

Activité 1 — Aux origines des éléments chimiques

► Introduction

En 1814, l'opticien allemand Joseph von Fraunhofer décompose la lumière solaire et y observe des centaines de **raies sombres**. Un demi-siècle plus tard, ces raies livrent une information que l'on croyait inaccessible : la composition chimique d'un astre situé à 150 millions de kilomètres.

Problématique : De quoi le Soleil est-il fait, et d'où viennent les éléments chimiques qui nous constituent ?

✓ Savoirs et savoir-faire

Savoirs	Savoir-faire / capacités
- Les noyaux des éléments chimiques stables se forment dans les étoiles à partir de l'hydrogène initial, par des réactions nucléaires. - La matière connue de l'Univers est principalement constituée d'hydrogène et d'hélium. - Dans les étoiles, ces réactions sont des fusions successives qui s'arrêtent au fer ; les noyaux plus lourds que le fer se forment lors d'événements violents tels que les explosions de supernovae.	- Extraire et relier des informations d'un spectre et d'un texte historique. - Une équation de réaction nucléaire étant fournie, reconnaître s'il s'agit d'une fusion ou d'une fission. - Vérifier la conservation du nombre de masse A et du numéro atomique Z.

Document 1 — Le spectre du Soleil et ses raies sombres

Chaque raie sombre correspond à l'absorption d'une longueur d'onde précise par l'atmosphère du Soleil. Les principales raies de Fraunhofer ont été attribuées à un élément chimique :

Élément	Longueurs d'onde des raies (nm)
Hydrogène (H)	656,3 ; 486,1
Hélium (He)	587,6
Sodium (Na)	589,0 ; 589,6
Magnésium (Mg)	518,4
Fer (Fe)	527,0
Calcium ionisé (Ca ⁺)	393,4 ; 396,8

Valeurs des raies de Fraunhofer — NIST Atomic Spectra Database.

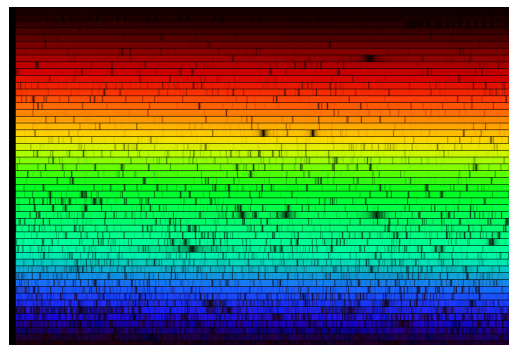


FIGURE 1 – Spectre de la lumière du Soleil dans le domaine visible.

Source : N. A. Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF — <https://www.nso.edu/data/> — Licence : usage éducatif (source institutionnelle publique US).

Document 2 — De Fraunhofer à l'hélium (1814–1895)

En 1814, Joseph von Fraunhofer décompose la lumière du Soleil et y repère près de **570 raies sombres**, qu'il note de A à K. En 1859-1860, Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen montrent que **chaque raie est la signature d'un élément chimique** : un spectre permet ainsi d'identifier les éléments présents dans la source de lumière.

Le 18 août 1868, lors d'une éclipse totale observée en Inde, Jules Janssen détecte dans le spectre du Soleil une raie jaune à **587,6 nm**, qui ne correspond à **aucun élément connu sur Terre**. Norman Lockyer et Edward Frankland concluent qu'il s'agit d'un **nouvel élément**, qu'ils nomment **hélium** (du grec *hélîos*, le Soleil). Ce n'est qu'en **1895**, soit 27 ans plus tard, que William Ramsay isole l'hélium sur Terre : un élément découvert dans le Soleil avant de l'être sur notre planète.

Document 3 — De l'hydrogène au fer : la fabrique stellaire

Quelques minutes après le Big Bang, la matière ne contient que de l'hydrogène et de l'hélium. Les autres éléments — comme le carbone, l'oxygène ou le fer — sont fabriqués plus tard, dans les étoiles, par des **réactions nucléaires**. Dans une étoile massive, chaque

combustible fusionne à son tour : quand l'un est épuisé, l'étoile se contracte, sa température augmente, et la fusion du combustible suivant démarre. Les noyaux de **fer** étant les plus stables, la chaîne **s'arrête au fer** : fusionner du fer ne libère plus d'énergie.

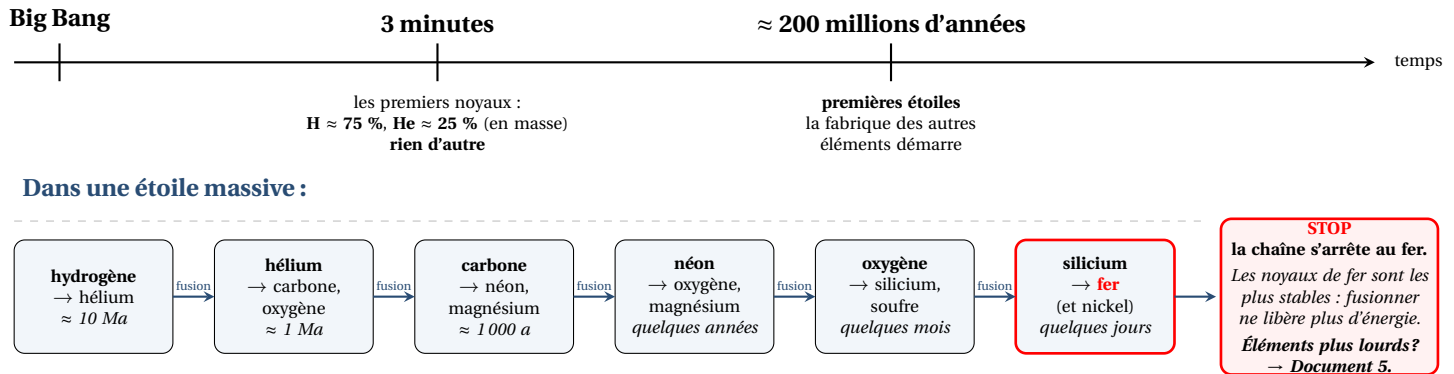


FIGURE 2 – Bande 1 : chronologie cosmique. Bande 2 : la chaîne des fusions successives dans une étoile massive.

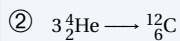
Ordres de grandeur pour une étoile d'environ 20 fois la masse du Soleil.

Document 4 — Trois équations nucléaires

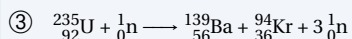
Voici trois équations de réactions nucléaires, notées A_ZX (A : nombre de masse, Z : numéro atomique). Leur type (fusion ou fission) n'est pas indiqué : vous devrez le déterminer dans les questions.



au cœur du Soleil (bilan global) — étape 1 de la frise du Document 3



dans une étoile évoluée — étape 2 de la frise du Document 3



dans un réacteur nucléaire

 Remarque

Dans la première équation, les neutrinos émis ne sont pas représentés; 0_e désigne un **positon**.

Document 5 — SN 1987A : une supernova visible à l'œil nu

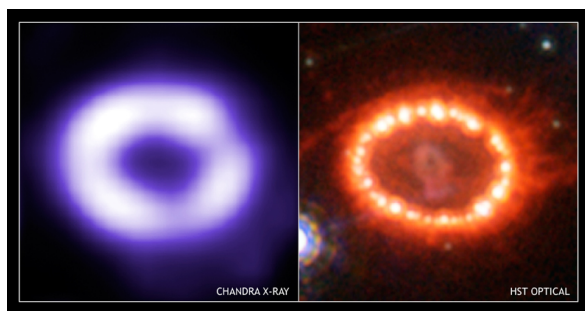


FIGURE 3 – SN 1987A, supernova observée en 1987 dans le Grand Nuage de Magellan.

Source : ESO — <https://www.eso.org/public/images/eso8704/> — Licence : CC BY 4.0.

Communiqué ESO eso8704, 25 février 1987 (traduction du professeur) :

« Dans la nuit du 23 au 24 février 1987, une supernova est découverte dans le Grand Nuage de Magellan^a, une galaxie satellite de notre Voie lactée. [...] The supernova reached magnitude 4,6 and was **visible to the naked eye**. It is the brightest to be observed since the 1604 supernova^b [...]. A massive star has exhausted its nuclear fuel, collapses and then explodes, ejecting its outer layers. »

Ce que l'on sait aujourd'hui de ces explosions : Lors de l'effondrement puis de l'explosion, l'énergie libérée est telle que des noyaux **plus lourds que le fer** peuvent se former. L'explosion disperse ensuite dans l'espace toutes les couches de l'étoile : cette matière enrichie servira plus tard à former de nouvelles étoiles et des planètes.

a. Galaxie satellite de la Voie lactée, située à environ 180 000 années-lumière.

b. Observée par Johannes Kepler.

Questions

Activité 1 — Aux origines des éléments chimiques

1. (a) À l'aide du Document 1, décrivez ce que l'on observe dans le spectre de la lumière solaire. Relevez ensuite **deux** éléments chimiques présents dans l'atmosphère du Soleil et la longueur d'onde qui permet de les identifier.
(b) Ces éléments existent-ils aussi sur Terre? Que peut-on en déduire sur la matière qui constitue les astres?

✓ Correction

(a) Le spectre de la lumière solaire est un spectre continu (dégradé de couleurs du violet au rouge) barré de nombreuses fines raies sombres : les raies de Fraunhofer. Chaque raie est la signature d'un élément; par exemple la présence d'hydrogène (raies à 656,3 nm et 486,1 nm) et de fer (raie à 527,0 nm) — on peut aussi citer l'hélium (587,6 nm), le sodium (589,0; 589,6 nm), le magnésium (518,4 nm) ou le calcium ionisé (393,4; 396,8 nm).
(b) Oui, tous ces éléments existent aussi sur Terre. On en déduit que les astres sont faits de la même matière que la Terre : ce sont les mêmes éléments chimiques qui nous constituent.

2. En 1868, la raie observée à 587,6 nm ne correspondait à **aucun** élément connu sur Terre. Expliquez le raisonnement qui a conduit à annoncer l'existence d'un nouvel élément chimique, et précisez ce qui l'a confirmé en 1895.

✓ Correction

Depuis Kirchhoff et Bunsen (1859–1860), on sait que chaque élément chimique possède des raies à des longueurs d'onde précises : elles constituent sa signature. La raie jaune à 587,6 nm ne correspondant à aucun élément connu sur Terre, Lockyer et Frankland en ont déduit qu'elle était la signature d'un élément encore inconnu, présent dans le Soleil : l'hélium. Cette annonce a été confirmée en 1895, lorsque Ramsay a isolé l'hélium sur Terre : l'élément prédit grâce au spectre solaire existait bel et bien, et son spectre présente bien la raie jaune à 587,6 nm.

3. D'après le Document 3 (bande 1), quels éléments chimiques existaient trois minutes après le Big Bang, et dans quelles proportions? Le carbone, qui nous constitue, était-il déjà présent?

✓ Correction

Trois minutes après le Big Bang, seuls l'hydrogène (environ 75 % en masse) et l'hélium (environ 25 %) existent : il n'y a rien d'autre. Le carbone n'est donc pas encore présent; il sera fabriqué plus tard, dans le cœur des étoiles.

4. Le Document 4 présente trois équations dont le type n'est **pas** indiqué.
(a) Pour l'équation ① (cœur du Soleil) : combien de noyaux entrent en réaction? Combien en sortent? Le noyau obtenu est-il **plus gros** ou **plus petit** que ceux de départ?
(b) Répondez aux mêmes questions pour l'équation ③ (réacteur nucléaire).
(c) L'une de ces transformations est une **fusion**, l'autre une **fission** : associez chaque terme à la bonne équation, puis **énoncez en une phrase** le critère qui permet de les distinguer.

✓ Correction

(a) Quatre noyaux d'hydrogène ${}^1_1\text{H}$ entrent en réaction et il se forme un seul noyau, l'hélium ${}^4_2\text{He}$ (les deux positons émis ne sont pas des noyaux). Le noyau formé ($A = 4$) est plus gros que les noyaux de départ ($A = 1$).
(b) Un seul noyau, l'uranium ${}^{235}_{92}\text{U}$, entre en réaction (le neutron absorbé n'est pas un noyau) et il se forme deux noyaux, ${}^{139}_{56}\text{Ba}$ et ${}^{94}_{36}\text{Kr}$, tous deux plus petits que le noyau d'uranium (139 et $94 < 235$).
(c) L'équation ① est une fusion, l'équation ③ une fission. Critère : si plusieurs noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd (A augmente), il s'agit d'une fusion; si un noyau lourd se scinde en plusieurs noyaux plus légers (A diminue), il s'agit d'une fission.

5. En appliquant le **critère que vous venez d'énoncer**, indiquez la nature de l'équation ②. Vérifiez ensuite, pour **chacune** des trois équations, la conservation du nombre de masse A et du numéro atomique Z .

✓ Correction

Équation ② : trois noyaux d'hélium s'assemblent en un seul noyau de carbone plus lourd ($3 \times 4 = 12$) : c'est une fusion.

Vérification de la conservation de A (somme des nombres de masse) et de Z (somme des numéros atomiques) :

- ① : $A : 4 \times 1 = 4 = 4 + 2 \times 0$; $Z : 4 \times 1 = 4 = 2 + 2 \times 1$.
- ② : $A : 3 \times 4 = 12 = 12$; $Z : 3 \times 2 = 6 = 6$.
- ③ : $A : 235 + 1 = 236 = 139 + 94 + 3 \times 1$; $Z : 92 + 0 = 92 = 56 + 36 + 3 \times 0$.

Pour les trois équations, A et Z sont bien conservés.

Activité 1 — Aux origines des éléments chimiques

6. À l'aide des Documents 3, 4 et 5, expliquez en quelques phrases comment, à partir du seul hydrogène initial, la centaine d'éléments chimiques stables a pu être produite. Précisez **jusqu'à quel élément** les fusions successives peuvent aller dans une étoile, et ce qui se produit pour les éléments **plus lourds**.

✓ Correction

Après le Big Bang, la matière ne contient que de l'hydrogène (et un peu d'hélium). Au cœur des étoiles, l'hydrogène fusionne en hélium, puis, dans les étoiles massives, les fusions se succèdent : l'hélium fabrique le carbone et l'oxygène, puis le carbone, le néon, l'oxygène et le silicium fusionnent à leur tour (équations de type ① et ②). La chaîne s'arrête au fer, dont les noyaux sont les plus stables : fusionner du fer ne libère plus d'énergie. Les noyaux plus lourds que le fer ne peuvent donc pas se former ainsi : ils sont produits lors d'événements violents, comme l'explosion d'une supernova. L'explosion disperse ensuite dans l'espace la matière enrichie, qui sert plus tard à former de nouvelles étoiles et des planètes : c'est ainsi que le carbone ou le fer qui nous constituent ont pu exister.

♥ À retenir

- Juste après le Big Bang, la matière ne contient que de l'hydrogène ($\approx 75\%$ en masse) et de l'hélium ($\approx 25\%$) ; la matière connue de l'Univers est encore principalement constituée de ces deux éléments.
- Chaque élément chimique possède des raies à des longueurs d'onde précises qui constituent sa signature : le spectre de la lumière d'un astre permet d'identifier les éléments présents dans son atmosphère.
- Lors d'une réaction nucléaire ${}_Z^AX$, le nombre de masse A et le numéro atomique Z se conservent.
- **Fusion** : plusieurs noyaux légers s'assemblent en un noyau plus lourd ; **fission** : un noyau lourd se scinde en noyaux plus légers.
- Les noyaux des éléments stables se forment dans les étoiles, à partir de l'hydrogène initial, par des fusions successives ; la chaîne s'arrête au **fer**, dont les noyaux sont les plus stables.
- Les noyaux plus lourds que le fer se forment lors d'événements violents, comme les explosions de **supernovae**, qui dispersent dans l'espace la matière enrichie.

Pour aller plus loin — Observer le ciel, c'est observer le passé

7. Le Document 5 indique que le Grand Nuage de Magellan est situé à environ 180 000 années-lumière. En déduire il y a combien de temps l'explosion de SN 1987A s'est réellement produite. Que cela nous apprend-il sur ce que l'on observe en regardant le ciel ?
Donnée : Une année-lumière correspond à la distance parcourue par la lumière en une année.

✓ Correction

La lumière de SN 1987A a parcouru environ 180 000 années-lumière avant de nous atteindre : elle a donc voyagé pendant environ 180 000 ans. L'explosion s'est donc réellement produite il y a environ 180 000 ans, alors qu'on ne l'a observée qu'en 1987. Observer le ciel, c'est observer le passé : plus un astre est lointain, plus on le voit tel qu'il était il y a longtemps, au moment où sa lumière est partie.

8. En 1835, le philosophe Auguste Comte écrivait à propos des astres : « Nous ne pourrions jamais étudier par aucun moyen leur composition chimique. »¹ À l'aide des Documents 1 et 2, expliquez pourquoi cette affirmation a été démentie moins de trente ans plus tard.

✓ Correction

Comte affirmait que la composition chimique des astres resterait à jamais inaccessible, faute de pouvoir en prélever des échantillons. Or Fraunhofer avait déjà observé les raies sombres du spectre solaire (Document 1), et en 1859–1860 Kirchhoff et Bunsen ont montré que chaque raie est la signature d'un élément chimique : l'analyse du spectre d'un astre permet donc de connaître sa composition à distance, sans aucun échantillon. L'identification de l'hélium dans le Soleil en 1868 (Document 2), avant même sa découverte sur Terre, montre que la prédiction de 1835 était démentie moins de trente ans plus tard.

1. A. Comte, *Cours de philosophie positive*, 19^e leçon, 1835.