

Détecteurs de radiations nucléaires

Version 2019-09-23

Cette expérience constitue une introduction à la détection et l'analyse des radiations nucléaires que l'ingénieur physicien est susceptible de rencontrer dans de nombreux domaines tels que la géophysique, le contrôle des matériaux, la médecine nucléaire, et dans plusieurs capteurs industriels. Il existe des applications encore plus répandues, comme les détecteurs de fumée à ionisation.

Les détecteurs sont utilisés principalement pour contrôler la présence ou l'absence de radiations, pour en mesurer le nombre et quelquefois pour en déterminer la nature ou en identifier l'isotope d'où ils proviennent. Les plus répandus sont actuellement : les émulsions photographiques, les chambres à ionisation, les compteurs Geiger, les jonctions de semi-conducteurs et les scintillateurs. La liste précédente est par ordre croissant de performance, mais aussi de complexité et de coût; l'utilisateur doit donc connaître les propriétés des différents détecteurs pour faire un choix judicieux selon ses besoins.

Il faut signaler que les chercheurs en physique nucléaire poursuivent des objectifs différents et par conséquent, ils utilisent, en plus, d'autres types de détecteurs dont il ne sera pas question ici.

1. Types de détecteurs

1.1 Les émulsions photographiques

Il est connu depuis longtemps que les radiations influencent les films photographiques. Historiquement, la découverte de la radioactivité naturelle a même été faite, accidentellement, faut-il dire, par ce moyen.

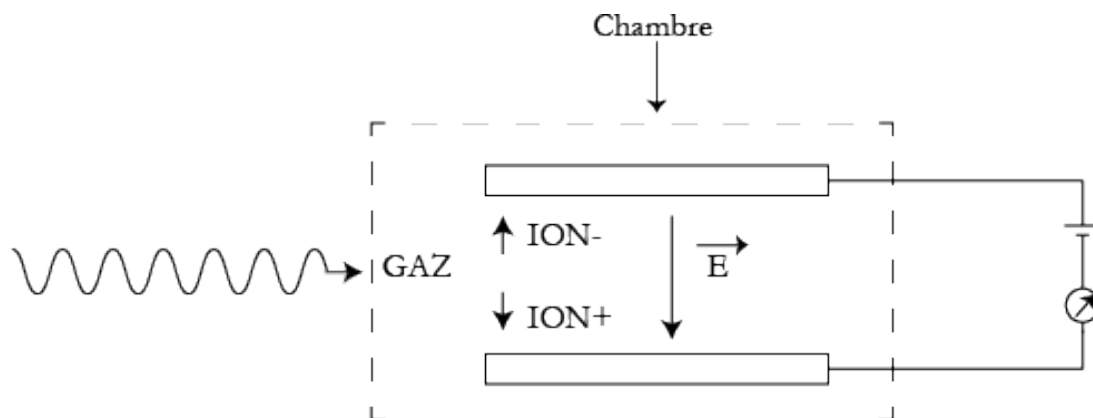
En ce qui concerne les rayons gamma, il n'y a rien de surprenant à cela puisqu'ils sont de même nature que la lumière. Les particules α et β sont aussi détectables par les traînées d'ions qu'elles produisent en étant freinées dans l'émulsion. Après le développement du film, il est possible d'observer les traces une par une (les chercheurs utilisent ce procédé) mais ceci exige un équipement optique assez sophistiqué. Habituellement, on s'intéresse plutôt au fait qu'un grand nombre de traces produisent à la longue une opacité plus ou moins grande du film.

Dans ce dernier cas, il s'agit donc d'un détecteur qui indique la dose totale de radiations reçues pendant une certaine période de temps.

Il n'y aura pas de manipulation à faire sur les émulsions photographiques mais il faut savoir que ce procédé est encore utilisé dans de nombreuses applications de détection de radiations.

1.2 Chambre d'ionisation

Ce détecteur est de conception très simple. Il consiste en une enceinte dans laquelle se trouve un gaz que l'on expose aux radiations à détecter.



Les radiations ionisent certaines molécules du gaz. Les ions $+$ et $-$ ainsi formés sont attirés par des conducteurs entre lesquels on maintient une différence de potentiel, c'est-à-dire un champ électrique. Finalement, la neutralisation des ions rendus aux électrodes provoque dans le circuit extérieur un petit courant proportionnel au nombre d'ions créés à chaque instant.

Les particules α et β sont très ionisantes; chacune laisse sur son parcours une traînée d'ions pouvant en contenir plusieurs milliers. Dans certaines conditions, il est même possible de détecter l'arrivée d'une seule particule à la fois; on obtient alors une impulsion de courant dont l'intensité dépend du nombre d'ions produits et la durée dépend de la dispersion dans le temps que mettent les ions à se rendre aux électrodes.

Ce signal de courant est cependant excessivement faible et difficile à observer. C'est pourquoi on utilise presque toujours les chambres à ionisation pour détecter les particules non pas individuellement mais plutôt lorsqu'elles arrivent en un flux entretenu. On obtient alors un courant continu plus intense et relativement facile à mesurer.

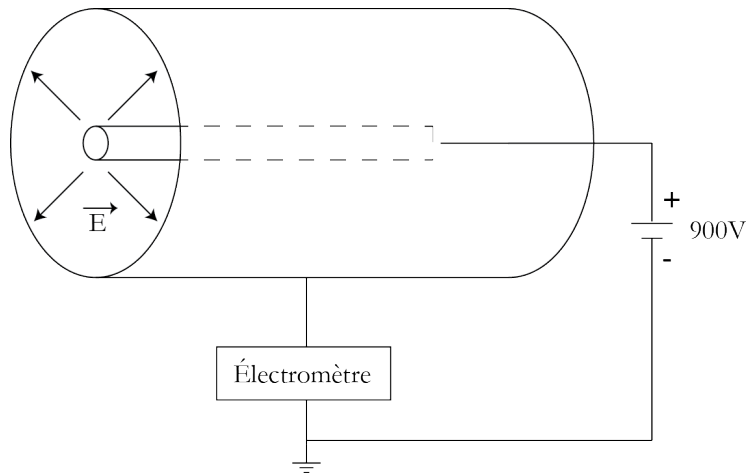
Les rayons gamma n'ont qu'une faible probabilité de réaction avec les molécules de gaz. A moins d'avoir affaire à un flux très intense, la chambre d'ionisation n'est pas un détecteur approprié pour ce type de radiation.

La nature du gaz dans la chambre n'a pas une grande importance. Très souvent, on utilise donc tout simplement de l'air à la pression atmosphérique. La chambre possède alors le grand avantage de pouvoir fonctionner tout en étant ouverte à l'atmosphère. La source radioactive peut ainsi être laissée à l'extérieur et les radiations peuvent y pénétrer sans avoir à traverser une paroi quelconque. Il faut en effet se souvenir que les particules α et β sont très fortement freinées si elles ont à traverser la moindre épaisseur de matière solide, comme par exemple la paroi d'un détecteur.

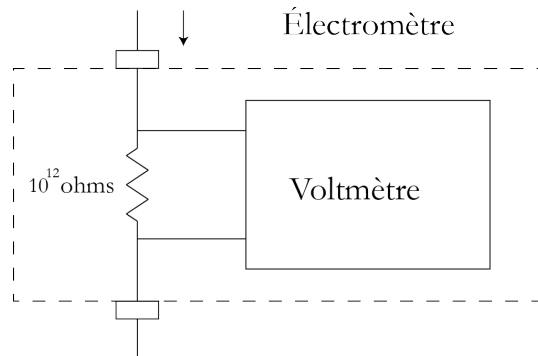
Les chambres à ionisation peuvent avoir des dimensions et formes très variées. Certaines ont un volume de gaz de seulement 1 cm^3 alors que d'autres ont plusieurs dm^3 (par exemple pour détecter les émanations de radon provenant du sol).

Radiations – 2. 3

Celle que vous allez utiliser est cylindrique, avec un champ électrique radial entre la paroi et une tige placée dans l'axe.



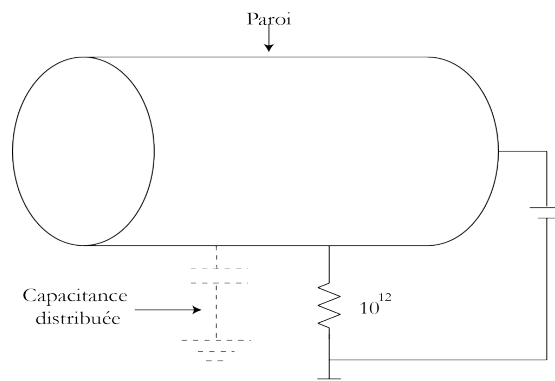
L'électromètre est une forme d'ampèremètre optimisé pour la mesure de courants très faibles; certains peuvent détecter un courant de 10^{-17} ampère. La construction interne de cet appareil comporte une particularité qu'il est bon de connaître pour utiliser adéquatement une chambre d'ionisation.



La seule façon de mesurer des courants aussi faibles consiste à les faire passer à travers une résistance de très grande valeur, par exemple 10^{12} ohms, et mesurer la chute de potentiel.

Il faut maintenant noter que la résistance de l'électromètre se trouve placée entre une électrode de la chambre et la masse. Or, comme n'importe quel conducteur, l'électrode (dans le cas présent un cylindre) a une certaine capacitance distribuée par rapport à l'environnement, et ceci inclut le corps de l'utilisateur qui se trouve au voisinage.

Si quelqu'un se déplace près de l'appareil, la valeur de C varie. Par conséquent, la charge accumulée sur la paroi doit pouvoir changer afin de ramener le potentiel à sa valeur initiale ($Q=CV$). Or, on sait que le produit RC , c'est-à-dire la "constante de temps" du circuit est justement une manière de décrire avec quelle rapidité ce mouvement peut se faire.



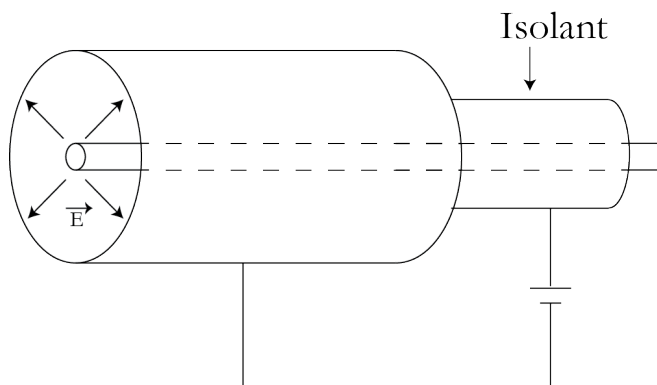
Dans le cas présent, une capacitance typique de 10 pf correspond à une constante de temps de dix secondes. Si les changements de capacitance se produisent plus rapidement que cela, et c'est habituellement le cas, la charge n'a pas le temps de s'équilibrer et c'est plutôt le potentiel qui varie, c'est-à-dire un ΔC entraîne un ΔV . Ce dernier est perçu par l'électromètre et interprété comme une variation de courant d'ionisation.

En conclusion, il est bon de se souvenir que, à cause de leur résistance interne extrêmement élevée, tous les électromètres sont sensibles aux variations de capacitance. Les chambres à ionisation portatives sont particulièrement sensibles à ce phénomène.

Question: D'après les observations que vous allez faire, pouvez-vous concevoir ce qui serait la chambre d'ionisation la moins susceptible d'être sensible aux paramètres extérieures?

1.3 Le compteur de Geiger-Müller

Ce détecteur consiste en un cylindre conducteur fermé contenant un gaz et ayant dans son axe un fil conducteur isolé. Une source de tension élevée maintient un champ électrique intense entre le fil central et le cylindre. En l'absence de radiation, il n'y a pas de courant.

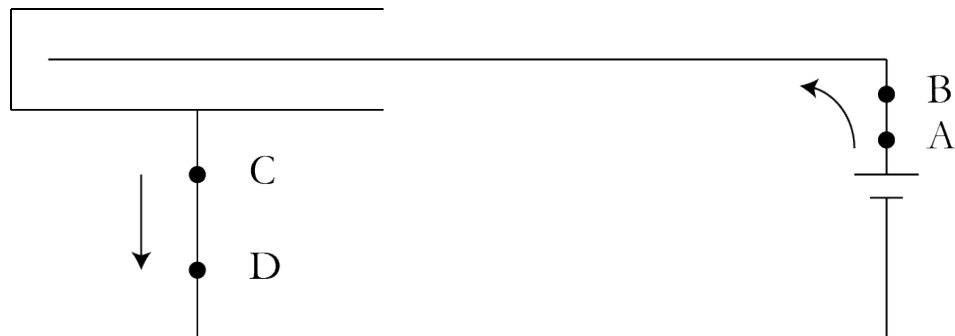


Pour qu'une radiation soit détectée, il faut d'abord qu'elle puisse ioniser au moins une molécule dans le gaz. L'ion ainsi produit est fortement accéléré par le champ et atteint vite une énergie suffisante pour déloger, par collision, des électrons des autres molécules situées sur son parcours. Ces

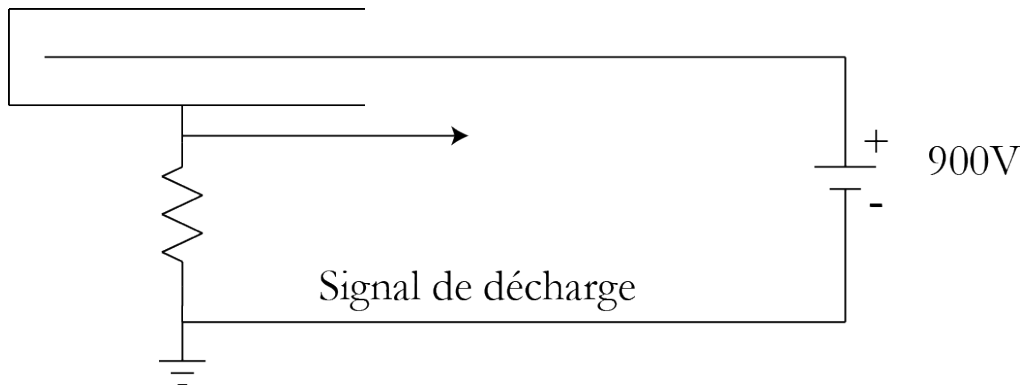
nouveaux ions sont par la suite accélérés et produisent à leur tour d'autres ions. L'effet de multiplication se propage très rapidement et, en quelques microsecondes, la décharge électrique s'étend à tout le volume du gaz.

La différence entre une chambre d'ionisation et un tube de Geiger est que, dans ce dernier, le champ électrique est beaucoup plus grand et le gaz n'est pas de l'air.

À cause du très grand nombre de molécules impliquées dans la décharge, le courant qui circule dans la boucle est intense et facilement observable; il suffit de placer une résistance en série dans la boucle, en AB ou CD, et observer la différence de potentiel lorsqu'il y a une décharge. Aucune amplification n'est requise.



Dans le montage utilisé au laboratoire, la résistance est placée en CD, le point D est mis à la masse, et vous observez le signal de tension en C.



Il a été vu que, pour amorcer une décharge dans le gaz, un ion doit y être créé. Les particules α et β sont rapidement freinées dans la matière solide et, par conséquent, elles ne peuvent traverser la paroi du tube sans avoir une énergie considérable. Celles qui pénètrent sont cependant virtuellement assurées d'être détectées à 100% car elles produisent des ions copieusement. Un rayonnement γ pénètre facilement la paroi, mais il doit ensuite produire une particule chargée pour d'être détecté. La probabilité d'interaction entre un gamma et la matière (paroi du tube ou gaz à l'intérieur) étant faible, une petite fraction seulement des rayonnements incidents sera détectée. Ceci n'est pas un inconvénient sérieux car la fraction étant connue (c'est l'«efficacité de détection»), on pourra toujours en déduire le taux réel de radiations.

Pour ce qui est des neutrons, ces particules n'ont pas de charge électrique et, par conséquent, réagissent peu avec la matière et ne sont pas facilement détectables. Ils ont malgré tout une probabilité de réaction particulièrement élevée avec les atomes de bore. C'est pourquoi, si l'on désire compter ce genre de particules, on utilise un tube de Geiger contenant du BF_3 .

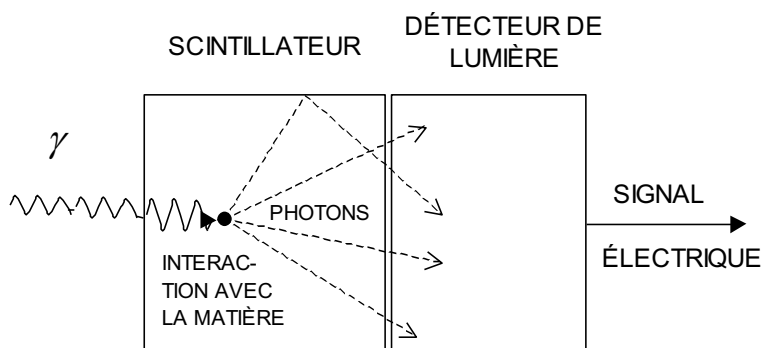
Dans tous les cas, quel que soit le type de rayonnement détecté, les décharges s'étendent à tout le volume du tube et, par conséquent, elles ont toutes la même intensité. Il n'est donc pas possible avec ce détecteur de mesurer l'énergie des radiations. Par contre, son extrême simplicité en fait le détecteur préféré dans la supervision de la radiation dans divers environnements et pour le contrôle des substances radioactives.

1.4 Les scintillateurs

Il est possible de détecter par scintillation des particules α , β , γ et les neutrons. Cependant, comme la grande majorité des scintillateurs sont utilisés pour la détection des radiations γ , c'est cette application qui sera étudiée ici.

Les γ sont très pénétrants; si leur énergie est le moins élevée, ils ont une bonne probabilité de pouvoir traverser plusieurs centimètres de matière solide ou liquide (et à plus forte raison un gaz) sans y perdre la moindre énergie, c'est-à-dire sans produire de réaction. C'est ainsi que, lorsqu'un flux de rayons γ arrive sur un détecteur, plusieurs peuvent passer à travers sans être détectés. Les cas qui nous intéressent sont ceux où il y a une réaction et, par conséquent, une possibilité de détection par les effets secondaires.

Le rayonnement γ peut réagir principalement de trois façons avec la matière : l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la production de paires électron-positon. Dans plusieurs matériaux, les trois phénomènes conduisent à l'apparition d'un grand nombre d'atomes dans un état énergétique excité. Ces états ne sont pas stables et les atomes en question se désexcitent rapidement en émettant des photons de longueur d'onde visible, c'est-à-dire en produisant une "scintillation".



Si le matériau est transparent à cette lumière, alors les photons peuvent en sortir et l'éclair devient détectable de l'extérieur.

Il suffit de placer à proximité un détecteur de lumière et en obtenir un signal électrique. Dans le cas d'un γ qui perd toute son énergie dans le scintillateur, le nombre de photons émis est proportionnel à

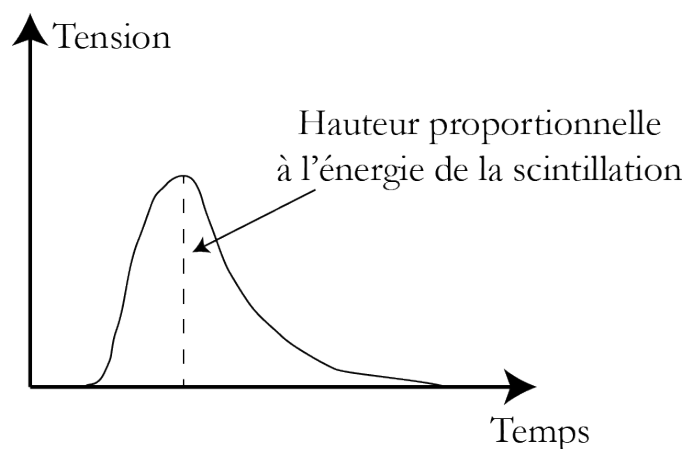
cette dernière; il s'ensuit que si l'on mesure l'intensité de l'éclair, on peut en déduire l'énergie du rayonnement gamma incident. La possibilité d'effectuer une analyse d'énergie est un atout capital des détecteurs à scintillations.

1.4.1 Scintillateur à l'iodure de sodium (dopé avec du thallium)

Ce matériau est presque universellement utilisé pour la détection des gammas. Afin d'obtenir une transparence suffisante pour les photons, il est nécessaire d'employer un monocristal et ceci a plusieurs conséquences : en plus d'être dispendieux, il est fragile et supporte mal les chocs mécaniques ou thermiques de même qu'une exposition à l'humidité. Il doit donc être encapsulé dans une enceinte scellée hermétiquement. Le temps de désexcitation des molécules de NaI(Tl) est d'environ 0.25 microseconde; ceci détermine la durée de la scintillation. Les photons émis ont des longueurs d'onde qui se situent principalement dans la lumière bleue pour ce type de matériau scintillant.

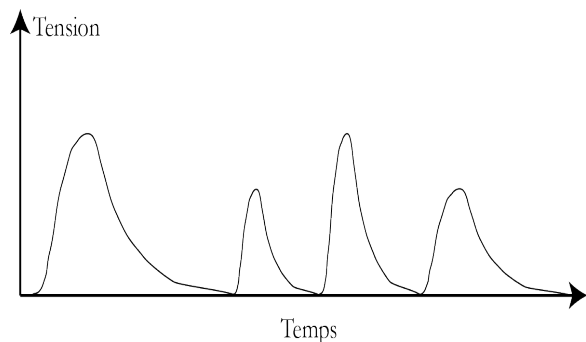
Analyse énergétique des rayons γ

Le détecteur de lumière est un tube photomultiplicateur qui produit un signal électrique proportionnel à l'intensité de la scintillation. Après amplification, ce signal est comme indiqué ci-contre et peut être observé à l'oscilloscope.



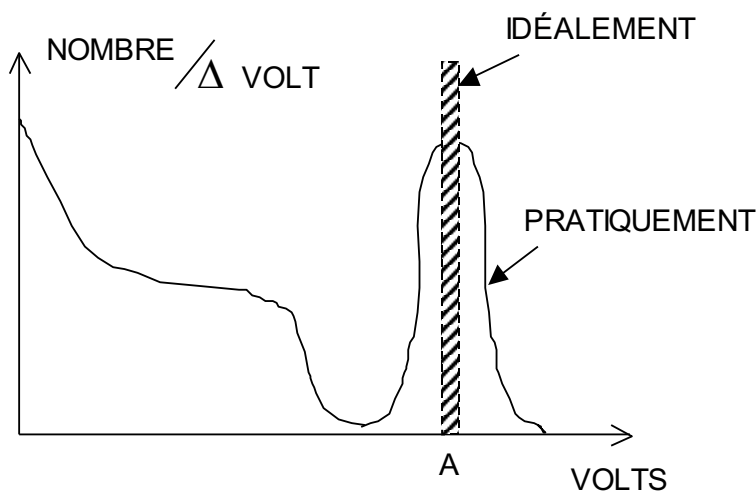
En faisant arriver une succession de rayons γ de même énergie sur un scintillateur, il serait évidemment souhaitable d'obtenir des signaux de hauteurs égales. Hélas, les choses ne sont pas aussi simples; certains γ ne perdent qu'une fraction de leur énergie dans le cristal et par conséquent produisent des signaux plus faibles.

Le résultat est toute une distribution de hauteurs, de zéro jusqu'à un maximum correspondant aux gammas qui sont complètement absorbés.



Il est habituel de représenter cette distribution par un “spectre” donnant le nombre de pulses en fonction de leur hauteur ou amplitude.

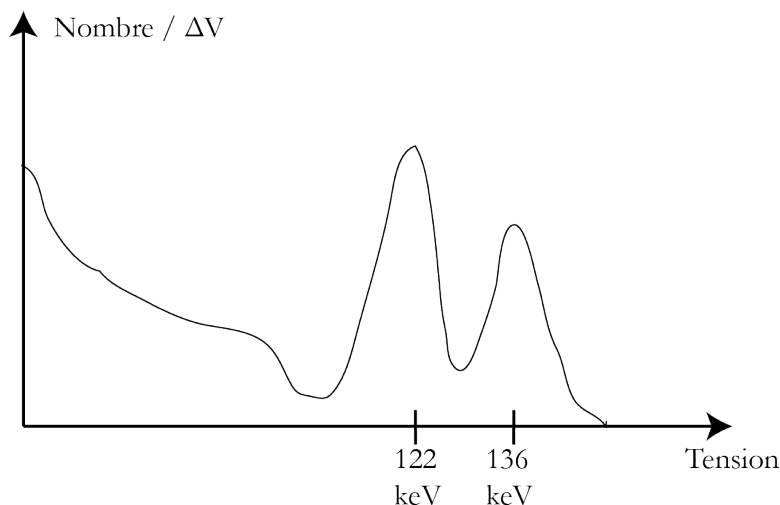
Le spectre représenté ci-dessous est typique pour des rayons γ de même énergie dans un scintillateur NaI(Tl).



Souvent, la nature de la source radioactive est connue (donc l'énergie de ses radiations aussi) et seul le nombre de radiations reste à mesurer. Dans ce cas, il suffit de faire l'intégrale du spectre, c'est-à-dire la surface sous la courbe.

Dans d'autres cas, la nature de la source est inconnue et l'objectif est précisément de la déterminer en mesurant l'énergie des rayons γ qu'elle émet. En effet, une source radioactive produit des rayons gamma ayant une énergie caractéristique de l'isotope dont elle est constituée. C'est la position du pic (point A) qui donne ce renseignement.

Certaines sources émettent des radiations γ de deux types, c'est-à-dire deux énergies différentes. Le détecteur à scintillation donne alors la superposition des deux spectres. Par exemple, l'isotope ^{57}Co émet des rayons gamma avec des énergies de 122 keV et 136 keV. Son spectre est indiqué ci-contre.



Analyseur multicanaux

Cet appareil est conçu pour recevoir les signaux de différentes hauteurs provenant du détecteur. Toutes les hauteurs possibles (par exemple de 0 à 10 volts) sont d'abord subdivisées en un certain nombre de "canaux", par exemple 1024. Chacun d'eux reçoit ensuite les signaux correspondant à sa hauteur, les additionne, et garde le résultat dans une mémoire. Le contenu des 1024 mémoires peut être observé en tout temps sur l'écran de l'appareil.

On obtient exactement le spectre décrit précédemment. Le nombre de canaux peut être choisi à volonté par l'utilisateur. Pour l'analyse des rayons gamma, il lui faut aussi établir la correspondance entre les volts, le numéro de canal et l'énergie.

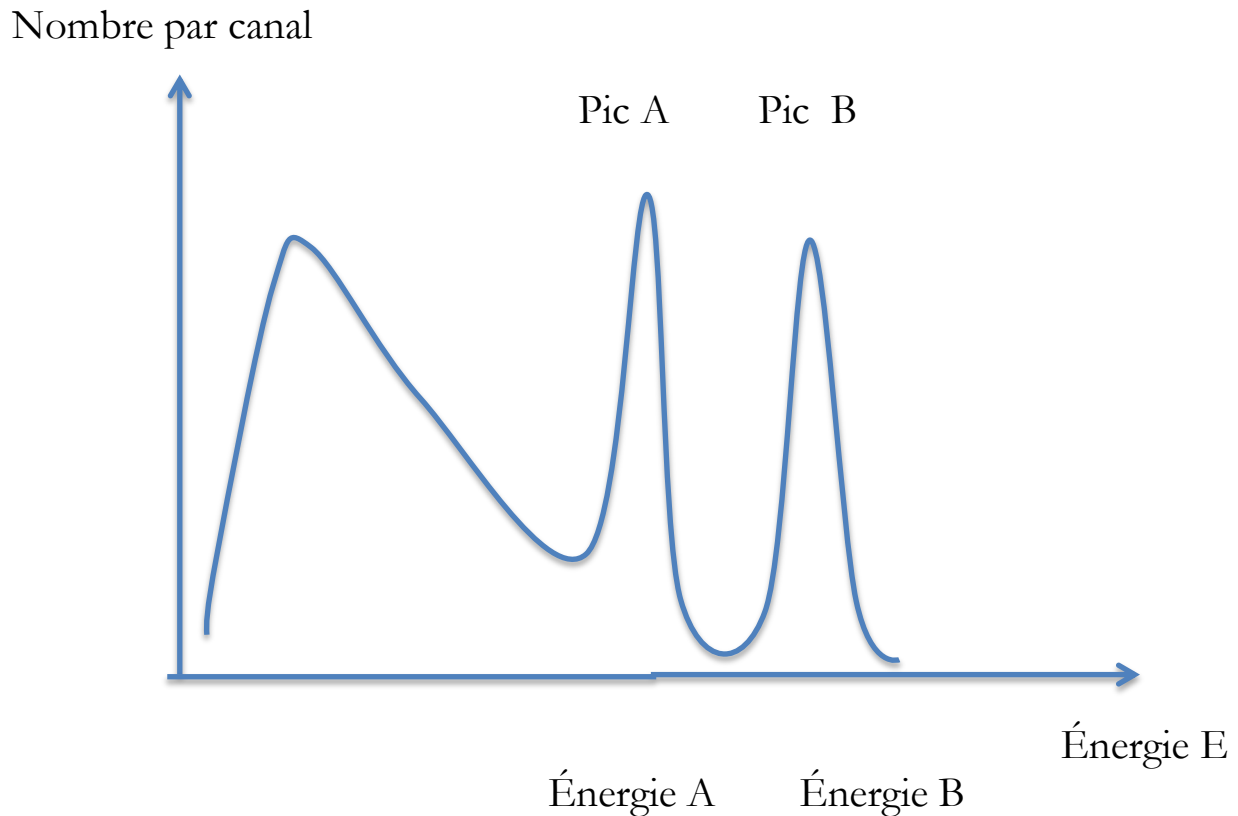
En principe, la relation entre l'énergie et la grandeur du signal étant linéaire, il suffirait de connaître un seul point d'étalonnage, c'est-à-dire un numéro de canal pour lequel l'énergie est connue.

En réalité, des problèmes de circuit font qu'il n'est pas toujours possible de s'assurer que la relation linéaire passe par l'origine; autrement dit, il n'est pas certain que l'énergie zéro corresponde au canal zéro. Il faudra donc se baser sur une relation du type $y = mx + b$ où b est l'énergie et x le numéro du canal.

Il faut donc avoir au moins deux canaux d'énergies connues pour étalonner l'appareil. Pour cela, il suffit d'utiliser deux sources γ d'énergies connues et voir dans quels canaux les signaux se placent.

Remarque:

Il faut réaliser que l'étalonnage en énergie devra être fait avec des raies en énergie du même ordre que l'énergie ou les énergies que nous désirons étudier dans nos mesures.



La pente M de la droite d'étalonnage en énergie avec ces deux valeurs A et B sera donnée par l'équation de base pour ce genre de calcul:

$$M = (\text{ÉnergieB} - \text{ÉnergieA}) / (\# \text{CanalB} - \# \text{CanalA}) = \Delta \text{Énergie} / \text{Canal}$$

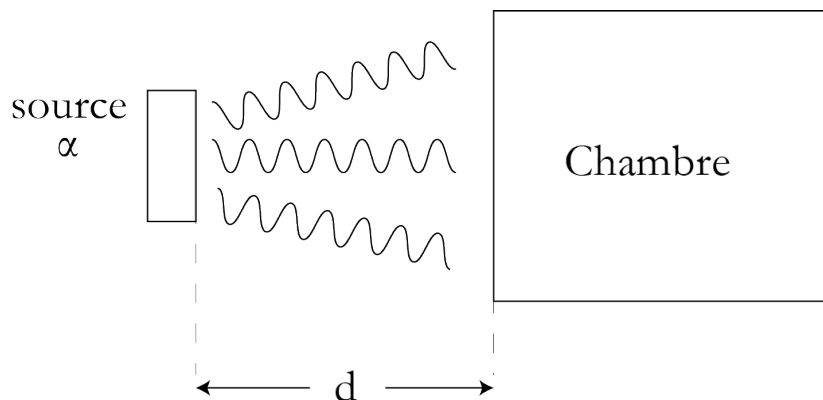
La pente de la droite est maintenant connue et c'est suffisant pour attribuer une énergie bien précise à tous les autres canaux.

Questions: Comment allez-vous choisir vos énergies d'étalonnage pour minimiser vos erreurs d'étalonnage? De plus, comment ferez-vous pour évaluer l'erreur sur vos résultats de mesures en énergie?

2. Manipulations

2.1 Chambre à ionisation

Vous avez une source d'américium 241 (^{241}Am sous sa forme symbolique) qui émet des particules α avec une énergie d'environ 5.4 MeV.



1. Utiliser l'électromètre en mode « ampèremètre » et sélectionner une échelle appropriée pour le signal que vous détectez en présence de la source radioactive. Bonne pratique : vérifier que le courant mesuré est le même sur deux échelles (e.g. 0,123 V ou 123 mV)
2. Mesurer approximativement la distance que ces particules peuvent parcourir dans l'air avant d'avoir été freinées complètement. Pour ce faire, il suffit de rapprocher progressivement la source de la chambre et noter à partir de quelle distance "d" un courant d'ions commence à apparaître. Dans cette position, l'extrémité des trajectoires commence tout juste à arriver à l'intérieur de la chambre.
3.
 - a) Rapprocher la source le plus près possible de la chambre et mesurer la tension. En déduire la quantité d'ions produits à chaque seconde. Il est bon de se rappeler que, à chaque fois qu'une molécule se fait ioniser, on obtient deux porteurs de charge dans le gaz : un positif et un négatif.
 - b) En sachant que, à chaque fois qu'une particule α ionise une molécule de N_2 ou O_2 dans l'air, elle perd environ 35 eV, calculer combien de particules α pénètrent dans la chambre à chaque seconde.
 - c) A l'aide de l'activité connue de la source, calculer le nombre de particules α qui entrent dans la chambre et comparer avec le résultat obtenu en b).

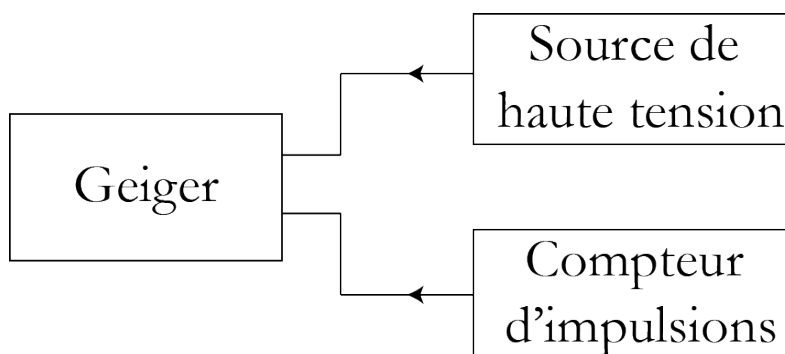
4. Si la chambre ne fonctionnait pas à la pression atmosphérique, il faudrait placer une paroi pour contenir son gaz. Elle devrait être très mince. Si la paroi avait l'épaisseur et la densité d'une feuille de papier, les particules α de 5.4 MeV pourraient-elles pénétrer?
5. Vous avez des sources de rayons γ au laboratoire. En en plaçant une très près de la chambre, produit-elle assez d'ions pour que sa présence soit détectée?

2.2 Compteur Geiger

2.2.1 Discrimination d'énergie

1. Mettre le détecteur sous tension et observer à l'oscilloscope la forme des impulsions obtenues avec une source de radiation γ .
2. Remplacer la source par une autre qui émet un rayonnement d'une énergie différente. Les signaux sont-ils différents? Peut-on identifier la source de rayonnement? Dans quel type d'utilisation pensez-vous que le compteur Geiger est utilisé?

Les signaux sont suffisamment grands pour qu'il ne soit pas nécessaire de les amplifier. Le système de mesure se résume donc à l'arrangement très simple illustré-ci dessous.



2.2.2 Temps mort

L'impulsion électrique, c'est-à-dire la décharge dans le tube, a une durée constante, facilement observable à l'oscilloscope.

Brancher l'oscilloscope à la sortie du Geiger et ajuster l'oscilloscope pour capter un grand nombre d'impulsions. Mesurer le temps minimum observable entre deux impulsions. Ce temps est approximativement ce qu'on appelle le temps mort, c'est-à-dire le temps minimal entre deux impulsions que l'on peut mesurer. Conseil : sur un oscilloscope numérique, on peut utiliser le mode Trig Normal et la persistance infinie (Display) pour visualiser efficacement le temps mort.

Quelle est l'origine de ce temps mort?

Le temps mort a deux effets nuisibles :

- il impose une limite au nombre de radiations qui peuvent être détectées par seconde. D'après la mesure du temps mort avec l'oscilloscope, quel serait approximativement ce nombre maximum?
- Le temps mort introduit une erreur dans le taux de comptage indiqué par le compteur d'impulsions.

En effet, supposons que le nombre de radiations détectées pendant un temps T , par exemple une minute, est N_D et que le temps mort du compteur soit τ .

Pendant l'intervalle T , le détecteur a été "mort", c'est-à-dire occupé pendant une durée totale $N_D\tau$; il a donc été "disponible" pendant un temps $(T - N_D\tau)$ correspondant à une fraction $\left(\frac{T - N_D\tau}{T}\right)$ du temps qui s'écoule.

Cette même expression donne la fraction des radiations qui ont effectivement été détectées N_D par rapport à celles qui auraient été détectées s'il n'y avait pas eu de temps mort : N

$$\frac{N_D}{N} = \frac{T - N_D\tau}{T}$$

$$N = \frac{N_D}{1 - \left(\frac{N_D\tau}{T}\right)}$$

Questions

- On voit que le terme de correction est d'autant plus important que le taux de comptage est élevé. Lorsque votre compteur indique un taux de radiations de 1000 par seconde, quel est le taux réel?
- Serait-il possible d'éviter ce temps mort, ou au moins pouvez-vous concevoir une façon de faire pour le minimiser?
- Quelle serait une solution pour éviter une telle contrainte, c'est-à-dire la présence d'un temps mort?

2.2.3 Efficacité de détection du tube Geiger

Vous pouvez évaluer avec une précision acceptable l'efficacité de votre compteur en plaçant à proximité une source de radiation d'intensité connue, par exemple du ^{137}Cs .

- Utiliser le compteur Geiger pour déterminer le bruit présent dans le laboratoire. Pour ce faire, placer toutes les sources loin du compteur et mesurer le nombre d'impulsions pendant une période de mesure que vous considérez appropriée.

2. Placer une source de radiation d'intensité connue et mesurer le nombre d'impulsions pendant la même période de mesure qu'en 1. **Il est demandé de compter suffisamment longtemps pour avoir une erreur statistique maximale de 3 %.**

Questions

- Comment allez-vous calculer ce temps de comptage?
 - Que pouvez-vous dire concernant les incertitudes des mesures faites en 1 et 2? Est-ce que vous connaissez un outil qui peut vous permettre de les calculer?
 - Est-il nécessaire d'ajuster le nombre d'impulsions pour considérer le temps mort? Pourquoi? Si oui, ajuster vos résultats.
3. Calculer l'incertitude des mesures en 1 et 2.
 4. Mesurer l'angle solide sous-tendu par le compteur à partir de la source.

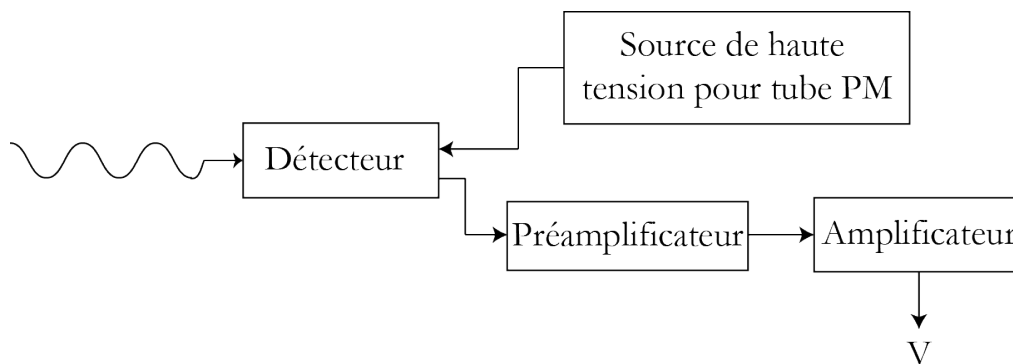
À l'instar d'un angle régulier, un angle solide (souvent noté $\Delta\Omega$) correspond à un rapport, mais, dans ce cas-ci, il s'agit du rapport entre une surface et la surface d'une sphère. Dans le cas précis du laboratoire, l'angle solide correspond au rapport entre l'aire de la section rectangulaire du compteur et l'aire d'une sphère dont le rayon correspond à la distance entre la source et le détecteur.

5. En vous fiant aux données fournies par le fabricant et le calcul fait en 1, calculer le nombre de rayons qui frappent le compteur par unité de temps. Faire attention de bien tenir en compte le temps de demi-vie de la source ainsi que sa date de fabrication.
6. Calculer l'efficacité du compteur en comparant les données du fabricant et ce que vous avez mesuré et commenter les résultats en discutant des erreurs potentielles de vos manipulations. Auriez-vous pu faire mieux?

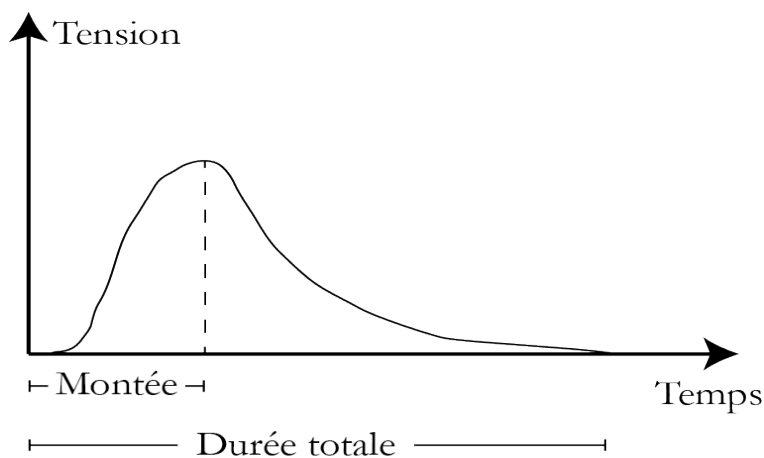
2.3 Les scintillateurs

1. Mettre le détecteur en marche et, avec une source γ monoénergétique à proximité (par exemple du césium-137), observer les signaux à la sortie de l'amplificateur.

Le préamplificateur est conçu pour que la tension monte tant que la scintillation dure, c'est-à-dire il fait l'intégrale de la lumière.



- La montée que vous observez correspond-elle au temps de désexcitation du NaI(Tl)?
- En observant la durée totale d'un signal, quel serait approximativement le temps mort de votre détecteur?
- Quelle est l'influence des modules électroniques qui façonnent le signal d'origine?



Les rayons gamma ont tous la même énergie, en est-il de même des signaux électriques? Pour l'analyse d'énergie, seuls les signaux de hauteur maximum sont utiles. Pourquoi?

2.3.1 Étalonnage de l'analyseur spectral

1. Ajuster l'amplification pour que les signaux maximum atteignent quelques volts puis transmettez-les à l'analyseur.

La position du pic, c'est-à-dire le numéro du canal, donne un point d'étalonnage. En répétant avec une source γ d'énergie différente, vous obtenez le deuxième point.

2. Établir l'équation de la droite, entre l'énergie et le numéro du canal.

Radiations – 2. 16

3. Votre système serait maintenant prêt à identifier des sources inconnues. Faites-en l'expérience en mesurant la radiation ambiante durant 10 à 15 minutes au minimum et identifiez la radiation principale.

Énergies des gammas émis par les sources utilisées au laboratoire :

- césium 137 : 662 keV
- cobalt 60 : 1.17 MeV et 1.33 MeV
- sodium 22 : 1.27 MeV (et 511 keV)