

Physique nucléaire appliquée à la biologie ou radiobiologie

La physique nucléaire désigne la science qui étudie la radioactivité et la structure du noyau. La radiobiologie utilise la radioactivité à des fins biologiques.

On désigne par le terme radioactivité la désintégration spontanée de noyaux d'atomes émettant un ou plusieurs rayonnements. On distingue plusieurs types de rayonnements : \bar{N} , $0+$, $0-$, 0 , neutrons ...

Un radioélément ou un radionucléide est en fait un atome radioactif.

I Radioactivité, structure du noyau

A. L'atome

Un atome est constitué du noyau accompagné de son cortège d'électrons. Il mesure un Angström ou 10^{-10} m. Il est électriquement neutre. Sa masse vaut à peu près celle du noyau.

I Noyau :

à Composé de nucléons : les protons et les neutrons

à La charge d'un neutron est nulle ; la charge d'un proton vaut $|e| = 1,6 * 10^{-19}$ C
(c'est la charge élémentaire)

à $m_{\text{proton}} \approx m_{\text{neutron}} \approx 1,67 * 10^{-27}$ kg

à Le noyau mesure à peu près 10^{-15} m

I Électrons :

à Sur des couches concentriques autour du noyau (de nombre quantique n)

à Liés au noyau par une énergie de quelques électrons-volts

à De charge $-|e| = -1,6 * 10^{-19}$ C

à $m_{\text{électron}} = 9,1 * 10^{-31}$ kg

On désigne un atome par ${}_Z^AX$ où A est son nombre de masse (le nombre de nucléons) et Z son nombre de charge (nombre de protons ou numéro atomique).

q Éléments radioactifs :

– Isotopes : même Z et A différent

ex : ${}_1^1\text{H}$, ${}_1^2\text{H}$ (deutérium), ${}_1^3\text{H}$ radioactif (tritium)

– Isobares : même A et Z différent

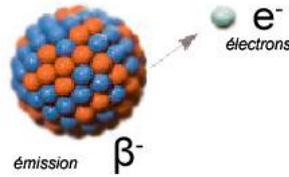
ex : ${}_{27}^{60}\text{Co}$ radioactif et ${}_{28}^{60}\text{Ni}$

– Isotones : même nombre de neutrons

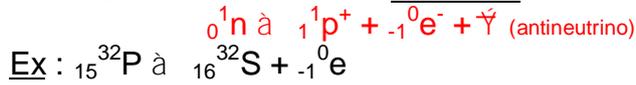
– Isomères : Même A et même Z, mais états d'énergie différents

B. Les différentes désintégrations

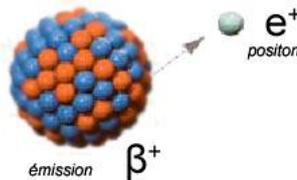
I Désintégration β^-



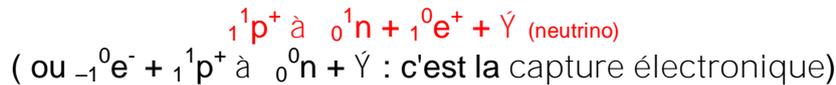
Les noyaux qui ont un excès de neutrons par rapport à la forme stable émettent des électrons :



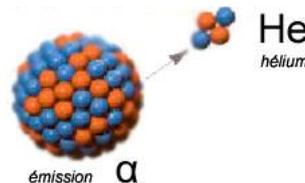
I Désintégration β^+



Les noyaux qui ont un excès de protons par rapport à la forme stable émettent des positons :

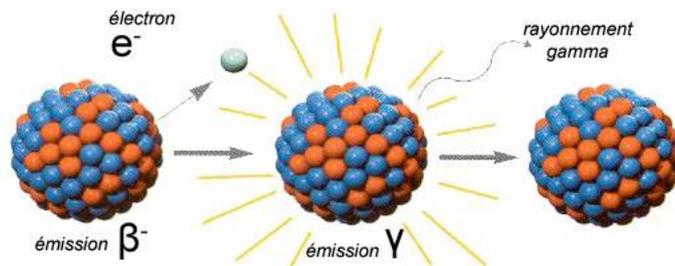


I Désintégration α



Ce sont les noyaux lourds qui émettent des noyaux d'hélium (et non pas des *atomes* d'hélium).

I Désintégration γ



Souvent, les noyaux créés après une désintégration α ou β se trouvent dans un état excité. Pour revenir à l'état fondamental, ces atomes émettent une radiation électromagnétique (un photon, d'énergie $E_0 = h\nu$).

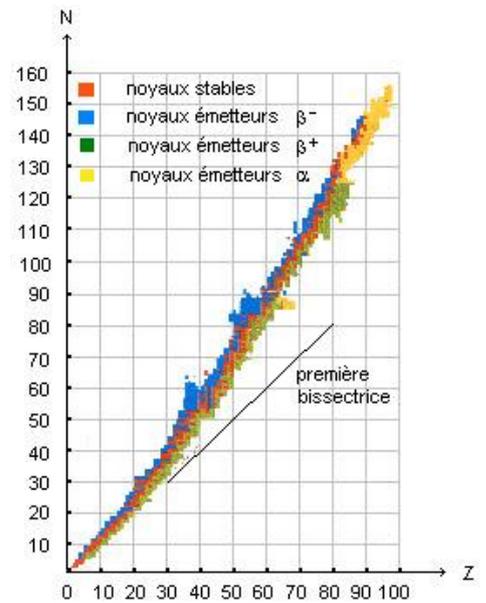
à La conversion interne s'effectue lorsque un excès d'énergie dans le noyau est donné à un électron qui est alors éjecté.

C. Relation d'équivalence masse / énergie

Relation de la relativité restreinte : $E = mc^2$

On utilisera préférentiellement comme unité massique l'unité de masse atomique qui correspond à un douzième la masse d'un atome de ${}^{12}\text{C}$:

$$1 \text{ uma} = M_C / 12 N_A = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



On utilisera préférentiellement comme unité énergétique l'électronvolt qui correspond à l'énergie prise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1V :

$$1 \text{ eV} = q \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

à On peut alors en conclure qu'à une masse correspond une certaine énergie qui vaut : $1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV}$

I Masse et énergie de liaison :

On remarque que la masse d'un atome est inférieure à la somme des masses de ses constituants. En fait, il faut soustraire B , l'énergie de liaison du noyau et B_e , l'énergie de liaison des électrons. On peut noter que B_e est négligeable.

$$M_{\text{atome}} = \sum (M_{\text{constituants}}) - B - B_e$$

à Lors d'une transformation radioactive, une partie de la masse est convertie en énergie de liaison.

D. Bilan énergétique

Soit la réaction $A \rightarrow B$ et m_A la masse des réactifs, m_B la masse des produits. On définit alors Q le bilan énergétique tel que : $Q = \sum m = m_A - m_B$.

à On remarque qu'il y a dans les désintégrations une perte de masse. Cela signifie qu'en contrepartie il y a une libération d'énergie avec l'extérieur. Cette énergie est en fait l'énergie cinétique donnée aux particules produites.

I Transformation α : ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + \alpha$

à $Q = M(\text{noyau X}) - M(\text{noyau Y}) - M(\text{noyau He})$

d'où $Q_{\alpha} = M_X - M_Y - M_{\text{He}}$

I Transformation β^- : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e^- + \bar{\nu}$

à $Q_{\beta^-} = M_X - M_Y$

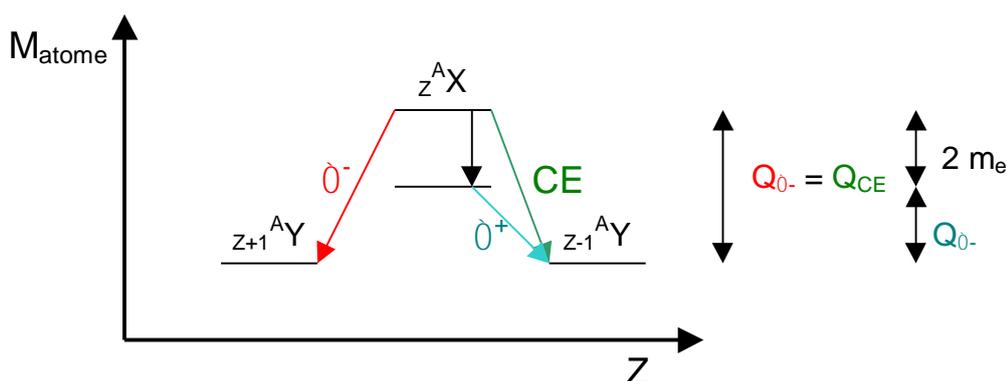
I Transformation β^+ : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e^+ + \nu$

à $Q_{\beta^+} = M_X - M_Y - 2 m_e$

I Capture électronique : ${}^0_{-1} e^- + {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu$

à $Q_{\text{CE}} = M_X - M_Y$

E. Schémas de désintégration



F. Loi de désintégration des noyaux, période et activité radioactive

I Loi de décroissance radioactive :

C'est une réaction cinétique du premier degré : $\dot{N} = -dN / dt$

$$\text{D'où } N(t) = N_0 e^{-\hat{U}t} \text{ et } t_{1/2} = \ln 2 / \hat{U}$$

N_0 est le nombre initial de noyaux radioactifs

$N(t)$ est le nombre de noyaux radioactifs à un instant t

\hat{U} est la constante de désintégration

$t_{1/2}$ est la demi-vie de l'élément

I Activité :

C'est le nombre de noyaux désintégrés par unité de temps :

$$A = -dN/dt \quad \text{et} \quad A = \hat{U}N$$

Remarque : On peut aussi définir que $A = A_0 e^{-\hat{U}t}$

L'activité peut se mesurer selon plusieurs unités :

- q Le Curie, c'est le nombre de désintégrations d'un gramme de Radium par seconde : $1 \text{ Ci} = 3,7 * 10^{10} \text{ désintégrations.s}^{-1}$
- q Le Becquerel : $1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration.s}^{-1}$

I Activité spécifique A_S :

$$A_S = A / m$$

$$\text{Ex : } A_S(^{226}\text{Ra}) = 1 \text{ Ci.g}^{-1} \\ A_S(^{14}\text{C}) = 0,25 \text{ Bq.g}^{-1}$$

G. Origine des radioéléments

I Origine artificielle :

- à Production d'énergie dans les centrales nucléaires
- à Imageries médicales
- à Utilisations industrielles (marquage, décontamination ...)
- à Utilisation militaire

I Origine naturelle :

- à Radioéléments d'origine cosmique

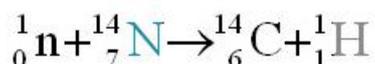
Le Soleil nous envoie 75% de protons, des noyaux d'He et quelques autres noyaux, des photons de toutes les longueurs d'onde, des électrons et des neutrons. Il en résulte principalement sur Terre du ^{40}K , du ^{14}C et du ^3H .

- à Radioéléments provenant de la formation de la Terre

H. Datation au carbone 14

à Le temps de demi-vie du ^{14}C est de 5730 ans.

Formation du carbone 14 :



Désintégration du carbone 14 :



Les êtres vivants absorbent en permanence du carbone (et donc en partie du ^{14}C d'origine Solaire). Ce phénomène maintient le taux de ^{14}C constant dans l'organisme est a la même valeur que dans l'environnement : $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,2 * 10^{-12}$.

À sa mort, le carbone n'est plus régénéré, et le taux se met alors à diminuer. Il est donc possible de déterminer l'âge de la mort de l'organisme grâce à son taux de ^{14}C .

l Limites de cette méthode :

Comme la quantité de ^{14}C est très faible, la mesure est difficile. On estime que l'on peut l'utiliser lorsque le ^{14}C a effectué jusqu'à 7 demi-vies (soit 30000 ans). Il faut aussi que le taux de ^{14}C reste constant dans le temps et dans l'espace. Libbig a démontré que ce taux était le même sur toute la surface du globe.

I. Décroissances multiples

Le plus souvent, le produit de la désintégration d'un radioélément est lui-même radioactif ; il se désintègre à son tour et ainsi de suite ... Dans ces conditions, chaque corps contribue à l'activité totale.

l Cas d'une chaîne à 3 éléments :

X_1 à X_2 à X_3 *stable* de constantes de désintégration λ_1 et λ_2 respectivement

On considère qu'à $t = 0$, N_1 n'est pas consommé et il n'y a pas de N_2 et N_3 . À tout moment on aura $N_1 + N_2 + N_3 = N_1^0$.

à Cinétique des réactions :

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad \frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2$$

à Intégration :

q Primitive

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

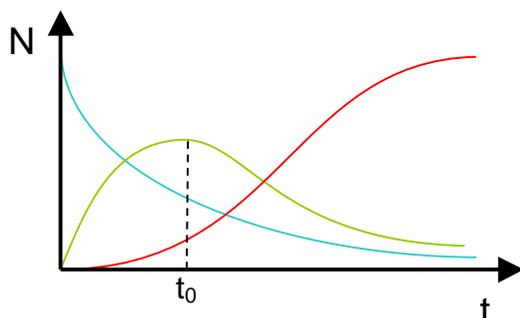
q Résolution d'une équation du premier ordre

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} \times (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

q Remplacer N_2 puis primitive

$$N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} \times \left(\frac{1 - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2} \right)$$

à Variations du nombre de noyaux :



À t_0 : $dN_2/dt = 0$ è $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$ ó $A_1 = A_2$

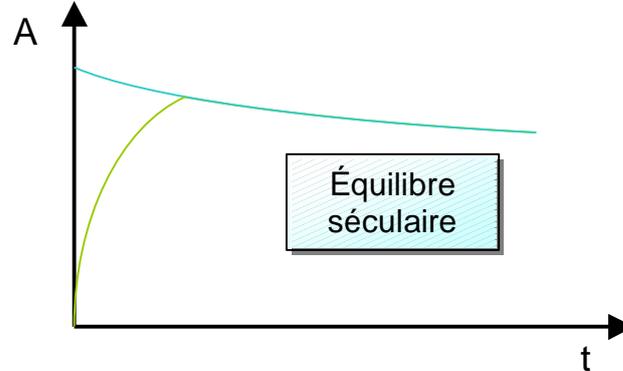
à On a : $t_0 = \ln(\lambda_2/\lambda_1) / (\lambda_2 - \lambda_1)$

Si $\lambda_1 \ll \lambda_2$: l'élément père met beaucoup plus de temps à se désintégrer que l'élément fils.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (1 - e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t}) \approx 1 - e^{-\lambda_2 t}$$

à on a :

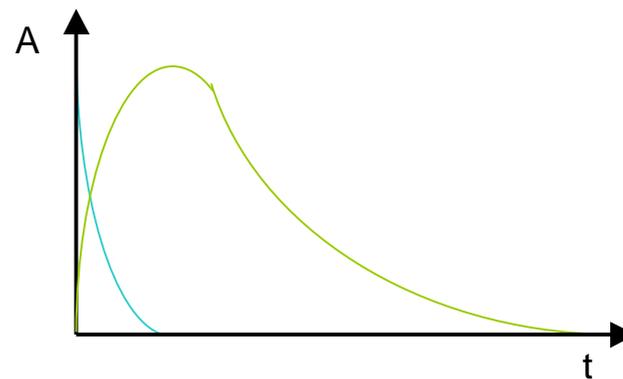
De plus, lorsque $t \gg T_2$, $A_2/A_1 \approx 1$, il y a formation d'un **équilibre séculaire**.



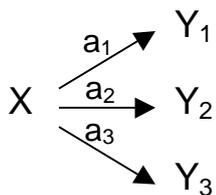
Si $\lambda_2 \ll \lambda_1$:

Au bout d'un temps suffisamment long par rapport à T_1 ($t > 10 T_1$) :

$$\text{à on a : } N_1 \approx 0 \text{ et } N_2 \approx N_1^0 e^{-\lambda_2 t}$$



J. Rapports d'embranchement



a_1, a_2 et a_3 sont des rapports d'embranchements (exprimés en %).

On a toujours : $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ ou 100 %

On définit alors la **radioactivité partielle** qui est la constante radioactive suivant l'un des modes de désintégration, telle que :

$$\hat{U}_i = a_i \hat{U}$$

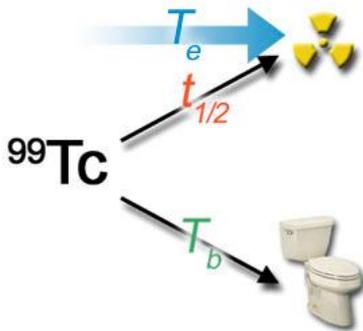
Ainsi que la **période radioactive partielle** :

$$T_i = \ln 2 / \hat{U}_i$$

à On a donc aussi : $\hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \hat{U}_3 = \hat{U}$ et $1/T_1 + 1/T_2 + 1/T_3 = 1/T$.

I Période biologique :

On appelle la période biologique T_b , le temps au bout duquel un organisme aura éliminé de manière biologique la moitié des éléments radioactifs absorbés. On définit donc \bar{U}_b par analogie avec les périodes radioactives.



Un radioélément absorbé a donc deux possibilités d'être éliminé dans un organisme : par désintégration et par élimination. On définit alors la période effective T_e qui est le temps au bout duquel il ne reste plus que la moitié des éléments dans l'organisme. Et on a : $1/T_e = 1/t_{1/2} + 1/T_b$.

II Interactions des particules avec la matière

A. Particules \tilde{N}

à Ces particules sont lourdes et chargées ($+2|e|$).

L'interaction avec la matière est principalement due aux forces électrostatiques entre la charge du noyau He et les électrons du milieu environnant.

Comme les particules \tilde{N} sont très massives par rapport aux électrons, les particules \tilde{N} ne sont presque pas déviées ; elles sont progressivement freinées lors de leur trajet dans la matière, en cédant une partie de leur énergie aux électrons du milieu.

Le transfert d'énergie peut se faire des manières suivantes :

q Ionisation : un électron est éjecté de son atome.

Rappel : pour ioniser un atome d'hydrogène, il faut une énergie de **13,6 eV**.

q Excitation : un électron passe sur une orbitale moins stable. Son retour vers une orbitale stable se fait par l'émission d'un ou plusieurs photons.

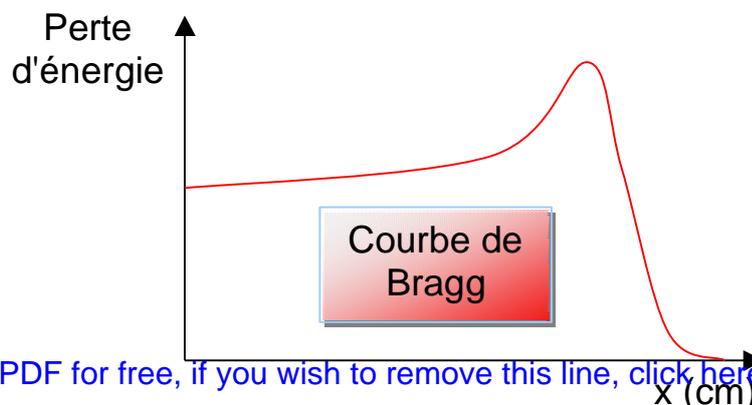
I Qui peuvent conduire à : Rupture de liaison chimique

À chaque transfert, la particule est ralentie, et on exprime ce ralentissement par la perte d'énergie spécifique, donnée par la relation de Bethe :

$$\frac{dE}{dx} = -C_0 z^2 Z \frac{N(\ln E) - C_i}{E}$$

où z et E sont la charge et l'énergie de la particule \tilde{N}

où Z et N sont la charge et le nombre d'atomes du milieu



On observe que le parcours maximal d'une particule \tilde{N} est :

- _ Dans l'air : $R_{\tilde{N}} \approx$ quelques cm
- _ Dans l'eau : $R_{\tilde{N}} \approx$ quelques μ m

è Une particule \tilde{N} fait beaucoup de dégâts mais sur une très courte distance.

B. Particules \tilde{O}^-

à Ces particules sont des électrons, elles sont donc négativement chargées ($-|e|$) mais sont beaucoup moins massives que les particules \tilde{N} .

Les particules \tilde{O}^- sont ralenties de la même manière que les particules \tilde{N} , c'est-à-dire par les forces électrostatiques et en transférant de l'énergie par des moyens identiques.

Cependant, les particules \tilde{O}^- étant identiques aux électrons du milieu, le transfert d'énergie par collision peut atteindre la moitié de l'énergie de la particule incidente. Dans ces conditions, les déviations sont beaucoup plus importantes, la trajectoire n'est plus rectiligne.

Il est alors difficile de définir la trajectoire des particules \tilde{O}^- . On parlera alors du parcours moyen $R_{1/2}$ qui est l'épaisseur nécessaire pour arrêter la moitié des rayonnements. Quelques millimètres d'aluminium suffisent à arrêter les rayonnements \tilde{O}^- .

C. Particules \tilde{O}

à Ces particules sont des photons, généralement d'énergie très élevée (rayons \tilde{O} ou X). Ils n'ont donc ni masse, ni charge.

Ils interagissent avec les électrons du milieu environnant selon les trois processus suivants.

1) Effet photoélectrique

Un photon arrache un électron d'un atome du milieu absorbant. L'énergie du photon est entièrement transférée à l'électron, sous forme d'énergie cinétique.

$$E_{\tilde{O}} = E_c + W \quad \text{ó} \quad h\nu = mv^2/2 + W$$

Où W est l'énergie de liaison de l'électron à son atome. Le photon doit donc avoir une énergie supérieure à W (les rayons \tilde{O} sont très énergétiques).

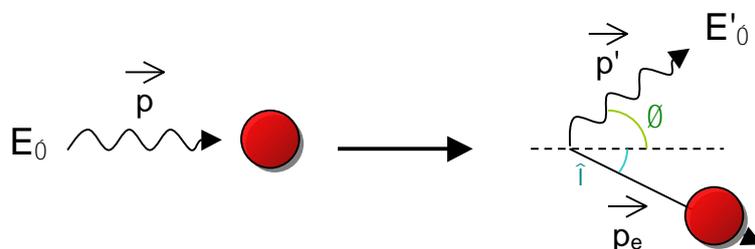
è L'électron éjecté agit ensuite comme une particule \tilde{O}^- .

De plus, l'effet photoélectrique intervient principalement avec les électrons des couches internes (K,L) de gros atomes. La lacune électronique est comblée par un autre électron du cortège électronique.

è Il y a alors émission d'un nouveau photon (souvent un rayon X).

2) Effet Compton

Le photon transmet seulement une faible partie de son énergie à un électron qui se trouve alors éjecté.

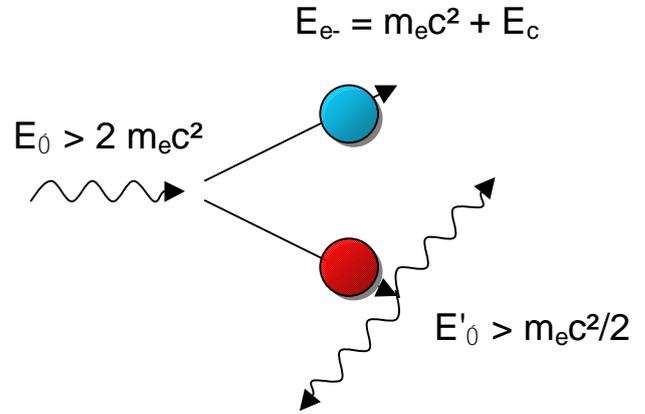


$$E_0 = E_c + W + E'_0$$

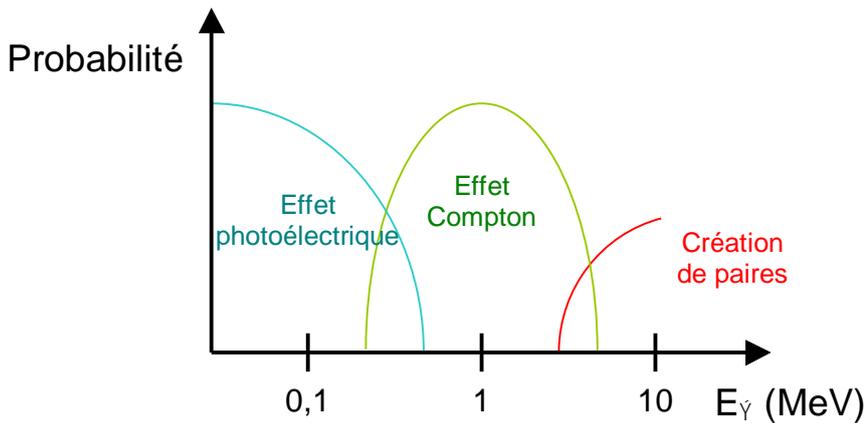
On peut comparer l'effet Compton) un choc entre le photon incident et l'électron au repos.

3) Effet de matérialisation ou création de paires

Au voisinage d'un électron lié à un atome, un photon se matérialise en une paire d'un électron et d'un photon. Le photon doit avoir une énergie d'au moins $2m_e c^2$ ($2 \times 0,511 \text{ MeV}$). Les particules créées emportent l'énergie restante sous forme d'énergie cinétique.

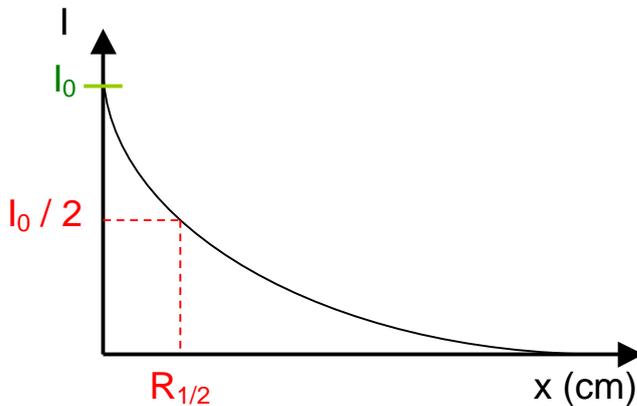


! Énergie du photon favorisant tel ou tel effet :

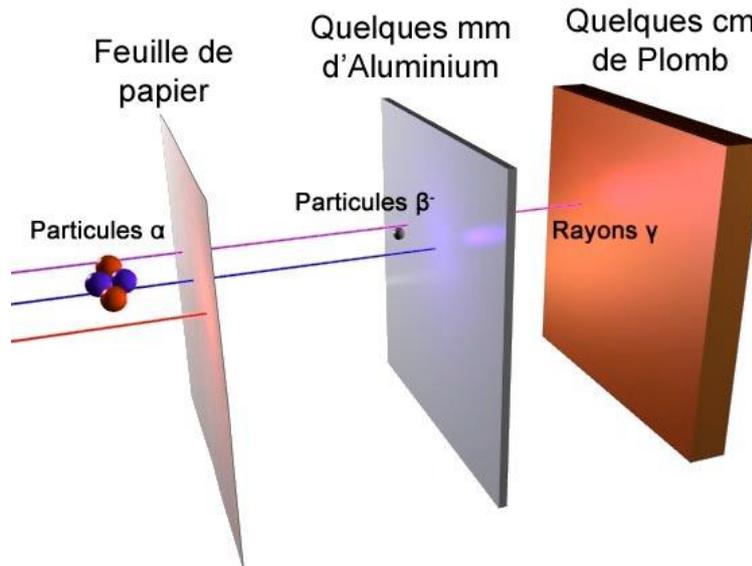


D. Loi d'atténuation

En tenant compte des ces trois effets, on peut définir une loi d'atténuation des rayonnements γ : $I = I_0 e^{-\mu x}$ où μ est le coefficient d'absorption linéique et x l'épaisseur du matériau absorbant.



è Quelques cm de Plomb suffisent pour arrêter les rayonnements γ



E. Grandeurs et unités dosimétriques

L'interaction des particules \tilde{N} , \tilde{O} et \tilde{O} avec la matière conduit à des excitations ou ionisations qui sont pour des tissus biologiques des événements initiateurs de réactions en cascade : cassure de molécules, création de radicaux libres, recombinaisons ... Ces réactions mal connues aboutissent en général à la détérioration ou la mort des cellules.

La *dangerosité d'une source* dépend du type et de l'énergie des rayonnements, ainsi que de la période radioactive et de la période de confinement de la substance dans un organisme.

1) Dose absorbée et TLE

$$D_a = E / m$$

Où E est l'énergie des rayonnements absorbés

m est la masse de l'organisme considéré uniformément irradié

D_a est la dose absorbée, et s'exprime :

q En Gray : $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$

q En rad (*ancienne unité*) : $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$

à Pour être plus exact, il faut prendre en compte le débit de la dose absorbée :

$$D(D_a) = D_a / t$$

Où t est le temps d'exposition

Malheureusement, D_a et $D(D_a)$ ne sont pas suffisants pour caractériser les dégâts causés aux cellules ; une même dose de particules \tilde{N} , \tilde{O} ou \tilde{O} ne produit pas les mêmes effets. De plus, si l'énergie est transmise brutalement, elle est plus dangereuse qu'à petites doses.

à On définit alors le Transfert Linéique d'Énergie (TLE) :

$$TLE = E / l \quad (\text{en keV} \cdot \text{m}^{-1})$$

Où l est la longueur moyenne de la trajectoire des particules absorbées

Rayonnement	TLE (keV·m ⁻¹)
\bar{N} (5MeV)	140
β	De 0,01 à 1
γ	De 0,01 à 1
X (E > 200 keV)	3

2) Efficacité Biologie Relative EBR

à C'est le paramètre utilisé en radiobiologie.

$$EBR = D_a / D_{a_ref}$$

Où D_{a_ref} est la dose absorbée produite par un rayonnement X de 200 keV
 D_a est la dose absorbée du rayonnement étudié en produisant les mêmes effets biologiques

3) Facteur de qualité, dose équivalente et dose efficace

En radioprotection, on cherche à estimer la nocivité d'un type de rayonnement pour tous les effets biologiques confondus afin d'estimer des valeurs limites d'exposition tolérées.

La valeur du facteur de qualité Q (ou de pondération, de nocivité) est généralement choisie à partir de la valeur maximale de l'EBR.

Rayonnement	Q
β, γ et X	1
\bar{N}	20

I Dose équivalente :

Elle donne une estimation de la nocivité d'un rayonnement pour un organisme.

$$H_t = Q * D_a$$

H_t est la dose équivalente et s'exprime :

q En Sievert : Sv

q En rem (ancienne unité) : 0,01 Sv

I Dose efficace :

$$H_e = W_t * H_t$$

Lorsque seulement certains organes sont irradiés (cas des irradiations internes), il ne faut prendre en compte que les organes touchés, qui ont de plus une radiosensibilité différente d'un organe à l'autre. On introduit le facteur de pondération cellulaire W_t .

Organe	W_t
Gonades	0,2
Moelle osseuse	0,12
Côlon	0,12
Poumons	0,12

Estomac	0,12
Seins	0,05
Vessie	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Autre	0,05
Surface des os	0,01
Peau	0,01
Organisme	1

Ex : pour un organisme exposé à une dose équivalente de 1 Sv, ses poumons auront absorbé une dose effective de 0,12 Sv.

à Pour être plus exact, on prend en compte le débit :

$$D(H_e) = H_e/t \qquad D(H_t) = H_t/t$$

Où t est la durée d'exposition

4) Normes

I Catégories de personnes exposées :

- q Directement Affectées aux Travaux sous Rayonnements (DATR)
 - q Dose acceptée : 50 mSv/an , sans dépasser 30 par trimestre
- q Non DATR
 - q 15 mSv/an
- q Public
 - q 5 mSv/an

On absorbe en moyenne $1 \text{ à } 2 \text{ mSv/an}$ de manière naturelle. Cette exposition est due aux rayonnements d'origine cosmique et ceux d'origine tellurique. Elle varie avec l'altitude (plus on est élevé, plus on ressent les rayonnements spatiaux).

On peut noter plusieurs facteurs d'exposition assez courants : une radiographie du thorax inflige $0,1 \text{ mSv/radio}$, les matériaux de construction (parpaings, briques ...) sont source de rayonnements et une explosion nucléaire apporterait $0,04 \text{ mSv/an}$.

I Exposition brusque et risques liés :

<i>Dose équivalente (mSv)</i>	<i>Effets</i>
0 à 5	Troubles apparents
5 à 10	Changements sanguins possibles
10 à 20	Troubles sérieux
20 à 40	Troubles sérieux, mort possible
40	Mort de la moitié des individus
60	Mort certaine

E. Lésions moléculaires produites par les radiations

1) Énergie des molécules

L'énergie totale d'une molécule est la somme de :

$$E = E_e + E_c + E_{r,v}$$

- q E_e l'énergie de liaison des électrons
- q E_c l'énergie cinétique ou l'énergie thermique associée au mouvement de la molécule
- q $E_{r,v}$ l'énergie de vibration et de rotation

Remarque : E_e et $E_{r,v}$ sont des énergies quantifiées, et ne peuvent être modifiées que si l'énergie du rayonnement incident est supérieur ou égal aux valeurs des transitions énergétiques permises.

Le transfert d'énergie sous forme thermique est insuffisant pour produire des liaisons moléculaires. On sait qu'une calorie est l'énergie nécessaire pour *augmenter d'un degré Celsius la température d'un gramme d'eau liquide*, d'où **1 cal = 4,12 J**.

Ex : pour une dose $D_a = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1} = 2,4 \times 10^{-4} \text{ cal.g}^{-1}$, la température de l'eau n'augmenterait que de $2,4 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$.

Cette élévation de température est minime. Pourtant dans la matière vivante, une dose d'un Gray provoque dans chaque noyau irradié plusieurs milliers de lésions sur l'ADN. Les lésions sont dues aux transferts d'énergie par ionisation ou excitation.

Ex : Énergies requises pour l'eau :

- à Ionisation de H_2O : $E_{l,\min} = 12,6 \text{ eV}$ _ $E_{l,\text{moy}} = 32 \text{ eV}$
- à Excitation de H_2O : $E_{E,\min} = 6,6 \text{ eV}$

2) Excitation et rupture de liaisons

Lors d'une *excitation*, l'électron reste lié à la molécule mais il possède un excès d'énergie qui le rend très instable sur son orbitale.

Lors d'une *ionisation*, un électron est éjecté, l'atome se neutralise par capture d'un autre électron, qui n'est pas, en général, directement placé sur une orbitale stable. L'ionisation conduit donc souvent à un atome excité.

L'**atome** se désexcite par l'émission d'un photon, d'énergie de la transition électronique. Une **molécule** se désexcite comme les atomes, mais également par transfert de l'excès d'énergie à une liaison chimique proche, pouvant conduire à la rupture de celle-ci.

F. Lésions sur l'ADN

On distingue deux types de lésions :

- q Directes : transfert direct de l'énergie de radiation sur l'ADN (ionisation, excitation)
- q Indirectes : dues à des réactions physico-chimiques induites par les rayonnements sur des molécules dans l'environnement immédiat de l'ADN (le plus souvent l'eau)

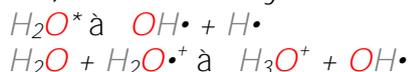
1) Radiolyse de l'eau et effet indirect

Les rayonnements peuvent avoir plusieurs effets sur l'eau :

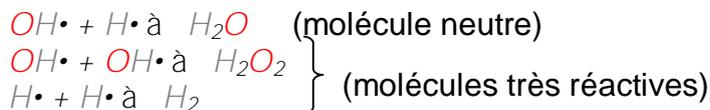
- q Ionisation : $h\nu + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^{\bullet+} + e^-$
- q Excitation : $h\nu + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^*$

Remarque : Un radical libre est un atome, ion ou molécule ayant un électron non-apparié. Ces molécules sont très réactives.

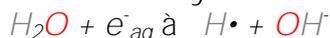
Ces molécules se déséxcitent en 10^{-12} s, soit par émission d'un photon, soit par dissociation ; c'est la radiolyse de l'eau.



Elles peuvent aussi s'annihiler ou former de nouvelles molécules :



Par ailleurs, l'électron éjecté par l'ionisation perd une grande partie de son énergie dans des collisions avec les autres molécules. Lorsque son énergie est suffisamment basse (l'électron est dit thermique), il s'entoure de molécules d'eau pour former un électron hydraté ou aqueux. Il réagit ensuite :



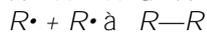
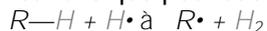
è La radiolyse de l'eau produit donc : $OH\cdot$, $H\cdot$, e^-_{aq} , H_2O_2 , H_2 .
Tous ces produits sont très toxiques, car très réactifs ; ils peuvent donc causer de nombreuses lésions sur l'ADN.

Ex : à Modifications que peut causer $OH\cdot$ à une molécule organique R—H :



puis $R\cdot + OH\cdot \rightarrow R-OH$

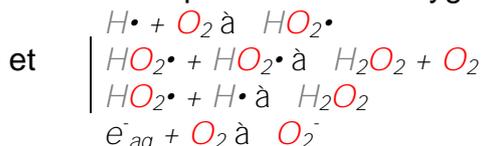
à Modifications que peut causer $H\cdot$:



On observe alors des lésions sur l'ADN : modifications de bases, rupture double brins, partages intrabrins, etc ...

2) Éléments radiosensibilisants ou radioprotecteurs

Certaines molécules comme le dioxygène augmentent l'effet biologique des rayonnements. En présence de dioxygène, il peut se produire :



Ces produits supplémentaires expliquent l'effet sensibilisant du dioxygène. Cela peut être utilisé pour des traitements de tumeurs par radiothérapie.

À l'inverse, certaines molécules sont dites radioprotectrices, si elles diminuent les effets nocifs des radiations, comme les thiols (—SH).



On ne les utilise pour l'instant que sur des cultures bactériennes.

3) Lésions directes sur l'ADN et effets biologiques

Elles correspondent à des ruptures d'un ou de deux brins de la double chaîne, de modifications chimiques des bases ou des sucres et/ou des partages intra et inter moléculaires.

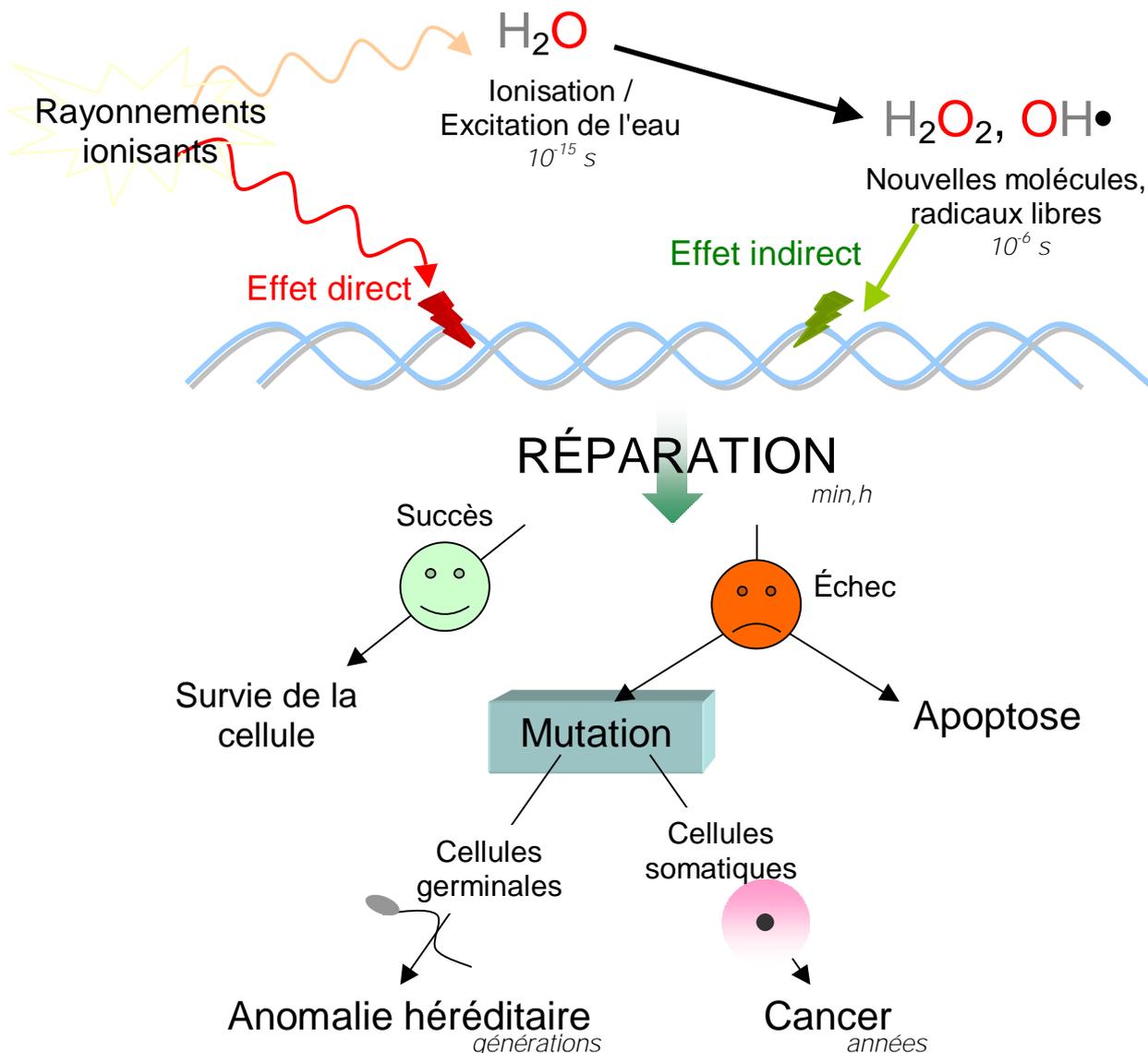
Il existe plusieurs mécanismes de réparation de l'ADN faisant intervenir des enzymes, appelées réparases, qui permettent de maintenir l'intégrité du code génétique.

La mise en évidence des mécanismes de réparation peut se faire par la mesure du nombre de ruptures de brins provoquées par une irradiation brutale d'un Gray. Tout de suite après cette exposition, on mesure 1500 cassures (pour une cellule de mammifère). Plusieurs heures plus tard, il n'existe plus que quelques dizaines de cassures.

Le plus souvent, les lésions résiduelles semblent n'avoir aucun effet biologique. En effet, sur l'ADN d'une cellule diploïde humaine qui contient 10^9 paires de bases pour 10^5 gènes, seules 10^8 paires de bases sont utilisées dans les gènes. En outre, 90% des gènes ne s'expriment pas.

Si la dose est trop importante, il subsiste des lésions sur l'ADN sur les gènes dominants qui, si elles sont incompatibles avec la survie de la cellule, provoque l'apoptose de la cellule ; dans le cas contraire, l'ADN a subi une mutation.

Si cette mutation porte sur une cellule somatique, elle peut être à l'origine d'un cancer ou d'un caractère nouveau chez l'organisme. Si cette mutation, porte sur une cellule germinale, elle peut être transmise à la descendance de l'individu.



G. L'apoptose radio-induite et courbes de survie

La mort cellulaire par irradiation n'est généralement pas immédiate (sauf dans le cas d'irradiations extrêmement intenses). La mort intervient avant ou après une ou plusieurs divisions cellulaires ; c'est l'apoptose, la mort cellulaire commandée par le programme génétique.

On distingue l'apoptose des nécroses, qui sont produites par un agent chimique (ex : acide) ou physique (ex : feu) et qui provoque la mort immédiate par la destruction du cytoplasme et du noyau.

L'apoptose est un phénomène naturel. En effet, chaque cellule contient dans son génome un programme qui détermine le nombre de ses divisions et de sa propre durée de vie. L'apoptose naturelle permet l'homéostasie : le nombre de cellules créées est égal au nombre de cellules détruites.

Ex : Muqueuse intestinale : 48h
 Foie, rein : quelques mois ou années
 Cœur, cerveau : 100 ans (ces cellules ne se divisent presque pas)

Or les rayonnements peuvent supprimer l'apoptose, il y a formation d'un cancer ; ou bien l'accélérer, on observe alors une apoptose radio-induite.

I Courbes de survie

Dans le cas le plus simple de l'étude du nombre de cellules survivantes en fonction de la dose reçue, on distingue deux cas typiques de courbes de survie.

q Cellules bactériennes :

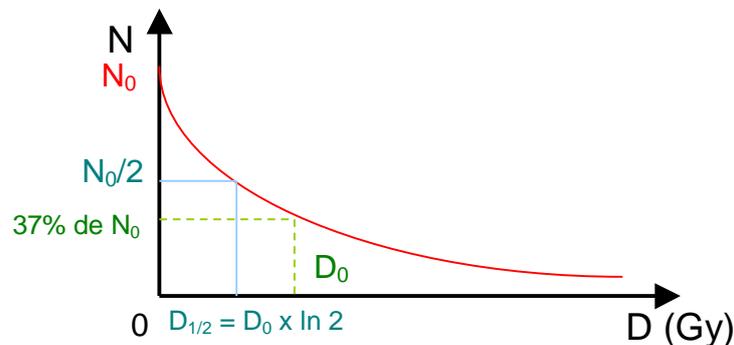
$$N = N_0 e^{-D/D_0}$$

N est le nombre de cellules survivantes

N_0 est le nombre de cellules avant irradiation

D_0 est la radiosensibilité ou dose létale moyenne (D_{37} , 37% des cellules survivent)

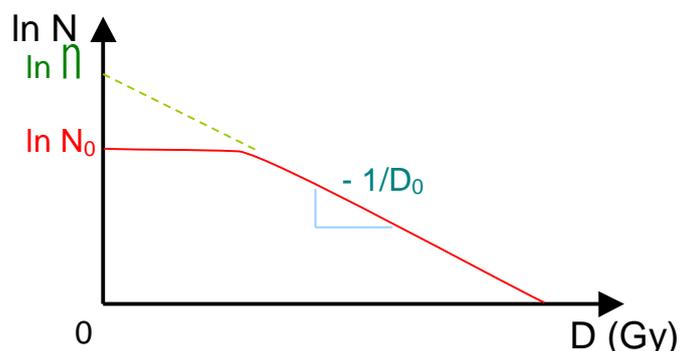
D est la dose absorbée



q Cellules de mammifères :

$$N = N_0 \overset{\text{flèche}}{\cap} e^{-D/D_0}$$

$\overset{\text{flèche}}{\cap}$ est le nombre d'expolation



Remarque : À faible dose, le nombre de cellules reste inchangé. Les enzymes de réparation peuvent donc contrebalancer les irradiations tant qu'elles ne dépassent pas un certain seuil.

I Limites de résistance aux irradiations :

D_a (Gy)	Organisme
1	Cellules de mammifères sensibles (cellules souche de moelle osseuse)
100	La plupart des bactéries
1 000	La plupart des virus
10 000	Pour certaines bactéries survivantes dans les bassins de refroidissement des réacteurs nucléaires