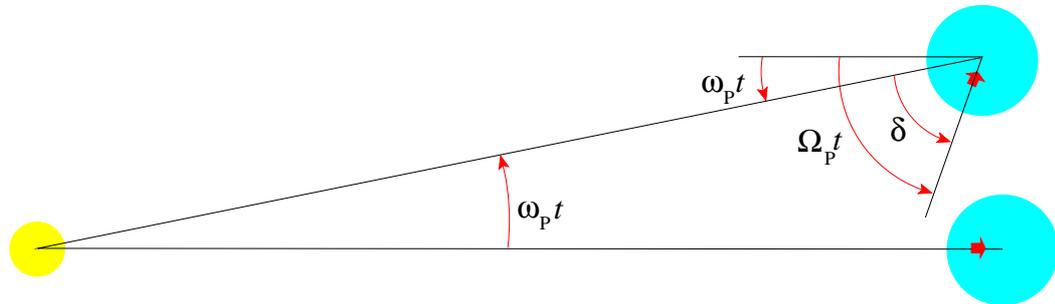


FIGURE 4.10: Sur la figure on a : $\delta = (\Omega_P - \omega_p)t$. La durée du jour est définie par le temps nécessaire pour que δ augmente de 2π (le Soleil revient à la verticale de la maison rouge).

C'est par cette formule que l'on a calculé la durée du jour sur Mercure donnée plus haut.

4.6 Axe de rotation de la Terre

L'axe de rotation des planètes sur elles-mêmes n'est pas forcément perpendiculaire au plan de leur orbite autour du Soleil, ce qui induit le phénomène des saisons. Pour la Terre par exemple, l'angle ϖ entre l'axe des pôles et la normale à l'écliptique vaut environ $23^\circ 27'$. Cet axe est de direction fixe. A cause de cet angle et du mouvement orbital de la Terre en 1 an, on voit sur la Fig. 4.11 comment s'expliquent la succession des 4 saisons sur la même période ; le début du printemps correspond au passage du Soleil dans le plan de l'équateur lorsqu'il traverse ce plan en montant du Sud au Nord au point vernal (ou point γ ou équinoxe de printemps) ; 90° plus loin, le Soleil passe au solstice d'été puis par tranches successives de 90° , il passe ensuite à l'équinoxe d'automne, au solstice d'hiver et revient au point vernal.

En réalité, l'axe de rotation de la Terre n'est pas fixe car perturbé par les attractions combinées de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre : on décompose généralement son mouvement en la somme de 2 parties :

d'abord une lente rotation de l'axe des pôles (en 25 770 ans environ) dans le sens rétrograde sur un cône de $23^\circ, 5$ d'ouverture autour de l'axe normal à l'écliptique passant par le centre de la Terre ; ce lent mouvement entraîne la précession des équinoxes à raison de $50'', 290$ par année de 365,25 jours (année julienne) et cela fait que la durée de 4 saisons successives (ou année tropique) est plus courte (365,2422 jours) que la durée de l'année sidérale

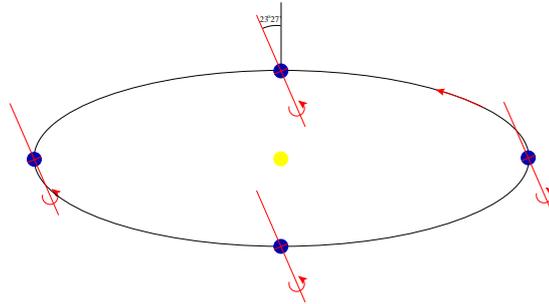


FIGURE 4.11: Les saisons expliquées par l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur elle-même. Le solstice d'été dans l'hémisphère Nord se trouve à droite, puis dans le sens de rotation de la Terre (indiqué par la flèche rouge), on passe par l'équinoxe d'automne, le solstice d'hiver et l'équinoxe de printemps.

(365,2563 jours) qui correspond au mouvement orbital donné par les lois de Kepler. C'est l'année tropique, calculée sur le retour des saisons, qui sert à établir les calendriers utiles pour la vie courante sur Terre.

Enfin, de très petites oscillations périodiques assez rapides, appelées nutations, dont les périodes sont inférieures à 18 ans et que l'on peut négliger pour la définition des saisons car leur contribution est nulle en moyenne dans le temps (voir fig. 4.12).

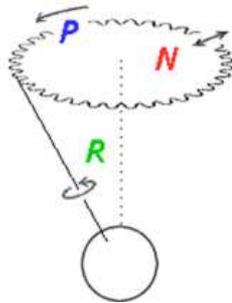


FIGURE 4.12: En vert, la rotation de la Terre sur elle-même (période de 23 h 56 m 04 s), en bleu la précession de l'axe de rotation de la Terre (période 25 770 ans) et en rouge la nutation d'une période inférieure à 18 ans.

Chapitre 5

Les étoiles

Les étoiles que l'on voit dans la galaxie sont des astres analogues au Soleil, transformant de la masse en énergie rayonnante par des réactions de fusion nucléaire. Pour avoir la température et la densité permettant ces réactions, il faut que la masse des étoiles soit supérieure à $1/20 M_{\odot}$; il semble aussi que pour être suffisamment stable la masse ne doive pas dépasser $100 M_{\odot}$. Les rayons stellaires sont beaucoup plus variés que les masses puisqu'on en trouve entre $10^{-5} R_{\odot}$ (soit quelques kilomètres seulement) et $1\,000 R_{\odot}$. Les densités moyennes sont alors extrêmement variées ($10^{18} \text{ kg.m}^{-3}$ pour les *pulsars* ou *étoiles à neutrons* qui condensent une masse équivalente à celle du Soleil dans une sphère d'une dizaine de km de rayon, ou $10^{-6} \text{ kg.m}^{-3}$ pour une *étoile géante* de $1\,000 R_{\odot}$).

Les étoiles diffèrent aussi par leur luminosité et leur couleur. La plupart ont une luminosité et une structure « constante » dans le temps, mais certaines sont variables, parfois fortement, avec des cycles allant d'une journée à des dizaines d'années. De même certaines étoiles sont simples, et d'autres sont doubles voire triple (une étoile tourne autour d'une autre, en fait plus de 60% des étoiles sont des étoiles multiples). On reparlera plus tard des différents types d'étoile. Avant on va définir la première grandeur mesurée lorsqu'on observe une étoile : sa *magnitude*.

5.1 Magnitude

5.1.1 Magnitude apparente

Avant de définir la magnitude, on définit la *luminosité* I d'une étoile comme étant l'énergie totale que rayonne l'étoile par seconde, c'est-à-dire la puissance totale de l'étoile. L'*éclat* F d'une étoile sera la perception de cette



FIGURE 5.1: Sirius et la constellation d'Orion.

luminosité à une distance d de l'étoile. C'est donc la puissance par unité de surface perçue à une distance d d'une étoile de luminosité I ; on a donc :

$$F = \frac{I}{4\pi d^2}. \quad (5.1)$$

L'astronome grec Hipparque (IIe siècle av J-C) fut l'un des premiers astronomes de l'Antiquité à collecter des informations pour bâtir des catalogues stellaires donnant la position et l'éclat des étoiles visibles à l'œil nu. Son plus grand catalogue comprenait un peu plus de 1 000 étoiles. Les vingt plus brillantes étaient classées dans la catégorie "étoiles de première grandeur", les autres se répartissaient ensuite sur cinq échelons, jusqu'aux "étoiles de sixième grandeur" qui étaient les plus faibles visibles à l'œil nu.

Après avoir pointé vers le ciel sa première lunette astronomique, Galilée fut contraint d'inventer la 7^{ième} grandeur, autrement dit 7^{ième} magnitude, pour désigner les étoiles invisibles à l'œil nu mais révélées par son instrument. Jusqu'au milieu du XIX^{ième} siècle, les astronomes ajoutèrent peu à peu de nouveaux échelons mais sans vraiment modifier la logique du système inventé près de 2 000 ans plus tôt !

Il devint alors urgent, pour faire face à l'inflation des catalogues stellaires, de ne pas laisser la classification des magnitudes à la seule perception de l'œil humain, et de mettre en évidence une loi de variation de luminosité des astres. Le premier qui formalisa le passage d'une magnitude à une autre fut l'astronome anglais Norman Pogson. En 1856, il proposa de considérer qu'une différence de 5 magnitudes correspondait à un éclat multiplié (ou divisé) par 100. Ainsi, une différence en magnitude de 1, correspondait à un éclat multiplié (ou divisé) par $100^{1/5} = 2,512$. Pogson en déduisit la formule suivante :

$$m = -2,512 \log_{10} \left(\frac{F}{F_0} \right) \quad (5.2)$$

où m est la *magnitude apparente* et F_0 une constante conventionnelle permettant de faire le lien avec les magnitudes de l'antiquité.

On peut aussi calculer la magnitude apparente à partir de la luminosité I et de la distance d de l'étoile :

$$m = -2,512 \log_{10} \left(\frac{I}{d^2} \right) + C_0 \quad (5.3)$$

où la constante C_0 dépend de F_0 et des unités choisies.

Pour Hipparque et pour tous les savants jusqu'au XIXe siècle, les étoiles les plus brillantes étaient toutes de 1^{ère} grandeur, sans qu'il soit fait aucune distinction dans ce groupe. Pourtant, il était manifeste à l'œil nu que Sirius était nettement plus brillante que Véga, alors que les deux astres se trouvaient sur le même échelon de magnitude. La création d'appareils capables de mesurer précisément des éclats (photomètres) permit de dépasser cette limite et d'appliquer la formule de Pogson à tous les astres. L'échelle des magnitudes débutant initialement à l'unité, les astres plus brillants furent dotés de magnitudes plus petites, voire négatives.

La magnitude apparente de Sirius devint ainsi égale à $-1,46$ et celle de Véga à $+0,03$. L'éclat de Véga est donc 3,9 fois moindre que celui de Sirius ($2,512^{0,03+1,46}$).

Aujourd'hui, l'échelle de magnitudes s'étend de $-26,74$ (Soleil) à $+30$ (galaxies photographiées par le télescope spatiale Hubble en 18h de pose).



FIGURE 5.2: L'étoile double μ du Bouvier. L'étoile centrale a une magnitude de 4,5, la seconde étoile une magnitude de 7,2 et les petites étoiles du fond du ciel une magnitude comprise entre 15 et 18. Crédit : Digitized Sky Survey

5.1.2 Magnitude absolue

La magnitude apparente ne nous renseigne en rien sur l'éclat réel de l'astre et ne donne aucune indication sur sa nature physique, ce que fait en revanche

la *magnitude absolue*. Ainsi, lorsque vous découvrez un beau ciel, les étoiles les plus brillantes, celles qui possèdent les magnitudes apparentes les plus fortes, ne sont pas forcément les plus grosses et les plus lumineuses ! Evidemment, la variété des distances des étoiles empêche d'utiliser la magnitude apparente pour comparer leurs luminosités intrinsèques. On utilise pour cela la notion de magnitude absolue qui est simplement la magnitude apparente qu'aurait une étoile si on l'observait à une distance arbitraire d_0 fixée :

$$M = -2,512 \log_{10} \left(\frac{I}{d_0^2} \right) + C_0 \quad (5.4)$$

où M est la magnitude absolue et C_0 la même constante que pour la magnitude apparente (eq. 5.3).

L'unité de distance adoptée ici est le parsec (noté pc), définie comme étant la distance au Soleil à la quelle il faudrait se placer pour voir le rayon de l'orbite de la Terre (1 UA) sous un angle de 1" (1 seconde de degré). Le choix d'une telle unité résulte de la technique des parallaxes utilisée pour mesurer la distance des étoiles les plus proches du Soleil (voir Chap. 7). On trouve alors les relations : 1 pc = 206 265 UA = 3,26 a.l.. La distance d_0 a été choisie égale à 10 pc, ce qui permet d'écrire cette relation entre m et M :

$$M = m + 5 \log_{10} d + 5 \quad (5.5)$$

avec d exprimé en pc.

On calcule que pour le Soleil, M vaut 4,8.

Cette relation permet aussi de déterminer la distance d d'une étoile si on mesure sa magnitude apparente m et si on peut estimer M par ses propriétés lumineuses. On verra ces méthodes au chapitre 7.

5.2 Le diagramme Hertzsprung-Russell

Hipparque fut donc le premier à effectuer une classification des étoiles suivant leur éclat. Ensuite, l'apparition de la spectroscopie a permis de faire une classification beaucoup précise des étoiles, suivant leur type spectraux. Au XIX^{ième} siècle, les étoiles ont été classées suivant leur apparence dans le domaine optique (du violet à l'orange). Les spectres identiques ont été classés en types spectraux avec les labels A,B,C, ..., T, attribué selon l'importance des raies de Balmer pour les premiers types, puis suivant d'autres critères qualitatifs pour les autres.

On a vu que le spectre d'une étoile permet non seulement de déterminer la température de surface grâce à la loi de Stefan, mais aussi les éléments chimiques présent dans son atmosphère. La température de surface peut aussi

être déterminée à partir des raies d'absorptions observées dans le spectre. En effet, ces raies correspondent à la présence d'atomes qui vont sur des niveaux plus excités en captant des photons. Par exemple, les raies de la série de Balmer correspondent à des atomes d'hydrogène pour lesquels l'électron passe du niveau 2 à un niveau plus excité. Si la température augmente, il y aura plus d'atomes d'hydrogènes excités, donc les raies de la série de Balmer seront plus intenses, jusqu'à la température correspondant à l'ionisation de l'atome. A ce moment là la série de Balmer disparaît (voir Fig. 5.3). En effet, si tous les atomes d'hydrogène sont ionisés alors il n'y a plus de possibilité de passage d'électron du niveau 2 à un niveau supérieur, passages qui sont à l'origine de la série de Balmer. D'autre part, plus la température baisse, plus des raies d'absorptions correspondant à des atomes plus lourds (calcium, puis fer), voire des molécules (CH, CN, TiO), apparaissent.

Or l'analyse quantitative a montré que les spectres stellaires peuvent être classés en une suite continue, ne dépendant que d'un seul paramètre : la température. La classification, encore utilisée aujourd'hui, des types spectraux a conservée les lettres du classement d'origine, mais les a réordonnée par températures décroissantes (de plus de 25 000 K à moins de 3 500 K) : O, B, A, F, G, K, M (Oh, Be A Fine Girl Kiss Me). On subdivise encore chaque type spectral en 10 parties (par exemple de G0 à G9) pour améliorer la finesse du classement des étoiles. Le Soleil est alors une étoile de type G2

La figure 5.4 montre la puissance émise par des étoiles de différents types spectraux en fonction de la longueur d'onde. On voit que plus l'étoile est chaude plus le maximum se fait pour les petites longueurs d'ondes (loi de Wien), mais aussi que plus la température diminue plus les raies d'absorption sont nombreuses correspondant à des éléments différents.

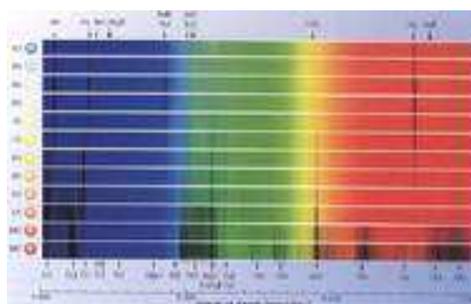


FIGURE 5.3: Spectre d'étoiles en fonction de leur type spectrale. Remarquez l'évolution de la série de Balmer en fonction de la température.

Finalement, on peut donc mesurer assez finement le type spectral d'une étoile et, si on connaît sa distance à la Terre, on connaît aussi sa magnitude

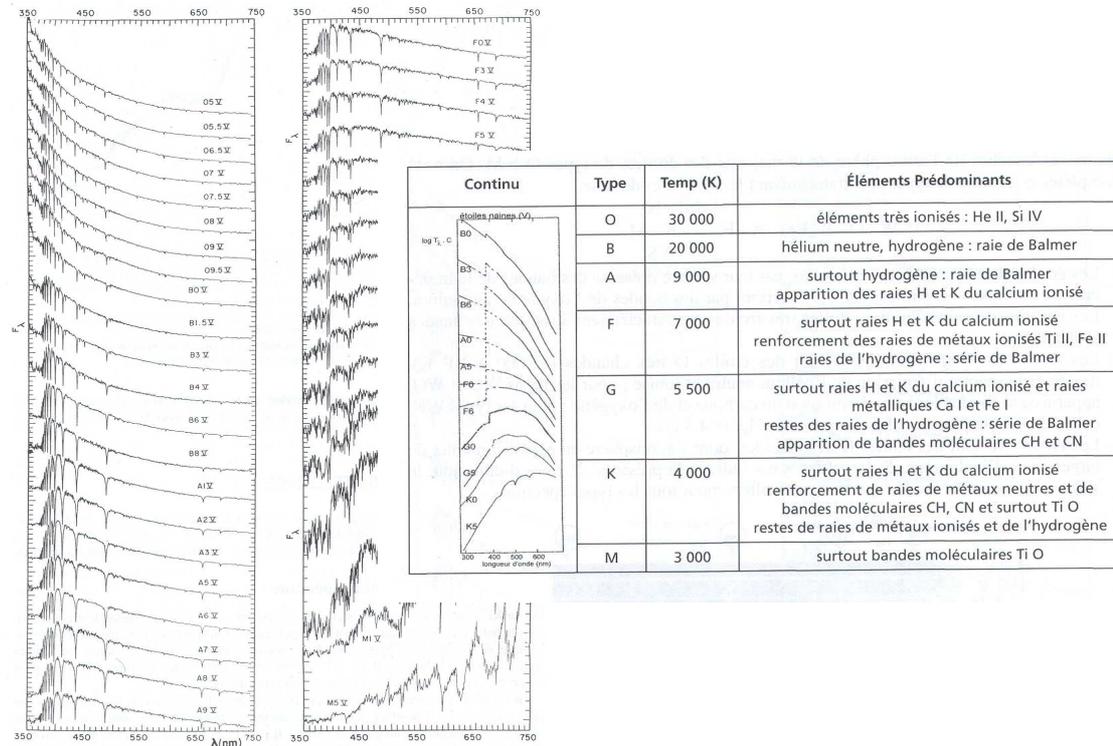


FIGURE 5.4: Spectres d'étoile en fonction de leur type spectral Crédit : A. Acker

absolue; on obtient alors un diagramme en plaçant la magnitude absolue des étoiles en fonction de leur type spectral. C'est le *diagramme de Hertzsprung-Russell* (diagramme HR), du nom des 2 astronomes qui l'ont établi pour la première fois vers 1910 (voir Fig. 5.5).

La magnitude absolue est souvent liée à la taille des étoiles. En effet, pour une température donnée (ce qui nous donne le type spectral), et une distance donnée (par exemple 10 pc, puisque c'est la distance de référence pour la magnitude absolue), une étoile sera d'autant plus lumineuse qu'elle sera grosse (en fait l'éclat sera proportionnelle à R^2 , où R est le rayon de l'étoile).

Sur le diagramme HR, on trouve que pour la majorité des étoiles, leur point dans ce diagramme est situé dans une bande étroite, appelée *séquence principale*, qui part des magnitudes très négatives pour le type O (étoiles très lumineuses et très chaudes) et descend en diagonale vers les magnitudes très positives pour le type M (étoiles très faibles et relativement froides). Le Soleil fait partie des étoiles de la séquence principale, ainsi que 80% des étoiles.

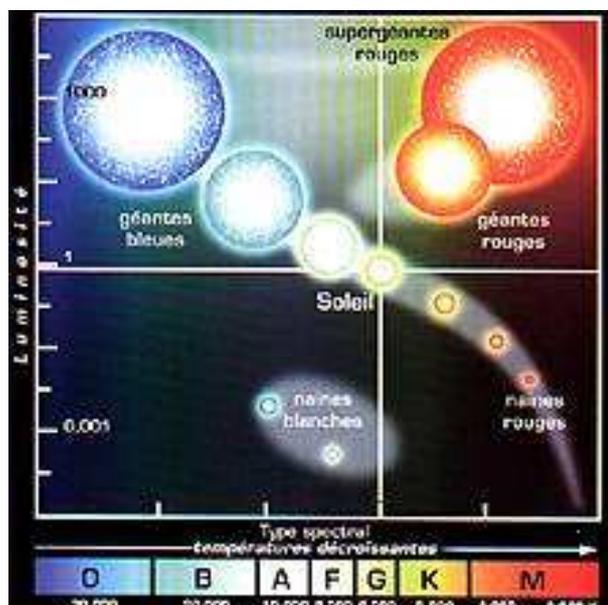


FIGURE 5.5: Diagramme de Hertzsprung-Russell.

La position d'une étoile sur la séquence principale, dépend essentiellement de sa masse : les étoiles les plus massives sont en haut de la séquence principale, les moins massives en bas. Ainsi, les étoiles les moins massives sont faibles et rouges, tandis que les plus massives sont brillantes et bleues.

Pour d'autres étoiles, la grande luminosité (magnitude absolue négative) ne dépend pas de la couleur : il s'agit de la branche des géantes et des supergéantes dont le rayon peut atteindre $1\,000 R_{\odot}$. Ainsi il y a des étoiles *géantes* et *super-géantes* qui sont « froides ». Enfin, il y a des étoiles chaudes mais de faible luminosité (donc de grande magnitude absolue) : ce sont les *naines blanches* dont le rayon est de l'ordre de $0,01 R_{\odot}$.

Une classification des étoiles se fait aussi suivant leur rayon qui est directement relié à la magnitude. Ainsi les classes I à IV, correspondent aux étoiles géantes et super-géantes qui peuvent aussi bien être rouges que bleues ; les naines blanches correspondent à la classe VII. Entre les deux, les étoiles de la séquence principale, qualifiées de naines définissent la classe V avec un rayon du même ordre que celui du Soleil. Légèrement en dessous de la séquence principale, on trouve encore la classe VI des sous-naines (voir Fig. 5.6).

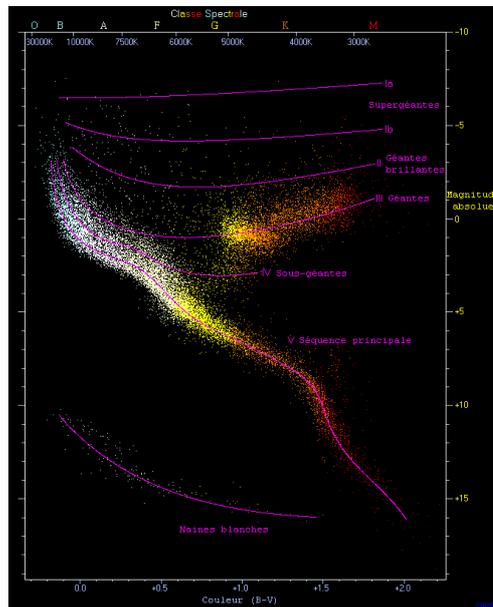


FIGURE 5.6: Echantillon d'étoile dans le diagramme HR. Les lignes horizontales correspondent aux classes d'étoiles suivant le rayon (I à VII).

5.3 Evolution des étoiles

Toutes les étoiles évoquées précédemment ne resteront pas indéfiniment à leur place sur le diagramme. A mesure que le temps passe, elles brûlent de plus en plus leur gaz, et se déplacent lentement jusqu'à rejoindre d'autres zones du diagramme. On va voir que l'évolution d'une étoile sur le diagramme ne correspond pas forcément aux grandes lignes observables sur le diagramme HR.

5.3.1 Les pouponnières

L'atténuation de la lumière des étoiles avec la distance est due à la présence de matière interstellaire. Dans la Voie Lactée, cette matière correspond à peu près à 10% de la masse totale. Lorsque cette matière est suffisamment concentrée elle est facilement détectable : les nébuleuses. Lorsqu'elles sont denses et froides, les nébuleuses apparaissent comme des nuages obscurs.

Mais elles peuvent aussi posséder en leur sein des étoiles centrales qui fournissent de l'énergie : ce sont les régions HII. Ces régions correspondent à des nuages chauds d'hydrogène ionisé (lorsque le nuage est froid et l'hy-

drogène non ionisé, il s'agit de région HII). La plus spectaculaire de ces régions est la nébuleuse d'Orion.

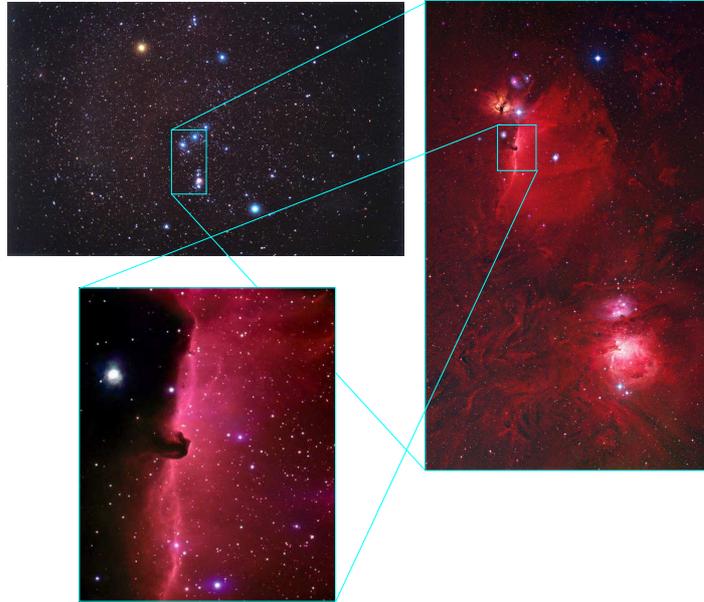


FIGURE 5.7: Région HII et nébuleuse de la “Tête de Cheval” de la constellation d’Orion.

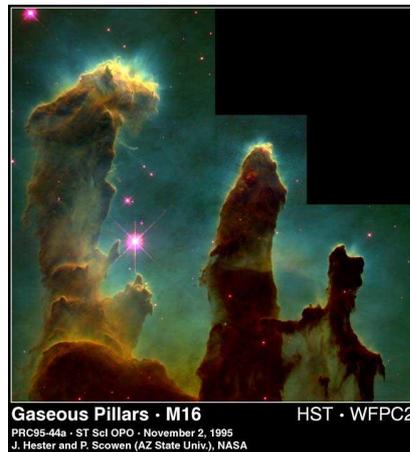


FIGURE 5.8: Nébuleuse de l’Aigle

Crédit : NASA/HST

Au sein de ces régions se trouve des étoiles de type O ou B de la séquence principale, qui sont des étoiles suffisamment chaudes pour fournir l’énergie

nécessaire à l'ionisation de l'hydrogène. La densité des régions HII est généralement de l'ordre de 100 masse de proton par m^3 . Les régions HI sont plus denses que les régions HII (10^7 mp.m^{-3}) mais sont difficilement détectables car elles sont froides et émettent principalement dans le domaine radio. Plus denses encore ($10^{10} \text{ mp.m}^{-3}$) sont les nuages moléculaires, mais ils sont à la même température que les régions HI.

5.3.2 L'effondrement

Ces nuages sont le lieu privilégié de formation de étoiles. En effet leur composition chimique est semblable à celle des étoiles et ils comportent des régions de fortes densités entourant des étoiles. Isolé de toute influence extérieurs le nuage moléculaire peu rester stable indéfiniment, mais un nuage de la Voie Lactée par exemple va être perturbé lors d'un passage au travers un bras de la galaxie. Ce type de choc peut provoquer un début d'effondrement gravitationnel du nuage. Cet effondrement peut conduire à la formation d'étoile, qui elles mêmes vont induire un choc dû à la pression de la lumière qu'elles émettent, induisant ainsi une réaction en chaîne de formation d'étoiles.

Le nuage moléculaire, dont la masse peut facilement atteindre $50\,000 M_{\odot}$, se fractionne en petite partie, *les globules* (voir Fig. 5.9), donnant naissance ainsi à des groupes des étoiles appelé amas ouverts (voir Fig. 5.10). Les étoiles se formant prêt l'une de l'autre vont rester liées gravitationnellement conduisant ainsi à des systèmes multiples.

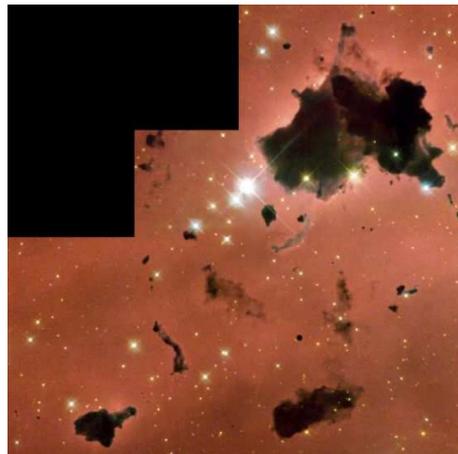


FIGURE 5.9: Fractionnement d'un nuage moléculaire en globules
HST/NASA

crédit :



FIGURE 5.10: L'amas ouverts : des Pleïades (à gauche, © AAO/Royal Observatory, Edinburgh), de la nébuleuse de la Rosette (à droite, © CalTech/Palomar)

Le nuage moléculaire se fragmente donc, chaque fragment engendrant la formation d'une étoile. Si on considère un globule typique, appelé *protoétoile*, l'énergie interne due à la contraction gravitationnelle est si forte que la protoétoile s'échauffe et devient extrêmement lumineuse. La protoétoile qui a donné naissance au Soleil a probablement eu une luminosité 500 fois plus forte que celle du Soleil.

Si la masse de la protoétoile est inférieure à $0,08 M_{\odot}$ alors la température au centre de l'astre ne sera jamais assez grande pour que des réactions de fusion de l'hydrogène en hélium aient lieu. La protoétoile atteint rapidement un rayon stable de l'ordre de celui de Jupiter avec une température externe de l'ordre de 1 500 K. La protoétoile est devenue une naine brune, une étoile ratée.

Si la masse est supérieure à $0,08 M_{\odot}$ alors les réactions de fusion de l'hydrogène en hélium peuvent avoir lieu. En moins d'un million d'années, ces réactions contre-balancent l'effet de contraction dû à la gravitation et un équilibre s'établit. Pendant ce temps, si le nuage qui a formé la protoétoile avait une rotation initiale, ce nuage, tout en étant chassé par la pression de radiation due à la nouvelle étoile, s'aplatit aussi en un disque de gaz et de poussières lui aussi en rotation et susceptible de se condenser lui-même en de futures planètes.

5.3.3 La séquence principale

Lorsqu'elle naît, l'étoile trouve alors sa place sur la séquence principale du diagramme HR. La place de l'étoile sur la séquence principale dépend de sa masse qui peut aller de $0,1 M_{\odot}$ à $100 M_{\odot}$ (au delà la protoétoile n'est pas stable et se fractionne) ; les étoiles les plus massives seront en haut à gauche, et les moins massives en bas à droite. Cette séquence correspond à la première phase de la vie des étoiles, lorsqu'elles "brûlent" leur hydrogène central pour le transformer en hélium. L'étoile reste sur la séquence principale tant qu'il y a dans son cœur de l'hydrogène disponible pour sa fusion en hélium. Cette phase peut durer 50 milliards d'années pour une étoile de $0,1 M_{\odot}$, mais seulement 20 millions d'années pour une masse initiale de $30 M_{\odot}$. Pour le Soleil, cette phase dure environ 10 milliard d'années. En fait toutes les étoiles ont la même vie sur la séquence principale, à la seule différence que plus elles sont massives plus elles vivent peu longtemps. En effet, plus elles sont massives plus elles vont consommer rapidement l'hydrogène qui se trouve dans leur cœur.

On estime la durée de vie d'une étoile sur la séquence principale par la relation :

$$t = 10 \text{ Ga} \frac{M(M_{\odot})}{L(L_{\odot})},$$

où M et L représente la masse et la luminosité d'une étoile en fonction de celle du Soleil.

Durant son séjour sur la séquence principale, une étoile brûle de l'hydrogène et le transforme en hélium. Ainsi de l'hélium va s'accumuler au cœur de l'étoile. Comme le noyau d'hélium prend moins de place que 4 noyau d'hydrogène, le centre du noyau va se contracter, engendrant une élévation de la température. Les zones périphériques du noyau se rapprochent à leur tour et voient leur température augmenter ; donc de la fusion de l'hydrogène va être facilité. En conséquence, la luminosité de l'étoile va augmenter légèrement au cours de la période de l'étoile sur la séquence principale. D'autre part, la pression de radiation ayant augmentée, elle provoque une expansion des couches externes de l'étoile, donc une baisse la température de surface. Ainsi une étoile sur la séquence principale va se déplacer légèrement sur le haut et vers la droite (voir Fig. 5.11).

5.3.4 Evolution post-séquence principale d'une étoile de type Soleil

L'évolution d'une étoile après sa période sur la séquence principale dépend essentiellement de sa masse. Pour les étoiles de faibles masses, de type M par

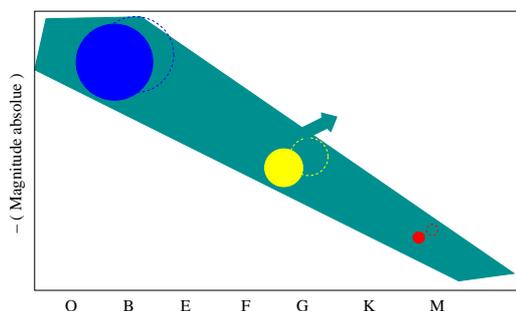


FIGURE 5.11: Déplacement d'une étoile au cours de sa vie sur la séquence principale

exemple, leur vie sur la séquence principale est plus longue que l'âge de l'univers, mais des simulations permettent de montrer que ces étoiles vont se refroidir tranquillement sans passer par la phase de *géante rouge*.

Pour les étoiles plus massives, il y a rupture de l'équilibre qui s'était établi entre la pression de radiation dans le cœur de l'étoile et la pression due au poids des couches supérieures qui tend à contracter l'étoile. Nous allons détailler d'abord le cas d'une étoile de masse similaire à celle du Soleil.

La phase de géante rouge

Pour une étoile dont la masse est de l'ordre de celle du Soleil, le comportement de l'étoile sur la séquence principale va en s'accroissant : augmentation de l'énergie produite au cœur de l'étoile, les couches extérieures de l'étoile vont s'étendre conduisant à une augmentation du rayon de l'étoile, associé à un abaissement de température. Ainsi, la luminosité de l'étoile ne change pas globalement mais sa température de surface diminue. L'étoile se déplace sur la droite du diagramme HR.

Ceci se passe jusqu'au point où l'énergie accumulée au cœur de l'étoile va rompre l'équilibre et expulser violemment les couches externes de l'étoile. La luminosité de l'étoile va monter en flèche, l'étoile est devenue une géante rouge. Pour le Soleil sa luminosité sera multipliée par 100.

Flash de l'hélium et phase sous-géante

En se contractant le cœur augmente sa température : pour $T > 10^8$ K, les noyaux d'hélium vont pouvoir fusionner en noyaux de carbone (pour $T > 5 \times 10^8$ K, ce sont les noyaux de carbone qui fusionnent en noyaux d'oxygène, et pour $T > 10^9$ K, on obtient du silicium, mais ce sont les étoiles plus

massives qui vont produire ces éléments lourds, parfois simultanément dans plusieurs couches superposées dans le cœur, les plus profondes produisant les éléments les plus lourds, et l'hydrogène continuant à fusionner en hélium à la périphérie du cœur). Selon la masse de l'étoile, la fusion de l'hélium en carbone peut s'effectuer de manière violente. C'est le *flash de l'hélium*. Pendant et après le flash, les couches externes de l'étoiles sont expulsées très loin, engendrant une perte de masse de l'étoile. La dilatation du noyau due au flash engendre une diminution de la température au cœur de l'étoile. L'étoile retrouve ainsi un équilibre pendant lequel l'hélium continue à fusionner en carbone au cœur de l'étoile et l'hydrogène en hélium en périphérie du cœur. C'est la phase de *sous géante*. La plus part des sous géantes se trouvent sur une bande horizontale du diagramme HR appelée *branche horizontale*.

Phase supergéante rouge et nébuleuses planétaires

L'étoile quitte la branche horizontale un peu comme elle a quitté la branche principale. Le carbone s'accumule au cœur de l'étoile, provoquant une contraction du noyau et donc une augmentation de la température interne. Mais comme le noyau est maintenant stratifié, chaque couche va contribuer à l'augmentation de l'énergie. L'étoile va donc monter plus haut que ce qu'elle avait fait lorsqu'elle était devenue une géante rouge, elle devient cette fois une *supergéante rouge* en suivant une trajectoire sur une bande presque verticale appelée *branche asymptotique*. Notre Soleil aura une luminosité multipliée par 10 000 lors de sa phase de supergéante rouge.

Une étoile supergéante commence à avoir cohésion moins importante du à la taille et la dilution. Ainsi sa surface devient irrégulière et l'étoile peut aussi se mettre à pulser. De même sa surface n'est plus régulière et peut présenter des boursouffures (voir Fig. 5.12).

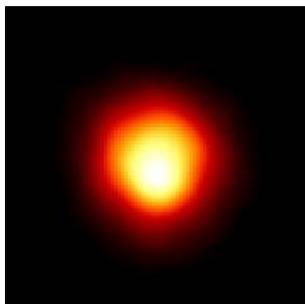


FIGURE 5.12: *Betelgeuse, une étoile en fin de vie* crédit : NASA/HST

Les couches externes finissent par être éjectées sous l'effet de la pression

du à la lumière émise par le noyau. Le résultat de cette expulsion est une nébuleuse planétaire (voir Fig. 5.13).



FIGURE 5.13: Nébuleuses planétaires en haut : La Lyre, le Sablier, au milieu : l'Esquimau, l'Hélice, en bas : l'Oeil de Chat crédit : NASA/HST

Phase naine blanche

Lors de l'expulsion des couches externe, le cœur de l'étoile va se refroidir. Il ne va plus produire d'énergie par fusion nucléaire mais va se contracter peu à peu pour devenir une naine blanche. Ces étoiles sont très chaude (d'où leur couleur) à cause de l'énergie thermique venant de la contraction de l'étoile. Cependant les naines blanches sont très peu lumineuses étant donnée leur dimension très réduite : de l'ordre de 10 000 km. Leur faible masse (de l'ordre de $0,8 M_{\odot}$) montre que les étoiles perdent une grande quantité de leur masse au cours de la phase nébuleuse planétaire en particulier (en effet la période sur la séquence principale d'une étoile de l'ordre de $0,8 M_{\odot}$ est plus longue que l'âge de l'univers).

5.3.5 Evolution des étoiles plus massives

Si une étoile à une masse supérieure a $2 M_{\odot}$ alors le flash de l'hélium n'aura pas lieu. Au contraire les réaction de fusion des éléments plus lourd vont pouvoir commencer tout de suite. Ainsi, l'étoile va avoir une structure en couche ou les éléments les plus lourds vont être produit vers le centre de l'étoile. Pour une étoile de masse supérieure à $8 M_{\odot}$ les réactions de fusion vont se faire jusqu'à produire du fer. En effet, le fer est le noyau atomique le plus stable, il est donc très difficile d'obtenir de l'énergie ni par fusion ni par fission du fer. Ainsi le cœur de fer se contracte sans qu'aucune réaction nucléaire ne vienne contrebalancer la pression. La pression devient telle que les électrons qui étaient libres de voyager entre les noyaux vont être contraints à se combiner avec les protons formant ainsi des neutrons. A la fin de se processus on obtient que des neutrons, c'est ce qu'on appelle de la matière neutronique. Cette matière est extrêmement dense ($10^{17} \text{ kg.m}^{-3}$). La contraction du noyau est extrêmement rapide (un dixième de seconde). Ainsi la matière va atteindre une densité encore plus forte que celle de la matière neutronique. Il se produit alors un rebond où le noyau revient à une taille normale, engendrant une onde de choc qui se propage dans les couches de l'étoile. Plus elle va vers les couches externes, plus l'onde de choc accélère (les couches étant de densités de plus en plus faible). Arrivée aux couches externe, sa vitesse est telle qu'elle va engendrée une explosion des couches externes de l'étoiles à des vitesses pouvant atteindre la moitié de la vitesse de la lumière. L'étoile est devenue une supernova. La luminosité d'une supernova peut atteindre 10 milliards de fois celle du Soleil, mais ce sont des phénomène assez rares (voir Fig. 5.14).

L'explosion engendre la formation d'une nébuleuse en expansion qui entoure le résidu stellaire (voir Fig. 5.15). Cette nébuleuse est enrichie en

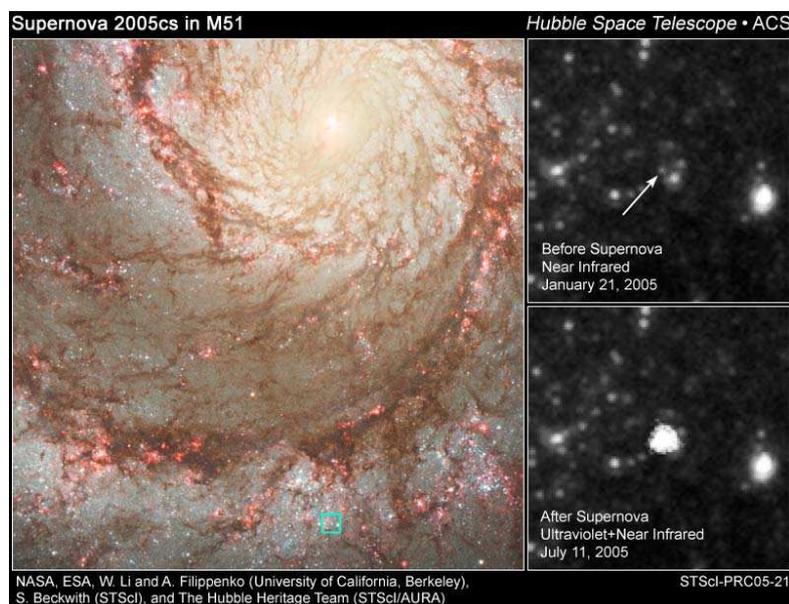


FIGURE 5.14: Supernova dans la galaxie d'Andromède crédit : NASA/HST

éléments lourds (formés dans l'étoile) par rapport au nuage de matière inter-stellaire d'où était naît l'étoile. D'ailleurs, une nucléosynthèse d'éléments très lourds (fer et au delà) peut résulter de l'explosion elle-même. L'explosion de l'étoile accélère aussi l'effondrement du résidu stellaire sur lui-même jusqu'à devenir une étoile naine blanche (si la masse initiale est inférieure à $3,5 M_{\odot}$). Si la masse initiale est supérieure à $3,5 M_{\odot}$, le collapse se poursuit jusqu'à former une *étoile à neutrons*, ou *pulsar* (voir Fig. 5.16), voire un *trou noir* pour les plus massives.

Dans une étoile à neutrons la matière dégénère par annihilation des charges des protons et électrons, aboutissant à leur transformation en neutrons et permettant une densité énorme puisque la répulsion électrostatique des protons n'existe plus. Le résidu stellaire, d'une masse comparable à celle du Soleil, se retrouve dans une sphère de quelques km de rayon, tournant sur lui-même à raison parfois de plusieurs centaines de tours par seconde (à cause de la conservation du moment cinétique de l'étoile).

Finalement, il résulte de l'évolution des étoiles, que celles-ci enrichissent progressivement le milieu interstellaire en éléments lourds, permettant à de nouvelles générations d'étoiles de profiter de cet enrichissement pour former avec elles des planètes comme la Terre, riches en minéraux divers. De ce point de vue, le Soleil est en effet une étoile de deuxième génération au moins. A l'inverse, des étoiles comme celles des amas globulaires, qui mon-

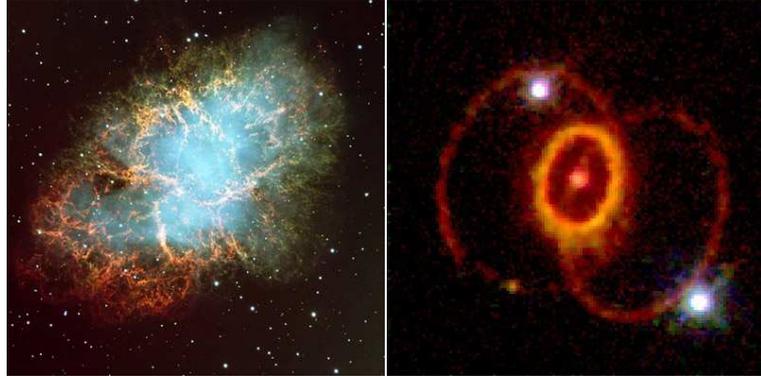


FIGURE 5.15: *Supernovae du crabe à gauche (crédit : NASA/HST) et de 1987*

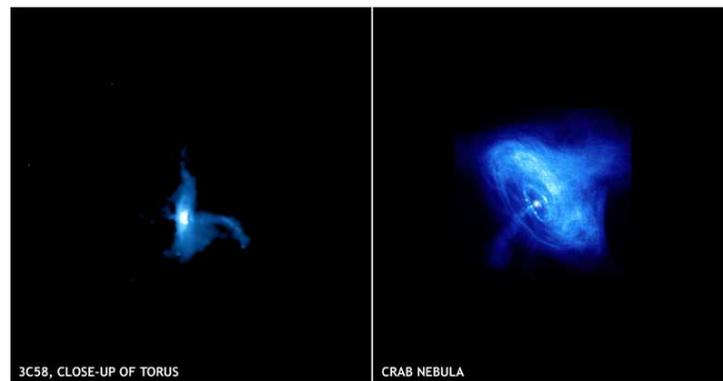
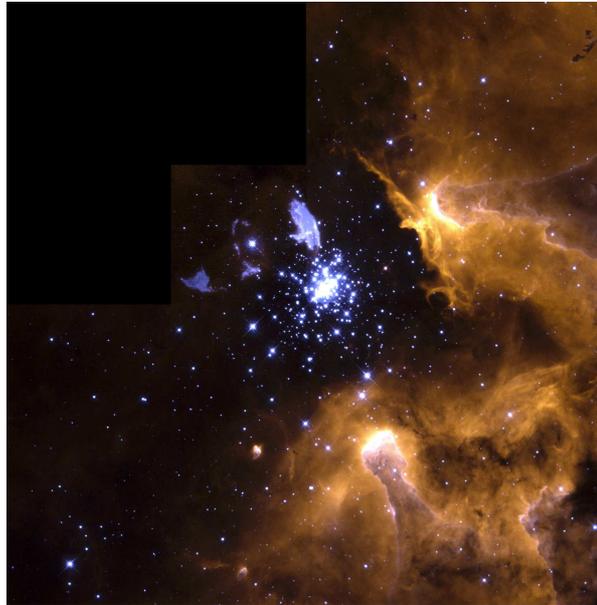


FIGURE 5.16: *Pulsar au sein du crabe* *crédit : NASA/CXC/SAO*

trent des spectres déficients en éléments lourds, semblent être contemporaines des débuts de la formation de la Galaxie. La dépendance de la durée de vie des étoiles vis-à-vis de leur masse explique aussi pourquoi dans les galaxies spirales riches en matière interstellaire, les étoiles très massives et très brillantes (c'est-à-dire jeunes, puisque de telles étoiles ont une durée de vie très courte) ne sont observées que dans les bras spiraux, là où elles viennent juste de se former.

La photo de la figure 5.17 de l'amas ouvert NGC 3603 montre différentes étapes de la vie d'une étoile : l'étoile super massive Sher25 de 100 masse solaire a déjà atteint sa fin de vie est expulsee la matière dans deux nébulosités de part et d'autre du plan de l'anneau de l'étoile. Les étoiles jeunes de l'amas

ionisent et dispersent la matière sculptant des piliers orientés radialement vers les étoiles. Dans les régions les plus denses du pilier, d'autres étoiles sont en train de se former.

FIGURE 5.17: *Amas ouvert NGC 3603**crédit : NASA/HST*

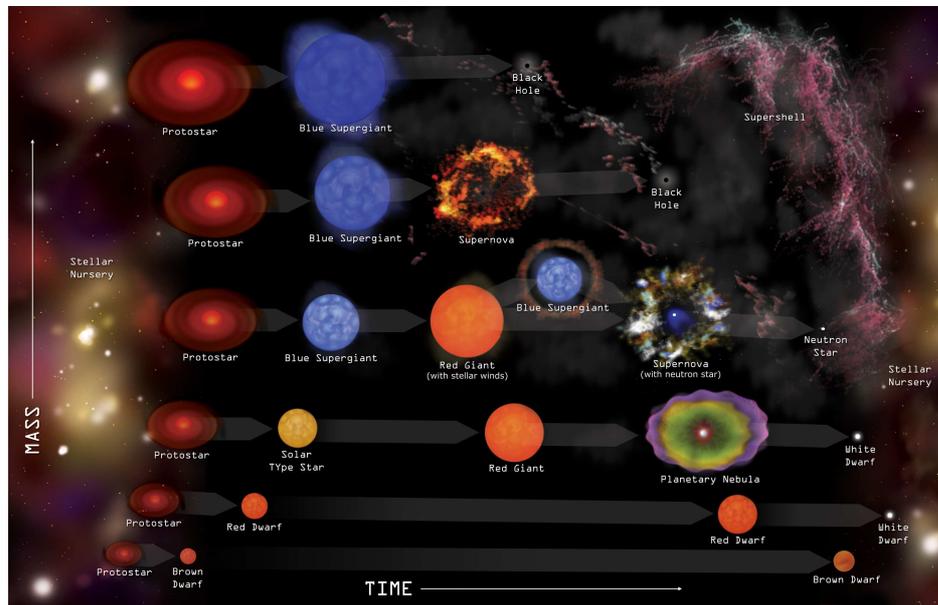


FIGURE 5.18: Etapes de la vies des étoiles en fonction de leur masse initiale
 crédit : NASA/CXC/SAO

Chapitre 6

Les galaxies

6.1 La Voie Lactée



FIGURE 6.1: *La Voie Lactée* crédit : D. Cantin

6.1.1 Structure générale

C'est un vaste ensemble constitué d'abord d'un *disque* contenant une masse condensée en étoiles d'environ $10^{11} M_{\odot}$ et une masse de matière interstellaire non condensée comprise entre 10^9 et $10^{10} M_{\odot}$. Ce disque a un

diamètre de 30 kpc pour une épaisseur moyenne de 0,7 kpc sauf au voisinage du *centre* qui apparaît comme un renflement sphérique (appelé *bulbe*) d'environ 3 kpc de diamètre. C'est parce que le Soleil est l'une des étoiles contenue dans ce disque que notre Galaxie nous apparaît comme une importante concentration d'étoiles le long d'un grand cercle de la voûte céleste, c'est *La Voie Lactée* (voir Fig. 6.1). Au voisinage du Soleil, les étoiles sont en moyenne distantes les unes des autres de 1,6 pc mais elles peuvent aussi être regroupées en amas ouverts plus denses contenant de quelques dizaines à quelques centaines d'étoiles ; elles peuvent aussi être liées par paires (d'où leur nom d'*étoiles doubles*) et elles peuvent alors être à des distances comprises seulement entre quelques millions et quelques milliards de km.

Dans le bulbe, la densité d'étoiles va croissant vers le centre et certaines observations (en rayons X) semblent même indiquer la présence au centre d'un *trou noir* super-massif équivalent à quelques millions de masses solaires (voir Fig. 6.2).

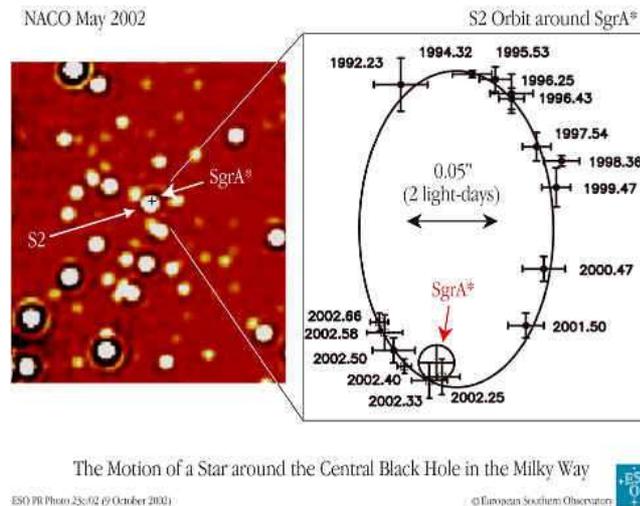


FIGURE 6.2: Le trou noir au centre de la Galaxie.

Dans le disque, la densité des étoiles et de la matière interstellaire est distribuée selon une structure spiralée : le bord du bulbe dans le plan galactique est le point de départ de 4 *bras spiraux* qui semblent s'enrouler dans ce plan autour du bulbe ; ce sont des zones du plan galactique où la densité de la matière interstellaire est la plus forte (ondes de densité).

La Galaxie comporte aussi un *halo sphérique*, de même centre et de même diamètre que le disque galactique, et peuplé d'une centaine d'*amas globulaires*. Ces amas sont des condensations de plusieurs dizaines de milliers

d'étoiles réparties dans des globules ayant une symétrie quasi-sphérique ; la densité d'étoiles va en croissant vers le centre de ces globules. Ces amas se comportent comme des satellites de la Galaxie, tournant autour du bulbe galactique sur des orbites très allongées qui coupent le disque au voisinage du bulbe ; ces mouvements s'effectuent avec des périodes de quelques centaines de millions d'années.

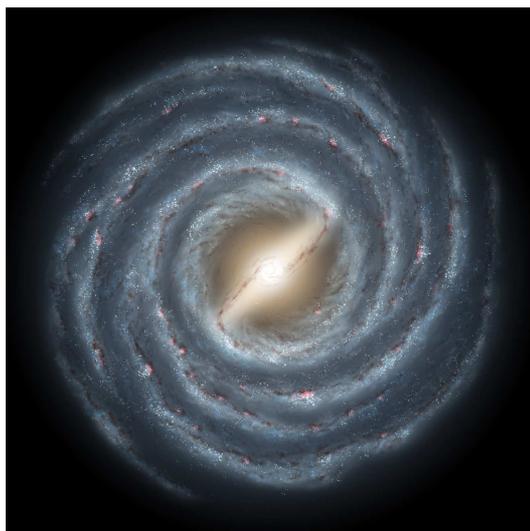


FIGURE 6.3: *La Voie Lactée reconstituée par le Spitzer Space Telescope.*

Dans le plan galactique, la matière interstellaire (poussières et gaz) est répartie en vastes nuages qui, malgré leur densité très faible, absorbent le rayonnement visible au point d'empêcher de voir dans le plan galactique au delà de quelques milliers d'années de lumière. Cette matière ténue est détectée par les rayonnements qu'elle est susceptible d'émettre ou d'absorber (nébuleuses brillantes ou nébuleuses obscures). Les poussières sont des particules microscopiques représentant moins de 1% de la masse du milieu interstellaire, constituées essentiellement de graphite, de silicates de fer, d'aluminium, de calcium, de magnésium. Les poussières se trouvent mélangées à des gaz ; ces derniers sont constitués de nuages moléculaires (essentiellement H₂ mais aussi CH, CN⁺ et CN observés dans le domaine visible, et plus de 80 autres molécules, dont le radical OH, observés dans le domaine radio) ; ces nuages comprennent entre 100 et 1 000 molécules par cm³ pour une température de 10 à 20 K. La structure spiralée de la galaxie est aussi observable par les vastes nuages d'hydrogène atomique (régions HI) présents surtout dans les bras spiraux, d'une densité de l'ordre de 50 atomes par cm³ et de température comprise entre 25 et 250 K ; ces conditions permettent à l'hydrogène d'émettre

une raie intense à 21 cm de longueur d'onde, qu'on ne sait pas reproduire sur Terre et que l'on qualifie pour cette raison de raie interdite.

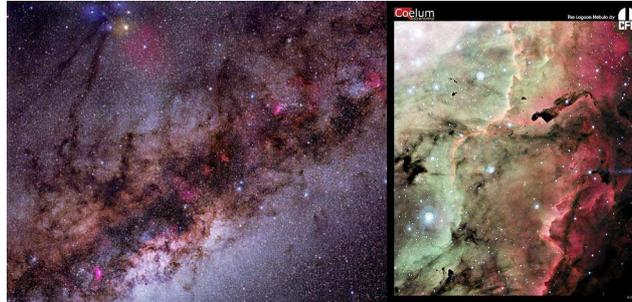


FIGURE 6.4: Vers la nébuleuse de la Pipe (crédit : Gleason) et Nébuleuse de la Lagune (crédit : CFHT, Cuillandre Coelum)

6.1.2 Le Soleil dans la Voie Lactée

Le Soleil est à environ 8,5 kpc du centre galactique et pratiquement dans le plan de symétrie du disque (ou plan galactique). Le Soleil est actuellement entre deux de ces bras spiraux, mais cette situation évolue du fait de la rotation galactique. Le Soleil par exemple décrit au voisinage du plan galactique une orbite sensiblement circulaire centrée sur le bulbe, à raison de 220 km par seconde et avec une période de 237 millions d'années.

On a :

$$\begin{aligned}
 R_{\odot} &= 8,5 \text{ kpc} \\
 V_{\odot} &= \Omega_{\odot} R_{\odot} = 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{ainsi} \quad P_{\odot} = 237 \text{ Myr} \\
 P_n &= \frac{2\pi}{\sqrt{4\pi\mu\rho_0}} \approx 62 \text{ Myrs}
 \end{aligned}$$

La rotation galactique des autres étoiles est semblable à celle du Soleil et avec une vitesse qui est paradoxalement presque indépendante de leur distance au centre galactique. La constance de cette vitesse est incompatible avec la distribution d'étoiles observée et il existerait de la matière obscure, non encore observée, dont la masse totale pourrait bien être beaucoup plus importante que celle de l'ensemble des étoiles visibles. La recherche de cette masse manquante est l'une des préoccupations actuelles des astronomes. Cependant la mission Hipparcos a permis de réduire considérablement l'importance de cette matière noire.

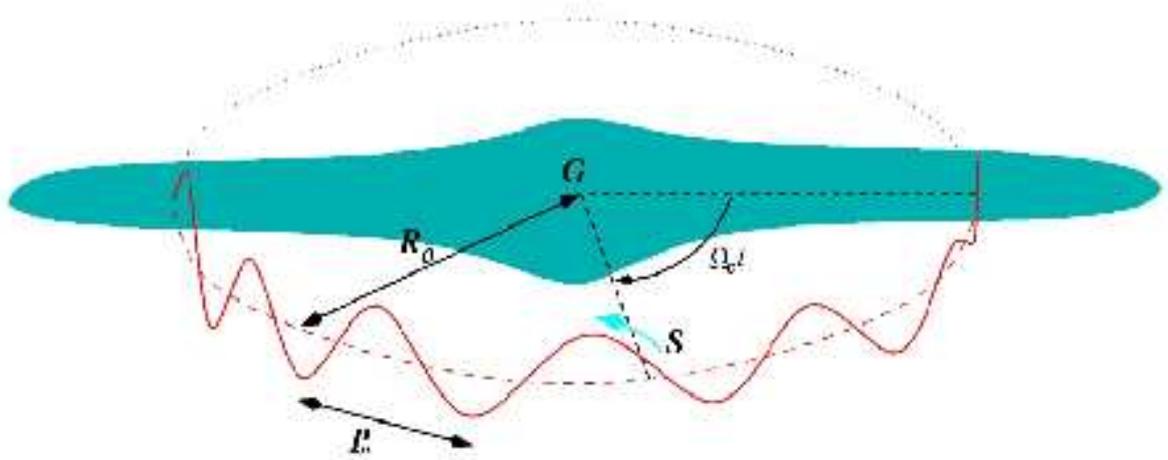


FIGURE 6.5: Mouvement du Soleil autour de la voie lactée.

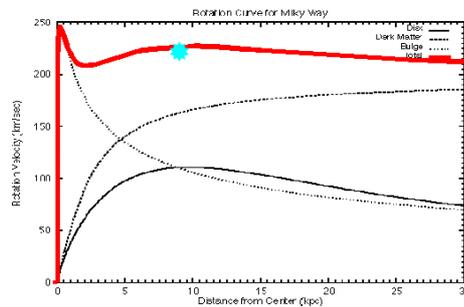


FIGURE 6.6: Mouvement du Soleil autour de la voie lactée.

6.2 Les autres galaxies

Pendant longtemps les galaxies étaient vues comme des nébuleuses sans qu'il soit possible de déterminer leur composition. Seul Emmanuel Kant vers 1750 supposa que ces nébuleuses correspondaient à des regroupements d'étoiles semblables à celui de notre Galaxie. Mais ce n'est qu'en 1917, grâce à

l'astronome Edwin Hubble, que la nébuleuse d'Andromède révéla sa vraie nature, c'est-à-dire qu'elle était en fait constituée d'un grand ensemble d'étoiles. Hubble pu montrer que cet ensemble d'étoiles était extérieur à notre Galaxie en estimant sa distance à partir d'étoiles variables (les Céphéïdes) présentes dans la nébuleuse.

La Galaxie devenait ainsi une simple galaxie parmi tant d'autres.

6.2.1 Les différents types de galaxie

Il existe, au delà de la Galaxie, d'autres galaxies qui peuvent différer par leurs dimensions, leur forme ou leur composition. On distingue 3 types de galaxies : spirales, elliptiques et irrégulières.

les galaxies spirales

Elles apparaissent, comme notre galaxie, avec une structure de disque en rotation, contenant de la matière stellaire et interstellaire répartie inégalement, la densité étant plus forte dans des zones spiralées ou bras spiraux. Ces bras peuvent être attachés à un bulbe sphérique ou aux extrémités d'un bulbe très allongé ressemblant à une barre (spirales barrées). Leur masse peut être comprise entre 10^9 et $5 \times 10^{11} M_{\odot}$ et leur diamètre entre 20 000 et 150 000 a.l. Ces galaxies sont très riches en poussières et en gaz, comme notre Galaxie. L'étude de l'évolution des étoiles dans une galaxie, montre que les galaxies spirales contiennent encore beaucoup d'étoiles jeunes, formées par la condensation de nuages de cette matière interstellaire qu'on trouve abondamment dans ce type de galaxie.

les galaxies elliptiques

Elles ne présentent aucune structure et apparaissent comme de vastes concentrations d'étoiles de forme sphérique ou ellipsoïdale, avec très peu de gaz interstellaire et pas de poussières. Leur masse peut être comprise entre 10^6 et $10^{13} M_{\odot}$, et leur diamètre entre 2 000 et 500 000 a.l. L'absence de poussières dans la matière interstellaire indique aussi un déficit d'étoiles jeunes dans ce type de galaxie.

les galaxies irrégulières

Elles n'ont pas de forme particulière. Leur masse peut être comprise entre 10^8 et $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ et leur dimension entre 5 000 et 50 000 a.l. Entre leurs

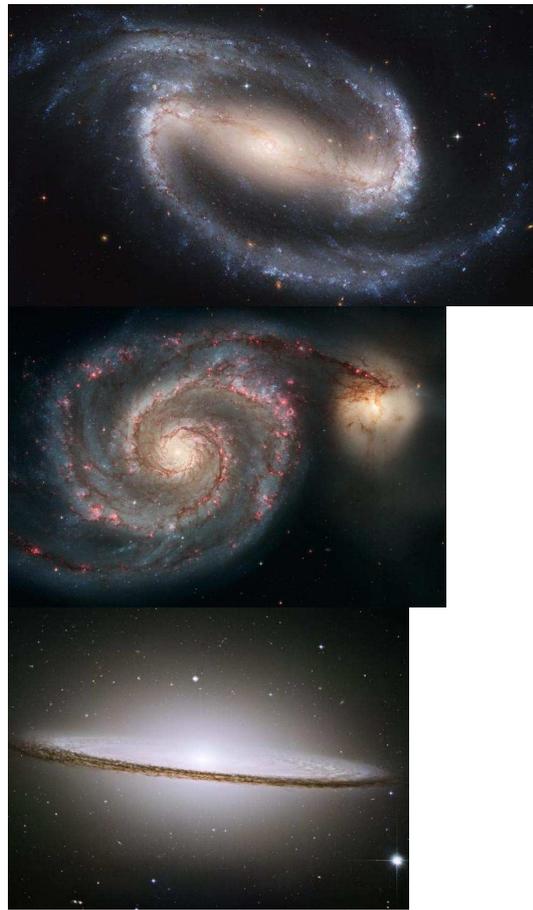


FIGURE 6.7: Exemple de galaxies spirales. De haut en bas : NGC1300, M51-Whirlpool, M104-Sombrero (crédit : NASA/HST)

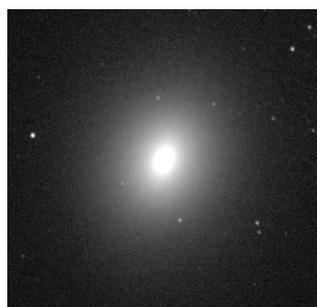


FIGURE 6.8: Exemple de galaxie elliptique : M 32

étoiles, ces galaxies contiennent beaucoup de gaz, et des poussières en quantité variable. Elles apparaissent ainsi comme intermédiaires entre les spirales et les elliptiques.



FIGURE 6.9: Exemple de galaxie irrégulière : Grand nuage de Magellan

C'est peut-être la faiblesse de la rotation des galaxies elliptiques et irrégulières qui les a différenciées des galaxies spirales. Les collisions relativement fréquentes entre galaxies pourraient aussi conduire les galaxies à fusionner pour donner finalement des galaxies elliptiques (Fig. 6.10).

Globalement, on voit davantage de galaxies spirales (60%) que d'elliptiques (30%) et d'irrégulières (10%), mais ces chiffres pourraient être biaisés par la luminosité propre des galaxies (davantage d'étoiles jeunes très brillantes et donc visibles de plus loin dans les spirales); l'Univers pourrait alors comporter jusqu'à 80% de galaxies elliptiques, 15% de spirales et 5% d'irrégulières. De toutes façons, leur distribution dans l'Univers est singulière comme on le verra plus tard.

6.2.2 Les galaxies actives

Il existe des galaxies qui présentent une activité intense qui se caractérise par des émissions anormalement élevées dans le domaine des rayons X venant de leur région centrale ou par d'immenses lobes de matière éjectées de part et d'autre de la galaxie. Les émissions provenant des galaxies actives se font sur des périodes relativement courtes (moins d'une année) impliquant des dimensions réduites pour la source (inférieure à une année lumière). Ceci renforce l'idée que ces émissions viennent de disque d'accrétion entourant des trous noirs se trouvant dans les régions centrales des galaxies. La matière du disque portée à très grande température émet des rayons X. Régulièrement, lorsque trop de matière s'accumule sur le disque, une partie est violemment rejetée suivant les lignes de champs magnétique, c'est-à-dire perpendiculairement au

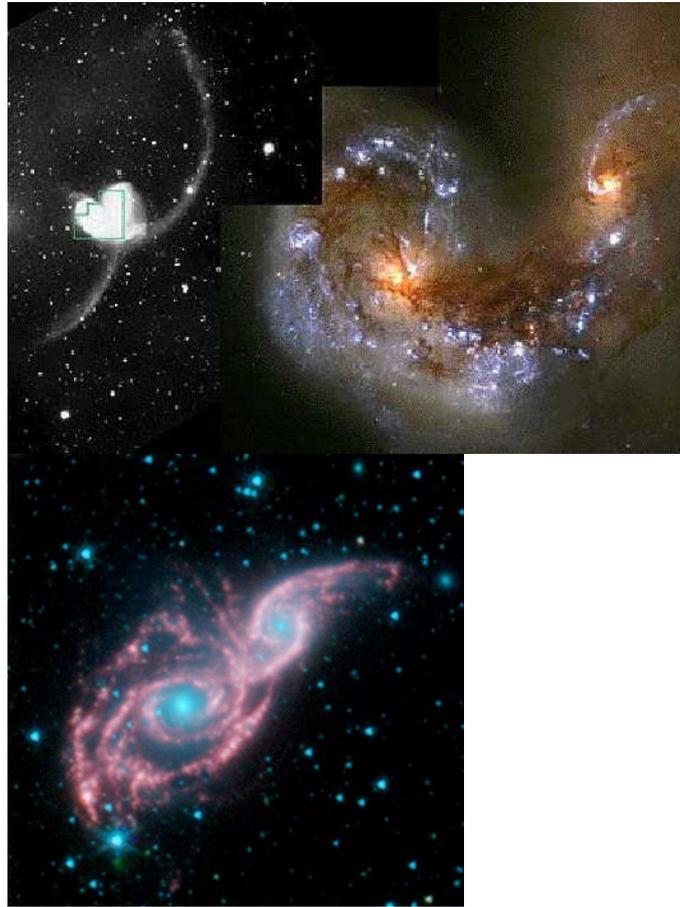


FIGURE 6.10: Collisions de galaxies : NGC4038 et NGC4039 (en haut), NGC2207 et IC2163 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Vassar)

disque d'accrétion. La matière éjectée le long de ces lignes de champ émet un fort rayonnement radio (Fig. 6.11).

Au début de la formation de l'univers, les galaxies avaient plus de matière environnante, ainsi les trous noirs avaient des plus grandes quantités de matières qui venaient s'accréter autour d'eux. En conséquence, les galaxies actives étaient bien plus nombreuses au début. Ceci explique que de nombreuses sources radios sont observées à des distances extrêmement élevées : ce sont les quasars (Quasi Stellar Astronomical Radio Source). Les quasars ont un rayonnement de 10 à 10 000 fois celui d'une galaxie normale et correspondent à des corps 20 000 fois plus petits qu'une galaxie normale. Le rayonnement radio montre que les quasars sont souvent associés à des structures doubles (Fig. 6.12).

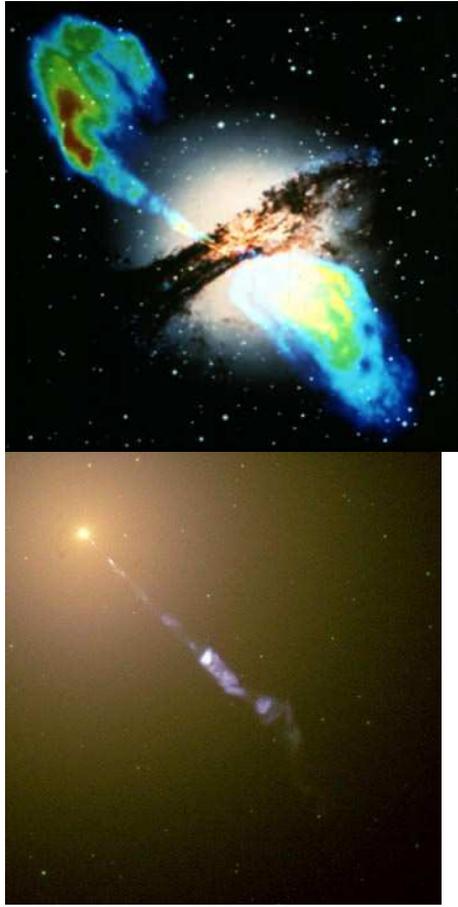


FIGURE 6.11:Galaxies actives : Centaure A en haut (Crédit : NASA/VLA/NOAO), M87 - Virgo

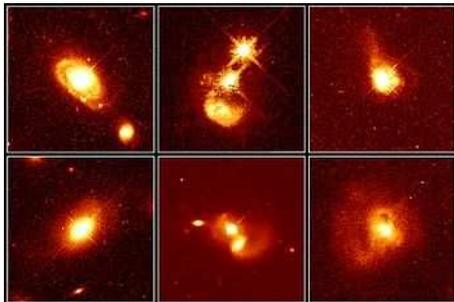


FIGURE 6.12:Les QUASARS

Les quasars étant les objets les plus lointains, ce sont ceux qui ont le mouvement apparent le plus petit. Ainsi ils sont utilisés pour définir un repère de référence fixe pour positionner les différents corps.

6.3 Organisation des galaxies



FIGURE 6.13:NGC 7317 - *Le quintette de Stephan*

On distingue plusieurs niveaux d'organisation des galaxies :

Les galaxies satellites

Les galaxies satellites de notre Galaxie : on trouve plusieurs petites galaxies proches de la Galaxie, considérées comme liées à elle par la gravitation et donc comme des satellites. Ce sont notamment les 2 Nuages de Magellan, visibles dans l'hémisphère sud, galaxies irrégulières distantes du centre galactique de 170 000 et 210 000 a.l. seulement. Leur forme irrégulière est due aux déformations engendrées par les effets de marées générés par la proximité de notre Galaxie. On trouve aussi au moins 6 petites galaxies elliptiques, très proches également.

Le Groupe local (ou amas local) de galaxies

Il s'agit d'une trentaine de galaxies, dont la notre et ses satellites, réparties non uniformément dans une sphère de 3×10^6 a.l. de rayon, centrée sur notre Galaxie. Au delà de cette distance et jusqu'à près de 8×10^6 a.l., on n'observe aucune galaxie. Le Groupe local contient notamment la grande galaxie spirale dite d'Andromède (du nom de la constellation où on la voit), distante de 2×10^6 a.l. et qui se rapproche de nous à 50 km.s^{-1} . Sa masse est comparable

à celle de notre Galaxie. Son diamètre, également comparable, nous la fait apparaître, malgré sa distance, sous un angle de $3'$ (6 fois le diamètre apparent de la Lune ou du Soleil). Elle possède aussi au moins 2 petites galaxies elliptiques satellites. C'est de nouveau la gravitation universelle qui maintient groupées les galaxies de l'amas local, leur imprimant des mouvements relatifs très lents mais réels et qui pourraient amener certaines à se rencontrer, voire à fusionner.

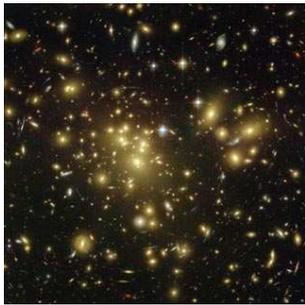


FIGURE 6.14: *L'amas de galaxies Abell 1689. (Crédit : NASA/ESA)*

Le Superamas local

C'est un regroupement de quelques centaines d'amas (ou groupes) de galaxies, chacun comprenant entre 10 et 800 galaxies. Chacun de ces amas a des dimensions comprises entre 1.6 et 13 millions d'a.l., avec une distance moyenne de 22 millions d'a.l. entre 2 amas. Le centre du superamas local se trouve dans la direction de la constellation de la Vierge, à quelques 40 millions d'a.l. de notre galaxie. La densité des amas va en croissant vers ce centre; le diamètre du superamas local serait de l'ordre de 100 millions a.l. C'est au sein des amas de galaxies que les galaxies peuvent interagir, se déformant parfois sous l'effet des marées gigantesques qu'elles peuvent soulever lorsqu'une galaxie en approche une autre.

Des bulles et filaments de superamas

Sur les 2 ou 3 premiers milliards d'a.l., la distribution des galaxies n'est ni homogène ni isotrope. On observe des groupements de galaxies de tous types en amas, eux-mêmes rassemblés en superamas, avec une organisation particulière des superamas : ceux-ci semblent en effet être situés sur des structures en forme de bulles ou de filaments, laissant des zones immenses vides de toute

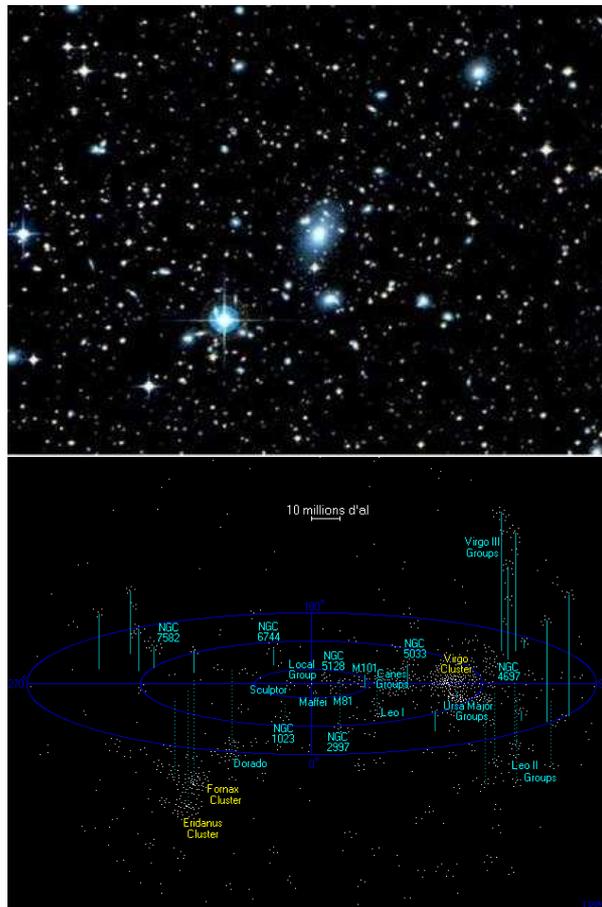


FIGURE 6.15: En haut : le centre du superamas Shapley 8 (Crédit : Palomar Observatory Sky atlas - National Geographic Society) ; en bas : Super amas de la Vierge (Virgo) (© Richard Powell)

galaxie (bulles vides de 35 millions de millions d'a.l. au cube). Les superamas recensés comprendraient au total 35 milliard de galaxies environ.

Un Univers lointain homogène et isotrope

Au delà des premiers milliards d'a.l. et à très grande échelle (de l'ordre de 100 millions d'a.l.), il semble que l'Univers ne comporte plus de structures plus grandes que les bulles et filaments observés à une échelle inférieure. Il paraît peuplé uniformément de galaxies, les galaxies les plus lointaines observées actuellement se situant à près de 10 milliard d'a.l. L'homogénéité

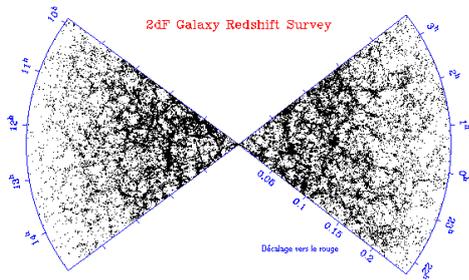


FIGURE 6.16:

de l'Univers à très grande distance est aussi confirmée par l'observation d'un rayonnement radio (appelé rayonnement cosmologique) correspondant à un univers homogène dont la température moyenne actuelle vaut 2,735 K, et qui serait le rayonnement résiduel lorsque l'univers est devenu visible (le Big Bang) à la suite de laquelle l'Univers en expansion se serait refroidi.

6.4 Expansion de l'Univers

FIGURE 6.17: *L'univers lointain (crédit : HST/NASA)*

En 1929 Hubble mis en évidence le lien entre la vitesse d'éloignement des galaxies et leur distances. Il en déduisit, non pas que les galaxies se déplaçaient les unes par rapport aux autres, mais que l'univers était en expansion. Cette expansion était d'ailleurs prévue par George Lemaître à partir de la relativité générale et la théorie du Big-Bang (voir chapitre 8). Ainsi plus

une galaxie est loin plus elle va s'éloigner de nous rapidement, portée par l'univers en expansion. La loi de Hubble reliant la vitesse d'éloignement à la distance est :

$$v = H_0 d \quad (6.1)$$

On peut aussi l'écrire en fonction du décalage vers le rouge observé (redshift) :

$$cz = H_0 d \quad (6.2)$$

où v est la vitesse d'éloignement, d est la distance de la galaxie observée et H_0 est la constante de Hubble. Aujourd'hui H_0 est compris entre 60 et 80 km/s par Mpc mais sa valeur était probablement plus grande au début de la formation de l'univers. Cette loi n'est valable pour des distances n'excédant pas le rayon de Hubble défini par :

$$R_H = \frac{c}{H_0} \quad (6.3)$$

Au delà de cette distance les lois de la relativité générale doivent être prises en compte.

Chapitre 7

La mesure des distances dans l'Univers

7.1 Les premiers calculs

Le premier à avoir essayé de calculer la distance Terre-Soleil est Aristarque de Samos (-280) qui a montré que le Soleil est 19 fois plus éloigné que la Lune (voir Fig. 7.1). Ceci lui permit d'émettre pour la première fois l'hypothèse d'un univers centré sur le Soleil (idée oubliée jusqu'à Copernic, 1543).

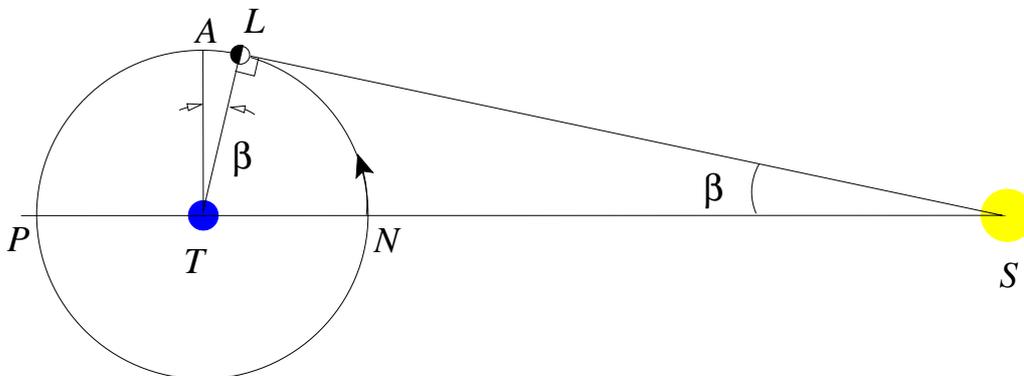


FIGURE 7.1: La méthode d'Aristarque de Samos pour calculer la distance Terre-Soleil

En réalité, le Soleil est 387 fois plus éloigné que la Lune. L'erreur d'Aristarque vient principalement de la difficulté à mesurer de manière précise l'instant exacte du quartier lunaire.

Puis, Hipparque (-150), calcula la distance Terre-Lune connaissant le diamètre de la Terre (voir Fig. 7.2) déjà connu depuis (Eratostène, -250) :

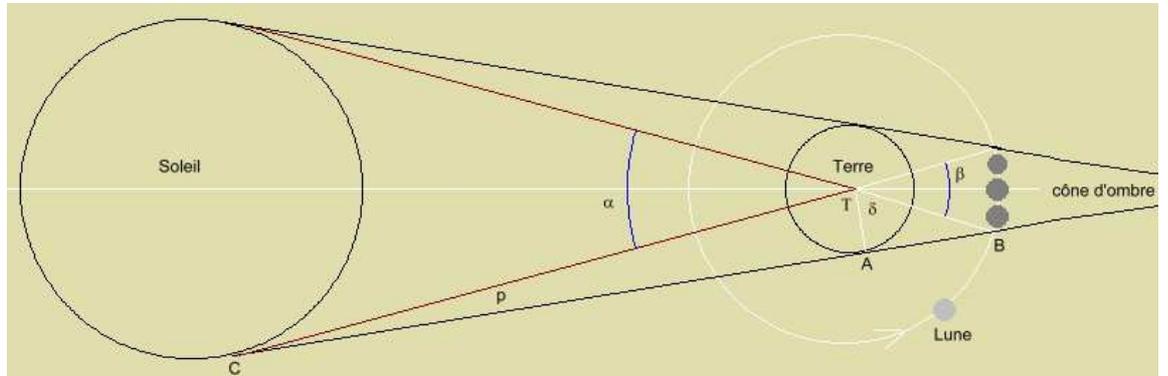


FIGURE 7.2: La méthode d'Hipparque pour calculer la distance Terre-Lune

Ainsi, on peut en déduire la distance Terre-Soleil.

Cependant, c'est le modèle de Copernic qui a permis par la suite de bien déterminer les distances des différentes planètes en utilisant comme unité l'unité astronomique. Plus tard (1671) la distance Terre Soleil a été bien mieux calculée à partir d'une mesure de la distance Terre-Mars, puis par le biais des distances en U.A., de la valeur de l'U.A. en km.

7.2 Introduction et triangulation

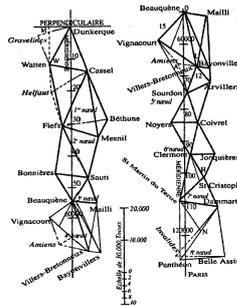


FIGURE 7.3: Mesure de la longueur d'un méridien. Crédit : ASM/Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

Avec l'envoi de nombreuses missions spatiales depuis plus de 40 ans, les mesures de distances dans le système solaire sont aujourd'hui très précises ; cependant, toutes ces mesures sont fondées sur notre connaissance des dimensions de la Terre, laquelle fut à la base de la définition du mètre et qui

a été l'objet de nombreuses missions de géodésie depuis plusieurs siècles : la méthode de base était celle de la triangulation par laquelle la distance d'un point éloigné P est obtenue par des mesures d'angles dans un triangle ABP : l'observateur vise P et B depuis A pour avoir l'angle \widehat{PAB} , puis P et A depuis B pour avoir l'angle \widehat{PBA} la mesure la longueur de la base AB permet ensuite de calculer les deux autres côtés du triangle par la formule de sinus : $PB \sin \widehat{PBA} = PA \sin \widehat{PAB}$.

Cette méthode a permis aux astronomes Delambre et Méchain de mesurer une partie de méridien entre Barcelone et Dunkerque (Fig. 7.3) conduisant ainsi à la définition du mètre : un quart de méridien terrestre est égal à 10 000 m.

Maintenant le mètre est défini à partir de la seconde et de la vitesse de la lumière. Une amélioration de nos connaissances sur la forme de la Terre fait que l'équateur n'est pas exactement égal à 40 000 km.

Maintenant, les distances de points éloignés à la surface de la Terre sont désormais connues par laser au millimètre près, grâce notamment aux satellites géodésiques qui l'observent en permanence. La distance Terre-Lune est elle-même mesurée par laser à quelques centimètres près en utilisant les 4 réflecteurs laser déposés sur son sol par les missions Apollo dans les années 70 (Fig. 7.4).

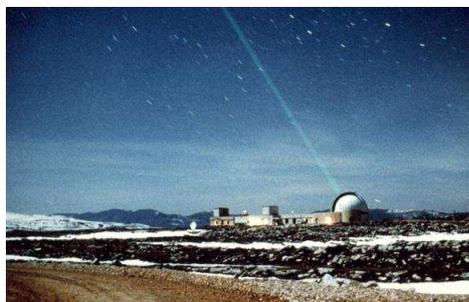


FIGURE 7.4: Tire laser sur la Lune depuis le plateau de Caussole (OCA)

Les planètes sont aussi régulièrement visées par des faisceaux-radar. Dans tous ces cas, on mesure les distances par l'intermédiaire du temps mis par un paquet de photons pour aller jusqu'à la cible puis pour revenir vers l'observateur après réflexion sur sa surface. Enfin, des sondes spatiales ont été suivies en permanence par radio jusqu'à des distances de plusieurs dizaines d'unités astronomiques.

Toutes ces mesures du système solaire nous permettent désormais de connaître la valeur de l'UA à 10^{-9} près : L'UA est maintenant définie comme

la distance parcourue à la vitesse de la lumière ($299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) en $499\,004\,782\text{ s}$, d'où sa valeur de $149\,597\,870\text{ km}$. C'est cette valeur de l'UA qui sert ensuite pour déterminer les distances des autres astres, d'abord les étoiles puis les galaxies.

7.3 La distance des étoiles

Il y a différentes manières de mesurer la distance des étoiles. La première, qui est une méthode directe est la parallaxe trigonométrique. Elle permet de connaître directement la distance d'étoiles relativement proches du soleil. Les autres méthodes utilisent les propriétés physiques des étoiles dont les effets observés depuis la Terre dépendent de la distance. Ainsi on peut commencer par calibrer l'évolution de ces effets avec la distance à partir des étoiles proches dont la distance est connue directement pour ensuite calculer des distances d'étoiles beaucoup plus éloignées.

7.3.1 Les parallaxes trigonométriques

Pour mesurer directement la distance des étoiles les plus proches du Soleil, on utilise une méthode géométrique appelée méthode des parallaxes : c'est dans son principe la même méthode de triangulation décrite plus haut, où cette fois la base d'observation d'une étoile proche est au maximum un diamètre de l'orbite héliocentrique de la Terre ; en effectuant à 6 mois d'intervalle deux observations d'une même étoile suffisamment proche, on voit cette étoile dans deux directions légèrement différentes, directions qui peuvent être repérées par rapport à d'autres étoiles voisines en direction mais beaucoup plus lointaines et qui ne manifestent donc pas d'effet de parallaxe (Fig.7.5).

Pour comprendre comment se manifeste cet effet de parallaxe, faisons l'hypothèse que toutes les étoiles sont fixes par rapport au Soleil. Alors, quand on les observe depuis la Terre, mobile autour du Soleil, tout se passe comme si on reportait sur elles le mouvement orbital apparent du Soleil autour de la Terre : En effet, le vecteur \overrightarrow{TE} qui joint la Terre T à une étoile E peut se décomposer (en introduisant la position S du Soleil) en $\overrightarrow{TS} + \overrightarrow{SE}$ où \overrightarrow{SE} est fixe et où \overrightarrow{TS} est un vecteur tournant (comme la Terre) en un an. En appelant E' le point tel que $\overrightarrow{TE'} = \overrightarrow{SE}$, on construit un parallélogramme $TSEE'$ et l'étoile E , vue de la Terre, semble alors tourner autour du point E' de telle façon que $\overrightarrow{E'E}$ reste égal à \overrightarrow{TS} . Ainsi, chaque étoile observée depuis la Terre semble décrire annuellement et de manière synchrone une orbite exactement égale (puisque translatée) à celle parcourue par la Terre autour de la Soleil.

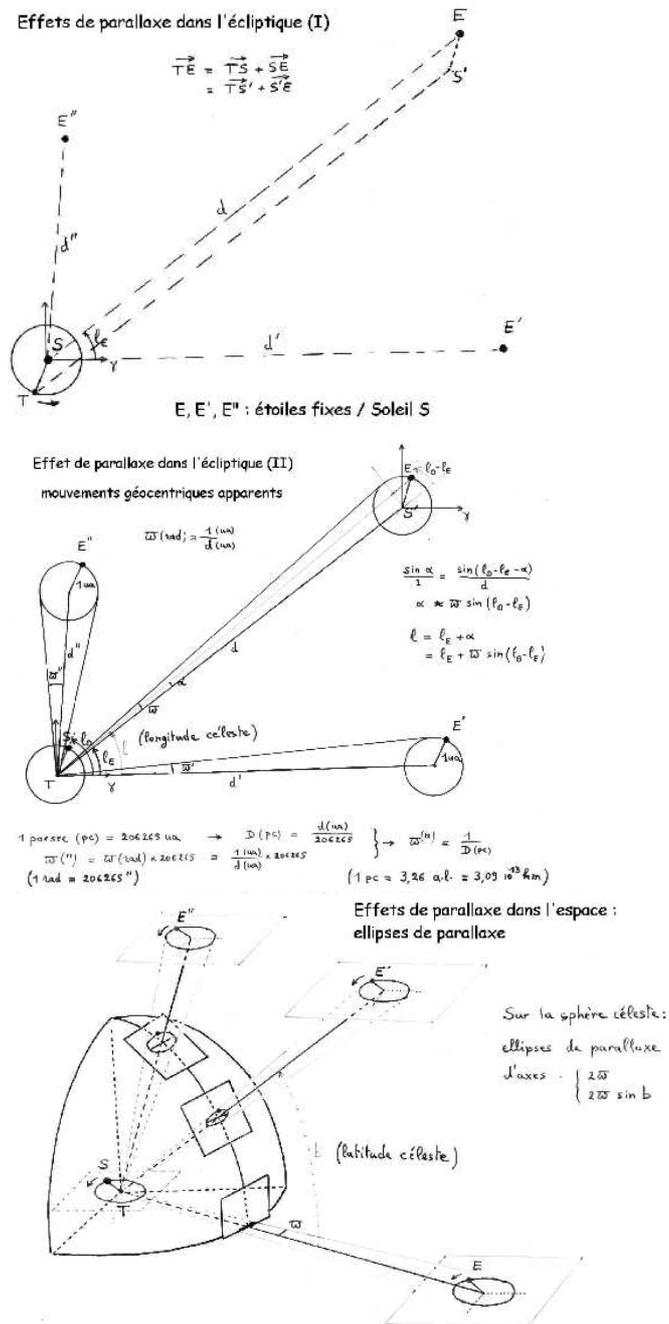


FIGURE 7.5: La parallaxe trigonométrique (crédit : Luc Duriez)

Si on suppose l'orbite terrestre circulaire, suivant la position de l'étoile dans le ciel par rapport au plan orbital de la Terre, cette orbite circulaire translaturée est vue en projection sur le ciel sous forme d'une ellipse plus ou moins aplatie (c'est l'ellipse de parallaxe), et l'angle sous lequel on voit le demi-grand axe de cette ellipse (de longueur 1 UA) est inversement proportionnel à la distance de l'étoile. Cet angle, généralement noté ϖ , est précisément l'angle de parallaxe de l'étoile, qui est classiquement défini comme l'angle sous lequel, depuis cette étoile, on verrait le rayon de l'orbite terrestre. C'est lorsque l'on détermine la distance d'une étoile par la mesure de cet angle de parallaxe que l'on parle de parallaxe trigonométrique.

Les angles de parallaxes observés sont toujours très petits : L'étoile la plus proche (Centaure) manifeste un angle de parallaxe égal à $0'',76$. Les plus petits angles mesurables actuellement sont de l'ordre de $0'',002$. Comme traditionnellement on exprime ces angles en secondes de degré, on a adopté une nouvelle unité de distance - le parsec (ou pc)- qui représente la distance jusqu'où il faut s'éloigner du Soleil pour voir le rayon de l'orbite terrestre (1 UA) sous un angle de $1''$. Comme il y a environ $206\,264'',8$ dans 1 radian, on a encore :

$$1 \text{ pc} \approx 206\,264,8 \text{ UA}$$

et la distance en parsec s'obtient simplement en calculant l'inverse de la valeur de l'angle de parallaxe exprimé en secondes :

$$D \text{ (pc)} = 1/\varpi \text{ (")}$$

Ainsi, la distance de Centaure vaut $1/0,76'' = 1,31$ pc, et la distance correspondant à une parallaxe de $0'',002$ est de 500 pc.

Jusqu'en 1996, on ne connaissait les parallaxes trigonométriques que d'un petit nombre d'étoiles proches (environ 10 000) car les observations astrométriques faites depuis la Terre sont altérées en précision par les turbulences de l'atmosphère¹.

1. Notons que pour appliquer convenablement la méthode des parallaxes trigonométriques, il faut tenir compte aussi du phénomène d'aberration de la lumière qui décale la direction observée par rapport à la direction vraie de l'objet visé d'un angle dépendant de la vitesse orthoradiale de cet objet par rapport à l'observateur. La Terre par exemple, qui se déplace autour du Soleil à près de 30 km/s, entraîne les observateurs terrestres en leur faisant apparaître la direction des astres décalée de $20''$ environ si ils sont observés dans la direction opposée au Soleil. Il s'y ajoute un effet d'aberration provenant de la vitesse de l'observateur due à la rotation de la Terre sur elle-même (450 m/s à l'équateur) ou celui provenant de la vitesse du satellite autour de la Terre dans le cas d'HIPPARCOS. Les mesures astrométriques de la direction des étoiles doivent donc être corrigées de l'aberration due aux divers mouvements de l'observateur avant de pouvoir servir à la détermination de leurs parallaxes et mouvements propres.

A cette date, le satellite astrométrique HIPPARCOS a mesuré les parallaxes trigonométriques et les mouvements propres de 100 000 étoiles dans une sphère de 500 pc centrée sur le Soleil, avec une précision de $0'',002$. Cependant, cela ne représente qu'une toute petite partie des étoiles de notre Galaxie. Pour mesurer les distances au delà de ces 500 pc, il faut utiliser d'autres méthodes.

La mission GAIA prévue pour fin 2013 va pouvoir calculer des parallaxes avec une précision 100 fois supérieure à celle d'Hipparcos.

7.3.2 Les parallaxes spectroscopiques

On a vu au chapitre 5 les définitions de magnitude apparente m et de magnitude absolue M pour les étoiles, reliées par la formule :

$$M = m - 5 \log_{10} d + 5$$

où d est la distance de l'étoile à la Terre exprimée en parsecs. Il suffit d'avoir m et M pour savoir calculer d . La magnitude apparente m est mesurable directement par des méthodes photométriques ; pour déterminer M on peut se servir du diagramme HR : par l'analyse du spectre de l'étoile, on déduit le type spectral, mais, pour un type spectral donné, il y a plusieurs classes spectrales (naine, géante ou supergéante...)

C'est l'analyse de la finesse des raies spectrales qui permet de savoir si on a affaire à une naine ou une géante : plus le milieu émettant la lumière de l'étoile est dilué, plus les raies sont fines ; les supergéantes, avec leurs atmosphères très étendues, émettent ainsi des raies plus fines que les géantes, et elles-mêmes ont des raies plus fines que les naines.

Cependant, cela laisse une assez forte incertitude sur la valeur de M pour un type spectral donné. Pour améliorer cette détermination de M , il convient de procéder simultanément avec plusieurs étoiles supposées à la même distance de la Terre, telles celles qui font partie d'un amas d'étoiles (on considère que les dimensions de l'amas sont petites par rapport à sa distance) ; il suffit de placer les étoiles de l'amas selon leur type et leur classe dans un diagramme HR où l'axe des ordonnées représente les magnitudes apparentes au lieu des magnitudes absolues. On obtient des nuages de points qui s'organisent de la même manière, avec séquence principale et branche de géantes et ou supergéantes. Il suffit ensuite de superposer au mieux la séquence principale du diagramme construit en magnitudes apparentes avec celle du diagramme de référence construit en magnitudes absolues à partir d'étoiles de distances connues ; on lit alors le décalage $m - M$ existant entre eux, et on en déduit la distance de l'amas. Cette méthode utilisant l'analyse spectrale conduit aux parallaxes dites spectroscopiques (Fig. 7.6).

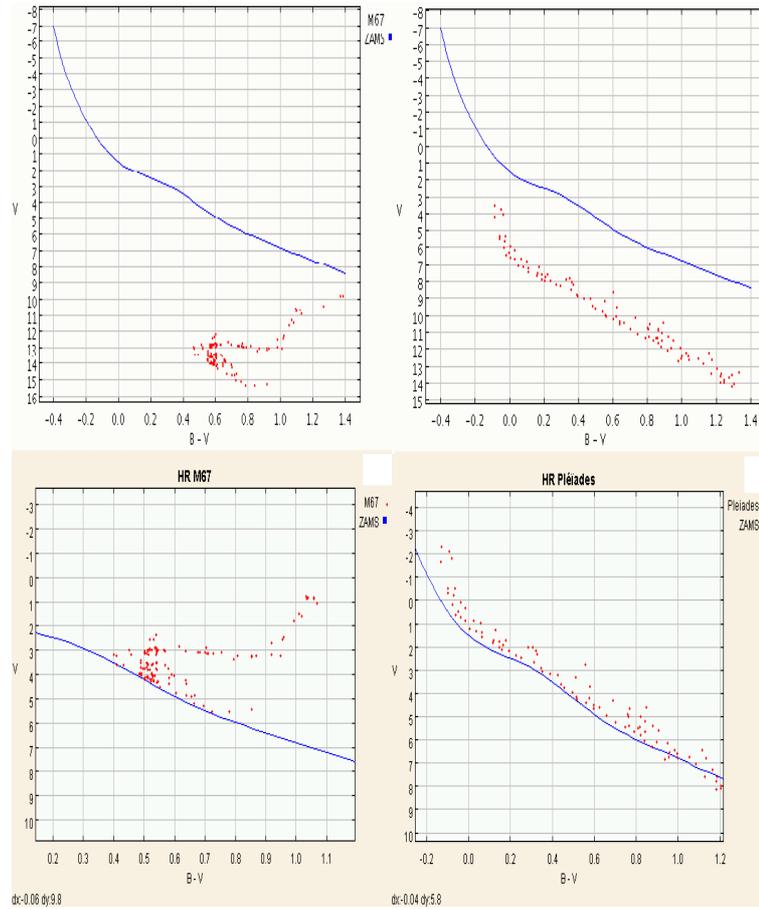


FIGURE 7.6: Parallaxe spectroscopique pour un amas globulaire (à gauche) et pour un amas ouvert (à droite). (crédit : ASM (Observatoire de Paris))

7.3.3 Les parallaxes dynamiques

Certaines étoiles sont doubles, c'est-à-dire formées de deux étoiles suffisamment proches pour être liées l'une à l'autre par la gravitation universelle. Elles tournent alors l'une autour de l'autre en suivant les mêmes lois de Kepler vues précédemment pour une planète tournant autour du Soleil. Si elles sont quand même suffisamment distantes l'une de l'autre, ou suffisamment proches du Soleil, ces deux étoiles peuvent être observées séparément depuis la Terre et l'on peut mesurer leur mouvement relatif. L'orbite elliptique décrite par l'une des étoiles autour de l'autre est vue en projection sur le ciel, mais on arrive à redresser l'ellipse apparente projetée pour déterminer finalement la période T du mouvement et l'angle α sous lequel apparaîtrait le demi-grand

axe a de l'ellipse réelle. Si la distance (inconnue) des deux étoiles au Soleil est D , on a alors $a = \alpha D$, et la troisième loi de Kepler s'écrit :

$$\frac{\alpha^3 D^3}{T^2} = \frac{G (m_1 + m_2)}{4 \pi^2},$$

en fonction des masses m_1, m_2 des deux étoiles. Avec $G = 4 \pi^2$ si l'on utilise les unités astronomiques de masse, de longueur et de temps, on peut calculer D si on peut estimer les masses :

$$D = \frac{[(m_1 + m_2) T^2]^{1/3}}{\alpha},$$

d'où D en UA si T est en années et les masses en masse solaire (et α en radians). La distance d'une étoile double ainsi déterminée à partir de l'observation de ses mouvements est appelée parallaxe dynamique.

Pour les étoiles doubles dont on a pu déterminer la distance par les parallaxes trigonométriques (D est donc alors connu), la relation précédente permet en fait de calculer la somme des masses des deux étoiles en unités de masse solaire. On peut connaître par ailleurs le rapport de ces masses en observant, en plus du mouvement relatif des deux étoiles, le mouvement de chacune par rapport à des étoiles voisines, étrangères au couple et supposées fixes. Avec la somme et le rapport des masses, on peut ensuite calculer chacune des masses. C'est grâce à la mesure de la masse des étoiles doubles de distance connue qu'a pu être établie par Eddington une forte corrélation entre la luminosité intrinsèque des étoiles et leur masse.

Pour les étoiles doubles de distance inconnue, l'estimation des masses peut être faite en analysant le spectre des deux étoiles de façon à en déterminer le type spectral, d'où la détermination de leur magnitude absolue avec le diagramme HR, puis de leur masse grâce à la relation masse-luminosité et enfin leur distance D par la relation ci-dessus. La comparaison entre la magnitude apparente et la magnitude absolue des étoiles donne par ailleurs une autre évaluation de cette distance.

7.3.4 Distance de certaines étoiles variables

Une étoile variable est une étoile dont la luminosité varie au cours du temps. Les variations de magnitude correspondantes peuvent être présentées en fonction du temps sous forme d'une courbe de lumière. Cette courbe peut apparaître strictement périodique, ou seulement périodique de façon approchée, ou sans périodicité (Fig. 7.7).

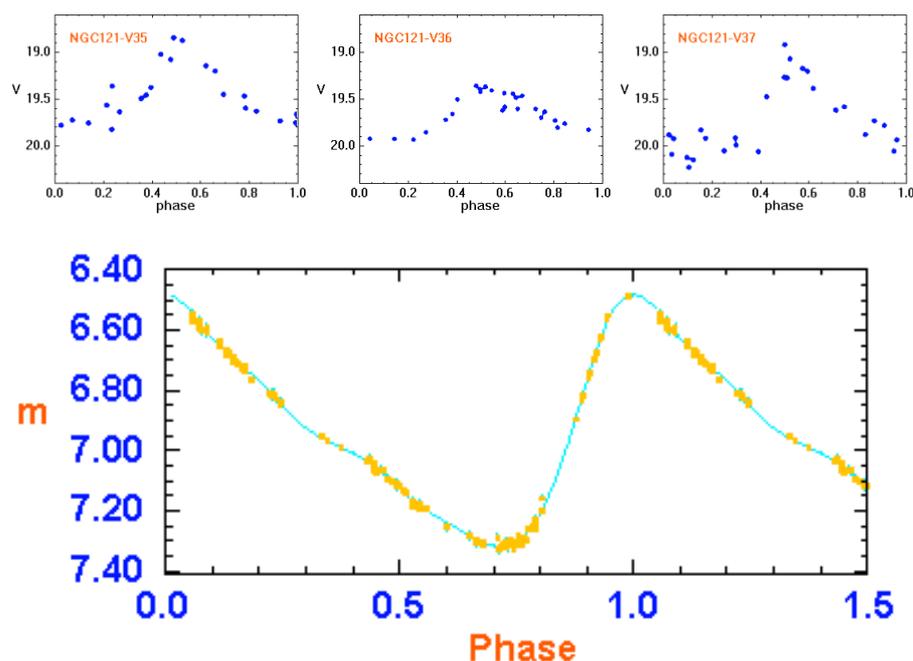


FIGURE 7.7: En haut : courbes de lumière d'une étoile RR Lyrae de l'amas NGC121 ; en bas : courbe de lumière de l'étoile delta de Céphée (crédit : ASM)

Etoiles doubles photométriques ou binaire à éclipses

Lorsque la courbe de lumière est strictement périodique, c'est que l'étoile variable est en fait une étoile double très serrée vue dans des circonstances particulières : l'observateur se trouve par hasard quasiment dans le plan de leur orbite, ce qui lui permet de voir alternativement les deux étoiles passer l'une devant l'autre ; ces éclipses se reproduisent périodiquement, avec la période de leur mouvement, entraînant des variations strictement périodiques de luminosité de l'ensemble (en général, de telles étoiles doubles sont trop serrées pour être vues séparément). On peut montrer que l'analyse de la courbe de lumière permet de déterminer le rapport des diamètres des étoiles,

mais la distance à l'observateur reste inconnue, faute de pouvoir séparer les deux étoiles.

Variables intrinsèques

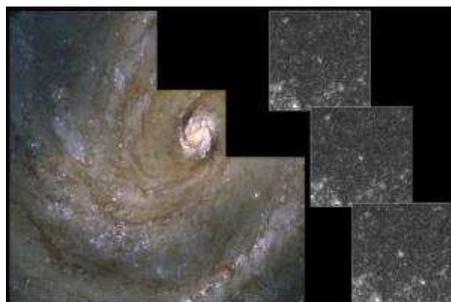


FIGURE 7.8: Céphéides dans M100 (Crédit : HST/NASA)

Lorsque la courbe de lumière est périodique de façon approchée, il s'agit d'une étoile dont la luminosité varie intrinsèquement. Le mécanisme provoquant ces variations est le plus souvent une pulsation de l'étoile qui en quelque sorte, gonfle et se dégonfle avec un certain rythme dépendant de la masse de l'étoile. On classe cette sorte d'étoile suivant leur période de pulsation : étoiles de type RR Lyrae (période inférieure à 0,3 j), Céphéides (de 0,3 j à 100 j), type Mira Ceti (de 100 à 500 j),... Certaines de ces étoiles sont suffisamment proches du Soleil pour qu'on ait pu déterminer leur parallaxe trigonométrique, et donc aussi leur magnitude absolue (bien sûr, leur magnitude absolue varie au même rythme que leur magnitude apparente). En recherchant les corrélations éventuelles entre la période P et la magnitude absolue moyenne M des céphéides de distance connue, Miss Leavitt a pu montrer en 1912 qu'on a sensiblement $M = a \log P + b$ où a et b sont des constantes dépendant du type de céphéides. Dès lors, quand on observe une céphéide de distance inconnue, il suffit de mesurer sa période de pulsation pour en déduire sa magnitude absolue moyenne, puis sa distance par comparaison avec sa magnitude apparente moyenne. L'intérêt des céphéides vient de ce que ce sont des étoiles intrinsèquement très brillantes (magnitude absolue moyenne comprise entre -2 et -6), donc visibles de très loin, bien au delà des limites de notre galaxie.

Certaines étoiles variables ont une courbe de lumière apériodique, leur luminosité augmentant brusquement puis revenant lentement à son niveau initial (Fig. 7.9). Parce que ces étoiles semblaient apparaître là où on n'observait rien auparavant, elles ont été désignées dans le passé sous le nom de

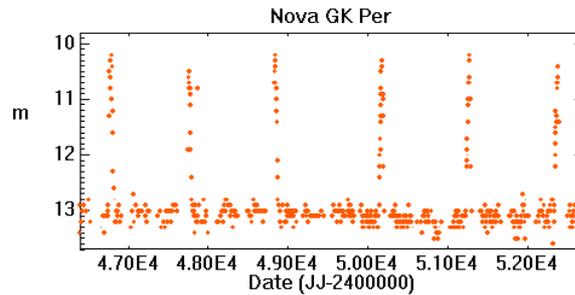


FIGURE 7.9: Courbe de lumière de l'étoile GK de Persée, construite à partir des données collectées par l'AFOEV (association française des observateurs d'étoiles variables). (Crédit : ASM)

novae (ou étoiles nouvelles) ou de supernovae dans le cas d'une augmentation exceptionnelle de luminosité. Les novae montrent ainsi en quelques heures une diminution de magnitude de l'ordre de 10, le retour au niveau initial se faisant en plusieurs mois, tandis que pour les supernovae, la diminution est comprise entre 17 et 20.

Il semble que le phénomène de nova se produise lorsqu'une étoile double est composée d'une naine blanche et d'une autre étoile ; cette dernière perd de la matière au profit de son compagnon beaucoup plus dense, cette matière pouvant brusquement exploser à la surface de la naine blanche lorsque des conditions sont atteintes pour permettre sa fusion (ainsi, c'est comme si on voyait à cet instant le coeur nucléaire d'une étoile).

Le phénomène de supernova semble être l'une des dernières étapes de la vie d'une étoile massive (voir Chap. 5) ; c'est l'instant où l'étoile explose, restituant une bonne part de sa masse au milieu interstellaire et concentrant un résidu sous forme d'un pulsar ou d'un trou noir. On estime que la magnitude absolue d'une supernova lors du maximum de luminosité atteint -17 ± 1 . Si on mesure sa magnitude apparente à cet instant, la différence des deux valeurs peut être identifiée à $-5 \log d + 5$ et on en déduit sa distance.

7.4 Les distances extragalactiques

Pour déterminer la distance des galaxies proches, on se sert des indicateurs de distance vus précédemment, à condition de savoir les y observer. On peut utiliser les céphéides car celles-ci sont détectables actuellement jusqu'à près de 20 Mégaparsecs.

C'est d'ailleurs grâce à celles observées dans les Nuages de Magellan (pe-

tites galaxies satellites de la notre) que Miss Leavitt trouva leur distance d'environ 100 000 pc ; montrant définitivement qu'ils sont bien à l'extérieur de notre Galaxie. En 1994, le télescope spatial permit d'identifier 28 céphéides dans la galaxie M100 située dans le superamas local de la Vierge, aboutissant à estimer la distance de cette galaxie à $17,1 \pm 1,8$ Mpc. L'observation de supernovae dans les galaxies extérieures à la notre est relativement fréquente (bien qu'on estime qu'il n'y a qu'une supernova en moyenne tous les trois ou quatre cents ans dans une galaxie donnée). En supposant encore observable une supernova quand, à son maximum de luminosité, elle atteint une magnitude apparente de +23, on peut calculer qu'avec une magnitude absolue de -17 à cet instant, on peut la voir à une distance de 10^9 pc ou 1 000 Mpc. Cependant l'incertitude sur la détermination des distances par les supernovae est sans doute de l'ordre de 20 à 30%.

En 1977, Tully et Fisher ont mis au point une autre méthode, basée sur l'observation de la rotation des galaxies spirales. Grâce à 12 galaxies proches dont les distances étaient bien connues (par les céphéides notamment), ils ont montré que V_{\max} , la vitesse maximale de rotation des galaxies spirales, est corrélée à leur magnitude absolue globale M ; plus précisément, ils ont obtenu la loi :

$$-M = 5 \log V_{\max} + 8,4.$$

La mesure de V_{\max} pour une galaxie spirale de distance inconnue permet donc d'en déduire M , puis en soustrayant cette valeur de la magnitude apparente globale, on obtient $5 \log d - 5$ puis la distance d .

La détermination de V_{\max} est possible en mesurant par la radioastronomie la forme de la raie spectrale de l'hydrogène neutre à 21cm de longueur d'onde. Cet hydrogène compose l'essentiel de la matière interstellaire dans les galaxies spirales et participe à la rotation des galaxies. Cette raie est alors élargie par l'effet Doppler-Fizeau induit par la rotation de la galaxie. La mesure de cet élargissement donne directement V_{\max} en $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, pondéré toutefois par le sinus de l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation par rapport à la direction de l'observateur ; cet angle est par ailleurs calculable par son cosinus puisque ce dernier s'identifie au rapport b/a des deux axes de l'ellipse apparente, projection du disque circulaire de la galaxie sur le plan du ciel. Plusieurs milliers de galaxies ont ainsi été mesurées jusqu'à plus de 100 Mpc.

Pour les galaxies plus lointaines, il reste la loi de Hubble $v = H_0 D$ qui relie la vitesse radiale d'éloignement des galaxies à leur distance ; cette loi est étalonnée sur les galaxies de distance connue, mais la valeur de H ainsi obtenue est encore relativement imprécise (comprise entre 60 et 80 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ par Mpc). Pour les galaxies de distance inconnue, leur vitesse radiale est mesurée par le décalage vers le rouge subi par la lumière qui nous en parvient, mais

les distances qu'on en déduit dépendent bien sûr du modèle d'Univers que l'on considère et pour lequel la loi de Hubble est supposée vraie.

La figure 7.10 récapitule la portée des différentes méthodes pour le calcul des distances.

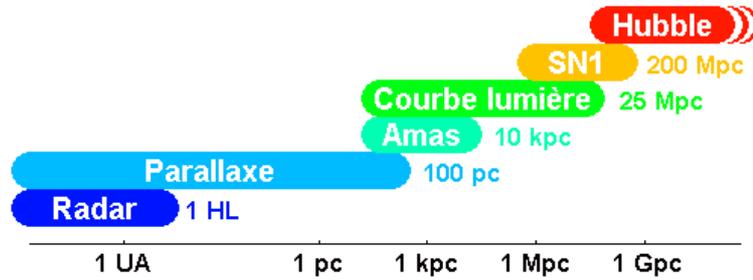


FIGURE 7.10: Portée des différentes méthodes (crédit ASM)

Chapitre 8

Notions de cosmologie

8.1 Un peu de relativité

8.1.1 Les limites de la théorie de la gravitation

On a vu au chapitre 4 la théorie *universelle* de la gravitation établie par Newton. Cette théorie rencontra de grands succès comme la découverte de Neptune, d'abord théorique par J.C. Adams (1843) et Le Verrier (1846) puis observée par Galle en 1846. Avant ça, elle permit à l'astronome Halley de montrer en 1705 que la comète de 1531, 1607 et 1682 est en fait la même comète et, en tenant compte des effets de la planète Jupiter, qu'elle repassera en 1758.

Mais cette théorie trouva ses limites avec le mouvement du périhélie de Mercure (déjà observé par Le Verrier qui supposa l'existence d'une planète à l'intérieur de l'orbite de Mercure). En 1909, William Campbell montra qu'aucune planète suffisamment massive pour expliquer ces anomalies ne pouvait exister à cet endroit. La théorie de la gravitation était donc incapable d'expliquer cette anomalie.

8.1.2 La relativité restreinte

En 1887, Albert Michelson et Edward Morley firent une expérience dans le but de mesurer directement la vitesse de la Terre sur son orbite, sans passer par la théorie de la gravitation. A l'aide d'un appareil, appelé interféromètre, ils étaient capables de mesurer la vitesse de la lumière avec une précision relative de 10^{-5} (i.e. de l'ordre de $1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$).

Ainsi, comme la Terre se déplace sur son orbite à une vitesse de $30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, ils devaient être capable de mesurer cette vitesse en observant une même

source à deux moments : le premier lorsque la Terre se rapproche de la source et le deuxième lorsque la Terre s'éloigne de la source.

Le résultat fut décevant : quelque soit l'époque à laquelle la vitesse de la lumière est mesurée, ils trouvèrent invariablement la même.

En 1905, Albert Einstein établit sa théorie de la relativité restreinte qui permit de résoudre ce paradoxe. Le fait qu'un observateur mesure toujours la même vitesse de la lumière quelque soit sa propre vitesse est un principe fondamentale de la physique. Il établit donc une nouvelle théorie à partir de ce principe qui arrive à la conclusion suivante : *l'écoulement du temps et l'échelle des longueurs doivent varier en fonction de la vitesse de l'observateur de manière à ce qu'une mesure de la vitesse de la lumière donne toujours la même valeur (de l'ordre de $3 \cdot 10^5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$).*

Cette conclusion est déjà une petite révolution par rapport à la théorie de la gravitation de Newton pour laquelle l'écoulement du temps et l'échelle de longueur forment une base absolue.

Cette nouvelle théorie permet de mettre en évidence un effet assez spectaculaire de la physique : *le facteur de ralentissement du temps*. Ce facteur γ est donné par :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (8.1)$$

où v est la vitesse de l'objet considéré et c la vitesse de la lumière.

Cet effet stipule qu'une horloge à bord d'un vaisseau se déplaçant à grande vitesse fonctionnera plus lentement qu'une horloge au repos. Ce ralentissement est imperceptible pour les personnes à bord du vaisseau puisque c'est toute la physique qui est ralentie, mais lorsqu'on compare avec l'extérieur alors on peut mesurer ce ralentissement. Des expériences ont pu être menées, soit à bord d'avion avec des horloges atomiques, soit dans des accélérateurs de particules, et montrer que le ralentissement du temps existe et correspond exactement à ce qu'avait prévu Einstein.

Il faut noter que γ est très proche de 1, et diffère de 1 d'une quantité de l'ordre de 10^{-12} pour un avion supersonique.

8.1.3 La relativité générale

En 1916, Einstein appliqua les notions vues précédemment à la théorie de la gravitation. Cette nouvelle théorie est connue maintenant sous le nom de relativité générale.

Cette théorie repose sur un autre principe : *le principe d'équivalence*. Ce principe est, dans un premier temps, le constat de l'égalité entre la masse inerte et la masse grave. C'est-à-dire que la masse intervenant dans la gravité

d'un corps est équivalente à la masse intervenant dans le principe fondamental de la dynamique. Einstein affirme que ce principe d'équivalence est valide et que, localement, les effets d'un champ gravitationnel sur une expérience n'utilisant pas la gravitation sont identiques aux effets d'une accélération du référentiel de l'observateur.

La théorie de la relativité générale est basée sur une représentation géométrique de la gravitation. La gravitation ne correspond alors qu'à une accélération dans un espace à 4 dimensions (espace+temps) qui va le déformer et changer sa géométrie.

On peut visualiser cette modification par la notion de courbure de l'espace-temps. Si l'espace-temps est représenté par un plan alors une masse va déformer cette espace-temps un peu comme une bille que l'on poserait sur une feuille de caoutchouc. Le champ d'accélération généré par cette masse se traduit donc par le fait que les nouvelles géodésies, i.e. les chemins les plus courts (la ligne droite en géométrie euclidienne), vont correspondre par exemple à des ellipses dont la masse en question se trouve à l'un des foyers.

Ainsi dans cette théorie la Lune a un mouvement rectiligne uniforme autour de la Terre, mais la déformation de l'espace-temps nous le fait voir comme une ellipse dont la Terre est l'un des foyers.

Cette nouvelle théorie permet non seulement de répondre à toute les questions déjà résolues par la théorie de Newton, mais aussi de résoudre les problèmes comme celui de l'orbite de Mercure. D'autre part, la précision que l'on a maintenant sur les observations font que même pour les planètes cette théorie doit être utilisée si on veut faire des modèles précis. Le GPS n'aurait aussi aucun sens si on ne connaissait pas cette théorie.

Historiquement, cette théorie a pu être vérifiée en 1919 en étudiant la déflexion des rayons lumineux provenant d'une étoile lors d'une éclipse de Soleil. En effet si la position de l'étoile se trouve pratiquement dans la même direction que le Soleil au moment de l'éclipse, alors sa position apparente est modifiée du fait de la déflexion des rayons lumineux provenant de l'étoile due à la déformation de l'espace temps provoquée par la présence du Soleil au voisinage du trajet emprunté par la lumière.

Un autre phénomène bien connu maintenant des observateurs est celui des *lentille gravitationnelles* qui se traduit par une déformation apparente des objets lorsque la lumière provenant de ces objets subit des déflexions causées par des étoiles se trouvant au voisinage du chemin qu'elle emprunte pour arriver jusqu'à l'observateur.

8.2 Un univers en expansion

8.2.1 Le paradoxe d'Olbers

La taille de l'univers est une des grandes questions à laquelle ont essayé de répondre les savants de tous les temps. Les Anciens imaginaient un univers refermé sur lui-même. Newton essaya aussi de savoir si l'univers était fini ou infini en utilisant sa théorie de la gravitation. Malheureusement, il n'arriva pas à conclure. D'une part un univers fini aurait dû induire un mouvement des étoiles par rapport à leur centre de gravité, ce qui n'était manifestement pas le cas. Sauf en cas d'une rotation globale de l'univers sur lui-même, mais alors rotation autour de quoi et par rapport à quoi ? L'univers infini posait aussi un problème à Newton, puisque si on peut construire un univers échappant à la contraction avec une distribution infini d'étoile, en utilisant un autre modèle où on regarde ce qui se passe dans un sphère donnée où, du coup, l'effet gravitationnelle de tout ce qui est extérieur à la sphère s'annule (parce que l'univers est infini), alors de nouveau les objets dans la sphère devraient finalement se contracter. Tous ces problèmes amenèrent Newton à abandonner la cosmologie.

En 1826, Heinrich Olbers mit en évidence un fait assez simple qui amenait à un paradoxe. Ce fait est "La nuit il fait noir". En effet, si on suppose l'univers comme étant infini avec une répartition uniforme d'étoile alors n'importe quelle direction devrait mener à une étoile, ainsi le ciel la nuit devrait être complètement lumineux.

Ainsi, pour Olbers il ne devait y avoir qu'un ensemble fini d'étoiles, mais à l'époque cette idée était mal acceptée ce qui conduit donc au paradoxe d'Olbers.

Une idée permettant de résoudre ce paradoxe était que les étoiles ont une durée de vie finie et en particulier qu'elles naissent. Ainsi, en considérant que la vitesse de la lumière est finie, alors plus on observe loin plus on observe des étoiles loin dans le passé. Jusqu'au moment où on observe avant qu'aucune étoile ne soit naît, expliquant ainsi le ciel noir.

Mais, ce paradoxe étant résolu, on revient au point de départ : l'univers est-t-il fini ou infini ?

8.2.2 La constante cosmologique d'Einstein

En faisant l'hypothèse du *principe cosmologique* qui stipule que toute région assez grande de l'univers est représentative de l'ensemble de l'univers (on a vu au chapitre 6 qu'au delà de 100 million d'années lumières l'univers de présente plus de structure caractéristique), Einstein appliqua sa théorie de la

relativité générale à l'univers dans son ensemble. Il arriva à cette conclusion : *sous l'effet de la présence de matière dans l'univers, l'espace lui-même devrait être soit en expansion soit en contraction et la matière de l'univers devrait être emportée par ce mouvement.*

Einstein ne pouvait concevoir un univers qui ne soit pas statique, il fut conduit à introduire une masse volumique au vide, quantité à laquelle il donna le nom de *constante cosmologique*.

Il dut admettre plus tard que cette introduction fut pour lui la plus grande erreur de sa vie...

8.2.3 Loi de Hubble et facteur d'échelle

On a déjà vu à la fin du chapitre 6 comment Hubble observa l'expansion de l'univers. Revenons maintenant à cette loi établie par Hubble. Si on suppose l'univers en expansion uniforme à un instant donné, alors deux points de l'espace vont voir leur distance de séparation augmentée avec un taux d'autant plus grand qu'ils sont éloignés. En effet, il y a un effet cumulatif : si chaque mètre augmente de H à chaque seconde, alors n mètres vont augmenter de $n \cdot H$ à chaque seconde, ce qui correspond à un taux d'expansion n fois plus grand.

Ceci se traduit donc par la loi de Hubble :

$$v = H \cdot D, \quad (8.2)$$

où v est ce qu'on appelle la *vitesse de récession* (i.e. le taux d'expansion de la distance mutuelle entre les deux objets), H est le paramètre de Hubble (i.e., le taux d'expansion par unité de longueur), et D la distance qui sépare les deux points.

Mais, si l'univers est en expansion, alors plus on remonte vers le passé, plus l'univers était dense, ainsi d'après la relativité générale, ceci doit conduire à un taux d'expansion plus élevé dans le passé. Ainsi, H n'est pas constant dans le temps. Comme la vitesse de la lumière est finie, ceci montre les limites de la relation 8.2, puisque la date à laquelle la lumière perçue a été émise est antérieure à la date d'observation, ainsi le paramètre H avait une valeur différente. De même la distance D qui sépare les objets aura changé.

Pour les galaxies les plus proches (quelques milliards d'années lumières) on peut supposer que la relation est valide. On peut alors mesurer la vitesse v à partir du décalage vers le rouge de la lumière provenant de l'astre observé, et ainsi en déduire H . On obtient à peu près $H = 65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$. Ce qui correspond à 66 nm/km/an/.

Ce paramètre nous permet de faire une approximation de l'âge¹ de l'univers en retranchant 66 nm à 1 km autant de fois qu'il faut pour avoir zéro. On arrive à 15 milliards d'années. Cette approximation repose sur le fait que H est constant et qu'on retranche toujours 66 nm à la longueur obtenue (qui n'est plus d'1 km après un an). On reviendra plus tard sur cet âge.

L'univers étant infini, alors il était aussi infini lorsqu'il était comprimé. Pour évaluer l'expansion de l'univers, on parle alors de *facteur d'échelle* e . e correspond au taux auquel était comprimé l'univers à une certaine époque, par exemple si $e = 0,25$, ça veut dire que l'univers était comprimé à 25%.

Ce facteur d'échelle s'applique aussi aux ondes lumineuses. Ainsi une onde de longueur d'onde λ_e émise à une époque où le facteur d'échelle était e sera perçue maintenant à la longueur d'onde $\lambda_o = \lambda_e/e$ (on a $\lambda_e = e\lambda_o$). Donc dans le cas où $e = 0,25$, la longueur d'onde perçue sera 4 fois plus grande que celle émise. C'est le *décalage vers le rouge* ou *red-shift*. On voit bien que ce décalage n'est pas dû à un effet Doppler-Fizeau comme on l'a vu au chapitre 1. Ceci dit, comme les formules de l'effet Doppler s'appliquent bien lorsqu'on remplace la vitesse de rapprochement par la vitesse de récession, d'un point de vue technique elle est encore utilisée même si physiquement ce n'est pas du tout le même phénomène qui est en jeu.

Ainsi le décalage vers le rouge $\delta = \lambda_o/\lambda_e = 1/e$ nous donne une information sur le facteur d'échelle au moment où les photons ont été émis. En cosmologie on utilise habituellement le décalage vers le rouge (red-shift) défini par $z = 1 - \delta$.

Ainsi, z est une quantité toujours mesurable, directement relié au facteur d'échelle de l'univers au moment où la lumière a été émise, mais on ne peut généralement pas le relier à une distance, puisque la loi de Hubble n'est pas valide si les astres observés sont trop lointains.

8.2.4 Le Big-Bang et le rayonnement du fond cosmologique

Peut-on remonter le temps autant qu'on veut ? La masse volumique de l'univers actuellement est de $1,5 m_p \cdot m^3$, où la masse du proton $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Si on considère l'univers à une époque où $e = 0,1$ alors ça veut dire que chaque élément de volume était comprimé par un facteur 1000, d'où une masse volumique égale à $1500 m_p \cdot m^3$.

Est-ce qu'on peut diminuer e autant qu'on veut ? La théorie de la relativité générale ne permet pas de rendre compte de masse volumique supérieur à

1. Attention, lorsqu'on parle d'âge pour l'univers, ça ne correspond pas à la datation d'une naissance, mais à la date à laquelle le premier rayonnement a été émis. On verra ça plus loin dans le chapitre.

$\rho_P = 10^{93} \text{kg} \cdot \text{m}^3$, appelé *masse volumique de Planck*. Ainsi, lorsque le facteur d'échelle nous fournit une telle masse volumique on atteint alors un mur de l'inconnu appelé *instant de Planck*. Cet instant correspond donc à l'instant à partir duquel la physique actuelle peut s'appliquer.

Cet instant est maintenant appelé l'instant du Big Bang qui, faute d'être la naissance de l'univers, on peut le voir comme la naissance de la physique actuelle. Malgré son nom, il ne faut pas voir cet événement comme une explosion mais seulement comme une étape de l'évolution de l'univers.

Si on applique les lois de la relativité générale à avant le Big-Bang, on obtient un masse volumique infinie 10^{-43} s avant l'instant de Planck, mais à l'heure actuelle, il est tout a fait spéculatif de savoir ce qu'il a bien pu se passer avant le Big-Bang.

La question est donc maintenant de savoir si on est en mesure d'observer l'instant de Planck. Et bien non ! En 1965, Arno Penzias et Robert Wilson on découvert que l'univers émettait un rayonnement à la même longueur d'onde, et ce dans toutes les directions. Ce rayonnement vint confirmer la théorie du Big-Bang, c'est-à-dire de l'univers se trouvant à un état très comprimé, qui prévoyait l'existence d'un *rayonnement de fond cosmologique*. Ce rayonnement correspond au rayonnement d'un corps noir à une température de $T_{\text{RFC}} = 2,73$ K. Or un rayonnement cosmologique complètement thermalisé ne peut s'expliquer que par une masse volumique de l'univers au moins 1 milliard de fois plus dense qu'actuellement. Ce qui correspond à l'idée d'un univers très comprimé comme dans la théorie du Big-Bang.

En utilisant la loi de Wien (voir chap. 1) et le facteur d'échelle, on peut voir que la température de l'univers au moment où le rayonnement a été émis est :

$$T = T_{\text{RFC}}/e.$$

Pour un univers 1 milliard de fois plus dense qu'aujourd'hui on doit avoir $e = 0,001$, ce qui nous donne $T = 3000$ K. Cette température correspond à la température nécessaire pour ioniser les atomes. Ainsi, quand $T = 3000$ K, les électrons circulaient librement autour des noyaux. Mais dans une telle matière, les photons rebondissent entre les électrons, effaçant toute trace de leur origine et de leur direction (ils sont thermalisés). Un tel milieu est donc très opaque. On ne peut pas voir au-delà un peu comme on ne peut pas voir au-delà de la brume.

Une fois que la température est devenue inférieure à 3000 K, alors les électrons ont commencé à tourner autour des noyaux et le milieu est devenu visible, c'est ce qu'on appelle le découplage entre la matière et la lumière. Cet instant où $T=3000$ K, appelé aussi *mur de brume*, se situe a peu près 600 000 ans après l'instant de Planck (le Big-Bang).

8.2.5 Avant le découplage et matière exotique

L'astronomie d'observation ne permet pas de remonter au-delà du mur de brume. Ceci-dit la relativité générale permet de le faire (jusqu'à l'instant de Planck), et de déterminer ainsi le facteur d'échelle. A partir de là, on peut faire des suppositions sur les étapes de l'évolution de l'univers entre l'instant de Planck et le découplage.

Schématiquement on a :

- jusqu'à $t = 10^{-32}$ s, inflation primordiale ;
- $t = 10^{-32}$ s, $T = 10^{26}$ K, $\rho = 10^{73}$ kg · m⁻³ : création de la matière, on passe du soupe ultra-dense de *quarks*, d'électrons, (avec une même quantité d'antiparticule moins 1 milliardième) de photons et de neutrinos à la matière par auto-destruction des particule-antiparticule en photons ; la légère sur-abondance des particules (sur les anti-particules) fait qu'on a l'univers constitué de la matière connue aujourd'hui.
- $t = 0,0001$ s, $T = 10^{12}$ K, $\rho = 10^{17}$ kg · m⁻³ : les quarks se combinent pour former les protons et les neutrons ;
- $t = 0,001$ s, $T = 10^{11}$ K, $\rho = 10^{13}$ kg · m⁻³ : les neutrons déperissent ;
- $t = 1$ s, $T = 10^{10}$ K, $\rho = 10^9$ kg · m⁻³ : l'hélium est accessible par les neutrons survivant qui s'associe à des protons formant du deutérium et de l'hélium mais les noyaux restent très instables ;
- $t = 100$ s, $T = 10^{11}$ K, $\rho = 10^5$ kg · m⁻³ : le deutérium devient stable et forme ensuite de l'hélium, les protons restant vont former de l'hydrogène. La théorie montre que finalement on a un univers composé à 75% d'hydrogène et 25% d'hélium (en masse) ;
- $t = 12$ j, $T = 10^7$ K, $\rho = 0,001$ kg · m⁻³ : la fusion primordiale va s'arrêter là puisque la fusion d'hélium en carbone nécessite des conditions de pression supérieur à celle présente ici. Seules quelques atomes de carbones isolés vont se former ainsi que du lithium.

Ce scénario vient confirmer la théorie du Big-Bang, en particulier pour ce qui est de l'abondance de l'hélium par rapport à l'hydrogène. Par contre la quantité de deutérium et de lithium est très sensible au température et densité de chaque étape. Le deutérium étant très difficile à former il semblerait que le deutérium observé actuellement est de formation primordiale. L'abondance de deutérium observé actuellement permet donc de contraindre la densité de matière à chaque étape. En particulier actuellement cette abondance correspond à une densité de matière de l'univers de $0,3 m_p \cdot m^{-3}$.

Or, si la matière visible a une densité de $0,05 m_p \cdot m^{-3}$ (ce qui ne pose pas trop de problème), la densité déduite des mouvements des galaxies est de $1,5 m_p \cdot m^{-3}$ soit 5 fois supérieure à la densité requise pour expliquer l'abondance de deutérium observé.

En fait cette densité de $0,3 \text{ m}_p \cdot \text{m}^{-3}$ est déterminée exclusivement par les particules pouvant participer aux réactions nucléaires : les neutrons et les protons. On doit donc supposer l'existence d'une *matière exotique* d'une densité de $1,2 \text{ m}_p \cdot \text{m}^{-3}$ représentant donc près de 80% de la masse de l'univers.

Pour conclure, les structures de l'univers décrites au chapitre 6 qui sont apparues très rapidement après le découplage (de l'ordre du milliards d'années) ont encore une origine mal comprise. En effet, l'uniformité de l'univers à l'instant du découplage, et observée à partir du RFC, peut difficilement donner des structures comme les amas de galaxies, les bulles et les filaments en un milliard d'années dans des conditions de température plutôt élevée. Ainsi, de nouveau il est possible que ce soit la matière exotique qui ait permis un effondrement rapide de la matière permettant la formation des structures observées.

8.3 Les modèles d'univers

8.3.1 Les paramètres des modèles d'univers

Un modèle d'univers basé sur la relativité générale dépend de 4 paramètres :

- la constante de Hubble H ;
- la masse volumique de la matière (visible, invisible, exotique) ρ_m ;
- la constante cosmologie Γ (ou masse volumique du vide ρ_Γ) ;
- la courbure globale de l'espace C .

Un univers à courbure positive $C > 0$ peut être représenté par une sphère, celui à courbure nulle $C = 0$ par un plan et celui à courbure négative par une selle de cheval.

Ces paramètres $(H, \rho_m, \rho_\Gamma, C)$ sont reliés par les équations de la relativité générale. Il ne s'agit certainement pas ici d'écrire ces équations, mais si on suppose que les deux paramètres de masse volumique ont tendance à recourber l'espace sur lui-même (donc rendre $C > 0$), alors que H a tendance à faire tendre C vers des valeurs négatives (proportionnellement à son carré d'ailleurs), on a une équation la forme :

$$C = k(\rho_m + \rho_\Gamma) - H^2, \quad (8.3)$$

où k est une constante permettant d'uniformiser les unités.

8.3.2 Les modèles historiques

Le modèle d'Einstein

Le premier modèle d'univers établi par Einstein était tel que l'univers devait être statique, c'est-à-dire $H = 0$. Ceci implique $\rho_{\Gamma} = \frac{1}{2}\rho_m$. Mais la solution est instable et conduit à $C > 0$ donc un univers refermé sur lui-même.

Le modèle de Friedmann

Peu de temps après qu'Einstein ait construit son modèle, Hubble mit en évidence, en 1917, l'expansion de l'univers. Ainsi $H > 0$. En 1922, Friedmann proposa un univers non statique mais en imposant une masse volumique du vide $\rho_{\Gamma} = 0$.

Si H est faible alors $H^2 < k\rho_m$ et donc la courbure est positive. On se retrouve avec un univers fermé. Dans ce cas, la masse élevée de la matière doit mener à une contraction de l'univers et à un Big-Crunch.

Si H est élevé, alors $H^2 > k\rho_m$, donc $C < 0$. L'univers est ouvert en forme de selle de cheval. Dans cet univers en revanche, l'expansion ralentit (H diminue) mais continue éternellement.

Le modèle d'Einstein-de Sitter

Einstein dut se résoudre au fait que $H > 0$. Mais, comme Friedmann il fixa $\rho_{\Gamma} = 0$. En collaboration avec de Sitter, ils prirent aussi $C = 0$ (univers plat). Ce qui conduit à :

$$H^2 = k\rho_m. \quad (8.4)$$

Ce modèle pourrait paraître instable, mais ce n'est pas le cas. On peut montrer que si la relation 8.4 est vérifiée à un instant donné alors elle restera toujours vérifiée, c'est-à-dire qu'une diminution de la densité de manière observable se traduit par une diminution du taux d'expansion de l'univers, mais qui tend vers zéro (ce n'était pas le cas dans le modèle de Friedmann).

Ici aussi l'expansion diminue mais continue éternellement.

Ce modèle eut pendant une grande partie du XX^e siècle la préférence, surtout parce qu'il était le plus simple. Ce n'est que vers la fin de XX^e siècle que les observations ont pu montrer qu'aucun de ces modèles ne fonctionnent comme on va le voir ensuite.

8.3.3 Calcul de distance à partir d'un modèle d'univers

On va se limiter ici au modèle d'Einstein–de Sitter avec un taux d'expansion actuel $H = 65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ mais le raisonnement reste le même avec d'autres modèles.

Dans ce modèle, l'univers est âgé de 10 Ga. Si on considère qu'un photon émis par une galaxie a mis 9 Ga pour arriver à l'observateur. Ainsi la galaxie était âgée de 1 Ga lorsque le photon a été émis. En utilisant le modèle d'univers de Einstein–de Sitter, on calcule que la galaxie se trouvait à 3,5 Ga.l. lorsque le photon a été émis.

On voit que du fait de l'expansion, le photon a du parcourir une distance égale à 9 Ga.l. alors qu'initialement il n'y avait que 3,5 Ga.l. entre la source et l'observateur. De manière plus générale, dans ce modèle la distance d'émission d'un photon est donnée par :

$$d(\text{Ga.l.}) = 30e(1 - \sqrt{e}).$$

L'âge de l'univers au moment de l'émission nous donne la valeur du facteur d'échelle ce qui nous donne la distance d . Connaissant d , on peut alors calculer à quelle distance se trouve la source (la galaxie dans notre exemple) au moment où le photon émis arrive à l'observateur. On a tout simplement :

$$D = \frac{d}{e},$$

ou encore :

$$D(\text{Ga.l.}) = 30(1 - \sqrt{e}).$$

Dans notre cas, on obtient $D = 15,8 \text{ Ga.l.}$

On peut ainsi déterminer la taille de l'univers observable, c'est-à-dire la distance à laquelle se trouve le mur de brume (instant auquel s'est passé le découplage). Ceci correspond à $e = 0,001$, ce qui donne $D = 29 \text{ Ga.l.}$ Ceci correspond à la distance actuelle à laquelle se trouve la matière qui a émis le rayonnement du fond cosmologique.

8.3.4 Limites des modèles historiques

Le modèle initialement construit par Einstein s'est révélé erroné quelques années après du fait de l'observation de l'expansion de l'univers par Hubble, c'est-à-dire que $H > 0$.

Si on considère l'équation de base du modèle de Einstein–de Sitter, avec $k \approx 900$ (obtenu par la théorie de relativité générale), on obtient :

$$H(\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}) = 30\sqrt{\rho_m(m_p \cdot \text{m}^{-3})}.$$

Dans ce modèle, on pourrait donc dire que H est déterminé par ρ_m . En utilisant la valeur actuelle de $H = 65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ on obtient une densité de matière actuelle $\rho_m = 4,7 m_p \cdot \text{m}^{-3}$, ce qui est 3 fois supérieur aux estimations les plus récentes donnant $\rho_m = 1,5 m_p \cdot \text{m}^{-3}$.

Mais supposons que le problème vient des observations, et que des observations futures pourraient résoudre ce problème. Ainsi il devient possible de déterminer H tout au long de l'évolution de l'univers, d'en déduire le facteur d'échelle e et donc de déterminer la date du Big-Bang, c'est-à-dire lorsque $e = 0,001$. On trouve dans ce cas une date, ou un âge, égale à 10 milliards d'années. On doit noter que l'expansion ne se fait pas à taux constant, l'univers ayant atteint la moitié de sa taille actuelle 3,5 Ga après le Big-Bang seulement.

Or l'analyse des diagrammes HR de certains amas globulaires montre que ceux-ci sont composés d'étoiles ayant 13 ou 14 milliards d'années. Pendant longtemps les partisans du modèle d'Einstein-de Sitter ont espéré que ce soit la théorie de l'évolution des étoiles, ou qu'une meilleure détermination de H allait permettre de résoudre ce paradoxe. Mais il se trouve que dans les deux cas, les observations vont confirmer les modèles et la valeur de H .

De même pour la masse volumique ρ_m qui reste proche de $1,5 m_p \cdot \text{m}^{-3}$. Cette dernière donnée semblerait indiquer que le modèle à prendre serait un modèle de Friedmann avec $H^2 > \rho_m$, c'est-à-dire un univers à courbure négative. Avec un tel modèle, l'âge de l'univers devient 12 Ga. Ce qui est mieux que l'âge obtenu avec le modèle d'Einstein-de Sitter et pourrait être satisfaisant. Mais d'autres observations vont contraindre les physiciens à considérer un nouveau modèle : *le nouveau modèle standard* qui est encore d'actualité.

8.3.5 Le nouveau modèle standard

Une analyse statistique des lentilles gravitationnelles montre que la masse volumique de la matière $\rho_m = 1,5 m_p \cdot \text{m}^{-3}$ est insuffisante pour expliquer les observations, mais qu'on doit introduire une masse volumique du vide 2 fois supérieur : $\rho_\Gamma = 3 m_p \cdot \text{m}^{-3}$.

Une autre analyse reposant sur l'observation des supernova de type Ia, montre que les supernova les plus éloignées (l'éloignement étant déterminé par leur red-shift), ont systématiquement des intensités plus faibles. Une manière de résoudre ce problème est donc de considérer que la transposition du red-shift en distance sous-estime les distances. Or cette transposition dépend du modèle d'univers, et il se trouve que la aussi, en introduisant une masse volumique du vide $\rho_\Gamma = 3 m_p \cdot \text{m}^{-3}$, alors les observations correspondent aux calculs de distance faits avec le nouveau modèle.

Ce nouveau modèle définit ce qu'on appelle le nouveau modèle standard.

Soit Ω le rapport entre une masse volumique donnée et la masse volumique totale requise pour qu'un univers ait une courbure nulle. Pour $H = 65 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, la masse volumique totale pour que la courbure soit nulle est $\rho_{\text{tot}} = 4,5 m_p \cdot \text{m}^{-3}$.

Dans ce cas, dans le modèle standard, on voit que le paramètre Ω pour la masse volumique de la matière vaut $\Omega = 1,4/4,5 = 0,3$ et pour la masse volumique du vide on a $\Omega = 3/3,4 = 0,7$. Au passage on notera que pour la matière ordinaire on a seulement $\Omega = 0,06$.

Ainsi, pour le modèle standard on voit que la masse volumique de la matière plus celle du vide donne $\Omega = 1$, ce qui correspond à un univers plat. Comme on aime bien les modèles simples, la masse volumique du vide est maintenant considérée comme la masse volumique nécessaire pour que l'univers soit plat.

Pour les physiciens théoriciens cette masse volumique du vide n'est pas affectée par l'expansion de l'univers. D'autre part, comme pour les modèles de Friedmann et d'Einstein-de Sitter, l'univers a toujours été plat, ainsi $\Omega = 1$ à n'importe quelle époque.

Dans ce cas, on a la relation :

$$H(\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}) = 30\sqrt{(\rho_m + \rho_\Gamma)(m_p \cdot \text{m}^{-3})}. \quad (8.5)$$

Ainsi, $\Gamma = 1$ implique une relation entre ρ_m et H au même titre que pour le modèle d'Einstein-de Sitter, sauf qu'ici on a une constante supplémentaire qui est la masse volumique du vide ρ_Γ .

En considérant l'évolution du facteur d'échelle dans le nouveau modèle standard on obtient maintenant un âge de l'univers égale à 14,5 Ga. Dans ce modèle, plus on remonte dans le temps plus la masse volumique de la matière augmente tandis que celle du vide reste constante. Ainsi lorsque le facteur d'échelle est égale à 0,5, la masse volumique du vide devient négligeable par rapport à celle de la matière et du coup le nouveau modèle standard évolue comme un modèle de Einstein-de Sitter pour lequel la masse volumique de la matière actuelle est égale à celle actuelle (donc 30% de la masse volumique totale utilisée dans le modèle d'Einstein-de Sitter original).

Dans un modèle d'Einstein-de Sitter, comme la masse volumique de la matière diminue avec le temps, alors le taux d'expansion de l'univers (H) diminue aussi. Dans le nouveau modèle standard c'est ce qui se passe pendant les premiers milliards d'année où la masse volumique de la matière domine sur la masse volumique du vide. Cependant il arrive une époque (après 11 Ga environ) où la masse volumique de la matière va devenir inférieure à celle du vide. Ainsi le taux d'expansion de l'univers ne peut plus diminuer. En

particulier il ne peut être inférieur à $30\sqrt{\rho_{\Gamma}(m_p \cdot \text{m}^{-3})}$, ce qui correspond à $55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$. C'est vers cette valeur que va tendre le taux d'expansion de l'univers dans le future.

Chapitre 9

La formation du système solaire

9.1 Introduction

La formation du Système Solaire est une discipline de l'astrophysique en pleine évolution. Depuis les travaux fondateurs de l'école soviétique les années 60-70, le nombre d'articles publiés tous les ans sur le sujet ne cesse d'augmenter, comme soumis à une sorte " d'effet Boule de Neige ", bien connu des gens de cette profession. En dépit de cette intense activité théorique, les observations demeurent rares. Notre Système Solaire nous donne une image de l'état final d'évolution d'un disque protoplanétaire, et l'observation de ses " fossiles " (astéroïdes, surfaces planétaires, comètes...) nous renseigne sur les différentes étapes qui ont mené le Système Solaire à sa forme actuelle. A la différence de la physique stellaire ou de la physique des galaxies, nous ne disposons que d'un échantillon très restreint d'observations. Ainsi, il est difficile d'estimer quelles sont les caractéristiques générales et les caractéristiques particulières de ces disques, ce qui représente un obstacle pour tester les scénarios de formation. Au début des années 80, les disques protoplanétaires étaient encore de purs objets théoriques, et déjà les premières simulations numériques de formation des planètes apparaissaient (Greenberg et al. 1978). Depuis, l'outil informatique a été utilisé de manière intensive, accompagné par le développement de tout un formalisme analytique (Wetherill et al. 1989,1992, 1993 ; Barge et Pelat 1990, 1991 ; Ida et al. 1988,1989, pour ne citer qu'eux). Cette période où la théorie avançait " à l'aveugle ", sans support observationnel, commence à prendre fin grâce aux avancées technologiques dans le domaine des observations (HST, vélocimétrie de précision, caméras CCD). La découverte en 1984 du disque Béta-Pictoris (Smith et Terrile 1984) a renforcé l'idée selon laquelle les disques protoplanétaires existent réellement. Les choses s'accélérent avec les découvertes de plus en plus fréquentes de

planètes extra-solaires. Les propriétés physiques de ces dernières ne sont pas expliquées par le scénario " standard " de formation des planètes. A l'heure actuelle nous avons besoin de deux modèles de formation des planètes : l'un pour notre Système Solaire, l'autre pour les planètes extra-solaires. Cependant, les scientifiques semblent s'accorder sur un certain nombre de grands " épisodes " qui ont jalonné l'histoire de la formation des planètes, mais aucune de ces étapes n'est totalement comprise pour le moment. Le disque proto-planétaire est composé d'une phase de gaz et d'une phase de grains de silicates qui évoluent de manière couplée. Le gaz initialement présent se dissipera complètement à terme (seule une faible fraction sera conservée dans l'atmosphère des planètes géantes) alors que les grains de silicates donneront naissance aux planètes. Un tel système se prête difficilement à la modélisation. La principale difficulté vient non seulement de la nature intrinsèque du milieu (faible densité, grand libre parcours moyen), mais surtout de la multiplicité des mécanismes en jeu (importance des perturbations à courte comme à grande distance, fragmentation des roches, accréation, distribution de tailles, interactions gaz/planétésimaux). Il faut noter en outre, qu'un disque proto-planétaire ne peut être décrit sur toute son évolution avec un même modèle. Aux temps les plus reculés, le système est quasiment " continu ", dominé par le gaz et les poussières. La description la plus adaptée est celle de l'hydrodynamique ou de la physique des plasmas. Cependant, et au fur et à mesure que les matériaux se condensent en corps de plus en plus massifs, le système se " discrétise ", rendant les descriptions continues de plus en plus inadéquates. Enfin, les dernières étapes de la formation des planètes sont étudiées typiquement avec des simulations du type N-Corps. Dans le cadre de ce travail nous nous sommes intéressés à l'époque dite des " planétésimaux " qui correspond à l'accréation de corps kilométriques pour former des embryons de planètes, allant de la taille de la Lune à celle de Mars. Nous avons étudié à l'aide d'un modèle mécanique simple, l'évolution d'un disque de planétésimaux au voisinage d'une planète géante en formation. Afin d'introduire le sujet, ainsi que les questions associées, nous décrirons dans la première partie de ce chapitre les grandes lignes de la théorie actuelle de la formation des planètes.

9.2 La formation des planètes terrestres

Kant (" Théorie du Ciel ", 1755) et Laplace (en 1796) ont indépendamment proposés un modèle semblable de formation des planètes par condensation d'un nuage de gaz et de poussières initialement froid, en rotation autour du

Soleil. Ce nuage a la forme d'un disque, qui repose dans le plan de l'écliptique. Ce modèle a l'avantage d'expliquer naturellement le fait observationnel le plus évident pour l'époque : les orbites de toutes les planètes sont regroupées dans un même plan (plan écliptique). L'idée centrale est donc de considérer ce plan privilégié comme une " trace " des conditions initiales du Système Solaire. Le nuage initial, dit " protoplanétaire", est le point de départ de la théorie actuelle de la formation des planètes. Dans la suite de ce chapitre, nous brosons les grandes lignes du modèle actuel afin d'en mettre en lumière les grandes lignes ainsi que les aspects directement reliés au présent travail de thèse.

9.2.1 Un disque issu de la naissance d'une étoile

Les modèles de formations stellaires s'accordent sur le fait qu'une étoile en formation s'entoure naturellement d'un " nid " de poussières et de gaz, résidu du nuage interstellaire au sein duquel se forme l'étoile. Cette enveloppe chaude et opaque n'est pas soutenue par sa propre pression et s'effondre, adoptant alors la forme d'un disque qui repose dans le plan équatorial de l'étoile (Basri et Bertout 1993). De plus en plus fréquemment de tels " berceaux " de poussières sont détectés. Les figures 1 et 2 montrent de spectaculaires observations faites à l'aide des caméras WFPC2 et NICMOS embarquées sur le télescope spatial. La durée de vie de l'enveloppe circum-stellaire est cependant courte : une estimation faite à partir d'observations montre que l'enveloppe se dissipe totalement en quelques 10^7 ans (Strom et al. 1989, Brandner et al. 2000).

9.2.2 Un disque de gaz et de grains

Après s'être effondrée sous forme de disque, la nébuleuse solaire se refroidit lentement. Les éléments silicatés, carbonés ou contenant du fer, se condensent à haute température donc au voisinage de l'étoile, les éléments volatils se condensent en glaces plus loin de l'étoile centrale. Très tôt dans son histoire, le disque protoplanétaire est chimiquement stratifié. Loin du Soleil, le disque est froid et des glaces d'eau, de méthane, d'ammoniaque et d'oxyde de carbone sont apparues. La température étant beaucoup plus élevée près du Soleil, des éléments réfractaires sont apparus tels que l'alumine, ou certains composés réfractaires du calcium, du magnésium, et des oxydes métalliques. A de telles température, les gaz ne peuvent survivre car leur agitation thermique leur permet de s'échapper du disque. Ainsi, dans la région des planètes terrestres, il n'y avait que peu d'hydrogène et d'hélium. Finalement, la composition chimique du système solaire s'explique comme

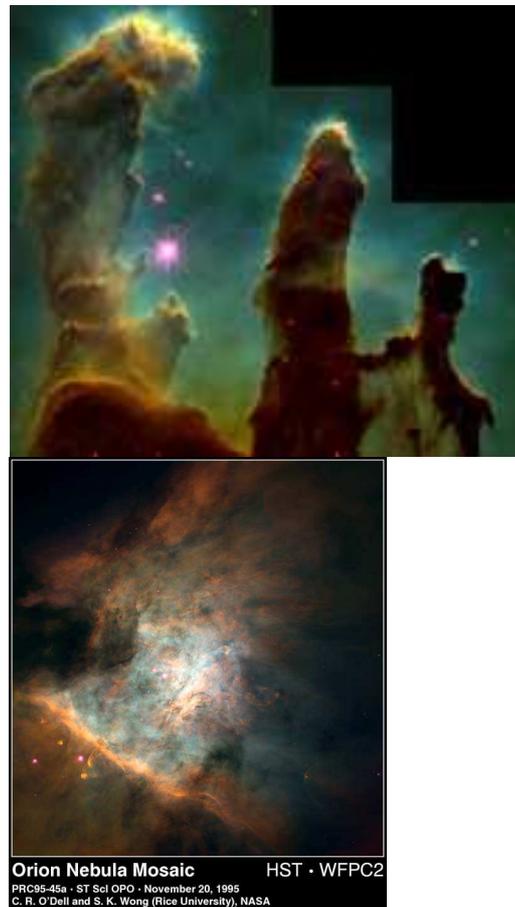


FIGURE 9.1: En haut : Nébuleuses de l'Aigle et d'Orion, lieu de naissance des étoiles (crédit : HST/NASA);

une conséquence directe des variations de température dans le disque protoplanétaire.

Le disque protoplanétaire contient en plus du gaz, environ 1% (en masse) de grains interstellaires micrométriques composés de matériaux réfractaires (un coeur de silicate et une couche de métaux) dont la dimension est de l'ordre du micron. Le problème de la formation des planètes peut donc se résumer simplement ainsi : Par quel(s) processus physique(s) des grains initialement micrométriques vont-ils pouvoir grandir et atteindre des tailles planétaires (de quelques 1 000 à 10 000 kilomètres)? L'observation du Système Solaire permet de déduire un certain nombre de contraintes sur le disque protoplanétaire initial. L'une d'entre elles est la masse minimum du disque. En évaluant la quantité d'éléments lourds présents dans le Système Solaire à

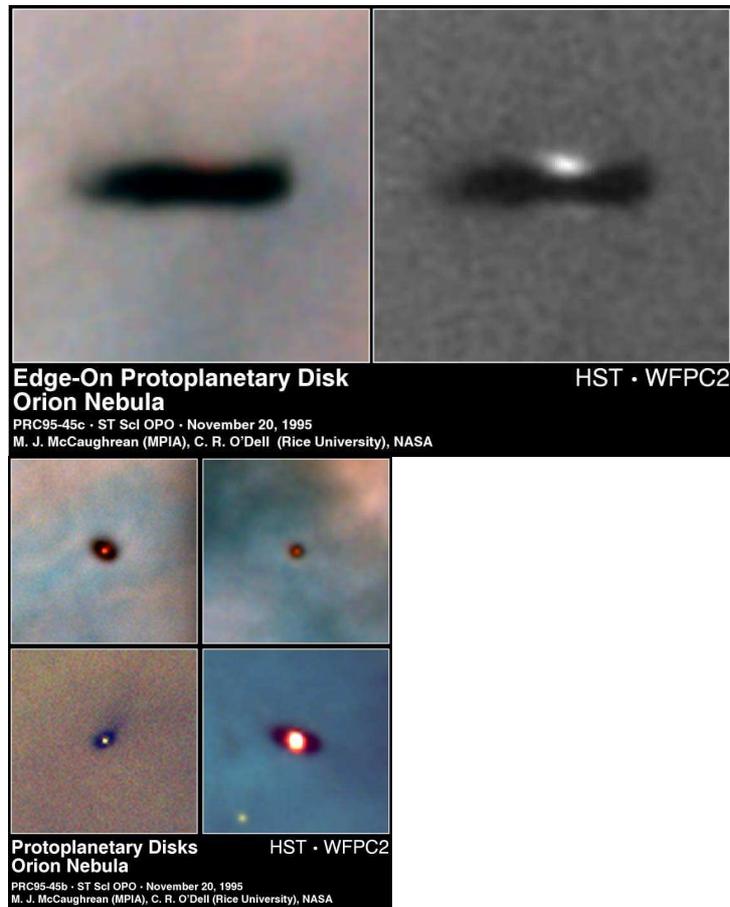


FIGURE 9.2: Disques protoplanétaires vus dans la nébuleuse d'Orion (crédit : HST/NASA);

l'heure actuelle, et en y ajoutant la masse " manquante " d'éléments légers (déduite de la composition solaire), on obtient une masse minimum d'environ 0,01 à 0,02 masse solaire (Weidenshilling 1977, Hayashi 1981). Le profil de densité initial est déduit à partir des masses et des positions des planètes actuelles. La densité surfacique d'éléments lourds (i.e non volatils) semble bien modélisée par une loi qui décroît en $r^{-3/2}$ (r est la distance au Soleil, voir Figure. 9.4), avec un sursaut vers 3-4 UA dû à la condensation des glaces. La localisation de cette transition n'est cependant pas certaine : Hayashi (1981) la situe à 2,7 UA, alors que des travaux plus récents (Stevenson et Lunine 1988) la placent plutôt à 4,5 UA. Cette loi met en lumière un grand déficit actuel de masse entre Mars et Jupiter, correspondant à la ceinture d'astéroïdes. Au vu du Système Solaire actuel, cette région semble

avoir perdu environ 99% de sa masse. Comme nous le verrons, les temps de formation des planètes dépendent fortement de la masse initiale du disque. Le disque de masse minimum est couramment utilisé comme point de départ des modèles de formation planétaire. Cependant un certain nombre de preuves indirectes suggèrent que le disque initial aurait pu être trois à dix fois plus massif (Lissauer 1987, Lissauer et al. 1995).

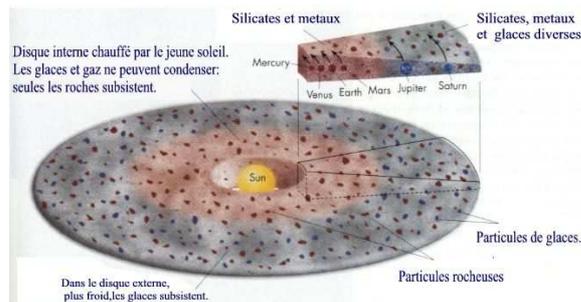


FIGURE 9.3: Stratification chimique et thermique du disque protoplanétaire

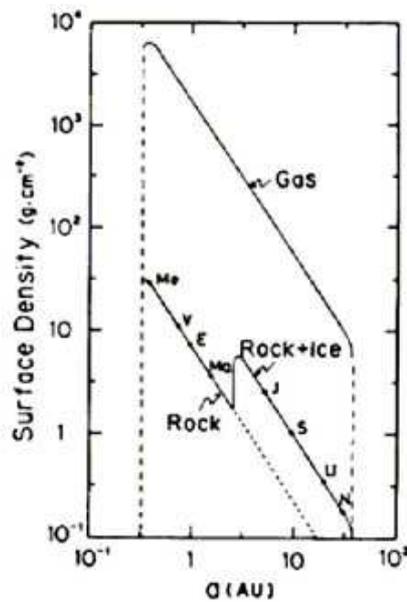


FIGURE 9.4: Profil de densité surfacique du gaz et des silicates dans la nébuleuse "de masse minimum" dans le disque protoplanétaire. D'après Hayashi, 1981

9.2.3 Chute et sédimentation des grains dans le plan équatorial

Aux premiers temps de la nébuleuse protoplanétaire, la densité du gaz est suffisante pour freiner fortement les mouvements des grains, ce qui a pour conséquence de diminuer l'inclinaison (et l'excentricité) de ces derniers et de les regrouper ainsi dans le plan du disque. Le gaz étant supporté par sa propre pression (équilibre entre la pression et la force de gravitation) sa vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de rotation keplerienne. Ainsi, les grains de tailles différentes (plus ou moins couplés avec le gaz) se placent sur des orbites différentes. En effet, les plus petits grains, qui sont fortement freinés par le gaz, acquièrent une vitesse orbitale proche de celle du gaz. A l'opposé, les plus gros, peu couplés avec le gaz, ont une orbite keplerienne. Ceci se traduit par une forte vitesse relative entre les grains de différentes tailles, et donc un fort taux de rencontres. Des grains micrométriques pourraient ainsi grandir jusqu'au centimètre en quelques milliers d'années, à 3 unités astronomiques (Hayashi et al 1985).

9.2.4 Formation des planétésimaux

Au cours de ce processus de sédimentation dans le plan équatorial, le disque de poussière devient de plus en plus fin. Trois mécanismes différents sont proposés pour expliquer la croissance des grains du centimètre au kilomètre. S'il n'y a pas de turbulence, la densité du disque peut être suffisante pour que le disque de grains devienne instable (instabilité de Jeans). Il se fragmente alors en " grumeaux " (Safronov 1969, Goldreich et Ward 1973) qui s'effondrent ensuite sur eux-mêmes et donnent naissance à des corps kilométriques, appelés " planétésimaux ". Ces corps sont les briques à partir desquelles les planètes vont se former. Néanmoins les conditions nécessaires pour atteindre un régime d'instabilité sont très " contraignantes " : l'épaisseur du disque doit être de l'ordre de quelques tailles de grains, et la moindre perturbation pourrait détruire ce délicat équilibre.

Weidenschilling et Cuzzi (1993), ont montré que de la turbulence aurait pu être présente, rendant le mécanisme précédent inopérant. Il est proposé que la turbulence favorise les rencontres proches entre les grains, leur permettant ainsi de se " coller " efficacement les uns aux autres, via des processus chimiques de surface. Cette physique est cependant très mal connue. Des modèles simples montrent que le disque de poussière aurait pu effectivement être turbulent (Weidenschilling & Cuzzi 1993), mais s'accordent sur le fait que des planétésimaux peuvent apparaître en quelques centaines de milliers d'années. Un autre mécanisme prometteur, héritier en quelque

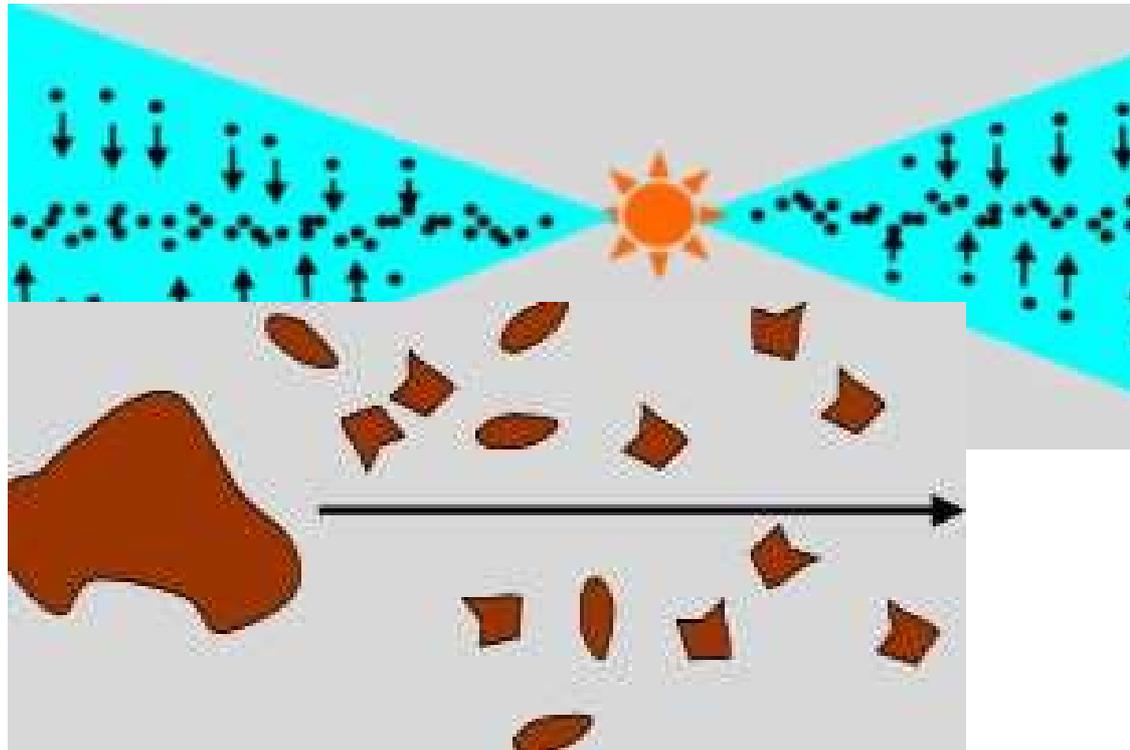


FIGURE 9.5: *En haut : formation du disque ; en bas : accumulation des petits grains sur les plus gros.*



FIGURE 9.6:

sorte des idées de Descartes, propose que de la matière puisse être accumulée au sein de tourbillons. Des simulations numériques récentes (Chavanis 2000) montrent que des tourbillons initialement présents dans la nébuleuse solaire peuvent, dans certaines conditions, se maintenir contre le cisaillement (le cisaillement provient de la rotation différentielle : une particule fluide est déformée, " étalée " par la rotation différentielle). Le jeu couplé des forces de Coriolis et de la rotation différentielle accumule alors les grains au coeur des tourbillons, créant localement des surdensités. Ces dernières deviennent suffisamment denses pour devenir gravitationnellement instables et s'effondrer en planétésimaux ou en planètes. Ces divers processus aboutissent à un même résultat final (sauf pour le mécanisme de croissance au sein de tourbillons) : le disque protoplanétaire est désormais composé d'un disque de gaz auquel se superpose un disque fin d'objets condensés appelés " planétésimaux " dont la taille typique est de quelques kilomètres dans le Système Solaire interne.

A l'issue de cette phase, le disque contient du gaz (comme toujours) et un disque très fin et très froid de planétésimaux, regroupés dans le plan équatorial du Soleil (Fig. 9.7).

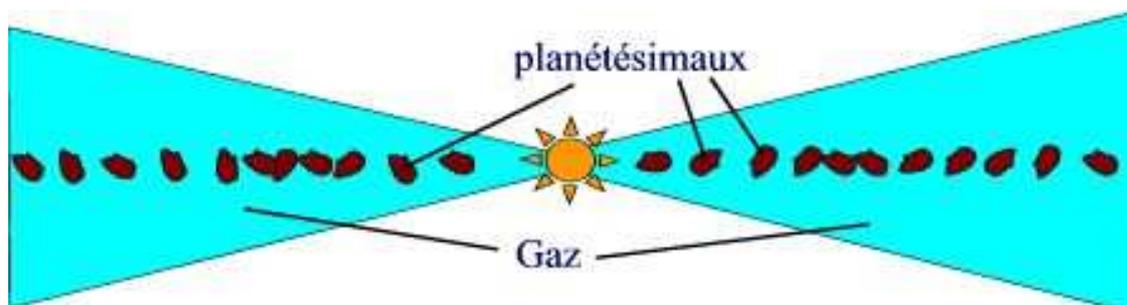


FIGURE 9.7:Disque de planétésimaux.

9.2.5 Des planétésimaux aux protoplanètes

Le disque de planétésimaux est initialement très " froid ", ce qui signifie que la vitesse d'agitation des planétésimaux est très faible comparée à leur vitesse orbitale. La vitesse moyenne de rencontre est de l'ordre de la vitesse d'évasion des corps ($\simeq 10\text{m.s}^{-1}$, Safronov 1969). Lors d'une collision physique inélastique, la vitesse de rebond devient inférieure à la vitesse de libération. Les deux planétésimaux sont alors " liés " gravitationnellement et finissent par s'accréter. Ce modèle d'accrétion par " collage gravitationnel " est le point de départ des théories de formation des protoplanètes. Ce processus

est évidemment très dépendant de la vitesse d'agitation dans le disque : c'est le paramètre qui fixe le taux d'accrétion et l'issue des collisions. A l'aide d'un mécanisme d'emballage de l'accrétion, appelé " effet Boule de Neige ", les auteurs semblent s'accorder sur le fait que les corps les plus gros peuvent atteindre quelques centièmes de masse terrestre en environ 100 000 ans à une unité astronomique (Wetherill et Stewart 1989, Weidenschilling et al. 1997, Kokubo et Ida 2000).

Dans ce modèle (développé par des américains dans les années 70) la croissance n'est pas ordonnée du tout : seul un unique corps grandit : le plus gros ! étant plus massif il attire plus efficacement les petits planétésimaux qui l'entourent. Il devient alors encore plus gros, et attire encore plus efficacement les autres petits corps et ainsi de suite. C'est une sorte d'instabilité (Fig. 9.8).

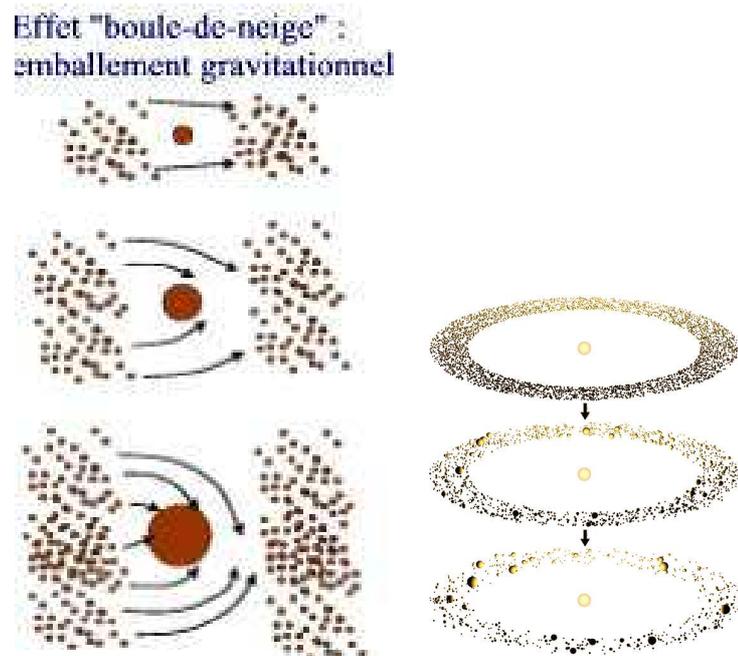


FIGURE 9.8: A gauche : modèle de l'effet boule de neige ; à droite : résultats de simulation de Tanaka et al. (2000).

9.2.6 Des protoplanètes aux planètes

A la fin de l'époque de l'accrétion Boule de Neige, le système se compose d'un grand nombre de protoplanètes (quelques dizaines à quelques centaines) qui n'accrètent quasiment plus de matériaux, ayant "consommé" tout ce qui était à leur portée. La suite de l'histoire diffère maintenant pour le Système Solaire interne et externe. Pour que les embryons des planètes terrestres continuent à grandir jusqu'à leur masse actuelle, le système doit entrer alors dans un processus d'échauffement. Les protoplanètes se perturbent gravitationnellement les unes les autres, augmentant de plus en plus leurs excursions radiales, jusqu'à ce que les orbites se croisent (Wetherill 1992). Les rencontres se traduisent alors par de gigantesques collisions physiques. Étant donné leur grande taille, les jeunes protoplanètes sont capables de résister à des chocs aussi violents et de réaccréter les fragments issus des collisions. Wetherill a mené de nombreuses simulations de cette époque finale. Il montre qu'en un temps de l'ordre de 10^8 ans, quelques centaines de corps de 0.01 masse terrestre peuvent former 2 à 5 planètes de masses terrestres. La Lune par exemple pourrait avoir été formée à cette époque à la suite d'un impact géant. Bien que les masses obtenues par les simulations numériques soient comparables à celles des planètes telluriques, il est en général difficile d'obtenir un Système Solaire "final" qui ressemble au nôtre. Par exemple, les excentricités sont en général bien plus élevées dans les simulations que celles observées dans le Système Solaire (Agnor et al., 1999, Chambers & Wetherill 1998, Fig. 9.9).

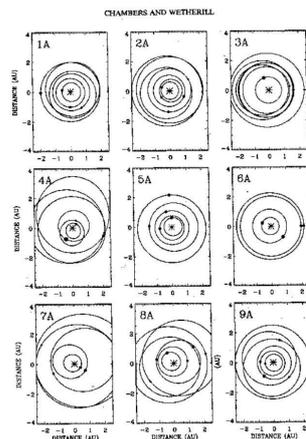


FIGURE 9.9: Des protoplanètes aux planètes.

9.2.7 Des disques post-planétaires

Une fois que la nébuleuse de gaz s'est dissipée, au bout de 10 millions d'années environ, et que les planètes se sont formées il ne reste plus qu'un disque de débris, composé des "restes", du matériau non encore utilisé pour la formation des planètes. De tels disques de débris, ou appelés également "post-planétaires", sont maintenant détectés autour d'étoiles jeunes depuis quelques années. Un disque post-planétaire se distingue d'un disque proto-planétaire car il ne contient quasiment plus de gaz, et uniquement des grains. Un magnifique exemple est celui de Béta-Pictoris, découvert en 1984 par B. Smith et R.J. Terrile (Fig. 9.10)

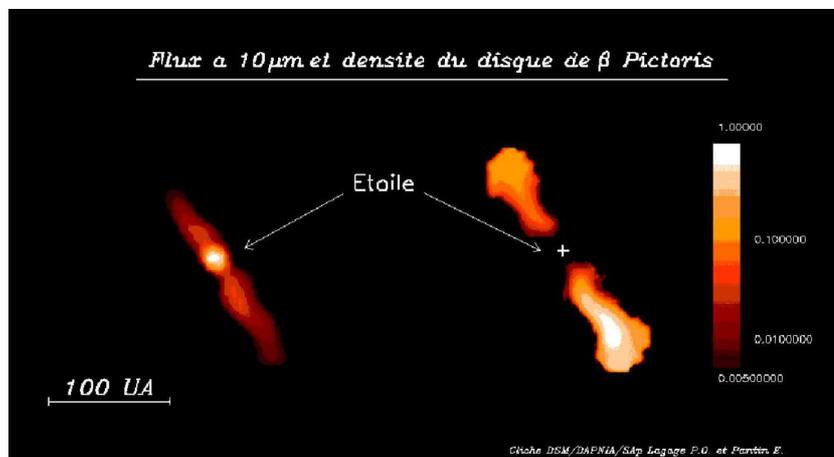


FIGURE 9.10: Image du disque de débris autour de l'étoile de Béta-Pictoris. Le disque fait environ 100 u.a de long. Le trou centra est réel.

9.2.8 En Résumé

Il y a 4,5 milliards d'années, le jeune Soleil était plusieurs dizaines de fois plus lumineux qu'aujourd'hui et enfoui dans une nébuleuse de gaz et de grains, qui s'est aplatie ensuite sous la forme d'un disque sous l'action de la force centrifuge et de la viscosité. C'est ce dernier qui donnera naissance aux planètes. Les astronomes l'appellent "disque protoplanétaire". Ce disque passe par cinq phases : un disque de gaz, un disque de grains, un disque de planétésimaux, un disque d'embryons, et un disque de planètes. Tout cela est résumé sur l'image ci-dessous.

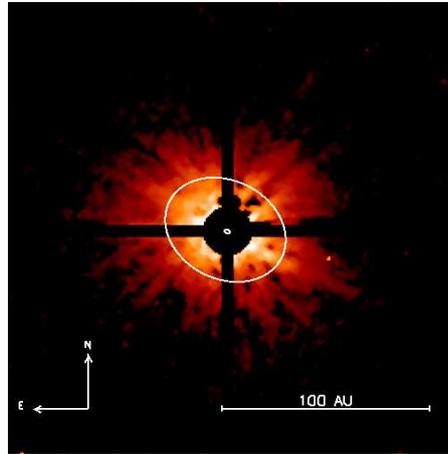


FIGURE 9.11: Disque circumstellaire Iota Horologii , photographié durant l'été 2000 Par Lagage & Pantin en Infrarouge (bande H) à l'aide du système ADONIS. Le centre est occulté du au coronographe. Autour de ce disque une planète extrasolaire a déjà été détectée par vitesse radiale ($\simeq 3$ masses de Jupiter à 1 AU) de manière indépendante, par une autre équipe. Le grand cercle externe est l'orbite de Neptune , pour indiquer l'échelle. Le petit cercle interne est l'orbite de la planète extrasolaire hypothétique.

9.3 La formation des planètes géantes gazeuses

Nous avons vu jusqu'ici comment les planètes terrestres se forment. Nous nous intéressons maintenant aux planètes géantes qui ont la particularité de posséder une atmosphère de gaz très massive, qui peut représenter plus de 90% de leur masse totale. Les scénarios de formation des planètes géantes sont divisés en deux grandes familles : le modèle de " l'instabilité gravitationnelle " et celui du " coeur solide ". Ce dernier, bien que présentant des difficultés majeures (en particulier en ce qui concerne les échelles de temps), semble s'être imposé face au modèle d'instabilité gravitationnelle pour les planètes géantes de notre Système Solaire, mais la question demeure encore ouverte. Nous décrivons ci-dessous les grandes lignes des deux approches.

9.3.1 Instabilité de gravitationnelle (dite de Jeans)

Dans le scénario de formation par instabilité, une planète géante se forme par un mécanisme analogue à celui d'une étoile. Le disque protoplanétaire, s'il est initialement assez massif, peut devenir gravitationnellement instable

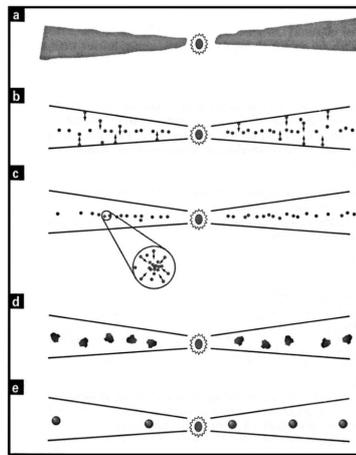


FIGURE 9.12: *Résumé des 5 étapes : Ce schéma résume notre conception actuelle de la formation des planètes, à savoir la formation d'un disque de gaz (a), suivie de celle d'un disque de grains qui migrent dans le plan équatorial (b), puis d'un disque de planétésimaux (c). Ces petits corps, d'une taille de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, forment un disque d'embryons de planètes (d) et finalement les planètes qui nous sont familières (e). D'après A. Brahic "Les enfants du Soleil", Ed. Odile Jacob.*

(instabilité de Jeans¹), s'effondrer et se fragmenter en corps dont la masse typique est de l'ordre de celle Jupiter (Cameron et al 1985, Boss 1996). Un tel mécanisme est capable de former des corps de la masse de Jupiter (10^{-3} masse solaire, ou 300 masses terrestres) en quelques 1000 ans. Bien qu'expliquant de manière naturelle la présence de planètes géantes dans notre Système Solaire,

1. Qu'est ce que l' Instabilité de Jeans? L'instabilité de Jeans est le mécanisme par lequel un nuage de gaz interstellaire peut s'effondrer sous son propre poids et donner naissance à des étoiles. C'est la gravité qui est à l'origine de ce phénomène. En effet, considérons un nuage de gaz pesant. Son équilibre interne résulte de l'équilibre entre deux forces : la gravité qui tend à le contracter sur lui même, et la pression, engendrée par sa chaleur, qui tend à le dilater (par exemple, quand un pneu de voiture est chaud, il a tendance à se dilater). Le plus souvent ces deux mécanismes agissent en sens contraire et s'équilibrent pour former une structure stable comme une étoile. Cependant, si le nuage de gaz est vraiment trop massif, ou trop dense, la gravité l'emporte sur les forces de pression : la moindre perturbation peut engendrer une contraction locale très forte. Dans la réalité, des perturbations sont toujours présentes. Ainsi, quand le nuage de gaz a atteint sa densité critique, il se fragmente en milliards de plus petits grumeaux qui individuellement se contractent très vite. Ces derniers augmentent alors leur pression interne, qui finit par contrebalancer la force de contraction gravitationnelle. Une étoile est à l'origine un de ces grumeaux. Sa composition chimique, au début de son histoire au moins, est exactement celle de la nébuleuse de gaz initiale.

ce scénario présente deux difficultés majeures. En effet, pour que l'instabilité se déclenche, la nébuleuse initiale doit être massive, de l'ordre de 1 masse solaire, ce qui est 100 fois supérieur à la " nébuleuse de masse minimum " (Hayashi 1981). Il faut donc un mécanisme capable d'éliminer 99% de la masse totale du Système Solaire. Ceci semble assez improbable (mais peut-être pas impossible, au vu de la faible masse de la ceinture d'astéroïdes par exemple). Mais l'objection majeure concerne les abondances atmosphériques en éléments lourds. En effet, selon ce scénario, la composition des atmosphères des planètes géantes devrait être proche de celle de la nébuleuse primitive, qui est également proche de la composition solaire. Or on note un fort enrichissement des planètes géantes en éléments lourds (Tab. 9.3.1), qui ne semble pas pouvoir être expliqué dans le cadre du scénario d'instabilité gravitationnelle.

Planète	Masse d'éléments lourds en masses terrestres	Masse de gaz (H+He) en masses terrestres	Fraction d'éléments lourds	Enrichissement rapport au So
Jupiter	10 à 30	290	6%	3
Saturne	15 à 25	70	20%	10
Uranus	10 à 16	4	75%	38
Neptune	10 à 16	4	75%	38

FIGURE 9.13: Abondances en éléments lourds des planètes géantes

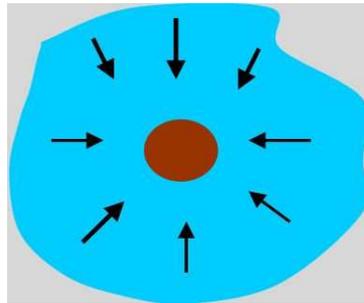
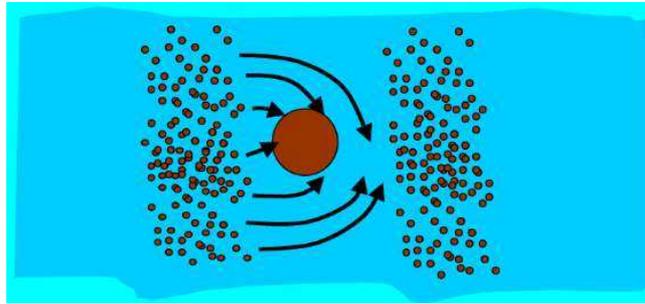
9.3.2 Modèle du coeur Solide

Formation d'un coeur solide Cette forte abondance d'éléments lourds dans l'atmosphère des planètes géantes semble naturellement être expliqué par le scénario " concurrent " dit du " coeur solide " qui prévaut aujourd'hui pour les planètes géantes de notre Système Solaire (pour les planètes extra-solaires du type " Jupiter chaud " c'est peut-être bien l'instabilité de Jeans, le bon mécanisme). Dans ce scénario, les planètes géantes se forment en deux temps. Dans un premier temps, un gros embryon de silicates et de glaces (de quelques masses terrestres à quelques dizaines de masses terrestres) se forme rapidement par accréition Boule de Neige, comme dans le cadre de la formation des planètes telluriques. Les modèles d'évolutions (Wetherill 1992, Lissauer et al. 1995) suggèrent que dans le système externe, les embryons peuvent être de 10 à 1000 fois plus massifs que dans le système interne.

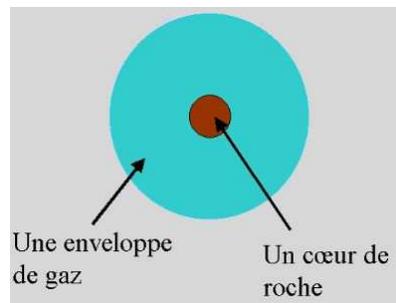
Accréition d'une enveloppe de gaz Le mécanisme par lequel une grande masse de gaz peut s'accumuler autour d'un embryon planétaire a été mis

en évidence au début des années 80 par Mizuno (Mizuno et al. 1978) . Ce dernier considère l'équilibre d'une enveloppe gazeuse reposant sur un coeur solide et relié à la nébuleuse environnante. En faisant varier la masse du coeur solide, Mizuno montre qu'il existe une masse critique au-delà de laquelle il n'est plus possible de construire une enveloppe en équilibre hydrostatique. Dans ces conditions, l'enveloppe de gaz se contracte rapidement (voir Figure 8). L'accrétion devient exponentiellement rapide : en un temps court (qui n'est pas estimé avec précision, mais plutôt extrapolé à partir des premiers instants, voir Pollack 1996 par exemple) une très grande quantité de gaz est accrétée (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de masses terrestres). La masse critique est en général atteinte lorsque la masse de gaz est égale à celle du coeur rocheux (Lissauer et al. 1995 ; Terquem et al. 1999). Dans le cas des planètes géantes, cette masse est environ de 10 à 15 masses terrestres (Pollack et al. 1996). La Figure 9 montre le résultat d'un calcul récent prenant en compte de manière couplée l'accrétion des planétésimaux et du gaz. En environ 5×10^5 ans, le coeur solide cesse de grandir par accrétion Boule de Neige, en raison du vidage de sa zone d'alimentation. Il accumule ensuite progressivement une enveloppe de gaz, augmentant sa masse et élargissant en conséquence, sa zone d'alimentation. La planète entre alors dans une période où l'accrétion du gaz et des planétésimaux se régulent mutuellement : l'enveloppe tend à se contracter en se refroidissant, mais cette perte d'énergie est contrebalancée par l'apport d'énergie gravitationnelle des planétésimaux lors de leur chute sur la planète. Lorsque la masse critique du coeur solide est atteinte (environ 15 masses terrestres) au bout de 8 millions d'années l'accrétion du gaz devient alors exponentielle et la protoplanète devient une géante gazeuse. Bodenheimer et Pollack (1986) montrent que la masse critique du coeur solide est très sensible au taux d'accrétion des planétésimaux. En effet, les planétésimaux absorbés par la protoplanète en réchauffent l'atmosphère. Cette énergie thermique sert à contrebalancer le refroidissement des couches supérieures qui rayonnent leur énergie thermique. L'accrétion rapide du gaz commence quand se crée un déséquilibre entre l'énergie perdue par rayonnement et l'énergie gagnée par capture de planétésimaux. La Figure suivante illustre ceci. Petit résumé en image du modèle du coeur solide :

- 1 Un embryon rocheux grandit par effet Boule-de-Neige, en attirant tous les planétésimaux qui l'entourent (Fig. 9.3.2) ;
- 2 Au cours de sa croissance l'embryon accrète une enveloppe de gaz. Quand sa masse devient suffisante l'enveloppe de gaz s'effondre rapidement sur le coeur rocheux. Ce dernier acquiert alors une atmosphère très massive. Il devient une protoplanète géante (Fig. 9.3.2) ;
- 3 A la fin nous obtenons une planète géante, composée d'une enveloppe de gaz très massive, et d'un petit coeur de roche central. Ultérieurement



ce dernier pourra se dissoudre partiellement dans l'enveloppe de gaz (Fig. 9.3.2).



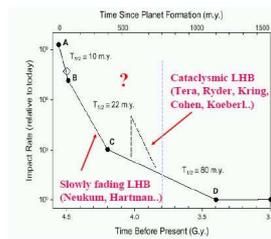
Ce scénario explique naturellement la présence de plusieurs masses terrestres de silicates dans les planètes géantes. Le problème majeur concerne les échelles de temps de formation. Pour une nébuleuse dont la densité est 5 fois supérieure à celle de la nébuleuse de masse minimum, le temps de formation de Jupiter est d'environ 810^6 ans, alors que le temps de dissipation estimé de la nébuleuse est environ 10 millions d'années. Pollack et al. (1996) montrent que de faibles variations de la densité de la nébuleuse (qui n'en modifient pas l'ordre de grandeur) suffisent à faire varier le temps de formation par un facteur 10. En adoptant la densité de la nébuleuse de masse minimum, le temps de formation de Jupiter est d'environ 10^8 ans, ce qui est beaucoup plus long que le temps de dissipation de la nébuleuse initiale et

rendent ce scénario improbable. C'est pour cette raison que certains auteurs comme Lissauer (1987, 1995) suggèrent que la nébuleuse protoplanétaire a été entre 3 et 10 fois plus massive que la nébuleuse de masse minimum. La détermination de cette densité est donc un objectif majeur de la planétologie actuelle car elle conditionne la chronologie de formation des planètes. En ce qui concerne Uranus et Neptune, il ne semble pas possible qu'elles aient pu atteindre leur masse critique avant la dissipation de la nébuleuse. Ainsi, elles auraient pu être stoppées dans leur processus de formation.

Des travaux (Guillot 1999) jettent encore une ombre supplémentaire sur ce scénario. A l'aide d'une modélisation sophistiquée des intérieurs de Jupiter et de Saturne, Guillot montre qu'il semble que la masse du coeur de silicates de Jupiter soit inférieure (entre 0 et 10 masses terrestres) à celle prédite par le modèle du coeur solide (10 à 20 masses terrestres). Nous voyons que le débat sur le mécanisme de formation des planètes géantes est encore loin d'être tranché.

9.4 Le bombardement tardif et la migration des planètes géantes

Une fois les planètes formées le système peut évoluer dynamiquement jusqu'à atteindre une certaine stabilité. L'étude des cratères d'impact sur les surfaces solides du système solaire (Lune, Mercure, etc), permet d'effectuer un historique de la fréquence d'impact depuis la formation des planètes. Cette étude met en évidence un rapide décroissance de la fréquence d'impact en quelques centaines de millions d'années pour atteindre le niveau actuel après un milliard d'années (voir fig. 9.4). Cependant cette étude met aussi en évidence un bombardement tardif après environ 500 millions d'années. Un tel bombardement s'explique par une évolution dynamique du système planétaire conduisant les planètes géantes à venir modifier les trajectoires de planétésimaux jusque là pratiquement non affectés par les planètes. Ce phénomène a été illustré par le "modèle de Nice" qui met en évidence une migration des planètes géantes, c'est-à-dire une variation monotone du demi-grand axe des planètes géantes. Un des scénari possibles serait qu'au cours de cette migration, Saturne se trouve en résonance avec Jupiter conduisant à un accroissement considérable des effets perturbatifs sur Uranus et Neptune et par conséquent sur le disque de planétésimaux se trouvant au-delà de l'orbite d'Uranus et Neptune (voir simulations de Morbidelli et al.).



Chapitre 10

Les exoplanètes

10.1 Introduction

Le Système solaire comporte 8 planètes. On a vu que le processus de formation du système solaire peut être généralisé à d'autres étoiles. Ainsi rien n'empêche, a priori, la présence de planètes autour d'autres étoiles que le Soleil. La recherche d'exoplanète est devenue une des priorités de la recherche en astronomie, avec la question corollaire : peut-il y avoir de la vie sur d'autres planètes que la Terre. Depuis Octobre 1995, date à laquelle la première exoplanète a été découverte, plus de 850 planètes extrasolaires ont été découvertes. Découverte et caractéristique de ces planètes sont maintenant énumérées.

L'intérêt d'une telle recherche réside non seulement dans le fait qu'on peut ensuite faire de la planétologie comparée afin de mieux déterminer les modèles temps de formation de système solaire que d'évolution à long terme de notre système.

Avant de commencer la description des méthodes de détection il nous faut définir ce qu'est une exoplanète. Premièrement ce n'est pas une étoile. Ainsi une exoplanète ne doit pas être à la source d'un rayonnement dont l'origine serait des réactions de fusion nucléaire. Les modèles de fusion montre que cette contrainte implique qu'une exoplanète doit être de taille inférieure à 13 fois la masse de Jupiter. D'autre part, une autre manière de définir une planète est que sa formation diffère de celle d'une étoile. Une étoile se forme par effondrement d'un nuage de gaz alors qu'une planète se forme par l'accrétion de différents matériaux allant de poussière de silicate ou de glace à partir d'un disque protoplanétaire orbitant autour d'une étoile. Ainsi une exoplanète doit tourner autour d'une étoile. Les deux définitions en générale se rejoignent.

Cependant, il peut se faire qu'une planète atteigne une masse supérieure à 13 fois la masse de Jupiter (on peut alors obtenir une étoile double), ou qu'un nuage de gaz interstellaire s'effondre pour donner un astre de masse inférieure à 13 fois la masse de Jupiter, on parle alors de planètes flottantes (ça concerne aussi des planètes qui pouvaient initialement tourner autour d'une étoile pour ensuite être éjectée de l'attraction gravitationnelle de l'étoile sous l'effet de perturbations).

Les objectifs principaux de la recherche d'exoplanète est donc la planétologie comparée. En particulier étudier les différentes forme possible de système planétaire (nombre de planètes, type de planètes, type d'étoile, etc). Ceci devrait permettre dans un second temps de mieux comprendre la formation de notre système solaire ainsi que de déterminer les chances pour que la vie existe ailleurs que sur Terre.

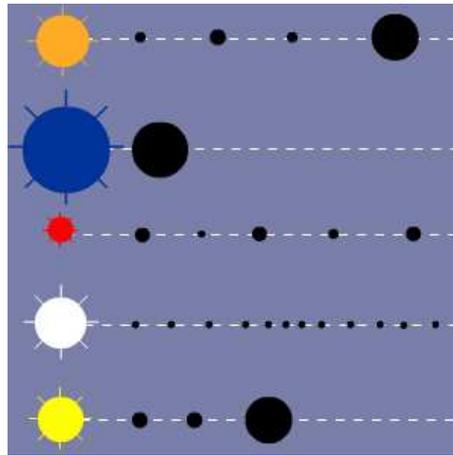


FIGURE 10.1: Différents types de système planétaire (crédit : UFE - Observatoire de Paris)

10.2 Méthodes de détection

L'idée la plus simple de la détection d'exoplanète est l'observation direct (Fig. 10.2). On a vu en TD que les capacités techniques des télescopes sont suffisantes pour observer un astre aussi brillant que Jupiter même à plusieurs parsec de distance et pour séparer l'astre de l'étoile. Mais la différence d'éclat est telle que la luminosité de l'étoile va noyer le peu de lumière provenant de la planète.

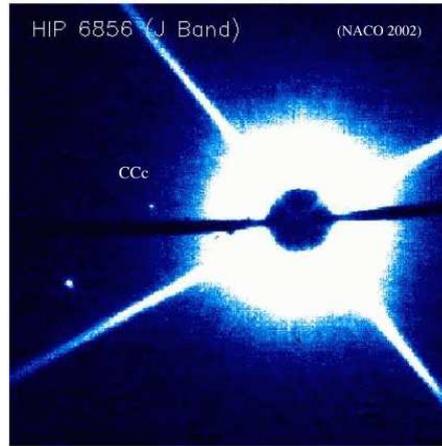


FIGURE 10.2: Détection de deux compagnons faibles de l'étoile HIP6856. (Crédit : VLT / NACO 2002)

10.2.1 Méthodes dynamiques

Ces méthodes sont basées sur la détection des perturbations de la planète sur l'étoile. D'après les principes de la dynamique l'étoile et la planète tournent autour de leur centre de masse. Ainsi si r_P et r_S sont les distances respectives de la planète et de l'étoile à ce centre de masse alors on a :

$$\frac{r_P}{r_S} = \frac{M_S}{m_P}$$

où M_S et m_P sont les masses de l'étoile et de la planète respectivement. Si on suppose la planète sur une orbite circulaire alors les distances r_P et r_S sont constantes et leur somme est égale au demi-grand axe de l'orbite de la planète autour de l'étoile.

Il y a alors trois méthodes pour détecter ces mouvements

Mesure de la vitesse radiale et effet Doppler-Fizeau

Soit $v_R(t)$ la vitesse radiale de l'étoile par rapport à l'observateur. On a :

$$v_R(t) = \vec{V} \cdot \hat{y} = K \sin \frac{2\pi t}{T}$$

où :

$$K = \frac{m_P \sin i}{M_S} \sqrt{\frac{G M_S}{a_P}}$$

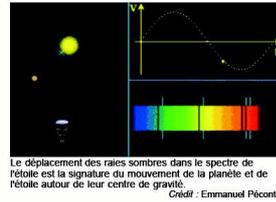


FIGURE 10.3:(Crédit : UFE - Observatoire de Paris)

où i est l'inclinaison de l'orbite de la planète par rapport au plan perpendiculaire à la ligne Observateur- Etoile (Fig. 10.3).

Cette méthode permet de déterminer la période orbitale, le demi-grand axe, l'excentricité de l'orbite et le produit $m_P \sin i$, c'est à dire une minoration de la masse de la planète. C'est la méthode la plus efficace pour détecter des exoplanètes actuellement.

Par astrométrie

On peut aussi mesurer de manière précise le mouvement de l'Etoile par rapport au fond d'étoile fixe. En effet le mouvement de l'étoile visible par l'observateur sera une ellipse (dans le cas d'un mouvement circulaire de la planète) décrite par les coordonnées suivantes :

$$\begin{aligned} x(t) &= r_s \cos \frac{2\pi t}{P} \\ z(t) &= -r_s \sin \frac{2\pi t}{P} \cos i \end{aligned}$$

Par exemple le mouvement du Soleil vu à 10 pc sous l'effet des perturbations gravitationnelles de Jupiter et de Saturne est montré sur la figure 10.4.

On obtient ici aussi les mêmes informations qu'avec la vitesse radiale sauf que la masse de la planète est déterminée de manière exacte.

Par chronométrage

Pour des étoiles particulières pour lesquelles on observe un rayonnement ayant une période très précise alors on peut déterminer l'existence d'une planète extrasolaire par les variations de ce signal. Ce type d'étoiles sont d'une part les pulsars pour lesquels on observe un rayonnement radio périodique

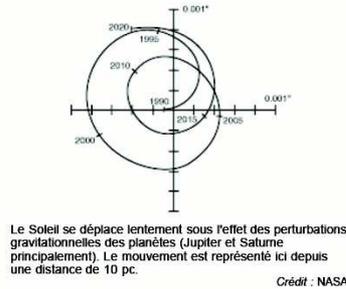


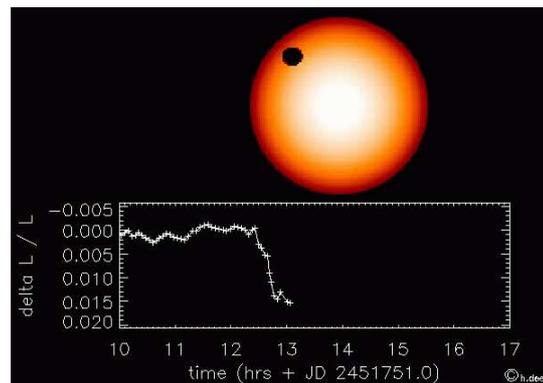
FIGURE 10.4:

très régulier et les étoiles binaires à éclipse (leur plan orbital contient la ligne observateur étoiles). Le mouvement de la planète éloigne et rapproche l'étoile de l'observateur. Ainsi le rayonnement (qui se déplace à la vitesse de la lumière) ne va pas mettre le même temps pour nous parvenir à deux époques différentes, du fait de la variation de la distance. Ceci va impliquer une variation dans la périodicité des quantités observées.

Cette méthode a permis de découvrir des planètes autour de pulsars.

10.2.2 Par transit

Lorsqu'une planète passe devant l'étoile elle va occulter une partie de la lumière nous provenant de l'étoile. Ainsi en étudiant les variations lumineuses des étoiles on peut déterminer l'existence de planète (Fig. 10.5).

FIGURE 10.5: *Détection d'une exoplanète par transit.*

Cette méthode donne la période orbitale l'inclinaison de la planète et le rapport des rayons de la planète et de l'étoile. Si on associe cette méthode à une méthode par vitesse radiale on obtient aussi la masse de la planète.

En outre, on peut observer le spectre de l'étoile au moment du transit. En comparant le spectre sans la planète devant l'étoile et avec la planète on peut en déduire les raies d'absorption qui sont dues à l'atmosphère de la planète. C'est de cette manière que de l'hydrogène de l'oxygène et du sodium ont été découvert dans l'atmosphère de la planète HD209458b.

10.2.3 Avec les lentilles gravitationnelles

Lorsqu'un corps massif, appelé déflecteur, se trouve proche de la ligne joignant l'observateur à un objet plus lointain, la lumière provenant de l'astre lointain est amplifiée suivant le facteur $\sqrt{M/b}$ où M est la masse du déflecteur et b la distance entre le déflecteur et la ligne observateur - étoile.

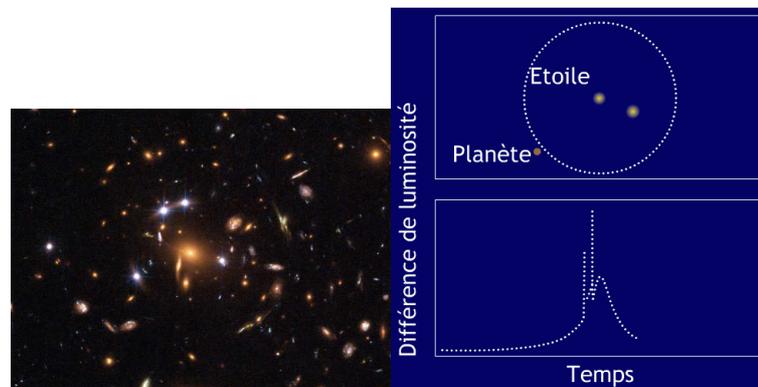


FIGURE 10.6:A gauche : Exemple de lentille gravitationnelle pour des galaxies lointaines (crédit HST/NASA) ; à droite : lentilles pour les planètes extra-solaires (crédit : UFE - Observatoire de Paris)

10.2.4 L'imagerie directe

L'idéal pour découvrir une planète extrasolaire est évidemment de l'observer directement. Ceci peut se faire en observant directement le flux de lumière réfléchi par la planète ou le flux thermique émis par la planète.

Le flux réfléchi par la planète va dépendre de la distance entre la planète et l'étoile du rayon de la planète, de la phase de la planète et de l'albedo de la planète (c'est à dire son pouvoir réflecteur qui dépend des conditions physiques de la planète).

Pour le flux thermique, il est dû au rayonnement émis par la planète suite à l'échauffement de sa surface induit par le rayonnement de l'étoile. Ce flux va dépendre de la distance planète étoile, et d'un facteur mesurant l'effet de serre de la planète, c'est à dire sa capacité à retenir le rayonnement réfléchi par la planète.

Dans les deux cas, le rapport entre le flux provenant de la planète et le flux de l'étoile est extrêmement petit. Ainsi la lumière de l'étoile va « étouffer » la lumière venant de la planète. Si par exemple la différence de magnitude entre l'étoile et la planète est de 20, ça correspond à un flux de la planète qui est 10⁻⁸ fois moins intense que celui de l'étoile, ce qui revient à déterminer ce flux avec au moins 8 chiffres de précision ce qui n'est pas possible.

Il existe deux méthodes pour limiter l'influence du flux de l'étoile : la coronographie qui consiste à appliquer un cache devant l'étoile, et l'extinction interférométrique qui consiste à utiliser deux miroir réfléchissant la lumière venant de l'étoile et de la planète et de combiner leur lumière afin de supprimer la lumière venant de l'étoile et de conserver celle qui vient de la planète.

Actuellement quelques images directes ont pu être effectuées. Ces images directes viennent essentiellement d'un rayonnement thermique venant de la planète. Ce rayonnement est particulièrement important pour des planètes jeunes encore très chaudes.

C'est le cas de GQ Lupi qui est une étoile jeune donc la planète qui lui tourne autour est encore très chaude. La planète se trouve à une distance comparable à celle de 20 fois la distance entre le Soleil et Jupiter. Son éclat serait 250 fois plus faible que celui de l'étoile (voir Fig. 10.7).

Une autre planète découverte par observation directe aussi en 2005 est 2M1207. Elle se trouve à 55 UA de son étoile qui est une naine brune (donc peu brillante). La planète est 100 fois moins brillante que l'étoile (voir Fig. 10.8).

Ces observations sont généralement faite dans l'infrarouge afin de limiter la différence d'éclat. En effet dans l'infrarouge on peut avoir un rapport d'éclat de 400 dans l'infrarouge alors qu'il est de 10 000 dans le visible.

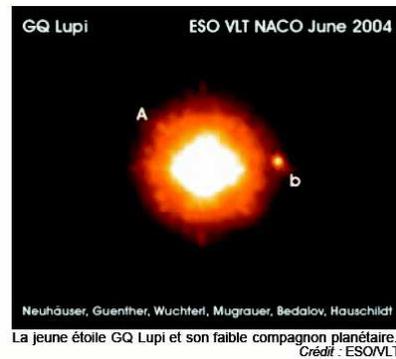


FIGURE 10.7:



FIGURE 10.8:

10.3 Les exoplanètes observées

Actuellement plus de 850 exoplanètes ont été découvertes. Seules les méthodes dynamiques et de transit ont réellement été mises en oeuvre. La méthode dynamique se traduit concrètement par plusieurs programmes de recherche de planètes par mesure de vitesses radiales des étoiles, par astrométrie au moyen du télescope spatial Hubble et par le chronométrage de pulsars. La méthode des transits est mise en oeuvre par plusieurs campagnes d'observation au sol et par le télescope spatial Hubble.

10.3.1 Diagramme des masses

On observe sur la figure 10.9 que le nombre de planètes décroît rapidement avec la masse pour devenir très faible au-delà de $10 M_{\text{Jupiter}}$. Cet effet n'est pas

dû à la technique de détection qui est d'autant plus efficace que les planètes sont massives. Il semble donc que les planètes plus massives que $10 M_{\text{Jupiter}}$ ne se forment que rarement autour d'étoiles de type solaire. Bien que la masse en abscisse soit en réalité pour la plupart des planètes le produit de la masse par le sinus de l'inclinaison de l'orbite sur le ciel, on montre par des calculs statistiques que l'échantillon des planètes connues est suffisamment grand pour que l'histogramme réel ne diffère pas significativement de l'histogramme obtenu à partir des mesures.

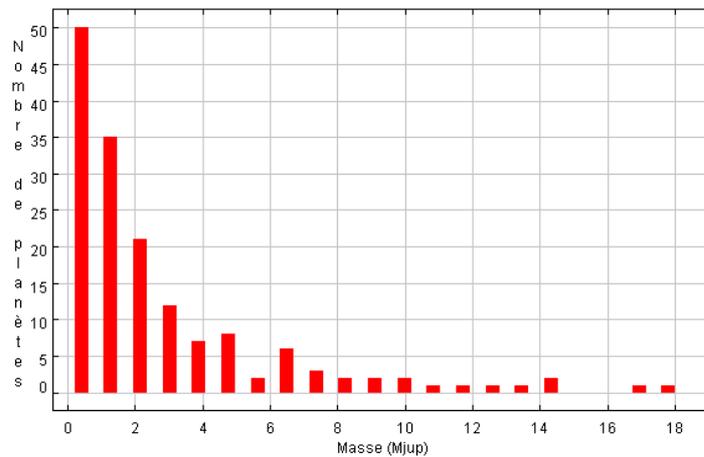


FIGURE 10.9: Diagramme des masses (crédit : Observatoire de Paris - UFE)

10.3.2 Diagramme des périodes

Sur l'histogramme de la figure 10.10, on observe une accumulation de planètes à courte période (inférieure à 10 j) dont on pense qu'elle résulte d'un phénomène de migration : les planètes se forment dans le disque de gaz et poussières qui entoure leur étoile-hôte lorsque cette dernière est encore jeune. Avant que le disque ne disparaisse, soufflé par le vent de particules émis par l'étoile, il exerce une force sur les planètes qui les rapproche de leur étoile. Au-delà de 1000 j, la rareté des planètes est un effet de la durée d'activité des relevés spectroscopiques qui est de l'ordre d'une dizaine d'année.

10.3.3 Diagramme masse/période

Sur le diagramme de la figure 10.11 on voit apparaître une corrélation intéressante entre masse et période. On note en particulier : une quasi-absence

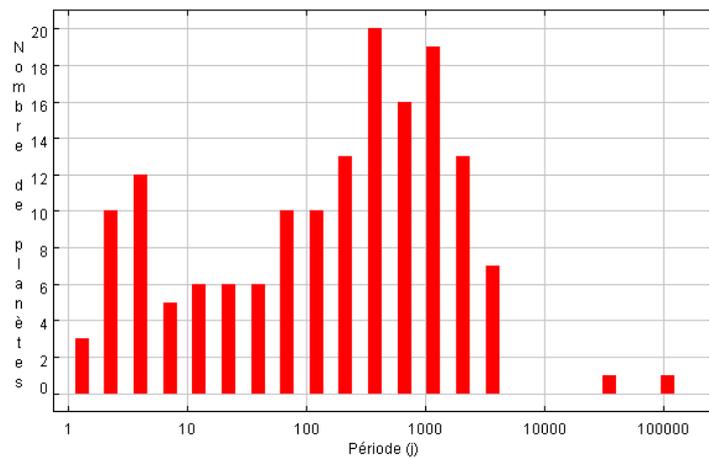


FIGURE 10.10: Diagramme des périodes (crédit : Observatoire de Paris - UFE)

de planètes massives () aux périodes inférieures à 100 j ; un déficit de planètes légères () aux périodes supérieures à 100 j. Cette corrélation est à mettre en relation avec la migration des planètes évoquée précédemment. Ainsi il semble que : les planètes massives formées loin de leur étoile (là où le gaz était en quantité suffisante) migrent peu ; les planètes de masse intermédiaire migrent sur des distances variables suivant les cas et sont observées à toutes les périodes ; les planètes légères migrent très efficacement et tendent à s'accumuler à proximité de leur étoile.

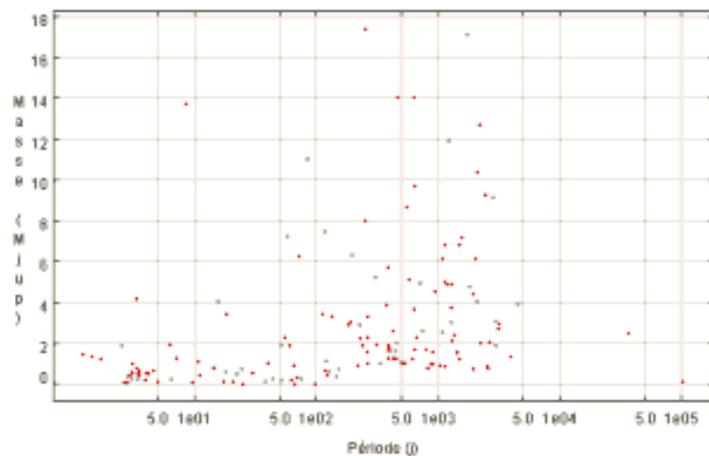


FIGURE 10.11: Diagramme des masses - périodes (crédit : Observatoire de Paris - UFE)

Toutes les planètes (géantes, les seules que l'on sache détecter) découvertes à ce jour sont beaucoup plus près (jusqu'à 100 fois) de leur étoile que ne l'est Jupiter du Soleil. Cela a constitué une grande surprise car la théorie prévoit qu'une planète géante doit se former à au moins 5 UA de son étoile. Cette disparité s'explique maintenant par le phénomène de "migration" : une fois qu'une planète commence à se former relativement loin de son étoile dans le disque protoplanétaire, un phénomène d'interaction gravitationnelle entre le disque et la planète en formation se produit. Elle a pour effet de freiner la planète qui du coup se rapproche de son étoile (migration) jusqu'à ce que l'interaction s'arrête. Ces planètes étant très proches de leur étoile, celle-ci les porte à une température élevée (jusqu'à 1200 K). C'est pourquoi on les appelle des "Jupiters chauds".

10.3.4 Diagramme excentricité période

Sur le diagramme de la figure 10.12 on voit que contrairement au système solaire où toutes les planètes ont des orbites quasiment circulaires (excentricité proche de 0), les systèmes extrasolaires ont des planètes sur des orbites qui peuvent être très elliptiques (excentricité proche de 1). On observe que les planètes à très courte période (moins de 5 j) sont toutes sur des orbites circulaires. Cet effet est dû aux forces de marée exercées à courte distance par l'étoile sur la planète et qui tendent à rendre les orbites circulaires.

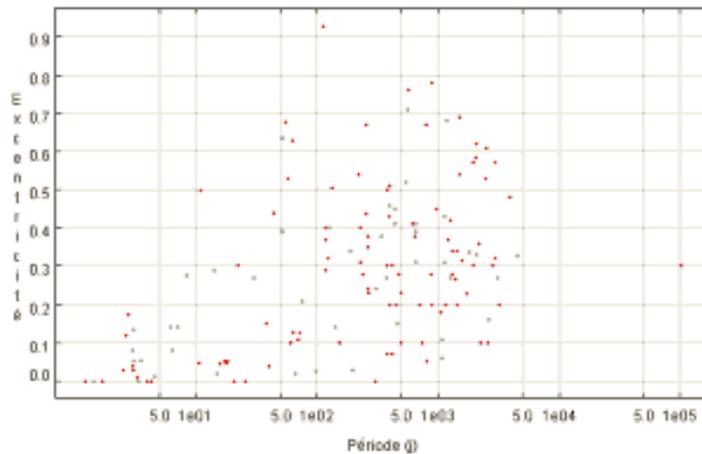


FIGURE 10.12: Diagramme des excentricités - périodes (crédit : Observatoire de Paris - UFE)

Une autre surprise a été de constater que la majorité des orbites planétaires sont assez ou très excentriques : elles forment des ellipses plus ou moins al-

longées au lieu d'être quasi circulaires comme dans le système solaire. On n'est pas bien sûr à ce jour de connaître l'explication de ce phénomène. Une des explications les plus vraisemblables pourrait être que si deux planètes migrent, elles le font à des vitesses différentes. Elles doivent alors forcément se rencontrer et au cours de cette rencontre l'une d'elles expulse l'autre du système planétaire. Les lois de la mécanique céleste font alors que celle qui reste a forcément une orbite elliptique.

Une explication possible des fortes excentricités des planètes pourrait être la présence de jet stellaire au début de la formation de l'étoile (Fig. 10.13).



FIGURE 10.13: *Jet stellaire*

10.4 La vie ailleurs que sur Terre

10.4.1 Zones habitables

La condition principale est qu'il faut un milieu liquide car il favorise énormément le transport des matériaux nécessaires à une activité biochimique. L'eau est un liquide a priori prometteur car c'est l'un des plus abondants de l'Univers (les autres étant par exemple l'alcool ; le méthane et l'ammoniac peuvent également être liquides, quoique à des températures beaucoup plus basses). De plus elle a l'avantage d'être un des meilleurs solvants ce qui favorise les réactions et échanges biochimiques. On est ainsi conduit à favoriser les circonstances permettant la présence d'eau liquide. Une autre condition universelle est qu'il faut, dans le cadre des concepts thermodynamiques traditionnels, une source d'énergie "noble" (c'est-à-dire sous forme non thermique) à entropie très basse. Elle doit par ailleurs être permanente car son interruption conduirait à la destruction des organismes. La meilleure source d'énergie permanente, abondante et de basse entropie connue à ce jour est le rayonnement des étoiles. Le meilleur endroit identifié à ce jour

où on trouve à la fois de l'eau liquide et une source permanente et intense de lumière est une planète située à une distance de son étoile telle que sa température est d'environ 300 K. De plus elle doit être suffisamment massive pour empêcher l'eau de s'échapper de la planète, mais pas trop sinon l'eau est confinée dans des couches profondes et sans lumière d'une atmosphère d'hydrogène (ce dernier point est toutefois sujet à discussion). On est ainsi conduit à chercher en priorité une vie biologique sur une planète de 1 à quelques masses terrestres située à une distance de 0,2 UA (pour les étoiles de type M) à 1,5 UA (pour les étoiles de type F) de son étoile (bien que des satellites de planètes géantes riches en eau et chauffés par effet de marée comme Europe soient envisageables). Cette distance critique, dépendant du type d'étoile, définit ce qu'on appelle la zone d'habitabilité de l'étoile (voir Fig. 10.14 et 10.15).

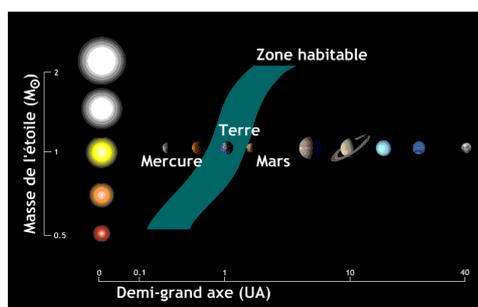


FIGURE 10.14: Zone d'habitabilité pour le Soleil (crédit : UFE - Observatoire de Paris)

Il y a cent milliards d'étoiles dans notre Galaxie et l'Univers accessible contient au moins cent milliards de galaxies. Par ailleurs on sait qu'il existe des systèmes planétaires autour des autres étoiles, même si on ne connaît pas encore aujourd'hui leur fréquence exacte. Il est donc difficile de penser que les conditions et les processus qui ont conduit à l'apparition de la vie sur Terre il y a trois milliards d'années ne se sont pas retrouvés à l'oeuvre sur d'autres planètes, hors du système solaire. Certes ces conditions sont assez strictes et par exemple la présence indispensable d'eau liquide impose que la température de la planète ne soit pas trop élevée ou trop basse. De même, si la planète est trop grosse, elle deviendra une planète gazeuse avec une atmosphère essentiellement composée d'hydrogène et d'hélium où les réactions chimiques du vivant ne peuvent se produire. On pense que d'autres conditions sont nécessaires, comme par exemple un bombardement pas trop fréquent par des astéroïdes dont chaque impact destructeur est capable de remettre à zéro

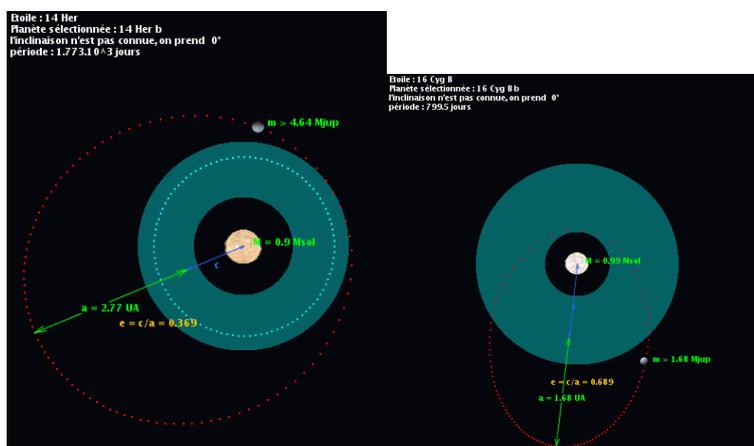


FIGURE 10.15: Exemple de zone habitable pour deux planètes extrasolaire. (crédit : UFE - Observatoire de Paris)

le processus de la vie. La présence de Jupiter, en détournant de la Terre les météorites très nombreuses au début de la formation du système solaire, a sans doute été un facteur de maintien de la vie sur notre Terre

10.4.2 Détection de la vie

Mais comment caractériser la vie d'une façon assez générale, sans anthropomorphisme, c'est-à-dire sans être obnubilé par le seul cas que nous connaissons, celui de la Terre? Une première remarque très générale est que la vie c'est, entre autres, une information complexe codée : celle contenue dans les gènes qui est capable de se reproduire à l'identique, ou presque, le rôle des erreurs étant essentiel pour que l'évolution ait lieu. Le support de cette information doit être un alphabet qui permet de créer des mots la décrivant. On ne trouve pas dans le monde physique d'alphabet plus efficace que celui des chaînes carbonées de la chimie organique : elles ont en effet la capacité de décrire un très grand nombre de mots différents et de façon linéaire (donc lisible selon un ordre imposé). L'atome de carbone est en effet unique pour se lier de façon complexe avec lui-même et avec d'autres atomes pour former de longues molécules en chaînes. Une condition est la présence d'eau pour favoriser les liaisons. On a ainsi bel et bien détecté de telles chaînes carbonées complexes hors de la Terre, dans notre Galaxie et dans d'autres galaxies. On voit mal quel autre support l'alphabet d'une vie extra-terrestre pourrait utiliser. La très grande majorité des molécules complexes détectées dans l'Univers sont des molécules carbonées.

Le seul moyen d'extraire le carbone de l'atmosphère primordiale d'une planète, c'est de casser la molécule CO_2 qui est très abondante. Ce faisant on doit alors nécessairement libérer de l'oxygène. C'est bien ce qui se passe sur Terre où la chlorophylle des plantes, avec l'aide de la lumière solaire, transforme le CO_2 en biomasse à base de carbone et libère l'oxygène dont les êtres évolués ont tant besoin par ailleurs. D'autre part, si la production d'oxygène par des êtres vivants n'était pas continue, l'oxygène disparaîtrait rapidement sous forme de rouille, en oxydant les roches. Enfin, on ne connaît pas de mécanisme naturel capable de produire sur une planète de l'oxygène de façon abiotique, c'est à dire sans l'intermédiaire du vivant. Les astrobiologistes pensent donc aujourd'hui que si on détecte de l'oxygène et de l'eau sur une planète, alors la vie est extrêmement probable (Fig. 10.16).

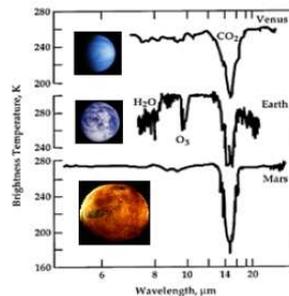


FIGURE 10.16: L'observation spectrale montre la présence des biomarqueurs O_3 et H_2O sur Terre contrairement à Vénus et Mars. (Crédit : Menesson et Marrioti)

10.5 Missions futures

10.5.1 GAIA

Au sol, l'organisme européen ESO (European Southern Observatory) projette de chercher des planètes géantes autour de quelques centaines d'étoiles à partir de 2008 au moyen de l'instrument PRIMA installé auprès du grand interféromètre de 120 mètres VLTI (Very Large Telescope Interferometer) au Chili. Dans l'espace, deux projets sont en phase d'étude finale : SIM (Space Interferometry Mission) de la NASA est un interféromètre de 20 mètres de base installé sur une poutre et constitué de 2 télescope de 40 cm de diamètre. Son lancement est prévu pour 2009. Il pourra chercher des planètes autour d'environ 1500 étoiles les plus proches. Il est suffisamment précis pour détecter des planètes de quelques masses terrestres situées à moins de 5 pc.

GAIA est un instrument qui mesure les variations de position des étoiles par rapport à toutes les autres (plus brillantes que $m = 20$). Ce procédé lui permet de mesurer les variations de position de 1,5 milliard d'étoiles. Il aura une précision suffisante pour chercher des planètes de la taille de Jupiter autour d'environ 20.000 étoiles. Son lancement par l'ESA (Agence Spatiale Européenne) est prévu pour 2012.

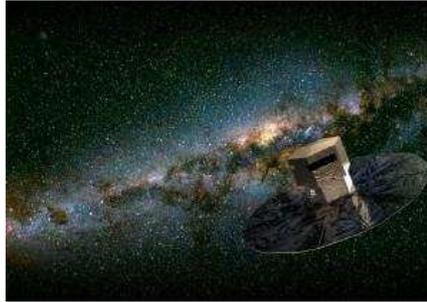


FIGURE 10.17: *Le satellite GAIA*

10.5.2 COROT

Dans l'espace, le CNES doit lancer en 2006, en collaboration avec d'autres pays européens, un télescope de 30 cm de diamètre appelé CoRoT. Comme son nom l'indique (Convection, Rotation et Transits planétaires) il doit à la fois étudier la rotation et la convection de quelques étoiles brillantes et chercher des transits planétaires autour de 60.000 étoiles jusqu'à la magnitude 16. Il a une sensibilité suffisante pour trouver des planètes deux fois plus grandes que la Terre (soit 20% de la taille de Jupiter).



FIGURE 10.18: *Le satellite COROT*

10.5.3 DARWIN

C'est de loin le domaine le plus prometteur. En effet, cette méthode permet une caractérisation très riche des propriétés physiques et chimiques des planètes : Atmosphère (densité, composition ...) Surface (couleur, morphologie des océans/continents ...) Rotation de la planète (durée du "jour") Satellites, anneaux De très nombreux projets sont en cours, au sol et dans l'espace. C'est le domaine qui concentre le plus d'activités et est en expansion la plus rapide.

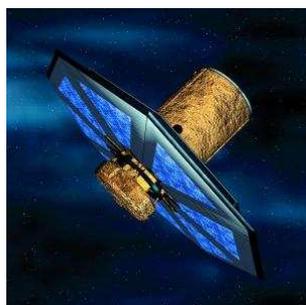


FIGURE 10.19: *Le satellite DARWIN*

10.5.4 Au sol

L'ESO devrait rendre opérationnelle à partir de 2008 une caméra appelée Planet Finder auprès de l'un des télescopes de 8 mètres de diamètre du Very Large Telescope installé au Chili. Le télescope Keck de 10 mètres a un projet analogue. Le LBT (Large Binocular Telescope) est une paire de télescopes américains de 8,2 mètres de diamètre installés au Chili. L'un d'eux est équipé d'une caméra pouvant détecter des planètes. A plus long terme, les Etats Unis et l'Europe ont des projets de très grands télescopes dont le diamètre sera compris, en fonction de la faisabilité et du coût, entre 30 mètres et 100 mètres. Ils seront tous équipés de caméras destinées à détecter des planètes en imagerie. La possibilité de détecter des exo-Terres avec cette future génération de télescopes qui devraient voir le jour autour de 2020 est à l'étude.

10.5.5 Dans l'espace plus tard

Pour l'instant, il n'y a qu'un télescope dont le lancement est acquis (prévu en 2011), le James Web Space Telescope (JWST). Mais il y a plusieurs projets

FIGURE 10.20: *Le Keck*

en cours de discussion. Le JWST est un télescope de 7 mètres de diamètre optimisé pour l'infrarouge. Il est équipé de plusieurs instruments (spectrographes, caméras). Pour ce qui concerne les exoplanètes, il comporte une caméra MIRI (Mid-InfraRed Imager) équipée d'une série de coronographes adaptés à la détection de planètes dans différentes longueurs d'onde de 7 à 20 microns. Il devrait pouvoir détecter quelques planètes autour des étoiles les plus proches. Il y a, pour le moyen terme, trois types de projets, pour lesquels il n'y a pas de décision définitive : Un télescope de taille modeste (environ 1 mètre de diamètre) équipé d'un coronographe et pouvant détecter la lumière réfléchie de planètes géantes. Un télescope de 3,5m x 7 m, dit TPF-C, équipé d'un coronographe et destiné à détecter des planètes telluriques par lumière stellaire réfléchie. Un interféromètre constitué de 3 à 6 télescopes de 3 mètres de diamètre et distants de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Il y a deux projets parallèles, l'un, Darwin, en phase d'étude à l'Agence Spatiale Européenne, l'autre, TPF-I, en phase d'étude à la NASA. Ces deux projets sont destinés à chercher en infrarouge des planètes telluriques par leur émission thermique. L'immense intérêt de ces trois derniers projets (Darwin, TPF-C, TPF-I) est d'être en mesure de chercher des biosignatures spectrales.

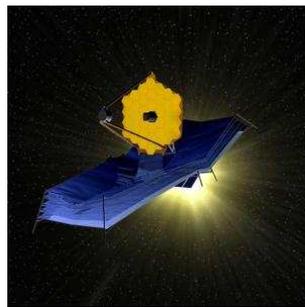


FIGURE 10.21: *Le satellite JWST*

Bibliographie