

L'Univers et sa mesure

Cours d'astronomie en LST-A S1, option Astro1

L. Duriez

Laboratoire d'Astronomie, UFR de Mathématiques

Université des Sciences et Technologies de Lille

<mailto:Luc.Duriez@univ-lille1.fr>

1^{er} septembre 2005

Table des matières

1	Introduction	2
2	Description du système solaire	3
2.1	Le Soleil	3
2.2	Les planètes du système solaire	4
2.3	Petit formulaire relatif au système solaire	8
3	Description du système galactique	11
3.1	La Galaxie	11
3.2	Les étoiles	12
3.3	L'évolution du Soleil et des étoiles	14
4	Description de l'Univers extragalactique	15
4.1	Les galaxies	15
4.2	Organisation des galaxies	16
5	La mesure des distances dans l'Univers	17
5.1	La distance des étoiles	17
5.1.1	Les parallaxes trigonométriques	18
5.1.2	Les parallaxes spectroscopiques	19
5.1.3	Les parallaxes dynamiques	19
5.1.4	Distance de certaines étoiles variables	20
5.2	Les distances extragalactiques	21
6	Bibliographie	22

1 Introduction

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 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 (voir Fig1).

Les rayonnements nous renseignent, par leur spectre, sur les conditions physiques de la matière qui les a émis (composition chimique (voir Fig 2), température (voir Fig 3), pression, densité, champs magnétiques ou électriques...), et parfois aussi sur la nature 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 Fig 4) ...).

Finalement, l'analyse des divers rayonnements reçus permet de penser quela masse de l'Univers visible est constitué de près de 75% d'Hydrogène et de 24% d'Hélium, les autres éléments étant fortement minoritaires (de l'ordre du pourcent)(voir Fig 4c). 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 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. On commence aussi à détecter des 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. Celles de ces planètes qui ont une masse

supérieure à 13 fois la masse de Jupiter sont depuis peu appelées *naines brunes*, astres intermédiaires entre étoiles et vraies planètes.

Après une description des divers objets observés dans l'Univers, ce cours s'attache à montrer comment on a pu déterminer leurs caractéristiques et en particulier leur distance.

2 Description du système solaire

2.1 Le Soleil

Le Soleil est une étoile qui a l'avantage pour nous d'être très proche : sa distance moyenne à la Terre vaut par définition 1 unité astronomique ou $1 \text{ UA} = 149\,597\,870 \text{ km}$, soit environ **150 millions de km**. Le Soleil est une sphère gazeuse de 700 000 km de rayon (noté $1 R_{\odot}$), vue depuis la Terre sous un angle d'environ un demi degré. Sa masse est de $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, 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).

L'énergie lumineuse émise par le Soleil 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* (voir Fig 5). 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, mais que cette rotation est différentielle (plus rapide à l'équateur qu'aux pôles). 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* (4000 km d'épaisseur) et la *couronne* (voir Fig 5) (qui s'étend jusqu'à 10 rayons solaires). L'origine de la température très élevée de la couronne (plusieurs millions de degrés) 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 sont le *cœur nucléaire* (du centre jusqu'au tiers du rayon) et les *zones radiatives* et *convectives* (voir Fig 5) (pour chacune environ un autre tiers du rayon). 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 Fig 6). 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 fournie par la fusion 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 essentiellement sous forme de rayonnement visible (maximum pour la longueur d'onde de 550 nm), correspondant à la température de 5760 K vue précédemment.

Les $3.826 \cdot 10^{26}$ 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'environ 5 milliards d'années environ.

2.2 Les planètes 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, 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 toutes dans le même sens autour du Soleil sur des orbites quasi-circulaires et quasi-coplanaires. 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 1 à 8 donnés en annexe](#) :

4 *planètes intérieures* ou *telluriques*, dans l'ordre d'éloignement au Soleil : Mercure, Vénus, la Terre et Mars ([voir Fig 7](#)). Leur densité moyenne est élevée (de 3,96 à 5,52) ([voir Tableau 2](#)) ; 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. On peut succinctement les décrire ainsi :

1. *Mercury*, petite planète très proche du Soleil, n'a été visité que par la 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*, 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.

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) ont révélé un sol de sable parsemé de cailloux rougeâtres composés notamment d'oxydes de fer. 2 petits satellites, *Phobos* et *Deimos*, (voir Tableau 4), 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 (voir Fig 8) (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. 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 complexes, ainsi que de nombreux satellites :

1. *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, (voir Tableau 5), dont 4 gros découverts par Galilée en 1610 et appelés depuis "satellites galiléens" : Ce sont *Io*, *Europa*, *Ganymède* (le plus gros satellite du système 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 à partir de la même nébuleuse. 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 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 débâcles.
2. *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 reconstruées 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 10 découverts par les sondes Voyager en 1981 et 12 récemment) (voir Tableau 6), *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 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 Saturne en Juillet 2004 afin d'explorer pendant plusieurs années l'ensemble du système saturnien. Elle doit lâcher sur Titan le module d'exploration "Huyghens" en décembre 2004. Les autres satellites montrent des surfaces cratérisées et sont probablement constitués d'un mélange de glaces d'eau et de roches.

3. *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 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) (voir Tableau 7), 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 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".
4. *Neptune* 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 (voir Tableau 8), 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 2 groupes de *planètes mineures* :

- Le premier, entre Mars et Jupiter, constitue la *ceinture d'astéroïdes* (voir Fig 7). Il s'agit d'une multitude de très petits corps rocheux, dont le plus gros, *Céres* (voir Tableau 3), 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 sonde Galileo, sur sa 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 la découverte de son satellite Dactyl, qu'il existe des satellites d'astéroïdes. D'ailleurs, 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 rocheuses ; d'autres météorites dites métalliques (10%) sont presque exclusivement formées de fer et de nickel.

- Le second groupe de planètes mineures est constitué de *naines glacées* ou *objets transneptuniens* 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* accompagnée de son satellite *Charon* (voir Tableau 8). C'est la seule planète importante à n'avoir pas encore été visitée par une sonde spatiale. On connaît actuellement un millier de 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* (voir Fig 8), 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 (voir Tableau 3).

Enfin, très loin du Soleil, au delà de cette ceinture et jusqu'aux quelques 50 000 UA qui limitent la sphère d'influence du Soleil, on trouve un halo sphérique où la matière est probablement 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 nuage de Oort est donc probablement sphérique.

Après être passées 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* (voir Fig 8) ou de *Encke* (voir Tableau 3), 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 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.

2.3 Petit formulaire relatif au système solaire

Les planètes décrivent autour du Soleil des orbites quasi-circulaires et quasi-coplanaires, régies par la loi de la Newton : Deux corps ponctuels ou sphériques S et P , de masses M et m , s'attirent mutuellement de sorte que dans un repère galiléen d'origine O , leurs quantités d'accélération vérifient les relations suivantes (où G représente la constante de la gravitation universelle, $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$) :

$$M \frac{d^2 \overrightarrow{OS}}{dt^2} = \frac{GMm}{\|\overrightarrow{SP}\|^3} \overrightarrow{SP}$$

$$m \frac{d^2 \overrightarrow{OP}}{dt^2} = -\frac{GMm}{\|\overrightarrow{SP}\|^3} \overrightarrow{SP}$$

On en déduit l'équation du *mouvement relatif* de P autour de S :

$$\frac{d^2 \overrightarrow{SP}}{dt^2} = -\frac{G(M+m)}{\|\overrightarrow{SP}\|^3} \overrightarrow{SP}$$

Cette équation admet des solutions particulières circulaires décrites d'un mouvement uniforme. Nous nous contenterons ici de ce type de solution. Si l'on considère ainsi une orbite de rayon R et décrite à la vitesse angulaire constante ω , on sait qu'il lui correspond une accélération cinématique $\omega^2 R$ qui s'identifie à l'accélération dynamique $\frac{G(M+m)}{R^2}$, d'où l'on tire la *troisième loi de Képler* :

$$\omega^2 R^3 = G(M+m) \quad \text{ou} \quad \frac{R^3}{T^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2}$$

où $T = 2\pi/\omega$ est la période du mouvement. Cette loi s'étend aux mouvements elliptiques, qui sont aussi solutions de l'équation du mouvement relatif, en y remplaçant simplement R par le demi-grand axe a de l'ellipse :

$$\omega^2 a^3 = G(M+m) \quad \text{ou} \quad \frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2}$$

Pour les planètes du système solaire, la période T qui intervient dans ces relations est la *période sidérale*, mesurée par rapport à un repère de directions fixes. Si M représente la masse du Soleil et m celle d'une planète, on voit qu'en négligeant le rapport m/M , la quantité $\omega^2 a^3$ est une constante $GM/4\pi^2$, la même pour toutes les planètes. En appliquant cette loi à l'orbite de la Terre ($a = 1 \text{ UA}$, $T = 1 \text{ an} = 365,2563 \text{ jours}$) et en adoptant $M = 1 M_\odot$ pour la masse du Soleil, on obtient la valeur de G en unités astronomiques : $G = 4\pi^2 \text{ UA}^3 \cdot M_\odot^{-1} \cdot \text{an}^{-2}$. En négligeant la masse des planètes par rapport à celle du Soleil, on a ainsi pour deux planètes P et P' :

$$\left(\frac{a'}{a}\right)^3 = \left(\frac{T'}{T}\right)^2$$

ce qui permet de 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 μ qui orbite une planète P de masse m sur une ellipse de demi-grand axe a_s avec une période T_s , on a de la même façon :

$$\frac{a_s^3}{T_s^2} = \frac{G(m+\mu)}{4\pi^2}$$

Négligeant la masse du satellite et combinant les troisièmes lois de Képler relatives au mouvement de la planète autour du Soleil et celui du satellite autour de sa planète, il est donc possible de déterminer la masse de cette planète en unités de masse solaire :

$$\frac{m}{M+m} = \left(\frac{a_s}{a}\right)^3 \left(\frac{T}{T_s}\right)^2$$

Il suffit pour celà de mesurer les demi-grands axes et les périodes sidérales de la planète et de son satellite.

Dans le cas du mouvement circulaire des planètes, on obtient simplement la valeur de la vitesse orbitale V en identifiant l'accélération cinématique V^2/R à l'accélération dynamique $\frac{G(M+m)}{R^2}$, ce qui donne :

$$V = \sqrt{\frac{G(M+m)}{R}}$$

Pour la Terre, on trouve une vitesse de 2π UA par an, c'est-à-dire de l'ordre de 30 km/s.

Pour le cas plus général du mouvement elliptique, on peut montrer que l'on a, pour une planète située à la distance r du Soleil sur une ellipse de demi-grand axe a :

$$V = \sqrt{G(M+m) \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

Quand on fait tendre a vers l'infini et en négligeant la masse m du deuxième corps, on obtient une valeur de V appelée *vitesse de libération* à la distance r du corps de masse M :

$$V_{Lib}(r) = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

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 km/s.

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 ρ :

$$V_{Sat}(\rho) = \sqrt{\frac{Gm}{\rho}} \quad \text{et} \quad V_{Lib}(\rho) = \sqrt{\frac{2Gm}{\rho}}$$

Pour la Terre, depuis sa surface, on obtient les valeurs $V_{Sat}(\rho_{Terre}) = 7,9$ km/s et $V_{Lib}(\rho_{Terre}) = 11,2$ km/s. 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

$$V(\theta) = \sqrt{3k\theta/\mu}$$

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

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 9). 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 10).

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 les planètes dans un repère centré au Soleil et tournant avec la Terre, on obtient leur vitesse angulaire dans ce repère (ou vitesse angulaire synodique) comme différence de leur

vitesse angulaire sidérale avec celle de la Terre. On en déduit cette relation entre la période synodique P_{syn} d'une planète et sa période sidérale T , en fonction de la période sidérale T_{\oplus} de la Terre :

$$\frac{1}{P_{syn}} = \left| \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}} \right|$$

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 11). 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 (voir Fig 12 et Fig 12a). 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

$$\overrightarrow{SP} = a(\cos(\omega t)\vec{i} + \sin(\omega t)\vec{j})$$

et

$$\overrightarrow{ST} = a_0(\cos(\omega_0 t)\vec{i} + \sin(\omega_0 t)\vec{j})$$

où les vecteurs unitaires \vec{i} et \vec{j} forment une base de directions fixes par rapport aux étoiles dans le plan de l'*écliptique* (ou plan de l'orbite héliocentrique de la Terre)¹. Avec $\left(\frac{a}{a_0}\right)^3 = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2$ (grâce à la troisième loi de Képler), il est simple de tracer la courbe décrite par le point P dans le repère $T\vec{i}\vec{j}$ et d'y voir les boucles de rétrogradation. Un calcul des coordonnées polaires (Δ, λ) de P dans ce repère montrerait aussi les changements de sens de variations de l'angle de position λ , ainsi que la durée de la phase de rétrogradation et son amplitude en fonction du rapport $\alpha = \frac{a}{a_0}$. L'observation de ces boucles de rétrogradation est ainsi un autre moyen de déterminer le rapport des rayons d'orbite des planètes.

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 (comme 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 $23^h56^m04^s$ et de 24^h . Si Ω est la vitesse angulaire correspondant à la période de rotation sidérale Θ de la planète sur elle-même et si ω est la vitesse angulaire orbitale (sidérale) du Soleil vu de la planète, la quantité $\omega - \Omega$ représente la vitesse angulaire du Soleil dans un repère lié à la planète (en supposant pour simplifier

¹Cette dénomination vient du fait que les éclipses de Lune ou de Soleil ne sont possibles que lorsque la Lune se trouve quasi alignée avec la Terre et le Soleil, c'est-à-dire d'abord dans le plan d'orbite de la Terre, mais aussi bien sûr à l'intersection de ce plan et du plan orbital de la Lune (*ligne des nœuds*) (voir Fig 15)

que ces deux rotations se font autour d'axes parallèles). La durée du jour sur la planète est alors le temps qu'il faut pour que l'angle $(\omega - \Omega) t$ augmente de 2π , d'où, en fonction de la période orbitale sidérale T de la planète :

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

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

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 ε entre l'axe des pôles et la normale à l'écliptique vaut environ $23^\circ 27'$ (voir Fig 13). Si cet axe est de direction fixe, à cause de cet angle et du mouvement orbital de la Terre en 1 an, on voit sur cette figure 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 (voir Fig 14). 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 25770 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* (365,2563 jours) qui correspond aux mouvement orbital donné par les lois de Kepler. C'est l'année tropique, calquée sur le retour des saisons, qui sert à établir les calendriers utiles pour la vie courante sur Terre.
- ensuite, de très petites oscillations périodiques assez rapides, appelées *nutations*, dont les périodes sont inférieures 18 ans et que l'on peut négliger pour la définition des saisons car leur contribution est nulle en moyenne dans le temps.

3 Description du système galactique

3.1 La Galaxie

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 Fig 16).

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 (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.

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*). 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 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 1000 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* 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.

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.

3.2 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 $1000 R_{\odot}$. Les densités moyennes sont alors extrêmement variées ($\approx 10^{18}$ 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 $\approx 10^{-6}$ kg.m⁻³ pour une étoile *géante* de $1000 R_{\odot}$).

La luminosité des étoiles est mesurée par leur *magnitude apparente* m , 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 conventionnelle d_0 donnée, prise 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 laquelle 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. 4). 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 l'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 Fig 17). 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 ; en plaçant alors dans un diagramme la magnitude absolue des étoiles en fonction de leur type spectral, 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). C'est le *diagramme HR* (ou de *Hertzsprung-Russell*, du nom des 2 astronomes qui l'ont établi pour la première fois vers 1910). Le Soleil fait partie des étoiles de la séquence principale. On trouve 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. 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 (voir Fig 18).

La place des étoiles dans ce diagramme dépend en fait de leur rayon. Celles présentes dans le haut (très lumineuses) sont des étoiles *géantes* et *supergéantes* (classes I à IV) 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* (classe VII) dont le rayon est de l'ordre $0,01 R_{\odot}$ (comparable au rayon de la Terre). Entre les deux, les étoiles de la séquence principale sont qualifiées de *naines* (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*.

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 (voir Fig 19).

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 des "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 plusieurs centaines de masses solaires. Il y a ainsi matière pour donner naissance à un groupe de plusieurs centaines d'étoiles, qui pourront cependant avoir des masses diverses. En 100 000 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. Pendant ce temps, si le nuage qui a formé la proto-étoile avait une rotation initiale, ce nuage 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. Lorsqu'elle naît, l'étoile trouve alors sa place sur la *séquence principale du diagramme HR* : Cette séquence correspond en effet à la première phase de la vie des étoiles, lorsqu'elles "brulent" 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.

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 et la pression due au poids des couches supérieures qui tend à contracter l'étoile. La suite dépend fortement de la masse initiale. Pour une étoile de $1,2 M_{\odot}$ par exemple, 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 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 enflent et se contractent alternativement, produisant des variations plus ou moins 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 née 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 (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. 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 juste de se former.

4 Description de l'Univers extragalactique

4.1 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 : spirales, elliptiques et irrégulières.

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4.2 Organisation des galaxies

On distingue plusieurs niveaux d'organisation des galaxies :

1. 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 par les effets de marées qu'elles subissent fortement 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 : 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 (voir Fig 20). 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 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.
3. 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 (voir Fig 21). La densité des amas va en croissant vers ce centre ; le diamètre du superamas local serait de l'ordre de 10^8 a.l. (voir Fig 22). 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.
4. 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 (voir Fig 23). 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* (ou *redshift*)

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

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 les plus lointaines ainsi détectées 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 (appelé *rayonnement cosmologique*) correspondant à un univers homogène dont la température moyenne actuelle vaut 2.735 K, et qui serait le rayonnement résiduel de l'explosion initiale, 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.

5 La mesure des distances dans l'Univers

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.

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. 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 m/s) en 499, 004 782 s, d'où sa valeur de 149 597 870 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.

5.1 La distance des étoiles

Le principe est simple : On mesure d'abord directement la distance des étoiles les plus proches du Soleil, ce qui permet de calibrer certaines propriétés intrinsèques et observables de ces étoiles et dont l'observation dépend de leur distance. Alors, observant ces propriétés sur des étoiles de distance inconnue, on peut inversement en déduire leur distance.

5.1.1 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.

Pour comprendre comment se manifeste cet effet de parallaxe, faisons d'abord l'hypothèse que toutes les étoiles sont fixes par rapport au Soleil (voir Fig 24). Alors, quand on les observe depuis la Terre, mobile autour du Soleil, tout se passe comme si l'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 parallèle 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 le Soleil autour de la Terre (voir Fig 25). Si l'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 translatée est vue en projection sur le ciel sous forme d'une ellipse plus ou moins aplatie (c'est l'*ellipse de parallaxe*) (voir Fig 26), 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.

En réalité, les étoiles bougent par rapport au Soleil (rotation galactique) mais les mouvements angulaires observés depuis le Soleil sont très lents (le plus souvent moins de $1''$ par an) et peuvent être considérés comme rectilignes uniformes ; vues de la Terre, les étoiles semblent alors décrire la somme vectorielle de ce mouvement rectiligne uniforme (appelé *mouvement propre*) et du mouvement annuel sur l'ellipse de parallaxe (voir Fig 27). Cette combinaison de mouvements donne un mouvement apparent cycloïdal, qui ressemble fort aux boucles qu'on a décrites plus haut à propos des mouvements géocentriques des planètes, avec leurs alternances de mouvements directs et rétrogrades. En fait, c'est exactement le même effet de parallaxe qui était alors appliqué aux planètes lorsqu'on écrivait que pour une planète P on avait $\overrightarrow{TP} = \overrightarrow{TS} + \overrightarrow{SP}$.

Les angles de parallaxes observés sont toujours très petits : L'étoile la plus proche (α 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 $206\,264'',8 \dots$ dans 1 radian, on a encore :

$$1 \text{ parsec} = 206\,264,8 \dots \text{ UA}$$

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 α 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 10000) car les observations astrométriques faites depuis la Terre sont altérées en précision par les turbulences de l'atmosphère. 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 $\pm 0''002$. 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.

Notons que pour appliquer convenablement la méthode des parallaxes trigonométriques, il faut tenir

compte aussi du phénomène d'*aberration de la lumière* (voir Fig 28) qui décale la direction observée par rapport à la direction vraie de l'objet visé d'un angle β 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.

5.1.2 Les parallaxes spectroscopiques

On a vu en 3.2 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 (voir Fig 29). 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.

5.1.3 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 Képler 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 Képler s'écrit :

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

en fonction des masses m_1 et 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 :

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

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 (relation masse-luminosité qui exprime que le logarithme de la masse d'une étoile est sensiblement une fonction linéaire de sa magnitude absolue).

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.

5.1.4 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.

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

Variables intrinsèques 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 \overline{M} des céphéides de distance connue, Miss Leavitt a pu montrer en 1912 qu'on a sensiblement

$$\overline{M} = a \log P + b$$

où a et b sont des constantes. 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 aperiodique, leur luminosité augmentant brusquement puis revenant lentement à son niveau initial. Parce que ces étoiles semblaient apparaître là où on n'observait rien auparavant, elles ont été désignées dans le passé sous le nom de *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 Δm de magnitude de l'ordre de 10, le retour au niveau initial se faisant en plusieurs mois, tandis que pour les *supernovae*, Δm est compris 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 cœur nucléaire d'une étoile).

Le phénomène de supernova semble être l'une des dernières étapes de la vie d'une étoile massive (de masse supérieure à $3,5 M_{\odot}$) ; 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.

5.2 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 (petites galaxies satellites de la nôtre) 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 $17,1 \pm 1,8$ Megaparsec.

L'observation de *supernovae* dans les galaxies extérieures à la nôtre 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 1000 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 $5 \log_{10} d - 5$ 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 km/s, 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 100Mpc.

Pour les galaxies plus lointaines, il reste la *loi de Hubble*

$$V_r = H D$$

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 km/s par Mpc). Pour les galaxies de distance inconnue, leur vitesse radiale est mesurée par l'effet Doppler-Fizeau du 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.

6 Bibliographie

Ce cours n'est évidemment qu'une petite introduction à l'astronomie. Pour en savoir plus, les ouvrages suivants sont à la portée des étudiants du 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 pourra aussi voir les nombreux sites internet consacrés à l'astronomie, comme celui par exemple de l'Observatoire de Paris :

(<http://www.obspm.fr/>)

ou du Bureau des Longitudes :

(<http://www.imcce.fr/>)

ou encore ceux qu'on atteindra en recherchant des mots-clés citant tel observatoire, ou tel objet céleste. . .

On trouvera aussi de très nombreuses images de toutes les catégories d'objets célestes, réalisées par toutes sortes d'instruments au sol ou dans l'espace, sur le site <http://www.cidehom.com/>.

Les figures et tableaux référencés dans le présent document sont accessibles et téléchargeables sur le site du Laboratoire d'Astronomie de Lille (LAL) :

<http://www.univ-lille1.fr/lal/>

sous la rubrique "Documents pédagogiques"