

IMRT2 : DEVOIR 3 : 0607

Les étudiants rendent le sujet complété et en entier.

PREMIÈRE PARTIE (30 points)

Q1 : QCM (10 points)

Compéter le tableau réponse par **V** pour vrai et **F** pour faux.

- 1) La masse atomique du chlore naturel est $35,453 \text{ g.mol}^{-1}$. Ce nombre n'est pas entier. Ceci est dû :
 - a) à l'imprécision des mesures
 - b) à l'état gazeux du dichlore
 - c) à l'existence des ions chlorure
 - d) au mélange de plusieurs isotopes dans le chlore naturel

- 2) au cours d'une désintégration de type α
 - a) la masse du noyau fils est égale à la masse du noyau père
 - b) la masse du noyau fils est égale à celle du noyau père diminuée de la masse de la particule α
 - c) la masse du noyau fils est inférieure à celle du noyau père
 - d) la masse du noyau fils est inférieure à celle du noyau père diminuée de la masse de la particule α

- 3) L'activité d'un échantillon radioactif :
 - a) est proportionnelle à la constante radioactive
 - b) est proportionnelle à sa masse
 - c) décroît proportionnellement au temps
 - d) est proportionnelle à sa période (demi-vie)

- 4) La capture électronique
 - a) se produit pour des éléments possédant un excès de protons
 - b) est souvent accompagnée d'une émission β^+
 - c) peut être accompagnée de photons X
 - d) s'accompagne de l'émission d'un neutrino

- 5) Le nucléide ^{16}N , émetteur β^- , dont la demi-vie est de 7,4 secondes est absent dans la nature parce que :
 - a) la période (demi-vie) est très courte
 - b) le noyau fils est lui-même radioactif
 - c) il ne peut pas se combiner avec d'autres atomes pour former des molécules
 - d) les particules β^- sont absorbées par quelques mètres d'air

	1	2	3	4	5
a					
b					
c					
d					

Q2 : Ondes ultra sonores (20 points)

Un sous marin d'exploration océanographique dispose d'un émetteur / récepteur à ultrasons ; cet appareil peut émettre ou recevoir des ondes de fréquence $f = 1,0 \text{ MHz}$ se propageant dans une direction verticale quelle que soit la position du sous marin.

La célérité des ondes sonores dans l'eau de mer vaut $c_E = 1,5 \text{ km.s}^{-1}$.

1. Durée d'émission du train d'ondes.

Le sous marin immobile envoie un train de $N = 1000$ oscillations ; calculer la durée de celui-ci.

2. La durée séparant l'émission et la réception du train d'onde vaut $\Delta t = 0,10 \text{ s}$; calculer la distance séparant le sous marin du fond.

3. Au cours de la propagation, le signal est atténué par des phénomènes dissipatifs.

La décroissance de l'amplitude du signal est de type exponentiel $a(z) = a_0 e^{-\alpha z}$;

Le coefficient d'atténuation vaut $\alpha = 3 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$;

Déterminer la distance pour laquelle le signal est réduit à $1 / 100$ de sa valeur.

4. Avec le même dispositif, pour mesurer la profondeur d'immersion du sous-marin, on sonde en direction de la surface de la mer (toujours selon une direction verticale) ; celle-ci peut éventuellement être polluée par une nappe de pétrole.

On donne le tableau (incomplet) des célérités, impédances et masses volumiques pour l'eau, l'air et le pétrole

	eau	air	pétrole
masse volumique $\rho \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	$1,0 \times 10^3$	1,3	$0,75 \times 10^3$
célérité du son $\text{(m.s}^{-1}\text{)}$	$1,5 \times 10^3$	330	$1,0 \times 10^3$
impédance $\text{(kg.m}^{-2}\text{.s}^{-1}\text{)}$	$1,5 \times 10^6$		

On rappelle l'expression du coefficient de réflexion (rapport de l'intensité réfléchi à l'intensité incidente :

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

4.1. Donner l'expression littérale et calculer l'impédance de l'air et du pétrole.

4.2. Comparer les coefficients de réflexion sur les interfaces eau / air et eau / pétrole

La présence d'une nappe de pétrole à la surface de l'eau empêche-t-elle la mesure de la profondeur d'immersion ? Justifier la réponse.

5. Le sous marin se déplace à une vitesse $V = 10 \text{ m.s}^{-1}$ suivant une direction descendante faisant un angle $\theta = 60^\circ$ avec la verticale.

On observe que l'onde mesurée par le récepteur, dirigé vers le fond, diffère par sa fréquence de l'onde émise.

5.1. Citer le nom que l'on donne à ce phénomène ; la fréquence de l'onde mesurée est-elle supérieure ou inférieure à la fréquence de l'onde émise ?

5.2. Plusieurs formules sont proposées pour exprimer le décalage relatif de fréquence observé.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{2 V \cos \theta}{c_E} \qquad \frac{\Delta f}{f} = \frac{2 c_E V}{\cos \theta} \qquad \frac{\Delta f}{f} = \frac{2 \cos \theta}{c_E} \qquad \frac{\Delta f}{f} = \frac{2 c_E}{V \cos \theta}$$

Choisir la bonne expression en justifiant la réponse.

Calculer la variation de fréquence observée.

DEUXIÈME PARTIE : PROBLÈME (30 points)

Données :

constante de Planck $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
charge élémentaire : $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$	$1 \text{ u} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV} / c^2$
	masse du proton : $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,007 \text{ u}$

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.

Les trois parties sont indépendantes.

I. 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. Établir l'expression et calculer la longueur d'onde minimale λ_0 des photons X de freinage émis par la cible.

2. Calculer la longueur λ_m , des photons les plus nombreux, sachant que $\lambda_m = 3 / 2 \lambda_0$. Calculer l'énergie correspondante E_m (en eV et en J)

3. Positionner E_0 et E_m , sur l'axe des abscisses du graphe de variation de fluence énergétique $d\phi / dE$ reproduit figure 1.

4. Décrire qualitativement le rôle et les qualités du filtre nécessaire permettant de ne laisser passer que les rayons de longueurs d'onde proche de λ_m .

5. On admet maintenant que le rayonnement est homogène et constitué de photons de longueur d'onde λ_m .

Afin de traiter une tumeur profonde, il faut réduire de 65% le nombre de photons incidents. On utilise des écrans de plomb.

Le coefficient massique d'absorption du plomb, pour ce rayonnement, vaut $4,6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, la masse volumique du plomb est $\rho = 11,3 \text{ g.cm}^{-3}$.

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.

Le coefficient massique d'atténuation globale, pour ce rayonnement, vaut à $0,11 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ dans l'eau. La masse volumique de l'eau est $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$.

6.1. Calculer la valeur de la couche de demi-atténuation CDA pour ce rayonnement.

6.2. À partir d'une valeur de la puissance rayonnée par ce type de photons unitaire $\phi_0 = 1 \text{ W}$, construire la courbe montrant l'évolution de la puissance du faisceau en fonction de la distance de pénétration.

Échelles : 1cm pour 0,1 W et 2 cm pour 1 CDA.

II. 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.

1. Action du champ magnétique \vec{B}

1.1. Sur la figure 2, représenter au point A2

le vecteur vitesse de l'ion ${}^1_1\text{H}^+$.

la force magnétique \vec{F}_m ,

en déduire le sens du champ magnétique \vec{B} .

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

1.3. Dans chaque Dee le mouvement du proton est circulaire de rayon :

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

Établir et calculer la durée θ de passage de l'ion dans un Dee ; commenter la réponse.

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 θ .

Établir et calculer la fréquence de la tension alternative $u_{D1D2}(t)$ utilisée pour créer le champ \vec{E} .

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 50 kV.

3. Énergie de sortie

Dans ce cyclotron, les protons ont effectué 500 tours.

3.1. Calculer l'énergie cinétique d'un proton à la sortie du cyclotron.

3.2. Ces protons peuvent-ils être qualifiés de "relativistes" à leur sortie ? Justifier la réponse.

III. Utilisation du faisceau de protons issus du cyclotron

1. Utilisation directe : proton thérapie

À la sortie du cyclotron les protons sont émis avec un spectre énergétique extrêmement fin.

1.1. Les protons de 50 MeV parcourent une distance de 3,5 cm dans les tissus biologiques ; calculer la valeur du transfert linéique d'énergie TLE (MeV.cm^{-1}) pour ces protons.

1.2. L'énergie nécessaire pour créer une paire (ion positif-électron) dans l'eau vaut $w = 33 \text{ eV}$.
 Calculer la densité linéique d'ionisation (DLI) ou nombre de paires d'ions formés par unité de longueur (ion / mm) pour ces protons.

1.3. La courbe de Bragg (figure 3) donne l'évolution de la DLI en fonction du parcours dans l'eau pour un faisceau de protons et un faisceau de particules α .

- 1.3.a. A partir de quelle profondeur de pénétration 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(s) avantage(s) peut-on voir à utiliser des protons plutôt que des particules α ?

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 4 présente trois réglages possibles.

Pour ces 3 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. Neutron thérapie :

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.

Proposer une équation pour décrire cette réaction nucléaire.

Identifier le noyau formé à l'aide du tableau ci-dessous.

^1_1H							^4_2He
^7_3Li	^9_4Be	$^{11}_5\text{B}$	$^{12}_3\text{C}$	$^{14}_7\text{N}$	$^{16}_8\text{O}$	$^{19}_9\text{F}$	$^{20}_{10}\text{Ne}$

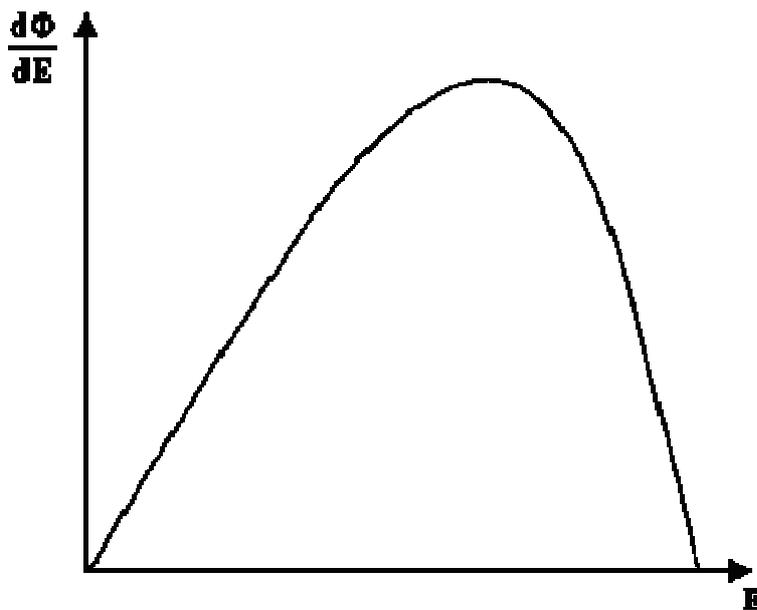


figure 1

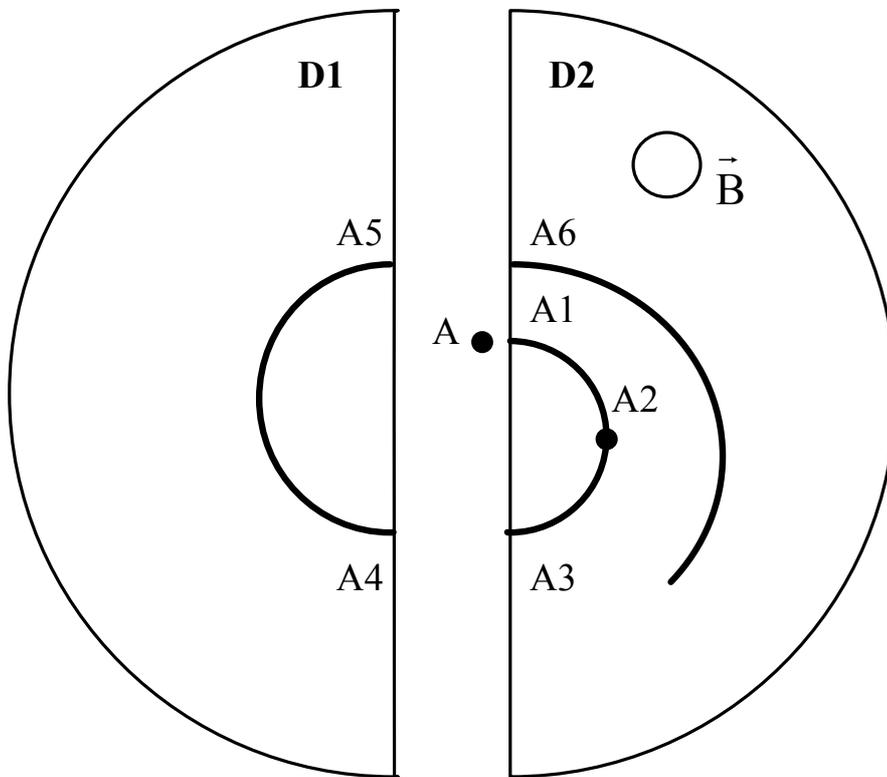


figure 2

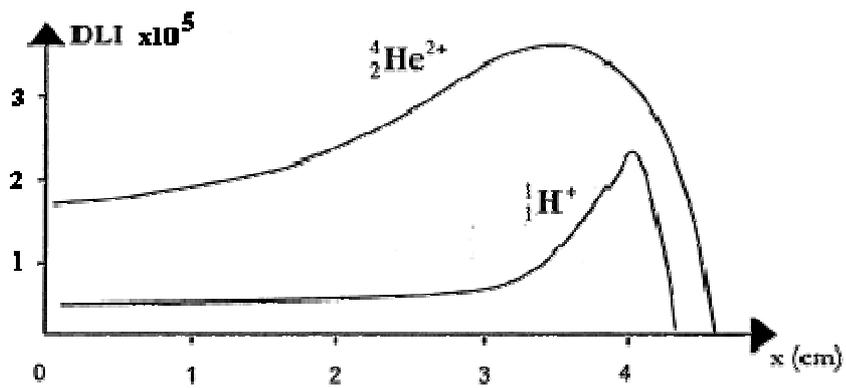


figure 3

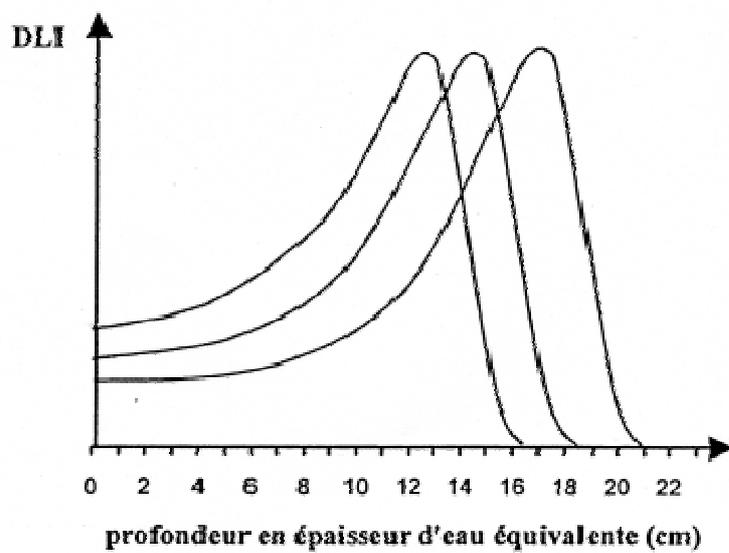


figure 4