

Chapitre 3 : loi de la décroissance radioactive

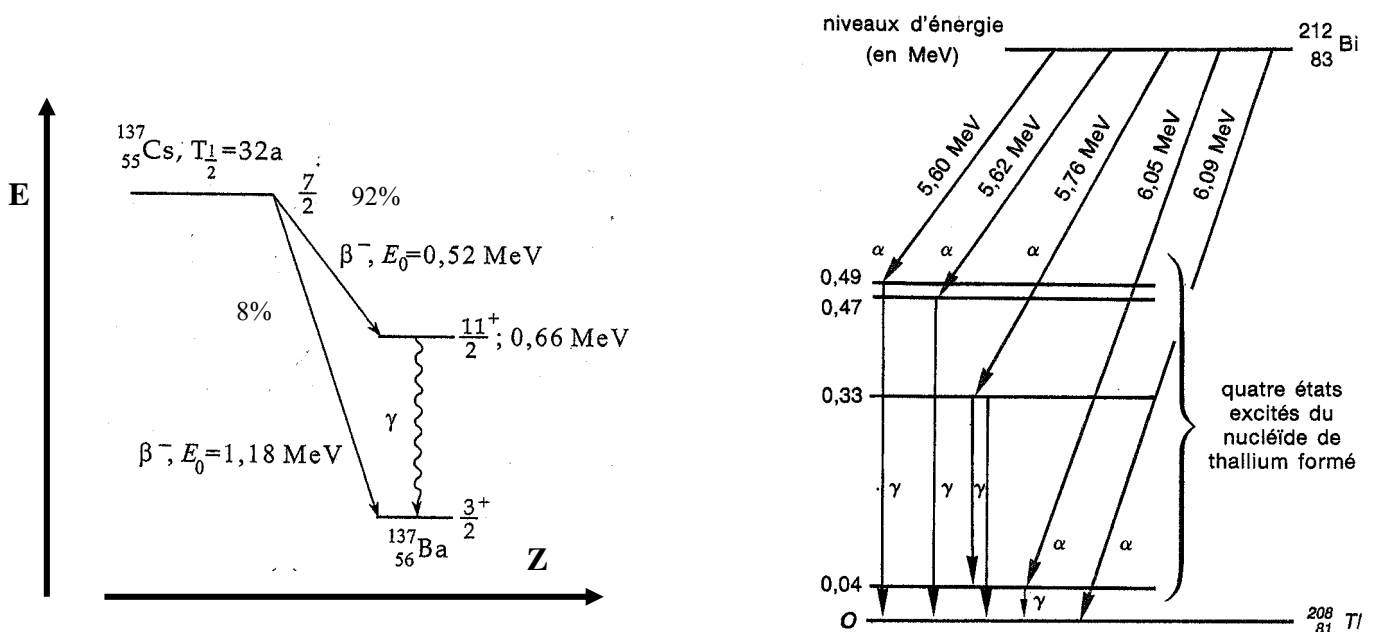
3.1 Introduction

• Au niveau macroscopique, la **radioactivité** pourrait se définir comme l'état d'une matière (atmosphère, eaux, roches, matériaux de construction ..) émettant un rayonnement constitué de particules chargées α , β , p ou neutres γ , n ... Ce rayonnement a une **origine nucléaire**, car la radioactivité d'un atome n'est pas altérée lorsqu'il se trouve engagé dans différents composés chimiques (par exemple, quand il est constituant d'un oxyde, d'un sulfate, d'un nitrate, ...); la radioactivité "résiste" à tous les traitements chimiques. On distingue la *radioactivité naturelle* (radioactivité de radioéléments qui existent dans la nature, réactions nucléaires spontanées) de la *radioactivité artificielle* (radioactivité produite au cours de réactions nucléaires).

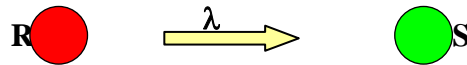
• Au niveau microscopique, la radioactivité se définit comme des **transitions nucléaires**, des processus au cours desquels les **noyaux** évoluent d'un état quantique initial caractérisé par une certaine énergie vers un état final situé à une énergie moins élevée, avec émission de particules α (noyaux d'hélium), β^\pm (positrons e^+ ou électrons e^-), de rayonnements γ , de neutrons (fission), ou éventuellement de rayons X (après capture électronique). *Ces phénomènes seront étudiés plus en détails dans le chapitre 5.*

⇒ la **loi de décroissance radioactive** qui est étudiée dans ce chapitre est valable quel que soit le type de radioactivité.

Le schéma de désintégration d'une source de ^{137}Cs ($\rightarrow ^{137}\text{Ba}$) fournit un exemple de transition β vers un niveau fondamental et de transition β suivie d'une transition γ (figure de gauche); celui d'une source de ^{212}Bi un exemple de transitions α , suivies de transitions γ .



3.2 Cas d'un seul élément radioactif se désintégrant vers un élément stable



3.2.1 Constante de désintégration ou constante radioactive : λ

Un échantillon contenant de **nombreux nucléides radioactifs** émet de façon continue: ses noyaux ne se désintègrent pas tous en même temps. Lorsqu'on envisage **un noyau** isolément, on ne peut pas prévoir à quel moment il va se désintégrer. Il reste inchangé jusqu'à ce que, BRUSQUEMENT, il se transforme en émettant une particule. On dit qu'un noyau ne vieillit pas car il "meurt" d'un seul coup sans avoir subi de modifications progressives.

Ce que l'on peut faire, c'est prévoir **l'évolution statistique d'un grand nombre** de radionucléides. Désignons par N_0 le nombre de noyaux radioactifs existant dans un échantillon à l'instant $t = 0$. Au temps t , il en reste $N(t)$ et dans l'intervalle de temps $t \rightarrow t+dt$, un certain nombre dN de noyaux se désintègrent. \Rightarrow le nombre de radionucléides a varié de $-dN$ pendant la durée dt .

On obtient la loi de décroissance radioactive en faisant 2 hypothèses :

- 1/ les N noyaux instables constituent des systèmes évoluant indépendamment l'un de l'autre
 $\Rightarrow |dN(t)|$ est proportionnel au nombre actuel $N(t)$ de radionucléides présents dans l'échantillon
- 2/ la désintégration d'un noyau n'est pas liée à l'instant de sa formation, c-à-d que l'âge d'un noyau n'a pas d'influence sur la probabilité qu'il a de se désintégrer \Rightarrow la variation $|dN|$ du nombre de radionucléides pendant la durée dt est proportionnelle à cette durée dt :

$$\mathbf{-dN = \lambda N dt} \quad (3.1).$$

La constante de proportionnalité λ est appelée **constante radioactive** du nucléide émetteur; elle représente la **probabilité de désintégration d'un noyau par unité de temps** et ne dépend que de la nature de ce noyau.

Expérimentalement, on détermine la constante λ , grandeur a priori inconnue, en mesurant le nombre de désintégrations pendant un certain intervalle de temps Δt , au moyen d'un détecteur observant la source. Par exemple, on pourrait enregistrer 510 désintégrations pendant 30 secondes. On désigne par $|\Delta N|$ le nombre de noyaux se désintégrant dans cet intervalle de temps Δt

$$\Rightarrow \text{Expérimentalement, on a : } \frac{|\Delta N|}{\Delta t} = \lambda N$$

Cette égalité est justifiée, à condition que

- 1/ le **nombre de désintégrations** soit **petit** par rapport au **nombre de noyaux instables de la source** de sorte que celui-ci varie peu au cours de la mesure $\Rightarrow |\Delta N| \ll N$
- 2/ les **fluctuations statistiques** de $|\Delta N|$ soient **faibles** (à cause du caractère aléatoire de la variable $|\Delta N|$) $\Rightarrow |\Delta N|$ grand devant l'unité : $|\Delta N| \gg 1$

En pratique cela signifie que, N étant effectivement grand, Δt ne doit être ni trop grand ni trop petit (cf. \rightarrow TP). Dans ces conditions, on peut assimiler N à une **fonction continue du temps**.

$$\Rightarrow \text{A partir de la relation (3.1) : } -\frac{dN(t)}{N} = \lambda dt$$

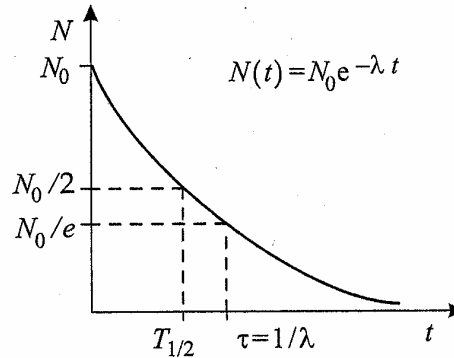
on déduit, en intégrant, le nombre N de radionucléides existant encore au temps t :

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad \rightarrow \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

⇒ la loi de décroissance:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

Le **nombre de radionucléides d'un échantillon décroît exponentiellement avec le temps**. Il est à noter que λt est un nombre sans dimension → la constante radioactive a les unités d'inverse d'un temps [s^{-1}].



3.2.2 Activité d'une source.

L'activité A d'une source au temps t est le nombre de noyaux de cette source qui se désintègrent par unité de temps à l'instant t : **$A(t) = -dN(t)/dt$** (3.3)

⇒ L'évolution temporelle de l'activité est déduite de la relation (3.2) :

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3.4)$$

⇒ L'enregistrement de l'activité A d'une source en fonction du temps conduit à la détermination de la constante radioactive λ et de l'activité initiale A_0 correspondant au radioisotope considéré.

L'unité d'activité est le **Becquerel [Bq]** correspondant à 1 désintégration par seconde [$\rightarrow s^{-1}$]¹. On emploie surtout ses multiples [Mbq, GBq].

NB L'unité Bq a remplacé l'unité Curie [Ci]. Historiquement, 1Ci correspond à l'activité de 1 gramme de radium :

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

$$1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$$

On emploie surtout des sous-multiples [μCi , mCi].

Des mesures récentes montrent que l'activité de 1 g de radium est de 0,989 Ci.

Voici les ordres de grandeur des activités de quelques sources radioactives :

- radon (^{222}Rn) contenu dans 1 m^3 d'air atmosphérique : 5 Bq
- minerai d'uranium à 10%, activité de l'uranium : $1,3 \cdot 10^{-4}$ GBq par kg
- sources pour la gammagraphie industrielle : 4 à 40 GBq
- sources de ^{60}Co pour la radiothérapie : 75 à 200 10^3 GBq
- bombe atomique à fissions équivalente à 20 kilotonnes de TNT : $7,4 \cdot 10^{13}$ GBq (1 min après l'explosion!).
- sources utilisées dans les TP de physique nucléaire : 10^{-5} - 10^{-2} GBq (1 μCi - mCi).

¹ la quantité physique avec dimension s^{-1} existe déjà : c'est le Hertz (Hz) qui est surtout utilisé pour les phénomènes périodiques tandis que le Bq est ici utilisé pour des événements distribués statistiquement.

3.2.3 Vie moyenne τ , demi-vie $T_{1/2}$.

En pratique, en plus de la constante radioactive λ , on utilise également la **vie moyenne** τ et la **demi-vie** (aussi appelée période radioactive bien qu'il ne s'agisse pas d'un phénomène périodique!) $T_{1/2}$ du radioélément.

◆ La **vie moyenne** τ représente, comme son nom l'indique, la moyenne des temps de vie d'un grand nombre de noyaux N_0 . Pour calculer τ , on cherche la moyenne du temps t entre l'instant où $N = N_0$ (soit $t = 0$) et l'instant où $N = 0$ (soit $t = \infty$). En utilisant les relations établies plus haut, on peut écrire:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_{N_0}^0 t(-dN) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt$$

$$\tau = \lambda \int_0^{\infty} \frac{y}{\lambda} \cdot e^{-y} \frac{dy}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{car} \quad \int_0^{\infty} y e^{-y} dy = 1 \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{1}{\lambda} \quad (3.5)$$

⇒ τ est l'intervalle de temps au bout duquel l'activité est réduite de $1/e$ ($e = 2,718$).

◆ La **demi-vie** $T_{1/2}$ est l'intervalle de temps nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux présents initialement. Ce temps est solution de (3.2) pour $N = N_0/2$:

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3.6)$$

◆ Remarquons qu'au bout d'un temps égal à k fois la demi-vie (après $t = k \cdot T_{1/2}$) le nombre de noyaux restant c-à-d qui ne sont **pas désintégrés** vaut :

$$\frac{N_0}{2^k} = N_0 e^{-\lambda k T_{1/2}} \quad (3.7)$$

⇒ Après un peu moins de **7 demi-vies** ($k = 7$), l'activité d'un radioisotope tombe à une valeur inférieure au centième (1%) de sa valeur initiale ($N_0/2^7 = N_0/128$).

Notons encore que la probabilité pour qu'un noyau ne soit **pas désintégré** après un temps t est

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

et son complément à l'unité, la probabilité pour qu'un noyau se soit **désintégré** après un temps t

$$1 - e^{-\lambda t} = \frac{N_0 - N}{N_0}$$

◆ Prenons le radium, ^{226}Ra , pour lequel $\lambda = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{s}^{-1}$: 1 noyau sur 100 milliards se désintègre en moyenne chaque seconde. Estimons l'activité de 1 gramme de Ra :

$$226 \text{ g Ra} \rightarrow 6 \cdot 10^{23} \text{ atomes}$$

$$1 \text{ g Ra} \rightarrow \approx 3 \cdot 10^{21} \text{ atomes}$$

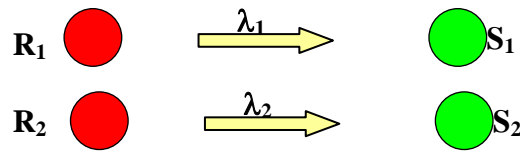
$$\text{or } \lambda \approx 10^{-11} \text{ s}$$

$$\Rightarrow A = \lambda N \approx 3 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-11} = 3 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \approx 1 \text{ Ci}$$

◆ Le tableau ci-dessous donne les demi-vies & constantes radioactives de quelques noyaux :

Tableau 3.1 demi-vies et constantes radioactives de quelques radioisotopes								
Noyau	^{198}Au	^{222}Rn	^{32}P	^{60}Co	^{137}Cs	^{226}Ra	^{235}U	^{238}U
$T_{1/2}$	2,695j	3,823 j	14,28 j	5,271 ans	30,15 ans	1600 ans	$7 \cdot 10^8$ ans	$4,510^9$ ans
λ [s]	$2,98 \cdot 10^{-6}$	$2,098 \cdot 10^{-6}$	$0,562 \cdot 10^{-6}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$	$7,29 \cdot 10^{-10}$	$1,37 \cdot 10^{-11}$	$3,12 \cdot 10^{-17}$	$4,92 \cdot 10^{-18}$

3.3 Mélange de plusieurs radio-isotopes



Comme on l'a fait implicitement ci-dessus, on suppose que les différents radioéléments présents dans la source décroissent vers des éléments stables.

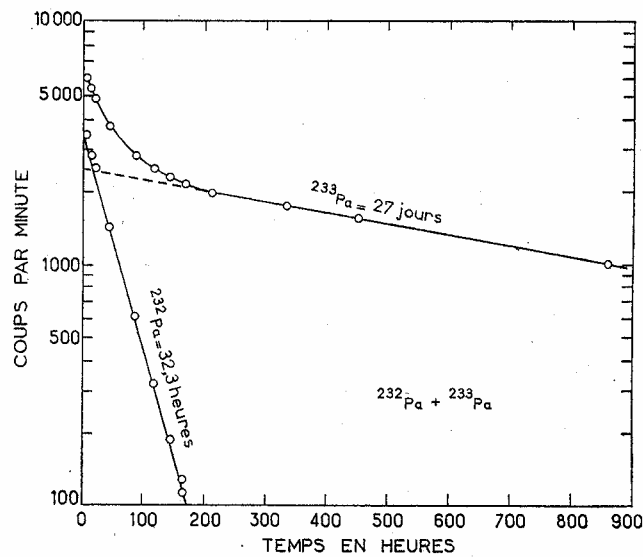
L'activité **A** d'un mélange de radio-isotopes est égale à la somme des activités des composants :

$$A = \sum_j A_j = \sum_j A_{0j} e^{-\lambda_j t} = \sum_j \lambda_j N_{0j} e^{-\lambda_j t} \tag{3.8}$$

Si l'on considère une source comportant deux radio-isotopes, on a :

$$A = \lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 N_{02} e^{-\lambda_2 t}$$

Si les demi-vies (ou λ_j) sont assez différentes tout en étant ni trop longues ni trop courtes et si les activités initiales (ou N_{0j}) sont comparables, le tracé de la variation de l'activité en fonction du temps $A = f(t)$ sur graphique semi-logarithmique permet de déterminer, de façon relativement précise, les deux constantes radioactives (cf. exemple ci-dessous et TP).

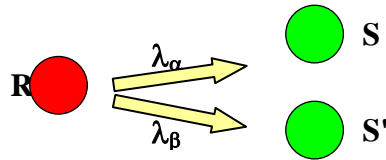


Pa = protactinium
 Z = 91

On a enregistré le comptage pour un mélange de ²³²Pa et de ²³³Pa

19 — Courbe tracée en coordonnées semi-logarithmiques représentant la décroissance de l'activité dans le temps pour le mélange ²³²Pa + ²³³Pa.

3.4 Instabilité multiple



De nombreux radio-isotopes se désintègrent en suivant plusieurs processus, par exemple, émissions β^- et β^+ et capture électronique (ex.: ^{40}K , ^{64}Cu), émissions α et β (ex.: ^{207}Po), émission α et fission (ex.: ^{252}Cf).

Considérons, par exemple, le deuxième cas; notons λ_α la probabilité d'émission d'une particule α par un noyau dans l'unité de temps, λ_β la probabilité que possède ce même noyau d'émettre une particule β pendant la même unité de temps et λ la probabilité de désintégration de ce noyau par unité de temps selon **l'une ou l'autre** de ces voies possibles. Pendant l'intervalle de temps dt , les nombres de noyaux qui se désintègrent par les voies α ou β sont respectivement

$$-(dn)_\alpha = \lambda_\alpha n dt \quad -(dn)_\beta = \lambda_\beta n dt \quad \text{avec } dn = dn_\alpha + dn_\beta$$

⇒ La probabilité de désintégration du noyau pendant dt est :

$$-\frac{dn}{n} = (\lambda_\alpha + \lambda_\beta) dt \quad \Leftrightarrow \quad n = n_0 e^{-\lambda t} \quad (3.9)$$

avec la constante radioactive $\lambda = \lambda_\alpha + \lambda_\beta$.

De façon générale, on définit la **constante de désintégration λ et des constantes de désintégration partielles** λ_k (probabilité de désintégration dans une voie particulière k) tel que :

$$\lambda = \sum_k \lambda_k \quad (3.10)$$

ainsi que les **rapports de branchement** λ_k/λ , généralement exprimés en %.

REMARQUE IMPORTANTE: si, à l'aide d'un détecteur approprié, on ne détecte par exemple que les particules α , on déduira du comptage enregistré en fonction du temps, non pas la constante partielle λ_α mais la constante radioactive λ . En effet :

$$-\frac{(dn)_\alpha}{dt} = \lambda_\alpha n = \lambda_\alpha n_0 e^{-\lambda t} \quad (3.11)$$

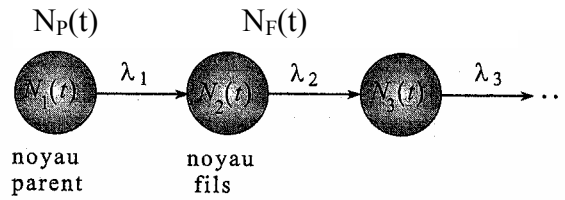
Il s'ensuit que, quel que soit le processus détecté, la décroissance d'activité (dans l'exemple $A_\alpha = \lambda_\alpha n$ et $A_\beta = \lambda_\beta n$) en fonction du temps est caractérisé par la demi-vie $T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$.

⇒ Il est **incorrect** de parler de **demi-vies partielles** qui ne recouvrent aucune réalité physique !

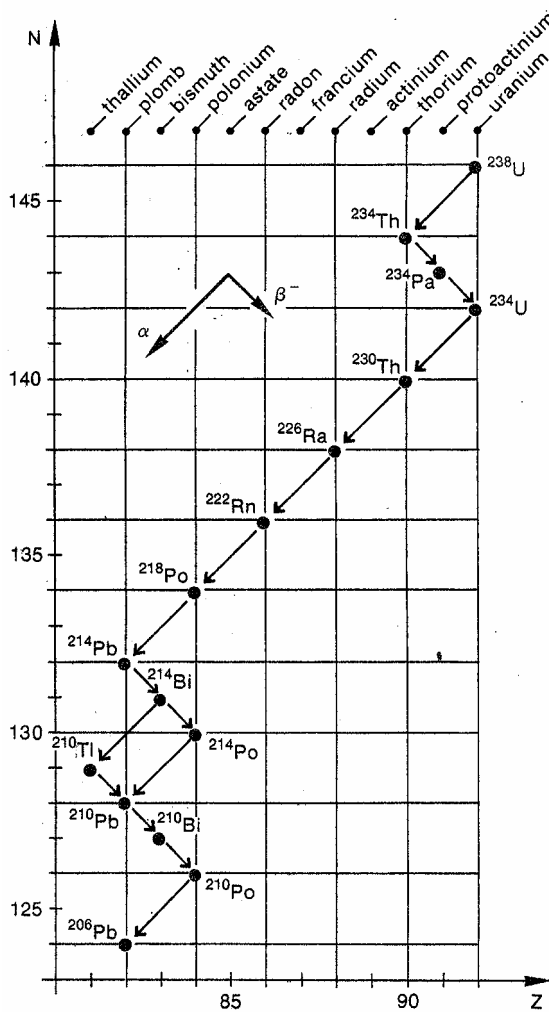
Un radioisotope à instabilité multiple est caractérisé par sa demi-vie $T_{1/2}$ (une seule demi-vie) et par les rapports de branchement des différentes voies de décroissance.

3.5 Les filiations radioactives

- Une filiation radioactive se définit comme une désintégration en série où un radioélément se désintègre pour former un autre radioélément. La détermination de la demi-vie d'un radioélément se complique !



Dans le cas de la radioactivité naturelle, une filiation radioactive peut compter jusqu'à 15 termes successifs. Exemple : la famille radioactive "uranium – radium" (une des 4 familles de noyaux lourds émetteurs α cf. §3.6).



Sur cette figure, on donne le symbole des radioéléments successifs jusqu'à l'élément stable (^{206}Pb) en bout de chaîne et on indique au moyen des flèches les **transitions α** (Z devient $Z - 2$) et les **transitions β^-** (Z devient $Z + 1$).

Le rapport des nombres de noyaux radium et uranium est de : $N_{\text{Ra}}/N_{\text{U}} = 0,36 \cdot 10^{-6}$. Ainsi des tonnes d'uranium doivent être traitées pour extraire un gramme de radium. Notons que cette opération a été naturellement réalisée, en 1898, par Pierre et Marie Curie qui ont ainsi rajouté deux nouveaux éléments au tableau périodique : le polonium et le radium.

Pour les applications, il faut connaître, en fonction du temps, les quantités des divers maillons de la chaîne de filiation.

- **Etudions le cas d'un seul maillon** : le "parent" P de constante radioactive λ_1 donnant le produit ("fils" ou "daughter") F de constante λ_2 ; F donne le noyau S stable : $P \xrightarrow{\lambda_1} F \xrightarrow{\lambda_2} S$

Exemple :



A l'instant initial, on a : N_{P0} atomes de parent pur, $N_{F0} = N_{S0} = 0$.

Entre t et $t+dt$: il disparaît $\lambda_1 N_P dt$ atomes de "produit-parent"; il apparaît $\lambda_1 N_P dt$ atomes de "produit-fils" tandis qu'il en disparaît $\lambda_2 N_F dt$; enfin, il apparaît $\lambda_2 N_F dt$ atomes de produit stable, ce que l'on résume :

$$dN_P = -\lambda_1 N_P dt \quad (3.12.a)$$

$$dN_F = (\lambda_1 N_P - \lambda_2 N_F) dt \quad (3.12.b)$$

$$dN_S = \lambda_2 N_F dt \quad (3.12.c)$$

L'intégration donne :

$$N_P = N_{P0} e^{-\lambda_1 t} \quad (3.13.a)$$

$$N_F = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{P0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.13.b)$$

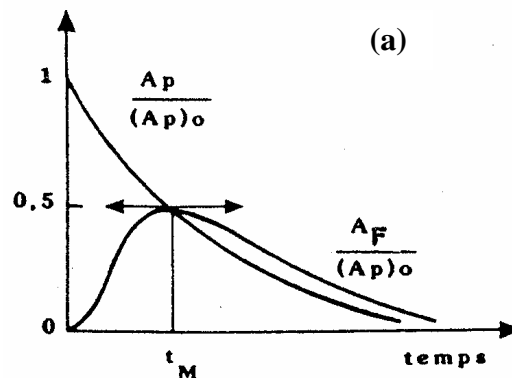
$$N_S = N_{P0} \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad (3.13.c)$$

Les activités radioactives correspondantes sont :

$$A_P = \lambda_1 N_P = A_{P0} e^{-\lambda_1 t} \quad (3.14.a)$$

$$A_F = \lambda_2 N_F = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{P0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.14.b)$$

Graphiquement :



On reconnaît pour $A_P(t)$ l'exponentielle décroissante caractéristique; l'intersection des 2 courbes ($A_P = A_F$) définit le temps t_m pour lequel A_F est maximale.

◆ Les valeurs relatives de λ_1 et λ_2 sont les paramètres de base. En pratique, la **demi-vie du parent est grande par rapport à celle du produit-fils** : $\lambda_2 > \lambda_1$. Dans ce cas, N_F (ou A_F) augmente et passe par un maximum **au temps t_m** pour lequel il y a égalité entre la production et la désintégration des noyaux du produit-fils; en effet:

mathématiquement $dN_F/dt = 0 \Rightarrow$ via (3.12.b) $\lambda_1 N_P = \lambda_2 N_F$ ou **$A_P = A_F$**

Calculons **le temps t_m** : $\lambda_1 N_P(t_m) = \lambda_2 N_F(t_m)$

$$\Rightarrow \lambda_1 N_{P0} e^{-\lambda_1 t_m} = \frac{\lambda_2 \lambda_1 N_{P0}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t_m} - e^{-\lambda_2 t_m})$$

$$\Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t_m} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t_m}$$

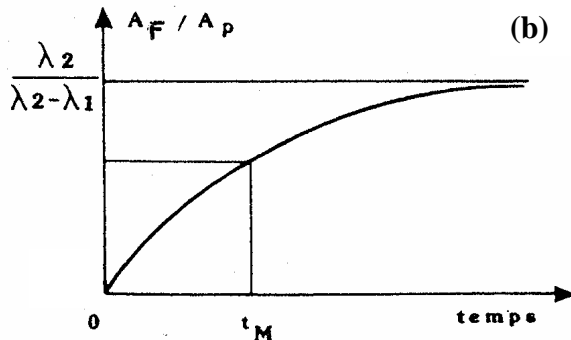
$$\Rightarrow \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_m} \rightarrow t_m = \frac{\ln(\lambda_2 / \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

♦ Le rapport **rapport** (A_F/A_P) est donné par
$$\frac{A_F}{A_P} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}\right) \quad (3.15.a)$$

Pour des **temps longs** par rapport à $1/(\lambda_2 - \lambda_1)$, ce rapport reste sensiblement **constant** et égal à :

$$\frac{A_F}{A_P} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.15.b)$$

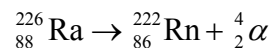
On atteint un **équilibre de régime**.



Evolution temporelle du rapport A_F/A_P qui tend vers la valeur asymptotique donnée par (3.15.b) : l'équilibre de régime.

♦ Et pour des **temps longs** et dans le cas de $(T_{1/2})_1 \gg (T_{1/2})_2$ ou $\lambda_1 \ll \lambda_2$: $A_F = A_P$.
C'est un équilibre idéal, appelé **équilibre séculaire**, pour des $(T_{1/2})_1$ de l'ordre du siècle (ou plus).

⇒ **Dans les filiations, si les périodes des pères sont beaucoup plus grandes que celles des fils, avec le temps, il s'établit un équilibre tel que tous les descendants possèdent la même activité.**
Ainsi, par exemple, l'équilibre entre le radium et le radon s'établit en quelques semaines (le calcul de t_m donne 46 jours):



avec $(T_{1/2})_1 = 1600$ ans et $(T_{1/2})_2 = 3,825$ jours.

3.6 La radioactivité naturelle

3.6.1 Radioactivité de l'écorce terrestre

Lors de la formation de la terre, il y a quelques **4,6 milliards d'années** ($4,6 \cdot 10^9$ ans), sont apparus les isotopes des divers éléments. Ceux qui étaient radioactifs de période relativement faible ont disparu. Ne participent à la radioactivité actuelle que ceux dont les demi-vies ne sont pas négligeables devant l'âge de la terre. La presque totalité de la radioactivité provient de **3 chaînes de filiation** (aussi appelées familles) dont le parent possède une demi-vie de l'ordre du **milliard d'années** (cf. tableau 3.2). Après une filiation comprenant une quinzaine de termes, ces 3 familles aboutissent à un **isotope stable du plomb** ($Z = 82$ est un nombre magique). Dans chaque famille, il y a un isotope de **l'élément 86** (appelé aussi "émanation") qui est un gaz rare; ces gaz sortent du sol et sont des indicateurs en physique de l'atmosphère pour le mouvement de l'air à grande échelle (Rn) ou dans la couche limite proche du sol (Tn).

Tableau 3.2 Les 3 familles radioactives naturelles et la famille (4n+1) artificielle qui a pu exister après la formation de la terre.

Nom de la famille	Nombre de masse type	Premier terme & $T_{1/2}$	Maillon gazeux	Dernier terme
Thorium	$A = 4n$	^{232}Th $1,405 \cdot 10^{10}$ ans	Thoron (Tn)	^{208}Pb
Neptunium	$A = 4n + 1$	^{237}Np $2,14 \cdot 10^6$ ans	<i>Aucun</i>	^{209}Bi
Uranium-Radium	$A = 4n + 2$	^{238}U $4,468 \cdot 10^9$ ans	Radon (Rn)	^{206}Pb
Uranium-actinium	$A = 4n + 3$	^{235}U $7,037 \cdot 10^8$ ans	Actinon (An)	^{207}Pb

Il n'y a pas de famille (4n + 1) à l'état naturel (famille dont $T_{1/2}$ est le plus court).

⇒ on peut supposer que ^{237}Np a été créé lors de la formation de la terre, mais que la famille a totalement disparu. Il est à noter que du ^{237}Np est fabriqué dans les réacteurs.

N.B. le ^{226}Ra contenu dans le granit rend les maisons construites avec ce matériau radioactive et alimente notre air avec le gaz inerte ^{222}Rn particulièrement nocif (car inhalé → fixé dans les poumons) !

En ce qui concerne la radioactivité de l'écorce terrestre s'ajoutent aux 3 familles pré - citées **quelques radionucléides** de demi-vies longues, sans filiation (cf. tableau 3.3). Le plus abondant est le ⁴⁰K; la mesure du rapport isotopique ⁴⁰K/⁴⁰Ar permet de dater les minéraux (cf. §3.6.3).

Tableau 3.3 : Radionucléides de l'écorce terrestre ne donnant pas de filiations radioactives

Radionucléide	Abondance isotopique (%)	Période (ans)	Rayonnement produit	Noyau Stable produit
⁴⁰ K	0,0117	1,26.10 ⁹	β ⁻ , CE β ⁺	⁴⁰ Ca, ⁴⁰ Ar
⁸⁷ Rb	27,83	4,8.10 ¹⁰	β ⁻	⁸⁷ Sr
¹¹³ Cd	12,2	9.10 ¹⁵	β ⁻	¹¹³ In
¹¹⁵ In	95,7	5,1.10 ¹⁴	β ⁻	¹¹⁵ Sn
¹³⁸ La	0,089	1,1.10 ¹¹	CE, β ⁻	¹³⁸ Ba, ¹³⁸ Ce
¹⁴⁴ Nd	23,8	2,1.10 ¹⁵	α	¹⁴⁰ Ce
¹⁴⁷ Sm	15,1	1,06.10 ¹¹	α	¹⁴³ Nd
¹⁴⁸ Sm	11,3	8,10 ¹⁵	α	¹⁴⁴ Nd
¹⁵² Gd	0,20	1,1.10 ¹⁴	α	¹⁴⁸ Sm
¹⁷⁶ Lu	2,61	3,6.10 ¹⁰	β ⁻	¹⁷⁶ Hf
¹⁷⁴ Hf	0,16	2,0.10 ¹⁵	α	¹⁷⁰ Yb
¹⁸⁷ Re	62,60	4.10 ¹⁰	β ⁻	¹⁸⁷ Os
¹⁹⁰ Pt	0,013	6.10 ¹¹	α	¹⁸⁶ Os

3.6.2 Rayonnement cosmique et radioactivité atmosphérique

Les particules très énergétiques provenant de notre galaxie ou même d'autres galaxies (**rayonnement cosmique primaire**), interagissent avec les atomes présents dans la haute atmosphère et donnent naissance à de nombreux éléments radioactifs (cf. tableau 3.4) comme le ¹⁴C qui se retrouvent dans notre environnement et même dans notre corps, ce qui implique que chaque être vivant est lui-même le siège d'une certaine radioactivité.

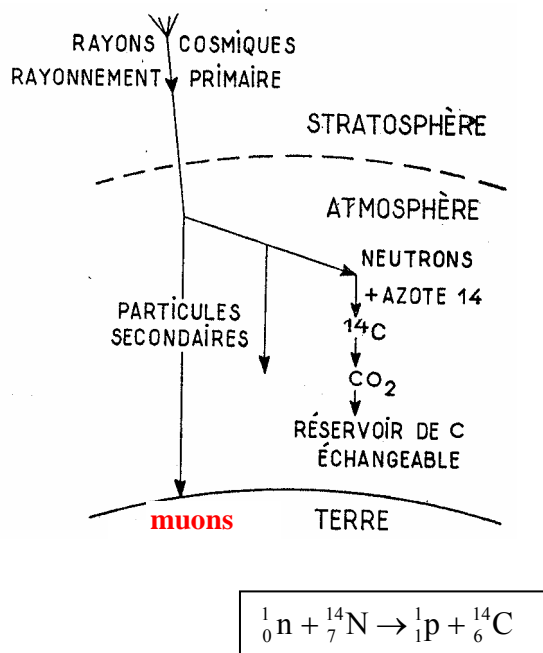


Tableau 3.4 Principaux radionucléides produits dans l'atmosphère par le rayonnement cosmique

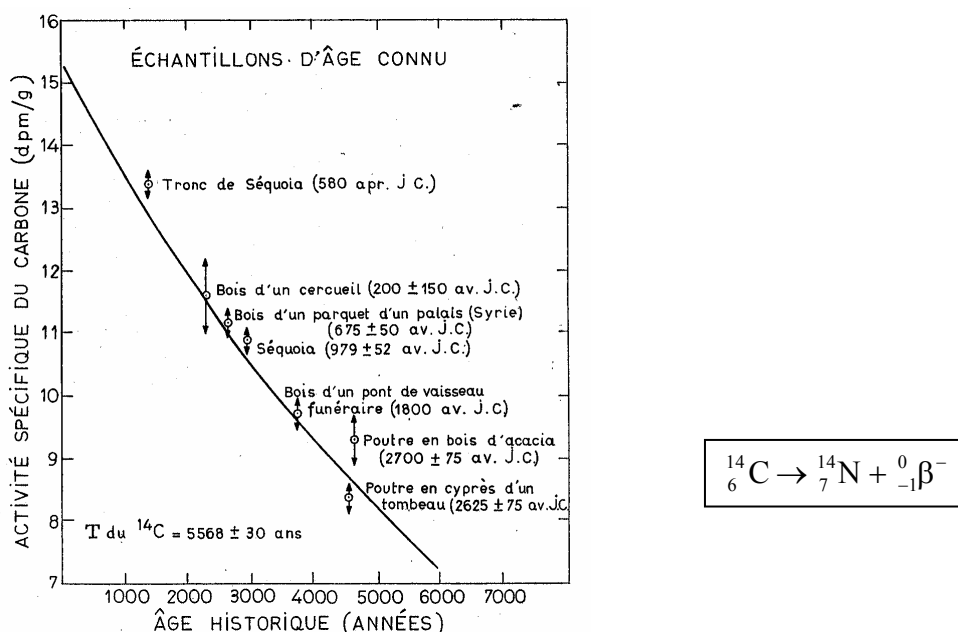
Radio-nucléides	Période	Rayonnement produit
³ ₁ H	12,34 ans	β ⁻ pur
⁷ ₄ Be	53,20 ans	CE
¹⁰ ₄ Be	1,6.10 ⁶ ans	β ⁻ pur
¹⁴ ₆ C	5730 ans	β ⁻ pur
²² ₁₁ Na	2,602 ans	β ⁺ , CE
²⁶ ₁₃ Al	7,16.10 ⁵ ans	β ⁺ , CE
³² ₁₄ Si	1,3.10 ⁶ ans	β ⁻ pur
³² ₁₅ P	25,56 jours	β ⁻
³⁵ ₁₆ S	87,44 jours	β ⁻ pur
³⁶ ₁₇ Cl	3,01.10 ⁵ ans	β ⁻ , CE
³⁹ ₁₇ Cl	1 heure	β ⁻
⁴¹ ₂₀ Ca	10 ⁵ ans	CE
⁸¹ ₃₆ Kr	2,1.10 ⁵ ans	CE

3.6.3 radioactivité : horloge du monde

La nature a mis à notre disposition des éléments actifs de périodes variées, depuis la seconde et moins, jusqu'au milliard d'années et plus. On peut mettre cela à profit pour dater des échantillons. L'utilisation de la radioactivité comme moyen de datation fut suggérée dès 1912 par Ernest Rutherford. Elle repose sur un principe simple : supposons un objet composé, au moment de sa création, à 100% d'un **isotope radioactif X**. Si on connaît la période conduisant au **nucléide stable Y**, il suffit de mesurer le **rapport** des quantités **X/Y** pour accéder à la durée séparant la création et la mesure c-à-d l'âge de l'objet. Il faut bien choisir l'élément X dont la demi-vie doit être du même ordre de grandeur que l'intervalle de temps que l'on mesure (âge supposé).

L'utilisation de la radioactivité a ainsi permis aux **géologues** de dater l'âge de la terre, en mesurant les plus vieilles roches terrestres. En plus des méthodes fondées sur les familles naturelles U/Pb, Th/Pb, on utilise fréquemment les "horloges" fondées sur les rapports $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ et $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$.

La **datation au ^{14}C** est un exemple fréquemment utilisé en **archéologie** (datation de la mort d'un être vivant)⁽²⁾. Cet élément, formé dans la haute atmosphère par les rayons cosmiques, s'échange avec le carbone stable du dioxyde de carbone. Les molécules CO_2 sont absorbées par les plantes, puis par les animaux qui s'en nourrissent; les règnes animal et végétal³ contiennent donc une faible quantité de ^{14}C . Tant qu'un organisme est vivant, il fixe cet isotope aussi bien que l'isotope 12 du carbone et le **rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$** reste constant pendant la vie, dû aux échanges de l'organisme avec l'extérieur. A la mort de celui-ci, les échanges cessent et le nombre moyen de noyaux de ^{14}C suit la **loi de décroissance radioactive**, avec une demi-vie de **5730 ans** (^{14}C conduit à ^{14}N par radioactivité β^-). La mesure du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ donne une idée de l'âge.



En fait, la création de ^{14}C varie au cours du temps, et des corrections s'imposent par rapport à une application simpliste de la loi de la décroissance (il faut procéder à des étalonnages délicats et à certaines opérations de concentration). La mesure du rayonnement β^- permet alors de dater l'échantillon et de remonter jusqu'à 30 000 ans environ ($5 \times T$), la période de ^{14}C étant de ≈ 6000 ans.

2 W.F. Libby (Los Angeles, Cal.), lauréat du Prix Nobel de Chimie pour la mesure par le carbone 14 en archéologie, en géologie, en géophysique, etc.

3 $^{14}\text{CO}_2$ pénètre aussi dans les océans, sous la forme de carbonates dissous.

3.7 Découverte de la radioactivité artificielle

Cette découverte, faite en janvier 1934 par *Frédéric et Irène Joliot-Curie*, résulte du bombardement d'une feuille d'aluminium par les particules alpha d'une source de ^{210}Po (5,3 MeV). L'aluminium produisait des positrons, dont l'intensité diminuait exponentiellement de moitié en 3 minutes et 15 secondes : le faisceau de particules α avait activé la cible. Ils proposèrent d'attribuer l'émission différée de positons à un radionucléide formé par capture des particules α et émission d'un neutron, selon :



Peu de temps après, ils confirmèrent qu'ils s'agissait bien d'un **radio-phosphore** : en dissolvant l'aluminium irradié dans de l'acide chlorhydrique, et en entraînant le produit volatil formé dans un courant gazeux de PH_3 , ils séparèrent ce radio-phosphore de l'aluminium.

3.8 Les éléments transuraniens (au-delà de $Z_U = 92$)

A l'état naturel, il existe de très faibles quantités de neptunium ($Z = 93$) et de plutonium ($Z = 94$). ^{239}Pu est décelable (très petite quantité) dans les minerais d'uranium les plus riches : dans la pechblende du Colorado (50% d'uranium), la teneur est $^{239}\text{Pu}/\text{U} = 7,7 \times 10^{-12}$; ce plutonium est en fait produit par l'interaction avec l'uranium des neutrons secondaires du rayonnement cosmique. Le tableau 3.5 présente la liste des **premiers isotopes fabriqués des éléments transuraniens**. Voici les raisons qui ont conduit aux noms donnés aux transuraniens. L'uranium doit son nom au fait qu'il a été découvert peu après la planète *Uranus*. Les éléments 93 et 94 ont pris le nom des deux *dernières planètes du système solaire*. A partir de l'actinium commence une série d'éléments, parallèle à celle des lanthanides (ou terres rares) débutant au lanthane : on a appelé **américium** (Am) l'élément 95, parce qu'il est, dans cette série, l'homologue de l'**europium** (Eu) ; le gadolinium vient du nom du chimiste Gadolin qui s'est illustré dans l'étude des terres rares, et le 96 a été appelé curium (Cm), les Curie ayant découvert l'actinium.

Au delà, le choix a été plus arbitraire. Le berkelium (Bk), 97, a été isolé par l'équipe de Seaborg, à Berkeley, ce laboratoire appartenant à l'université de Californie, d'où le nom de californium donné au suivant. Le 99 (Es) et le 100 (Fm) ont reçu les noms de deux illustres physiciens; le 101 (Md) marque que la classification périodique a dépassé la borne 100. Le 102 (No) a été soupçonné (plutôt que découvert) par les chercheurs de l'Institut Nobel de Stockholm; le 103 (Lr) par Lawrence de l'Université de Californie. Le 104 a été appelé kurchatovium (Kh) par les soviétiques, rutherfordium (Rf) par les américains. Enfin, le 105 (Ha) rappelle la découverte de la fission par Otto Hahn.

Tableau 3.5 Les éléments transuraniens

Z	Elément	Symbole	découverte	1° isotope isolé	$T_{1/2}$ 1° isotope
93	Neptunium	Np	1940	^{239}Np	2,35 jours
94	Plutonium	Pu	1941	^{238}Pu	86,4 ans
95	Américium	Am	1945	^{241}Am	458 ans
96	Curium	Cm	1944	^{242}Cm	162,5 jours
97	Berkélium	Bk	1949	^{243}Bk	4,5 heures
98	Californium	Cf	1950	^{245}Cf	44 minutes
99	Einsteinium	Es	1952	^{253}Es	20 jours
100	Fermium	Fm	1953	^{255}Fm	22 heures
101	Mendelevium	Md	1955	^{256}Md	1,5 heures
102	Nobelium	No	1958	^{254}No	3 secondes
103	Lawrentium	Lr	1961	^{257}Lr	8 secondes
104	Kurchatovium Rutherfordium	Kh Rf	1964	^{257}Kh	4,6 secondes
105	Hahnium/Dubnium	Ha / Db	1970	^{260}Ha	1,6 secondes
106	Seaborgium	Sg	1974	^{259}Sg	Quelques ms
107	Bohrium	Bh	1981	^{262}Bh	4 millisecc.
108	Hassium	Hs	1984	^{265}Hs	2,4 millisecc.
109	Meitnerium	Mt	1982	^{266}Mt	5 millisecc.
110	Ununnilium	Uun	1994	$^{269}\text{110}$	$\text{Qq } 10^{-4} \text{ s}$
111	Ununnumium	Uuu	1994		

112	Ununbium	Uub	1996		
114		Uuq			
116		Uuh	1999		
118		Uuo	1999		

3.9 Quelques unités employées en dosimétrie

1/ énergie des radiations

Souvent, les rayonnements provenant de la radioactivité (α , β , γ , n ...) peuvent atteindre les tissus vivants de l'extérieur (exposition accidentelle ou volontaire) : on parle de **rayonnements ionisants** car ils créent dans les cellules traversées des ions⁺ et des ions⁻ (radicaux libres très nocifs) en y perdant une partie de leur énergie. Les énergies des radiations ionisantes ainsi que les énergies perdues par ces radiations dans la matière s'expriment en **keV**, **MeV**, ce qui semble petit convertis en Joule : $1,6 \cdot 10^{-13}$ J, $1,6 \cdot 10^{-16}$ J. Mais il faut les comparer à l'énergie qui lie une cellule vivante : **$10^{-16} - 10^{-17}$ J** quand la radiation est reçue lors de la **division de la cellule**. Les doses de radiations qui peuvent causer des effets sérieux sur la matière vivante sont généralement si faibles en terme d'énergie qu'elles ne peuvent être détectées par les sens physiques. On comprend dès lors l'utilité des détecteurs & moniteurs de radiations pour mesurer les ionisations.

2/ doses de radiations

◆ L'unité originale de dose est le **Roentgen**; il s'agit plus exactement d'une unité d'**exposition** aux radiations: elle se définit comme la quantité de radiations qui produit une **charge** de 100 esu⁴ ($3,33 \cdot 10^{-6}$ C) dans 1 cm³ d'air sec @760 mm Hg et 15°C.

◆ Afin de mieux tenir compte des effets dans la matière, il est plus juste d'exprimer une dose en terme d'énergie absorbée car l'énergie est directement liée aux dommages causés aux tissus. Une exposition de 1 Roentgen dépose 93 ergs / g d'air ($9,3 \cdot 10^{-3}$ J/ kg d'air). L'unité de dose absorbée connue sous le nom de **rad (Roentgen Absorbed Dose)** a été définie pour être proche de la valeur précitée :

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs absorbés par gramme d'absorbant}$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}$$

Une dose absorbée ou simplement dose se définit comme suit :

$$D = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dV}$$

avec ρ = masse volumique, dE = quantité d'énergie absorbée, dV = unité de volume.

⇒ Dans le système d'unités international, le rad est remplacé par le **Gray (Gy)** :

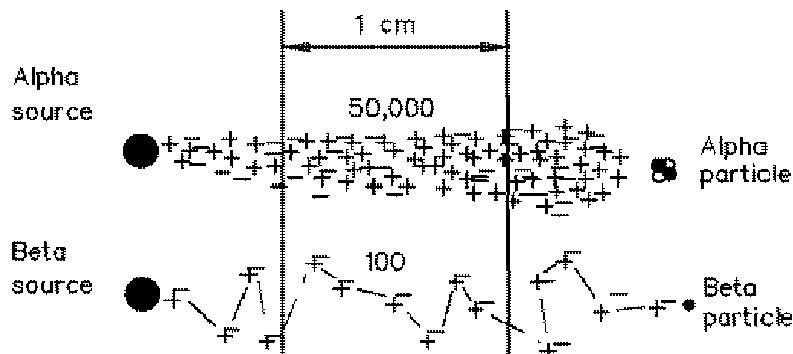
$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

⁴esu = electrostatic charge unit

3/ Les effets biologiques

♦ Différentes sources de radiations (α , β , γ , X, protons, neutrons ...) ne produiront pas les mêmes effets biologiques pour une même énergie absorbée car leur densité d'ionisation est différente : les particules X, β , γ produisent la densité d'ionisation la plus faible (≈ 10 ionisations sur une longueur comparable à la dimension d'une cellule) alors que les particules lourdes (α , protons) ont une densité d'ionisation beaucoup plus élevée (>100 ionisations sur une longueur comparable à la dimension d'une cellule). La probabilité de dommage⁵ à une cellule dépend donc de la nature de la radiation ionisante.



⇒ On a défini un "RBE" (Relative Biological Efficiency), aussi appelé facteur de qualité (QF = Quality Factor). La dose D_γ obtenue à une exposition aux rayons γ sert de référence. La dose D multipliée par le facteur RBE est appelée dose équivalente (ou dose biologique) H et est mesurée dans une unité différente (bien que le facteur RBE soit sans dimension). L'unité de dose équivalente est le Sievert (Sv) : **$H [\text{Sv}] = \text{RBE } D [\text{Gy}]$**

NB Une ancienne unité est le rem pour "Roentgen Equivalent Man": $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

Tableau 3.6 Facteur tenant de l'effet biologique des radiations	
Radiation ionisante	Facteur RBE
X, γ , β	1
Neutrons thermiques	3
Neutrons rapides	10
Protons	10
Particules α	20
Noyaux lourds de recul	20

4/ Radioactivité ambiante

Pour mieux percevoir ce que ces unités signifient, considérons la quantité de radiations de notre environnement. La radioactivité du corps humain vaut $\approx 7500 \text{ Bq}$; elle est principalement due aux radioisotopes ^{14}C et ^{40}K . La radioactivité due aux rayons cosmiques au niveau de la mer est de $\approx 0,3 \text{ mSv/an}$, celles des radiations terrestres : $\approx 0,5 \text{ mSv/an}$. On peut également inhaler ou ingérer des radioisotopes ($\approx 1,1 \text{ mSv/an}$ et $\approx 0,3 \text{ mSv/an}$ dans chaque cas respectivement). Enfin, il ne faut pas oublier les radiations dues au diagnostic aux rayons X ou au traitement par médecine nucléaire : $\approx 0,8 \text{ mSv/an}$. Ce qui fait un total de $\approx 3 \text{ mSv/an}$.

N.B. Les activités humaines produisent de nombreux éléments radioactifs de tous types et de toutes demi-vies : déchets des centrales nucléaires, résidus des explosions de bombes, radio-isotopes produits dans les laboratoires de recherche et pour les hôpitaux.

⁵ Les dégâts occasionnés sont fonction de nombreux facteurs : dose absorbée, localisation, durée de l'exposition, type de cellules, type de rayonnement. En particulier, les cellules indifférenciées (cellules du sang) ou en division rapide (cellules germinales ou tumorales) sont très sensibles aux rayons. On utilise cette caractéristique en radiothérapie, pour détruire les cellules cancéreuses.