

SPECTROMETRIE GAMMA

Etallonnage d'un spectromètre gamma



MEKIL Thomas
PARIS Tanguy

Sommaire

I / Introduction	3
II / Théorie	3
1) Les différents types de rayonnements	3
2) Lois de désintégration	4
3) Interaction des rayonnements gamma avec la matière	4
4) Les détecteurs semi-conducteur	5
III / Protocole expérimentale	6
1) Chaîne d'acquisition	6
2) Calibration analogique	7
3) Calibration en énergies	7
IV / Exploitation des données	8
1) Analyse spectrale	8
2) Calcul de l'activité	9
V / Conclusion	10
VI / Remerciements	10
VII / Référence bibliographiques	10

I / Introduction

Les recherches sur la radioactivité ont permis de reconstituer l'histoire de l'Univers et de la Terre, et fournissent des outils et instruments indispensables pour la médecine, la biologie ou la géologie. La radioactivité se retrouve au cœur de nombreux enjeux et applications dans notre vie quotidienne tels l'énergie nucléaire permettant la production d'électricité ou l'étude des rayonnements nécessaire à la compréhension de mécanismes régulant le corps humain ou encore pour la surveillance d'éléments radioactifs présent dans notre environnement.

La spectrométrie gamma est une des techniques de mesures utilisée en physique nucléaire pour quantifier un grand nombre de radionucléides via l'énergie de rayonnements gamma émis. Elle s'appuie notamment sur la physique des semi-conducteurs mis en jeu dans la détection par des détecteurs composés d'un cristal.

Nous allons nous intéresser aux différents processus physiques régissant le phénomène au niveau atomique dans les semi-conducteurs, puis identifier et quantifier les énergies d'un élément radioactif par spectrométrie gamma.

II / Théorie

1) Les différents types de rayonnements

La désintégration d'un élément radioactif en un noyau stable ou radioactif s'accompagne de l'émission d'un rayonnement. On distingue des rayonnements particuliers (chargés ou neutres) et électromagnétiques. Dans le cadre de la spectrométrie gamma faisant l'objet de notre étude on s'intéressera plus particulièrement aux alpha, bêta et gamma.

- le rayonnement alpha correspondant à l'émission d'un noyau d'hélium (particule α) constitué de 2 protons et 2 neutrons. Elle concerne généralement les radionucléides lourds.

- le rayonnement bêta concerne les noyaux instables riches en protons ou neutrons. Elle se retrouve sous 2 formes β^+ et β^- :

le β^- est l'émission d'un électron chargé négativement associé avec une particule appelée antineutrino est issu de la transformation d'un neutron en un proton. Elle concerne les noyaux ayant un excès de neutrons.

le β^+ est l'émission d'un électron chargé positivement (e^+) appelé positron, et associé à celle d'un neutrino (de masse quasiment nulle).

-le rayonnement gamma est une radiation électromagnétique émise à la suite d'un rayonnement alpha ou bêta lorsque ceux-ci produisent un nouveau noyau dans un état excité. Cette excès d'énergie est libérée sous forme de photons de hautes énergies possédant un fort potentiel de pénétration dans la matière. Son énergie est

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

h : constante de planck, ν : fréquence de l'onde et λ : la longueur d'onde.

2) Lois de désintégration radioactive

Dans un échantillon radioactif la probabilité de désintégration d'un noyau pendant un intervalle de temps donné ne dépend pas des conditions physiques et chimiques du milieu. Pendant un court intervalle de temps le nombre de noyaux se désintégrant.

est proportionnel au nombre de noyaux présent

$$-dN/dt = \lambda N$$

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t)$$

$$T = (\ln 2) / \lambda$$

avec N: nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t

N_0 : constante de proportionnalité

T: le temps de demi-vie (temps nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux radioactifs)

λ : constante de proportionnalité

Unités de mesures: 1 Becquerel = 1 désintégration/s

1 Curie = $3.7 \cdot 10^{10}$ B

3) Interaction des rayonnements gamma avec la matière

Les particules γ sont détectées via leurs interactions avec la matière en cédant une partie de leur énergie à un ou plusieurs électrons. Le type d'interaction dépend du matériau traversé et de l'énergie du photon incident. Il peut se produire trois processus d'interaction:

- l'effet photoélectrique correspond à l'absorption totale du photon γ par un atome dont l'énergie est transférée à un électron qui va être éjectée d'une des couches électroniques de l'atome. On appelle cet électron un photoélectron qui emporte une énergie cinétique E_c égale à l'énergie du photon incident $E = h\nu$ diminuée de l'énergie de liaison de l'électron E_l sur la couche électronique qu'il occupe:

$$E_c = E - E_l$$

- l'effet Compton consiste au transfert d'une partie de l'énergie du photon à un électron, le plus souvent à un électron des couches extérieures de l'atome au repos (considéré comme libre puisque l'on peut négliger son énergie de liaison). Il s'ensuit la diffusion d'un photon d'énergie E' dépendant de l'angle de diffusion:

$$E' = E / (1 + E \cdot \alpha (1 - \cos(\theta)))$$

avec $\alpha = E / m_0 \cdot c^2$

L'électron possède ensuite une énergie

$$E_e = E - E' \quad (7)$$

L'énergie de l'électron est donc nulle pour $\theta = 0$ et maximale pour $\theta = \pi$ correspondant à l'énergie du front Compton dans le spectre obtenu.

- la création de paire est la création d'un positron et d'un électron suite à la disparition d'un photon γ . Du fait de l'instabilité du positron, après plusieurs collisions (Si c'est avec un électron la 1^o lui est fatale) il s'annihile avec un électron produisant deux photons d'annihilation de 511 keV à 180° l'un de l'autre. Il s'agit donc d'une réaction à seuil possible uniquement pour des photons incidents d'énergies supérieures 1,022 MeV.

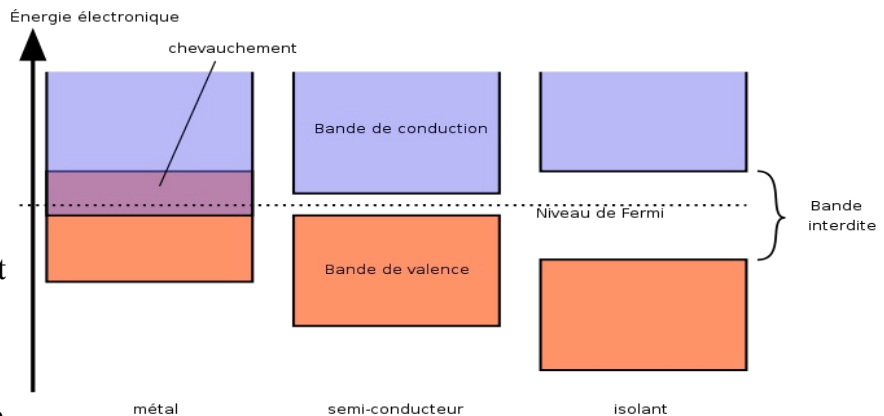
4) Le détecteur semi conducteur

On s'intéresse ici à la caractérisation : activité et énergie d'échantillons émettant des rayons gamma , pour cela on utilise un détecteur à semi conducteur qui a pour but de convertir le rayonnement à étudier en un signal électrique tout en conservant les propriétés énergétique et quantitative du rayonnement.

Propriétés des semis conducteurs

Les électrons dans un matériau (isolant, semi-conducteur, métaux) peuvent se situer sur deux bandes d'énergie (niveaux d'énergie):

-La bande de valence : à l'intérieur de laquelle il y a les électrons responsables des liaisons covalentes , ils ne sont pas responsable de la conduction, dans les isolant tout les électrons se situent dans la bande de valence.



-La bande de conduction: ou se trouvent les électrons périphériques libre de se déplacer permettant la conduction.

Entre ces deux bandes il y a un gap (barrière) énergétique appelée bande interdite de valeur E_g , où il ne peut y avoir d'électrons .

Pour qu'un électron de la bande de valence atteigne la bande de conduction il faut qu'il franchisse cette barrière via un apport énergétique.

Remarque: pour les métaux il n'y a pas de bande interdite : la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent $E_g=0$, pour les isolant E_g est grand .

Dans les semi-conducteur E_g est suffisamment faible pour qu'un électron de la bande de valence puisse passer dans la bande de conduction via un apport énergétique et ainsi permettre l'établissement d'un courant électrique : c'est pour cela que l'on utilise des semi-conducteur , car le rayonnement gamma issu de l'élément radioactif que l'on veut étudier , va interagir avec le semi-conducteur en lui cédant l'énergie nécessaire pour qu'il migre vers la bande de conduction.

Les semi-conducteur intrinsèques , de type N et P

dans un cristal semi-conducteur la conductivité

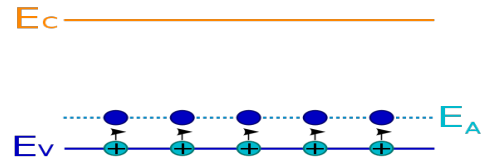
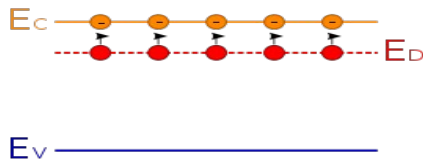
$$U=q(N^*\mu_n+P^*\mu_p)$$

q la charge d'un électron, P et N sont la densité des trous positif (déficit d'électron) et des électrons

, μ_n et μ_p leurs mobilités respective en $m^2/V*s$.

Donc la conductivité est proportionnelle a la densité des trous et des électrons dans le cristal, pour l'augmenter afin d'abaisser au maximum E_g il faut introduire des impuretés : ce procédé est appelé dopage.

Le dopage : consiste a introduire au sein du cristal monoatomique (germanium, silicium) des atomes possédant soit un excès d'électrons dopage de type N, soit un excès de charge positive dopage de type P.



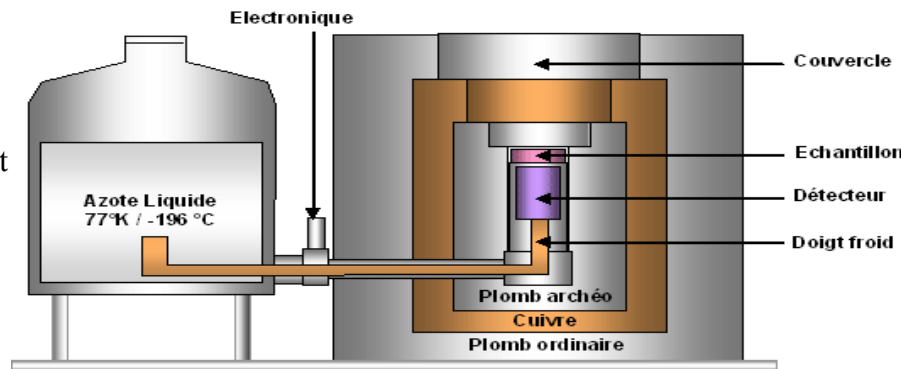
Ce dopage fais

apparaître deux nouvelles bandes d'énergie (niveau donneur type N, niveau accepteur type P) qui ont pour effet d'abaisser E_g ce qui diminue le seuil énergétique à l'établissement d'un courant.

Les semi-conducteur intrinsèque sont pur et non dopé: tout les électrons de la bande de conduction proviennent de la bande de valence.

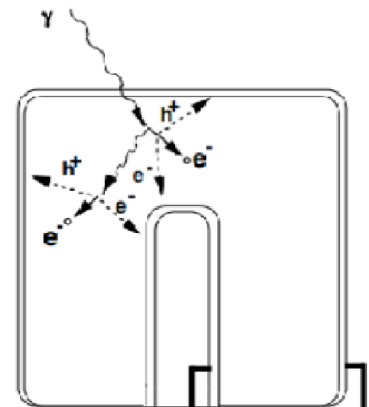
Fonctionnement du détecteur a rayon gamma on s'intéresse ici au détecteur à germanium

-Structure du détecteur:
constitué d'un cristal de germanium , d'une structure en plomb permettant d'atténuer le bruit extérieur (rayonnement cosmique..), d'une structure en cuivre (cage de faraday) et d'un cryostat permettant de baisser la température du cristal et donc son agitation thermique se qui limite le bruit et stabilise le cristal.



-Principe de fonctionnement :

Un photon issu de l'élément radioactif interagit avec le cristal de germanium par effet photo électrique ,compton ou par création de pair ce qui aura pour effet de céder de l'énergie aux électrons du cristal , ils peuvent ainsi passer le gap énergétique et être accéléré par une haute tension ce qui fourni un courant dont la quantité de charge obtenue est proportionnelle à l'énergie déposée dans le cristal par le rayonnement.



III / Protocole expérimental

1) La chaîne d'acquisition

Le but de cette chaîne est de relier le signal électrique à une énergie et ensuite de comptabiliser les différentes énergies obtenues.

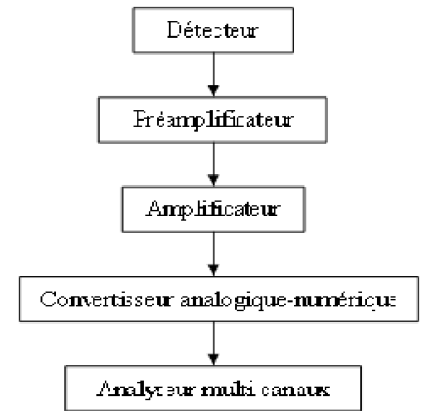
-le préamplificateur: le signal à l'entrée n'est pas proportionnelle à l'énergie déposée dans le cristal, mais son intégrale est égale à la charge collectée qui dépend de l'énergie déposée. Le préamplificateur est un montage intégrateur qui va intégrer le signal pour faire le lien avec l'énergie

-L'amplificateur: qui sert à la mise en forme du signal et à son amplification : le but est de minimiser le bruit et d'obtenir un signal gaussien

-Le convertisseur analogique-numérique et l'analyseur multicanaux: à la sortie de l'amplificateur on a un signal continu, le convertisseur transforme l'amplitude du signal en un nombre qui est proportionnelle à l'énergie déposée dans le cristal.

Ensuite l'analyseur multicanaux collecte, classe et enregistre les informations dans différents canaux : chaque canal correspond à une énergie.

Cela permet d'obtenir un histogramme en temps réel dans lequel l'énergie déposée dans le cristal est relié au numéro de canal et le nombre de coups dans un canal donné est proportionnelle aux nombres de photons ayant déposé la même énergie dans le cristal.



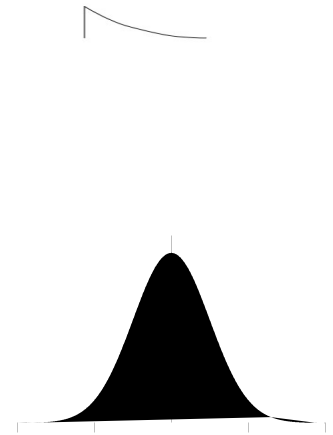
2) Calibration analogique

À la sortie du détecteur on obtient le signal suivant (sur un oscilloscope) abscisse : temps ; ordonnée : Voltage .

-La première calibration consiste à changer les paramètres du préamplificateur et de l'amplificateur afin d'obtenir un signal gaussien, qui est optimum car croît et décroît suffisamment rapidement ce qui permet d'éviter l'empilement de deux différents signaux .

-On peut aussi régler le temps d'occupation ou temps d'échantillonnage : durée pendant laquelle le signal est enregistré, si il est trop court le signal risque de ne pas être pris dans son intégralité, si il est trop long il risque de prendre deux signaux en même temps

-Enfin le réglage du gain qui permet de ne pas prendre en compte les rayons X se situant entre 0-100 keV.



3) Calibration en énergie

Le logiciel GammaVision est utilisé pour le traitement et l'analyse du signal. Il permet d'avoir un spectre avec le numéro de canal en abscisse et le nombre de coups dans le canal correspondant. Ce spectre correspond à un histogramme représentant le nombre de photons mesurés en fonction de leur énergie. Un étalonnage en énergie est donc nécessaire à l'identification des éléments radioactifs, en établissant une relation linéaire entre le numéro de canal et l'énergie déposée dans le

cristal. Pour cela on utilise une source test qui émet à des énergies connues. Nous avons utilisé de l'⁷

Europium152 possédant deux pics d'énergies à 111 keV et 344 keV. On sélectionne les pics et on leur affecte leur valeur en énergie correspondante. On obtient ainsi le spectre d'un ensemble de pics distribués en énergie se rajoutant sur un bruit de fond. Les pics obtenus représentent l'énergie des photons incidents et permettent d'identifier le radioélément qui émet des rayonnements gamma. Ils s'étendent sur plusieurs canaux et suivent une loi gaussienne de la distribution de l'énergie dont la largeur à mi-hauteur varie avec l'énergie. La surface du pic correspond aux nombres de coups par seconde et est proportionnelle à l'activité de l'élément en Becquerel.

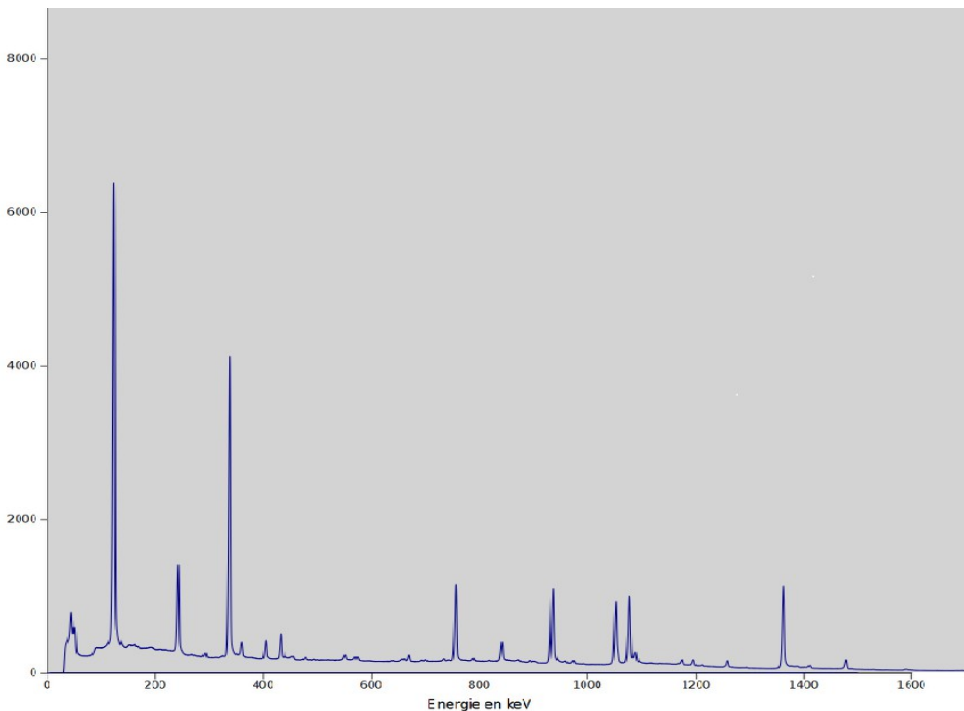
IV / Exploitation des données

1) Analyse spectrale

On réalise l'acquisition du spectre d'Eu 152 en gardant la calibration faite au préalable. Les énergies correspondantes en fonction de leur proportions sont déterminées à l'aide de la table de radioactivité, on a pour les pourcentages les plus élevés:

Energie (keV)	Pourcentage %
121	29,0
344	26,5
778	12,9
964	14,6
1085	10,2
1112	13,6

Nous pouvons observés l'ensemble des pics correspondants sur le spectre suivant pour une acquisition d'une durée de 2h20



La première raie significative à une énergie $E=121$ keV correspondant au pic d'absorption total des gamma due à l'effet photoélectrique, On observe un plateau due aux effets Compton, causé par l'interaction de particules gamma avec un électron du détecteur. Nous pouvons calculé l'énergie compton maximale pour un photon d'énergie $E=h\nu$ de 121 keV donné par l'équation (6)

E_e est maximale pour $\cos(\theta) = -1$,
On trouve $E_e=39$ keV

2) Calcul de l'activité

L'activité d'un échantillon est proportionnelle a la surface du pic obtenue c'est a dire au nombre de coups total collecté et ensuite divisé par le temps total de l'acquisition.

L'activité est en Bq , 1 Bq = 1 désintégration par seconde
pour déterminer l'activité d'un échantillon il faut tout d'abord connaître l'activité actuel d'un échantillons étalons . Pour cela il faut appliquer la loi de décroissance radioactive, ensuite mettre l'échantillon étalon dans le détecteur et estimer le coefficient de proportionnalité entre la surface du pic que l'on obtient et l'activité calculé.

Remarque: il faut que l'échantillon et l'étalon est la même géométrie.

Après il suffit d'estimer la surface du pic dont on veut calculer l'activité et d'y appliquer le coefficient de proportionnalité.

V / Conclusion

Ce projet nous a permis d'avoir une approche pluridisciplinaire dans les différents domaines que sont la physique nucléaire, la chimie, l'électronique ainsi que l'outil informatique. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux processus physiques régissant la radioactivité et le fonctionnement des semi-conducteurs .

Notre rapport traite principalement du fonctionnement du détecteur germanium ainsi que de son étalonnage afin d'être opérationnel dans l'identification d'éléments radioactifs ainsi qu'à l'évaluation de leur activité.

VI / Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre tuteur M GOUDOUR Jean Pierre, ingénieur à l'institut de chimie de Nice pour l'aide et les conseils apportés tout au long de notre stage.

VII / Références bibliographiques

[1] Physique des électrons dans les solides – les éditions de l'école polytechnique

[2] Précis de physique nucléaire – Edition DUNOD

[3] Les rayonnements ionisants – Edition MASSON

[4] Les détecteurs semi-conducteur

[5] <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>

