

**PREMIÈRE PARTIE : CONTRÔLE DES CONNAISSANCES****Données :**

Constante de Planck :

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}^{-1}$$

Célérité de la lumière dans le vide :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Charge élémentaire :

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

Masse d'un proton :

$$m_P = 1,6725 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,0073 \text{ u}$$

Masse d'un neutron :

$$m_N = 1,6748 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,0087 \text{ u}$$

Masse d'un électron :

$$m_e = 9,1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5,486 \times 10^{-4} \text{ u}$$

Unité de masse atomique

$$u = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2} = 1,6661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

**Q1 : Questions à choix multiples**

Chaque question possède au moins une réponse vraie. Pour chacune des questions, répondre par vrai (V) ou faux (F) en remplissant le document réponse de la page 2.

1. Une particule chargée est placée dans un champ électrique constant perpendiculaire à sa vitesse initiale
  - a) elle prend une trajectoire circulaire.
  - b) elle prend une trajectoire rectiligne.
  - c) elle prend une trajectoire parabolique.
  - d) elle accélère.
2. Un condensateur plan crée entre ses deux plaques un champ électrique :
  - a) parallèle aux plaques.
  - b) perpendiculaire aux plaques.
  - c) proportionnel à la distance entre les plaques.
  - d) proportionnel à la tension appliquée entre les plaques.
3. Soit un condensateur plan dont les plaques sont distantes de 3,0 cm dans le vide. La tension appliquée entre les plaques est  $U = 1,5 \text{ kV}$ . La valeur  $E$  du champ électrique entre les plaques est :
  - a)  $1,5 \text{ kV.m}^{-1}$
  - b)  $4,5 \text{ kV.cm}^{-1}$
  - c)  $50 \text{ kV.m}^{-1}$
  - d)  $500 \text{ V.cm}^{-1}$
4. L'accélération d'un électron de charge  $-e$ , soumis à un champ électrique  $E$  constant a pour norme :
  - a)  $a = mE / e$ .
  - b)  $a = -mE / e$ .
  - c)  $a = eE / m$ .
  - d)  $a = em / E$ .
5. Un champ magnétique uniforme perpendiculaire à la vitesse d'une particule chargée :
  - a) communique une énergie cinétique importante à la particule.
  - b) maintient la particule sur une trajectoire circulaire.
  - c) maintient la particule dans un même plan.
  - d) freine la particule.

6. Entre les dees d'un cyclotron, la tension électrique appliquée :
- conserve la même valeur et le même signe.
  - change de signe et conserve la même valeur.
  - change de valeur et de signe.
  - est alternative.
7. La durée du parcours d'une particule chargée dans un dee d'un cyclotron :
- dépend de la vitesse d'entrée de la particule dans le dee.
  - ne dépend pas de la charge de la particule.
  - dépend de la valeur du champ magnétique.
  - dépend de la masse de la particule.
8. Un circuit RLC série avec  $R = 1000 \Omega$ ,  $L = 0,7 \text{ H}$  et  $C = 1,0 \mu\text{F}$  est alimenté par une tension sinusoïdale  $u(t) = 15 \sin(1000\pi t + \pi/3)$ ,  $i(t)$  étant pris à l'origine des phases.
- On donne  $Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$
- 8.1. La tension d'alimentation :
- a une fréquence de 1000 Hz.
  - a une valeur efficace de 15 V.
  - a une pulsation de  $1000\pi \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .
  - a une période de 2 ms.
- 8.2.
- L'avance de phase  $\varphi$  de la tension par rapport à l'intensité vaut  $+\pi/3 \text{ rad}$ .
  - L'avance de phase  $\varphi$  de la tension par rapport à l'intensité vaut  $-\pi/3 \text{ rad}$ .
  - $u(t)$  est en avance sur  $i(t)$ .
  - Le circuit est capacitif.
- 8.3. L'impédance :
- du condensateur dépend de la fréquence imposée par la tension d'alimentation
  - du circuit RLC vaut  $700 \Omega$
  - du circuit RLC est minimale à une fréquence  $f = 190 \text{ Hz}$
  - de la bobine est proportionnelle à la fréquence  $f$  de la tension d'alimentation

### Réponses du QCM

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8.1</b>	<b>8.2</b>	<b>8.3</b>
<b>A</b>										
<b>B</b>										
<b>C</b>										
<b>D</b>										

## **Q2. EFFET COMPTON ET AUTRES INTERACTIONS.**

1. Décrire brièvement l'interaction par effet Compton, si possible en utilisant un schéma ; réaliser un bilan énergétique de l'interaction.

2. Au cours de cette interaction, on montre que la différence entre  $\lambda'$ , longueur d'onde du photon diffusé, et  $\lambda$ , longueur d'onde du photon incident vaut :

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

où  $\theta$  correspond à la valeur de l'angle entre la direction du photon incident et celle du photon diffusé, et  $m_e$  la masse de l'électron.

Deux "cas extrêmes" peuvent se présenter : cas d'un choc frontal et cas d'un choc tangentiel.

2.1. Dans lequel de ces deux cas l'énergie reçue par le milieu est-elle maximale ?

2.2. Quelle est la valeur de  $\theta$  dans le cas d'un choc frontal ?

3. Le photon incident a une énergie  $E_i = 500$  keV. On suppose qu'il interagit par effet Compton.

3.1. Calculer la longueur d'onde correspondant à ce photon incident.

3.2. A partir des résultats précédents, calculer la longueur d'onde  $\lambda'$  associée au photon diffusé dans le cas du choc frontal correspondant à une valeur de  $\Delta \lambda$  égale à  $4,85 \times 10^{-12}$  m.

3.3. Vérifier que  $E_d$ , l'énergie du photon diffusé, vaut 170 keV.

4. On s'intéresse maintenant aux autres types d'interaction photon-matière.

La figure 1 de l'annexe représente les zones de prédominance des différents effets en fonction de l'énergie des photons incidents et du numéro atomique du milieu traversé (absorbeur).

4.1. Compléter la figure 1 avec les noms des différents effets.

4.2. Donner une description des autres effets évoqués dans cette figure.

4.3. Un photon d'énergie 100 keV interagit avec de l'eau (on considérera que le numéro atomique associé à l'eau, vaut environ 8). Dans ces conditions, quel type d'interaction prédomine ?

4.4. Un photon d'énergie 100 keV interagit avec du plomb de numéro atomique  $Z = 82$ .

Dans ces conditions, quel type d'interaction prédomine ?

4.5. Quelle énergie minimale doit avoir un photon pour provoquer une matérialisation ? Que représente cette énergie ? Justifier la réponse à l'aide d'un calcul.

5. Le coefficient d'atténuation linéique global pour des photons de 100 keV traversant l'eau vaut  $\mu = 0,17 \text{ cm}^{-1}$ .

5.1. Calculer la proportion de photons transmis après la traversée de 2,0 cm d'eau.

5.2. Calculer l'épaisseur de la couche de demi-atténuation (C.D.A.) de ce milieu dans ces conditions.

5.3. Définir et calculer l'épaisseur de la couche de déci transmission de ce milieu dans ces conditions.

5.4. Définir et calculer l'épaisseur de la couche de milli transmission de ce milieu dans ces conditions.

## DEUXIÈME PARTIE: PROBLÈME

Une application des cyclotrons : production de nouveaux radionucléides

**Données spécifiques au problème :**

Masse d'un noyau de cuivre Cu 64 :  $m_{\text{Cu}} = 63,92977 \text{ u}$

Masse d'un noyau de nickel Ni 64 :  $m_{\text{Ni}} = 63,92797 \text{ u}$

Masse d'un noyau de zinc Zn 64 :  $m_{\text{Zn}} = 63,91265 \text{ u}$

On considérera que  $m(\text{H}^-) = m(\text{H}^+) = m_p$

demi-vie (période radioactive) du cuivre 64 : 12,7 jours.

Les radionucléides sont souvent obtenus en bombardant des cibles par des particules chargées. Le cuivre 64 est obtenu en bombardant une cible de nickel par des protons  $\text{H}^+$ .

Un faisceau de particules accélérées grâce à un cyclotron subit un traitement appelé "extraction par stripping". Dans notre cas, des ions hydrure  $\text{H}^-$  sont accélérés par le cyclotron. Au voisinage de la périphérie du cyclotron, le faisceau d'ions hydrure  $\text{H}^-$  est dirigé vers une feuille mince, dite "feuille de stripping", réalisée généralement en carbone. Cette feuille de stripping a pour effet d'arracher les électrons périphériques des ions hydrure  $\text{H}^-$ , changeant ainsi leur charge. La courbure de la trajectoire est alors inversée, et le faisceau est conduit à l'extérieur de la machine par un orifice.

Le schéma du cyclotron étudié est représenté sans souci d'échelle en annexe 2

Un champ électrique, variable dans le temps, peut être établi dans l'intervalle étroit qui sépare les "dees" D1 et D2. Le champ électrique est nul à l'intérieur des "dees". On négligera la durée du transit entre les deux "dees".

Le champ électrique variable est obtenu en appliquant une tension sinusoïdale entre les deux "dees", de valeur maximale  $U_M = 50,0 \text{ kV}$ .

Le cyclotron est réglé de telle façon que lorsque la particule passe entre les deux "dees", la valeur de la tension accélératrice est alors égale à  $U_M$ .

Un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  de valeur  $B = 1,5 \text{ T}$ , règne à l'intérieur de chaque "dee", sa direction est perpendiculaire au plan de la figure 2

Les parties 1, 2, 3 et 4 sont indépendantes.

### **1. Accélération des ions $\text{H}^-$ .**

#### **1.1. Départ des ions $\text{H}^-$ dans la zone où règne le champ électrique E du cyclotron.**

1.1.1. Préciser le signe et la charge de l'ion hydrure ; comparer avec l'ion hydronium  $\text{H}^+$

1.1.2. On injecte un ion hydrure  $\text{H}^-$  au point O avec une vitesse négligeable. On considère que le poids de l'ion hydrure est négligeable devant les autres forces en présence.

Sur la figure 2 est dessinée dans chaque "dee", une partie de la trajectoire d'un ion hydrure  $\text{H}^-$ .

Sachant qu'au départ l'ion hydrure  $\text{H}^-$  se dirige vers le "dee" D1, préciser la polarité de chacun des "dees" D1 et D2 à cet instant.

1.1.3. Après avoir justifié les réponses sur la copie, représenter sur la figure 2 au point d'injection O :

- le champ électrique  $\vec{E}$  régnant entre les deux "dees",

- la force électrique  $\vec{F}_E$  s'exerçant alors sur un ion hydrure  $\text{H}^-$

1.1.4. Calculer l'énergie cinétique  $E_0$  acquise par un ion hydrure  $\text{H}^-$  lors d'un passage entre les deux "dees" en joules et en keV.

## 1.2. Mouvement des ions $H^-$ dans la zone où règne le champ magnétique (zone 1).

1.2.1. Donner l'expression vectorielle de la force magnétique  $\vec{F}_B$  (force de Lorentz)

1.2.2. Représenter le vecteur vitesse  $\vec{v}$  et la force magnétique  $\vec{F}_B$  (force de Lorentz) au point M, sans souci d'échelle sur la figure 2.

1.2.3. Représenter le vecteur champ magnétique sur le schéma en justifiant la réponse sur la copie.

## 1.3. Sortie des ions $H^-$ au voisinage de la périphérie du cyclotron.

*On suppose que la vitesse initiale des ions hydrure  $H^-$  est négligeable ainsi que la distance entre les deux "dees".*

1.3.1. Calculer le nombre de passages  $n$ , nécessaires entre les "dees" pour obtenir des ions hydrure  $H^-$  d'énergie cinétique finale  $E_{cf} = 14,0$  MeV.

1.3.2. Expliquer pourquoi on peut considérer que les ions hydrures sont "non-relativistes".

Calculer leur vitesse finale  $v_f$ , (correspondant à cette énergie).

1.3.3. En déduire un ordre de grandeur de la taille du cyclotrons

## 2. Obtention des protons $H^+$ .

*Lorsque les ions hydrure ont l'énergie cinétique finale  $E_{cf}$ , on interpose sur leur trajet, dans la zone 2, où le vecteur champ magnétique est identique à celui de la zone 1, une feuille de carbone. Les ions  $H^-$  sont alors "épluchés" et donnent des protons  $H^+$ .*

2.1. Combien d'électrons doit-on enlever à l'ion hydrure  $H^-$  pour obtenir un proton  $H^+$  ?

2.2. À l'aide de justifications qualitatives, indiquer par son numéro 1, 2 ou 3, la trajectoire que les protons suivent après leur "épluchage".

## 3. Obtention des noyaux de cuivre

*Les protons obtenus sont envoyés ensuite sur une cible de nickel  ${}^{64}_{28}Ni$ .*

*Le choc des protons sur la cible de nickel produit des noyaux de cuivre 64.*

3.1. Écrire l'équation de cette réaction nucléaire. Préciser la nature de la particule produite en même temps que le noyau  ${}^{64}_{29}Cu$ .

3.2. *Il est également possible d'obtenir des noyaux  ${}^{67}_{29}Cu$  à partir cette fois, d'une cible de zinc selon le mécanisme  ${}^A_ZZn(p, 2p){}^{67}_{29}Cu$  qui résume le bombardement d'une cible de zinc par des protons avec formation de cuivre 67.*

3.2.1. Écrire l'équation de cette autre réaction nucléaire.

3.2.2. Préciser les valeurs des nombres A et Z du noyau de la cible. Justifier la réponse.

## 4. Désintégration du cuivre 64.

*Le cuivre 64 est émetteur "beta +".*

*Ce radionucléide est un candidat potentiel en radiodiagnostic.*

4.1. Le noyau formé se trouve dans un état excité. Écrire l'équation de désintégration de  ${}^{64}_{29}Cu$ .

4.2. Calculer l'énergie disponible lors de la désintégration d'un noyau de  ${}^{64}_{29}Cu$  (en MeV). Préciser sous quelles formes cette énergie apparaît.

4.3. Que va-t-il se passer pour la particule émise lors de cette désintégration pendant la traversée du milieu environnant ? Décrire plus particulièrement le phénomène se produisant en fin de parcours.

4.4. *On considère un échantillon de cuivre 64 présentant une activité  $A_0 = 200$  MBq.*

4.4.1. Calculer la valeur de la constante radioactive  $\lambda$  du cuivre 64 dans le système international d'unités.

4.4.2. Calculer le nombre  $N_0$  de noyaux de cuivre 64 présents dans l'échantillon considéré.

4.4.3. Calculer la masse de l'échantillon en nanogrammes. *On assimilera la masse de l'atome à la masse du noyau.*

4.4.4. Calculer la durée pour laquelle l'échantillon aura perdu 90% de son activité initiale.

Figure 1

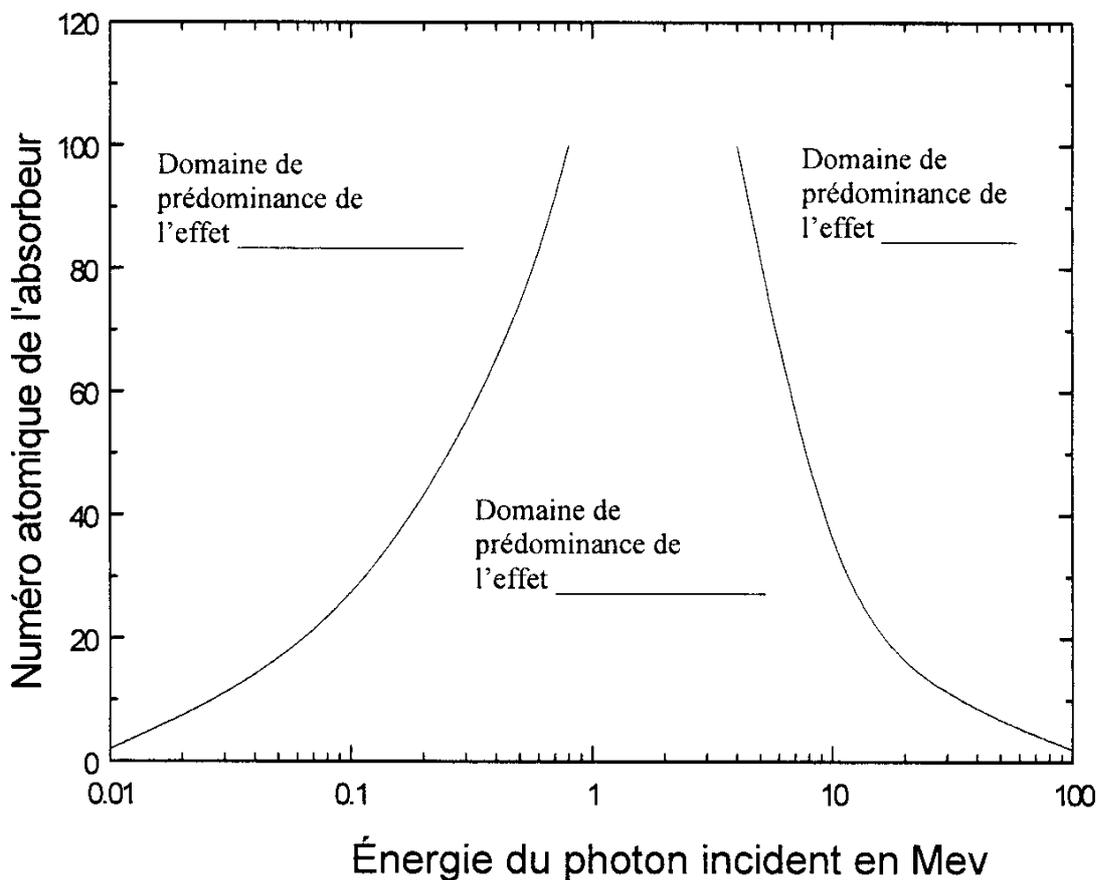


Figure 2

