Physique Générale A

Série d'exercices 19: Physique Nucléaire. - corrigé - 14 Avril 2026

Remarque: les exercices au format QCM devraient être réalisables en 2 minutes environ. Des exercices plus longs sont proposés afin d'approfondir vos connaissances. Ceux-ci font toutefois partie du champ de l'examen.

1.) **QCM A, Composition d'un atome**

A. Faux. Les nucléons sont les composants du noyau dans un atome. Cette catégorie regroupe les protons de charge électrique positive $+e$ et les neutrons qui n'ont pas de charge électrique. Il suffit donc de ne compter que les protons et les électrons.

B. Faux. Les atomes sont électriquement neutres. Comme les trois atomes considérés ont chacun un seul proton, ils doivent tous avoir un seul électron.

C. Faux. Le nombre de protons donné par le numéro atomique Z détermine le nom d'un élément chimique, cependant le nombre de neutrons présents dans le noyau peut fluctuer créant ainsi des isotopes. Un atome de carbone contient 6 protons, donc $^{12}_{6}C$ est un isotope du carbone, mais pas $^{12}_{7}X$.

D. Faux. Si le nombre de protons est modifié alors le type de l'élément chimique est différent, il ne s'agit donc pas d'un isotope du carbone.

E. Vrai.

2.) **QCM A, Désintégrations nucléaires**
B. Vrai. En effet, cette réaction nucléaire correspond à un mécanisme de fusion nucléaire entre deux noyaux, où deux noyaux initiaux engendrent un nouveau noyau final plus lourd. Cela ne correspond donc pas à de la désintégration nucléaire comme les points A. (désintégration α), C. (désintégration β^+) et D. (désintégration γ), où seulement un noyau initial se transforme de lui-même.

3.) **QCM K', Tomographie à émission de positrons**
Les réponses aux questions sont les suivantes :

A. Faux, les photons proviennent de l'annihilation d'un électron et d'un positron. La conservation de l'énergie dicte que l'énergie de chaque photon correspond à l'énergie totale d'un électron ou positron.

$$E_\gamma = m_{electron}c^2 = m_{positron}c^2 = 9.109 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{m/s})^2 = 8.198 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$$

$$E_\gamma = \frac{8.198 \cdot 10^{-14}\ \text{J}}{1.602 \cdot 10^{-19}\ \text{J/eV}} = 511\,\text{keV}.$$

B. Vrai. Le temps mis par les photons pour arriver au détecteur est

$$t_1 = \frac{x_1}{c} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{x_2}{c}$$

La différence de temps d'arrivée est donc

$$\Delta t = \frac{|x_1 - x_2|}{c} = \frac{9\,\text{cm}}{299\,792\,458\,\text{m/s}} = 0,3\,\text{ns}.$$

C. Faux. Dans la partie B, nous avons vu qu'une différence de temps de 0,3 ns (300 ps) correspond à une distance de 9 cm. Si une scanner PET a une résolution temporelle de 100 ps, ce scanner serait capable de mesurer la position avec une précision de

$$\Delta x = 9\,\text{cm} \cdot \frac{100\,\text{ps}}{300\,\text{ps}} = 3\,\text{cm}$$

le long de la direction de propagation des photons.

D. Vrai, voir les diapositives 23 et 24.

4.) **QCM K', Équivalence masse - énergie**

Les réponses aux questions sont les suivantes :

A. Vrai. L'électron-volt est défini comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt : 1 eV = (1 e) $\times$ (1 V), où e désigne la valeur absolue de la charge électrique de l'électron.

B. Vrai. Une masse en kilogramme peut être convertie en MeV via la relation $E = mc^2$. Par exemple, on peut exprimer la masse de l'électron comme $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg = 0.511 MeV. Ici, 0.511 MeV correspond à l'énergie au repos de l'électron.

C. Faux. L'énergie au repos d'une particule de masse m vaut $E_0 = mc^2$.

D. Faux. L'énergie au repos d'une masse de 51 kg vaut : $E_0 = mc^2 = 51 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 4.59 \cdot 10^{18}$ J. Pour convertir des joules en électron-volt, il utiliser la relation 1 eV = $1.602 \cdot 10^{-19}$ J. Ainsi, $E_0 = 4.59 \cdot 10^{18}$ J/($1.602 \cdot 10^{-19}$ J/eV) = $2.87 \cdot 10^{37}$ eV = $2.87 \cdot 10^{31}$ MeV.

5.) **QCM K', Atome de Chlore**

A. Vrai. ${}^{35}_{17}$Cl contient 18 neutrons et 17 protons. En prenant $m_p = 1.007276$ uma et $m_n = 1.00866$ uma, on trouve :

$$m(17\ p + 18\ n) = 17 \cdot m_p + 18 \cdot m_n = 35.279572 \text{ uma}$$

B. Vrai. Le défaut de masse D_m est la différence entre la masse des constituants du noyau et la masse du noyau. On a donc :

$$D_m = m(17\ p + 18\ n) - M({}^{35}_{17}\text{Cl}) = 35.279572 - 34.968853 = 0.310719 \text{ uma}$$

C. Vrai. L'énergie de liaison s'exprime :

$$E_l = (Zm_p + (A - Z)m_n - M)c^2$$

On reconnait le défaut de masse $D_m = Zm_p + (A - Z)m_n - M$. On a donc $E_l = D_m c^2$. On veut E_l en MeV, il faut donc que D_m soit en MeV/c^2. Pour convertir des unités de masse atomique en MeV/c^2, on utilise le facteur de conversion 1 uma = 931.494 MeV/c^2. On a ainsi :

$$D_m = 0.310719 \cdot 931.494 = 289.4 \text{ MeV/c}^2.$$

On a $E_l = D_m c^2$. Comme D_m a les unités de MeV/c^2, on a $E_l = D_m = 289.4$ MeV

NB: Tout le calcul peut être fait en utilisant les unités SI (poids en kg et énergie en J), mais il faut être très précis sur les décimales à prendre. Les unités MeV/c^2 sont très utilisées en physique nucléaire pour simplifier c^2 qui est régulièrement présent dans les équations.

D. Vrai. L'énergie de liaison par nucléon du ${}^{35}_{17}$Cl est :

$$\frac{E_l}{A} = \frac{289.4}{35} = 8.27 \text{ MeV/nucléon.}$$

6.) **QCM A, Énergie de liaison**

C. Pour calculer l'énergie de liaison, nous calculons le défaut de masse :

$$D_m = 26 \cdot m_p + 30 \cdot m_n - m_{\text{fer}} = (26 \cdot 1.00728 + 30 \cdot 1.008665 - 55.93494)\text{uma} = 0.514\,\text{uma}.$$

En convertissant le défaut de masse en électron-volt et en joule, nous obtenons l'énergie de liaision :

$$0.514\,\text{uma} = 0.514\,\text{uma} \cdot \frac{931.5\,\text{MeV}}{\text{uma}} = 479\,\text{MeV}$$

$$0.514\,\text{uma} = 0.514\,\text{uma} \cdot \frac{1.49 \times 10^{-10}\,\text{J}}{\text{uma}} = 7.66 \times 10^{-11}\,\text{J}.$$

Par conséquent, l'option C est correcte.

7.) **QCM A, Activité d'éléments radioactifs**

B Vrai. L'activité en fonction du temps de chaque élément nous est donnée par :

$$A(t) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\lambda t}, \tag{1}$$

avec $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$.

Après t = 1 an = $365.25 \cdot 24 \cdot 3600$ secondes = $3.156 \cdot 10^7$ secondes, l'activité de ces 4 éléments devient :

A. Uranium 238 :

$$A(1\,\text{an}) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{1\,\text{an}}{T_{1/2}}} = 3 \cdot 10^6 \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{1\,\text{an}}{4.47 \cdot 10^9\,\text{an}}} \simeq 3 \cdot 10^6\ \text{Bq} \tag{2}$$

L'activité de l'Uranium 238 n'a pas changé en un an. En effet, sa demi-vie $T_{1/2} = 4.47 \cdot 10^9$ ans est infiniment très grande par rapport à un an. Sa demi-vie est tellement grande qu'elle est comparable à l'âge de l'Univers : de l'ordre de $10 \cdot 10^9$ ans.

B. Césium 134 :

$$A(1\,\text{an}) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{1\,\text{an}}{T_{1/2}}} = 7 \cdot 10^{15} \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{1\,\text{an}}{2\,\text{an}}} = 4.95 \cdot 10^{15}\ \text{Bq} \tag{3}$$

L'activité du Césium 134 a légèrement diminuée après un an mais reste du même ordre de grandeur. En effet, l'année attendue reste plus faible que la demi-vie $T_{1/2} = 2$ ans. Après un an, c'est le Césium 134 qui sera l'élément radioactif le plus actif.

C. Iode 131 :

$$A(1\,\text{an}) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{1\,\text{an}}{T_{1/2}}} = 6 \cdot 10^{17} \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{365.25\,\text{jour}}{8\,\text{jour}}} = 1.08 \cdot 10^4\ \text{Bq} \tag{4}$$

L'activité de l'Iode 131, très intense au début (t = 0), décroit très vite après un an, en perdant plusieurs ordres de grandeur. En effet, cela vient du fait que sa demi-vie $T_{1/2} = 8$ jours est beaucoup plus courte qu'un an. Les noyaux d'Iode 131 se sont presque tous désintégrés.

C. Nobélium 259 :

$$A(1\,\text{an}) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{1\,\text{an}}{T_{1/2}}} = 1 \cdot 10^{20} \cdot \mathrm{e}^{-\ln(2)\frac{365.25 \cdot 24 \cdot 60\,\text{min}}{58\,\text{min}}} = 0\ \text{Bq} \tag{5}$$

La calculatrice affiche une activité parfaitement nulle pour le Nobélium 259. Techniquement, cela veut dire qu'elle est inférieure à 10^{-99} Bq (limite pour la calculatrice). En réalité, cela signifie qu'il n'y a plus aucun noyau de Nobélium 259. Même si le Nobélium 259 avait initialement une activité titanesque, tous les noyaux se sont désintégrés après 1 an. Ceci s'explique par une demi-vie $T_{1/2} = 58$ mins infiniment plus courte qu'un an.

8.) **QCM K', Cancer de la thyroïde et Iode 131**

A. Faux. Au bout de 16 jours (2 demi-vies), l'activité de la pilule est divisée par 4, et la pilule a donc une activité $A(16j) = 3,5 \cdot 10^9$ Bq.

B. Vrai. Au moment d'être ingérée, l'activité est $A(16j) = 3,5 \cdot 10^9$ Bq. On a :

$$A = \lambda N \text{ avec } \lambda = \frac{ln(2)}{t_{1/2}}$$

On trouve donc :

$$N(16j) = \frac{A(16j)}{\lambda} = A(16j)\frac{t_{1/2}}{ln(2)} = 3,5 \cdot 10^9 \frac{8 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{ln(2)} = 3,49 \cdot 10^{15} \text{ noyaux de } {}^{131}_{53}\text{I}.$$

C. Vrai. Initialement (16 jours avant l'administration au patient), il y avait donc 4 fois plus de noyaux, et on a donc $N_0 = 4 \cdot N(16j) = 1,4 \cdot 10^{16}$ noyaux d'iode ${}^{131}_{53}$I.

D. Vrai. On a :

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{ln(2)}{t_{1/2}}t}$$

En prenant $A_0 = A(16j)$, on trouve:

$$A(180j) = A(16j)e^{-\frac{ln(2)}{t_{1/2}}t} = 3.5 \cdot 10^9 e^{-\frac{ln(2)}{8}180} = 590 \text{ Bq}$$

En réalité, le patient est moins radioactif, car il a éliminé au cours des 6 mois une partie d'iode radioactif par la vessie.

9.) **Exercice d'approfondissement : Datation au ${}^{14}_{6}$C du pharaon Khéops**

A. Vrai. Le nombre d'atomes de carbone (essentiellement ${}^{12}_{6}$C) dans un prélèvement de 1 mg d'os de personne vivante (soit $m_{{}^{12}_{6}C} = 0.3$ mg de ${}^{12}_{6}$C) est donné par :

$$N_{{}^{12}_{6}C} = \frac{m_{{}^{12}_{6}C}}{M^{molaire}_{{}^{12}_{6}C}} \cdot N_{Av} = \frac{0.3 \times 10^{-3}}{12} \cdot 6.02 \times 10^{23} = 1.505 \cdot 10^{19} \text{ atomes de } {}^{12}_{6}C$$

$$N^{vivant}_{{}^{14}_{6}C} = 1.2 \times 10^{-12} \cdot N_{{}^{12}_{6}C} = 1.2 \times 10^{-12} \cdot 1.5 \cdot 10^{19} = 1.806 \times 10^7 \text{ atomes de } {}^{14}_{6}C$$

où N_{Av} est le nombre d'Avogadro.

B. Vrai. L'activité d'un prélèvement de 1 mg d'os de personne vivante est donnée par le nombre d'atomes de ${}^{14}_{6}$C multiplié par la constante radioactive du ${}^{14}_{6}$C :

$$A^{vivant}_{{}^{14}_{6}C} = \lambda \cdot N^{vivant}_{{}^{14}_{6}C} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N^{vivant}_{{}^{14}_{6}C}$$

Comme 5730 ans $= 1.808 \times 10^{11}$ s, alors :

$$A^{vivant}_{{}^{14}_{6}C} = \frac{\ln 2}{1.808 \times 10^{11}} \cdot 1.806 \times 10^7 = 6.9238 \times 10^{-5} \text{ Bq}$$

C. Vrai. Le nombre d'atomes de ${}^{14}_{6}$C du prélèvement de 1 mg sur l'os du pharaon est :

$$N^{mort}_{{}^{14}_{6}C} = N_{{}^{12}_{6}C} \cdot 6.92 \times 10^{-13} = 1.0415 \times 10^7 \text{ atomes de } {}^{14}_{6}C.$$

L'activité du prélèvement de 1 mg d'os du pharaon est :

$$A^{mort}_{{}^{14}_{6}C} = \lambda \cdot N^{mort}_{{}^{14}_{6}C} = \frac{\ln 2}{1.807 \times 10^{11}} \cdot 1.0415 \times 10^7 = 3.9928 \times 10^{-5} \text{ Bq}.$$

D. Vrai. La date de la mort du pharaon est donnée par la loi de décroissance de l'activité radioactive :

$$A^{mort}_{{}^{14}_{6}C} = A^{vivant}_{{}^{14}_{6}C} \cdot e^{-\lambda t} \leftrightarrow \frac{A^{mort}_{{}^{14}_{6}C}}{A^{vivant}_{{}^{14}_{6}C}} = e^{-\lambda t} \leftrightarrow \ln\left(\frac{A^{mort}_{{}^{14}_{6}C}}{A^{vivant}_{{}^{14}_{6}C}}\right) = \ln(e^{-\lambda t})$$

$$\leftrightarrow \ln\left(\frac{A^{mort}_{{}^{14}_{6}C}}{A^{vivant}_{{}^{14}_{6}C}}\right) = -\lambda t \leftrightarrow t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{A^{mort}_{{}^{14}_{6}C}}{A^{vivant}_{{}^{14}_{6}C}}\right)$$

$$\leftrightarrow t = -\frac{5730}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{3.9949 \times 10^{-5}}{6.9276 \times 10^{-5}}\right) \approx 4551 \text{ ans}$$

Le pharaon est donc mort il y a 4551 ans.

10.) **Exercice d'approfondissement : Traitement des déchets nucléaires**

A. L'activité initiale totale s'exprime comme :

$$A_{0\,tot} = A_{0\,I} + A_{0\,Cs} = \lambda_I \cdot N_{0\,I} + \lambda_{Cs} \cdot N_{0\,Cs}.$$

Or, $N_{0\,I} = 0.8 \cdot N_{0\,tot}$ et $N_{0\,Cs} = 0.2 \cdot N_{0\,tot}$ et $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$.
D'où :

$$A_{0\,tot} = \ln 2 \cdot (0.8/T_{1/2\,I} + 0.2/T_{1/2\,Cs}) \cdot N_{0\,tot}$$

$$\Leftrightarrow N_{0\,tot} = \frac{A_{0\,tot}}{\ln 2 \cdot (0.8/T_{1/2\,I} + 0.2/T_{1/2\,Cs})} = 4.97 \cdot 10^{21} \text{ atomes.}$$

Il y a au total $N_{0\,tot} = 4.97 \cdot 10^{21}$ noyaux radioactifs initialement présents.

B. Les nombres initiaux de noyaux $N_{0\,I}$ et $N_{0\,Cs}$ s'obtiennent directement avec :

$$N_{0\,I} = 0.8 \cdot N_{0\,tot} = 0.8 \cdot 4.97 \cdot 10^{21} = 3.98 \cdot 10^{21} \text{ atomes,}$$

et

$$N_{0\,Cs} = 0.2 \cdot N_{0\,tot} = 0.2 \cdot 4.97 \cdot 10^{21} = 9.94 \cdot 10^{20} \text{ atomes.}$$

Avec ces valeurs, nous pouvons déterminer les actvités de ces éléments comme :

$$A_{0\,I} = \lambda_I \cdot N_{0\,I} = \frac{\ln 2}{T_{1/2\,I}} \cdot N_{0\,I} = \frac{\ln 2}{8 \cdot 24 \cdot 3600} \cdot 3.98 \cdot 10^{21} = 3.99 \cdot 10^{15} \text{ Bq} \simeq A_{0\,tot},$$

et

$$A_{0\,Cs} = \lambda_{Cs} \cdot N_{0\,Cs} = \frac{\ln 2}{T_{1/2\,Cs}} \cdot N_{0\,Cs} = \frac{\ln 2}{2 \cdot 365.25 \cdot 24 \cdot 3600} \cdot 9.94 \cdot 10^{20} = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ Bq.}$$

L'activité totale initiale $A_{0\,tot}$ provient majoritairement de la désintégration de l'Iode 131.

C. L'activité radioactive en fonction du temps $A(t)$ s'exprime généralement comme :

$$A(t) = A_0 \cdot \mathrm{e}^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Dans notre cas, nous avons au bout d'un an :

$$A_I(1\text{an}) = A_{0\,I} \cdot \mathrm{e}^{-\ln 2 \cdot \frac{1\text{an}}{T_{1/2\,I}}} = 3.99 \cdot 10^{15} \cdot \mathrm{e}^{-\ln 2 \cdot \frac{365.25\text{jour}}{8\text{jour}}} = 72 \text{ Bq,}$$

et

$$A_{Cs}(1\text{an}) = A_{0\,Cs} \cdot \mathrm{e}^{-\ln 2 \cdot \frac{1\text{an}}{T_{1/2\,Cs}}} = 1.1 \cdot 10^{13} \cdot \mathrm{e}^{-\ln 2 \cdot \frac{1\text{an}}{2\text{an}}} = 7.8 \cdot 10^{12} \text{ Bq.}$$

Après un an, l'activité de l'Iode 131 est complètement négligeable par rapport à celle du Césium 134. Ceci s'explique par le fait que sa demi-vie $T_{1/2\,I} = 8$ jours est très courte par rapport à un an, contrairement au Césium 134 ($T_{1/2\,Cs} = 2$ ans).

D. Avec l'activité des deux éléments, nous avons directement le nombre de noyaux au bout d'un an :

$$N_I(1\text{an}) = \frac{A_I(1\text{an}) \cdot T_{1/2\,I}}{\ln 2} = \frac{72 \cdot 8 \cdot 24 \cdot 3600}{\ln 2} = 7.2 \cdot 10^7 \text{ atomes,}$$

et

$$N_{Cs}(1\text{an}) = \frac{A_{Cs}(1\text{an}) \cdot T_{1/2\,Cs}}{\ln 2} = \frac{7.8 \cdot 10^{12} \cdot 2 \cdot 365.25 \cdot 24 \cdot 3600}{\ln 2} = 7.1 \cdot 10^{20} \text{ atomes.}$$

Les noyaux ^{134}Cs sont présents à quasiment $\sim 100\%$. Après un an, les noyaux ^{131}I ne représentent qu'une infime proportion des noyaux radioactifs $\sim 1 \cdot 10^{-11}\%$. Même si les noyaux ^{131}I étaient initialement prépondérant avec une forte activité, après un 1 an, il n'en reste quasiment plus dû à la courte demi-vie.

E. Pour obtenir une activité de 1000 Bq, il faut attendre plus d'un an. Comme nous l'avions constaté précédemment, l'activité de ^{131}I est complètement négligeable par rapport à celle de ^{134}Cs. Ainsi pour un temps $t = t_{1000\,\text{Bq}}$ où l'activité totale sera de 1000 Bq, nous pouvons directement écrire :

$$A_{tot}(t_{1000\,\text{Bq}}) \simeq A_{Cs}(t_{1000\,\text{Bq}}) = A_{0\,Cs}\mathrm{e}^{-\ln 2 \cdot \frac{t_{1000\,\text{Bq}}}{T_{1/2\,Cs}}}.$$

Il faut maintenant isoler $= t_{1000\,\text{Bq}}$ de l'équation :

$$\mathrm{e}^{-\ln 2 \cdot \frac{t_{1000\,\text{Bq}}}{T_{1/2\,Cs}}} = \frac{A_{Cs}(t_{1000\,\text{Bq}})}{A_{0\,Cs}}$$

$$\Leftrightarrow -\ln 2 \cdot \frac{t_{1000\,\text{Bq}}}{T_{1/2\,Cs}} = \ln\left(\frac{A_{Cs}(t_{1000\,\text{Bq}})}{A_{0\,Cs}}\right)$$

$$\Leftrightarrow t_{1000\,\text{Bq}} = -\frac{T_{1/2\,Cs}}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{A_{Cs}(t_{1000\,\text{Bq}})}{A_{0\,Cs}}\right) = -\frac{2\text{ an}}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{1000}{1.1 \cdot 10^{13}}\right) = 67\text{ ans.}$$

L'activité radioactive de ces déchets nucléaires sera faible dans 67 ans. Cela veut dire que pendant au moins 67 ans, ces déchets devront restés enterrés pour éviter tout risque pour l'environnement et la santé. En réalité, ces déchets contiennent en plus d'autres éléments radioactifs avec souvent des demi-vies très longues, rendant la durée d'enterrement de ces déchets significativement plus longue.