

Dr Chabou Moulley Charaf
Université Ferhat Abbas, Sétif 1
Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre
Département des Sciences de la Terre
Année universitaire 2015-2016

LMD -Sciences de la Terre et de l'Univers-
Master Géologie des ressources minérales et
substances utiles
Cours de Géochimie fondamentale

Cours 2. Formation des éléments chimiques

1. La nucléosynthèse

On appelle nucléosynthèse l'ensemble des processus qui conduisent à la formation (ou synthèse) des éléments chimiques (noyaux atomiques plus précisément) dans l'Univers.

La nucléosynthèse est un phénomène fondamental qui explique la répartition et l'abondance des éléments chimiques dans l'Univers.

2. Les réactions nucléaires à l'origine de la nucléosynthèse

2.1. Fusion de noyaux

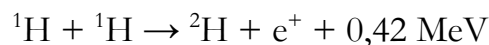
La fusion de deux noyaux pères donnera un noyau fils. La masse totale des deux noyaux pères est supérieure à la masse du noyau fils formé. L'excès de masse est libéré sous forme d'énergie selon la loi d'Einstein : $E = \Delta m \cdot c^2$.

Δm = différence de masse

c = vitesse de la lumière dans le vide.

Les réactions de fusion sont donc exothermiques (elles libèrent de l'énergie).

Exemple :



Pour que les réactions de fusion se produisent, il faut que les noyaux de même charge soient animés de vitesses importantes afin de vaincre les forces de répulsion électrostatique. Ceci est possible si les températures sont très élevées (augmentation de l'agitation thermique et donc de la vitesse des particules). Pour l'hydrogène, cette température qui permet la fusion est de 10 millions de kelvins. Cette température augmente avec la charge des noyaux. Pour l'hélium, elle est de 100 millions de kelvins et pour l'oxygène, 2 milliards de kelvins.

2.2. Capture de neutrons

La capture neutronique est une réaction nucléaire dans laquelle un noyau atomique absorbe un ou plusieurs neutrons ce qui conduit à la formation d'un noyau plus lourd. Etant donné que les neutrons ne possèdent pas de charge électrique, ils peuvent plus facilement entrer dans un noyau que les protons chargés positivement et qui subissent de ce fait la répulsion électrostatique. La fusion des neutrons dans un noyau atomique émet un rayonnement gamma et libère donc de l'énergie. Ces réactions sont exothermiques.

Etant donné que la durée de vie moyenne d'un neutron à l'extérieur d'un noyau atomique est de 15 minutes, les réactions de capture neutronique ne peuvent se produire que dans des sites de production de neutrons. Ces sites correspondent à des milieux denses et très chauds.

2.3. Photodésintégration

La photodésintégration est une réaction nucléaire dans laquelle des photons de très haute énergie (cette énergie est acquise à très haute température) interagissent avec des noyaux atomiques lourds en les brisant en noyaux plus légers. La photodésintégration absorbe l'énergie des photons : elle est donc endothermique. Les températures requises pour le déclenchement de ces réactions sont de l'ordre de 3 à 4 milliards de kelvins.

2.4. Spallation

La spallation (de l'anglais to spall, produire des éclats) est une réaction nucléaire au cours de laquelle des particules de très grande énergie entrent en collision avec des noyaux lourds en les brisant en noyaux plus légers.

3. Les différents types de nucléosynthèses dans l'Univers

Le tableau périodique des éléments contient 92 éléments chimiques naturels : toute la matière de l'Univers visible est constituée de ces éléments avec une prédominance des éléments les plus simples du tableau : l'hydrogène et l'hélium. L'Univers est constitué de **75 % d'hydrogène et 23 % d'hélium**. Les autres éléments chimiques ne représentent que 2 % de la composition de l'Univers.

L'hydrogène et l'hélium ont été formés essentiellement au tout début de l'histoire de l'Univers, entre 3' et 15' après la naissance de l'Univers. C'est ce que l'on appelle la **nucléosynthèse primordiale**.

Les autres éléments du tableau périodique jusqu'au **fer (Fe)** ont été formés à l'intérieur des étoiles. C'est la **nucléosynthèse stellaire** (stella est un mot latin qui veut dire étoile).

Les éléments plus lourds que le fer ont été formés lors de l'explosion des étoiles (supernovae). C'est la **nucléosynthèse explosive**.

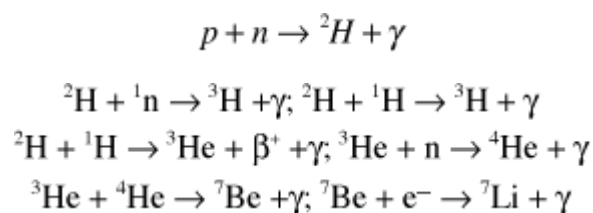
Enfin certains éléments légers (lithium, béryllium, bore) ont été essentiellement formés dans le milieu interstellaire par collision entre les rayons cosmiques et les noyaux atomiques. **C'est les réactions de spallation**.

3.1. La nucléosynthèse primordiale

La théorie la plus largement acceptée concernant l'origine de l'Univers est **la théorie du Big Bang**. Selon cette théorie, l'Univers est né d'une gigantesque explosion, le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années. Il est entré en **expansion** et a évolué (s'est refroidi et dilué) à partir d'un état **extrêmement chaud et dense**.

3 minutes après le Big Bang, quand la température de l'Univers aura baissé à 10^9 K, le rayonnement de l'Univers n'aura plus assez d'énergie pour casser les **noyaux** atomiques. Alors, protons et neutrons pourront se lier pour former les premiers noyaux légers de l'Univers. C'est la **nucléosynthèse primordiale**. Les noyaux formés durant cette période sont ceux du deutérium (isotope de l'hydrogène contenant 1 proton et 1 neutron), le tritium (isotope de l'hydrogène contenant 1 proton et 2 neutrons), l'hélium 3 (isotope de l'hélium contenant 2 proton et 1 neutron), l'hélium 4 (2 protons et 2 neutrons) et enfin le lithium 7 (3 protons et 4 neutrons). La réaction qui se produit le plus est celle de la transformation d'un noyau d'hydrogène (1 proton) en noyau d'hélium 4.

Les réactions de fusion nucléaire qui se sont produites durant la nucléosynthèse primordiale sont les suivantes :



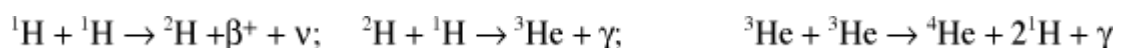
Etant donné qu'au début de ce processus, l'Univers était composé de 2 neutrons pour 14 protons, avec la transformation du proton en noyau d'hélium, on aura 1 noyau d'hélium (2 neutrons + 2 protons) formé pour 12 protons. Etant donné que le nombre de masse de l'hélium est de 4 alors que celui du proton est de 1, la proportion de l'hélium formé durant la nucléosynthèse primordiale sera de 4/16, soit 25 %. Celle de l'hydrogène sera de 75 %. **La proportion actuelle de l'hélium dans l'Univers (25 %) ne peut s'expliquer que dans le cadre de la nucléosynthèse primordiale. Aucun processus dans l'Univers ne peut former la quantité actuelle d'hélium.**

La nucléosynthèse primordiale va durer 15' car la température de l'Univers aura baissé et ne sera plus suffisante pour permettre aux réactions de fusion de se produire. L'Univers sera alors composé de 75 % d'hydrogène, 25 % d'hélium et des traces (0,01 %) d'autres éléments légers formés durant cette étape (deutérium, tritium, hélium 3, lithium 7). C'est la composition actuelle de l'Univers qui a donc été acquise durant cette courte étape qui a duré entre 3' et 15' après le Big-Bang.

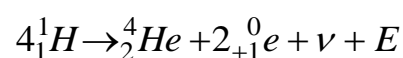
3.2. La nucléosynthèse stellaire

Les étoiles sont des boules de gaz composées essentiellement d'hydrogène et d'hélium au cœur de lesquelles se produisent des réactions nucléaires qui en font une source de lumière et de chaleur. Elles **naissent** de la contraction d'un nuage **de gaz et de poussières (les nébuleuses gazeuses)**. Lorsque la température au centre de la protoétoile devient suffisante (supérieure à **10 millions de degrés**) les réactions thermonucléaires se déclenchent : quatre noyaux d'hydrogène se combinent pour donner un noyau d'hélium. Cette réaction s'accompagne d'un dégagement important d'énergie (dû à une perte de masse qui est transformée en énergie selon la loi d'Einstein $E = m.c^2$) qui fournit à l'étoile son rayonnement. Pendant la majeure partie de leur vie, les étoiles tirent leur énergie de cette réaction de fusion. On dit que l'étoile est dans la **séquence principale**, et connaît alors une longue période de stabilité qui peut durer de quelques millions à plus de 10 milliards d'années.

Lorsqu'une étoile de type solaire gagne la séquence principale les réactions thermonucléaires qui se produisent au cœur de l'étoile sont appelées **chaînes proton-proton**, ou **chaîne p-p**, et comprennent trois réactions principales : la fusion de deux noyaux d'hydrogène (1 proton) produit un noyau de deutérium (1 proton et 1 neutron) : dans cette réaction, un proton se transforme en neutron avec libération d'un électron. Le deutérium synthétisé capture un autre proton et forme un noyau d'hélium 3 (2 protons et un neutron) ; enfin, deux noyaux d'hélium 3 fusionnent en noyau d'hélium 4 (deux protons et deux neutrons) ce qui libère en même temps deux protons.



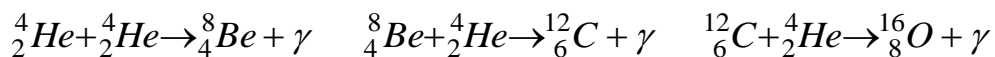
On peut résumer ces réactions dans la réaction suivante :



L'énergie libérée lors de ces réactions permet de maintenir le cœur de l'étoile stable pendant des milliards d'années.

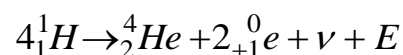
Lorsque l'hydrogène est épuisé au cœur de l'étoile, celui-ci se contracte et sa température augmente. La température des couches supérieures va augmenter en même temps : l'hydrogène de ces couches qui était resté jusque là intact commence à se transformer en hélium. Cette combustion des couches périphériques de l'étoile provoque la dilatation des régions externes, l'étoile grossit, sa température de surface diminue et devient rouge. L'étoile n'appartient plus à la séquence principale dans le diagramme H-R : c'est **une géante rouge**.

Lorsque la température du cœur de l'étoile atteint 100 millions de degrés, la fusion des noyaux d'hélium se déclenche et donne naissance à des noyaux de carbone et d'oxygène selon les réactions suivantes :



(Le béryllium n'est pas stable à l'intérieur des étoiles et se transforme instantanément en carbone) L'énergie libérée par la fusion de l'hélium stoppe la contraction de l'étoile, mais cette phase ne dure pas longtemps car l'hélium est très vite consommé. Lorsque tout l'hélium est épuisé, l'étoile se contracte à nouveau. Cependant, pour les étoiles dont la masse est < 6 masse solaire, la température centrale ne devient jamais suffisante pour fusionner des noyaux plus lourds. Le cœur se contracte jusqu'à ce que la densité atteigne un seuil où les électrons sont arrachés des noyaux et se rapprochent les uns des autres. On obtient alors un gaz d'électrons dégénérés qui stoppe la contraction du cœur de l'étoile qui se transforme en **naine blanche**.

Pour les étoiles dont la masse est supérieure à 6 masses solaires, l'évolution est différente. La phase de la séquence principale est la même que dans le cas précédent : quatre noyaux d'hydrogène se combinent pour donner un noyau d'hélium selon la réaction :



avec cependant deux différences :

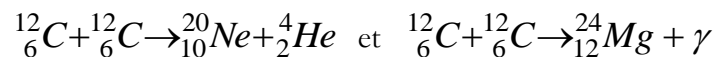
- d'abord la réaction se fait par l'intermédiaire des noyaux de carbone (C), azote (N) et oxygène (O), qui servent de catalyseurs : c'est le cycle CNO.
- Ensuite, la durée de passage de ces étoiles dans la séquence principale est beaucoup plus courte, car le cœur de l'étoile est massif et chaud et consomme rapidement son hydrogène.

Au bout de quelques millions d'années, lorsque l'étoile aura épuisé ses réserves en hydrogène, le cœur va se contracter à nouveau jusqu'à ce que la température dépasse 100 millions de degrés. La fusion de l'hélium se déclenche ($3 {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$ et ${}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma$), ce qui va stopper

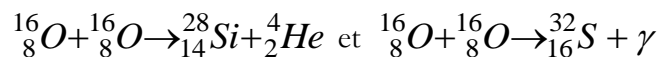
la contraction pour un moment. Les couches externes de l'étoile se sont entre temps dilatées et l'astre est devenu une supergéante rouge.

Lorsque l'étoile aura consommé tout son hélium, le cœur va se contracter, mais dans ce cas la masse de l'étoile est suffisante pour que la température atteigne les seuils de déclenchement de fusion des noyaux plus lourds que l'hélium. Dans ce cas, le cycle de « combustion-épuisement du combustible central-contraction de cœur-augmentation de température-allumage du combustion suivant » se reproduit plusieurs fois.

Lorsque la température atteint 800 millions de degrés, les noyaux de carbone 12 fusionnent pour donner naissance au néon 20 et au magnésium 24 selon les réactions :



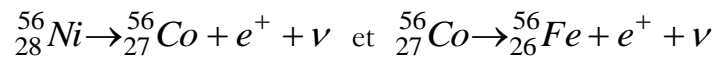
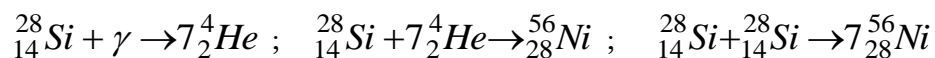
A 2 milliards de degrés, les noyaux d'oxygène 16 fusionnent en silicium 24 et en soufre 32 selon les réactions :



La combustion de l'oxygène est la dernière phase de fusions d'éléments identiques au cœur de l'étoile.

A des températures supérieures à 3 milliards de degrés, les noyaux de silicium sont brisés par les photons (qui sont très énergétiques à ces températures colossales, **photodésintégration**) qui libèrent des particules (protons, neutrons et noyaux d'hélium 4) qui sont ensuite capturés par les noyaux de ${}^{28}\text{Si}$ présents pour former tous les éléments jusqu'au fer, le noyau le plus stable dans l'Univers.

Les principales réactions qui se produisent sont les suivantes :



Les différentes étapes précédentes sont de plus en plus courtes et les températures atteintes de plus en plus élevées. Par exemple, la fusion du silicium dure seulement 1 jour. Le tableau 1 donne les durées des différents stades évolutifs des étoiles selon leurs masses. La structure de l'étoile est alors composée d'un noyau de fer enveloppée de couches concentriques dont la composition correspond du centre vers l'extérieur aux produits de fusion successifs : silicium, soufre, oxygène, néon, carbone et hélium. L'enveloppe externe est composée d'hydrogène et d'hélium. C'est la structure en « pelure d'oignons » (figure 1).

Tableau 1. Durée des stades évolutifs des étoiles

	Etoile de 0,3 masse solaire	Etoile de 1 masse solaire	Etoile de 25 masses solaires
Fusion de l'hydrogène	800 milliards d'années	10 milliards d'années	7 millions d'années
Fusion de l'hélium		10 millions d'années	500 000 ans
Fusion du carbone			200 ans
Fusion du néon			1 an
Fusion de l'oxygène			5 mois
Fusion du silicium			1 jour

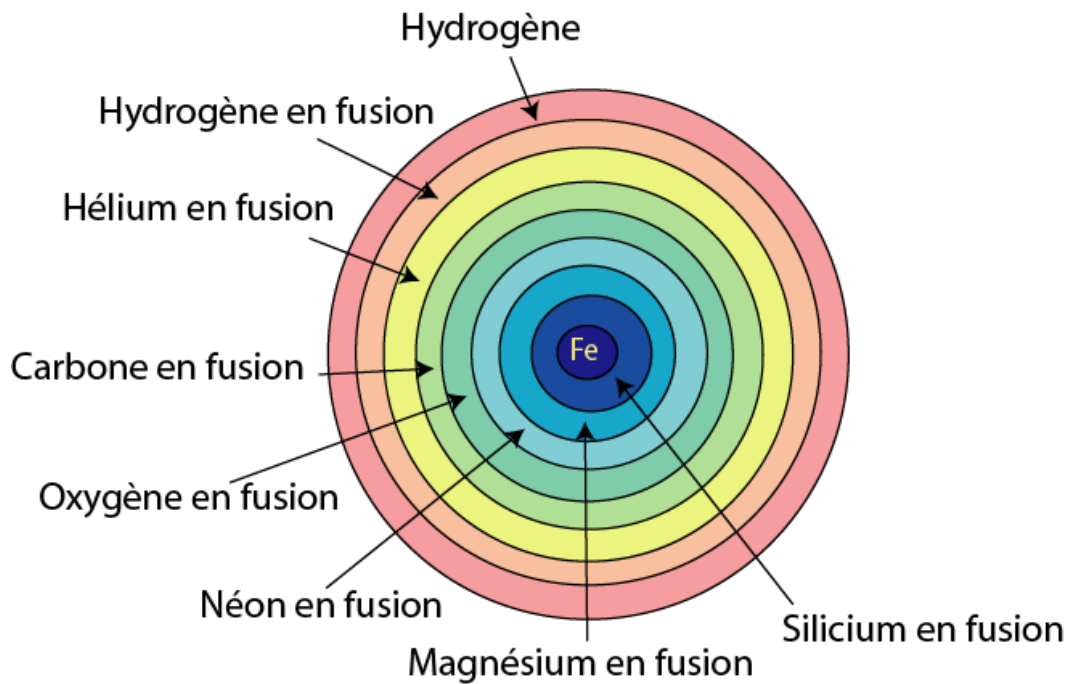


Figure 1. Le cœur d'une étoile massive ayant une structure en « pelure d'oignons » avant l'explosion d'une supernova. Dans chaque couche, un élément brûle et le centre de fer est inerte.

Le fer est très stable et les réactions de fusion s'arrêtent à ce stade. Le cœur de l'étoile s'effondre alors en une fraction de seconde et la masse du cœur de l'étoile est telle que même la pression du gaz d'électrons dégénères est insuffisante pour stopper la contraction. Dans ce cas, l'évolution ultérieure va dépendre de la masse du cœur de l'étoile :

- Si elle est supérieure à 1,4 masse solaire et inférieure à 3 masses solaires, la contraction va s'arrêter lorsque les électrons seront tellement proches des noyaux qu'ils se combinent avec les protons pour donner des neutrons : $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$. Le cœur de l'étoile sera alors composé essentiellement de neutrons et se transformera en un objet extrêmement dense d'une dizaine de kilomètres de diamètres appelé : **étoile à neutrons**. La densité de ces objets est de l'ordre de 100 millions de tonnes par cm^3 . Les pressions engendrées par la répulsion entre les neutrons seront suffisantes pour stopper la contraction de l'étoile.
- Si la masse du cœur de l'étoile est supérieure à 3 masses solaires, alors rien ne pourra stopper la contraction de l'étoile. Celle-ci se poursuivra jusqu'à ce que la force de gravité du cœur de l'étoile soit telle que même la lumière ne pourra s'échapper de cet objet : le cœur se transforme alors en **trou noir**. C'est les objets les plus denses de l'Univers.

3.3. La nucléosynthèse explosive

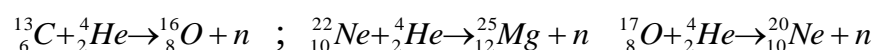
Lorsque le cœur de l'étoile se transforme en étoile à neutrons ou en trou noir, la contraction de l'étoile qui se faisait à des vitesses extrêmement élevées s'arrête brusquement (en quelques fractions de secondes) : les enveloppes externes de l'étoile qui étaient entraînées à grandes vitesses dans cette chute vont rebondir sur la cœur de l'étoile et une onde de choc se propage vers l'extérieur et va porter la température des couches de l'étoile à des milliards de degrés : une gigantesque explosion va se produire, c'est la **supernova II**.

La supernova disperse dans l'espace toutes les couches supérieures de l'étoile (enrichies en éléments lourds). Des neutrons rapides seront émis lors de cette explosion et vont se combiner aux éléments présents pour former tous les éléments chimiques plus lourds que le fer. C'est la **nucléosynthèse explosive**.

L'explosion d'une supernova contribue à enrichir le milieu interstellaire en éléments chimiques plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Les supernovae sont la source de la plupart des éléments lourds trouvés dans l'Univers. Par ailleurs, c'est l'onde de choc des supernovae qui favorise la formation de nouvelles étoiles en initiant ou en accélérant la contraction des nébuleuses gazeuses.

3.4. Les processus s et r

Lors du stade de la géante rouge, certains éléments plus lourds que le fer se forment par capture neutronique. Certains réactions de fusion produisent des neutrons comme par exemple :



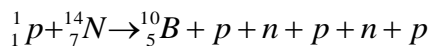
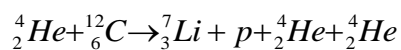
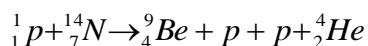
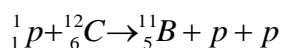
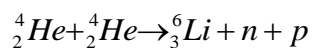
Ces neutrons peuvent être capturés par les noyaux existants pour former des noyaux de plus en plus lourds. Ce processus se produit sur des durées de temps de quelques milliers d'années, il est appelé **processus s (slow, lent)**. Le flux de neutrons est faible durant ce processus, ce qui ne permet pas de produire des éléments très lourds. Le dernier isotope formé par ce processus est le ^{209}Bi .

Le processus de capture neutronique qui se produit lors de la nucléosynthèse explosive est appelé : **processus r (rapide)**. Le flux de neutrons produits lors de l'explosion de l'étoile est très important et la capture neutronique se fait en quelques minutes (d'où le nom de processus r). Ce flux important de neutrons permet la synthèse des éléments très lourds jusqu'à l'uranium.

3.5. Les réactions de spallation

Dans le milieu interstellaire, des particules de grande énergie (protons, noyaux d'hélium 4) qui forment le rayonnement cosmique peuvent entrer en collision avec des noyaux de carbone, d'oxygène et d'azote. Ces collisions engendrent des réactions de spallation qui conduisent à la formation des éléments légers lithium, béryllium et bore. Ces éléments sont fragiles et sont détruits à l'intérieur des étoiles à des températures de 1 million de kelvins. Les réactions de spallation dans le milieu interstellaire sont les principaux producteurs de ces éléments dans l'Univers.

Les principales réactions de spallation qui se produisent dans le milieu interstellaire sont les suivantes :



4. L'abondance des éléments chimiques dans l'Univers

L'analyse du graphique représentant l'abondance des éléments chimiques dans l'Univers normée à un million d'atomes de silicium en fonction du numéro atomique Z permet de faire les constatations suivantes (figure 2) :

- Les éléments de numéro atomique pair sont plus abondants que ceux de numéro atomique impair (ceci est vrai pour les éléments dont le numéro atomique est supérieur à 4). Les spectres d'abondance naturelle des éléments présentent ainsi une structure en

dents de scie. C'est l'effet d'Oddo-Harkins [reporté pour la première fois par Giuseppe Oddo (1865-1954) en 1914 et William Draper Harkins (1873-1951) en 1917].

- Une décroissance des abondances avec la masse, avec des pics à certains nombre de masse, tel que celui du fer 56.
- Les éléments légers jusqu'au Nickel, sont nettement plus abondants que les éléments plus lourds.
- Une abondance importante des éléments H et He par rapport aux autres éléments.
- Un déficit considérable des éléments de faible masse Li, Be, B.

Ces constatations s'expliquent par les processus de nucléosynthèse qui ont donné naissance à ces éléments.

- L'abondance de l'hydrogène et de l'hélium s'explique par le fait que ces deux éléments ont été synthétisés lors de la nucléosynthèse primordiale.
- L'abondance des éléments de numéro atomique pair par rapport à ceux de Z impair est la marque de la fusion des noyaux d'hélium de masse 4, puis de noyaux multiples de 4, plus stables.
- Les éléments légers jusqu'au nickel ont été synthétisés par fusion successives lors de la nucléosynthèse stellaire. Ceci explique la décroissance des abondances avec la masse et l'abondance de ces éléments par rapport aux éléments plus lourds qui ont été synthétisés par des processus différents.
- Le pic du fer est expliqué par le maximum de stabilité du noyau de cet élément.
- Les éléments plus lourds que le fer et les isotopes peu abondants des éléments légers ont été synthétisés par capture neutronique par les processus s (phase de géante rouge) et r (explosion de l'étoile, nucléosynthèse explosive).
- Le déficit des éléments légers Li, Be et B s'explique par le fait que ces éléments sont détruits au sein des étoiles et sont formés par spallation (rares).

5. Sites de formation des éléments chimiques

La figure 3 représente la version du tableau périodique qui montre les sites de formation des éléments chimiques : nucléosynthèse primordiale pour H et He (Big Bang), spallation pour Li, B et Be (rayons cosmiques), nucléosynthèse stellaire pour les éléments jusqu'au fer, nucléosynthèse explosive et processus s (grosses étoiles) pour les éléments plus lourds que le fer.

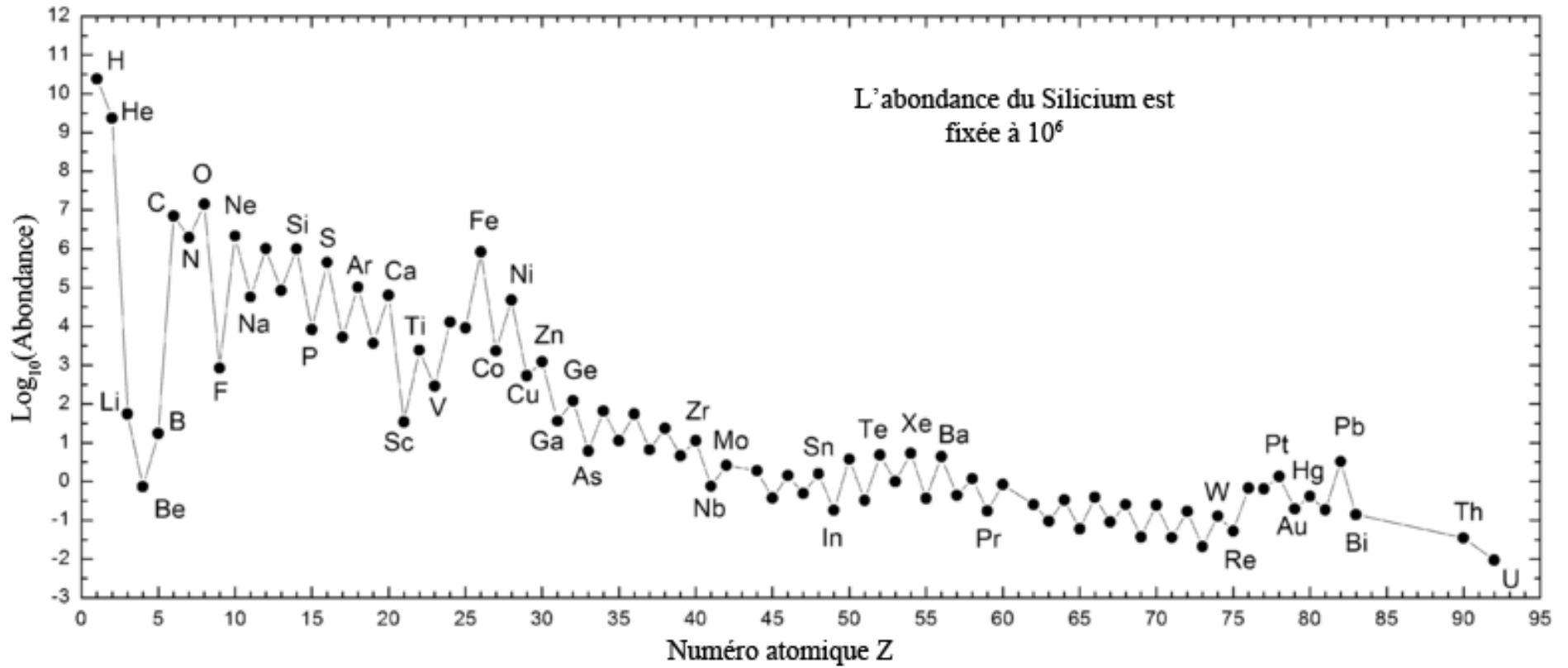


Figure 2. Abondance relative des éléments chimiques dans l'Univers et dans le Soleil, en fonction du numéro atomique.

Notez la structure en dents de scie (Effet d'Oddo-Harkins) (d'après Anders et Ebihara, 1982).

H B		B B		C L		Grosses étoiles		Supernovae		He B							
Li C		Be C		C cosmiques		Petites étoiles		Artificiel		B C							
Na L		Mg L								C S L							
K L	Ca L	Sc L	Ti S L	V S L	Cr L	Mn L	Fe S L	Co S	Ni S	Cu L	Zn L	Ga S	Ge S	As L	Se S	Br S	Kr S
Rb S	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo S L	Tc L	Ru S L	Rh S	Pd S L	Ag S L	Cd S L	In S L	Sn S L	Sb S	Te S	I S	Xe S
Cs S	Ba L		Hf S L	Ta S L	W S L	Re S	Os S	Ir S	Pt S	Au S	Hg S L	Tl S L	Pb S	Bi S	Po S	At S	Rn S
Fr S	Ra S		La L	Ce L	Pr S L	Nd S L	Pm S L	Sm S L	Eu S	Gd S	Tb S	Dy S	Ho S	Er S	Tm S	Yb S L	Lu S
			Ac S	Th S	Pa S	U S	Np S	Pu S	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M

Figure 3. Tableau périodique montrant l'origine cosmogénique de chaque élément