

Activité 3 — Becquerel, Curie et la radioactivité

► Introduction

Fin février 1896, Henri Becquerel range dans un tiroir des sels d'uranium posés sur une plaque photographique soigneusement enveloppée de papier noir : le temps est couvert et son expérience attendra le retour du soleil. Quelques jours plus tard, il développe la plaque par acquit de conscience et y découvre une image parfaitement nette.

Problématique : Que se passe-t-il dans un noyau radioactif? Peut-on prévoir le moment où il va se désintégrer?

✓ Savoirs et savoir-faire

Savoirs	Savoir-faire / capacités
- Certains noyaux sont instables et se désintègrent spontanément : ce phénomène est appelé radioactivité. - L'instant de désintégration d'un noyau individuel est aléatoire. - La demi-vie $t_{1/2}$ est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux d'un échantillon se désintègre. Elle est caractéristique du noyau.	Calculer le nombre de noyaux restants au bout de n demi-vies. Utiliser une représentation graphique pour déterminer une demi-vie. Simuler et interpréter l'évolution d'une population de noyaux.

La découverte de la radioactivité

Document 1 — 1896–1898 : la découverte de la radioactivité

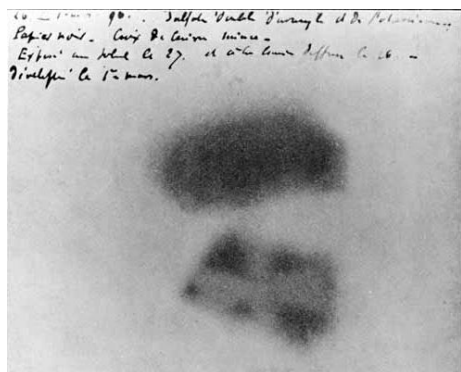


FIGURE 1 – Plaque photographique impressionnée par les sels d'uranium, sans aucune exposition à la lumière (Henri Becquerel, 1896).

Source : Musée Curie / Wikimedia Commons (domaine public).

En février 1896, Henri Becquerel découvre par hasard que des sels d'uranium, posés sur une plaque photographique soigneusement enveloppée de papier noir, l'ont **impressionnée sans avoir été exposés à la lumière** : l'uranium émet donc un rayonnement **spontané**.

Plutôt que d'étudier un seul minéral, Marie Curie compare systématiquement l'**ionisation de l'air** provoquée par divers composés. La **pechblende** se révèle bien plus « active » que l'uranium qu'elle contient : elle en déduit l'existence d'**éléments encore inconnus**.

En **1898**, avec Pierre Curie, elle isole successivement deux nouveaux éléments radioactifs, le **polonium** puis le **radium**, et invente le mot « **radioactivité** » pour désigner ce phénomène.

Décroissance du radium 226

Document 2 — Décroissance d'un échantillon de radium 226

La courbe ci-dessous montre l'évolution du nombre N de noyaux de radium 226, noté ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, dans un échantillon de **0,30 g** contenant initialement $N_0 = 8,0 \times 10^{20}$ noyaux.

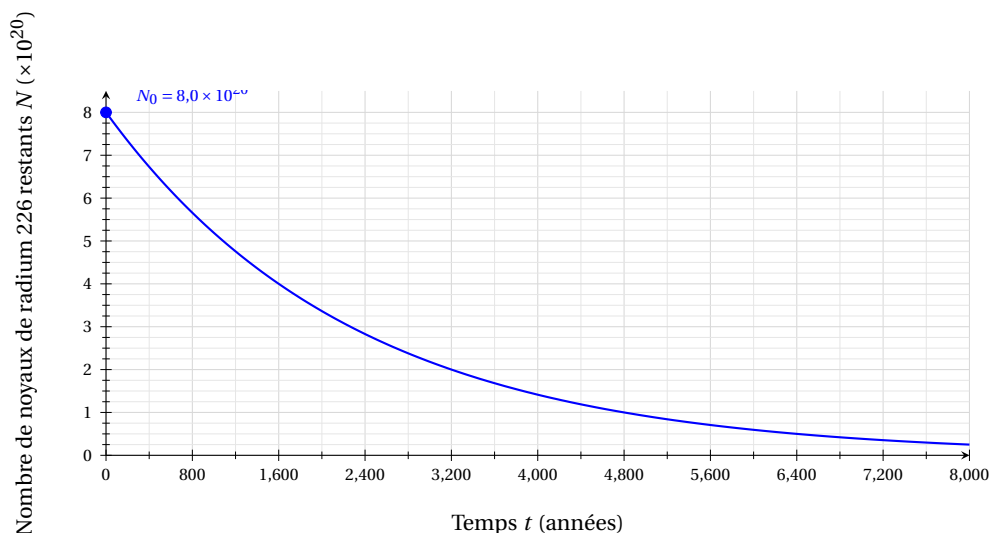


FIGURE 2 – Évolution du nombre de noyaux de radium 226 d'un échantillon de 0,30 g.

Source : LiveChart of Nuclides, LNHB / IAEA.

Simuler une population de noyaux

Document 3 — Simuler une population de noyaux

Matériel : un lot de **dés radioactifs** par binôme : dés imprimés en 3D dont une seule face est rouge et porte le symbole radioactif, les cinq autres étant blanches. Un dé lancé au hasard présente donc la face rouge avec la probabilité $p = \frac{1}{6}$.

Modèle : chaque binôme dispose de **10 dés**, qui représentent chacun un noyau. Un **tour** correspond à une même durée pour toute la classe.

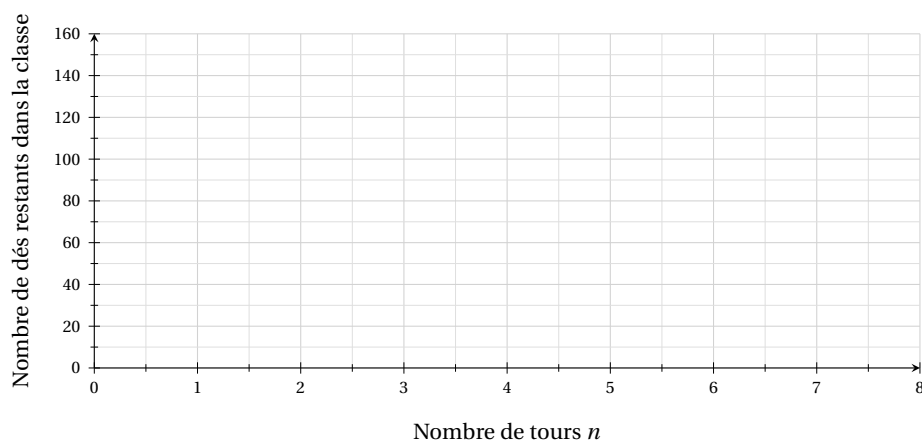
À chaque tour, lancez en même temps **tous les dés encore présents**, puis **écartez** les dés tombés sur la face rouge (ces noyaux se sont désintégrés) et comptez les dés restants. Réalisez **8 tours**, ou arrêtez si tous les dés du binôme ont disparu.

Tableau à compléter : notez à chaque tour le nombre de dés restants dans votre binôme, puis le total obtenu en **mise en commun** pour toute la classe (N_0 = nombre total de dés de la classe au départ).

Nombre de tours n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Notre binôme : dés restants	10								
Total de la classe : dés restants	$N_0 = \dots$								

Le tableau se complète avec les valeurs réellement obtenues en classe.

Mise en commun : reportez le total de la classe sur le graphique ci-dessous, puis tracez la **courbe de décroissance** du nombre de dés restants.



Activité 3 — Becquerel, Curie et la radioactivité

FIGURE 3 – Graphique à compléter : nombre de dés restants en fonction du nombre de tours.

Le radon dans les habitations

Document 4 — Le radon 222 dans les habitations

Le **radium 226**, naturellement présent dans certaines roches du sous-sol, produit du **radon 222**, noté $^{222}_{86}\text{Rn}$. Ce **gaz** radioactif, incolore et inodore, a une demi-vie de $t_{1/2} = 3,8\text{d}$. Il **remonte en permanence du sol** et peut s'infiltrer dans les habitations par les fissures et les caves.

Le sol libère du radon **en continu**. Dans un logement fermé, ce gaz **s'accumule** et sa concentration augmente. **Aérer renouvelle l'air intérieur** : le radon présent est **évacué vers l'extérieur** et **dilué** dans l'atmosphère.

L'**activité** d'un échantillon se mesure en **becquerels** (Bq) : $1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$, soit une désintégration par seconde. Pour le radon dans l'air, on parle d'activité volumique, exprimée en $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Niveau de référence dans l'air	Effets sanitaires en France
$300\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (niveau de référence dans les lieux d'habitation, code de la santé publique)	3000 décès par an (deuxième cause de cancer du poumon après le tabac)

Source : IRSN / ASNR — *Le radon*, cartographie du potentiel radon et réglementation.

Questions

- (a) Décrivez ce que montre la plaque photographique du Document 1. Pourquoi cette observation prouve-t-elle que le rayonnement est émis **spontanément** par l'uranium, sans aucune intervention extérieure ?
(b) Marie Curie constate ensuite que la pechblende est bien plus « active » que l'uranium qu'elle contient. Quelle hypothèse en a-t-elle déduite, et comment l'a-t-elle vérifiée ?

✓ Correction

(a) La plaque porte l'image **nette** des échantillons de sel d'uranium qui étaient posés dessus. Or elle était enveloppée de papier noir et n'a jamais été exposée à la lumière : aucun rayonnement lumineux extérieur ne pouvait donc l'impressionner. Le rayonnement qui l'a noircie est donc émis par l'uranium **lui-même**, sans apport d'énergie extérieure (ni lumière, ni chaleur) : cette émission est **spontanée**.

(b) La pechblende est plus « active » que l'uranium qu'elle contient : l'activité observée ne peut pas être due au seul uranium présent. Marie Curie en déduit que la pechblende contient un ou plusieurs **éléments inconnus**, encore plus radioactifs que l'uranium. Elle l'a vérifié en fractionnant chimiquement le minerai : elle isole en 1898, avec Pierre Curie, deux nouveaux éléments radioactifs, le **polonium** puis le **radium**, dont l'activité est bien supérieure à celle de l'uranium.

Activité 3 — Becquerel, Curie et la radioactivité

2. Réalisez la simulation du Document 3, complétez le tableau et tracez la courbe du **total de la classe**.

(a) Peut-on prévoir à quel tour **un** dé donné va tomber sur la face rouge? Comparez ce qui est arrivé à **vos 10 dés** avec ce qui est arrivé aux 10 dés du binôme voisin.

(b) La courbe obtenue pour le **total de la classe** est-elle régulière? Que peut-on en déduire pour un échantillon réel, qui contient des milliards de milliards de noyaux?

(c) À l'aide de cette courbe, déterminez le nombre de tours au bout duquel la **moitié** des dés de la classe a disparu. Cette durée est la **demi-vie** de la population de dés.

✓ Correction

(a) Non : chaque lancer est **aléatoire**. Un dé a une chance sur six de tomber sur la face rouge à chaque tour, mais rien ne permet de prévoir à quel tour *ce* dé précis disparaîtra. Deux binômes partant des mêmes 10 dés n'obtiennent donc pas la même suite de nombres de dés restants (ni la même durée totale) : les « noyaux » individuels se désintègrent à des instants différents, tous imprévisibles.

(b) La courbe du total de la classe est beaucoup plus **régulière** que celle d'un binôme : elle décroît de façon continue, en s'arrondissant, car les écarts entre binômes se compensent lorsque le nombre de dés est grand. Pour un échantillon réel, qui contient un très grand nombre de noyaux, la désintégration d'un noyau pris isolément reste aléatoire, mais **l'évolution de l'ensemble est prévisible** : on peut la décrire par une loi de décroissance.

(c) On lit sur la courbe l'abscisse du point d'ordonnée $N_0/2$, c'est-à-dire la moitié du nombre total de dés de départ : on obtient environ **4 tours**. Le modèle le confirme : à chaque tour, un dé sur six disparaît en moyenne, donc le nombre de dés restants est multiplié par $\frac{5}{6}$. Au bout de 3 tours il reste $\left(\frac{5}{6}\right)^3 \approx 58\%$ des dés, au bout de 4 tours $\left(\frac{5}{6}\right)^4 \approx 48\%$: la moitié est atteinte entre 3 et 4 tours, soit environ **4 tours**.

3. À l'aide du Document 2, déterminez la durée au bout de laquelle il ne reste que la **moitié** des noyaux initiaux. Expliquez la méthode utilisée. Reprenez ensuite la même méthode en partant de la durée trouvée : que constatez-vous?

✓ Correction

Méthode : on trace l'horizontale d'ordonnée $N_0/2 = 4,0 \times 10^{20}$ noyaux, puis on lit l'abscisse de son point d'intersection avec la courbe : on trouve $t_{1/2} \approx 1600$ ans.

En repartant de cette date, on recommence avec la moitié des noyaux *restants*, soit $N = 2,0 \times 10^{20}$ noyaux : la courbe est coupée à $t \approx 3200$ ans, soit de nouveau 1600 ans plus tard.

La durée nécessaire pour désintégrer la moitié des noyaux présents est donc toujours la même, quel que soit le nombre de noyaux de départ : c'est la **demi-vie** du radium 226, une grandeur **caractéristique** de ce noyau.

Σ ♥ Formule à connaître

Nombre de noyaux restants après n demi-vies écoulées :

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

N_0 : nombre de noyaux initialement présents ; N : nombre de noyaux restants ; $t_{1/2}$: demi-vie du noyau considéré.

Les valeurs $N_0, \frac{N_0}{2}, \frac{N_0}{4}, \dots$ forment une **suite géométrique** de raison $\frac{1}{2}$.

Activité 3 — Becquerel, Curie et la radioactivité

4. Calculer le nombre de noyaux de radium 226 restants au bout de 6400 **ans**. Vérifier le résultat sur le graphique du Document 2.

✓ Correction

6400 ans correspondent à $n = \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{6400}{1600} = 4$ demi-vies, d'où :

$$N = \frac{N_0}{2^n} = \frac{8,0 \times 10^{20}}{2^4} = \frac{8,0 \times 10^{20}}{16} = 5,0 \times 10^{19} \text{ noyaux}$$

Sur le graphique du Document 2, à $t = 6400$ ans, la courbe passe bien à $N \approx 0,5 \times 10^{20} = 5 \times 10^{19}$ noyaux : le résultat est cohérent.

5. Le radon 222 a une demi-vie de 3,8 jours.

(a) Un échantillon de radon est enfermé dans un récipient **scellé, isolé de toute source** qui en produirait. Au bout de combien de jours le nombre de noyaux de radon aura-t-il été **divisé par 16** ?

(b) Dans un logement, la situation est différente : le sol libère du radon **en permanence**, si bien que le nombre de noyaux présents dans l'air **ne peut pas** décroître comme en (a). Expliquez alors, à l'aide du Document 4, **par quel mécanisme** l'aération réduit la quantité de radon dans l'air d'une pièce.

✓ Correction

(a) $16 = 2^4$: le nombre de noyaux de radon doit donc être divisé par 2^4 , ce qui correspond à $n = 4$ demi-vies. Soit une durée :

$$t = n \times t_{1/2} = 4 \times 3,8 \text{ jours} = 15,2 \text{ jours} \approx 15 \text{ jours}$$

(b) Dans un logement, le sol apporte du radon en continu : la quantité présente résulte d'un équilibre entre cet apport et la désintégration, elle ne diminue donc pas comme dans un récipient scellé. L'aération **renouvelle l'air** : elle évacue vers l'extérieur l'air intérieur chargé en radon et le remplace par de l'air neuf, où le radon est très dilué. La quantité de radon diminue par **renouvellement et dilution de l'air**, et non par désintégration.

♥ À retenir

À retenir :

- Certains noyaux sont **instables** : ils se désintègrent spontanément, c'est la **radioactivité**.
- L'instant de désintégration d'un noyau *individuel* est **aléatoire** et imprévisible. Pour un grand nombre de noyaux, l'évolution d'ensemble devient régulière et prévisible.
- La **demi-vie** $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux d'un échantillon se sont désintégrés. Elle est **caractéristique** du noyau radioactif et se détermine graphiquement.
- Après n demi-vies, il reste $N = \frac{N_0}{2^n}$ noyaux, avec $n = \frac{t}{t_{1/2}}$: le nombre de noyaux est divisé par 2 à chaque demi-vie.

Pour aller plus loin — Ordres de grandeur et transfert à une supernova

Activité 3 — Becquerel, Curie et la radioactivité

6. Les carnets de laboratoire de Marie Curie, écrits il y a environ 120 ans, sont aujourd'hui encore conservés dans des boîtes plombées à la Bibliothèque nationale de France, et leur consultation nécessite une autorisation particulière. Justifiez cette précaution en comparant 120 ans à la demi-vie du radium 226.

✓ Correction

La demi-vie du radium 226 vaut 1600 ans, alors que les carnets n'ont que 120 ans : cette durée ne représente que $\frac{120}{1600} = 0,075$ demi-vie. Presque aucun noyau ne s'est donc désintégré : il reste environ 95 % du radium 226 initialement présent, qui continue d'émettre un rayonnement. Les carnets sont encore nettement radioactifs, d'où leur conservation dans des boîtes plombées (le plomb absorbe une partie du rayonnement) et la limitation du temps d'exposition des personnes qui les consultent.

Document 5 — La lumière de la supernova SN 1987A et le cobalt 56

En février 1987, une étoile a explosé dans le Grand Nuage de Magellan : c'est la supernova **SN 1987A** (voir l'activité 1). La désintégration du **cobalt 56**, noté $^{56}_{27}\text{Co}$ et formé lors de l'explosion, alimente ensuite la luminosité résiduelle de l'étoile.

La courbe ci-contre modélise la décroissance du nombre de noyaux de cobalt 56 restants.

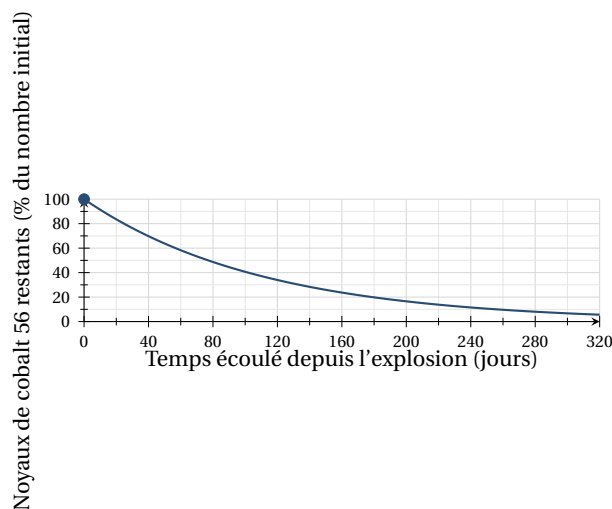


FIGURE 4 – Modèle : décroissance du nombre de noyaux de cobalt 56 formés lors de l'explosion (d'après la luminosité observée de SN 1987A, qui a décliné en suivant cette loi entre 4 et 16 mois).

7. En 1987, la luminosité de la supernova SN 1987A (activité 1) a décliné régulièrement : cette décroissance est due à la désintégration du **cobalt 56** formé lors de l'explosion. Déterminez graphiquement la demi-vie du cobalt 56 à l'aide du Document 5. Comparez-la aux demi-vies du radon 222 et du radium 226 : que confirme cette comparaison ?

✓ Correction

On lit l'abscisse du point de la courbe d'ordonnée 50 % du nombre initial de noyaux : on trouve $t_{1/2} \approx 77$ jours (environ 2,5 mois).

Comparaison : radon 222 $t_{1/2} = 3,8$ jours ; cobalt 56 $t_{1/2} \approx 77$ jours ; radium 226 $t_{1/2} = 1600$ ans $\approx 5,8 \times 10^5$ jours. Ces trois demi-vies sont très différentes : la comparaison confirme que la **demi-vie est une grandeur caractéristique de chaque noyau radioactif**. Une demi-vie aussi courte que celle du cobalt 56 explique en outre que la luminosité de SN 1987A, alimentée par sa désintégration, ait diminué en quelques mois seulement.