

# Diplôme de Technicien Supérieur en Imagerie Médicale et Radiologie Thérapeutique

Durée : 3 heures

Coefficient : 3

Session 2004

— L'utilisation de la calculatrice est autorisée —

Le sujet comporte 8 pages dont un document réponse (pages 7 et 8) à rendre avec la copie

## PHYSIQUE

### I.1. PREMIÈRE PARTIE : CONTRÔLE DE CONNAISSANCES (30 points)

#### Q1. QUESTIONS A CHOIX MULTIPLES (10 points)

**Consigne :** Recopier la seule bonne réponse pour chacune des questions qui suit sans justification.

- 1) Les orbites électroniques de l'atome correspondent
  - a) à des niveaux d'énergie d'autant plus bas que ces orbites sont plus proches du noyau
  - b) à des niveaux d'énergie d'autant plus haut que ces orbites sont plus proches du noyau
  - c) à des niveaux équidistants les uns des autres
  
- 2) Energie
  - a) l'énergie de liaison d'un électron de la couche K est inférieure à l'énergie de liaison d'un électron de la couche L
  - b) l'énergie de liaison d'un électron sur la couche K est pour tous les atomes égale à  $-13,6 \text{ eV}$
  - c) l'énergie d'ionisation est l'énergie à fournir pour extraire un électron de l'atome
  
- 3) Le spectre d'émission d'un atome renseigne
  - a) sur les valeurs énergétiques des niveaux électroniques car les longueurs d'onde des raies émises sont proportionnelles à la différence des niveaux d'énergie
  - b) Certaines raies émises ont la même position dans le spectre, pour des atomes situés dans la même colonne de la classification périodique
  
- 4) Pour que les raies K apparaissent dans le spectre de RX, il faut que l'énergie des électrons incidents soit :
  - a) égale ou supérieure à l'énergie de liaison des électrons de la couche K
  - b) inférieure à l'énergie de liaison des électrons de la couche K
  - c) autre réponse à compléter

## HIMSC

5) Le Césium  $^{137}\text{Cs}$  noyau radioactif émet un rayonnement  $\gamma$  d'énergie 0,662 MeV.

Ce rayonnement provient :

- a) d'un choc d'un électron externe très énergétique sur le noyau de Césium
- b) d'un retour au niveau fondamental du noyau fils formé
- c) d'une dématérialisation du noyau de Césium.

### Q2. RADIOACTIVITE (20 points)

Données :

<u>masses des noyaux</u>		<u>correspondances d'unités</u>
$^{235}_{92}\text{U}$ :	235,043 92 u	$1 \text{ u} = 1,660 54 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
$^{94}_{38}\text{Sr}$ :	93,915 36 u	$1 \text{ eV} = 1,602 18 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
$^{140}_{54}\text{Xe}$ :	139,918 79 u	$c = 2,997 92 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
$^1_0\text{n}$ :	1,008 66 u	

#### 1. Etude du noyau

1.1. Donner la définition :

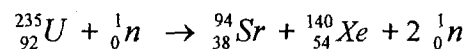
- 1.1.a. du défaut de masse d'un noyau,
- 1.1.b. de l'énergie de liaison d'un noyau.

1.2. La courbe d'Aston ( $-\frac{\epsilon_l}{A} = f(A)$ ) reproduite figure 1 sur le document réponse, donne l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de masse.

1.2.a. Où sont situés les noyaux stables ?

1.2.b. Annoter la figure 1 en précisant quels sont les noyaux pouvant donner une fusion d'une part, une fission d'autre part.

1.3. On considère la réaction de fission nucléaire :



Exprimer littéralement et calculer l'énergie libérée lors de cette réaction.

#### 2. Réaction nucléaire

2.1. L'Iridium  $^{192}_{78}\text{Ir}$  est un émetteur de rayonnement  $\gamma$  et  $\beta^-$ . Écrire l'équation de la réaction nucléaire, on appellera X le noyau fils.

## HIMSC

- 2.2. Par désintégrations successives de type  $\alpha$  ou  $\beta^-$ , le noyau de Thorium  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  conduit au noyau stable de plomb  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ . A partir des variations des nombres de masse et de charge, calculer les nombres respectifs de particules  $\alpha$  et  $\beta^-$  émises.
- 2.3. L'iode  ${}^{125}_{53}\text{I}$  est utilisé depuis 1998 en France en curiethérapie. L'iode se désintègre par capture électronique avec émission de photons et d'électrons.
- 2.3.a. D'où provient l'électron capturé par le noyau ?
- 2.3.b. Quelle est l'origine de l'électron expulsé ?
- 2.3.c. Ecrire l'équation de la réaction nucléaire de capture électronique.

### 3. loi de décroissance

- 3.1. Il existe deux isotopes de l'iridium instables :

$${}^{192}_{78}\text{Ir} \quad \text{de période } T_1 = 74 \text{ j}$$

$${}^{194}_{78}\text{Ir} \quad \text{de période } T_2 = 18 \text{ h}$$

- 3.1.a. Calculer leur constante radioactive respective en  $\text{s}^{-1}$ .
- 3.1.b. Quel est de ces deux isotopes celui qui sera éliminé le plus rapidement ? Justifier succinctement.
- 3.2. Le Technétium  ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$  a une période de 6 heures. Une fiole de Technétium a une activité de 40 MBq à 18 heures,
- 3.2.a. Donner la définition de l'activité A et l'exprimer en fonction du nombre de noyaux radioactifs.
- 3.2.b. Quelle était son activité à 12 heures ?
- 3.2.c. Quelle sera son activité le lendemain à 18 heures ?

## 1.2. DEUXIÈME PARTIE : PROBLÈME (30 points)

### Données :

constante de Planck : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$	1 eV = $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
masse du proton : $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,007 \text{ u}$	1 u = $931,5 \text{ MeV.c}^{-2}$
charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	
célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$	

Les accélérateurs de type « cyclotron » permettent d'accélérer les particules lourdes de haute énergie (protons, deutons) et trouvent une application médicale en radiothérapie protonique et neutronique. Une comparaison avec la radiothérapie conventionnelle sera amorcée.

**Les trois parties sont indépendantes.**

### I- Principe de base du cyclotron

Un cyclotron est composé de deux demi cylindres creux D1, D2 appelées « Dees », à l'intérieur desquels règne un champ magnétique  $\vec{B}$  de valeur 1,8 T. Entre les Dees, existe un champ électrique  $\vec{E}$ , commandé par une tension  $u_{D1D2}(t)$ .

En A sont injectés des protons  ${}^1_1\text{H}^+$  de vitesse initiale négligeable. Sous l'action des deux champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  le mouvement de l'ion dans le cyclotron a une trajectoire représentée sur la figure 2 du document réponse.

#### 1. Action du champ magnétique $\vec{B}$

1.1. Sur le document réponse, représenter au point  $A_2$

- le vecteur vitesse de l'ion  ${}^1_1\text{H}^+$ .
- la force magnétique  $\vec{F}_m$
- en déduire le sens du champ magnétique.

1.2. Démontrer que l'action du champ magnétique ne modifie pas la valeur de la vitesse  $v$ .

1.3. On démontre, et vous l'admettez que le mouvement du proton est circulaire de rayon :

$$R = \frac{m_p \cdot v}{q \cdot B}$$

Exprimer et calculer la durée  $\theta$  de passage de l'ion dans un Dee. Qu'en concluez-vous ?

#### 2. Action du champ électrique $\vec{E}$

2.1. Représenter sur le schéma (figure 2), le vecteur champ électrique dans les espaces  $A_3A_4$  et  $A_5A_6$ , tel que le proton soit accéléré.

2.2. On peut négliger la durée de passage de l'ion dans l'intervalle entre les deux Dees devant  $\theta$ , exprimer et calculer la fréquence de la tension alternative  $u_{D1D2}(t)$  utilisée pour créer le champ  $\vec{E}$ .

## HIMSC

- 2.3. Calculer l'augmentation d'énergie à chaque accélération entre les deux Dees sachant que pendant le passage de l'ion, la tension peut être considérée comme constante et égale à 42 kV.
- 2.4. Quelle est l'augmentation de l'énergie cinétique du proton à chaque tour ?
- 2.5. A l'aide de vos réponses, compléter les courbes proposées figure 3 correspondant à l'énergie cinétique totale acquise au cours du temps d'une part, et à la tension  $u_{D1D2}(t)$  d'autre part.

### 3. Énergie de sortie

- 3.1. Certains cyclotrons possèdent 4 Dees permettant d'accélérer 4 fois par tour les particules introduites. Quelle est alors l'énergie acquise par les protons en un tour, pour la même tension d'accélération ?
- 3.2. Sachant que le nombre de tours effectués par les protons est égale à 200, quelle est l'énergie de sortie des particules ?

## II- Radiothérapie conventionnelle. Rayons X

On forme des rayons X en envoyant un faisceau d'électrons de grande énergie,  $E_0 = 8 \text{ MeV}$ , issu d'un accélérateur, sur une cible constituée d'une fine plaque de platine.

1. Calculer la longueur d'onde minimale  $\lambda_0$  des photons X de freinage émis par la cible.
2. Calculer la longueur  $\lambda_m$  des faisceaux les plus nombreux, sachant que  $\lambda_m = \frac{3}{2} \cdot \lambda_0$ . Calculer leur énergie correspondante  $E_m$ .
3. Positionner  $E_0$  et  $E_m$  sur l'axe des abscisses du graphe de variation de fluence énergétique  $\frac{d\phi}{dE}$  reproduit figure 4 du document réponse.
4. Expliquer qualitativement le rôle et les qualités du filtre nécessaire permettant de ne laisser passer que les rayons de longueurs d'onde proche de  $\lambda_m$
5. On admet maintenant que le rayonnement est homogène et constitué de photons de longueur d'onde  $\lambda_m$ . Afin de traiter une tumeur profonde, il faut réduire de 65% le nombre de photons incidents. On utilise des écrans de plomb.  
Sachant que pour cette énergie le coefficient massique d'absorption vaut  $4,6 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  et que la masse volumique du Plomb  $\rho$  est  $11,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , calculer l'épaisseur de plomb nécessaire à cette absorption.
6. Les milieux biologiques sont constitués essentiellement d'eau. Celle-ci sert de modèle pour évaluer le trajet des rayons X.

Les photons ont un coefficient massique d'atténuation globale égal à  $0,11 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  dans l'eau. La masse volumique de l'eau est  $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

- 6.1. Calculer la valeur de la couche de demi-atténuation CDA pour ce rayonnement.
- 6.2. A partir d'une valeur de l'énergie arbitrairement choisie, construire la courbe d'atténuation de l'énergie en fonction de 5 valeurs de CDA traversées
- 6.3. Cette courbe illustre-t-elle la phrase trouvée dans les livres ? : "*les rayons X utilisés en radiothérapie conventionnelle s'amenuisent au fur et à mesure qu'ils pénètrent dans le corps entraînant des dommages non négligeables aux cellules situées en aval et en amont de la tumeur*"

**III- Utilisation des faisceaux de protons issus du cyclotron**

Ces faisceaux sont soit utilisés directement, soit servent à former un faisceau de neutrons.

**1. Utilisation directe : protonthérapie**

A la sortie du cyclotron les particules sont émises avec un spectre énergétique extrêmement fin.

- 1.1. On rappelle que le TLE est le Transfert Linéique d'Énergie. Calculer sa valeur en MeV.cm<sup>-1</sup> pour des particules de 50 MeV sachant que le parcours de ces particules est de 3 cm dans les tissus biologiques.
- 1.2. En déduire la densité linéique (DLI) ou nombre de paires d'ions formés par unité de longueur (ion / mm), sachant que dans l'eau l'énergie nécessaire pour créer une paire (ion positif-électron) est de 33 eV.
- 1.3. La courbe de Bragg (figure 5 du document réponse) donne la DLI en fonction du parcours dans l'eau pour deux particules.
  - 1.3.a. A partir de quelle profondeur les deux types de particules cèdent-elles principalement leur énergie ?
  - 1.3.b. Sur quelle étendue cette énergie est-elle cédée ?
  - 1.3.c. Quel avantage voyez-vous à l'utilisation des protons par rapport celle des RX de même énergie ?

**1.4. Rôle de l'absorbeur :**

La position du pic de Bragg varie suivant l'énergie du faisceau de protons incidents. Un dispositif absorbeur d'énergie à plaques de Lexan d'épaisseurs variables permet de déplacer le pic de Bragg de la surface de la peau jusqu'à une profondeur de 250 mm. Le graphe reproduit figure 6 du document réponse présente trois réglages possibles.

Pour ces réglages :

- 1.4.a. A quelle profondeur minimale la tumeur doit-elle se trouver ?
- 1.4.b. Quelle est l'épaisseur maximale de tumeur susceptible d'être irradiée ?

**2. Neutronthérapie :**

Quelques centres de traitements utilisent un faisceau de neutrons.

Le flux de neutrons est obtenu par choc des protons rapides sur une cible de Béryllium.

Ecrire l'équation de réaction nucléaire et identifier le noyau formé à l'aide du tableau ci-dessous.

$^1_1H$							$^4_2He$
$^7_3Li$	$^9_4Be$	$^{11}_5B$	$^{12}_6C$	$^{14}_7N$	$^{16}_8O$	$^{19}_9F$	$^{20}_{10}Ne$

Document réponse (à rendre avec la copie)

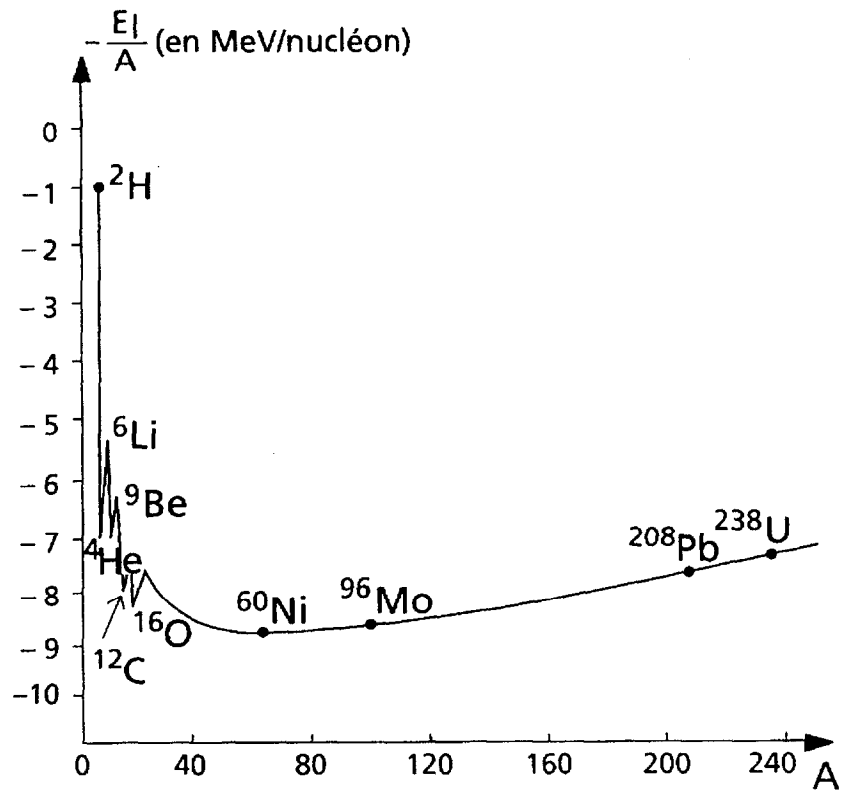


Figure 1

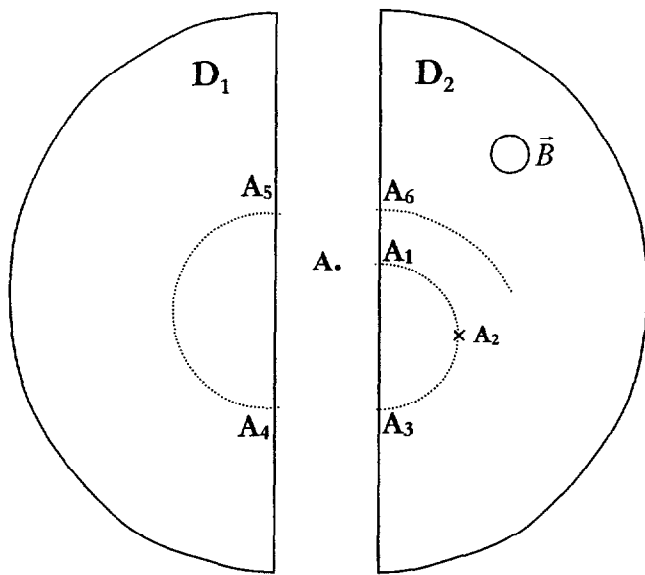


Figure 2

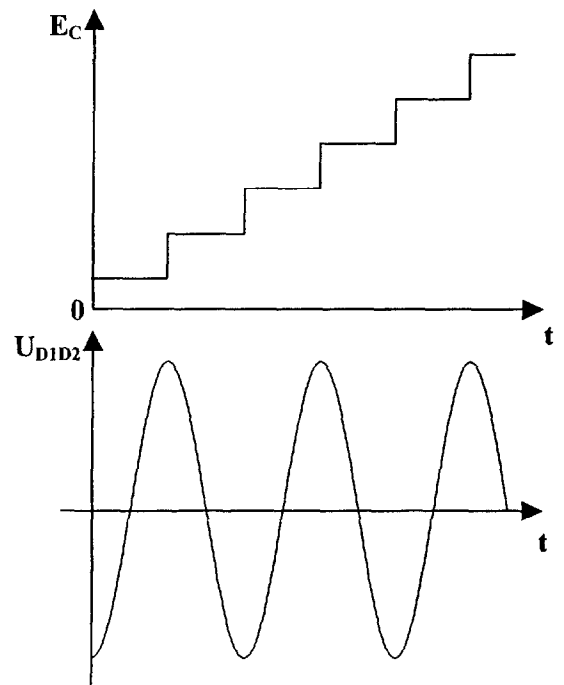


Figure 3

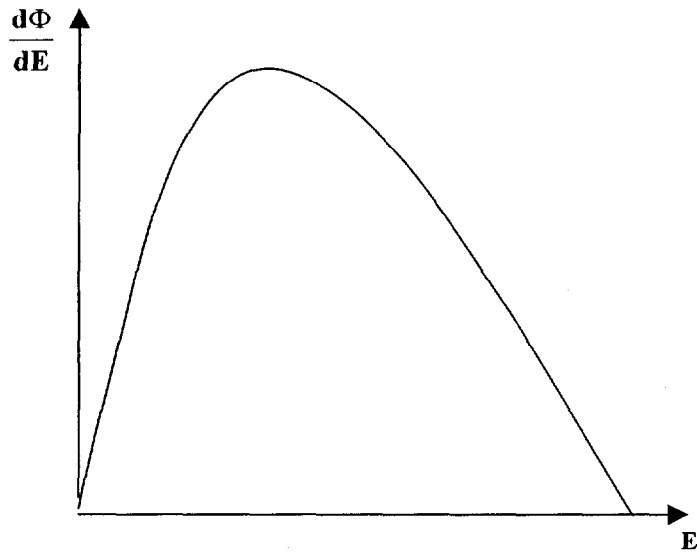


Figure 4

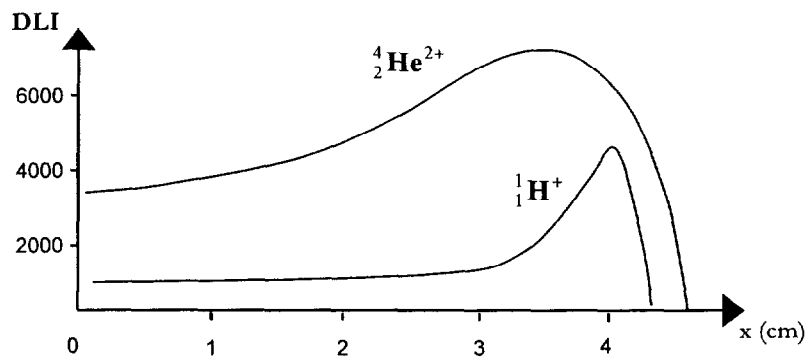


Figure 5

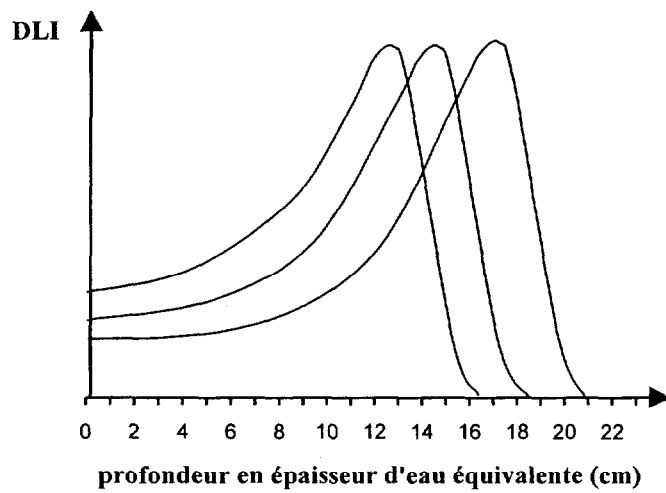


Figure 6