Nouvelle Calédonie 11/2009 EXERCICE II. (5,5 points)
LES RÉACTIONS DE FISSION ET LEUR UTILISATION POUR LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

L'uranium est un métal relativement répandu dans l'écorce terrestre. Il est essentiellement composé de deux isotopes, l'uranium 238 $^{238}_{92}U$ et l'uranium 235 $^{235}_{92}U$, 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 (%)*
$^{238}_{92}U$	*4,50*	*supérieure à 99*
$^{235}_{92}U$	*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 $t = n.\ t_{1/2}$, 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 note 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 :*

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y_1 + {}^{A_2}_{Z_2}Y_2 + k\,{}^{1}_{0}n $$

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

Quel phénomène risque-t-il de se produire si k ≥ 2 ?

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

$$ {}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{93}_{Z}\mathrm{Rb} + {}^{A}_{55}\mathrm{Cs} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

3. Modélisation du mécanisme de fission

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

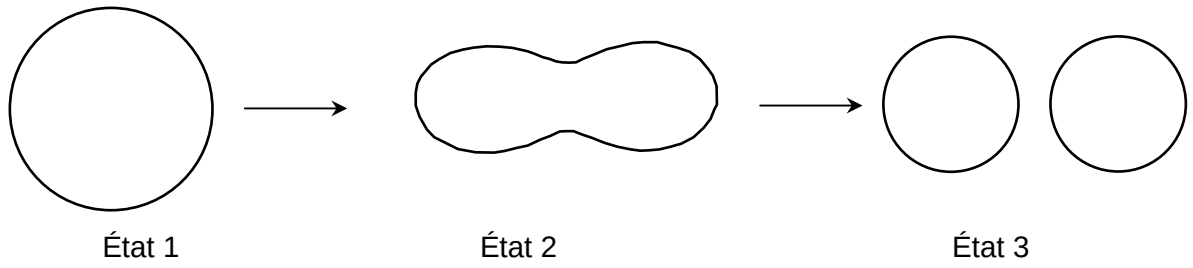


Figure 7

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****.*

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 faille 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**.

4. Noyaux fissiles

Il existe un phénomène appelé capture neutronique permettant d'apporter de l'énergie, notée E_a, au noyau ${}^{A}_{Z}X$ et conduisant à un nouveau noyau ${}^{A+1}_{Z}Y$. 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 ${}^{233}_{92}U$ et ${}^{239}_{94}Pu$ 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	${}^{233}_{92}U$	${}^{235}_{92}U$	${}^{238}_{92}U$	${}^{239}_{94}Pu$
Noyau après capture	${}^{234}_{92}U$	${}^{236}_{92}U$	${}^{239}_{92}U$	${}^{240}_{94}Pu$
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 ${}^{A+1}_{Z}Y$ après capture.

Tableau 3

Énergie seuil nécessaire pour provoquer la fission				
Noyau ${}^{A+1}_{Z}Y$	${}^{234}_{92}U$	${}^{236}_{92}U$	${}^{239}_{92}U$	${}^{240}_{94}Pu$
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 ${}^{A}_{Z}X$ 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-a-dire de très faible énergie cinétique E_c, typiquement E_c = 0,025 eV.
Lorsque l'énergie cinétique E_c du neutron capturé par le noyau au repos ${}^{A}_{Z}X$ 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

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

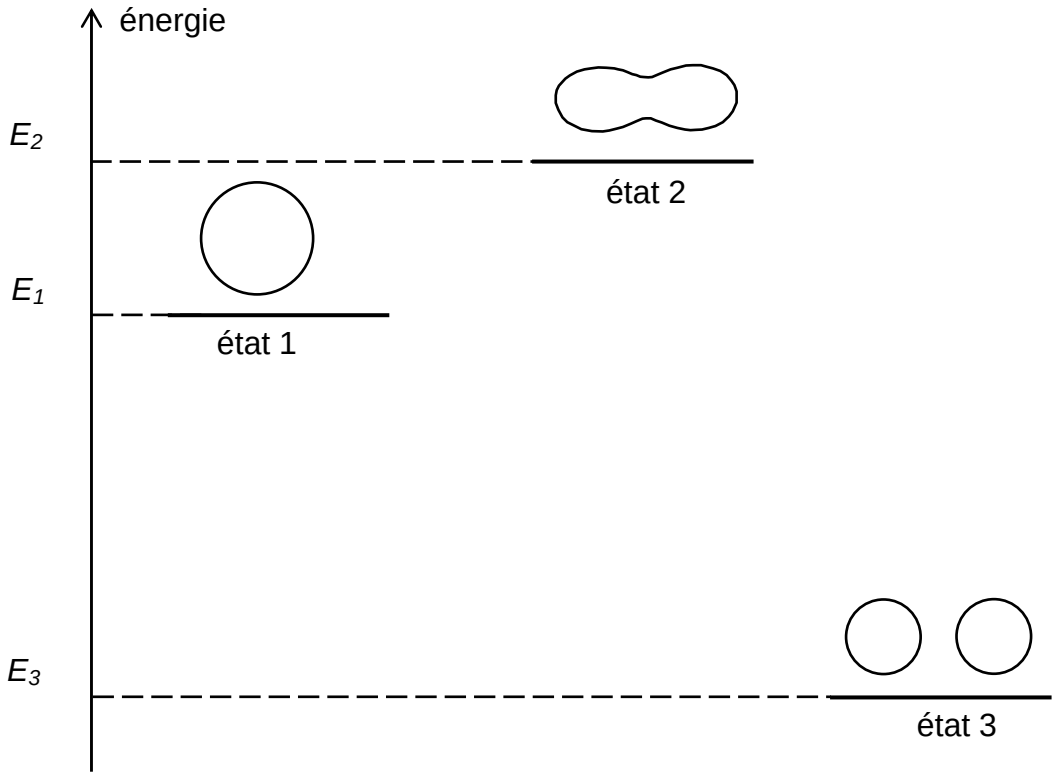


Figure 8 : Diagramme énergétique