

Chapitre C4 – Radioactivité et décroissance radioactive



Se positionner

1. Un noyau atomique est constitué :
 - ① de protons, de neutrons et d'électrons
 - ② de protons et de neutrons
 - ③ de protons et d'électrons
2. Le numéro atomique d'une entité, noté Z , indique :
 - ① le nombre de nucléons (protons + neutrons)
 - ② le nombre d'électrons
 - ③ le nombre de protons
 - ④ le nombre de neutrons
3. Un élément chimique est défini par :
 - ① le numéro atomique noté Z
 - ② le nombre de masse noté A
 - ③ une case du tableau périodique des éléments
 - ④ un symbole
4. Dans un noyau, les nucléons se répartissent approximativement à part égale entre protons et neutrons :

① VRAI
② FAUX
5. Deux atomes sont isotopes si
 - ① ils ont le même nombre de protons mais pas le même nombre de neutrons
 - ② ils ont le même nombre de neutrons mais pas le même nombre de protons
 - ③ ils appartiennent à deux cases voisines du tableau périodique
 - ④ ils appartiennent à la même case du tableau périodique
6. La désintégration radioactive est un phénomène :
 - ① aléatoire
 - ② naturel
 - ③ qui peut être provoqué

Repères historiques

Positionner les scientifiques suivants sur l'axe chronologique ci-dessous en recherchant leurs dates de naissance et mort. On pourra aussi indiquer la découverte principale de chacun·e (au sujet de la radioactivité), et le cas échéant l'année d'obtention d'un Prix Nobel.

Wilhem Röntgen
Henri Becquerel
Pierre Curie

Marie Skłodowska Curie
Ernest Rutherford
Fréderik Soddy

Hans Geiger
Irène Curie
Lise Meitner

Frédéric Joliot



Activité 1 - Des noyaux pas tous stables

Vous disposez du paragraphe A du modèle.

Parmi la centaine d'éléments chimiques connus à ce jour, on a identifié plus de 3000 isotopes dont la plupart sont instables : ce sont les noyaux dits radioactifs. Environ 300 noyaux sont stables.

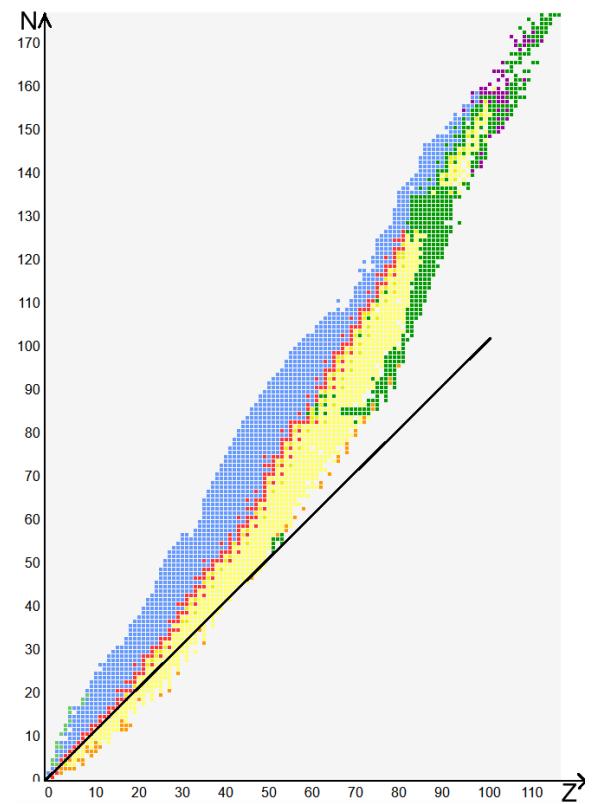
Les noyaux sont instables pour l'une des trois raisons suivantes :

- plus de neutrons que les isotopes stables de l'élément
- moins de neutrons que les isotopes stables de l'élément
- trop de protons et de neutrons (noyaux trop lourds)

Pour repérer les noyaux stables ou instables, on utilise une représentation des isotopes dans un diagramme dit (N,Z), dont un exemple est donné ci-contre. Le segment en noir représente le cas où N=Z.

- Indiquer la particularité que semblent présenter les noyaux stables de faible numéro atomique (Z<20).
- Indiquer à quelles zones colorées du diagramme (N,Z) correspondent les 3 catégories ci-dessus (a, b et c).
- En utilisant le paragraphe B du modèle, compléter les équations de réactions suivantes (sans tenir de la colonne « Type de radioactivité » pour l'instant).

| | Type de radioactivité |
|--|-----------------------|
| $^{145}Pr \rightarrow \dots Nd + {}_{-1}^0e$ | |
| $\dots Gd \rightarrow {}^{148}Sm + {}_{-2}^4He$ | |
| $^{15}_8O \rightarrow \dots N + {}_{-1}^0e$ | |
| $\dots _6C \rightarrow {}^{14}_7N + {}_{-1}^0e$ | |
| $\dots Po \rightarrow {}^{208}Pb + {}_{-2}^4He$ | |
| $^{201}_{86}Rn \rightarrow \dots At + {}_{-1}^0e$ | |
| $\dots _{79}Au \rightarrow {}^{168}_{77}Ir + \dots$ | |
| $\dots _{90}Th \rightarrow {}^{228}Ra + {}_{-2}^4He$ | |
| $^{228}_{88}Ra \rightarrow {}^{228}_{89}Ac + \dots$ | |



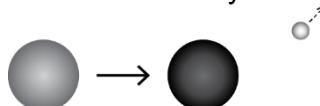
Source du diagramme :
https://physique.ostralo.net/diagramme_NZ/

- À l'aide du paragraphe C du modèle, compléter la dernière colonne du tableau précédent.
- Vérifier le type de radioactivité à l'aide du diagramme (N,Z) interactif suivant :
https://physique.ostralo.net/diagramme_NZ/
- Attribuer à chaque zone colorée du diagramme (N,Z) un type de radioactivité.

Activité 2 – La désintégration radioactive, comment ça marche ?

La radioactivité a été découverte par hasard par Henri Becquerel en 1896, alors qu'il étudiait les propriétés fluorescentes des sels d'uranium. Marie Curie, rejointe par Pierre Curie, a mis en évidence la radioactivité de nombreux nucléides (celle du radium et du polonium notamment). Elle a largement contribué à la compréhension des émissions radioactives et a développé leurs premières applications médicales.

Cette activité utilise le simulateur  [simulRAD](#) et un [tableur partagé](#) accessibles sur www.prof-vince.fr. Il simule, selon des lois à découvrir, une désintégration radioactive : réaction nucléaire spontanée au cours de laquelle un noyau instable se transforme en un autre noyau stable et émet une particule.



1^{ère} partie - Comportement d'UN noyau unique

- ▶ Régler le nombre de noyaux à un seul noyau.
 - ▶ Lancer l'animation en cliquant sur « ► » et noter la durée au bout de laquelle le noyau se désintègre.
 - ▶ Recommencer 9 fois et noter les 10 durées obtenues dans le tableau partagé en respectant bien le numéro de votre groupe.
1. Indiquer la propriété de la désintégration radioactive (cf quiz) mise en évidence par ces simulations.
 2. Noter la durée moyenne de désintégration obtenue avec toutes les simulations du groupe :
 3. Si on considère qu'un noyau a 100 % de chance d'être désintégré au bout de cette moyenne, quelle probabilité a-t-il d'être désintégré au bout d'une seconde ? (la probabilité étant proportionnelle à la durée, on pourra utiliser un produit en croix).
 4. Vérifier par un calcul que le résultat précédent est cohérent avec la proportion de désintégrations ayant eu lieu en moins de 1 s (valeur indiquée à la fin du tableau partagé).

La constante radioactive λ représente cette probabilité que le noyau se désintègre au bout d'une seconde (on a pris l'unité de temps par convention).

Vérifier que la valeur obtenue à la question 3 est en accord avec la valeur indiquée par le simulateur.

5. **Prévisions** (ne pas utiliser le simulateur pour traiter la question qui suit !)

Prévoir ce qu'on va observer :

- si on règle $\lambda = 0$?
- si on augmente λ ?

6. **Vérification** : utiliser le simulateur pour vérifier ($\lambda = 0$ puis augmenter).

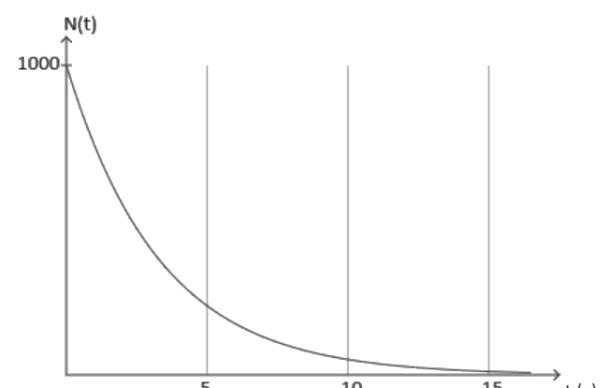
2^{ème} partie - Comportement d'une population de noyaux

- ▶ Régler le nombre de noyaux à une dizaine environ et la constante radioactive à $\lambda = 0,3 \text{ s}^{-1}$ environ.
 - ▶ Cliquer sur « voir le graphique » et lancer l'animation.
 - ▶ Recommencer deux ou trois fois sans effacer les graphiques successifs.
7. Une évolution temporelle suit une loi si elle est reproductible, c'est-à-dire si, dans des conditions données, elle est toujours la même. Peut-on dire que l'évolution temporelle d'une population de 10 noyaux suit une loi ?
 - ▶ Effacer les graphiques.
 - ▶ Toujours avec $\lambda = 0,3 \text{ s}^{-1}$, réaliser de nouvelles simulations avec 100, 200 (jusqu'à 1000) noyaux, en augmentant de 100 en 100. On effacera les graphiques après chaque augmentation du nombre de noyaux.

Vérifier que lorsque le nombre de noyau devient très grand, l'évolution est très proche d'une loi exponentielle

8. En raisonnant uniquement à l'aide de la signification de la constante radioactive, représenter ci-contre la courbe qu'on va obtenir si λ augmente.
- ▶ Utiliser le simulateur pour vérifier la prévision précédente.

9. Cocher l'option Afficher la courbe d'équation $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$, puis l'option Mettre en évidence τ et $t_{1/2}$. Faire afficher les valeurs de τ et $t_{1/2}$, puis en utilisant le simulateur vérifier que $\tau = 1/\lambda$.



Activité 3 - Une population qui suit une décroissance exponentielle

Évolution d'un noyau

La désintégration d'un noyau radioactif est un phénomène **aléatoire**. La probabilité qu'il se soit désintégré au bout d'une durée Δt est proportionnelle à cette durée, ce qui se traduit par la relation suivante :

$$p = \lambda \Delta t$$

- p : probabilité de la désintégration ; Δt : durée en seconde ;
- λ : **constante radioactive** en s^{-1} : c'est une propriété du noyau.

Évolution d'une population de noyaux

On considère un échantillon radioactif contenant, à la date $t = 0$, N_0 noyaux non désintégrés.

$N(t)$ désigne le nombre de noyaux non désintégrés à une date t .

Pendant une durée Δt , chaque noyau a une probabilité p de se désintégrer, le nombre de désintégrations est donc égal, en moyenne, au produit du nombre de noyaux présents et de cette probabilité, soit :

$$\text{nombre de désintégrations} = pN(t) = \lambda \times \Delta t \times N(t)$$

1. Le nombre de noyaux restants à la date $t + \Delta t$ vaut donc $N(t + \Delta t) \approx$
2. La variation du nombre de noyaux non désintégrés vaut donc : $N(t + \Delta t) - N(t) \approx$
3. Et donc $\frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} \approx$

Cette relation est approximative car :

- le phénomène est aléatoire et ne devient prévisible *en moyenne* que si le nombre de noyaux est suffisamment élevé ;
- $N(t)$ diminue continûment avec le temps donc le produit $p \times N(t)$ n'est pas constant pendant la durée Δt .
- 4. Pour une grande population de noyaux, cette relation ne devient rigoureuse que pour une durée infiniment petite, durant laquelle la variation de $N(t)$ est infinitésimale, on a donc :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} = \frac{dN}{dt}(t) =$$

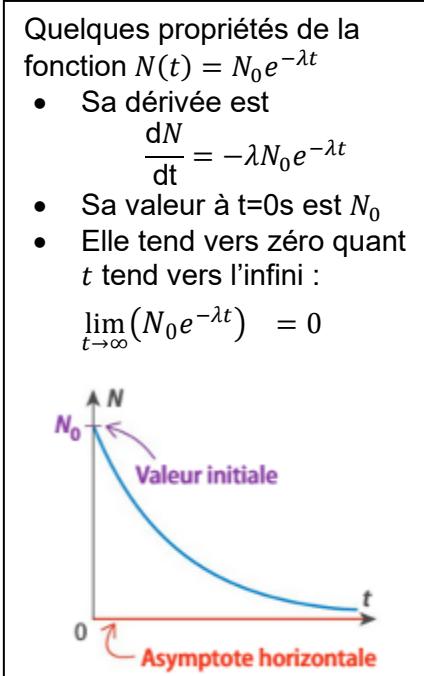
C'est l'équation différentielle satisfaite par le nombre de noyaux non désintégrés dans l'échantillon.

5. Vérifier que l'expression donnée par le simulateur $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ est solution de cette équation différentielle précédente (pour ceci, on aura besoin de dériver la fonction).

Pour aller plus loin : résoudre l'équation différentielle à l'aide de vos connaissances mathématiques. Parmi l'infinité de fonctions vérifiant cette équation différentielle, déterminer la seule qui valide la condition initiale : $N(0) = N_0$.

Compléments mathématiques

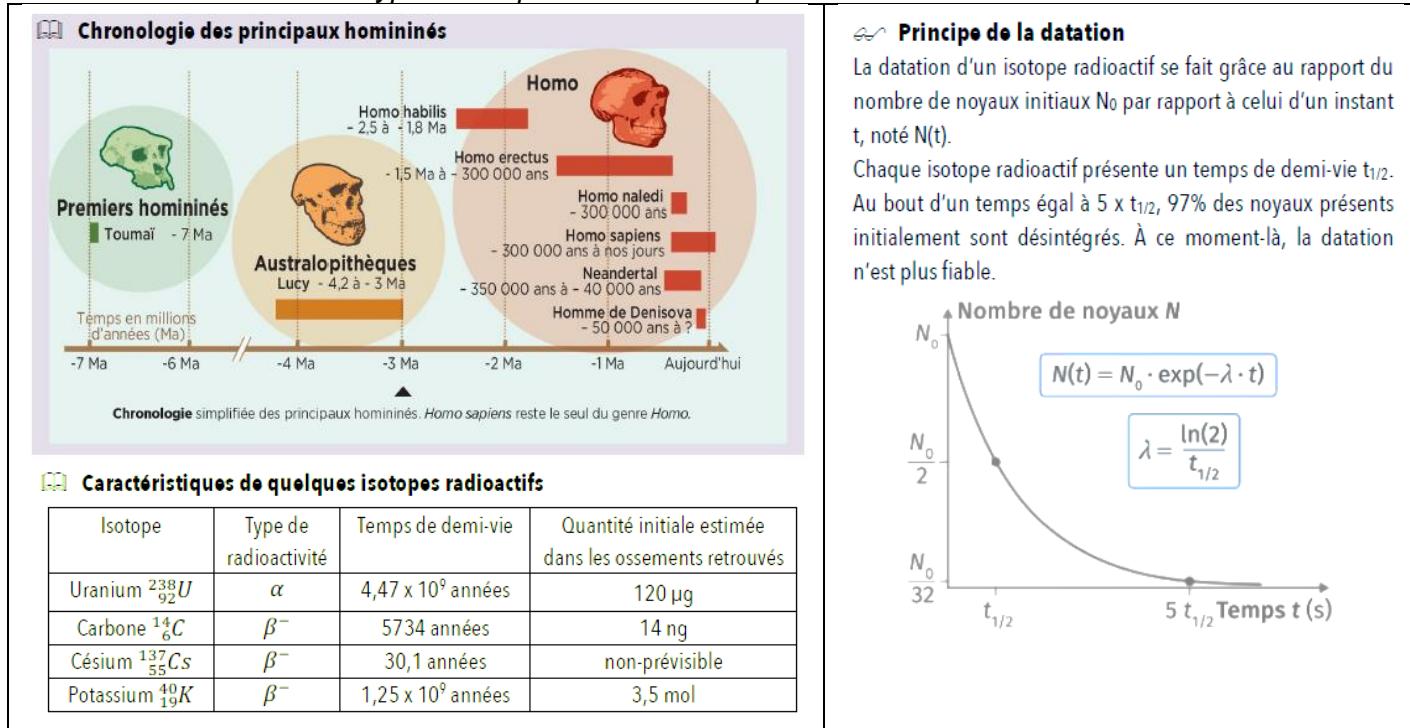
| Notations générales utilisées en mathématiques | Notations pour la présente étude |
|---|--|
| Équation différentielle | |
| $y' = ay$ | $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ |
| Fonction solution de l'équation différentielle, à déterminer | |
| y (fonction de x) | N (fonction de t) |
| Solution générale | |
| $y(x) = K e^{ax}$ où $K \in \mathbb{R}$ | $N(t) = K e^{-\lambda t}$ où $K \in \mathbb{R}$ |
| Solution particulière vérifiant une valeur particulière | |
| $\text{Si } y(0) = y_0 \text{ alors } y(t) = y_0 e^{ax}$ | $\text{Si } N(0) = N_0 \text{ alors } N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ |



Activité 4 – Radioactivité et datation

A- Homo luzonensis

Depuis 2007, des archéologues ont trouvé 13 ossements (dents, phalanges, fémurs) dans la grotte de Callao sur l'île de Luçon aux Philippines. Ces ossements présentent à la fois des caractères primitifs proches de l'Australopithecus et d'autres, plus récents, proches d'Homo sapiens. S'agirait-il d'une nouvelle espèce... ? Une nouvelle espèce du genre Homo... ? On cherche ici à dater les ossements d'une nouvelle espèce afin de déterminer si elle est du type Homo proche d'Homo sapiens.



- À l'aide des documents, citer les deux isotopes radioactifs qui ne permettent pas de dater les ossements trouvés.
- Compléter les équations de désintégration des deux isotopes les plus adaptés à la datation des ossements :

$$\dots \rightarrow \dots Th + \dots$$
 et
$$\dots \rightarrow \dots Ca + \dots$$
- Les analyses des ossements montrent qu'ils contiennent $3,03527 \times 10^{17}$ noyaux d'uranium encore présents. Ces ossements appartiennent-ils au genre *Homo* ? (Masse molaire de l'Uranium : $M = 238,0 \text{ g.mol}^{-1}$).

B- Datation au carbone 14

La datation au carbone 14 peut être utilisée pour dater une statuette en bois. Un petit échantillon est brûlé et les gaz qui s'en échappent sont analysés pour déterminer la proportion de ^{14}C . Le noyau de carbone 14 est radioactif β^- et donne un noyau d'azote en se désintégrant avec une demi-vie $t_{1/2} = 5730$ ans : c'est la durée nécessaire à la désintégration de la moitié d'un échantillon. On admet que la proportion des deux isotopes du carbone (^{12}C et ^{14}C) est constante dans l'atmosphère et dans les êtres vivants et qu'il en a toujours été ainsi. Elle est de $1,3 \times 10^{-12}$ atomes de ^{14}C pour un atome de ^{12}C . Lorsque l'être vivant meurt, cette proportion décroît exponentiellement car les isotopes 14 se désintègrent.



- Écrire l'équation de désintégration du carbone 14.
- Expliquer graphiquement le principe de la datation au carbone 14.
- Exprimer la relation entre la demi-vie et la constante radioactive puis calculer la constante radioactive du carbone 14.
- L'analyse d'un prélèvement de masse $m = 0,10 \text{ g}$ de la statuette montre qu'elle contient 10% en masse de carbone. Évaluer le nombre total d'atomes de carbone présents dans le prélèvement lors de la mort du bois qui a servi à confectionner la statuette, puis le nombre d'atomes de carbone 14.
- Déterminer l'activité A_0 de cet échantillon au moment de la mort du bois.
- Cet échantillon a une activité $A = 2,0 \text{ mBq}$. En déduire l'âge approximatif de la statuette.

Activité 5 – Radioactivité et médecine

La médecine nucléaire permet de faire du diagnostic (plus précisément au sujet des processus biologiques dans les organes, les mécanismes physiopathologiques) et de la radiothérapie. Pour en savoir plus sur les principes de la médecine nucléaire, voir le document ci-contre.

On explore plus précisément ici un cas de radiothérapie et le moyen de se protéger.



PARTIE 1 : LA RADIOTHÉRAPIE

La radiothérapie est une technique qui consiste à irradier des cibles tumorales disséminées dans l'organisme au moyen de médicaments radioactifs émettant des rayonnements ionisants.

Données :

- Masses molaires : $M(^{23}\text{Na}) = 23,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(^{131}\text{I}) = 131,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(^{127}\text{I}) = 127,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Temps de demi-vie de l'iode 131 : $t_{1/2} = 8 \text{ jours}$

Document 1 : Injection d'iode 131

L'iode 131 est le radioélément le plus utilisé en radiothérapie β^- . Dans le cadre d'un traitement radiothérapeutique, 2,0 μg d'iode de sodium sont injectés. L'échantillon est constitué de 20 % d'atomes d'iode 131 radioactifs et de 80 % d'atomes d'iode 127 non radioactifs. Le traitement à l'iode 131 conduit à une émission de rayonnements gamma de haute énergie qui requiert des contraintes de radioprotection dont un confinement des malades dans des chambres radio protégées.

Document 2 : Mesures de l'activité d'un échantillon radioactif

Des mesures ont été effectuées sur un échantillon pour s'assurer de la nature de l'échantillon radioactif.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A (MBq) | 1600 | 1460 | 1345 | 1230 | 1130 | 1040 | 950 | 870 | 805 | 730 | 670 | 620 | 520 | 440 | 370 | 310 | 260 | 220 |
| t (jours) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 |

1. Après avoir calculé la masse molaire de l'échantillon, montrer que le nombre de noyaux d'iode radioactifs initialement présents dans l'échantillon injecté au patient est voisin de $1,6 \times 10^{15}$.
2. Calculer la valeur de la constante radioactive de l'iode 131 et en déduire que la valeur initiale de l'activité de l'échantillon est en accord avec la valeur calculée à la question précédente.
3. Expliquer pourquoi l'échantillon ne peut pas être préparé longtemps avant l'injection.

PARTIE 2 : LA RADIOPROTECTION

La médecine moderne utilise plusieurs sources de rayonnements. Les praticiens régulièrement en contact avec ses sources doivent se protéger méticuleusement en respectant un protocole strict de travail.

Document 1 : Les différentes unités de la radioactivité

- Le becquerel (Bq), indicateur de la radioactivité émise. Cette unité sert à définir l'activité d'un échantillon radioactif. Un becquerel équivaut à une désintégration par seconde.
- Le gray (Gy), pour mesurer la dose de rayonnement absorbée. Tous les rayonnements émis par des atomes radioactifs transportent de l'énergie. Au contact de la matière, ils cèdent tout ou une partie de leur énergie. Un gray équivaut à 1 joule par kilogramme.
- Le sievert (Sv) pour évaluer le risque biologique. Pour une même dose absorbée, les effets dépendent de la nature du rayonnement, de son énergie et du temps d'exposition.

Document 2 : Les sources d'exposition de la radioactivité

Il existe différentes sources d'expositions à la radioactivité.

- La radioactivité naturelle : on parle des rayonnements cosmiques (de l'ordre de 1 mSv/an), des rayonnements telluriques (de 1 à 10 mSv/an), de la radioactivité de l'air et des radionucléides présents dans le corps humain (moins de 1 mSv/an).
- L'exposition peut être d'origine médicale ou industrielle. L'exposition peut être liée à un accident nucléaire : l'accident entraîne la dispersion de sources radioactives dans l'environnement qui peuvent alors être en contact direct avec les populations (ingestion, inhalation, contact cutané ou non). Ces sources de radioactivités se déposent dans les sols, les surfaces (maison, plantes, etc.) et dans l'eau.

| Sources radioactives naturelles | | | |
|---------------------------------|-------------|--|-------------|
| Eau de pluie | 0,5 Bq/L | Eau de mer | 14 Bq/L |
| Lait | 70 Bq/L | Poisson | 100 Bq/L |
| Pommes de terre | 150 Bq/kg | Corps humain | 120 Bq/L |
| Terre sédimentaire | 400 Bq/kg | Engrains phosphatés | 3 000 Bq/kg |
| Terre granitique | 8 000 Bq/kg | Uranium 238 ($t_{1/2} \approx 4,5$ milliards d'années) | 37,2 MBq/kg |

▲ Ordres de grandeur de l'activité de différentes sources radioactives.

Document 3 : Radioprotection et pouvoir de pénétration des rayonnements

En France la radioprotection relève de l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui a fixé une dose annuelle admissible de :

- 20 mSv pour les travailleurs soumis aux rayonnements.
- 1 mSv pour la population (sauf dans le cas médical).

Pour se protéger des rayonnements ionisants, il faut s'éloigner de la source, mettre des écrans (composés d'éléments chimiques de numéros atomiques Z élevés) et diminuer la durée d'exposition.

1. Expliquer les nuances entre les trois unités de mesures, et justifier l'utilisation du sievert pour la radioprotection.
2. Expliquer pourquoi il est nécessaire de connaître le type de radioactivité dont on veut se protéger pour adopter une protection efficace.
3. Expliquer pourquoi les trois stratégies évoquées dans le document 3 sont nécessaires et complémentaires pour limiter l'exposition aux radiations.

