

## Exercices sur la radioactivité

### Données :

– Energies ...

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

– Masses des particules nucléaires :

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

<u>Elément</u>	$^{235}_{92}\text{U}$	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{239}_{92}\text{U}$	$^{141}_{56}\text{Ba}$	$^{92}_{36}\text{Kr}$	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$^{239}_{93}\text{Np}$	$^4_2\text{He}$
<u>Masse</u> ( $\times 10^{-25} \text{ kg}$ )	3,9043	3,9535	3,9692	2,3340	1,5262	3,9690	3,9691	0,06645

### Exercice n°1 : Des désintégrations nucléaires ...

1. Compléter le tableau ci-dessous des phénomènes de radioactivité naturelle (on pourra s'aider du tableau périodique en Annexe) :

Noyau père	Noyau fils	Particule	Type de radioactivité
$^{217}_{88}\text{Ra}$		Noyau d'hélium	
	$^{174}_{72}\text{Hf}$		$\beta^+$
$^{213}_{84}\text{Po}$	$^{209}_{82}\text{Pb}$		
$^{209}_{82}\text{Pb}$			$\beta^-$
	$^{103}_{43}\text{Tc}$	électron	
$^{174}_{72}\text{Hf}$			alpha
	$^{107}_{46}\text{Pd}$	positon	

2. De quel type de radioactivité s'agit-il pour tous ces noyaux ?

---

		nombre de masse de l'isotope le plus abondant		symbole de l'élément		masse molaire atomique de l'élément (g · mol <sup>-1</sup> )																																																																																																															
		A	Z	nom		M																																																																																																															
1 H hydrogène 1,0	2 He hélium 4,0	3 Li lithium 6,9	4 Be béryllium 9,0	5 B bore 10,8	6 C carbone 12,0	7 N azote 14,0	8 O oxygène 16,0	9 F fluor 19,0	10 Ne néon 20,2	11 Na sodium 23,0	12 Mg magnésium 24,3	13 Al aluminium 27,0	14 Si silicium 28,1	15 P phosphore 31,0	16 S soufre 32,1	17 Cl chlore 35,5	18 Ar argon 39,9	19 K potassium 39,1	20 Ca calcium 40,1	21 Sc scandium 45,0	22 Ti titane 47,9	23 V vanadium 50,9	24 Cr chrome 52,0	25 Mn manganèse 54,9	26 Fe fer 55,8	27 Co cobalt 58,9	28 Ni nickel 58,7	29 Cu cuivre 63,5	30 Zn zinc 65,4	31 Ga gallium 69,7	32 Ge germanium 72,6	33 As arsenic 74,9	34 Se sélénium 79,0	35 Br brome 79,9	36 Kr krypton 83,8	37 Rb rubidium 85,5	38 Sr strontium 87,6	39 Y yttrium 88,9	40 Zr zirconium 91,2	41 Nb niobium 92,9	42 Mo molybdène 95,9	43 Tc technétium 98,9	44 Ru ruthénium 101,1	45 Rh rhodium 102,9	46 Pd palladium 106,4	47 Ag argent 107,9	48 Cd cadmium 112,4	49 In indium 114,8	50 Sn étain 118,7	51 Sb antimoine 121,7	52 Te tellure 127,6	53 I iode 126,9	54 Xe xénon 131,3	55 Cs césium 132,9	56 Ba baryum 137,3	57 La lanthane 138,9	58 Ce cérium 140,1	59 Pr praseodyme 140,9	60 Nd néodyme 144,2	61 Pm prométhium -145	62 Sm samarium 150,4	63 Eu europium 152,0	64 Gd gadolinium 157,2	65 Tb terbium 158,9	66 Dy dysprosium 162,5	67 Ho holmium 164,9	68 Er erbium 167,3	69 Tm thulium 168,9	70 Yb ytterbium 173,0	71 Lu lutécium 175,0	72 Hf hafnium 178,5	73 Ta tantalum 180,9	74 W tungstène 183,9	75 Re rhenium 186,2	76 Os osmium 190,2	77 Ir iridium 192,2	78 Pt platine 195,1	79 Au or 197,0	80 Hg mercure 200,6	81 Tl thallium 204,4	82 Pb plomb 207,2	83 Bi bismuth 209,0	84 Po polonium -209	85 At astate -210	86 Rn radon -222	87 Fr francium -223	88 Ra radium 226,0	89 Ac actinium -227	90 Th thorium 232,0	91 Pa protactinium 231,0	92 U uranium 238,0	93 Np néputunium -237	94 Pu plutonium -244	95 Am américium -243	96 Cm curium -247	97 Bk berkélium -247	98 Cf californium -251	99 Es einsteinium -254	100 Fm fermium -257	101 Md mendélévium -258	102 No nobélium -259	103 Lr lawrencium -260	104 Rf rutherfordium -261	105 Db dubnium -262	106 Sg seaborgium -262	107 Bh bohrium -262	108 Hs hassium -262	109 Mt meitnerium -262	110 Ds darmstadtium -262	111 Rg roentgenium -262	112 Cn copernicium -262	113 Nh nihonium -262	114 Fl flérovium -262	115 Mc moscovium -262	116 Lv livermorium -262	117 Ts tennessine -262	118 Og oganesson -262

L = Lanthanides : 57 à 71

139 La lanthane 138,9	140 Ce cérium 140,1	141 Pr praseodyme 140,9	142 Nd néodyme 144,2	146 Pm prométhium -145	152 Sm samarium 150,4	153 Eu europium 152,0	158 Gd gadolinium 157,2	159 Tb terbium 158,9	164 Dy dysprosium 162,5	165 Ho holmium 164,9	166 Er erbium 167,3	169 Tm thulium 168,9	174 Yb ytterbium 173,0	175 Lu lutécium 175,0
--------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	--------------------------------

A = Actinides : 89 à 103

227 Ac actinium -227	232 Th thorium 232,0	231 Pa protactinium 231,0	238 U uranium 238,0	237 Np néputunium -237	244 Pu plutonium -244	243 Am américium -243	247 Cm curium -247	247 Bk berkélium -247	251 Cf californium -251	254 Es einsteinium -254	257 Fm fermium -257	258 Md mendélévium -258	259 No nobélium -259	260 Lr lawrencium -260
-------------------------------	-------------------------------	------------------------------------	------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	---------------------------------

# Exercices sur la radioactivité

## Exercice n°2 : Réacteurs nucléaires

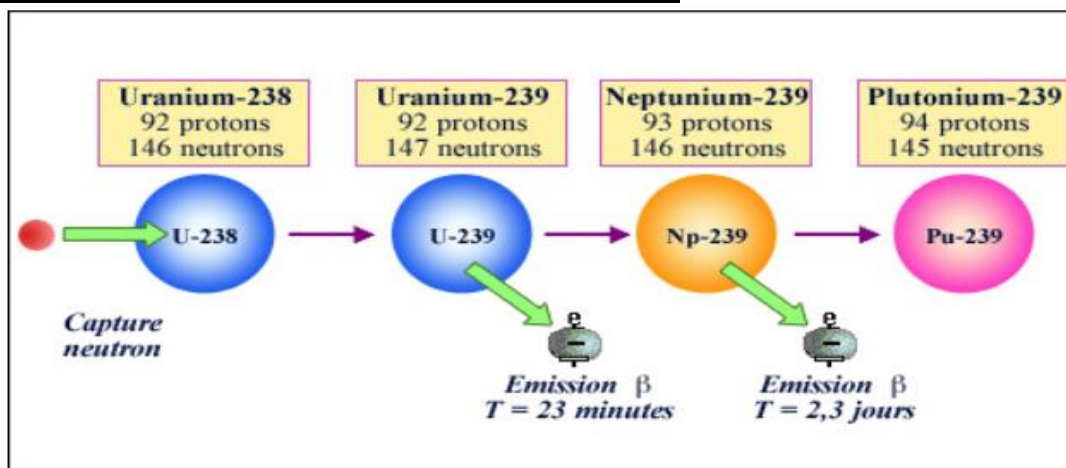
Une centrale nucléaire est une installation destinée à la production d'énergie à base de **combustible nucléaire**, c'est à dire une association de radionucléides, éléments chimiques radioactifs de composition moyenne **5% d'Uranium 235, 90% d'Uranium 238** et d'autres éléments faiblement radioactifs ou pas du tout.

Ils peuvent se transformer au cours du temps, mais trop lentement, c'est pourquoi, on provoque leur transformation, notamment en utilisant des faisceaux de **neutrons lents**, ce qui va accélérer le processus nucléaire de transformation et augmenter la production énergétique.

On utilise souvent l'**uranium 235** dit **fissile**, car il est capable de fissionner facilement sous l'action d'un neutron. Il se décompose en Baryum 141 et en Krypton et en libérant 3 nouveaux neutrons.

- On pourrait croire que l'uranium 238 ne sert à rien, mais non : il est dit fertile, car il ne subit pas de fission directe, mais subit une série de transformations jusqu'à aboutir à un noyau lui même fissile (voir Document 1). Le **plutonium 239**, enfin, se transforme en **uranium 235**.

## Document 1 : Génération du Plutonium 239



### Génération du plutonium

La capture d'un neutron par un noyau d'uranium-238 aboutit à la formation au bout de quelques jours d'un noyau de plutonium-239 fissile. Le noyau d'uranium-239 résultant de la capture du neutron est radioactif bêta-moins. Par émission d'un électron et d'un antineutrino, il se transforme en neptunium-239, qui étant lui-même instable se transforme à son tour de la même façon en plutonium-239.

## Document 2 : Isotopes du Baryum

Le baryum possède 40 isotopes connus de nombre de masse variant entre 114 et 153, et 10 isomères nucléaires. Parmi eux, six isotopes sont stables, <sup>132</sup>Ba, <sup>134</sup>Ba, <sup>135</sup>Ba, <sup>136</sup>Ba, <sup>137</sup>Ba et <sup>138</sup>Ba. Un septième isotope, <sup>130</sup>Ba, est théoriquement instable mais si peu radioactif que moins d'un noyau sur cent milliards a disparu depuis leur synthèse dans les supernovas (c'est donc un radioisotope primordial de très très longue demi-vie).

## Document 3 : Isotopes du Krypton

Le krypton possède 33 isotopes connus, de nombre de masse variant de 69 à 101<sup>7</sup> et trois isomères nucléaires. Le krypton naturel est constitué de six isotopes stables, <sup>78</sup>Kr, <sup>80</sup>Kr, <sup>82</sup>Kr, <sup>83</sup>Kr, <sup>84</sup>Kr et <sup>86</sup>Kr mais on soupçonne deux d'entre eux, <sup>78</sup>Kr et <sup>86</sup>Kr, d'être légèrement radioactifs (avec des demi-vies très supérieures à l'âge de l'univers). On attribue au krypton une masse atomique standard de 83,798(2) u.



### **Document 4 : Quelques données de puissance des centrales nucléaires**

Une **centrale nucléaire** est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un ou plusieurs réacteurs nucléaires alimentés en combustible nucléaire (source d'énergie). La puissance électrique d'une centrale varie de quelques mégawatts à plusieurs milliers de mégawatts en fonction du nombre et du type de réacteur en service sur le site.

L'énergie d'une centrale nucléaire provient de la fission de noyaux d'atomes lourds. L'énergie dégagée par la fission dégage de la chaleur qui, comme pour toute centrale thermique conventionnelle, sert à vaporiser de l'eau. La vapeur d'eau produite entraîne ensuite en rotation une turbine accouplée à un alternateur qui produit à son tour de l'électricité. C'est la principale application de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

On compte dans le monde environ 250 centrales nucléaires qui ont produit 10,8 % de l'électricité mondiale en 2013. Ces centrales comptent en janvier 2016 un total de 441 réacteurs en fonctionnement (y compris 41 réacteurs japonais à l'arrêt), dont la puissance atteint au total 382 GW ; 67 réacteurs sont en cours de construction.

Source : Wikipedia.com

#### **Questions :**

1. Qu'est-ce que la radioactivité ?
  2. Quel est le mécanisme de transformation utilisé dans de telles centrales ?
  3. Quelle est l'origine de l'énergie produite dans ces centrales ?
  4. Ecrire l'équation de la transformation de l'Uranium 235 en Baryum et en Krypton.
  5. De quel type est cette transformation ? Justifier.
  6. Calculer l'énergie libérée lors de cette transformation nucléaire, en J puis en eV. Justifier.
  7. Les produits de cette réaction sont-ils stables ? Justifier.
  8. Quelle est l'énergie libérée par 1 kg d'uranium 235 ? Choisir l'unité la plus appropriée. Justifier.
  9. Quel type de réaction éventuelle pourraient-ils respectivement subir ? Justifier.
  10. Ecrire alors l'équation de cette transformation éventuelle pour chacun des produits.
  11. Quel(s) type(s) de réaction ont lieu après l'enrichissement neutronique de l'Uranium 238, pour aboutir au plutonium 239 ?
  12. Ecrire l'équation complète de transformation de l'uranium 238 en Plutonium 239.
  13. Quel type de réaction simple a lieu lors la transformation du plutonium en Uranium 235 ?
  14. Ecrire l'équation de cette transformation.
  15. Calculer l'énergie impliquée dans la transformation de l'uranium 238 en uranium 235, en J, puis en eV.
  16. Commenter le signe de cette énergie.
  17. Calculer l'énergie que libère 1 kg d'uranium 238. Choisir l'unité la plus appropriée.
  18. Conclure en comparant le bilan énergétique des 2 isotopes de l'uranium 235 et 238.
  19. On imagine qu'un réacteur consomme 1kg de combustible classique, sans perte. Quelle est l'énergie libérée par cette masse de combustible ? Justifier.
  20. Quelle serait la durée moyenne d'utilisation de cette masse de combustible dans un réacteur réel ?
-

## Corrigé des exercices sur la radioactivité

### Corrigé de l'exercice 1 : Des désintégrations nucléaires ...

1.:

Noyau père	Noyau fils	Particule	Type de radioactivité
${}_{88}^{217}\text{Ra}$	${}_{86}^{213}\text{Rn}$	Noyau d'hélium ( ${}_{2}^4\text{He}$ )	$\alpha$
${}_{73}^{174}\text{Ta}$	${}_{72}^{174}\text{Hf}$	Positron ( ${}_{1}^0e$ )	$\beta^+$
${}_{84}^{213}\text{Po}$	${}_{82}^{209}\text{Pb}$	Noyau d'Hélium ( ${}_{2}^4\text{He}$ )	$\alpha$
${}_{82}^{209}\text{Pb}$	${}_{83}^{209}\text{Bi}$	Electron ( ${}_{-1}^0e$ )	$\beta^-$
${}_{42}^{103}\text{Mo}$	${}_{43}^{103}\text{Tc}$	électron ( ${}_{-1}^0e$ )	$\beta^-$
${}_{72}^{174}\text{Hf}$	${}_{70}^{170}\text{Yb}$	Noyau d'Hélium ${}_{2}^4\text{He}$	alpha
${}_{47}^{107}\text{Ag}$	${}_{46}^{107}\text{Pd}$	positron ( ${}_{1}^0e$ )	$\beta^+$

2. Il s'agit de radioactivité naturelle, car les désintégrations sont spontanées.

## Corrigé des exercices sur la radioactivité

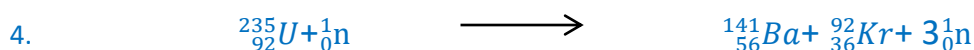
### Corrigé de l'exercice 2 : Réacteurs nucléaires

1. La radioactivité est la transformation spontanée et aléatoire d'un noyau atomique instable en un autre noyau plus stable. Elle s'accompagne de rayonnements. Le noyau radioactif peut être issu de la nature (c'est la radioactivité naturelle) ou créé par collision de particules (c'est la radioactivité artificielle)

2. La fission, non spontanée, donc provoquée.

Tout est basé sur l'équation d'Einstein, c'est à dire sur le fait qu'il y a contraction de masse lors de la formation de noyaux d'éléments chimiques, donc, lors de la fission de noyaux lourds, les noyaux plus légers issus de cette fission sont plus légers que le noyau initial. Cette "libération" de masse est équivalente à de l'énergie selon :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$



car :  $235 + 1 = 141 + 92 + 3$  (conservation des nucléons)

et :  $92 = 56 + 36 + 0$  (conservation des charges)

5. C'est une fission provoquée, car 2 nouveaux noyaux plus légers sont produits à partir d'un noyau plus lourd, forcé de fissionner sous l'action d'un neutron.

6. Il faut calculer le défaut de masse, puis déduire l'énergie libérée, alors (toutes les masses sont données  $\cdot 10^{-25}$  kg)

$$\begin{aligned}\Delta m &= \{ m({}_{56}^{141}\text{Ba}) + m({}_{36}^{92}\text{Kr}) + 3 \cdot m({}_0^1\text{n}) \} - \{ m({}_{92}^{235}\text{U}) + m({}_0^1\text{n}) \} \\ &= \{ 2,3340 + 1,5262 + 3 \cdot 0,016749 \} - \{ 3,9043 + 0,016749 \} \\ &= \underline{-1,106 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}\end{aligned}$$

Soit finalement :

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta m \cdot c^2 \\ &= (-1,106 \cdot 10^{-27}) \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 \\ &= \underline{-9,54 \cdot 10^{-11} \text{ J}} \\ &= \underline{-0,596 \text{ GeV} = -596 \text{ MeV}}\end{aligned}$$

NB : le signe est négatif, c'est une réaction exoénergétique : les composés perdent de l'énergie, que l'environnement récupère !

7. Ce qu'on vient de calculer est l'énergie libérée pour un atome d'uranium 235.

On va calculer combien d'atomes identiques contiendrait 1 kg d'uranium 235 pur soit :

$$\underline{N(\text{U235}) = 1 / (3,9043 \cdot 10^{-25}) = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ atomes}} \text{ d'Uranium 235.}$$

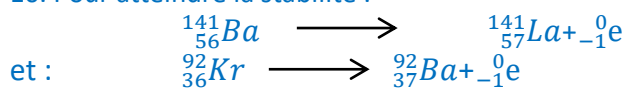
Soit finalement :

$$\begin{aligned}|\Delta E(1 \text{ kg U 235})| &= 5,96 \cdot 10^8 \cdot 2,56 \cdot 10^{24} \\ &= 1,53 \cdot 10^{33} \text{ eV} = 2,45 \cdot 10^{14} \text{ J} \\ &= \underline{245 \text{ TJ}}\end{aligned}$$

8. On peut regarder les documents 2 et 3, les isotopes stables s'arrêtent respectivement pour  $A = 38$  et  $A = 86$  pour le Baryum et le Krypton. Dans cette réaction, chaque noyau produit possède un  $A$  trop grand, par excès de neutrons.

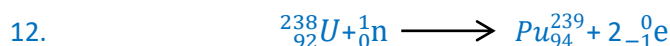
9. Excès de neutrons = désintégrations  $\beta^-$ , car alors 1 neutron se transforme en proton, charge + excédentaire qui doit être compensée par émission d'un électron (conservation de la charge).

10. Pour atteindre la stabilité :



Mais encore faudrait-il vérifier la stabilité des nouveaux noyaux formés, car sinon, les désintégrations continuent ...

11. L'uranium 238 subit, de manière provoquée, un enrichissement neutronique (qui n'est ni une fission, ni une désintégration). Il subit ensuite 2 désintégrations  $\beta^-$  car 2 neutrons se transforment en 2 protons (il y a changement d'élément, car  $Z$  change ... : U à Np, puis à Pu).



13. Le Pu (qui possède 94 protons et 239 nucléons) perd exactement 4 nucléons et 2 protons pour produire l'uranium (qui possède 92 protons et 235 nucléons), c'est donc une émission  $\alpha$ .



15. Il faut coupler les 2 réactions des questions 12 et 14 en 1 seule soit :



Il faut calculer le défaut de masse, puis déduire l'énergie libérée, alors (toutes les masses sont données  $\cdot 10^{-25}$  kg)

$$\Delta m = \{ m(U_{92}^{235}) + m(He_2^4) + 2 \cdot m(e_{-1}^0) \} - \{ m(U_{92}^{238}) + m(n_0^1) \}$$

$$\Delta m = \{ 3,9043 + 0,06645 + 2 \cdot 0,00009109 \} - \{ 3,9535 + 0,016749 \}$$

$$\Delta m = \underline{5,19 \cdot 10^{-29} \text{ kg}}$$

Soit finalement :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$$\Delta E = (5,19 \cdot 10^{-29}) \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2$$

$$\Delta E = \underline{4,67 \cdot 10^{-12} \text{ J}}$$

$$\Delta E = \underline{29,2 \text{ MeV}}$$

16. Cette dernière transformation est endoénergétique, c'est à dire que le système des réactifs et produits emmagasine de l'énergie, autrement dit, c'est une réaction qui absorbe de l'énergie et du coup n'en produit pas ... est ce problématique ? Non, car à ce stade, l'uranium 235 va produire de l'énergie ! Et si un atome d'uranium 238 absorbe 29,2 MeV pour se transformer en uranium 235, ensuite, cet atome d'uranium 235 va libérer en fissionnant, 708 MeV, soit beaucoup plus (70 fois plus !), donc cette "perte" est en fait minime ...

17. Donc, le bilan est le suivant, l'uranium 238 arrive en somme à produire autant que l'uranium 235 MOINS l'énergie qu'il faut pour que l'uranium 238 se transforme en uranium 235, soit : un atome d'uranium 238 produit :  $596 - 29,2 = \underline{567 \text{ MeV}}$ .

Pour 1 kg, il faut (voir question 7) :

$$N(U_{238}) = 1 / (3,9535 \cdot 10^{-25}) = \underline{2,53 \cdot 10^{24} \text{ atomes}} \text{ d'Uranium 238.}$$

Soit finalement :

$$|\Delta E(1 \text{ kg U } 238)| = 5,67 \cdot 10^8 \cdot 2,53 \cdot 10^{24}$$

$$|\Delta E(1 \text{ kg U } 238)| = 1,43 \cdot 10^{33} \text{ eV} = 2,30 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

$$|\Delta E(1 \text{ kg U } 238)| = \underline{230 \text{ TJ}}$$

18. Les 2 isotopes sont donc intéressants, car l'uranium 238 se transforme en uranium 235 ... mais avec un bilan énergétique légèrement moins bon, mais cela est difficile de faire mieux, car la nature propose des minerais d'uranium très riches en uranium 238, pas en 235 ...

19. Maintenant, on doit faire attention aux proportions de chaque isotope de départ :

1 kg de combustible contient :

0,05 kg d'uranium 235

0,90 kg d'uranium 238

et c'est tout pour les radionucléides "intéressants", soit :

$$\underline{\Delta E(1 \text{ kg combustible}) = 0,9 \cdot 230 + 0,05 \cdot 245 = 219 \text{ TJ}}$$

20. Dans le document 4, on nous dit qu'il y a en activité 441 réacteurs pour un total de 382 GW, donc, en moyenne :  $382 / 441 = \underline{0,87 \text{ GW en moyenne}}$ .

Il nous reste, pour cette puissance, à calculer le temps, par la relation :  $P = \Delta E / \Delta t$

soit :

$$\Delta t = \Delta E / P$$

$$\Delta t = 219 \cdot 10^{12} / (0,87 \cdot 10^9)$$

$$\Delta t = 2,5 \cdot 10^5 \text{ s} \text{ soit environ : } \underline{70 \text{ h} \sim 2,9 \text{ jours.}}$$