

NFI/GE2, Option « Energies Renouvelables ».  
Technologie des réacteurs nucléaires, Examen.

F. Ravelet<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Arts et Metiers ParisTech, DynFluid,*  
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.  
contact: florent.ravelet@ensam.eu

5 avril 2019

Durée : 1h30.

Documents autorisés : une feuille manuscrite recto-verso.

Calculatrices autorisées.

Les questions sont marquées d'une puce et rédigées en italiques.

Noyau	masse (u)
${}_{92}^{239}\text{U}$	239.054292
${}_{94}^{238}\text{Pu}$	238.049558
${}_{93}^{238}\text{Np}$	238.050944
${}_{92}^{238}\text{U}$	238.050787
${}_{92}^{236}\text{U}$	236.045566
${}_{92}^{235}\text{U}$	235.043928
${}_{92}^{234}\text{U}$	234.040950
${}_{90}^{234}\text{Th}$	234.043599
${}_{2}^{4}\text{He}$	4.002603
${}_{0}^{1}\text{n}$	1.008665
${}_{1}^{1}\text{p}$	1.007276
$e^{-}$	0.0005486

TABLE 1 – Masses atomiques au repos, dans l'état fondamental, en unité de masse atomique :  $1u = 931.494 \text{ MeV}\cdot\text{c}^{-2}$ . Données issues de l'Atomic Mass Data Center (<https://www-nds.iaea.org/amdc/>); il existe même une application pour smartphone...

## 1 Pourquoi l'uranium 235 est-il plus facilement fissile que l'uranium 238 ? (10 points)

Lors de la fission d'un noyau lourd, pour pouvoir se briser en deux noyaux plus petits, il doit se déformer considérablement. Sa surface augmente inévitablement, et cette augmentation a un coût énergétique pour vaincre la « tension superficielle » introduite dans le modèle de la goutte. En d'autres termes, il existe une barrière de potentiel entre l'état initial (un noyau quasi-sphérique) et l'état final (deux noyaux plus petits, également quasi-sphériques). Ceci est illustré en Fig. 1.

A partir du modèle de la goutte, on peut estimer la barrière de fission par la formule empirique suivante :

$$E_{\text{barriere}} = 19.0 - 0.36 \frac{Z^2}{A} + \epsilon \text{ MeV}$$

avec  $\epsilon = 0$  pour les noyaux pairs en protons-pairs en neutrons,  $\epsilon = 0.4$  pour les noyaux pairs-impairs et  $\epsilon = 0.7$  pour les noyaux impairs-impairs. On se propose de comparer les noyaux d'uranium 235 et d'uranium 238.

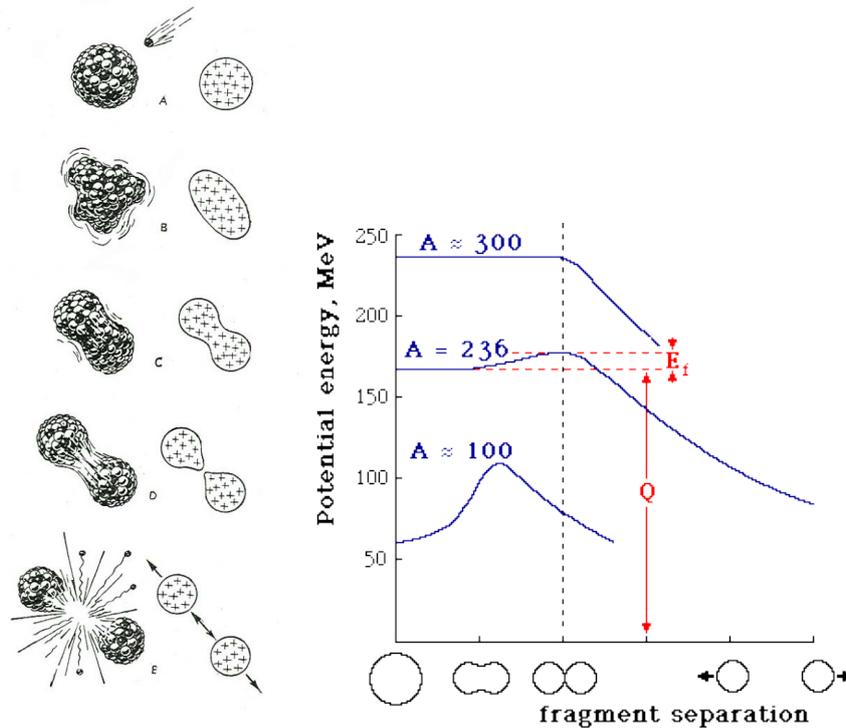
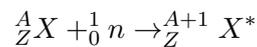


FIGURE 1 – Schéma des étapes d’une fission induite, illustrant la barrière de fission

La réaction de capture d’un neutron par  ${}^A_Z X$  s’écrit :



La petite étoile \* signifie que le noyau composé est dans un état excité. Si ce niveau d’excitation excède la barrière de fission, le noyau composé pourra se scinder en deux.

### a Fission de l’uranium 235

1. • A partir des données du tableau 1, calculer la somme de la masse d’un neutron et de la masse d’un noyau  ${}^{235}_{92}U$ .
2. • Cette masse est celle du noyau excité  ${}^{236}_{92}U^*$ , formé suite à la capture d’un neutron sans énergie cinétique. La comparer à celle du noyau  ${}^{236}_{92}U$  dans son état fondamental.
3. • Traduire cette différence (masse de  ${}^{236}_{92}U^*$  - masse de  ${}^{236}_{92}U$ ) en énergie d’excitation (donner le résultat en MeV).
4. • A partir de la formule donnant la barrière de fission, calculer  $E_{\text{barriere}}$  pour  ${}^{236}_{92}U$ .
5. • En comparant  $E_{\text{barriere}}$  et l’énergie d’excitation pour  ${}^{236}_{92}U^*$ , conclure quand à la possibilité de fission de  ${}^{235}_{92}U$  par des neutrons de toute énergie cinétique.

### b Fission de l’uranium 238

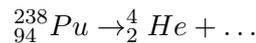
1. • A partir des données du tableau 1, calculer la somme de la masse d’un neutron et de la masse d’un noyau d’ ${}^{238}_{92}U$ .
2. • Cette masse est celle du noyau excité  ${}^{239}_{92}U^*$ , formé suite à la capture d’un neutron sans énergie cinétique. La comparer à celle du noyau  ${}^{239}_{92}U$  dans son état fondamental.

3. • Traduire cette différence (masse de  ${}_{92}^{239}\text{U}^*$  - masse de  ${}_{92}^{239}\text{U}$ ) en énergie d'excitation (donner le résultat en MeV).
4. • A partir de la formule donnant la barrière de fission, calculer  $E_{\text{barriere}}$  pour  ${}_{92}^{239}\text{U}$ .
5. • En comparant  $E_{\text{barriere}}$  et l'énergie d'excitation pour  ${}_{92}^{239}\text{U}^*$ , conclure quand au minimum d'énergie cinétique que doit apporter un neutron pour avoir une chance de fissionner  ${}_{92}^{238}\text{U}$ .

## 2 Générateur au Plutonium 238 (7 points)

Le plutonium 238 ( ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ ) est un émetteur  $\alpha$  de période de demi-vie 87.75 ans. On donne en Tab. 1 les valeurs des masses atomiques au repos de quelques noyaux.

1. • Compléter l'équation bilan de la décroissance  $\alpha$  du  ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ . Quel est le noyau formé ?



2. • A partir de la table de masse, calculer l'énergie dégagée par une réaction de décroissance  $\alpha$  du  ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ , l'exprimer en MeV.
3. • A partir de la donnée de la période de demi-vie 87.75 an, calculer la constante de décroissance radioactive du plutonium 238, l'exprimer en  $s^{-1}$ .
4. • Donner l'activité d'un kilogramme de plutonium 238, en prenant une masse molaire de  $238 \text{ g.mol}^{-1}$  et le nombre d'Avogadro égal à  $\mathcal{N} = 6.02 \times 10^{23}$ .
5. • Donner la puissance dégagée par un kilogramme de plutonium 238 (en  $\text{W.kg}^{-1}$ ).
6. • En prenant pour le plutonium pur une densité de  $19.8 \text{ g.cm}^{-3}$  (c'est un métal très dense), donner la densité de puissance dégagée par un litre de plutonium 238 (en  $\text{kW.L}^{-1}$ ).
7. • Pourrait-on faire des bouilloires à plutonium 238 ? (une bouilloire électrique typique contenant 1.7 litres d'eau a une puissance de 2 kW)

## 3 Energie cinétique des électrons relativistes (3 points)

On note  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide. L'expression de l'énergie cinétique  $E_k$  d'une particule de masse au repos  $m_0$  et de vitesse  $v$  est :

$$E_k = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

Avec le facteur relativiste  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La masse au repos de l'électron est  $m_e = 511 \text{ keV.c}^{-2}$ .

1. • Calculer l'énergie cinétique d'un électron se déplaçant à  $v = 2.25 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ . L'exprimer en keV.
2. • L'indice de réfraction d'un milieu est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans ce milieu. Sachant que l'indice de réfraction de l'eau est  $n = 1.33$ , calculer la vitesse de la lumière dans l'eau.
3. • Un neutron libre est instable par radioactivité  $\beta^-$ . Ecrire l'équation bilan de cette réaction et à partir des données du Tab. 1, donner l'énergie dégagée par cette réaction. Cette énergie se retrouvant<sup>1</sup> sous forme d'énergie cinétique de l'électron produit, peut-on avoir des électrons se déplaçant plus vite que la lumière dans l'eau à partir de cette réaction ?

---

1. presque intégralement pour être tout-à-fait rigoureux