

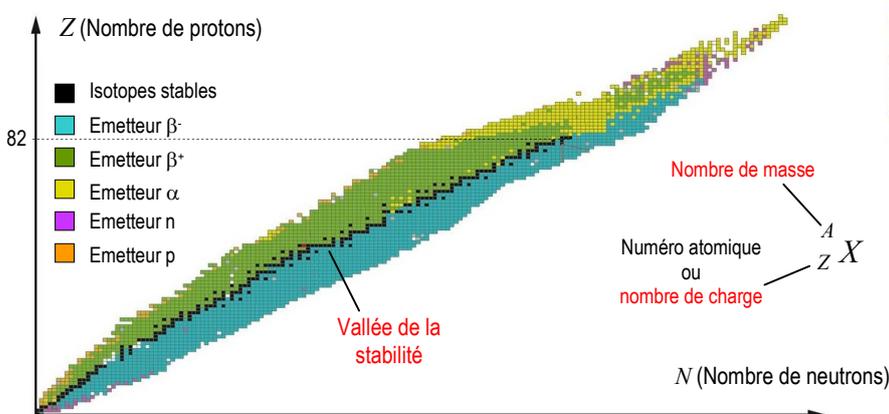
- Déterminer, à partir d'un diagramme (N,Z), les isotopes radioactifs d'un élément.
- Déterminer, à partir d'un diagramme (N,Z), les isotopes radioactifs d'un élément.
- Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs.
- Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive.
- Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un événement.
- Citer quelques applications de la radioactivité dans le domaine médical.
- Citer des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces

Chapitre 7

Évolution temporelle d'une transformation nucléaire

I. Éléments chimiques et radioisotopes

A ce jour, 118 éléments chimiques ont été découverts (de ${}^1_1\text{H}$ à l'oganesson ${}^{118}_{118}\text{Og}$). Sur ces 118 éléments, 80 possèdent au moins un isotope stable. Il existe ainsi environ 280 isotopes stables et plus de 2000 isotopes instables.



Le dernier élément chimique possédant au moins un isotope stable est le plomb ($Z = 82$). L'élément suivant, le bismuth ($Z = 83$) ne possède aucun isotope stable.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|----|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| 1 | H | | | | | | | | | | | | | | | | He | |
| 2 | Li | Be | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne | |
| 3 | Na | Mg | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | |
| 4 | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 5 | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| 6 | Cs | Ba | * Lu | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 7 | Fr | Ra | ** Lr | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Cn | Nh | Fl | Mc | Lv | Ts | Og |

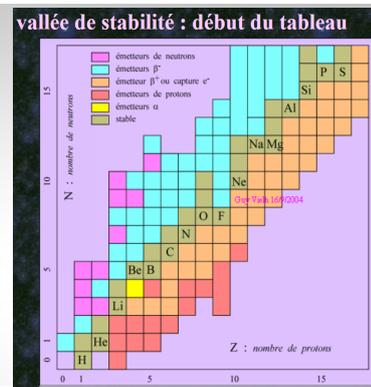
(Source Wikipedia)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| * | La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb |
| ** | Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No |

- Pb** Un isotope au moins de cet élément est stable
- Cm** Un isotope a une période d'au moins 4 millions d'années
- Cf** Un isotope a une période d'au moins 800 ans
- Md** Un isotope a une période d'au moins 1 journée
- Bh** Un isotope a une période d'au moins 1 minute
- Og** Tous les isotopes connus ont une période inférieure à 1 minute

Exercice 1 :

1. Quelle relation mathématique existe-t-il entre le nombre de masse A , le numéro atomique Z et le nombre de neutron N pour un isotope donné ?
2. Combien d'isotopes stables existe-t-il pour l'élément hydrogène ?
3. Donner l'écriture conventionnelle du seul isotope de l'hydrogène qui est un émetteur β^- .
4. Combien existe-t-il d'isotope pour l'élément carbone ?
5. Donner l'écriture conventionnelle des isotopes stables de l'élément carbone.
6. Donner l'écriture conventionnelle des deux isotopes qui ne possèdent aucun neutron dans leur noyau.
7. Quel est le mode de désintégration de l'atome ${}^{12}_6\text{N}$?
8. L'oxygène 18 est-il stable ou instable ?

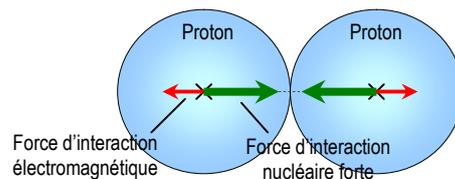


II. Instabilité des noyaux

Un noyau d'atome est uniquement composé de protons et neutrons (ou nucléons).

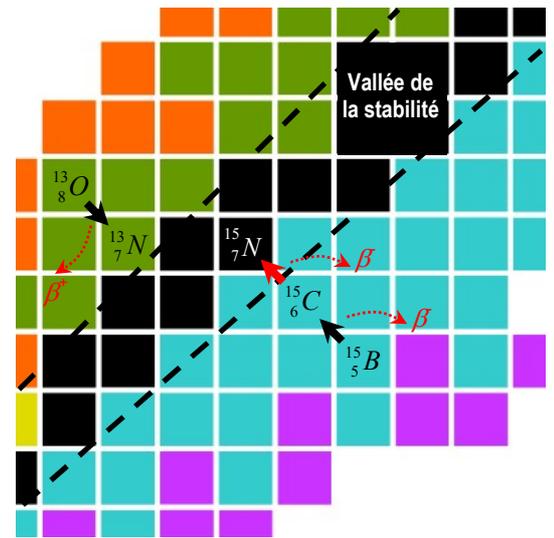
La force d'interaction gravitationnelle qui s'exerce entre ces nucléons est totalement négligeable du fait de la masse extrêmement petite du nucléon ($1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$). Cette interaction n'est donc en rien responsable de la cohésion d'un noyau d'atome.

La force due à l'interaction électromagnétique entre les protons d'un même noyau étant répulsive (charges de même signe), elle a tendance à faire éclater le noyau.

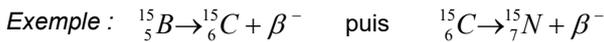


Il doit donc exister une autre interaction capable de maintenir la cohésion du noyau des atomes malgré la force électromagnétique répulsive entre protons. Cette interaction, appelée **interaction nucléaire forte**, maintient les nucléons d'un même noyau collés entre eux. Elle s'exerce entre tous les nucléons, protons et neutrons.

Néanmoins, pour un isotope renfermant un nombre trop élevé de nucléons, ou ayant une proportion protons/neutrons mal équilibrée, on observe une inversion du rapport de force entre l'interaction nucléaire forte et l'interaction électromagnétique, rendant le noyau instable et le forçant à **transmuter** en un autre élément chimique plus stable.

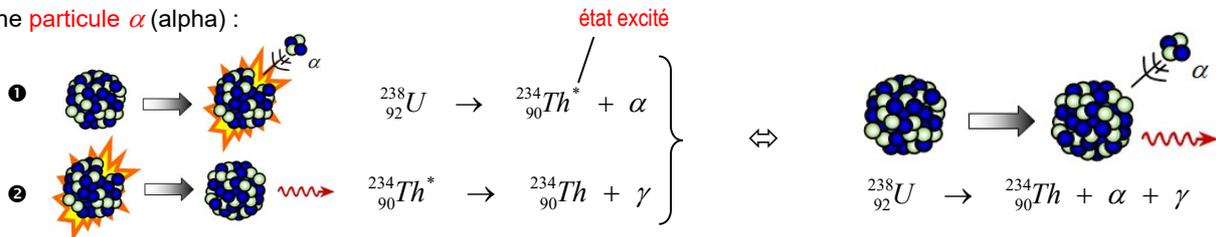


Pour un isotope instable, **la ou les transmutations qu'il subit le rapprochent de la vallée de la stabilité.**



La désintégration d'un noyau radioactif peut entraîner l'émission :

• d'une **particule α** (alpha) :

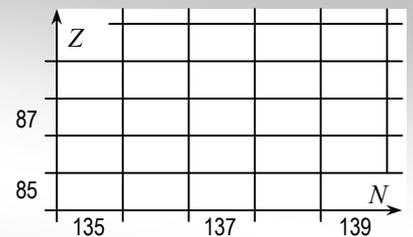


Exemple :

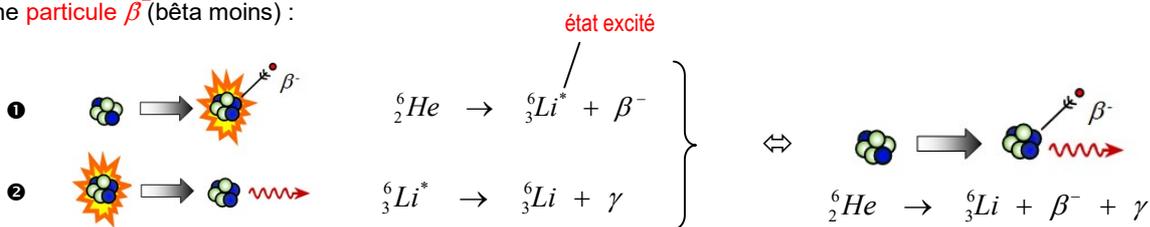
- 1 Un noyau d'uranium 238 libère une particule alpha et se transmute en noyau de thorium 234 dans un état excité.
- 2 Le noyau de thorium 234 excité se désexcite en émettant un photon de longueur d'onde dans le domaine des rayons γ (gamma).

Exercice 2 :

- Sachant que durant une transmutation il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge, déterminer l'écriture conventionnelle de la particule alpha.
- De quel élément chimique la particule alpha est-elle un isotope ?
- Le radium 226 (Ra) se désintègre en émettant une particule alpha. A l'aide d'un tableau périodique, écrire l'équation complète de cette transmutation.
- Placer sur le diagramme ci-contre le noyau père (radium 226) et le noyau fils et matérialiser la transmutation par une flèche allant du noyau père vers le noyau fils.

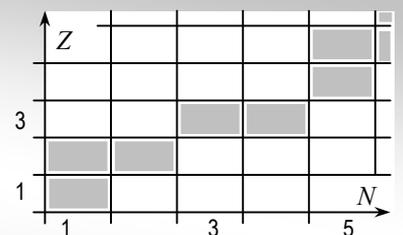


• d'une **particule β⁻** (bêta moins) :

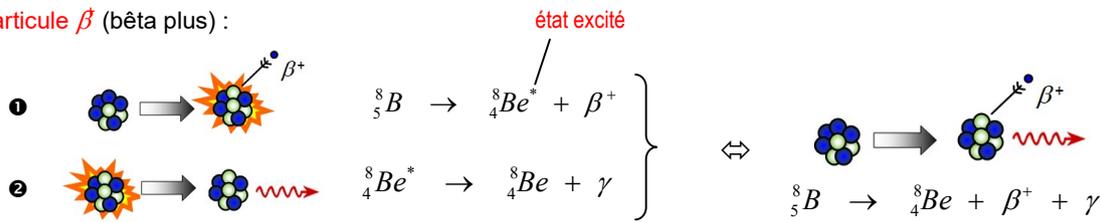


Exercice 3 :

- Déterminer l'écriture conventionnelle de la particule β⁻. De quelle particule s'agit-il ?
- Compléter le diagramme ci-contre avec la transformation nucléaire décrite ci-dessus.
- Au cours de cette transmutation, quelle transformation mettant en jeu un nucléon a précisément lieu dans le noyau de l'atome ?
- Sachant que l'écriture conventionnelle du neutron est 1_0n , déterminer celle du proton et écrire l'équation de la transformation que subit le nucléon du noyau qui se transforme.

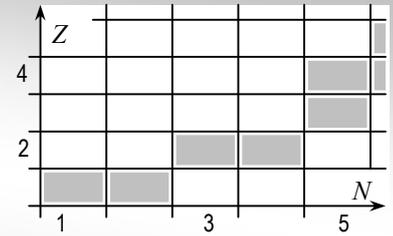


• d'une **particule β** (béta plus) :



Exercice 4 :

- Déterminer l'écriture conventionnelle de la particule β . De quelle particule s'agit-il ?
- Compléter le diagramme ci-contre avec la transformation nucléaire décrite ci-dessus.
- Au cours de cette transmutation, quelle transformation mettant en jeu un nucléon a précisément lieu dans le noyau de l'atome ?
- Ecrire l'équation de la transformation que subit le nucléon du noyau qui se transforme.



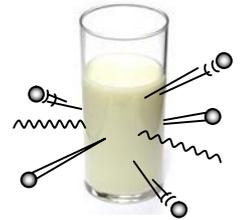
- Lors d'une transformation radioactive il y a toujours **conservation du nombre de masse et du nombre de charge** (*lois de Soddy*)
- La particule α est un noyau d'hélium 4_2He . La particule β^- est un électron ${}^0_{-1}e$. La particule β^+ est un positron 0_1e (ou positon).
- Lors d'une transformation nucléaire, le noyau formé est appelé **noyau fils**. Ce noyau fils est généralement obtenu dans un **état dit excité**. Il perdra alors son énergie sous forme d'un **rayonnement γ** (gamma) très pénétrant et de très grande énergie (donc dangereux).
- Lors d'une transformation nucléaire, de la **matière** du noyau père est **convertie en énergie** présente dans la vitesse relativiste de la particule émise et dans le rayonnement.

III. Décroissance radioactive

3.1. Définitions

- Chaque désintégration radioactive émet une particule α , β^- ou β^+ et souvent aussi un rayonnement γ .
- L'**activité notée A** d'un échantillon de matière radioactive est le **nombre de désintégrations que l'on observe en une seconde**. Elle se compte en **becquerel (Bq)** :

$$1 Bq \Leftrightarrow 1 \text{ dés/s}$$
- Le nombre d'atomes radioactifs contenus dans un échantillon est appelé **population** et est noté N .
Ainsi, à chaque fois qu'un noyau radioactif se désintègre, la population N de cet isotope diminue de 1.



Exercice 5 :

Soit une population de $N = 12\,000$ noyaux d'un isotope radioactif quelconque. Sachant que l'activité A de cet échantillon est en moyenne de $7 Bq$, peut-on connaître de manière certaine la population exacte de cet isotope au bout de $3 s$ ou $5 min$? Justifier.

3.2. Loi de décroissance radioactive

On prend une population très grande de $N = 100\,000$ noyaux d'un même isotope à la date $t = 0$. Dans les premières minutes, on mesure une activité à peu près constante et égale à $A = 5 Bq$.

| | | | | | | |
|------------|---------|--------|--------|--------|--------|------|
| N | 100 000 | 99 995 | 99 990 | 99 985 | 99 980 | Etc. |
| $t (s)$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | Etc. |
| ΔN | 0 | -5 | -10 | -15 | -20 | Etc. |

De ces mesures, on déduit donc que $\Delta N = -cste \times \Delta t$ et donc que la variation de la population est proportionnelle au temps.

Si l'on prend à présent deux populations initiales du même isotope et de $100\,000$ noyaux chacune, avec une activité de $5 Bq$ pour chacune de ces populations, on a donc globalement une population de $200\,000$ noyaux avec une activité de $10 Bq$.

| | | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| N_1 | 100 000 | 99 995 | 99 990 | 99 985 | 99 980 | Etc. |
| N_2 | 100 000 | 99 995 | 99 990 | 99 985 | 99 980 | Etc. |
| $N_1 + N_2$ | 200 000 | 199 990 | 199 980 | 199 970 | 199 960 | Etc. |
| $t (s)$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | Etc. |
| ΔN | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | Etc. |

On en déduit donc que : $\Delta N = -cste \times N(t)$

On en déduit donc que : $\Delta N = -cste \times N(t)$

Ainsi, on obtient que : $\Delta N = -\lambda \times N(t) \times \Delta t$ avec λ une constante appelée **constante radioactive**.

$$\Leftrightarrow \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \times N(t)$$

Si l'on considère l'évolution de la population sur une durée infinitésimale, on a :

$$\frac{dN}{dt} + \lambda \times N(t) = 0$$

On obtient une équation différentielle du premier degré ayant une solution du type :

$$N(t) = A \cdot e^{-k \times t} + B$$

Exercice 6 :

1. Montrer, à l'aide des conditions initiales et finales du système que l'on a : $A = N_0$ et $B = 0$
2. En déduire la nouvelle expression de la solution $N(t)$ à l'équation diff.
3. A l'aide de cette nouvelle expression, calculer la dérivée de $N(t)$.
4. En déduire, à l'aide de l'équation différentielle, que $k = \lambda$.
5. Ecrire l'expression finale de $N(t)$ en fonction de λ et N_0 .

A retenir :

La *loi de décroissance radioactive* est : $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ | λ en s^{-1}
 t en s

On dispose d'un échantillon de matière contenant une population de $N_0 = 800$ isotopes radioactifs identiques (noyaux pères) à la date $t = 0$. Un système de mesure permet de connaître précisément à chaque instant la population $N(t)$ de noyaux pères restants. L'évolution de cette population en fonction du temps est donnée ci-contre :

D'après ce graphe, on remarque que la population N d'un échantillon d'un radioisotope donné diminue de moitié à intervalle de temps régulier. Cet intervalle de temps est appelé **période de demi-vie** et est noté $T_{1/2}$.

On a donc :
$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

Pour aller plus loin...

Résolution par le calcul d'une primitive :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N(t)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\frac{dN}{dt}}{N(t)} = -\lambda$$

$$\Leftrightarrow \frac{N'(t)}{N(t)} = -\lambda$$

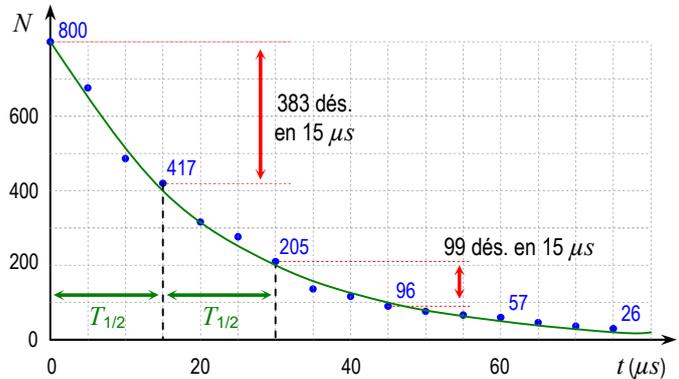
Or, on sait que la dérivée de $\ln(u)$ est égale à u' / u . En intégrant la relation précédente, on a donc :

$$\ln(N(t)) + cste = -\lambda \times t + cste'$$

$$\Leftrightarrow N(t) = e^{-\lambda t + cste''}$$

$$\Leftrightarrow N(t) = e^{-\lambda t} \times e^{cste''}$$

$$\Leftrightarrow N(t) = K \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{avec } K = e^{cste''}$$



Exercice 7 :

Montrer que si $N(T_{1/2}) = N_0 / 2$ et si $N(T_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}}$ alors $T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$

D'après le graphe, on remarque aussi que le rythme de désintégration diminue en même temps que le nombre de noyaux pères restants.

Or on sait que : $\Delta N = -\lambda \times N(t) \times \Delta t$

Mais si en une seconde ($\Delta t = 1$) la variation ΔN de la population est par exemple égale à -5 noyaux, l'activité A sera alors de $+5$ Bq.

D'où : $A(t) = \lambda \times N(t) \times 1s \Leftrightarrow A(t) = \lambda \times N(t)$ On a donc bien A qui est proportionnel à N .

IV. La radioactivité

4.1. Datation

Le carbone est l'élément chimique de numéro atomique 6 et de symbole C . Il possède entre autre un isotope stable, le **carbone 12** (^{12}C) et un isotope radioactif, le **carbone 14** (^{14}C) de demi-vie égale à 5730 ans. Le carbone 14 étant instable, il se désintègre spontanément au cours du temps. **Cependant le rayonnement cosmique entretient le niveau de cet isotope à une valeur constante dans l'atmosphère de la Terre.** Ainsi, tout organisme vivant, végétal ou animal, possède la même concentration en ^{14}C que l'atmosphère terrestre du fait de son métabolisme actif. Cette concentration est définie par la relation :

$$\frac{\text{nombre atomes } ^{12}C}{\text{nombre atome } ^{14}C} = 1,0 \times 10^{12}$$

Cela signifie que dans tout être vivant (végétal ou animal) ou récemment mort, ces deux isotopes du carbone respectent cette proportion. Mais, lorsque l'organisme meurt, la fin de son métabolisme empêche le renouvellement de l'isotope ^{14}C et sa population subit alors la loi de décroissance radioactive en diminuant de moitié tous les 5 730 ans. On mesure donc la proportion restante de l'isotope ^{14}C pour pouvoir situer approximativement l'époque de la mort du composé organique à dater (**cette méthode n'est plus fiable au-delà de 50 000 ans**).

Exercice 8 :

L'analyse d'un morceau de bois retrouvé dans une grotte montre que la concentration en ^{14}C a été divisée par un facteur 8,7 par rapport à la concentration normale de l'atmosphère. En déduire approximativement l'âge de ce bout de bois.

1. L'étude d'un échantillon de bois prélevé sur un arbre vivant donne une population en carbone 12 de $1,0 \times 10^{22}$ atomes. En déduire la population d'atomes de carbone 14 dans cet échantillon.
2. Calculer la constante radioactive du carbone 14.
3. En déduire l'activité de l'échantillon de bois vivant.
3. Quelle relation existe-t-il entre la population actuelle $N(t)$ de carbone 14 dans le bout de bois retrouvé dans la grotte et celle notée N_0 qui était celle de ce bois vivant ?
4. En déduire l'âge de ce bout de bois.

Le bismuth 209 a longtemps été considéré comme le dernier élément stable de la classification. Mais en 2003, la preuve est faite que cet élément est bien radioactif, comme le prédisait les modèles théoriques, avec une période de demi-vie de 2×10^{19} ans.

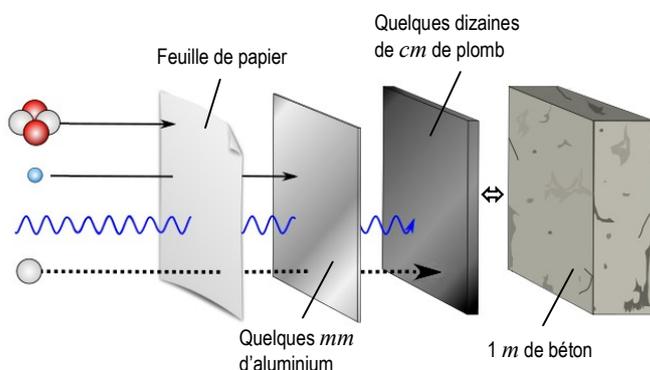
5. Déterminer le pourcentage restant de cet isotope dans l'Univers depuis le Big Bang.

4.2. Radioprotection

L'ensemble des rayonnements électromagnétiques (photons X ou γ) ou des particules (α , β ou β^+) émis par la radioactivité constitue le rayonnement ionisant capable de produire directement ou indirectement des ions lors de son passage à travers la matière qu'il détériore. Ces rayonnements ont néanmoins des applications dans les domaines de la défense, de la santé, de la production d'électricité, etc.

Pour les organismes vivants, les rayonnements ionisants sont nocifs, voire mortels en cas de dose élevée. Leurs propriétés dépendent de la nature des particules constitutives du rayonnement et de leur énergie.

La dose efficace de l'exposition aux rayonnements ionisants se mesure en **sievert** ($1 Sv = 1 J/kg$), une unité qui permet d'évaluer l'impact des rayonnements ionisants sur l'homme. Cette unité tient compte du type de rayonnement et de la quantité d'énergie reçue par unité de masse.



ECHELLE DES EXPOSITIONS

