

Le radon piégé par un aspirateur

Analyse théorique d'une courbe de décroissance radioactive

Terminale — spécialité physique-chimie · mesures avec le Microcosmos

L'expérience

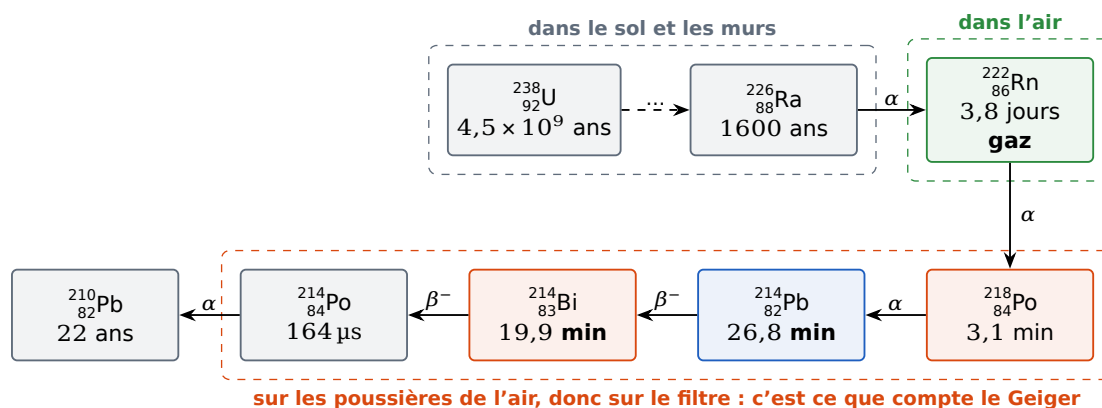
Un filtre à café est fixé sur le tube d'un aspirateur, qui fonctionne pendant **40 minutes** dans une chambre mansardée. Le filtre est ensuite posé contre le tube Geiger du **Microcosmos**, qui compte les impulsions par tranches de 10 s pendant environ 2 h. Le bruit de fond (mesuré sans filtre) vaut 4,2 impulsions en 10 s. Les mesures sont regroupées en classes de 300 s (5 min) pour limiter les fluctuations.

1. D'où vient le radon ?

L'**uranium 238** est présent en petite quantité dans toutes les roches (surtout le granite) et dans les matériaux de construction qui en sont issus : pierre, brique, béton, plâtre. Il se désintègre très lentement ($T_{1/2} = 4,5$ milliards d'années) en une longue suite de noyaux radioactifs, la **famille de l'uranium 238**. L'un d'eux, le **radium 226**, donne naissance au **radon 222**.

Le radon a une particularité : c'est un **gaz noble**. Il ne forme pas de liaison chimique, il s'échappe des grains de roche et diffuse à travers le sol et les murs jusqu'à l'air des pièces, où il s'accumule si l'on aère peu. Sa demi-vie (3,8 jours) lui laisse le temps de voyager.

Dans l'air, le radon se désintègre à son tour. Ses descendants (polonium, plomb, bismuth) sont des **métaux** : à peine formés, ils se fixent sur les fines poussières de l'air (aérosols). Le filtre de l'aspirateur, qui a vu passer plusieurs dizaines de mètres cubes d'air, retient ces poussières... et donc les descendants du radon. Le radon lui-même, qui est un gaz, **traverse le filtre** : on ne le recueille pas, on recueille ses « enfants ».



Radon et santé

Respirer les descendants du radon irradie les poumons : le radon est, après le tabac, la **deuxième cause de cancer du poumon** en France. Le niveau de référence est de 300 Bq m^{-3} dans les bâtiments. Les concentrations sont plus élevées dans les régions granitiques, dans les sous-sols et les pièces peu aérées. **Aérer quelques minutes chaque jour** suffit à les réduire fortement. Le filtre de l'expérience, lui, ne présente aucun danger : son activité est très faible et disparaît en quelques heures.

2. Ce que compte le tube Geiger

- Le **polonium 218** ($T_{1/2} = 3,1 \text{ min}$) a presque entièrement disparu après $5 T_{1/2} \approx 15 \text{ min}$: il s'est transformé en plomb 214.
- Les particules α du polonium sont très peu pénétrantes : elles sont en grande partie arrêtées par le papier, l'air et la paroi du tube.
- Le compteur détecte donc surtout les **électrons β⁻ du plomb 214 et du bismuth 214**. Ceux du bismuth 214, très énergétiques (jusqu'à 3,3 MeV), sont mieux détectés que ceux du plomb 214 (jusqu'à 1 MeV).
- Le polonium 214 se désintègre en 164 µs, aussitôt formé ; le plomb 210 ($T_{1/2} = 22 \text{ ans}$) a une activité si faible qu'il ne compte plus.

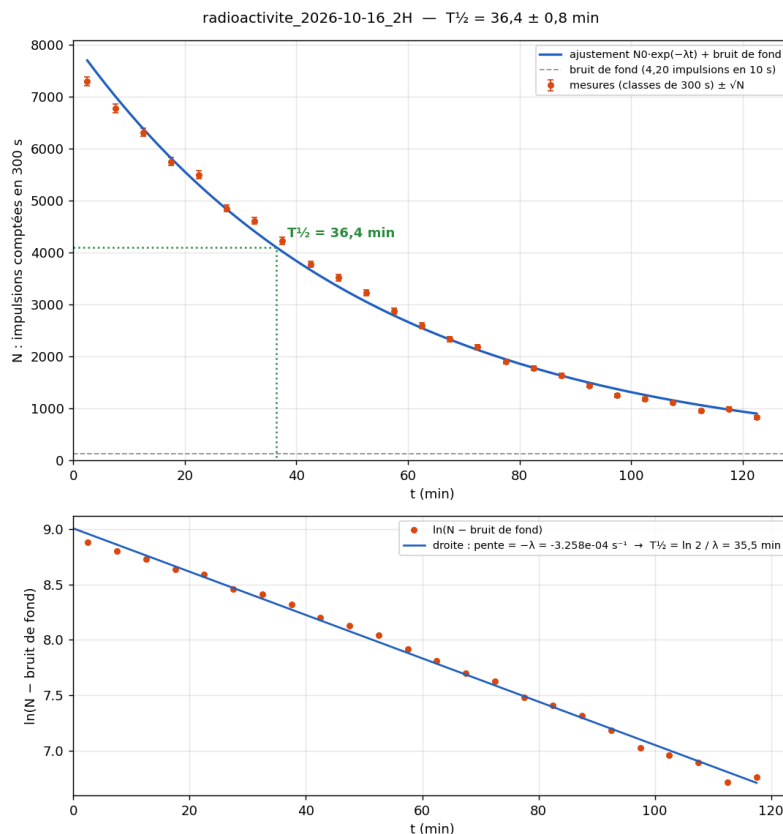
3. Rappel : la décroissance d'une seule espèce de noyaux

Pour une seule espèce de noyaux radioactifs, le nombre de noyaux N et l'activité $A = \lambda N$ décroissent de façon exponentielle :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \Leftrightarrow \quad \ln N(t) = \ln N_0 - \lambda t \quad \text{avec} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Le graphe de $\ln N$ en fonction de t est alors une **droite** de pente $-\lambda$. Si la courbe mesurée était celle du plomb 214 seul, on trouverait $T_{1/2} = 26,8$ min.

4. La courbe mesurée



L'ajustement par une seule exponentielle donne $T_{1/2} = 36,4 \pm 0,8$ min. Mais en regardant bien :

- les points sont **sous** la courbe ajustée au début, **au-dessus** entre 30 et 60 min, puis de nouveau **sous** la courbe à la fin : les écarts ne sont pas dus au hasard ;
- dans le graphe du bas, $\ln(N - \text{bruit de fond})$ n'est **pas une droite** mais une courbe légèrement bombée : la pente augmente au cours du temps. Entre 0 et 30 min, elle correspond à une demi-vie d'environ 41 min ; entre 60 et 120 min, à environ 35 min.

La décroissance est donc **freinée au début**, puis **accélère**. Une seule exponentielle ne suffit pas à la décrire.

5. Explication : la filiation radioactive

Le filtre contient au départ **à la fois** du plomb 214 et du bismuth 214. Or le bismuth 214 n'est pas seulement détruit par ses propres désintégrations : il est aussi **fabriqué** en permanence par la désintégration du plomb 214. Pendant une petite durée dt , le bilan des noyaux de bismuth 214 s'écrit :

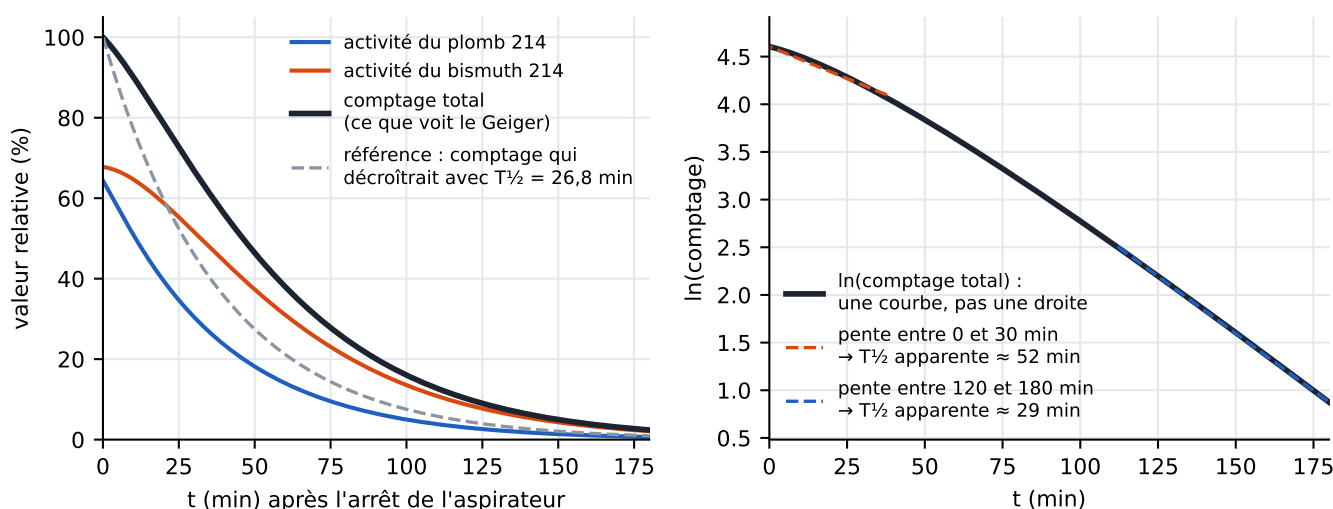
$$\frac{dN_{\text{Bi}}}{dt} = \underbrace{\lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}}}_{\text{formés à partir du plomb 214}} - \underbrace{\lambda_{\text{Bi}} N_{\text{Bi}}}_{\text{désintégrés}} \quad \text{alors que} \quad \frac{dN_{\text{Pb}}}{dt} = -\lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}}.$$

Une image : deux bassins en cascade

Le plomb 214 est un bassin qui se vide dans un second bassin, le bismuth 214, qui se vide lui-même. Au début, le second bassin est rempli par le premier presque aussi vite qu'il se vide : son niveau baisse lentement. Quand le premier bassin s'est assez vidé, le second ne fait plus que suivre la vidange du premier.

On en déduit deux régimes, que montre le modèle ci-dessous (collecte de 40 min, puis mesure ; calcul fait avec les demi-vies réelles) :

- **au début**, le bismuth 214 est réalimenté par le plomb 214 : son activité baisse peu, voire augmente ; le comptage total décroît plus lentement que chacun des deux noyaux pris seul ;
- **au bout de quelques heures**, le bismuth 214 (le plus « rapide ») ne fait plus que suivre le plomb 214 : les deux activités deviennent proportionnelles et décroissent ensemble avec la demi-vie du **plomb 214**, 26,8 min. On parle d'**équilibre de filiation**. Comme les deux demi-vies sont proches, cet équilibre s'installe lentement (voir « Pour aller plus loin »).



Le modèle prévoit une demi-vie apparente d'environ 50 min sur les 30 premières minutes, puis de plus en plus courte : 31 min entre 1 h et 2 h, 29 min entre 2 h et 3 h, et tendant vers 26,8 min. C'est exactement le comportement mesuré (41 min puis 35 min). Les valeurs ne coïncident pas parfaitement : elles dépendent des proportions de plomb et de bismuth recueillies sur le filtre, et de la façon dont le compteur détecte chacun d'eux. Une petite part des descendants du **thoron** (radon 220, issu du thorium des murs), de demi-vie bien plus longue (plomb 212 : 10,6 h), peut aussi ralentir la fin de la courbe.

À retenir

Une demi-vie mesurée sur un mélange de noyaux « parents » et « enfants » est une **demi-vie apparente** : elle dépend de l'instant où on la mesure. Ici, elle passe d'environ 40-50 min à 27 min. Le « ± 0,8 min » de l'ajustement ne mesure que le hasard des comptages, pas l'erreur due à un modèle trop simple.

6. Exploitation

1. Écrire les équations des désintégrations du radon 222 en polonium 218, puis du plomb 214 en bismuth 214, en précisant les lois de conservation utilisées.
2. Pourquoi le radon lui-même ne se trouve-t-il pas sur le filtre ? Qu'y trouve-t-on ?
3. Au bout de combien de temps le polonium 218 recueilli a-t-il pratiquement disparu ? Justifier.
4. Avec le tableau des classes (fichier _classes.csv), tracer ln(N – bruit de fond) en fonction de t. Mesurer la pente entre 0 et 30 min, puis entre 60 et 120 min. En déduire les deux demi-vies apparentes.
5. Expliquer pourquoi la demi-vie apparente diminue au cours du temps. Vers quelle valeur doit-elle tendre ? Comment le vérifier expérimentalement ?
6. Le plomb 210 a une demi-vie de 22,2 ans. Pour un même nombre de noyaux, calculer le rapport

entre l'activité du plomb 214 et celle du plomb 210. Expliquer pourquoi le filtre ne « compte » presque plus au bout de quelques heures.

7. Pourquoi recommande-t-on d'aérer les logements, et en particulier les sous-sols ?

Pour aller plus loin (spécialité mathématiques)

En négligeant le polonium 218, et en notant $N_{\text{Pb}}(0)$ et $N_{\text{Bi}}(0)$ les nombres de noyaux sur le filtre à l'arrêt de l'aspirateur, les deux équations du § 5 ont pour solutions (équations de Bateman) :

$$N_{\text{Pb}}(t) = N_{\text{Pb}}(0) e^{-\lambda_{\text{Pb}} t}, \quad N_{\text{Bi}}(t) = N_{\text{Bi}}(0) e^{-\lambda_{\text{Bi}} t} + N_{\text{Pb}}(0) \frac{\lambda_{\text{Pb}}}{\lambda_{\text{Bi}} - \lambda_{\text{Pb}}} (e^{-\lambda_{\text{Pb}} t} - e^{-\lambda_{\text{Bi}} t}).$$

8. Vérifier que $N_{\text{Bi}}(t)$ est bien solution de l'équation $\frac{dN_{\text{Bi}}}{dt} = \lambda_{\text{Pb}} N_{\text{Pb}} - \lambda_{\text{Bi}} N_{\text{Bi}}$.

9. Comme $\lambda_{\text{Bi}} > \lambda_{\text{Pb}}$, le terme $e^{-\lambda_{\text{Bi}} t}$ devient négligeable devant $e^{-\lambda_{\text{Pb}} t}$ aux temps longs. Montrer qu'alors $\frac{A_{\text{Bi}}}{A_{\text{Pb}}} \rightarrow \frac{\lambda_{\text{Bi}}}{\lambda_{\text{Bi}} - \lambda_{\text{Pb}}} = \frac{T_{\text{Pb}}}{T_{\text{Pb}} - T_{\text{Bi}}}$, et calculer ce rapport (on trouve environ 3,9). Le comptage total décroît alors avec $T_{1/2} = 26,8$ min.

10. Le rapport $e^{-\lambda_{\text{Bi}} t} / e^{-\lambda_{\text{Pb}} t}$ est divisé par e toutes les $\tau = 1/(\lambda_{\text{Bi}} - \lambda_{\text{Pb}})$. Calculer τ (environ 1 h 50 min). Pourquoi faut-il mesurer plusieurs heures pour voir la demi-vie du plomb 214 seule ?

Mes résultats (question 4)

Tranche de temps	Pente de $\ln(N - \text{fond})$ (min^{-1})	λ (min^{-1})	$T_{1/2}$ apparente (min)
0 - 30 min			
30 - 60 min			
60 - 90 min			
90 - 120 min			

Conclusion :

Données : $T_{1/2}({}^{222}\text{Rn}) = 3,82$ j ; $T_{1/2}({}^{218}\text{Po}) = 3,05$ min ; $T_{1/2}({}^{214}\text{Pb}) = 26,8$ min ; $T_{1/2}({}^{214}\text{Bi}) = 19,9$ min ; $T_{1/2}({}^{214}\text{Po}) = 164$ μs ; $T_{1/2}({}^{210}\text{Pb}) = 22,2$ ans. Mesures : Microcosmos, lycée Charles de Gaulle, Caen, 16 octobre 2026.