

Activité 4 — Dater une roche, soigner un patient

► Introduction

Deux objets sans lien apparent : un cristal australien de 0,2 mm et une image du squelette entier d'un patient, obtenue en trois heures. Le premier date de 3,3 milliards d'années, la seconde a été prise ce matin. Pourtant, tous deux reposent sur la **même** propriété : la décroissance radioactive, dont l'activité précédente a montré qu'elle suit une loi régulière et caractéristique de chaque noyau.

Problématique : Comment un noyau radioactif peut-il servir d'**horloge** et d'outil **médical** ?

✓ Savoirs et savoir-faire

Savoirs	Savoir-faire / capacités
La demi-vie est caractéristique du noyau radioactif considéré (réinvestissement).	(i) Utiliser une décroissance radioactive pour effectuer une datation, en identifiant les hypothèses du modèle utilisé. (ii) Expliquer l'utilisation des noyaux radioactifs en contexte médical. (iii) Citer quelques précautions liées à l'utilisation de substances radioactives et les relier au principe d'optimisation. (iv) Calculer le nombre de noyaux restants après n demi-vies (réinvestissement).

Dater un cristal : les zircons de Jack Hills

Document 1 — Les zircons de Jack Hills (Australie-Occidentale)

Les **zircons** sont de minuscules cristaux (de 0,1 à 0,4 mm), emprisonnés dans des roches plus récentes. Ceux extraits de la formation de Jack Hills, en Australie-Occidentale, comptent parmi les **plus anciens matériaux terrestres connus** : le plus ancien d'entre eux a été daté à 4,404 milliards d'années, alors que la Terre s'est formée il y a 4,57 milliards d'années. Tous les grains de cette formation ne sont pas aussi anciens : celui étudié ici a cristallisé il y a environ 3,3 milliards d'années.

Pour dater un zircon, on exploite la désintégration de l'uranium 238 : chaque noyau de $^{238}_{92}\text{U}$ qui se désintègre finit par donner un noyau de **plomb 206 stable**, $^{206}_{82}\text{Pb}$, qui reste **piégé** dans le cristal.

La datation repose sur **deux hypothèses** :

- **H1** — Lors de sa cristallisation, le zircon incorpore l'uranium mais **rejette le plomb** : il ne contenait donc **aucun plomb** initialement ;
- **H2** — Le zircon est un minéral exceptionnellement résistant : depuis sa cristallisation, il n'a **ni perdu ni gagné** d'uranium ou de plomb. On dit qu'il s'est comporté comme un **système fermé**.

Sur ce grain, on compte **environ 67 atomes de plomb 206 pour 100 atomes d'uranium 238** encore présents (valeur arrondie pour simplifier les calculs).

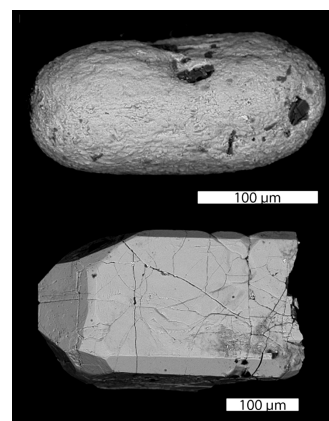


FIGURE 1 – Grain de zircon de Jack Hills (longueur de l'ordre de 0,2 mm).

Source : University of Wisconsin-Madison (J. W. Valley) / NASA Earth Observatory — licence à vérifier.

Contexte : S. A. Wilde *et al.*, *Nature* **409**, 175–178 (2001) — le plus ancien grain de Jack Hills, daté à 4,404 milliards d'années.

📎 Remarque

Les analyses réelles sont effectuées à la **sonde ionique** et fournissent des rapports isotopiques avec bien plus de chiffres significatifs. La valeur « 67 pour 100 » utilisée ici est un **arrondi**, choisi pour simplifier les calculs en classe. Elle ne correspond pas à un relevé instrumental précis.

La décroissance de l'uranium 238

Document 2 — Décroissance de l'uranium 238

La courbe ci-dessous donne l'évolution du nombre de noyaux d'uranium 238 encore présents dans un cristal, exprimé en pourcentage du nombre initial, en fonction du temps écoulé depuis la cristallisation.

Activité 4 — Dater une roche, soigner un patient

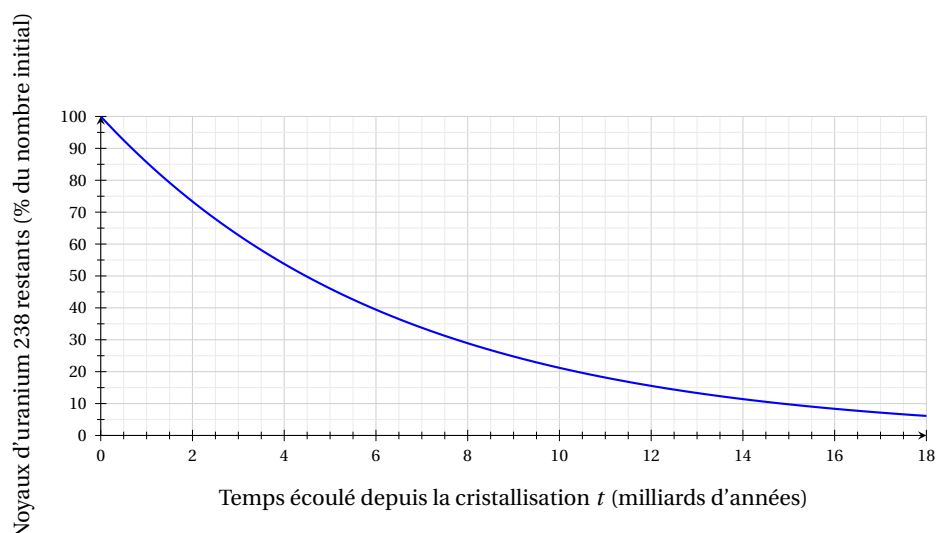


FIGURE 2 – Décroissance du nombre de noyaux d'uranium 238 restants en fonction du temps écoulé depuis la cristallisation.

Remarque

La méthode réelle de datation **uranium-plomb** utilise également le couple **uranium 235 / plomb 207**. En comparant les âges obtenus avec les deux couples, les géologues **vérifient l'hypothèse H2 du système fermé** : si le cristal avait perdu du plomb, les deux âges ne concorderaient pas.

Soigner un patient : la scintigraphie au technétium 99m

Document 3 — La scintigraphie au technétium 99m

Le **technétium 99m**, noté $^{99m}_{43}\text{Tc}$, est le **radionucléide le plus utilisé en imagerie médicale**. C'est un **émetteur gamma** : lors de sa désintégration, il produit un rayonnement gamma d'énergie 140 keV, qui **traverse les tissus** et peut être détecté **à l'extérieur** du corps.

Sa **demi-vie** est courte : $t_{1/2} = 6,0$ heures. Il est obtenu sur place, à l'hôpital, à partir d'un **générateur au molybdène 99**.

Pour une **scintigraphie osseuse**, on injecte au patient une activité typique de 600 MBq. Les images sont acquises **2 à 3 heures** après l'injection, ce qui permet de visualiser l'ensemble du squelette grâce à la fixation du traceur sur les os.

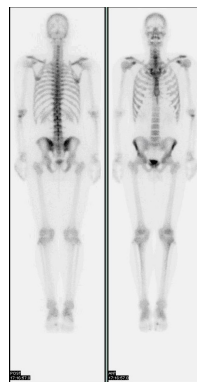


FIGURE 3 – Scintigraphie osseuse au technétium 99m : le squelette entier est visible quelques heures après l'injection.

Source : Wikimedia Commons / service hospitalier universitaire — licence à vérifier.

Données : AIEA / OCDE-AEN, SFMN.

Se protéger des rayonnements ionisants

Document 4 — Les principes de la radioprotection

La radioprotection regroupe l'ensemble des mesures destinées à protéger les personnes des rayonnements ionisants. Le système international de radioprotection repose sur **trois principes** et se traduit par **trois moyens pratiques**.

Les trois principes	Les trois moyens pratiques
Justification : toute exposition doit être justifiée par un bénéfice qui l'emporte sur le risque.	Temps : réduire la durée d'exposition.
Optimisation (ALARA) — <i>As Low As Reasonably Achievable</i> : maintenir l'exposition aussi basse que raisonnablement possible .	Distance : s' éloigner de la source.
Limitation : respecter les limites réglementaires de dose.	Écran : placer un écran (plomb, béton) entre la source et la personne.

Activité 4 — Dater une roche, soigner un patient

Conseils au patient après un examen de médecine nucléaire : boire beaucoup et uriner fréquemment pour accélérer l'élimination du traceur; éviter les contacts rapprochés et prolongés avec de jeunes enfants et des femmes enceintes pendant quelques heures.

Source : ASNR (ex-ASN/IRSN), fiche d'information du public « Les principes de la radioprotection ».

Questions

- La datation de ce cristal repose sur **deux hypothèses**, toutes deux énoncées dans le Document 1.
 - Laquelle concerne le **plomb présent au moment de la cristallisation**?
 - Laquelle concerne les échanges possibles **entrée ou sortie** du cristal **depuis sa formation**?
 - Choisissez **l'une** de ces deux hypothèses et expliquez pourquoi l'âge calculé serait **erroné** si elle n'était pas vérifiée.

- Le comptage donne 67 atomes de plomb 206 pour 100 atomes d'uranium 238.
 - Déduisez-en le nombre N_0 de noyaux d'uranium 238 présents lors de la cristallisation (pour 100 noyaux restants aujourd'hui), puis calculez le **pourcentage** de noyaux d'uranium 238 restants.
 - Expliquez pourquoi la mesure du **seul uranium 238 restant** n'aurait pas permis de dater le cristal.

- À l'aide de la courbe du Document 2 :
 - Déterminez **graphiquement** la **demi-vie** $t_{1/2}$ de l'uranium 238, c'est-à-dire le temps au bout duquel il ne reste plus que 50 % des noyaux initiaux.
 - À l'aide du **pourcentage** de noyaux d'uranium 238 restants calculé à la question 2.(a), déduisez-en **graphiquement** l'âge du cristal, comparez-le à l'âge publié pour ce grain (3,31 milliards d'années) et commentez la **précision** de cette lecture.

Activité 4 — Dater une roche, soigner un patient

Remarque

Rappel (activité 3). Après n demi-vies écoulées, le nombre de noyaux radioactifs restants vaut

$$N = \frac{N_0}{2^n}, \quad \text{avec} \quad n = \frac{t}{t_{1/2}}.$$

4. Une activité de 600 MBq de technétium 99m est injectée à un patient à 8 h. Déterminez la **fraction** de noyaux encore présents 24 h plus tard. Comme l'activité est proportionnelle au nombre de noyaux, déduisez-en l'**activité restante**.

5. À l'aide du Document 3, expliquez pourquoi le technétium 99m est particulièrement adapté à l'**imagerie médicale**. Donnez au moins **deux** arguments et précisez le rôle de sa **demi-vie**.

6. (a) À l'aide du Document 4, citez les **trois moyens** de se protéger d'une source radioactive et proposez, pour chacun, un **exemple concret** — soit pour le **personnel** du service de médecine nucléaire, soit pour le **patient** de retour chez lui.
- (b) Le Document 4 présente également les **trois principes** de la radioprotection. **Nommez** celui qui consiste à maintenir l'exposition « **aussi basse que raisonnablement possible** » et **expliquez** en quoi les trois moyens de la question (a) en sont une **application concrète**.

À retenir

Activité 4 — Dater une roche, soigner un patient

Pour aller plus loin — Datations chiffrées et choix d'une horloge

7. **Dater un charbon de bois au carbone 14.** Un fragment de charbon de bois retrouvé dans une grotte présente une activité due au carbone 14 de $A = 0,029 \text{ Bq}$ par gramme de carbone. Un échantillon de bois vivant possède, lui, une activité $A_0 = 0,23 \text{ Bq}$ par gramme. On donne $t_{1/2}({}^{14}_6\text{C}) = 5730 \text{ ans}$.
- (a) Calculez le rapport A/A_0 et montrez qu'il vaut environ $1/8$.
 - (b) L'activité d'un échantillon est proportionnelle au nombre de noyaux radioactifs qu'il contient. Déduisez-en le nombre n de demi-vies écoulées depuis la mort de l'arbre.
 - (c) Calculez l'âge du charbon de bois.
 - (d) Pourrait-on dater de la même façon une roche vieille de 4 milliards d'années? Justifiez en une phrase.

8. **Choisir la bonne horloge.** Une datation n'est exploitable que si la durée t à mesurer correspond à un nombre de demi-vies $n = t/t_{1/2}$ **proche de 1**. On donne $t_{1/2}({}^{14}\text{C}) = 5730 \text{ ans}$, $t_{1/2}({}^{99\text{m}}\text{Tc}) = 6,0 \text{ h}$ et $t_{1/2}({}^{238}\text{U}) = 4,468 \text{ milliards d'années}$.
- (a) Calculez $n = t/t_{1/2}$ (durées converties en années) pour ces **trois** noyaux dans les **deux** cas suivants : une pièce de bois gauloise de 2000 ans, une roche lunaire de 4,0 milliards d'années. Présentez les six résultats dans un tableau.
 - (b) Quel noyau faut-il choisir dans chaque cas? Justifiez à l'aide des valeurs de n et expliquez pourquoi le **troisième** noyau est inutilisable dans les deux cas.
 - (c) **L'uranium 238, horloge de la Terre.** La Terre s'est formée il y a 4,57 milliards d'années, alors que le plus ancien zircon de Jack Hills (Document 1) a cristallisé il y a 4,404 milliards d'années. Calculez l'écart entre ces deux dates (en millions d'années), puis le **pourcentage** de noyaux d'uranium 238 encore présents aujourd'hui dans une roche qui se serait formée avec la Terre.