

Comprendre l'Univers

Cours d'astronomie en LST-B S1, option Sciences de l'Univers

L. Duriez

Laboratoire d'Astronomie, UFR de Mathématiques,
Université des Sciences et Technologies de Lille
<mailto:Luc.Duriez@univ-lille1.fr>

12 septembre 2005

Table des matières

1	Introduction	1
2	La Galaxie et l'Univers extragalactique	3
2.1	La Galaxie ou Voie Lactée	3
2.2	Les galaxies	4
2.3	Organisation des galaxies	4
3	Le Soleil et les étoiles	6
3.1	Le Soleil	6
3.2	Les étoiles	7
3.3	L'évolution du Soleil et des étoiles	8
4	Les planètes et le système solaire	9
4.1	Formation des systèmes planétaires	9
4.2	Structure du système solaire	10
5	La Terre et le système Terre-Lune	14
5.1	Une planète double	14
5.2	Origine et formation de la Lune	14
5.3	Constitution de la Lune	15
6	Bibliographie	16

1 Introduction

Ce cours donne succinctement une description générale de l'Univers, dans le but de comprendre comment son contenu et son évolution ont permis la formation de planètes comme la Terre, et justifiant la formule selon laquelle nous sommes, comme notre planète, des poussières d'étoiles.

L'Univers nous est révélé essentiellement par le rayonnement électromagnétique qu'il émet, que nous captions puis analysons : Rayonnements émis à toutes longueurs d'onde (γ , X, UV, visible, IR, radio)

- observés sur Terre après filtrage par l'atmosphère (voir Fig1) et par les instruments d'observation (lunettes et télescopes avec divers capteurs : œil, plaque photographique, matrice CCD, photomètres, spectrographes...). L'atmosphère dégrade la qualité des informations qu'elle laisse passer, mais c'est néanmoins à travers elle que nous avons acquis l'essentiel de nos connaissances sur l'Univers depuis des siècles.
- observés depuis l'espace par des télescopes embarqués sur des satellites de la Terre ou sur des sondes envoyées dans le système solaire. Principal avantage : élimination du filtre atmosphérique et de ses défauts, permettant d'étendre l'exploration de l'Univers à tous les domaines de longueur d'onde.

Les rayonnements nous renseignent, par leur spectre, sur les conditions physiques de la matière qui les a émis (température, pression, densité, composition chimique, champs magnétiques ou électriques...)(voir Fig2), et parfois aussi sur la nature et les mouvements du milieu que ce rayonnement a dû traverser entre son émission par un astre et sa réception par l'observateur (absorptions sélectives de ce milieu, altérations de la longueur d'onde par effet Doppler-Fizeau...)(voir Fig3)

Finalement, l'analyse des divers rayonnements reçus permet de penser que la masse de l'Univers visible est constituée de près de 75% d'Hydrogène et de 24% d'Hélium, les autres éléments étant fortement minoritaires (de l'ordre du pourcent)(voir Fig3a). Cette matière est présente dans l'Univers sous forme plus ou moins condensée et selon une organisation que l'on va étudier. Avant cela, il convient cependant de définir de manière succincte les deux grandes classes d'astres condensés que l'on rencontre dans l'Univers (étoiles et planètes), les autres objets, non condensés, apparaissant sous forme de nuages de gaz ou de poussières mélangées :

- *les étoiles* : matière gazeuse, condensée par l'action de la gravitation universelle en un objet généralement sphérique, et dont la masse est suffisamment grande pour qu'en son centre, puisse démarrer le cycle de la fusion de l'hydrogène en hélium (puis éventuellement d'autres cycles de fusion produisant des éléments plus lourds). Ces réactions produisent de l'énergie que l'étoile évacue sous forme de rayonnements. Par exemple, le Soleil est une étoile dont la masse vaut $2 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 1 M_{\odot}$. La masse initiale d'une étoile doit être supérieure à $1/20 M_{\odot}$ pour que s'amorce la fusion de H en He ; les étoiles les plus massives peuvent atteindre $100 M_{\odot}$.
- *les planètes* : matière condensée, solide ou fluide, de masse trop faible ($< 1/20 M_{\odot}$) pour engendrer des réactions de fusion nucléaire. Toutes les planètes observées ou détectées à ce jour sont en orbite autour d'une étoile, attachées à elle par la gravitation universelle. Par exemple autour du Soleil, Jupiter, la plus grosse planète du système solaire, a une masse d'environ $1/1000 M_{\odot}$ et la Terre moins de $1/300000 M_{\odot}$. Tandis que l'on voit les étoiles par la lumière qu'elles émettent, on ne voit les planètes que parce qu'elles sont éclairées par leur étoile : la partie éclairée d'une planète réfléchit et diffuse vers l'espace une partie de cette lumière reçue. Les planètes du système solaire se distinguent aussi des étoiles par leur mobilité dans le ciel, qui se manifeste de manière sensible par rapport aux étoiles, lesquelles semblent fixes les unes par rapport aux autres. Dans les planètes les plus massives, on retrouve à peu près les mêmes proportions d'Hydrogène et d'Hélium que dans les étoiles, mais on trouve aussi des planètes (telle la Terre) où ces éléments légers sont devenus minoritaires par rapport aux éléments plus lourds comme le Silicium ou le Fer. Les *astéroïdes*, les *comètes* et les *satellites* sont des objets de nature planétaire, distingués des planètes par leur taille ou par leur situation dans l'organisation du système solaire (cf. paragraphe 3).
- Enfin, on détecte de plus en plus de planètes d'une taille comparable à celle de Jupiter autour de certaines étoiles proches (plus de 160 en Sept 2005), ce qui laisse à penser que ces petits corps froids doivent aussi exister partout dans l'Univers. Certaines de ces planètes ont une masse supérieure à 13 fois celle de Jupiter et sont alors maintenant appelées *naines brunes*, astres intermédiaires entre étoiles et vraies planètes.

2 La Galaxie et l'Univers extragalactique

2.1 La Galaxie ou Voie Lactée

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 100 000 années de lumière (notée a.l., chaque a.l. représentant environ 10^{13} km) pour une épaisseur moyenne de 2000 a.l. sauf au voisinage du centre qui apparaît comme un renflement sphérique (appelé *bulbe*) d'environ 10 000 a.l. de diamètre. (voir Fig4)

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). Le Soleil est à environ 26 000 a.l. du centre galactique et pratiquement dans le plan de symétrie du disque (ou plan galactique). Au voisinage du Soleil, les étoiles sont en moyenne distantes les unes des autres de 5 a.l. 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 (*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.

Dans le disque, la densité des étoiles et de la matière interstellaire est distribuée selon une structure spiralée (cf. fig 4) : 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). 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 250 km par seconde et avec une période de 200 millions d'années ; à intervalles d'environ 60 millions d'années, le Soleil se retrouve alors dans l'un des bras spiraux. 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.

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 H_2 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 1000 molécules par cm^3 pour une température de 10 à 20 K. La structure spiralée de la galaxie est aussi observable par les vastes nuages d'hydrogène atomique présents surtout dans les bras spiraux, d'une densité de l'ordre de 50 atomes par cm^3 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 ainsi de raie interdite.

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.

2.2 Les galaxies

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 :

- les *galaxies spirales* 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 $5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, 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* 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* n'ont pas de forme particulière. Leur masse peut être comprise entre 10^8 et $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, et leur dimension entre 5 000 et 50 000 a.l. Entre leurs étoiles, ces galaxies contiennent beaucoup de gaz, et des poussières en quantité variable. Elles apparaissent ainsi comme intermédiaires entre les spirales et les elliptiques.

C'est peut-être la faiblesse de la rotation des galaxies elliptiques et irrégulières qui les a différencié des galaxies spirales. Les collisions relativement fréquentes entre galaxies pourraient aussi conduire les galaxies à fusionner pour donner finalement des galaxies elliptiques. 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 le montre ce qui suit.

2.3 Organisation des galaxies

On distingue plusieurs niveaux d'organisation des galaxies (cf. fig 5 à 8) :

1. Les *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 par les effets de marées qu'elles subissent en provenance de notre Galaxie à cause de cette proximité. On trouve aussi au moins 6 petites galaxies elliptiques très proches également.
2. le *Groupe local* (ou amas local) de galaxies (voir Fig5) : Il s'agit d'une trentaine de galaxies, dont la nôtre et ses satellites, réparties non uniformément dans une sphère de $3 \cdot 10^6$ a.l. de rayon, centrée sur notre Galaxie. Au delà de cette distance et jusqu'à près de $8 \cdot 10^6$ 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 $2 \cdot 10^6$ 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 uni-

verselle 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.

3. Le *Superamas local* (voir Fig6 et Fig7) : 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 10^8 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 rencontre une autre.
4. Des *bulles et filaments de superamas*(voir Fig8) : 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 galaxie (bulles vides de 35 millions de (millions d'a.l.) au cube. Les superamas recensés comprendraient au total $35 \cdot 10^9$ galaxies environ.
5. 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. En fait ces distances énormes sont estimées en faisant l'hypothèse d'une formation de l'Univers à partir d'une explosion initiale (le "Big Bang"), conduisant d'abord à une expansion de l'Univers telle que les galaxies sont vues avec des vitesses d'éloignement V sensiblement proportionnelles à leur distance D ; c'est la loi de Hubble (établie par cet astronome vers 1930 pour des galaxies relativement proches) : $V = H D$ où H est la constante de Hubble estimée actuellement à environ 20 km.s^{-1} par million d'a.l. En mesurant le décalage vers le rouge (redshift) $z = \Delta\lambda/\lambda$ du spectre des galaxies, souvent interprété comme résultant de l'effet Doppler-Fizeau ($V = z c$ tant que $z \ll 1$), on en déduit la distance D par le calcul, supposant connue la valeur de H . Cependant, sans faire appel à l'effet Doppler, la "constante" H mesure plus simplement le taux de dilatation actuel de l'Univers : $2 \cdot 10^{-18}$ par seconde. Pour z non petit devant 1, la vitesse V est calculable en inversant la relation relativiste $z = \sqrt{(1 + V/c)/(1 - V/c)} - 1$ mais la loi de Hubble qui s'écrivait $z c = H D$ pour z petit, doit être reformulée car dans l'espace relativiste le terme de "distance" est mal défini à cause de l'expansion. Le paramètre z la remplace avantageusement et n'est proportionnel à D que pour les objets proches. Le terme de "vitesse" devient lui-même ambigu pour z élevé car les galaxies ne sont pas animées de vitesse mais sont "comobiles" dans l'univers en dilatation qui les porte. Les galaxies ainsi détectées avec un z élevé (actuellement jusqu'à $z = 6$) sont des objets très lumineux ressemblant à des étoiles (d'où leur nom de *quasar*, pour "quasi-stellar" objet) et qui pourraient être des noyaux de galaxie en formation. L'homogénéité de l'Univers à très grande distance est aussi confirmée par l'observation d'un rayonnement radio correspondant à un univers homogène dont la température moyenne actuelle vaut 2.735 K, et qui serait le rayonnement résiduel de l'explosion après refroidissement dû à l'expansion de l'Univers depuis le Big Bang. C'est aussi cette explosion initiale qui aurait produit une nucléosynthèse primordiale (fusion de l'hydrogène en hélium, puis en lithium et en béryllium) conduisant aux proportions 75% d'Hydrogène - 24% d'Hélium pour la matière initiale de l'Univers.

3 Le Soleil et les étoiles

3.1 Le Soleil

Le Soleil est une étoile qui a l'avantage pour nous d'être très proche : sa distance moyenne à la Terre vaut 150 millions de km, soit par définition, 1 *unité astronomique* ou 1 UA. Le Soleil est une sphère gazeuse de 700 000 km de rayon (noté $1 R_{\odot}$), de sorte que le Soleil apparaît depuis la Terre sous un angle d'environ un demi degré. Sa masse est de $2 \cdot 10^{30}$ kg, soit $1 M_{\odot}$, d'où une densité moyenne de $1\,400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Cette masse est répartie entre les éléments H (73%), He (25%), C (0,8%) et 61 autres éléments (1,2% restants). Ces éléments sont détectés essentiellement par leur spectre d'absorption identifié dans la lumière émise par le Soleil (notamment les raies du Fer et du Calcium).

Cette énergie lumineuse émise peut être mesurée depuis la Terre en la piégeant (capteurs solaires) : on obtient $1360 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ après correction de la partie absorbée par l'atmosphère terrestre. On en déduit que chaque m^2 de surface solaire émet $6.3 \cdot 10^7 \text{ W}$. En utilisant la loi de Stephan, qui identifie la puissance émise par chaque m^2 de Soleil à la quantité σT^4 où $\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$, on trouve que la température de surface du Soleil vaut 5760 K. On en déduit aussi la puissance totale émise par le Soleil : $3.826 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

La surface du Soleil que l'on voit ainsi directement, est la *photosphère*. C'est une couche d'environ 350 km d'épaisseur par laquelle l'énergie solaire produite en son centre s'échappe du Soleil, sans être réabsorbée par des couches supérieures ; c'est aussi l'*atmosphère* du Soleil. La photosphère est parfois altérée par des défauts de luminosité (les *taches solaires*), qui correspondent à des zones plus froides (donc moins lumineuses) où la température n'est que de 4500 K environ. Ces taches sont liées à des anomalies du champ magnétique solaire, qui se produisent avec un cycle de 11 ans. Les taches se forment et évoluent jusqu'à disparaître en quelques mois. L'observation de ces taches montre alors que le Soleil tourne sur lui-même en 25 jours environ et que les taches se forment dans les régions équatoriales du Soleil. Les taches sont aussi 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*.

Les couches supérieures du Soleil sont la *chromosphère* et la *couronne* (voir Fig9 pour leurs caractéristiques). L'origine de la température très élevée de la couronne est encore une énigme, mais cette zone externe du Soleil semble être la source du flux de particules chargées qui s'échappent du Soleil à plus de $1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ et qui constitue le *vent solaire*. Ce vent interagit avec la magnétosphère terrestre, donnant en particulier les aurores polaires. Le flux mesuré au niveau de la Terre correspond à quelques 10^{10} protons par cm^3 et par seconde, équivalent à une perte de masse du Soleil de $2 \cdot 10^6$ tonnes par seconde ! L'observation directe de la couronne n'est possible depuis la Terre que lors des éclipses totales de Soleil, lorsque la Lune vient cacher complètement la photosphère lors d'un alignement Soleil-Lune-Terre. Des instruments, appelés coronographes, réalisant une éclipse solaire artificielle, permettent cependant d'observer couramment les couches les plus basses de la couronne.

Les couches inférieures du Soleil (voir Fig9) sont le *cœur nucléaire*, et les *zones radiatives et convectives*. C'est dans le cœur que la température et la densité permet aux protons (ou noyaux d'hydrogène) de fusionner pour donner des noyaux d'hélium, suivant pour cela plusieurs cycles possibles (voir Fig10). Le défaut de masse entre un noyau d'hélium et 4 protons est transformé en énergie rayonnante (photons γ). Ces photons tentent de sortir du Soleil, et par la pression de radiation qu'ils engendrent, ils contre-balaçent la gravitation, empêchant les couches supérieures du Soleil de s'effondrer plus bas vers le centre. Le Soleil est ainsi une machine en équilibre. L'énergie nucléaire est transportée directement par rayonnement dans la zone radiative, et par des mouvements de convection de la matière dans la zone convective. Elle sort par la photosphère sous forme de rayonnement visible (maximum pour la longueur d'onde de 550 nm), correspondant à la température de 5760 K vue précédemment. Les $3.826 \cdot 10^{26} \text{ W}$ émis par le Soleil permettent de calculer que, chaque seconde, la masse d'hydrogène transformée en hélium est de 600 millions de tonnes, conduisant à une perte de masse de $4.26 \cdot 10^6$ tonnes par seconde ; néanmoins, la masse initiale du Soleil lui donne une durée de vie de l'ordre de 10 milliards d'années. Si la Terre s'est formée en même temps que le Soleil, l'âge de la Terre permet de prédire pour le Soleil une durée de vie d'encore 5 milliards d'années environ.

3.2 Les étoiles

Les étoiles 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 doit 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 $1000 R_{\odot}$. Les densités moyennes sont alors extrêmement variées ($\approx 10^{18} \text{ kg.m}^{-3}$ 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 $\approx 10^{-6} \text{ kg.m}^{-3}$ pour une *étoile géante* de $1000 R_{\odot}$).

La luminosité des étoiles est mesurée par leur *magnitude apparente*, définie par : $m = -2,5 \log_{10}(I/d^2)$ où I est l'intensité lumineuse intrinsèque de l'étoile et d sa distance à la Terre. Les unités à utiliser dans cette formule sont relatives au monde des étoiles : m vaut zéro pour une étoile de référence (Véga, étoile la plus brillante de la constellation de la Lyre) et vaut 5 pour les étoiles tout juste visibles à l'œil nu. Dans ces conditions on montre que le Soleil a une magnitude de -27 et que les astres les plus faibles observables actuellement avec les meilleurs télescopes ont une magnitude voisine de l'ordre $+30$. 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 d_0 donnée, la même pour toutes les étoiles : $M = -2,5 \log_{10}(I/d_0^2)$. L'unité de distance adoptée ici est alors 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. On trouve alors les relations : $1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ UA} = 3,26 \text{ a.l.}$ La distance d_0 a été choisie égale à 10 pc, ce qui permet d'écrire cette relation entre m et M :

$$M = m - 5 \log_{10} d + 5 \quad \text{avec } d \text{ exprimé en pc}$$

On calculerait 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.

En fait, la magnitude absolue M est aussi une façon de mesurer I , et on peut montrer que pour la majorité des étoiles (comme le Soleil) I est sensiblement proportionnel à sa surface (c'est-à-dire à R^2) et à T^4 (avec la loi de Stephan déjà vue pour le Soleil) où T est sa température de surface. Comme le spectre d'une étoile dépend d'abord de sa température de surface puis des éléments chimiques présents dans son atmosphère, l'étude de son spectre permet de connaître ces paramètres physiques et chimiques. On trouve alors que les étoiles peuvent être rangées dans diverses catégories selon leur température ou *type spectral*. Ces types spectraux, classés par températures décroissantes (de plus de 25000 K à moins de 3500 K) sont notés par les lettres suivantes (résultant de raisons historiques) : O, B, A, F, G, K, M (voir Fig11 pour les caractéristiques de chaque type). En réalité, on subdivise encore chaque type spectral en 10 parties (par exemple de G_0 à G_9) pour améliorer la finesse du classement des étoiles. Le Soleil est alors une étoile de type G_2 .

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 absolue ; alors, en représentant par un point dans un diagramme la magnitude absolue des étoiles en fonction de leur type spectral, on trouve que pour la majorité des étoiles, leur point représentatif dans ce diagramme est situé dans une bande étroite, appelée *séquence principale*, qui part magnitudes très négatives pour le type O (étoiles très lumineuses et très chaudes) et descend presque linéairement vers les magnitudes très positives pour le type M (étoiles très faibles et relativement froides) (voir Fig12). C'est le *diagramme HR* (ou de Hertzsprung-Russell, du nom des 2 astronomes qui l'ont établi pour la première fois vers 1910). Les étoiles de la séquence principale sont aussi qualifiées de naines ; ce sont, comme le Soleil, des étoiles dont le rayon est du même ordre de grandeur que celui du Soleil. On indique aussi dans ce diagramme que le type spectral est corrélé à la couleur des étoiles : les étoiles froides sont plutôt rouges, les très chaudes plutôt bleues ; le Soleil est plutôt jaune. On voit aussi que les étoiles les moins massives sont faibles et rouges, tandis que les plus massives sont brillantes et bleues.

D'autres étoiles se retrouvent dispersées dans ce diagramme : Celles présentes dans le haut (très lumineuses) sont des étoiles *géantes* et *supergéantes* qui peuvent aussi bien être rouges que bleues et leur rayon peut atteindre $1000 R_{\odot}$; celles du bas (très peu lumineuses) sont des *naines blanches* dont le rayon est de l'ordre $0,01 R_{\odot}$ (comparable au rayon de la Terre).

3.3 L'évolution du Soleil et des étoiles

La structure du diagramme HR s'explique par la façon dont les étoiles évoluent, depuis leur naissance jusqu'à leur mort. La [Figure 13](#) décrit sur le diagramme HR un exemple d'évolution, concernant ici une étoile dont la masse initiale serait de $1,2 M_{\odot}$, c'est-à-dire assez comparable finalement au Soleil.

Les étoiles naissent dans une galaxie à la suite de la contraction gravitationnelle d'un nuage de matière interstellaire (gaz et poussières). Cette contraction peut être provoquée par la traversée du nuage par une onde de densité qui va donner de "germes" plus denses, susceptibles dès lors d'attirer vers eux la matière environnante. Un nuage typique qui se condense a une dimension de l'ordre de $10^9 R_{\odot}$, comprend environ 1000 particules par cm^3 à une température de 40 K, correspondant à une masse totale de l'ordre de $100 M_{\odot}$. Il y a ainsi matière pour donner naissance à un groupe d'une centaine d'étoiles, qui pourront cependant être de masses diverses. En 100000 ans, les condensations des futures étoiles (ou proto-étoiles) voient leur température centrale s'élever au delà de 10^6 K, permettant l'amorce des réactions nucléaires de fusion de protons en noyaux d'hélium.

En moins d'un million d'années, ces réactions contre-balancent l'effet de contraction dû à la gravitation et un équilibre s'établit. L'étoile trouve sa place dans le diagramme HR sur la séquence principale : Cette séquence correspond en effet à l'état des étoiles en train de "bruler" 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 ([voir Fig13](#)).

Quand l'hydrogène central est épuisé, il y a rupture de l'équilibre qui s'était établi entre la pression de radiation dans le cœur de l'étoile qui supporte le poids des couches supérieures, et la gravitation qui tend à contracter l'étoile. La suite dépend fortement de la masse initiale. Pour l'étoile de $1,2 M_{\odot}$ de la figure 13, en même temps que son cœur se contracte de nouveau, ses couches supérieures se dilatent et se refroidissent, jusqu'à atteindre le stade de géante rouge. Cette phase peut durer quelques millions d'années. 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 $T > 5 \cdot 10^8$ 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 les 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).

Si à la fin de la fusion de l'hélium, aucune nouvelle réaction de fusion ne peut s'amorcer, le déséquilibre du cœur de l'étoile se traduit d'abord par une contraction de l'étoile (la gravitation l'emportant sur le rayonnement), jusqu'à une explosion gigantesque qui éjecte dans l'espace les couches externes de l'étoile (phénomène de *supernova* pour les étoiles les plus massives). Cette explosion peut être précédée par des oscillations de l'étoile, qui enfle et rétrécit alternativement, produisant des variations presque périodiques de la luminosité de l'étoile. L'explosion engendre la formation d'une nébuleuse en expansion qui entoure le résidu stellaire. Cette nébuleuse est enrichie en éléments lourds (formés dans l'étoile) par rapport au nuage de matière interstellaire d'où était nait l'étoile. D'ailleurs, une nucléosynthèse d'éléments très lourds (fer et au delà) résulte aussi de l'explosion elle-même.

L'explosion de l'étoile accélère aussi l'effondrement du résidu stellaire sur lui-même (phase appelée *collapse*) jusqu'à devenir une étoile *naine blanche* (si la masse initiale est inférieure à $3,5 M_{\odot}$). Le résidu de l'étoile devenue naine blanche n'a plus d'évolution si ce n'est qu'un refroidissement inexorable. Si la masse initiale est supérieure à $3,5 M_{\odot}$, le collapse se poursuit jusqu'à former une *étoile à neutrons*, ou *pulsar*, 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 (cf. chapitre suivant). De ce point de vue, le Soleil est en effet une étoile de deuxième génération au moins, au contraire d'étoiles comme celles des amas globulaires, qui montrent des spectres déficients en éléments lourds, semblant par là 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 presque de se former.

4 Les planètes et le système solaire

4.1 Formation des systèmes planétaires

On a vu dans l'introduction que les planètes sont des astres froids, de masse inférieure à $1/20 M_{\odot}$, et liés à une étoile (le Soleil pour les planètes du système solaire). On connaît actuellement (fin 2003) une centaine d'étoiles proches autour desquelles on a détecté au moins une planète. En fait, la présence de planètes autour des étoiles ne doit pas être exceptionnelle car la façon dont les étoiles se forment par contraction d'un nuage de matière interstellaire permet d'expliquer aussi la formation simultanée d'éventuelles planètes :

Lors de la condensation d'un nuage de matière interstellaire en étoiles, chaque proto-étoile piège autour d'elle une nébulosité destinée à se condenser sur elle. Cependant, si cette nébulosité possède initialement un mouvement de rotation suffisamment rapide autour d'un certain axe, on peut montrer qu'elle commencera par s'aplatir dans le plan orthogonal à cet axe passant par le centre de masse, formant alors un disque de poussières et de gaz. Ce disque continue de tourner autour de cet axe mais cette rotation n'est pas celle d'un solide : Chaque particule a son propre mouvement, et les collisions entre particules sont fréquentes. Il y aurait une situation d'équilibre si toutes les particules pouvaient tourner dans le disque sur des orbites circulaires de même centre, sans se gêner entre elles. En fait, les collisions dans le disque conduisent certaines à tomber sur la proto-étoile, les autres pouvant aussi s'agglomérer pour former dans le disque, des petits corps qui pourront grossir par accrétion et subsister si leurs mouvements sont suffisamment stables. Parallèlement, la proto-étoile accumule de la matière, et dès que celle-ci est suffisante pour déclencher les réactions nucléaires dans son cœur, l'énergie rayonnante qui sort de la nouvelle étoile excite le reste de la nébulosité, ce qui en éjecte les particules les plus légères loin de l'étoile.

Si les petits corps formés dans le disque n'accumulent pas assez de matière pour devenir aussi des étoiles, ils subsistent sous forme de planètes (cependant, presque une fois sur deux, il y a formation simultanée de 2 étoiles, qu'on appelle alors étoile double) ; l'énergie que chaque planète a accumulée sous forme de chaleur lors des collisions dans la phase d'accrétion, fluidifie ses matériaux, permettant aux éléments les plus lourds de migrer vers le centre de la planète. Les planètes trop proches de l'étoile sont en outre chauffées par elle, au point de perdre une grande partie de leurs éléments légers (hydrogène et hélium) si leur masse n'est pas suffisante pour les retenir. En effet, la vitesse de libération à la surface d'un corps sphérique de rayon r et de masse m est donnée par : $V_L = \sqrt{2Gm/r}$ où G est la constante de la gravitation universelle ; cela signifie que si à la surface d'un corps on donne à une particule une vitesse supérieure à V_L , celle-ci s'échappe, sinon elle retombe à sa surface. Or la chaleur communique à une particule de masse μ une vitesse thermique $V_T = \sqrt{3kT/\mu}$ où k est la constante de Boltzmann et T la température. Si la chaleur donne à certaines particules des vitesses supérieures à la vitesse de libération d'une planète, ces particules ne peuvent par être retenues par elle et s'en échappent.

C'est ainsi qu'on peut expliquer dans ses grandes lignes la formation des planètes, en même temps que celle du Soleil, il y a 4,5 à 5 milliards d'années. On connaît par ailleurs au moins une étoile jeune (β Pictoris) entourée actuellement d'un disque de poussières à l'intérieur duquel on pense pouvoir déceler au moins une planète en formation.

4.2 Structure du système solaire

Le système solaire est le domaine entourant le Soleil dans lequel son influence gravitationnelle est prépondérante sur celle des étoiles les plus proches. Il correspond sensiblement à une sphère de 50 000 UA de rayon (soit 1 a.l. environ), centrée sur le Soleil et contenant des planètes et leurs satellites, des comètes et des poussières interplanétaires.

Près du Soleil, jusqu'à une trentaine d'unités astronomiques, le système solaire comporte essentiellement 8 *planètes principales* qui tournent dans le même sens autour du Soleil sur des orbites quasi-circulaires et quasi-coplanaires (voir Fig14). Ce système est globalement très aplati, à l'image du disque de poussières en rotation dont il provient. Ces 8 planètes sont classées en deux groupes (on trouvera leurs caractéristiques chiffrées, ainsi que celles de leurs éventuels satellites et anneaux, dans les tableaux donnés en annexe) :

- 4 *planètes intérieures* ou *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) ; 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 (voir Fig20). On peut succinctement les décrire ainsi :
 1. *Mercure*, petite planète très proche du Soleil, n'a été visité que par une seule sonde (Mariner 10 en 1974) ; elle 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. Mercure tourne très lentement sur lui-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° C la nuit à $+430^{\circ}$ C le jour.
 2. *Vénus*, de taille comparable à la Terre, 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° 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) 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).
 3. *La Terre*, dont les caractéristiques internes sont supposées suffisamment connues pour ne pas être rappelées ici, 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, sera étudiée plus loin (paragraphe 5).
 4. *Mars*, deux fois plus petite que la Terre, 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. 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, MarsRovers en 2004) ont révélé un sol de sable parsemé de cailloux rougeâtres 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 et qui sépare les planètes intérieures des suivantes :

- 4 *planètes extérieures* ou *planètes gazeuses* : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune (la planète Pluton est aussi extérieure mais n'est pas gazeuse), qui ont une densité moyenne faible (de 0,7 à 1,5) ; elles sont formées essentiellement d'hydrogène et d'hélium, comme le Soleil. Elles ne possèdent pas de surface solide. La (figure 21) montre la structure interne supposée de Saturne, qui doit vraisemblablement être comparable à celle des 3 autres planètes gazeuses. Leur atmosphère est marquée par la présence de nuages plus ou moins colorés par des molécules carbonées ou azotées (voir Fig22). Ces 4 planètes ont aussi la particularité d'être entourées d'un système d'anneaux plus ou moins complexes, ainsi que de nombreux satellites :
5. *Jupiter*, astre énorme 318 fois plus massif que la Terre, est une planète dont l'influence gravitationnelle est non négligeable sur toutes les autres planètes. Il tourne sur lui-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 15000 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 entouré d'une trentaine de satellites, dont 4 gros découverts par Galilée en 1610 et appelés depuis satellites galiléens : Io, Europa, Ganymède et Callisto. Ces satellites tournant autour de Jupiter ressemblent à un système solaire en miniature, formés probablement en même temps que Jupiter à partir de la même nébuleuse. Ce système a été visité par les sondes Pioneer (1975), Voyager (1979) et Galileo (1996) ; cette dernière a été placée en orbite autour de Jupiter, permettant une étude prolongée du système jovien. Ces missions ont 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 Europa, 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 débaçles.
 6. *Saturne*, la plus spectaculaire avec son système d'anneaux équatoriaux, 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 résonance gravitationnelle dus au satellite le plus proche, Mimas. Parmi la trentaine de satellites connus orbitant Saturne (dont 9 gros connus depuis plus d'un siècle, 10 petits découverts par les sondes Voyager en 1981 et 12 autres découverts récemment), Titan est le plus gros ; c'est même aussi le plus gros du système solaire, 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 et des traces d'acide cyanhydrique, une des premières molécules prébiotiques, mais à l'état inerte. La sonde Cassini, lancée en 1997, s'est satellisée autour de cette planète en Juillet 2004 afin d'explorer pendant plusieurs années l'ensemble du système saturnien. Elle a déposé sur Titan le module d'exploration "Huyghens" en décembre 2004, révélant un sol

composé de glaces de méthane et d'eau. Les autres satellites montrent des surfaces cratérisées et sont probablement constitués d'un mélange de glaces d'eau et de roches.

7. *Uranus* 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 interminable de 42 ans et suivi d'une nuit toute aussi longue. Une vingtaine de satellites (dont 5 gros connus depuis plus d'un siècle et 10 petits découverts par la sonde Voyager 2 en 1986) tournent autour d'Uranus dans son plan équatorial, c'est-à-dire dans le plan perpendiculaire à son axe de rotation, donc quasiment perpendiculaire aussi 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 inexplicée. 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".
8. *Neptune* ressemble beaucoup à Uranus tant pour sa structure interne que pour son atmosphère (cf. fig 22), 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.

A côté de ces 8 planètes principales, on trouve dans le système solaire 3 groupes de *planètes mineures* :

- Le premier, entre Mars et Jupiter, constitue 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 répertoriés, ayant des dimensions supérieures à quelques kilomètres pour les plus petites, 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, ce qui pourrait faire représenter leur ensemble comme un nuage ou un anneau un peu épais de petites planètes. La sonde Galileo, en route vers Jupiter, a visité 2 astéroïdes, montrant des surfaces irrégulières et toujours totalement cratérisées, signes de leur formation par accréation ou parfois par fragmentations dues à des collisions mutuelles. L'un d'eux, Ida, a même montré par son satellite Dactyl, qu'il existe des astéroïdes ayant des satellites. L'astéroïde Eros a d'ailleurs été visité en 2001 par la sonde Near qui, après être restée satellisée durant plusieurs mois, s'est finalement posé en douceur sur cet astéroïde.

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 les astéroïdes, témoins peu dégradés de la condensation de la nébuleuse proto-solaire : 90% des météorites sont de nature rocheuses, appelés *chondrites* (contenant des chondres ou petites sphères silicatées) ; elles ont une composition chimique dont les éléments sont en proportion voisine de celle observée, pour ces éléments, sur le Soleil. Dans

les chondrites carbonées, les sphérules sont dispersées dans un substrat noir carboné. Les oxydes de silicates composant les chondres sont riches en calcium et aluminium et seraient apparus à une température d'environ 1600 K, typique de la condensation initiale du Système solaire. D'autres météorites dites métalliques (10%) sont presque exclusivement formées de fer et de nickel.

- Le second groupe de planètes mineures est constitué des *naines glacées* que l'on commence à découvrir au delà de l'orbite de Neptune, entre 30 UA et 150 UA du Soleil. Le principal représentant de ce groupe est la planète *Pluton* accompagné de son satellite *Charon*. C'est la seule planète importante à n'avoir pas encore été visitée par une sonde spatiale. On connaît actuellement plus de 700 naines glacées dans cette zone, de rayons supérieurs à 100 km, et l'on pense qu'il y aurait encore plusieurs millions de ces petits corps à découvrir. Ils forment la *ceinture de Kuiper*, du nom de l'astronome qui avait prédit leur existence vers 1950 comme étant la source de certaines comètes périodiques. On vient d'ailleurs de découvrir dans cette ceinture, un objet plus gros que Pluton situé à 70 UA du Soleil environ, retirant ainsi à Pluton la titre de dixième planète du système solaire. 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. Certains satellites de Neptune pourraient avoir été capturés à partir la ceinture de Kuiper.
- Enfin, très loin du Soleil, au delà de cette ceinture et jusqu'aux confins de la sphère d'influence du Soleil, il existe très probablement un halo sphérique où la matière est condensée en des millions de très petits corps glacés, mélanges de glaces et de roches, formant le *nuage de Oort* ou nuage des *comètes*. On les connaît car certains de ces petits corps (ou noyaux cométaires) deviennent visibles sous forme de comète dans le cas où leur orbite les amène à se rapprocher suffisamment du Soleil (souvent à moins de 1 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. Les orbites des comètes connues sont des paraboles très allongées et il n'y a pas de direction privilégiée pour la direction de leur axe de "chute" vers le Soleil : Le halo du nuage de Oort est donc probablement sphérique.

Après être passé près du Soleil, les comètes retournent définitivement vers le nuage de Oort. Mais parfois, une rencontre avec une planète comme Jupiter, les dévie et elles se retrouvent sur des orbites elliptiques avec un mouvement les ramenant périodiquement vers le Soleil (on connaît une centaine de ces *comètes périodiques*, comme celles de Halley ou de Encke qui furent un jour capturées par Jupiter). 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 ; les radicaux libres proviennent de la dissociation par le rayonnement solaire de molécules-mères comme CH_3CN , HCN et H_2O , constituants de base de la chimie organique. La fraction volatile de la comète de Halley contient 80% d'eau, 4,5% d'acide formique, 3,5% de formaldéhyde, 2% d'hydrazine, 1,5% d'oxyde de carbone, 1,5% d'acétylène, 1% d'acide cyanhydrique, des traces d'azote, d'ammoniac, de soufre. Les poussières contiennent du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote (ou CHON) ou des silicates ; la teneur en carbone des CHON atteint le niveau de l'abondance observée dans les poussières interstellaires, ce qui montre le caractère primordial de la matière des comètes, témoins glacés du proto-système solaire, d'où l'intérêt de leur étude pour la compréhension de la formation des étoiles et de leurs cortèges planétaires.

Enfin, le *milieu interplanétaire* est constitué de nombreuses poussières éparses qui peuplent le disque du système solaire. Elles diffusent la lumière du Soleil, produisant une faible lueur dans le plan moyen du système solaire, observée sous le nom de *lumière zodiacale*. Il y a aussi les particules du vent solaire et des rayons cosmiques d'origine interstellaire.

5 La Terre et le système Terre-Lune

La Terre étant supposée bien connue par ailleurs, on ne s'intéressera ici qu'à la Lune et à ses interactions avec la Terre.

5.1 Une planète double

La Terre et la Lune sont de dimensions comparables (rayons respectifs de 6378 km et 1738 km) distants en moyenne de 384 400 km, soit environ 60 rayons terrestres. Cette proximité et le rapport peu élevé de leurs rayons (égal à 3,67) permettent de les considérer comme une planète double, mais, malgré leur même éloignement du Soleil (≈ 1 UA), ce sont deux planètes très différentes l'une de l'autre :

La masse de la Lune vaut $1/81,3$ de celle de la Terre (soit $7,4 \cdot 10^{22}$ kg), donnant notamment une densité moyenne de 3,35 seulement, contre 5,52 pour la Terre. La vitesse de libération à sa surface n'est alors que de $2,3 \text{ km.s}^{-1}$ (contre $11,2 \text{ km.s}^{-1}$ sur Terre), expliquant l'absence totale d'atmosphère sur la Lune, d'où l'absence de protection et d'érosion du sol lunaire qui montre une multitude de cratères provenant des impacts de météorites parfois vieux de plus de 4 milliards d'années. Cette absence d'atmosphère entraîne aussi des températures au sol très contrastées (de -50 à $+150^\circ \text{ C}$), que la lenteur de la rotation de la Lune sur elle-même (en 27,3 jours) ne permet pas de tempérer. Cette rotation s'effectue d'ailleurs exactement dans le même temps que la Lune met pour tourner autour de la Terre : Cela explique pourquoi la Lune présente toujours la même face vers la Terre (c'est ce qu'on appelle une *rotation synchrone*). Notons que cette durée de 27,3 jours diffère de la *lunaison* (29,5 j), laquelle représente l'intervalle de temps séparant 2 pleines lunes successives : La lunaison tient compte des dispositions relatives de la Terre, de la Lune et du Soleil, et donc des mouvements de la Lune autour de la Terre et de la Terre autour du Soleil ; elle correspond à la période du mouvement orbital de la Lune dans un repère tournant à la vitesse de un tour par an (d'où la combinaison des vitesses angulaires : $1/29,5 = 1/27,3 - 1/365,25$). Du fait de la rotation synchrone, la lunaison représente aussi la durée d'un "*jour lunaire*", bien différente de la durée du jour terrestre.

Enfin, autre particularité, la rotation orbitale de la Lune autour de la Terre ne se fait pas dans le plan équatorial de la Terre (alors que les systèmes de gros satellites de Jupiter, de Saturne ou d'Uranus sont quasi-coplanaires à l'équateur de leur planète) : Le plan orbital de la Lune fait en effet un angle quasi-constant de 5° avec le plan de l'*écliptique* (ou plan de l'orbite terrestre autour du Soleil), tandis que l'équateur terrestre fait un angle de plus de 23° avec ce même plan.

Grâce à sa proximité, la Lune a été la cible de nombreuses missions spatiales depuis 1959, avec notamment le premier pas d'un homme sur la Lune en 1969 et la collecte de près de 400 kg d'échantillons lunaires ramenés sur Terre.

5.2 Origine et formation de la Lune

Pour expliquer l'origine et la formation de la Lune, il faut établir un scénario qui aboutisse à la situation actuelle résumée précédemment, et qui entraîne quelques contraintes. Par exemple, la différence des densités moyennes observées entre la Lune et la Terre doit être expliquée. Or avec cette différence de densité, si la Lune a un noyau de fer comme la Terre, il doit en contenir moins de 10%, contre près de 30% pour la Terre. Une telle différence de composition entre la Lune et la Terre est une contrainte forte pour le scénario, qu'il faut concilier avec les résultats de l'analyse des échantillons lunaires rapportés par les différentes missions Apollo, qui montre notamment que la composition isotopique de l'oxygène est pratiquement la même dans les matériaux des manteaux lunaire et terrestre. Cette dernière observation montre que la Lune et la Terre ont dû se former à partir des mêmes matériaux, dans la même zone de la nébuleuse primitive, mais cela est contradictoire avec le déficit présumé en fer.

Il y a eu au moins 3 scénarios envisagés, aujourd'hui abandonnés : Le fait que l'orbite lunaire est loin d'être coplanaire à l'équateur terrestre, est difficile à concilier avec le scénario d'une Lune formée en même temps que la Terre à partir de la même nébuleuse en rotation. Un autre scénario selon lequel la Lune se serait formée par scission d'une Terre primitive en rotation rapide nécessiterait une rotation initiale trop

grande pour expliquer les rotations observées actuellement. Enfin, l'hypothèse d'une capture de la Lune par la Terre est très difficile à justifier d'un point de vue dynamique.

Finalement, le scénario généralement retenu actuellement est celui d'un impact géant de la Terre primitive, il y a quelques 4,4 milliards d'années, par un objet de la taille de Mars (d'une masse de l'ordre de 0,15 masse terrestre) ; Des simulations numériques ont montré qu'un tel objet heurtant la Terre de façon oblique, à 11 km/s, arrache une partie du manteau terrestre (voir Fig24) ; ces débris se retrouvent, d'abord dispersés, en orbite autour de la Terre, puis se recondensent par gravité en un objet d'une masse de l'ordre de 1/100 de la masse terrestre, à la distance d'environ 25 rayons terrestres. Le reste des débris retombe rapidement sur la Terre. Cela expliquerait la relativement grande vitesse de rotation de la Terre sur elle-même (1 tour par jour), et les différences d'inclinaison des axes de rotation notées ci-dessus. Cela expliquerait aussi la composition de la Lune, comparable au manteau terrestre, avec une déficience importante en éléments lourds. La Lune, juste après sa formation par cet impact, aurait été complètement fondue, perdant tous ses éléments volatiles (telle que l'eau) et condensant ensuite rapidement des éléments réfractaires.

Lors de son refroidissement, la Lune s'est figée sous forme d'un ellipsoïde allongé dont les dimensions actuelles correspondent à la forme qu'avait la Lune (par l'action des marées levées sur elle par la Terre) lorsqu'elle se trouvait à la distance de 25 rayons terrestres seulement. Le fait qu'elle soit maintenant à 60 rayons terrestres s'explique par l'effet des marées que la Lune soulève cette fois sur la Terre : La viscosité de la Terre fait que le bourrelet de marée terrestre ne se trouve pas dirigé vers la Lune, mais est entraîné par la rotation de la Terre, le plaçant en avance sur le mouvement lunaire ; cela engendre un couple qui ralentit la rotation de la Terre (la durée du jour augmente de 0,0016 seconde par siècle) et qui, par réaction, accélère le mouvement orbital de la Lune, ce qui se traduit par l'*éloignement de la Lune* à raison de 3 cm par an. L'*augmentation de la durée du jour terrestre* est corroboré par certaines observations de fossiles marins indiquant qu'il y a 440 millions d'années, le jour était plus court, l'année (qui a une durée bien constante) comptant alors 407 jours longs de 21,5 heures seulement. La rotation synchrone de la Lune observée actuellement s'explique de la même façon par le ralentissement de la rotation de la Lune sur elle-même, jusqu'à l'équilibre actuel, provoqué par le couple du bourrelet de marée soulevé par la Terre sur la Lune.

5.3 Constitution de la Lune

La Lune ne montre donc à la Terre qu'une seule face, présentant des "*mers*" sombres entourées de zones plus claires qui se révèlent être des parties montagneuses fortement cratérisées. En fait les mers sont d'immenses cratères d'origine météoritique (on compte 29 bassins de diamètre supérieur à 300 km) : L'analyse des anomalies de la trajectoire des satellites envoyés pour explorer la Lune a révélé la présence d'énormes concentrations de masse (appelées *mascons*) sous la surface des mers, interprétés comme les restes de météorites denses (probablement métalliques) responsables de ces cratères. Ces cratères auraient ensuite été submergés par des laves basaltiques il y a 3,5 milliards d'années, lors d'une période où le volcanisme semble avoir très actif sur la Lune. La surface du sol des mers lunaires est composée d'une épaisse couche de poussières, matière rugueuse, sombre, consistante comme du sable humide et collante comme du talc. On y trouve des grains très fins (0,1 mm), fragments cristallins et vitreux ou billes de verres colorés, mélangés à des fines particules (0,05 μm) vitreuses orange jaunes ou rouges ; ces dernières sont le résultat de la condensation de gouttelettes fluides projetées "en l'air" lors d'impacts météoritiques. Le vent solaire agit en permanence pour fissurer la surface exposée de ces grains.

Les montagnes se présentent comme la juxtaposition ou le recouvrement mutuel d'une multitude de cratères d'impact, les plus récents et les plus gros étant parfois accompagnés de longues traînées rayonnantes associées à la projection radiale des éjectats. Leur surface est recouverte de brèches entièrement cristallisées constituées à 90% de feldspath calcique ou d'un mélange de feldspath calcique, de pyroxène et d'olivine. Leur datation les font remonter à plus de 3,8 milliards d'années.

Il n'y a pas de volcanisme actif sur la Lune actuellement, mis à part deux brefs épisodes où l'on a observé de très légères émanations de gaz colorés dans le fond des cratères Alphonse et Aristarque. L'étude sismologique révèle pourtant une activité souterraine plus ou moins permanente, avec des foyers qui s'ac-

tivent chaque mois, probablement liés aux marées variables qui résultent des variations mensuelles de la distance Terre-Lune.

Quant à la face cachée de la Lune, elle est connue depuis la mission soviétique Luna 3 en 1959, et sa topographie fut analysée par les "lunar orbiters" américains : On y voit paradoxalement très peu de mers. Les grands bassins qui existent pourtant sur la face cachée n'ont jamais été submergés par la lave basaltique comme sur la face visible. Cette dissymétrie viendrait peut-être de la plus grande épaisseur de la croûte sur la face cachée que sur la face visible.

Finalement, la surface lunaire semble être restée pratiquement sans changement depuis plus de 3 milliards d'années, exposée en permanence au milieu interplanétaire. On devrait y trouver encore des indices sur l'origine et l'histoire de la Lune et aussi de la Terre.

6 Bibliographie

Ces quelques pages ne sont finalement qu'une petite introduction à l'astronomie. Pour en savoir plus, les ouvrages suivants sont à la portée des étudiants de 1er cycle universitaire :

- Astronomie et Astrophysique, par Seguin et Villeneuve, 2002 2ème édition, "De Boeck Université".
- Le monde des étoiles, par D. Benest, C. Froeschlé, L. Gouguenheim, M. Loulgerge, JP. Rozelot, C. Wealkens, JP. Zahn, 1995, collection "les fondamentaux", chez Hachette.
- L'univers des galaxies, par D. Benest, A. Blanchard, L. Bottinelli, S. Collin, C. Froeschlé, L. Gouguenheim, J. Lefèvre, L. Nottale, 1995, collection "les fondamentaux", chez Hachette.
- Astronomie – introduction, par A. Acker, 1992, Collection "De caelo", chez Masson.
- Le grand atlas de l'astronomie, dans la collection des atlas Universalis.

On trouvera aussi sur l'internet de nombreuses images des divers objets décrits dans ces quelques pages. Voir par exemple le site suivant qui donne chaque jour depuis plus de 8 ans une vue commentée et souvent inédite d'un nouvel objet céleste : <http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>, ou sa traduction donnée dans <http://www.cidehom.com/apod.php>.