

Niveau : Terminale

Discipline :

PHYSIQUE-CHIMIE

CÔTE D'IVOIRE – ÉCOLE NUMÉRIQUE



## THEME : REACTIONS NUCLEAIRES

### TITRE DE LA LEÇON : REACTIONS NUCLEAIRES SPONTANÉES

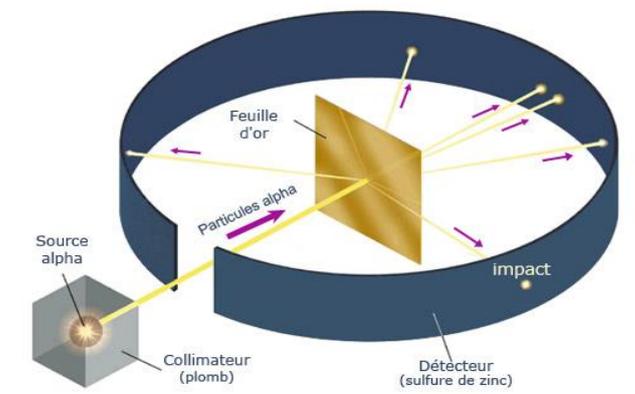
#### I. SITUATION D'APPRENTISSAGE

Au cours des SVT, les élèves de la Terminale D du Lycée Moderne de Dabou ont appris que les archéologues peuvent déterminer l'âge des vestiges qu'ils récupèrent. Pour ce faire, ils utilisent des connaissances en radioactivité. Émerveillés par cette information, les élèves décident, au cours de Physique-Chimie, sous la conduite de leur Professeur de définir l'activité d'un échantillon, de connaître la loi de décroissance radioactive, de déterminer la constante radioactive, la période, l'activité et l'âge d'un échantillon radioactif.

#### II. CONTENU DE LA LEÇON

##### 1 La structure de la matière

##### 1-1 Expérience de Rutherford



En bombardant une feuille mince d'or par des particules  $\alpha$  en 1909, Rutherford constate que :

- la grande majorité des particules  $\alpha$  traverse la feuille d'or sans déviation ;
- quelques unes sont déviées par une charge positive contenue dans l'atome.

Il conclut alors que :

- un atome est principalement vide : on dit qu'il a une structure lacunaire ;
- un atome est formé d'un noyau positif autour duquel gravitent très loin des électrons.

##### 1-2 Constitution du noyau d'un atome

Le noyau d'un atome est formé de particules appelées nucléons : les **protons** et les **neutrons**.

Caractéristiques des nucléons :

|              |                   |                   |
|--------------|-------------------|-------------------|
| Nucléon      | proton            | neutron           |
| Charge ( C ) | $1,602.10^{-19}$  | 0                 |
| Masse ( kg)  | $1,6726.10^{-27}$ | $1,6749.10^{-27}$ |

Le nombre de protons dans le noyau est son **numéro atomique** (ou nombre de charge) **Z**. Le nombre total de nucléons dans le noyau est son **nombre de masse A**. Son **nombre de neutron N** est donné par la relation :  $N = A - Z$

## 2- L'élément chimique

C'est l'ensemble des espèces chimiques ayant le même numéro atomique Z.

## 3- Le nucléide

Un nucléide est un type de noyaux caractérisés par son nombre de masse A et son numéro atomique Z.

on le note  ${}^A_ZX$

## 4- Les isotopes

Les isotopes sont des nucléides qui ont le même numéro atomique mais des nombres de masses différents. Exemples :  ${}^{12}_6C$ ,  ${}^{13}_6C$  et  ${}^{14}_6C$  sont isotopes.

## 5- Unité de masse atomique u.

En physique nucléaire, les masses s'expriment en unité de masse atomique **u**. L'unité de masse atomique **u** représente le douzième ( $\frac{1}{12}$ ) de la masse de l'isotope du carbone 12.  $1u = 1,66.10^{-27} \text{ kg}$  ;

$1u = 931 \text{ MeV}/c^2$ .

Ainsi la masse du proton  $m_p = 1,007276 u$  et la masse du neutron  $m_n = 1,008665 u$

## 6- Emissions radioactives

### 6-1 Définition

La radioactivité ou désintégration radioactive est la décomposition spontanée de certains noyaux instables naturels ou artificiels. Cette désintégration s'accompagne de l'émission de particules et d'un rayonnement électromagnétiques  $\gamma$ . Le noyau qui subit la désintégration est appelé « noyau père » et donne naissance à un nouveau noyau « le noyau fils ».

### 6-2 Les émissions radioactives.

Selon le type de radionucléide, on obtient des particules  $\alpha$ ,  $\beta^+$  ou  $\beta^-$ . Ainsi le nom de la radioactivité est lié à la nature des particules émises.

| Particule                 | Symbole           | Charge | Masse (u)     |
|---------------------------|-------------------|--------|---------------|
| $\alpha$ : noyau d'hélium | ${}^4_2\text{He}$ | + 2e   | 4             |
| $\beta^+$ : positon       | ${}^0_1e$         | + e    | $5,5.10^{-4}$ |
| $\beta^-$ : électron      | ${}^0_{-1}e$      | - e    | $5,5.10^{-4}$ |

Le rayonnement électromagnétique  $\gamma$  transporte de l'énergie et est caractérisé par une fréquence très élevée de l'ordre de  $10^{21}$  Hz. Il est de la même nature que la lumière ou les ondes radio.

### 6-3 Lois de conservation

La désintégration radioactive peut être représentée par l'équation-bilan suivante :

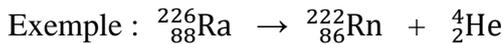


Elle vérifie les lois de conservation suivantes :

- Conservation du nombre de charge  $Z_1+Z_2=Z$
- Conservation du nombre de nucléons.  $A_1+A_2=A$ .

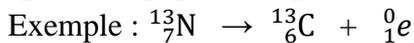
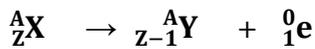
### 6-4 Radioactivité $\alpha$ .

C'est la désintégration d'un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  en un noyau  ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$  avec émission d'une particule  $\alpha$ . Elle s'observe pour les noyaux lourds instables ( $A > 200$  et  $Z > 82$ ). L'application des lois de conservation conduit à l'écriture de l'équation-bilan de la réaction :  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$

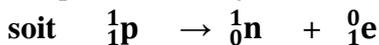


### 6-5 Radioactivité $\beta^+$

C'est la désintégration d'un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  en un noyau  ${}^A_{Z'}\text{Y}$  avec émission d'une particule  $\beta^+$ . Elle concerne les noyaux trop riches en protons par rapport à leur isotope stable. L'application des lois de conservation conduit à l'écriture de l'équation-bilan de la réaction entre :

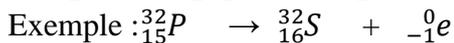


Remarque : le positron et le neutrino qui n'existe pas dans le noyau proviennent de la désintégration d'un des protons du noyau.

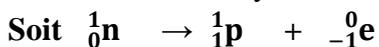


### 6-6- Radioactivité $\beta^-$

C'est la désintégration d'un noyau  ${}^A_Z\text{X}$  en un noyau  ${}^A_{Z'}\text{Y}$  avec émission d'une particule  $\beta^-$ . Elle concerne les noyaux trop riches en neutrons par rapport à leur isotope stable. L'application des lois de conservation conduit à l'écriture de l'équation-bilan de la réaction :



Remarque : l'électron et l'antineutrino qui n'existent pas dans le noyau proviennent de la désintégration d'un neutron du noyau.



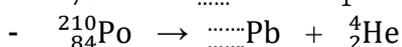
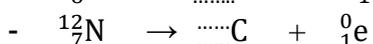
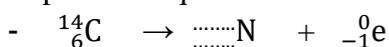
### Remarque :

La plupart des noyaux sont créés dans un état excité  $\text{Y}^*$ , à partir des radioactivités  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ . Mais cet état instable est de courte durée. La désexcitation s'accompagne de l'émission d'un rayonnement

électromagnétique  $\gamma$  suivant l'équation :  ${}^A_Z\text{Y}^* \rightarrow {}^A_Z\text{Y} + {}^0_0\gamma$

### Activité d'application

Complète les équations suivantes



## Solution

- ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$
- ${}^{12}_7\text{N} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^0_1\text{e}$
- ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$

## 7. La décroissance radioactive

### 7-1 Loi de décroissance radioactive

La désintégration d'un noyau radioactif est un phénomène aléatoire. A l'instant  $t$ , un échantillon de substance radioactive contient  $N_0$  noyaux. A l'instant  $t + dt$ , elle en contiendra  $N$  inférieur à  $N_0$ .

La variation de noyaux entre  $t$  et  $t+dt$  est proportionnelle à la durée de désintégration et au nombre de noyaux  $N$  présents dans l'échantillon à la date  $t$  :  $dN = -\lambda N dt$ .

$\lambda$  est la constante radioactive. Elle caractérise le nucléide et s'exprime en  $s^{-1}$ .

$$\int \frac{dN}{N} = - \int \lambda dt \rightarrow \ln N = - \lambda t \text{ d'où le résultat : } N = N_0 e^{-\lambda t}$$

### 7- 2 Période ou demi-vie d'un nucléide.

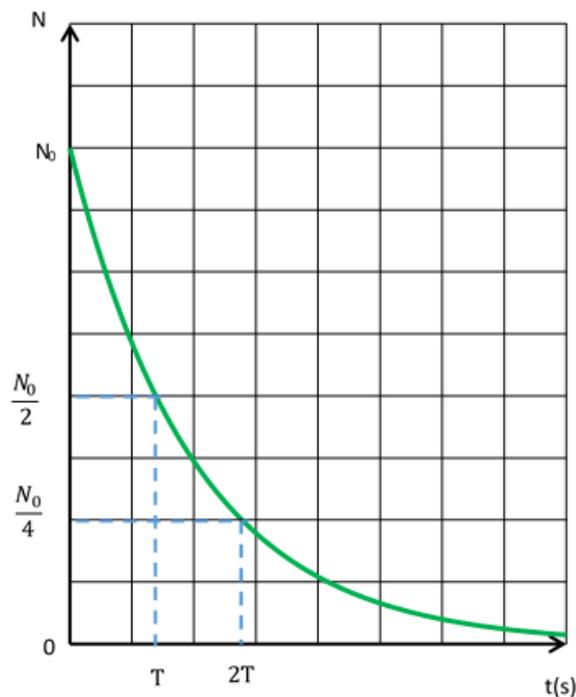
On appelle demi-vie  $T$  d'un nucléide le temps au bout duquel la moitié des noyaux radioactifs initialement présents a été désintégrée. C'est une caractéristique du nucléide. Elle ne dépend pas du nombre de noyaux que contient l'échantillon et vaut :

$$\text{En une période } T : N = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \rightarrow -\ln 2 = -\lambda T \rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} \leftrightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

Exemple :

| Noyaux | ${}^{235}_{92}\text{U}$ | ${}^{14}_6\text{C}$  | ${}^{30}_{16}\text{S}$ |
|--------|-------------------------|----------------------|------------------------|
| T      | $4,5 \cdot 10^9$ ans    | $5,7 \cdot 10^3$ ans | 3 min                  |

### 7-3 Courbe de décroissance radioactive



#### 7- 4. Activité d'une substance radioactive

L'activité d'une substance radioactive est le nombre de désintégrations par unité de temps. Elle s'exprime en becquerel (Bq) et se note  $A$  telle que :  $A = \lambda N$        $A = A_0 e^{-\lambda t}$

#### Activité d'application 2

La période du carbone 14 est 5590 années. Un échantillon de bois, trouvé dans une grotte préhistorique donne 212 désintégrations par minute. Un échantillon contenant la même masse de carbone et préparé à partir d'un jeune bois donne 1350 désintégrations par minute.

Détermine l'âge du bois ancien.

#### Solution

$$\text{On a : } A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{A}{A_0} \right) \text{ or } \lambda = \frac{\ln 2}{T} \text{ d'ou } t = \frac{T}{\ln 2} \ln \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

$$t = \frac{5590}{\ln 2} \ln \left( \frac{1350}{212} \right) = 14930 \text{ années}$$

#### SITUATION D'EVALUATION

Ton camarade de la classe de Terminale découvre dans une revue scientifique le principe de la datation au carbone 14. Dans la biosphère, la proportion des atomes de carbone 14 est d'un atome de  $^{14}\text{C}$  pour  $10^6$  atomes de  $^{12}\text{C}$ . A sa mort, un organisme cesse de consommer des composés carbonés et la concentration en  $^{14}\text{C}$  commence à décroître.

Le carbone 14 ( $^{14}_6\text{C}$ ), radioactif  $\beta^-$  a une période  $T = 5590$  ans.

Ton camarade décide de déterminer l'âge d'un objet d'art découvert dans des fouilles. Dans un prélèvement de 0,1 g de matières organiques sur l'objet d'art, il constate qu'il y a 10% en masse de carbone. Cet échantillon présente une activité  $A = 1180$  Bq (1180 désintégrations par seconde).

Données : Masse molaire de  $^{12}\text{C}$  :  $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$ , constante d'Avogadro :  $N_A = 6,22 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

Eprouvant des difficultés, ton camarade te sollicite afin de l'aider.

1-Ecris l'équation de désintégration du  $^{14}\text{C}$ .

2-Calculer :

2.1-la masse de carbone dans le prélèvement de 0,1g ;

2.2-la constante radioactive  $\lambda$ .

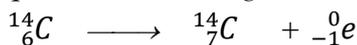
3-Déterminer :

3.1- l'activité initiale  $A_0$  de l'échantillon de carbone.

3.2-l'âge approximatif de l'objet d'art.

#### Solution

1- équation de désintégration de carbone 14 ( $^{14}_6\text{C}$ )



2-/2.1-masse  $m'$  de carbone dans le prélèvement de 0,1g.

$$m' = \frac{10 \cdot m}{100} \Rightarrow m' = \frac{10 \cdot 10^{-4}}{100} \text{ d'où } m' = 10^{-5} \text{ kg}$$

2.2- la constante radioactive  $\lambda$ .

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T} A. N. \lambda = \frac{\ln 2}{5590 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \lambda = 3,93 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

3-/ 3.1- l'activité initiale  $A_0$  de l'échantillon de carbone

$$A_0 = \lambda N_0 \text{ or } N_0 = n N_A = \frac{m N_A}{M}$$

$$A_0 = \lambda \frac{mNA}{M} \quad A.N : A_0 = \frac{3,93 \cdot 10^{-12}}{12} * 10^{-5} * 6,02 \cdot 10^{23} \quad A_0 = 1,97 \cdot 10^6 \text{Bq}$$

3.2- l'âge approximatif de l'objet d'art

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow t = -\frac{\ln \frac{A}{A_0}}{\lambda} \quad A.N : t = -\frac{\ln \frac{1180}{1,97 \cdot 10^6}}{3,93 \cdot 10^{-12}} \quad d'où \quad t = 1,9 \cdot 10^{12} \text{s}$$

#### IV. EXERCICES

##### Exercice 1

Complète les équations des réactions nucléaires suivantes :

| Emission $\alpha$  | Emission $\beta^+$  | Emission $\beta^-$  |
|--|---|---|
| ${}^{210}_{84}\text{Po} \longrightarrow \dots \text{Pb} + \dots$ | ${}^{12}_7\text{N} \longrightarrow \dots \text{C} + \dots$            | ${}^{14}_6\text{C} \longrightarrow \dots \text{B} + \dots$          |
| ${}^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow \dots \text{Th} + \dots$  | $\dots \text{Fe} \longrightarrow \dots {}^{53}_{25}\text{Mn} + \dots$ | $\dots \text{P} \longrightarrow \dots {}^{32}_{16}\text{S} + \dots$ |

Résolution

| Emission $\alpha$   | Emission $\beta^+$  | Emission $\beta^-$  |
|---|---|---|
| ${}^{210}_{84}\text{Po} \longrightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$ | ${}^{12}_7\text{N} \longrightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^0_{+1}\text{e}$         | ${}^{14}_6\text{C} \longrightarrow {}^{14}_7\text{B} + {}^0_{-1}\text{e}$       |
| ${}^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$  | ${}^{53}_{26}\text{Fe} \longrightarrow {}^{53}_{25}\text{Mn} + {}^0_{+1}\text{e}$ | ${}^{32}_{15}\text{P} \longrightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + {}^0_{-1}\text{e}$ |

##### Exercice 2

Un échantillon contient  $m = 1 \text{ mg}$  de césium  ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ . Le radionucléide a pour période  $T = 8,25 \cdot 10^8 \text{s}$ .

Calcule l'activité initiale de cet échantillon.

**Solution**

L'activité initiale est :

$$A_0 = \lambda N_0 \quad \text{or} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad \text{Donc} \quad A_0 = \frac{\ln 2}{T} \times \frac{m_{\text{échant}}}{A.u} \quad \text{car} \quad N_0 = \frac{m_{\text{échant}}}{A.u}$$

$$A.N : A_0 = 3,69 \cdot 10^9 \text{Bq}$$

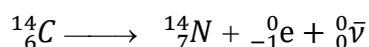
##### Exercice 3

Dans la haute atmosphère, sous l'effet du bombardement neutronique, l'azote  ${}^{14}_7\text{N}$  se transforme en carbone  ${}^{12}_6\text{C}$  radioactif. La désintégration du carbone 14 donne de l'azote 14.

Ecris les équations des réactions nucléaires produites.

**Solution**

Equations des différentes réactions nucléaires



#### Exercice 4

Dans une revue de physique nucléaire et atomique, Doué découvre l'extrait de tableau ci-dessous donnant l'évolution dans le temps du nombre de noyaux dans un échantillon de polonium 210 contenant à  $t = 0$  s,  $N$  noyaux

|                  |   |      |      |      |      |      |
|------------------|---|------|------|------|------|------|
| T(jours)         | 0 | 40   | 80   | 100  | 120  | 150  |
| N/N <sub>0</sub> | 1 | 0,82 | 0,67 | 0,61 | 0,55 | 0,47 |

Par ailleurs il a lu que le nucléide  $^{107}_{84}\text{Po}$  est radioactif ; il est un émetteur  $\alpha$ .

À partir des informations découvertes par Doué, tu es sollicité pour déterminer certaines caractéristiques du radionucléide  $^{107}_{84}\text{Po}$ .

Données :  $m(\alpha) = 4,00150$  u ;  $m(^{107}_{84}\text{Po}) = 209,9368$  u ;  $m(\text{noyau fils}) = 205,9295$  u.

Extrait de la classification :

|                  |                        |                        |                  |                  |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| $_{82}\text{Pb}$ | $^{107}_{83}\text{Bi}$ | $^{107}_{84}\text{Po}$ | $_{85}\text{At}$ | $_{86}\text{Rn}$ |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|

1. Écris l'équation de la désintégration d'un noyau de polonium 210.
2. Trace la courbe  $-\ln(N/N_0) = f(t)$  avec  $t$  en jours.
3. Déduis de la courbe :
  - 3.1 la valeur de la période  $T$  du polonium ;
  - 3.2 la constante radioactive  $\lambda$ .

#### Solution

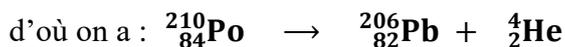
1. Equation de désintégration



Lois de conservation

$$84 = 2 + Z \rightarrow Z = 82$$

$$210 = 4 + A \rightarrow A = 206$$

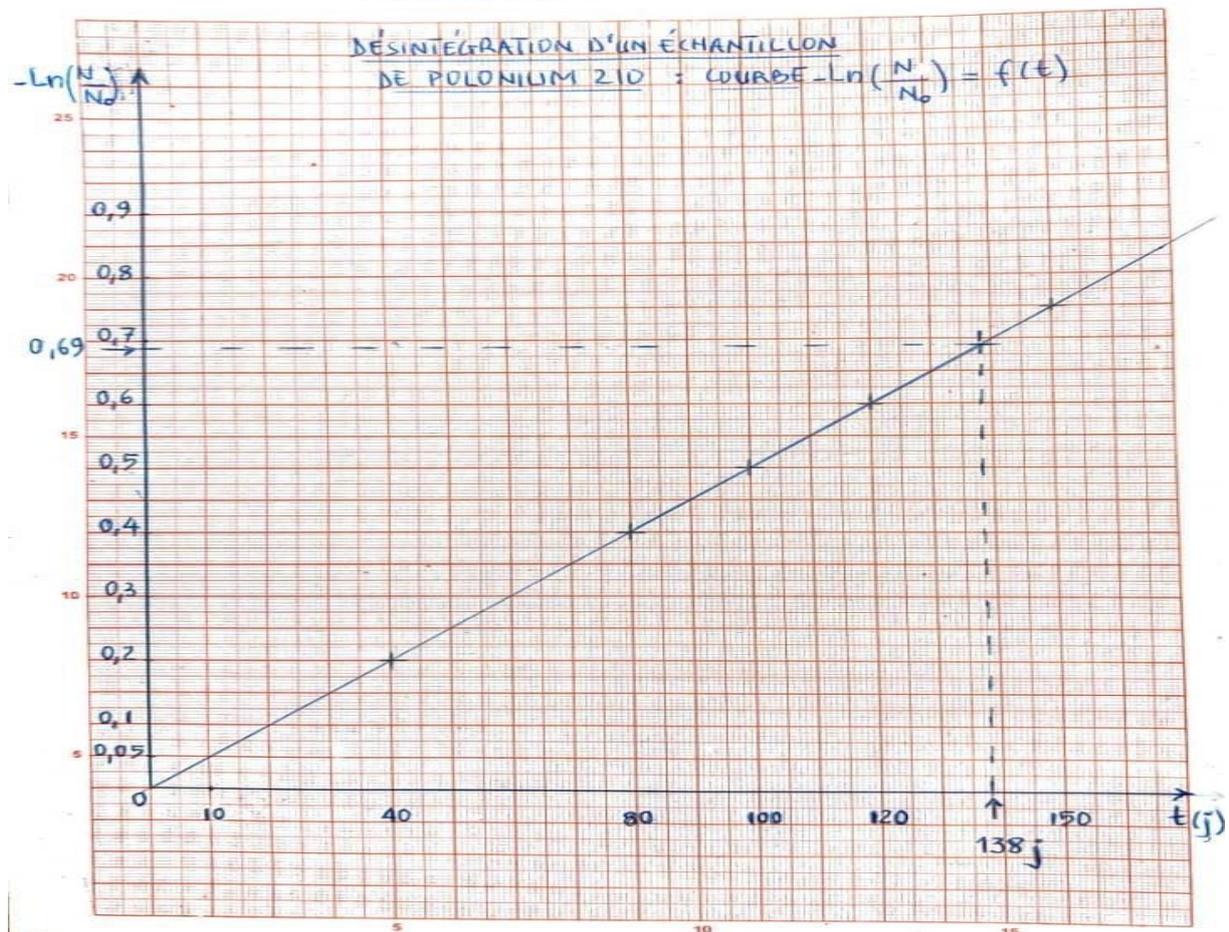


2. Tracé de la courbe  
Complétons le tableau

|                  |   |      |      |      |      |      |
|------------------|---|------|------|------|------|------|
| t ( jours )      | 0 | 40   | 80   | 100  | 120  | 150  |
| N/N <sub>0</sub> | 1 | 0,82 | 0,67 | 0,61 | 0,55 | 0,47 |
| $-\ln N/N_0$     | 0 | 0,20 | 0,40 | 0,49 | 0,60 | 0,75 |

Traçons la courbe  $-\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = f(t)$

$$\text{Echelle : } \begin{cases} t: & 1\text{cm} \rightarrow 10\text{j} \\ -\ln\left(\frac{N}{N_0}\right): & 1\text{cm} \rightarrow 0,05 \end{cases}$$



On en déduit:  $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$  à  $t = T$ ;

$$N = \frac{1}{2} N_0 \rightarrow \frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} \rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T \rightarrow -\ln 2 = -\lambda T \rightarrow \ln 2 = \lambda T = 0,69$$

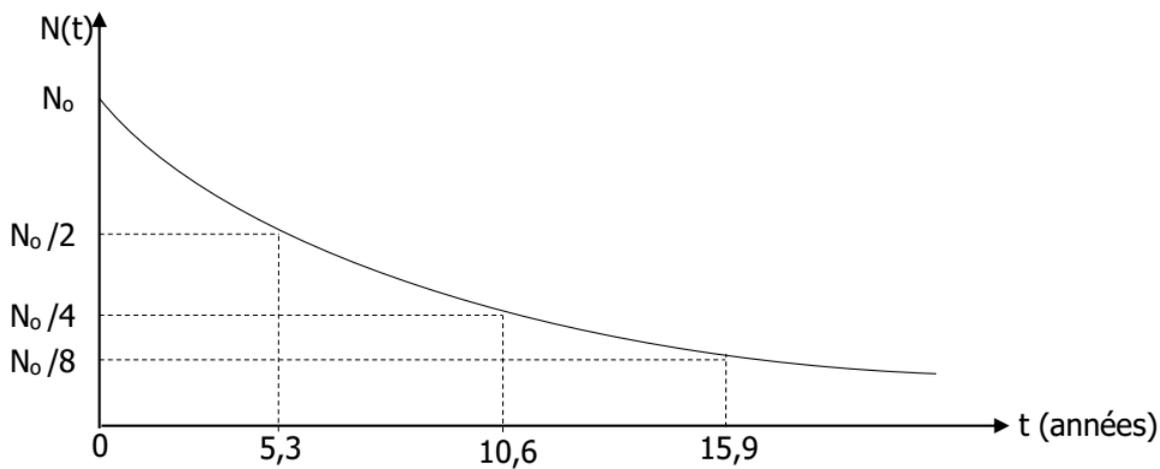
T est l'abscisse correspondant à l'ordonnée  $-\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = 0,69$  on obtient  $T = 138 \text{ j}$

### 3.2. Valeur de $\lambda$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{138} = 5,023 \cdot 10^{-3} \text{ j}^{-1} \text{ ou } \lambda = \frac{\ln 2}{138 \times 24 \times 3600} \rightarrow \lambda = 5,813 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

### Exercice 5

Pendant la préparation de votre devoir de niveau, ton groupe de travail trouve un exercice qui traite de la désintégration de l'atome de cobalt à travers une courbe de décroissance exponentielle  $N(t)$ , représentant le nombre de noyaux de cobalt désintégrés (voir ci-dessous). Le groupe souhaite exploiter la courbe en déterminant la constante radioactive.



Tu disposes comme informations :

-le symbole de l'atome de cobalt :  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  ;

-l'atome de cobalt est un élément radioactif  $\beta^-$

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| Mn | Fe | Co | Ni | Cu |
|----|----|----|----|----|

Tu es sollicité pour faire le compte rendu

- 1.Cite les lois de conservation vérifiées dans toute désintégration radioactive
- 2.Ecris l'équation de la désintégration produite
3. Donne la signification de  $N_0$  et  $\lambda$
4. Détermine la constante radioactive du cobalt.

### **Solution**

1.Les lois de conservations sont :

-la loi de conservation de la charge électrique :  $Z = Z_1 + Z_2$  ;

-la loi de conservation du nombre de nucléons :  $A = A_1 + A_2$  .

2.Équation de désintégration :  ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}e$

3.

3.1. Signification :

$N_0$  : nombre initial de noyaux radioactifs présents à la date  $t = 0$  ;

$\Lambda$  : constante radioactive du radionucléide

3.2. Déterminons  $\lambda$  :

Graphiquement  $N(t) = N_0/2$  à  $t = T = 5,3$  ans ,  $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T}$  ce qui conduit à  $\lambda = \ln 2/T$

$\lambda = \ln 2/5,3 = 0,13 \text{ an}^{-1}$  .

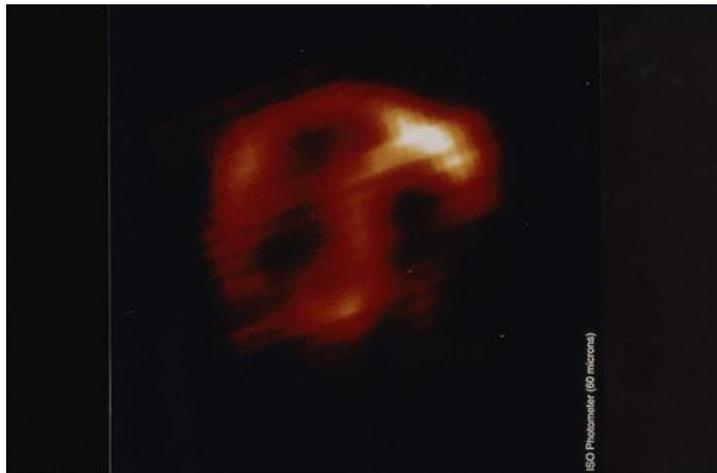
#### **IV. DOCUMENTATION**

Physique Terminales CDE Collection Arex

Physique Terminales CE Collection Eurin-Gié

Physique Terminales CE Collection Nathan

### **Des vestiges de la formation de la Terre aux rayons cosmiques**



#### ***Explosion lointaine d'une supernova***

*L'explosion d'une supernova, un des cataclysmes majeurs de l'univers, est un événement rare à l'échelle d'une galaxie. Elle ensemece l'espace intergalactique d'éléments plus lourds que le fer, que l'on retrouvera plus tard lors de la formation d'étoiles et de planètes. Certains de ces éléments lourds comme le thorium et l'uranium qui sont radioactifs ont subsisté en raison d'une très longue durée de vie. Ce cliché d'une grande acuité a été pris en 1996 à bord du satellite ISO.*

©CEA/ESA/ISO

Exposés de tout temps à la radioactivité naturelle, les hommes ne soupçonnaient d'ailleurs pas son existence jusqu'au siècle dernier. Ce n'est qu'à partir de 1896, avec la découverte des rayons uraniques par Henri Becquerel, que l'humanité a pris conscience de ces rayonnements et a cherché à en comprendre les multiples origines.

La radioactivité naturelle provient principalement de radioéléments produits dans les étoiles, il y a des milliards d'années. On trouve des traces de ces éléments radioactifs et de leurs descendants dans notre environnement.

Quatre éléments contemporains de la naissance et de la mort des étoiles ont survécu car leurs durées de vie se mesurent en milliards d'années : deux isotopes de l'uranium, l'uranium-238 et l'uranium-235, le thorium-232 et enfin le potassium-40 qui constitue environ un dix millième du potassium naturel.

Les noyaux d'uranium et de thorium qui se désintègrent se transforment par « filiation » en une succession d'éléments radioactifs. On retrouve ces descendants, en équilibre radioactif (c'est-à-dire que pour chacun de ces descendants il s'en forme autant qu'il s'en désintègre), au sein des minerais d'uranium

et de thorium. Les plus célèbres sont le radium, et le polonium, identifiés par Pierre et Marie Curie, et le radon en raison de sa part importante dans la radioactivité naturelle. Finalement, au bout de milliards d'années, les noyaux d'uranium et de thorium deviennent des noyaux stables de plomb, après être passés par toute la série de leurs descendants.

La radioactivité naturelle résulte également du bombardement du globe terrestre par des particules de haute énergie en provenance de l'espace : les rayons cosmiques. L'atmosphère et le champ magnétique terrestre servent de bouclier et en réduisent l'importance. Le bombardement des atomes de l'atmosphère génère aussi des éléments radioactifs dont les plus connus sont le carbone-14 et le tritium.

Toutes ces sources de radioactivité naturelle sont modestes et constantes à l'échelle des temps humains. Au total, les effets de l'exposition sont faibles ou bénins, comme en témoigne le foisonnement des espèces vivantes. Lors de l'apparition de la vie sur terre la radioactivité naturelle due à l'uranium était le double de celle d'aujourd'hui.

Depuis quelques dizaines d'années de nouvelles sources liées à l'activité humaine s'ajoutent aux sources naturelles. La plus importante résulte des soins et traitements médicaux.

<https://www.laradioactivite.com/site/pages/lesorigines.htm>