La détermination du volume sanguin est un examen de marquage cellulaire isotopique réalisé in vitro qui nécessite le recours simultané à deux médicaments radiopharmaceutiques :

- L'albumine humaine iodée marquée à l'iode 125 (Seralb®) pour déterminer le volume plasmatique (activité utilisée pour le marquage = 0,2 MBq)
- Le pyrophasphate stanneux (Technescan PYP®) pour le traitement des hématies avant marquage au technétium 99m pour déterminer le volume globulaire (activité utilisée pour le marquage = 4 MBq)

L'iode-125 présente une période physique de 59,4 jours. Il décroît en tellure stable (^{125}Te) par capture électronique (100 %).

Seulement 6,7 % de la désintégration de l'iode-125 conduisent à un état énergétique instable et à l'émission de rayonnements gamma dont l'énergie moyenne est de 35,5 keV. L'iode-125 est donc un faible émetteur de rayonnements gamma dont la détection est cependant rendue efficace par les rayons X du tellure-125 produit par décroissance (K_{alpha} = 27 keV ; $K_{bêta}$ = 31 keV).

Le technétium-99 métastable (^{99m}Tc) est obtenu à partir d'un générateur (^{99}Mo/^{99m}Tc) contenant du molybdène-99 (^{99}Mo) et décroît en émettant principalement un rayonnement gamma d'une énergie de 140 keV, et selon une période radioactive de 6,02 heures, pour donner du technétium-99 (^{99}Tc) qui, au regard de sa longue période de $2{,}13 \times 10^5$ années, peut être considéré comme quasi stable.

Données :

- équivalent énergétique de l'unité de masse atomique : $1\ u = \ 931{,}5\ \mathrm{MeV}/c^2$
- masses atomiques : $M_{at}\left(^{125}I\right) = 124{,}904631\ u$ et $M_{at}\left(^{125}Te\right) = 124{,}904431\ u$
- numéro atomique Z de l'iode : 53
- numéro atomique Z du molybdène : 42

Question 1

a) Écrire l'équation de désintégration de l'iode-125 en tellure-125 stable. (2 points)

$$^{125}_{53}I + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{125}_{52}Te + {}^{0}_{0}\nu_e$$

b) Calculer la constante radioactive λ (en j^{-1}) et la durée de vie moyenne τ (en j) de l'iode-125. (2 points + 2 points)

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{59{,}4\ \mathrm{j}} = 1{,}17 \times 10^{-2}\ \mathrm{j}^{-1}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = \frac{59{,}4\ \mathrm{j}}{\ln 2} = 85{,}7\ \mathrm{j}$$

La « durée de vie moyenne » τ est en fait un temps caractéristique de désintégration que l'on retrouve dans l'équation :

$$A(t) = A_0\ e^{-\frac{t}{\tau}} = A_0\ e^{-\lambda t} = A_0\ e^{-\frac{\ln 2}{T}t}$$

Le temps τ est donc le temps pour lequel l'activité a été divisée par $e = 2{,}71828$ …

Cette question a été posée en 2016-2017 pour le sodium-24.

c) Quelle est la signification physique de la constante radioactive ? (2 points)

Probabilité de désintégration par unité de temps.

d) Quelle est l'énergie libérée lors de la désintégration de l'iode-125 en tellure-125 stable ? (3 points)

En notant Q cette énergie :

$$Q = [M_{at}(X) - M_{at}(Y)]\, c^2 = [(124{,}904631 - 124{,}904631) \times 931{,}5\ \text{MeV}/c^2] \times c^2$$

$$Q = [M_{at}(X) - M_{at}(Y)] = 0{,}1857\ \text{MeV}$$

e) Par quelle particule est emportée l'énergie libérée au cours de la transition radioactive ? (2 points)

Par le neutrino électronique ${}^{0}_{0}\nu_e$.

f) Quel autre type de désintégration permettrait théoriquement d'obtenir du tellure-125 à partir de l'iode-125 ? Cette désintégration est-elle énergétiquement possible ? Justifier. (2 points + 2 points)

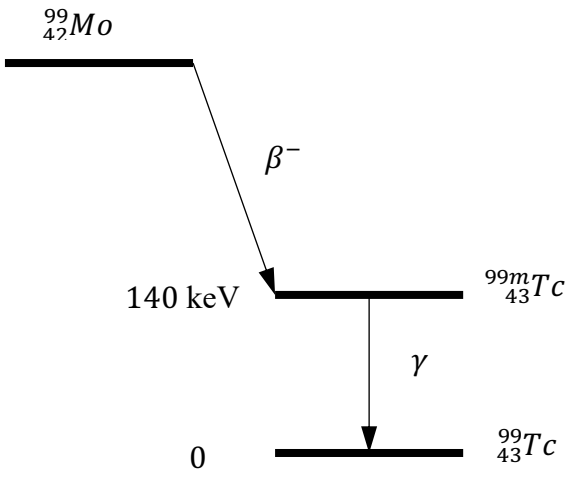
Une désintégration bêta moins. Cette désintégration n'est pas énergétiquement possible, car la condition énergétique n'est pas remplie : $[Q = 0{,}1857\ \text{MeV}] < [2\, m_e\, c^2 = 1{,}022\ \text{MeV}]$.

g) Écrire l'équation de désintégration de l'iode-125 en tellure-125 stable. (2 points)

$${}^{99}_{42}Mo \rightarrow {}^{99m}_{43}Tc + {}^{0}_{-1}e^- + {}^{0}_{0}\overline{\nu_e}$$

h) Donner le nom et expliquer brièvement le phénomène qui se produit pour 93,3 % de la désintégration de l'iode-125 et qui explique les émissions de rayons X du tellure-125. (1 point)
Conversion interne : l'énergie excédentaire du noyau fils excité est transférée à un des électrons orbitaux, qui est expulsé de l'atome, laissant une place vacante dans la couche électronique. Cela provoque un réarrangement du cortège électronique et l'émission de photons de fluorescence X et/ou à une émission d'un électron appelé « électron Auger ».
Remarque : émission γ et conversion interne sont des phénomènes secondaires très fréquents, qui se produisent avec de très nombreux radionucléides.

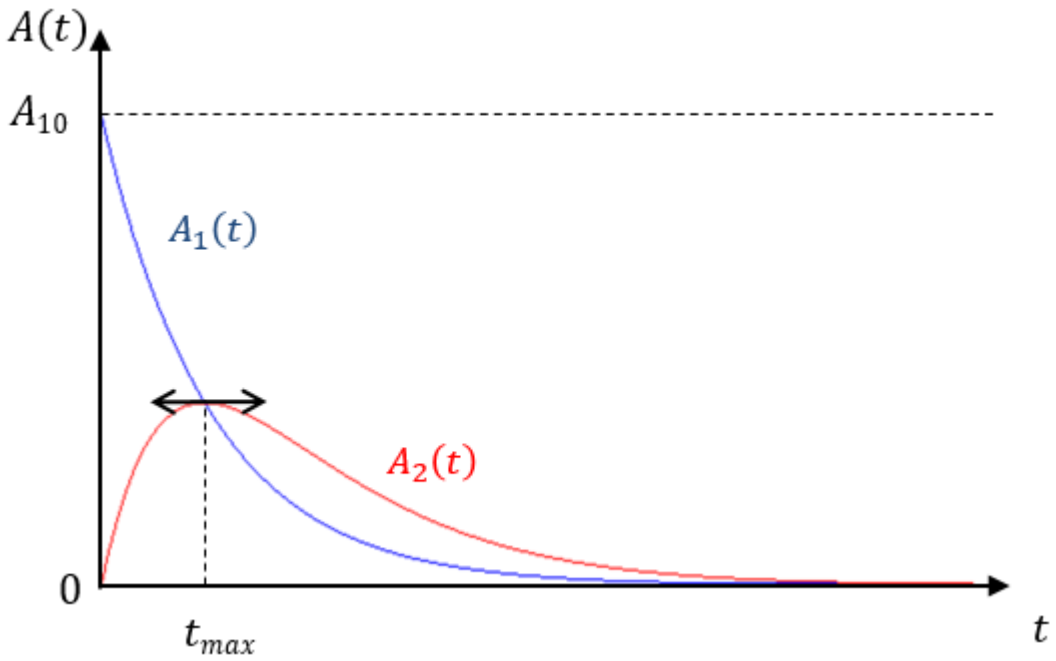
i) À partir des données de l'énoncé, donner le schéma de désintégration simplifié du molybdène-99 en technétium-99 en précisant le type de désintégration. L'énergie du niveau du technétium-99 métastable sera précisée (l'énergie du niveau du technétium-99 étant pris à zéro). (2 points)



Flèche oblique vers la droite pour β^- car le nombre de protons augmente.

j) Donner l'allure des courbes des activités du molybdène-99 et du technétium-99m en fonction du temps (en supposant que l'activité du technétium-99m est nulle au temps initial et qu'il n'y a pas de prélèvement de technétium-99m dans le temps). (2 points)

Avec A_1 l'activité du molybdène-99 et A_2 celle du technétium-99m :



Question 2

Le flacon de Seralb® utilisé pour le marquage plasmatique présente une activité de 320 kBq à calibration le 18/04/2025. Sachant que le marquage est réalisé le 30/04/2025 et que le flacon contient un volume de produit de 2 mL :

a) Calculer l'activité du flacon le jour de son utilisation. (3 points)

$$A = A_0\, e^{-\lambda t} = A_0\, e^{-\frac{\ln 2}{T_p}\Delta t} = 320\ \text{kBq}\ e^{-\frac{\ln 2}{59.4\ \text{j}}\ 12\ \text{j}} = 278\ \text{kBq}$$

b) Calculer le volume de produit qui sera utilisé pour le marquage. (2 points)

On utilise une activité de 0,2 MBq pour le marquage soit 200 kBq et le flacon de Seralb® contient 278 kBq dans 2 mL le jour de l'utilisation.

V = 200 kBq × 2 mL / 278 kBq = 1,44 mL

Question 3

La dose efficace de l'iode 125 et du technétium 99m dans cette indication sont de 0,3 mSv/MBq et 7 µSv/MBq, respectivement. Calculer en Sv la dose efficace totale reçue par un patient pour cet examen. (3 points)

Dose efficace iode 125 : 0,3 mSv/MBq × 0,2 MBq = 0.06 mSv

Dose efficace technétium 99m : 0,007 mSv/MBq × 4 MBq = 0.028 mSv

Dose efficace totale : 0,06 + 0,028 = 0,088 mSv = **$8{,}8 \times 10^{-5}$ Sv** (attention aux unités !)

Question 4

Les quantités d'iode 125 et de technétium 99m injectées au patient à la fin du marquage ont été estimées à 11 031 756 cpm et 120 297 996 cpm, respectivement. Un prélèvement sanguin a ensuite été effectué et les concentrations mesurées sur sang total en iode 125 et technétium 99m étaient 3 505 cpm/mL et 56 293 cpm/mL, respectivement.

a) Calculer le volume plasmatique. (2 points)

V_p = 11 031 759 cpm / 3 505 cpm/mL = 3 147 mL

b) Calculer le volume globulaire. (2 points)

V_g = 120 297 996 cpm / 56 293 cpm/mL = 2 137 mL

c) Calculer le volume de sang total. (2 points)

V_{st} = 3 147 mL + 2 137 mL = 5 284 mL

d) Calculer en pourcentage l'hématocrite. (2 points)

Hte = V_g/V_{st} × 100 = 2 137 mL / 5 284 mL × 100 = 40,4 %