

UE48

enseignement coordonné :

physique, chimie, toxicologie, santé publique, environnement, galénique, sémiologie, oncologie, pharmacie clinique...

RADIOACTIVITÉ ET APPLICATIONS PHARMACEUTIQUES

Responsable de l'UE : Pr Florence Agnely

Responsable TP : Dr Ghazlene Mekhloufi

Rôles du pharmacien dans ce domaine

- **À l'officine :**



- **Acteur de santé publique** et d'aide à la sécurité civile (conseil pollution, réseau sécurité)

radioactivité : enjeu de santé publique (*Tchernobyl, Le Tricastin, La Hague, Fukushima, Zaporijia...*)

- Rôle dans le dispositif de **radioprotection** (ex : délivrance des comprimés d'iodure de potassium)

- **Information du patient** sur les examens qu'il va subir (imagerie médicale) et sur les traitements

Rôles du pharmacien dans ce domaine

- **À l'hôpital :**



Radiopharmacie : regroupe toutes les activités de la pharmacie hospitalière (gestion, approvisionnement, préparation, contrôle, dispensation) autour d'un médicament particulier : le médicament radiopharmaceutique destiné au **diagnostic ou à la thérapie**.

↳ *Débouché méconnu actuellement en plein essor*

Collaboration avec les collègues du radiodiagnostic et de la radiothérapie

Rôles du pharmacien dans ce domaine

- **Dans l'industrie :**

- **Radiostérilisation** : méthode de stérilisation industrielle (dispositifs médicaux)

- Chimie analytique (sources scellées, réactifs...)

- Développement et production des **médicaments radiopharmaceutiques**

ex : IBA - Cis bio international, Curium PET, Amphastar...



Rôles du pharmacien dans ce domaine

- **En recherche :**



Utilisation des techniques de **scintigraphie** et plus généralement d'**imagerie**

- en **recherche clinique** chez l'animal ou chez l'homme
- **recherche en pharmacie galénique**

Objectifs de l'enseignement

Total : 23 h

12,5 h cours magistraux

+ 1,5 h cours en distanciel + 3,5 h TP + 4,5 h ED

+ Conférence radiopharmacien (1 h) : Solène Marie (KB)

- Donner des **connaissances générales sur la radioactivité et ses applications dans les domaines pharmaceutique et médical** nécessaires au pharmacien quelle que soit son orientation
- **Situer les techniques d'imagerie scintigraphiques** dans le panorama actuel des techniques d'imagerie

Évaluation

Un examen (1h15) constitué :

- de questions de cours (et TP)
- d'exercices avec applications numériques
- d'études de cas

UE 48 : Radioactivité et applications pharmaceutiques

Bases physiques de la radioactivité

Pr Nicolas HUANG

Quels rayonnements ?

- Rayonnement ionisant : rayonnement électromagnétique ou particulaire suffisamment énergétique pour ioniser la matière

Élément	Énergie de première ionisation (eV)
H	13,6
C	11,3
N	14,5
O	13,6

$$1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

(1 électron-volt = énergie cinétique E acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel U d'un volt : $E = eU$, avec e la valeur absolue de la charge électrique de l'électron)

Quels rayonnements ?

- Rayonnements particulaires :

- *particules α*

- noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}^{2+}$ (2 protons + 2 neutrons)

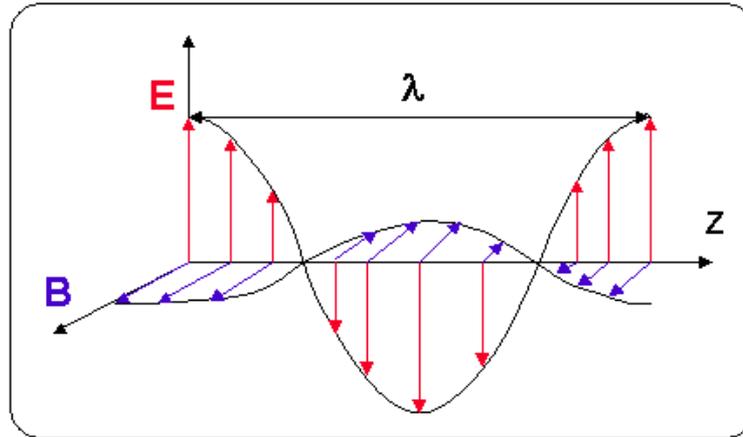
- *particules β*

- électron (noté β^- ou e^-) ou positon (noté β^+ ou e^+)

- *protons, neutrons, ions*

Quels rayonnements ?

- Rayons X et γ : rayonnements électromagnétiques de haute énergie (donc de haute fréquence ou de petite longueur d'onde).



- **Rayons X** : ondes électromagnétiques avec :
E compris entre ≈ 100 eV et ≈ 100 keV
- **Rayons γ** : ondes électromagnétiques avec :
E $> \approx 100$ keV

- **Energie d'un photon** : $E = h\nu$

avec la constante de Planck $h \approx 6,626 \times 10^{-34}$ J.s

et la fréquence du photon ν (unité SI : $\text{Hz} \equiv \text{s}^{-1}$, soit un nombre de périodes temporelles par seconde)

Nucléides

- Nucléide : atome ou noyau atomique caractérisé par son nombre de protons et de nucléons, et par son état énergétique.
- Radionucléide : nucléide instable et donc radioactif. Leur composition en protons et neutrons rend leur architecture interne plus fragile. (Les électrons ne sont pas en cause dans cette instabilité.)
- Caractéristique du noyau atomique (ou nucléide) :
 - composé de nucléons (protons, neutrons)
 - cohésion assurée par l'interaction forte (une des 4 interactions fondamentales avec les interactions électromagnétiques, gravitationnelles et faible)

Notation : $\frac{A}{Z}X$

X : symbole de l'élément chimique
A : nombre de nucléons = nombre de masse
Z : nombre de protons = numéro atomique
N = A – Z : nombre de neutrons

Le nombre de protons caractérise l'élément chimique.

Exemple : ${}^{12}_6\text{C}$, noté parfois ${}^{12}\text{C}$

Nucléides

- Classification des nucléides :

Nucléides de même Z sont des isotopes (même nombre de protons)

Exemples : isotopes de l'oxygène $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$, $^{18}_8\text{O}$ ont chacun 8 protons

remarque : $^{35,5}_{17}\text{Cl}$ signifie que la masse molaire est de 35,5 g/mol (ou 35,5 uma).

Ce nombre provient de l'abondance naturelle de chlore (Cl) sur Terre, c'est-à-dire du pourcentage en nombre d'atomes, pour un élément donné, de chacun des isotopes par rapport à l'ensemble des isotopes (naturels) trouvés sur une planète. Ainsi, pour Cl, l'abondance naturelle de $^{35}_{17}\text{Cl}$ est d'environ 76 %, et celle de $^{37}_{17}\text{Cl}$ d'environ 24 %.

Nucléides de même A sont des isobares (même nombre de nucléons)

Exemples : argon 40 ($^{40}_{18}\text{Ar}$), calcium 40 ($^{40}_{20}\text{Ca}$) ont chacun 40 nucléons

Nucléides de même N sont des isotones (même nombre de neutrons)

Exemples : azote ($^{15}_7\text{N}$) et oxygène 16 ($^{16}_8\text{O}$) ont chacun 8 neutrons

Nucléides

- Classification des nucléides :

Si les noyaux ont le même A et N (et donc Z), mais des énergies différentes, deux cas :

- Le noyau est dans un état excité avec une durée de vie courte (< 1 ps). (1 ps = 10⁻¹² seconde)

Exemple : ${}_{81}^{208}\text{Tl}^*$.

- Le noyau est dans un état excité avec une durée de vie plus longue (> 1 ps) : on parle d'« **état métastable** ». On dit que le noyau est un **isomère** du nucléide de base.

Exemple : ${}_{43}^{99\text{m}}\text{Tc}$ (isomère de ${}_{43}^{99}\text{Tc}$).

Dans les deux cas, **le noyau se désexcite par émission γ ou par conversion interne** (c'est-à-dire que l'énergie de désexcitation sert à éjecter un électron périphérique de l'atome). L'émission γ est en compétition avec la conversion interne lors de la désexcitation.

Dans le cas d'un état métastable, la désexcitation de ce noyau par émission γ est appelé « transition isomérique » (noté TI). Une transition isomérique est donc une émission gamma retardée.

Remarques :

- Lorsque le noyau est excité, les nucléons qui le composent se situent à des niveaux d'énergie supérieurs à ceux du noyau stable. (Les électrons ne sont pas en cause dans cet état excité et dans la désexcitation). Les états excités correspondent à des niveaux d'énergie du noyau qui sont quantifiés.
- Certains noyaux métastables ont une longue durée de vie (secondes, minutes voire années). La différence avec leurs noyaux stables correspondants est leur énergie, plus élevée.

Nucléides

- Caractéristique du noyau atomique (ou nucléide) :
 - charge d'un proton : $q_p = + e \approx 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 - charge d'un neutron : $q_n = 0$
 - masse d'un proton $m_p \approx 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 - masse d'un neutron $m_n \approx 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ($m_n \gtrsim m_p$)

Remarque : on a :

$$\frac{m_p}{m_e} \approx \frac{m_n}{m_e} \approx 1,84 \cdot 10^3$$

(masse d'un électron $m_e \approx 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$)

Dimension d'un noyau atomique : de 10 000 à 100 000 fois plus petites que celles d'un atome.

Deux unités de masse hors SI sont couramment utilisées en physique nucléaire : le MeV/c^2 et l'unité de masse atomique (uma).

Unités de masse

MeV/c²

La relation d'Einstein relie la masse m d'un objet isolé et au repos à son énergie E (principe d'équivalence masse – énergie) :

$$E = mc^2$$

avec c vitesse de la lumière : $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 2,998 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

La masse m d'une particule peut donc être exprimée en unité d'énergie divisée par c^2 , soit en J/c² dans les unités SI, ou en MeV/c².

$$1 \text{ eV} \approx 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

(énergie cinétique E acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel U d'un volt : $E = qU$)

Unités de masse

MeV/c²

Exemple : masse d'un électron $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg

$$E_e(\text{eV}) = m_e c^2 = \frac{(9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}) \times (2,998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1})^2}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J.eV}^{-1}} \approx 511 \cdot 10^3 \text{ eV}$$

soit $E_e \approx 511 \text{ keV} \approx 0,511 \text{ MeV}$

d'où $m_e \approx 511 \text{ keV}/c^2 \approx 0,511 \text{ MeV}/c^2$

Masse d'un électron : $m_e \approx 0,511 \text{ MeV}/c^2 \approx 511 \text{ keV}/c^2$

Masse d'un proton : $m_p \approx 938 \text{ MeV}/c^2$

Masse d'un neutron : $m_n \approx 940 \text{ MeV}/c^2$

Unités de masse

Unité de masse atomique

L'unité de masse atomique, notée u ou uma, est égale au douzième de la masse d'un atome de carbone 12.

$$1 \text{ uma} = \frac{\overbrace{12 \text{ g. mol}^{-1}}^{\text{masse d'un atome de carbone 12}}}{12 N_A} = \frac{1 \text{ g. mol}^{-1}}{6,02214 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \approx 1,6605 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

$$1 \text{ uma} \approx 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

Exemple : masse d'un électron $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

$$m_e = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}{1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = \frac{0,511 \text{ MeV}/c^2}{931,5 \text{ MeV}/c^2} \approx 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ uma}$$

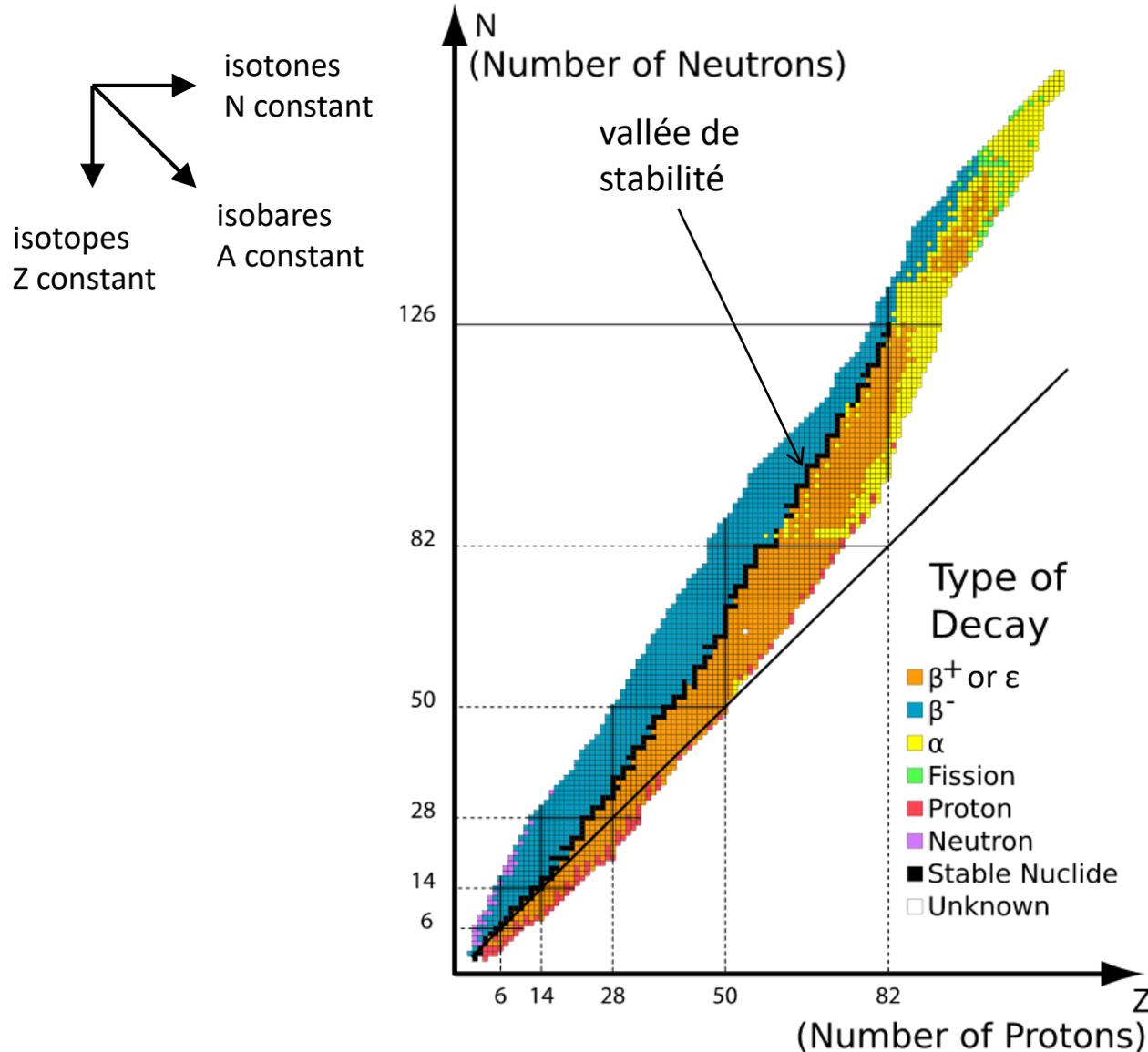
Masse d'un électron : $m_e \approx 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ uma}$

Masse d'un proton : $m_p \approx 1,007 \text{ uma}$

Masse d'un neutron : $m_n \approx 1,009 \text{ uma}$

Stabilité et instabilité des noyaux

La stabilité des noyaux est liée à la proportion des protons et neutrons qu'ils renferment.



Stabilité et instabilité des noyaux

Dans la courbe de $N = f(Z)$:

- Les noyaux stables sont situés dans la « vallée de stabilité ».
Pour les éléments légers stables, chaque nucléon contribue à la cohésion totale du noyau. **Les noyaux sont tels que $N \approx Z$.**
Pour des éléments plus lourds, chaque nucléon n'interagit plus qu'avec ses proches voisins, car l'interaction forte a une portée limitée. Ainsi, **plus le nombre de protons Z augmente** (et donc plus la répulsion électrostatique, à longue portée, est forte), **plus le nombre de neutrons N doit être grand pour stabiliser le noyau.**
- Les noyaux instables sont situés hors de la « vallée de stabilité ».
La majorité des nucléides sont instables : ce sont des noyaux **radioactifs** ou **radionucléides**.

Les noyaux instables se désintègrent spontanément au cours du temps : on parle de **désintégration** ou de **transition radioactive**.

Ces noyaux donnent naissance à d'autres noyaux qui peuvent être stables ou instables. Dans ce dernier cas, la désintégration se poursuit jusqu'à obtenir un noyau stable (on parle de filiation radioactive).

Stabilité et instabilité des noyaux

Parmi les noyaux instables :

- **Les noyaux excédentaires en neutrons** évoluent spontanément vers des noyaux stables par **désintégration β^- (émission d'un électron)**. La transformation est isobarique.

- **Les noyaux excédentaires en protons** évoluent spontanément vers des noyaux stables par **désintégration β^+ (émission d'un positon) ou par capture électronique**. La transformation est isobarique.

- Les noyaux lourds et instables pour lesquels une transformation isobarique est impossible peuvent donner naissance à des noyaux d'hélium (**désintégration α**) ou se scinder en deux noyaux (fission).

Transitions radioactives

Phénomènes primaires :

- Désintégration α (émission d'un noyau d'He)
- Désintégration β^- (émission d'un électron)
- Désintégration β^+ (émission d'un positon)
- Capture électronique (CE ou ε)

Phénomènes secondaires :

- Émission γ
- Conversion interne

Transitions radioactives

Lois de conservation

Les transformations (ou transitions) radioactives obéissent à des lois de conservation :

- conservation de l'énergie totale ;
- conservation de la quantité de mouvement ;
- conservation du nombre de nucléons A ;
- conservation de la charge électrique Z .

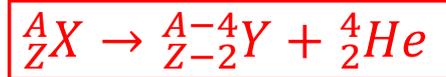
Les deux dernières lois sont connues sous le nom de *lois de Soddy*.

Transitions radioactives

Désintégration α

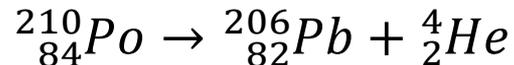
Transitions radioactives pour certains noyaux lourds (typiquement, $A > 100$).

- Equation de désintégration



avec ${}_2^4He \equiv \alpha$

Exemple : polonium-210 et plomb-206



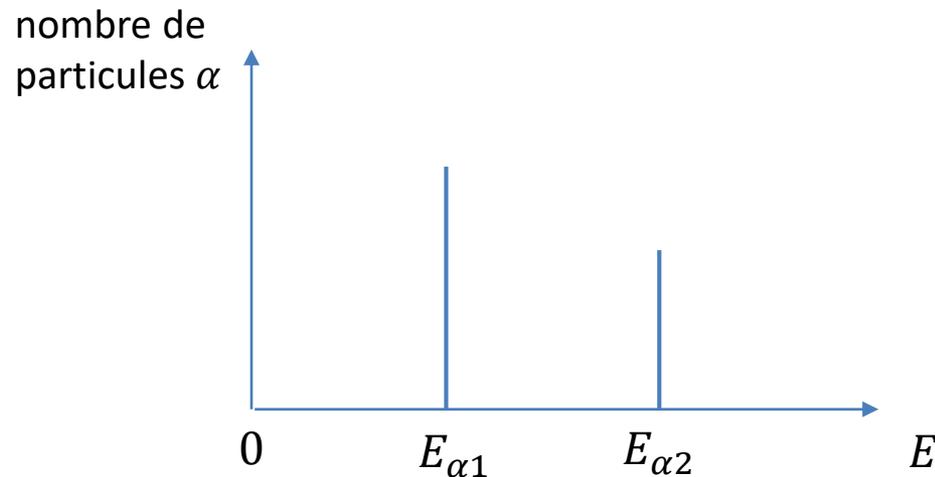
Remarque : les particules α sont chargées $+2e$, mais les équations de désintégrations ne tiennent compte que des noyaux, donc ${}_2^4He$ représente bien un noyau d'hélium. En tenant compte des électrons, on devrait écrire ${}_2^4He^{2+}$.

Transitions radioactives



L'énergie libérée lors de la désintégration α est essentiellement emportée sous forme d'énergie cinétique par la particule α , l'énergie de recul du noyau étant négligeable.

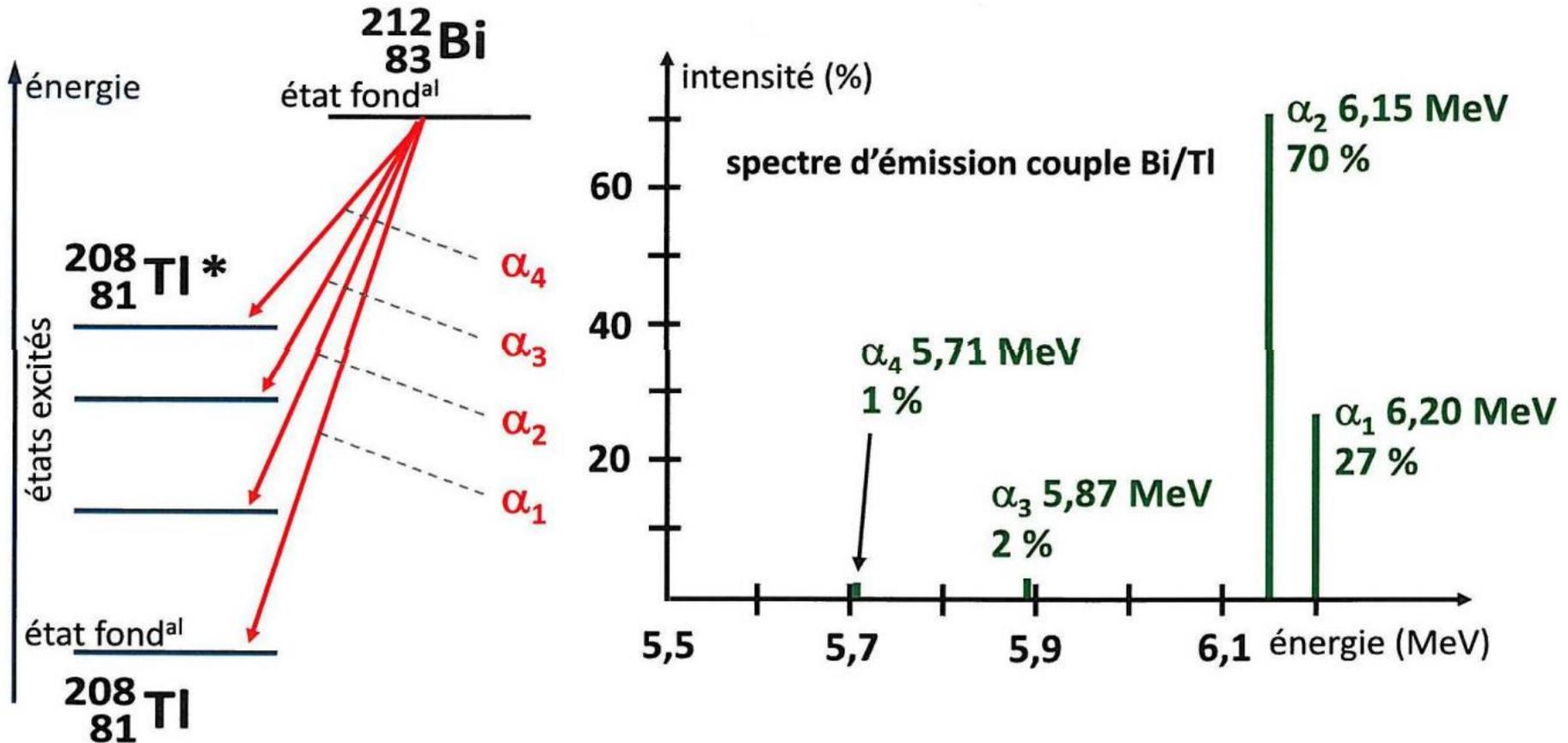
Dans le cas d'un **noyau fils excité** (ce qui est la quasi-totalité des cas, l'éjection d'un noyau rendant le noyau fils instable), la particule α n'emporte pas toute l'énergie : l'autre partie de l'énergie est emportée par une émission γ , qui est quantifiée. Par conséquent, **le spectre d'émission α (nombre de particules α en fonction de leur énergie) est discret (c'est-à-dire non continu) : on a un spectre de raies.**



Transitions radioactives

Désintégration α : schéma de désintégration et spectre

Désintégration du Bismuth-212 en Thallium-208* et en Thallium-208



- Issu de la chaîne de désintégration du ^{232}Th . Le ^{232}Th est présent naturellement sur Terre
- Utilisation possible en immunothérapie

Transitions radioactives

Désintégration β^- (noyaux excédentaires en neutrons)

- Equation de désintégration



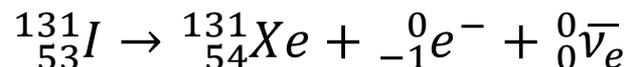
$e^- \equiv \beta^-$ électron, $\bar{\nu}_e$ antineutrino (noté $\bar{\nu}$ s'il n'y a pas d'ambiguïté avec des antineutrinos d'autres particules)

L'antineutrino est une antiparticule de charge électrique nulle et de masse extrêmement faible, qui n'interagit quasiment pas avec la matière. Cette particule interagit par le biais de l'interaction faible.

Il s'agit d'une **transformation isobarique** (A inchangé) d'un noyau **excédentaire en neutrons**.



Exemple : molybdène-99 et technétium-99 métastable ; iode 131 et xénon 131



Transitions radioactives

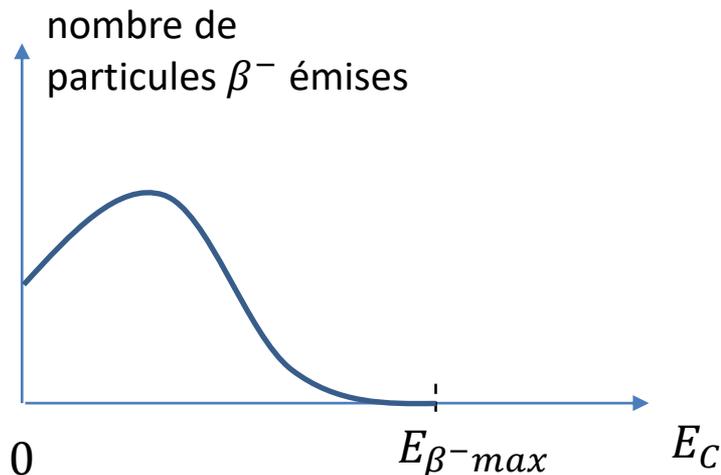


- Condition énergétique

La réaction n'est possible que si $[M_{at}(X) - M_{at}(Y)] c^2 > 0$

- Energie libérée au cours de la transition

L'énergie libérée lors de la désintégration β^- se répartit *aléatoirement* entre la particule β^- créée et l'antineutrino. **Le spectre d'émission β^- est donc continu.** L'énergie cinétique de β^- varie de 0 (lorsque $\bar{\nu}$ emporte toute l'énergie) à E_{β^-max} (lorsque $\bar{\nu}$ n'emporte pas d'énergie).

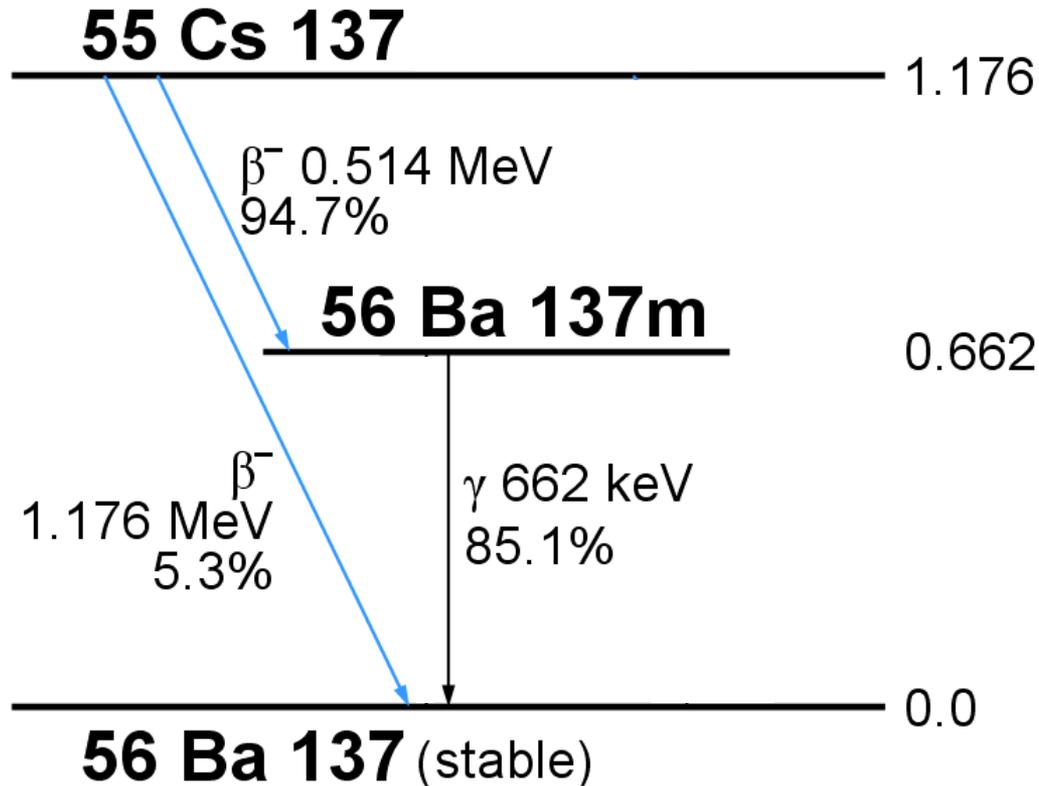


Un nombre non négligeable de particules β^- sont émises avec une très faible énergie. En effet, les particules β^- de faible énergie restent attirées par le noyau positif et s'en éloignent difficilement, d'où une accumulation de particules β^- finalement émises avec une énergie quasi nulle.

Transitions radioactives

Désintégration β^- : schéma de désintégration

Désintégration du césium-137 (^{137}Cs) en baryum-137 métastable ($^{137\text{m}}\text{Ba}$) et en ^{137}Ba



- Le césium-137 est un des produits de la fission de l'uranium.
- Utilisation en radiotoxicologie ou en radiothérapie.

Transitions radioactives

Désintégration β^+ (noyaux excédentaires en protons)

- Equation de désintégration



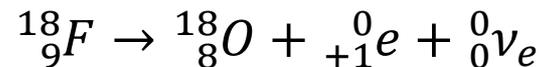
$e^+ \equiv \beta^+$ positon (ou positron ou antiélectron : il s'agit de l'antiparticule associée à l'électron), ν_e neutrino (noté ν s'il n'y a pas d'ambiguïté avec des neutrinos d'autres particules)

Le neutrino est une particule de charge électrique nulle et de masse extrêmement faible, qui n'interagit quasiment pas avec la matière. Cette particule interagit par le biais de l'interaction faible.

Il s'agit d'une *transformation isobarique* (A inchangé) d'un noyau **excédentaire en protons**.



Exemple : fluor 18 en oxygène 18



Transitions radioactives

Désintégration β^+ : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + {}^0_0 \nu_e$

- Condition énergétique

La réaction n'est possible que si

$$[M_{at}(X) - M_{at}(Y)] c^2 > 2 m_e c^2$$

avec $2 m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$

Si cette condition énergétique est remplie, le noyau excédentaire en protons se stabilise par désintégration β^+ ou par capture électronique (CE).

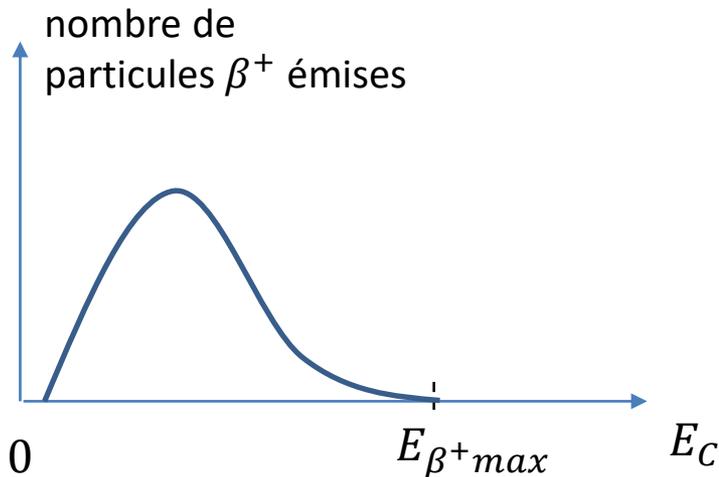
Si cette condition énergétique n'est pas remplie, le noyau excédentaire en protons se stabilise uniquement par capture électronique (CE).

Transitions radioactives

Désintégration β^+

- Energie libérée au cours de la transition

L'énergie libérée lors de la désintégration β^+ se répartit *aléatoirement* entre la particule β^+ créée et le neutrino. **Le spectre d'émission β^+ est donc continu.** L'énergie cinétique de β^+ varie de 0 (lorsque ν_e emporte toute l'énergie) à E_{β^+max} (lorsque ν_e n'emporte pas d'énergie).



Pratiquement pas de particules β^+ émises avec une énergie nulle. En effet, même avec une très faible énergie, les particules β^+ sont repoussées par le noyau (répulsion électrostatique) et s'en éloignent sans difficulté.

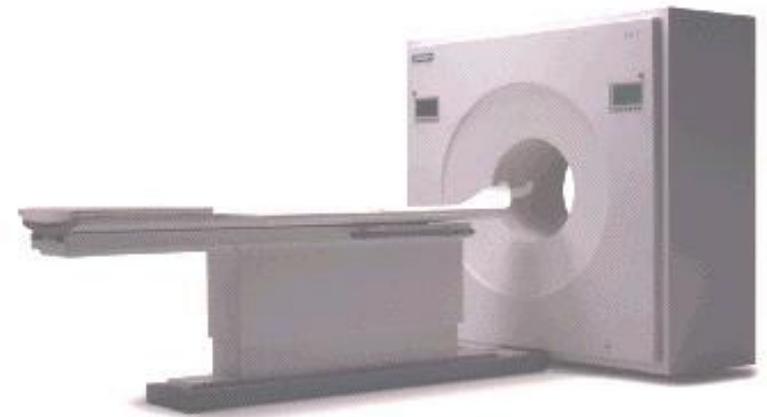
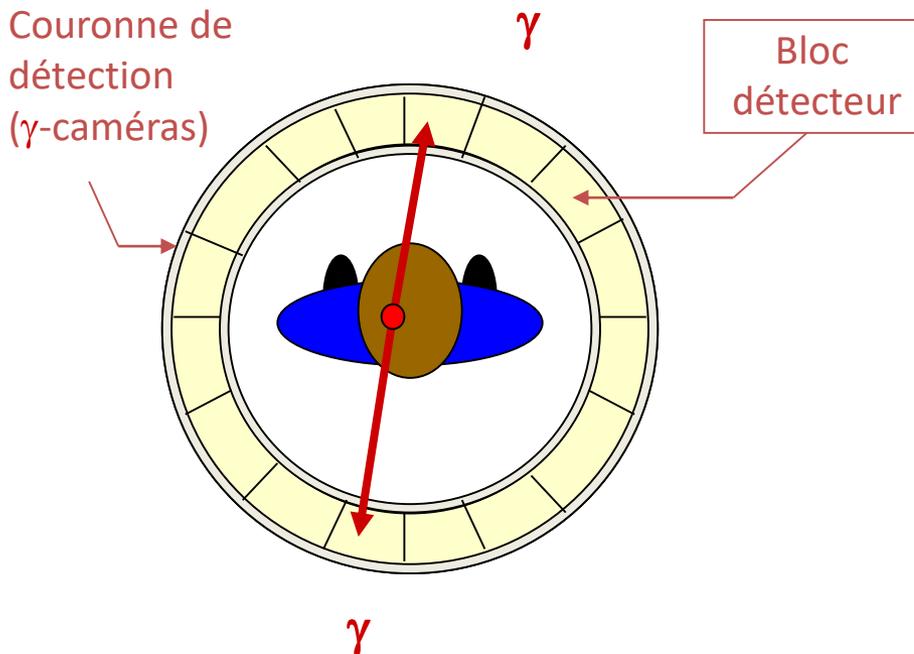
Transitions radioactives

Désintégration β^+

- Devenir de β^+

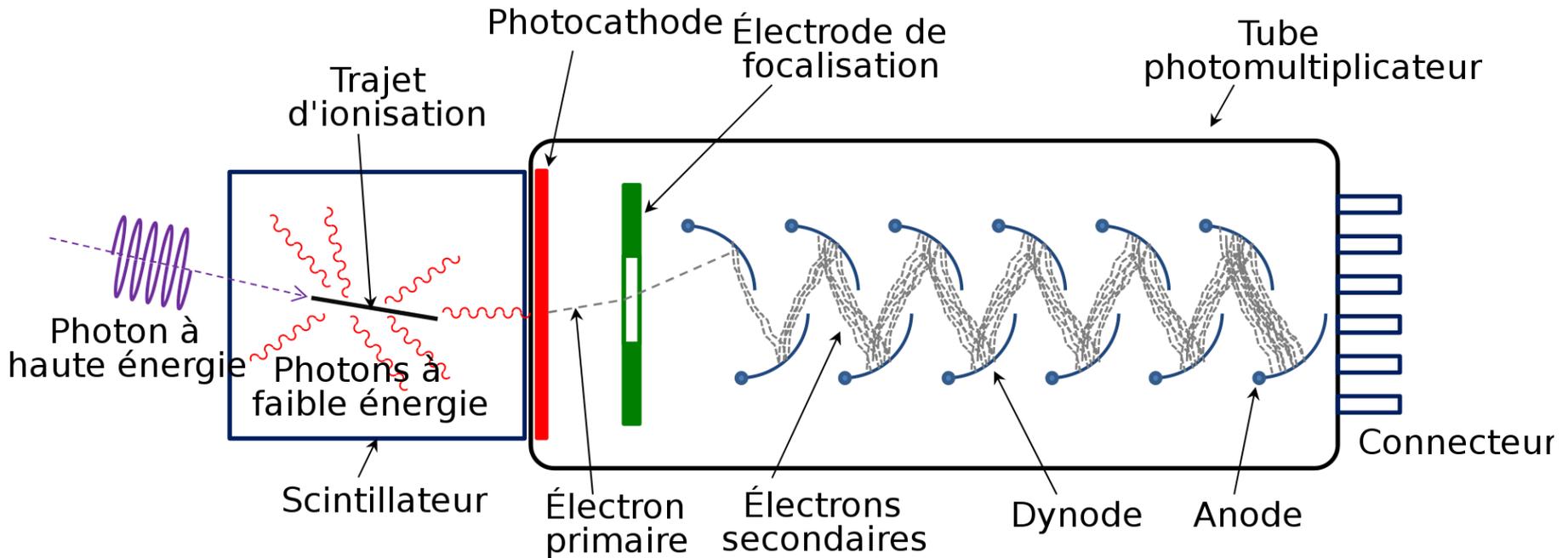
Lors de la traversée d'un matériau, le positon épuise progressivement son énergie cinétique sous forme de collisions multiples. En fin de parcours, la collision du positon avec un électron donne lieu à une réaction d'annihilation des 2 particules, qui aboutit à la formation de 2 photons γ de 511 keV, qui partent dans des directions opposées. **Le principe de fonctionnement de la TEP (Tomographie par Emission de Positons) repose sur ce mécanisme d'annihilation.**

L'émetteur β^+ le plus fréquemment utilisé pour la TEP est le fluor 18 (combiné avec du glucose).



Détecteur à scintillation

Instrument pour détecter et mesurer des rayonnements ionisants par excitation d'un « scintillateur » (matériau qui émet de la lumière à la suite de l'absorption d'un rayonnement ionisant (photon ou particule chargée)).



Exemple de scintillateurs :

- NaI(Tl)
- germanate de bismuth BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
- orthosilicate de lutétium LSO (Lu_2SiO_5 activé au cérium)

Scanner



TEP



Fusion des images

TEP/Scanner



Diagnostic:

**La lésion est localisée dans
la région aorto-pulmonaire
inaccessible pour
une Médiastinoscopie**

Transitions radioactives

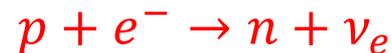
Capture électronique (CE ou ε) (noyaux excédentaires en protons)

Il s'agit de la capture par le noyau d'un électron appartenant à une couche profonde de l'atome (souvent la couche K qui est la plus profonde ; on parle alors de capture K).

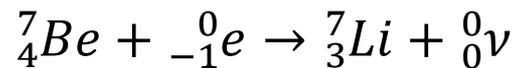
- Equation de désintégration



Il s'agit d'une *transformation isobarique* (A inchangé) d'un noyau excédentaire en protons.



Exemple : béryllium-7 et lithium-7



Transitions radioactives

Capture électronique (CE ou ϵ) : ${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_0\nu_e$

- Condition énergétique

La réaction n'est possible que si $[M_{at}(X) - M_{at}(Y)] c^2 > 0$

Par comparaison, la condition énergétique pour une désintégration β^+ est

$$[M_{at}(X) - M_{at}(Y)] c^2 > 2 m_e c^2$$

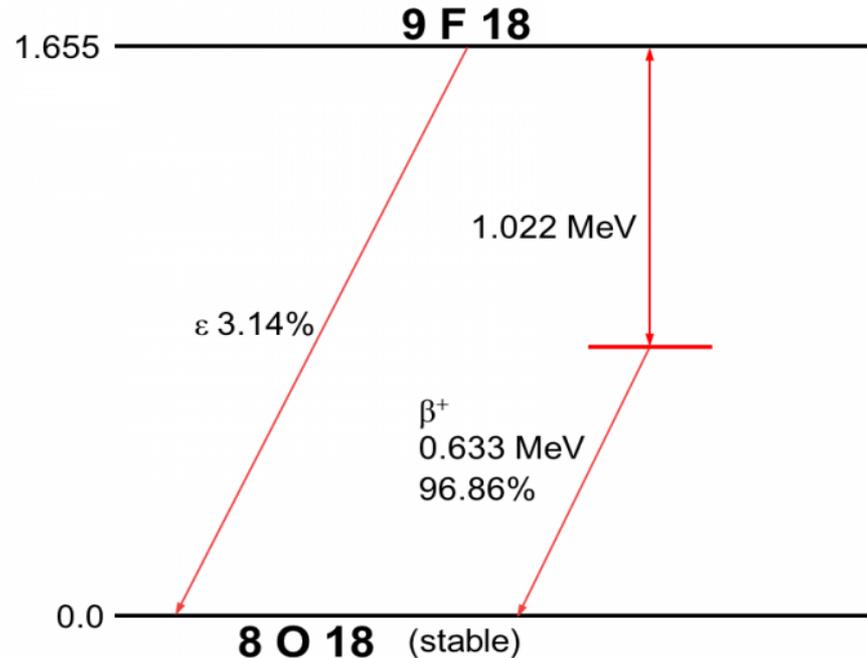
La CE se produit essentiellement pour des noyaux lourds (grands rayons nucléaires et orbites électroniques plus compactes). Les électrons capturés sont généralement issus de la couche la plus proche du noyau (couche K).

- Effets secondaires

Les effets secondaires consécutifs à une capture électronique sont identiques à ceux de la conversion interne. Suite à la **capture de l'électron d'un atome**, la **place vacante dans la couche électronique** correspondante provoque un **réarrangement du cortège électronique**. Ce réarrangement libère de l'énergie et donne naissance à des photons de fluorescence et/ou à une émission d'un électron appelé « électron Auger ».

Transitions radioactives

Exemple : schéma de désintégration du fluor-18



- Production du ^{18}F par bombardement de ^{18}O avec des protons.
- Le ^{18}F est utilisé en médecine nucléaire pour l'imagerie TEP. Le ^{18}F est intégré dans une molécule de glucose où il remplace un groupement hydroxyle pour former du fluorodésoxyglucose (^{18}F -FDG). Celui-ci est capté par les cellules, proportionnellement à leur activité métabolique, mais y reste piégé car les cellules ne pourront le consommer pour des raisons métaboliques. Les cellules cancéreuses, se multipliant sans cesse, consomment davantage de glucose que les saines, et concentrent donc davantage de ^{18}F -FDG, ce qui permet de les localiser.

Transitions radioactives

Émission γ et conversion interne

- Suite à une désintégration α , β^- , β^+ ou CE, le noyau fils peut être excité. Le noyau fils peut revenir à son état fondamental soit par **émission γ** , soit par **conversion interne**, ces deux phénomènes étant en **compétition**.

- **Émission γ et conversion interne ne sont pas des modes de désintégration**. Ce sont des **phénomènes secondaires** qui peuvent apparaître **après une désintégration α , β^- , β^+ ou CE**. On a :

- **Émission γ et conversion interne** sont des **phénomènes très fréquents**, qui se produit avec de très nombreux radionucléides. Il est rare que des désintégrations ne s'accompagnent jamais de ce processus secondaire.

Remarque : La probabilité d'une conversion interne augmente avec Z et avec la période radioactive, et augmente lorsque l'énergie de l'émission γ avec laquelle elle est en compétition diminue.

- **Pour une émission γ , on a :**



Transitions radioactives

Émission γ et conversion interne

- Dans la conversion interne, l'énergie excédentaire du noyau fils excité est transféré à un des électrons orbitaux, qui est expulsé de l'atome. On a :



- L'énergie cinétique E_C de l'électron émis sera :

$$E_C = E - W$$

avec E énergie de transition et W énergie de liaison de l'électron.

- Suite à une **conversion interne**, la **place vacante dans la couche électronique** correspondante provoque un **réarrangement du cortège électronique**. Ce réarrangement libère de l'énergie et donne naissance à des photons de fluorescence et/ou à une émission d'un électron appelé « électron Auger ».

Cinétiques des transitions radioactives

Activité des sources radioactives

Il est impossible de prévoir à quel moment un noyau particulier va se désintégrer : la désintégration radioactive est un phénomène **intrinsèquement aléatoire**. Il par contre possible de prévoir **statistiquement** la désintégration d'un ensemble de noyaux.

- Soit **λ la probabilité de désintégration d'un noyau par unité de temps**.
On appelle **λ la constante radioactive. Unités SI : s^{-1}** .
- Quelle est la loi de variation du nombre de noyaux pères N en fonction du temps ?

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

et donc (formules à savoir retrouver) :

$$N_0 = N(t) e^{+\lambda t}$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N(t)} = \frac{T}{\ln 2} \ln \frac{N_0}{N(t)}$$

Cinétiques des transitions radioactives

Activité des sources radioactives

- On définit la **période radioactive T** ou **demi-vie** comme étant **le temps au bout duquel la moitié des noyaux pères se sont désintégrés**. On a donc par définition :

$$N(t = T) = \frac{N_0}{2}$$

- Lien entre T et λ

On a :

$$\begin{cases} N(t = T) = \frac{N_0}{2} \\ N(t = T) = N_0 e^{-\lambda T} \end{cases}$$

d'où

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T \Rightarrow -\ln 2 = -\lambda T \Rightarrow \ln 2 = \lambda T$$

soit

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

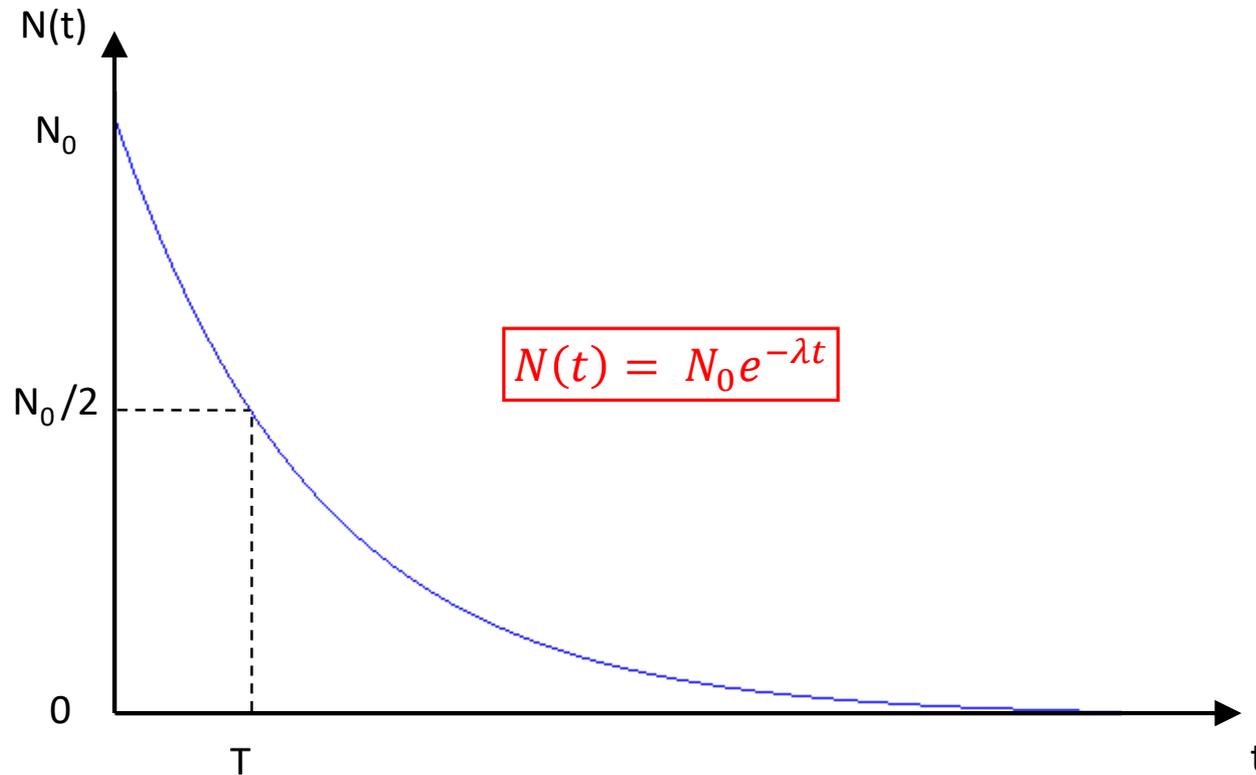
D'où

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t} = N_0 e^{-\frac{t}{T} \ln 2} = N_0 e^{\ln 2^{-t/T}} \text{ car } \ln a^n = n \ln a \text{ avec } a > 0$$

Soit

$$N(t) = N_0 2^{-t/T}$$

Cinétiques des transitions radioactives



Cinétiques des transitions radioactives

Activité des sources radioactives

Activité : nombre de désintégrations de noyaux pères par unité de temps.

Unités SI : $s^{-1} \equiv \text{Bq}$

Un becquerel (Bq) correspond à une désintégration par seconde.

Autre unité : le curie (Ci), qui est l'activité de 1 gramme de radium 226 ($T \approx 1600$ ans).

$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

On a :

$$A(t) = \lambda N(t)$$

On retrouve donc, avec $A(t = 0) = A_0$:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \text{ ou } A(t) = A_0 2^{-t/T}$$

et

$$A(t = n T) = \frac{A_0}{2^n}$$

Cinétiques des transitions radioactives

Activité des sources radioactives

Comment évolue la masse des atomes radioactifs en fonction du temps ?

Lien entre la masse des atomes et le nombre de noyaux, et donc avec l'activité ?

Soit $N(t)$ le nombre de noyaux radioactifs et $m(t)$ la masse totale des atomes correspondants.

On donne la masse molaire d'un noyau M_{mol} et le nombre d'Avogadro N_A .

On a :

$$m(t) = N(t) \times \underbrace{\frac{M_{mol}}{N_A}}_{\text{masse d'un atome}}$$

soit

$$m(t) = \frac{A(t)}{\lambda} \frac{M_{mol}}{N_A}$$

soit

$$m(t) = \frac{A(t)}{\ln 2} T \frac{M_{mol}}{N_A}$$

Cinétiques des transitions radioactives

Evolution des populations des noyaux pères et fils en fonction du temps

- Quel est la loi de variation du nombre de noyaux fils en fonction du temps ?

Deux cas possibles : le noyau fils est stable ou le noyau fils est instable.

Cas 1 : le noyau fils est stable

Soit X_1 le radioélément père, et $N_1(t)$ le nombre de noyaux radioactifs pères présent à l'instant t . Le radioélément père X_1 est caractérisé par :

λ_1 constante radioactive

$$N_1(t = 0) = N_{10}$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} N_1(t) = 0$$

On a :

$$N_1(t) = N_{10}e^{-\lambda_1 t}$$

Soit X_2 le noyau fils, et $N_2(t)$ le nombre de noyaux fils présent à l'instant t . Le noyau fils X_2 est caractérisé par :

$$N_2(t = 0) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} N_2(t) = N_{10}$$

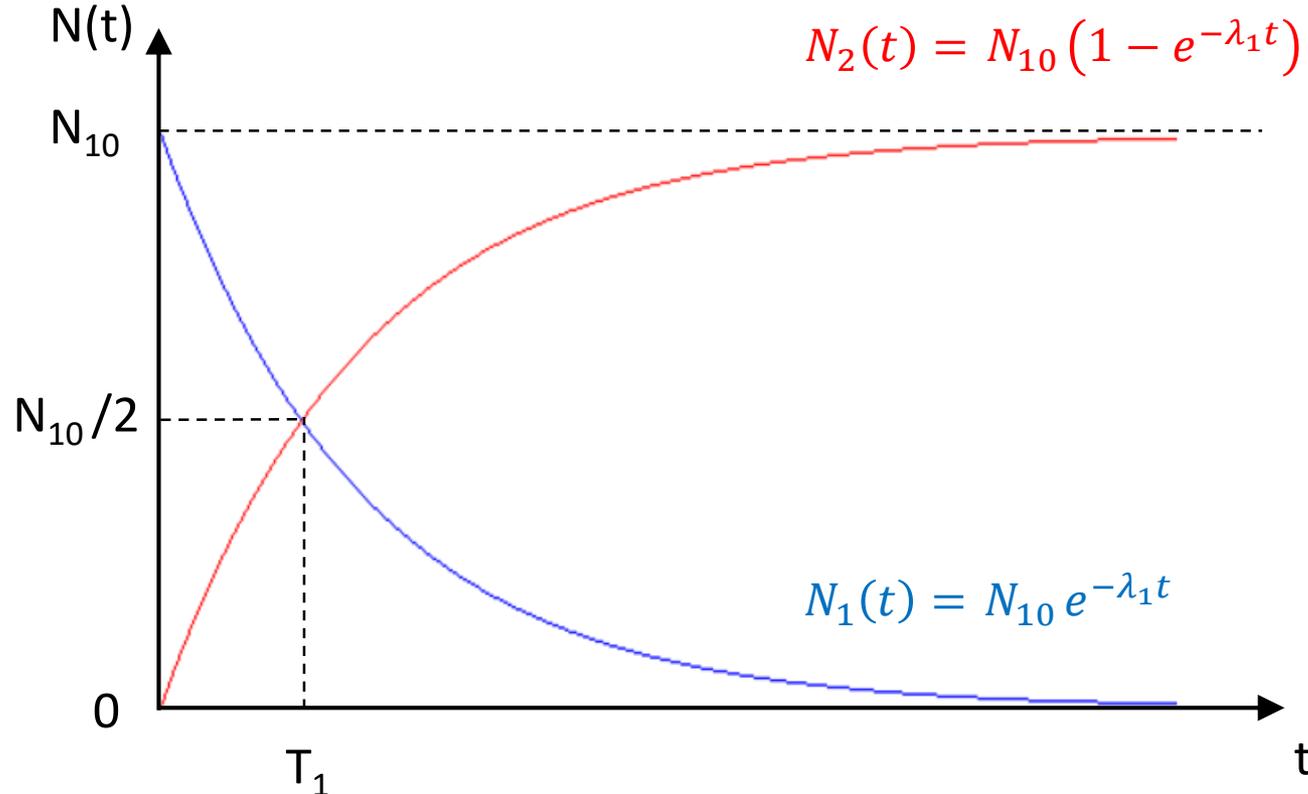
Cinétiques des transitions radioactives

Evolution des populations des noyaux pères et fils en fonction du temps

Cas 1 : le noyau fils est stable

- Le nombre de noyaux fils X_2 produits est égal au nombre de noyaux pères X_1 désintégrés. On a :

$$N_2(t) = N_{10} - N_{10}e^{-\lambda_1 t} \Rightarrow \boxed{N_2(t) = N_{10}(1 - e^{-\lambda_1 t})}$$



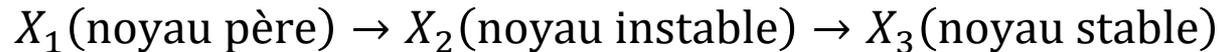
Remarque : les courbes se croisent en $t = T_1$, et $N_1(T_1) = N_2(T_1) = \frac{N_{10}}{2}$ 47

Cinétiques des transitions radioactives

Evolution des populations des noyaux pères et fils en fonction du temps

Cas 2 : le noyau fils est instable

On considère la filiation suivante :



On s'intéresse à $A_1(t)$ et $A_2(t)$. Les noyaux X_1 et X_2 ont respectivement pour constantes radioactives λ_1 et λ_2 . Les conditions initiales sont :

$$\begin{aligned} N_1(t = 0) &= N_{10} \\ N_2(t = 0) &= N_3(t = 0) = 0 \end{aligned}$$

On a :

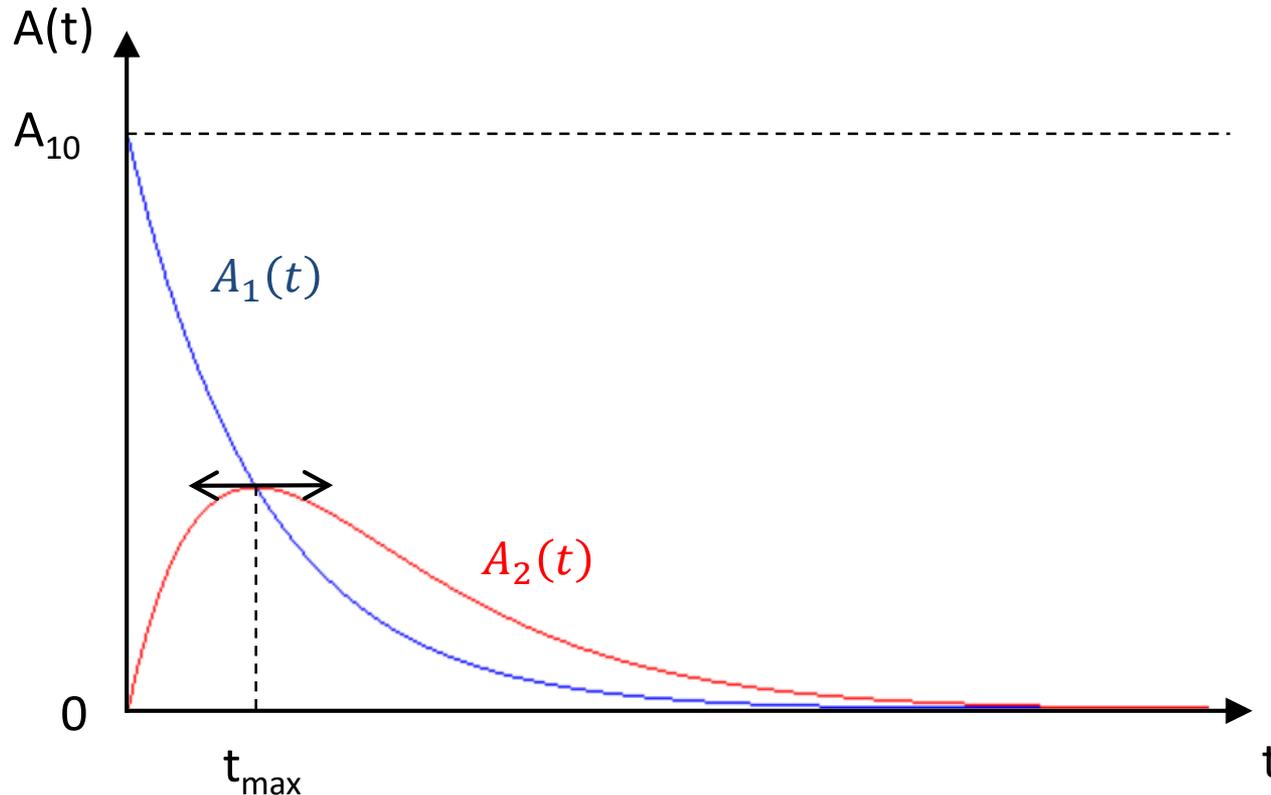
$$N_1(t) = N_{10}e^{-\lambda_1 t}$$

On peut montrer que :

$$N_2(t) = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Cinétiques des transitions radioactives

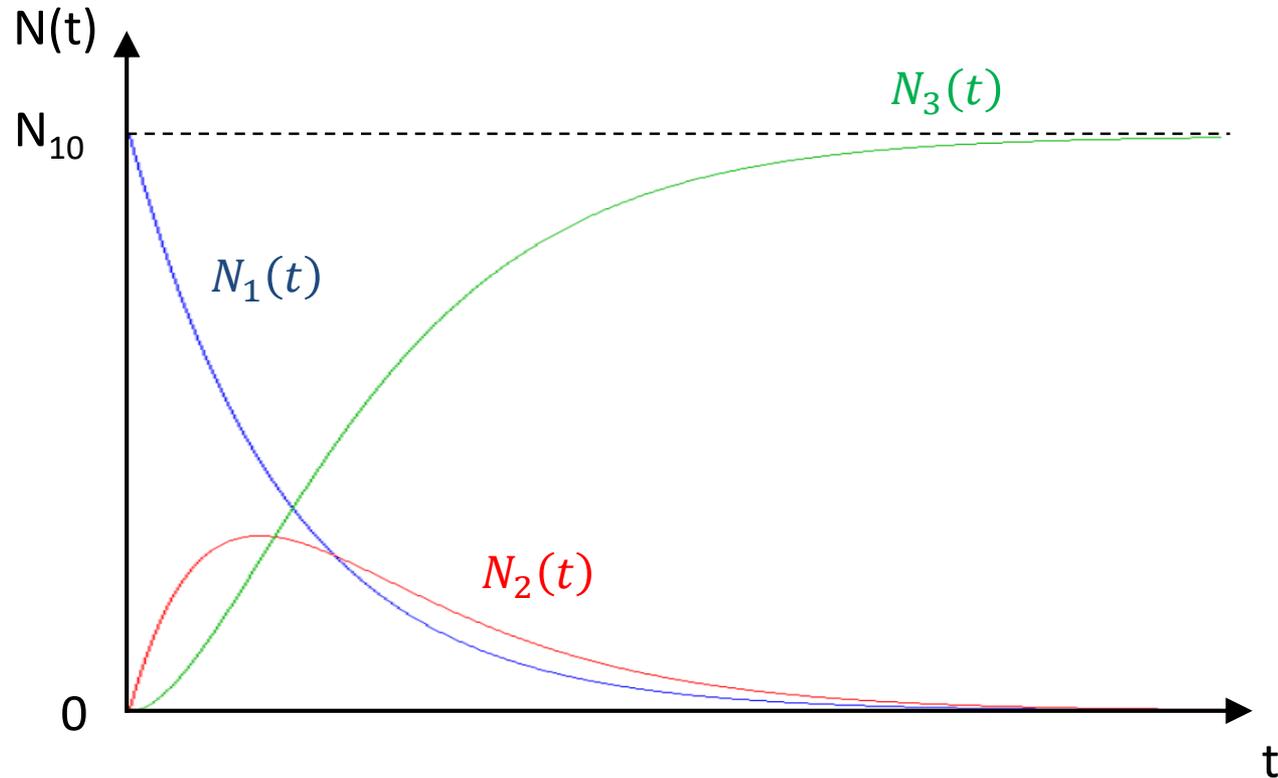
Courbe des variations des activités des noyaux X_1 et X_2 en fonction du temps



Remarque : Pas d'activité pour le noyau X_3 qui est supposé stable.

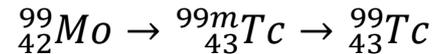
Cinétiques des transitions radioactives

Courbe des variations des nombres des noyaux X_1 , X_2 et X_3 en fonction du temps



Cinétiques des transitions radioactives

Exemple : générateur de technétium 99m dans les services de médecine nucléaire
(« vache à technétium »)



Pour le molybdène-99 (émission β^-) : $T_1 \approx 66$ h .

Pour le technétium-99m (émission γ) : $T_2 \approx 6$ h. Cette période convient pour des acquisitions d'images scintigraphiques, mais est trop courte pour pouvoir conserver le technétium 99m plus d'une journée.

La production maximale de ${}_{43}^{99m}\text{Tc}$ à partir du ${}_{42}^{99}\text{Mo}$ est atteinte en un temps t_{max} . On peut montrer que :

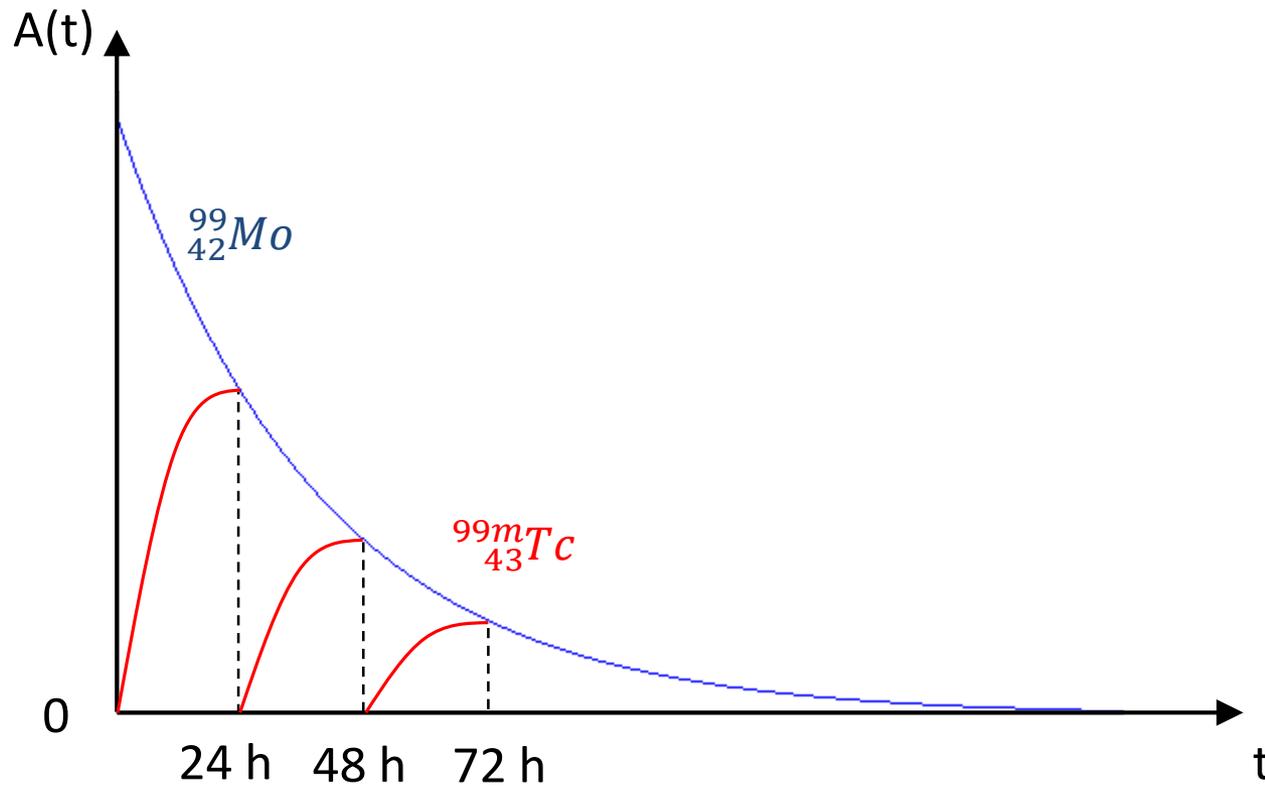
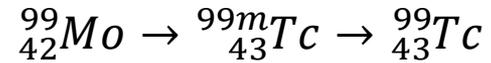
$$t_{max} = \frac{1}{\ln 2} \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} \approx 23 \text{ h}$$

La quantité de technétium est ainsi prélevée toutes les 23 heures environ pendant plusieurs jours successifs (séparation du molybdène par chromatographie sur colonne). **Cette technique permet d'effectuer les examens scintigraphiques nécessitant du technétium 99m pendant plusieurs jours, et ce à partir d'une seule livraison de molybdène.**

Remarque : La scintigraphie osseuse repose sur la fixation dans les structures osseuses de molécules phosphatées marquées au technétium-99m. Le radiopharmaceutique est injecté par voie intraveineuse. L'imagerie se fait par détection des rayons γ grâce à des gamma-caméras. Il existe également la scintigraphie pulmonaire, rénale, cérébrale, thyroïdienne, cardiaque.

Cinétiques des transitions radioactives

Exemple : générateur de technétium 99m dans les services de médecine nucléaire
(« vache à technétium »)



Cinétiques des transitions radioactives

- **Période effective et période biologique d'un radioélément**

Des radionucléides peuvent être introduits dans l'organisme ou dans un organe pour diverses raisons, soit naturelles (potassium-40, radon, etc.), soit artificielles (diagnostic ou thérapie). Ils peuvent être éliminés :

- par désintégration physique, caractérisée par la période radioactive ou demi-vie T ;
- par élimination biologique, caractérisée par la période biologique T_b .

La période biologique T_b est le temps au bout duquel la quantité du radioélément introduite dans l'organisme ou dans un organe a été réduite de moitié par voies biologiques (métabolisme, excrétion). La période biologique dépend des caractéristiques chimiques du radioélément et de la molécule à laquelle elle appartient, et de leurs interactions avec l'organisme ou organe.

La période effective T_{eff} est le temps au bout duquel la quantité du radioélément introduite dans un organisme a été réduite de moitié par désintégration physique ou par voies biologiques. T_{eff} dépend de T et T_b , et on a : $T_{\text{eff}} < T$ et $T_{\text{eff}} < T_b$.

On a :

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_b}$$

soit

$$T_{\text{eff}} = \frac{T T_b}{T + T_b}$$

Exemples :

- iode 131 : $T = 8$ jours, $T_b \approx 80$ jours (thyroïde normale adulte), $T_{\text{eff}} = 7,3$ jours
- carbone 14 : $T = 5\,730$ ans, $T_b = 40$ jours (corps humain adulte), $T_{\text{eff}} = 40$ jours

Examens

- Pour les équations :

On a :

$$N_1(t) = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

A.N. :

$$N_1(t = 6,00 \text{ h}) = 1,00 \times 10^{-5} \text{ mol} \times e^{-\frac{\ln 2}{15,0 \text{ h}} \times 6,00 \text{ h}}$$

$$N(t) = 7,58 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

Examens

- Conversions d'unités de mesure

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3$$

$$10 \text{ cm}^3 = 0,01 \text{ dm}^3 = 0,01 \text{ L}$$

$$1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ }\mu\text{L} = 1 \text{ mm}^3$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3 \approx \text{masse volumique de l'eau à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

La radioactivité sur Terre

- Vidéo de cours

Voici un lien vers une vidéo qui servira de cours en distanciel (équivalent à 30 min de cours) sur les bases physiques en radioactivité. La vidéo est en anglais, mais des sous-titres en français sont disponibles. Attention pour les sous-titres en français : l'abréviation erronée "ms" est utilisée pour microsievverts (l'abréviation adéquate aurait été μSv). Pour la définition du Sievert, voir cours de radioprotection.

The Most Radioactive Places on Earth – Derek Muller

<https://www.youtube.com/watch?v=TRL7o2kPqw0>

Une question très simple issue de cette vidéo sera posée à l'examen.