

Un niveau d'organisation : les éléments chimiques

De tout temps, les Hommes se sont interrogés sur l'origine et l'histoire de l'Univers. Ce n'est qu'au xx^e siècle que la cosmologie, fondée sur des observations et mesures précises, a permis de répertorier de nombreux éléments qui constituent l'Univers et de comprendre qu'ils se sont formés à partir de l'hydrogène.

Comment, à partir du seul élément hydrogène, la diversité des éléments chimiques est-elle apparue ?

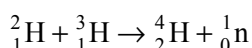
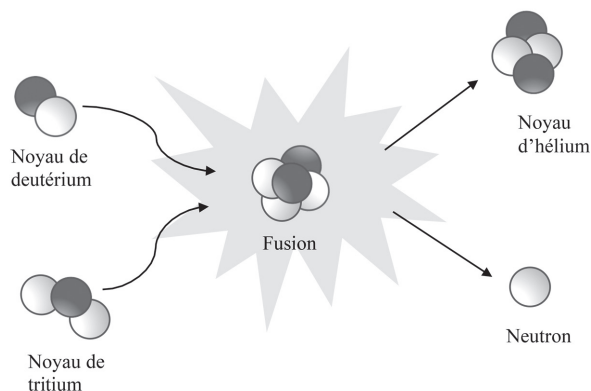
1. L'origine et la répartition des éléments chimiques dans l'Univers

D'après la théorie du « Big Bang », scénario retenu à ce jour, l'Univers à ses débuts, est rempli d'une soupe de particules très chaude, qui sous l'action de différentes interactions, s'associent pour former des neutrons et des protons.

Lorsque l'agitation des particules est suffisamment faible pour permettre aux protons et neutrons de se lier, il y a apparition des premiers noyaux atomiques dont le deutérium (1 proton et 1 neutron : ${}^2_1\text{H}$) et le tritium (1 proton et 2 neutrons : ${}^3_1\text{H}$), isotopes de l'hydrogène ${}^1_1\text{H}$, c'est la **nucléosynthèse primordiale**.

Deux noyaux atomiques légers peuvent fusionner pour donner un noyau plus lourd et plus stable en dégageant une énergie considérable : c'est la **fusion nucléaire**.

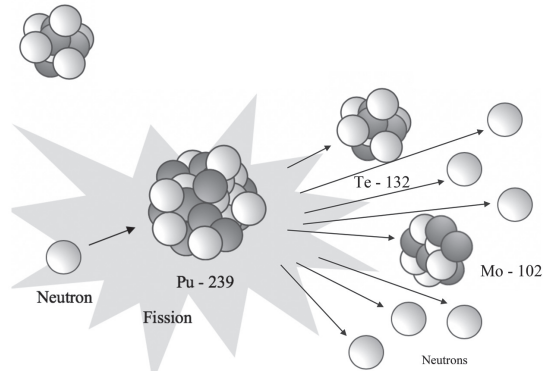
La formation de l'hélium par fusion nucléaire



Au sein des étoiles, les noyaux d'hydrogène et d'hélium peuvent fusionner pour donner de nouveaux éléments chimiques dont le carbone, l'oxygène et même des atomes plus lourds comme le fer.

Certains noyaux trop riches en protons, en neutrons, ou en protons et neutrons, sont instables et peuvent se transformer en d'autres noyaux plus stables en libérant de grandes quantités d'énergie, c'est la **fission nucléaire**.

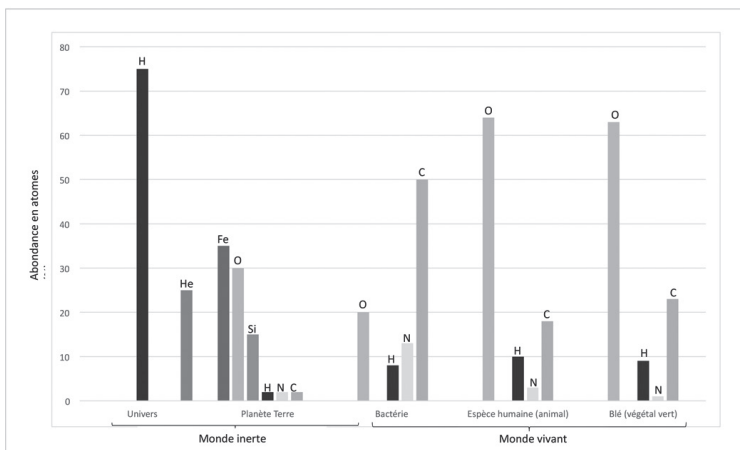
La fission du plutonium



Cette matière, par **accrétion** forme les étoiles et les planètes. Ainsi, au bout de neuf milliards d'années après le Big Bang se forme notre système solaire et onze milliards d'années après ses débuts, la vie apparaît sur Terre.

Les électrons issus de la soupe primordiale et les noyaux formés interagissent pour créer des **atomes** électriquement neutres. L'Univers est alors principalement constitué d'atomes d'hydrogène à 75 %, d'atomes d'hélium à 25 % et d'atomes de lithium (${}^6_3\text{Li}$) en très faible quantité.

Proportion en atomes du monde vivant et du monde inerte



On recense 92 éléments chimiques dans l'Univers que l'on retrouve dans la classification périodique des éléments dite de Mendeleïev d'après le nom d'un chimiste russe **Dimitri Mendeleïev** (1834-1907) qui classa en 1869 les éléments par masse atomique croissante.

L'abondance de ces éléments est différente sur Terre suivant que l'on étudie le monde minéral (inerte) ou le monde vivant, la biosphère étant principalement constituée de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O) et d'azote (N).

2. La radioactivité

Au sein des noyaux atomiques dit **nucléides**, il y a environ 300 nucléides naturels stables et 1 200, dont une vingtaine naturels, instables et éphémères du fait d'un excès de protons ou de neutrons voire des deux.

On appelle **radioactivité** le phénomène qui permet à des noyaux instables de se stabiliser par leur transformation en d'autres noyaux. La radioactivité ne concerne que le noyau des atomes et non les couches électroniques des atomes. La radioactivité naturelle s'accompagne de l'expulsion d'une quantité d'énergie sous forme de particules (α , β) ou de rayonnement (γ). Les réactions radioactives naturelles sont aléatoires, spontanées et inéluctables, indépendantes des conditions de température et de pression. Il existe aussi une radioactivité artificielle qui est générée par un stimulus externe.

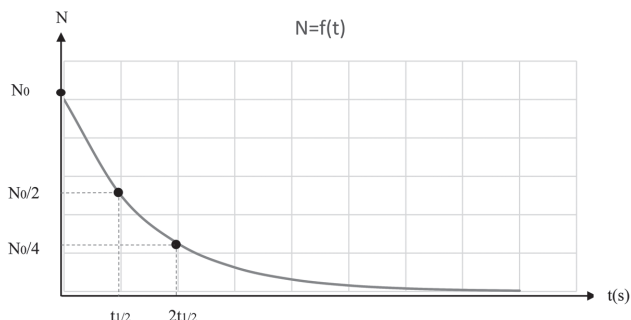
On utilise la radioactivité pour produire de l'électricité, dans le domaine médical mais aussi dans la datation d'échantillons macroscopiques.

La désintégration radioactive

L'étude de la désintégration d'un grand nombre de noyaux radioactifs d'un échantillon macroscopique montre qu'elle suit une loi statistique, celle d'une fonction exponentielle décroissante où le nombre de noyaux diminue au cours du temps.

Soit N_0 le nombre de noyaux dans l'échantillon à $t = 0$ s.

Courbe de désintégration d'un noyau radioactif



La demi-vie $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents a été désintégrée. Elle est caractéristique du nucléide étudié. Les radionucléides connus ont des durées de demi-vie comprises entre 10^{-22} s et 10^{21} ans.

Au bout d'une durée égale à 2 demi-vies, c'est-à-dire lorsque $t = 2 \cdot t_{1/2}$, le nombre de noyaux initiaux a été divisé 2 fois par 2 soit par $2^2 = 4$. Donc le nombre de noyaux restants est $N(t = 2 \cdot t_{1/2}) = N_0/4$.

Ainsi au bout de n demi-vies, c'est-à-dire lorsque $t = n \cdot t_{1/2}$, le nombre de noyaux a été divisé n fois par 2, donc par 2^n . Ainsi, le nombre de noyaux restants est

$$N(t = n \cdot t_{1/2}) = N_0/2^n.$$

La datation d'un échantillon

La loi de décroissance permet de dater un échantillon par rapport à nos jours. On peut déterminer son âge en mesurant les proportions entre des noyaux radioactifs et des noyaux stables.

Ainsi pour dater des organismes autrefois vivants (animal ou végétal), on utilise le carbone qui permet des datations allant de $-1\ 000$ à $-30\ 000$ ans. Dans l'environnement, le carbone existe sous plusieurs formes dont principalement le nucléide stable (^{12}C : carbone 12) et, en moindre quantité, le nucléide radioactif

(^{14}C : carbone 14).

Lors des échanges avec l'environnement (alimentation, respiration), les organismes intègrent à leur structure une partie du carbone 14. Lorsque l'organisme meurt, les échanges de carbone cessent et le noyau radioactif se trouve piégé dans l'échantillon. Le carbone radioactif commence alors sa désintégration en ^{14}N (azote 14) avec une demi-vie de 5 730 ans.

Pour des organismes vivants le processus de transformation du ^{14}C en ^{14}N ne peut être mesuré qu'à partir de la mort du sujet, car il n'y a plus de renouvellement du ^{14}C .

Vers 1950, le chimiste américain **W. Libby** a démontré que tous les êtres vivants sont caractérisés, à tout instant t , par le même rapport du nombre de noyaux de

$$^{14}\text{C} \text{ au nombre de noyaux de } ^{12}\text{C} : \left(\frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C})} \right)_t = 1,0 \times 10^{-12}$$

La mesure de la proportion de $\frac{N(^{14}\text{C})}{N(^{12}\text{C})}$ permet d'obtenir l'âge approximatif de la date de la mort de l'organisme.

Par exemple, pour dater une sculpture ancienne en bois, en mesurant ses proportions $\frac{N\left({}^{14}_6\text{C}\right)}{N\left({}^{12}_6\text{C}\right)}$, on obtient 1 noyau de ${}^{14}\text{C}$ pour 8×10^{12} noyaux de ${}^{12}\text{C}$. On

considère qu'au moment où le bois a été sculpté, les proportions étaient les mêmes

que pour le bois vivant actuel. Or pour un bois vivant actuel, les proportions en

$$\frac{N\left({}^{14}_6\text{C}\right)}{N\left({}^{12}_6\text{C}\right)} = 1,0 \times 10^{-12} \text{ (1 noyau de carbone 14 pour } 10^{12} \text{ noyaux de carbone 12).}$$

Par conséquent, le bois sculpté n'a plus que 1 huitième de son capital de noyaux de ${}^{14}\text{C}$.

Sachant $N(t) = N_0/2^n$ à l'instant $t = n \cdot t_{1/2}$ et que $t_{1/2}({}^{14}\text{C}) = 5\,730$ ans,

$$N(t) = N_0/8 = N_0/2^3$$

$t = 3 \times 5\,730 = 17\,190$ ans, le morceau de bois est âgé de 17 190 ans.

L'essentiel

- Tous les corps présents dans l'Univers sont composés des mêmes éléments chimiques de par leur origine commune.
- Sur Terre, il en est de même avec une distinction entre matière vivante et matière minérale.
- Certains noyaux de ces éléments sont instables et se désintègrent pour gagner en stabilité en émettant un rayonnement très énergétique, c'est la radioactivité.
- On caractérise ces noyaux instables par leur demi-vie : durée nécessaire pour que la moitié de la population initiale des noyaux d'un échantillon se soit désintégrée.
- Le temps de demi-vie d'un noyau radioactif et la proportion de radio-nucléides par rapport aux nucléides stables permettent de dater un échantillon.

Énoncés des exercices

* Exercice 1

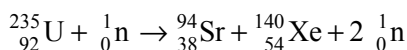
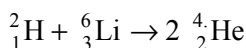
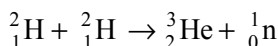
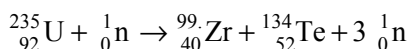
🕒 5 min

1. Quelle est la composition des noyaux d'hydrogène, de deutérium, de tritium et d'hélium 4 ?
2. Qu'est-ce qu'un noyau radioactif ?

** Exercice 2

🕒 5 min

Soit quatre équations de réactions nucléaires :



Préciser quelles équations modélisent des réactions de fusion nucléaire et quelles sont celles qui modélisent des réactions de fission nucléaire.

** Exercice 3

🕒 10 min

D'où vient l'eau qui recouvre la surface de la Terre ? Cette question, intimement liée à celle de l'apparition de la vie, se pose à la communauté scientifique.

Parmi les scénarios envisagés par les chercheurs, l'un d'eux avance que les comètes ou les astéroïdes auraient pu déposer l'eau sur notre planète lors d'un bombardement intensif, il y a environ 4 milliards d'années.

Document 1

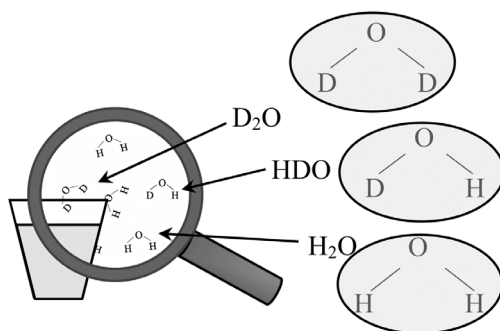
La mission Rosetta

Rosetta est une mission spatiale de l'Agence Spatiale Européenne dont l'objectif principal est de recueillir des données sur la composition de la comète Tchouri. La sonde Rosetta a rejoint la comète le 6 août 2014, à une distance de 500 millions de kilomètres de la Terre. Elle a pu prélever quelques échantillons du sol.

Document 2

Le rapport isotopique D/H dans l'eau

Dans la nature, l'hydrogène existe sous la forme de plusieurs isotopes. L'isotope le plus abondant est l'hydrogène ^1_1H . Un deuxième isotope, le deutérium ^2_1H , est beaucoup plus rare. Ainsi dans un prélèvement d'eau on peut trouver des molécules d'eau sous 3 formes différentes : H_2O (eau), HDO (eau semi-lourde) et D_2O (eau lourde).



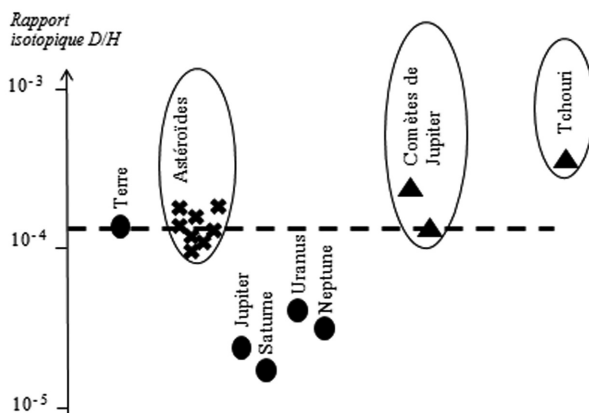
On définit le rapport isotopique de l'élément hydrogène par :

$$\text{Rapport isotopique} = \frac{\text{nombre de noyaux D}}{\text{nombre de noyaux H}}$$

Le rapport isotopique de l'élément hydrogène permet d'identifier la composition d'une eau. Ce rapport est constant sur tous les océans de la Terre ; il en est de même pour tous les astres.

Document 3

Rapport isotopique D/H dans l'eau sur différents astres



1. Expliquer la différence entre ces deux isotopes hydrogène et deutérium.
2. Justifier l'utilisation du terme « lourde » pour l'eau utilisée dans le document 2.
3. Montrer que les mesures réalisées sur la comète Tchouri ne permettent pas de confirmer l'hypothèse selon laquelle l'origine de l'eau terrestre serait due à des dépôts de comètes ou d'astéroïdes.

** Exercice 4

 20 min

Des analyses des compositions chimiques de différentes structures ont été répertoriées dans un tableau.

Composition chimique de structures issues de matières vivante et minérale

Algue	O	C	H	N	P			
	78%	11%	9%	1%	1%			
Homme	O	C	H	N	P	S		
	64%	20%	9%	5%	1%	1%		
Granite	O	Si	Al	K	Na	Ca	Fe	Mg
	49,7%	34,9%	7,1%	2,9%	2,2%	1,5%	1,5%	0,5%
Cœur du Soleil	He	H	Autres					
	63%	35%	2%					
Univers	H	He	O	Ne	N	C	Autres	
	75%	23%	0,6%	0,3%	0,2%	0,1%	0,8%	

1. À partir du tableau, réaliser les représentations graphiques en diagrammes circulaires de chaque matière étudiée.
2. Quels sont les éléments chimiques qui permettent de distinguer la matière minérale de la matière vivante ?
3. Pourquoi peut-on dire que nous sommes des poussières d'étoiles ?

** Exercice 5

 15 min

Vers 1932, le couple de physiciens français Frédéric Joliot et Irène Curie bombardent pour leurs recherches avec une source de particules alpha (noyaux d'hélium) des éléments et, en analysent les réactions nucléaires produites, ils remarquent que des éléments légers, en particulier l'aluminium et le bore, éjectent parfois un neutron. Ils observent également que la matière irradiée conserve une radioactivité relativement durable après l'enlèvement de la source de particules alpha. Ainsi, une feuille d'aluminium irradiée émet un rayonnement dont l'intensité décroît exponentiellement en fonction du temps avec une demi-vie de 3 minutes 15 secondes. Un résultat analogue est obtenu avec du bore irradié, mais la demi-vie est différente : 14 minutes. La seule explication possible, c'est que l'aluminium et le bore, éléments naturellement stables, sont devenus radioactifs.

Extrait tiré de : « Les grandes expériences scientifiques » de Michel Rival (Éd. du Seuil)