# 3. RADIOACTIVITE

## I. Matériel

1 compteur C.R.A.B. et 4 écrans d'aluminium d'épaisseur 5 mm. L'appareil C.R.A.B., destiné à illustrer l'étude de la radioactivité comprend :

- Un détecteur de rayonnement radioactifs constitué par un compteur GEIGER MULLER associé à son alimentation de 500 V.
- Un compteur, destiné à enregistrer les rayonnements détectés.
- Un chronomètre avec présélection de la durée de comptage.
- Un jeu d'écrans d'aluminium et de plomb.

La source radioactive de $^{137}Cs$, placée au centre d'un disque transparent (figure 1) est recouverte d'une fine pellicule plastique **qu'il faut éviter de toucher par mesure de précaution**. Elle émet des rayonnements $\beta$ et $\gamma$. Côté sigle, les rayonnements $\beta$ sont arrêtés par le plexiglas ; côté opposé tous les rayonnements traversent la pellicule transparente. Les caractéristiques de la source sont les suivantes :

- Période : 30 ans
- Activité initiale : $3{,}7 \times 10^5$ Bq $\pm$ 10 %
- Energie des rayonnements : $\gamma$: 0,662 MeV ; $\beta$ : 0,514 MeV maximum.

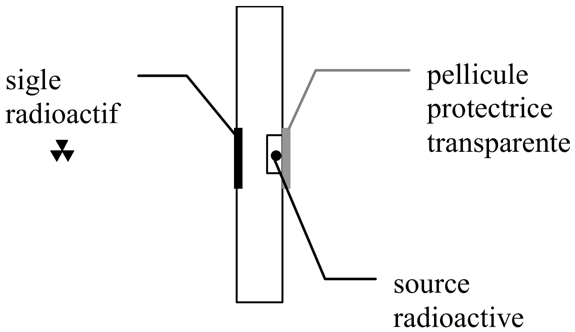


*Figure 1*

## II. Aspects théoriques

### 1°) Quelques unités

| ACTIVITE | DOSE ABSORBEE | EQUIVALENT DE DOSE |
|---|---|---|
| Becquerel (Bq)<br>1 Bq = 1 désintégration / s | Gray (Gy)<br>1 Gy = 1 J/kg | Sievert (Sv)<br>1 Sv = 1 J/kg |

Le Gray est utilisé pour mesurer l'énergie absorbée par unité de masse de matière, quelle que soit la nature du rayonnement et celle de l'absorbant. Le Sievert est une unité biologique d'irradiation : elle représente la dose de rayonnement absorbé par les tissus susceptible de provoquer leur destruction.

### 2°) Décroissance radioactive

Le nombre de noyaux radioactifs présents dans un échantillon à une date $t$ n'est jamais connu avec certitude, car la désintégration est un phénomène aléatoire ; seul le nombre moyen peut être déterminé expérimentalement. On fait l'hypothèse que la variation $\mathrm{d}\overline{N}(t)$ du nombre moyen de noyaux radioactifs entre les dates $t$ et $t + \mathrm{d}t$ est proportionnelle à ce nombre moyen de noyaux $\overline{N}(t)$ présents à la date $t$ et à la durée $\mathrm{d}t$ de l'intervalle de temps infinitésimal considéré :

$$\mathrm{d}\overline{N}(t) = -\lambda\overline{N}(t)\mathrm{d}t$$

$\lambda$ est une constante, appelée constante radioactive, caractéristique du radioélément. Par intégration, et en posant $\lambda = 1/\tau$ on obtient la loi de décroissance radioactive pour l'échantillon considéré :

$$\overline{N}(t) = \overline{N}(t_0)\exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \qquad (1)$$

La relation (1) concerne une population de noyaux radioactifs. On peut montrer que $\lambda$ et $\tau$ ont une signification probabiliste pour un noyau particulier de cette population : $\lambda$ représente la probabilité de désintégration par unité de temps et $\tau$ la durée de vie moyenne d'un nucléïde. On définit également la *période* ou *demi-vie* du radio-isotope, durée $T$ au bout de laquelle la moitié de noyaux d'une population donnée ont perdu leur radioactivité. On montre que :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}$$

### 3°) Désintégration du ${}^{137}_{55}\mathrm{Cs}$

On appelle désintégration radioactive d'un noyau atomique sa transformation spontanée en un autre noyau avec émission de particules ($\alpha$ ou $\beta$). Pour le $^{137}\mathrm{Cs}$ le schéma de désintégration est donné sur la figure 2.

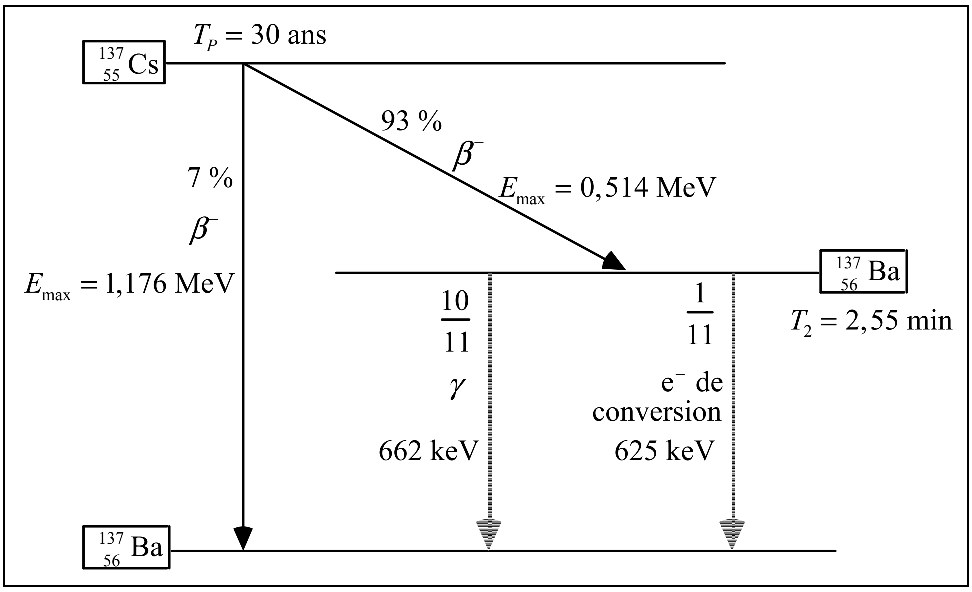


*Figure 2 : désintégration du* $^{137}\mathrm{Cs}$

## III. Préliminaires

### 1°) Activité de la source radioactive

#### *a) Définition*

L'activité $A$ d'un échantillon radioactif est le nombre de noyaux qui se désintègrent par unité de temps :

$$\overline{A} = \left|\frac{\mathrm{d}\overline{N}}{\mathrm{d}t}\right| \Rightarrow \overline{A} = \lambda\overline{N}$$

L'unité légale est le Becquerel (Bq) qui correspond à une désintégration par seconde. On rencontre encore parfois le Curie (Ci) qui correspond sensiblement à l'activité de 1 g de radium.

### b) Calcul de l'activité au moment de l'utilisation

La source utilisée est le $^{137}$Cs, sa période est de 30 ans. Son activité, au jour de sa préparation, est $A_0$. On peut en déduire l'activité au moment de son utilisation :

$$\overline{A} = \lambda\overline{N_0}\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = \overline{A_0}\exp\left(-0{,}693\frac{t}{T}\right) \qquad (2)$$

La source a été préparée en septembre 1993. Calculer son activité aujourd'hui.

### c) Évolution de l'activité au cours de la manipulation

Soit $\overline{A_1}$ l'activité au début de la séance de TP ($t = t_1$) et $\overline{A_2}$ à la fin de la séance ($t = t_2$). Exprimer littéralement puis calculer numériquement la variation relative d'activité $(\overline{A}_2 - \overline{A}_1)/\overline{A}_1$ entre le début et la fin de la manipulation.

### d) Dose admissible

L'équivalent de dose cumulée annuelle autorisée pour une population normale est fixé à 5 mSv. L'équivalent de dose reçue en mSv est calculé par la relation :

$$D = 1{,}45\times10^{-6}\frac{C\cdot E\cdot p\cdot t}{d^2} \quad \text{avec}$$

$C$ : activité de la source en Bq
$E$ : énergie du rayonnement $\gamma$ en MeV
$p$ : proportion de photons émis (figure 2)
$d$ : distance du point de mesure à la source en cm
$t$ : durée d'exposition en heure

Calculer l'équivalent de dose reçu pendant la séance de TP si la source est placée respectivement à 1 m, 10 cm, 1 cm et si tout le rayonnement émis atteint l'expérimentateur. Comparer avec l'équivalent de dose autorisé.

### e) Relation entre comptage et activité

Soit $\overline{N}(t_0)$ le nombre moyen de noyaux radioactifs à la date $t_0$, instant du début du comptage et $t$ la durée du comptage. Le nombre total de noyaux qui ont émis un rayonnement pendant cette durée est :

$$\Delta\overline{N}(t) = \overline{N}(t_0) - \overline{N}(t_0 + t)$$

Les rayonnements sont émis dans toutes les directions. Du fait de sa taille réduite, de sa position et de son rendement, le compteur ne peut les détecter tous mais une proportion $p$. La valeur moyenne du comptage pendant la durée $t$ est alors :

$$\overline{n}(t) = p\Delta\overline{N}$$

Soit, avec la relation (1) :

$$\overline{n}(t) = p\overline{N}(t_0)\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

Dans le cas des manipulations prévues, les temps de comptages $t$ sont très inférieurs à $\tau$ :

$$\frac{t}{\tau} << 1 \Rightarrow \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \approx 1 - \frac{t}{\tau} \Rightarrow \overline{n}(t) = \frac{p\overline{N}(t_0)}{\tau}t$$

Les comptages mesurés moyens sont donc proportionnels aux durées des comptages :

$$\bar{n}(t) = \alpha t \qquad (3)$$

# IV. Expériences

## 1°) Loi de décroissance radioactive

### *a) Caractère aléatoire des désintégrations*

La désintégration radioactive est un phénomène aléatoire : il est impossible de prévoir la date de l'émission radioactive d'un noyau ; en conséquence, le nombre $n$ de désintégrations pendant une durée $t$ est une variable aléatoire. Pour s'en convaincre, il suffit d'effectuer plusieurs comptages pour une même durée : on obtient des valeurs différentes, groupées autour d'une valeur moyenne $\bar{n}$, estimateur de la valeur vraie du comptage.

Placer la source à 4,5 cm du compteur, sigle ☢ vers l'extérieur. Choisir un temps de comptage de 5 s. Effectuer 10 comptages successifs. Calculer la valeur moyenne et l'écart type.

### *b) Précision statistique des mesures*

Pour obtenir la valeur vraie d'un comptage de durée $t$, il faudrait réaliser un nombre infini ou du moins très grand de mesures. Cette opération est trop longue. On peut cependant donner une estimation de cette valeur en effectuant une seule mesure de $n$ . On montre que la précision de cette estimation est :

$$\boxed{P_S = \frac{2}{\sqrt{n}}}$$

### *c) Vérification de la loi de décroissance radioactive*

Placer la source à 4,5 cm du détecteur. Noter les valeurs $n$ du comptage pour des durées de comptage de 1 à 200 s. Représenter $n$ en fonction de $t$. La loi de décroissance radioactive dans sa forme approchée (3) est-elle vérifiée ? Si oui, calculer le coefficient $\alpha$.

## 2°) Absorption du rayonnement radioactif

Les rayonnements radioactifs sont absorbés par les différents matériaux que l'on intercale entre la source et le détecteur. L'absorption est différente suivant la nature du rayonnement, du matériau interposé, et de son épaisseur. En règle générale plus le matériau est dense et épais, plus l'absorption est importante.

### *a) Loi d'absorption des rayonnements nucléaires*

L'intensité ou le taux de comptage d'un rayonnement monoénergétique après traversée d'une épaisseur $x$ de matériau obéit à la loi :

$$I = I_0 \exp(-\mu_L x)$$

$I_0$ est l'intensité mesurée sans écran (écran d'épaisseur nulle) et $\mu_L$ le coefficient linéaire d'absorption, qui dépend à la fois du matériau et du rayonnement (on le trouve dans des tables). La demi-épaisseur $e$ du matériau correspond à une épaisseur qui réduit de moitié l'intensité du rayonnement :

$$\frac{I_0}{2} = I_0 \mathrm{e}^{-\mu_L e} \quad \Rightarrow \quad e = \frac{\ln 2}{\mu_L} = \frac{0{,}693}{\mu_L}$$

Exemple : pour des $\gamma$ de 2,5 MeV et l'aluminium $\mu_L = 0{,}1\ \mathrm{cm}^{-1}$ ; $e = 6{,}9$ cm *b) Recherche de bonnes conditions d'expérimentation*

On veut travailler avec une précision statistique meilleure que 2 %. Calculer le nombre de désintégrations $n$ que l'on doit compter. En déduire le temps de comptage minimum $t$. Choisir un temps de comptage proche de cette valeur et conserver cette valeur dans toute la suite.

*c) Absorption des $\gamma$ par le plomb et l'aluminium*

Placer la source à 4,5 cm du détecteur, sigle ☢ côté compteur : presque tous les rayonnements $\beta$ (et une faible partie de $\gamma$) sont absorbés par le plexiglas. Ne plus la bouger pendant toute la manipulation, même dans son plan, car elle n'est pas centrée.

Placer contre le détecteur différentes épaisseurs de plomb. Relever le nombre de désintégrations $n$ en fonction de l'épaisseur totale $x$.

Effectuer une étude analogue avec l'aluminium (prendre les écrans 5 mm).

Représenter en coordonnées semi-log sur un même graphe les comptages obtenus en fonction des épaisseurs de matériau.

En déduire les coefficients d'absorption linéique $\mu_L$ du plomb et de l'aluminium pour les $\gamma$ de 662 keV ainsi que les demi-épaisseurs $e$.

Comparer les deux matériaux.

REMARQUE : du fait de la présence d'un résidu de $\beta^-$, il est préférable de ne pas tenir compte, pour les représentations graphiques, du comptage pour une épaisseur nulle.

*d) Absorption des $\beta^-$ par l'aluminium*

Retourner la source : on détecte maintenant les rayonnements $\gamma$ et $\beta$. Étudier et interpréter l'absorption de ces rayonnements par l'aluminium pour des épaisseurs inférieures à 5 mm. En déduire l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'aluminium qui permet d'arrêter presque tous les $\beta$.

## 3°) Variation de l'activité en fonction de la distance source détecteur

*a) Principe*

La source $S$ , supposée ponctuelle, est placée à la distance $R$ du détecteur (*figure 3*). La sphère de rayon $R$ et de surface $4\pi R^2$ est traversée par la totalité du rayonnement. La surface de la fenêtre d'entrée du détecteur est $\pi r^2$ ($r$ est le rayon de la fenêtre d'entrée). Si le rayonnement est uniformément réparti, le détecteur ne reçoit qu'une fraction $k$ de rayonnement :

$$k = \frac{\pi r^2}{4\pi R^2} = \frac{1}{4}\left(\frac{r}{R}\right)^2$$

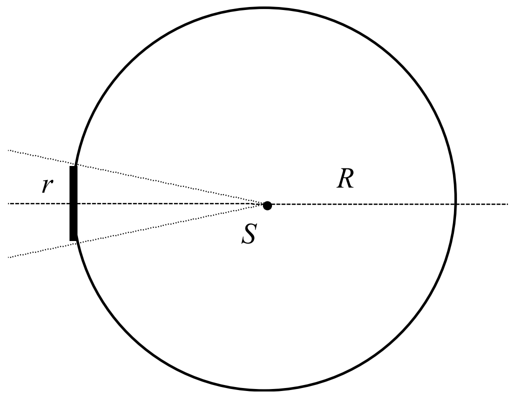

*Figure 3*

L'activité enregistrée est donc proportionnelle à $1/R^2$. Si toutes les mesures ont la même durée, la valeur moyenne du comptage est :

$$\bar{n} = \frac{K}{R^2}$$

*b) Mesures*

Enlever tous les écrans. Relever les valeur du comptage en fonction de la position de la source (ne pas utiliser les positions entre 1 et 3 cm, car la source n'est plus centrée). Tracer $n$ en fonction de $R$ en coordonnées logarithmiques. La loi de décroissance en fonction de la distance est-elle vérifiée ? Si oui, déterminer le coefficient *K*.