

EXERCICE II. LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE ET PROVOQUÉE DE L'URANIUM (5,5 POINTS)

En 1797, Joseph Denis François Champeaux, ingénieur des Mines, remarque dans l'échantillonnage d'un collectionneur « un minéral d'un beau jaune verdâtre formé de lamelles placées les unes sur les autres ». Il met 3 ans à localiser le gisement d'origine de cette roche à Saint Symphorien de Marmagne.

Nommé en 1852 « Autunite » en référence à l'Autunois, en Bourgogne, cet étrange minéral est exploité clandestinement par les collectionneurs et utilisé à la cristallerie de Baccarat pour la fabrication de verres jaunes à reflets verts.

C'est à cette époque que son analyse chimique est effectuée : il s'agit de phosphate d'uranium et de calcium hydraté de formule $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. L'uranium métal est alors isolé du minéral provenant de Saint Symphorien.

En 1896, Henri Becquerel découvre le phénomène de radioactivité en travaillant sur l'uranium.

L'uranium étant devenu un minéral militaire, le CEA installe en 1946 à Saint Symphorien le premier centre de recherche et d'exploitation de l'uranium. Le site, non rentable, fermera 3 ans plus tard, mais tous les géologues de l'uranium se formeront là.

Données :

Unité de masse atomique	$u = 1,660\,54 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Énergie de masse de l'unité de masse atomique	$E = 931,5 \text{ MeV}$
Électronvolt	$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$
Megaélectronvolt	$1 \text{ MeV} = 1,00 \times 10^6 \text{ eV}$
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Nom du noyau ou de la particule	Uranium	Strontium	Xénon	Neutron	Proton
Symbole	${}_{92}^{235}\text{U}$	${}_{38}^{94}\text{Sr}$	${}_{54}^{\text{A}}\text{Xe}$	${}_0^1\text{n}$	${}_1^1\text{p}$
Masse (en u)	235,120	93,8946	138,888	1,00866	1,00728

1. A la découverte d'un minéral radioactif : l'Autunite

1.1. Qu'appelle-t-on noyau radioactif ?

1.2. L'uranium présent dans l'Autunite comprend 3 isotopes naturels : ^{238}U , présent en écrasante majorité, ^{235}U et ^{234}U .

1.2.1. Rappeler la définition de noyaux isotopes.

1.2.2. Comparer la composition des noyaux des atomes d'uranium 235 et 238.

1.3. Voici une petite partie de la chaîne de désintégration de l'uranium 238 :



1.3.1. Rappeler les lois de conservation dites lois de Soddy, intervenant lors des désintégrations nucléaires.

1.3.2. Écrire l'équation de cette désintégration du noyau d'uranium 238 en thorium 234.

1.3.3. Quel est le type de radioactivité correspondant à cette désintégration ?

1.3.4. Le thorium 234 se désintègre lui-même en protactinium ^{234}Pa .

Écrire l'équation de cette deuxième réaction de désintégration.

Quelle particule est alors émise ?

1.4. L'uranium ^{238}U présente un temps de demi-vie de $4,5 \cdot 10^9$ années.

1.4.1. Rappeler la définition du temps de demi-vie noté $t_{1/2}$.

1.4.2. En utilisant la loi de décroissance radioactive $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, retrouver la relation entre le

temps de demi-vie et la constante radioactive λ : $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

1.4.3. En déduire la valeur de la constante de désintégration radioactive λ , en an^{-1} , puis en s^{-1} .

1.5. L'activité A_0 d'une pierre d'Autunite de masse voisine de 100 g, n'est pas négligeable ; elle est voisine de 9000 Bq.

1.5.1. Rappeler la définition de l'activité d'une espèce radioactive.

1.5.2. Que représente un Becquerel (Bq) ?

1.5.3. On rappelle que l'activité $A(t)$ à la date t et le nombre de noyaux $N(t)$ présents au même instant sont liés par la relation : $A(t) = \lambda N(t)$.

Calculer le nombre de noyaux N_0 d'uranium présents dans cette pierre à la date $t = 0$ s et montrer que son ordre de grandeur est de 10^{21} .

1.5.4. L'activité $A(t)$ de l'échantillon suit la loi de décroissance radioactive : $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$ avec $A(t)$ l'activité de l'échantillon à la date t et A_0 l'activité initiale qui vaut 9000 Bq.

Que vaut l'activité de la pierre au bout de 10 ans ?

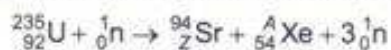
Que vaut-elle au bout de 1000 ans ?

1.5.5. Que peut-on en déduire à propos de la décroissance de l'activité de cette pierre.

1.5.6. Quels effets biologiques peut avoir l'inhalation prolongée de poussières issues d'une telle pierre ?

2. La radioactivité provoquée de l'uranium :

Dans certaines conditions, l'uranium 235 peut se scinder en deux noyaux plus légers et plus stables comme par exemple le strontium et le xénon selon l'équation suivante :



- 2.1. Comment appelle-t-on ce type de réaction ?
- 2.2. Déterminer la valeur de A et de Z.
- 2.3. Bilan énergétique :
 - 2.3.1. Énoncer la relation d'équivalence masse-énergie.
 - 2.3.2. Exprimer, en fonction des masses des particules et des noyaux intervenant dans l'équation précédente, la variation d'énergie de masse ΔE au cours de cette réaction nucléaire.
 - 2.3.3. À l'aide des données en début d'exercice, calculer sa valeur en J, puis en MeV.
- 2.4. Est-ce que de l'énergie est libérée au cours de cette réaction ? Justifier la réponse.

EXERCICE I : DES ISOTOPES DU PHOSPHORE 31 (6 points)

Dans la nature, l'isotope prépondérant de l'élément phosphore est le phosphore 31.

1. Le phosphore 32

Données :

masse du noyau de phosphore 32 $m(P) = 5,31 \times 10^{-26}$ kg.

extrait de la classification périodique : $_{11}\text{Na}$; $_{12}\text{Mg}$; $_{13}\text{Al}$; $_{14}\text{Si}$; $_{15}\text{P}$; $_{16}\text{S}$; $_{17}\text{Cl}$.

Substance radioactive artificielle, le phosphore $^{32}_{15}\text{P}$ est utilisé en médecine nucléaire. Il est radioactif β^- et sa demi-vie $t_{1/2}$ est égale à 14,3 jours. Il se présente sous forme d'une solution qui s'injecte par voie veineuse pour traiter la polyglobulie primitive (maladie de Vaquez). Il se fixe sélectivement sur les globules rouges (hématies), car il suit le métabolisme du fer, abondant dans ces globules, et son rayonnement détruit les hématies en excès. C'est un traitement efficace et bien toléré de cette affection.

D'après le site « dictionnaire médical »

1.1. Généralités

1.1.1. Donner la composition du noyau de phosphore 32.

1.1.2. Définir le terme " isotope ".

1.1.3. Quelle est la particule émise lors d'une radioactivité β^- ?

1.1.4. Énoncer les lois de conservation qui régissent une réaction nucléaire, puis établir l'équation de désintégration du phosphore 32 en précisant l'élément formé.

1.2. Loi de décroissance

Un patient reçoit par voie intraveineuse une solution de phosphate de sodium contenant une masse m_0 égale à $10,0 \times 10^{-9}$ g de phosphore 32.

Le nombre de noyaux de phosphore restant au cours du temps est donné par la loi de décroissance radioactive : $N = N_0 \times e^{-\lambda t}$ où λ est une constante strictement positive.

1.2.1. Calculer le nombre initial N_0 de noyaux de phosphore 32.

1.2.2. Définir la demi-vie $t_{1/2}$ puis établir la relation entre $t_{1/2}$ et λ .

La relation précédente conduit à $\lambda = 5,61 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

1.2.3. Définir l'activité $A(t)$ d'un échantillon à l'instant t et en déduire la relation entre l'activité $A(t)$ et $N(t)$ le nombre de noyaux à l'instant t . Calculer la valeur de l'activité A_0 de l'échantillon de phosphore reçu par le patient.

1.2.4. Déterminer l'instant t_1 où l'activité sera divisée par 10.

1.2.5. Tracer l'allure de la courbe représentant $A(t)$ en fonction de t . On tracera la courbe sans calculatrice ; on représentera simplement les activités correspondant à $t_{1/2}$, $2t_{1/2}$, $3t_{1/2}$, $4t_{1/2}$, $5t_{1/2}$...).

1.2.6. Retrouver graphiquement l'ordre de grandeur du temps t_1 .

2. Le phosphore 30

En 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie ont synthétisé du phosphore 30 ($^{30}_{15}\text{P}$) en bombardant de l'aluminium 27 avec des particules alpha. Le phosphore 30 se désintègre par émission β^+ en silicium 30, un isotope stable.

Données :

- unité de masse atomique : $1 \text{ u} = 1,660 5 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,602 18 \times 10^{-19} \text{ J}$
- célérité de la lumière dans le vide : $c = 2,997 92 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- masse de différentes particules :

Particule	proton	neutron	$^{30}_{15}\text{P}$
Masse	$m_p = 1,007 28 \text{ u}$	$m_n = 1,008 66 \text{ u}$	$m(^{30}\text{P}) = 29,970 06 \text{ u}$

- énergie de liaison par nucléon du phosphore 31 :
 $E_l / A = 8,48 \text{ MeV/nucléon}$

2.1. Donner la définition de l'énergie de liaison E_l d'un noyau.

2.2. Donner l'expression du défaut de masse Δm d'un noyau en fonction du nombre de nucléons et du nombre de protons de ce noyau et des masses m_p , m_n et $m(^{30}\text{P})$. Calculer le défaut de masse d'un noyau de phosphore 30 ; l'exprimer en kilogramme.

2.3. Énergie de liaison par nucléon du phosphore 30.

2.3.1. Quelle relation lie l'énergie de liaison et le défaut de masse ?

Calculer l'énergie de liaison d'un noyau de phosphore 30 exprimée en joule puis en MeV. En déduire l'énergie de liaison par nucléon.

2.3.2. Comparer cette valeur à celle de l'énergie de liaison par nucléon du phosphore 31. Conclure.

EXERCICE II. LES RÉACTIONS DE FISSION ET LEUR UTILISATION POUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE (5,5 points)

L'uranium est un métal relativement répandu dans l'écorce terrestre. Il est essentiellement composé de deux isotopes, l'uranium 238 ${}^{238}_{92}\text{U}$ et l'uranium 235 ${}^{235}_{92}\text{U}$, formés en même temps que la Terre, il y a 4,5 milliards d'années. Du fait de leur très grand temps de demi-vie, ces deux isotopes subsistent encore aujourd'hui dans la croûte terrestre mais en proportions très différentes comme le montre le tableau 1 suivant :

Noyau	Temps de demi-vie en 10^9 ans	Proportion dans la croûte terrestre (%)
${}^{238}_{92}\text{U}$	4,50	supérieure à 99
${}^{235}_{92}\text{U}$	0,713	inférieure à 1

Tableau 1

L'objectif de cet exercice est de comprendre pourquoi malgré la différence d'abondance, le combustible utilisé dans les centrales nucléaires est l'uranium 235 (nécessitant alors une étape d'enrichissement du minerai) et quelle serait la principale caractéristique d'une nouvelle filière de réacteur (génération IV) utilisant l'uranium 238.

Les quatre parties sont indépendantes.

1. À propos de l'abondance relative des isotopes de l'uranium

1.1. Qu'appelle-t-on noyaux isotopes ?

1.2. On note N_0 le nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon. Donner la loi de décroissance radioactive $N(t)$ en fonction de N_0 et de la constante radioactive λ .

1.3. Définir le temps de demi-vie radioactive noté $t_{1/2}$.

1.4. Au bout d'une durée $t = 2 t_{1/2}$, par combien est divisé N_0 ?

Même question pour une durée $t = n \cdot t_{1/2}$, où n est un entier ?

1.5. Abondance relative des isotopes

1.5.1. Quelle est approximativement la valeur du rapport (noté R_{238}) de l'âge de la Terre au temps de demi-vie de l'uranium 238 ? Même question pour l'uranium 235 (rapport noté R_{235}). On donnera les valeurs sous forme de nombres entiers.

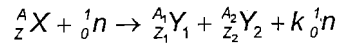
1.5.2. En supposant que les noyaux d'uranium 238 et 235 ont été initialement formés en quantités égales (on notera N_0 le nombre de noyaux initialement présents), déduire de ce qui précède les valeurs des nombres (notés N_{238} et N_{235}) de chacun des deux noyaux actuellement présents en fonction de N_0 .

1.5.3. Déduire des résultats précédents la valeur du rapport des populations des noyaux d'uranium 238 et 235 actuellement présents. Justifier alors le fait qu'il existe actuellement une différence d'abondance entre ces deux noyaux présents dans la croûte terrestre.

2. Un exemple de réaction de fission utilisée dans un réacteur nucléaire

2.1. Donner la définition de la fission nucléaire.

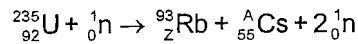
2.2. Des réactions de fission sont induites par la capture d'un neutron et s'écrivent :



k est un entier égal à 2 ou 3 suivant les noyaux fils formés.

Quel phénomène risque-t-il de se produire si $k \geq 2$?

2.3. Compléter l'équation de réaction suivante en donnant les valeurs des nombres Z et A et en précisant les lois utilisées :



3. Modélisation du mécanisme de fission

On peut modéliser la fission d'un noyau lourd suivant le schéma donné sur la figure 7 suivante :

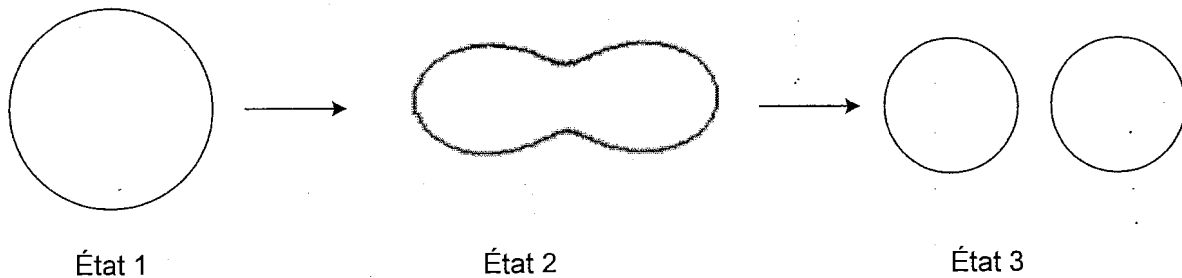


Figure 7

À partir d'un noyau lourd dans l'état 1, on passe par un état intermédiaire 2 où le noyau est déformé, puis on obtient l'état 3 avec deux noyaux fils séparés.

Dans l'état 2, la distance moyenne inter-nucléons est plus grande que dans l'état 1.

3.1. Quelle est la nature de la force d'interaction qui assure la cohésion du noyau ? Cette force est-elle attractive ou répulsive ?

3.2. Quelle est la nature de l'autre force d'interaction s'exerçant entre les protons ? Cette force est-elle attractive ou répulsive ?

3.3. Le schéma modélisant la fission d'un noyau lourd se traduit du point de vue énergétique par le diagramme donné **SUR LA FIGURE 8 DE L'ANNEXE EN PAGE 12.**

3.3.1. Les positions relatives des niveaux d'énergie des états 1 et 3 sont-elles compatibles avec le fait que la réaction de fission libère de l'énergie ?

3.3.2. À faible distance inter-nucléons, la force de cohésion est prédominante. Justifier que pour déformer le noyau, il faut apporter de l'énergie au système noyau. Ceci est-il compatible avec les positions relatives des niveaux d'énergie des états 1 et 2 ?

3.3.3. Pour réaliser la fission, il faut donc apporter une énergie minimale au noyau, appelée énergie seuil. Représenter cette énergie seuil par une flèche sur le diagramme donné **SUR LA FIGURE 8 DE L'ANNEXE EN PAGE 12.**

4. Noyaux fissiles

Il existe un phénomène appelé capture neutronique permettant d'apporter de l'énergie, notée E_a , au noyau A_ZX et conduisant à un nouveau noyau ${}^{A+1}_ZY$. Les valeurs de cette énergie apportée par la capture d'un neutron quasiment au repos sont données pour certains noyaux dans le tableau 2. Les noyaux ${}^{233}_{92}\text{U}$ et ${}^{239}_{92}\text{Pu}$ n'existent pas à l'état naturel mais le plutonium peut être produit à partir d'uranium 238.

Tableau 2

Énergie apportée par la capture d'un neutron quasiment au repos				
Noyau avant capture	${}^{233}_{92}\text{U}$	${}^{235}_{92}\text{U}$	${}^{238}_{92}\text{U}$	${}^{239}_{94}\text{Pu}$
Noyau après capture	${}^{234}_{92}\text{U}$	${}^{236}_{92}\text{U}$	${}^{239}_{92}\text{U}$	${}^{240}_{94}\text{Pu}$
Énergie apportée E_a (MeV)	6,8	6,5	4,8	6,5

Dans le tableau 3 figurent les énergies seuil nécessaires à provoquer la fission de ces mêmes noyaux ${}^{A+1}_ZY$ après capture.

Tableau 3

Énergie seuil nécessaire pour provoquer la fission				
Noyau ${}^{A+1}_ZY$	${}^{234}_{92}\text{U}$	${}^{236}_{92}\text{U}$	${}^{239}_{92}\text{U}$	${}^{240}_{94}\text{Pu}$
Énergie seuil de fission E_s (MeV)	6,0	5,9	5,8	5,9

4.1. Pour réaliser une réaction de fission, il faut apporter une énergie minimale appelée énergie seuil E_s . En utilisant les tableaux 2 et 3, déterminer parmi les quatre noyaux A_ZX celui qui ne peut pas conduire à une fission après capture d'un neutron pratiquement au repos.

4.2. Production d'énergie à partir d'uranium 238

On parle de neutrons quasiment au repos quand il s'agit de neutrons très lents, c'est-à-dire de très faible énergie cinétique E_c , typiquement $E_c = 0,025 \text{ eV}$.

Lorsque l'énergie cinétique E_c du neutron capturé par le noyau au repos A_ZX n'est pas négligeable celle-ci s'ajoute à l'énergie apportée par la capture du neutron au repos : l'énergie apportée lors de la capture d'un neutron est alors égale à $E_c + E_a$.

4.2.1. Dans le cas du noyau trouvé à la question 4.1, quelle condition doit vérifier l'énergie cinétique du neutron pour qu'après sa capture, la fission du nouveau noyau soit possible ?

4.2.2. Le forum international Génération IV auquel participe la France a pour but de développer des réacteurs à « neutrons rapides » permettant à la fois l'optimisation de la consommation des ressources en uranium et la minimisation des déchets à vie longue.

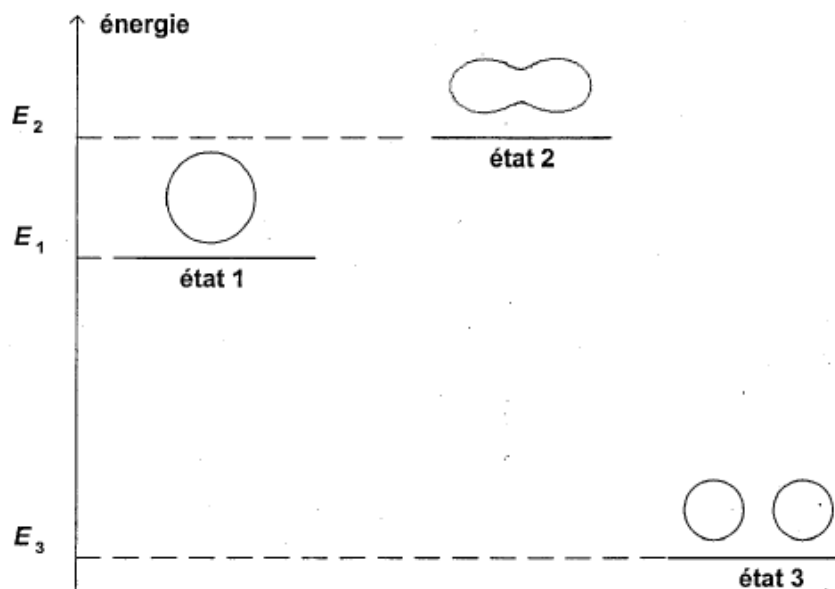
Justifier l'expression « neutrons rapides » pour désigner les neutrons utilisés dans cette nouvelle filière de réacteur.

4.2.3. En considérant la grande différence d'abondance entre les noyaux d'uranium 238 et 235, expliquer qualitativement la possibilité d'optimiser la consommation des ressources en minerai uranium grâce aux réacteurs à « neutrons rapides ».

ANNEXE À RENDRE AGRAFÉE AVEC LA COPIE
ANNEXE DE L'EXERCICE II

Attention, le diagramme énergétique n'est pas à l'échelle.

Figure 8 :
Diagramme
énergétique



ANNEXE DE L'EXERCICE III

Équation chimique		$AH(aq) + H_2O(l) = A^-(aq) + H_3O^+$			
État du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)			
État initial	$x = 0$		excès		
État d'équilibre	x_{eq}		excès		

Tableau d'évolution