

Alain Meunier


La naissance de la Terre

De sa formation
à l'apparition de la vie

DUNOD

À ma tribu :
Claire, Sébastien, Julien, Magali
Denis, Benoît, Jessica

Concepteur de la maquette de couverture : Raphaël Tardif
Illustration de couverture : © NASA-JPL-CalTech *Double the Rubble*

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>		<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--	--

© Dunod, Paris, 2013
ISBN : 978-2-10-070682-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 3352 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Prologue

D'où venons-nous? Cette question est un moteur de réflexion puissant qui, selon la réponse qu'on y apporte, finit par orienter la société comme l'individu, le collectif comme l'intime. Sous la simplicité de la formulation, se cachent de redoutables interrogations. L'une d'elles est particulièrement fondamentale: elle vient du besoin quasi viscéral de comprendre comment s'est formé le monde qui nous entoure et de savoir quelle place il occupe dans l'Univers. Il faut alors élargir le champ de l'investigation à ce qui nous échappe et nous paraît hors de la compréhension humaine. Mythes et religions ont donné des réponses qui s'imposent soit par la croyance en une vérité révélée soit par une stricte interprétation de ce que perçoivent nos sens. Dans l'un et l'autre des cas, la certitude est établie; elle écarte le doute et procure un confort intellectuel mais au prix d'un aveuglement. C'est comme cela que, depuis Aristote, le Soleil tourne autour de la Terre ou que, depuis la publication de la Bible, notre planète ne peut être âgée de plus de 6 000 ans. Face à ce scénario définitif et acclamé par la multitude, certains se dressent, mus par une exigence particulière: le doute! C'est là que commence la science. Vérifier, contrôler, remettre en question ce qui paraît pourtant certain: c'est prendre un risque et pas seulement intellectuel. Combien de Giordano Bruno ont-ils été martyrisés? Le droit de se poser des

questions a été conquis difficilement et la victoire n'est jamais définitive.

La formation du Soleil, l'origine de la Lune, la structuration de la Terre, l'apparition de la vie, tout cela soulève des myriades de problèmes qui peuvent, s'ils ne sont pas organisés en une séquence logique, amener à un foisonnement anarchique et improductif. L'ombre de René Descartes nous guide alors dans cette jungle: il faut commencer par le début de tout, c'est-à-dire la fabrication même des atomes qui composent la matière que nous observons. C'est à ce prix qu'il devient possible de comprendre comment, ensuite, le Soleil et les planètes se sont formés et comment en dater l'acte de naissance. Ce faisant, il devient alors possible de considérer les mécanismes géologiques qui ont achevé de construire notre Terre pour l'amener à ce que nous connaissons d'elle actuellement, c'est-à-dire un corps composé d'une croûte, d'un manteau et d'un noyau. Certaines étapes de ce long processus sont particulièrement importantes: il s'agit de retrouver l'origine de ce qui n'est même pas de la roche mais constitue pourtant notre environnement quotidien: les océans et l'atmosphère. Question difficile mais qu'il est indispensable de traiter car elle en introduit une autre encore plus essentielle: comment la vie est-elle apparue sur cette planète? L'enchaînement des interrogations nous conduit dans un voyage qui se mesure en milliards d'années, du Big Bang à l'apparition des premiers êtres pluricellulaires complexes. C'est une grande difficulté car le temps de l'astrophysicien et du géologue est hors de la perception commune. Néanmoins, pour aussi immensément long que soit un milliard d'années, ce n'est pas l'éternité. Il y a un début et une fin avec, entre les deux, des événements qui se succèdent et qui font l'histoire.

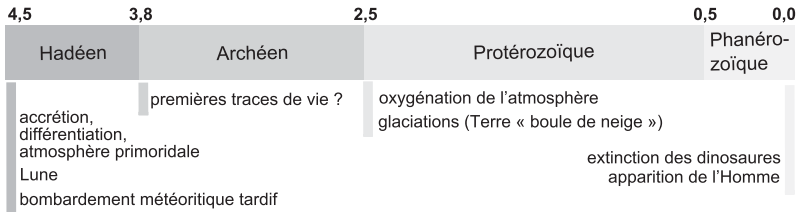
Ce petit ouvrage a une grande ambition: mettre à la portée de qui s'intéresse un peu à la science ou de qui débute en géologie,

PROLOGUE

les raisonnements des spécialistes en physique nucléaire, astrophysique, géochimie, pétrographie, tectonique. Plutôt que de présenter un compte rendu exhaustif des découvertes publiées dans ces différents domaines, il cherche à établir une vision logique de cette très longue période (trois milliards et demi d'années) qui correspond à la « jeunesse » de la Terre : l'Hadéen, l'Archéen et le Protérozoïque. Après cela, elle ressemble plus à ce que nous connaissons d'elle aujourd'hui. C'est tout aussi passionnant mais c'est une autre histoire.

Afin d'aider le lecteur à se repérer dans l'ouvrage, voici une échelle simplifiée des temps géologiques depuis 4,568 milliards d'années, la date de naissance officielle du système solaire. Une échelle plus détaillée est donnée dans l'épilogue.

Milliards d'années



I

D'où viennent les atomes ?

Nous sommes tellement habitués à marcher sur des roches ou des sols, à naviguer sur l'eau ou même, simplement à respirer, que cet environnement familier nous semble être là depuis toujours. Et pourtant, ce n'est pas le cas. Mais alors, d'où tout cela vient-il ? En d'autres termes, d'où proviennent les briques essentielles, c'est-à-dire, les éléments du tableau périodique qui composent les solides, les liquides et les gaz ? Ce que nous voyons, ce que nous touchons, bref, tout (nous y compris) est formé d'assemblages plus ou moins complexes d'atomes, le plus souvent sous la forme de molécules ou d'ions (atomes auxquels il manque des électrons ou, au contraire, qui en possèdent plus qu'ils n'ont de protons). Des cristaux aux composés du vivant, toute matière tire son origine de combinaisons électroniques qui agissent comme des liens entre les éléments chimiques. Or, si la chimie nous explique comment tout cela se forme ou se défait, elle reste muette sur la question des origines. D'où viennent les atomes ? Pourquoi sont-ils présents dans les proportions qui font le monde ? Répondre à ces interrogations oblige à remonter le temps jusqu'à un événement ou plutôt, selon les astrophysiciens, une singularité, que la théorie du Big Bang décrit le mieux pour le moment. Le géologue doit leur laisser la place, son temps viendra plus tard. Nous sommes

donc au point de départ d'un long voyage dont l'unité de temps est le milliard d'années. Avant de nous lancer, il convient de payer tribut aux géants qui nous ont précédés et dont les découvertes nous nourrissent : Galilée, Kepler, Newton, Einstein... et bien d'autres. Parmi eux, certains sont injustement peu connus hors du petit monde des spécialistes. C'est le cas par exemple, du prêtre belge Georges Lemaître, un grand savant, qui, par le biais de la physique théorique, est arrivé à ce modèle totalement contre-intuitif du commencement de l'Univers. Bravant l'ironie de quelques grands noms de l'astrophysique de l'époque, il a montré qu'il était possible d'avoir une vie spirituelle tout en étant un chercheur génial. Venons-en au but de ce chapitre : présenter les conséquences palpables de la physique nucléaire et de l'astrophysique dont les développements mathématiques demeurent inaccessibles à la plupart d'entre nous.

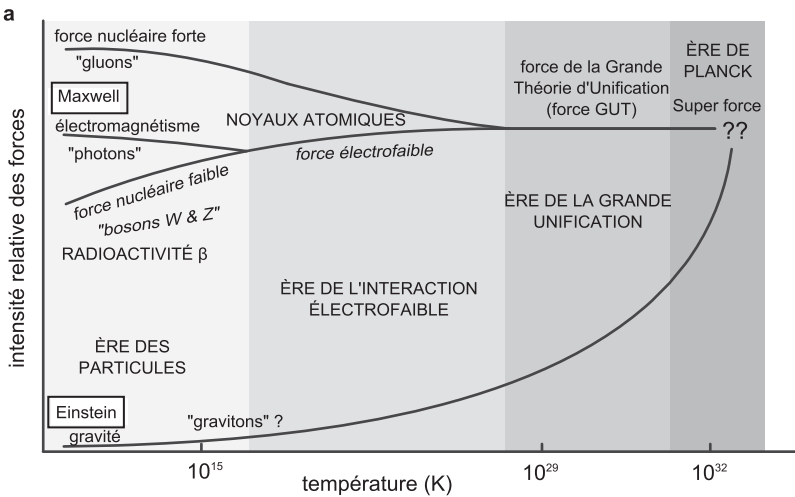
De l'origine de l'hydrogène et de l'hélium

Quelle ne fut la surprise de la communauté scientifique lorsqu'en 1925 l'astronome américain Edwin Hubble démontra que les galaxies, découvertes depuis peu, n'étaient pas fixes dans l'espace mais s'éloignaient de nous d'autant plus rapidement qu'elles étaient lointaines. Le plus beau dans cette découverte bouleversante est qu'elle s'exprime par une loi simple : la vitesse de récession (v) est directement proportionnelle à la distance (d) qui sépare l'observateur de la galaxie visée, distance exprimée en mégaparsecs (1 Mpc $\approx 3 \cdot 10^{22}$ m soit 10 milliards de milliards de kilomètres). Ainsi, même sans avoir un bagage notable en mathématiques, on peut comprendre cette très simple (et très belle) équation : $v = H \times d$. La constante de Hubble H valant environ 72 ± 8 km/s (pratiquement 360 000 kilomètres par heure), on parle donc ici de vitesses considérables. La conséquence de cette découverte fondamentale

est proprement vertigineuse : l'Univers n'est pas immuable mais en expansion constante. Tout bouge, tout change, rien n'est éternel. Cela implique qu'il y a eu un début que l'on peut atteindre en « passant le film à l'envers » et qu'il y aura une fin prévisible que l'on définit par extrapolation. Il devient donc possible de remonter le temps jusqu'à une limite ultime, le commencement de tout (du moins de tout ce que nous percevons). Elle se situe à $13,7 \pm 0,2$ milliards d'années (Ga) du temps présent. Ne sachant pas très bien à quoi cela correspond : taille infiniment petite, chaleur et densité infiniment grandes, nous avons courageusement pris l'habitude de la désigner sous le nom de « singularité du Big Bang ». Ce qui s'est passé précisément à ce moment-là, nous échappe encore et n'est pas l'objectif de cet ouvrage. En revanche, l'inventaire des forces qui ont été mises en jeu nous aide à comprendre quelle fut l'origine des atomes et pourquoi ils se sont fabriqués selon des proportions bien précises.

La physique décrit l'Univers, de l'infiniment petit à l'infiniment grand, par l'action de quatre grandes forces (figure 1.1). La force nucléaire forte, portée par les gluons sur de très courtes distances, explique comment protons et neutrons sont intimement reliés dans les noyaux des atomes. La force nucléaire faible est mise en jeu dans la radioactivité β^- (émission d'un électron). Elle est portée par les bosons W et Z . La force électromagnétique est celle qui gouverne les rayonnements visibles ou invisibles. Elle est portée par les photons. Enfin la gravité, telle qu'elle fut redéfinie par Einstein et dont on cherche encore le porteur (graviton). Elle organise les étoiles, les galaxies, le Cosmos. Remonter le temps vers la singularité du Big Bang revenant à considérer un Univers de plus en plus dense et de plus en plus chaud, les physiciens ont été conduits à penser que ces quatre forces qui semblent indépendantes, devaient en fait s'unifier progressivement sous l'effet des températures inimaginables mises en jeu. Une première étape

avait déjà été franchie par Maxwell, un mathématicien écossais, qui, en 1864, montra qu'électricité et magnétisme étaient deux expressions de la même force. La seconde étape fut précisément l'unification de cette force électromagnétique avec la force nucléaire faible donnant la force électrofaible. À ce moment de son histoire, l'Univers est à une température supérieure à 10^{15} K (1 million de milliards de degrés) et son organisation dépend alors seulement de trois forces indépendantes : électrofaible, nucléaire forte et gravité. Plus récemment, les recherches théoriques ont pu unifier l'électrofaible avec la force nucléaire forte (force GUT de *Grand Unification Theory*) pour des températures hallucinantes (10^{29} K). Le dernier défi, mais il est de taille, est d'unifier la gravité avec la force GUT et, se faisant, de s'approcher au plus près de la singularité.



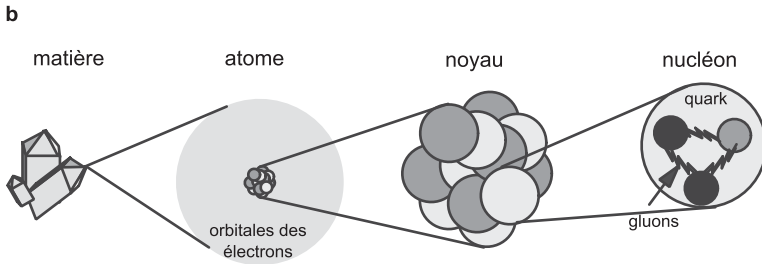


Figure 1.1

a) Les quatre forces qui gouvernent l'Univers actuel et leur unification à mesure qu'on se rapproche de la singularité du Big Bang (ère de Planck). b) La structure de la matière du cristal au nucléon.

Lors de la séquence historique des événements conduisant à la nucléosynthèse primordiale, le temps se découpe en ères successives dont la durée est pour le moins surprenante, pour un géologue s'entend. En effet, la première, l'ère de Planck se termine à 10^{-43} s (une seconde divisée par un nombre à 43 zéros!). Nous sommes ici à la frontière du connu car nous ne savons pas encore comment unifier la mécanique quantique qui est le meilleur outil pour décrire l'infiniment petit avec la théorie de la relativité générale qui permet la compréhension du plus grand. Nous supposons que c'est durant l'ère de Planck que les quatre forces étaient unifiées. Mais qui donc était Planck? Physicien allemand, il s'est d'abord intéressé au rayonnement des corps noirs. Cette étude l'a conduit, malgré lui, à définir la notion de quanta (« paquets » d'énergie). De ses travaux sont issues des constantes universelles qui servent justement à établir la théorie du Big Bang. Citons, parmi elles :

- la distance de Planck ($l_p \approx 1,6 \cdot 10^{-35}$ m) est la limite au-delà de laquelle la théorie de la gravitation d'Einstein (la relativité

générale), devient caduque car elle suppose un espace lisse. C'est la dimension des phénomènes gouvernés par la mécanique quantique.

- le temps de Planck ($t_p \approx 5,4 \cdot 10^{-45}$ s) est le temps mis par la lumière pour parcourir l_p . En dessous de ce temps, l'âge de l'Univers n'a pas de sens.
- la densité de Planck ($\rho_p \approx 5,1 \cdot 10^{96}$ kg/m³).

Ces données de la physique théorique permettent de découper l'histoire de l'Univers en quatre ères caractérisées chacune par un état particulier de la matière et des rayonnements. L'ère de la grande unification (10^{-43} à 10^{-38} s) correspond à la séparation de la gravité des autres interactions naturelles unifiées dans la force GUT (électrofaible + nucléaire forte). Le temps s'écoule, nous sommes à 10^{-38} s, l'Univers s'est refroidi (10^{29} K) et c'est au tour de l'interaction nucléaire forte de se séparer de la force électrofaible. C'est à ce moment (si l'on peut dire) que, selon Alan Guth, l'énergie libérée provoque une inflation brutale de l'Univers dont la taille est multipliée par un facteur 10^{50} . C'est une expansion qui, partant de la taille d'un atome, nous amène au-delà de celle d'une galaxie. L'Univers, à ce stade, est une « soupe » brûlante de quarks et de rayonnements. Commence alors l'ère de l'interaction électrofaible (10^{-38} à 10^{-10} s). L'énergie cinétique des quarks acquise après l'inflation n'est plus suffisante pour combattre l'interaction nucléaire forte. Ils s'agglomèrent par trois pour former des nucléons : c'est la transition quarks-hadrons. L'Univers à cette époque n'est encore gouverné que par trois interactions naturelles : gravitationnelle, nucléaire forte et électrofaible. À $t = 10^{-10}$ s, il s'est refroidi à 10^{15} K. L'interaction électromagnétique se sépare de l'interaction nucléaire faible. Le mécanisme en fut vérifié expérimentalement en 1983 par la découverte des bosons W et Z.

Nous entrons, à ce moment, dans l'ère des particules de matière et antimatière (10^{-10} à 10^{-3} s). À $t = 10^{-3}$ s, la température de l'Univers tombe à 10^{12} K. Les quatre interactions sont maintenant séparées. Protons, antiprotons, neutrons et antineutrons, dans ce « milieu trop froid », ne peuvent plus être créés par la combinaison de deux photons. Les particules étant légèrement plus abondantes que leurs antiparticules, ce sont les survivants des protons et des neutrons qui forment la totalité de l'Univers tel que nous l'observons (nous avons du mal à imaginer que tout ce que nous voyons n'est en fait que le résidu d'une réaction mal équilibrée). Électrons et positrons proviennent toujours des interactions entre les photons. L'ère de la nucléosynthèse primordiale commence (10^{-3} s à 3 min). L'Univers est encore une « soupe » opaque formée de noyaux d'éléments légers, d'électrons libres et de rayonnements. Par le jeu des collisions à grande vitesse entre protons et neutrons (grande énergie cinétique), le processus de fusion nucléaire conduit à la formation de noyaux plus lourds que l'hydrogène (un proton) : le deutérium (un neutron et un proton), le tritium (deux neutrons pour un proton) et enfin l'hélium (un ou deux neutrons pour deux protons).¹ C'est à ce moment que se décide la composition de l'Univers. Le nombre de protons est à peu près identique au nombre de neutrons tant que la température est supérieure à 10^{11} K. En dessous de ce seuil, la réaction de transformation des protons en neutrons cesse tandis que la transformation des neutrons en protons se poursuit. Ces derniers dominent alors la scène dans un rapport de sept pour un. Lorsque la température devient inférieure à 10^{10} K, les produits de la fusion ne se détruisent plus : hélium, deutérium, tritium et lithium demeurent stables. Comme il y a sept fois plus de protons que de neutrons et qu'il faut la combinaison de deux neutrons avec deux protons pour former un noyau d'hélium, il reste donc douze protons soit

douze noyaux d'hydrogène. Âgé de trois minutes, l'Univers est suffisamment froid (10^9 K) pour que la fusion nucléaire s'arrête. Sa masse est alors composée pour 75 % de noyaux d'hydrogène et pour 25 % de noyaux d'hélium (figure 1.2) auxquels il faut ajouter des traces de ^2H , ^3H , ^3He , ^7Be et ^7Li . Voilà qui intéresse le géologue : les proportions entre les différents isotopes, deutérium/hydrogène par exemple, serviront de point zéro à toute variation enregistrée dans les roches. D'autre part, on constate sans grand effort qu'il n'y a pas d'éléments plus lourds que le lithium ; pas d'or, pas d'uranium. Il faut donc qu'une autre forge ait contribué à peupler le tableau périodique.

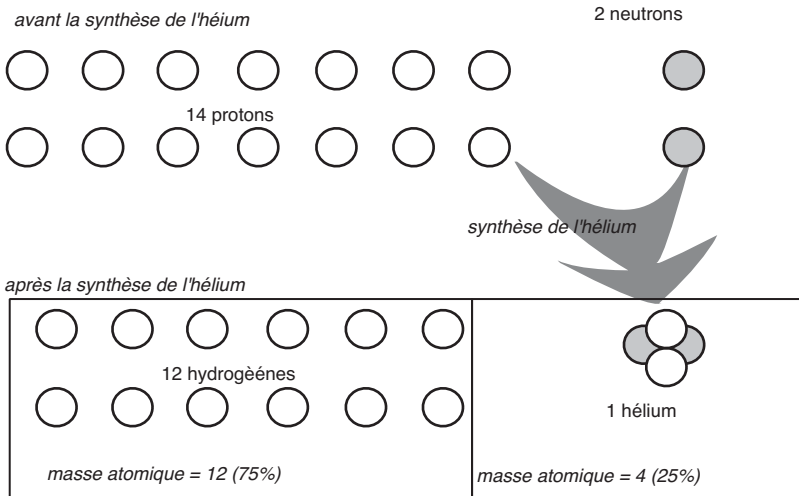


Figure 1.2

La nucléosynthèse primordiale (Big Bang) aboutit à un Univers composé de 75 % d'hydrogène (deutérium D et tritium T) et de 25 % d'hélium He.

Nous sommes, cette fois, à l'aube de l'ère des atomes (trois minutes à 380 000 années). Les quatre interactions, maintenant séparées, agissent d'une manière identique à ce que nous connaissons dans le monde actuel. Durant cette période, la matière est dans un état physique particulier : le plasma. En effet, il n'existe pas seulement l'état solide, liquide ou gazeux ; il faut y ajouter un quatrième état qui n'apparaît que pour des températures élevées. En l'occurrence, après le Big Bang, la matière est composée de noyaux d'hydrogène et d'hélium qui n'ont pas encore capté leurs électrons. Ces derniers, agités dans un mouvement incessant, créent autant d'obstacles sur le chemin des photons qui ne peuvent voyager sans être arrêtés par une collision : l'Univers reste opaque. Aucune lumière ne peut en sortir. Ce n'est qu'après 380 000 années que, s'étant refroidi à 3 000 K, les électrons ne sont plus suffisamment agités pour échapper à l'attraction électrique des protons coincés dans les noyaux atomiques. Ils sont donc capturés donnant naissance à de vrais atomes (un électron pour l'hydrogène, deux pour l'hélium). Ce phénomène est désigné sous le terme de « recombinaison ». Les électrons étant captifs, l'espace se libère et les photons peuvent voyager sans être arrêtés. L'Univers devient transparent. Transparent, certes, mais toujours sombre car aucune source de lumière ne brille : les étoiles n'existent pas encore. C'est l'âge des ténèbres. Il faut attendre que la gravité organise le chaos. On pense que les étoiles de première génération ne sont pas apparues avant 200 millions d'années inaugurant ainsi l'ère stellaire dans laquelle nous sommes toujours. Tout a commencé par la condensation gravitaire qui effondre localement les nuages d'hydrogène et d'hélium. Il semble que les premières étoiles aient été très massives ce qui explique qu'elles aient toutes disparu. Nous verrons plus loin que la durée de « vie » de ces astres est d'autant plus courte qu'ils sont gros et qu'elle se termine par un feu d'artifice gigantesque : les

supernovæ. Le bilan chimique à l'extinction de cette génération est évidemment la perte d'une petite partie de l'hydrogène et de l'hélium primordiaux consommés dans le cœur de ces étoiles. Les éléments légers tels que le lithium Li et le béryllium Be ont disparu tandis que d'autres, plus lourds, sont désormais présents dans les nuages interstellaires. C'est en effet au centre de ces astres massifs que la fusion nucléaire produit, par étapes, tous les éléments jusqu'au fer. Voilà la seconde forge dont nous avons besoin après le Big Bang. Cependant, elle n'est pas suffisante car elle ne produit pas l'or, le plomb ou l'uranium. C'est au moment de leur explosion finale que ces éléments se fabriquent (troisième forge). Nous y reviendrons plus loin. Les supernovæ dispersent cette matière et ensemencent les nuages interstellaires. Ils donneront à leur tour les étoiles de deuxième puis de troisième génération que nous observons aujourd'hui. Les spectres des quasars (noyaux de galaxies très actifs) les plus anciens que l'on découvre en utilisant les télescopes terrestres contiennent la signature de l'hydrogène comme cela est prévisible mais aussi celle du soufre, du carbone et de l'oxygène. C'est la trace indubitable qu'une population antérieure d'étoiles avait déjà produit ces éléments plus lourds que le lithium avant que le quasar ne se forme. Même présentée de façon aussi succincte, la théorie du Big Bang semble bien expliquer une grande partie de l'Univers tel que nous l'observons actuellement. La preuve la plus éclatante de cette réussite a été, sans conteste, la découverte par Penzias et Wilson (prix Nobel 1978) du rayonnement cosmologique, véritable fossile à $2,728 \pm 0,004$ K du flash libéré par l'Univers devenu transparent. Une telle précision semble hallucinante mais nous savons maintenant que les fluctuations de la température sont mesurées de façon fiable jusqu'à la quatrième décimale et qu'elles dessinent une structure avec des filaments et des grumeaux. C'est le visage de l'Univers 380 000 années après la singularité et avant la formation des étoiles et des galaxies. Cette

image bouleversante est actuellement peaufinée par le satellite Planck lancé le 14 mai 2009 par l'Agence Spatiale Européenne.

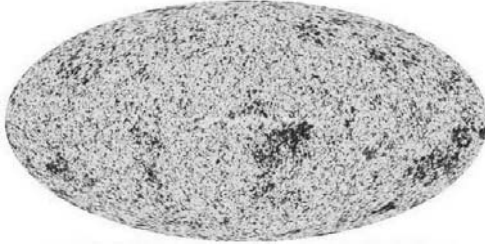


Figure 1.3

Le fond diffus cosmologique (carte établie par la mission Wilkinson Microwave Anisotropy Probe ou WMAP lancée par la NASA en juin 2001).

Connaissant la composition de l'Univers, les astrophysiciens ont pu en calculer la densité. C'est une donnée capitale pour expliquer le passé et prévoir l'avenir. Alors, est-ce la fin de la quête? L'essentiel serait-il désormais connu? Ce n'est pas si simple. Les abondances mesurées pour les éléments de l'hydrogène au lithium correspondent théoriquement à une densité de $3 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3$. Elle est voisine de la densité calculée à partir de la masse détectable (les étoiles qui brillent) mais loin de la densité critique 10^{-29} g/cm^3 qui permet à l'Univers d'être tel qu'il est observé. C'est gênant! Nous ne pouvons expliquer l'expansion qui semble être définitivement prouvée aujourd'hui. Pire, elle s'accélère semble-t-il! À plus petite échelle, la rotation même des galaxies est remise en cause: leur masse mesurée par la matière visible est notoirement insuffisante ce qui devrait entraîner leur dispersion dans l'espace. Tout se passe donc comme s'il manquait une énorme quantité de matière que l'on ne voit pas. C'est pour cela qu'elle

est appelée la matière noire. Pire encore, si cela est possible! Même si on était capable d'en mesurer la masse, elle ne suffirait pas. Le bilan serait toujours déséquilibré si on n'y ajoutait une quantité encore plus grande d'énergie noire. En clair (si j'ose dire après tout ce noir), nous ne comprenons même pas 10 % de l'Univers. Devant tant d'ignorance, les cheveux se dressent sur la tête! Cette énigme est l'un des grands défis de la physique théorique d'aujourd'hui. Le géologue reste pantois devant un tel mystère mais se console en pensant qu'aucune roche, de sa connaissance, n'est composée de matière noire. Ce qui compte pour lui, *in fine*, c'est de comprendre la partie visible de l'Univers qui renferme les éléments chimiques du tableau périodique ainsi que leurs isotopes dont il fait grand usage. Son regard est bien myope mais, même réduite à cette simple portion du visible, sa tâche représente déjà une véritable gageure. Après ce constat désolant, il nous faut nous attacher aux mécanismes de la nucléosynthèse stellaire, l'usine où se forment les atomes plus lourds que le lithium.

La nucléosynthèse stellaire

Les étoiles se forment, nous l'avons évoqué, par l'effondrement gravitaire local d'une petite portion de ces gigantesques nuages interstellaires qui sont très froids donc optiquement opaques. Seuls les télescopes infrarouges permettent d'identifier leur lieu de naissance (points plus chauds que le nuage environnant). En effet, la chute de matière sur la proto-étoile provoque son échauffement et s'accompagne de l'émission de différentes radiations dont la plupart sont observées dans le domaine de l'infrarouge et, parfois, du visible. Il arrive toutefois que certaines d'entre elles soient beaucoup plus énergétiques: ce sont les bouffées de rayons X. Comment cette condensation locale de la matière s'opère-

t-elle? Rien n'est immobile dans l'espace; les nuages interstellaires bougent et tournent. Localement, l'effondrement gravitationnel forme une partie plus dense: le globule. C'est le germe de la proto-étoile. Celle-ci concentre son héritage de mouvement dans une rotation très rapide (conservation du moment angulaire classiquement illustrée par la patineuse qui étend les bras).² De ce fait, son champ magnétique qui est puissant dès l'origine, se déforme: les lignes s'entortillent aux deux pôles créant un champ de force canalisé. C'est par là que s'éjecte à très grande vitesse (200 km/s soit 720 000 kilomètres par heure) une fraction de la matière qui est tombée sur l'astre (figure 1.4). Les deux jets polaires sont typiques de l'activité T-Tauri (du nom d'une étoile dans la constellation du Taureau). Simultanément, le globule s'effondre sur lui-même en formant un disque de poussières, aplati dans la région équatoriale et tournoyant autour de la proto-étoile. Des interactions magnétiques s'établissent et génèrent localement des températures très élevées. Gaz et poussières se transforment; des minéraux apparaissent par condensation, les plus réfractaires au plus près de l'étoile, les moins réfractaires dans les régions éloignées. Nous y reviendrons plus loin. En résumé, de multiples observations d'étoiles T-Tauri montrent qu'elles ont en commun les propriétés suivantes: elles font moins de trois masses solaires et contiennent beaucoup de lithium. Par leurs jets polaires, elles subissent une perte de masse importante (jusqu'à 0,4 masse solaire); elles sont caractérisées par un champ magnétique intense qui se manifeste par de larges taches noires à leur surface. Il faudra nous en souvenir car notre Soleil est passé, lui aussi, par cette étape, ce qui a eu des conséquences importantes pour la Terre.

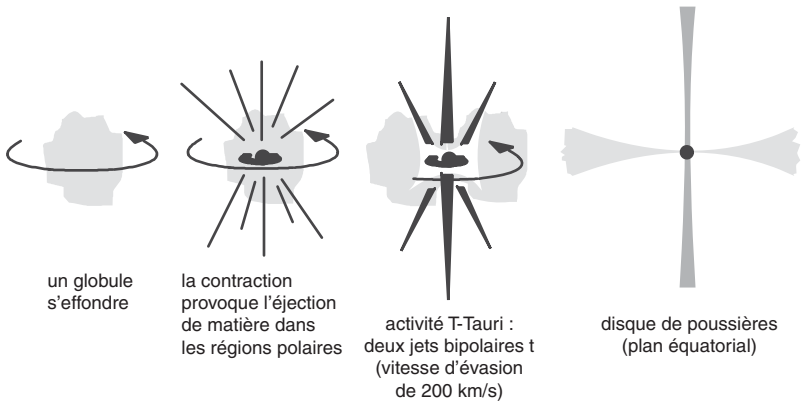


Figure 1.4

La formation progressive d'une étoile T-Tauri munie de son disque de poussières aplati dans la région équatoriale.

La proto-étoile ne reste au stade T-Tauri que durant une période réellement brève à l'échelle des temps cosmologiques: l'ordre de grandeur est la centaine de milliers d'années. Elle quitte sa « jeunesse échevelée » en se densifiant. Les jets bipolaires disparaissent. Son diamètre diminue tandis que pression et température internes augmentent. Si sa masse est suffisante (au moins 0,5 masse solaire), les conditions de la fusion de l'hydrogène en hélium sont alors atteintes dans son cœur. Extrêmement énergétique, ce processus génère une pression de radiation colossale capable de contrebalancer les effets de la gravité. Entre effondrement et expansion, l'étoile atteint un stade d'équilibre et son diamètre ne varie plus. Elle appartient désormais à la séquence principale, la grande diagonale dans le diagramme de Hertsprung-Russell qui montre comment sont reliées couleur et luminosité (figure 1.5). La couleur dépend de la température de surface des étoiles: bleues, elles sont très chaudes; rouges, elles sont plus froides. La luminosité quant à elle, dépend de

D'OU VIENNENT LES ATOMES?

leur masse. Certaines étoiles sont massives donc lumineuses mais relativement froides; elles appartiennent aux domaines des géantes et super-géantes rouges et se situent en dehors de la séquence principale. D'autres au contraire sont petites et réparties dans un large domaine de température, ce sont les naines blanches.

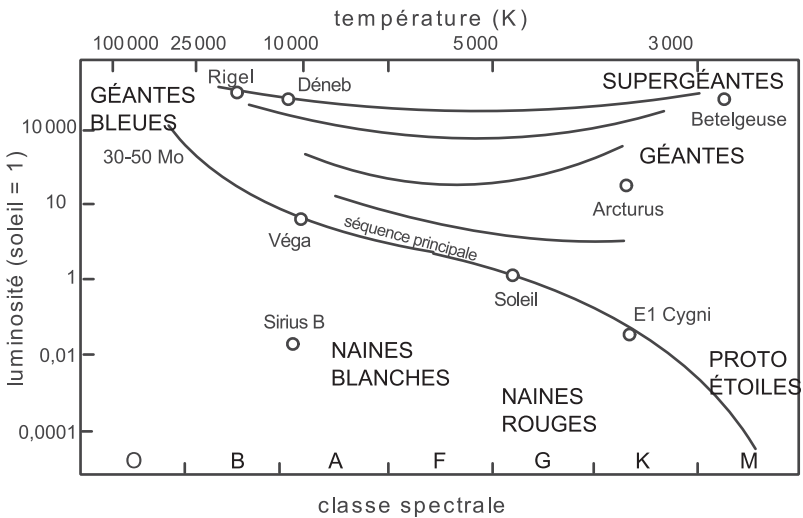


Figure I.5

Diagramme de Hertzsprung-Russell montrant la variation de la luminosité des étoiles en fonction de leur classe spectrale (température de surface).

Le sort des étoiles et leur durée de vie dépendent de leur masse. Les plus grosses meurent les premières (géantes), les plus petites durent plus longtemps (naines rouges). Les étapes qu'elles franchissent de leur naissance à leur disparition sont aujourd'hui bien connues. Nous en considérerons simplement deux catégories en

fonction du type de mort qui les attend: les étoiles moyennes dont le Soleil est un exemple et les géantes rouges (Bételgeuse) ou bleues (Sirius).

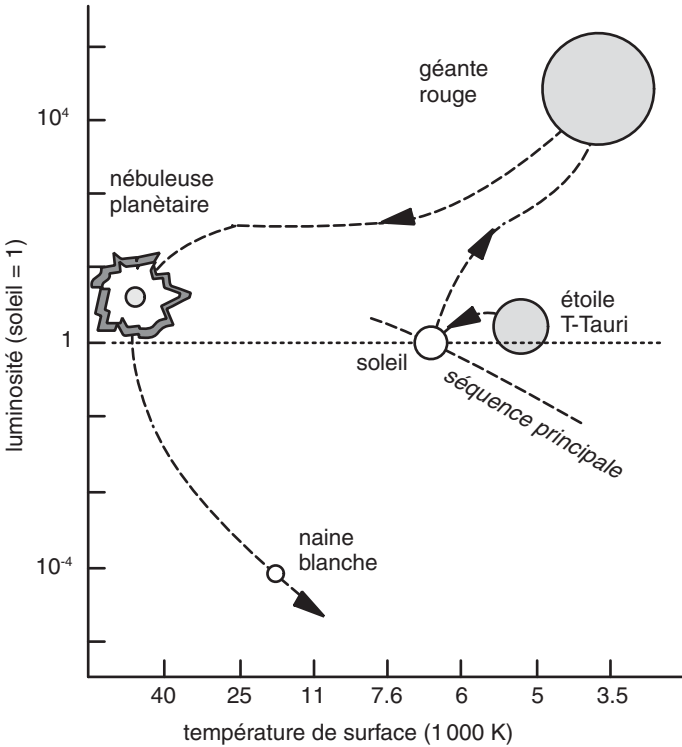


Figure I.6

Migration d'une étoile de la taille du Soleil dans le diagramme de Hertzsprung-Russell.

Une étoile moyenne comme le Soleil reste sur la séquence principale pendant environ une dizaine de milliards d'années. Il a un