

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.

Le spectre du Soleil et ses raies sombres

Document 1 — Le spectre du Soleil et ses raies sombres

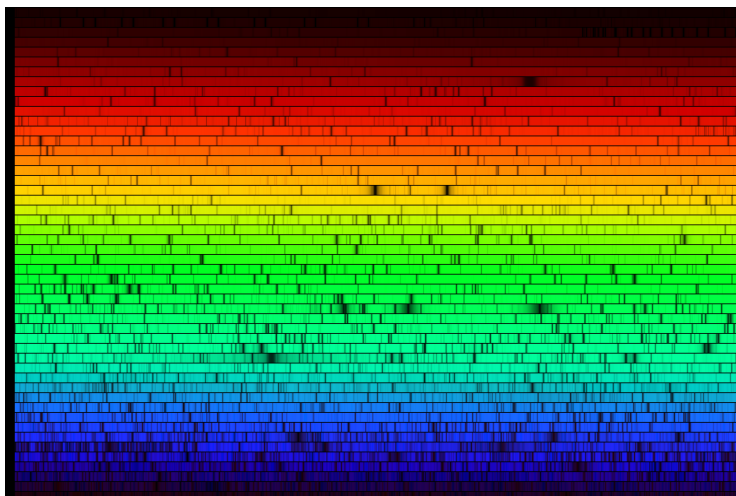


FIGURE 1 – Spectre de la lumière du Soleil dans le domaine visible.

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

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.

De Fraunhofer à l'hélium

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.

De l'hydrogène au fer : la fabrique stellaire

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.

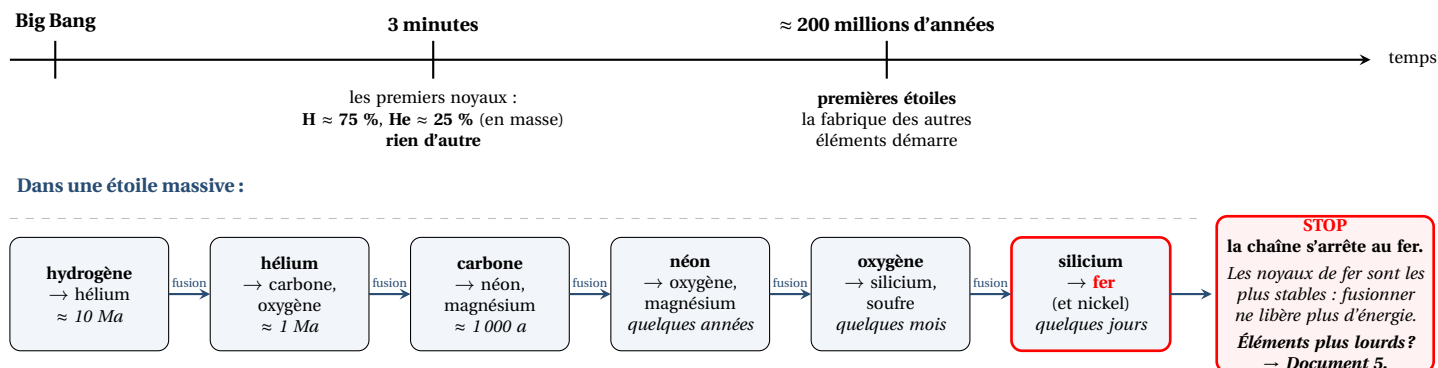


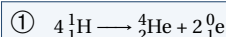
FIGURE 2 – Bande 1 : chronologie cosmique. Bande 2 : la chaîne des fusions successives dans une étoile massive.

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

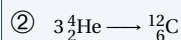
Trois équations nucléaires

Document 4 — Trois équations nucléaires

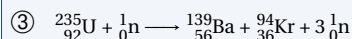
Voici trois équations de réactions nucléaires, notées A_ZX (A : nombre de masse, Z : numéro atomique). Leur type (fusion ou fission) n'est pas indiqué : vous devrez le déterminer dans les questions.



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 ; ${}^0_1\text{e}$ désigne un **positon**.

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

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

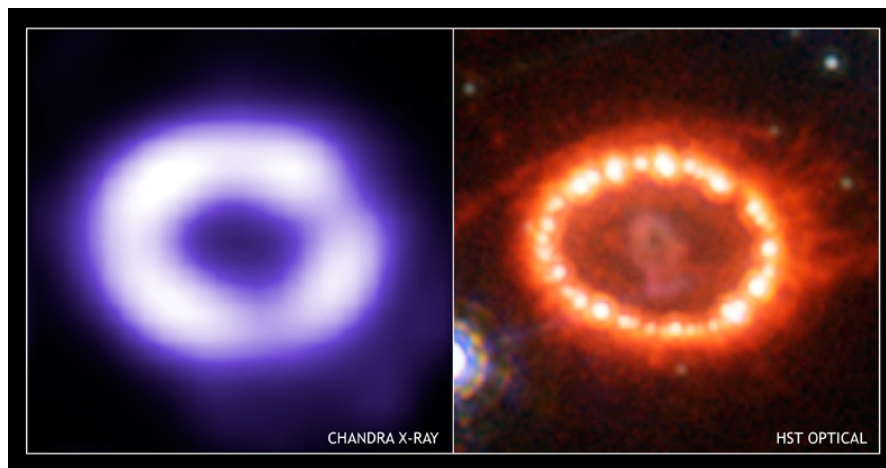


FIGURE 3 – SN 1987A, supernova observée en 1987 dans le Grand Nuage de Magellan.

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 Magellan¹, 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 supernova² [...]. A massive star has exhausted its nuclear fuel, collapses and then explodes, ejecting its outer layers. »

Source : ESO, communiqué eso8704, 25/02/1987 — <https://www.eso.org/public/news/eso8704/>.

Remarque

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.

Questions

1. Galaxie satellite de la Voie lactée, située à environ 180 000 années-lumière.
2. Observée par Johannes Kepler.

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 présente un fond continu (arc-en-ciel) traversé par de nombreuses **raies sombres** (raies de Fraunhofer). Ces raies correspondent à l'absorption de certaines longueurs d'onde par l'atmosphère du Soleil.

Deux éléments chimiques présents dans le Soleil :

- **Hydrogène (H)** : raies à 656,3 nm et 486,1 nm
- **Sodium (Na)** : raies à 589,0 nm et 589,6 nm

(On pourrait aussi citer l'hélium à 587,6 nm, le magnésium à 518,4 nm, le fer à 527,0 nm, ou le calcium ionisé à 393,4 nm et 396,8 nm.)

(b) Oui, tous ces éléments existent aussi sur Terre. On en déduit que **la matière qui constitue les astres est de même nature que celle sur Terre** : les mêmes éléments chimiques sont présents dans tout l'Univers.

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

Les travaux de Kirchhoff et Bunsen (1859-1860) ont établi que **chaque raie spectrale est la signature d'un élément chimique spécifique**. Lorsqu'une raie est observée, elle correspond nécessairement à un élément connu.

En 1868, Jules Janssen observe une raie à 587,6 nm dans le spectre solaire qui **ne correspond à aucun élément connu sur Terre**. Le raisonnement est donc le suivant :

- Toute raie spectrale correspond à un élément chimique;
- La raie à 587,6 nm n'est associée à aucun élément terrestre connu;
- Donc cette raie est la signature d'un **nouvel élément**, inconnu sur Terre.

Cet élément est nommé **hélium** (du grec *hélîos*, Soleil). La confirmation vient en **1895**, lorsque William Ramsay parvient à **isoler l'hélium sur Terre**, 27 ans après sa découverte dans le Soleil.

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, la matière de l'Univers ne contenait que :

- de l'**hydrogène (H)** : environ **75 %** en masse;
- de l'**hélium (He)** : environ **25 %** en masse.

Le carbone n'était pas présent à ce moment. Il sera fabriqué plus tard, dans les étoiles, par fusion nucléaire de l'hélium (voir étape 2 de la frise du Document 3).

Activité 1 — Aux origines des éléments chimiques

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) Équation ① : $4\ {}^1_1\text{H} \longrightarrow\ {}^4_2\text{He} + 2\ {}^0_1\text{e}$

- Noyaux qui entrent en réaction : **4 noyaux d'hydrogène** (${}^1_1\text{H}$)
- Noyaux qui sortent : **1 noyau d'hélium** (${}^4_2\text{He}$) + 2 positons (le positon n'est pas un noyau)
- Le noyau obtenu (hélium, $A = 4$) est **plus gros** que les noyaux de départ (hydrogène, $A = 1$).

(b) Équation ③ : ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow\ {}^{139}_{56}\text{Ba} + {}^{94}_{36}\text{Kr} + 3\ {}^1_0\text{n}$

- Noyaux qui entrent en réaction : **1 noyau d'uranium-235** (${}^{235}_{92}\text{U}$) + 1 neutron
- Noyaux qui sortent : **2 noyaux** (baryum-139 et krypton-94) + 3 neutrons
- Les noyaux obtenus (baryum $A = 139$ et krypton $A = 94$) sont **plus petits** que le noyau de départ (uranium $A = 235$).

(c)

- L'équation ① est une **fusion** : plusieurs petits noyaux s'assemblent pour former un noyau plus gros.
- L'équation ③ est une **fission** : un noyau lourd se brise en noyaux plus légers.

Critère de distinction : Dans une **fusion**, des noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd. Dans une **fission**, un noyau lourd se brise en noyaux plus légers.

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 : $3\ {}^4_2\text{He} \longrightarrow\ {}^{12}_6\text{C}$

Trois noyaux d'hélium ($A = 4$) s'assemblent pour former un noyau de carbone ($A = 12$). Il s'agit donc d'une **fusion**.

Vérification des conservations :

Équation ① : $4\ {}^1_1\text{H} \longrightarrow\ {}^4_2\text{He} + 2\ {}^0_1\text{e}$

- Nombre de masse A : $4 \times 1 = 4$ (gauche) et $4 + 2 \times 0 = 4$ (droite) ✓
- Numéro atomique Z : $4 \times 1 = 4$ (gauche) et $2 + 2 \times 1 = 4$ (droite) ✓

Équation ② : $3\ {}^4_2\text{He} \longrightarrow\ {}^{12}_6\text{C}$

- Nombre de masse A : $3 \times 4 = 12$ (gauche) et 12 (droite) ✓
- Numéro atomique Z : $3 \times 2 = 6$ (gauche) et 6 (droite) ✓

Équation ③ : ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow\ {}^{139}_{56}\text{Ba} + {}^{94}_{36}\text{Kr} + 3\ {}^1_0\text{n}$

- Nombre de masse A : $235 + 1 = 236$ (gauche) et $139 + 94 + 3 \times 1 = 236$ (droite) ✓
- Numéro atomique Z : $92 + 0 = 92$ (gauche) et $56 + 36 + 3 \times 0 = 92$ (droite) ✓

Dans les trois cas, il y a conservation du nombre de masse A et du numéro atomique Z .

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, l'Univers ne contient que de l'hydrogène et de l'hélium. Les autres éléments se forment ensuite dans les étoiles :

- Dans le cœur des étoiles, l'**hydrogène** fusionne pour former de l'**hélium** (équation ①).
- Quand l'hydrogène est épuisé, l'étoile se contracte, sa température augmente, et l'hélium fusionne pour former du **carbone** et de l'**oxygène** (équation ②).
- Dans les étoiles massives, des fusions successives produisent des éléments de plus en plus lourds : néon, magnésium, silicium, etc.
- La chaîne de fusions **s'arrête au fer** (et au nickel), car les noyaux de fer sont les plus stables : fusionner du fer ne libère plus d'énergie.

Les éléments **plus lourds que le fer** (or, uranium, etc.) se forment lors d'**événements violents** comme l'explosion de **supernovae** (Document 5). L'énergie libérée lors de ces explosions permet la formation de ces noyaux lourds, qui sont ensuite dispersés dans l'espace et serviront à former de nouvelles étoiles et des planètes.

♥ À retenir

À retenir :

- **Les éléments chimiques sont universels** : les mêmes éléments (hydrogène, hélium, carbone, fer, etc.) sont présents sur Terre et dans les astres.
- **Origine des éléments** :
 - Juste après le Big Bang : uniquement **hydrogène** ($\approx 75\%$) et **hélium** ($\approx 25\%$).
 - Dans les étoiles : les **fusions nucléaires** transforment l'hydrogène en éléments plus lourds, jusqu'au **fer**.
 - Lors des **supernovae** : les éléments **plus lourds que le fer** se forment.
- **Fusion et fission** :
 - **Fusion** : plusieurs noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd (ex : $H \rightarrow He$ dans le Soleil).
 - **Fission** : un noyau lourd se brise en noyaux plus légers (ex : $U \rightarrow Ba + Kr$).
- Dans toute réaction nucléaire, il y a **conservation du nombre de masse A** et du **numéro atomique Z** .

Activité 1 — Aux origines des éléments chimiques

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 déduisez 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

Le Grand Nuage de Magellan est situé à **180 000 années-lumière** de la Terre. Cela signifie que la lumière met 180 000 ans pour nous parvenir de cette galaxie.

L'explosion de SN 1987A a été observée en **1987**, mais elle s'est réellement produite il y a :

$$180\,000 + 1987 \approx \mathbf{182\,000 \text{ ans}}$$

(en comptant depuis l'an 0, ou plus simplement : il y a environ **180 000 ans**).

Conclusion : Observer le ciel, c'est observer le **passé**. Plus un objet céleste est lointain, plus la lumière a mis de temps à nous parvenir, et plus nous le voyons tel qu'il était dans le passé. En regardant des objets très lointains, les astronomes peuvent ainsi étudier l'Univers tel qu'il était il y a des millions, voire des milliards d'années.

8. En 1835, le philosophe Auguste Comte écrivait à propos des astres : « Nous ne pourrons jamais étudier par aucun moyen leur composition chimique. »³ À l'aide des Documents 1 et 2, expliquez pourquoi cette affirmation a été démentie moins de trente ans plus tard.

✓ Correction

Auguste Comte pensait en 1835 qu'il était impossible de connaître la composition chimique des astres, car on ne peut pas prélever d'échantillons sur le Soleil ou les étoiles.

Cette affirmation a été démentie grâce à la **spectroscopie** :

- En 1814, Fraunhofer observe les raies sombres dans le spectre solaire, sans en comprendre l'origine.
- En 1859-1860, **Kirchhoff et Bunsen** établissent que **chaque élément chimique émet ou absorbe des longueurs d'onde spécifiques**, qui constituent sa **signature spectrale**.
- En comparant les raies observées dans le spectre d'un astre avec les raies connues des éléments terrestres, on peut identifier les éléments présents dans cet astre.

Ainsi, moins de trente ans après l'affirmation de Comte, les scientifiques ont pu déterminer la composition chimique du Soleil et des étoiles **sans avoir besoin d'échantillons**, simplement en analysant leur lumière. C'est une révolution : l'Univers devient accessible à l'analyse chimique à distance.

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