

1 Formation des éléments

Transformations nucléaires au sein des étoiles

C'est à partir d'un petit nombre de **particules élémentaires** qui se sont organisées en unités de plus en plus complexes que s'est constituée la matière de l'Univers.

Il y a 13,8 milliards d'années, juste après le **Big Bang**, l'Univers était principalement constitué de noyaux d'**hydrogène**, de numéro atomique $Z = 1$. L'hydrogène est le plus léger des éléments puisqu'il est constitué d'un seul proton.

L'hydrogène est le carburant majeur des étoiles et sa **transformation nucléaire** en hélium est la première étape de la formation d'autres noyaux plus lourds, appelée **nucléosynthèse** (Fig. 1).

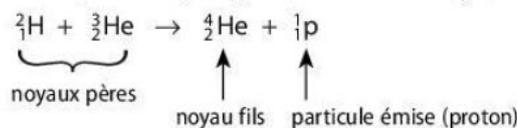
La formation de noyaux à partir de noyaux plus légers peut être modélisée par des réactions de **fusion**.

Lors d'une fusion, deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd. Une grande quantité d'énergie est alors libérée.

La plupart des noyaux d'atomes sont stables. Ils le doivent à l'interaction forte entre nucléons qui l'emporte sur la répulsion électrostatique entre protons (qui possèdent tous la même charge positive). Cependant, au cœur des étoiles, la forte densité et la température extrême permettent à deux noyaux légers de fusionner.

La fusion de deux noyaux peut s'accompagner de l'éjection d'une ou plusieurs particules (neutron, proton...).

Exemple : Fusion d'un isotope de l'hydrogène, le deutérium (${}^2_1\text{H}$), et de l'hélium 3 (${}^3_2\text{He}$) :



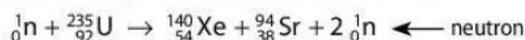
Les éléments plus lourds que l'hélium sont produits dans les derniers stades de la vie des étoiles. Des fusions successives conduisent d'abord jusqu'au fer, l'élément le plus stable du tableau périodique, puis dans la phase ultime de la vie de l'étoile, seront formés les éléments plus lourds que le fer.

Fission nucléaire

La **fission** est un autre type de transformation nucléaire.

Lors d'une fission nucléaire, un noyau lourd se brise en deux noyaux plus légers.

Exemple : Équation de fission possible de l'uranium 235 :



La matière dans l'Univers

Représentant plus de 90 % des atomes de la matière connue, soit presque les $\frac{3}{4}$ de sa masse, l'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers. Il est suivi par l'hélium. Très loin ensuite viennent : l'oxygène, le carbone, l'azote...

Dans l'Univers, les éléments hydrogène et hélium sont prédominants (Fig. 2).

La Terre est surtout constituée d'oxygène, d'hydrogène, de fer, de silicium et de magnésium. Les êtres vivants sont constitués de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote (CHON) qui sont les éléments indispensables à la vie.

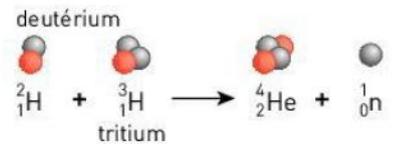


Fig. 1 : Fusion de deux noyaux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, pour former un noyau d'hélium (et un neutron).

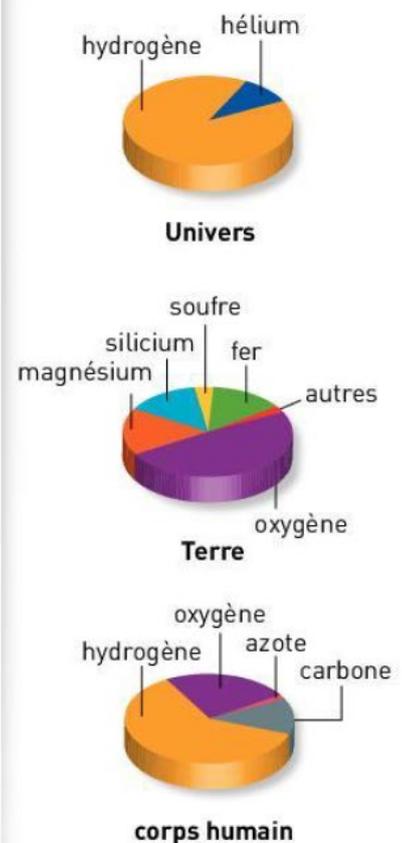


Fig. 2 : Abondance des éléments chimiques (en pourcentage d'atomes) dans l'Univers, sur Terre et dans les êtres vivants.

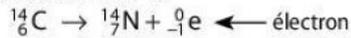
2 Radioactivité

● Définition

Un excès de protons par rapport aux neutrons, ou l'inverse, ou encore trop de nucléons, rendent certains noyaux d'atomes instables. Ces **noyaux instables** vont alors se transformer **spontanément** en d'autres noyaux : ils se **désintègrent**, en émettant des **rayonnements** sous forme de **particules chargées** et/ou d'**ondes électromagnétiques**.

La **radioactivité** est la désintégration spontanée d'un noyau instable (noyau père) en un autre noyau plus stable (noyau fils).

Exemple : Désintégration du carbone 14 :



● Un phénomène aléatoire

Un noyau radioactif doit se transformer pour être plus stable. Cependant, il est impossible de déterminer à quel moment il va le faire.

La radioactivité est un phénomène **aléatoire**.

Par conséquent, les lois régissant la radioactivité sont statistiques (elles sont élaborées sur un grand nombre d'échantillons d'un noyau donné) et l'avenir d'un noyau radioactif ne se prédit qu'en termes de probabilité.

La radioactivité est un phénomène naturel, mais on sait aussi créer des éléments radioactifs artificiels. Ses nombreuses applications concernent la médecine (radiothérapie, imagerie), la datation, l'industrie (traceurs, stérilisation...).

● Demi-vie d'un noyau radioactif

La demi-vie, notée $t_{1/2}$, est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux d'un échantillon radioactif se soit désintégrée.

La **demi-vie** est caractéristique du noyau radioactif (Fig. 3).

Exemple : Pour ${}^{92}_{238}\text{U}$, $t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ années, alors que pour ${}^{8}_{15}\text{O}$, $t_{1/2} = 1,2 \times 10^2$ secondes.

On note N_0 le nombre de noyaux radioactifs tous identiques initialement présents dans un échantillon. Au bout de la durée $t_{1/2}$, la population de noyaux a diminué de moitié et il en reste un nombre $\frac{N_0}{2}$. On peut déterminer graphiquement $t_{1/2}$ sur la **courbe de décroissance radioactive** (Fig. 4).

Phosphore 32	14,3 jours
Iridium 192	74 jours
Cobalt 60	5,25 années
Césium 137	30 années
Carbone 14	5 730 années
Uranium 238	$4,5 \times 10^9$ années

Fig. 3 : Demi-vies de quelques noyaux radioactifs.

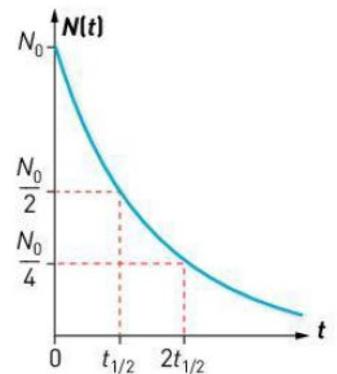


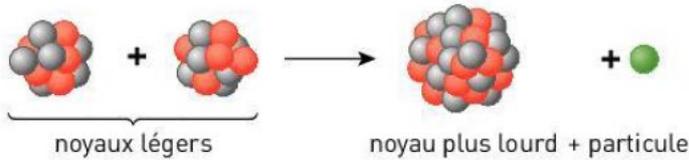
Fig. 4 : Allure de la courbe de décroissance radioactive d'un noyau.

Le vocabulaire à retenir

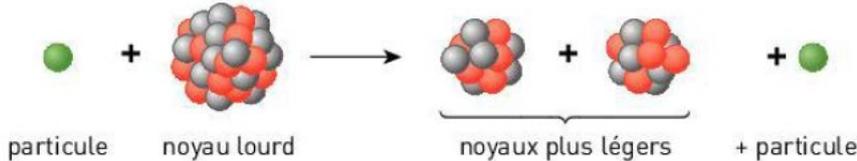
- **Aléatoire** : imprévisible, lié au hasard.
- **Big Bang** : modèle utilisé pour décrire l'origine et l'évolution de l'Univers.
- **Courbe de décroissance radioactive** : représente la réduction du nombre de noyaux radioactifs d'un échantillon au cours du temps.
- **Demi-vie** : au bout de cette durée, la moitié des noyaux d'un échantillon radioactif s'est désintégrée.
- **Fission** : transformation nucléaire dans laquelle un noyau lourd se brise en deux noyaux plus légers.
- **Fusion** : transformation nucléaire dans laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.
- **Nucléosynthèse stellaire** : ensemble des transformations nucléaires dans les étoiles et qui forment les noyaux.
- **Particule élémentaire de matière** : particule qui ne peut être décomposée (électrons, neutrinos, quarks).
- **Radioactivité** : désintégration d'un noyau instable pour en former un autre plus stable.
- **Spontané/spontanément** : qui se produit de soi-même, sans action extérieure.
- **Transformation nucléaire** : transformation de la matière au cours de laquelle les noyaux des atomes sont modifiés.

1 Formation des éléments

Des réactions de fusion nucléaire dans les étoiles forment les éléments :



La fission nucléaire est un autre type de transformation nucléaire :

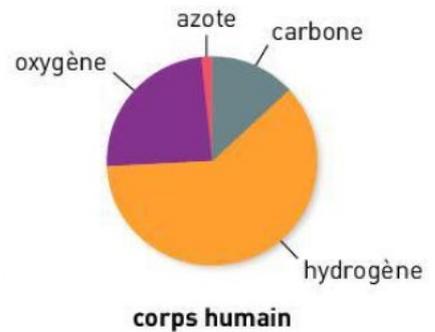
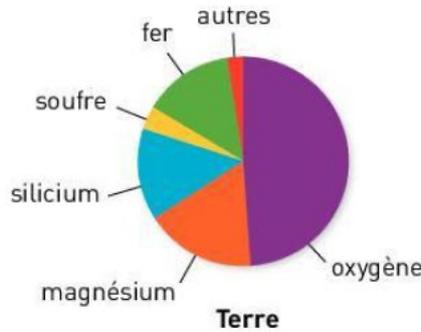
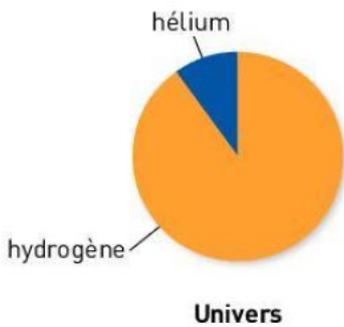


Pour visualiser

Fusion nucléaire
Fission nucléaire

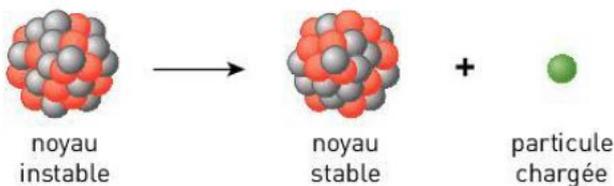
Deux animations pour comprendre la fusion et la fission nucléaires.

Abondance des éléments chimiques



2 Radioactivité

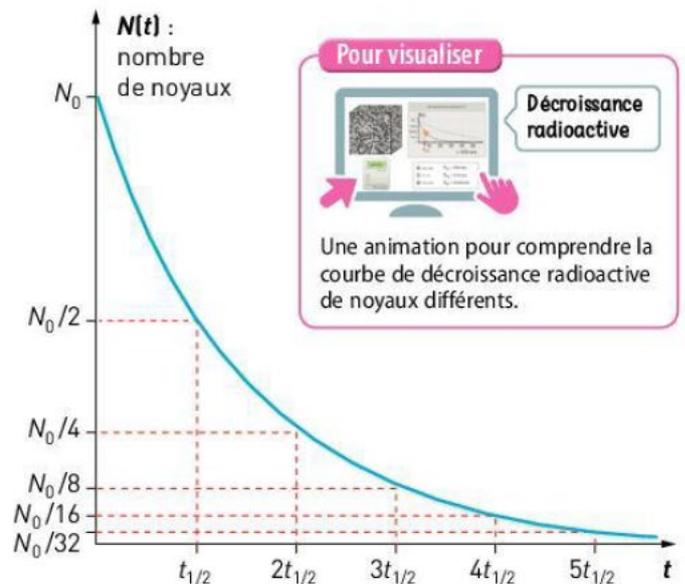
La radioactivité est la désintégration spontanée d'un noyau instable



C'est un phénomène aléatoire au niveau d'un noyau



Courbe de décroissance radioactive



Pour visualiser

Décroissance radioactive

Une animation pour comprendre la courbe de décroissance radioactive de noyaux différents.

$t_{1/2}$, la demi-vie, telle que $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$