

PREMIERE PARTIE: CONTROLE DE CONNAISSANCES (30 points)

1. QUESTIONS À CHOIX SIMPLE (12 points)

Chacune des propositions de 1 à 12 contient une seule affirmation vraie (a, ou b, ou c, ou d). Choisir la bonne affirmation en la justifiant si demandé.

Compléter le tableau en indiquant pour chaque proposition celle qui est vraie (V), sans justification, sauf si celle-ci est explicitement demandée, qu'il faudra alors rédiger brièvement sur la copie.

Données:

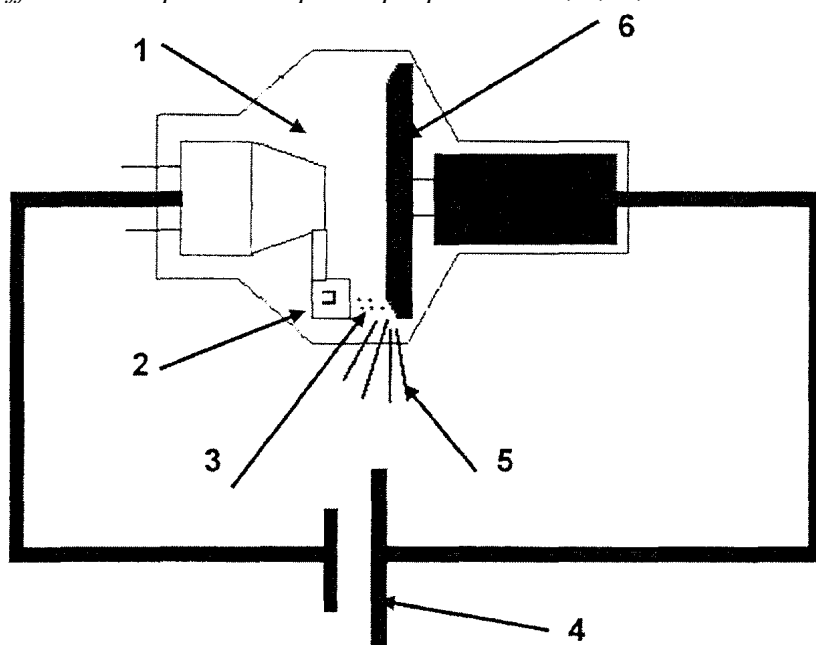
célérité de la lumière dans le vide. $C = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

charge élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$

énergie de l'atome d'hydrogène dans son niveau fondamental : $E = -13,6 \text{ eV}$

1. Le schéma légendé ci-dessous est celui d'un tube à rayons X. Choisir la réponse exacte d'association chiffres/lettres parmi les quatre propositions a, b, c, d.



- A) anode
- B) filament à la cathode
- C) électrons
- D) photons
- E) générateur de haute tension
- F) vide

- a. 1-E) 2-A) 3-D) 4-F) 5-C) 6-B).
- b. 1-F) 2-B) 3-D) 4-E) 5-C) 6-A).
- c. 1-F) 2-B) 3-D) 4-E) 5-C) 6-A).
- d. 1-F) 2-B) 3-C) 4-E) 5-D) 6-A).

2. La tension accélératrice d'un tube à rayons X vaut $U_1 = 140 \text{ kV}$. Le spectre d'émission en fonction de la longueur d'onde λ présente un aspect continu, auquel se superposent deux raies pour les longueurs d'onde 18 pm et $0,12 \text{ nm}$.

Un nouveau réglage est réalisé pour $U_2 = 60 \text{ kV}$; le spectre présente un aspect continu avec :

- a. les deux raies à 18 pm et à $0,12 \text{ nm}$
- b. une raie à $0,12 \text{ nm}$.
- c. une raie à 21 nm .
- d. la disparition des deux raies.

Justifier la bonne affirmation.

3. Le faisceau de rayons X employé en radiologie conventionnelle est filtré pour son utilisation. Cette opération de filtration :

- a. est obtenue par des filtres placés entre le patient et le capteur radiographique.
- b. est réalisée entre l'anode et la cathode du tube.
- c. minimise les photons X d'énergie maximale pour limiter l'irradiation du patient.
- d. permet d'utiliser au mieux les photons X les plus énergétiques.

4. L'énergie du niveau n de l'atome d'hydrogène est donnée par l'expression $E = -\frac{13,6}{n^2}$ en eV.

Dans le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène, on observe une radiation de longueur d'onde $\lambda = 435 \text{ nm}$:

- a. La fréquence de la radiation est de $6,9 \times 10^5 \text{ MHz}$.
- b. La radiation est émise quand l'électron passe de la couche $n = 2$ à $n = 5$.
- c. Le photon émis appartient aux ultraviolets.
- d. Cette radiation appartient à la série des raies de Balmer (transition électronique d'un état quantique de nombre principal $n > 2$ vers l'état de niveau $n = 2$).

Justifier la bonne réponse.

5. À propos de l'atténuation d'un faisceau de rayons X monoénergétiques lors de la traversée d'un filtre :

- a. Le flux du faisceau transmis décroît exponentiellement lorsque l'épaisseur de matière traversée augmente.
- b. La couche de demi-atténuation (CDA) s'exprime en m^{-1} .
- c. La CDA représente la profondeur pour laquelle le nombre de photons dans le faisceau est divisé par $\ln 2$.
- d. L'atténuation sera plus importante si l'énergie des photons augmente.

6. À propos de l'atténuation d'un faisceau de particules chargées monoénergétiques lors de la traversée de matière :

- a. Le flux du faisceau transmis décroît exponentiellement lorsque l'épaisseur de matière traversée augmente.
- b. La couche de demi-atténuation (CDA) s'exprime en m^{-1} .
- c. La pénétration d'un faisceau d'électrons est bien supérieure à celle d'un faisceau de particules alpha de même énergie.
- d. Les particules chargées lourdes provoquent plus d'ionisations en début qu'en fin de parcours.

7. Un circuit est constitué de l'association en série d'un conducteur ohmique de résistance $R = 25 \Omega$ avec une bobine d'inductance $L = 75 \text{ mH}$, de résistance négligeable, et d'un condensateur de capacité $C = 10 \mu\text{F}$. Il est soumis à une tension sinusoïdale de fréquence $f = 125 \text{ Hz}$ et de tension efficace $U = 4,4 \text{ V}$. L'expression littérale de l'impédance Z d'un circuit RLC est

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

- a. L'impédance de cette association série vaut $59 \text{ k}\Omega$.
- b. L'impédance de cette association série vaut 227Ω
- c. Le circuit est traversé par un courant électrique d'intensité efficace 60 mA
- d. La fréquence de résonance de ce circuit vaut 1154 Hz .

Justifier la bonne réponse.

8. Dans un cyclotron, le mouvement d'une particule chargée

- a. est rectiligne uniforme entre les deux dees,
- b. est indépendant de sa charge électrique.
- c. s'étudie à partir de la force magnétique qui s'exerce sur la particule entre les deux dees et de la force électrique qui s'exerce sur la particule dans chaque dee.
- d. est rectiligne accéléré entre les deux dees.

9. À propos du laser :

- a. dans un même matériau, la lumière "laser" se propage plus vite que la lumière incohérente.
- b. les photons émis par un laser sont majoritairement produits par émission spontanée.
- c. les photons émis par un laser sont majoritairement produits par émission stimulée.
- d. la distance entre les deux miroirs formant la cavité résonante est quelconque.

10. À propos de l'effet photoélectrique :

- a. La probabilité d'effet photoélectrique diminue au profit de l'annihilation lorsque le numéro atomique Z du milieu traversé augmente.
- b. Le photon incident disparaît après son interaction avec un électron lié : on parle d'absorption totale.
- c. Lorsque le photon ne parvient pas à arracher l'électron, ce dernier peut voir sa charge s'inverser et se transformer en positon.
- d. L'effet photoélectrique est responsable du flou de diffusion dans l'image radiante.

11. On considère un faisceau de rayons X traversant un écran de protection en cuivre dont l'épaisseur est de 20 mm. Le faisceau est composé de deux types de photons (faisceau "bichromatique") : photons d'énergie E_1 pour lesquels la couche de demi-atténuation (CDA1) du cuivre est 4 mm; photons d'énergie E_2 pour lesquels la couche de demi-atténuation (CDA2) du cuivre est 10 mm. À l'entrée du filtre, le débit Φ_1 (entrée) de photons d'énergie E_1 , est égal au débit Φ_2 (entrée) de photons d'énergie E_2 .

Quel est le rapport $\frac{\Phi_1(\text{sortie})}{\Phi_2(\text{sortie})}$ à la sortie du filtre ? a. 0,8 b. 2 c. $\frac{1}{8}$ d. $\frac{1}{4}$

Justifier la bonne réponse.

12. L'énergie de liaison d'un noyau :

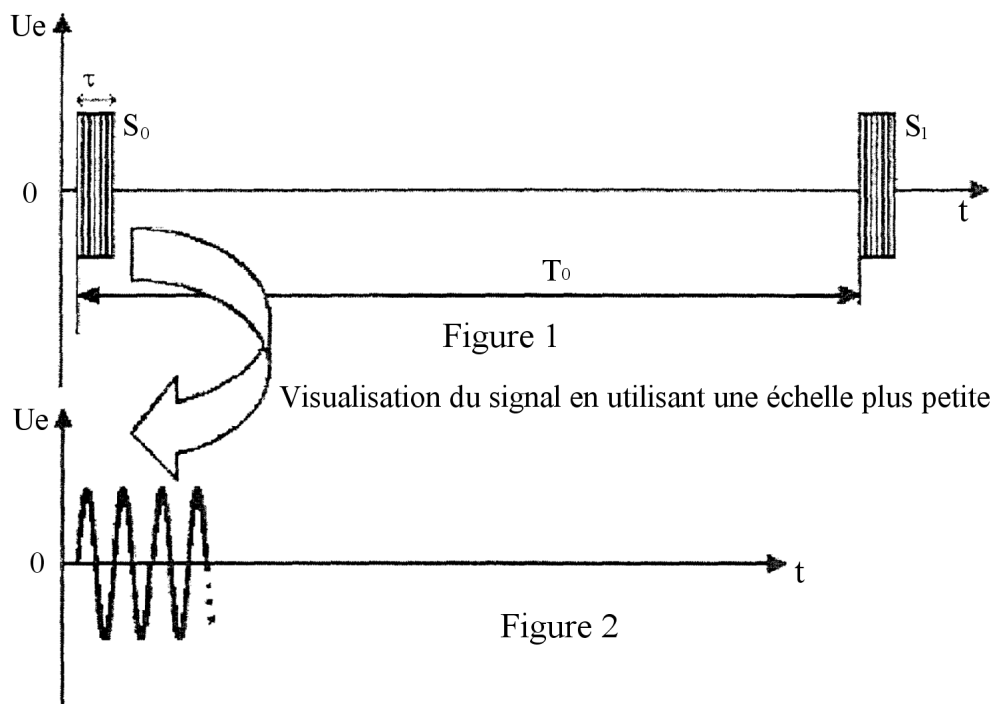
- a. est égale à l'énergie libérée lors de la dissociation du noyau constituants isolés et au repos.
- b. est la même pour tous les isotopes d'un élément chimique.
- c. est égale à l'énergie libérée lors de la formation du noyau au repos à partir de ses constituants isolés et au repos.
- c. est nulle pour un noyau stable.

Propositions ► ▼ Questions	a	b	c	d	
1					
2					À justifier
3					
4					À justifier
5					
6					
7					À justifier
8					
9					
10					
11					À justifier
12					

2. LES ULTRASONS (18 points)

Un générateur médical d'ultrasons utilisé en échographie émet des ultrasons de fréquence $f = 10,0 \text{ MHz}$. Cette onde n'est pas générée par l'émetteur en continu mais par trains d'ondes d'une durée $\tau = 2,00 \mu\text{s}$ émis à intervalle de temps $T_0 = 0,500 \text{ ms}$.

Un système d'acquisition permet de visualiser la tension U_e aux bornes de l'émetteur en fonction du temps. On obtient la représentation cidessous montrant deux trains d'ondes successifs S_0 et S_1 (figure 1). Une visualisation de S_0 est également proposée avec une échelle de temps plus petite afin de voir les détails du signal (figure 2) :



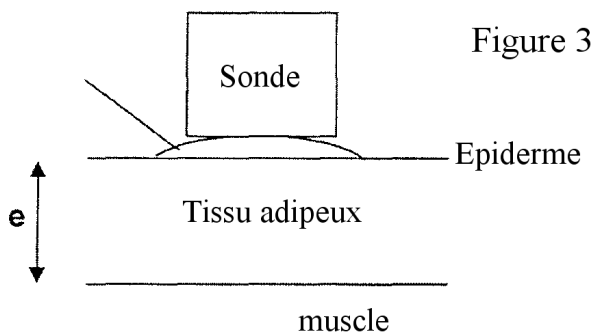
La même sonde assure l'émission d'ultrasons pendant l'excitation électrique de l'émetteur et la réception des échos provenant de la région anatomique explorée, entre deux excitations.

1. Étude de la sonde.

- 1.1. Calculer la période T_{us} des ultrasons. En déduire le nombre de périodes qui constituent un train d'ondes.
- 1.2. Quel nom porte le phénomène physique permettant à la sonde d'être à la fois émettrice et réceptrice ? Expliquer succinctement cette double propriété physique.
- 1.3. Expliquer par un calcul, pourquoi on peut dire que la sonde passe donc 99,6% de son temps de travail en réception.

2. Principe de la mesure de l'épaisseur du tissu adipeux.

Cet écho graphe permet d'acquérir des images en coupe verticale de la peau, et de mesurer l'épaisseur du tissu adipeux avant et après application d'un produit à visée amincissante. Pour simplifier, on supposera que la zone étudiée a la structure suivante représentée figure 3 ci-contre :



2.1. Expliquer pourquoi on doit placer du gel sur la peau du patient.

2.2. L'épaisseur du tissu adipeux est $d = 32 \text{ mm}$. La puissance surfacique (ou intensité) du faisceau d'ultrasons vaut à l'entrée de l'épiderme $I_0 = 94 \text{ mW.cm}^{-2}$.

Le coefficient d'absorption du tissu adipeux vaut $a = 1,15 \text{ cm}^{-1}$.

La célérité des ultrasons dans les tissus adipeux vaut $c_1 = 1450 \text{ m.s}^{-1}$.

2.2.1. On admet que les dimensions des détails observés sur une échographie sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ultrasonore employée. Quelles sont les dimensions (en m) des détails que l'on peut observer dans le tissu adipeux pour la fréquence utilisée ?

2.2.2. Calculer la durée t mise par les ultrasons pour parcourir la distance entre l'épiderme et le muscle.

2.2.3. Montrer que l'intensité I du faisceau arrivant sur l'interface tissu adipeux / muscle vaut $2,4 \text{ mW.cm}^{-2}$.

2.2.4. Calculer alors l'atténuation A en dB du faisceau d'ultrasons, à partir de la relation $A = 10 \log(I_0 / I)$.

2.3. L'impédance acoustique du muscle est $Z_2 = 1,60 \times 10^6 \text{ unités SI}$. La masse volumique du tissu adipeux est $\rho = 952 \text{ kg.m}^{-3}$. Le coefficient de réflexion de l'interface tissu adipeux / muscle se calcule à partir de la formule:

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Il donne aussi le rapport entre l'intensité du faisceau réfléchi et l'intensité du faisceau incident.

2.3.1 Exprimer l'impédance acoustique Z_1 du tissu adipeux en fonction de ρ et c_1 , puis la calculer en précisant son unité.

2.3.2 Calculer alors le coefficient de réflexion R de l'interface tissu adipeux / muscle. Montrer que le coefficient de transmission T est de 99,5%. Ces coefficients dépendent-ils du sens de la traversée par les ultrasons de l'interface ?

2.3.3. Calculer alors l'intensité I' du faisceau revenant sur l'interface tissu adipeux / épiderme.

DEUXIÈME PARTIE: PROBLÈME (30 points)

Les trois parties du problème sont indépendantes

Données pour les trois parties du problème :

<i>élément chimique</i>	<i>Tellure Te</i>	<i>Iode I</i>	<i>Xénon Xe</i>
<i>numéro atomique</i>	52	53	54

Énergie de liaison des électrons de la couche K du tellure $E_K = 31,81 \text{ keV}$

Énergie de liaison des électrons de la couche L du tellure : $E_L = 4,34 \text{ keV}$

Énergie de liaison des électrons de la couche M du tellure : $E_M = 0,82 \text{ keV}$

Formule de l'équivalence dose-énergie : $D(\text{Gy}) = \frac{E(\text{J})}{M(\text{kg})}$

D (en Gy) représente la dose absorbée en gray, E(en J) l'énergie absorbée en joule et M (en kg) la masse du corps exposé en kilogramme.

Dose équivalente en sievert : $H_T(\text{Sv}) = D(\text{Gy}) W_R$, où D est la dose absorbée en gray et W_R le facteur de pondération sans dimension.

<i>nature du rayonnement</i>	<i>électrons, rayons γ, rayons X</i>	<i>protons</i>	<i>particules α</i>
W_R	1	2	20

Dose efficace en sievert : $E(\text{Sv}) = H_T(\text{Sv}) W_T$ où W_T est le facteur de sensibilité de l'organe.

<i>nature de l'organe</i>	<i>thyroïde</i>	<i>estomac</i>	<i>poumons</i>
W_T	0,04	0,12	0,12

*masse en unité de masse atomique (u) des **noyaux** suivants*

<i>noyau</i>	<i>iode 131</i>	<i>xénon 131</i>	<i>proton</i>	<i>neutron</i>	<i>électron</i>
<i>masse (u)</i>	130,877053	130,875462	1,00728	1,00866	$5,486 \times 10^{-4}$

1 u 931,5 MeV.c⁻².

I. L'iode 123**1. Production**

L'iode 123 peut se produire à partir du bombardement d'un noyau d'antimoine $^{121}_{51}\text{Sb}$ par une particule alpha.

Écrire l'équation de cette réaction nucléaire.

2. Classification périodique.

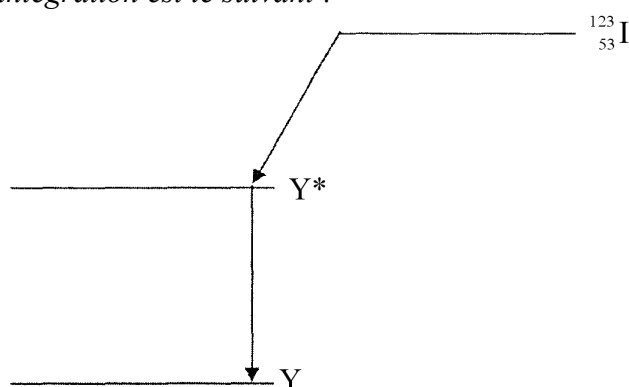
- 2.1. Rappeler le nombre maximal d'électrons que chaque sous-couche, s, p, d, f, peut contenir.
- 2.2. Donner la configuration électronique d'un atome d'iode dans son état fondamental après avoir rappelé le moyen utilisé pour retrouver l'ordre croissant de remplissage des différentes sous-couches.
- 2.3. En déduire la position (numéro de ligne et de colonne dans la classification périodique à 18 colonnes) de l'élément iode.

3. Désintégration

L'iode 123, dont la période ou demi-vie vaut $t_{1/2} = 13,2 \text{ h}$, se désintègre par capture électronique pour former un noyau Y.

On observe alors un rayonnement gamma d'énergie 159 keV et des rayons X d'énergie 27,47 keV et 30,99 keV.

Le schéma simplifié de désintégration est le suivant :



- 3.1. Écrire l'équation de la réaction correspondant à la capture électronique d'un noyau d'iode $^{123}_{53}\text{I}$. Identifier le noyau Y.
- 3.2. Expliquer pourquoi un rayonnement gamma est émis.
- 3.3. Expliquer les valeurs d'énergie des photons X produits.
- 3.4. Montrer que la constante radioactive de l'iode 123 est égale à $1,46 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

4. Scintigraphie.

L'iode 123 est utilisé pour effectuer des scintigraphies thyroïdiennes.

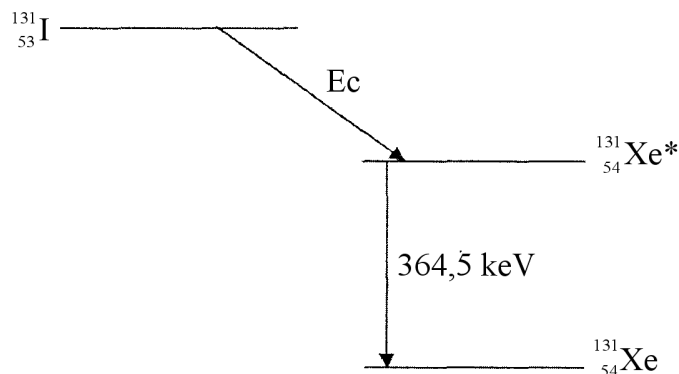
Deux heures avant l'examen on injecte par voie intraveineuse, une dose d'iode 123 qui présente une activité $A_{inj} = 7,0 \text{ MBq}$. Cet iode radioactif est métabolisé par la thyroïde de la même façon que l'isotope stable, l'iode 127. L'examen consiste d'abord à explorer la thyroïde par une caméra à scintillations qui localise et mesure le rayonnement gamma émis par l'iode radioactif : la caméra, associée à un ordinateur, permet de visualiser l'activité métabolique de la glande.

- 4.1. Calculer le nombre de noyaux radioactifs d'iode 123 injectés dans le patient.
- 4.2. L'iode 123 se répartit à $x\%$ dans la thyroïde et à $y\%$ dans le reste de l'organisme. Sachant que la fraction répartie dans l'organisme hors thyroïde sera évacuée principalement par voie rénale, on ne considérera ici que l'activité liée aux désintégrations dans la thyroïde. On mesure au début de l'examen une activité de la thyroïde qui vaut $A = 1,4 \text{ MBq}$. Que vaut, à cet instant, le taux de captation x mesurant le pourcentage d'iode fixée dans la thyroïde ?
- 4.3. Calculer la durée, en heures et en minutes, pour laquelle l'activité de la thyroïde est passée de 1,4 MBq à 0,28 MBq.
- 4.4. Cet examen entraîne au final une dose absorbée par la thyroïde de 490 mGy. Calculer la dose équivalente et la dose efficace reçue par la thyroïde.

II. L'iode 131

1. Désintégration

L'iode 131 se désintègre selon le schéma simplifié de désintégration suivant :



Sa période ou demi-vie vaut $t' = 28,04$ jours.

1.1. Écrire l'équation de la réaction de désintégration d'un noyau d'iode 131. De quel type de radioactivité s'agit-il ?

1.2. Calculer la perte de masse puis l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau d'iode 131.

1.3. Comment se partage l'énergie libérée ?

Le noyau d'iode 131 étant initialement au repos, déterminer, en keV, l'énergie cinétique maximale de la particule chargée émise. On négligera l'énergie cinétique du noyau de xénon.

2. Radio-iodothérapie

Dans le cas de certains traitements, on utilise l'iode 131 pour détruire des cellules cancéreuses situées dans la thyroïde.

On demande alors à un patient d'avaler une gélule contenant de l'iode 131 ayant une activité $A_0 = 900$ MBq. Celui-ci sera en chambre radioprotégée pendant deux jours. Un document remis à la sortie demande pendant huit jours après la sortie :

d'éviter le contact avec des enfants de moins de 15 ans et des femmes enceintes,
de dormir à distance du conjoint.

2.1 L'énergie moyenne des particules chargées émises par les noyaux d'iode 131 vaut $E_{\text{moy}} = 0,191$ MeV. Le parcours moyen dans la thyroïde de ces particules vaut $R = 0,50$ mm. L'énergie moyenne par ionisation (ou par paire ion / électron) du tissu vaut $w = 33$ eV.

2.1.1. Calculer le nombre total d'ionisations créées par une particule chargée.

2.1.2. Calculer la DLI (densité linéique d'ionisation) de cette particule chargée.

2.2. La gélule est présentée dans un flacon en verre, lui-même placé dans un pot en plomb d'épaisseur $e = 2,5$ cm. La CDA, couche de demi-atténuation pour les photons gamma d'énergie 364,5 keV vaut 3,0 mm dans le plomb. On néglige l'atténuation par le verre.

Calculer le pourcentage de photons gamma sortant du pot.

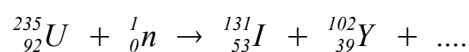
2.3. Globalement, 75% de l'activité de l'iode 131 administrée est éliminée dans l'urine dans un délai de 48 heures.

Justifier les conseils remis à la sortie du patient.

III. Tchernobyl.

1. Centrale nucléaire.

La présence d'iode 131, expulsé dans l'air au cours de cet accident nucléaire, peut s'expliquer par la réaction nucléaire suivante :



${}_{39}^{102}\text{Y}$ est un noyau d'yttrium.

1.1. Compléter l'équation de cette réaction.

1.2. De quel type de transformation nucléaire s'agit-il ?

2. Accident.

De l'iode 131 avec une activité totale estimée à $1,2 \times 10^{18}$ Bq s'est retrouvée dans l'atmosphère suite à l'accident de Tchernobyl.

Une personne habitant dans la zone des trente kilomètres de la centrale a absorbé au niveau de la thyroïde une dose $D = 1,4\text{Gy}$ (par inhalation d'iode 131 et par consommation de denrées alimentaires contaminées).

La thyroïde de cette personne a une masse $M = 20$ g.

2.1. Calculer, à partir de la dose absorbée, la quantité d'énergie reçue par cette thyroïde.

2.2. On peut à partir de la formule de Marinelli, estimer l'activité initiale reçue A par la thyroïde au cours de cet accident :

$$A(\text{MBq}) = \frac{23,4 \times D(\text{Gy}) \times M(\text{g})}{F_0 \times T_{\text{eff}}}$$

F_0 est le taux de fixation thyroïdienne à l'instant $t = 0$

$$F_0 \approx 0,20$$

T_{eff} est la période (demi-vie) effective en jours

$$T_{\text{eff}} \approx 7,6 \text{ jours}$$

Calculer l'activité initiale reçue par la thyroïde de cette personne.

2.3. Comparer l'activité reçue par la thyroïde dans ce cas avec celle reçue initialement par la thyroïde de la personne subissant la scintigraphie qui vaut $A = 1,4$ MBq (question 1.4.2).