

Le grand tour

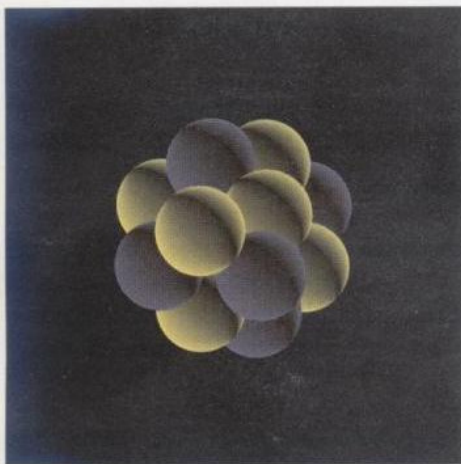
L'objectif de ce prologue est d'apprécier les dimensions de l'Univers, d'appivoiser son immensité, tout en se familiarisant avec les objets et les phénomènes principaux dont cet ouvrage traite par la suite. Pour ce faire, nous allons explorer l'Univers en huit sauts, en débutant à l'échelle du noyau atomique, pour nous rendre jusqu'aux confins de l'Univers observable (voir la figure de la p. 3).

Notre voyage commencera par une fenêtre de 10^{-14} m de côté*, qui laisse voir un noyau d'oxygène, un des éléments chimiques importants en astronomie. À chaque saut, on augmentera la largeur du côté de la fenêtre par le facteur approprié pour atteindre le niveau d'organisation suivant. Par exemple, pour passer du noyau atomique à l'atome lui-même, on doit grossir la fenêtre par un facteur 10 000. Puis, pour se rendre de l'échelle de l'atome à l'échelle humaine, on doit faire un saut immense d'un facteur un milliard. De même, le saut est d'un milliard entre l'échelle humaine et celle englobant la planète Terre.

À partir de la quatrième fenêtre, on entre dans le domaine de l'astronomie proprement dite. De la Terre au système Terre-Lune, le saut n'est que d'un facteur 10. Puis, en quatre sauts successifs d'un facteur 10 000 chacun, on passe au système solaire (10^{13} m), au système d'étoiles le plus proche du Soleil, Alpha du Centaure (10^{17} m), à notre Galaxie, la Voie lactée (10^{21} m), puis, finalement, à l'ensemble des millions de galaxies qui se distribuent en amas et en filaments séparés par d'immenses vides — la superstructure de l'Univers (10^{25} m).

Fenêtre 1 : 10^{-14} m LE NOYAU ATOMIQUE

La première fenêtre, d'une largeur de 10^{-14} m, montre un noyau d'oxygène, constitué de 8 protons et de 8 neutrons. Bien que cet ouvrage porte sur l'astronomie, il est utile de prendre le temps de comprendre les concepts reliés aux échelles nucléaire et atomique. En effet, plusieurs phénomènes astronomiques, en particulier la source d'énergie des étoiles, découlent de processus qui se produisent à ces échelles.



* Le lecteur qui ne serait pas familiarisé avec la notation scientifique est invité à se reporter à l'annexe 1.

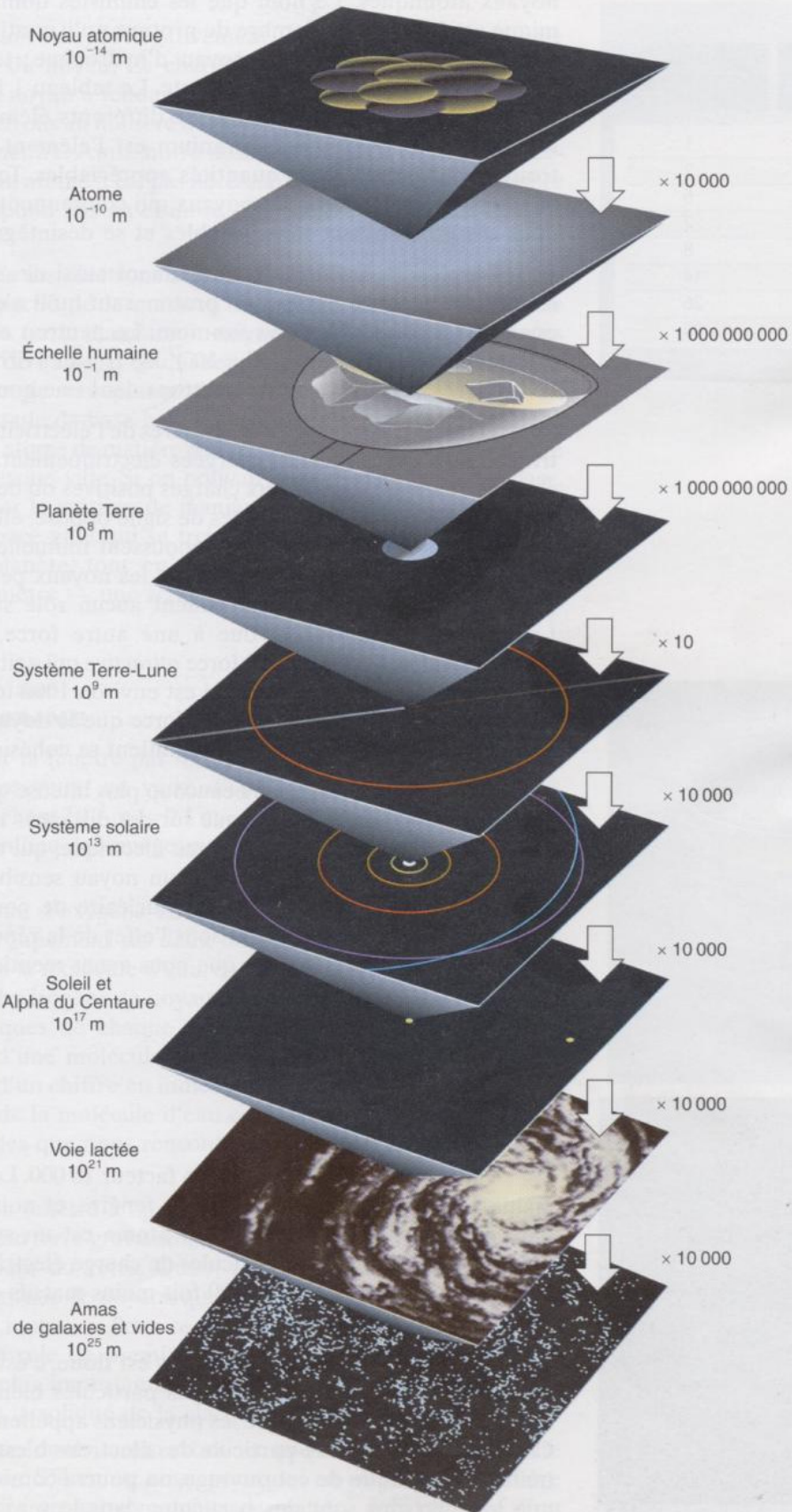
NEUF FENÊTRES SUR L'UNIVERS

Tableau 1

Quelques noyaux atomiques importants

Nom et symbole chimique		Nombre de protons dans le noyau
Hydrogène	H	1
Hélium	He	2
Carbone	C	6
Azote	N	7
Oxygène	O	8
Silicium	Si	14
Fer	Fe	26
Uranium	U	92

C'est le cas du phénomène bien connu de l'électricité. Le **proton** est une particule de charge électrique positive qui se trouve dans tous les noyaux atomiques. Le nom que les chimistes donnent à un noyau atomique est fonction du nombre de protons qu'il contient. Ainsi, tout noyau contenant 1 proton est un noyau d'hydrogène; tout noyau contenant 2 protons est un noyau d'hélium, etc. Le tableau 1 indique le nombre de protons contenus dans le noyau de différents éléments chimiques. Avec son noyau de 92 protons, l'uranium est l'élément le plus lourd qui se trouve dans la nature en quantités appréciables. Toutefois, on a réussi à produire en laboratoire des noyaux qui contiennent jusqu'à 114 protons; mais ces gros noyaux sont instables et se désintègrent très rapidement.

La plupart des noyaux contiennent aussi des **neutrons**. Le neutron est pratiquement le jumeau du proton, sauf qu'il n'est pas chargé électriquement: il est neutre, d'où son nom. Le neutron et le proton ont à peu près la même masse, soit $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Il y a environ cent mille milliards de milliards de protons et de neutrons dans une goutte d'eau!

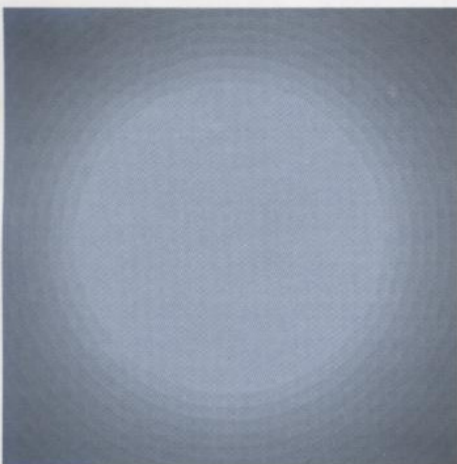
D'après les principes élémentaires de l'électricité, il y a une **force électrique** entre des particules chargées électriquement. La force entre deux charges de même signe (deux charges positives ou deux charges négatives) est répulsive; entre deux charges de signe opposé, elle est attractive. Ainsi, tous les protons d'un noyau se repoussent mutuellement en raison de la force électrique. Mais alors, comment les noyaux peuvent-ils exister? Les neutrons étant neutres, ils ne jouent aucun rôle sur le plan électrique. La stabilité du noyau est due à une autre force, que l'on nomme la **force nucléaire**. Il s'agit d'une force *attractive* qui agit indistinctement entre les protons et les neutrons, et qui est environ 1000 fois plus intense que la force répulsive. C'est grâce à cette force que le noyau d'oxygène illustré à la fenêtre 1, comme tout noyau, maintient sa cohésion.

Si la force nucléaire est beaucoup plus intense que la force électrique, elle ne peut agir en revanche que sur des distances très courtes, de l'ordre de 10^{-14} m, contrairement à la force électrique, qui a une portée illimitée. Ainsi, si on essayait de construire un noyau sensiblement plus gros que la largeur de la fenêtre 1, la force nucléaire ne pourrait en maintenir la cohésion, et il se désintégrerait sous l'effet de la répulsion électrique. Cela explique la limite de grosseur que nous avons mentionnée plus haut.

Fenêtre 2: 10^{-10} m L'ATOME

Faisons un saut d'échelle d'un facteur 10 000. Le noyau d'oxygène est maintenant invisible au centre de la fenêtre, et nous apercevons l'atome d'oxygène dans son ensemble. Un **atome** est un système composé d'un noyau central entouré de particules de charge électrique négative, les **électrons**, lesquels sont environ 2000 fois moins massifs que les protons ou les neutrons.

Si l'image que nous apercevons est floue, c'est que les électrons qui entourent le noyau ne sont pas des particules bien définies, mais plutôt des distributions diffuses que les physiciens appellent « ondes-particules ». Comme la dualité onde-particule des électrons n'est pas un aspect important dans l'optique de cet ouvrage, on pourra considérer dans ce qui suit que les électrons sont des particules dans le sens usuel du mot (petits



objets localisés). Précisons en passant que toutes les particules fondamentales de la physique (protons, neutrons, etc.) présentent la dualité onde-particule.

Les électrons étant chargés négativement, ils sont attirés par la charge positive des protons du noyau. La charge de l'électron étant égale à la charge du proton, un noyau a tendance à capturer en orbite autour de lui un nombre égal d'électrons au nombre de protons qu'il contient. L'ensemble de l'atome est alors neutre. Ainsi, notre atome d'oxygène contient 8 électrons, s'il est neutre. Un atome n'est pas nécessairement neutre : si le nombre d'électrons ne correspond pas au nombre de protons, on qualifie l'atome d'**ion**.

Étant donné que les électrons sont 2000 fois moins massifs que les protons, la majeure partie de la masse d'un atome (environ 99,98 %) se trouve dans son noyau. Or, le diamètre du noyau est environ 10 000 fois plus petit que l'ensemble de l'atome, ce qui représente un dixième de milliardième de un pour cent de son volume : dans un modèle d'atome qui aurait les dimensions d'un stade de base-ball, le noyau aurait la taille d'une balle de golf ! Ainsi, chaque atome de matière contient un petit cœur massif entouré d'un vaste espace presque vide. Si on pouvait faire disparaître cet espace, on pourrait comprimer la matière de manière fantastique. Par exemple, si on enlevait tout l'espace vide qui se trouve entre les noyaux des atomes de la Terre, notre planète, tout en conservant la même masse, aurait environ 1 km de diamètre — une réduction de taille d'un facteur 10 000.

Fenêtre 3 : 10^{-1} m L'ÉCHELLE HUMAINE

Nous venons d'élargir la fenêtre par un facteur un milliard, et une image familière s'offre à nos yeux : un verre d'eau contenant des glaçons. La fenêtre mesure maintenant 10^{-1} m (= 0,1 m = 10 cm) de côté. L'atome d'oxygène est invisible au milieu de l'image, quelque part dans le haut du glaçon situé au centre.

En fait, cet atome d'oxygène fait partie d'une **molécule** d'eau. Une molécule est un regroupement de deux ou plusieurs atomes liés par la force électrique. Dans la molécule d'eau, composée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène, le noyau de l'atome d'oxygène attire vers lui les électrons uniques de chaque atome d'hydrogène. Les chimistes écrivent la formule d'une molécule en indiquant le symbole de chaque atome présent, suivi d'un chiffre en indice qui représente son nombre. Par exemple, la formule de la molécule d'eau est H_2O . Le tableau 2 présente certaines des molécules que nous rencontrerons à plusieurs reprises dans cet ouvrage.

À l'échelle de la fenêtre 3 apparaît la troisième grande force de la nature, la **gravitation**, ou *force gravitationnelle*. Elle se manifeste ici en maintenant l'eau à l'intérieur du verre. Quant à la force nucléaire, elle maintient ensemble la multitude de noyaux que contient le verre, mais elle passe inaperçue à l'échelle humaine. Pour ce qui est de la force électrique, elle continue de jouer un rôle de premier plan. En fait, à cette échelle, elle demeure la force la plus importante. C'est elle qui est responsable de la cohésion du verre, de la solidité de la glace et de la fluidité de l'eau.

À la fenêtre précédente, nous avons vu que toute matière est faite essentiellement de vide. S'il en est ainsi, pourquoi un morceau de matière ne peut-il pas traverser un autre morceau de matière, à la manière d'un

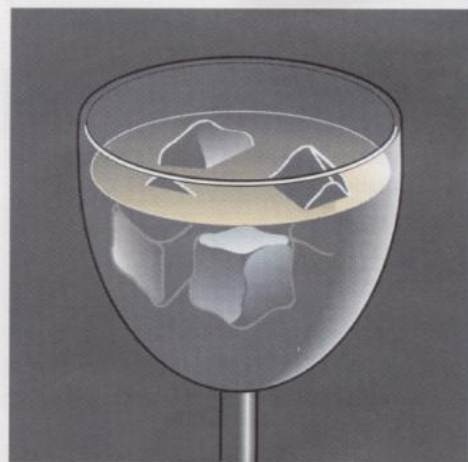


Tableau 2

Quelques molécules importantes en astronomie

Nom	Formule
Dihydrogène	H_2
Eau	H_2O
Gaz carbonique	CO_2
Méthane	CH_4
Ammoniaque	NH_3
Dioxyde de silicium	SiO_2

fantôme? Et qu'est-ce qui permet à un morceau de quasi-vide de tenir ensemble? Dans les deux cas, il s'agit de la force électrique. Les parties positives d'une molécule peuvent attirer les parties négatives d'une autre molécule et former des liens attractifs. Ces liens sont responsables de la cohésion de la matière et de la solidité qu'ont les objets de la vie de tous les jours.



Fenêtre 4 : 10^8 m LA PLANÈTE TERRE

Un autre saut d'un facteur un milliard, et nous pénétrons enfin dans l'espace. La fenêtre mesure maintenant 10^8 m (= 10^5 km = 100 000 km) de largeur. On y aperçoit notre planète, la Terre, dans sa totalité. Le verre d'eau, bien qu'invisible à cette échelle, se trouve toujours en plein centre de l'image!

Il est intéressant de remarquer que le saut est à peu près le même entre l'atome et l'échelle humaine qu'entre celle-ci et l'échelle planétaire. Sur l'échelle des puissances de 10, le monde humain se situe donc à mi-chemin entre un atome et une planète. Ainsi, si on grossissait un objet de la taille de la fenêtre 3, disons une orange, jusqu'à la taille de la Terre, chaque atome de l'orange initiale aurait à peu près la taille d'une orange.

La force électrique dominait les phénomènes de la fenêtre 3. À partir de la fenêtre 4, c'est la force gravitationnelle qui domine à toutes les échelles. Paradoxalement, la gravitation est de loin la force la moins intense (tableau 3). Si elle finit par l'emporter sur les autres forces, c'est par défaut. On a déjà mentionné que la portée de la force nucléaire est très petite; elle ne compte donc pas ici. En revanche, la force électrique et la force gravitationnelle ont toutes deux une portée illimitée. Si la force électrique cesse d'être importante à partir de l'échelle planétaire, c'est parce que les objets de taille astronomique (comme les planètes ou les étoiles) sont électriquement neutres: ils contiennent autant de charges positives que de charges négatives; les forces électriques attractives compensent les forces électriques répulsives, et l'effet net est nul. En revanche, la gravitation est seulement de nature attractive, et elle est produite par toute masse. Plus la masse d'un objet est grande, plus la force gravitationnelle est grande. Ainsi, à partir de l'échelle planétaire, la gravitation règne en maître incontesté.

Lorsque la gravitation domine, les objets ont tendance à adopter la forme la plus compacte possible, celle d'une sphère. Considérons le cas illustré, notre Terre. Le relief terrestre — montagnes et vallées — est imposant pour des créatures de notre taille, mais, à l'échelle de la planète, il s'agit de plissements négligeables: en fait, proportionnellement, notre planète est plus lisse qu'une boule de billard! Nous verrons à la section 13.8 qu'un objet de type planétaire dont la taille dépasse quelques centaines de kilomètres a une gravitation trop élevée pour avoir une forme autre qu'une sphère. En revanche, les objets plus petits, comme les astéroïdes, peuvent avoir des formes irrégulières.

Fenêtre 5 : 10^9 m LE SYSTÈME TERRE-LUNE

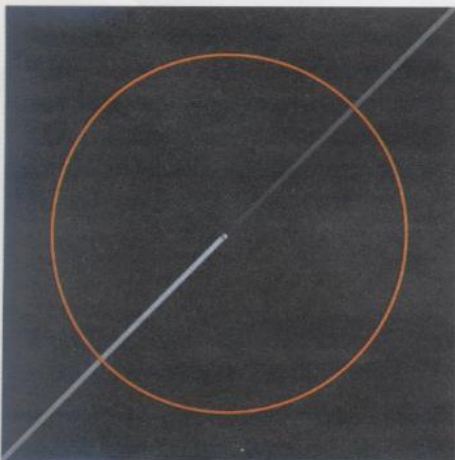
Avec un saut d'un facteur 10 par rapport à la fenêtre précédente, la Terre n'est plus qu'un point, et on aperçoit l'orbite de la Lune, le seul satellite

Tableau 3

Intensité relative des forces fondamentales de la nature

Force	Intensité relative
gravitationnelle	1
électrique	10^{40}
nucléaire	10^{43}
faible	*

* La force faible intervient dans certains processus de physique nucléaire, mais il est difficile de déterminer précisément son intensité.



naturel de la Terre. La ligne diagonale représente une portion de l'orbite de la Terre autour du Soleil. À cette échelle, la Terre se présente comme un point d'un demi-millimètre de diamètre, et la Lune est carrément invisible: seule son orbite est représentée. À l'aube du troisième millénaire, cette fenêtre correspond aux limites qui ont été explorées directement par des êtres humains à bord de vaisseaux spatiaux. Et dire qu'il ne s'agit en quelque sorte que de la cour arrière de notre planète!

Si, d'un point de vue astronomique, la Lune est située dans notre cour arrière, il en est autrement à l'échelle humaine. S'il y avait une autoroute entre la Terre et la Lune et qu'on y roulait jour et nuit à 100 km/h, le voyage durerait presque 6 mois! Les capsules Apollo ont pu atteindre la Lune en quelques jours parce qu'elles voyageaient à plusieurs kilomètres *par seconde*.

Aussi bien s'y faire tout de suite: l'espace est extrêmement vide, et les distances entre les objets astronomiques sont de manière générale extrêmement grandes par rapport à la taille de ceux-ci. Le cas de la Terre et de la Lune n'est même pas un cas extrême, car on peut assez facilement représenter à l'échelle leurs diamètres et la distance qui les sépare dans les limites d'une feuille de format courant:



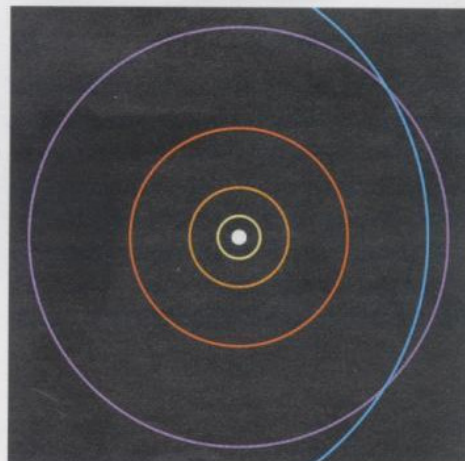
Une façon pratique de se représenter les distances en astronomie consiste à calculer le temps que prendrait le voyage entre la Terre et un objet à la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s. De la Terre à la Lune, il faudrait 1,3 s; on dit ainsi que la Lune est distante de la Terre de 1,3 seconde-lumière*.

La gravitation, qui est la cause, comme nous l'avons vu, de la sphéricité de la Terre et de la Lune, est aussi responsable de l'orbite de celle-ci autour de notre planète. En effet, c'est la force gravitationnelle entre ces deux astres qui fait en sorte que la Lune reste en orbite autour de la Terre au lieu de se perdre dans l'espace interplanétaire.

Fenêtre 6: 10^{13} m LE SYSTÈME SOLAIRE

Un saut d'un facteur 10 000 nous fait découvrir plusieurs astres en orbite autour du Soleil, qui constituent le **système solaire**. À cette échelle, la Terre et le Soleil sont si proches qu'ils se confondent en un point au centre de l'image. En fait, en plus du Soleil, de la Terre et de la Lune, le point central contient trois autres planètes qui tournent autour du Soleil: Mercure, Vénus et Mars. La première orbite que l'on distingue dans la fenêtre est celle de Jupiter, suivie, par ordre croissant de taille, des orbites de Saturne, d'Uranus, de Neptune et d'une portion de l'orbite fortement elliptique de Pluton.

* La section de l'annexe II portant sur les unités de distance donne plus de détails sur les mesures reposant sur la vitesse de la lumière.





Les neuf planètes du système solaire et le satellite de la Terre, la Lune. Les tailles sont à l'échelle, mais pas les distances entre les planètes. Remarquez l'anneau de petites particules qui entoure Saturne ; Jupiter, Uranus et Neptune possèdent également des anneaux, mais ils sont trop ténus pour être représentés ici. À cette échelle, le diamètre du Soleil correspond à la hauteur de la page.

Le système solaire contient une étoile, neuf planètes ainsi que d'innombrables satellites, astéroïdes et comètes. Comme les termes étoile, planète, satellite, astéroïde et comète reviennent souvent en astronomie, nous allons profiter de l'occasion pour les définir.

Une **étoile** est un astre assez massif pour briller par lui-même*. Notre Soleil est une étoile moyenne, et sa masse est 300 000 fois plus grande que celle de la Terre. La masse des étoiles varie entre approximativement 0,08 et 100 fois la masse du Soleil**. Une étoile dont la masse excède 100 fois celle du Soleil se désintègre afin de retrouver une configuration plus stable.

Un objet moins massif que le centième de la masse du Soleil (3000 fois la Terre) ne brille pas par lui-même. Il s'agit alors d'un *objet de type planétaire*. Dans notre système solaire, l'appellation **planète** est habituellement réservée aux corps assez gros (d'un diamètre supérieur à 2000 km) qui tournent directement autour du Soleil. Ainsi, il y a neuf planètes dans le système solaire : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton, par ordre croissant de la distance au Soleil.

Un objet en orbite autour d'une planète se nomme **satellite**. Un satellite est toujours plus petit que la planète autour de laquelle il gravite. Cependant, sept satellites du système solaire, dont la Lune, sont plus gros que la plus petite des planètes, Pluton.

Un objet de moins de 2000 km de diamètre qui tourne directement autour du Soleil se nomme **astéroïde**. Comme nous l'avons mentionné à la fenêtre 4, les astéroïdes sont généralement de forme irrégulière. Certains astéroïdes contiennent de la glace et possèdent une orbite qui les conduit à un certain moment près du Soleil. Ils fondent alors en partie ; la vapeur qui en résulte forme une queue : on observe alors une **comète**.

Si la fenêtre 5 représentait la zone explorée jusqu'à présent par des vaisseaux spatiaux habités, la fenêtre 6 correspond pour sa part à la zone explorée par les sondes spatiales robotisées. À ce jour, quatre sondes ont réussi, après plusieurs années de vol, à quitter le système solaire. Elles se trouvent présentement tout juste au-delà des limites de la fenêtre 6. L'exploration physique de l'Univers s'arrête donc à cette fenêtre. Toutes nos connaissances sur les fenêtres suivantes ont été obtenues à partir de la Terre (ou de télescopes orbitaux), par l'observation et l'analyse de la lumière qui nous provient des objets célestes.

Un rayon de lumière prend environ 10 heures à traverser la fenêtre 6. Le Soleil se trouve à 8 minutes-lumière de la Terre. Au point le plus éloigné de sa trajectoire, Pluton se trouve à 6,7 heures-lumière de la Terre. Cela montre à quel point le système solaire est vaste par rapport à la taille des planètes. Imaginez que vous vouliez construire un modèle du système solaire réduit un milliard de fois. La Terre pourrait y être représentée par une cerise, et la Lune, par un petit pois. Les quatre plus grosses planètes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) pourraient être figurées par des agrumes ou des petits melons ; les autres planètes et les satellites, par un assortiment de graines. Le tout pourrait se transporter facilement dans un

* Les étoiles tirent leur énergie de la fusion nucléaire en leur cœur, comme nous le verrons au chapitre 6.

** On a récemment confirmé l'existence d'objets intermédiaires entre les planètes et les étoiles, appelés *naines brunes*, dont la masse varie entre 0,01 et 0,08 fois la masse du Soleil. Nous en décrirons les caractéristiques à la section 7.2.

ou deux sacs d'épicerie. Maintenant, si vous voulez disperser ces fruits et ces graines pour que la distance qui les sépare soit aussi à l'échelle, vous aurez besoin d'un terrain de 15 km de diamètre, l'équivalent de la superficie d'une grande ville! Imaginez une dizaine de fruits et quelques poignées de graines éparpillées dans une ville, et vous aurez une bonne idée du vide énorme qui sépare les planètes dans le système solaire.

Fenêtre 7: 10^{17} m

LE SOLEIL ET ALPHA DU CENTAURE

Il faut faire à nouveau un saut d'un facteur 10 000 pour voir apparaître l'étoile la plus proche du Soleil, en fait un système de trois étoiles rapprochées qui apparaît, vu de la Terre, comme un seul point: le système triple d'**Alpha du Centaure**. Dans la fenêtre 7, le Soleil (ainsi que tout le système solaire) est au centre, et le point décentré représente le système d'Alpha du Centaure.

Si on avait voulu représenter les étoiles réellement à l'échelle de la fenêtre, elles auraient été invisibles. En effet, si les distances entre les planètes sont impressionnantes en comparaison de leur taille, les distances entre les étoiles le sont encore plus. Si on réduisait notre Soleil à la taille d'un pamplemousse et qu'on le plaçait à Montréal, le système stellaire le plus proche (le système triple d'Alpha du Centaure) serait représenté par un pamplemousse, une orange et une cerise... quelque part en France! S'il y a une constante qui se dégage de notre grand tour de l'Univers, c'est que le vide prédomine à toutes les échelles, que ce soit l'échelle atomique, l'échelle planétaire ou l'échelle stellaire.

Un rayon de lumière prend environ 10 ans à traverser la fenêtre 7. Le système triple d'Alpha du Centaure est distant de 4,2 a.l. (années-lumière) par rapport au système solaire. Les systèmes d'étoiles multiples sont nombreux dans l'Univers: on estime que plus de la moitié des étoiles font partie de systèmes doubles ou multiples. Les étoiles solitaires comme le Soleil sont minoritaires.

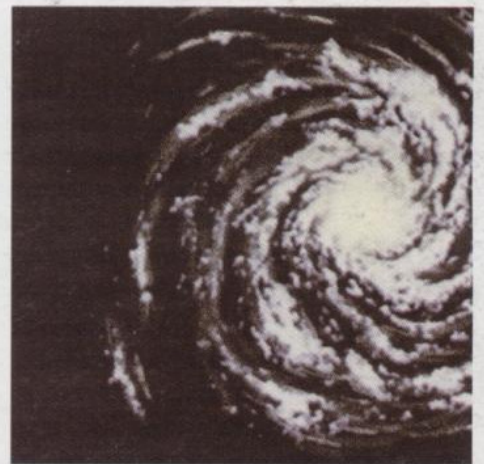
Fenêtre 8: 10^{21} m

LA VOIE LACTÉE

Un autre saut d'un facteur 10 000 nous projette dans une fenêtre mesurant 100 000 a.l. de largeur. On y aperçoit une agglomération d'environ 100 milliards d'étoiles, disposées en forme de spirale. Il s'agit de notre Galaxie, la **Voie lactée**. Une **galaxie** est un gigantesque amas d'étoiles retenu par sa propre gravitation. Notre Galaxie est de taille moyenne: il existe des galaxies naines qui contiennent seulement 100 000 étoiles, et des galaxies géantes qui en contiennent plusieurs centaines de milliards.

Une galaxie ne contient pas que des étoiles: nous verrons au chapitre 7 qu'il existe des agglomérations diffuses de gaz et de poussière entre les étoiles, les **nuages interstellaires**. C'est à partir de ces nuages que les étoiles se forment. Un nuage interstellaire éclairé par des étoiles (de l'intérieur ou de l'extérieur) se nomme une **nébuleuse**. La dimension moyenne des nébuleuses est de quelques dizaines d'années-lumière; à l'échelle de la fenêtre 8, elles se fondent dans la spirale galactique.

Le Soleil, la Terre, le verre d'eau et l'atome d'oxygène se trouvent encore exactement au centre de l'image, à peu près à mi-chemin entre le centre et le bord de la spirale. Le système solaire se situe à environ



26 000 a.l. du centre de la Galaxie. La Voie lactée tourne sur elle-même : c'est cette rotation, combinée à sa propre gravitation, qui fait qu'elle garde sa forme. Le Soleil effectue une rotation autour du centre de la Galaxie en 220 millions d'années.

La majeure partie des étoiles de la Galaxie sont invisibles à l'œil nu. Les 6000 étoiles visibles à l'œil nu depuis la Terre sont concentrées dans une sphère d'environ 1000 a.l. de diamètre — à peine un centième de la largeur de la fenêtre 8!



Fenêtre 9: 10^{25} m AMAS DE GALAXIES ET VIDES

Un dernier saut d'un facteur 10 000 nous dévoile la dernière fenêtre de ce grand tour, qui s'étend sur un milliard d'années-lumière. La Voie lactée est en plein centre, et on aperçoit plusieurs millions de galaxies semblables à la nôtre. Celles-ci ne sont pas distribuées uniformément dans l'espace : elles se concentrent en amas et en filaments, laissant de grands vides presque dépourvus de galaxies ; ces vides peuvent atteindre une taille de 300 millions d'années-lumière, ou 300 Ma.l. ($M = \text{méga} = 10^6$; voir l'annexe 11).

Contrairement aux planètes et aux étoiles, la distance typique entre les galaxies n'est pas très grande comparativement à leur taille. Par exemple, notre Galaxie fait environ 100 000 a.l. de diamètre, et la galaxie principale la plus proche, la **galaxie d'Andromède**, est située à environ 2,5 millions d'années-lumière, c'est-à-dire 25 fois le diamètre de notre Galaxie. Si on réduisait la Voie lactée à la taille d'une pizza de 40 cm de diamètre, la galaxie d'Andromède se trouverait à environ 10 m de distance. De plus, notre Galaxie possède environ une dizaine de galaxies naines satellites, situées à une distance moyenne de quelques centaines de milliers d'années-lumière.

La proximité relative des galaxies implique que les collisions entre galaxies ne sont pas rares, contrairement aux collisions entre planètes ou entre étoiles, qui ne se produisent à peu près jamais. On estime que 2 % des galaxies de l'Univers sont présentement en interaction.

L'observation de l'Univers à l'échelle de la fenêtre 9 révèle un phénomène surprenant : les amas de galaxies se fuient les uns les autres, et ce dans toutes les directions. L'Univers est en expansion ! Nous traiterons de ce sujet dans la quatrième partie de cet ouvrage. Nous verrons que l'Univers était dans un état de haute densité il y a environ 15 milliards d'années. Tandis que l'expansion diluait la matière, la structure cosmique — les galaxies, les étoiles et les planètes — est graduellement apparue, pour donner l'Univers que nous observons aujourd'hui.

Mais à vrai dire, à l'échelle où nous sommes, on ne peut plus réellement affirmer que l'on observe l'Univers tel qu'il est aujourd'hui. En effet, la lumière prend un milliard d'années à traverser la fenêtre 9, c'est-à-dire près d'un dixième de l'âge de l'Univers.

Plus l'objet que l'on observe est lointain, plus il nous apparaît tel qu'il était il y a longtemps. *Regarder loin dans l'espace, c'est regarder loin dans le passé.* Ce délai de transmission de la lumière existe bien sûr à toutes les échelles. Lorsque vous regardez la Lune dans le ciel, vous ne la voyez pas telle qu'elle est *maintenant*, mais telle qu'elle était 1,3 secondes auparavant. De même, vous voyez le Soleil tel qu'il était il y a 8 minutes, le système d'Alpha du Centaure, tel qu'il était il y a 4,2 ans, et la galaxie d'Andromède, telle qu'elle était il y a 2,5 millions d'années.

Les objets célestes évoluent avec le temps, mais leur rythme d'évolution est en général assez lent. Ce n'est qu'à partir de l'échelle des galaxies lointaines que le délai de transmission de la lumière devient important par rapport à leur rythme d'évolution. Ce que l'on voit alors ne correspond plus à ce qui existe. Par exemple, nous verrons au chapitre 8 que l'on observe, loin dans l'espace, des objets étranges, nommés *quasars*, que l'on ne voit pas à des distances inférieures. Cela s'explique tout simplement par le fait qu'ils n'existent plus à notre époque. Pour voir un quasar, il faut regarder suffisamment loin dans l'espace pour observer des régions de l'Univers telles qu'elles étaient à l'époque où les quasars existaient !

Plus on regarde loin dans l'espace, plus on voit l'Univers jeune, et plus on se rapproche de l'état de haute densité initial. En fin de compte, peu importe la direction dans laquelle on regarde, on finit par frapper un « mur de brume » : on regarde tellement loin dans le passé, que l'on voit des régions de l'Univers telles qu'elles étaient avant que la structure cosmique ne se forme. L'Univers était alors rempli d'un gaz dense, chaud et, malheureusement pour nous, opaque. Tout ce qui se trouve plus loin ou, ce qui revient au même, tout ce qui s'est passé avant, est caché par ce mur opaque. Nous avons atteint l'**horizon cosmique**, c'est-à-dire la limite de l'**Univers observable**. Celui-ci contient cent milliards de galaxies, chacune contenant environ cent milliards d'étoiles. Le nombre total d'étoiles dépasse ainsi 10^{22} . On estime que le nombre total de noyaux atomiques dépasse 10^{80} . Et on ne parle que de l'Univers observable : l'Univers dans son ensemble, pour autant que l'on sache, pourrait fort bien être infini !

Tableau 4

Quelques distances

	Distance à partir de la Terre
Lune	1,3 seconde-lumière
Soleil	8 minutes-lumière
Pluton	6,7 heures-lumière
Alpha du Centaure	4,2 a.l.
Centre de la Voie lactée	26 000 a.l.
Galaxie d'Andromède	2 500 000 a.l.