

Transformations nucléaires – Exercices – Devoirs

Exercice 1 corrigé disponible

1. La radioactivité naturelle

A partir des travaux d'Henri Becquerel sur l'uranium, c'est en 1898 que Marie et Pierre Curie découvrent la propriété atomique qu'ont certains éléments lourds d'émettre spontanément un rayonnement.

Marie Curie donnera le nom de radioactivité à cette propriété persistante dans tous les états chimiques et physiques de la matière.

C'est également en 1898 qu'ils annoncent la découverte de deux nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium.

Leurs travaux seront couronnés par deux prix Nobel, l'un en 1903, l'autre en 1911.



Données :

- 1 an $\approx 365,25$ j ; célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- 1 eV = $1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Masse molaire du radium : $M = 226,0 \text{ g.mol}^{-1}$

On rappelle la relation : $\lambda t_{1/2} = \ln 2$, où λ est la constante radioactive, et $t_{1/2}$ la demi-vie.

1.1. Le becquerel est une unité de mesure utilisée en radioactivité, donner sa définition.

1.2. Le noyau de radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ se désintègre spontanément en donnant un noyau de radon $^{222}_{86}\text{Rn}$ lui-même radioactif. Cette désintégration s'accompagne de l'émission d'un rayonnement γ de longueur d'onde $6,54 \times 10^{-12} \text{ m}$.

- Donner la composition du noyau de radium.
- Ecrire l'équation de la réaction de désintégration du radium et préciser le type de radioactivité.
- Expliquer la présence du rayonnement γ émis lors de la désintégration du radium. Quelle information fournit-elle sur le noyau ?

1.3. L'activité d'un gramme de radium est égale à $A = 3,70 \times 10^{10} \text{ Bq} = 1 \text{ Curie}$.

1.3.1. Déterminer le nombre N de noyaux de radium présents dans l'échantillon de 1,00 g.

1.3.2. Calculer le temps de demi-vie $t_{1/2}$ du radium et vérifier que $t_{1/2} = 1,58 \times 10^3$ années.

1.3.3. Au bout de combien de temps les $\frac{3}{4}$ des noyaux de radium seront-ils désintégrés ?

2 - La radioactivité artificielle

Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent en 1934 la radioactivité artificielle, ce qui leur vaudra le prix Nobel de physique en 1935.

Ils ont notamment réussi la synthèse du phosphore 30 ($^{30}_{15}\text{P}$), isotope radioactif du phosphore 31 ($^{31}_{15}\text{P}$).

Le phosphore 30, produit artificiellement, se transforme spontanément par désintégration β^+ en silicium 30 ($^{30}_{14}\text{Si}$), noyau obtenu directement dans son état fondamental.

La diversité des radioéléments artificiels a permis leur utilisation dans les domaines de la médecine, la biologie, l'astrophysique, la géophysique, la radiothérapie, la datation...



2.1. Exploitation du texte

2.1.1. Quelle est la différence entre la radioactivité naturelle et la radioactivité artificielle ?

2.1.2. Pourquoi le phosphore 30 est-il dit isotope du phosphore 31 ?

2.2. Désintégration du phosphore 30

2.2.1. Donner le nom et le symbole de la particule émise lors d'une désintégration β^+ .

2.2.2. Ecrire l'équation de la désintégration du phosphore 30 en indiquant les lois utilisées.

2.2.3. Y a-t-il émission d'un rayonnement lors de la désintégration du phosphore 30 ? Justifier.

Exercice 2 corrigé disponible

Lors de la mission Apollo XI et des suivantes, du matériel scientifique a été déployé à la surface de la Lune afin de l'étudier. Des échantillons de roche lunaire ont également été ramenés sur Terre. De nombreuses méthodes de datation reposent sur la décroissance radioactive de certains radioéléments. Un radioélément est adapté à cette mesure si son temps de demi-vie est de l'ordre de grandeur de l'âge à déterminer.

3.1. Parmi les radioéléments ci-dessous, indiquer en justifiant celui qui pourrait être utilisé pour mesurer l'âge de la Lune.

isotope radioactif	ordre de grandeur du temps de demi-vie
iode 131	une dizaine de jours
plutonium 238	une centaine d'années
potassium 40	un milliard d'années

Pour déterminer l'âge des roches lunaires ramenées sur Terre par les astronautes, les physiciens ont mesuré expérimentalement les quantités relatives d'argon 40 gazeux et de potassium 40 solide emprisonnés dans la roche lunaire.

3.2. Le potassium $^{40}_{19}\text{K}$ est un isotope radioactif. Il se désintègre en produisant de l'argon $^{40}_{18}\text{Ar}$. Écrire l'équation de désintégration nucléaire d'un noyau de potassium 40.

3.3. Donner l'expression du nombre $N_K(t)$ de noyaux radioactifs de potassium 40 présents dans l'échantillon de roche lunaire à la date t en fonction du nombre initial $N_K(0)$ de ces noyaux.

3.4. Donner la définition du temps de demi-vie d'un échantillon radioactif. Établir la relation liant la constante de désintégration radioactive λ et le temps de demi-vie. Montrer que $\lambda = 5,50 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$ pour le potassium 40 sachant que $t_{1/2} = 1,26 \times 10^9 \text{ ans}$.

3.5. Un échantillon de 1,0 g de roche lunaire analysé à la date t contient $N_{\text{Ar}}(t) = 2,3 \times 10^{17}$ noyaux d'argon 40 et $N_K(t) = 2,4 \times 10^{16}$ noyaux de potassium 40. En admettant que le potassium 40 ne subit que la désintégration de la question 3.2. et que la roche lunaire ne contenait pas d'argon 40 au moment de sa formation, on montre que $N_K(0) = N_K(t) + N_{\text{Ar}}(t)$.

Évaluer l'âge de cette roche lunaire.

Exercice 3 corrigé disponible

1. Transfert thermique et radioactivité du globe terrestre.

Dès l'Antiquité, les premiers mineurs ont constaté que la température du sol augmente avec la profondeur. L'intérieur de la Terre est donc chaud. Comme le transfert thermique a toujours lieu des corps chauds vers les corps froids, il y a une fuite constante d'énergie de la Terre vers l'espace. Vers 1860, Lord Kelvin avait calculé le temps mis par le globe terrestre pour se refroidir complètement, à partir de la perte d'énergie constatée : quelques centaines de millions d'années au plus. Or la Terre est beaucoup plus vieille, et elle n'est pas froide. L'énergie qui s'échappe est donc, pour une grande part, produite par la Terre elle-même. C'est la radioactivité naturelle qui est à l'origine de l'essentiel de cette énergie. Toutes les couches de la Terre contiennent de l'uranium, du thorium et du potassium 40. Ces noyaux radioactifs produisent de l'énergie en se désintégrant.

D'après « Enseigner la géologie » Editions Nathan.

Données :

À l'état naturel, il existe trois isotopes du potassium : les isotopes 39, 40 et 41. Le potassium 40 est radioactif et se transforme en argon 40.

	argon $^{40}_{18}\text{Ar}$	potassium $^{40}_{19}\text{K}$	calcium $^{40}_{20}\text{Ca}$
Numéro atomique Z	18	19	20
Masse des noyaux (kg)	$m(\text{Ar}) = 6,635913 \times 10^{-26}$	$m(\text{K}) = 6,636182 \times 10^{-26}$	$m(\text{Ca}) = 6,635948 \times 10^{-26}$

Masse d'un électron et d'un positon (ou positron) : $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

1.1. Le potassium 40 et le diagramme (N, Z).

Les noyaux dont le numéro atomique $Z \leq 20$ et tels que le nombre de neutrons $N = Z$ sont stables (sauf exceptions).

1.1.1. Sur la figure représentée en **ANNEXE**, tracer la droite sur laquelle se situent ces noyaux stables.

1.1.2. Placer sur le diagramme (N, Z) les positions respectives des noyaux de potassium 40 et de calcium 40. À partir de ces positions, indiquer lesquels de ces noyaux sont stables ou instables.

1.1.3. Écrire l'équation de la désintégration du potassium 40 en calcium 40 en précisant les lois de conservation utilisées. Déterminer le type de radioactivité correspondant à cette désintégration.

1.2. Autre désintégration du potassium 40.

Le potassium 40 peut également se désintégrer en argon 40 selon l'équation ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + {}^0_1\text{e}^-$.

1.2.1. Quel est le type de radioactivité correspondant à cette désintégration ?

2. Évolution temporelle et dynamique interne du globe terrestre.

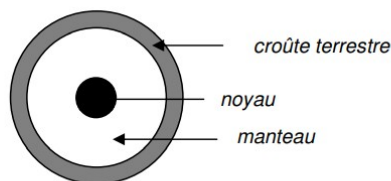
L'énergie thermique produite par le globe terrestre est évacuée par des courants de convection dans le manteau qui se traduisent en surface par la tectonique des plaques.

Le nombre de noyaux radioactifs diminue régulièrement au cours du temps, par simple décroissance radioactive. Par exemple, la quantité d'uranium 238 présente dans la Terre diminue de moitié tous les 4,5 milliards d'années.

Mais la diminution du nombre de noyaux radioactifs dans le manteau s'est intensifiée il y a environ deux milliards d'années, à l'époque où s'est formée la majorité du matériel continental de la croûte terrestre. En effet, celui-ci intégra, au fur et à mesure de sa formation, une quantité croissante d'uranium, thorium et potassium, appauvrissant ainsi le manteau en noyaux radioactifs.

D'après « Enseigner la géologie » Editions Nathan.

Schéma très simplifié du globe terrestre



2.1. Choisir le ou les adjectif(s) relatif(s) à la désintégration d'un noyau radioactif donné :

- a) prévisible dans le temps b) spontanée c) aléatoire.

2.2. « Le nombre de noyaux radioactifs ... diminue ... par simple décroissance radioactive ».

On s'intéresse à une espèce de noyaux radioactifs. On note N le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t , et N_0 le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t_0 choisi comme origine des dates. Soit λ la constante radioactive de l'ensemble des noyaux considérés.

2.2.1. Donner l'expression de la loi de décroissance radioactive du nombre de noyaux N au cours du temps. Rappeler l'unité de la constante radioactive λ dans les unités du Système International.

2.2.2. Tracer l'allure de la courbe représentant les variations du nombre de noyaux N au cours du temps. Placer quelques points remarquables (au moins deux points).

2.2.3. À quel instant la décroissance radioactive est-elle la plus rapide ? Justifier à partir du graphique tracé.

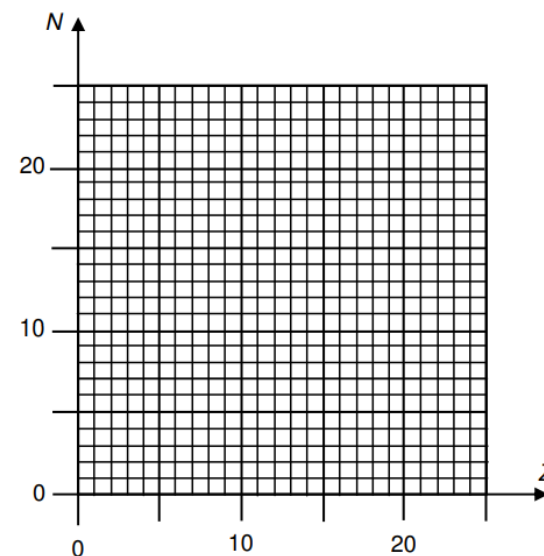
2.3. Déterminer, en utilisant le texte, la durée au bout de laquelle les trois quarts des noyaux d'uranium 238 présents aujourd'hui auront disparu par désintégration.

2.4. Choisir la proposition correcte en justifiant par une courte phrase issue en partie du texte introduisant cette partie 2.

La croissance des continents explique :

- a) l'augmentation du nombre de noyaux radioactifs dans le manteau
b) une diminution plus rapide du nombre de noyaux radioactifs dans le manteau
c) la décroissance radioactive par désintégration de l'uranium dans le manteau.

Le diagramme (N, Z)



Exercice 4 corrigé disponible

Deux causes peuvent être à l'origine de douleurs cardiaques :

- soit les cellules qui constituent le muscle cardiaque sont détruites (ce qui correspond à un infarctus du myocarde) ;
- soit les cellules sont encore vivantes mais souffrent du manque d'oxygène dû à une réduction de l'irrigation sanguine (ce qui correspond à une ischémie coronaire).

Pour son diagnostic, le cardiologue prescrit une scintigraphie myocardique au cours de laquelle du thallium 201 est injecté au patient par voie intraveineuse. En effet, cet élément radioactif, émetteur gamma, n'est fixé que par les cellules vivantes du cœur et son rayonnement de faible énergie est alors détecté par une gamma-caméra à scintillations.

D'après un texte du mensuel Pour la Science

Dans la première partie de cet exercice, on étudie la production de thallium 201 qui sert à la préparation de la solution que l'on injecte au patient lors de son examen. Dans la deuxième partie, on s'intéresse à la désintégration radioactive du thallium 201. Enfin, dans la dernière partie, on traite de la scintigraphie myocardique.

Les trois parties de cet exercice sont indépendantes.

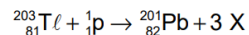
1. Production du thallium 201

1.1. Le thallium naturel ${}_{81}^{201}\text{Tl}$ est composé de thallium 203 et de thallium 205 à raison respectivement de 29,5 % et 70,5 % en masse.

1.1.1. Indiquer le nombre de protons et de neutrons contenus dans chacun de ces noyaux.

1.1.2. Expliquer pourquoi ces noyaux de thallium sont des isotopes.

1.2. On bombarde par un flux de protons une cible de thallium. Le thallium 203 se transforme en plomb 201 selon l'équation ci-dessous :



En énonçant les lois utilisées, identifier la particule X.

1.3. Le plomb 201, précédemment obtenu subit spontanément une désintégration radioactive β^+ pour former le thallium 201. Écrire l'équation de la désintégration du noyau de plomb 201 en thallium 201. On supposera que le noyau fils n'est pas émis dans un état excité.

2. La désintégration du thallium 201

Données :

- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$;
- constante de Planck : $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$;
- électronvolt : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

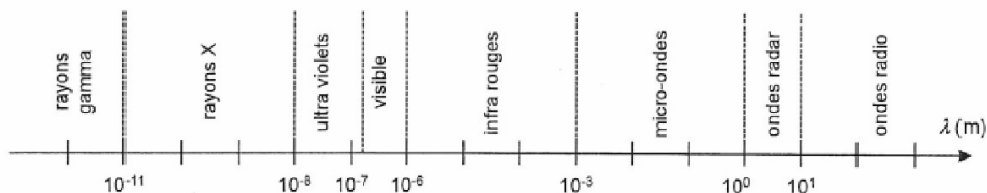
2.1. Lors de la désintégration du thallium 201 un des rayonnements émis possède une énergie E de 135 keV.

2.1.1. Donner l'expression littérale de la longueur d'onde de ce rayonnement λ dans le vide en fonction de l'énergie E , de la célérité de la lumière dans le vide c et de la constante de Planck h .

2.1.2. Calculer la longueur d'onde λ de ce rayonnement dans le vide.

2.1.3. La **figure 1** ci-dessous représente les différents domaines du spectre des ondes électromagnétiques. À quel domaine du spectre appartient le rayonnement émis lors de la désintégration du thallium 201 ?

Votre réponse est-elle en cohérence avec les renseignements du texte introductif ?



2.2. Le processus de désintégration du thallium 201 s'effectue en plusieurs étapes. On obtient un noyau excité de mercure Hg^* qui se désexcite en émettant le rayonnement d'énergie E de 135 keV. Dans un noyau, il existe des niveaux d'énergie comme dans le cortège électronique d'un atome. La **figure 2** représente le diagramme énergétique du noyau de mercure.

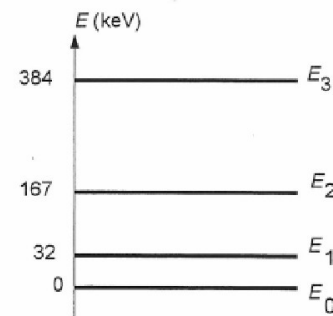


Figure 2. Diagramme énergétique représentant les premiers niveaux du noyau de mercure

À quelle transition correspond le rayonnement d'énergie $E = 135 \text{ keV}$?

3. Scintigraphie myocardique

Données :

- constante radioactive du thallium 201 : $\lambda_{\text{Tl}} = 2,6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$;
- masse molaire du thallium 201 : $M = 201,0 \text{ g.mol}^{-1}$;
- loi de décroissance radioactive relative à l'activité : $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$;
- relation entre l'activité A et le nombre de noyaux N : $A = \lambda \cdot N$;
- constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

3.1. Lors d'une scintigraphie myocardique, on utilise une solution de chlorure de thallium 201 dont l'activité volumique A_v est de 37 MBq.mL^{-1} . Cet examen nécessite l'injection par voie intraveineuse d'une solution d'activité A_0 de 78 MBq chez un individu de 70 kg . On visualise les premières images du cœur grâce à une gamma-caméra à scintillations quelques minutes seulement après l'injection.

3.1.1. Calculer le volume V de solution d'activité A_0 à injecter à un patient de 70 kg .

3.1.2. À partir de l'activité initiale A_0 , montrer que le nombre de noyaux N_0 de thallium 201 reçus par le patient au moment de l'injection est de $3,0 \times 10^{13}$.

3.1.3. En déduire la masse m_0 de thallium correspondante.

3.1.4. Le thallium présentant une certaine toxicité, une dose limite a été fixée. Elle est de 15 mg.kg^{-1} par unité de masse corporelle. Vérifier par un calcul que la dose injectée au patient ne présente pas de danger.

3.1.5. Vérifier que le temps de demi-vie $t_{1/2}$ du thallium 201 vaut 74 heures.

3.1.6. On estime que les résultats de l'examen sont exploitables tant que l'activité du traceur est supérieure à $3,0 \text{ MBq}$
Par un calcul de l'activité A , déterminer au bout de combien de jours une nouvelle injection est nécessaire.

3.2. Après injection de la solution de chlorure de thallium 201, l'examen médical consiste pour le patient à produire un effort lors d'un exercice physique pendant lequel une gamma-caméra prend des images de son cœur. Une autre série d'images est prise deux heures plus tard lorsque le patient est au repos. La **figure 3** montre les résultats d'une scintigraphie myocardique effectuée sur trois patients différents A, B et C. Le patient A est en parfaite santé.

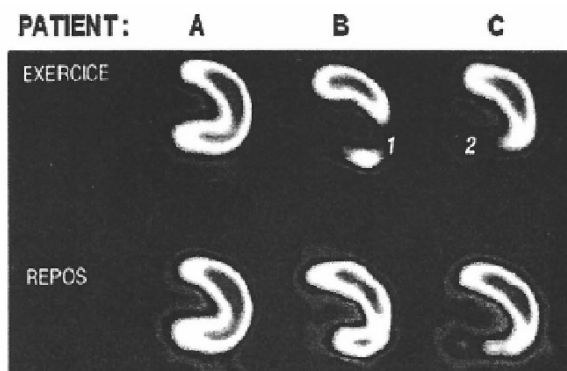


Figure 3. Scintigraphie cardiaque au Thallium 201 de trois patients lors d'un exercice physique puis au repos. Les zones claires sur les images représentent les cellules saines du cœur qui fixent le thallium 201.

3.2.1. En vous aidant du texte introductif, dire si le diagnostic médical pour le patient B est une ischémie coronaire ou un infarctus du myocarde. Justifier.

3.2.2. Même question pour le patient C. Justifier.

Exercice 5

En 1797, Joseph Denis François Champeaux, ingénieur des Mines, remarque dans l'échantillonnage d'un collectionneur « un minerai d'un beau jaune verdâtre formé de lamelles placées les unes sur les autres ». Il met 3 ans à localiser le gisement d'origine de cette roche à Saint Symphorien de Marmagne.

Nommé en 1852 « Autunite » en référence à l'Autunois, en Bourgogne, cet étrange minéral est exploité clandestinement par les collectionneurs et utilisé à la cristallerie de Baccarat pour la fabrication de verres jaunes à reflets verts.

C'est à cette époque que son analyse chimique est effectuée : il s'agit du phosphate d'uranium et de calcium hydraté de formule $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. L'uranium métal est alors isolé du minerai provenant de Saint Symphorien.

En 1896, Henri Becquerel découvre le phénomène de radioactivité en travaillant sur l'uranium.

L'uranium étant devenu un minerai militaire, le CEA installe en 1946 à Saint Symphorien le premier centre de recherche et d'exploration de l'uranium. Le site, non rentable, fermera 3 ans plus tard, mais tous les géologues de l'uranium se formeront là.

Électronvolt	$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$
Mégaélectronvolt	$1 \text{ MeV} = 1,00 \times 10^6 \text{ eV}$
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

1. A la découverte d'un minerai radioactif : l'Autunite

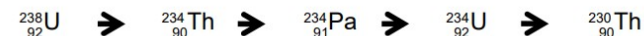
1.1. Qu'appelle-t-on noyau radioactif ?

1.2. L'uranium présent dans l'Autunite comprend 3 isotopes naturels : ^{238}U , présent en écrasante majorité, ^{235}U et ^{234}U .

1.2.1. Rappeler la définition de noyaux isotopes.

1.2.2. Comparer la composition des noyaux des atomes d'uranium 235 et 238.

1.3. Voici une petite partie de la chaîne de désintégration de l'uranium 238 :



1.3.1. Rappeler les lois de conservation dites lois de Soddy, intervenant lors des désintégrations successives.

1.3.2. Écrire l'équation de cette désintégration du noyau d'uranium 238 en thorium 234.

1.3.3. Quel est le type de radioactivité correspond à cette désintégration ?

1.3.4. Le thorium 234 se désintègre lui-même en protactinium ^{234}Pa .

Écrire l'équation de cette deuxième réaction de désintégration.

Quelle particule est alors émise.

1.4. L'uranium ^{238}U présente un temps de demi-vie de $4,5 \cdot 10^9$ années.

1.4.1. Rappeler la définition du temps de demi-vie noté $t_{1/2}$.

1.4.2. En utilisant la loi de décroissance radioactive $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, retrouver la relation entre le temps de demi-vie et la constante radioactive λ : $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

1.4.3. En déduire la valeur de la constante de désintégration radioactive λ en an^{-1} , puis en s^{-1} .

1.5. L'activité A_0 d'une pierre d'Autunite de masse voisine de 100 g, n'est pas négligeable ; elle est voisine de 9000 Bq.

1.5.1. Rappeler la définition de l'activité d'une espèce radioactive.

1.5.2. Que représente un becquerel (Bq) ?

1.5.3. On rappelle que l'activité $A(t)$ à la date t et le nombre de noyaux $N(t)$ présents au même instant sont liés par la relation : $A(t) = \lambda \cdot N(t)$.

Calculer le nombre de noyaux N_0 d'uranium présents dans cette pierre à la date $t = 0$ s et montrer que son ordre de grandeur est de 10^{21} .

1.5.4. L'activité $A(t)$ de l'échantillon suit la loi de décroissance radioactive : $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$ avec $A(t)$ l'activité de l'échantillon à la date t et A_0 l'activité initiale qui vaut 9000 Bq.

Que vaut l'activité de la pierre au bout de 10 ans ?

Que vaut-elle au bout de 1000 ans ?

1.5.5. Que peut-on en déduire à propos de la décroissance de l'activité de cette pierre.

1.5.6. Quels effets biologiques peut avoir l'inhalation prolongée de poussières issues d'une telle pierre ?