

7.

Physique nucléaire



©Bjoern Wylezich Shutterstock.com

Sommaire

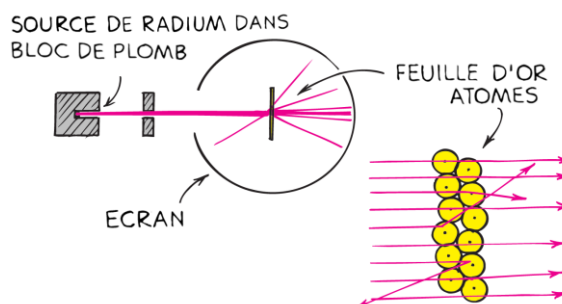
1	Noyaux atomiques	1
1.1	Composition et cohésion	1
1.2	Nombres caractéristiques	1
1.3	Nucléide et isotopes	1
1.4	Masse d'un noyau atomique	2
1.5	Stabilité et énergie de liaison	3
1.5.1	Défaut de masse d'un noyau	3
1.5.2	Énergie de liaison nucléaire	3
2	Lois de conservation des réactions nucléaires	5
3	Radioactivité	6
3.1	Découverte (pour en savoir plus)	6
3.2	Définition	6
3.3	Effet ionisant du rayonnement radioactif	7
3.4	Types de désintégrations radioactives	8
3.4.1	Désintégration α	8
3.4.2	Désintégration β	8
3.4.3	Désintégration γ	9
3.4.4	Pénétrance	10
3.5	Table des nucléides	11
3.6	Décroissance radioactive	12
3.6.1	Courbe de décroissance et demi-vie	12
3.6.2	Loi de décroissance radioactive	13
3.6.3	Activité	14
3.7	Familles radioactives	15
3.8	Applications	16
3.8.1	Datation radioactive	16
3.8.2	Imagerie médicale	17
4	Bilan énergétique des réactions nucléaires	18
5	Fission nucléaire	19
5.1	Définition	19
5.2	Principe de la fission induite	19
5.3	Exemple de la fission induite de l'uranium 235	19
5.4	Énergie libérée par la fission	20

5.5	Réaction en chaîne.....	21
6	Fusion nucléaire.....	22
6.1	Définition	22
6.2	Principe de la fusion.....	22
6.3	Exemples de réactions de fusion	22
6.4	Énergie libérée par la fusion	23
7	Pour en savoir plus.....	24
7.1	Réacteur de fission.....	24
7.1.1	Le combustible nucléaire	24
7.1.2	Exemple du réacteur à eau pressurisée (type Cattenom)	24
7.2	Réacteur de fusion.....	25
7.3	Bombes nucléaires.....	26
8	Exercices	28

1 Noyaux atomiques

1.1 Composition et cohésion

C'est en 1911 que Sir Ernest Rutherford prouve l'existence d'un **noyau atomique** minuscule, très massif et de charge positive en constatant que des particules alpha (noyaux d'hélium 4) bombardées sur une feuille d'or mince rebondissent dans les très rares cas où elles n'arrivent pas à la traverser.

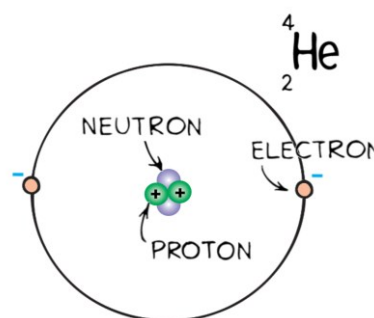


Le noyau atomique (diamètre 10^{-14} m), bien que de taille très petite par rapport à l'atome (diamètre 10^{-10} m), comporte presque la masse entière de celui-ci.

Le noyau atomique est composé de particules, appelées **nucléons**, dont il existe deux types :

- le **proton** qui porte une charge électrique positive égale à la charge élémentaire e ;
- le **neutron** qui est électriquement neutre et qui n'est que de 0,2 % plus lourd que le proton.

Les nucléons s'attirent mutuellement avec une très grande force, appelée **force nucléaire forte**, qui est beaucoup plus intense que la répulsion électrique entre les protons ou l'attraction gravitationnelle entre les nucléons. La portée de la force forte est cependant très petite, limitée environ au diamètre d'un nucléon (10^{-15} m).



1.2 Nombres caractéristiques

Le nombre Z de protons dans un noyau atomique est appelé **numéro atomique** ou **nombre de charge** et est égal au nombre d'électrons de l'atome neutre.

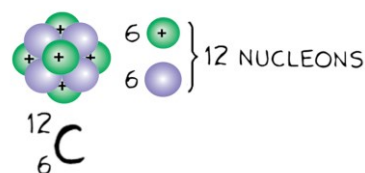
Le nombre N de neutrons dans un noyau atomique léger est environ égal à Z et devient de plus en plus grand que Z dans le cas de noyaux lourds.

Le nombre total $A = Z + N$ de nucléons dans un noyau atomique est appelé **nombre de masse**.

1.3 Nucléide et isotopes

Un **nucléide** est un ensemble de noyaux atomiques identiques ou d'atomes de noyau identique. Il est caractérisé par son nombre de protons Z et par son nombre de nucléons A .

Écriture symbolique : A_ZX (X : élément chimique)



Les différents nucléides d'un même élément chimique X sont appelés **isotopes**. Ils se différencient par leur nombre de neutrons $N = A - Z$. Les isotopes d'un élément ont pratiquement les mêmes propriétés chimiques. Lorsqu'on veut souligner les propriétés chimiques plutôt que les propriétés nucléaires d'une seule espèce d'atomes, on emploie souvent le terme « isotope » au singulier au lieu de « nucléide » pour la désigner.

Exemples :

- Isotopes naturels de l'hydrogène ($Z = 1$ proton)

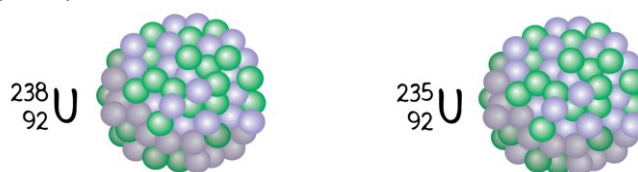

 ${}^1_1\text{H}$


 ${}^2_1\text{H}$


 ${}^3_1\text{H}$

nom du nucléide :	protium (atome) proton (noyau)	deutérium (atome) deutéron (noyau)	tritium (atome) triton (noyau)
nombre de neutrons N :	0	1	2
abondance :	99,985 %	0,015 %	traces
stabilité :	stable	stable	instable

- Isotopes naturels principaux de l'uranium :



${}^{238}_{92}\text{U}$: $Z = 92$ protons, $A = 238$ nucléons et $N = 146$ neutrons (abondance : 99,275 %).

${}^{235}_{92}\text{U}$: $Z = 92$ protons, $A = 235$ nucléons et $N = 143$ neutrons (abondance : 0,725 %).

1.4 Masse d'un noyau atomique

La **masse d'un noyau atomique** d'un nucléide X est notée m_X . Elle diffère de la **masse d'un atome** de ce nucléide qui renferme également des électrons et qui est notée $m(X)$. En négligeant la faible contribution de l'énergie de liaison des électrons à la masse d'un atome supposé neutre, on a en bonne approximation :

$$m_X \simeq m(X) - Z m_e$$

où Z désigne le nombre de protons respectivement d'électrons et m_e la masse de l'électron.

Les masses des noyaux et des atomes sont souvent exprimées dans l'**unité de masse atomique**, qui est définie comme un douzième de la masse d'un atome neutre de carbone 12 :

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m({}^{12}_6\text{C}) = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,49 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

L'unité de masse atomique est environ égale à la masse d'un nucléon :

$$1 \text{ u} \simeq m_p \simeq m_n$$

■ As-tu compris ?

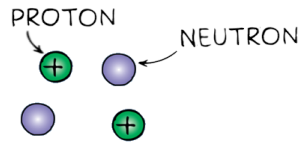
- Lequel a une masse plus grande : un atome d'hélium ou un atome de néon ?
- Lequel contient un nombre plus grand d'atomes : un gramme d'hélium ou un gramme de néon ?
- Les nucléides ${}^{12}_6\text{X}$ et ${}^{14}_6\text{X}$ appartiennent-ils au même élément chimique ? Comment les nomme-t-on ?
- Les nucléides ${}^{14}_6\text{X}$ et ${}^{14}_7\text{X}$ appartiennent-ils au même élément chimique ? Justifier.
- On considère quatre nucléides ${}^{210}_{83}\text{X}$, ${}^{210}_{84}\text{X}$, ${}^{210}_{82}\text{X}$, ${}^{206}_{82}\text{X}$.
Nommer les éléments chimiques auxquels appartiennent ces nucléides.

1.5 Stabilité et énergie de liaison

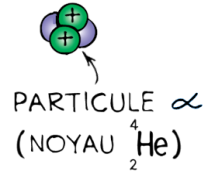
1.5.1 Défaut de masse d'un noyau

Expérimentalement, on a constaté que la masse d'un noyau atomique est toujours inférieure à la somme des masses des nucléons qui le constituent, pris séparément.

Exemple :



$$2 m_p + 2 m_n = 6,6904 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ = 3753 \text{ MeV}/c^2$$

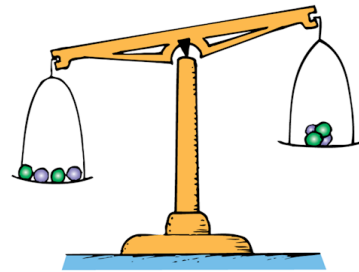


$$m_\alpha = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ = 3724 \text{ MeV}/c^2$$

La différence de masse vaut dans ce cas :

$$2 m_p + 2 m_n - m_\alpha = 0,0504 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 28,3 \text{ MeV}/c^2$$

Ceci correspond à une perte de masse d'environ 0,8%.



De façon générale :

Le **défaut de masse** Δm d'un noyau A_ZX est égal à la différence entre la masse totale de ses nucléons pris séparément et sa propre masse :

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_X$$

1.5.2 Énergie de liaison nucléaire

Lorsqu'un noyau est brisé en ses nucléons, on assiste à une augmentation de masse, égale au défaut de masse Δm . D'après Einstein, l'augmentation de masse est équivalente à l'énergie qu'on a fournie au noyau pour le briser.



L'**énergie de liaison** E_ℓ d'un noyau A_ZX est égale à l'énergie minimale nécessaire pour le séparer en ses nucléons :

$$E_\ell = \Delta m c^2 \quad (c: \text{célérité de la lumière dans le vide})$$

Inversement, lorsqu'un noyau se forme à partir de nucléons séparés, on assiste à une diminution de masse, égale au défaut de masse. Elle se traduit par une libération d'énergie qui est égale à l'énergie de liaison.

Exemple :

L'énergie de liaison de la particule α vaut :

$$E_\ell = \Delta m c^2 = 28,3 \frac{\text{MeV}}{c^2} \cdot c^2 = 28,3 \text{ MeV}$$

Ceci signifie qu'il faut 28,3 MeV d'énergie pour séparer les quatre nucléons de la particule α , ou, inversement, que 28,3 MeV d'énergie sont libérée lorsqu'une particule α se forme à partir de deux protons séparés et de deux neutrons séparés.

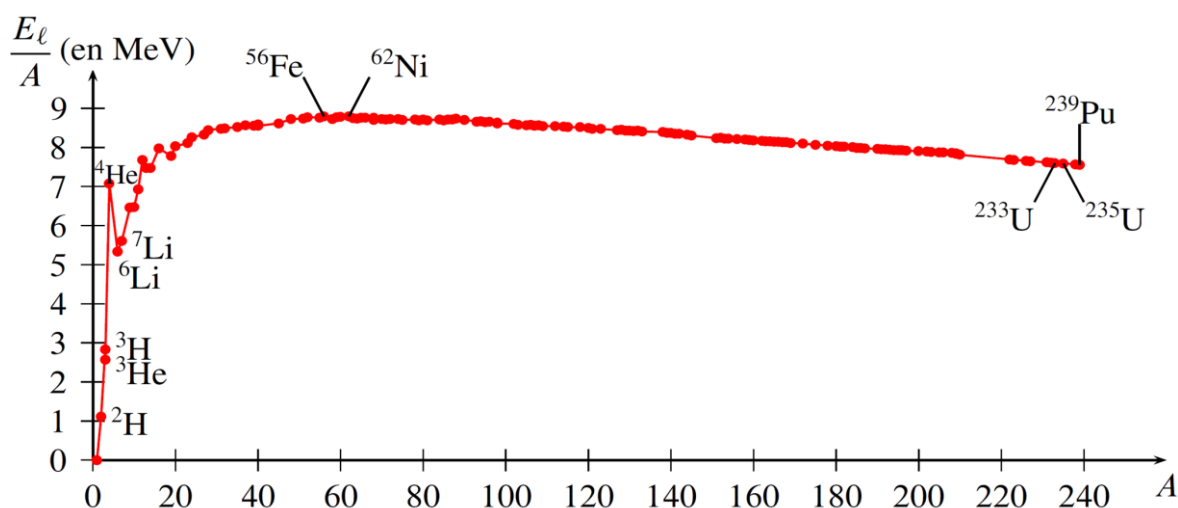
L'énergie de liaison moyenne par nucléon $\frac{E_\ell}{A}$ est égale au rapport entre l'énergie de liaison E_ℓ du noyau atomique considéré et son nombre de nucléons A .

Exemple :

L'énergie de liaison moyenne par nucléon pour la particule α vaut :

$$\frac{E_\ell}{A} = \frac{28,3 \text{ MeV}}{4} = 7,07 \text{ MeV}$$

Considérons la représentation de l'énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre de masse A (« **courbe d'Aston** ») :



L'allure de la courbe permet de déduire que :

- À l'exception des noyaux très légers, l'énergie de liaison moyenne par nucléon a une valeur entre 7 MeV et presque 9 MeV. (Par comparaison, l'énergie de liaison de l'électron dans l'atome H ne vaut que 13,6 eV).
- Les noyaux avec $A \approx 60$, comme le fer 56 ou le nickel 62, sont les plus stables.
- La fission d'un noyau très lourd libère de l'énergie, alors que la fusion de noyaux légers en libère encore davantage.

■ **As-tu compris ?**

- Calculer l'énergie de liaison moyenne par nucléon pour le noyau de ^7_3Li , sachant que sa masse vaut $m_{^7_3\text{Li}} = 7,01436 \text{ u}$.
- Quel noyau atomique est le plus stable ?
- Dans quel noyau atomique la masse moyenne par nucléon est-elle la plus petite ? Justifier.

2 Lois de conservation des réactions nucléaires

Une **réaction nucléaire** est un processus au cours duquel un ou plusieurs noyaux atomiques se transforment. Parmi les principaux types de réactions nucléaires, on compte les chocs nucléaires, les désintégrations radioactives, la fission nucléaire et la fusion nucléaire.

Contrairement à une réaction chimique, une réaction nucléaire peut modifier le noyau atomique et ainsi convertir un élément chimique en un autre (**transmutation nucléaire**). En revanche :

Toute réaction nucléaire conserve le nombre total de charge Z et le nombre total de masse A .

C'est la **loi de Soddy**, nommée en l'honneur de Frederick Soddy (1877-1956), radiochimiste britannique et lauréat du prix Nobel 1921.

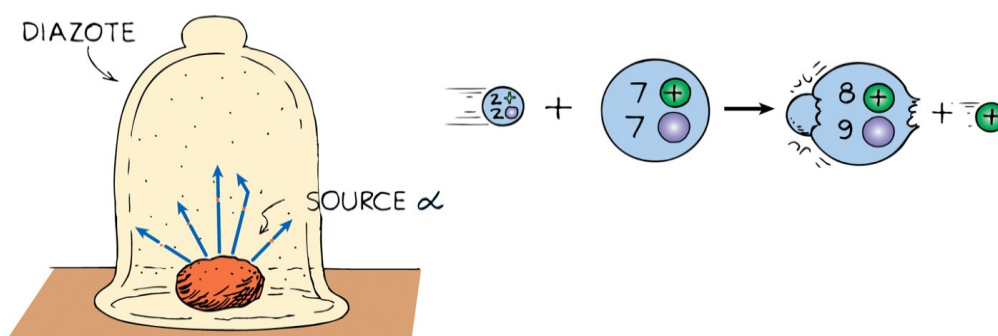
De plus, toute réaction nucléaire obéit bien évidemment au *principe de la conservation de l'énergie* et au *principe de la conservation de la quantité de mouvement*.

Exemples de réactions nucléaires :

- Les particules α utilisées en 1911 par Ernest Rutherford pour mettre en évidence l'existence du noyau atomique étaient produites par la désintégration radioactive du radium 226 selon l'équation :



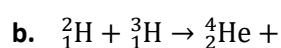
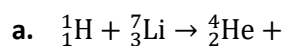
- La première transmutation nucléaire artificielle fut observée en 1919 par Ernest Rutherford, lorsqu'il réussit à transformer de l'azote par bombardement avec des particules α en oxygène selon l'équation :



Les éléments du tableau périodique qui se trouvent derrière l'uranium (éléments transuraniens) ont été produits par transmutation artificielle.

■ As-tu compris ?

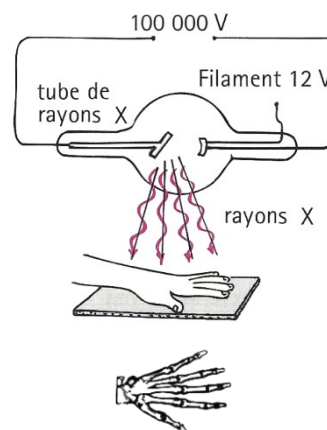
9. Compléter les réactions nucléaires suivantes :



3 Radioactivité

3.1 Découverte (pour en savoir plus)

En 1895, le physicien allemand **Wilhelm Roentgen** a découvert un rayonnement de nature inconnue, qui est produit lorsqu'un faisceau d'électrons frappe le verre d'un tube à gaz de décharge. Ces **rayons X** se sont révélés être des ondes électromagnétiques de haute fréquence, émises lors de la décélération d'électrons à l'impact sur une cible (rayonnement de freinage) ou lors de la désexcitation d'atomes de la cible vers les couches électroniques les plus internes (rayonnement caractéristique). Dû à leur haute énergie, les rayons X peuvent pénétrer à travers de nombreuses couches d'atomes avant d'être complètement absorbés. Ils traversent par exemple le tissu souple de la main mieux que les os et produisent ainsi une image sur une plaque photographique.



En 1896, soit quelques mois après la découverte des rayons X, le physicien français **Henri Becquerel** constata qu'une plaque photographique enveloppée de feuilles de papier noir très épais était impressionnée au voisinage de sels d'uranium. Il conclut que l'uranium émet des radiations invisibles qui traversent le papier opaque à la lumière. Cette radiation diffère des rayons X puisqu'elle peut être déviée par des champs électriques et magnétiques. Elle met en évidence un changement beaucoup plus dramatique dans l'atome que des transitions d'électrons entre différentes couches : elle provient en effet de changements dans le noyau même de l'atome. C'était la découverte de la **radioactivité**, nom inventé en 1898 par **Pierre** et **Marie Curie** qui étudiaient de près ce phénomène. Le couple Curie découvrit notamment en 1898 les éléments radioactifs polonium et radium en analysant la pechblende, un minéral d'uranium. En 1903, Marie et Pierre Curie partagent avec Henri Becquerel le prix Nobel de physique pour leurs recherches sur la radioactivité.



*Marie Curie (1867-1934),
lauréate du prix Nobel de
physique 1903 et du prix
Nobel de chimie 1911*

3.2 Définition

La **radioactivité** est la transformation spontanée d'un noyau atomique instable en un noyau atomique plus stable avec émission d'un rayonnement.

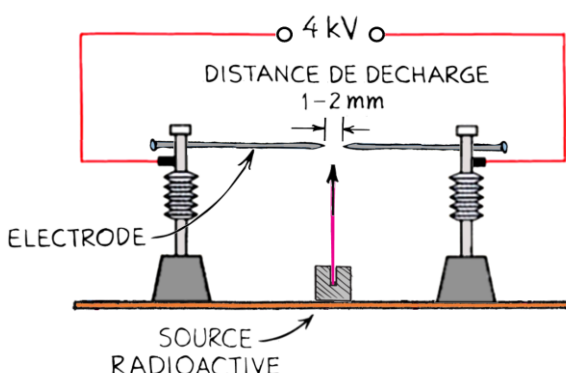
Plus de 99,9 % des atomes de notre environnement sont stables. Leurs noyaux ne vont probablement pas changer durant toute l'existence de l'Univers. La radioactivité est donc une réaction nucléaire spontanée qui n'affecte que certains nucléides : les **radionucléides (nucléides radioactifs, isotopes radioactifs ou radioisotopes)**.

On distingue entre **radioactivité naturelle** et **radioactivité artificielle** selon que le radionucléide est présent en Nature ou a été créé artificiellement dans des réactions nucléaires.

Le noyau atomique initial et instable est nommé **noyau père** ; le noyau atomique final et plus stable est nommé **noyau fils**.

3.3 Effet ionisant du rayonnement radioactif

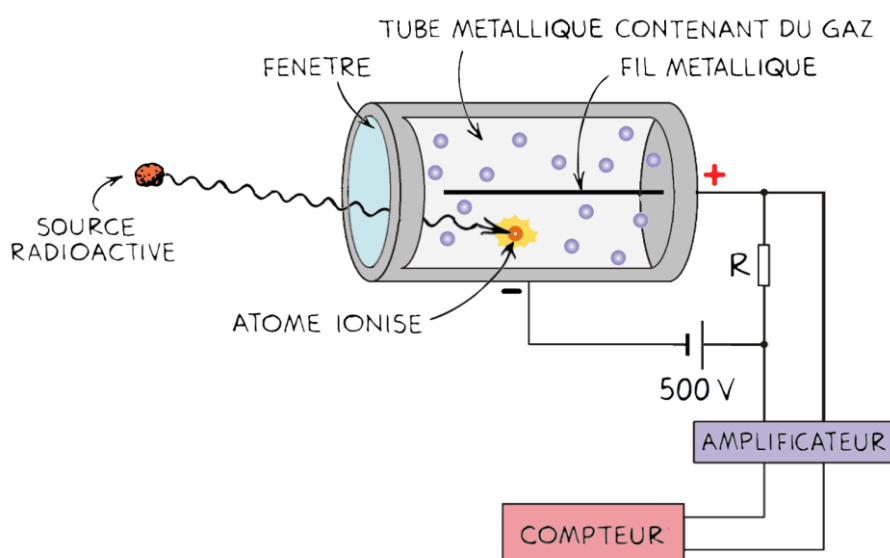
L'expérience de l'éclateur permet de montrer un pouvoir particulier du rayonnement qui est émis par les radionucléides. On diminue la distance entre les électrodes autant que possible sans qu'il y ait une décharge d'étincelle. Lorsqu'on approche ensuite une source radioactive, on observe qu'une décharge d'étincelle éclate entre les électrodes. On en conclut que le rayonnement « radioactif » a créé des charges électriques en traversant l'air.



Le rayonnement radioactif est un **rayonnement ionisant** : il peut créer des ions en arrachant des électrons aux atomes ou aux molécules.

Le fait d'être ionisant rend le rayonnement dangereux pour les êtres vivants. Il peut endommager l'ADN¹ et dissocier des molécules (radiolyse), ce qui peut causer le dysfonctionnement, la mutation ou la mort de cellules.

Mais l'effet ionisant permet aussi de détecter le rayonnement radioactif. Le **compteur Geiger** est un des détecteurs de radiation le plus connu qui utilise cet effet². Le compteur comprend une chambre de forme cylindrique qui est remplie de gaz et qui dispose de deux électrodes : un fil métallique au milieu de la chambre sert d'anode (+), le manteau métallique de la chambre sert de cathode (-). Entre les deux électrodes règne une tension de plusieurs centaines de volts. Lorsque le rayonnement passe à travers la paroi d'entrée, il ionise des atomes de gaz. Le gaz devient conducteur et un bref courant électrique circule ce qui se traduit par une variation de tension au niveau de la résistance. L'impulsion de tension est amplifiée et envoyée soit vers un haut-parleur (« bip-bip »), soit vers un compteur d'impulsions. Après la détection de l'impulsion de tension, on revient aux conditions de départ.



¹ L'acide désoxyribonucléique (ADN) est le support de l'information génétique.

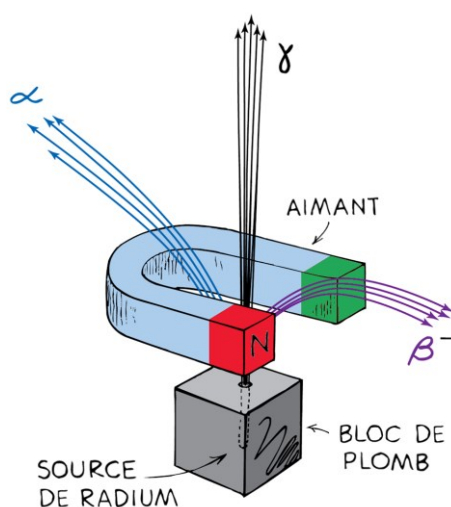
² Il a été développé par les physiciens allemands Hans Geiger et Walther Müller en 1928.

3.4 Types de désintégrations radioactives

Les radionucléides émettent trois types de radiations distinctes, nommées α , β et γ .

- Un rayonnement α est un faisceau de noyaux d'hélium (charge positive).
- Un rayonnement β est un faisceau d'électrons (charge négative ; β^-) ou de positrons (charge positive ; β^+).
- Le rayonnement γ est un rayonnement électromagnétique (respectivement un faisceau de photons) sans charge électrique de très grande fréquence.

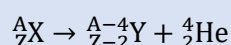
Ces rayonnements peuvent être séparés en les faisant passer par un champ magnétique³.



3.4.1 Désintégration α

La **désintégration α** est un type de désintégration radioactive où le noyau père émet spontanément un noyau d'hélium 4 (particule α).

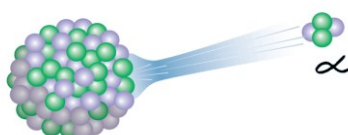
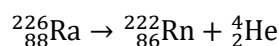
Équation de désintégration :



Le nombre de masse du noyau père diminue de 4 unités et son nombre de charge de 2 unités. X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

Cause : La radioactivité α est caractéristique des noyaux trop lourds (pour la plupart $A > 200$).

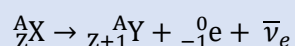
Exemple :



3.4.2 Désintégration β

La **désintégration β^-** est un type de désintégration radioactive où le noyau père émet spontanément un électron (particule β^-) et un antineutrino ($\bar{\nu}_e$)⁴.

Équation de désintégration :

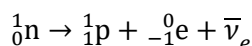


³ Il existe encore d'autres types de désintégration plus rares (capture électronique, émission de neutron, émission de proton, double désintégration β , fission spontanée, ...).

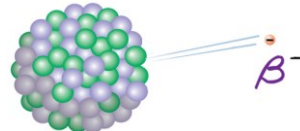
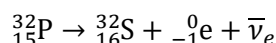
⁴ Le neutrino [électronique] (symbole : ν_e) et son antiparticule, l'antineutrino [électronique] (symbole : $\bar{\nu}_e$), sont des particules élémentaires neutres de masse presque nulle qui n'interagissent que très faiblement avec la matière. Le neutrino a été postulé par Wolfgang Pauli (1900-1958) en 1930 pour expliquer comment l'énergie et de la quantité de mouvement sont conservées lors de la désintégration β .

Le nombre de nucléons du noyau père ne change pas et son nombre de charge augmente d'une unité. X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

Cause : La radioactivité β^- est caractéristique des noyaux contenant trop de neutrons. Les particules émises sont créées lors de la transformation d'un neutron en un proton selon l'équation :

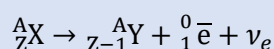


Exemple :



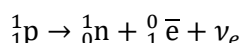
La **désintégration β^+** est un type de désintégration radioactive où le noyau père émet spontanément un positron (particule β^+) et un neutrino (ν_e).

Équation de désintégration :

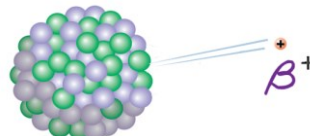
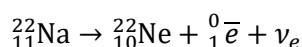


Le nombre de nucléons du noyau père ne change pas et son nombre de charge diminue d'une unité. X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

Cause : La radioactivité β^+ est caractéristique des noyaux contenant trop de protons. Les particules émises sont créées lors de la transformation d'un proton en un neutron selon l'équation :



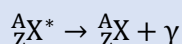
Exemple :



3.4.3 Désintégration γ

La **désintégration γ** est un type de désintégration radioactive où un noyau énergétiquement excité (indiqué par une étoile *) émet spontanément un ou plusieurs photons de haute énergie (particules γ).

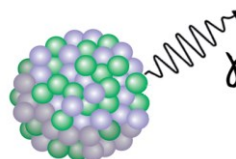
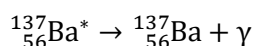
Équation de désintégration :



Ni le nombre de masse du noyau père ni son nombre de charge ne changent.

Cause : La radioactivité γ est un effet secondaire qui accompagne les désintégrations α ou β ou une réaction nucléaire provoquée. À l'issue d'un tel processus, un noyau se retrouve souvent dans un état excité et dissipe de l'énergie par rayonnement électromagnétique de haute fréquence.

Exemple :

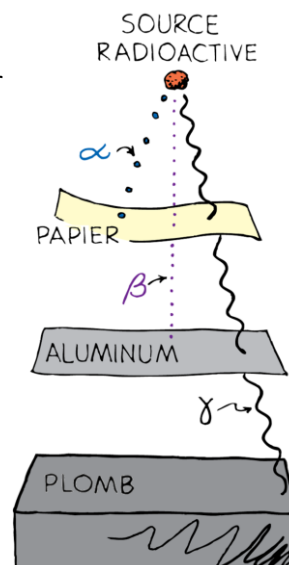


■ As-tu compris ?

10. Pourquoi les rayonnements α et β^- sont-ils déviés dans des sens opposés lorsqu'ils traversent un champ magnétique ? Pourquoi le rayonnement γ n'est-il pas dévié ?

3.4.4 Pénétrance

- Les particules α ont des vitesses faibles par rapport à la vitesse de la lumière. Elles sont peu pénétrantes et une feuille de papier suffit pour les arrêter.
- Le rayonnement β peut être bloqué par une feuille d'aluminium de quelques millimètres d'épaisseur.
- Le rayonnement γ est très pénétrant. Il peut traverser plusieurs décimètres de plomb, ou plusieurs mètres de béton.

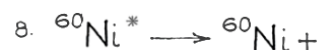
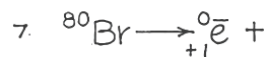
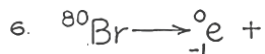
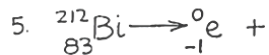
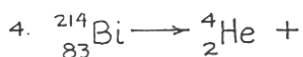
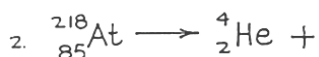
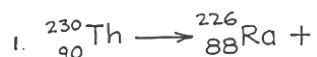


■ As-tu compris ?

- Le gaz dans le ballon de la petite fille est constitué de particules α et β^- produites par des réactions de désintégration radioactive.
 - Si le mélange est électriquement neutre, comparer le nombre de particules α et β^- dans le ballon.
 - Pourquoi ces particules α et β^- ne sont pas dangereuses pour l'enfant ?
 - Le mélange de ces particules α et β^- constitue quel élément ?



- Compléter les réactions de désintégration suivantes :

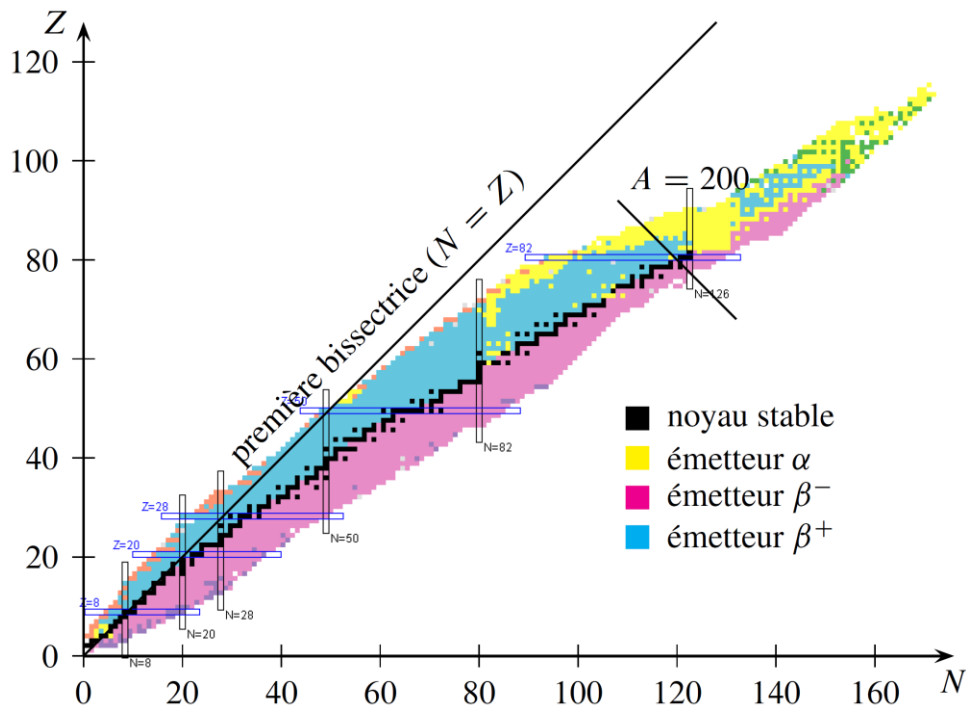


NUCLEAR PHYSICS... IT'S THE SAME TO ME WITH THE FIRST TWO LETTERS INTERCHANGED!



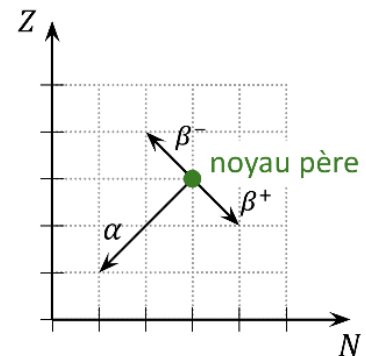
3.5 Table des nucléides

La table des nucléides est la représentation graphique de tous les nucléides stables et instables sous forme d'un diagramme $Z = f(N)$.



Discussion :

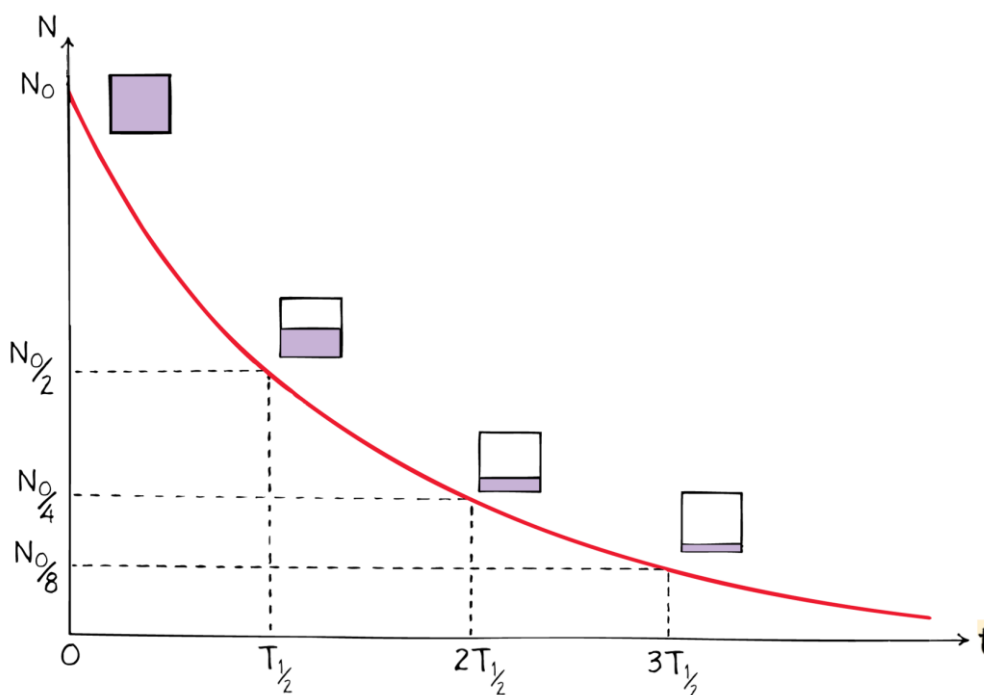
- Les noyaux stables sont répartis étroitement autour d'une courbe, que l'on appelle **courbe de stabilité**.
- Pour les noyaux stables avec $Z \leq 20$, le nombre de neutrons est environ égal au nombre de protons : $N \simeq Z$.
- Pour les noyaux avec $Z > 20$, le nombre de neutrons est plus grand que le nombre de protons. L'excès de neutrons assure que l'interaction forte attractive entre les nucléons domine l'interaction électrostatique répulsive entre protons. (Les neutrons, particules électriquement neutres, ne participent pas à l'interaction électrostatique.) Par conséquent, l'excès de neutrons doit augmenter avec le nombre de protons ce qui se traduit dans la représentation graphique par l'écart croissant entre les noyaux et la première bissectrice.
- Les noyaux émetteurs α sont en général des noyaux lourds ($A > 200$).
- Les noyaux émetteurs β^- se trouvent au-dessous de la courbe de stabilité.
- Les noyaux émetteurs β^+ se trouvent au-dessus de la courbe de stabilité.
- Les radionucléides se désintègrent tel que leur noyau fils est plus rapproché de la courbe de stabilité.



3.6 Décroissance radioactive

3.6.1 Courbe de décroissance et demi-vie

L'expérience montre que le nombre d'impulsions par unité de temps enregistrés par un détecteur (**taux de comptage**) dirigé sur une source radioactive diminue exponentiellement avec le temps. Il en est de même pour le nombre N de noyaux radioactifs présents dans la source, tel qu'illustré par la **courbe de décroissance** (N_0 : nombre initial de noyaux) :



La décroissance radioactive est caractérisée par un temps particulier :

La **demi-vie** (ou **période radioactive**) d'un radionucléide (symbole : $T_{1/2}$) est le temps au bout duquel la moitié des noyaux d'une population initiale s'est désintégrée.

Unité SI : $[T_{1/2}] = 1 \text{ s}$

La demi-vie est caractéristique du radionucléide. Les demi-vies des radionucléides couvrent une gamme très large de valeurs, allant d'environ 10^{-22} s (environ le temps que la lumière mettrait pour traverser une distance égale au diamètre d'un noyau atomique) à 10^{30} s (environ 1'000 milliards fois l'âge de l'Univers).

■ As-tu compris ?

13. Si un isotope radioactif a une demi-vie d'un an, quel pourcentage d'un échantillon initial de cet isotope restera-t-il après deux ans ?
14. L'actinium 225 a une demi-vie de 10 jours. Quel pourcentage du nombre initial de noyaux présents dans un échantillon de ce radionucléide en reste après 30 jours ?
A. 33,3% B. 30 % C. 50 % D. 25 % E. 12,5% F. 10%

3.6.2 Loi de décroissance radioactive

Considérons un échantillon comprenant N noyaux d'un radionucléide donné à l'instant t . Pendant un certain intervalle de temps dt , le nombre N de noyaux va diminuer de $-dN$ ($dN < 0$ car N diminue).

L'instant de la désintégration radioactive d'un noyau individuel est aléatoire. Cependant, elle est équiprobable à chaque instant. En notant λ la probabilité de désintégration par unité de temps, la probabilité qu'un noyau se désintègre dans l'intervalle de temps dt s'écrit⁵ :

$$\frac{-dN}{N} = \lambda dt$$

La constante λ est caractéristique du radionucléide. On l'appelle **constante radioactive** ou **constante de désintégration** du radionucléide.

Par intégration on obtient :

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt$$
$$\ln N = -\lambda t + C$$

La constante d'intégration C se détermine à partir des conditions initiales. Si, à l'instant $t = 0$, il y a N_0 noyaux radioactifs, alors :

$$\ln N_0 = C$$

Il vient :

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$
$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

Finalement, la **loi de décroissance radioactive** s'écrit :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Le nombre de noyaux radioactifs diminue donc *exponentiellement* avec le temps.

Relation entre $T_{1/2}$ et λ

Après le temps $t = T_{1/2}$, le nombre initial N_0 de noyaux s'est réduit de moitié. D'après la loi de décroissance :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad |: N_0$$

En réarrangeant les termes et en prenant le logarithme naturel de chaque membre, il vient :

$$-\lambda T_{1/2} = \ln \frac{1}{2}$$

Finalement :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4)$$

⁵ $\frac{-dN}{N} = \frac{\text{nombre de cas favorables}}{\text{nombre de cas possibles}} = p$: application de la formule de Laplace pour la probabilité p d'un événement, valable dans le cas de l'équiprobabilité

■ As-tu compris ?

15. La demi-vie du radon 220 vaut 52 s. Avec quelle probabilité un noyau de ce radionucléide va-t-il se désintégrer dans la prochaine seconde⁶ ?
16. Montrer en partant de la relation (3), que la masse m d'un échantillon radioactif subit également une décroissance exponentielle au cours du temps selon l'équation :

$$m(t) = m_0 e^{-\lambda t}$$

où m_0 désigne la masse initiale de l'échantillon.

3.6.3 Activité

L'**activité** A d'une source radioactive est égale au nombre de noyaux qui se désintègrent par unité de temps :

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

L'unité SI d'activité est le **becquerel** : 1 désintégration/s = 1 becquerel = 1 Bq

Par l'équation (3), on trouve :

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

de sorte que l'activité s'écrit :

$$A = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t}$$

où $A_0 = \lambda N_0$ désigne l'activité à l'instant $t = 0$.

De même que le nombre de noyaux radioactifs, l'activité suit une loi de décroissance exponentielle.

Le **taux de comptage** déterminé expérimentalement à l'aide d'un détecteur de radiation est approximativement proportionnel à l'activité⁷ et suit donc aussi une décroissance exponentielle.

■ As-tu compris

17. Montrer que l'activité d'un échantillon radioactif de masse m et de demi-vie $T_{1/2}$ peut s'écrire :

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{M(X)} N_A$$

où $M(X)$ désigne la masse molaire du radioisotope et N_A la constante d'Avogadro.

18. Comparer les activités d'un gramme de polonium 210 ($T_{1/2} = 138,4$ j) et d'un gramme d'uranium 238 ($T_{1/2} = 4,46 \cdot 10^9$ a). Conclure.

⁶ La valeur numérique de la constante de désintégration peut être supérieure à 1, selon l'unité de temps choisie. Une probabilité ne peut cependant pas être supérieure à 1. L'interprétation probabiliste de la valeur numérique de λ n'est correcte que si l'unité de temps choisie est beaucoup plus petite que la demi-vie.

⁷ Seulement une partie du rayonnement radioactif émis par la source est détectée par le détecteur pour des raisons géométriques (taille de la fenêtre d'entrée, distance du détecteur à la source) et de rendement (temps mort du détecteur). De plus, le bruit électronique et le bruit de fond naturel influencent la mesure.

3.7 Familles radioactives

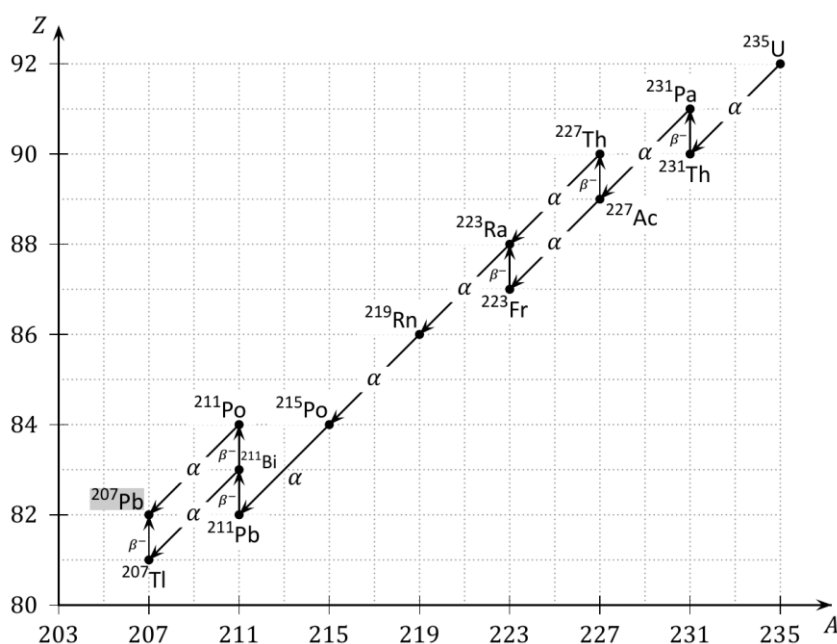
Souvent le noyau fils résultant d'une désintégration radioactive est lui-même radioactif. Des désintégrations radioactives se succèdent alors jusqu'à ce qu'un isotope stable soit atteint. La succession de ces désintégrations forme une **chaîne de désintégration**.

Puisque la désintégration α réduit le nombre de nucléons du noyau père de quatre unités, tandis que les autres modes de désintégrations principaux ne modifient pas ce nombre, tous les noyaux fils d'une chaîne de désintégration ont le même nombre de nucléons à un multiple entier n de 4 près.

Pour la radioactivité naturelle, on distingue ainsi quatre chaînes de désintégration principales ou **familles radioactives** selon que le nombre de masse des radionucléides de la famille respective est de la forme $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$ ou $4n + 3$. Les familles radioactives sont nommées d'après leur premier terme. Parmi les membres d'une famille radioactive, le premier terme possède la plus grande demi-vie.

Nombre de masse A	Famille radioactive	Premier terme	Demi-vie	Dernier terme
$4n$	thorium	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ a	$^{208}_{82}\text{Pb}$
$4n + 1$	neptunium	$^{237}_{93}\text{Np}$	$2,14 \cdot 10^6$ a	$^{209}_{83}\text{Bi}$
$4n + 2$	uranium-radium	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$ a	$^{206}_{82}\text{Pb}$
$4n + 3$	uranium-actinium	$^{235}_{92}\text{U}$	$0,71 \cdot 10^9$ a	$^{207}_{82}\text{Pb}$

La chaîne du neptunium 237, qui aboutit au bismuth 209, a pratiquement disparu dans la Nature puisque sa demi-vie est environ 2'000 fois inférieure à l'âge de la Terre (4,57 milliards d'années). Les trois autres chaînes de désintégration ont entièrement survécu. Les premiers termes de ces familles, le thorium 232, l'uranium 238 et l'uranium 235, sont, en raison de leur longue demi-vie, toujours présents en Nature à l'état de traces. Les trois chaînes de désintégration du thorium et de l'uranium passent toutes par un radioisotope gazeux, le radon, et aboutissent toutes à un isotope stable du plomb.



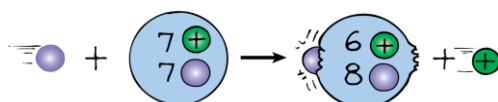
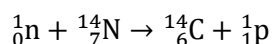
Chaîne de désintégration de l'uranium 235

3.8 Applications

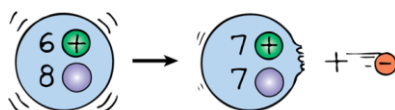
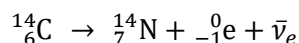
3.8.1 Datation radioactive

La **datation radioactive** est une technique qui permet de déterminer l'âge d'un échantillon radioactif à partir de l'évolution temporelle de son activité.

Une des variantes les plus connues est la **datation par le radiocarbone** (carbone 14) qui est basée sur les propriétés du radiocarbone, un isotope naturel radioactif du carbone. Le carbone 14 est continuellement formé dans la haute atmosphère dans des réactions nucléaires entre des atomes d'azote 14 et des neutrons générés par le rayonnement cosmique selon l'équation :



Le carbone 14 ainsi formé est radioactif (émetteur β^-) avec une demi-vie de 5730 a. Il se désintègre selon la réaction suivante :



Le carbone 14 a les mêmes propriétés chimiques que le carbone 12 non radioactif, puisqu'il s'agit d'isotopes d'un même élément. Le carbone 14 peut ainsi se lier au dioxygène de l'atmosphère pour former du dioxyde de carbone. Les organismes vivants échangent constamment du CO_2 avec leur environnement, de sorte qu'ils contiennent des atomes de carbone 14 et de carbone 12 dans le même rapport que l'atmosphère (approximativement 1 atome de carbone 14 pour 1000 milliards d'atomes de carbone 12). Une fois qu'un organisme meurt, il cesse d'échanger du CO_2 avec son environnement. Le pourcentage en carbone 14 commence alors à décroître. En déterminant les quantités de carbone 14 et de carbone 12 présents dans un échantillon provenant de l'organisme, on peut obtenir le temps depuis sa mort à l'aide de la loi de la décroissance radioactive.



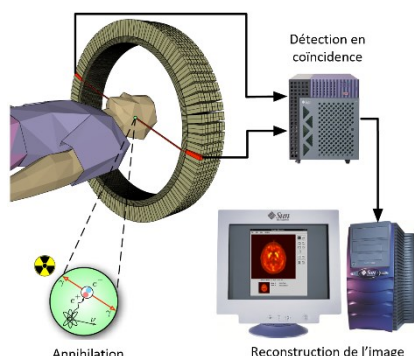
La datation par le radiocarbone permet de déterminer l'âge de matière organique jusqu'à environ 50'000 ans.

■ As-tu compris ?

19. Un archéologue extrait un gramme de carbone d'un ancien manche de hache et mesure que son activité radioactive vaut un quart de l'activité d'un gramme de carbone extrait d'une branche d'arbre fraîchement coupée. Quel est l'âge approximatif du manche de la hache ?

3.8.2 Imagerie médicale

La **tomographie par émission de positrons** (TEP) est une méthode d'imagerie médicale où on détecte les rayonnements émis par un produit radioactif, injecté au préalable. Le produit radioactif, appelé **traceur**, est constitué de substances normalement utilisées par le corps (p.ex. glucose) qui sont marquées avec un émetteur β^+ de courte demi-vie (p.ex. fluor 18). Le traceur s'accumulera en plus ou moins une heure aux endroits à haute activité métabolique, souvent caractéristique d'une maladie (p.ex. cellules cancéreuses). Lorsqu'un atome du **marqueur** se désintègre, le positron émis s'annihile avec un électron de l'entourage immédiat produisant une paire de photons qui partent dans des sens diamétralement opposés. Les capteurs de la caméra TEP détectent les photons en coïncidence ce qui permet de déterminer la ligne sur laquelle se trouve le centre d'émission. Les données des capteurs sont traitées par un ordinateur qui visualise l'activité métabolique ou biochimique de l'organe.



La **scintigraphie** est une méthode d'imagerie médicale similaire à la TEP, où le patient reçoit un traceur marqué avec un émetteur γ (p.ex. technétium 99m). Le rayonnement émis est détecté par une caméra gamma qui produit des images visualisant le fonctionnement de l'organe ou de la cible à examiner.

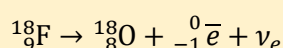
Exercice résolu

Le fluor 18 est un émetteur β^+ de demi-vie 109,8 min utilisé comme marqueur pour la tomographie par émission de positrons (TEP). Pour réaliser un scan TEP, on injecte à un patient un traceur marquée au fluor 18 d'activité initiale 300 MBq.

- Écrire l'équation de désintégration du fluor 18.
- Calculer le nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans le traceur.
- Calculer le temps au bout duquel l'activité a diminué de 90%.

Solution

- Équation de désintégration :



- Nombre de noyaux initiaux :

$$N_0 = \frac{A_0}{\lambda} = \frac{A_0}{\ln 2} T_{1/2}$$

$$\text{A.N. : } N_0 = \frac{300 \cdot 10^6}{\ln 2} \cdot 109,8 \cdot 60 = 2,85 \cdot 10^{12}$$

- Temps nécessaire :

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ -\lambda t &= \ln \frac{A}{A_0} \\ t &= -\frac{\ln \frac{A}{A_0}}{\ln 2} T_{1/2} \end{aligned}$$

$$\text{A.N. : } t = -\frac{\ln 0,10}{\ln 2} \cdot 109,8 \text{ min} = 364,7 \text{ min} \simeq 6 \text{ h}$$

4 Bilan énergétique des réactions nucléaires

Puisque des liaisons nucléaires sont modifiées au cours d'une réaction nucléaire, l'énergie au repos E_0 des noyaux y est modifiée. D'après le principe de la conservation de l'énergie, l'énergie échangée au cours d'une réaction nucléaire avec le milieu extérieur s'écrit :

$$Q = E_0(\text{réactifs}) - E_0(\text{produits}) \\ = (m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}}) c^2$$



Exemples :

- Désintégration α du radium 226 (équation (1))⁸ :

$$Q = (m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}}) c^2 \\ = (m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\alpha}) c^2 \\ = (225,97713 \text{ u} - 221,97040 \text{ u} - 4,00150 \text{ u}) c^2 \\ = 0,00523 \text{ u } c^2 \\ = 0,00523 \cdot 931,49 \text{ MeV} \\ = 4,87 \text{ MeV} > 0$$

La réaction est **exoénergétique**, c'est-à-dire qu'elle libère de l'énergie. On assiste à une *diminution de la masse au repos totale*. L'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique des produits ou sous forme d'énergie d'excitation des produits.

- Transmutation de l'azote 14 selon l'équation (2) :

$$Q = (m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}}) c^2 \\ = (m_{\text{He}} + m_{\text{N}} - m_{\text{O}} - m_{\text{H}}) c^2 \\ = (4,00150 \text{ u} + 14,00307 \text{ u} - 16,99913 \text{ u} - 1,0078 \text{ u}) c^2 \\ = -0,00236 \text{ u } c^2 \\ = -0,0023 \cdot 931,49 \text{ MeV} \\ = -2,20 \text{ MeV} < 0$$

La réaction nucléaire est dite **endoénergétique**, c'est-à-dire qu'une l'énergie minimale doit être investie pour l'initier (ici 2,20 MeV). On assiste à une *augmentation de la masse au repos totale*.

Remarque :

Dans le cas d'une réaction nucléaire où chaque nucléon garde son identité, les nombres totaux de protons et de neutrons sont conservés séparément. Les énergies au repos totaux des réactifs et des produits ne se distinguent alors que par l'énergie de liaison nucléaire. On obtient :

$$Q = E_{\ell}(\text{produits}) - E_{\ell}(\text{réactifs})$$

La réaction nucléaire libère donc de l'énergie, si les produits sont en moyenne plus stables que les réactifs.

⁸ Le calcul a été fait en utilisant la masse des noyaux. L'énergie de liaison des électrons peut être négligée puisqu'elle n'apparaîtrait qu'en tant que différence très petite dans le calcul. En règle générale, si le nombre d'électrons liés à l'état final est égal à celui à l'état initial, ce qui est le cas pour de nombreuses réactions nucléaires, le calcul de l'énergie libérée fournit le même résultat, si on calcule avec la masse de noyaux ou avec la masse des atomes.

5 Fission nucléaire

La fission nucléaire fut découverte en 1938 par Otto Hahn et Fritz Straßmann lorsqu'ils essayaient de produire de nouveaux éléments en bombardant de l'uranium avec des neutrons. À leur grande surprise, ils découvraient du baryum parmi les produits. Cela ne pouvait que signifier que des noyaux d'uranium s'étaient brisés.

5.1 Définition

La **fission nucléaire** est la cassure d'un noyau lourd en deux (rarement trois) noyaux plus légers.

On distingue :

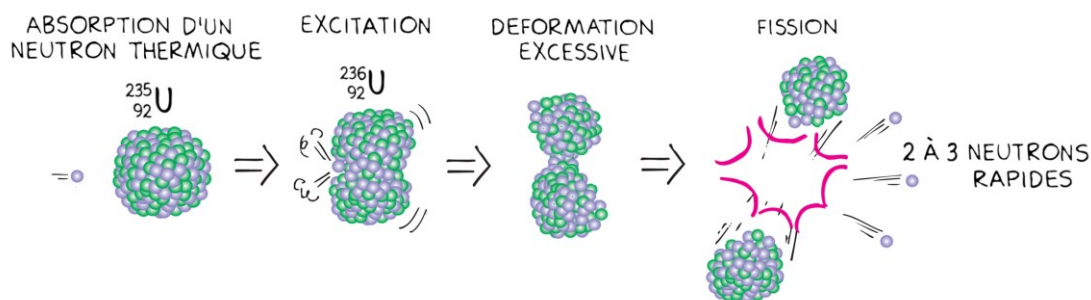
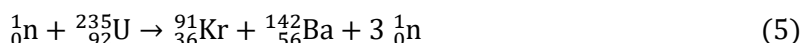
- la **fission spontanée** où la fission se fait naturellement ; c'est un type de radioactivité rare.
- la **fission induite** où la fission est provoquée par le bombardement de noyaux lourds par des particules ; elle est utilisée pour produire de l'énergie nucléaire et dans les bombes atomiques.

5.2 Principe de la fission induite

Afin de provoquer une fission, on utilise surtout des neutrons car ces particules électriquement neutres peuvent pénétrer le noyau déjà à faible énergie. L'absorption du neutron conduit à la formation d'un noyau composé qui commence à osciller. Le noyau atteint aussitôt la forme d'un haltère, permettant à l'interaction électrique répulsive entre les deux parties de l'haltère de l'emporter sur l'interaction forte attractive de courte portée. Le noyau se désintègre alors en deux fragments en émettant quelques neutrons.

5.3 Exemple de la fission induite de l'uranium 235

La fission de l'uranium 235 peut être provoquée très efficacement à l'aide de neutrons lents (« **neutrons thermiques**⁹ »). Une réaction typique de fission est :



■ As-tu compris ?

20. Compléter les réactions de fission suivantes en précisant les lois de conservation utilisées :

- ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{35}^{85}\text{Br} + {}_{57}^{148}\text{La} + \dots {}_0^1\text{n}$
- ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow \dots + {}_{54}^{140}\text{Xe} + 2 {}_0^1\text{n}$
- ${}_0^1\text{n} + {}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{40}^{97}\text{Zr} + \dots + 4 {}_0^1\text{n}$

⁹ Les neutrons lents sont appelés neutrons thermiques car leur énergie cinétique est comparable à l'énergie cinétique qu'ils auraient dû à l'agitation thermique à température ordinaire.

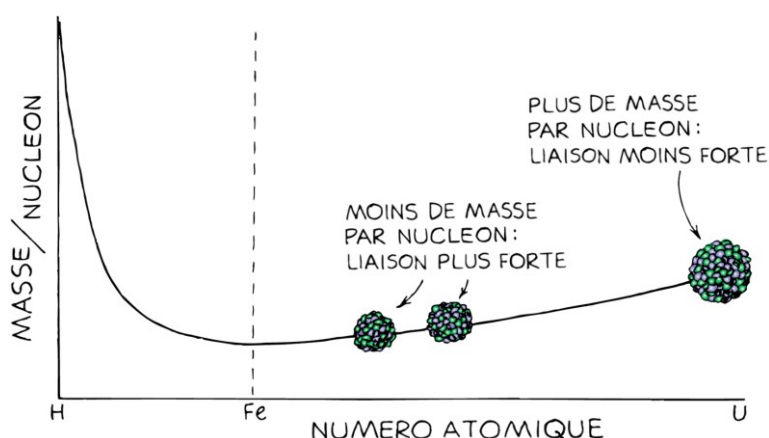
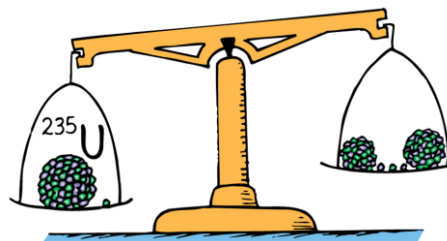
5.4 Énergie libérée par la fission

Données :

$$m_{235}^{92}\text{U} = 234,99345 \text{ u} ; m_{91}^{36}\text{Kr} = 90,90369 \text{ u}$$

$$m_{142}^{56}\text{Ba} = 141,88573 \text{ u} ; m_n = 1,00866 \text{ u}$$

La masse au repos totale des réactifs de la réaction de fission (5) est sensiblement plus grande que celle des produits. Cette réaction de fission est fortement **exoénergétique** ($Q > 0$).



L'énergie libérée lors de la réaction (5) vaut :

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}}) c^2 \\ &= (m_n + m_{\text{U}} - m_{\text{Kr}} - m_{\text{Ba}} - 3 m_n) c^2 \\ &= (1,00866 + 234,99345 - 90,90369 - 141,88573 - 3 \cdot 1,00866) \text{ u } c^2 \\ &= 0,1867 \cdot 931,49 \text{ MeV} \\ &= 173,9 \text{ MeV} \end{aligned}$$

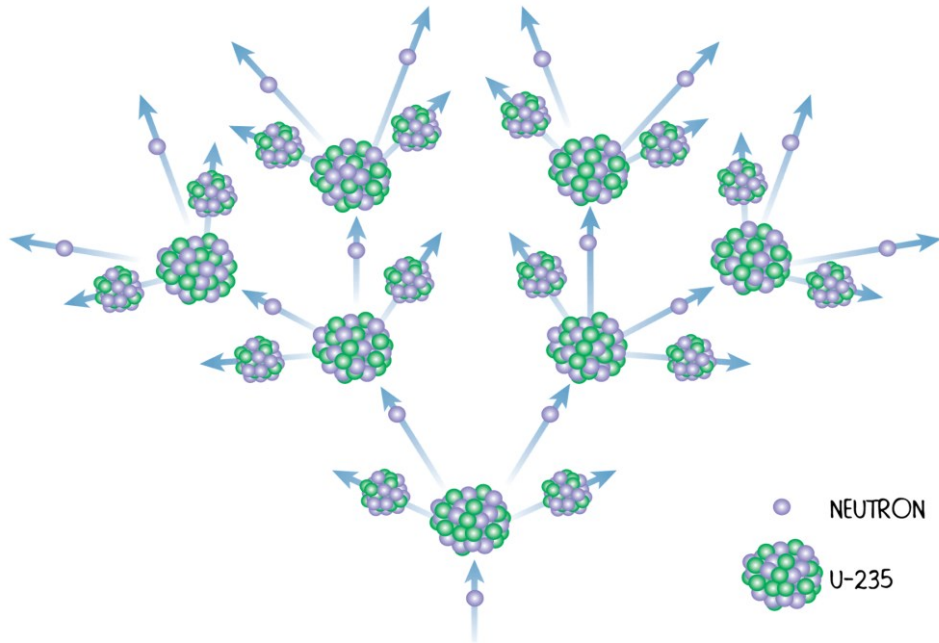
L'énergie libérée lors de cette réaction de fission nucléaire est de millions de fois plus grande que celle qui est libérée lors d'une réaction chimique. À titre de comparaison : lors d'une explosion de TNT, l'énergie libérée par molécule vaut 25 eV. La fission d'1 g d'uranium libère la même quantité d'énergie que la combustion de 1,8 tonnes de pétrole !

■ As-tu compris ?

21. Un noyau de deutérium est divisé en un proton et un neutron. Cette réaction est-elle exo- ou endoénergétique ? Justifier.
22. Si un noyau de fer se divisait en deux, ses fragments de fission auraient...
 - A. moins de masse par nucléon.
 - B. plus de masse par nucléon.
 - C. la même masse par nucléon.
23. Calculer l'énergie libérée par la réaction de fission a de l'exercice 20 p.19.
 Indications : $m_{85}^{35}\text{Br} = 84,89641 \text{ u}$, $m_{148}^{57}\text{La} = 147,90092 \text{ u}$

5.5 Réaction en chaîne

La fission provoquée d'un atome d'uranium 235 consomme un neutron thermique et produit 2 à 3 neutrons rapides. Les neutrons libérés peuvent à leur tour provoquer les fissions d'autres atomes d'uranium, et ce plus efficacement s'ils sont freinés à de faibles vitesses. De cette manière une fission en engendre d'autres. C'est le **principe de la réaction en chaîne**.



Soit k le **facteur de multiplication de neutrons**, c.-à-d. le nombre moyen de neutrons issus d'une fission qui engendrent une nouvelle fission. Trois cas peuvent se présenter :

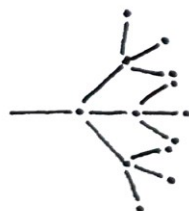
- Si $k > 1$, la réaction en chaîne n'est pas contrôlée. Le nombre total de fissions augmente exponentiellement au cours du temps. (cas de la bombe atomique)
- Si $k = 1$, la réaction en chaîne est contrôlée. Le nombre total de fissions reste constant au cours du temps. (cas de la centrale nucléaire)
- Si $k < 1$, la réaction en chaîne s'éteint.

■ As-tu compris

24. Compléter les tableaux en indiquant le nombre de fissions pour chaque génération.



GENERATION	1	2	3	4	5	6	7
NO. DE FISSIONS	1						



GENERATION	1	2	3	4	5	6	7
NO. DE FISSIONS	1						

6 Fusion nucléaire

En 1920, l'astrophysicien Arthur Eddington fut le premier à suggérer que les étoiles tiraient leur énergie énorme de la fusion de l'hydrogène en hélium.

Quand Ernest Rutherford, Marcus Oliphant et Paul Harteck ont mené des expériences en 1934, ils ont été "*surpris de constater qu'en bombardant de l'hydrogène lourd [isotope ${}^2_1\text{H}$, encore appelé deutérium] avec des diplons [noyaux ${}^2_1\text{H}$, appelés aujourd'hui deutérons], un effet énorme était produit*". Ils venaient de réaliser la première réaction de fusion artificiel de l'hydrogène en hélium et de découvrir de surcroît le tritium [isotope ${}^3_1\text{H}$] et l'hélium 3.

6.1 Définition

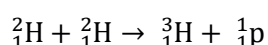
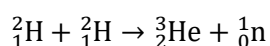
La **fusion nucléaire** est la réunion de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd.

6.2 Principe de la fusion

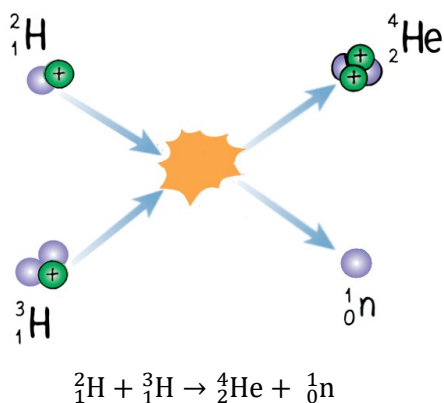
Pour que deux noyaux atomiques puissent fusionner, il faut qu'ils se rapprochent de si près que l'interaction forte attractive de courte portée l'emporte sur l'interaction électrique répulsive entre les noyaux de charge positive. En pratique, ce rapprochement peut se faire lorsque des noyaux qui possèdent une grande énergie cinétique (plusieurs MeV) entrent en collision. En petit nombre, des collisions de haute énergie peuvent être réalisées dans des accélérateurs de particules. Par contre, elles se produisent en grand nombre lorsque la matière se trouve à de très hautes températures, comme dans le cœur d'une étoile (environ 10 millions de degrés Celsius). À de telles températures, les noyaux atomiques sont séparés de leurs électrons ; ils forment un état de matière appelé **plasma**. Dans le plasma chaud, les noyaux atomiques atteignent, dû à leur agitation thermique importante, les énergies cinétiques nécessaires pour surmonter leur répulsion électrique (« fusion thermonucléaire »).

6.3 Exemples de réactions de fusion

Les réactions de fusion découvertes par Rutherford et autres en 1934 s'écrivent :



Autre exemple typique :



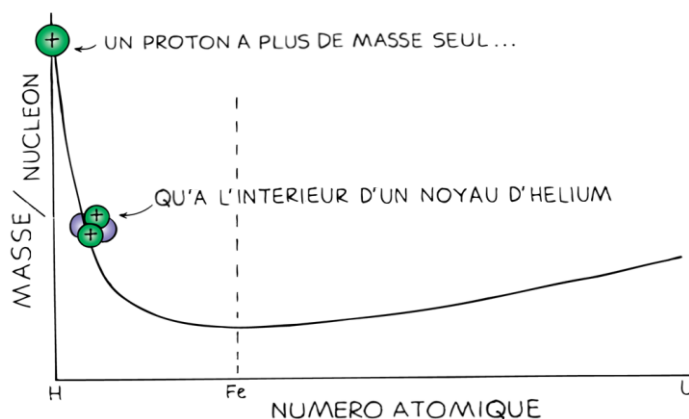
(6)

6.4 Énergie libérée par la fusion

Données :

$$m_{2\text{H}} = 2,01355 \text{ u}, m_{3\text{H}} = 3,01550 \text{ u}, \\ m_{\alpha} = 4,00150 \text{ u}, m_{\text{n}} = 1,00866 \text{ u}$$

La masse au repos totale des réactifs de la réaction de fusion nucléaire (6) est sensiblement plus grande que celle des produits. La diminution de la masse au repos se traduit par une importante libération d'énergie. Cette réaction de fusion est fortement **exoénergétique** ($Q > 0$).



L'énergie libérée lors de la réaction (6) vaut :

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}}) c^2 \\ &= (m_{3\text{H}} + m_{2\text{H}} - m_{\alpha} - m_{\text{n}}) c^2 \\ &= (3,01550 + 2,01355 - 4,00150 - 1,00866) \text{ u } c^2 \\ &= 0,0189 \cdot 931,49 \text{ MeV} \\ &= 17,6 \text{ MeV} \end{aligned}$$

C'est la **fusion de l'hydrogène en hélium** qui est à l'origine de l'énergie solaire. Le noyau du **Soleil** (diamètre 200 000 km) est un énorme réacteur thermonucléaire dont la température interne dépasse 10^7 K. La suite des réactions nucléaires qui s'y déroulent est complexe. Globalement, 4 protons fusionnent en un noyau d'He avec éjection de 2 positrons et de 2 neutrinos ; des rayonnements γ sont également produits. Le Soleil, né il y a 4,57 milliards d'année, aura épuisé tout son combustible (l'hydrogène) dans environ 8 milliards d'années. Sous l'effet de la gravitation, son cœur s'effondrera et le Soleil deviendra alors une **naine blanche**, ceinturée d'une immense **nébuleuse planétaire**. Ce sera la fin de notre système solaire. Des simulations indiquent que notre planète disparaîtra déjà beaucoup plus tôt, avec les planètes intérieures Mercure et Vénus, toutes les trois vaporisées par le Soleil. L'énergie que rayonnent les innombrables autres étoiles trouve son origine, comme pour le Soleil, dans des réactions thermonucléaires.

■ As-tu compris ?

25. Quelle réaction libérerait de l'énergie à partir d'un noyau d'or : la fission ou la fusion ?
26. Même question pour un noyau de carbone.

7 Pour en savoir plus

7.1 Réacteur de fission

7.1.1 Le combustible nucléaire

Afin de pouvoir entretenir une réaction en chaîne contrôlée, le **combustible nucléaire** doit contenir des **nucléides fissiles**, c.-à-d. des nucléides susceptibles de subir une fission induite par neutrons thermiques. Parmi les nucléides fissiles les plus importants, on compte l'uranium 235, qui est le seul nucléide fissile naturel, et le plutonium 239.

Les réacteurs industriels utilisent le plus souvent comme combustible du dioxyde d'uranium, enrichi en quelques pourcents d'uranium 235, ou du dioxyde de plutonium. La matière fissile est empilée sous forme de pastilles dans des tubes métalliques de quelques mètres de longueur (voir photo ci-contre). Quelques centaines de ces tubes combustibles forment un **assemblage combustible**. Quelques centaines d'assemblages combustibles sont chargés dans le cœur du réacteur.



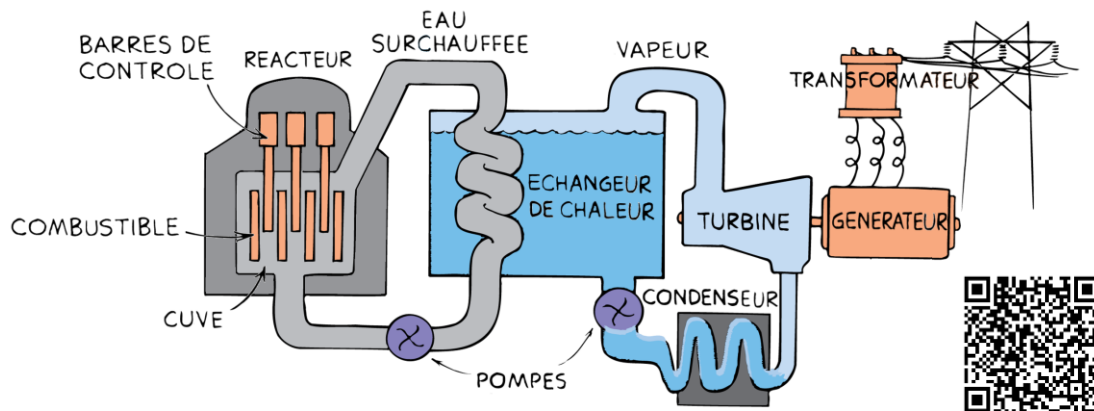
Assemblage combustible pour un réacteur de fission à eau pressurisée

7.1.2 Exemple du réacteur à eau pressurisée (type Cattenom)

Le réacteur à eau pressurisée est le type de réacteur le plus répandue dans le monde. Il comprend trois circuits indépendants :

- Le **circuit primaire** fermé : Les assemblages combustibles sont immergés dans de l'eau dans une **cuve** en acier qui contient le **cœur du réacteur**. La fonction de l'eau est double. D'une part, elle permet d'évacuer la chaleur dégagée par les réactions nucléaires qui se poursuivent au sein des assemblages combustibles : elle joue le rôle de **fluide caloporteur**. En refroidissant les assemblages combustibles, l'eau s'échauffe jusqu'à 320 °C. L'eau reste liquide à ces températures, car elle se trouve sous haute pression (ca. 150 bar). Ainsi l'eau ne peut s'évaporer. D'autre part, l'eau joue le rôle de **modérateur**. Elle freine les neutrons rapides issus des fissions à des faibles vitesses pour qu'ils puissent provoquer de nouvelles réactions de fission. L'eau chaude du circuit primaire est pompée dans un échangeur de chaleur (générateur de vapeur), puis elle revient vers le réacteur. Le nombre de neutrons disponibles est ajusté à l'aide de **barres de contrôle**. Il s'agit de barres constituées de matériaux « capteurs » de neutrons (cadmium, bore ou baryum) que l'on enfonce plus ou moins loin dans le cœur du réacteur.

- Le **circuit secondaire** fermé : Dans l'**échangeur de chaleur**, l'eau du circuit secondaire s'évapore. La vapeur d'eau fait tourner la turbine, dont l'axe est solidaire du rotor de l'alternateur. Il y a production d'électricité. La vapeur d'eau est ensuite refroidie dans le **condenseur** et pompée dans l'échangeur de chaleur.
- Le **circuit de refroidissement** semi-ouvert : Le circuit de refroidissement utilise en général l'eau de mer ou de rivière et peut comprendre une **tour de refroidissement** à l'intérieur de laquelle l'eau chaude provenant du condenseur est pulvérisée dans un flux d'air.



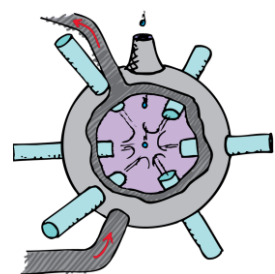
7.2 Réacteur de fusion

Le Soleil, à l'instar de toutes les étoiles, est un réacteur de fusion naturel servant d'exemple type pour la réalisation de réacteurs de fusion artificiels.

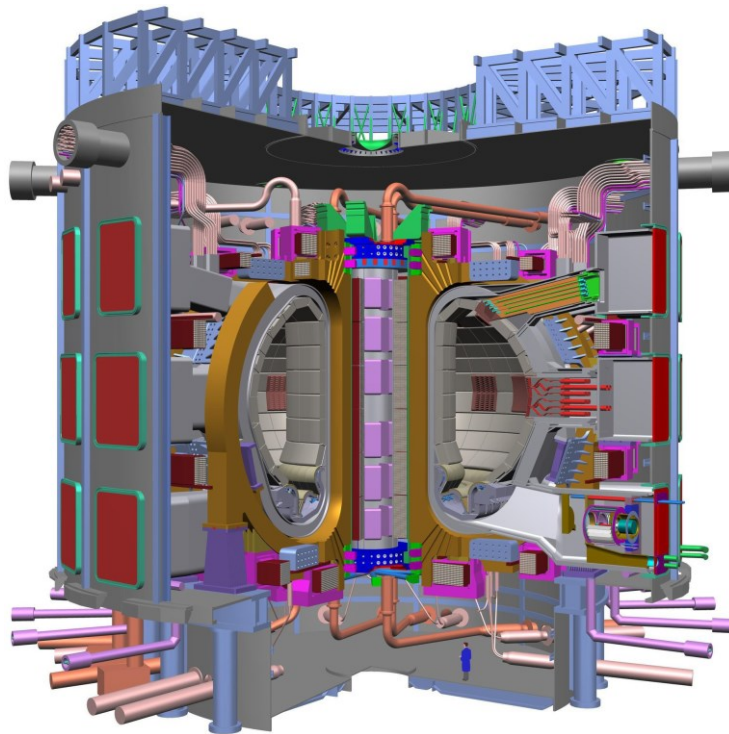
Pour initier la fusion dans un réacteur, il faut chauffer la matière à des températures de l'ordre de plusieurs 100 millions de degrés Celsius ; la matière est alors à l'état de plasma. Mais comment confiner un plasma tellement chaud ?

Il existe deux approches différentes :

- Dans la technique du **confinement magnétique**, un plasma de deutérium et de tritium est contrôlé à l'aide de champs magnétiques dans un réacteur immense, appelé **tokamak**. Cette technique est par exemple employée par le projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), le réacteur de fusion le plus grand du monde qui est actuellement en construction à proximité de Cadarache (Sud de France).
- Dans la technique du **confinement inertiel**, le plasma est contrôlé en envoyant des impulsions de laser puissantes sur des petites pastilles (diamètre inférieure à 1 mm) contenant le combustible (mélange deutérium-tritium). C'est la technique qui est par exemple utilisée par le *National Ignition Facility* (NIF) situé à Livermore en Californie.



Plusieurs réacteurs de fusion expérimentaux ont déjà été réalisés. L'énergie fournie à ces réacteurs pour déclencher les réactions de fusion a malheureusement, à ce stade, toujours dépassé l'énergie produite. Ce n'est cependant qu'une question de temps avant qu'on ne succède à domestiquer l'énergie des étoiles.



Vue en coupe du tokamak ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

7.3 Bombes nucléaires

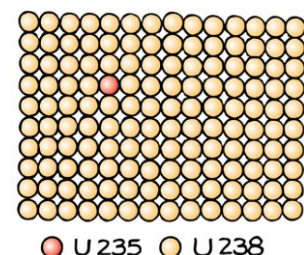
Au début de la Seconde guerre mondiale, Albert Einstein écrit une lettre d'avertissement urgente au président des États-Unis Theodore Roosevelt :

[...] Il pourrait devenir possible de mettre en place une réaction nucléaire en chaîne dans une grande masse d'uranium, par laquelle de vastes quantités d'énergie et de grandes quantités de nouveaux éléments semblables au radium seraient générées. Maintenant, il semble presque certain que cela pourrait être réalisé dans un avenir immédiat. Ce nouveau phénomène conduirait également à la construction de bombes, et il est concevable - quoique beaucoup moins certain - que des bombes extrêmement puissantes d'un nouveau type soient ainsi construites. [...]

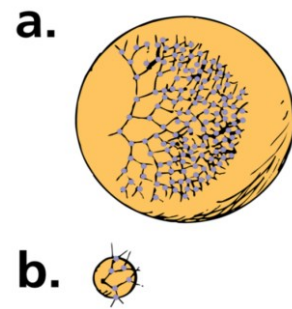
Il existe deux types principaux de **bombes nucléaires** :

- la **bombe atomique** ou bombe à fission dont le principe de fonctionnement est basé sur une réaction en chaîne incontrôlée de fission d'isotopes fissiles, les plus souvent utilisés étant l'uranium 235 et plutonium 239.
- la **bombe thermonucléaire** ou bombe H où une bombe à fission fournit l'énergie thermique nécessaire pour déclencher la fusion d'un mélange de deutérium et de tritium.

Une réaction en chaîne n'a pas lieu dans un échantillon d'uranium naturel dans de la roche. C'est surtout l'isotope rare U-235 qui est susceptible de subir une fission nucléaire. Or, seulement 0,7% (1 sur 140 noyaux) d'uranium est du U-235. L'isotope plus fréquent, l'U-238 n'est pas fissile. Toute réaction en chaîne est arrêtée par l'absorption des neutrons par l'U-238.



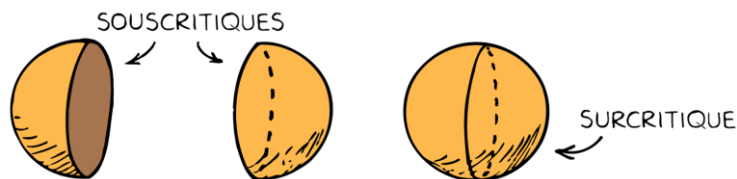
- a. Une réaction en chaîne qui se déclenche dans un morceau d'U-235 pur de la taille d'un ballon de handball, engendre une explosion dévastatrice.
- b. Cependant, dans un morceau d'U-235 plus petit, aucune explosion n'a lieu. En effet, un neutron émis lors d'une fission nucléaire parcourt une certaine distance moyenne avant de rencontrer un autre noyau d'uranium. Si la taille du morceau d'uranium est trop petite, un neutron va probablement s'évader à travers la surface du morceau avant de rencontrer un autre noyau. En moyenne, moins d'un neutron par fission va être en mesure de déclencher une autre fission et la réaction en chaîne s'arrête.



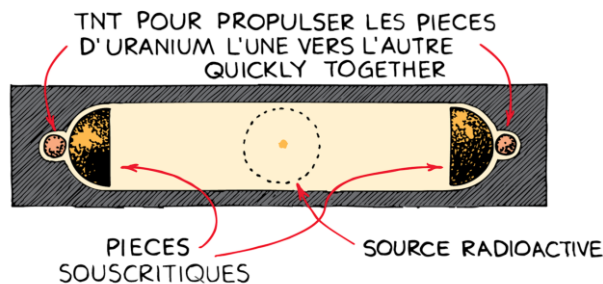
La **masse critique** est la quantité de masse pour laquelle chaque fission produit, en moyenne, une fission supplémentaire.

- Pour une **masse souscritique**, la réaction en chaîne va s'arrêter.
- Pour une **masse surcritique**, la réaction en chaîne va augmenter de manière exponentielle.

Deux morceaux d'U-235 pur sont stables si chacune d'entre elles est souscritique. Si les morceaux sont assemblés, leur masse combinée peut être surcritique.



Voici un schéma simplifié d'une bombe atomique :

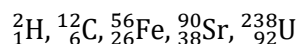


Une difficulté majeure consiste à séparer assez d'U-235 du plus abondant U-238. Il a fallu plus de deux ans pour extraire assez d'U-235 pour fabriquer la bombe atomique qui a détoné au-dessus de Hiroshima en 1945. La séparation des isotopes d'uranium reste un procédé compliqué et cher de nos jours.

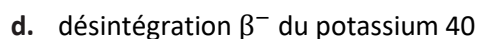
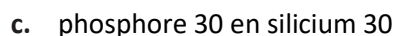
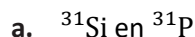
Pour entretenir une réaction en chaîne dans l'uranium, l'échantillon doit contenir un pourcentage plus grand d'U-235 que le pourcentage naturel de 0,7%. Puisque les atomes U-235 et U-238 sont identiques d'un point de vue chimique, ils ne peuvent pas être séparés par voie chimique. On doit donc recourir à des méthodes de séparation physiques (diffusion gazeuse ou centrifuge de gaz) qui utilisent la différence de masse des deux isotopes dans les molécules du gaz hexafluorure d'uranium UF_6 . L'**enrichissement de l'uranium** en U-235 doit atteindre une valeur critique pour que l'uranium puisse être utilisé dans une centrale nucléaire (3%) ou dans une bombe atomique (>90%).

8 Exercices

1. Donner le nombre de neutrons et de protons pour chacun des noyaux atomiques suivants :



2. Écrire les équations de désintégration des radionucléides suivants :



3. Vrai ou faux ? Justifier.

Lors de toute désintégration radioactive, le noyau père et le noyau fils correspondent à des éléments chimiques différents.

4. Si la masse d'un certain échantillon radioactif diminue de la moitié en quatre semaines, alors après les quatre semaines suivantes la masse restante est...

A. nulle

B. $\frac{1}{4}$ de la masse initiale

C. $\frac{1}{8}$ de la masse initiale

5. Le nucléide ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ possède une énergie de liaison moyenne par nucléon d'environ 8 MeV. Quelle est l'énergie minimale nécessaire pour séparer un noyau de ce nucléide en ses nucléons ?

A. 8 MeV

B. 80 MeV

C. 160 MeV

D. 240 MeV

6. Montrer, en combinant les relations (3) et (4), que la loi de décroissance radioactive peut aussi s'écrire :

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

En déduire le rapport entre N et N_0 après une durée de n demi-vies.

7. Dans la famille radioactive de l'uranium, on rencontre le nucléide ${}^{218}_{84}\text{Po}$ qui par deux désintégrations successives, la première de type α , la seconde du type β^- , devient un isotope de bismuth.

a. Écrire les équations traduisant les deux désintégrations.

b. On observe que la deuxième désintégration s'accompagne d'une autre émission dangereuse pour l'organisme humain. Préciser de quelle émission il s'agit et indiquer brièvement sa cause.

8. Le radium 226 est un isotope commun sur Terre et a une demi-vie d'environ 1600 ans. Étant donné que la Terre a environ 5 milliards d'années, pourquoi reste-t-il du radium ?

9. Le carbone 14, émetteur β^- , de demi-vie 5730 ans, apparaît dans la haute atmosphère à la suite du choc de neutrons sur les atomes d'azote 14.
 - a. Écrire le bilan de la réaction de la formation de carbone 14.
 - b. Pour connaître l'époque à laquelle vécurent les humains préhistoriques dans la caverne de Lascaux, on mesure la radioactivité d'un échantillon de charbon de bois enfoui dans le sol de la grotte. Le nombre de désintégration n'est plus que 1,6 par minute alors qu'il serait 11,5 par minute pour un échantillon de charbon de bois « actuel » de même masse. Combien de temps s'est-il écoulé, depuis le dernier feu, dans la grotte de Lascaux ?
10. Le polonium 210, noyau instable, subit une désintégration α en donnant un noyau stable.
 - a. Écrire l'équation bilan de la désintégration en précisant les nombres de masse et de charge.
 - b. Calculer l'énergie libérée lors de la désintégration d'un noyau de polonium sachant que les masses des noyaux père et fils sont respectivement égales à 209,9146 u et 205,9077 u.
 - c. Que signifie l'affirmation « la demi-vie du nucléide polonium 210 est de 138 jours » ?
 - d. Calculer la masse de polonium 210 restant au bout de 414 jours dans un échantillon qui en contenait initialement 20 g.
11. Le 24 janvier 2016, un laboratoire de physique nucléaire a reçu une source radioactive de cobalt 60, émetteur β^- ayant une activité à cette date de 50,19 MBq. La demi-vie de cet isotope du cobalt est de 5,271 années. Le noyau fils est émis dans un état excité.
 - a. Écrire les équations des transformations nucléaires.
 - b. Calculer la masse du cobalt contenue dans la source à la date de l'achat. La masse d'un atome de cobalt est 59,93 u.
 - c. Calculer l'activité de la source le 24 janvier 2023.
 - d. Donner la date à laquelle l'activité n'est plus que 12,5% de l'activité initiale.
12. La sonde spatiale New Horizons a été lancée par la NASA en 2006 pour étudier la planète naine Pluton. La sonde utilise un générateur à radioisotope comme source d'énergie. Le générateur renferme un échantillon de plutonium 238 qui avait une activité de $4,939 \cdot 10^{15}$ Bq à la date du lancement. Le plutonium 238 se désintègre en uranium 234 et possède une demi-vie de 87,74 ans. Dans la suite on négligera le fait que l'uranium 234 se désintègre aussi.
 - a. Écrire l'équation de désintégration du plutonium 238
 - b. Calculer l'énergie libérée lors d'une désintégration d'un noyau de plutonium 238, puis la puissance fournie par le générateur à la date de fabrication. On indique que les masses des noyaux de plutonium 238 et d'uranium 234 sont respectivement égales à 237,9980 u et 233,9905 u.
 - c. Sachant qu'à la fin du trajet Terre-Pluton l'activité de l'échantillon avait diminué de 7,2%, calculer la durée du trajet.
13. Un noyau de radium 226 se désintègre en un noyau de radon.
 - a. Écrire l'équation de désintégration correspondante.
 - b. Sachant que les masses des noyaux père et fils sont respectivement égales à 225,9532 u et 221,9469 u, calculer l'énergie libérée lors de la désintégration d'un noyau de radium.
 - c. Cette énergie est entièrement acquise par la particule α sous forme d'énergie cinétique.

- i. Expliquer, en se basant sur le concept de quantité de mouvement, pourquoi l'énergie cinétique du noyau fils est négligeable.
 - ii. Déterminer, en appliquant les lois de la mécanique classique, la vitesse d'émission de la particule α . La valeur trouvée justifie-t-elle l'application de la mécanique classique si on admet qu'il faut recourir à la mécanique relativiste si la vitesse d'une particule est supérieure à 10% de la vitesse de la lumière ?
- 14.** Parmi les diverses réactions de fission possibles pour le noyau de l'atome de l'uranium lorsqu'il absorbe un neutron, l'une donne naissance au noyau ^{139}Xe , au noyau ^{95}Sr ainsi qu'à deux neutrons. Les énergies de liaison par nucléon des trois noyaux sont respectivement : 7,7 MeV pour l'uranium ; 8,4 MeV pour le xénon et 8,7 MeV pour le strontium.
- a. Montrer que cette réaction est exoénergétique et calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235.
 - b. Calculer l'énergie libérée par la fission totale d'un kilogramme d'uranium 235.
 - c. Après plusieurs désintégrations de type β^- , les produits primaires de fission aboutissent respectivement à deux nucléides stables : le lanthane (La) et le molybdène (Mo). Écrire le bilan global de ces désintégrations, ainsi que l'équation bilan de la fission du noyau ^{235}U conduisant aux nucléides stables.
- 15.** Une des réactions de fusion possible afin de produire de l'énergie est :
- $$\text{deutérium} + \text{deutérium} \rightarrow \text{hélium 3} + \text{neutron}$$
- avec la réaction ultérieure de deutérium sur l'hélium 3 pour former de l'hélium 4.
- a. Écrire les équations bilan des deux réactions ainsi que le bilan de l'ensemble de la fusion.
 - b. Montrer que les deux réactions sont exoénergétiques et calculer la libération d'énergie pour la fusion de 1 kg de deutérium. On donne les masses des noyaux suivants :
- hydrogène : 1,007 276 u deutérium : 2,013 451 u hélium 3 : 3,014 933 u

Crédits Photos

- © Bjoern Wylezich / Shutterstock.com (1985818733) – **page titre** (source radioactive)
- © Wikimedia Commons – **p.6** (Marie Curie ; domaine public)
- © Wikimedia Commons / United States Departement of Energy – p.24 (Nuclear fuel pellets; domaine public)
- © Wikimedia Commons / PD-USGov – p.24 (Nuclear fuel element; domaine public)

Crédits Illustrations

- © Figure retravaillée sur base de la table des nucléides fournie par National Nuclear Data Center, <https://www.nndc.bnl.gov/nudat/> – **p.11** (table des nucléides)
- © Wikimedia Commons / Jens Maus (<http://jens-maus.de>) – **p.17** (schéma TPE; domaine public)
- © ITER – **p.17** (vue en coupe du Tokamak ITER)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

- © HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson
- © HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson
- © EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press

