

### MOTS-CLÉS

- ▶ Particules élémentaires, modèle standard, quarks, leptons, bozons, nucléosynthèse, cycle de Bethe.
- ▶ Phases cosmique, stellaire, interstellaire et planétaire.
- ▶ Diagramme de Hertzsprung-Russell, phase T. Tauri, supernova, pulsar.

Une des forces de la théorie du Big Bang est de pouvoir expliquer assez fidèlement la proportion actuelle des éléments chimiques dans l'Univers à partir d'un modèle de synthèse des noyaux des éléments chimiques. Pour être valide, la théorie doit notamment expliquer trois données principales :

- L'hydrogène est l'élément le plus abondant (90 % des atomes de l'Univers sont de l'hydrogène) et moins d'un atome sur mille n'est ni de l'hydrogène ni de l'hélium (*fig. 2.2*).
- Il existe une décroissance progressive de l'abondance des éléments en fonction des numéros atomiques croissants.
- Trois éléments échappent à cette corrélation, le lithium, le béryllium et le bore qui, malgré leur petit numéro atomique, sont parmi les éléments les moins abondants de l'Univers (*fig. 2.2*).

## 2.1 LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE : PARTICULES, NOYAUX ET ATOMES

La physique des particules s'est développée au cours du XX<sup>e</sup> siècle notamment grâce à l'étude des rayons cosmiques et surtout par l'analyse des expériences de collisions expérimentales réalisées dans les accélérateurs comme le LHC (Large Hadron Collider) du CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) à Genève<sup>1</sup>. Pourquoi accélérer et faire entrer en collision des particules ? La formule d'Einstein  $E = MC^2$  montre l'équivalence entre masse et énergie. Lorsque des particules entrent en collision, l'énergie qu'elles transportent est utilisée pour créer de nouvelles particules (dont la durée de vie est parfois très brève car elles sont souvent instables). Plus l'énergie disponible est élevée plus ces dernières seront lourdes et nombreuses. Pour classifier les centaines de types de particules ainsi observées et comprendre les liens et les interactions les reliant, une théorie a été élaborée dans les années 1960-1970 : Le **Modèle Standard** qui, s'il n'explique pas tout (cf. infra), a résisté jusqu'à maintenant à tous les tests expérimentaux. Le modèle standard suppose l'existence de douze

1. Pour plus d'informations, le lecteur pourra consulter l'excellent ouvrage collectif « Passeport pour les deux infinis », Dunod éd. 2016.

types de particules plus ou moins sensibles à quatre forces fondamentales transmises par quatre particules médiatrices ou **bosons** dont seules trois ont pu être mises en évidence (cf. infra).

### 2.1.1 Les forces fondamentales régissant l'univers

L'ensemble des phénomènes de l'univers peut être décrit grâce à quatre interactions ou forces fondamentales. Deux d'entre elles, la gravité et l'électromagnétisme nous sont familières, du fait de leur implication dans des processus de notre vie courante (chute des corps, électricité, magnétisme). Les deux autres, dites interactions « fortes » et « faibles » interviennent dans le monde de l'infiniment petit. L'interaction « forte » est responsable de la cohésion des noyaux atomiques. L'interaction « faible » gouverne les processus de désintégrations radioactives.

Chacune de ces forces est transmise par une ou plusieurs particules médiatrices (**bosons**) dont la masse gouverne la portée, plus ou moins grande, de l'interaction (plus leur masse est grande, plus la portée est courte, *tableau 2.1 et fig. 2.1*).

**TABEAU 2.1 Les caractéristiques des forces fondamentales :**

les quatre forces qui agissent sur les particules élémentaires sont classées par intensité décroissante par rapport à celle de la force « forte » prise arbitrairement comme unité.

Type	Intensité relative	Particules médiatrices (bosons)	Processus principaux dans lesquels ces forces sont impliquées
Force forte	1	Gluon	Cohésion des noyaux atomiques
Force électromagnétique	$10^{-3}$	Photon	Cortège électronique entourant le noyau
Force faible	$10^{-5}$	Boson $Z^0$ , $W^+$ , $W^-$	Désintégration radioactive bêta
Gravitation	$10^{-38}$	Graviton ? particule non encore observée	Chute des corps, astres, évolution des galaxies

### 2.1.2 Les particules élémentaires : Quarks et Leptons

On a découvert des centaines de types de particules sensibles à l'interaction « forte » regroupées sous le terme d'**hadrons** dont font partie les constituants des noyaux atomiques (**nucléons**) : les **protons** et les **neutrons**. La diversité des hadrons résulte du fait qu'ils sont constitués par la combinaison de constituants plus élémentaires les **quarks** qui sont maintenus ensemble par des gluons (responsables de l'interaction « forte »).

Il existe six types de quarks : les quarks u (up) et d (down) qui constituent les protons et les neutrons des noyaux atomiques, le quark « étrange » observé dans les rayons cosmiques et les quarks « charme », « bottom » et « top » observés dans les accélérateurs (*fig. 2.1*). À chaque quark correspond une antiparticule ou antiquark dont l'association constitue l'antimatière. Les quarks ont des charges électriques de  $-1/3$  pour les quarks down (d) ou de  $+2/3$  pour les quarks up (u).

Les quarks s'associent pour former les « particules composites » ou hadrons que l'on peut regrouper en deux types les **baryons** (pour les assemblages de trois quarks) et les **mésons** (pour les assemblages quark/antiquark). *Ainsi le proton (charge électrique +1) est un baryon constitué de deux quarks up (charge +2/3) et d'un quark down (charge -1/3) tandis que le neutron (charge électrique nulle) est un assemblage de deux quarks down et d'un quark up.*

Les **leptons** (*fig. 2.1*) sont aussi une famille de six particules élémentaires : l'**électron**, le **muon**, le **tau** et leurs trois **neutrinos** associés. Ces particules ont des propriétés voisines notamment elles ne sont pas sensibles à l'interaction forte.

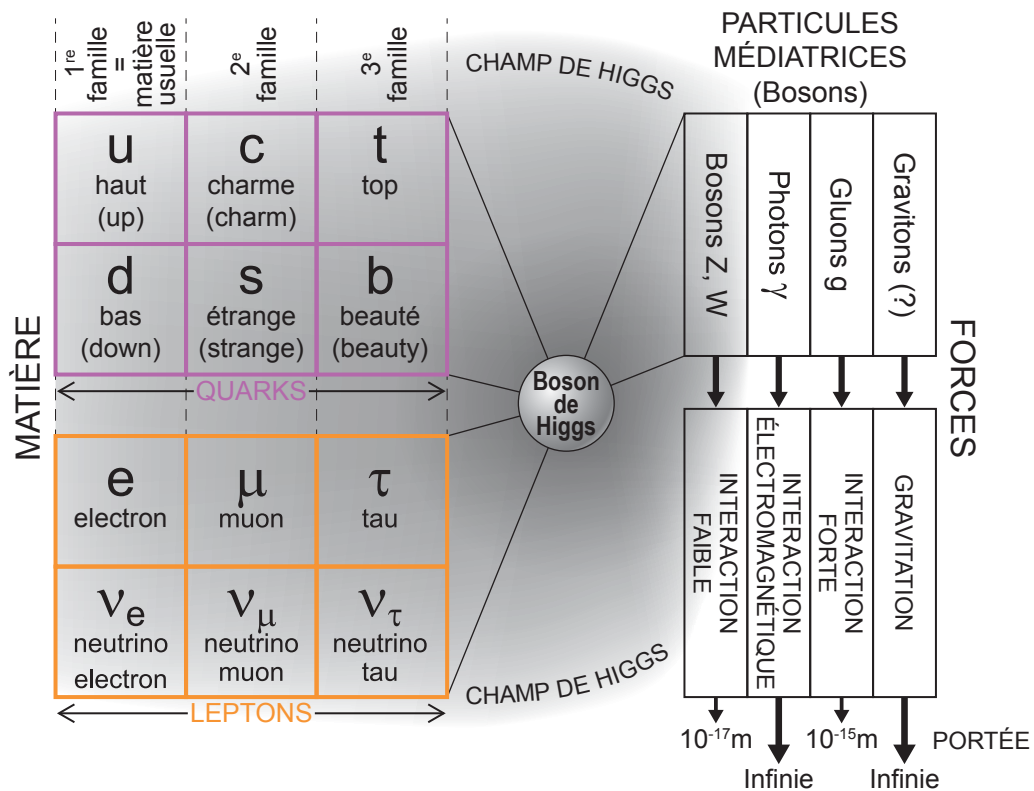


Figure 2.1 Le modèle standard.

Représentation des familles de particules constituant la matière et des forces mises en jeu dans l'Univers ainsi que leurs particules médiatrices. La matière « usuelle » est constituée des deux types de quarks et de leptons de la colonne de gauche. Le boson de Higgs (mis en évidence en 2012) et le champ de Higgs sont au cœur du modèle : la masse inertielle d'une particule résulterait de son degré d'interaction avec le champ de Higgs.

L'électron a été la première particule élémentaire découverte (1897), elle est stable et de charge électrique opposée à celle du proton (tableau 2.2). Le muon a les mêmes propriétés que l'électron hormis sa masse qui est 207 fois plus élevée. Il en est de même du tau qui est encore plus massif. Les neutrinos sont des particules élémentaires neutres produites lors de désintégrations causées par l'interaction faible telle la radioactivité bêta des noyaux atomiques instables. Leur masse, comparée à celle des autres particules, est très faible ce qui fait que l'on a longtemps pensé, à tort, que leur masse était nulle. **Quark up, quark down, électron et neutrino associé à l'électron sont les constituants élémentaires stables de la matière « usuelle »**, parfois dite « ordinaire » ou baryonique en référence aux particules qui la constitue.

Dans l'univers actuel, les populations de quarks et d'électrons sont sensiblement égales (un peu moins d'une unité par  $m^3$ , en fait, il y a 1,7 quark U et 0,8 quark D pour chaque électron). L'abondance des neutrinos est mal connue mais il semble qu'elle soit du même ordre que celle des photons qui sont les éléments les plus abondants (environ 400 par  $cm^3$ ) et qui proviennent, pour la plupart, du rayonnement « fossile » (fig. 1.6). Il convient de rappeler que la matière « usuelle » ne représente qu'une faible part de la masse de l'Univers (fig. 1.5), la majeure partie est représentée par la matière noire.

### 2.1.3 Le modèle standard

Les six types de quarks et de leptons forment l'ensemble des douze particules du modèle standard (fig. 2.1). Les particules sont classées dans un tableau à double entrée à trois colonnes (ou familles) comportant chacune quatre lignes correspondant à quatre types de particules. Dans chaque ligne les particules ont des propriétés communes et sont classées par ordre de masse croissante. La première colonne (famille, à gauche du tableau) regroupe les deux quarks et les deux leptons (électron et neutrino associé) qui forment la matière usuelle actuelle. Les particules médiatrices des interactions fondamentales sont présentées sur la droite du graphique avec la portée de chacune des interactions.

La grande réussite de la théorie du modèle standard est d'avoir unifié l'interaction électromagnétique et l'interaction faible (force électrofaible). Cependant le modèle standard n'est pas la « théorie du tout » mais simplement la théorie du « presque tout ». La gravité n'est pas intégrée au modèle (les gravitons n'ont pas encore été détectés). Une étape importante a toutefois été réalisée en 2012 par la détection dans l'expérience ATLAS du CERN d'une particule, **le boson de Higgs** (ou du moins la détection des particules lourdes résultant de sa dissociation), vecteur du champ de Higgs. La masse inertielle d'une particule résulterait de son degré d'interaction avec le champ de Higgs. Ainsi, une particule sans interaction avec le champ de Higgs, comme le photon, a une masse nulle. Inversement, plus cette interaction est importante, plus la particule est « lourde ». Le champ de Higgs affecterait toutes les autres particules élémentaires (même le neutrino qui a une masse non nulle contrairement à ce qui a longtemps été pensé). L'absence de masse du photon explique la portée infinie de la force électromagnétique et la masse des bosons Z et W, qui interagissent avec le champ de Higgs, explique la portée très limitée de la force faible. De même la masse nulle des photons explique pourquoi ils se déplacent dans le vide à une vitesse (299 792 458 m/s) qu'aucune particule massive ne peut atteindre.

### 2.1.4 Les noyaux et les atomes

Ainsi que nous l'avons vu plus haut, les quarks, maintenus ensemble par des gluons (responsables de l'interaction « forte »), s'associent pour constituer des nucléons : protons (*deux quarks u et d'un quark d*) et neutrons (*deux quarks d et d'un quark u*). Dans l'univers il existe autant de protons (charge +1) que d'électrons (charge -1) et cinq fois plus de protons que de neutrons (la majorité des neutrons existants étant incorporés dans les noyaux d'hélium (fig. 2.2 et 2.6))

TABLEAU  
2.2

#### Les caractéristiques des composants de la matière usuelle :

On doit noter que l'électron est une particule élémentaire tandis que les nucléons, proton et neutron sont des particules composites formées par l'assemblage de quarks. L'essentiel de la masse du proton et du neutron ne provient pas de la masse des quarks (seulement une dizaine de  $\text{MeV}/c^2$  pour le proton) mais de l'énergie des gluons qui maintiennent ces quarks ensemble

Les masses sont exprimées en kg et en  $\text{MeV}/c^2$  qui est une unité d'énergie reliée à la masse par la formule  $E = MC^2$ .

	Électron	Proton	Neutron
Masse	$9,11 \cdot 10^{-31}$ kg $0,511 \text{ MeV}/c^2$	$1,67 \cdot 10^{-27}$ kg $938 \text{ MeV}/c^2$	$1,68 \cdot 10^{-27}$ kg $938 \text{ MeV}/c^2$
Charge électrique	-1	+1	0

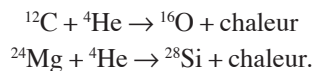
## Encart 2.1 – La matière est-elle stable ?

Il se pourrait que les quarks aient une durée de vie limitée quoique très longue (de l'ordre de  $10^{32}$  années). La matière, elle-même, ne serait donc pas stable. Dans cette hypothèse, la Terre perdrait environ 1 g tous les 20 000 ans et le Soleil près de 20 g par an.

Les nucléons se regroupent en noyaux (*fig. 2.3*) qui captent des électrons pour former des atomes. Le nombre d'électrons est égal au nombre de protons, il définit le numéro atomique (1 pour l'hydrogène, 2 pour l'hélium, etc.) et commande les propriétés chimiques de l'élément. Les forces de liaisons des nucléons (forces nucléaires) sont énormément plus grandes que celles qui relient noyaux et électrons (forces électromagnétiques).

Partant du noyau le plus simple, celui de l'hydrogène (1 proton), si l'on ajoute un neutron, on obtient un nouveau noyau dont la charge est toujours + 1 (il s'agit toujours de l'élément chimique hydrogène) mais sa masse est + 2 (c'est un isotope de l'hydrogène, on l'appelle hydrogène lourd ou deutérium). En fusionnant 2 noyaux de deutérium, on fabrique un noyau d'hélium (2 protons + 2 neutrons). En fait, la difficulté réside dans la façon de fabriquer le neutron et de l'injecter dans le noyau d'hydrogène. Quand l'hydrogène est porté à une température de quelques millions de degrés, un certain nombre de protons, en capturant des électrons, se transforment en neutrons. La formation du deutérium résulte donc, en fait, de la réunion de 2 hydrogènes dans des conditions de température très élevées. Même dans ces conditions, cette fusion est très difficile, aussi l'abondance du deutérium est très faible dans la nature (1/100 à 1/1 000 de celle de l'hydrogène) d'autant plus que le passage du deutérium à l'hélium est relativement facile. Ce dernier, extrêmement robuste, constitue la structure principale permettant de bâtir des noyaux plus complexes (*fig. 2.6*). La structure formée par la réunion de 2 noyaux d'hélium (charge + 4, masse 8) n'est pas stable mais la fusion de 3 noyaux (six protons et six neutrons) conduit à une structure de charge + 6 et de masse 12 correspondant au carbone ( $^{12}\text{C}$ ). De même la fusion de 4 noyaux d'hélium conduit à l'oxygène ( $^{16}\text{O}$ ). En combinant la structure hélium, les « superstructures » carbone et oxygène et, en y ajoutant éventuellement le deutérium, on peut fabriquer tout une série de nouveaux éléments. Classiquement, les astrophysiciens représentent ces évolutions sur un diagramme protons/neutrons (*fig. 2.6*).

Chaque opération de fusion ou de capture neutronique est une réaction nucléaire qui peut se résumer comme une équation de bilan telle que :



La quantité d'énergie dégagée par les réactions nucléaires est considérable. De plus, elles nécessitent des températures extrêmement élevées pour se produire (il faut que les noyaux soient suffisamment agités et énergétiques pour fusionner lors des collisions). Ainsi, faut-il une température de l'ordre du million de degrés pour amorcer la formation d'hydrogène, de 100 millions de degrés pour fusionner les noyaux d'hélium et de 600 millions de degrés pour réunir les noyaux de carbone et d'oxygène.

Toute la nucléosynthèse est régie par cet antagonisme : nécessité d'avoir un milieu suffisamment chaud pour que les réactions se produisent mais aussi suffisamment froid pour que les structures nucléaires produites ne soient pas détruites.

## 2.2 NUCLÉOSYNTÈSE ET ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

Nous allons envisager comment la synthèse des différents noyaux a pu se réaliser au cours de l'évolution de l'Univers à partir de l'explosion initiale (Big Bang). Ce phénomène s'est déroulé en quatre étapes dans des milieux différents : le cosmos, les étoiles, le milieu interstellaire, les planètes (*fig. 2.2*).

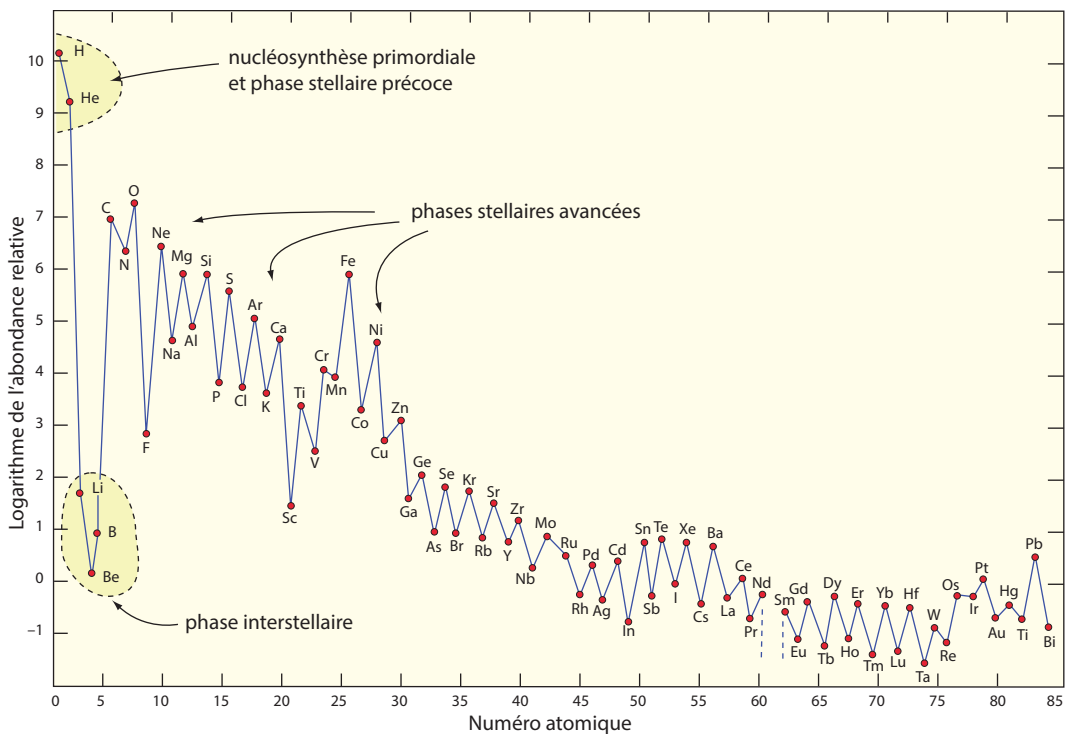


Figure 2.2 Abondance relative des différents éléments chimiques et les principales phases de la nucléosynthèse.

### 2.2.1 La phase cosmique ou nucléosynthèse primordiale

On ne sait que peu de chose sur les événements qui se sont déroulés au cours de la première seconde suivant le « Big Bang ». Dans la matière nucléaire « normale » les quarks ne sont jamais libres, ils sont liés par trois (confinés) sous l'action des gluons. Cependant la théorie de l'interaction forte prédit que si la température augmente suffisamment, l'agitation thermique prend le dessus sur les forces de cohésion nucléaire et les noyaux se vaporisent en donnant un gaz d'hadrons constitués de protons, de neutrons et d'autres particules de même type, constituées de quarks et/ou d'antiquarks (fig. 2.3). Si la température continue d'augmenter (au-dessus de mille milliards de degrés) les hadrons eux-mêmes se disloquent et l'on obtient un nouvel état de la matière : le **plasma de quarks et de gluons** (QGP pour l'acronyme anglais) où les quarks et gluons sont déconfinés.

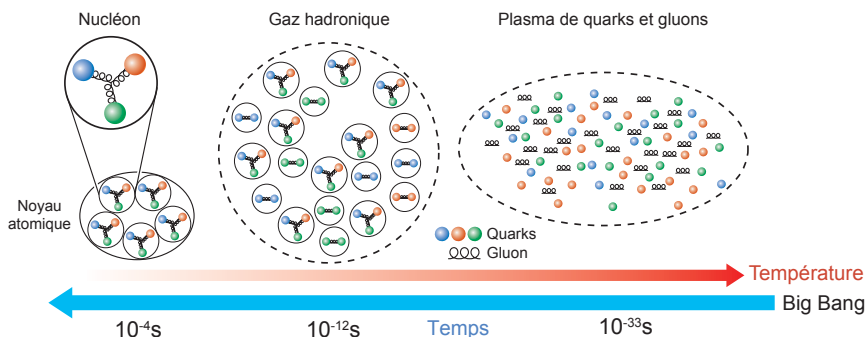


Figure 2.3 L'évolution de la matière nucléaire en fonction de la température.

L'évolution inverse se serait produite dans l'univers au cours des  $10^{-4}$  secondes suivant le Big Bang.

On pense que les premiers instants de l'Univers correspondraient à l'évolution inverse. Le QGP existerait vers  $10^{-33}$  seconde après le Big Bang, la transition du QGP vers le gaz hadronique se serait produite après  $10^{-12}$  seconde. Du fait des températures extrêmes, il y a une agitation intense dans le gaz hadronique, les collisions d'hadron sont nombreuses et il en résulte parfois, vers  $10^{-4}$  seconde, la formation de noyaux de deutérium qui ont une durée de vie très brève car ils sont pratiquement détruits immédiatement par les photons très énergétiques.

Cette phase primordiale de  $10^{-32}$  seconde après le Big Bang est appelée *phase d'inflation*. Elle est caractérisée par l'existence de fluctuations quantiques qui ont généré deux types d'ondes, les ondes gravitationnelles et les ondes de densité (fig. 2.4). En 2014, les scientifiques de l'observatoire BICEP2 ont annoncé avoir déterminé une polarisation dans la lumière du fond diffus cosmologique, qui serait un enregistrement fossile, dans la lumière de l'Univers actuel, des effets des ondes gravitationnelles dues à l'inflation. Dans la même année, les scientifiques travaillant autour des données du satellite Planck, dont la mission est la cartographie du fond diffus cosmologique, ripostaient en avançant que les effets d'artefacts dus à des poussières cosmiques n'avaient pas été pris en compte par l'équipe de BICEP2. Cette polémique illustre l'énorme intérêt et les enjeux considérables de ces recherches sur l'origine du cosmos.

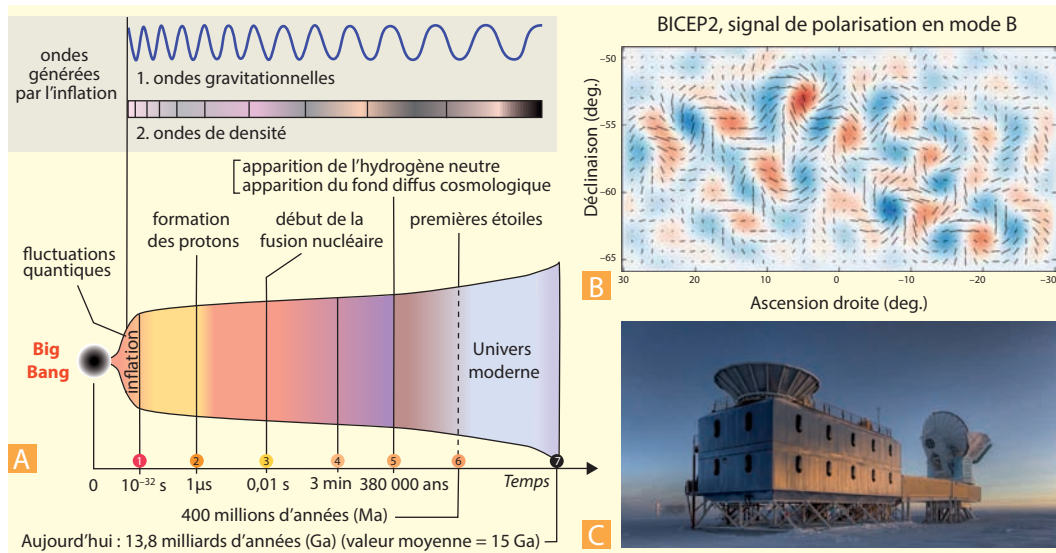


Figure 2.4 L'inflation et le fond diffus cosmologique.

**A.** Une représentation simplifiée de l'évolution de l'Univers élaborée en tenant compte des découvertes des missions des satellites spatiaux et des radiotélescopes depuis les années 2000 (*modifiée d'après un document BICEP2, 2014*). On met en évidence les principales étapes de l'histoire très précoce comprenant notamment l'inflation jusqu'à  $10^{-32}$  seconde après le Big Bang et l'apparition du fond cosmologique diffus à 380 000 ans. Avant cette date, l'Univers est opaque à cause des interactions constantes entre la matière et la lumière (photons). L'inflation est un événement très violent qui a généré par fluctuations quantiques des ondes gravitationnelles et de densité, comme le prévoyait la théorie de la relativité générale. Ces ondes sont amplifiées par l'inflation. Les fluctuations de la distribution de la matière par les ondes gravitationnelles ont laissé des empreintes sur les radiations du fond diffus cosmologique.

**B.** Début 2014, la polarisation de la lumière du fond diffus aurait été mise en évidence par le radiotélescope BICEP2, situé en Antarctique, qui a scruté 1 % du ciel durant 600 jours à l'aide de 512 antennes. Cette carte de l'Univers montre la polarisation en mode B résultant d'une empreinte des ondes gravitationnelles sur les radiations du fond diffus. Les régions en rouge vibrent dans le sens des aiguilles d'une montre, les régions en bleu vibrent en sens inverse (*document BICEP2*). Ces résultats sont remis en cause par les équipes de la mission Planck (*voir fig. 1.6*), qui estiment que des artefacts dus à la polarisation par les poussières stellaires pourraient avoir été enregistrés fournissant un signal dont l'interprétation est donc erronée.

**C.** Vue d'un des bâtiments du radiotélescope BICEP2 (*document BICEP2*).

## Partie I ■ La Terre : une planète dans l'Univers

Au bout d'une seconde, la température est tombée aux environs du milliard de degrés (grâce à l'expansion, la chaleur est évacuée) et l'énergie des particules devient comparable à celle qui lie les nucléons. Le nombre et la durée de vie des deutérons deviennent plus importants. Ils peuvent capturer des protons et des neutrons pour former des noyaux à 3 ou 4 nucléons (fig. 2.3). Ainsi, au bout de quelques minutes, l'Univers est formé d'une population abondante de noyaux d'hydrogène et de  $^4\text{He}$ , de populations beaucoup plus faibles de deutérium, de  $^3\text{He}$  et de  $^7\text{Li}$  (fig. 2.2). Cette intense période de création nucléaire porte le nom de « **nucléosynthèse primordiale** ».

### Encart 2.2 – La première crise de croissance de l'Univers

La nucléosynthèse primordiale va rapidement s'arrêter car d'une part le noyau  $^4\text{He}$  est une structure stable mais « fermée » qui ne s'associe pas facilement et d'autre part la température a beaucoup trop décliné pour que les fusions nucléaires puissent se produire. L'Univers vit sa première crise de croissance, elle durera environ un million d'années, le temps que la température baisse suffisamment (jusqu'à quelques milliers de degrés) pour qu'on quitte le domaine du nucléaire pour entrer dans celui de l'électromagnétisme.

L'évolution de l'Univers ne reprend que lorsque, la baisse de la température aidant, les protons sont capables de capturer un électron pour former des atomes d'hydrogène. Ces atomes ont des durées de vie brèves car ils sont soumis à un bombardement photonique intense. La température diminuant, les photons deviennent moins énergétiques et la population d'atomes augmente. Vers 3 000 °K, l'Univers est formé d'atomes d'hydrogène et d'hélium tandis que, pratiquement d'une façon contemporaine, les atomes d'hydrogène se sont associés deux par deux pour former des molécules (molécules et atomes naissent donc en même temps).

### Encart 2.3 – La seconde crise de l'Univers : l'émission du rayonnement fossile

L'Univers entre alors dans une deuxième crise car la molécule d'hydrogène est aussi une structure « fermée » qui ne s'associe que très difficilement. Pourtant, malgré cette crise, la capture des électrons par les protons représente une étape importante dans l'évolution de l'Univers. En effet, les électrons libres représentaient une « entrave » au passage de la lumière. Leur capture progressive va rendre l'Univers « transparent », c'est de cette période (environ 300 000 ans après le Big Bang) que date le « **rayonnement fossile** », ou fond diffus cosmologique, tel que les satellites COBE, WMAP et Planck ont pu l'enregistrer (fig. 1.6).

**L'énergie contenue dans la matière de l'Univers va alors devenir prépondérante par rapport à celle du rayonnement.**

## 2.2.2 La phase stellaire

L'évolution de l'Univers semble compromise, la température diminue, il n'y a en présence que des structures « fermées » qui, du fait de l'expansion, s'éloignent de plus en plus les unes des autres ; les probabilités d'association deviennent donc de plus en plus faibles.

### a) Le rôle de la gravité

Un nouveau phénomène va relancer le système, c'est la gravité. La capture des électrons, en rendant l'Univers « transparent » permet à la gravitation de vaincre la pression de la matière et du rayonnement. Dans cette sorte de « fluide homogène » qu'est alors l'Univers, vont se produire des agrégations gravitationnelles et des masses de matières vont se condenser pour donner naissance aux galaxies.

Les galaxies apparaissent donc comme des systèmes liés (par les forces gravitationnelles) qui échappent à l'expansion et au refroidissement universel. En leur sein, de nouvelles condensations de la matière gazeuse vont se produire en donnant naissance aux étoiles. Les étoiles sont de gigantesques réacteurs nucléaires produisant l'énergie nécessaire à leur activité lumineuse. À leur niveau, les

phénomènes gravitationnels provoquent une élévation de température permettant le déclenchement des réactions nucléaires (fusion des noyaux atomiques) qui à leur tour dégagent de la chaleur.

#### Encart 2.4 – La formation des Galaxies

Le mécanisme de formation des galaxies est encore très mal connu ; pour certains, il pourrait s'agir d'une fragmentation progressive (fluide universel → superamas → amas → galaxie → étoiles), pour d'autres, se formerait d'abord des groupes d'étoiles qui se réuniraient ultérieurement en galaxies puis en amas et en super-amas.

### b) Les différents types d'étoiles

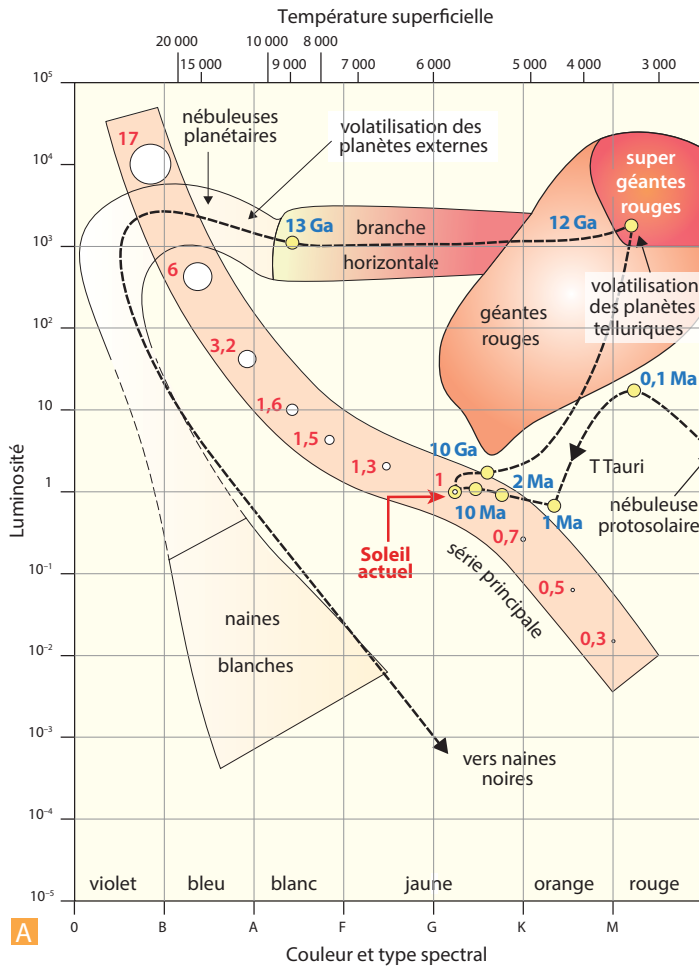
Les astronomes ont l'habitude de classer les étoiles d'après l'analyse de la lumière qu'elles émettent. Ceci permet de déterminer leur température de surface (couleur), la quantité d'énergie rayonnée (luminosité) et leur composition chimique (spectroscopie). On utilise classiquement, un diagramme (**diagramme de Hertzsprung-Russell**, *fig. 2.5*) combinant la luminosité stellaire absolue et la couleur stellaire (à laquelle est associée une température superficielle). On constate, tout d'abord, que les différentes étoiles se regroupent préférentiellement dans certaines régions du graphe. Chaque région correspond à un type de production d'énergie.

La majorité des étoiles se placent sur une diagonale qu'on nomme la **série principale**. De plus, la position des étoiles dans la série principale dépend de leur masse (les petites sont en bas vers le rouge, les grosses vers le violet). Pour assurer leur brillance, les étoiles de cette série transforment leur hydrogène en hélium. Ces étoiles restent dans la série principale tant qu'elles n'ont pas épuisé leur réserve d'hydrogène, cela peut prendre soit des milliards d'années pour les petites étoiles soit seulement quelques millions d'années pour les géantes bleues. Le Soleil occupe une position intermédiaire et l'on admet que sa durée d'appartenance à la série principale est d'environ 10 milliards d'années.

Un autre groupement d'étoiles se situe à droite dans la partie haute du graphe de la figure 2.5, c'est le domaine des géantes et supergéantes rouges. Ces étoiles transforment les noyaux d'hélium en carbone et oxygène. À gauche de ce domaine, se trouve la branche horizontale qui correspond à des étoiles plus évoluées qui consomment leur carbone ou leur oxygène voire leur silicium. Au-delà, se situe le domaine des nébuleuses planétaires puis la répartition des étoiles sur le graphique fait un brusque coude pour aboutir au domaine des naines blanches.

### c) L'évolution des étoiles et la nucléosynthèse

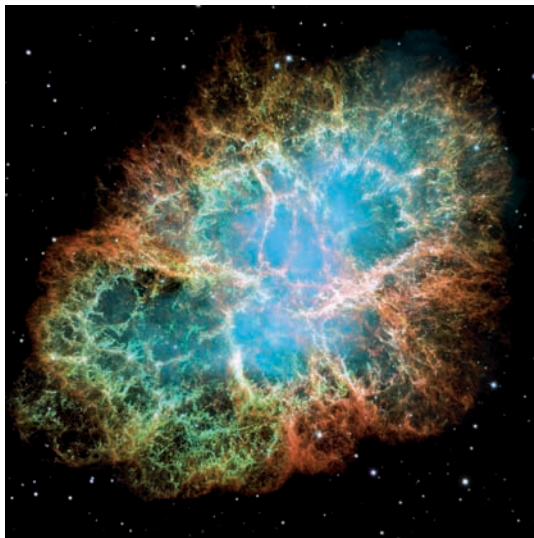
À la suite de l'effondrement et de la contraction du nuage de matière interstellaire qui leur a donné naissance, la température augmente et les étoiles naissantes émettent d'abord des rayonnements radio puis infrarouges. Dans ces nouvelles conditions les produits issus de la phase cosmique deviennent instables, le nombre et l'énergie des photons augmentent, les molécules se fragmentent en atomes qui perdent leurs électrons périphériques. Les collisions entre toutes ces particules deviennent fréquentes, d'infrarouge la lumière passe au rouge (l'étoile devient visible) puis, suivant sa masse, elle vire au jaune ou au bleu. Cette première phase de l'évolution des étoiles est appelée **phase T. Tauri** ; elle est brève, dans le cas du Soleil, elle a duré au maximum 15 Ma (*fig. 2.5*). La température augmente jusqu'à ce que le cœur de l'étoile approche 15 millions de degrés. Dans ces conditions la nucléosynthèse peut reprendre, les noyaux d'hydrogène vont de nouveau s'unir pour donner du deutérium, de l'hélium 3 et de l'hélium 4. Pour les mêmes raisons que dans la nucléosynthèse primordiale, la complexité nucléaire n'ira pas plus loin mais les réactions nucléaires mises en jeu suffisent à couvrir les besoins énergétiques de l'étoile qui s'installe dans un état « stationnaire » (elle appartient alors à la série principale, son rayon ne se modifie plus, sa couleur est stable). C'est le cas du Soleil depuis 4,5 milliards d'années et cette situation devrait durer encore environ 5 milliards d'années (*fig. 2.5*).



**Figure 2.5 Évolution des étoiles.**

**A.** Diagramme de Hertzsprung-Russell. L'axe des ordonnées est gradué en luminosité stellaire absolue (exprimée par rapport à celle du Soleil prise comme unité), celui des abscisses représente les couleurs « stellaires » auxquelles on peut associer une température de surface. La masse des étoiles de la série principale, en chiffres rouges, est exprimée par rapport à la masse du Soleil prise comme unité. On a représenté l'évolution du Soleil, passée et à venir, le long de la courbe en pointillés noirs. Les chiffres en bleu expriment le temps écoulé depuis la naissance du Soleil (en Ma et en Ga). Après la phase T. Tauri, le Soleil fait partie de la série principale. On estime que la durée d'appartenance du Soleil à la série principale sera de l'ordre de 10 milliards d'années. Dans 5 milliards d'années, le Soleil devrait donc évoluer vers les géantes rouges (volatilisation des planètes internes), puis vers les nébuleuses planétaires (volatilisation des planètes externes), pour enfin s'éteindre lentement en évoluant vers la zone des naines blanches et des naines noires.

**B.** La nébuleuse du Crabe résulte de l'explosion d'une étoile massive en supernova, explosion qui fut rapportée par des astronomes chinois et japonais en 1054, car la lumière était visible en plein jour. D'énormes quantités de matières et d'énergie sont alors éjectées dans l'espace, et ce processus dure encore. Des atomes d'oxygène et de soufre sont présents dans les débris. Un pulsar se trouve au centre de la nébuleuse et émet des vents d'électrons (couleur bleue). La couleur rouge est due à la fusion de l'hydrogène. Mosaïque réalisée à partir des données du télescope spatial Hubble de la NASA lancé en 1990 (photo NASA/ESA/J. Hester and A. Loll, Arizona State Univ.).



Quand l'étoile a épuisé, en son cœur, ses réserves d'hydrogène, pour compenser ses dépenses énergétiques, elle se contracte de nouveau et la température reprend son ascension. Les collisions particulières sont nombreuses, mais les structures provenant de la rencontre de deux noyaux d'hélium ne sont pas stables et se dissocient immédiatement ; en revanche si un troisième noyau percute cette structure « fugace », on obtient un noyau stable de carbone. On peut se demander pourquoi une telle structure ne s'est pas réalisée au cours de la nucléosynthèse primordiale. Cela provient du fait que la probabilité de rencontre de trois noyaux est très faible. Au cours de la nucléosynthèse primordiale, les conditions de température nécessaires à cette synthèse n'ont été réalisées que pendant un très court moment, tandis que la durée de la phase stellaire permet ce type de rencontre. Une nouvelle phase de fusion nucléaire s'amorce qui va subvenir aux besoins énergétiques de l'étoile, la contraction se ralentit, sa couleur vire au rouge tandis que son atmosphère subit une expansion importante qui traduit, sans doute, la différenciation chimique entre le centre (hélium et carbone) et la surface (hydrogène). L'étoile acquiert une structure en couches concentriques (*fig. 2.6*). Au centre les températures permettent la transformation d'He en C et O, au-delà la transformation de H en He tandis que la surface trop froide est hors du domaine des réactions nucléaires. C'est le stade des **géantes rouges** (*fig. 2.5*).

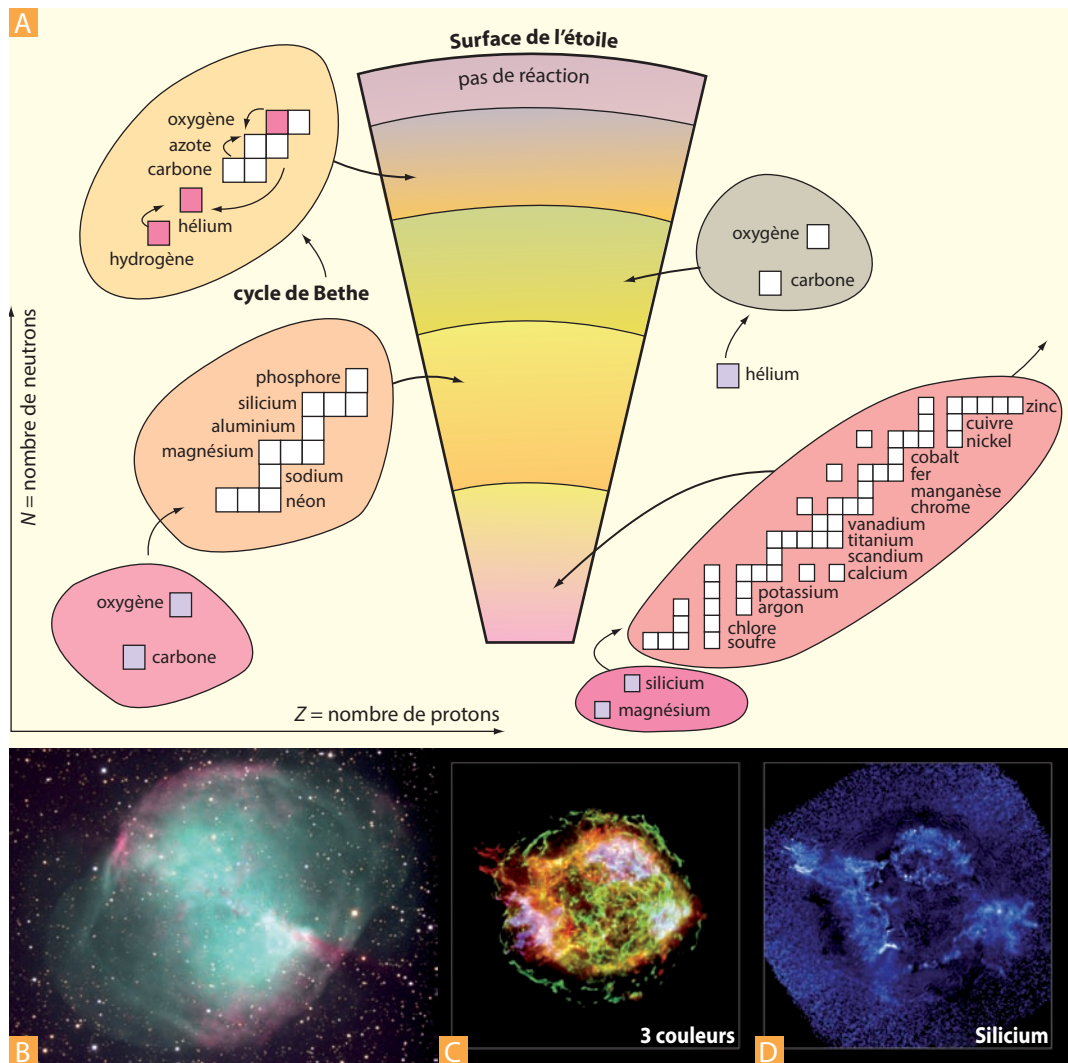
### Encart 2.5 – Le rôle catalytique du carbone

Indépendamment du rôle prépondérant que jouera, ultérieurement, le carbone dans la constitution des molécules complexes, la présence de celui-ci est capitale pour la suite de la nucléosynthèse car il catalyse et accélère la transformation hydrogène-hélium (**cycle de Bethe**) en permettant de « sauter » l'étape deutérium (*fig. 2.6*). Un noyau de carbone capture successivement quatre protons du milieu ambiant, lors de la quatrième adjonction la structure se brise en donnant 1 noyau d'hélium et 1 noyau de carbone (2 protons ont été transformés en neutrons). Cette action catalytique du carbone nécessite de très fortes températures et ne peut se dérouler que dans les étoiles massives.

Une fois l'hélium épuisé au cœur de l'étoile, la contraction va reprendre, la température augmente de nouveau et le carbone devient le nouveau « combustible » stellaire. De sa fusion naîtront des éléments nouveaux tels que le néon, le sodium, l'aluminium, le silicium, le phosphore et le soufre. Nous avons alors atteint des températures de l'ordre du milliard de degrés. Dans ces conditions, les réactions au centre de l'étoile produisent de plus en plus de neutrinos, particules qui s'échappent facilement (beaucoup plus facilement que les photons) de l'étoile. Cette production de neutrinos augmente la déperdition énergétique et provoque des contractions de plus en plus rapides des couches extérieures de l'étoile.

Après l'épuisement du carbone survient la fusion, entre 2 et 5 milliards de degrés, du néon, de l'oxygène puis du silicium. L'étoile a alors une structure complexe (*fig. 2.6*). Du fait de la production croissante de neutrinos, ces phases sont de plus en plus courtes. En quelques milliers d'années, les noyaux intermédiaires (de Si jusqu'au groupe des métaux tels Fe, Ni, Cr, Zn...) sont engendrés et vont conduire, par une longue chaîne de captures neutroniques jusqu'aux noyaux les plus lourds.

L'évolution nucléaire semble pouvoir aller à son terme, mais les températures internes de l'étoile avoisinent alors les 5 milliards de degrés et l'énergie thermique risque de dépasser l'énergie de liaison des nucléons. Les structures nucléaires nouvellement formées risquent donc d'être détruites. Cependant, la déperdition énergétique de l'étoile est alors très forte (en grande partie à cause de l'évacuation des neutrinos) et pour compenser cela, elle se contracte de plus en plus rapidement. Il en résulte, au bout d'une suite de phénomènes complexes, une gigantesque explosion (c'est le stade **supernova**) qui évacue la masse stellaire dans l'espace, où elle se refroidit, et dissémine ainsi les éléments lourds synthétisés (*fig. 2.5 et 2.6*).



**Figure 2.6** Les réactions nucléaires dans les étoiles.

**A.** Structure et réactions nucléaires à l'intérieur d'une étoile massive évoluée. L'étoile présente une structure en couches concentriques. Les réactions qui requièrent les plus hautes températures se déroulent au centre de l'étoile, la surface étant trop froide pour être le lieu de réaction nucléaire. Les différentes réactions et les noyaux résultants sont représentés sur des diagrammes de Segré, protons/neutrons (nombre de neutrons,  $N$ , en ordonnée et nombre de protons,  $Z$ , en abscisse). Le cycle de Bethe (CNO) catalyse la transformation de H en He.

**B.** La nébuleuse planétaire de l'halète (Messier 27) est formée de gaz éjectés par l'étoile centrale très chaude, et excités par le rayonnement ultraviolet de cette étoile. L'éjection de matière intervient dans les dernières phases de la vie des étoiles, ce qui introduit des atomes synthétisés par l'étoile dans le milieu interstellaire. Celui-ci s'enrichit ainsi en éléments lourds. Image NASA et *Hubble Heritage Team* (StScI/AURA).

**C et D.** Images en rayons X du reste de la supernova Cas A (constellation de Cassiopée). En C, chaque couleur correspond à une gamme différente d'énergie des rayons X, qui signent ainsi par ce spectre la présence de certains noyaux atomiques. En D, la couleur bleue a été isolée, elle correspond au spectre des noyaux de silicium éjectés dans l'explosion. Image du satellite américain Chandra (*photo NASA*).

L'explosion de la supernova a, en quelque sorte, protégé de la destruction, les noyaux lourds nouvellement synthétisés. Cette libération d'atomes lourds va jouer un rôle accélérateur pour la suite de l'évolution nucléaire en augmentant l'opacité du gaz galactique. Une matière opaque se condense plus facilement qu'une matière transparente, il en résulte que le taux de formation d'étoiles aux dépens du gaz galactiques augmente.

### Encart 2.6 – Le pic d'abondance du fer

Pour déclencher les réactions de fusion nucléaire conduisant à des éléments plus lourds que l'argon, il faut des températures telles qu'il se détruit presque autant de noyaux qu'il s'en fabrique. Seuls les noyaux les plus stables vont résister à ces cycles création/destruction ; parmi les éléments susceptibles d'être fabriqués, le fer présente le noyau le plus stable ce qui explique sa surabondance (« pic du fer ») par rapport aux éléments voisins (*fig. 2.2*).

Après l'explosion, il reste un résidu stellaire, correspondant au cœur de l'étoile qui s'est replié sur lui-même, qu'on nomme étoile à neutrons (la densité y est très forte, les structures nucléaires ont éclaté et il ne reste au cœur de l'étoile que des neutrons liés par la force de gravité). Ces structures portent aussi le nom de « **pulsars** » car elles émettent une lumière intermittente (seuls les pôles magnétiques émettent de la lumière d'où l'aspect intermittent de l'émission du fait de la rotation du pulsar, suivant un axe incliné par rapport à l'axe magnétique). Il se pourrait que, dans certains cas, le résidu stellaire devenant encore plus dense, on passe alors à un « trou noir ».

Dans le cas des étoiles de petite taille (telles que le Soleil), l'évolution est moins brutale (*fig. 2.5*). Après la phase géante rouge, elles libèrent les produits de la nucléosynthèse au cours du stade nébuleuse planétaire dont la matière nébulaire correspond aux couches externes de l'étoile. Le cœur se refroidit progressivement en devenant une naine blanche, puis une naine noire lorsqu'elle a épuisé sa chaleur interne.

### 2.2.3 La phase interstellaire

La radioastronomie a mis en évidence l'existence de poussières interstellaires qui remplissent l'espace. La connaissance de leur structure est en pleine évolution. Les premiers modèles (grains de graphite) se sont compliqués par adjonction de pellicule de glaces contenant divers éléments et, peut-être même, des structures organiques comme les porphyrines dont l'importance biologique pourrait alors être considérable si cette découverte se confirme.

### Encart 2.7 – Les principales molécules interstellaires identifiées

2 atomes :  $H_2$ ,  $CH^+$ ,  $C_2$ ,  $CN$ ,  $CO$ ,  $CS$ ,  $OH$ ,  $NO$ ,  $NS$ ,  $SO$ ,  $SiO$ ,  $SiS$ ,  $HCl$ ,  $PN$   
 3 atomes :  $H_2O$ ,  $C_2H$ ,  $HCN$ ,  $HNC$ ,  $HCO^+$ ,  $HCS^+$ ,  $NH_2^+$ ,  $H_2S$ ,  $HNO$ ,  $OCS$ ,  $SO_2$ ,  $HOC^+$ ,  $SiC_2$ ,  $H_3^+$   
 4 atomes :  $NH_3$ ,  $H_2CO$ ,  $H_2CS$ ,  $HNCO$ ,  $HNCS$ ,  $C_3H$ ,  $C_3O$ ,  $C_3N$ ,  $C_2H_2$ ,  $HOCO^+$ ,  $HCNH^+$ ,  $HSCC$ ,  $HsiCC$   
 5 atomes :  $CH_4$ ,  $C_4H$ ,  $CH_2NH$ ,  $CH_2CO$ ,  $NH_2CN$ ,  $HCOOH$ ,  $HC_3N$ ,  $C_3H_2$ ,  $SiH_4$ ,  $CH_4$ ,  $CH_2CN$   
 6 atomes :  $CH_3OH$ ,  $CH_3CO$ ,  $CH_3CN$ ,  $CH_3SH$ ,  $NH_2CHO$ ,  $H_2CCH_2$ ,  $C_5H$   
 7 atomes :  $CH_3NH_2$ ,  $CH_3C_2H$ ,  $CH_3CHO$ ,  $CH_2CHCN$ ,  $HC_5N$ ,  $CH_2(CN)_2$   
 8 atomes :  $CH_3COOH$ ,  $CH_3C_3N$ ,  $HCOOCH_3$   
 9 atomes :  $CH_3CH_2OH$ ,  $(CH_3)_2O$ ,  $CH_3CH_2CN$ ,  $HC_7N$ ,  $C_2H_5OH$ ,  $C_2H_5CN$   
 10 atomes :  $CH_3C_5N$   
 11 atomes :  $HC_9N$   
 13 atomes :  $HC_{11}N$

Ces poussières correspondent aux restes des supernovae et des nébuleuses planétaires qui se sont largement répandus et dont la température est tombée à quelques dizaines de degrés absolus. De nouveau,



Voir encart 2.7

nous sommes dans le domaine de l'électromagnétisme ; il y a fabrication d'atomes à partir des noyaux, et l'hydrogène va jouer un rôle primordial en se combinant avec les atomes lourds pour former des molécules complexes (eau, ammoniac, méthane et hydrocarbures) qui se trouvent sous forme d'une pellicule de glace sur les poussières. Le rayonnement cosmique fragmente les molécules présentes dans les couches de glace et crée ainsi des possibilités de nouvelles recombinaisons. Les progrès de la spectroscopie ont mis en évidence une surprenante complexité des molécules interstellaires. On y constate le rôle prépondérant du carbone (un seul composé à base de silicium a été découvert), les éléments C, H, O, N sont présents dans le milieu interstellaire et l'on y trouve (malgré les conditions peu favorables) des molécules organiques fragiles qui semblent pouvoir être les premiers maillons vers l'apparition de la vie.

La phase interstellaire ne se limite pas à la fabrication de molécules complexes, elle joue aussi un rôle dans la nucléosynthèse. Dans les étapes précédentes, nous avons sauté certains éléments en passant directement de l'hélium au carbone. Il manque **le lithium, le béryllium et le bore** qui sont, parmi les noyaux légers, les éléments les moins abondants de l'Univers ; **ils devraient être presque aussi abondants que l'hélium, or ils sont 10<sup>8</sup> fois moins abondants** (fig. 2.2). Ces noyaux sont très fragiles et ne résistent pas aux conditions réalisées dans les étoiles. Ils ne sont fabriqués que tardivement, dans le milieu interstellaire, sous l'influence des rayons cosmiques qui fragmentent les noyaux d'oxygène, d'azote et de carbone.

C'est un des processus les plus lents de l'Univers ce qui explique la très faible abondance de ces trois noyaux (Li, Be, B).

### 2.2.4 La phase planétaire

Malgré la présence de molécules complexes, le milieu interstellaire n'est pas un milieu très favorable à la poursuite de l'évolution moléculaire. Il présente trois inconvénients majeurs, le froid (qui limite la réactivité des molécules), les distances (le pourcentage de rencontres donc de recombinaisons de structures est faible), la présence de rayonnements cosmiques et ultra-violets (qui détruisent les molécules fragiles). Pour que l'évolution moléculaire se poursuive il faut un milieu dense, qui favorise les contacts, un milieu protecteur, et un milieu à température modérée qui accélère les réactions sans détruire les molécules fragiles. Ces conditions sont réalisées dans les planètes. Ce sont des structures liées gravitationnellement à une étoile qui apporte, par son rayonnement, une partie de l'énergie nécessaire à une température correcte. Le reste de l'énergie provient de la chaleur initiale de la planète qui est due aux réactions nucléaires et au bombardement météoritique. De plus, si sa masse est suffisante, la planète retient les gaz et une atmosphère se constitue. Sur les planètes, il y a donc des possibilités de recombinaisons multiples. Dans ce cadre, l'eau joue un rôle capital par son pouvoir de dissolution. Sa concentration sur la planète Terre (la « Planète Bleue ») n'est sans doute pas étrangère à la réalisation des suites de phénomènes complexes qui, par la possibilité d'autoduplication des molécules organiques, ont conduit à l'apparition de la vie.

Une étape importante est la réalisation de structures photosensibles (du type chlorophylle) capables de capter l'énergie solaire et de la transformer en énergie chimique. Nous quittons alors le domaine de l'évolution chimique pour celui de l'évolution des cellules et des organismes telle que nous la connaissons depuis les travaux de Darwin.

#### À retenir

- La théorie du « Big Bang » permet d'établir un modèle de synthèse des différents noyaux atomiques qui est cohérent avec l'abondance actuelle des éléments chimiques dans l'Univers et qui rend compte des anomalies positives (pic du fer) ou négatives (faibles concentrations du lithium, du béryllium et du bore). Cette nucléosynthèse se déroule en quatre phases dans des milieux différents : le cosmos, les étoiles, le milieu interstellaire et les planètes.