

LA RADIOACTIVITÉ

Afin d'adapter cette brochure numérique à tous les navigateurs, nous en avons figé les thèmes en sept rubriques : la matière (R-1), la radioactivité (R-2), la radioactivité dans la nature (R-3), les effets des rayonnements et leurs applications (R-4), l'énergie nucléaire et les réacteurs nucléaires (R-5), le cycle du combustible nucléaire (R-6), la radioactivité : une découverte française (R-7).

Qu'est-ce que la radioactivité ?

Les modes de désintégration des noyaux

L'émission gamma

Parcours des rayonnements dans la matière

Période radioactive

La radioactivité et ses unités

Le noyau a trop de neutrons

Le noyau a trop de protons

Désintégration alpha

Rayons gamma

Valeurs des parcours des rayonnements dans la matière

Comment calculer l'activité d'un radioélément ?

QU'EST-CE QUE LA RADIOACTIVITÉ ?

Les noyaux instables reviennent vers la stabilité en modifiant leur structure interne. Cette modification s'accompagne d'une diminution de leur masse ; ce défaut de masse se transforme en énergie : c'est l'énergie nucléaire. Par exemple, un défaut de masse d'un millième de gramme correspond à un dégagement d'énergie égal à 25 000 kWh !

Ceci ne se fait pas tout seul ! Cette transformation va s'accompagner de l'émission d'un (ou plusieurs) rayonnement(s) (qui véhicule(nt) l'énergie), mesurable(s) par des appareils appropriés : les détecteurs de rayonnements.

Cette émission de rayonnements s'appelle la radioactivité.

Plus le noyau sera loin de l'équilibre et plus il sera instable, plus il aura tendance à se transformer (on dit aussi : désintégrer) rapidement. Plus il est proche de l'équilibre et plus sa durée de vie augmente. Ainsi le potassium-40 a une durée de vie supérieure au milliard d'années. Cela lui permet d'être encore présent dans l'écorce terrestre 4,5 milliards d'années après la formation de notre planète. Il participe ainsi à la radioactivité naturelle qui nous entoure. C'est aussi le cas de l'uranium et du thorium.

La radioactivité traduit, en fait, le retour vers l'équilibre.

LES MODES DE DÉSINTÉGRATION DES NOYAUX

Les possibilités de désintégration des noyaux sont très limitées :

β
(bêta)

* les noyaux instables en raison d'un excès de neutrons reviennent vers la stabilité en transformant un neutron en proton. Ils émettent alors un électron : c'est la désintégration β^- .

* les noyaux instables en raison d'un excès de protons reviennent vers la stabilité en transformant un proton en neutron. Ils émettent alors un positon (particule « jumelle » de l'électron, mais de charge positive) : c'est la désintégration β^+ . Ils peuvent aussi, pour faire cette transformation de proton en neutron, capturer un électron : c'est la capture électronique.

α
(alpha)

* les noyaux instables car ils possèdent trop de nucléons, ont deux voies possibles de désintégration :

- éjecter un noyau d'hélium-4 formé de 2 protons et 2 neutrons. Ils perdent ainsi quatre nucléons d'un coup : c'est la désintégration α .
- se couper en deux noyaux différents : c'est la fission. Certains très gros noyaux peuvent fissionner spontanément.

f

Il est possible aussi d'induire dans d'autres noyaux (appelés fissiles) ce phénomène en les bombardant avec un neutron : c'est la fission provoquée.

L'ÉMISSION GAMMA

γ

(gamma)

La majorité des noyaux possèdent encore, après une désintégration, un trop plein d'énergie. Ils libèrent cet excès d'énergie (on dit qu'ils se désexcitent) en émettant un rayonnement électromagnétique, de même nature que les rayons lumineux (mais d'énergie plus élevée) appelé *rayon γ* (on dit aussi *photon γ*). Le symbole γ caractérise le fait que cette émission provient du noyau.

Lorsque c'est l'atome - et non le noyau - qui se désexcite, le rayonnement électromagnétique émis, découvert par Röntgen en 1895, s'appelle *rayon X*.

Il faut noter que si, en moyenne, les *rayons γ* sont plus énergétiques que les *rayons X*, ils sont (là aussi en moyenne) moins énergétiques que les *rayons cosmiques* qui sont de même nature et par lesquels nous sommes continuellement irradiés, de façon naturelle puisqu'ils proviennent des hautes couches de l'atmosphère.

PARCOURS DES RAYONNEMENTS DANS LA MATIÈRE

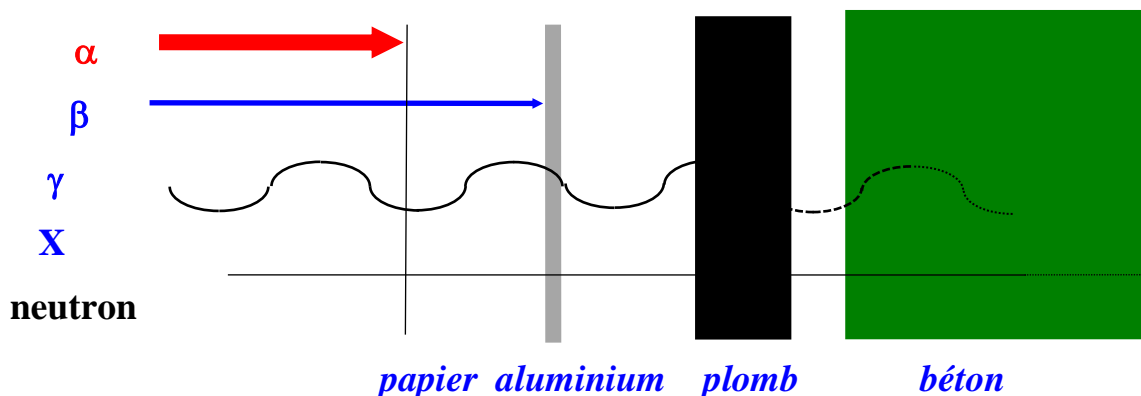
Les *rayons alpha* (α) ont un pouvoir de pénétration très faible : ils sont arrêtés par une feuille de papier ou par les couches superficielles de la peau.

Les *rayons bêta* (β) ont un pouvoir de pénétration un peu plus important mais une feuille d'aluminium les arrête.

Les *rayons gamma* (γ) ne sont pas des particules et sont donc très pénétrants ; de même pour les *rayons X*.

Les *neutrons*, qui sont pourtant des particules, sont eux aussi très pénétrants en raison de leur manque de charge électrique.

Dans ces deux derniers cas, il faut une épaisseur importante de béton ou de plomb pour arrêter ou atténuer leur flux afin qu'ils ne constituent plus un danger pour l'homme (ou encore d'eau ou de paraffine, écrans plus efficaces pour les neutrons).



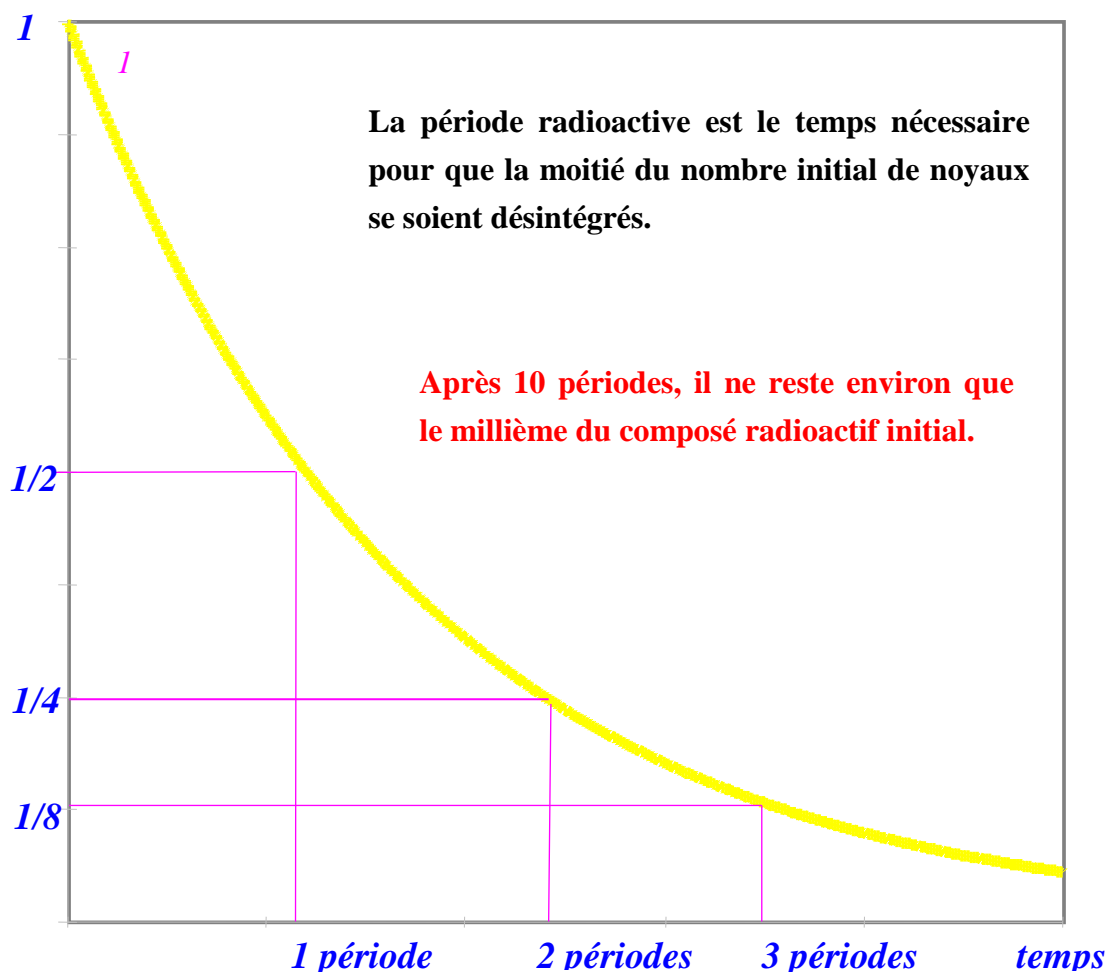
PÉRIODE RADIOACTIVE

La durée de vie d'un atome instable est définie par *la période radioactive* : c'est le temps que met un élément radioactif pour perdre la moitié de sa radioactivité. La période radioactive de l'uranium-238 est de 4,5 milliards d'années. Celle de l'uranium-235 est de 704 millions d'années. L'uranium-235 décroît donc plus vite que l'uranium-238. Ceci explique qu'il n'en reste plus que 0,72% dans l'uranium nature.

Voici quelques autres exemples (en vert les isotopes stables auxquels ils aboutissent) :

10 minutes pour l'azote-13	→	carbone -13
5 ans pour le cobalt-60	→	nickel-60
30 ans pour le césium-137	→	baryum-137
5 730 ans pour le carbone-14	→	azote-14
16 millions d'années pour l'iode-129	→	xénon-129
1,2 milliard d'années pour le potassium-40	→	argon et calcium-40

On peut retenir qu'après dix périodes, la radioactivité d'un élément est divisée approximativement par 1 000.



Classification périodique (2015)

Cases blanches : isotopes stable(s) et radioactif(s)

cases couleur : élément dont l'isotope de plus longue période T est

H 1																	He 2																														
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10																														
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18																														
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36																														
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54																														
Cs 55	Ba 56	⁵⁷ ₇₁	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86																														
Fr 87	Ra 88	⁸⁹ ₁₀₃	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	? 113	Fl 114	? 115	Lv 116	? 117	? 118																														
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>La 57</td> <td>Ce 58</td> <td>Pr 59</td> <td>Nd 60</td> <td>Pm 61</td> <td>Sm 62</td> <td>Eu 63</td> <td>Gd 64</td> <td>Tb 65</td> <td>Dy 66</td> <td>Ho 67</td> <td>Er 68</td> <td>Tm 69</td> <td>Yb 70</td> <td>Lu 71</td> </tr> <tr> <td>Ac 89</td> <td>Th 90</td> <td>Pa 91</td> <td>U 92</td> <td>Np 93</td> <td>Pu 94</td> <td>Am 95</td> <td>Cm 96</td> <td>Bk 97</td> <td>Cf 98</td> <td>Es 99</td> <td>Fm 100</td> <td>Md 101</td> <td>No 102</td> <td>Lr 103</td> </tr> </table>																		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71																																	
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103																																	

LA RADIOACTIVITÉ ET SES UNITÉS

Nous savons parfaitement mesurer la radioactivité. Nous cherchons en fait à connaître :

- * l'intensité de la source radioactive (appelée aussi **activité**), mesurée par le **becquerel** (symbole **Bq**) : un becquerel correspond à 1 désintégration par seconde.
- * la quantité de radioactivité absorbée par un matériau ou un individu exposé, mesurée par le **gray** (symbole **Gy**). C'est en fait une dose de radioactivité absorbée, définie par la quantité d'énergie déposée dans un kilogramme de matière. Le **gray** correspond à une énergie absorbée de **1 joule** par une masse irradiée égale à **1 kilogramme**.

Rappelons que Le joule est l'unité qui quantifie la quantité d'énergie dans le Système International d'Unités (symbole J) Il correspond à une valeur relativement petite de la quantité d'énergie. Ainsi, pour élever la température de 1 litre d'eau de 20° C à 100° C, il faut fournir une énergie égale à 335 000 joules environ. *De même : 1 kilowattheure (kWh) correspond à 3 600 000 joules.*

- * l'effet produit sur l'individu exposé, mesurée par le **sievert** (symbole **Sv**). C'est aussi une énergie absorbée, entre autres, par kilogramme de matière vivante.

En effet, à dose égale, les effets de la radioactivité dépendent de la nature du rayonnement reçu (α , β , γ , neutrons). voir « *les effets biologiques des rayonnements ionisants* » (R-4)

Le becquerel est une toute petite unité, à notre échelle. C'est ainsi que :

un becquerel d'iode-129 correspond à 0,000 000 157 gramme de ce radionucléide !

Une autre unité, définie par **Marie Curie** (R-7), reflétait davantage la réalité physique : elle correspondait à l'activité d'un gramme de radium-226, c'est le **curie** (symbole **Ci**). Il faut **3 tonnes d'uranium-238** pour obtenir une activité égale à 1 curie.

1 curie = 37 milliards de becquerels

Un milligramme de césium-137 a une activité de 0,087 Ci ou encore 87 millicuries (soit 3,2 milliards de becquerels).

Toutefois, depuis 1986, l'unité officielle est le **becquerel** et ses multiples. Le **curie** (et ses sous-multiples) a donc officiellement disparu en même temps que le **rad** (0,01 gray) et le **rem** (0,01 sievert).

→ 31 décembre 1985
curie rad rem

1er janvier 1986 →
becquerel gray sievert
curie rad rem

LE NOYAU A TROP DE NEUTRONS



un neutron se transforme en proton, le noyau éjecte alors un électron,
c'est ce que l'on appelle : **émission β^-**

du carbone	se transforme	en azote
de l'azote	se transforme	en oxygène
du fer	se transforme	en cobalt
du cobalt	se transforme	en nickel
du nickel	se transforme	en cuivre etc.
du césium-137	se transforme	en baryum stable
de l'iode-129	se transforme	en xénon stable
de l'uranium	se transforme	en en neptunium, puis en plutonium.

LE NOYAU A TROP DE PROTONS



un proton se transforme en neutron
c'est l'inverse de β^-

l'azote	se transforme	en carbone
l'oxygène	se transforme	en azote
le fluor	se transforme	l'oxygène
		etc.

DÉSINTÉGRATION ALPHA

α

Les très gros noyaux perdent à la fois des protons
et des neutrons (en réalité, une particule α : de l'hélium-4
constitué de $2p + 2n$)

Ainsi le plutonium redevient de l'uranium,
de l'uranium se transforme en thorium,
du polonium en plomb etc.

RAYONS GAMMA

Ces rayons γ sont les cousins des autres rayonnements électromagnétiques

ondes hertziennes

ondes radio

micro-ondes

infrarouge

lumière visible

ultraviolet*

rayons X*

rayons γ *

rayons cosmiques*

Leur énergie est égale ou plus grande que celle des rayons X mais nettement plus petite que celle des rayons cosmiques.

* rayonnements ionisants

VALEURS DES PARCOURS DES RAYONNEMENTS DANS LA MATIÈRE

α (alpha) : les rayons alpha sont arrêtés par quelques dizaines de micromètres (millièmes de mm) dans un matériau solide ou liquide, 2 à 4 cm dans l'air.

Pour un calcul plus précis, on peut utiliser les formules suivantes :

Parcours dans l'air $R_{cm}(\alpha) = 0,32 \times (E_{MeV})^{1,5}$

Parcours dans un autre milieu (ρ masse volumique et A masse atomique) $\frac{R_2}{R_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$

Ainsi, par exemple, le parcours d'un α de 4 MeV est de
2,56 cm dans l'air, 11 μ m dans le plomb, 33 μ m dans l'eau

β (bêta) : les rayons bêta sont arrêtés par quelques mm ou cm (selon leur énergie) dans un matériau liquide ou solide mais peuvent parcourir quelques mètres dans l'air.

Pour un calcul plus précis, on peut utiliser la formule suivante :

Parcours (cm) $= \frac{0,35 \times E_{(MeV)}}{\rho_{(g \cdot cm^{-3})}}$

Ainsi, par exemple, le parcours d'un électron de 4 MeV est de
1 080 cm dans l'air, 1,28 mm dans le plomb 14 mm dans l'eau

γ (gamma) et X : les rayons gamma (et rayons X de même énergie) sont atténués d'un facteur 1 000 après la traversée d'une épaisseur e d'environ :

e = 1 dizaine de cm dans le plomb,

e = 45 cm dans le béton,

e = 1,05 m dans l'eau.

Pour les atténuer d'un facteur 1 million il faut une épaisseur d'écran égale à 2e, Pour les atténuer d'un facteur 1 milliard il faut une épaisseur d'écran égale à 3e, etc.

Pour un calcul plus précis on peut retenir que pour réduire d'un facteur 10 l'intensité d'un faisceau de rayons gamma dont l'énergie est égale à quelques MeV (entre 1 et 3 MeV), il faut une épaisseur e (en cm) à peu près égale à $35/\rho$ où ρ est la masse volumique de la matière irradiée en $g \cdot cm^{-3}$.

n (neutron) : l'écran le plus efficace pour arrêter ou atténuer un faisceau de neutrons doit être constitué majoritairement d'atomes d'hydrogène : l'eau ou la paraffine par exemple. Il faut quelques dizaines de centimètres de ces matériaux pour arrêter ou atténuer très fortement un faisceau de neutrons

COMMENT CALCULER L'ACTIVITÉ D'UN RADIOÉLÉMENT ?

L'activité **A** d'un radioélément traduit sa vitesse de disparition par désintégration. Son unité est le **becquerel** (1 désintégration par seconde ; symbole **Bq**).

L'activité **A** est donc le produit de la **probabilité de désintégration par seconde** que possède un radioélément (λ : lambda) par le **nombre de noyaux présents (N)**.

Plus clairement : si un radioélément X a une probabilité égale à 1 sur 1 million de se désintégrer par seconde et que le nombre de noyaux X présents soit égal à 1 million, il y aura 1 désintégration par seconde !

Il existe une relation entre λ et la période radioactive **T** : $\lambda \times T \approx 0,693$.

Si l'activité s'exprime en becquerels, la période alors est exprimée en secondes

Reprenons l'exemple de l'iode-129 dont la période radioactive vaut :

$1,6 \times 10^7$ ans soit 5×10^{14} secondes. Dans 129 g d'iode-129 il y a 6×10^{23} noyaux d'atomes d'iode-129, donc dans 0,000 000 157 g ($1,57 \times 10^{-7}$) il y a $7,3 \times 10^{14}$ atomes d'iode-129

$$A = \lambda N = \frac{0,693}{T} \times N = \frac{0,693 \times 7,3 \times 10^{14}}{5 \times 10^{14}} = 1 \text{ Bq}$$

Voici une formule simple pour calculer l'activité d'un radioélément **A_X** connaissant sa masse **m** (exprimée en grammes) et sa période **T** (exprimée en années)

Le raisonnement conduit à : $\text{Activité}_{(\text{Bq})} = \lambda N = \frac{0,693}{T \times 31,56 \times 10^6} \times \frac{m \times 6,02 \times 10^{23}}{A}$

et donc :

$$\text{Activité}_{(\text{Bq})} = 1,322 \times 10^{16} \times \frac{m}{A \times T}$$

ou encore, puisque 1 curie = 37×10^9 becquerels

$$\text{Activité}_{(\text{Ci})} = 3,57 \times 10^5 \times \frac{m}{A \times T}$$

exemples : 1 mg de ^{60}Co ($T = 5,7$ ans) a une activité de $3,87 \times 10^{10}$ Bq (38,7 GBq) ou 1,04 Ci
 1 kg de ^{238}U ($T = 4,5 \times 10^9$ ans) a une activité de $1,23 \times 10^7$ Bq (12,3 MBq) ou 0,33 mCi