

1 Quel est le problème avec les déchets radioactifs ?

1.1 Ils sont là pour longtemps !

Première idée importante : certains déchets radioactifs vont mettre du temps à disparaître !

La production d'électricité d'origine engendre des déchets.

Ces déchets sont pendant une durée qui peut être estimée à partir de la
- $t_{1/2}$ (parfois aussi appelée improprement « période ») de l'élément considéré. Celle-ci correspond au temps au bout duquel l'activité (nombre de désintégrations par seconde) a été **divisée par deux**.

À chaque fois que l'on compte le temps $t = t_{1/2}$, le nombre de noyaux radioactifs est divisé par deux. Ainsi le nombre de noyaux radioactifs décroît avec le temps :

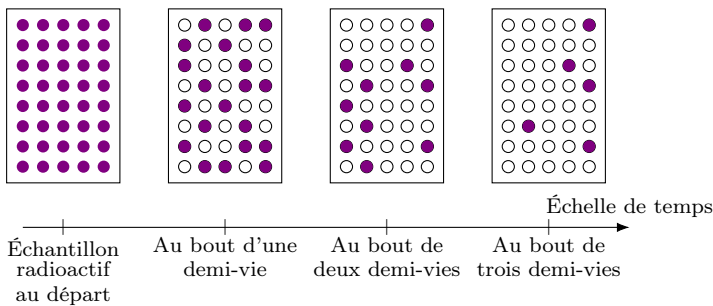


FIG. 1 – Illustration symbolique de la disparition des noyaux radioactifs. Admirez le travail d'orfèvre.

1

.....

.....

.....

La demi-vie radioactive $t_{1/2}$ est caractéristique de chaque type de noyau radioactif.

Voici quelques valeurs de demi-vies pour quelques nucléides instables :

Radionucléides		$t_{1/2}$
Iode 131	^{131}I	8 jours
Cobalt 60	^{60}Co	5,2 ans
Strontium 90	^{90}Sr	28,1 ans
Césium 137	^{137}Cs	30 ans
Plutonium 239	^{239}Pu	24 100 ans
Iode 129	^{129}I	16×10^6 ans
Uranium 238	^{238}U	$4,5 \times 10^9$ ans

FIG. 2 – Demi-vie de quelques isotopes instables.

Remarque : lorsque $t_{1/2}$ est de l'ordre de l'âge de la Terre, comme dans le cas de l'Uranium, tous les noyaux n'ont pas encore eu le temps de disparaître !

On peut représenter le de noyaux radioactifs restants en fonction du temps, par exemple pour le césium 137, dont la demi-vie est de 30 ans :

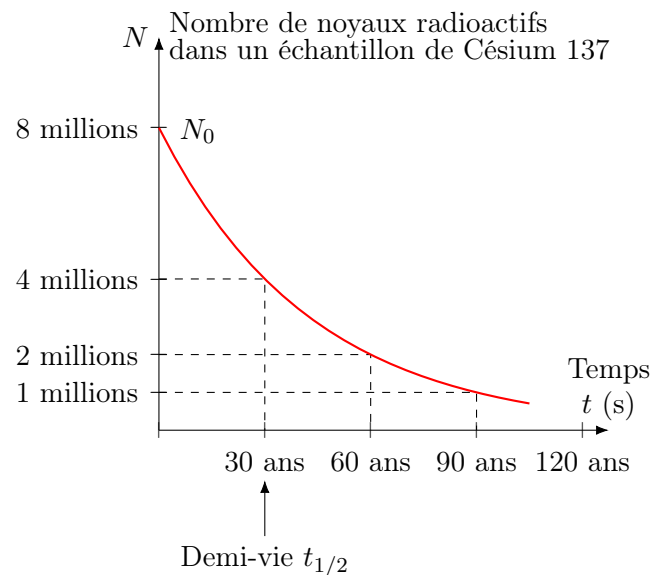


FIG. 3 – Décroissance radioactive du nombre de noyaux.

Admirez la beauté mathématique de cette courbe : il s'agit de la « rencontre » d'une suite arithmétique de raison avec une suite géométrique de quotient ! (le nom de cette courbe est « *exponentielle décroissante* »).

Remarque : le césium 137 est un polluant majeur dans tout accident nucléaire, en plus de l'iode 131 ; remarquez bien les valeurs des demi-vies de ces petites saletées !

Consigne : à l'aide de la courbe ci-après, déterminez la demi-vie du plutonium 241. Le tracé doit être apparent sur votre copie !

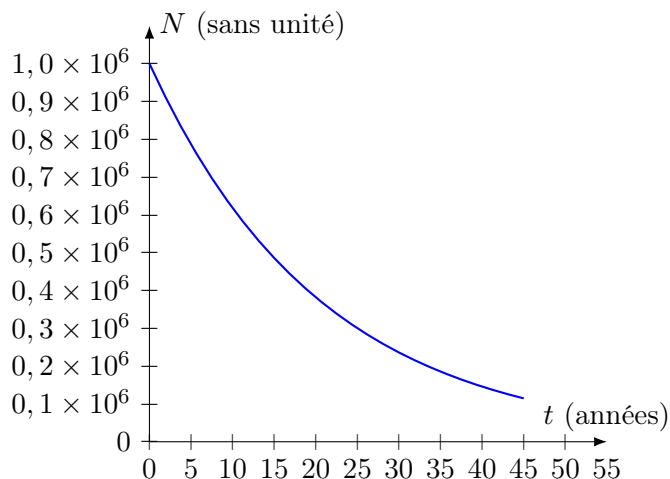


FIG. 4 – Décroissance radioactive du nombre de noyaux de plutonium 241 (Bac 2014).

La demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon de noyaux radioactifs est égale à la durée nécessaire pour que statistiquement la moitié des noyaux de l'échantillon présents à la date t soient désintégrés à la date $t + t_{1/2}$:

$$N(t + t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$$

Dans le cas particulier du choix d'une origine des dates $t = 0$, on a directement :

2

où on note N_0 le nombre de noyaux radioactifs à l'instant initial $N_0 = N(t = 0)$.

La demi-vie ne correspond pas à la moitié de la vie de l'échantillon. Un échantillon radioactif « ne meurt jamais » : il reste toujours une fraction de noyaux, nombre à diviser à nouveau par 2 au bout de $t_{1/2}$...

Remarquez bien que, pour un noyau donné, la *probabilité* qu'il se désintègre dans le temps $t_{1/2}$ à venir est toujours de 1/2. Ceci explique pourquoi la fréquentation assidue de noyaux radioactifs est déconseillée.

1.2 Certains déchets radioactifs sont plus dangereux que d'autres !

Deuxième idée importante : tous les déchets nucléaires ne se valent pas !

Dans une centrale nucléaire, les produits de fission sont en général c'est-à-dire qu'ils se transforment naturellement en d'autres noyaux en émettant des rayonnements. On distingue deux types de déchets radioactifs :

Les déchets à et à forte activité ;

Les déchets à et à faible activité.

Actuellement, le traitement des déchets consiste à séparer les deux types mentionnés et à les stocker de façon adéquate. Une autre solution consisterait à traiter les déchets à longue vie dans un surgénérateur (voir plus loin).

1.3 Il existe des tas d'unités différentes pour mesurer la dangerosité des déchets radioactifs !

Troisième idée importante : pour caractériser une source, on utilise l'activité, ou nombre de désintégration par seconde.

L'..... A d'une source est simplement le nombre moyen de désintégrations par seconde dans l'échantillon. Elle s'exprime en becquerels (Bq), avec :

3

et se mesure avec un compteur Geiger.



FIG. 5 – Compteur Geiger.

L'activité \mathcal{A} d'une source est le nombre moyen de désintégrations par seconde dans l'échantillon :

$$\mathcal{A} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

où $\Delta N = N_{\text{final}} - N_{\text{initial}}$ désigne la variation du nombre de noyaux radioactifs dans l'échantillon, et $\Delta t = t_{\text{final}} - t_{\text{initial}}$ est la durée écoulée, ou intervalle de temps.

Le nombre N de noyaux radioactifs diminue, donc $\Delta N < 0$, d'où le signe $-$ pour avoir une activité positive.

Voici quelques exemples de valeurs :

Source	Activité (Bq)
1 litre d'eau	10
1 litre de lait	80
1 kg de granit	1 000
1 homme de 70 kg	10 000
50 kg d'engrais phosphatés	100 000
1 g de plutonium	2×10^6
1 scintigraphie thyroïdienne	$3,7 \times 10^7$

FIG. 6 – Exemples d'activités.

Attention, les nombres peuvent être énormes, car le nombre d'Avogadro (= nombre d'atomes de carbone 12 dans 12 g de carbone) est lui-même énorme ($N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$). Il faut retenir qu'une activité de plusieurs millions de becquerels n'a rien de bien exceptionnel.

L'activité \mathcal{A} d'une source est proportionnelle à son nombre N de noyaux radioactifs, et inversement proportionnelle à la demi-vie $t_{1/2}$ des noyaux, tel que :

$$\mathcal{A} = 0,69 \cdot \frac{N}{t_{1/2}}$$

Le facteur 0,69 sera détaillé dès que vous en aurez débuté les mathématiques élémentaires (et cela fait un excellent exercice de mathématiques!). En attendant, cette formule sera toujours donnée quand elle sera nécessaire.

Les sources les plus dangereuses sont :

- les sources de très faible durée de vie ($t_{1/2}$ donc $1/t_{1/2}$ grand, donc activité);
- les sources contenant un grand nombre d'atomes radioactifs (N donc activité).

Ainsi, les sources les plus dangereuses biologiquement parlant sont les sources de très faible durée de vie ($1/t_{1/2}$ grand) et contenant un grand nombre d'atomes radioactifs (N grand). Heureusement, l'activité de ces sources là décroît rapidement dans le temps.

Les déchets à vie courte (inférieure à 300 ans) ou de faible activité sont stockés dans des fûts en acier ou en béton.

Les déchets à vie longue (des milliers d'années) ou de haute activité sont coulés dans du bitume ou du verre.

1.4 Les ressources fissiles sont limitées !

Quatrième idée importante : l'uranium est un combustible fossile comme les autres !

Au rythme de la consommation actuelle, les réserves connues d'uranium seront épuisées dans un siècle.

Une autre solution mise en œuvre par les Français dans les années 80 et abandonnée depuis consistait à utiliser le plutonium militaire (utilisé dans les bombes) dans un surgénérateur. Les réserves sont suffisantes pour alimenter tous les réacteurs nucléaires pour dix siècles !

2 Applications

2.1 Effets biologiques

Les dépendent de l'activité \mathcal{A} de la source, de l'énergie du rayonnement émis et de la manière dont ce rayonnement est absorbé. Pour tenir compte de ces paramètres, d'autres unités sont utilisées (en particulier le sievert, symbole Sv).

Divers paramètres d'influence :

- Activité de la source ;
- Énergie et nature des particules émises ;
- Distance de la source ;
- Absorption du milieu ;
- Nature des tissus touchés...

On distingue diverses possibilités d'action :

Irradiation À distance, sans contact direct avec la source ;

Contamination Par absorption (voies digestives ou respiratoires) de produits radioactifs pouvant se désintégrer dans l'organisme.

Afin de se protéger, on peut être amené à travailler sous boîte à gants, revêtu d'une combinaison, et équipé de détecteurs de radiations portables.

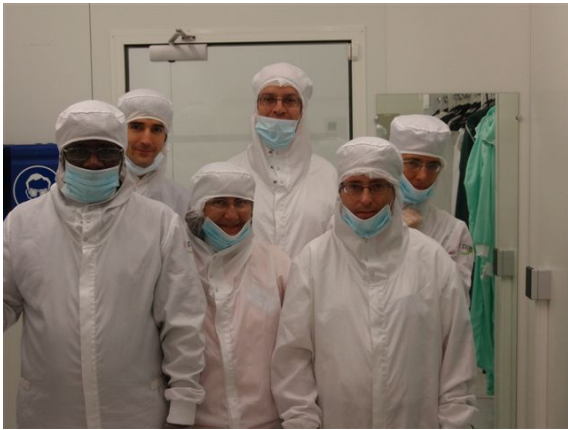


FIG. 7 – Pensez à enfiler votre pijama avant d'aller au lit. Le grand type au centre va venir vérifier vos exos de physique !

2.2 Applications « utiles »

Radiothérapie Destruction sélective de cellules cancéreuses ;

Imagerie médicale Par exemple, scintigraphie par injection d'un produit radioactif appelé marqueur, repérable par son rayonnement ;

Stérilisation Par exemple, pour le matériel médical ;

Conservation Par exemple, pour les fruits et légumes, par destruction des parasites.

2.3 Datation (aussi « utile » !)

En géologie Datation des roches, à partir de nucléides à longue demi-vie comme ^{238}U , ^{206}Pb ou ^{87}Rb ;

En archéologie Le carbone 14 ($t_{1/2} \simeq 5600$ ans pour l'isotope $^{14}_6\text{C}$ du carbone) permet de dater des objets d'origine végétale ou animale.

En effet, la répartition en carbone 14 est homogène autant dans le temps que entre l'atmosphère et les organismes vivants ;

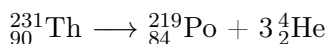
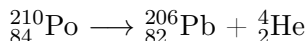
À la mort de l'échantillon, le carbone 14 n'est plus renouvelé, car les échanges avec l'atmosphère cessent. La teneur décroît alors exponentiellement, selon la loi radioactive. Ces phénomènes seront l'objet du programme de Terminale.

3 Correction des exercices du chapitre 10 (début)

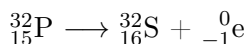
10.1

La classification périodique était indispensable pour faire cet exercice.

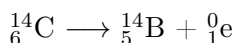
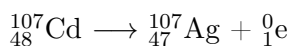
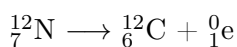
- a. Émetteurs α , c'est-à-dire un noyau d'hélium $4\ ^2_2\text{He}$ dans les noyaux fils :



- b. Émetteurs β^- , un électron ${}_{-1}^0\text{e}$ dans les produits :



- c. Émetteurs β^+ , un positon (ou électron positif, anti-particule de l'électron) ${}_{+1}^0\text{e}$ dans les produits :



10.2

- a. Un élément correspond à un certain numéro atomique Z ; on trouve les éléments dans la classification périodique, classés par numéro atomique Z croissant. Parmi toutes les paires (Z, A) proposées, il n'y a que trois valeurs du numéro atomique Z différentes, donc trois éléments :

Z	Symbole	Nom
$Z = 4$	Be	le béryllium
$Z = 8$	O	l'oxygène
$Z = 16$	S	le soufre

- b. Des noyaux sont isotopes s'ils ont le même numéro atomique Z (même nombre de protons), mais un nombre de nucléons A différent (donc un nombre différent de neutrons). On distingue :

— deux isotopes du béryllium : ${}^8_4\text{Be}$ et ${}^9_4\text{Be}$;

— trois isotopes de l'oxygène : ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$ et ${}^{18}_8\text{O}$;

— quant au soufre, il n'est ici proposé que par un seul nucléide : ${}^{32}_{16}\text{S}$.

10.3 N° 6 p. 152 – Une eau lourde

- Avec un seul proton, le deutérium est un nucléide de numéro atomique $Z = 1$. Il s'agit donc d'un isotope de l'hydrogène.
- $Z = 1$ pour le proton et $A = 1 + 1$ pour les nucléons, somme du nombre de proton et de neutron. La représentation symbolique est donc ${}^2_1\text{H}$.

- À la place de H_2O , il faudrait écrire DHO pour l'eau semi-lourde et D_2O pour l'eau lourde. Cocasse, n'est-il pas ?

- La masse volumique de la glace d'eau pure, à $0\ ^\circ\text{C}$ sous 1 atmosphère, est $917\ \text{kg/m}^3$, à comparer à $1000\ \text{kg/m}^3$ pour l'eau liquide. Par conséquent, la glace d'eau flotte sur l'eau, tel que confirmé dans l'expérience du verre de droite. En effet, la glace d'eau est moins dense que l'eau liquide, en raison de sa structure cristalline lacunaire de la glace.

Que l'on considère de la glace d'eau ou de la glace d'eau lourde ne change rien à la structure cristalline, qui est du ressort de la chimie (donc ne fait intervenir que les électrons). Dans tous les cas, la glace d'eau est une structure :

$$\frac{1000}{917} = 1,09$$

fois moins dense que l'eau liquide.

Montrons maintenant que la glace d'eau lourde est plus dense que l'eau liquide (ce qui n'a rien d'évident). Pour cela, commençons par calculer la masse molaire de l'eau :

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 2 \times 1,0 + 16,0 = 18,0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

ainsi que la masse molaire de l'eau lourde :

$$M(\text{DHO}) = 2 \times 2,0 + 16,0 = 20,0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

Ainsi, à quantité de matière égale, l'eau lourde sera :

$$\frac{20,0}{18,0} = 1,11$$

fois plus dense que l'eau formée uniquement d'hydrogène 1.

On constate que $1,11 > 1,09$, l'allourdissement due au neutron supplémentaire est suffisant pour compenser l'allègement dû à la structure cristalline de la glace ! Ainsi, la glace d'eau lourde pure coule dans l'eau.

10.4 N° 7 p. 152 – Une eau radioactive

- On passe de l'oxygène 16 à l'oxygène 15. Sa représentation symbolique est ${}^{15}_8\text{O}$.
- Les deux isotopes ont les mêmes propriétés chimiques, qui ne concernent que les électrons de valence. Ajouter ou enlever des neutrons aux noyaux n'a pas d'effet direct sur la liaison chimique.

10.5 N° 9 p. 153 – Un problème de stabilité

- L'interaction forte est responsable de la cohésion du noyau.

2. La radioactivité est un phénomène aléatoire, inélu- cible et spontané, par lequel un noyau père instable se désexcite en créant un noyau fils plus stable, et une autre particule ou un autre noyau, ce que l'on peut qualifier de « rayonnement » (terme générique qui évite de préciser s'il s'agit d'un noyau d'hélium, d'un électron, d'un positon ou d'un photon gamma).
3. a. Les noyaux sont classés en fonction de le nombre de protons ou numéro atomique Z en abscisse, et de leur nombre de neutrons $N = A - Z$ en ordon- née. Chaque petit carré coloré sur le diagramme représente un noyau.
- b. Les noyaux de la zone bleue ont un excès de neu- trons, N trop grand, pour que les noyaux soient stable. Spontanément, en transformant un neutron et proton, et en émettant un électron (rayonne- ment β^-), le noyau va se rapprocher de la zone de stabilité en rouge.

La zone jaune correspond aux noyaux comportants un excès de protons, Z trop grand. Spontanément, en transformant un proton en neutron, et en émet- tant un positon (rayonnement β^+), le noyau va se rapprocher de la zone de stabilité en rouge.

La zone en vert correspond aux noyaux qui sont définitivement trop gros, donc un excès de protons et de neutrons. Spontanément, en émettant deux protons et deux neutrons, c'est-à-dire un noyau d'hélium 4 (rayonnement α), le noyau va se rap- procher de la zone de stabilité en rouge.

- c. La zone de stabilité en rouge semble représenter le fond d'une vallée, entourée de pentes d'où dévalent spontanément les noyaux. Cela a rappelé aux phy- siciens ayant constaté ce curieux regroupement un problème de mécanique de chute des corps bien connu.

4 Exercices du chapitre 10 (fin)

10.6 N° 13 p. 154 – Conversions en tout genre

10.7 N° 15 p. 154 – Activité du césium 137

10.8 N° 16 p. 154 – Scintigraphie osseuse

10.9 N° 19 p. 155 – Authenticité d'un millésime

10.10 N° 22 p. 156 – Le retour de la momie

10.11 N° 23 p. 156 – Le radon des sous-sols