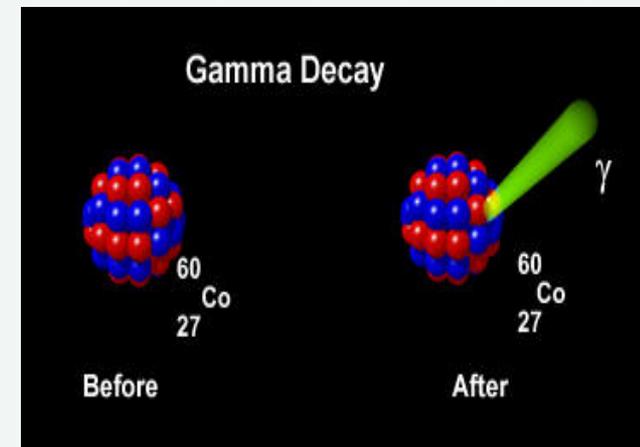
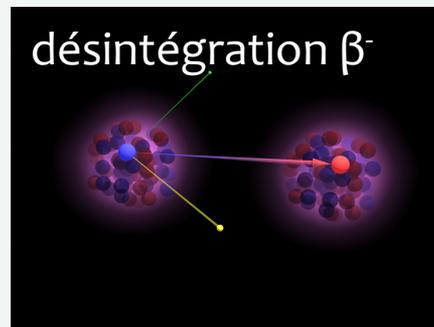
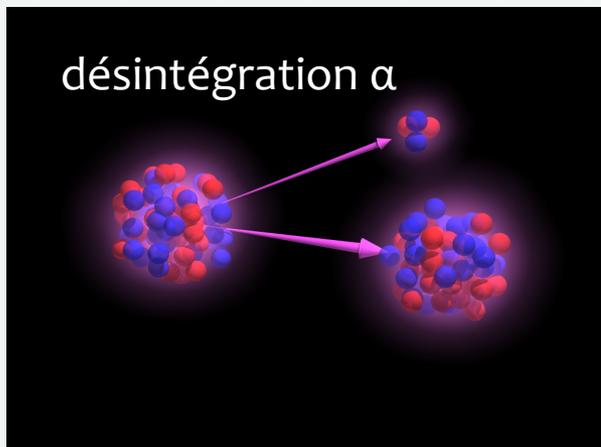


Chapitre 3

La radioactivité sous ses différentes formes



Plan

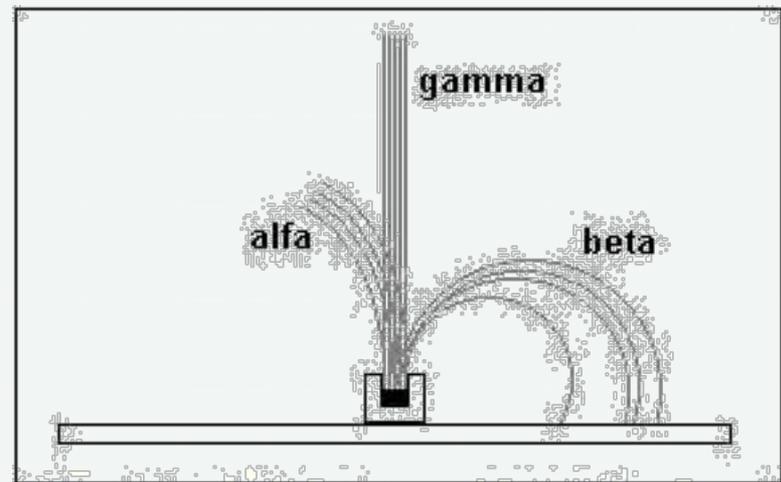
- 🌐 Qu'est-ce que la radioactivité ?
- 🌐 Quels mécanismes ?
- 🌐 Lois de la radioactivité
- 🌐 Radioactivité naturelle
- 🌐 Notions de Radioprotection

Qu'est-ce que la radioactivité ?

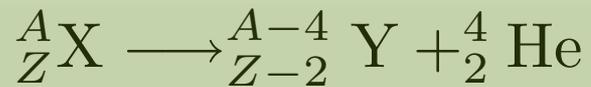
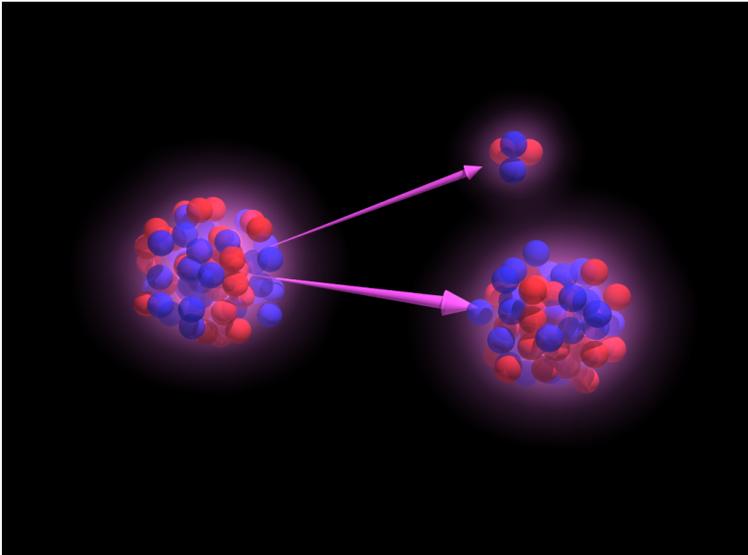
Définition : La radioactivité est un processus de transformation aléatoire d'un noyau atomique via l'émission d'une radiation sous la forme d'une particule ou d'une onde électromagnétique.

Pourquoi ? L'état final est moins énergétique que l'état initial (Chaleur de réaction >0)

Les mode de désintégration les plus courants sont :
 α , β^\pm , γ (et fission)



1- Désintégration α



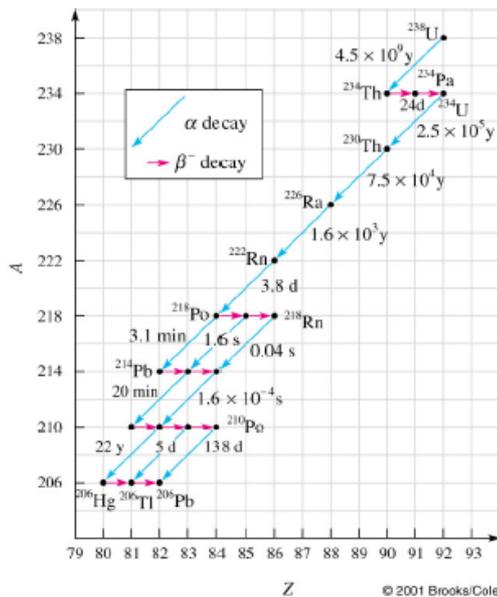
$$Q_{\alpha} = M(X) - M(Y) - M(^4\text{He})$$

- La désintégration α est due à l'émission d'un noyau ^4He
- ^4He est un noyau doublement magique fortement lié
 $B_{\alpha} \approx 28 \text{ MeV}$
- La désintégration alpha α est énergétiquement favorable pour presque tous les noyaux ayant $A \geq 190$ et pour de nombreux ayant $A \geq 150$.

Faits expérimentaux

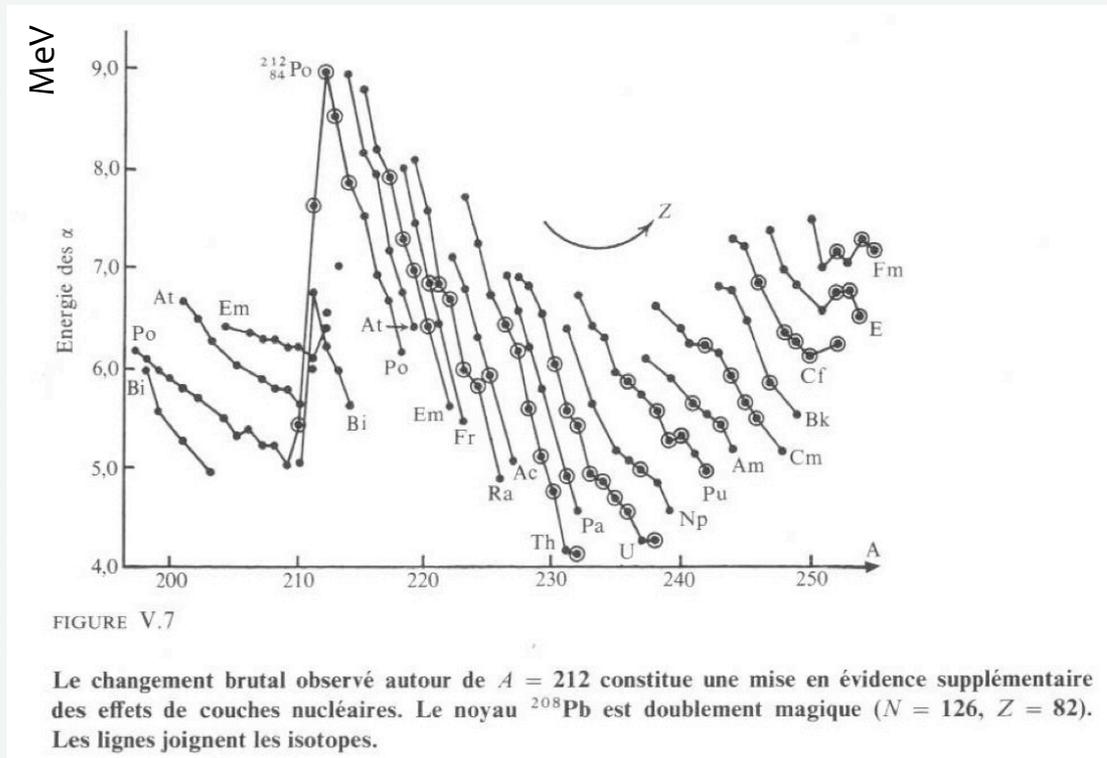
🌐 Quelques chaleurs de réaction pour ^{232}U

	n	p	d	t	^3He	α	^5He	^6Li	^7Li
Q (MeV)	-7.26	-6.12	-10.70	-10.24	-9.92	+5.41	-2.59	-3.79	-1.94



Radioactivité naturelle

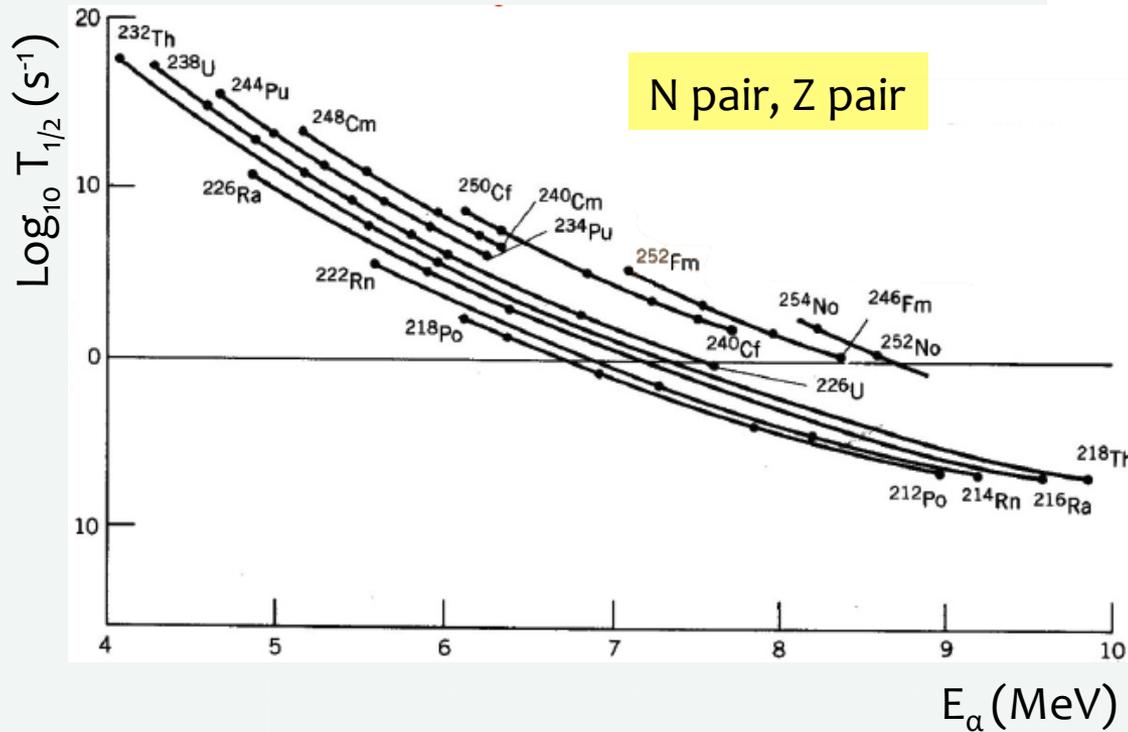
Energie libérée dans les désintégration α pour des noyaux $A > 200$



Tendance générale :

- Dans une série isotopique, E_α décroît avec A
- pour A donné, E_α croît avec Z
- E_α varie entre 5 and 10 MeV

Evolution de $T_{1/2}$ en fonction de E_α



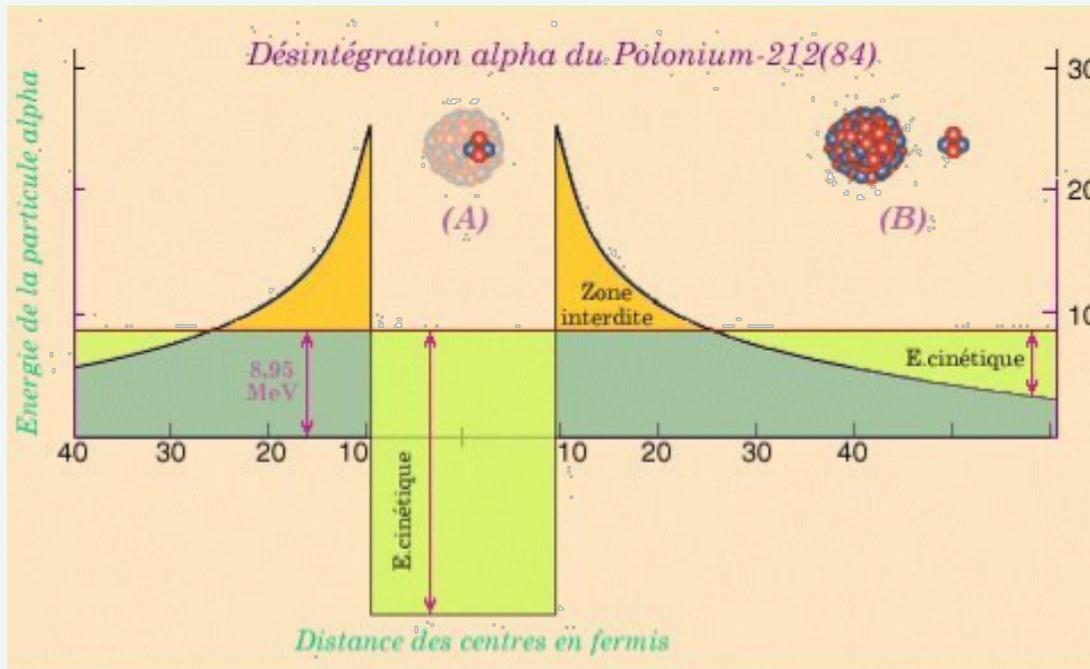
- Geiger et Nuttal 1911
- Tres forte dépendance du temps de vie en fonction de E_α
- Pour une chaîne isotopique donnée, $T_{1/2}$ chute avec A .

	E_α	$T_{1/2}$
^{232}Th	4.08 MeV	$1.4 \cdot 10^{10}$ years
^{218}Th	9.85 MeV	$1.0 \cdot 10^{-7}$ s

\Rightarrow facteur 2.5 en E_α conduit à un facteur 10^{24} dans $T_{1/2}$

Modèle de Gamov

Basé sur le franchissement de la barrière Coulombienne par effet tunnel.



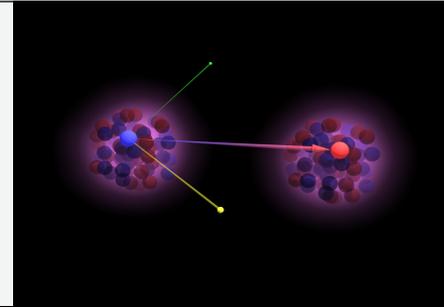
- En mécanique classique, la particule α ne peut pas entrer ou sortir du noyau
- En mécanique quantique, la particule α peut pénétrer la barrière coulombienne.

Désintégrations β

- **Désintégration β^-** : ${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$

au niveau des nucléons : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

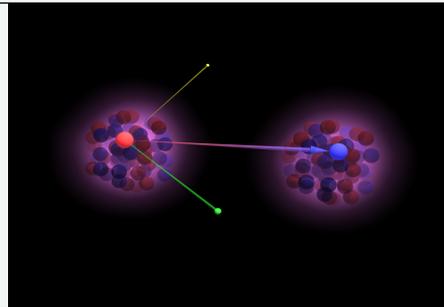
energy condition : $m(X) > m(Y) + m_e + m_\nu$



- **Désintégration β^+** : ${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$

au niveau des nucléons : $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

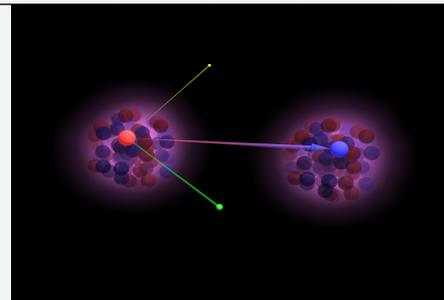
condition énergétique : $m(X) > m(Y) + m_e + m_\nu$



- **Capture électronique**: $e^- + {}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$

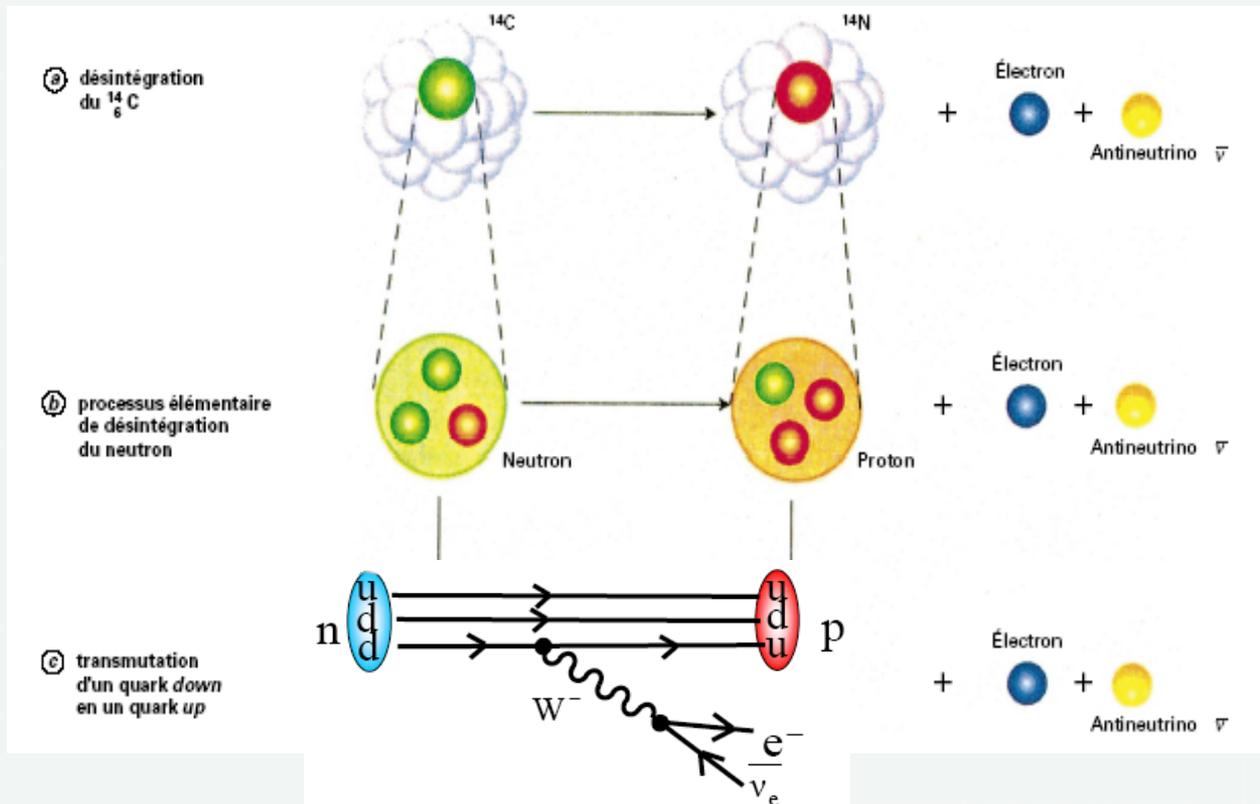
au niveau des nucléons : $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

condition énergétique : $m(X) > m(Y) - m_e + m_\nu + B_k$

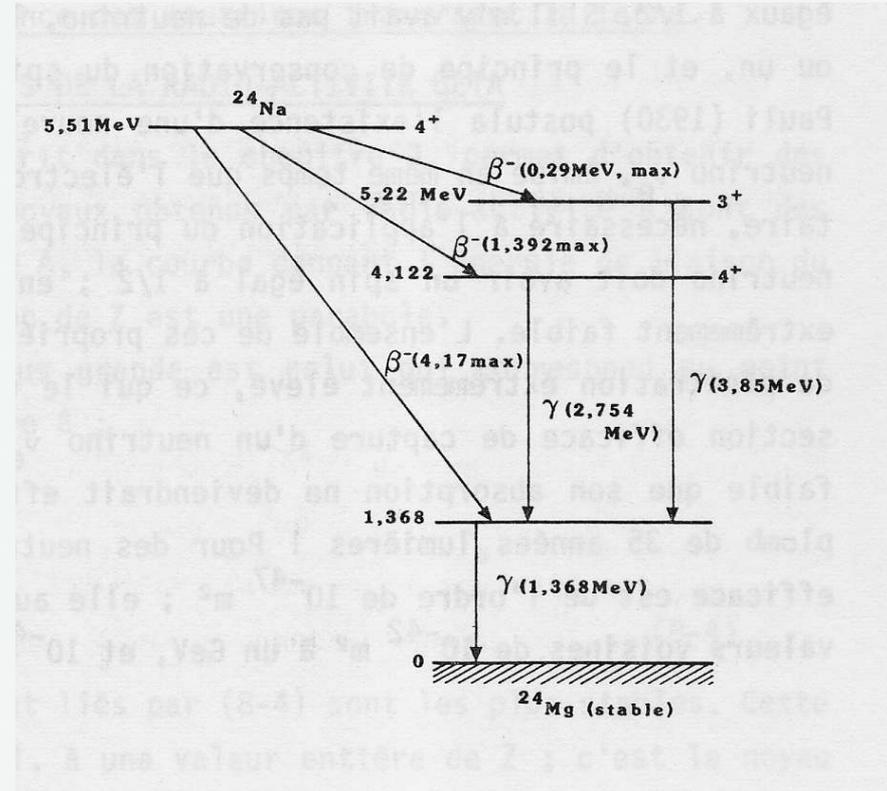
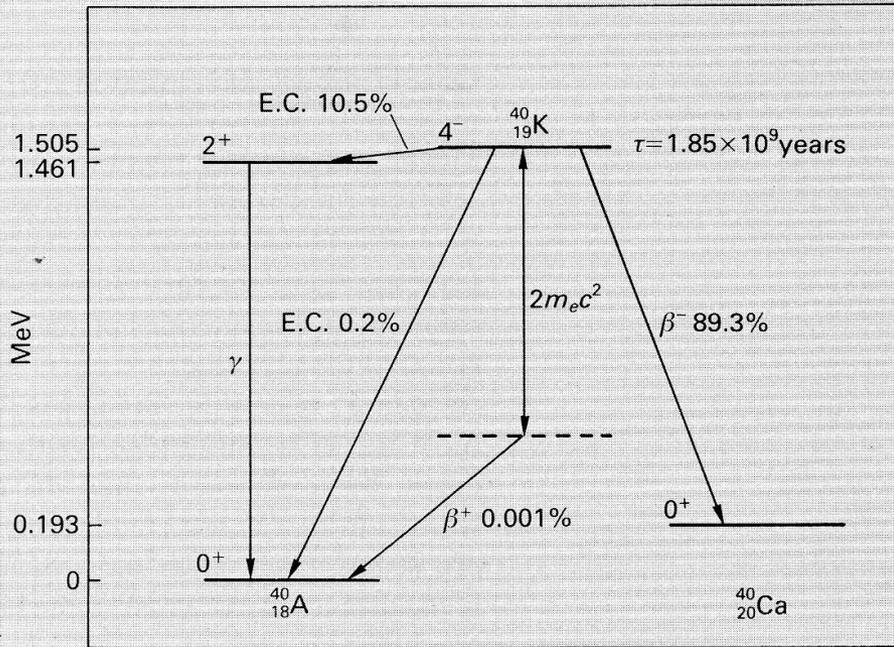


Désintégration beta

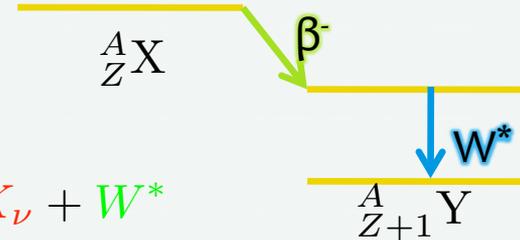
- La désintégration β se produit via l'interaction faible, et résulte de l'échange d'un boson W^\pm ($m_W=80 \text{ GeV}/c^2$)



Exemple de désintégrations β



Conservation de l'énergie dans la désintégration β^-

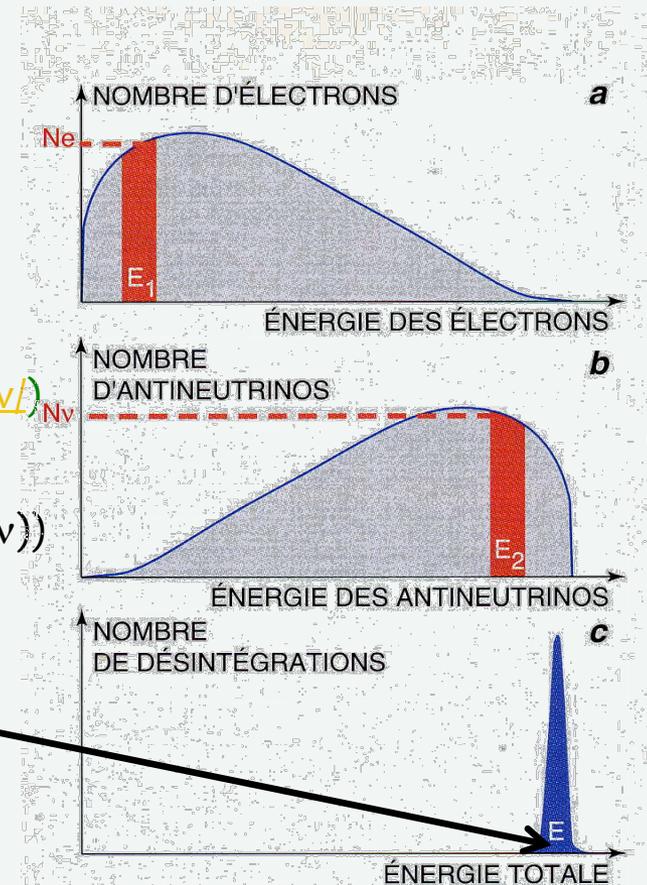


$$m(X) = m(Y) + m_e + m_\nu + K_Y + K_e + K_\nu + W^*$$

Conservation de l'énergie :

- Masse du neutrino : $m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}/c^2$
(source Particle Data Group, 2008, <http://pdg.lbl.gov/>)
- Pour simplifier, on suppose $W^* = 0$
- Le recul nucléaire est négligeable ($m(Y) \gg m(e), m(\nu)$)
- On définit :

$$K_\beta^{\text{max}} = K_e + K_\nu = m(X) - m(Y) - m_e$$

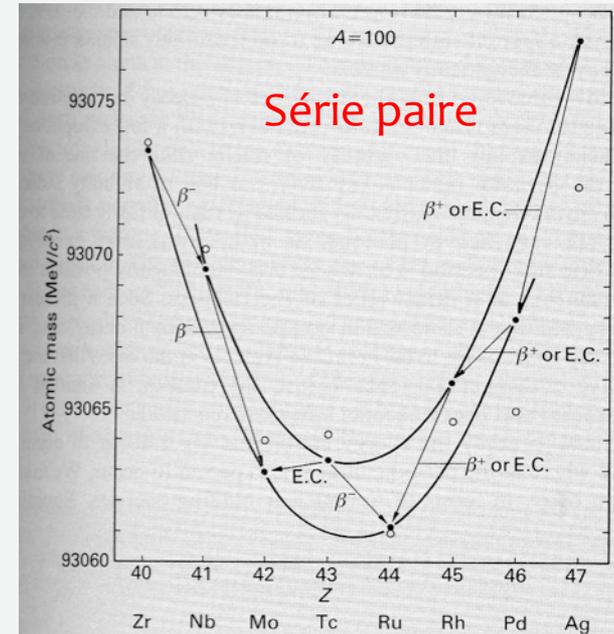
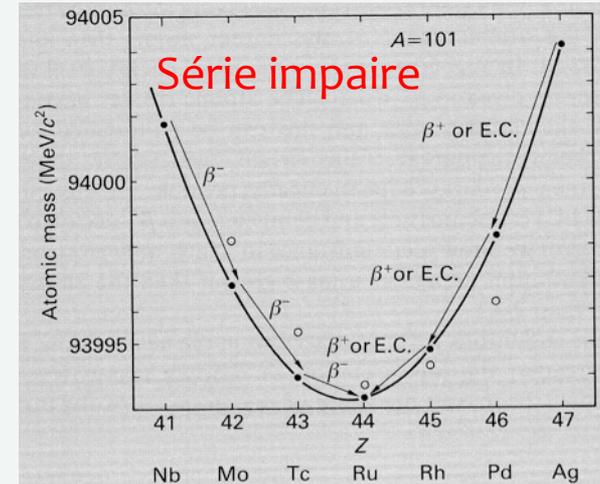
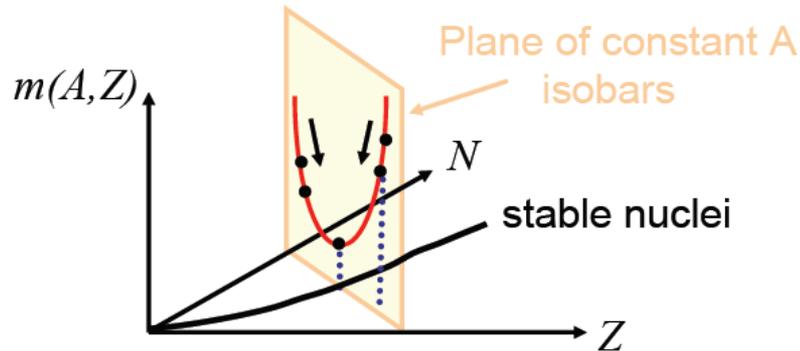


Stabilité β

$$M(A, Z) = ZM(^1H) + (A - Z)m_n - u_v A + u_s A^{2/3} + u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + u_T \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \delta(A)$$

Désintégration β :

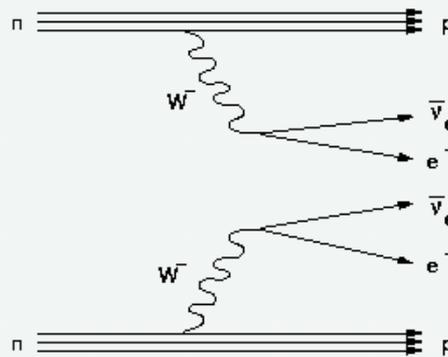
- Isobarique (A constant)
- Z change de ± 1
- M(A,Z) is quadratique en Z (min pour Z_0)
 → **parabole de masse**



Double désintégration β

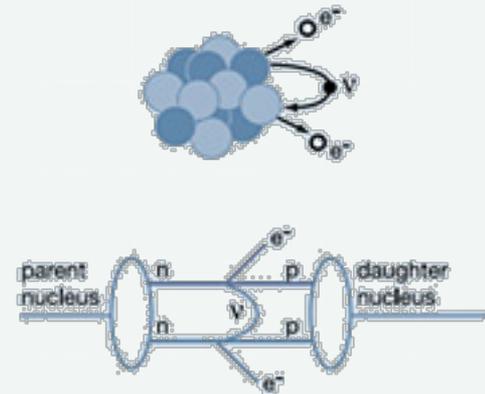
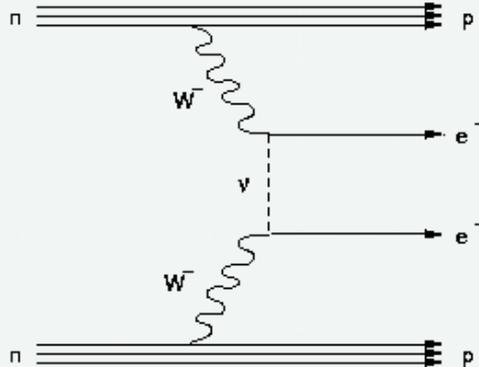
➤ double désintégration β avec deux neutrinos

- Dans la double désintégration β^- , deux neutrons du noyau sont convertis en deux protons, et deux électrons et deux anti-neutrinos électroniques sont émis
 $^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr} + 2e^- + 2\nu_e$ $T_{1/2}=10^{20}$ yr (observé en 1986)
- la double désintégration β est la plus rare des formes de radioactivité; Elle n'a été observée que pour 10 isotopes, et tous ont des temps de vie supérieur à 10^{19} yr.
- La double désintégration β^+ et la double conversion électronique est théoriquement possible, mais n'ont jamais été observés.



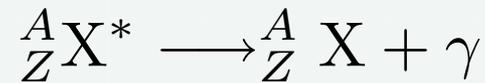
➤ Double désintégration β sans neutrinos

- Possible si l'**anti-neutrino** et le **neutrino** sont la même **particule** et dans ce cas, le **neutrino doit être massif**)
- Les deux neutrinos s'annihilent, ou de manière équivalente un nucléon absorbe le neutrino émis par un autre nucléon du noyau.
- Dans ce cas, les deux électrons sont émis dos à dos pour conserver l'impulsion (quantité de mouvement)
- De nombreuses expériences ont été menées pour rechercher la double désintégration β sans neutrinos, **sans succès pour le moment.**



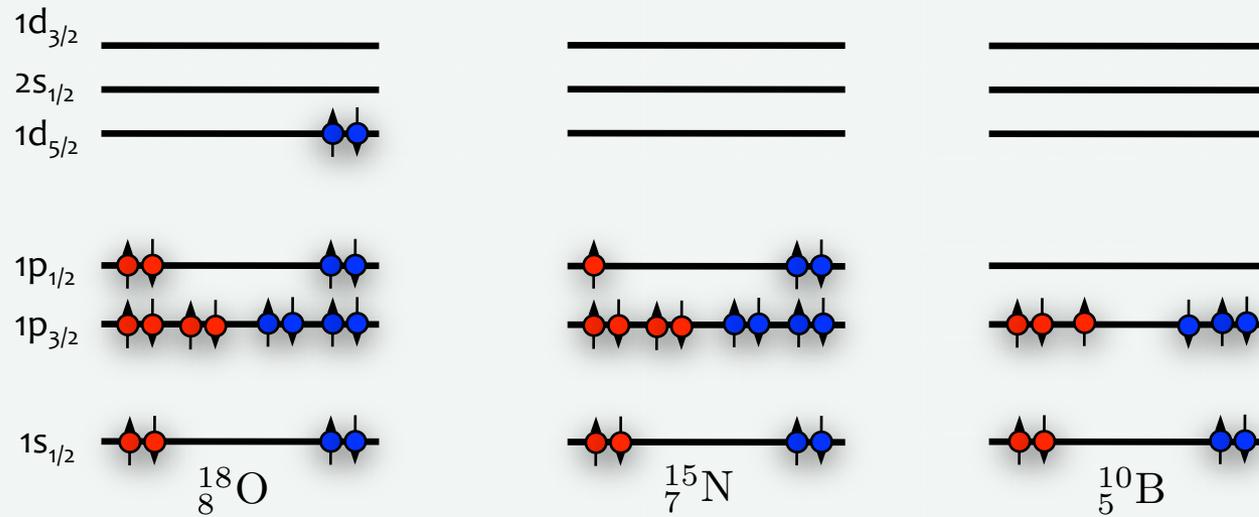
Désintégration γ

- 🌐 Rappel : les niveaux d'énergie nucléaire sont quantifiés (mécanique quantique)

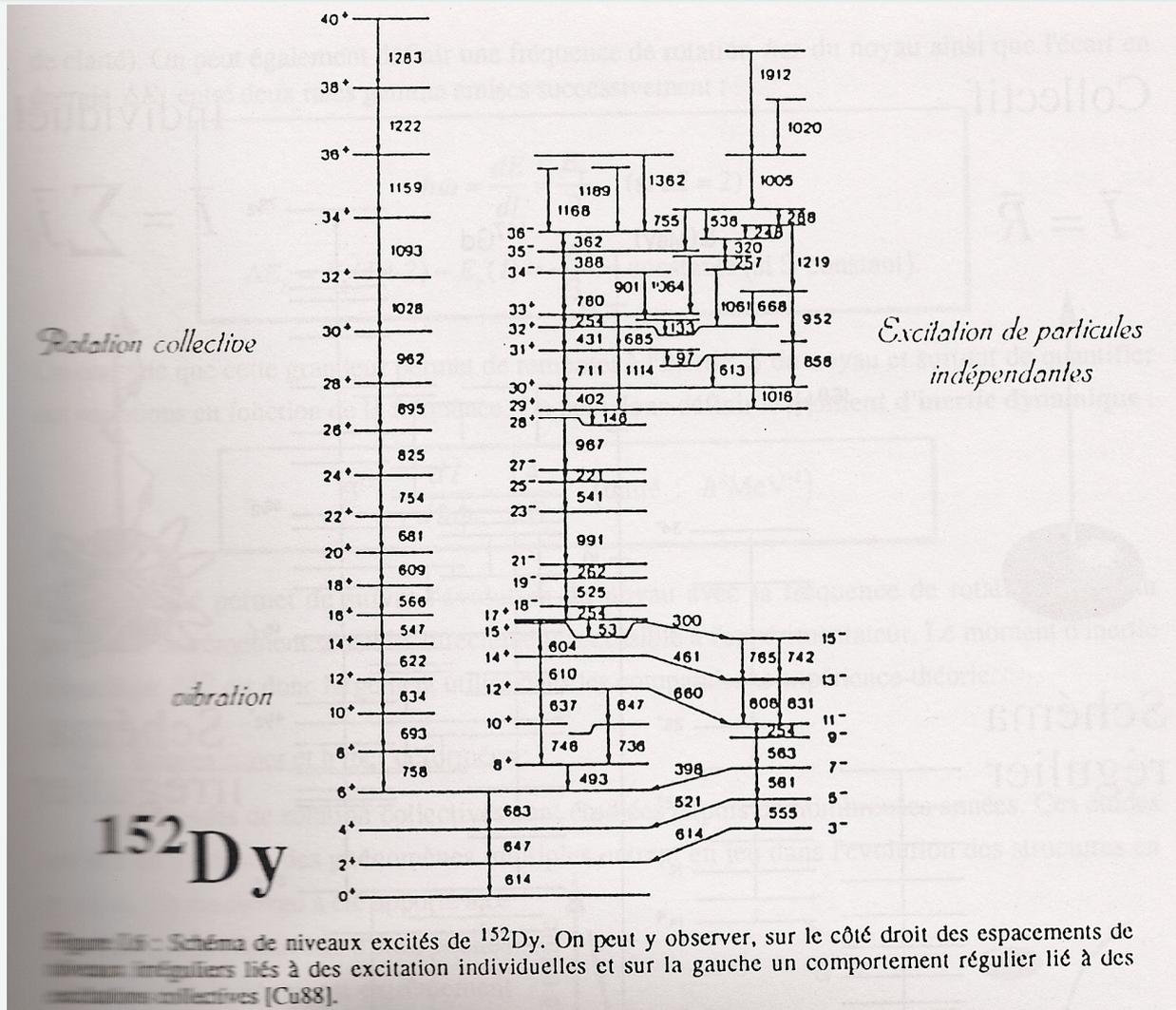


- 🌐 L'émission of rayons γ (radiation électromagnétique = photon) se produit lorsqu'un noyau est créé dans un état excité (par exemple après des désintégrations α , β ou des collisions)
- 🌐 Les énergies des photons sont discrètes.

Aperçu des niveau énergétique nucléaires

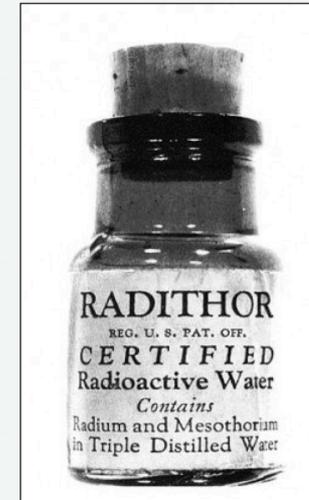


Exemple du ^{152}Dy



Les lois de la radioactivité

- Au début du siècle, Radithor était un médicament bien connu de brevet. Il s'agissait d'eau distillée contenant un minimum de 1 microcurie chaque du radium 226 et 228 ainsi que 1 microcurie d'isothioranium. Radithor a été fabriqué de 1918 à 1928.
- Publicité pour la crème Tho-Radia :
“La science a créé ThoRadia pour embellir les femmes. A elles d'en profiter.
Reste laide qui veut !”

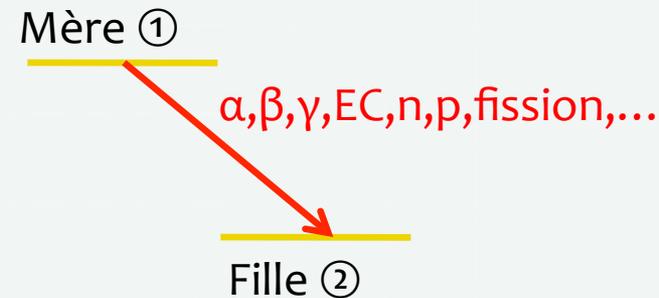


3. LES PRODUITS DE BEAUTÉ et élixir de jeunesse au thorium et au radium étaient commercialisés dans les années 1920.

La loi de désintégration radioactive

- Désintégration d'un état quantique (**état initial ou mère**) à un autre (**état final ou fille**).

Le taux de transition λ représente la probabilité de transition par unité de temps :

$$[\lambda] = T^{-1}$$


λdt est la probabilité (constante) qu'un noyau se désintègre dans l'intervalle de temps dt

λ ne dépend que de la structure de l'état initial et final et est calculable en mécanique quantique

🌐 Pour une population de noyaux

🌐 Nombre de noyaux présent à l'instant t :

$$N(t) = N(0) p(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$

où $N(0)$ est le nombre de noyaux au temps $t=0$

🌐 Demi-vie $T_{1/2}$ (ou période): temps au bout duquel 50% des noyaux se sont désintégrés

$$\frac{N(T_{1/2})}{N(0)} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \implies T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.693\tau$$

Les périodes radioactives s'étalent sur une grande échelle:

^{238}U $T_{1/2}=4.5 \cdot 10^9$ years

^{226}Ra $T_{1/2}=1617$ years

^{222}Rn $T_{1/2}=3.8$ days

^{214}Po $T_{1/2}=1.6 \cdot 10^{-4}$ s

Vitesse de désintégration:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(0)e^{-\lambda t} = -\lambda N(t)$$

 **Activité:** nombre de désintégration par unité de temps à l'instant t . C'est la vitesse désintégration instantanée.

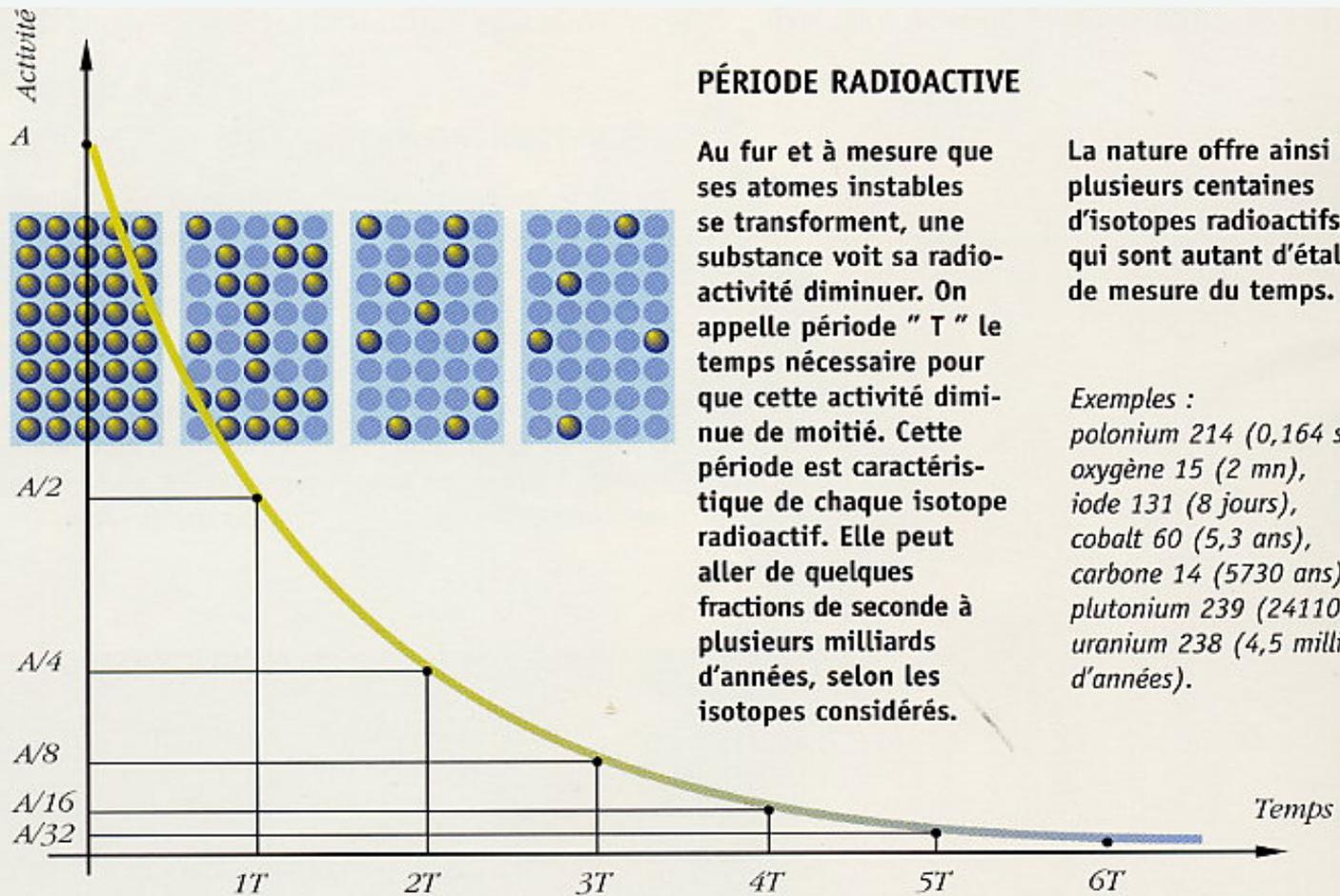
$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(0)e^{-\lambda t} = \lambda N(t) = N(t)/\tau$$

$$A(t) = \lambda N(0)e^{-\lambda t} = A(0)e^{-\lambda t}$$

Unités

Becquerel (Bq) = 1 désintégration par seconde

Curie (Ci) = $3.7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde
(initialement l'activité d'un gramme radium)



PÉRIODE RADIOACTIVE

Au fur et à mesure que ses atomes instables se transforment, une substance voit sa radioactivité diminuer. On appelle période " T " le temps nécessaire pour que cette activité diminue de moitié. Cette période est caractéristique de chaque isotope radioactif. Elle peut aller de quelques fractions de seconde à plusieurs milliards d'années, selon les isotopes considérés.

La nature offre ainsi plusieurs centaines d'isotopes radioactifs, qui sont autant d'étalons de mesure du temps.

Exemples :
 polonium 214 (0,164 s),
 oxygène 15 (2 mn),
 iode 131 (8 jours),
 cobalt 60 (5,3 ans),
 carbone 14 (5730 ans),
 plutonium 239 (24110 ans),
 uranium 238 (4,5 milliards d'années).

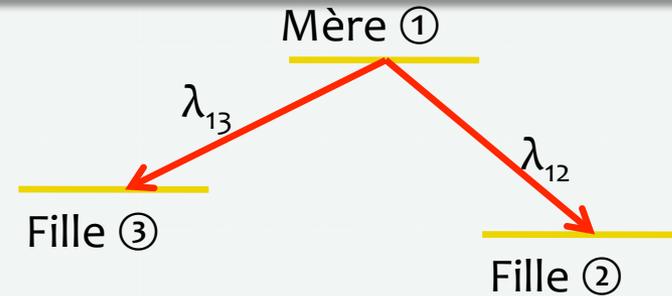
Désintégration multiples

Si plus d'un mode de désintégration possible

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_{12}N_1 - \lambda_{13}N_1 = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})N_1$$

$$\lambda = \lambda_{tot} = \lambda_{12} + \lambda_{13}$$

Evolution of the population: $N_1(t) = N_1(0)e^{-\lambda_{tot}t}$



Généralisation : Considérons n modes de désintégration, $i=1..n$
 λ_i sont les constantes de désintégration partielles,

$$\lambda_{tot} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$A_i(t) = \lambda_i N(t)$$

Activité partielle

$$\tau_i = 1/\lambda_i$$

$$\tau_{tot} = \frac{1}{\sum \frac{1}{\tau_i}}$$

Temps de vie

$$BR(i) = \lambda_i/\lambda_{tot}$$

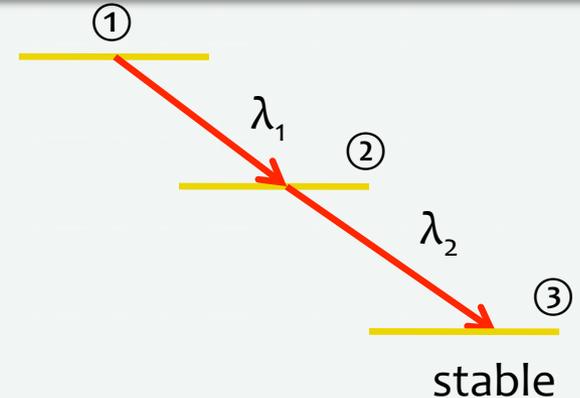
$$\sum_i BR(i) = 1$$

Rapport d'embranchement

Chaines radioactives

Chaîne avec 3 éléments :
populations $N_1(t)$, $N_2(t)$, $N_3(t)$

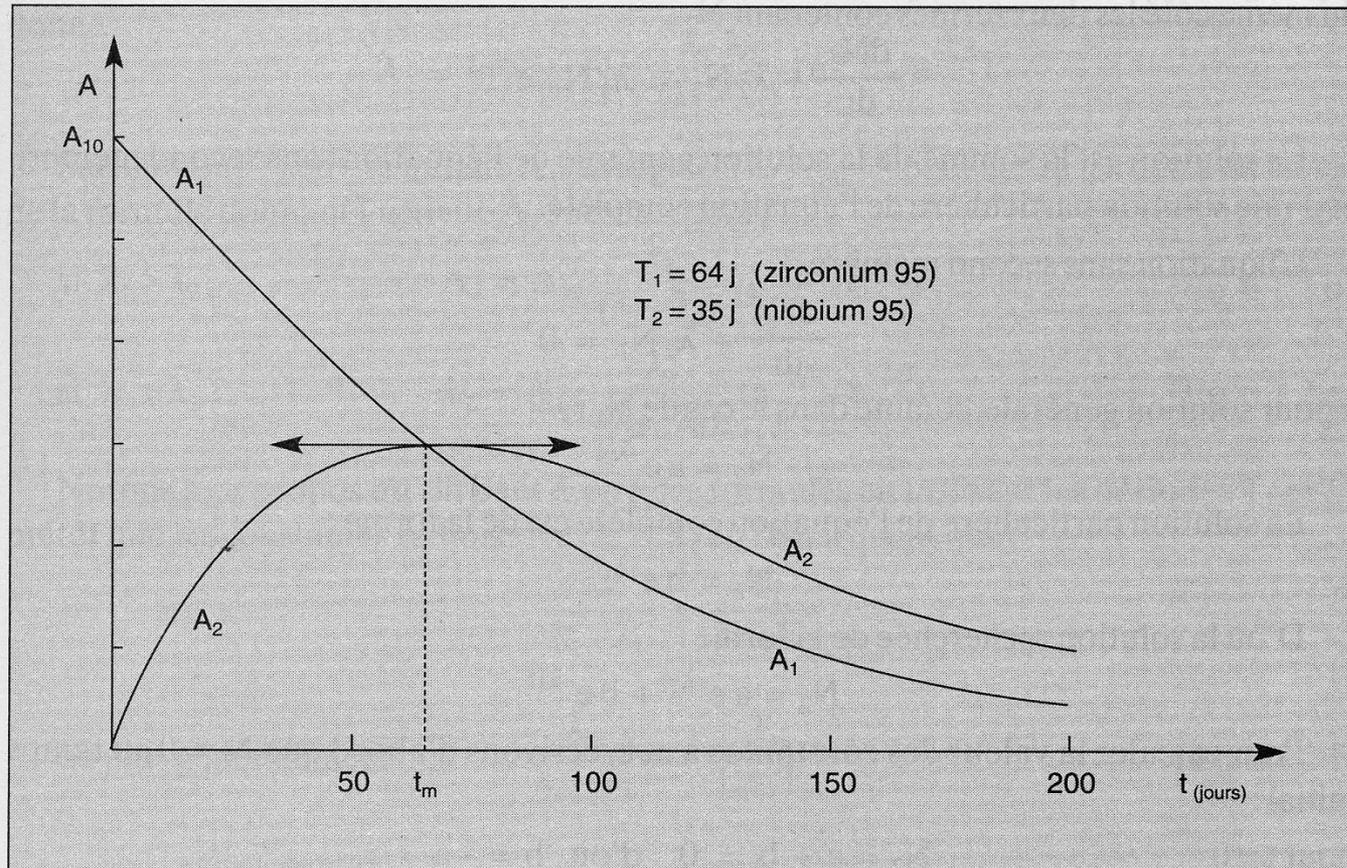
$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1(t) \\ \frac{dN_2}{dt} = +\lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) \\ \frac{dN_3}{dt} = +\lambda_2 N_2(t) \end{cases}$$



La solution de ce système d'équations différentielles est :

$$\begin{cases} N_1(t) = N_1(0) e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2(0) e^{-\lambda_2 t} \\ N_3(t) = N_1(0) \left(1 + \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \right) + N_2(0) (1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_3(0) \end{cases}$$

Exemple : Chaîne isobarique $A=95$, ${}_{42}\text{Zr} \rightarrow {}_{42}\text{Nb} \rightarrow {}_{42}\text{Mo}$



Radioactivité naturelle

- Il y a deux sources de radioactivité naturelle
 - Les radioéléments créés avec la terre : Radioactivité tellurique
 - Les rayons cosmiques : les rayons cosmiques (p, noyaux légers, γ énergétiques) et les radioéléments qu'ils produisent (^{14}C , ^3H , ...) sont des sources de radioactivité.
- Dans le cas de la radioactivité tellurique, le premier élément de la chaîne de désintégration a une période bien plus grande que tous ses descendants. Dans ce cas, les équations de bateman peuvent être simplifiées :
Si pour chaque i , $T_1 \gg T_i$ après un temps $t \gg T_i$, les activités sont toutes identiques : $A_1(t) \sim A_2(t) \sim \dots \sim A_{n-1}(t)$
C'est "l'équilibre séculier"
- Il y a 4 chaînes radioactives naturelles sur terre.
 - Origine : création de la Terre.
 - Equilibre séculier atteint
 - Mélange de désintégrations α et β^-

Nom de la chaîne	Type	Noyau final(stable)	Noyau de départ→	T _{1/2} (années)
Thorium	4n	²⁰⁸ Pb	²³² Th	1.41 10 ¹⁰
Neptunium (Extinct)	4n+1	²⁰⁹ Bi	²³⁷ Np	2.14 10 ⁶
Uranium	4n+2	²⁰⁶ Pb	²³⁸ U	4.47 10 ⁹
Actinium	4n+3	²⁰⁷ Pb	²³⁵ U	7.04 10 ⁸

Chaîne 4n+2

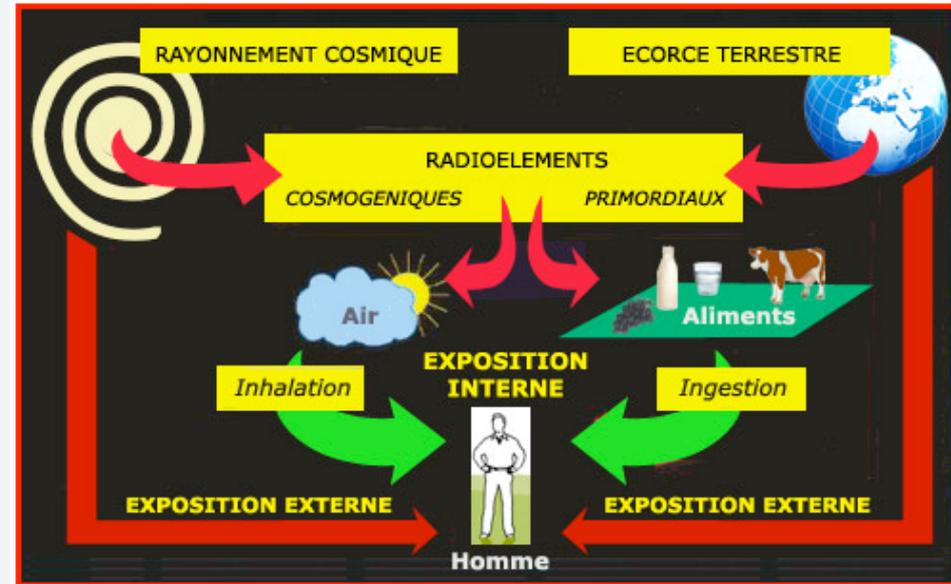
	Désintégration	T _{1/2}		Désintégration	T _{1/2}
1	²³⁸ U → ²³⁴ Th + α	4.468 × 10 ⁹ ans	8	²¹⁸ Po → ²¹⁴ Pb + α	3.05 minutes
2	²³⁴ Th → ²³⁴ Pa + β ⁻	24.10 jours	9	²¹⁴ Pb → ²¹⁴ Bi + β ⁻	26.8 minutes
3	²³⁴ Pa → ²³⁴ U + β ⁻	6.75 heures	10	²¹⁴ Bi → ²¹⁴ Po + β ⁻	19.7 minutes
4	²³⁴ U → ²³⁰ Th + α	2.45 × 10 ⁵ ans	11	²¹⁴ Po → ²¹⁰ Pb + α	164 μs
5	²³⁰ Th → ²²⁶ Ra + α	8.0 × 10 ⁴ ans	12	²¹⁰ Pb → ²¹⁰ Bi + β ⁻	22.3 jours
6	²²⁶ Ra → ²²² Rn + α	1.60 × 10 ³ ans	13	²¹⁰ Bi → ²¹⁰ Po + β ⁻	5.01 jours
7	²²² Rn → ²¹⁸ Po + α	3.824 jours	14	²¹⁰ Po → ²⁰⁶ Pb + α	138.4 jours

Dans cette chaîne radioactive naturelle, ²²²Rn est un gaz qui peut poser des problèmes pour la santé. 7000 ²²²Rn /m²/s s'échappent du sol.

C'est la source de 1/3 de l'exposition radioactive moyenne pour la population française.

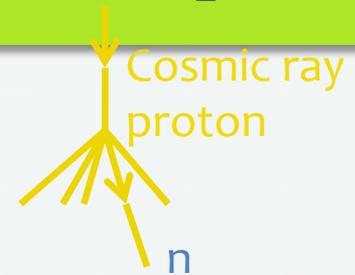
Quelques noyaux radioactifs dans notre environnement

- Rayonnement cosmique :
Carbone-14
- Origine tellurique :
Potassium-40, Uranium-235,
Uranium-238, Radon-222
- Elements artificiels :
 - Application médicale :
Iode-131
 - Réacteurs :
Tritium, Césium-137



Datation au carbone-14

But: datation de la matière organique récente



- ✓ Le ${}^{14}\text{C}$ est continuellement formé dans la haute atmosphère terrestre.

Le taux de production du ${}^{14}\text{C}$ atmosphérique est approximativement constant.
Vérifié avec la dendrochronologie (anneaux de croissance des arbres)

⚠ Complications pour les générations futures : la combustion des énergies fossiles (accroissement ${}^{12}\text{C}$ in atmosphere), les essais nucléaires atmosphériques (la quantité de ${}^{14}\text{C}$ double presque entre les années 1950 et 1960) changent la composition de l'atmosphère.

- ✓ Le carbone dans les organismes vivants est continuellement échangé avec le carbone atmosphérique.
Equilibre: ~ 1 atome de ${}^{14}\text{C}$ pour 10^{12} atomes d'autres isotopes de carbone (98.89% de ${}^{12}\text{C}$ et 1.11% de ${}^{13}\text{C}$)
- ✓ ${}^{14}\text{C}$ se désintègre dans les organismes morts : ${}^{14}_6\text{C} \longrightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$, $T_{1/2} = 5730$ years
Le ${}^{14}\text{C}$ n'est plus absorbé de l'atmosphère
Dans les matériaux organiques vivants, on observe ~ 15 désintégrations/minute/gramme de carbone
- ✓ On mesure l'activité spécifique pour obtenir l'âge (i.e. le nombre de désintégration par unité de temps et par unité de masse)

Potassium-40



^{40}K



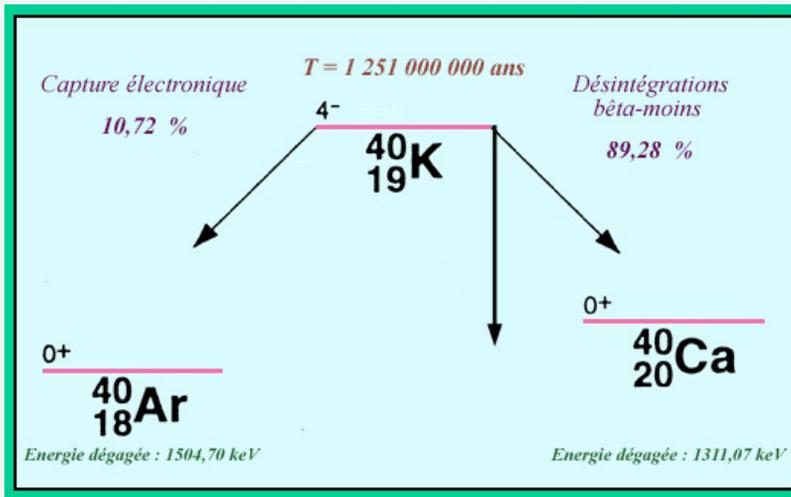
$T_{1/2}=1,251$ milliard d'années, présent depuis la création de la terre



1/10000 du potassium naturel



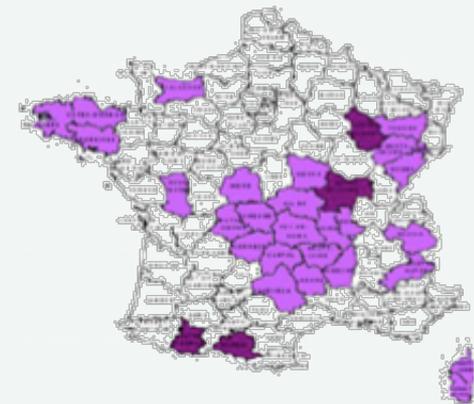
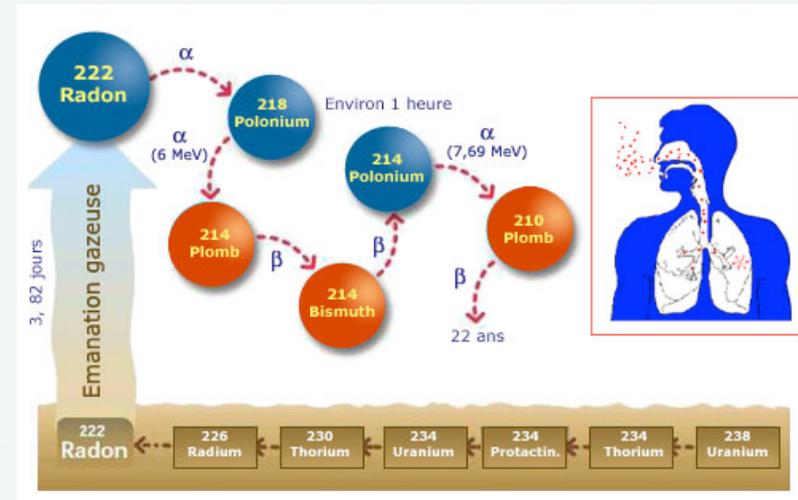
responsable de plus de la moitié de la radioactivité du corps humain, à raison d'environ 4 à 5000 désintégrations par seconde pour un homme de 80 kg



Les très lentes désintégrations du ^{40}K en argon sont utilisées pour dater des roches comme des laves dont l'âge se situe entre le million et 1 milliard d'années. La désintégration du ^{40}K en ^{40}Ar produit un atome de gaz, qui est retenu dans le réseau cristallin d'une lave. Il peut s'en échapper quand la lave est encore liquide, mais non quand elle se solidifie. A cet instant, la roche contient une certaine quantité de potassium mais pas d'argon. Lors d'une désintégration, l'atome gazeux d'argon reste prisonnier dans le réseau cristallin auquel appartenait le potassium. L'argon s'accumule très lentement. Pour déterminer l'âge de la lave, on mesure la quantité d'argon accumulé depuis qu'elle s'est solidifiée.

Le problème du radon-222

- Période : 3.8 jours (alpha)
- Propriété chimique : gaz
- Le radon constitue la principale source d'exposition à la radioactivité parce qu'il est le seul des descendants de l'uranium à être gazeux
- Le risque qu'il présente provient surtout de ses descendants qui sont radioactifs. Inhalés avec le radon, ces descendants solides (plomb-214, bismuth-214, polonium-214, plomb-210) émettent des rayonnements qui irradient des cellules sensibles comme celles des bronches.



Uranium et Plutonium

^{238}U et ^{235}U

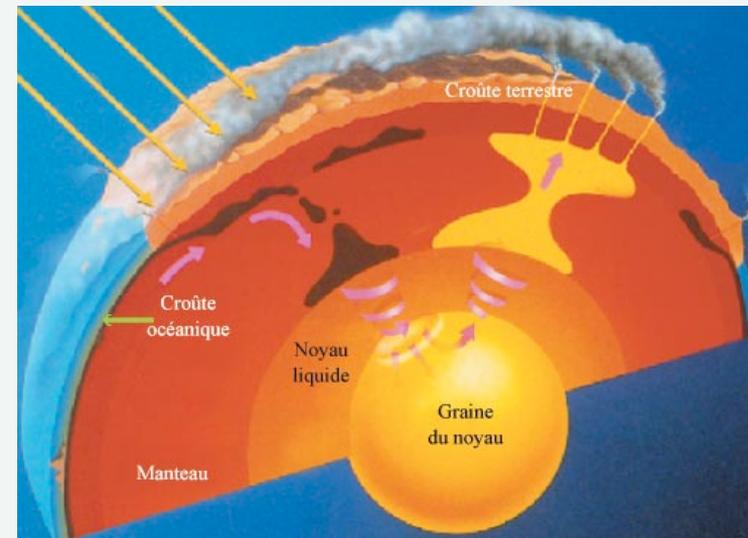
-  Tous les isotopes de l'uranium sont radioactifs et instables. L'uranium aurait disparu depuis longtemps si deux de ces isotopes, l'uranium-238 et l'uranium-235, n'avaient subsisté dans le système solaire et sur la Terre jusqu'à nos jours en raison de durées de vie exceptionnellement longues. La période de l'uranium-238 est de 4,5 milliards d'années. Celle de l'uranium-235 qui disparaît plus vite n'est « que » de 700 millions d'années.
-  Alors que l'abondance des deux isotopes était au départ similaire, l'uranium naturel est constitué de nos jours à 99,3 % d'uranium-238, contre 0,70 % d'uranium-235. Les noyaux d'uranium-235 et 238 sont, avec ceux du Thorium-232, les plus lourds existant à l'état naturel. Ils ont été formés il y a très longtemps, lors de l'explosion de supernovae.
-  On le trouve à l'état de traces dans la croûte terrestre (3 $\mu\text{g}/\text{kg}$), en particulier dans les roches granitiques ou volcaniques.
-  Il émet principalement des rayonnements alpha parfois accompagnés de gamma de faible énergie.
-  L'uranium-235 est le seul noyau naturel aisément **fissile** que l'on peut extraire du sol. (Très rare et recherché)

^{239}Pu

L'uranium-238 prédominant est dit **fertile**. La fission demeure marginale pour ce noyau. Même provoquée par des neutrons rapides sa probabilité reste faible. Plus fréquemment, la capture d'un neutron rend instable ce noyau très stable. Au bout de quelques jours, le noyau, devenu de l'uranium-239, se transforme en Plutonium-239 dont la période est de 24 000 ans (via ^{239}Np $T_{1/2}=2,4$ jours). Le Plutonium-239 est fissile. Il sert de combustible dans les réacteurs nucléaires et les bombes atomiques.

La chaleur de la terre

- La radioactivité contribue aux températures clémentes que nous connaissons à la surface de la terre.
- La chaleur géothermique est due à un dégagement de chaleur minime mais constant (93,7 mW/tonne pour l'uranium 238), Mais les quantités sont énormes à l'échelle de la Terre. On estime à 50 000 et 160 000 milliards de tonnes les quantités respectives d'uranium et de thorium dans la croûte et le manteau terrestre. Selon cette estimation, l'uranium seul dégagerait l'énergie électrique produite par 4620 centrales nucléaires de 1 Gigawatt.
- De cette chaleur, seule une faible proportion s'échappe en raison des dimensions du globe terrestre. La radioactivité provenant des isotopes 235 et 238 de l'uranium, du thorium 232 et du potassium 40 est à l'origine de 80% de l'énergie émergeant de la surface du sol.



Un exemple d'application médicale : L'iode-131



^{131}I



Période : 8 jours



Produit de fission très redouté lorsqu'il est relâché par accident dans l'environnement, car il se concentre dans la **thyroïde**

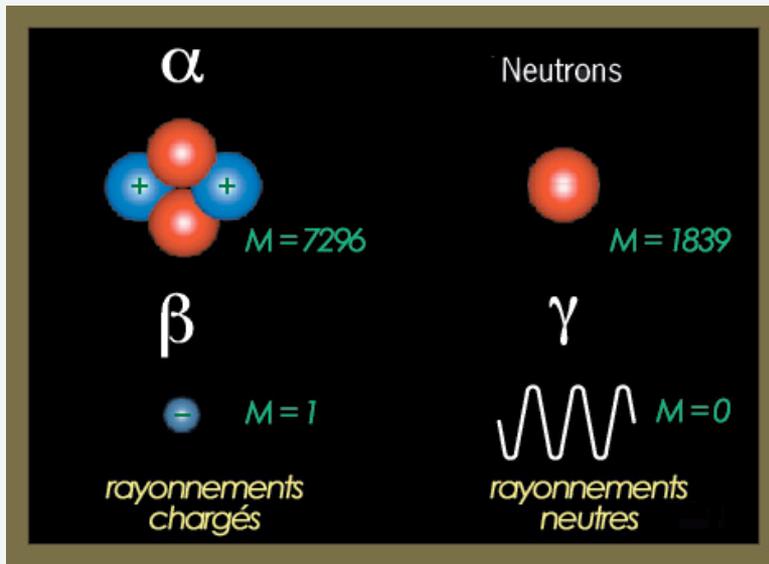


En médecine, l'iode-131 sert d'abord à l'étude du fonctionnement de la thyroïde, puis au traitement des hyperthyroïdies et des cancers de la thyroïde

Trois exemples de noyaux produits dans les réacteurs

- ^{137}Cs
 - Période : 30 ans (beta 1.176MeV) (durée de vie moyenne)
 - Le césium-137 a été répandu sur terre lors des essais dans l'atmosphère des armes atomiques. Le césium-137 est également un des principales sources de contamination radioactive lors des accidents de réacteurs. Lors de l'accident de Tchernobyl, une quantité importante de cet isotope a été disséminée. Il a fallu attendre 1995 pour que le niveau de césium dans l'atmosphère redevienne normal
 - Se retrouve dans les champignons et le gibier
 - Absorbé par l'homme, le césium se répartit dans les muscles. Sa période biologique est de 100 jours.
- ^{90}Sr
 - Période : 28.8 ans (β 0.546 MeV)
 - Propriétés chimiques identiques au calcium. Se fixe dans les os.
- Tritium
 - Période 12.3 ans, (β 5.7 keV)
 - produit en très petite quantité dans l'atmosphère par le rayonnement cosmique
 - Du tritium est produit par capture de neutrons dans l'eau qui sert au refroidissement des réacteurs
 - pénètre facilement dans l'organisme, à travers le cycle de l'eau. Période biologique 10 jours
 - La réaction de fusion du deutérium et du tritium est la réaction thermonucléaire qui libère le plus d'énergie et qui peut-être exploitée dans les réacteurs basés sur la fusion nucléaire

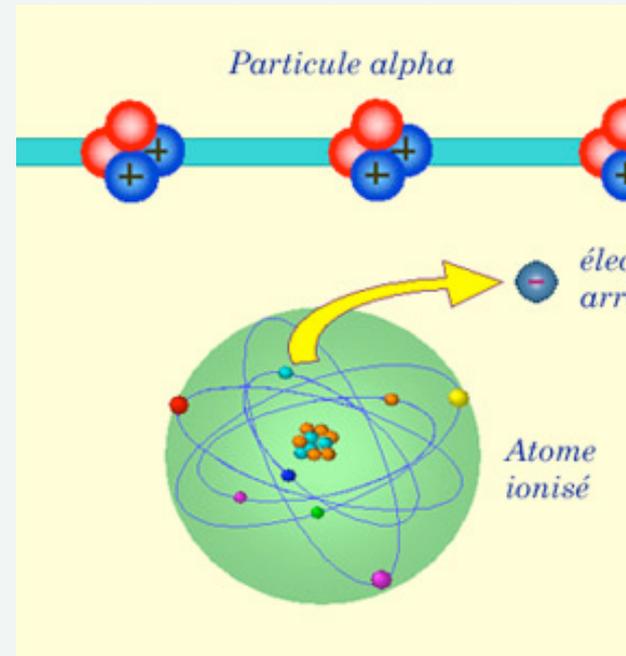
Matière et rayonnements



- Les quatre rayonnements
Les effets des rayonnements dépendent principalement de leur charge électrique, de leur masse et de leur nature :
- Les rayonnements électriquement chargés (alpha et bêta) perdent leur énergie en ionisant les atomes rencontrés, alors que les neutrons et les gamma (neutres) n'ionisent pas et cèdent leur énergie en mettant en mouvement des électrons ou des noyaux
- Les masses relatives des rayonnements sont très différentes, la particule alpha étant 7300 fois plus lourde que l'électron
- Les rayonnements nucléaires - neutrons et à un moindre degré particules alpha - sont capables de transformer les noyaux.

Ionisation

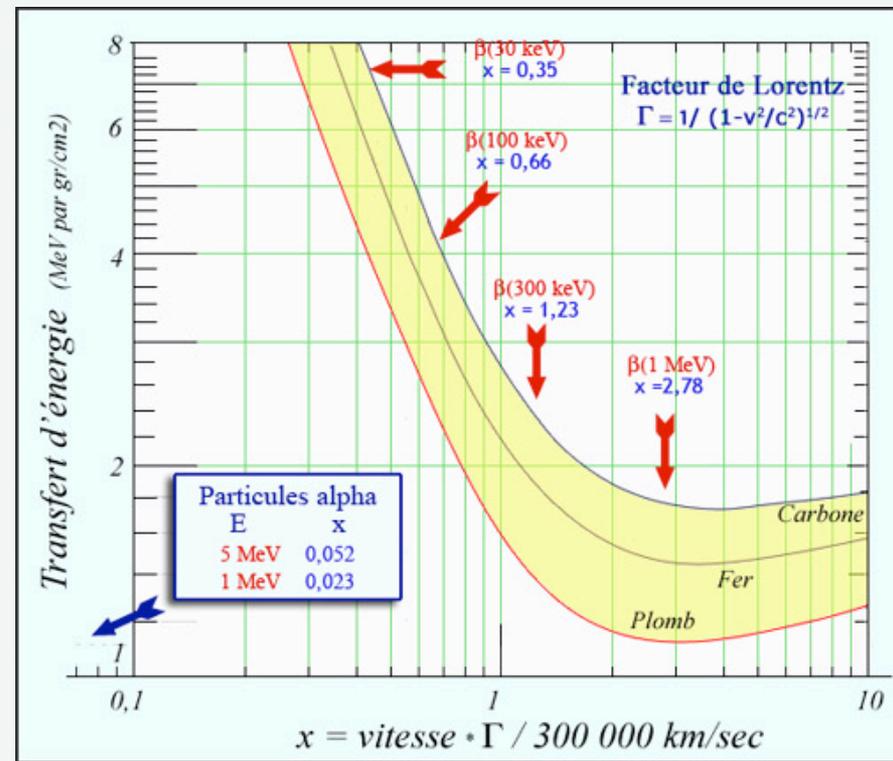
- Qui : les particules chargées
- Mode d'action : ejection des électrons du cortège atomique
- L'ionisation est d'autant plus forte que la masse et la charge électrique du projectile est élevée
- Ionisation plus importante en fin de parcours → hadronthérapie
- Les effets de l'ionisation sont multiples : ruptures de liaisons moléculaires, créations de radicaux libres, déclenchements de réactions chimiques, génération de défauts dans des structures cristallines, etc...



Du fait de sa charge électrique positive, une particule alpha est capable d'attirer à distance les électrons des atomes auprès desquels elle passe. C'est en arrachant un très grand nombre d'électrons qu'une particule chargée perd progressivement son énergie et finalement s'arrête. Les atomes qui ont perdu un électron sont devenus des ions, porteurs d'une charge électrique positive. C'est pourquoi ce phénomène s'appelle ionisation.

Particules alpha et produits de fission

- Les particules α ont une énergie insuffisante pour donner lieu à des réactions nucléaires. Ils interagissent avec le milieu traversé par le biais de leur charge électrique. Ils sont très ionisants, faciles à arrêter, mais ils sont beaucoup plus dangereux que les rayons β en cas d'ingestion ou d'inhalation.
- La fission nucléaire dans les réacteurs, produit des noyaux - appelés produits de fission - qui héritent de l'énergie libérée. Ils perdent leur énergie en bousculant les atomes qu'ils rencontrent le long d'un très court parcours. Ils sont extrêmement ionisants. Beaucoup plus lourds qu'une particule alpha, ils possèdent une charge électrique en proportion. Ils emportent chacun une énergie environ 25 fois supérieure à celle d'une particule alpha standard de 4-5 MeV.



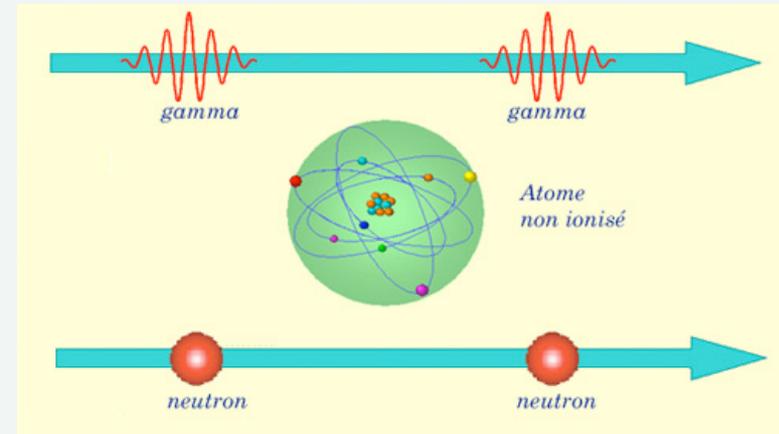
Electrons (rayonnement β)

- Les électrons ou positons, beaucoup plus légers, interagissent également par leur charge électrique, qui est moitié de celles des α . Alors que le parcours des α est court et rectiligne, la trajectoire des β dont la masse est 8 000 fois plus faible est plus longue, imprévisible cahotique avec de brusques changements de direction.

Relation entre dépôt d'énergie et vitesse de la particule
Ce transfert dépend du milieu traversé et d'un paramètre (x) fonction du rapport de sa vitesse et de celle de la lumière. Ce transfert passe par un minimum appelé minimum d'ionisation, correspondant à des vitesses très relativistes. Les alpha très lents par rapport à la vitesse de la lumière sont loin de ce minimum (les valeurs de x sont en dehors de la figure) : les alpha sont très ionisants. Par contre les valeurs de x pour les électrons bêta et les électrons produits par les gamma, sont proches ou peu éloignées de la zone du minimum. Les électrons ionisent peu.

Effet des particules neutres

- Photon (gamma), neutrons
- Les particules neutres n'ionisent pas, par contre elles sont capables d'interagir lors de chocs directs ou à très courte distance : les gamma avec des électrons ou des noyaux ; les neutrons uniquement avec des noyaux
- Photons : Un photon gamma est de même nature que la lumière visible. Tant qu'il n'est pas entré en collision avec un électron ou un noyau, il ne dépose aucune énergie dans le milieu traversé. Il ne produit aucun dégât le long de ce trajet. C'est au moment où il interagit, généralement avec un électron d'un atome, qu'il transfère au milieu tout ou partie de son énergie selon trois mécanismes qui arrachent l'électron à son atome, ou créent un nouvel électron et un positon.
- Neutrons : Plus imprévisible encore est le parcours d'un neutron, la manière dont il ralentit et transfère son énergie. Un neutron ignore les électrons. Il n'interagit qu'avec des noyaux. Il rebondit sur ces derniers, ou déclenche des réactions nucléaires.

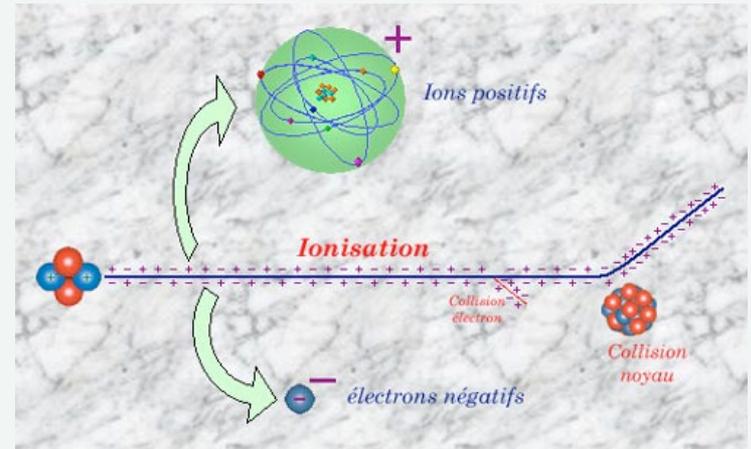


Remarque : Les neutrinos interagissent si peu qu'ils sont très difficiles à détecter. Pratiquement invisibles, leurs effets sont négligeables dans la matière et ils ne posent aucun problème en radioprotection.

Parcours des α

Un bulldozer atomique très ionisant, le long d'un bref parcours : Une particule alpha, 7300 fois plus lourde qu'un électron, n'est pratiquement pas déviée quand elle éjecte des électrons atomiques. Son trajet est très rectiligne. Elle laisse sur son passage un sillage d'électrons et d'atomes ionisés. Il arrive enfin que la particule alpha heurte un noyau. Elle est alors déviée à grand angle. De telles collisions sont rares, mais c'est ainsi que Rutherford découvrit l'existence des noyaux.

Un émetteur alpha devient dangereux lorsqu'il se fixe dans la matière vivante. Un simple contact avec la peau ne suffit pas, l'épiderme étant suffisamment épais pour absorber les particules alpha dans ses couches "mortes". Par contre il y a risque dans le cas d'une inhalation d'aérosols radioactifs qui se déposent sur les cellules pulmonaires, comme avec les descendants du radon. Quand un émetteur alpha se retrouve à demeure dans l'organe ou le tissu contaminé, les dégâts sont importants au niveau de la cellule car le dépôt d'énergie est maximum sur une courte longueur de quelques microns.

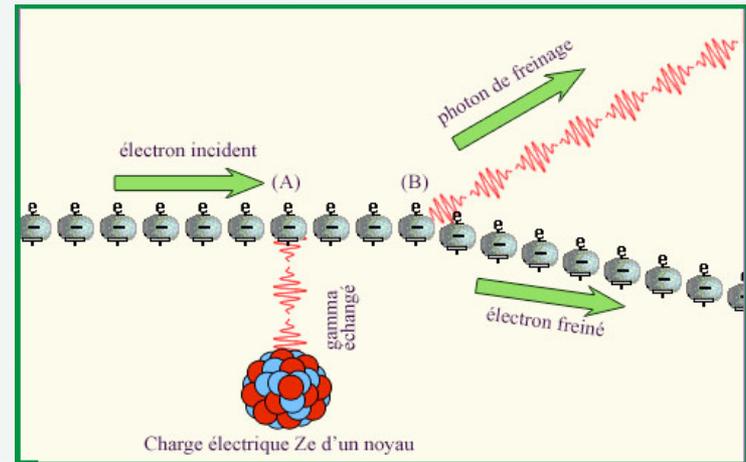


Parcours des β

Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

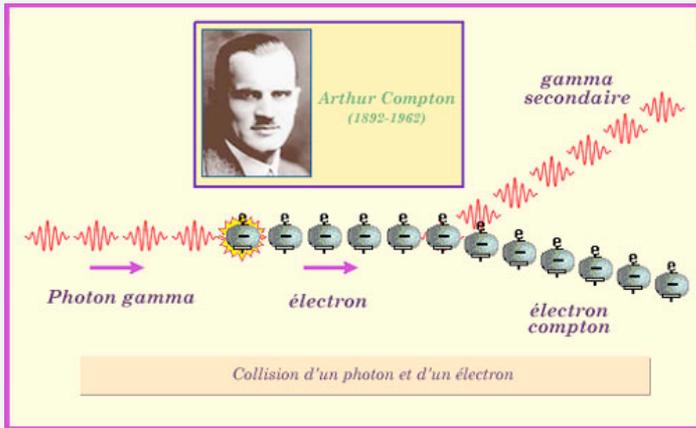
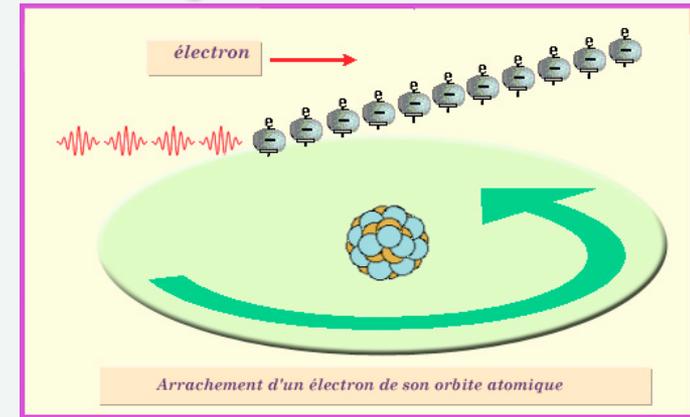
Un électron ultrarelativiste passant à côté d'un noyau subit l'effet de son fort champ électrique. On sait aujourd'hui que l'interaction entre charges électriques est due à l'échange de photons. En (A), l'électron échange un photon non observé avec le noyau. En (B), il émet un photon qui sera observé, le photon de freinage.

L'électron a perdu de l'énergie, sa trajectoire a été déviée. Si l'électron ne passe pas très près du noyau, l'échange est mou, le photon est de faible énergie (infrarouge, visible, UV ...). Au contraire si l'échange est 'dur', le rayonnement de freinage produit un rayon X ou gamma.

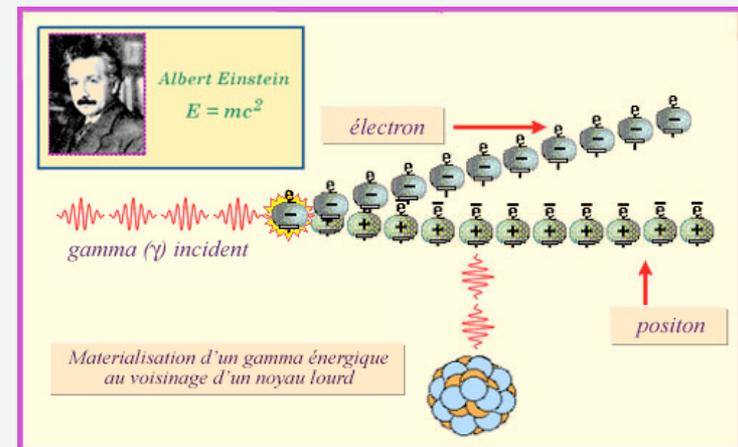


Parcours des γ

Effet photoélectrique



Effet Compton

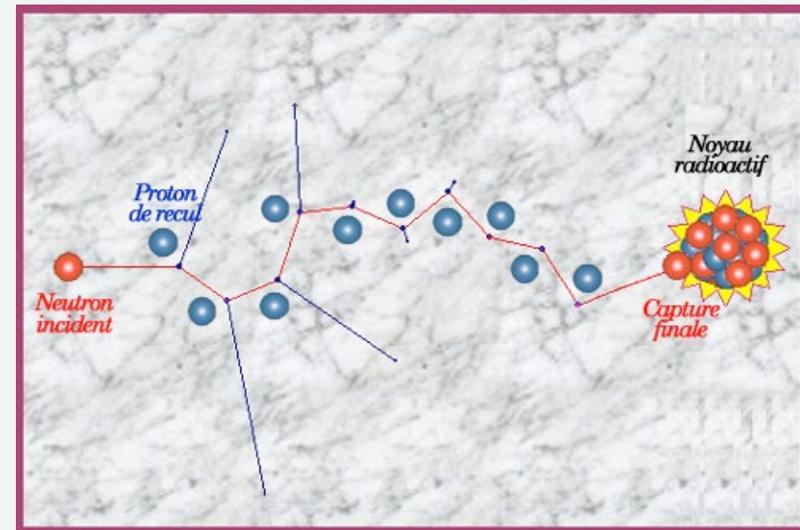
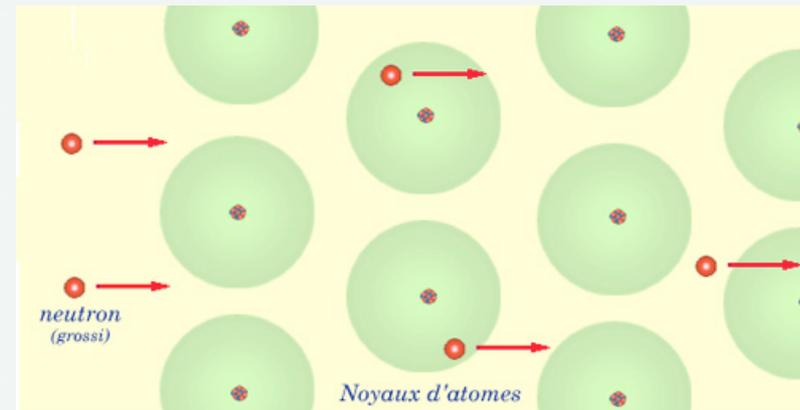


Création paires

Parcours des neutrons

Quand il traverse la matière, un neutron ne voit que les noyaux d'atomes. Les cortèges électroniques lui sont transparents. Pour la compréhension de la figure, le neutron et les noyaux ont été grossis, mais à l'échelle de l'atome ils sont aussi petits qu'un point. Le neutron ne rencontre pratiquement que du vide, ce qui explique que le rayonnement neutronique soit particulièrement pénétrant.

Un neutron subit dans la matière une série de collisions dites « élastiques » contre des noyaux. Il transmet son énergie aux noyaux qui reculent sous le choc (le parcours du neutron, qui n'interagit pas entre deux collisions, devrait être représenté en pointillés). Le ralentissement est le plus rapide dans une matière hydrogénée où les noyaux de recul sont des protons de masse égale au neutron. Ce sont les noyaux de recul qui ionisent et produisent des effets secondaires car ils sont chargés. Le neutron finit par être capturé par un noyau qui peut alors devenir radioactif : la matière est activée. Dans des cas particuliers comme l'uranium-235 ou le plutonium-239, la capture déclenche l'explosion du noyau : c'est la fission.



Parcours : résumé

- Libre parcours moyen des radiations :

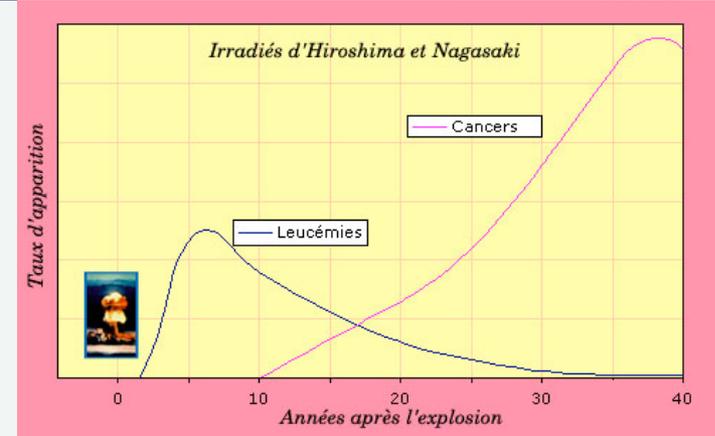
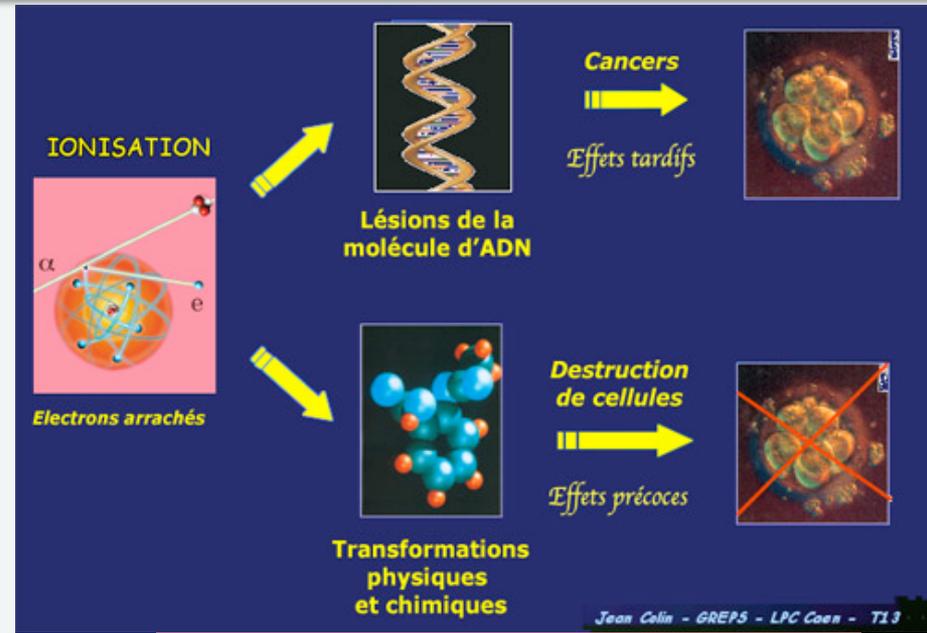
	Dans un solide	Dans l'air
α (5MeV)	$\sim 20 \mu\text{m}$	$\sim 5 \text{ cm}$
β	$\sim \text{mm}$	$\sim \text{cm}$
γ	$\sim \text{cm}$	$\sim \text{m}$

- neutrons : $\sim \text{cm}$ dans l'eau, dans la parafine
- La perte d'énergie est plus grande pour les particules chargées.

Les effets des rayonnements ionisants



Les rayonnements radioactifs peuvent induire des modifications chimiques qui, à leur tour, sont susceptibles d'introduire des modifications cellulaires dans la matière vivante. La plupart de ces modifications résultent d'une altération de l'ADN, la molécule qui porte le code génétique dans le noyau de la cellule. Le plus souvent, la cellule peut réparer l'altération de l'ADN. Il existe cependant une probabilité d'induire, sous l'effet des rayonnements, des effets à long terme comme des leucémies ou des cancers.



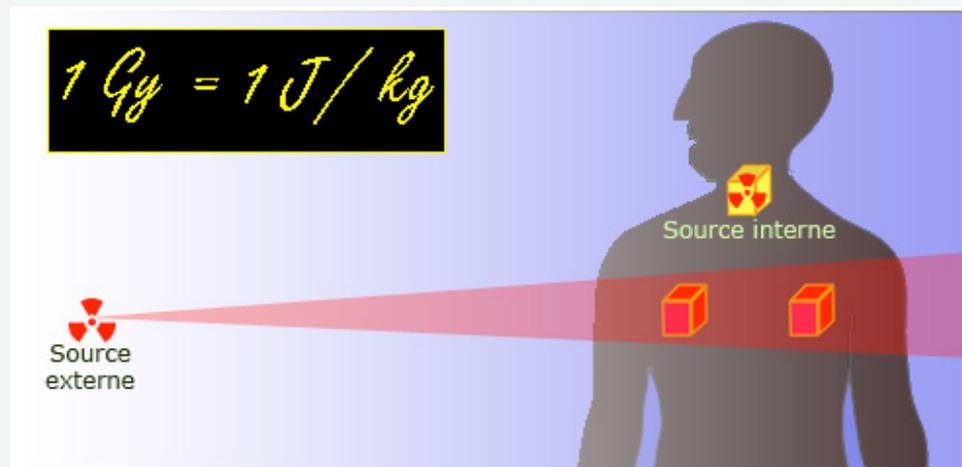
Compteur Geiger

- Pendant de très nombreuses années, la radioactivité fut détectée par un appareil simple, dû à Geiger et Müller. Dans les compteurs Geiger-Müller, un fil fin tendu dans un gaz est mis sous une haute tension. L'ionisation du gaz provoque une décharge électrique, transformée en signal sonore. Le très fort champ électrique présent à proximité du fil provoque un effet d'avalanche qui amplifie le signal. Les compteurs Geiger-Müller permettent de compter le passage de particules individuelles.



La dose : énergie absorbée

- 🌐 Dose : La dose radioactive est l'énergie déposée par unité de masse dans un milieu pour une radiation ionisante
Unité : 1 gray = 1 Gy = 1 J/kg (note : 1Gy=100Rad)
- 🌐 Normalement, une source radioactive émet dans toutes les directions. Une partie des rayonnements est absorbée par l'air, les écrans mis en place, les matériaux rencontrés avant d'atteindre l'échantillon. La dose de dépôt d'énergie tient compte de ces facteurs géométriques et de ces absorptions.



La dose effective: unité de doses pour le vivant



Dose effective (mesure l'effet sur un corps vivant):

La dose n'est pas un bon indicateur de l'effet biologique probable. 1 Gy de radioactivité α sera beaucoup plus dangereux biologiquement que 1 Gy de radiation γ par exemple.

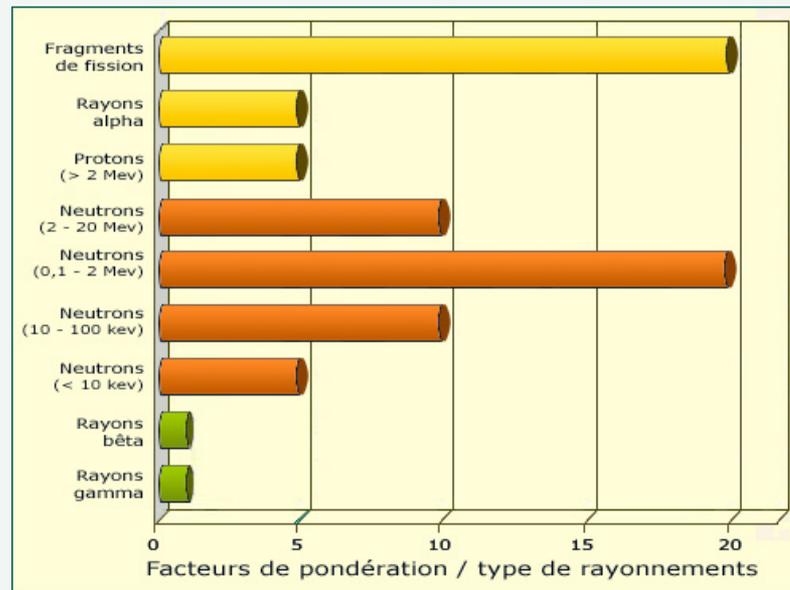
Un facteur de pondération peut être appliqué pour refléter les différents effets biologiques :

Dose équivalente :

$$D_{eq} = D \cdot F_Q$$

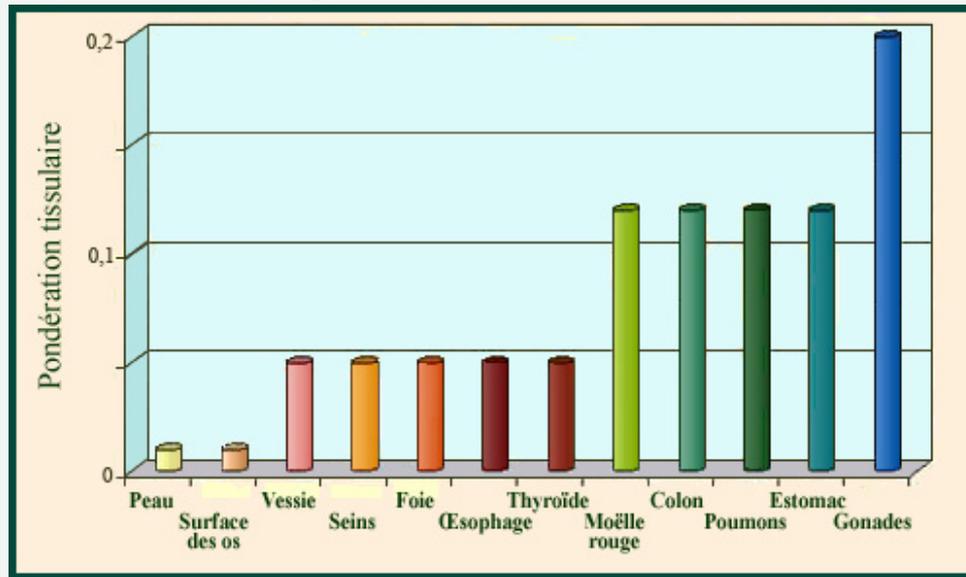
Où F_Q est un facteur de qualité prenant en compte la nocivité pour le corps humain.

Unité : 1 Sievert = 1Sv (note : 1Sv = 100 rem)



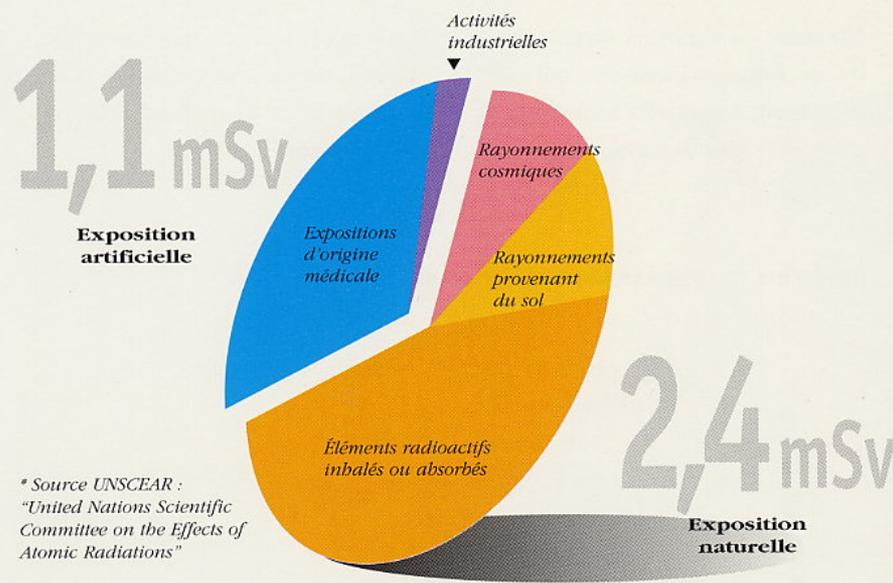
La dose biologique

- ✓ Un facteur de qualité additionnel F_S est parfois ajouté à la dose effective afin de prendre en compte la sensibilité des tissus biologiques à l'irradiation :
 - 🌐 Petits F_S : muscles, peau
 - 🌐 Grand F_S : système nerveux, gonades, moelle.

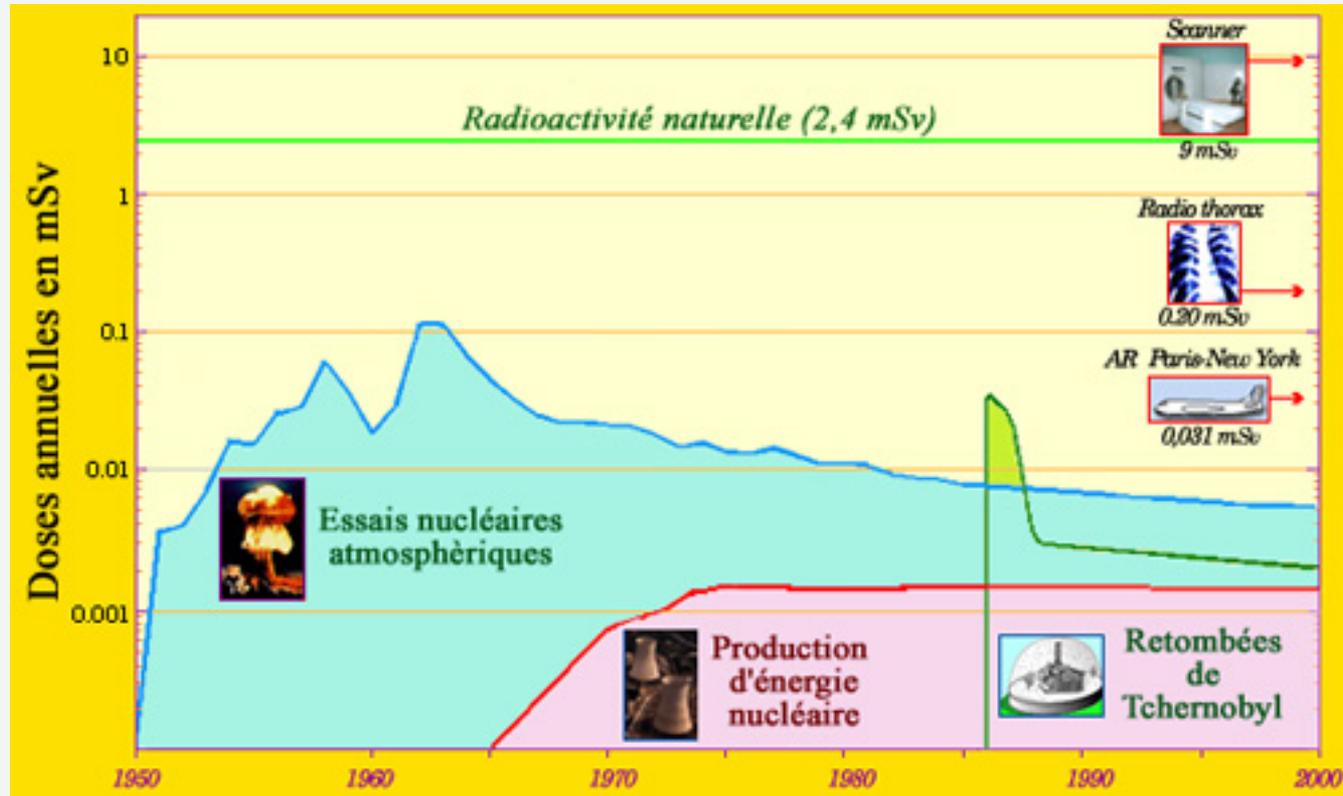


- ✓ Période biologique : Echelle de temps pour l'évacuation de la radioactivité par le corps humain.

Dose équivalente	Commentaire
0.03 mSv	Vol Paris-NewYork
1 mSv	Irradiation médicale moyenne
15mSv	Maximum / an (pour un travailleur contrôlé)
~1 Sv	Voyage aller retour sur mars (2.5 ans)
3-5 Sv	Mort dans les 2 mois @ 50%
10 Sv	Mort rapide



Radioactivité naturelle du corps humain - 0.25 mSv / year
 -4000 Bq de ^{40}K et 4000 Bq de ^{14}C



Source : <http://www.laradioactivite.com/>

EFFETS DES DOSES* REÇUES PAR IRRADIATION HOMOGENE DU CORPS ENTIER

→ Entre 0 et 250 mGy : aucun effet biologique ou médical immédiat ou à long terme n'a été observé chez l'enfant ou l'adulte. C'est le domaine des faibles doses.

→ Entre 250 et 1 000 mGy : quelques nausées peuvent apparaître et une légère diminution du nombre de globules blancs.

→ Entre 1 000 et 2 500 mGy : vomissements, modification de la formule sanguine, mais évolution satisfaisante ou guérison complète assurée,

→ Entre 2 500 et 5 000 mGy : les conséquences pour la santé deviennent graves ; l'hospitalisation est obligatoire ; la dose de 5 000 mGy reçue en une fois est mor-

telle pour une personne sur deux.

→ Au delà de 5 000 mGy : le décès est presque certain.

Des effets tardifs (risques de cancers..., qui augmentent avec la dose) ont aussi été observés au-dessus de 250 mGy.

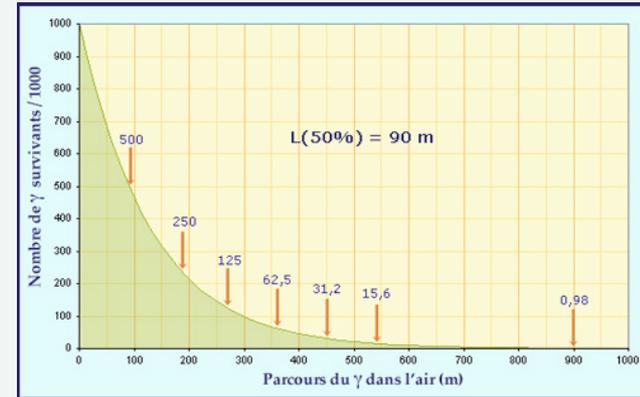
**Ce tableau se réfère à des doses absorbées en une seule fois, par irradiation homogène du corps entier. Dans ce cas le gray est équivalent au sievert pour les rayonnements X, γ et β , et à 25 Sv pour les rayonnements α . Des doses cumulées très supérieures à 5 Gy sont utilisées sur une portion de l'organisme en radiothérapie (60 à 80 Gy), elles sont déposées localement par séances de 2 à 3 Gy à raison de cinq à six séances par semaine.*

Radio protection

- 🌐 La radioprotection est l'art d'étudier le risque d'irradiation et de s'en protéger. Des règlements visent à réduire les expositions dues aux activités humaines à des valeurs aussi faibles que possibles.
- 🌐 Il est facile de se protéger des particules chargées si l'épaisseur de blindage est supérieure à leur parcours maximal. Il est impossible en principe d'arrêter parfaitement des particules neutres. Pratiquement, un blindage adéquat permet de réduire fortement le rayonnement non arrêté.

Radioprotection γ

- On se préoccupe surtout des gamma dans le cas d'une exposition à une source externe de rayonnements. On cherchera alors à se protéger en blindant la source, en interposant des écrans ou en s'en éloignant quand on le peut. C'est l'effet d'angle solide.
- Le rayonnement est d'autant plus vite atténué par un blindage ou un écran que la matière traversée comprend des atomes lourds dont le noyau possède une charge électrique très élevée. C'est la raison pour laquelle, on utilise pour se protéger dans des laboratoires des briques de plomb. Ce matériau dont les atomes sont particulièrement lourds ($A=208$).



Radioprotection neutrons

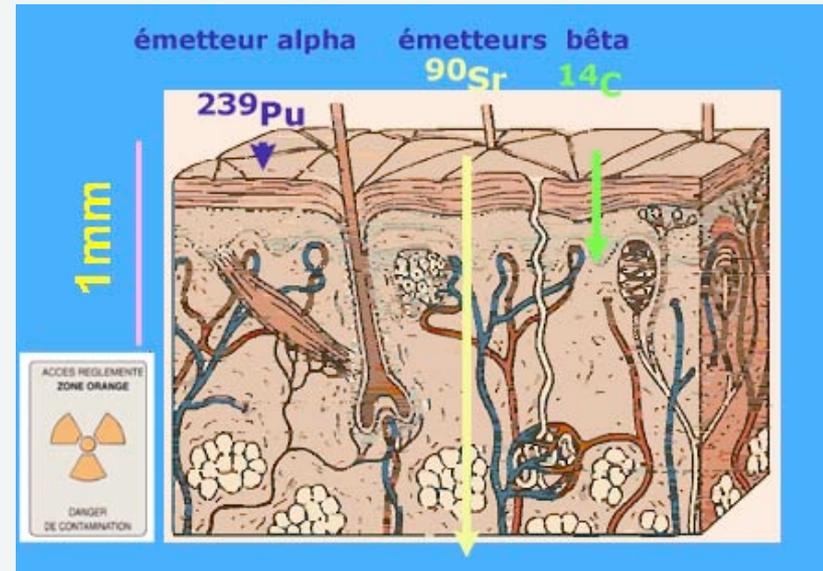
-  Le rayonnement neutronique est le plus dangereux. Il est heureusement de courte durée. Les cas d'expositions sont exceptionnels : intervention au cœur d'un réacteur, accident de criticité et, à une toute autre échelle, explosions de bombe atomique ou de bombe à hydrogène. En temps normal, l'exposition se réduit aux quelques neutrons produits par le rayonnement cosmique. Elle est très faible.
-  Les neutrons finissent capturés par les noyaux. Pour s'en protéger, la manière la plus efficace est de favoriser ces captures, en incorporant dans le matériau de blindage des noyaux très gourmands en neutrons. Les probabilités de capture des neutrons lents deviennent par exemple très grandes pour des noyaux comme le bore-10 ou le cadmium.
-  On se protège des neutrons avec des murs de béton incorporant du bore. Le béton contient de l'eau, donc de l'hydrogène qui ralentit efficacement les neutrons. Le bore incorporé dans le béton contient 20 % de bore-10, très efficace pour capturer les neutrons.

Radioprotection β

- 🌐 Pour la radioprotection, les blindages usuels utilisant des matériaux lourds comme le plomb ($Z=82$) sont contre-indiqués car ils favorisent le rayonnement de freinage. On utilisera plutôt comme écrans des matériaux de faible densité, comme le plexiglass, le plastique, le bois ou l'eau dont les noyaux atomiques décélèrent moins l'électron produisant des rayonnements moins énergiques et moins pénétrants.

Contamination externe

- Une contamination externe a lieu par contact avec une substance radioactive. Les rayons bêta et surtout alpha étant peu pénétrants, les effets seront intenses mais ne se feront pas sentir en profondeur. Une contamination externe produira donc des brûlures superficielles de la peau.
- Il est possible de décontaminer par un nettoyage soigné
- une personne contaminée ne peut à son tour contaminer et ne présente donc pas de dangers pour ceux qui la soignent.



Contamination interne

- 🌐 Une contamination interne se produit de trois façons : par l'inhalation de substances ou poussières radioactives ; par ingestion, lorsqu'elles sont contenues dans les aliments absorbés ou bien déposées sur un objet porté à la bouche ; par blessure avec un objet contaminé ou lorsqu'elles souillent une plaie existante. Il est impossible de décontaminer une personne ayant subi une contamination interne car il est trop tard. On peut par contre en limiter parfois l'effet, par exemple dans le cas du tritium en buvant beaucoup d'eau.

Règlementation

- La population française est exposée chaque année à une dose efficace par habitant de 3,7 mSv. Ces 3,7 mSv se répartissent en 2,5 mSv de radioactivité naturelle, 1,1 mSv d'origine médicale et 0,06 mSv de radioactivité liée aux autres activités humaines dont le nucléaire (sauf accident !).

Définition	Valeurs
Dose efficace corps entier	1 mSv/an
Doses équivalentes pour le cristallin	15 mSv/an
Doses équivalentes pour la peau	50 mSv/an