

## ACTIVITÉ 1.1.1. – LA FORMATION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

Hydrogène, oxygène, azote : tous ces noms d'éléments chimiques sont bien connus, leurs atomes nous entourent au quotidien.

Cette activité soulève la problématique suivante : quels sont les phénomènes qui expliquent la formation des différents éléments chimiques ?

*Ci-contre, photographie du rémanent de la supernova Cassiopée A, télescopes Hubble et Spitzer, NASA.*



### I. Histoire de l'Univers d'après le modèle du Big Bang

#### Doc. 1 Histoire de l'Univers



<https://youtu.be/OVDzfqxUm54>

Vidéo du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) qui présente l'histoire de l'Univers d'après le modèle du Big Bang.

1. Indiquer l'âge de l'Univers.
2. Indiquer quels ont été les premiers noyaux formés au cours de l'histoire de l'Univers.
3. Justifier l'utilisation des termes « *nucléosynthèse primordiale* » pour désigner ce phénomène.
4. Indiquer où et comment sont formés les noyaux de carbone, d'azote ou d'oxygène.

### II. De l'hydrogène aux éléments lourds

#### Doc. 2 Les supernovas, d'après cea.fr

DES ÉTOILES...

Les **étoiles** dont la masse est à peu près dix fois supérieure à celle du Soleil entretiennent tout d'abord la **fusion** de l'**hydrogène** en hélium pendant quelques millions d'années. À la fin de cette période, l'épuisement de l'hydrogène conduit à la contraction gravitationnelle du cœur jusqu'à ce que la température soit suffisamment élevée pour amorcer la fusion de l'hélium en carbone et en oxygène, pendant que l'hydrogène continue sa fusion dans une couche entourant le cœur. Après environ un million d'années, l'hélium s'épuise à son tour et la contraction du cœur permet la fusion du carbone en néon et en sodium, pendant dix mille ans. Suivent ensuite la fusion du néon en oxygène et en magnésium (qui dure une dizaine d'années), puis celle de l'oxygène en silicium et en soufre (pendant quelques années). Finalement, une semaine suffit à transformer le silicium en fer. L'apparition de ce dernier marque le début d'un processus qui aboutira à la destruction de l'étoile.

Le noyau du fer étant le plus lié (son énergie de liaison étant la plus forte), sa combustion ne permet pas de produire l'énergie que l'étoile rayonne inexorablement par sa surface. Le **fer** est donc l'élément le plus lourd formé ordinairement dans la vie d'une étoile petite ou moyenne. Dans le cas des étoiles très massives, l'histoire se poursuit.

Une fois le silicium épuisé et le fer formé, la contraction du cœur reprend, mais, cette fois, la température est si forte que les [particules de lumière] peuvent briser les noyaux de fer. La disparition d'une partie de l'énergie lumineuse diminue la pression centrale et précipite l'effondrement du cœur, attisé par la capture des électrons par les noyaux transformant les protons en neutrons. Cette réaction nucléaire s'accompagne d'une émission de neutrinos, qui emportent la phénoménale quantité d'énergie potentielle gravitationnelle dégagée par la contraction.

En quelques dixièmes de seconde, la matière atteint l'incroyable densité d'un million de tonnes par centimètre cube, l'équivalent d'une plate-forme pétrolière compactée dans le volume d'un dé à coudre !

...AUX SUPERNOVAS

Le cœur de l'étoile, désormais constitué de neutrons, se réduit à une petite sphère d'une dizaine de kilomètres de diamètre : une étoile à neutrons vient de se former, sur la surface rigide de laquelle le reste de l'étoile en effondrement vient s'écraser. La violente compression qui en résulte produit une onde de choc qui remonte à travers les couches externes de l'étoile. Son passage chauffe la matière à des températures supérieures au milliard de degrés et provoque des réactions [...] qui produisent des éléments lourds, notamment du nickel et du cobalt radioactifs. Quand l'onde de choc atteint la surface, la température s'élève brutalement et l'étoile entière explose, éjectant les éléments qui la composent à des vitesses pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde. Cet événement, appelé « supernova », marque la mort d'une étoile massive.

### Doc. 3 Les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques désignent le flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie qui circulent dans le milieu interstellaire. Le rayonnement cosmique est principalement constitué de particules chargées : protons (88 %), noyaux d'hélium (9 %), antiprotons, électrons, positrons et particules neutres (rayons gamma, neutrinos et neutrons). La source de ce rayonnement se situe selon les cas dans le Soleil, à l'intérieur ou à l'extérieur de notre galaxie. Leur existence est connue notamment grâce à leur interaction avec la haute atmosphère terrestre, cette interaction génère alors des cascades de particules atmosphériques. Lorsque les rayons cosmiques se déplacent dans l'Univers, ils peuvent aussi rencontrer un rare noyau lourd sur leur parcours. L'interaction entre le rayon cosmique et ce noyau le « casse », ce qui peut alors former des noyaux de lithium, de béryllium ou de bore.

- Pour chacune des équations de réaction suivantes, citer un extrait du document 2 qui décrit la transformation modélisée.
 

<input type="checkbox"/> a. ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{énergie}$	<input type="checkbox"/> b. ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{31}_{16}\text{S} + {}^1_0\text{n} + \text{énergie}$
<input type="checkbox"/> c. ${}^{28}_{14}\text{Si} + {}^{28}_{14}\text{Si} \rightarrow {}^{56}_{26}\text{Fe} + 2 {}^0_1\text{e} + \text{énergie}$	<input type="checkbox"/> d. ${}^{59}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^{59}_{27}\text{Co} + {}^0_{-1}\text{e} + \text{énergie}$
- Rédiger une phrase en employant les mots en gras du document 2 pour résumer la nucléosynthèse stellaire.
- En exploitant les réponses aux questions précédentes et les informations fournies par les documents, rédiger une réponse de quelques lignes à la problématique de l'activité : quels sont les phénomènes qui expliquent la formation des différents éléments chimiques ?

## Correction

**I.1.** L'Univers est âgé de plus de 13 milliards d'années (13,7 Ga d'après l'estimation actuelle).

**I.2.** Les premiers noyaux formés sont les noyaux d'hydrogène, d'hélium et de lithium, entre 3 et 20 min après le Big Bang.

**I.3.** On parle de nucléosynthèse car le mécanisme a permis de former (*synthèse*) les premiers (*primordiale*) noyaux (*nucléo*) de l'Univers.

**I.4.** Les noyaux de ces éléments sont formés dans le cœur des étoiles, on parle de nucléosynthèse stellaire.

**II.1.a.** « les étoiles entretiennent d'abord la fusion de l'hydrogène en hélium ».

**II.1.b.** « Suivent ensuite la fusion du néon en oxygène et en magnésium (qui dure une dizaine d'années), puis celle de l'oxygène en silicium ».

**II.1.c.** « Finalement, une semaine suffit à transformer le silicium en fer. »

**II.1.d.** « [Le] passage [de l'onde choc] chauffe la matière à des températures supérieures au milliard de degrés et provoque des réactions [...] qui produisent des éléments lourds, notamment du nickel et du cobalt radioactifs. »

**II.2.** La nucléosynthèse stellaire désigne les phénomènes à l'œuvre au cœur des étoiles et par lesquels des transformations successives de fusion permettent de former à partir d'hydrogène des éléments plus lourds pouvant aller jusqu'au fer.

**II.3. et bilan à apprendre.** Les éléments chimiques ont des origines différentes. Les noyaux d'hydrogène et d'hélium ont été formés peu de temps après le Big Bang, il y a environ 13 milliards d'années. Combustibles au cœur des étoiles, ils sont consommés lors de transformations de fusion qui produisent des noyaux plus lourds comme le carbone, l'azote ou l'oxygène et pouvant aller jusqu'au fer. Les étoiles les plus massives ont une fin de vie explosive, il s'agit d'une supernova, engageant une quantité colossale d'énergie qui permet de produire les éléments plus lourds encore que le fer. Enfin, certains éléments comme le lithium, le bore ou le béryllium sont produits lors de l'interaction entre les rayonnements cosmiques et les noyaux présents dans l'Univers.