



UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

LICENCE 3 – PARCOURS PHYSIQUE INGÉNIERIE

Étude expérimentale d'un compteur Geiger-Müller

Caractérisation et limites de détection

Réalisé par :

Layla SARRAF

Lara VIRLOGEUX

Encadré par :

M. Bonnet

M. Cottancin

M. Cagnoli

Année universitaire 2024–2025

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Bonnet, M. Cottancin et M. Cagnoli, encadrants de ce projet, de nous avoir permis de travailler sur un thème en adéquation avec nos aspirations. Nous remercions également Mme Pinard pour son aide. Nous adressons tout particulièrement nos remerciements à M. Charles Soto, doctorant à l'IP2I, pour son accompagnement précieux tout au long de ce projet.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Rappels sur la radioactivité	3
2.1	Types de rayonnements	3
2.2	Unités utilisées	3
3	Fonctionnement du compteur Geiger	4
3.1	Principe de détection	4
3.2	Structure et composants du compteur	5
4	Mesures expérimentales	5
4.1	Détermination du temps mort	5
4.1.1	Protocole	5
4.1.2	Résultats	5
4.2	Évaluation de l'efficacité	7
4.2.1	Protocole	7
4.2.2	Résultats	8
4.3	Capacité de discrimination du détecteur	9
4.3.1	Protocole	9
4.3.2	Résultats	10
4.4	Effet de la distance et saturation du compteur	12
4.4.1	Protocole	13
4.4.2	Résultats	13
5	Conclusion, limites et perspectives	14

1 Introduction

La découverte de la radioactivité à la fin du XIX^e siècle, notamment par Henri Becquerel en 1896, puis par Marie et Pierre Curie, a marqué le début d'une nouvelle ère scientifique. Très vite, il est devenu nécessaire de développer des instruments capables de détecter et de mesurer ces rayonnements invisibles. Hans Geiger, en 1908, puis Geiger et Müller en 1928, ont ainsi conçu le compteur Geiger-Müller, qui reste aujourd'hui encore un outil simple et fiable pour détecter la présence de rayonnements ionisants.

Dans le cadre de ce projet, nous avons étudié le fonctionnement d'un compteur Geiger, évalué ses performances, et envisagé la construction d'un détecteur similaire.

Dans un premier temps, nous commencerons par un bref rappel sur les notions fondamentales de la radioactivité. Nous présenterons ensuite le principe de fonctionnement ainsi que la structure du compteur Geiger utilisé. Enfin, nous exposerons nos mesures expérimentales et discuterons des principales caractéristiques et limites du détecteur.

2 Rappels sur la radioactivité

Lorsqu'un atome est instable, il tend à atteindre un état plus stable. Pour cela, il se transforme en un autre noyau en émettant un rayonnement. Il existe 3 types de rayonnements : α , β et γ

2.1 Types de rayonnements

- Radioactivité α : elle correspond à l'émission d'un noyau d'hélium (${}^4_2\text{He}$) composé de deux protons et deux neutrons.
- Radioactivité β :
 - β^- : émission d'un électron accompagnée d'un antineutrino, liée à la transformation d'un neutron en proton dans le noyau.
 - β^+ : émission d'un positon (l'antiparticule de l'électron) accompagnée d'un neutrino, liée à la transformation d'un proton en neutron.
- Radioactivité γ : dans certains cas, même après une émission α ou β le noyau peut rester dans un état excité. Il retourne alors à son état fondamental par émission d'un photon γ sans changement de sa composition nucléaire.

Le tube utilisé dans le compteur n'étant pas très sensible au rayonnement α aucune source émettant ce type de rayonnement n'a été utilisée.

2.2 Unités utilisées

Un élément radioactif est caractérisé par son activité (A), mesurée en becquerels (Bq), correspondant à une désintégration par seconde. Cette activité suit une loi de décroissance exponentielle et évolue en fonction de la période (ou demi-vie) de l'élément.

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T}$$

T = période

A_0 = activité initiale

La période correspond au temps au bout duquel la moitié des noyaux présents dans un échantillon se sont désintégrés, et elle s'exprime en secondes. Enfin, le sievert (Sv) — unité de dose équivalente — permet d'évaluer l'impact de la radioactivité sur l'organisme humain. Il existe d'autres unités de mesure, mais elles ne seront pas détaillées ici, car elles ne sont pas pertinentes dans le cadre de notre étude.

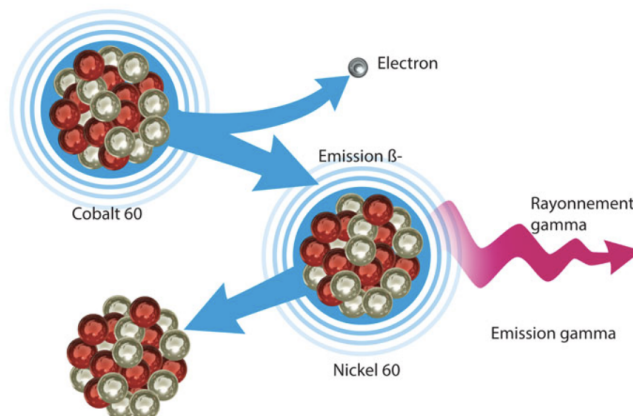


FIGURE 1 – Désintégration du Cobalt ^{60}Co .

Source : CEA, article "Qu'est-ce que la radioactivité?" [4]

3 Fonctionnement du compteur Geiger

3.1 Principe de détection

Un compteur Geiger-Müller est un détecteur de rayonnements ionisants composé d'un tube rempli d'un gaz rare et soumis à une haute tension d'environ 400 V. La paroi du tube fait office de cathode, tandis qu'un fil conducteur situé en son centre joue le rôle d'anode. Lorsqu'une particule ionisante n'est présente, le gaz demeure isolant. Cependant, lorsqu'un rayonnement α , β ou γ traverse le gaz, il provoque l'ionisation des atomes, arrachant des électrons qui sont alors accélérés par le champ électrique interne. Ces électrons, en entrant en collision avec d'autres atomes, déclenchent une avalanche d'ionisations, amplifiant le signal jusqu'à la formation d'une impulsion de courant détectable. [2] [8] [3]

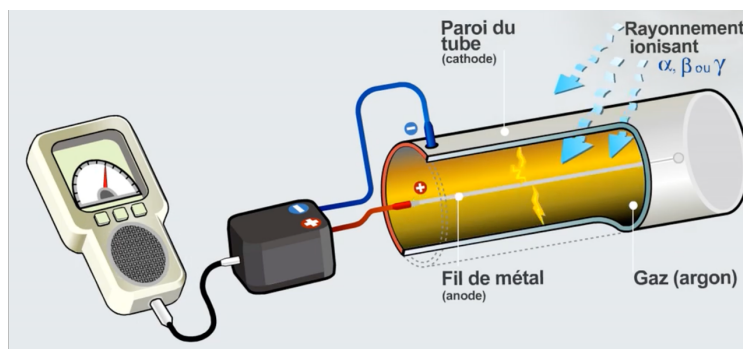


FIGURE 2 – Schéma du fonctionnement d'un compteur Geiger.

Source : CEA, vidéo "Le compteur Geiger-Müller" [3]

Le nombre d'impulsions enregistrées par minute (CPM - coups par minute) est proportionnel à l'intensité du rayonnement. En appliquant un facteur de conversion spécifique au tube utilisé, il est possible d'exprimer cette mesure en sieverts (Sv), une unité permettant d'évaluer l'exposition aux rayonnements et leur dangerosité pour la santé.

3.2 Structure et composants du compteur

Le dispositif présenté ci-dessous est constitué d'un circuit haute tension alimentant un tube Geiger-Müller, contenant un gaz rare, en l'occurrence de l'argon. Un buzzer est connecté au circuit pour émettre un signal sonore à chaque détection (impulsion), et peut être désactivé si nécessaire. L'ensemble du montage est ensuite relié à un microcontrôleur Arduino, chargé de compter les impulsions. Grâce à un programme associé, Arduino envoie ces données à un ordinateur, permettant d'afficher en temps réel le nombre de coups par minute (CPM).



FIGURE 3 – Aperçu des composants du détecteur [6]

4 Mesures expérimentales

4.1 Détermination du temps mort

Le temps mort est l'intervalle minimal entre deux impulsions pendant lequel le détecteur ne peut pas enregistrer de nouvel événement (impulsion) [2].

4.1.1 Protocole

Pour déterminer ce temps mort nous avons commencé par faire l'acquisition du temps auquel survient chaque événement pendant 1 min puis nous avons fait la différence entre $t_{i+1} - t_i$ afin de tracer l'occurrence en fonction des $t_{i+1} - t_i$ qui est l'intervalle entre deux événements. Sur le programme Arduino une boucle a été codée afin de déterminer le temps de communication entre la carte Arduino et l'ordinateur, afin de mesurer au mieux le temps mort du tube.

4.1.2 Résultats

Le temps mort obtenu expérimentalement est d'environ $\tau \approx 53 \mu s$, ce qui correspond à l'ordre de grandeur annoncé par le fabricant.

Une estimation du temps de communication entre l'Arduino et l'ordinateur a donné une valeur d'environ 4 ms, mais celle-ci semble surestimée : l'affichage des CPM était quasiment instantané. Cela suggère que ce délai correspond plutôt à un temps global de traitement et ne limite pas la détection des impulsions.

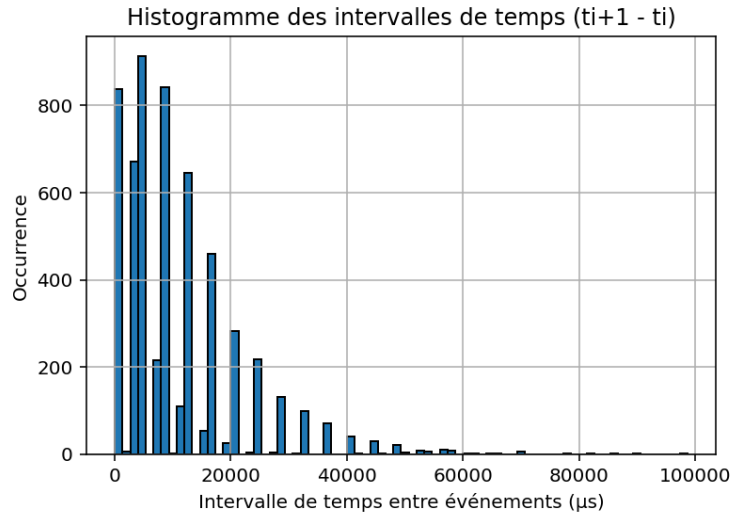


FIGURE 4 – Temps mort

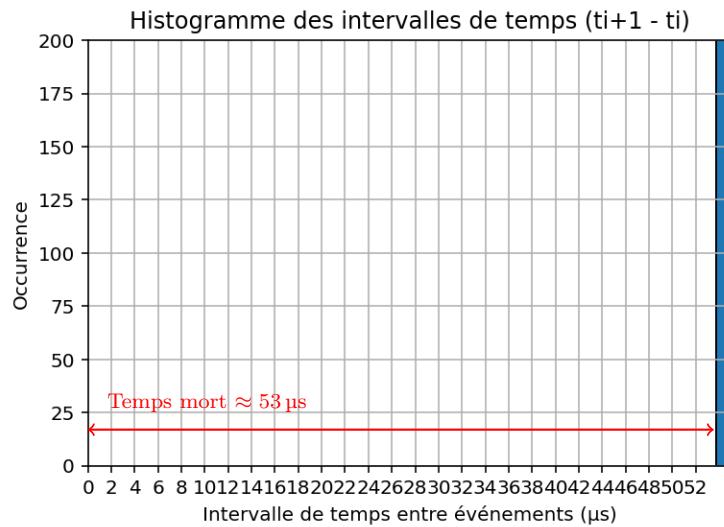


FIGURE 5 – Zoom temps mort

On remarque que l'histogramme des intervalles de temps entre événements présente une forme globalement compatible avec une distribution statistique aléatoire, similaire à une loi de Poisson. Cependant, un élément inhabituel attire l'attention : on observe ce qui semble être deux pentes décroissantes de manière exponentielle, ce qui n'est pas courant dans ce type de mesure.

Nous avons envisagé plusieurs hypothèses, étayées par des sources scientifiques [1] [9], pour tenter d'expliquer ce phénomène. Toutefois, aucune d'entre elles n'a pu être confirmée de manière certaine dans le cadre de notre expérience.

Première hypothèse : une variation de la tension d'alimentation

Le compteur utilisé étant alimenté via un module Arduino, la haute tension nécessaire au fonctionnement du tube Geiger-Müller est générée à partir de la tension 5V fournie par l'alimentation USB. Or, cette tension peut être instable, notamment si l'adaptateur USB utilisé n'est pas fiable ou si l'Arduino est soumis à une forte charge. Une baisse momentanée de la tension d'alimentation pourrait entraîner une diminution de la haute tension dans le

tube, affectant l'intensité des impulsions générées et augmentant temporairement la durée pendant laquelle le tube reste partiellement inactif. Cela pourrait se traduire par une pente secondaire plus douce, interprétable comme un temps de restitution prolongé.

Deuxième hypothèse : la nature du compteur Geiger-Müller

Il existe deux modèles théoriques de comportement face au temps mort :

Le modèle non-paralysable, dans lequel les événements arrivant pendant le temps mort sont ignorés, sans effet sur la suite de la mesure. Le modèle paralysable, dans lequel chaque événement, même non détecté, prolonge le temps mort du détecteur. Le compteur que nous avons utilisé est censé être non-paralysable, comme la majorité des tubes Geiger-Müller. Toutefois, certains tubes ou certains circuits électroniques associés peuvent présenter un comportement partiellement paralysable, en particulier à fort taux de comptage, ce qui pourrait allonger le temps mort effectif ou altérer temporairement l'efficacité de détection. Cette phase transitoire, au cours de laquelle la sensibilité du tube revient progressivement à la normale, correspond à ce que l'on appelle le temps de restitution, et pourrait également expliquer la présence d'une seconde pente moins abrupte dans l'histogramme.

4.2 Évaluation de l'efficacité

Il existe trois types d'efficacité ε :

- l'efficacité géométrique $\varepsilon(\text{géo})$,
- l'efficacité intrinsèque $\varepsilon(\text{int})$,
- et l'efficacité totale ε , qui est simplement le produit des deux.

L'efficacité géométrique est essentiellement liée à la configuration géométrique du détecteur. Elle correspond à la proportion de particules émises par la source qui atteignent le détecteur. Elle dépend notamment de la distance entre la source et le détecteur, et de la surface sensible de ce dernier.

$$\varepsilon_{\text{géo}} = \frac{\Omega}{4\pi}$$

L'efficacité intrinsèque, quant à elle, correspond à la probabilité qu'une particule atteignant le détecteur soit effectivement détectée. Elle dépend également de la géométrie du détecteur.

$$\varepsilon_{\text{int}} = \frac{CPS}{A \varepsilon_{\text{géo}}}$$

Avec :

l'angle solide $\Omega = \frac{S_{\text{apparente}}}{d^2}$

cps : coups par seconde mesurés

A : activité actuelle de la source

d : distance entre la source et le détecteur

4.2.1 Protocole

Pour déterminer ces efficacités, il nous fallait des sources dont l'activité est connue.

Or, comme l'activité radioactive suit une loi exponentielle décroissante avec le temps, nous avons calculé l'activité actuelle de chaque source à partir de sa demi-vie.

Nous avons ensuite placé les sources à 4 cm, puis à 1 cm du détecteur, et effectué une acquisition du CPS pour chacune de ces distances.

Pour chaque position, nous avons réalisé entre 3 et 5 mesures, puis calculé la moyenne du CPS afin d'obtenir une valeur plus fiable. Nous avons également calculé l'angle solide correspondant à chaque position.

Une fois toutes les données recueillies, nous avons simplement appliqué les formules d'efficacité géométrique et intrinsèque.

4.2.2 Résultats

Distance d (cm)	Angle solide Ω (sr)	ε (%)
4	0,55	4,38
1	8,8	70,02

FIGURE 6 – Mesure de l'efficacité géométrique

Type	Source	A (Bq)	$Mcps_{4\text{ cm}}$	$Mcps_{1\text{ cm}}$	$\varepsilon_{4\text{ cm}}$ (%)	$\varepsilon_{1\text{ cm}}$ (%)
γ	^{60}Co	3501	1,30	4,11	0,843	0,168
	^{137}Cs	42500	6,30	22,87	0,577	0,077
	^{241}Am	35752	0,81	1,82	0,52	0,0073
β	^{36}Cl	20222,3	3,52	14,51	0,03	0,03
	^{14}C	20185,4	14,386		1,62	0,134
	^{90}Sr	27,8	12,43	47,07	1,01	0,241

FIGURE 7 – Mesure de l'efficacité intrinsèque

Correction suite à la présentation orale :

À la suite de la présentation orale, le jury a souligné que la formule initialement utilisée pour estimer l'angle solide entre la source et le détecteur n'était pas bien adaptée à la géométrie réelle du compteur Geiger.

Nous avons donc révisé notre calcul en adoptant une expression plus rigoureuse de l'angle solide :

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}} \right) \quad \text{avec} \quad R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

où d est la distance source-détecteur et A la surface apparente.

Les nouvelles valeurs obtenues sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Distance d (cm)	Angle solide Ω (sr)	ε (%)
4	0,49	3,95
1	3,06	24,4

FIGURE 8 – Mesure de l'efficacité géométrique après correction

On remarque que cette correction a peu d'impact sur les données à 4 cm, mais modifie sensiblement l'efficacité géométrique à courte distance. Cela nous a permis de recalculer plus précisément l'efficacité intrinsèque du détecteur à partir de ces valeurs corrigées d'angle solide.

Type	Source	$\varepsilon_{4\text{cm}}(\%)$	$\varepsilon_{1\text{cm}}(\%)$
γ	^{241}Am	0,057	0,021
	^{60}Co	0,94	0,48
	^{137}Cs	0,57	0,34
β	^{36}Cl	0,33	0,22
	^{14}C	0,023	0,003
	^{90}Sr	1,59	0,96

FIGURE 9 – Efficacité intrinsèque après correction de l'angle solide

L'efficacité qui nous intéresse le plus est l'efficacité intrinsèque. On remarque qu'elle dépasse rarement les 1 %, ce qui peut sembler étonnant au premier abord. Après plusieurs vérifications [5], il s'avère que cela est tout à fait normal pour un compteur Geiger. En effet, lorsqu'on est en présence de rayonnements β de faible énergie, ces derniers peuvent être arrêtés simplement par l'air avant même d'atteindre le gaz du tube, et donc ne jamais être détectés. L'efficacité est encore plus faible pour les rayonnements γ . Cela s'explique par leur nature : ce sont des photons, donc non chargés, qui traversent souvent le tube sans interagir, car l'ionisation se fait de manière indirecte. Ils interagissent avec la matière environnante (souvent la paroi du détecteur) par deux phénomènes physiques :

- l'effet Compton : un photon gamma entre en collision avec un électron, perd une partie de son énergie, et l'électron éjecté peut ensuite ioniser le gaz ;
- l'effet photoélectrique : le photon est absorbé par un atome de la paroi, provoquant l'éjection d'un électron qui ira ioniser le gaz à son tour.

Cette faible efficacité est également due à la géométrie du détecteur. En effet, ce n'est pas parce qu'une source est très proche du tube que celui-ci détecte davantage de particules. Au contraire, à courte distance, la surface apparente du détecteur diminue, ce qui peut réduire l'angle solide couvert. On peut faire l'analogie avec une affiche : si on se tient trop près, on ne voit qu'une petite partie de l'image.

4.3 Capacité de discrimination du détecteur

Dans cette partie, nous cherchons à savoir si le compteur est capable de différencier les types de rayonnements (particules).

4.3.1 Protocole

Pour cela, nous avons connecté la sortie digitale du compteur à un oscilloscope afin d'observer la forme des impulsions générées. Théoriquement, chaque impulsion devrait présenter un pic suivi d'une décroissance exponentielle. Dans notre cas, nous observons plutôt une croissance exponentielle, ce qui peut s'expliquer par le fait que la tension mesurée est négative, probablement en raison de l'inversion liée au transistor utilisé dans le montage.

Nous traitons ensuite cette courbe à l'aide d'un ajustement exponentiel (fit) pour déterminer un temps caractéristique. L'expérience est répétée avec plusieurs sources émettant des rayonnements différents. Si le temps caractéristique (taux de croissance) varie selon le type de source utilisée, cela indiquerait que le détecteur est sensible à la nature du rayonnement. Ce temps correspond à la durée nécessaire pour que le gaz retrouve son état initial c'est-à-dire non ionisé.

4.3.2 Résultats

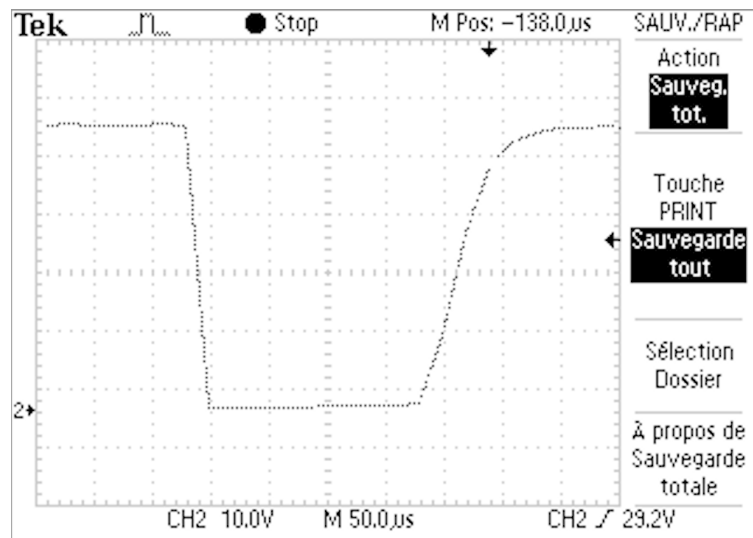


FIGURE 10 – Capture d’une impulsion pour une source ^{60}Co

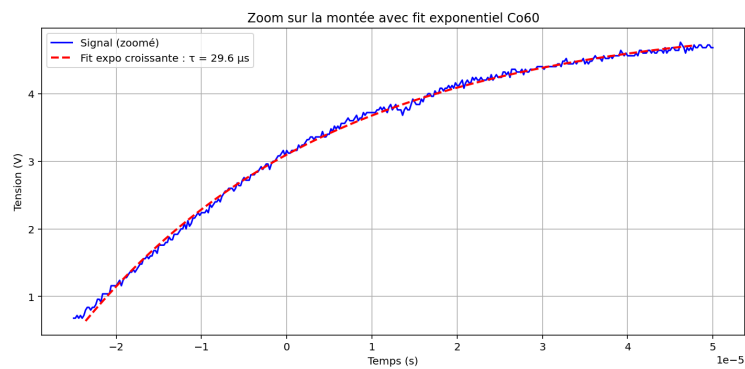


FIGURE 11 – Ajustement pour le ^{60}Co

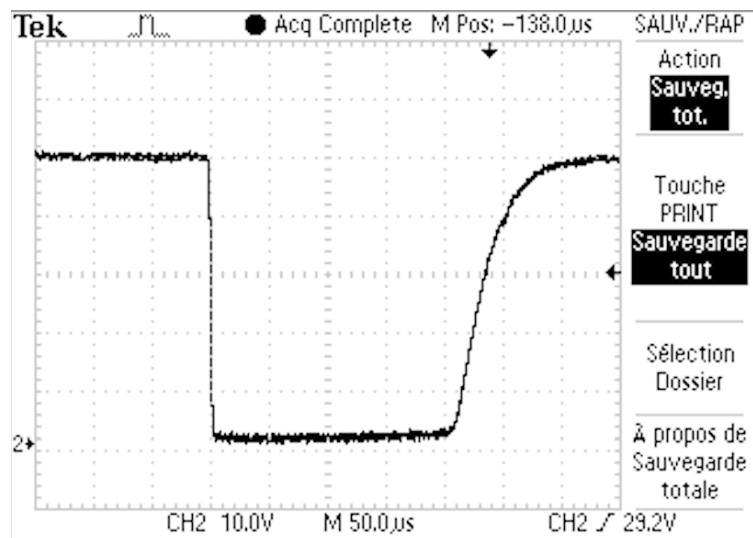


FIGURE 12 – Capture d’une impulsion pour une source ^{137}Cs

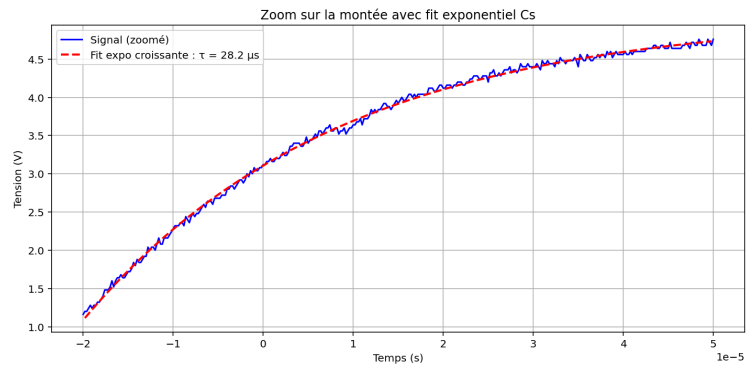


FIGURE 13 – Ajustement pour le ^{137}Cs

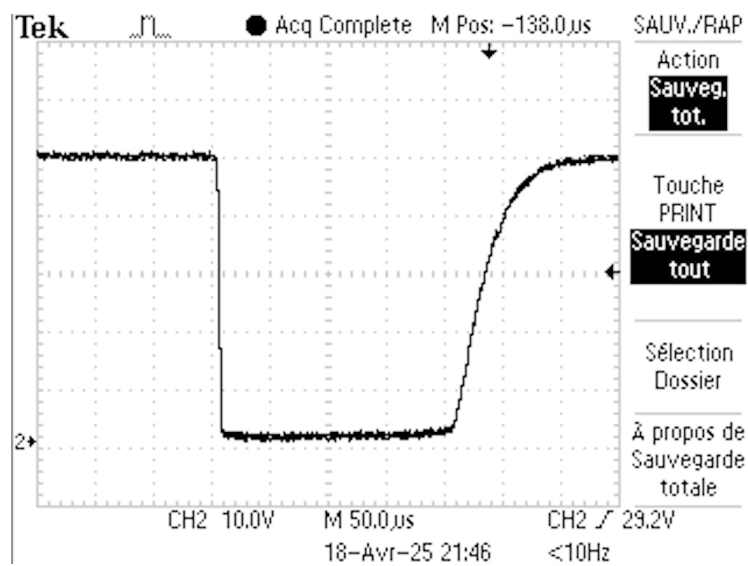


FIGURE 14 – Capture d'une impulsion pour une source ^{14}C

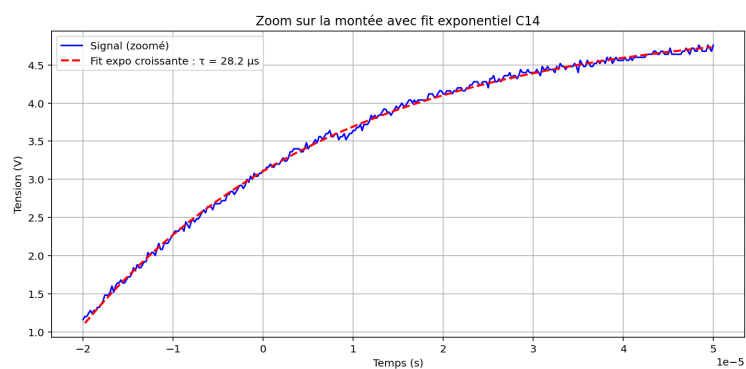


FIGURE 15 – Ajustement pour le ^{14}C

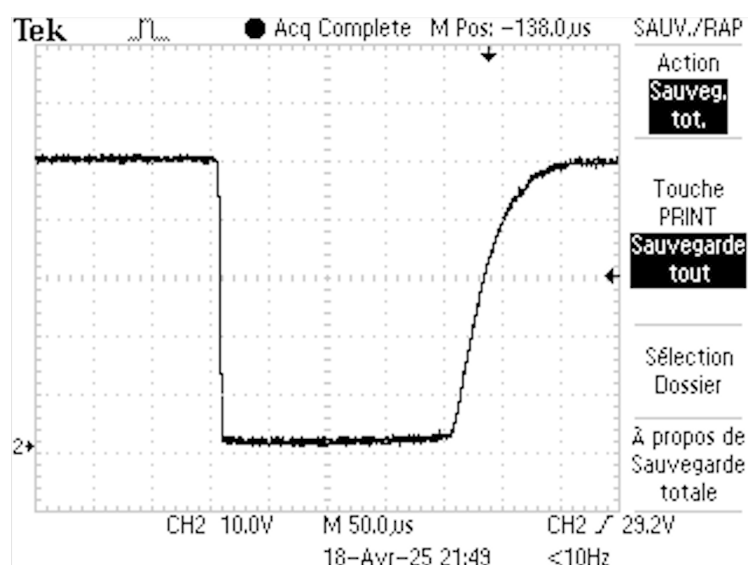


FIGURE 16 – Capture d’une impulsion pour une source ^{36}Cl

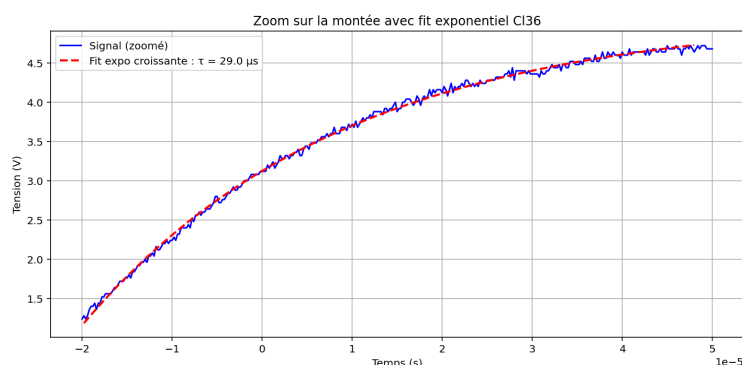


FIGURE 17 – Ajustement pour le ^{36}Cl

On constate que la valeur du paramètre τ varie autour de $30\text{ }\mu\text{s}$ pour l’ensemble des sources testées. Le césium (^{137}Cs) et le cobalt (^{60}Co) sont des émetteurs de photons γ , tandis que le carbone (^{14}C) et le chlore (^{36}Cl) émettent principalement des particules β^- .

Nous avons également observé que la forme des impulsions est similaire pour toutes les sources, ce qui a été confirmé par les ajustements réalisés à l’aide d’une fonction exponentielle croissante. Les courbes ajustées présentent des profils très proches, avec un temps caractéristique τ quasi identique, quelle que soit la nature du rayonnement.

Ces observations montrent que le détecteur ne permet pas de distinguer les différents types de rayonnements. Ce résultat est cohérent avec le principe de fonctionnement d’un compteur Geiger-Müller : une fois l’avalanche d’ionisation déclenchée, la réponse du tube est toujours la même, quel que soit le type ou l’énergie du rayonnement à l’origine de la détection.

4.4 Effet de la distance et saturation du compteur

« L’intensité du rayonnement provenant d’une source ponctuelle en espace libre varie inversement avec le carré de la distance à la source. »

— Knoll, dans *Radiation Detection and Measurement*[7]

Autrement dit, si l'on note d la distance entre la source et le détecteur, on s'attend à ce que le taux de comptage (CPM) varie selon :

$$CPM \propto \frac{1}{d^2}$$

4.4.1 Protocole

Pour tester cette loi, nous avons mesuré le taux de comptage (CPM corrigé) en fonction de la distance entre la source radioactive et le détecteur Geiger-Müller, en réalisant une série de mesures entre 0 et 20 cm. Afin d'interpréter correctement les données, nous avons tenu compte des imprécisions liées à la géométrie réelle de l'expérience.

En particulier, la distance mesurée horizontalement ne correspond pas exactement à la distance réelle entre la source et le centre du tube Geiger. En considérant une incertitude sur la position horizontale (b) ainsi qu'une différence d'alignement vertical (Δh), la distance réelle suit la relation issue du théorème de Pythagore :

$$CPM(x) = \frac{a}{(x + b)^2 + (\Delta h)^2}$$

Nous avons ajusté cette fonction aux données expérimentales par une régression non linéaire (via la fonction `curve_fit` de SciPy). La courbe obtenue montre une très bonne concordance entre le modèle théorique et les données.

4.4.2 Résultats

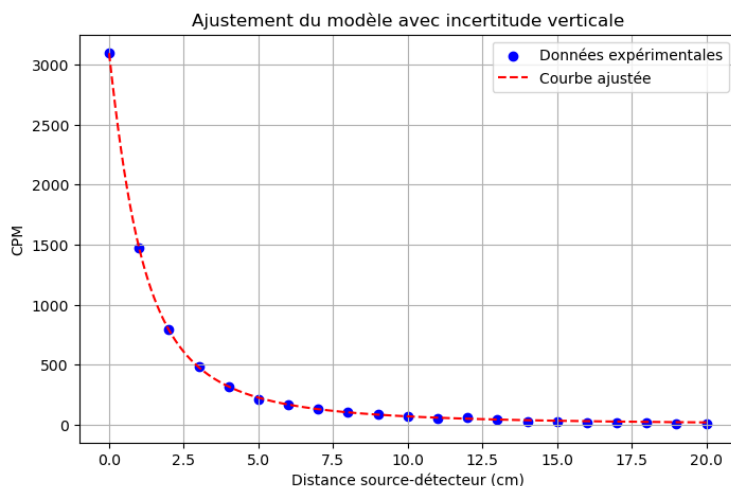


FIGURE 18 – CPM en fonction de la distance en cm

Les paramètres obtenus sont :

- $a \approx 8542.94$
- $b \approx 1.01$ cm : décalage horizontal, probablement dû à l'épaisseur du boîtier du détecteur ou à un défaut d'alignement.
- $\Delta h \approx 1.32$ cm : décalage vertical moyen entre la source et l'axe du tube.

Ces résultats confirment que le comportement du détecteur est compatible avec une loi en $\frac{1}{d^2}$, ajustée pour les effets géométriques de l'expérience.

Nous avons également profité de cette manipulation pour rechercher un éventuel *effet de saturation* du détecteur. En effet, à très courte distance, le flux de particules devient élevé, et le compteur peut atteindre un taux maximal de détection, limité par son temps mort.

Cependant, la courbe expérimentale ne présente aucune saturation nette dans la plage de distances étudiée. Ce n'est que lorsque la source a été placée en contact direct avec le boîtier du détecteur que l'on a pu observer un léger plafonnement du CPM.

Cela suggère que la véritable limite de saturation du compteur n'a pas été atteinte lors de cette expérience. Le tube Geiger-Müller utilisé est conçu pour résister à des débits de particules bien plus élevés. Il est donc probable que, même à la distance minimale mesurable dans notre protocole, le compteur fonctionnait encore dans son régime linéaire.

5 Conclusion, limites et perspectives

Ainsi, nous avons pu comprendre le fonctionnement d'un compteur Geiger et identifier certaines de ses caractéristiques. Ce type de détecteur est économique, simple à utiliser, et le nombre de coups par minute (CPM) peut être converti en dose équivalente, exprimée en sieverts, à l'aide d'un facteur de conversion propre au type de tube utilisé. Cette estimation permet de donner un ordre de grandeur de l'impact sur l'homme, bien qu'elle reste approximative.

Cependant, nous avons également mis en évidence les limites de cet appareil : il ne permet pas de distinguer les différents types de rayonnements (α , β , γ), ni de mesurer leur énergie. Son efficacité étant relativement faible, il s'avère peu précis. En résumé, ce type de compteur est surtout adapté pour détecter la présence ou l'absence de radioactivité.

Nous avons également envisagé de construire notre propre compteur, mais cette partie n'a pas pu aboutir, faute de temps et de compétences techniques suffisantes.

Dans le cadre d'un futur projet, il serait intéressant d'approfondir certaines hypothèses formulées, notamment sur le temps mort du système, et d'explorer le fonctionnement d'autres types de détecteurs, reposant sur des principes physiques plus avancés. Ces dispositifs pourraient offrir des mesures plus précises et permettre une meilleure caractérisation des rayonnements.

Références

- [1] Bader ALMUTAIRI et al. “Simultaneous experimental evaluation of pulse shape and deadtime phenomenon of GM detector”. In : *Scientific Reports* 11.1 (2021), p. 3320. DOI : 10.1038/s41598-021-81571-3. URL : <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81571-3>.
- [2] Daniel BLANC et al. *Les rayonnements ionisants : détection, dosimétrie, spectrométrie*. 1997.
- [3] CEA. *Le compteur Geiger Müller*. 2025. URL : <https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/physique-chimie/compteur-geiger-muller.aspx>.
- [4] CEA. *Qu'est-ce que la radioactivité ?* 2025. URL : <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite/radioactivite.aspx?Type=Chapitre&numero=1>.
- [5] James E. CEMBER et Thomas E. JOHNSON. *Introduction to Health Physics*. 4^e éd. McGraw-Hill Education, 2008.
- [6] DFROBOT. *Geiger Counter Module - Gravity: SEN0463*. 2024. URL : <https://www.dfrobot.com/product-2547.html>.
- [7] Glenn F. KNOLL. *Radiation Detection and Measurement*. 4^e éd. John Wiley & Sons, 2010.
- [8] Abdallah LYOUSSI. *Détection de Rayonnements et Instrumentation Nucléaire*. EDP Sciences, 2010.
- [9] Nur Syamsi SYAM et al. “Statistical Parameter Study of the Time Interval Distribution for Nonparalyzable, Paralyzable, and Hybrid Dead Time Models”. In : *Journal of the Korean Physical Society* 72 (2018), p. 1133-1138. DOI : 10.3938/jkps.72.1133. URL : <https://link.springer.com/article/10.3938/jkps.72.1133>.