DOSSIER 7

DATATION À L'AIDE DE NOYAUX RADIOACTIFS

David Soissons

Objectif	Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un événement.
Terminale spécialité - Sciences physiques et chimiques	**Constitution et transformations de la matière**
	Thème 3 • Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique. **Partie B** • Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation nucléaire.
Notions et contenus	Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs ; constante radioactive loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité. Radioactivité naturelle ; applications à la datation.
Compétences mobilisées	S'approprier APP — Analyser ANA — Réaliser REA — Valider VAL

POURQUOI MESURER LA RADIOACTIVITÉ ?

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables, c'est-à-dire qu'ils restent indéfiniment identiques à eux-mêmes. Les autres sont instables car ils possèdent trop de protons ou de neutrons ou trop des deux. Pour revenir vers un état stable, ils sont obligés de se transformer. Ils expulsent alors de l'énergie – provenant de la modification du noyau – sous forme de rayonnements : c'est le phénomène de la radioactivité.

Les recherches sur la radioactivité ont contribué à la connaissance de la matière, permis de reconstituer l'histoire de l'Univers et de la Terre et procuré des marqueurs, outils et instruments irremplaçables en biologie, médecine et géologie.

Pots à fard d'Égypte ancienne (Collection du Musée du Louvre, Paris). © LMC14/C. Moreau

•••

Les propriétés de la radioactivité et les nombreuses applications qui en ont découlé sont de plus en plus présentes dans notre vie quotidienne : la production d'électricité, les diagnostics médicaux, l'astronomie…
Les éléments radioactifs sont également d'excellents chronomètres : la décroissance radioactive et la mesure de l'activité fournissent ainsi des « horloges » destinées à dater des événements plus ou moins anciens.

C'est ce dernier point que nous allons étudier dans ce dossier.

POUR BIEN DÉMARRER !

Choisir la ou les bonnes réponses :

Questions	Réponse A	Réponse B	Réponse C
1. On donne la représentation symbolique du plomb : $^{208}_{82}Pb$ et $m_{nucléon} = 1{,}67\ 10^{-27}$ kg			
a) Son noyau contient :	82 électrons.	208 nucléons.	126 neutrons.
b) 10 g de plomb contiennent :	$2{,}89 \times 10^{22}$ atomes de plomb.	$7{,}30 \times 10^{22}$ atomes de plomb.	$6{,}00 \times 10^{27}$ atomes de plomb.
2. Une réaction nucléaire s'accompagne d'une conservation :	du nombre de nucléons A.	de la masse totale.	du nombre de protons Z.
3. La particule émise lors de la désintégration α est :	le positon $^{0}_{+1}e$.	l'électron $^{0}_{-1}e$.	l'atome d'hélium $^{4}_{2}He$.
4. L'iode $^{131}_{53}I$ se désintègre en émettant un électron.			
a) Il s'agit d'une désintégration :	β^-	β^+	α
b) Son noyau fils est :	le xénon $^{131}_{54}I$.	le tellure $^{131}_{52}Te$.	l'antimoine $^{127}_{51}Sb$.

Partie A : Décroissance radioactive et activité

La datation est principalement fondée sur la décroissance radioactive d'isotopes instables de certains éléments chimiques.

Le choix d'un isotope dépend de l'échantillon à analyser et de son âge présumé. En effet, la vitesse de désintégration, qui est indépendante de l'environnement, n'est pas la même pour la soixantaine d'isotopes radioactifs connus.

Quelles caractéristiques permettent de choisir un élément radioactif comme marqueur de temps ?

Document 1 : La décroissance radioactive : une loi fondamentale

La loi de décroissance radioactive est une loi fondamentale de la radioactivité. Quand un noyau émet une particule alpha ou un électron bêta, il se transforme : c'est ainsi que du radium devient du radon, du tritium de l'hélium ! De ce fait, le nombre d'atomes de l'espèce radioactive diminue inexorablement.

La population des radioéléments décroît selon une loi appelée exponentielle. La période radioactive, qui mesure la rapidité de la décroissance, est une caractéristique du noyau. Elle peut varier de quelques secondes à plusieurs milliards d'années.

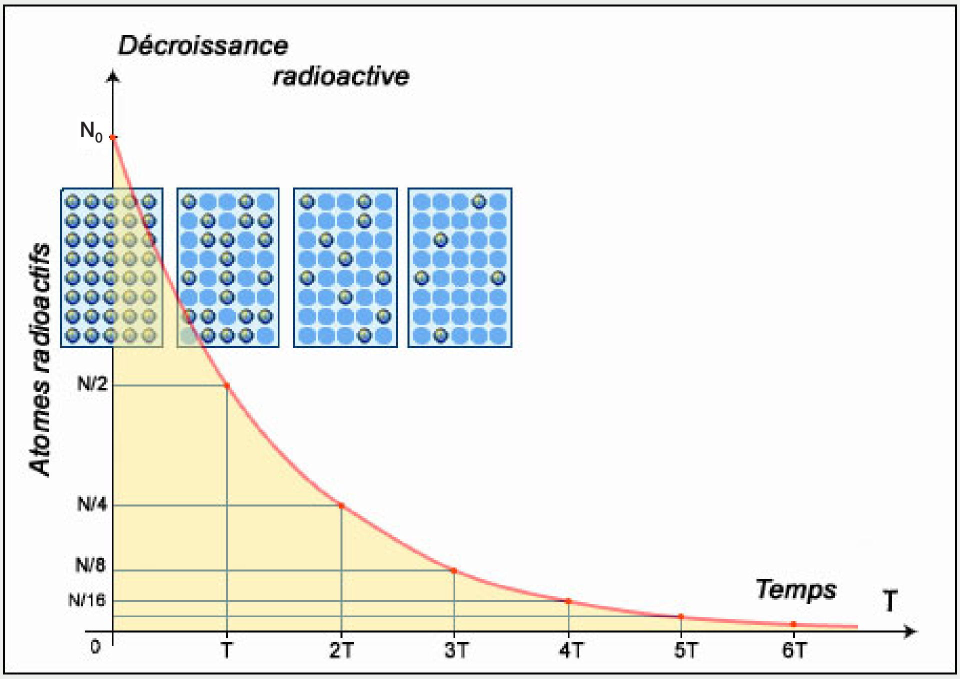


Figure 1 : Courbe de décroissance radioactive

D'après « La radioactivité : Périodes et activités : la décroissance radioactive, une loi fondamentale »
www.laradioactivite.com/site/pages/PeriodeActivite.htm

Document 2 : Données et définition

Pour un échantillon d'éléments radioactifs on note N_0 le nombre d'éléments présents à la date t = 0 s.

À l'instant t, le nombre d'éléments radioactifs encore présents est noté N(t).

Un élément radioactif donné est caractérisé par sa constante radioactive λ. Elle représente la probabilité de désintégrations par seconde de cet élément radioactif. Elle est indépendante du temps, c'est-à-dire de « l'âge » de l'échantillon.

1 APP **Proposer à partir du Document 1 une définition de la demi-vie notée $t_{1/2}$ d'une population d'éléments radioactifs.**

....
....
....
....

2 ANA/RAI **Donner l'expression de l'équation différentielle vérifiée par N(t) en fonction de la constante radioactive λ.**

....
....

3 ANA/REA **En déduire l'expression de la solution N(t) puis l'exprimer en fonction de N_0 et de λ.**

....
....

4 VAL **Justifier l'allure de la courbe de la désintégration radioactive d'un élément radioactif.**

....
....
....

5 ANA/RAI/REA **Établir l'expression de la constante radioactive λ d'un élément radioactif en fonction de sa demi-vie $t_{1/2}$ en précisant son unité.**

....
....
....

Document 3 : Activité d'un échantillon d'éléments radioactifs

L'activité d'un échantillon d'éléments radioactifs représente le nombre de désintégrations par seconde. Elle se note A et s'exprime en becquerels (Bq).

On mesure l'activité initiale de 1,0 g de différents éléments radioactifs :

Uranium-238 : $A_{0,^{238}U} = 1{,}23 \times 10^{4}$ Bq ; Uranium-235 : $A_{0,^{235}U} = 7{,}91 \times 10^{4}$ Bq ;
Césium-137 : $A_{0,^{137}Cs} = 3{,}21 \times 10^{12}$ Bq ; Iode-131 : $A_{0,^{131}I} = 4{,}61 \times 10^{15}$ Bq ;
Fluor-18 : $A_{0,^{18}F} = 3{,}51 \times 10^{18}$ Bq

6 ANA/RAI Exprimer l'activité A(t) d'un échantillon en fonction du nombre d'éléments radioactifs N(t) de l'échantillon.

....

7 ANA/RAI Établir, en justifiant, l'expression temporelle de l'évolution de l'activité A(t) d'un échantillon d'éléments radioactifs en fonction de la constante radioactive λ et de l'activité initiale A_0.

....

....

8 RAI Exprimer l'activité initiale A_0 d'un échantillon de masse *m* d'éléments radioactifs en fonction de la constante radioactive λ, du nombre de masse *A* de l'élément radioactif, de la masse *m* et du nombre d'Avogadro N_A.

....

....

9 REA Calculer les valeurs des demi-vies des éléments radioactifs évoqués dans le Document 3 en utilisant une unité de temps adaptée.

....

....

....

....

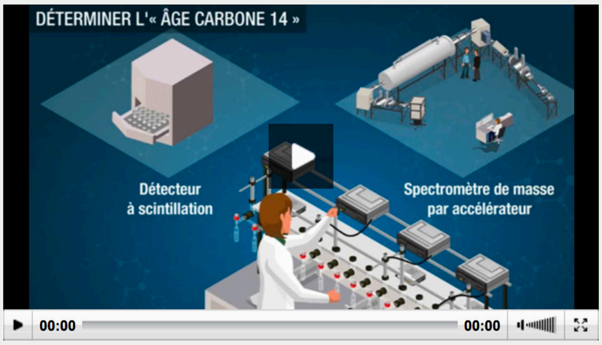
....

....

Partie B : La datation à l'aide de noyaux radioactifs

Document 4 : Carbone 14 : maître du temps

Certains éléments radioactifs naturels sont de véritables chronomètres pour remonter le temps. En se basant sur la loi de décroissance radioactive de l'élément carbone 14, les chercheurs ont mis au point des méthodes de datation. Ils peuvent ainsi remonter sur une période de 300 à 50 000 ans.



Regarder la vidéo de l'article :
La datation par le carbone 14 (4'21")

D'après Mediachimie
www.mediachimie.org/ressource/la-datation-par-le-carbone-14

10 ANA/RAI/COM Justifier pourquoi la datation au carbone 14 ne peut être réalisée que sur des objets « morts » puis décrire en quelques lignes le principe de la datation au carbone 14.

11 APP Relever après avoir visionné la vidéo du Document 4 la valeur de la demi-vie $t_{1/2}$ du carbone 14.

12 ANA/RAI Exprimer l'activité d'un échantillon au bout d'une durée $\Delta t = n \times t_{1/2}$ (n entier) notée $A(nt_{1/2})$ en fonction de l'activité initiale A_0 et de $t_{1/2}$.

13 ANA/RAI/REA Calculer au bout de combien de fois la demi-vie d'un échantillon est considérée inactive sachant que dans ce cas son activité vaut 1 millième de l'activité initiale.

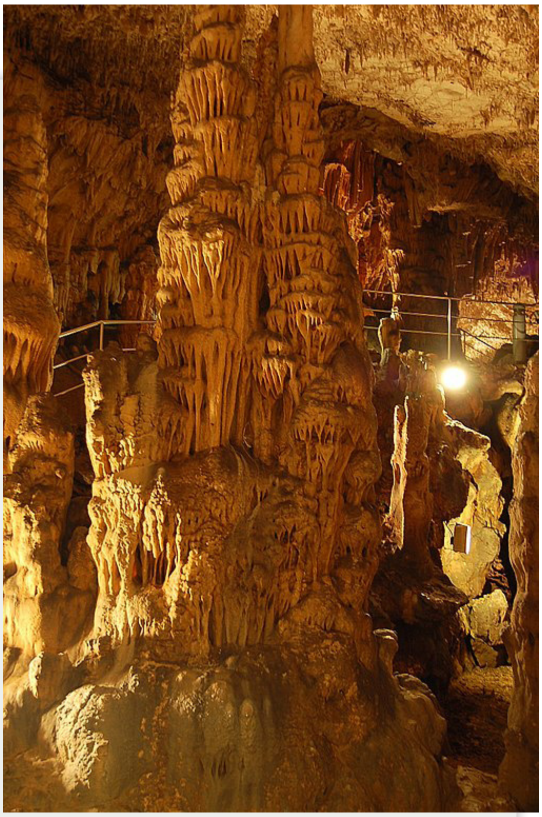
14 RAI/VAL Justifier alors la phrase en gras du Document 5.

Document 5 : Autres éléments pour dater

Le carbone 14 n'est pas le seul isotope radioactif utilisé pour dater et étudier l'évolution du climat et de l'environnement.

Pour dater les spéléothèmes, appelés plus couramment concrétions, les scientifiques se basent sur la datation $^{234}U/^{230}Th$ qui repose sur la différence de solubilité entre l'uranium soluble et le thorium très peu soluble dans les eaux naturelles. En théorie, au moment de sa précipitation, la calcite (ou l'aragonite) formant les spéléothèmes ne contient pas de ^{230}Th. Celle-ci s'accumule au cours du temps par désintégration de ^{234}U. L'inverse du rapport de ces deux éléments est donc proportionnel à l'âge de la concrétion.

La mesure des isotopes du plomb 210 leur sert à dater des sédiments récents (220 ans).



Colonne d'accrétion stalagmitique dans la grotte Biserujka, île de Krk, Croatie. © Wolfgang Glock/Wikipédia

D'après « Les savanturiers - Le carbone 14, maître du temps »
www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/les-savanturiers/CEA_SAVANTURIERS_N18_web.pdf

Donnée : $t_{1/2,^{234}U}$ = 245 500 années

15 ANA/RAI Écrire la réaction de désintégration de l'uranium ^{234}U en thorium ^{230}Th. On donne Z(U) = 92.

....

....

16 RAI/REA Déterminer l'âge maximal pouvant être daté par l'uranium ^{234}U.

....

....

....

17 RAI/REA Déterminer la demi-vie du plomb 210.

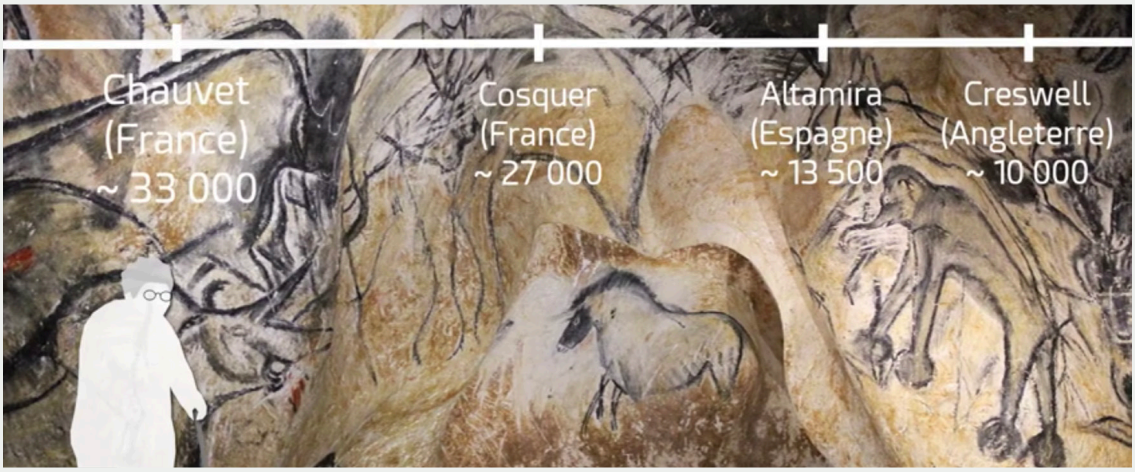
....

....

Document 6 : La grotte Chauvet : une vielle dame

Les objets, les peintures, les ossements… retrouvés dans les grottes permettent de déterminer leur âge. Aujourd'hui, la grotte Chauvet en Ardèche est la plus ancienne grotte ornementale découverte.

On a mesuré pour un échantillon de 40 g de charbon de bois retrouvé près d'un foyer de feu une activité A de $2{,}1 \times 10^{-1}$ Bq.



D'après Médiachimie – La grotte Chauvet et le carbone 14
www.mediachimie.org/ressource/la-grotte-chauvet-et-le-carbone-14

Document 7 : Programme python « décroissance radioactive du Carbone-14 »

```python
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
plt.grid(True)
t=np.linspace(0,50000,100000)
r = .........................................
plt.plot(t,r)
plt.ylim([0,0.000000000001])

# Légende des axes et du graphique
plt.title('Titre:x')
plt.xlabel('Nom de la variable x (unité)')
plt.ylabel('Nom de la variable y')

plt.show()
```

<u>Données :</u> Pourcentage des isotopes du carbone dans un échantillon :
$P(^{12}C) = 98,93\ \%$; $P(^{13}C) = 1,07\ \%$; $P(^{14}C) = 1,0 \times 10^{-12}\ \%$.

18 REA Montrer que le rapport r(t) défini par $r = \frac{N_{14}(t)}{N_{12}}$ est égal à $1,0 \times 10^{-12} \times e^{-\frac{0,693 x t}{5730}}$.

....
....
....
....

19 REA Compléter les lignes 5, 10, 11 et 12 du programme Python afin de tracer la courbe r(t) = f(t).

....
....
....
....

20 REA Exécuter le programme puis imprimer la courbe.

21 ANA/RAI/REA Calculer le nombre d'élément ^{14}C, noté N_{14}, au moment de la mesure de l'activité de l'échantillon.

....
....
....

22 APP/REA Calculer le nombre d'élément ^{12}C, noté N_{12} dans l'échantillon.

....
....

23 REA/ANA/RAI En déduire graphiquement l'âge de l'échantillon puis le vérifier par le calcul.

....
....
....
....
....
....
....

24 VAL Comparer à l'âge estimé de la grotte Chauvet.

....
....

Corrigés Dossier 7

POUR BIEN DÉMARRER !

1a) B et C ; 1b) A ; 2. A et C ; 3. C ; 4 a) : A ; 4 b) : A.

Partie A : Décroissance radioactive et activité

1. Cette population est divisée par deux, chaque fois qu'un laps de temps caractéristique de l'espèce radioactive, appelé période ou encore demi-vie s'écoule. La demi-vie est donc la durée au bout de laquelle la moitié des éléments radioactifs présents initialement se sont désintégrés.

2. λ représente la probabilité de désintégrations par seconde donc $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \times N(t)$

3. Cette équation a pour solution $N(t) = K \times e^{-\lambda \times t}$

Or à t = 0 on a $N(0) = N_0 = K \times e^0$

Alors $N(t) = N_0 \times e^{-\lambda \times t}$.

4. La relation en 3 est une fonction exponentielle décroissante qui correspond bien à la courbe de la désintégration radioactive.

5. À $t = t_{1/2}$ on a : $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$

donc $\frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\lambda \times t_{1/2}} \Leftrightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda \times t_{1/2}}$

$\Leftrightarrow \ln(\frac{1}{2}) = \ln e^{-\lambda \times t_{1/2}} = -\lambda \times t_{1/2} \Leftrightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ en s^{-1}.

6. $A(t) = \lambda \times N(t)$

7. D'après question 6 on a : $A(t) = \lambda \times N_0 \times e^{-\lambda \times t}$

or $A_0 = \lambda \times N_0$ donc $A(t) = A_0 \times e^{-\lambda \times t}$.

8. $A_0 = \lambda \times N_0$ or $N_0 = \frac{N_A \times m}{A}$ d'où $A_0 = \frac{\lambda \times N_A \times m}{A}$.

9.

On a $A_0 = \frac{\lambda \times N_A \times m}{A}$ et $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ d'où $t_{1/2} = \frac{\ln 2 \times N_A \times m}{A_0 \, x \, A}$

Pour l'élément Uranium -238 on a $t_{1/2,{}^{238}U} = \frac{\ln 2 \, x \, 6{,}02 \, x \, 10^{23} \times 1{,}0}{1{,}23 \, x \, 10^4 \, x \, 238} = 1{,}4 \times 10^{17}$ s

soit $t_{1/2,{}^{238}U} = \frac{1{,}4 \, x \, 10^{17}}{31{,}6 \, x \, 10^{6} (s \text{ dans un an})} = 4{,}5 \times 10^9$ ans soit 4,5 milliards d'années.

<u>De même on trouve</u> : $t_{1/2,{}^{235}U} =$ 710 millions d'années ; $t_{1/2,{}^{137}Cs} =$ 30 ans ;

$t_{1/2,{}^{131}I} =$ 8 jours : $t_{1/2,{}^{18}F} =$ 110 minutes.

Partie B : La datation à l'aide de noyaux radioactifs

10. Les organismes vivants assimilent tout au long de leur vie du CO_2 par respiration, alimentation...
Ils contiennent alors les proportions ^{14}C / ^{12}C et ^{14}C / ^{13}C constantes.
Lorsqu'un organisme meurt, il n'assimile plus de carbone. La quantité de ^{12}C et ^{13}C reste stable tandis que celle de ^{14}C diminue. Les chercheurs calculent « l'âge carbone 14 » de leur échantillon à partir des rapports $^{14}C/^{12}C$ et $^{13}C/^{12}C$ mesurés, puis en déduisent son âge vrai grâce aux courbes de calibration.

11. $t_{1/2,{}^{14}C}$ = 5730 ans.

12. A(t) suit la même loi de décroissance exponentielle que N(t) alors $A(t_{1/2}) = \frac{A_0}{2}$; $A(2x \, t_{1/2}) = \frac{A_0}{4} = \frac{A_0}{2^2}$;

$A(3x \, t_{1/2}) = \frac{A_0}{8} = \frac{A_0}{2^3}$ soit $A(nx \, t_{1/2}) = \frac{A_0}{2^n}$

13. Il faut que $A(nx \, t_{1/2}) = \frac{A_0}{2^n} = \frac{A_0}{1000}$

soit $2^n = 1000 \Leftrightarrow \ln 2^n = \ln 1000 \Leftrightarrow n \ln 2 = \ln 1000$

Donc $n = \frac{\ln 1000}{\ln 2} \approx 10$.

14. Le carbone 14 sera inactif au bout de $\Delta t = 10 \times t_{1/2,{}^{14}C} = 10 \times 5730 = 57\,300$ ans.
D'où la phrase écrite en gras du **Document 5**.

15. ${}^{234}_{92}U \rightarrow {}^{230}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$

16. $\Delta t = 10 \times t_{1/2,{}^{234}U} = 10 \times 245\,500$ ans
$= 2\,455\,000$ ans soit environ 2,5 millions d'années.

17. $t_{1/2,{}^{210}Pb} = \Delta t_{Pb} / 10 = 220/10 = 22$ ans

18.

$r = \frac{N_{14}(t)}{N_{12}}$ or $N_{14}(t) = N_{14,0} \times e^{-\lambda \times t} = N_{14,0} \times e^{-\frac{ln2}{t_{1/2}} \times t} = N_{14,0} \times e^{-\frac{0{,}693}{t_{1/2}} \times t}$

Alors $r = \frac{N_{14,0} \times e^{-\frac{0{,}693}{t_{1/2}} \times t}}{N_{12}}$ avec $\frac{N_{14}(0)}{N_{12}} = \frac{P(^{14}C)}{P(^{14}C)} \approx 1{,}0 \times 10^{-12}$

Et $r = 1{,}0 \times 10^{-12} \times e^{-\frac{0{,}693 x t}{5730}}$

19.

```
r = 1.0*10**(-12)*np.exp(-(0.693*t)/5730)
```

```
plt.title('décroissance radioactive Carbone-14')
plt.xlabel('temps (an)')
plt.ylabel('r')
```

20. Pas de corrigé. Courbe à imprimer.

21. On a A = λ N_{14} soit $N_{14} = \frac{A}{\lambda} = \frac{t_{1/2}\ x\ A}{\ln 2}$
avec A = $2{,}1 \times 10^{-1}$ Bq
et $t_{1/2}$ = 5730 ans = 5730 x 31,6 x 10^6 s
D'où N_{14} = 5,49 x 10^{10} atomes de ^{14}C.

22. On a $N_{tot,C} \approx N_{12}$ = n x N_A = $\frac{N_A \times m}{A}$ = 2,0 x 10^{24}

23. On a r = $\frac{N_{14}}{N_{12}}$ = 2,7 x 10^{-14}.
- On lit graphiquement t = 30 x 10^3 ans = 30000 ans.
- Calcul : r = 1,0 x 10^{-12} x $e^{-\frac{0{,}693xt}{5730}}$
$\Leftrightarrow$ ln r = ln (1,0 x 10^{-12} x $e^{-\frac{0{,}693xt}{5730}}$)
$\Leftrightarrow$ ln r = ln (1,0 x 10^{-12}) + ln $e^{-\frac{0{,}693xt}{5730}}$
= ln (1,0 x 10^{-12}) - $\frac{0{,}693xt}{5730}$

Alors t = $\frac{5730}{0{,}693}$(ln (1,0 x 10^{-12}) -ln r)

soit t = $\frac{5730}{0{,}693}$(ln (1,0 x 10^{-12}) - ln (2,7 x 10^{-14})) = 29864 ans.
Les deux valeurs sont cohérentes.

24. L'âge du charbon de bois est bien cohérent par rapport à l'âge estimé de la grotte de 33000 ans.