

**EXERCICE N°1:**

Dans la nature le carbone 14 existe sous forme de deux noyaux isotopes  $^{12}_6\text{C}$  et  $^{14}_6\text{C}$ . Dans la haute atmosphère un neutron formé par l'action des rayons cosmiques bombarde un noyau d'azote 14 ( $Z=7$ ) qui se transforme en carbone 14 radioactif  $\beta^-$  avec émission d'une autre particule.

- Le symbole d'un noyau se note  $^A_ZX$ . Donner le nom des grandeurs représentées par les lettres A, Z ainsi que leur signification.
  - Donner la composition du noyau de carbone 14.
  - Définir les termes isotope et "radioactif"
- Ecrire l'équation de la réaction nucléaire correspondant à la formation du carbone 14. Identifier la particule émise.
- Ecrire l'équation de désintégration du carbone 14.
- Le temps de demi-vie du carbone 14 est 5570 ans. Qu'appelle-t-on temps de demi-vie?
- La loi de décroissance radioactive en fonction du temps est du type :  $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$ 
  - Que représente des grandeurs physiques  $N(t)$ ,  $N_0$  et  $\lambda$ .
  - Sachant que  $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$ , déterminer l'unité de  $\lambda$  par analyse dimensionnelle.
  - Calculer  $\lambda$ .

**EXERCICE N°2:**

- Donner la composition en protons et en neutrons des noyaux atomiques suivants  $^{12}_6\text{C}$  et  $^{14}_6\text{C}$ .
- Ces deux noyaux sont dits isotopes. Justifier cette affirmation en définissant le mot isotopes.
- Le carbone  $^{14}_6\text{C}$  est un noyau radioactif émetteur  $\beta^-$ . Écrire l'équation de la réaction nucléaire correspondante en la justifiant. On admet que le noyau fils n'est pas obtenu dans un état excité.
- Calculer l'énergie de liaison, en joules, du carbone  $^{14}_6\text{C}$  que l'on notera  $E(^{14}_6\text{C})$ .
- En déduire l'énergie de liaison par nucléon du carbone  $^{14}_6\text{C}$  (en joules par nucléon).
- Calculer l'énergie libérée par la réaction de la question 1.3. (en joules).

Données :

- numéros atomiques :  $Z(\text{Be}) = 4$ ,  $Z(\text{B}) = 5$ ,  $Z(\text{C}) = 6$ ,  $Z(\text{N}) = 7$ ,  $Z(\text{O}) = 8$  ;

- célérité de la lumière dans le vide :  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

- masses de quelques particules :

particule	Proton	neutron	Electron	noyau $^{14}\text{C}$	noyau $^{14}\text{N}$
masse (en kg)	$1,672\ 621 \cdot 10^{-27}$	$1,674\ 927 \cdot 10^{-27}$	$9,109\ 381 \cdot 10^{-31}$	$2,325\ 84 \cdot 10^{-26}$	$2,325\ 27 \cdot 10^{-26}$

**II. Datation par le carbone  $^{14}_6\text{C}$** 

Deux scientifiques, Anderson et Libby, ont eu l'idée d'utiliser la radioactivité naturelle du carbone  $^{14}_6\text{C}$  pour la datation. Les êtres vivants, végétaux ou animaux, assimilent du carbone. La proportion du nombre de noyaux de  $^{14}_6\text{C}$  par rapport au nombre de noyaux de  $^{12}_6\text{C}$  reste constante pendant toute leur vie. À la mort de l'organisme, tout échange avec le milieu naturel cesse et les atomes de  $^{14}_6\text{C}$  disparaissent peu à peu. La radioactivité décroît alors avec le temps selon une loi exponentielle, qui permet d'atteindre un ordre de grandeur de l'âge de l'échantillon analysé. On admet que le rapport entre le nombre de  $^{14}_6\text{C}$  et  $^{12}_6\text{C}$  est resté constant dans les êtres vivants au cours des derniers millénaires.

On note  $N(t)$  le nombre de noyaux radioactifs d'atomes de " carbone 14 " à un instant de date  $t$  pour un échantillon et  $N_0$  le nombre de noyaux radioactifs à un instant pris comme origine des dates ( $t_0 = 0$  s) pour ce même échantillon. On note  $\lambda$  la constante radioactive.

1- Écrire la loi de décroissance radioactive.

2- Temps de demi-vie et constante radioactive. Donner la définition du temps de demi-vie d'un échantillon radioactif que l'on notera  $t_{1/2}$ . Retrouver l'expression littérale du temps de demi-vie en fonction de la constante radioactive :  $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ .

3- Le temps de demi-vie de l'isotope du carbone  $^{14}_6\text{C}$  est  $5,70 \cdot 10^3$  ans. En déduire la valeur de la constante radioactive  $\lambda$  en  $\text{an}^{-1}$ .

4- L'activité  $A(t)$  d'un échantillon radioactif à l'instant de date  $t$  est donnée ici par l'expression :  $A(t) = \lambda N(t)$  Définir l'activité et donner son unité dans le système international.

5 - En utilisant cette expression et la loi de décroissance, déduire que :

$$A(t) / A_0 = N(t) / N_0 = \exp(-\lambda t) \text{ où } A_0 \text{ est l'activité à l'instant de date } t_0 = 0 \text{ s.}$$

### III La faille de San Andreas

En 1989, à proximité de la faille de San Andreas en Californie, on a prélevé des échantillons de même masse de végétaux identiques ensevelis lors d'anciens séismes. On a mesuré l'activité de chacun d'eux. On admet que cette activité est due uniquement à la présence de  $^{14}_6\text{C}$ .

échantillons numéro	1	2	3
activités de l'échantillon (SI)	0,233	0,215	0,223

L'activité d'un échantillon de même végétal vivant et de même masse est  $A_0 = 0,255$  SI. On note  $t$  la durée qui s'est écoulée entre l'instant de date  $t_0 = 0$  s du séisme et l'instant de la mesure.

1- Déterminer la valeur  $t_3$  qui correspond à l'échantillon n°3.

2- En déduire l'année au cours de laquelle a eu lieu le séisme qui correspond à l'échantillon n°3 étudié en 1989.

3- Pour les échantillons 1 et 2, on propose les années 586 et 1247. Attribuer à chaque échantillon, l'année qui correspond. Justifier sans calcul.

### EXERCICE N°3:

Données : iode I ( $Z=53$ ) ; xénon Xe ( $Z=54$ ) ; césium Cs ( $Z= 55$ ) ; baryum Ba ( $Z= 56$ ) ; lanthane La ( $Z=57$ )

La masse du noyau d'un élément X sera notée  $m_X$ .  $m_p$  = masse du proton ;  $m_n$  = masse du neutron

Un réacteur de centrale nucléaire fonctionne à l'uranium enrichi (3% d'uranium 235 fissile et 97% d'uranium 238 non fissile).

#### Le noyau d'uranium 235

1- Donner la composition du noyau d'uranium  $^{235}_{92}\text{U}$ .

2- Donner l'expression du défaut de masse  $\Delta m$  de ce noyau en utilisant les notations définies précédemment.

3- Donner l'expression de l'énergie de liaison du noyau d'uranium  $^{235}_{92}\text{U}$ . Préciser les unités.

#### Fission de l'uranium 235

Par capture d'un neutron lent, un noyau d'uranium 235 subit une réaction de fission d'équation  $^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{x}_{54}\text{Xe} + {}^{y}_{94}\text{Sr} + 3{}^1_0\text{n}$

1- Calculer les valeurs de  $x$  et de  $y$  en précisant les lois de conservation utilisées.

2- Donner l'expression de l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium  $^{235}_{92}\text{U}$  en utilisant les notations définies précédemment.

#### Désintégration du noyau de césium 137

Les produits de fission sont radioactifs et se transmutent en d'autres produits, eux-mêmes radioactifs. Parmi ces déchets, on trouve le césium 137, radioactif  $\beta^-$  dont la demi-vie  $t_{1/2}=30$  ans

1- Écrire l'équation de la désintégration d'un noyau de césium 137, le noyau fils étant formé

dans un état excité.

2- Quelle est la nature du rayonnement émis lors de la désexcitation du noyau fils ?

3- Définir la demi-vie d'un noyau radioactif.

4- À un instant choisi comme origine des dates, on dispose d'un échantillon de césium 137 de masse  $m_0$ . Donner l'expression littérale de la masse  $m$  de césium 137 restant à l'instant de date  $t$  en fonction de  $m_0$  et de  $t_{1/2}$ .

5- Montrer qu'à la date  $t = n t_{1/2}$ , la fraction de la masse initiale restante vaut :  $m/m_0 = 1/2^n$ .

- En déduire la durée approximative au bout de laquelle la masse restante de césium 137 est égale à 0,1% de sa masse initiale.

**EXERCICE N°4:**

À 800 millions de degrés, le carbone fusionne en magnésium ( $Z = 12$ ), à 1 milliard de degrés, l'oxygène ( $Z=8$ ) fusionne en silicium ( $Z = 14$ ) et à 4 milliards de degrés, le silicium fusionne en fer ( $Z = 26$ )

On donne : énergie de liaison d'un noyau de carbone 12  $^{12}_6\text{C} : E_l = 92,2 \text{ MeV}$

1) Définir l'énergie de liaison.

2) Calculer l'énergie moyenne de liaison par nucléon d'un noyau de carbone 12.

Le tableau suivant donne les énergies moyennes de liaison par nucléon de quelques noyaux :

	$^4_2\text{He}$	$^{56}_{26}\text{Fe}$	$^{238}_{92}\text{U}$
$E_l / A$ en MeV/nucléon	7,1	8,8	7,6

3) Parmi ces trois noyaux, lequel est le plus stable ? Justifier.

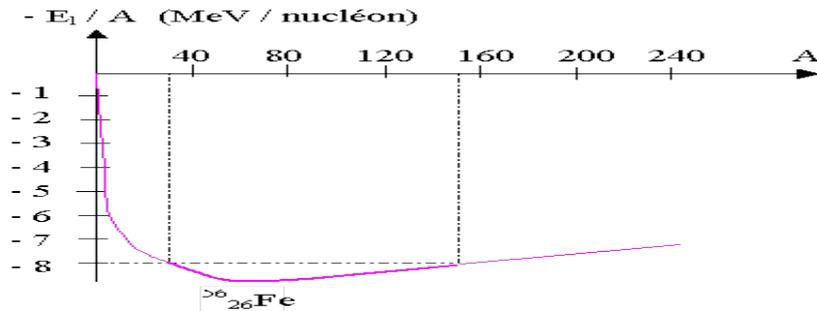
4) En utilisant la courbe d'Aston donnée en annexe, répondre aux questions suivantes :

4.1) Comment évolue la stabilité d'un noyau quand son nombre de nucléons augmente ?

Distinguer trois domaines.

4.2) Quels sont les deux types de réactions nucléaires qui permettent d'accéder au maximum de stabilité ? Préciser dans quel domaine.

4.3) Justifier pourquoi la synthèse des éléments chimiques au cœur des étoiles s'arrête à l'élément fer.



**EXERCICE N°5:**

La glande thyroïde produit des hormones essentielles à différentes fonctions de l'organisme à partir de l'iode alimentaire. Pour vérifier la forme ou le fonctionnement de cette glande, on procède à une scintigraphie thyroïdienne en utilisant les isotopes 131 ( $^{131}_{53}\text{I}$ ) ou 123 ( $^{123}_{53}\text{I}$ ) de l'iode. Pour cette scintigraphie, un patient ingère une masse  $m = 1,00 \mu\text{g}$  de l'isotope  $^{131}_{53}\text{I}$ .

Données :

Constante d'Avogadro :  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ;

Masse molaire de l'iode  $^{131}_{53}\text{I} : M = 131 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

1) Donner la composition du noyau de l'isotope  $^{131}_{53}\text{I}$ .

2) Montrer que le nombre d'atomes radioactifs (donc de noyaux radioactifs) initialement présents dans la dose ingérée est égal à  $4,60 \cdot 10^{15}$  atomes.

Ce nombre sera noté  $N_0$  par la suite.

L'instant de l'ingestion est pris comme origine des dates ( $t = 0$  s).

3) L'isotope  $^{131}_{53}\text{I}$  est radioactif  $\beta^-$ .

Après avoir précisé les lois de conservation utilisées, écrire l'équation de désintégration.

On admettra que le noyau fils produit n'est pas produit dans un état excité.

Données : Quelques symboles d'éléments chimiques :

antimoine	tellure	Iode	xénon	césium
$_{51}\text{Sb}$	$_{52}\text{Te}$	$_{53}\text{I}$	$_{54}\text{Xe}$	$_{55}\text{Cs}$

4) La demi-vie de l'isotope  $^{131}_{53}\text{I}$  vaut 8,0 jours.

4.1) Rappeler la loi de décroissance radioactive en faisant intervenir  $N_0$  et la constante radioactive.

4.2) Demi-vie d'un échantillon radioactif.

4.2.1) Définir la demi-vie  $t_{1/2}$  d'un échantillon radioactif.

4.2.2) En déduire la relation  $\ln 2 = \lambda \cdot t_{1/2}$ .

4.3) Tracer l'allure de la courbe correspondant à l'évolution au cours du temps du nombre de noyaux radioactifs dans l'échantillon, en justifiant le raisonnement utilisé. On placera correctement les points correspondant aux instants de dates  $t_{1/2}$ ,  $2t_{1/2}$  et  $3t_{1/2}$ .

5) On rappelle que l'activité  $A(t)$ , à l'instant de date  $t$ , d'un échantillon de noyaux radioactifs est définie par  $A(t) = |dN(t)/dt|$ .

5.1) A partir de la loi de décroissance radioactive montrer que l'activité de l'échantillon  $^{131}_{53}\text{I}$  à l'instant de date  $t$  est proportionnelle au nombre de noyaux radioactifs à cet instant.

5.2) En déduire l'expression littérale de l'activité  $A_0$  de l'échantillon à l'origine des dates, en fonction de  $N_0$  et  $t_{1/2}$ . Calculer sa valeur numérique, exprimée dans le système international.

5.3) Calculer dans le système international, l'activité  $A$  de l'échantillon  $^{131}_{53}\text{I}$  à l'instant de l'examen, sachant qu'en général, l'examen est pratiqué quatre heures après l'ingestion de l'iode radioactif  $^{131}_{53}\text{I}$ .

5.4) En déduire la perte relative d'activité  $|\Delta A|/A_0 = |A(t) - A_0|/A_0$  entre les deux instants évoqués. Cette perte sera calculée et exprimée en pourcentage.

6) La demi-vie de l'isotope  $^{123}_{53}\text{I}$  est 13,2 heures.

On considère maintenant que le patient ingère une quantité d'isotope  $^{123}_{53}\text{I}$  telle que l'activité initiale de cet isotope soit la même que celle de l'isotope  $^{131}_{53}\text{I}$  trouvée ci-dessus.

L'activité  $A$  (valeur calculée à la question 5.3) sera-t-elle atteinte après une durée identique, plus petite ou plus grande qu'avec l'isotope  $^{131}_{53}\text{I}$  de l'iode ? Justifier.

Une méthode graphique peut être utilisée.

### EXERCICE N°6:

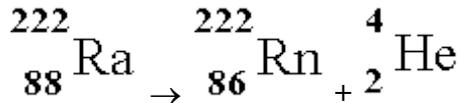
Données (valables pour tout l'exercice)

Unité de masse atomique	$u = 1,66054 \cdot 10^{-27}$ kg
Energie de masse de l'unité de masse atomique	$E = 931,5$ MeV
Electronvolt	$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ J
Megaélectronvolt	$1 \text{ MeV} = 1 \cdot 10^6$ eV
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \cdot 10^8$ m.s <sup>-1</sup>

Nom du noyau ou de la particule	Radon	Radium	Hélium	Neutron	Proton	électron
Symbole	$^{222}_{86}\text{Rn}$	$^{222}_{88}\text{Ra}$	$^4_2\text{He}$	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{p}$	$^0_{-1}\text{e}$
Masse (en u)	221,970	225,977	4,001	1,009	1,007	$5,49 \cdot 10^{-4}$

### A) Désintégration du radium

L'air contient du radon 222 en quantité plus ou moins importante. Ce gaz radioactif naturel est issu des roches contenant de l'uranium et du radium. Le radon se forme par désintégration du radium (lui-même issu de la famille radioactive de l'uranium 238), selon l'équation de réaction nucléaire suivante :



- 1) Quel est le type de radioactivité correspondant à cette réaction de désintégration? Justifier votre réponse.
- 2) Défaut de masse

- a) Donner l'expression littérale du défaut de masse  $\Delta m$  du noyau de symbole  ${}^A_Z X$  et de masse  $m_X$
  - b) Calculer le défaut de masse du noyau de radium Ra L'exprimer en unité de masse atomique  $u$
  - 3) Ecrire la relation d'équivalence masse-énergie.
  - 4) Le défaut de masse  $\Delta m(\text{Rn})$  du noyau de radon Rn vaut  $3,04 \cdot 10^{-27}$  kg
    - a) Définir l'énergie de liaison  $E_1$  d'un noyau.
    - b) Calculer, en joule, l'énergie de liaison  $E_1(\text{Rn})$  du noyau de radon.
    - c) Vérifier que cette énergie de liaison vaut  $1,71 \cdot 10^3$  MeV.
    - d) En déduire l'énergie de liaison par nucléon  $E_1/A$  du noyau de radon. Exprimer ce résultat en  $\text{MeV} \cdot \text{nucléon}^{-1}$ .
  - 5) Bilan énergétique
    - a) Etablir littéralement la variation d'énergie  $\Delta E$  de la réaction (1) en fonction de  $m_{\text{Ra}}$ ,  $m_{\text{Rn}}$  et  $m_{\text{He}}$ , masses respectives des noyaux de radium, de radon et d'hélium.
    - b) Exprimer  $\Delta E$  en joule.
- B) Fission de l'uranium 235

A l'état naturel, l'élément uranium comporte principalement les isotopes  ${}_{92}^{238}\text{U}$  et  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Dans une centrale nucléaire "à neutrons lents", le combustible est de l'uranium « enrichi ». Lors de la fission d'un noyau d'uranium 235, un grand nombre de réactions sont possibles. Parmi celles-ci, il y en a une qui donne les noyaux de zirconium et de tellure, dont les symboles

des noyaux sont  ${}_{40}^{99}\text{Zr}$  et  ${}_{52}^{134}\text{Te}$ .

- 1) Définir le terme "isotope"
- 2) Intérêt énergétique de la fission
  - a) Donner la définition de la fission.
  - b) Ecrire la réaction de fission d'un noyau d'uranium 235 bombardé par un neutron, conduisant à la formations de Zr et de Te.
  - c) Les noyaux U, Zr et Te sont placés sur la courbe d'Aston (voir annexe). A partir de cette courbe, dégager l'intérêt énergétique de cette réaction de fission

### C) Désintégration du noyau Zr :

Le noyau Zr issu de la fission du noyau d'uranium est instable. Il se désintègre au cours d'une désintégration  $\beta^-$  en donnant le noyau de niobium Nb.

- 1) Donner la définition de la radioactivité  $\beta^-$
- 2) Ecrire l'équation de désintégration du noyau Zr.

### **EXERCICE N°7:**

- 1) La radioactivité  $\beta^-$

Certains noyaux atomiques instables sont la source de rayonnements, désignés par les trois premières lettres de l'alphabet grec : alpha ( $\alpha$ ), bêta ( $\beta$ ) et gamma ( $\gamma$ ).

[...] La radioactivité  $\beta^-$  fut observée sous la forme d'un rayonnement qui était dévié par des champs électriques ou des aimants en sens contraire du rayonnement alpha.

Elle est donc portée par des charges électriques négatives.

[...] Un exemple de radioactivité  $\beta^-$  est celui d'un isotope naturel à vie très longue du potassium, le potassium 40, dont 4000 noyaux se désintègrent par seconde dans le corps humain.

On donne un extrait de la classification périodique des éléments :

Elément	Chlore	Argon	Potassium	Calcium	Scandium
Symbole	Cl	Ar	K	Ca	Sc
Numéro atomique	17	18	19	20	21

1.1) Définir un noyau radioactif.

1.2) Donner la composition du noyau de potassium 40.

1.3) En indiquant les lois de conservation à respecter, donner l'équation de la désintégration de ce noyau en supposant que le noyau fils n'est pas obtenu dans un état excité.

1.4) Le noyau fils obtenu est-il un isotope du potassium ? Justifier la réponse.

2) La radioactivité  $\alpha$

Un exemple de désintégration alpha est celui, historique, du radium 226 qui se transforme en un noyau de radon en éjectant une particule alpha.

La réaction libère 4,6 MeV. Le noyau résiduel de radon est un gaz rare lui-même radioactif, ce qui permit à Rutherford de le détecter en 1898 à Montréal.

Données :

La masse des noyaux peut être exprimée en unité de masse atomique (u), définie par :

$$1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

$$\text{Masse des noyaux : } m(^{226}\text{Ra}) = 225,97701 \text{ u}$$

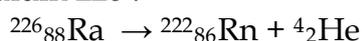
$$m(^4\text{He}) = 4,00150 \text{ u}$$

$$m(^{222}\text{Rn}) = 221,97029 \text{ u}$$

$$\text{Célérité de la lumière dans le vide : } c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

2. Ecrire l'expression littérale, en fonction des données, de l'énergie libérée par la désintégration du radium 226 :



Calculer cette énergie en J puis en MeV.

### **EXERCICE N°8:**

1. Le radon  $^{222}_{86}\text{Rn}$  fait partie d'une famille radioactive qui, par une série d'émissions  $\beta^-$  et  $\alpha$ , aboutit au plomb  $^{206}_{82}\text{Pb}$

2. Ecrire l'équation de la réaction nucléaire représentant l'émission  $\alpha$  par des noyaux  $^A_Z\text{X}$ .

3. Ecrire l'équation de la réaction nucléaire représentant l'émission  $\beta^-$  par des noyaux  $^A_Z\text{X}$ .

4. En déduire le nombre de désintégrations  $\beta^-$  et  $\alpha$  émises pour passer du  $^{222}_{86}\text{Rn}$  au  $^{206}_{82}\text{Pb}$ .

5. On prépare un échantillon de 1 mg de  $^{222}_{86}\text{Rn}$  et on mesure la décroissance dans le temps de la masse m du radon restant :

t(jours)	0	1	2	3	4	5
m(mg)	1	0,83	0,69	0,58	0,48	0,4

6. - A l'aide des données du tableau, donner l'ordre de grandeur de la demi-vie du radon 222.  
 - Tracer le graphe de  $\ln(m) = f(t)$ . Indiquer la nature de la courbe obtenue. En déduire la constante radioactive  $\lambda$  du radon 222 puis sa demi-vie.
7. Calculer l'activité  $A_0$  de l'échantillon de radon à  $t = 0$ . Calculer la masse  $m_{10}$  et l'activité  $A_{10}$  de l'échantillon de radon à  $t = 10$  jours.

Données : Masse molaire du radon 222 :  $M = 222 \text{ g.mol}^{-1}$

Nombre d'Avogadro :  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

### **EXERCICE N°10:**

$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  ;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ;  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  ; masse d'un neutron  $m_n = 1,00866 \text{ u}$  ; pouvoir calorifique du pétrole  $P_{cp} = 42,00 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

nom et symbole de l'élément	uranium 235 U	zirconium 95 Zr	tellure 138 Te
n° atomique	92	40	à déterminer
masse en u	234,993	94,8860	137,901

Thorium Th ( $Z = 90$ ) ; protactinium Pa ( $Z = 81$ ) ; neptunium Np ( $Z = 93$ ) ; plutonium Pu ( $Z = 94$ )

Dans une centrale nucléaire à neutrons lents, le combustible est l'uranium 235 enrichi. Il contient 3% d'uranium 235 fissile et 97% d'uranium 238 non fissile. Lors de la fission d'un noyau d'uranium 235 sous l'impact d'un neutron, plusieurs réactions sont possibles. La plus fréquente donne des noyaux de zirconium 95 et de tellure 138 ainsi qu'un ou plusieurs neutrons.

1. Ecrire la réaction de fission. Justifier.
2. Calculer en MeV l'énergie  $E_1$  libérée par cette réaction nucléaire.
3. Calculer en J l'ordre de grandeur de l'énergie  $E_2$  libérée par la fission de 1,000 g d'uranium 235.
4. Calculer la masse de pétrole libérant par combustion la même énergie. Conclure.
5. L'uranium 238 non fissile du réacteur se transforme par capture d'un neutron lent en un noyau radioactif. Ce dernier subit deux désintégrations  $\beta^-$  pour se transformer en un noyau fissile. Ecrire les équations des deux réactions nucléaires afin d'identifier le noyau fissile formé.