

EXERCICES Appliquer le cours

I Réactions nucléaires spontanées (§1 du cours)

16. Reconnaître des isotopes

a.

Noyau	Élément	A	Z	N
$^{210}_{84}\text{Po}$	polonium	210	84	126
$^{204}_{84}\text{Po}$	polonium	204	84	120
$^{12}_{6}\text{C}$	carbone	12	6	6
$^{14}_{6}\text{C}$	carbone	14	6	8

b. Deux noyaux isotopes ont le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents.

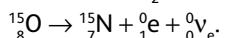
Les deux noyaux de polonium du tableau sont isotopes, les deux noyaux de carbone le sont également.

17. Utiliser le diagramme (N, Z)

1. a. Le noyau X_1 se note $^{14}_{6}\text{C}$.

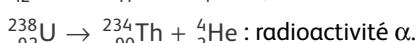
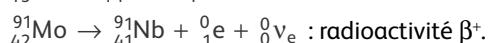
b. $^{14}_{6}\text{C}$ est radioactif β^- : $^{14}_{6}\text{C} \rightarrow ^{14}_{7}\text{N} + ^0_{-1}\text{e} + ^0_{0}\bar{\nu}_e$.

2. Le noyau X_2 se note $^{15}_{8}\text{O}$. Il est radioactif β^+ :



3. Les deux noyaux X_1 et X_2 ne sont pas isotopes car ils n'ont pas le même numéro atomique (X_1 est isotope des autres noyaux de carbone $^{12}_{6}\text{C}$, $^{13}_{6}\text{C}$, qui sont stables ; X_2 est isotope des autres noyaux d'oxygène $^{16}_{8}\text{O}$, $^{17}_{8}\text{O}$, qui sont stables).

18. Différencier les radioactivités α et β



19. Définir l'activité

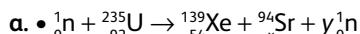
a. L'activité A d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégrations de noyaux radioactifs qui se produisent par seconde dans cet échantillon.

b. Pour un échantillon donné, l'activité est proportionnelle à la masse de l'échantillon : l'activité de la moitié de l'échantillon sera $1,0 \times 10^{11}$ Bq au même instant.

c. L'activité diminue au cours du temps pour un échantillon donné.

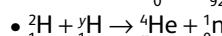
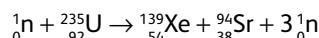
I Réactions nucléaires provoquées (§2 du cours)

20. Utiliser les lois de conservation

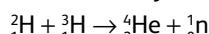


avec :

$$92 = 54 + x \text{ d'où } x = 92 - 54 = 38 \text{ et } 1 + 235 = 139 + 94 + y \\ \text{d'où } y = 3.$$



avec : $1 + 1 = x$ d'où $x = 2$ et $2 + y = 4 + 1$ d'où $y = 3$.



b. La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd, dit fissile, est scindé en deux noyaux plus légers sous l'impact d'un neutron.

La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour donner un noyau plus lourd.

La première équation correspond ainsi à une réaction de fission nucléaire tandis que la deuxième équation correspond à une réaction de fusion nucléaire.

21. Extraire des informations

a. D'après le texte, le technétium présente « une forte fixation osseuse mais une faible fixation extra-osseuse ». La scintigraphie permettra donc de minimiser les fixations parasites du marqueur.

b. $\frac{400}{50} = 8,0 \text{ MBq/kg}$. La prescription correspond aux recommandations d'utilisation car :

$$3,7 \text{ MBq/kg} < 8,0 \text{ MBq/kg} < 11,1 \text{ MBq/kg}.$$

c. $20 \times 6 > 48 \text{ h}$: le produit injecté est encore actif après 48 h.

I Bilan d'énergie (§3 du cours)

22. Calculer la perte de masse

a. $\mathcal{E}_{\text{libérée}} = |\Delta m| \times c^2$ avec $\mathcal{E}_{\text{libérée}}$ en joule (J), Δm en kilogramme (kg) et c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\text{b. } |\Delta m| = \frac{\mathcal{E}_{\text{libérée}}}{c^2} = \frac{2,00 \times 10^{-13}}{(2,997\,924\,58 \times 10^8)^2} \\ = 2,23 \times 10^{-30} \text{ kg.}$$

EXERCICES S'entraîner

23. Exercice résolu dans le manuel

24. Application de l'exercice résolu

> COMPÉTENCES : Réaliser, valider.

$$1. \Delta m_{(1)} = m(\text{Be}) - 2m(\text{He}) = 2,290\,00 \times 10^{-3} \text{ u} \\ = 3,802\,64 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

REMARQUE : $\Delta m_{(1)} > 0$, cette réaction de fusion nécessite d'être amorcée par un apport d'énergie. La température extrêmement élevée de l'étoile permet d'enclencher cette réaction de fusion (voir l'exercice 32 pour l'ensemble du processus « triple alpha »).

$$\mathcal{E}_{(1)} = \Delta m_{(1)} \times c^2 = 3,417\,64 \times 10^{-13} \text{ J} = 2,133\,12 \text{ MeV}$$

Énergie par nucléon : $\frac{\mathcal{E}_{(1)}}{4} = 0,533\,280 \text{ MeV/nucléon.}$

$$\Delta m_{(2)} = m(\text{C}) - m(\text{He}) - m(\text{Be}) = -1,011\,00 \times 10^{-2} \text{ u} \\ = -1,678\,81 \times 10^{-29} \text{ kg}$$

REMARQUE : $\Delta m_{(2)} < 0$, cette réaction de fusion libère de l'énergie.

$$\mathcal{E}_{(2)} = |\Delta m_{(2)}| \times c^2 = 1,508\,84 \times 10^{-12} \text{ J} = 9,417\,39 \text{ MeV}$$

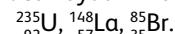
Énergie par nucléon : $\frac{\mathcal{E}_{(2)}}{6} = 1,569\,57 \text{ MeV/nucléon.}$

2. La réaction (1) nécessite un apport d'énergie pour pouvoir être initiée tandis que la réaction (2) libère de l'énergie. L'énergie par nucléon mise en jeu dans la réaction (2) est environ 3 fois plus grande que celle mise en jeu dans la réaction (1).

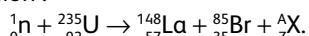
25. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser.

a. La classification périodique fournit le symbole et le nombre de charges des noyaux mis en jeu :



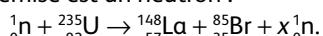
Le bombardement du noyau d'uranium par un neutron produit la fission :



La conservation de la charge électrique donne :

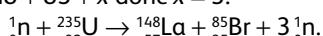
$$0 + 92 = 57 + 35 + Z \text{ d'où } Z = 0.$$

La particule émise est un neutron :



La conservation du nombre de masse impose :

$$1 + 235 = 148 + 85 + x \text{ donc } x = 3.$$



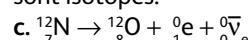
b. L'un des trois neutrons émis lors la fission peut à son tour heurter un noyau d'uranium et provoquer une deuxième fission : la fission peut donner naissance à une réaction en chaîne.

26. Stabilité et instabilité des noyaux

> COMPÉTENCES : Restituer, analyser, réaliser.

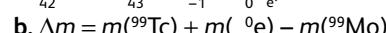
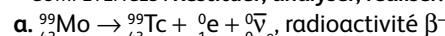
a. ${}_{\bar{7}}^{12}\text{N}$: 7 protons, 5 neutrons ; ${}_{\bar{7}}^{14}\text{N}$: 7 protons, 7 neutrons.

b. Ces deux noyaux possèdent le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents, ils sont isotopes.



27. Production du technétium

> COMPÉTENCES : Restituer, analyser, réaliser.



$$\Delta m = 98,882\,35 + 5,485\,79 \times 10^{-4} - 98,884\,37$$

$$\Delta m = -1,471\,42 \times 10^{-3} \text{ u}$$

$$\Delta m = -1,471\,42 \times 10^{-3} \times 1,660\,54 \times 10^{-27}$$

$$\Delta m = -2,443\,35 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = |\Delta m| \times c$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = 2,443\,35 \times 10^{-30} \times (2,997\,924\,58 \times 10^8)^2$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = 2,195\,97 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = \frac{2,443\,35 \times 10^{-30} \times (2,997\,924\,58 \times 10^8)^2}{1,602\,18 \times 10^{-19}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = 1,370\,61 \times 10^6 \text{ eV soit } 1,370\,61 \text{ MeV}$$

28. In English Please

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, réaliser.

a. L'activité d'une source radioactive peut s'exprimer en curie.

b. $1 \text{ Ci} = 3,70 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

29. Perception de la radioactivité

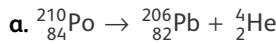
> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser.

Les documents nécessaires à la résolution de cet exercice sont disponibles sur www.nathan.fr/sirius2015

La synthèse doit comprendre les éléments suivants.

- Peu après la découverte de la radioactivité, un véritable engouement autour de ce phénomène, ainsi qu'une méconnaissance de ses effets sur l'Homme, ont conduit à la mise en vente de nombreux produits « miracles » à base de radium notamment.
- Peu à peu, les conséquences sur la santé de cette commercialisation et de la manipulation sans précaution particulière de radium dans l'industrie émergent à travers des scandales parfois étouffés.
- L'engouement laisse ainsi progressivement place à la défiance, puis à la peur.
- Les récentes catastrophes nucléaires ainsi que la problématique de la gestion des déchets participent à une certaine méfiance vis-à-vis du nucléaire.

30. S'auto-évaluer



b. $\mathcal{E} = |\Delta m| \times c^2 = |m({}_{82}^{206}\text{Pb}) + m({}_2^4\text{He}) - m({}_{84}^{210}\text{Po})| \times c^2$

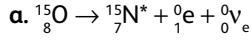
$$\mathcal{E} = |205,9295 + 4,0015 - 209,2368| \times 1,66054$$

$$\times 10^{-27} \times (2,99792458 \times 10^8)^2 = 1,0360 \times 10^{-10} \text{ J}$$

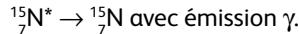
$$\mathcal{E} = \frac{1,0360 \times 10^{-10}}{1,60218 \times 10^{-13}} = 646,64 \text{ MeV}$$

31. Tomographie

> COMPÉTENCES : Restituer, analyser, valider.



b. Il s'agit d'une onde électromagnétique, le rayonnement γ est émis par le noyau excité :

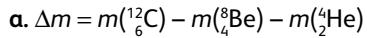


c. L'activité diminue rapidement car la demi-vie est de 2 minutes : l'irradiation subie par le patient est faible et cette radioactivité disparaissant en quelques heures, on peut faire plusieurs études des modifications de l'irrigation d'un organe chez le même sujet.

En revanche, l'activité diminuant très rapidement, elle serait trop faible pour permettre l'étude de processus physiologiques s'effectuant sur plusieurs jours.

32. ★ Nucléosynthèse

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser, communiquer.



$$\Delta m = -1,01000 \times 10^{-2} \text{ u}$$

b. $\mathcal{E}_{\text{libérée}} = |\Delta m| \times c^2$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = 1,01000 \times 10^{-2} \times 1,66054 \times 10^{-27} \times (2,99792458 \times 10^8)^2 = 1,50734 \times 10^{-12} \text{ J}$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = \frac{1,50734 \times 10^{-12}}{1,60218 \times 10^{-19}} \\ = 9,40808 \times 10^6 \text{ eV}$$

$$= 9,40808 \text{ MeV}$$

c. Fusion de deux noyaux d'hélium :



Le carbone est formé à partir de trois noyaux ${}_{2}^4\text{He}$ dont deux forment le beryllium, d'où l'appellation « processus triple-alpha ».

33. ★★ Datation et radioactivité

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser, valider.

a. L'objet est abandonné sur le sol à la date $t_0 = 0$. On peut donc estimer qu'il présente la même activité (pour un gramme) à $t = 0$ que celle d'un organisme vivant (pour un gramme), soit $2,30 \times 10^{-1} \text{ Bq}$.

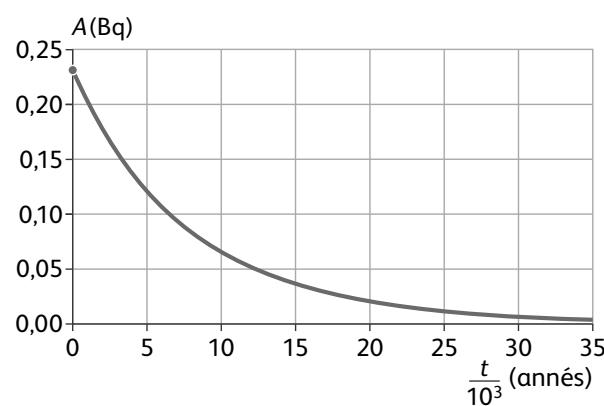
b. D'après le texte, l'activité est divisée par deux pour une demi-vie $t_{1/2}$.
On en déduit que : $A(t_{1/2}) = \frac{A_0}{2} = \frac{2,30 \times 10^{-1}}{2} \text{ Bq}$.

c.

$t(s)$	0	$t_{1/2}$	$2 t_{1/2}$	$3 t_{1/2}$	$4 t_{1/2}$	$5 t_{1/2}$	$6 t_{1/2}$
$A(10^{-1} \text{ Bq})$	2,30	1,15	0,575	0,288	0,144	0,0719	0,0359

La durée séparant deux dates consécutives est toujours $t_{1/2}$, l'activité est divisée par 2 entre deux colonnes consécutives.

d.



e. Par lecture graphique, $A = 2,50 \times 10^{-2} \text{ Bq}$ en ordonnée donne $t = 18 \times 10^3$ ans en abscisse.

L'âge des peintures est $1,8 \times 10^4$ ans.

f. L'activité serait trop faible pour dater des objets ayant quelques millions d'années.

34. ★ Un réacteur thermonucléaire : le Soleil

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser, valider.

a. La perte de masse par seconde est :

$$|\Delta m| = \frac{\mathcal{E}_{\text{libérée}}}{c^2} = \frac{3,9 \times 10^{26}}{(2,99792458 \times 10^8)^2} = 4,3 \times 10^9 \text{ kg/s.}$$

b. Masse perdue en 4,6 milliards d'années :

$$4,6 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 3600 \times |\Delta m| = 6,3 \times 10^{26} \text{ kg.}$$

c. Masse du Soleil : $1,99 \times 10^{30}$ kg ; cette perte de masse correspond à $\frac{100 \times 6,3 \times 10^{26}}{1,99 \times 10^{30}} = 0,032$ % de sa masse.

d. Ce pourcentage peut paraître relativement faible au premier abord. La très grande valeur de la masse du Soleil explique la faiblesse du pourcentage. Les hypothèses sont toutefois sans doute réductrices : l'énergie libérée par seconde n'est certainement pas constante depuis la formation du Soleil, le calcul conduit ici à un ordre de grandeur de 10^{-2} %.

35. ★★ Le plutonium 241

> COMPÉTENCES : Restituer, analyser, réaliser, valider.

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{fission}} &= |\Delta m| \times c^2 \\ &= |m(^{141}_{55}\text{Cs}) + m(^{98}_{39}\text{Y}) + 2m(^1_0\text{n}) - m(^{241}_{94}\text{Pu})| \times c^2 \\ \mathcal{E}_{\text{fission}} &= |140,793\,52 + 97,900\,70 + 2 \times 1,008\,66 - 241,005\,14| \times 1,660\,54 \times 10^{-27} \times (2,997\,924\,58 \times 10^8)^2 \\ \mathcal{E}_{\text{fission}} &= 4,381\,74 \times 10^{-11} \text{ J.}\end{aligned}$$

L'équation de la désintégration β^- du plutonium 241 est :



La masse de l'antineutrino est négligeable dans le calcul de la variation de masse, donc :

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\beta^-} &= |\Delta m| \times c^2 = |m(^{241}_{95}\text{Am}) + m({}^0_{-1}\text{e}) - m(^{241}_{94}\text{Pu})| \times c^2 \\ \mathcal{E}_{\beta^-} &= |241,004\,57 + 5,486 \times 10^{-4} - 241,005\,14| \times 1,660\,54 \times 10^{-27} \times (2,997\,924\,58 \times 10^8)^2\end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_{\beta^-} = 3,194 \times 10^{-15} \text{ J.}$$

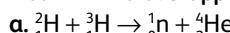
REMARQUE : la masse de l'électron est souvent négligée devant les masses des noyaux en physique nucléaire.

Pour comparer les deux énergies, on peut calculer par exemple le rapport $\frac{\mathcal{E}_{\text{fission}}}{\mathcal{E}_{\beta^-}}$, on trouve : $\frac{\mathcal{E}_{\text{fission}}}{\mathcal{E}_{\beta^-}} \approx 10^4$.

L'énergie libérée par la fission du noyau de plutonium est bien plus grande que l'énergie libérée par la désintégration β^- de ce noyau (environ 10 000 fois plus grande).

36. ★★ Le réacteur nucléaire ITER

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, réaliser, valider.



b. La température doit être élevée pour vaincre les répulsions entre les noyaux chargés positivement.

c. Variation de masse :

$$\Delta m = m(^4_2\text{He}) + m(^1_0\text{n}) - m(^3_1\text{H}) - m(^2_1\text{H})$$

$$\Delta m = (4,001\,51 + 1,008\,66 - 2,013\,55 - 3,015\,50)$$

$$\Delta m = -0,018\,88 \text{ u}$$

Δm est la perte de masse, le signe de Δm est négatif.

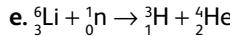
d. $|\Delta m| = +0,018\,88 \times 1,660\,54 \times 10^{-27}$
 $= 3,135\,10 \times 10^{-29} \text{ kg.}$

Énergie libérée :

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{libérée}} &= |\Delta m| \times c^2 = 3,135\,10 \times 10^{-29} \times (2,997\,924\,58 \times 10^8)^2 \\ &= 2,817\,69 \times 10^{-12} \text{ J}\end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = \frac{2,817\,69 \times 10^{-12}}{1,602\,18 \times 10^{-19}}$$

$$\mathcal{E}_{\text{libérée}} = 17,586\,6 \times 10^6 \text{ eV, soit } 17,586\,6 \text{ MeV.}$$



Les neutrons nécessaires proviennent de la fusion.

37. ★ Calcul d'incertitudes

> COMPÉTENCES : Réaliser, valider.

a. La moyenne obtenue pour 50 comptages est $\bar{n} = 15,53 \approx 15,5$ (on peut réaliser ce calcul avec la calculatrice ou à l'aide d'un tableur).

L'écart-type se calcule à partir de la variance, directement à la calculatrice ou à l'aide d'un tableur : on obtient : $\sigma_{n-1} = 3,08$.

b. Pour 50 comptages, on obtient $U(n) = \frac{2 \times \sigma_{n-1}}{\sqrt{50}} = 0,9$.

On écrira ainsi $n = 15,5 \pm 0,9$ pour un niveau de confiance de 95 %.

Pour 200 comptages, $U(n) = 0,6$ et $n = 15,2 \pm 0,6$ pour un niveau de confiance de 95 %.

Pour 1 000 comptages, $U(n) = 0,08$ et $n = 15,30 \pm 0,08$ pour un niveau de confiance de 95 %.

Les incertitudes relatives permettent de comparer les précisions des différentes séries :

50 comptages, $\frac{U(n)}{\bar{n}} = \frac{0,9}{15,5} = 6\%$;

200 comptages, $\frac{U(n)}{\bar{n}} = \frac{0,6}{15,2} = 4\%$;

1 000 comptages, $\frac{U(n)}{\bar{n}} = \frac{0,08}{15,3} = 0,6\%$.

La précision semble augmenter avec le nombre de comptages.

EXERCICES Vers le Bac

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site :

www.nathan.fr/sirius2015

38. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

Radiographie et médecine nucléaire

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, communiquer.

Éléments de réponse

Au début du xx^e siècle, deux techniques importantes d'imagerie médicale émergent : la radiologie et les techniques de médecine nucléaire. La radiologie consiste à obtenir sur un film radiographique une « image » de l'organe ciblé, à l'aide d'une source externe de rayons X. La technique permet d'éviter l'absorption de traceurs radioactifs et d'obtenir des informations précieuses sur la forme, la taille et l'intégrité de l'organe. Elle ne permet cependant pas d'analyser le fonctionnement de la zone ciblée et expose le patient à une source de rayons X.

Dans les techniques d'imagerie de la médecine nucléaire, un traceur radioactif est injecté au patient avant l'examen. La scintigraphie de la thyroïde est couramment mise en œuvre en médecine nucléaire. Elle utilise deux types de traceurs : l'iode 123 et le technétium 99m. La scintigraphie permet d'obtenir de précieux renseignements sur le fonctionnement de la thyroïde en détectant d'éventuelles anomalies dans la fixation de l'iode. L'iode 123 étant onéreux car difficile à obtenir, le technétium 99m peut offrir une alternative à cet examen bien qu'il ne soit pas assimilé par la thyroïde. Le coût constitue

donc l'un des critères de choix du traceur. Dans la majorité des cas, le traceur est choisi pour être métabolisé par l'organe ciblé et avoir une durée de vie compatible avec l'examen, à la fois suffisamment longue pour permettre l'analyse mais aussi assez courte pour ne pas rester actif trop longtemps dans l'organisme du patient. L'iode 123 a ainsi une demi-vie de 13 heures.

Ces deux techniques d'imagerie permettent d'offrir des alternatives différentes aux médecins : la radiologie permet d'obtenir rapidement des informations sur la forme de l'organe tandis que les techniques de médecine nucléaire affinent les diagnostics en éclairant sur le fonctionnement de l'organe ciblé.

39. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

Comparaisons énergétiques

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.

Éléments de réponse

On détermine l'énergie nucléaire libérée par la fission d'un noyau d'uranium :

$$\begin{aligned} {}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} &\rightarrow {}^{139}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + 3 {}^1_0\text{n} \\ \mathcal{E}_{\text{Noyau}} &= |\Delta m| \times c^2 \\ &= |m({}^{139}_{54}\text{Xe}) + m({}^{94}_{38}\text{Sr}) + 2 \times m({}^1_0\text{n}) - m({}^{235}_{92}\text{U})| \times c^2 \\ &= 2,8722 \times 10^{-11} \text{ J}. \end{aligned}$$

Pour déterminer l'énergie libérée par un kilogramme d'uranium, on cherche le nombre de noyaux d'uranium dans 1 kg : $N = \frac{1}{m({}^{235}_{92}\text{U})} = 2,56268 \times 10^{24}$ noyaux dans 1 kg.

L'énergie libérée par la combustion d'1 kg d'uranium est : $\mathcal{E}_{1\text{kg, uranium}} = N \times \mathcal{E}_{\text{noyau}} = 7,3604 \times 10^7 \text{ MJ}$.

L'énergie libérée par 1 tonne de combustible fossile est de l'ordre d'1 tep soit de 42 GJ.

On obtient donc une énergie 1 000 fois plus faible pour 1 kg :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{1\text{kg, comb, fossile}} &= \frac{42 \times 10^9}{10^3} = 42 \text{ MJ} \\ \frac{\mathcal{E}_{1\text{kg, uranium}}}{\mathcal{E}_{1\text{kg, comb, fossile}}} &= 1,8 \times 10^6 \approx 10^6. \end{aligned}$$

L'énergie libérée par la fission d'1 kg d'uranium est bien plus grande que l'énergie libérée par la combustion d'1 kg de combustible fossile. Cette comparaison n'est pas suffisante pour choisir l'énergie à privilégier, il faudrait tenir compte de beaucoup d'autres données : les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble des cycles, la gestion des déchets, le coût de construction et de démantèlement des centrales, l'éthique et la sûreté de l'approvisionnement en combustible, la sécurité des installations, etc.