

IMRT2 : DEVOIR 4 : 1011

données :

célérité de la lumière $c = 3,000 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

constante de Planck $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

masse de l'électron $m = 5,486 \times 10^{-4} \text{ u} = 0,511 \text{ MeV.c}^{-2}$

charge élémentaire $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

masse du proton : $m_p = 1,007276 = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$

unité de masse atomique :

masse atomique du nickel 60 : 59,930786 u

$1 \text{ u} = 1,660 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2}$

masse atomique du cobalt 60 : 59,9338174 u

Q1 : QCM: compléter le tableau par V pour Vrai et F pour Faux

1. Une onde sonore :

- a) se propage dans le vide à la célérité de 340 m.s^{-1} .
- b) peut se propager dans le vide ou dans un milieu matériel.
- c) se propage dans l'air à la célérité de 340 m.s^{-1} .
- d) se propage plus rapidement dans l'eau que dans l'air.
- e) ne peut pas se propager dans un solide.

2. Une onde sinusoïdale ultrasonore de fréquence $f = 2,0 \text{ MHz}$ se propageant à la vitesse de 340 m/s

- a) a une longueur d'onde de $0,17 \text{ mm}$
- b) a une longueur d'onde de $0,68 \text{ mm}$.
- c) a une longueur d'onde de $0,17 \text{ m}$.
- d) a une longueur d'onde de $1,7 \times 10^{-4} \text{ m}$.
- e) a une longueur d'onde de $0,17 \mu\text{m}$

3. Une onde acoustique de fréquence $f = 1,0 \text{ MHz}$ se propage dans un milieu musculaire (1) d'impédance $Z_1 = 1,64 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, de masse volumique $\rho_1 = 1,04 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ et de célérité $c = 1,58 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$ pénètre dans un milieu osseux (2) d'impédance $Z_2 = 6,60 \times 10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et de masse volumique $\rho_2 = 1,65 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

Les coefficients d'atténuation linéique valent $\mu_1 = 26,2 \text{ m}^{-1}$ pour le milieu musculaire et $\mu_2 = 263 \text{ m}^{-1}$ pour le milieu osseux.

3.1. au changement de milieu de propagation :

- a) la fréquence de l'onde augmente.
- b) la célérité de l'onde diminue.
- c) la longueur d'onde augmente.
- d) la longueur d'onde diminue.
- e) la célérité de l'onde augmente.

3.2. au changement de milieu de propagation, en incidence normale :

- a) l'intensité de l'onde augmente.
- b) l'onde est totalement réfléchie.
- c) l'intensité de l'onde réfléchie est plus importante que l'intensité de l'onde incidente.
- d) l'intensité de l'onde transmise est égale à l'intensité de l'onde incidente.
- e) l'intensité de l'onde transmise est plus faible que l'intensité de l'onde incidente.

3.3. au changement de milieu de propagation, en incidence normale

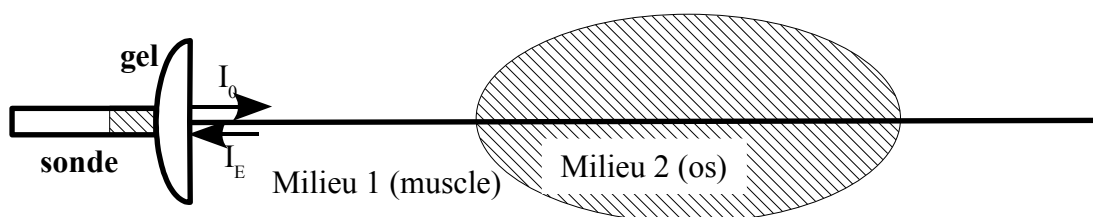
- a) le coefficient de réflexion vaut 0,60.
- b) le coefficient de transmission est égal au coefficient de réflexion.
- c) le coefficient de transmission vaut 0,64.
- d) le coefficient de réflexion vaut 0,36.
- e) le coefficient de réflexion vaut 0,67.

3.4. une sonde envoie une salve d'ultrason dans un milieu constitué de 2,0 cm de muscle (1) puis de 3,0 cm d'os (2) ; la durée séparant l'émission de la salve et la réception de l'écho du à l'interface muscle/os vaut :

- a) 12,6 μ s
- b) 25,3 μ s
- c) 10,0 μ s
- d) 38,0 μ s
- e) $1,26 \times 10^{-5}$ s.

3.5. cette salve, d'intensité initiale (juste après l'entrée dans le milieu 1) I_0 , se réfléchit sur l'interface muscle/os ; l'intensité I_E de l'écho (juste avant la sortie du milieu 1) du à cette réflexion vaut :

- a) 0,59 I_0
- b) I_0
- c) 0,13 I_0
- d) 0,21 I_0
- e) 0,36 I_0 .



V/F	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
a							
b							
c							
d							
e							

Q2 : Désintégration du cobalt 60 ($Z = 27$).

Le cobalt 60 se désintègre par radioactivité β^- pour donner du nickel dans un état excité.

1. Écrire l'équation de la réaction de désintégration.

Énoncer les deux lois utilisées lors de l'écriture de cette équation.

2. Chaque année, un échantillon de cobalt 60 perd 12,5% de son activité initiale.

2.1. Donner l'expression mathématique décrivant l'évolution de l'activité d'une source radioactive en fonction du temps.

2.2. Déterminer la constante radioactive du cobalt 60 dans les unités du système international.

2.3. Calculer la demi-vie (période) du cobalt 60.

3. Le noyau de nickel obtenu par désintégration du cobalt 60 se trouve à 100% dans un état excité ; chaque désintégration est suivie de l'émission successive de deux photons γ d'énergie $E_1 = 1,172 \text{ MeV}$ et $E_2 = 1,333 \text{ MeV}$.

3.1. Calculer les longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 des rayons γ émis.

3.2. Tracer le diagramme de désintégration du cobalt 60 en détaillant les états excités du nickel.

3.3. Calculer l'énergie libérée au cours de cette transformation (énergie disponible).

Sous quelle forme cette énergie apparaît-elle ?

4. Le traitement d'une tumeur pulmonaire par les photons γ délivrés par une source de cobalt 60 nécessite un débit de dose $\dot{D}$ de 18 gray par heure.

Une mesure effectuée dans un fantôme placé sur le trajet du faisceau γ émis par la source de cobalt 60 donne un débit de dose $\dot{D}$ de 50 gray par heure.

Le coefficient linéique d'absorption du plomb pour ces photons vaut $\mu = 1,15 \text{ cm}^{-1}$.

4.1. Donner l'expression mathématique décrivant l'évolution du débit de dose $\dot{D}$ en fonction de l'épaisseur de plomb traversé.

4.2. Calculer l'épaisseur de la couche de demi atténuation (CDA) pour ces photons.

4.2. Calculer l'épaisseur du filtre de plomb à interposer sur le trajet du faisceau γ pour obtenir un débit de dose convenable.

Problème.

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 D_1 et D_2 appelées "Dees", à l'intérieur desquels règne un champ magnétique $\vec{B}$ de valeur $B = 1,8 \text{ T}$. 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 $\vec{B}$ et $\vec{E}$ le mouvement de l'ion dans le cyclotron a une trajectoire représentée sur la figure 1 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 admettra que le mouvement du proton est circulaire de rayon :*

$$r = \frac{m v}{q B}$$

Établir l'expression et calculer la durée θ de passage de l'ion dans un "Dee" ; conclure.

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

2.1. Représenter sur le schéma (figure 1), 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 θ .* Exprimer et calculer la fréquence de la tension alternative $u_{D1D2}(t)$ utilisée pour créer le champ $\vec{E}$.

2.3. *Pendant le passage de l'ion, la tension peut être considérée comme constante et égale à 42 kV.* Calculer l'augmentation d'énergie à chaque accélération entre les deux "Dees".

2.4. Quelle est l'augmentation de l'énergie cinétique du proton à chaque tour ?

2.5. A l'aide des réponses aux questions précédentes, annoter et compléter les courbes proposées figure 2 (en concordance de temps) 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.*

Déterminer l'énergie acquise par les protons en un tour, pour la même tension d'accélération.

3.2. *Le nombre de tours effectués par les protons est égale à 200 ;* calculer 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, $E = 8 \text{ MeV}$, issu d'un accélérateur, sur une cible constituée d'une fine plaque de platine.

1. Détailler le phénomène auquel est due l'émission de rayons X.
2. Établir l'expression et calculer l'énergie maximale des photons X émis par la cible.
Calculer leur longueur d'onde minimale λ_m .
3. Calculer la longueur λ_0 des photons les plus nombreux, sachant que $\lambda_0 = 3 / 2 \lambda_m$. Calculer l'énergie correspondante E_0 .
4. Positionner E_0 et E_m , sur l'axe des abscisses du graphe de variation de fluence énergétique $d\Phi / dE$ reproduit figure 3 du document réponse.
5. *On admet maintenant que le rayonnement est homogène et constitué de photons de longueur d'onde λ_0*
Afin de traiter une tumeur profonde, il faut réduire de 65% le nombre de photons incidents. On utilise des écrans de plomb.
Pour cette énergie, le coefficient massique d'absorption du plomb vaut $4,6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$; la masse volumique du plomb vaut $\rho = 11,3 \text{ g.cm}^{-3}$.
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 $0,11 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ dans l'eau. La masse volumique de l'eau vaut $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$.

- 6.1. Calculer la valeur de la couche de demi-atténuation CDA pour ce rayonnement.
- 6.2. Construire la courbe montrant l'atténuation de l'énergie (en pourcentage de l'énergie initiale) en fonction de 5 valeurs de CDA traversées. (échelles 10% par cm, 2 cm par cm)
- 6.3. Expliquer comment l'interprétation de cette courbe confirme (ou infirme) la phrase trouvée dans certains 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 du faisceau de protons issus du cyclotron

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

1. *On rappelle que le TLE est le Transfert Linéique d'Énergie.*
Calculer sa valeur en MeV.cm^{-1} pour des particules de 50 MeV sachant que le parcours de ces particules est de 3,0 cm dans les tissus biologiques.

2. Dans l'eau, l'énergie nécessaire pour créer une paire (ion positif-électron) est de 33 eV.

Déterminer la densité linéique (DLI) ou nombre de paires d'ions formés par unité de longueur (ion / mm) dans l'eau.

3. La courbe de Bragg (figure 4 du document réponse) donne la DLI en fonction du parcours dans l'eau pour deux particules.

3.1. Donner l'hypothèse, portant sur le TLE, qui permet de justifier l'existence du pic observé en fin de course.

3.2. A partir de quelle profondeur les deux types de particules cèdent-elles principalement leur énergie ?

3.3. Sur quelle étendue cette énergie est-elle cédée ?

3.4. Quel avantage y a-t-il à utiliser des protons plutôt que des rayons X de même énergie ?

4. 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 5 du document réponse présente trois réglages possibles.

4.1. Décrire l'effet des plaques de Lexan sur les protons.

Pour ces réglages, déterminer :

4.2. À quelle profondeur minimale la tumeur doit se trouver.

4.3. L'épaisseur maximale de tumeur susceptible d'être irradiée.

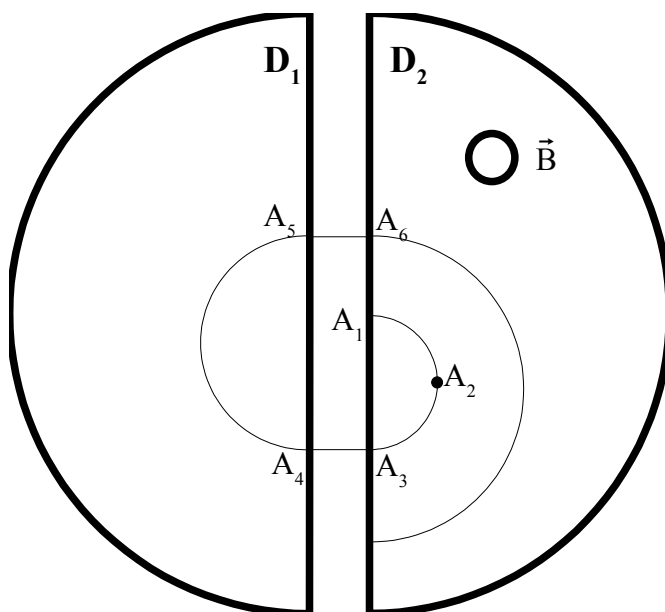


figure 1

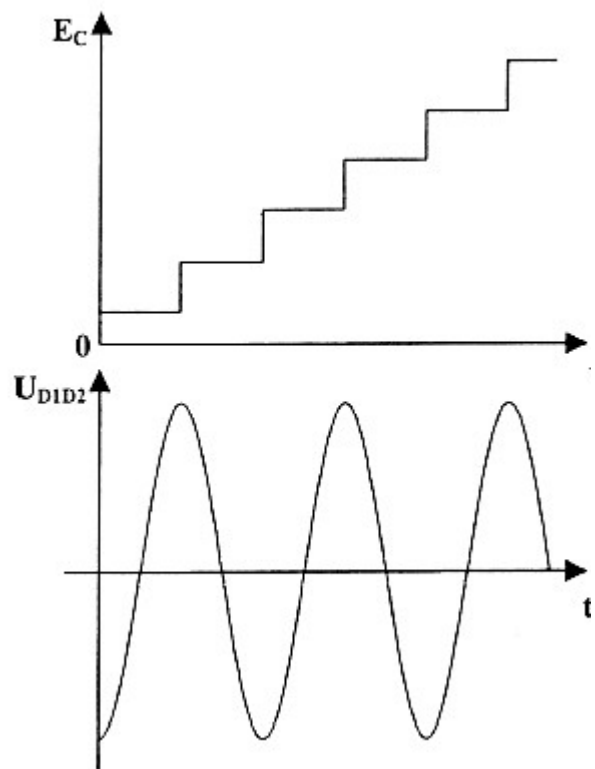


figure 2

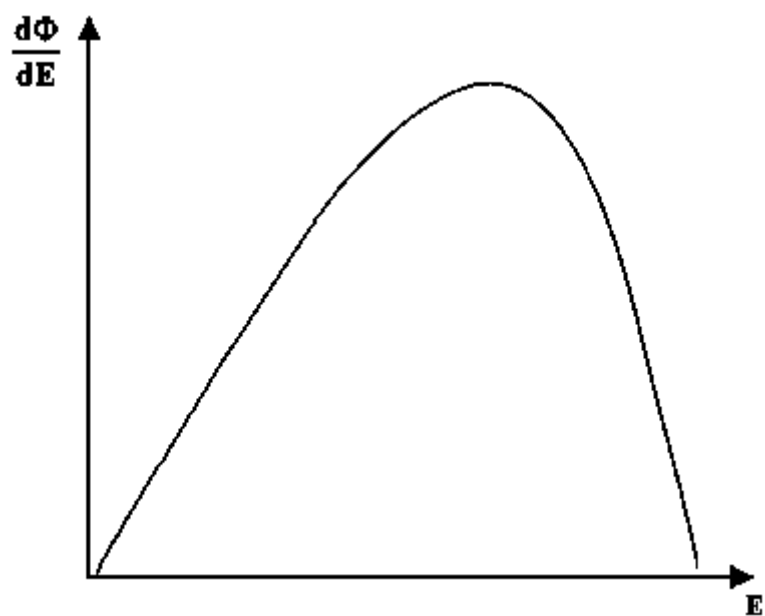


figure 3

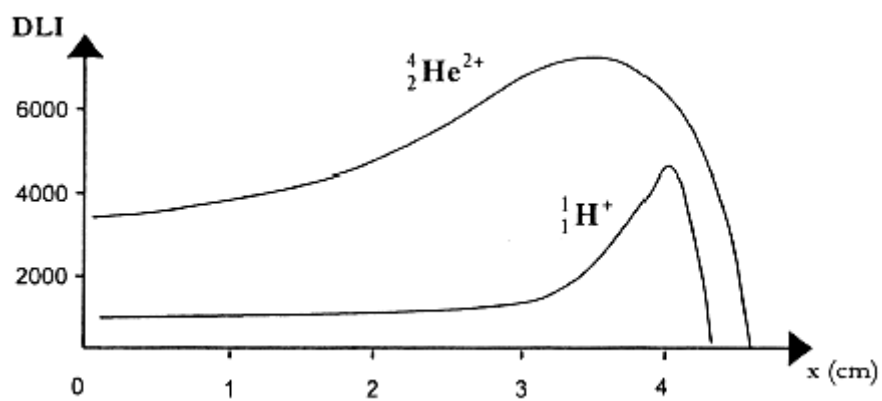


figure 4

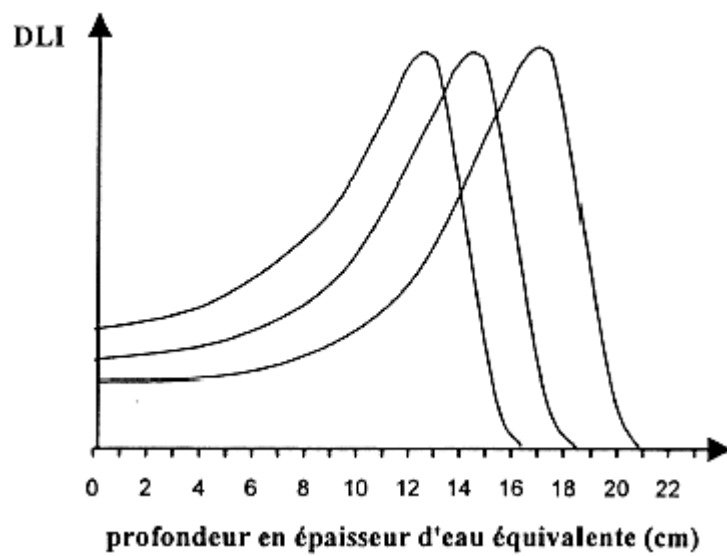


figure 5