

Estelle Gauquelin  
Responsable : Julien Pancin

# MESURE DE L'ÉPAISSEUR DE FEUILLES EMISSIVES SUBMICROMETRIQUES

---

L3-Magistère de Physique Fondamentale

GANIL  
Bd Henri Becquerel  
BP 55027 – 14076 CAEN Cedex 5  
FRANCE

Je remercie Julien Pancin, mon responsable de stage, qui a su me guider grâce à son expérience et sa pédagogie, Georges Frémont, qui m'a aidé à la mise en œuvre de mes expériences, et le GANIL qui m'a accueillie pour mon stage.

# Mesure de l'épaisseur de feuilles émissives submicrométriques

## Résumé :

Les trajectographes de faisceau à feuille émissive sont des détecteurs utilisés en physique nucléaire pour les faisceaux de basse énergie. Le but de ce stage était de mesurer l'épaisseur de feuilles émissives submicrométriques. Pour ce faire, il a fallu mettre au point un banc de mesure capable de donner des valeurs d'épaisseurs de l'ordre du dixième de micromètre. Plusieurs méthodes ont été utilisées : d'abord en pesant une feuille connaissant ces dimensions, mais cette technique ne nous renseigne pas sur l'homogénéité de la feuille. On a aussi utilisé les interférences visibles sur la feuille en lumière blanche, mais le résultat n'était pas assez précis, avec une barre d'erreur difficile à évaluer. Finalement, on a utilisé les pertes d'énergie de particules alpha à travers les feuilles pour mesurer précisément leur épaisseur, en comparant l'énergie des alphas avec et sans feuille à l'aide d'un détecteur silicium. Cette expérience a été réalisée sur des feuilles de différentes épaisseurs et en différents points de chaque feuille. Le système de mesure a été testé sur des feuilles disponibles dans le commerce d'épaisseur 0,5 et 0,9 microns. Des feuilles plus fines de l'ordre de 0,2 microns ont aussi été fabriquées et leur épaisseur a pu être mesurée précisément. Les résultats des mesures sont exploités grâce à des ajustements en gaussienne et en convolution de gaussienne et d'exponentielle afin d'en déduire l'épaisseur des feuilles émissives.

## Abstract:

The beam trackers with emissive foils are detectors used in nuclear physics for low energy beams. The aim of this internship was measuring the thickness of submicron emissive foil. To reach this purpose, a device capable of measuring thickness smaller than a tenth of micron had to be devised. Different ways were possible: first, by weighing a foil knowing its dimensions, but this proceed does not let know about the homogeneity of the foil. Another way is with interferences under white light thanks to the thickness of the foil, but it is not accurate enough to have interesting results and it gives error bars difficult to assess. The experiment finally used calculates the loss of energy of alpha particles through emissive foils to measure their thickness, by comparing the energy of the alpha particles with and without foils using a silicon detector. It has been used on foils of different thicknesses and on different points of those ones. This way of measurements has been first tried on foils available in the trade with a thickness of 0,5 and 0,9 microns. Thinner foils about 0,2 microns thick have been made in the laboratory and their thickness measured precisely. The results are analyzed thanks of fittings using gaussian and convolution between exponential and gaussian in order of deducing the thickness of the emissive foils.

## Introduction

Dans le cadre de ma première année de Magistère de Physique Fondamental, j'ai effectué un stage de six semaines sur le site du GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds).

Mon stage s'est déroulé au sein du Secteur Technique pour la Physique (STP) comprenant une soixantaine de personnes. J'ai été rattaché au pôle Détection, qui a pour but de maintenir les détecteurs existant, concevoir ceux de demain, et assurer le fonctionnement des salles d'expériences.

Le but de ce stage est de mesurer l'épaisseur de feuilles émissives utilisées dans des détecteurs. Ces feuilles sont très fines et émettent des électrons lors du passage d'ions de faible énergie à travers elles. L'épaisseur et l'homogénéité de ces feuilles sont des paramètres importants pour avoir une détection non destructive du faisceau incident. Ces détecteurs permettent de reconstruire les trajectoires de chaque particule pour mieux comprendre la cinématique des réactions nucléaires. Ces détecteurs seront utilisés sur de futures installations comme SPIRAL2.

Après une présentation du GANIL, le rôle et le principe de fonctionnement des détecteurs à feuilles émissives sont expliqués. Puis, la fabrication de feuilles très fines est décrite suivie des différentes techniques de mesure de l'épaisseur des feuilles. Une de ces techniques, plus précise, est explicitée et les résultats correspondant sont analysés.

## I- Présentation du GANIL

Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) est l'un des cinq plus grands laboratoires mondiaux de physique nucléaire. Sa construction débuta en 1975 et la première expérience fut réalisée en 1983 [1]. Aujourd'hui, la contribution du GANIL à la physique se fait aussi bien dans les domaines du nucléaire, de la physique atomique, de la matière condensée, que de la radiothérapie. En ce qui concerne la physique nucléaire, le GANIL permet de faire des découvertes concernant la structure des noyaux atomiques, leurs propriétés thermiques et leurs mécanismes d'interaction. Il participe aussi à la création de nouvelles espèces nucléaires n'existant pas à l'état naturel sur Terre, communément appelées des noyaux "exotiques".



*Figure 1 : Le GANIL*

De plus, un pôle scientifique pluridisciplinaire s'est progressivement construit autour du GANIL, formant le campus Jules Horowitz, et rassemblant des laboratoires tels que CIMAP (Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique), ou Cyceron, la plateforme d'imagerie biomédicale. L'enseignement scientifique et l'ingénierie se sont renforcés et des liens entre les différents secteurs de la physique sont apparus.

Actuellement, le plus gros projet du GANIL est la construction et la mise en service de SPIRAL2 (Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne de 2<sup>ème</sup> génération) qui est un accélérateur linéaire. Ce nouvel accélérateur viendra s'ajouter à SPIRAL, l'ensemble de production et d'accélération de noyaux exotiques actuellement en fonctionnement du GANIL. Il permettra d'étudier une plus grande gamme de noyaux exotiques et plus particulièrement les noyaux super-lourds.

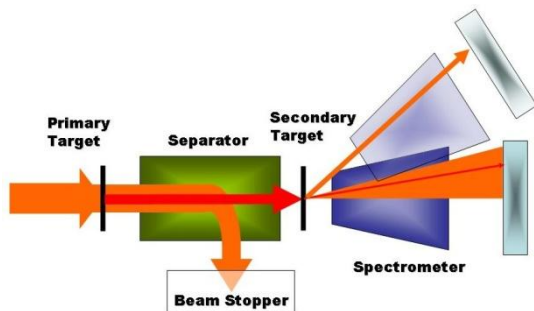
## II- $S^3$ : Super Separator Spectrometer

### 1. Présentation

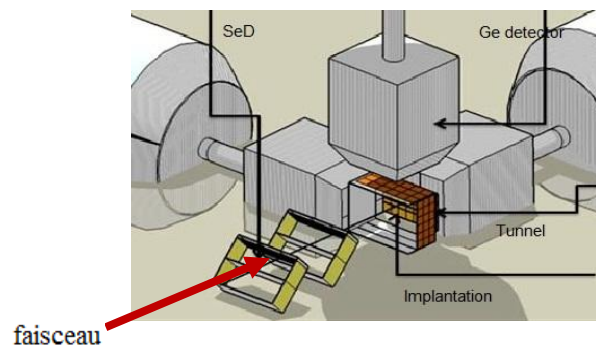
$S^3$  sera une salle d'expérience de SPIRAL2 principalement utilisée pour étudier les noyaux produits par fusion, comme par exemple les noyaux pauvres en neutrons ou les noyaux super-lourds. Mais  $S^3$  pourra aussi être utilisé dans l'étude des noyaux légers ou des noyaux riches en neutrons [2].

SPIRAL2 va produire un faisceau à partir d'une source d'ions stables, celui-ci sera accéléré par LINAG (Accélérateur Linéaire du GANIL) et envoyé sur la cible primaire de  $S^3$ . Les produits de réaction sont séparés du faisceau dans le premier étage séparateur (*Figure 2.a*). Ensuite il est possible de faire subir à ces ions de nouvelles réactions nucléaires dans la cible secondaire afin d'obtenir les noyaux exotiques à étudier, comme des noyaux super-

lourds. Ces noyaux sont finalement triés selon leur masse avant d'arriver dans le système de détection de S3. Ce système de détection permettra de reconstruire la trajectoire des noyaux, de mesurer leur énergie, leur vitesse et leur masse, et d'étudier leur mode de décroissance  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  [3].



**Figure 2.a :** Schéma de principe de S<sup>3</sup>



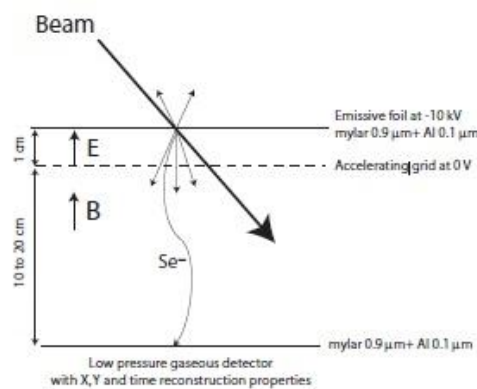
**Figure 2.b :** Schéma du système de détection

Au plan focal de détection, S<sup>3</sup> combinera donc plusieurs détecteurs (Figure 2.b) [4] :

- 2 détecteurs à feuilles émissives pour la mesure des trajectoires et de la vitesse.
- Un détecteur Silicium à pistes en bout de ligne pour la mesure de l'énergie, de la position d'implantation des noyaux et des décroissances  $\alpha$  et  $\beta$  de ces noyaux.
- Un tunnel de détecteur Silicium pour la mesure des  $\alpha$  et  $\beta$  qui sortiront du silicium d'implantation.
- Des détecteurs Germanium pour la mesure des décroissances  $\gamma$ .

## 2. Les détecteurs à feuille émissive

Ces détecteurs chargés de donner la position et le temps au passage des noyaux sont composés d'une feuille émissive à 45° et d'un détecteur basse pression (parallèle à la feuille et hors faisceau) pour les électrons secondaires [5]. L'avantage des feuilles se situe dans leur épaisseur (typiquement 0,9  $\mu\text{m}$  de mylar aluminisé). En effet les particules incidentes sont des noyaux de basse énergie et il faut un matériau très fin afin de ne pas modifier leurs caractéristiques (angle d'incidence et énergie). En traversant la feuille émissive, les ions vont lui arracher des électrons qui vont être accélérés par un champ électrique (10 kV/cm), guidés par un champ magnétique (100 Gauss) et détectés par un SeD (Secondary electrons Detector) fonctionnant à basse pression d'isobutane (4 torr) (Figure 3). La position des électrons reconstruite sur le SeD permet de déterminer leur point d'émission sur la feuille émissive. La reconstruction de la trajectoire des noyaux et le calcul de leur vitesse sont réalisés en utilisant 2 SeD l'un derrière l'autre.



**Figure 3 :** Schéma d'un détecteur à feuille émissive

### III- Réalisation de l'expérience

#### 1. Fabrication des feuilles

Les feuilles utilisées lors de ces expériences sont des feuilles de  $0,9\text{ }\mu\text{m}$  d'épaisseur en mylar ( $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ ), plus connues sous l'abréviation PET (Polyéthylène téréphtalate). Elles sont aluminisées par évaporation, i.e. recouverte d'une fine couche d'aluminium, afin de pouvoir imposer un potentiel à la feuille. On peut aussi utiliser d'autres matériaux comme du carbone ou du formvar ( $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ ). Le mylar est intéressant à utiliser car il est facile à manipuler et disponible commercialement.

Avec l'arrivée de  $\text{S}^3$  pour SPIRAL2, on sera capable d'étudier des ions plus lourds et de basse énergie. Des feuilles très fines seront donc nécessaires pour ne pas perturber la trajectoire des ions. L'épaisseur minimale des feuilles de mylar est de  $0,5\text{ }\mu\text{m}$ , ce qui est toujours trop épais dans le cadre de  $\text{S}^3$ .

Pour fabriquer des feuilles très fines ( $\leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$ ), on peut utiliser un mélange de chlorure de vinyle (90%) et d'acétate de vinyle (10%), aussi appelé VYNS ( $\text{H}_{31,37}\text{C}_{20,9}\text{O}_{1,45}\text{Cl}_9$ ). Il faut un grand bac d'eau (selon la taille voulue de la future feuille), et une armature pour la feuille qu'on ne peut pas toucher directement. On part du mélange sous forme liquide et on en dépose une ligne sur un côté d'une plaque en verre, ensuite on dépose ce même côté sur la surface de l'eau afin que le mélange se répande sur la surface en une fine couche. En utilisant simplement cette méthode, on remarque, en regardant sous incidence faible, que se sont formées des raies blanches (transparentes) et jaunes à la surface de la couche de plastique. Ces raies correspondent à différentes épaisseurs de la feuille dues à une tension entre l'eau et le mélange lorsque celui-ci avance sur l'eau, il faut donc aider le plastique. Pour cela, à l'aide d'une autre plaque on "tire" la feuille de plastique sur l'eau au fur et à mesure qu'elle avance, c'est-à-dire qu'on dégage la surface de l'eau devant le mélange, de plus cela permet d'enlever les impuretés qui pourraient se déposer sur la feuille. On se retrouve donc avec une feuille très fine à la surface de l'eau. Pour la récupérer, il faut poser très délicatement l'armature dessus, dont on aura au préalable recouvert les bords de colle ou de scotch double-face afin de fixer la feuille (l'armature doit être plus petite que la surface de plastique recouvrant l'eau), de façon à ce que la feuille ne casse pas et qu'elle soit lisse. La feuille, qui est maintenant fixée à son armature, flotte toujours à la surface de l'eau et on peut enlever le surplus de plastique autour de l'armature en le découpant le long du cadre grâce à un pinceau imprégné de solvant. Il faut maintenant récupérer la feuille, mais on ne peut pas juste prendre l'armature et soulever l'ensemble de l'eau car la feuille casserait à cause de la différence de pression entre les deux côtés de sa surface. Il faut donc immerger l'ensemble doucement, toujours pour ne pas casser la feuille. Une fois le tout immergé, il faut mettre l'armature, et donc la feuille qui y est fixée, en position verticale dans le bac, puis sortir l'ensemble de l'eau en maintenant la position verticale pour que la pression s'exerce de chaque côté de la feuille soit la même. La feuille est prête et il ne reste qu'à la laisser sécher.

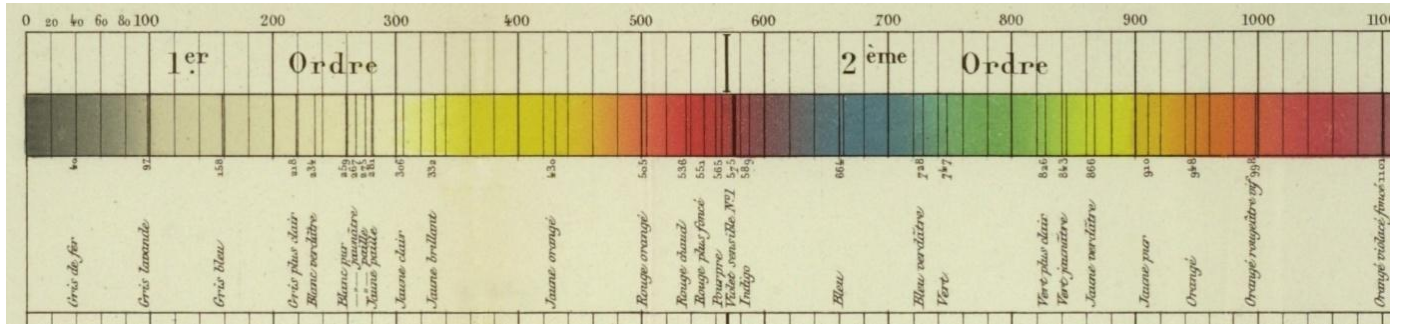
#### 2. Mesure de l'épaisseur

Il y a plusieurs façons, plus ou moins précises, de connaître l'épaisseur d'une feuille. Par exemple, on peut mesurer l'épaisseur moyenne en pesant la feuille, si on connaît précisément sa surface et la densité du matériau. Cependant, cette méthode ne permet pas de mesurer d'épaisseur locale, et ne donne donc pas d'information sur l'homogénéité de la feuille.

Une autre méthode consiste à observer les franges d'interférences créées par cette feuille très fine en lumière blanche. L'échelle des teintes de Newton-Lévy (*Figure 4*) donne, en incidence faible (proche de l'axe optique) et sous lumière blanche, la correspondance entre la couleur des franges et la différence de marche des rayons incidents. L'épaisseur de la feuille peut être déduite de la différence de marche en utilisant

$$\delta = 2ne \cos \theta \quad (1)$$

avec  $\delta$  la différence de marche,  $n$  l'indice optique du matériau,  $e$  son épaisseur et  $\theta$  l'angle d'incidence de la lumière (ici,  $\cos \theta \approx 1$ ). En reportant la couleur des franges sur l'échelle de Newton-Lévy, on obtient la différence de marche et on peut en déduire l'épaisseur de la feuille. Le problème de cette technique est qu'elle n'est pas très précise.



**Figure 4 :** Echelle des teintes de Newton-Lévy

La dernière façon de mesurer l'épaisseur des feuilles émissives est un montage expérimental qui va permettre de déterminer la perte d'énergie de particules alpha à travers une feuille. On peut en effet remonter à une épaisseur en utilisant

$$\Delta E = \rho S(E) \Delta x \quad (2)$$

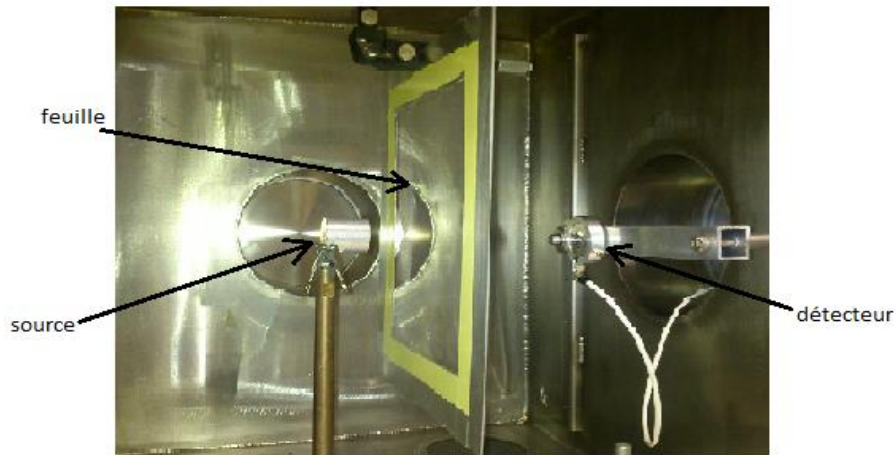
avec  $\Delta E$  la perte d'énergie des particules à travers la feuille en MeV,  $\Delta x$  l'épaisseur de la feuille en cm,  $\rho$  la masse volumique de la feuille en  $\text{g/cm}^3$ , et  $S(E) = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$  le pouvoir d'arrêt de la feuille en  $\text{MeV.cm}^2/\text{g}$ . Une table, calculée par le logiciel SRIM, du pouvoir d'arrêt de l'Hélium dans le mylar est fournie en annexe 1 pour des énergies de l'ordre du MeV.

### 3. Mise en place de l'expérience

#### a- Description

Pour réaliser l'expérience, on place, alignés dans une chambre sous vide, une source de particules alpha, une feuille, et un détecteur Si (*Figure 5*). La source est constituée de 3 radionucléides : le  $^{239}\text{Pu}$ , le  $^{241}\text{Am}$  et le  $^{244}\text{Cm}$ , qui en se désintégrant émettent les particules alpha traversant la feuille avec une certaine énergie, qui est celle de désintégration. Le  $^{239}\text{Pu}$  et le  $^{241}\text{Am}$  ont trois pics d'énergie de désintégration et le  $^{244}\text{Cm}$  en a deux, mais les pics n'ont pas tous la même intensité (*Figure 6*) et chaque radionucléide a un pic principal qui sera celui auquel on s'intéressera.





**Figure 5 : Mise en place du dispositif**

Les mesures sont réalisées sous vide ( $P=10^{-5}$  mbar) afin que les particules n'interagissent pas avec l'air. Le vide est réalisé dans la chambre grâce à une pompe primaire et une pompe secondaire qui s'enclenche à une pression de 0,5 mbar. Le détecteur Si est polarisé à une tension de 70 V et est relié à une chaîne électronique constituée d'un préamplificateur, d'un amplificateur et d'un ADC 12 bits (Analog Digital Converter – Convertisseur analogique numérique). Lorsqu'une particule  $\alpha$  atteint le détecteur, le préamplificateur envoie un signal en tension en forme de marche dont la hauteur dépend de l'énergie reçue avec une sensibilité de 10 mV/MeV. Ce signal est ensuite transmis à un amplificateur qui le met en forme avant de le transmettre à l'ADC qui mesure l'amplitude du signal.

$^{239}\text{Pu}$			$^{241}\text{Am}$		
$T_{1/2}$	$(2,411 \pm 0,003) \times 10^4$ ans		$T_{1/2}$	$(432,7 \pm 0,5)$ ans	
$\alpha$	Energie [keV]	Intensité [%]	$\alpha$	Energie [keV]	Intensité [%]
	5105,1	11,7		5388	1,4
	5143,1	15,1		5442,90	12,8
	5155,8	73,0		5485,6	85,2

$^{244}\text{Cm}$		
$T_{1/2}$	$(18,11 \pm 0,02)$ ans	
$\alpha$	Energie [keV]	Intensité [%]
	5762,70	23,6
	5804,82	76,4

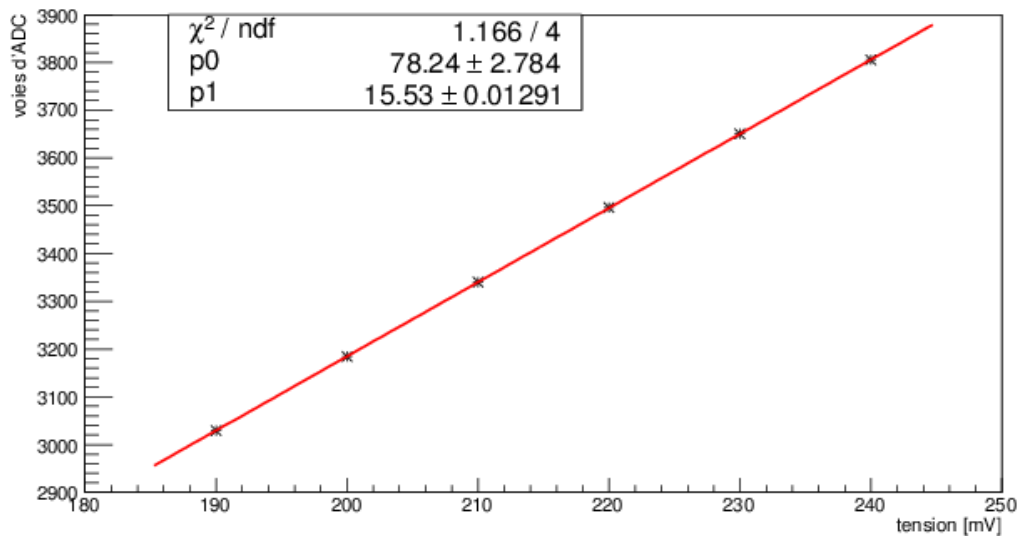
**Figure 6 : Tables des énergies de désintégration des radionucléides**

En comparant l'énergie des  $\alpha$  mesurée dans le détecteur Si sans feuille et avec une feuille, on est capable de remonter à l'épaisseur de la feuille en utilisant la formule (2).

### **b- Mesure de la linéarité**

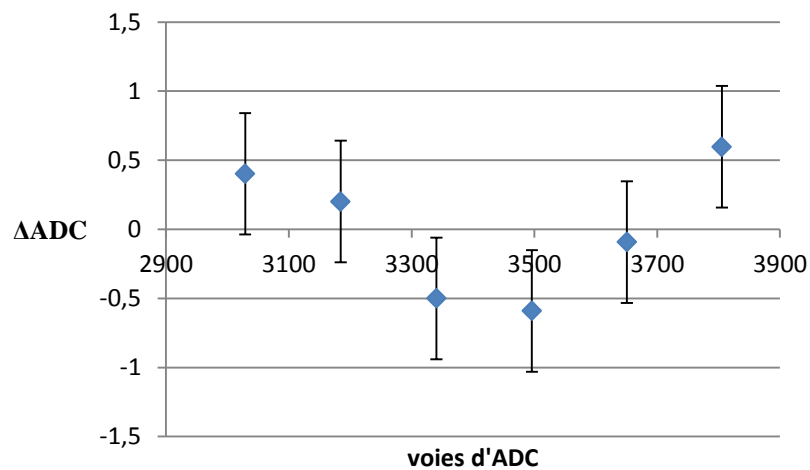
Afin de mesurer la linéarité de la chaîne électronique, on injecte des impulsions en entrée du préamplificateur grâce à un générateur de tension. La valeur ADC en bout de chaîne électronique dépend de la tension appliquée. On peut ainsi balayer tout le spectre des canaux ADC en faisant varier la tension et vérifier que la chaîne a un comportement linéaire surtout

dans le domaine de valeurs qui nous intéresse, c'est-à-dire entre 3000 et 3900 valeurs ADC (domaine dans lequel se situent nos pics  $\alpha$ ). Ainsi on obtient une courbe avec en abscisse la tension appliquée par le générateur et en ordonnée les valeurs d'ADC auxquelles la tension correspond (*Figure 7*).



**Figure 7 :** Calibration de la chaîne électronique avec ajustement par une droite ( $y=p0+p1.x$ )

On effectue un ajustement de la courbe à l'aide d'une droite sur la gamme qui nous intéresse, et on peut tracer la différence entre les valeurs expérimentales et l'ajustement en fonction des valeurs prédites par l'ajustement (*Figure 8*).



**Figure 8 :** Différence entre les mesures expérimentales et l'ajustement

Le défaut de linéarité est négligeable pour la gamme de valeurs qu'on utilise pour mesurer l'épaisseur des feuilles. En effet, la différence entre les valeurs expérimentales et l'ajustement entre 3000 et 3900 voies ADC nous donne un écart-type de 0,44 valeurs d'ADC, qui va nous servir dans les calculs d'erreur ultérieurs.

## 4. Le détecteur Silicium

Le détecteur utilisé pour réaliser l'expérience est un semi-conducteur en silicium. Un semi-conducteur possède une bande de valence et une bande de conduction, c'est-à-dire que si ses électrons se trouvent tous dans sa bande de valence, le semi-conducteur se comporte comme un isolant, alors que s'ils sont dans sa bande de conduction, il se comporte comme un conducteur. L'écart à franchir entre les deux bandes dépend du matériau du détecteur et de la température, et dans la suite, toutes les valeurs seront données pour une température de 300 K [6]. Dans le cas du silicium, l'intervalle d'énergie entre les deux bandes est de 1,115 eV. De plus, lorsqu'un électron se détache de la bande de valence pour aller dans la bande de conduction, il laisse un trou derrière lui. Ces trous sont les porteurs de charges de la bande de valence, alors que les électrons sont ceux de la bande de conduction, ainsi lorsque les électrons se déplacent sous l'action d'un champ électrique dans la bande de conduction, les trous se déplacent dans la direction opposée dans la bande de valence. L'énergie moyenne à fournir pour former une paire trou-électron est 3,62 eV. Dans un semi-conducteur intrinsèque, la concentration d'électrons et de trous est la même ( $1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ). Ces semi-conducteurs sont souvent utilisés dopés afin d'augmenter la densité de porteurs de charge.

Lorsque que les particules alpha rencontrent le semi-conducteur, ils arrachent des électrons de sa bande de valence en lui cédant de l'énergie, et sous l'influence du champ électrique appliqué au détecteur, les électrons dérivent vers les électrodes en induisant des courants, qui seront intégrés par le préamplificateur.

Le détecteur Silicium utilisé est un PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon) de marque Canberra. Sa surface est de  $150 \text{ mm}^2$  avec une fenêtre d'entrée très fine de 50 nm d'aluminium. La résolution en énergie annoncée par le fabricant est de 15 keV (FWHM) en  $\alpha$  [7].

## IV- Mesures et résultats

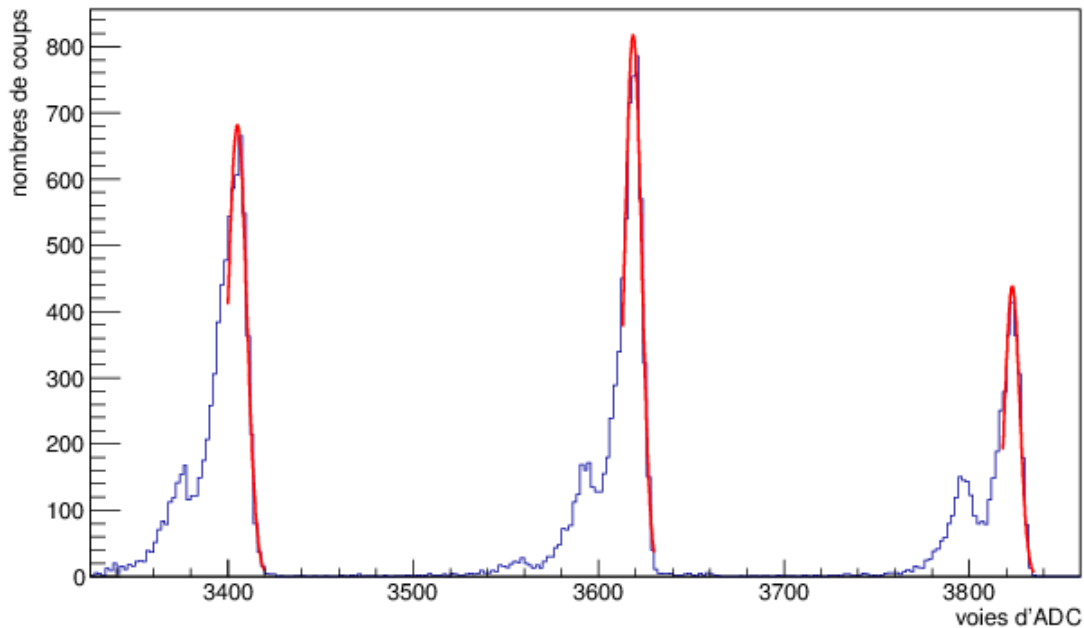
### 1. Mesure sans feuille

La première mesure à faire est celle des valeurs d'énergie délivrées par la source elle-même. Ces valeurs nous serviront de point de comparaison pour la détermination de  $\Delta \text{ADC}$ , et ensuite de  $\Delta E$ , pour enfin remonter à l'épaisseur des feuilles. On place donc la source dans la chambre face au détecteur, on fait le vide et on récupère l'histogramme des mesures, qu'on ajuste à l'aide d'une gaussienne (*Figure 9*). De cet ajustement on récupère les moyennes des pics principaux ainsi que l'erreur correspondante. On remarque que l'ajustement avec une gaussienne ne correspond pas très bien aux courbes. En effet, lorsque les particules alpha atteignent le détecteur, elles ont une énergie inférieure ou égale à celle qu'elles avaient au moment de leur émission par la source, mais jamais supérieure (due à l'épaisseur de la source, de la fenêtre d'entrée du Si,...). Il y a donc l'apparition d'une queue exponentielle sur les histogrammes de mesure, et cette queue est d'autant plus marquée que l'épaisseur de la feuille est grande. On utilise donc, pour ajuster les courbes, une convolution entre une gaussienne et une exponentielle (*Figure 10*), d'équation :

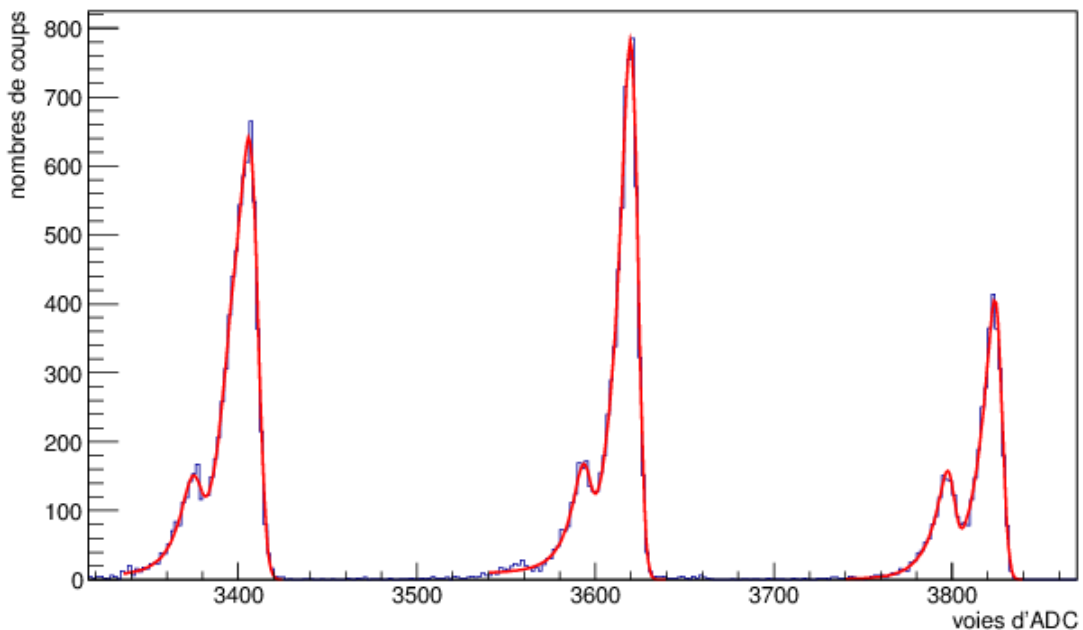
$$f(u) = \frac{A}{2\tau} \exp\left(\frac{u-\mu}{\tau} + \frac{\sigma^2}{2\tau^2}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{u-\mu}{\tau} + \frac{\sigma}{\tau}\right)\right] \quad (3)$$

avec  $\mu$  le centroïde de la gaussienne,  $\tau$  le paramètre de décroissance de l'exponentielle,  $\sigma$  la résolution de la gaussienne et  $A$  le facteur de normalisation [8]. Tous les ajustements, les

centroïdes et les erreurs sont obtenus grâce au logiciel ROOT et un exemple des programmes d'analyse utilisés est donné en annexe 2 [9].



**Figure 9 :** Histogramme de la mesure sans feuille avec l'ajustement en gaussienne



**Figure 10 :** Histogramme de la mesure sans feuille avec l'ajustement en convolution

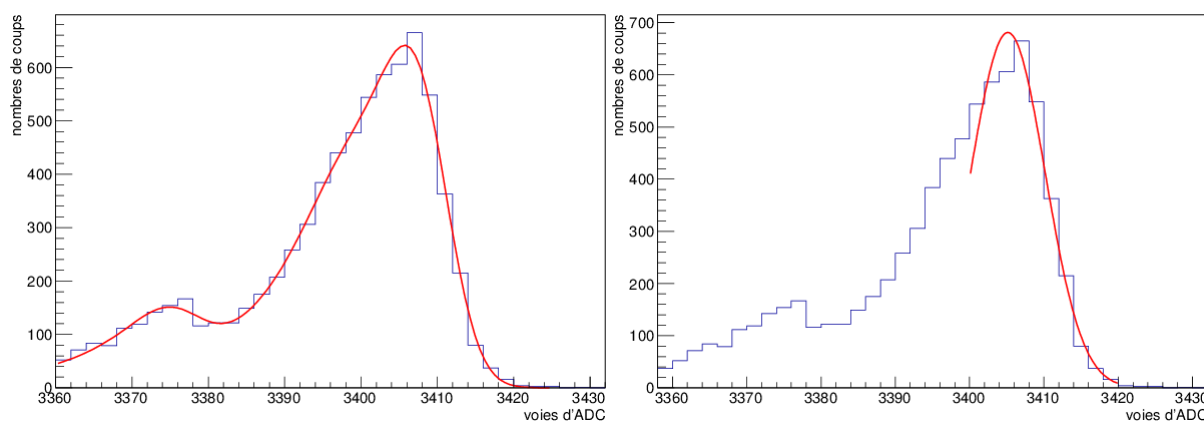
On tire donc de ces deux ajustements le centroïde de chacun des pics principaux, qui correspondent, de gauche à droite sur l'histogramme, au  $^{239}\text{Pu}$ , au  $^{241}\text{Am}$  et au  $^{244}\text{Cm}$ . On observe que les valeurs données par les deux ajustements ne sont pas les mêmes (Figure 11). En effet, en faisant l'ajustement avec la gaussienne, on ne prend pas en compte le décalage de la moyenne qu'induit la queue exponentielle, ni l'épaulement dans le pic principal du  $^{239}\text{Pu}$  dû à son pic secondaire qui est très proche en énergie de son pic principal (Figure 12). Dans la suite de ce rapport, tous les tableaux de valeurs avec leurs erreurs correspondantes seront donnés en annexe 3.

		$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$	$^{244}\text{Cm}$
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3405,9	3619,2	3823,1
	Erreur [ADC]	0,19	0,13	0,16
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3410,1	3623,3	3827,4
	Erreur [ADC]	0,27	0,15	0,18

**Figure 11 :** Tableau des moyennes des pics principaux données par les deux techniques d'ajustement pour la mesure sans feuille

L'épaulement du  $^{239}\text{Pu}$  peut fausser les résultats car il décale la moyenne du pic principal, notamment dans l'ajustement avec la convolution. C'est pourquoi on utilise les pics principaux du  $^{241}\text{Am}$  et du  $^{244}\text{Cm}$  pour calculer le facteur de conversion ADC-énergie. On prend les valeurs ADC de la mesure sans feuille données par l'ajustement en convolution car il a une meilleure précision avec un  $\chi^2$  plus proche de 1 (le  $\chi^2$  est une mesure de l'adéquation entre une série de données et une courbe par exemple). En considérant la différence d'énergie des pics principaux du  $^{241}\text{Am}$  et du  $^{244}\text{Cm}$  (Figure 6) et la différence en valeur ADC obtenue (Figure 11), on obtient un facteur de conversion de  $1,564 \pm 0.003$  keV/ADC. D'autre part, la résolution donnée par l'ajustement en convolution est de 12 keV, meilleure que celle annoncée par le constructeur du détecteur Silicium.

Les résultats que l'on va récupérer par les mesures avec des feuilles émissives seront convertis en keV grâce au facteur de conversion déterminé précédemment et on en déduira ensuite l'épaisseur des feuilles grâce au pouvoir d'arrêt S(E) déterminé par le logiciel de calcul SRIM (Figure 13) dont l'erreur est estimé à 5% par comparaison avec des valeurs fournies par des articles traitant du sujet [10,11]. Cette comparaison permettra de remonter à l'épaisseur des feuilles. On peut considérer que le pouvoir d'arrêt ne variera pas significativement jusqu'à des épaisseurs de 1  $\mu\text{m}$  (soit 1,5% de sa valeur).



**Figure 12 :** comparaison de l'épaulement du  $^{239}\text{Pu}$  avec les deux ajustements

	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$	$^{244}\text{Cm}$
Feuille de VYNS	101,25	96,86	93,15
erreur	5,06	4,84	4,66
Feuille de mylar	116,03	110,93	106,62
erreur	5,80	5,55	5,33

**Figure 13 :** Valeurs du pouvoir d'arrêt dans les matériaux utilisés [keV/ $\mu\text{m}$ ]

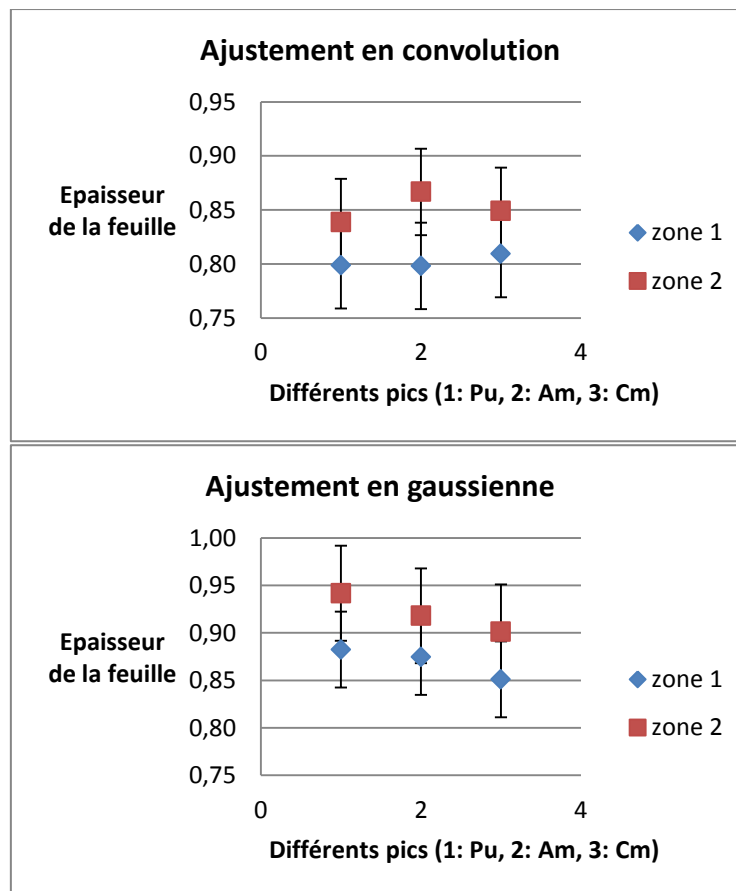
## 2. Mesures de l'épaisseur d'une feuille de $0,9 \mu\text{m}$

### a- Mesure en masse

On pèse une feuille de  $0,9 \mu\text{m}$  de mylar (valeur donnée par le fabricant avec une erreur de 20%) afin de déterminer sa masse. Le mylar a une masse volumique de  $1,397 \text{ g/cm}^3$  et la feuille utilisée a une surface de  $7 \pm 0,1 \text{ cm} \times 8 \pm 0,1 \text{ cm}$  et une masse de  $6,8 \pm 0,1 \text{ mg}$ . Elle a donc une épaisseur moyenne de  $0,87 \pm 0,04 \mu\text{m}$ , ce qui rentre dans la barre d'erreur donnée par le fabricant. Mais on peut voir en incidence faible que la feuille a différentes couleurs (rose ou vert), ce qui signifie qu'elle n'est pas homogène.

### b- Mesure avec les pertes d'énergie de particules $\alpha$

On mesure la perte d'énergie de particule  $\alpha$  à travers la feuille afin de remonter à une épaisseur. Pour cela, on la place entre la source et le détecteur dans la chambre sous vide et on fait l'expérience en deux points distincts de cette feuille. On voit que les particules ne perdent pas la même énergie dans les deux zones. Cela confirme que la feuille n'est pas homogène. Pour déterminer son épaisseur, on part du  $\Delta\text{ADC}$  qu'on trouve entre la mesure sans feuille et la mesure avec feuille. Ensuite, on utilise le facteur de conversion déterminé auparavant pour avoir la perte d'énergie des particules dans la feuille. Et on utilise finalement la formule (2) pour retrouver la valeur de l'épaisseur de la feuille selon les pics avec l'ajustement en gaussienne et en convolution afin de comparer leur précision (*Figure 14*).

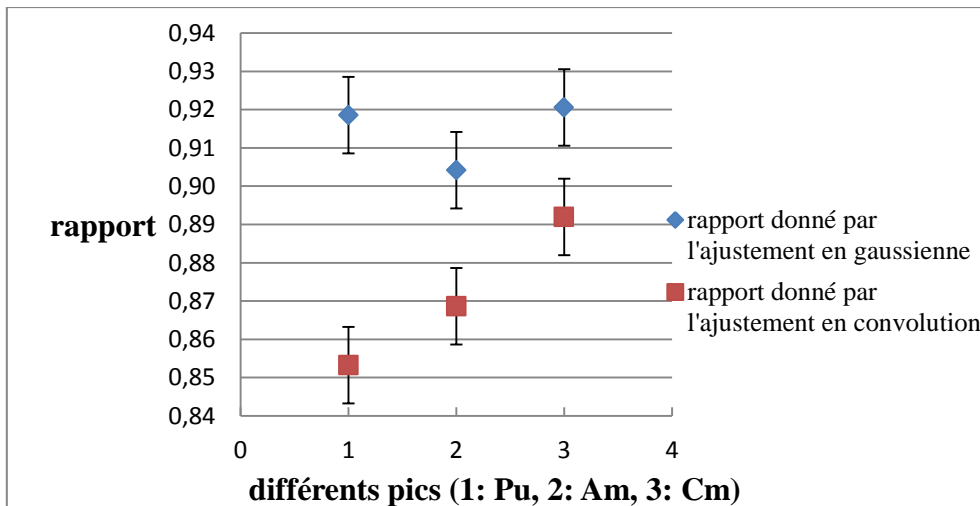


**Figure 14 :** Epaisseur d'une feuille donnée à  $0,9 \mu\text{m}$  en deux points distincts de celle-ci en fonction des radionucléides

Les erreurs sur les  $\Delta\text{ADC}$  sont calculées à partir des erreurs fournies par ROOT sur les moyennes des pics des radionucléides, ainsi qu'à partir de l'erreur déterminée auparavant sur la chaîne électronique. On effectue un calcul d'exemple sur le pic du  $^{241}\text{Am}$  en prenant l'ajustement en convolution sur la zone 1. On a une erreur de chaîne électronique de 0,44 ADC, une erreur sur la mesure sans feuille de 0,15 ADC et une erreur sur la mesure avec la feuille de 0,38 ADC, on obtient une erreur de  $0,74 = \sqrt{2 \times 0,44^2 + 0,15^2 + 0,38^2}$ . On compte l'erreur sur la chaîne électronique deux fois car elle rentre en compte sur le pic mesuré sans feuille et sur celui mesuré avec feuille. Ensuite on calcule l'erreur sur  $\Delta E$  en multipliant l'erreur sur le  $\Delta\text{ADC}$  par le facteur de conversion (on ne prend pas en compte l'erreur de 0.003 keV/ADC du facteur de conversion dans nos calcul car il est négligeable par rapport aux autres erreurs). On obtient une erreur de 1,2 keV sur le  $\Delta E$  et on en déduit l'erreur sur l'épaisseur, en prenant en compte l'erreur sur le pouvoir d'arrêt, et on obtient une erreur de 0,04  $\mu\text{m}$  pour une épaisseur de 0,80  $\mu\text{m}$ .

On remarque que les ajustements (gaussienne et convolution) ne donnent pas la même épaisseur de feuille pour une même zone ciblée. Cela s'explique par le fait que la feuille est relativement épaisse. Les pertes en énergie des particules  $\alpha$  sont grandes, et la queue exponentielle est plus accentuée. Cette queue exponentielle influence les moyennes des pics principaux en "avalant" les pics secondaires. Dans le cas de la convolution, elle décale les  $\Delta\text{ADC}$  vers des valeurs plus petites, ce qui correspond à des épaisseurs plus faibles des feuilles. Dans le cas de la gaussienne, la non-prise en compte de l'exponentielle fait que l'on a des valeurs plus grandes de  $\Delta\text{ADC}$  et donc des épaisseurs plus grandes. La convolution donne donc une épaisseur plus faible que la gaussienne. Si on compare ces valeurs à l'épaisseur moyenne de la feuille déduite de sa masse, on s'aperçoit que les barres d'erreurs se recoupent. Donc même si ces ajustements ne peuvent pas nous donner une valeur exacte de l'épaisseur de la feuille car elle est trop épaisse, ils nous permettent de l'évaluer. On remarquera tout de même que l'ajustement en convolution donne une épaisseur plus homogène pour les trois radionucléides que l'ajustement en gaussienne.

### c- Mesure de pertes d'énergie pour une feuille à 30°



**Figure 15 :** Rapport entre les  $\Delta\text{ADC}$  des mesures avec et sans angle pour une feuille de 0,9  $\mu\text{m}$

Avec un angle de 30° sur la feuille, l'épaisseur traversée par les particules est de 1,04  $\mu\text{m}$ , donc on doit avoir un rapport  $\cos(\pi/6) = 0,87$  entre les  $\Delta\text{ADC}$  des mesures avec et sans angle pour chaque ajustement (Figure 15). On remarque que, pour l'ajustement en convolution, le rapport augmente pour des pics d'énergie plus hauts, mais les valeurs sont

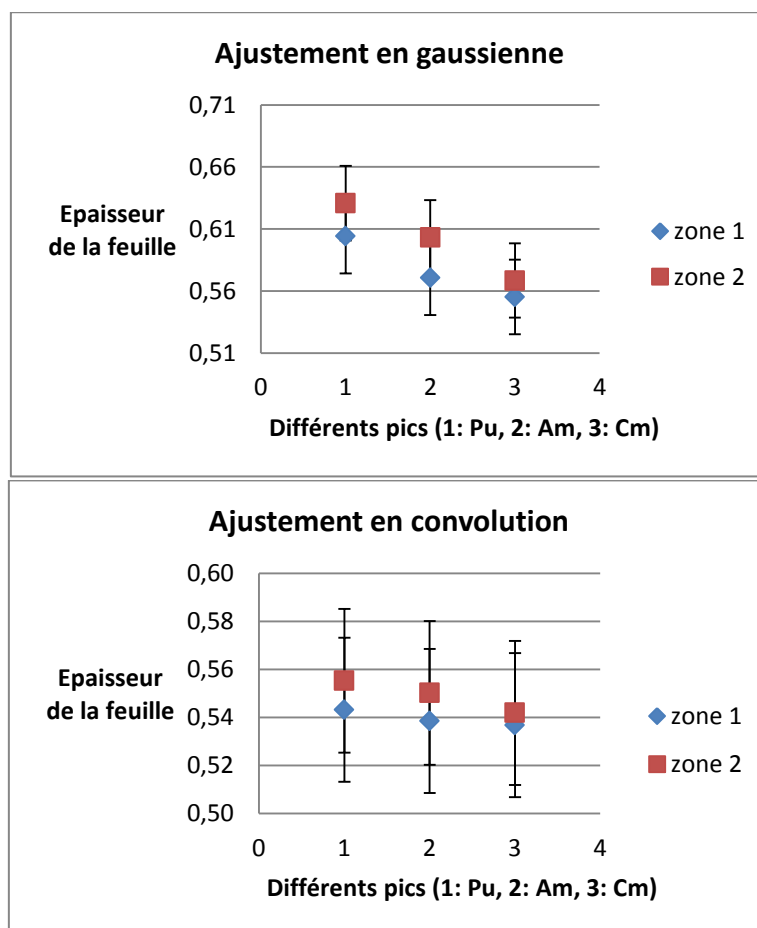
plus proche de 0,87 que l'ajustement en gaussienne. En effet, ce dernier donne des valeurs trop élevées du rapport dû à un manque de précision de l'ajustement. La différence de  $\frac{dE}{dx}$  entre chaque radionucléide explique le fait que le rapport, avec l'ajustement en convolution, soit proportionnel à l'énergie. Ceci confirme la bonne précision de l'ajustement en convolution.

### 3. Mesures de l'épaisseur d'une feuille de 0,5 $\mu\text{m}$

#### a- Mesure en masse

On pèse une feuille de 0,5  $\mu\text{m}$  d'épaisseur (valeur donnée par le fabricant avec une erreur de 20%) et de surface  $36 \pm 0,1 \text{ cm} \times 15 \pm 0,1 \text{ cm}$ . Elle a une masse de  $43,2 \pm 0,2 \text{ mg}$  et une masse volumique de  $1,397 \text{ g/cm}^3$ , et donc une épaisseur de  $0,57 \pm 0,03 \mu\text{m}$ . Cela correspond à l'erreur donnée par le fabricant. De plus, étant données les couleurs de la feuille en incidence faible, l'épaisseur semble homogène.

#### b- Mesure avec les pertes d'énergie de particules $\alpha$



**Figure 16 :** Epaisseur d'une feuille donnée à 0,5  $\mu\text{m}$  en deux points distincts de celle-ci en fonction des radionucléides

On refait les mêmes calculs que pour la feuille de 0,9  $\mu\text{m}$  afin de retrouver l'épaisseur de la feuille (Figure 16). On voit que l'ajustement en convolution est plus homogène que celui en gaussienne et il nous donne une épaisseur de  $0,54 \pm 0,03 \mu\text{m}$  pour la zone 1 de la feuille et une moyenne de  $0,55 \pm 0,04 \mu\text{m}$  d'épaisseur sur les trois pics pour la zone 2. Ces



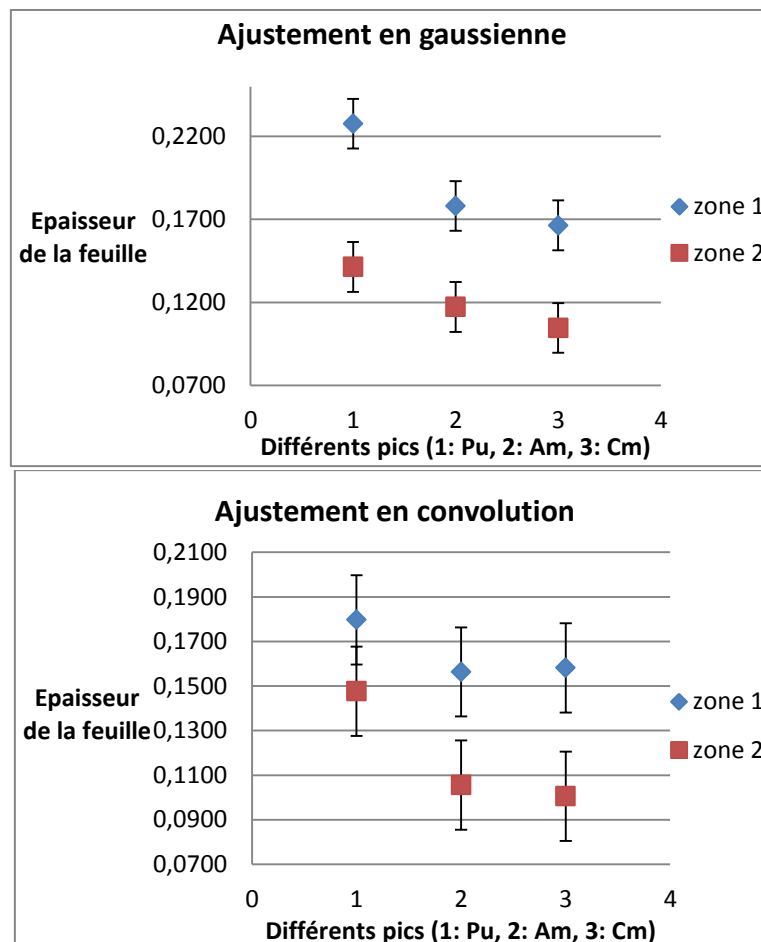
valeurs correspondent, dans les barres d'erreur, à l'épaisseur moyenne déterminée auparavant grâce à la masse de la feuille. Cela semble confirmer le fait que l'ajustement en convolution est d'autant plus précis que les feuilles sont fines. En revanche l'ajustement en gaussienne semble encore très décalé.

#### 4. Mesures de l'épaisseur de feuilles de moins de 0,2 $\mu\text{m}$ d'épaisseur

##### a- Mesure d'une feuille fine avec des franges visibles

On commence les mesures avec les feuilles de moins de 0,2  $\mu\text{m}$  en VYNS fabriquées avec la technique expliquée auparavant. Le but de ces mesures est de trouver l'épaisseur de ces feuilles très fines en comparant les pertes d'énergie des particules  $\alpha$  dans les feuilles et les valeurs données par SRIM.

On fait d'abord les mesures avec une feuille sur laquelle on peut voir des franges jaunes et incolores à intervalles réguliers. Cela est le signe que la feuille n'a pas une épaisseur homogène selon l'échelle de Newton-Lévy. On peut donc prédire que la feuille sera plus épaisse au niveau de ses franges jaunes que de ses franges incolores.



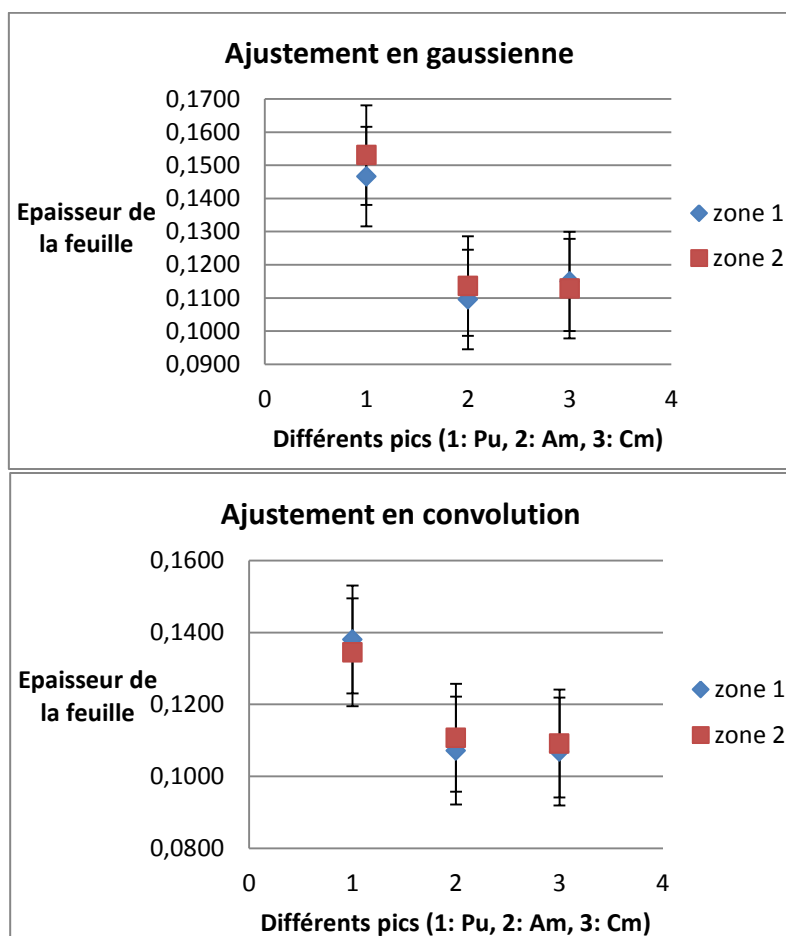
**Figure 17 :** Epaisseur d'une feuille très fine en deux points distincts de celle-ci en fonction des radionucléides

On constate que l'épaisseur donnée par le pic du  $^{239}\text{Pu}$  est décalé. Cela s'explique par l'épaulement sur son pic principal qui décale les moyennes des ajustements. Avec l'ajustement en gaussienne, on remarque que les épaisseurs ne sont pas les mêmes pour une même zone, ce qui signifie que l'ajustement donne des écarts trop grand entre les pics.

L'ajustement en convolution est donc plus précis mais les valeurs de moyenne du  $^{239}\text{Pu}$  sont à mettre de côté à cause de son épaulement. On récupère donc deux valeurs d'épaisseur : la zone jaune (zone 1) a une épaisseur de  $0,16 \pm 0,01 \mu\text{m}$  et la zone incolore (zone 2) a une épaisseur de  $0,10 \pm 0,006 \mu\text{m}$ .

### b- Mesure d'une feuille fine sans franges visibles

On fait de nouvelles mesures, mais avec une feuille plus homogène, toujours en vyns et fabriquée grâce à la même technique que précédemment. On mesure la perte d'énergie en ADC en deux points distincts de cette feuille et on retrouve l'épaisseur de la feuille grâce à la formule (2) et aux valeurs de SRIM (*Figure 18*).



**Figure 18 :** Epaisseur d'une feuille très fine en deux points distincts de celle-ci en fonction des radionucléides

Les résultats montrent que la feuille est bien homogène, mais le pic principal du  $^{239}\text{Pu}$  est décalé par rapport aux deux autres pics et cela pour les deux ajustements. La mesure est faussée par l'épaulement du  $^{239}\text{Pu}$ , et comme précédemment, on ne le prend pas en compte.

On effectue les mêmes calculs qu'auparavant afin de retrouver l'épaisseur de la feuille et on remarque que, sans prendre en compte le  $^{239}\text{Pu}$ , les deux ajustements donnent les mêmes résultats avec approximativement la même erreur, c'est-à-dire une épaisseur de  $0,11 \pm 0,007 \mu\text{m}$ . Cela s'explique par le fait que la feuille est bien plus homogène que celles étudiées auparavant et bien plus fine, donc les ajustements sont plus précis avec des barres d'erreur plus faibles et un résultat équivalent entre les deux ajustements.

## Conclusion

On a donc pu constater qu'il était possible de fabriquer des feuilles très fines, d'en estimer l'épaisseur en les pesant ou en utilisant l'échelle Newton-Lévy, mais la technique la plus fiable et précise reste l'utilisation des pertes d'énergie de particules  $\alpha$  à travers les feuilles. En revanche, on ne prend pas en compte les résultats donnés par le  $^{239}\text{Pu}$  à cause de son pic secondaire trop proche du pic principal, et on remarque que l'ajustement par la convolution entre une exponentielle et une gaussienne est en général meilleur. L'homogénéité des feuilles est un paramètre important pour les détecteurs, la méthode en convolution va permettre de vérifier cette homogénéité.

Le problème principal qui se pose pour utiliser ces feuilles dans des détecteurs est qu'il faut les aluminiser, c'est-à-dire qu'il faut les recouvrir d'une fine couche d'aluminium afin de pouvoir appliquer un champ électrique aux électrons arrachés de la feuille. Or, les feuilles très fines sont très fragiles et risquent de se casser lors de l'aluminisation si on met une épaisseur trop grande d'aluminium sur leur surface. L'homogénéité et l'aluminisation des feuilles très fines vont être les prochains paramètres à perfectionner avant d'entamer les expériences avec des noyaux super-lourds sur  $S^3$ .

## Annexe 1 : Table de calcul du pouvoir d'arrêt de l'Hélium dans le mylar par SRIM

On a utilisé le logiciel SRIM pour avoir des valeurs théoriques de la perte d'énergie des particules  $\alpha$  dans les matériaux que l'on a utilisés pour les expériences et notamment le mylar. On donne donc ici une table des valeurs du pouvoir d'arrêt de l'Hélium dans le mylar en fonction de l'énergie des particules  $\alpha$  incidentes. La plage d'énergie intéressante pour nous est entre 5 et 6 MeV et les valeurs du pouvoir d'arrêt que l'on utilise sont celles données par  $\frac{dE}{dx}$  Elec.

```
=====
Calculation using SRIM-2006
SRIM version ---> SRIM-2008.04
Calc. date ---> juin 07, 2012
=====
```

Disk File Name = SRIM Outputs\Helium in Mylar

Ion = Helium [2], Mass = 4,003 amu

Target Density = 1,3970E+00 g/cm3 = 9,6311E+22 atoms/cm3

===== Target Composition =====

Atom Name	Atom Numb	Atomic Percent	Mass Percent
H	1	036,36	004,20
C	6	045,45	062,50
O	8	018,18	033,30

=====

Bragg Correction = -0,83%

Stopping Units = MeV / (mg/cm2)

See bottom of Table for other Stopping units

Ion Energy	dE/dx Elec.	dE/dx Nuclear	Projected Range	Longitudinal Straggling	Lateral Straggling
2,00 MeV	1,489E+00	1,311E-03	8,44 um	2914 A	2871 A
2,25 MeV	1,400E+00	1,184E-03	9,68 um	3433 A	3045 A
2,50 MeV	1,321E+00	1,081E-03	10,99 um	3936 A	3228 A
2,75 MeV	1,251E+00	9,950E-04	12,39 um	4433 A	3422 A
3,00 MeV	1,187E+00	9,224E-04	13,85 um	4929 A	3627 A
3,25 MeV	1,130E+00	8,602E-04	15,40 um	5425 A	3842 A
3,50 MeV	1,078E+00	8,063E-04	17,02 um	5924 A	4069 A
3,75 MeV	1,030E+00	7,591E-04	18,71 um	6428 A	4308 A
4,00 MeV	9,874E-01	7,174E-04	20,48 um	6937 A	4557 A
4,50 MeV	9,119E-01	6,470E-04	24,25 um	8816 A	5091 A
5,00 MeV	8,477E-01	5,898E-04	28,32 um	1,06 um	5669 A
5,50 MeV	7,925E-01	5,424E-04	32,68 um	1,23 um	6291 A
6,00 MeV	7,445E-01	5,023E-04	37,34 um	1,41 um	6956 A

6,50 MeV	7,024E-01	4,681E-04	42,28 um	1,58 um	7663 A
7,00 MeV	6,651E-01	4,384E-04	47,52 um	1,75 um	8412 A
8,00 MeV	6,019E-01	3,895E-04	58,82 um	2,39 um	1,00 um
9,00 MeV	5,579E-01	3,509E-04	71,17 um	2,97 um	1,18 um

---

Multiply Stopping by      for Stopping Units

1,3970E+01	eV / Angstrom
1,3970E+02	keV / micron
1,3970E+02	MeV / mm
1,0000E+00	keV / (ug/cm2)
1,0000E+00	MeV / (mg/cm2)
1,0000E+03	keV / (mg/cm2)
1,4505E+01	eV / (1E15 atoms/cm2)
1,2487E+00	L.S.S. reduced units

---

(C) 1984,1989,1992,1998,2008 by J.P. Biersack and J.F. Ziegler

## Annexe 2 : Programmes utilisés pour faire les ajustements

Afin de tracer les histogrammes des mesures et de faire les ajustements en gaussienne et en convolution sur ceux-ci, on a créé les programmes ci-dessous :

- Ajustement en gaussienne :

```
using namespace std;

#include "stdio.h"
#include <TCanvas.h>
#include <TF1.h>
#include <TH1.h>
#include <TH2.h>
#include <TGraph.h>
#include <TTree.h>
#include <TStyle.h>
#include <TFile.h>
#include <TMath.h>
#include "stdlib.h"
#include "string.h"

void adc_gaus(char* Filename1) // Filename1: arbre root
{
    TString str;
    const int nbin=548;
    //création de l'histogramme entre 3000 et 4096 bins
    TH1F* h_q=new TH1F("h_q","h_q",nbin,3000,4096);

    //lecture du TTree
    str="C:\\root\\macros\\";
    str+=Filename1;

    TFile *f=new TFile(str);
    TTree *t=(TTree*)f->Get("AutoTree");

    unsigned short q;

    t->SetBranchAddress("ADC_VOIE_2",&q);

    //comptage du nombre d'évènements
    int Nevt=50000;
    int nevent=t->GetEntries();
    if(nevent<Nevt) Nevt=nevent;
    cout<<"nombre d'evts: "<<Nevt<<endl;

    //analyse pour 2 signaux
    for (int evt=0 ; evt<Nevt ; evt++)
    {
        t->GetEntry(evt);
        if((float)q>3000)
            h_q->Fill((float)q);
    }

    //dessin de l'histogramme
```

```

TCanvas *ct1=new TCanvas();
h_q->Draw();

//exemple d'ajustement de h_q par des gaussiennes
Double_t par[9];
TF1 *f1=new TF1("f1","gaus",3400,3420); //création de la //gaussienne de 3400 à 3420 bins
TF1 *f2=new TF1("f2","gaus",3613,3630);
TF1 *f3=new TF1("f3","gaus",3818,3835);

//dessin des ajustements
h_q->Fit(f1,"R");
h_q->Fit(f2,"R+");
h_q->Fit(f3,"R+");

}

```

- Ajustement en convolution :

```

using namespace std;

#include <stdio.h>
#include <TCanvas.h>
#include <TF1.h>
#include <TH1.h>
#include <TH2.h>
#include <TGraph.h>
#include <TTree.h>
#include <TStyle.h>
#include <TFile.h>
#include <TMath.h>
#include "stdlib.h"
#include "string.h"

//déclaration de l'ajustement et de ses paramètres
double fitconv(double*,double*);
double fitconv2(double*,double*);
double fitconv3(double*,double*);

void adc_fit(char* Filename1) // Filename1: arbre root
{
TString str;
const int nbin=548;
//création de l'histogramme
TH1F* h_q=new TH1F("h_q","h_q",nbin,3000,4096);

//lecture du TTree
str="C:\\root\\macros\\";
str+=Filename1;

TFile *f=new TFile(str);
TTree *t=(TTree*)f->Get("AutoTree");

unsigned short q;

t->SetBranchAddress("ADC_VOIE_2",&q);

```

```

//comptage du nombre d'évènements
int Nevt=50000;
int nevent=t->GetEntries();
if(nevent<Nevt) Nevt=nevent;
cout<<"nombre d'evts: "<<Nevt<<endl;
//analyse pour 2 signaux
for (int evt=0 ; evt<Nevt ; evt++)
{
    t->GetEntry(evt);
    // cout<<tacl<<endl;
    if((float)q>3000)
        h_q->Fill((float)q);
}

//dessin de l'histogramme
TCanvas *ct1=new TCanvas();
h_q->Draw();

//exemple d'ajustement de h_q par des convolutions
Double_t par[26];

TF1 *f1=new TF1("f1",fitconv3,3335,3425,10);
TF1 *f2=new TF1("f2",fitconv2,3540,3640,8);
TF1 *f3=new TF1("f3",fitconv2,3740,3840,8);

//on fixe des paramètres de départ pour faire l'ajustement
f1->SetParameters(100,3375,5,8,2000,2500,3399,11000,3410,0.7);
f1->SetParLimits(0,10,1000);
f1->SetParLimits(1,3370,3380);
f1->SetParLimits(2,2,7);
f1->SetParLimits(3,1,10);
f1->SetParLimits(4,1000,3000);
f1->SetParLimits(5,1000,5000);
f1->SetParLimits(6,3398,3401);
f1->SetParLimits(7,10000,15000);
f1->SetParLimits(8,3408,3415);
f1->SetParLimits(9,0.4,2);

f2->SetParameters(100,3593,4,5,2000,13000,3623,1);
f2->SetParLimits(0,10,1000);
f2->SetParLimits(1,3585,3600);
f2->SetParLimits(2,2,6);
f2->SetParLimits(3,1,10);
f2->SetParLimits(4,1000,3000);
f2->SetParLimits(5,10000,15000);
f2->SetParLimits(6,3622,3624);
f2->SetParLimits(7,0.5,2);

f3->SetParameters(100,3800,4,2,2000,7000,3827,1);
f3->SetParLimits(0,45,1000);
f3->SetParLimits(1,3798,3801);
f3->SetParLimits(2,2,6);
f3->SetParLimits(3,1,10);
f3->SetParLimits(4,1000,3000);
f3->SetParLimits(5,5000,8000);
f3->SetParLimits(6,3826,3829);

```



```

f3->SetParLimits(7,0.5,2);

//dessin des ajustements
h_q->Fit(f1,"R");
h_q->Fit(f2,"R+");
h_q->Fit(f3,"R+");

}

//fonctions définissant l'ajustement en convolution :

//cas où le pic est simple
double fitconv(double *x, double *param)
{
double val;

val = param[4]*((1.-param[5])/(2.*param[0])*exp( (x[0]-
param[1])/param[0]+param[2]*param[2]/(2*param[0]*param[0]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[1]+param[2]*param[2]/param[0])/(sqrt(2)*param[2]))+
param[5]/(2.*param[3])*exp((x[0]-param[1])/param[3]+param[2]*param[2]/(2*param[3]*param[3]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[1]+param[2]*param[2]/param[3])/(sqrt(2)*param[2])));

return val;
}

//cas où il y a un pic principal et un secondaire
double fitconv2(double *x, double *param)
{
double val;

val=param[4]*((1.-param[7])/(2.*param[0])*exp((x[0]-
param[1])/param[0]+param[2]*param[2]/(2*param[0]*param[0]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[1]+param[2]*param[2]/param[0])/(sqrt(2)*param[2]))+
param[7]/(2.*param[3])*exp((x[0]-param[1])/param[3]+param[2]*param[2]/(2*param[3]*param[3]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[1]+param[2]*param[2]/param[3])/(sqrt(2)*param[2])))+
param[5]*((1.-param[7])/(2.*param[0])*exp((x[0]-
param[6])/param[0]+param[2]*param[2]/(2*param[0]*param[0]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[6]+param[2]*param[2]/param[0])/(sqrt(2)*param[2]))+
param[7]/(2.*param[3])*exp((x[0]-param[6])/param[3]+param[2]*param[2]/(2*param[3]*param[3]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[6]+param[2]*param[2]/param[3])/(sqrt(2)*param[2])));

return val;
}

//cas où il y a aussi un pic tertiaire
double fitconv3(double *x, double *param)
{
double val;

val=param[4]*((1.-param[9])/(2.*param[0])*exp((x[0]-
param[1])/param[0]+param[2]*param[2]/(2*param[0]*param[0]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[1]+param[2]*param[2]/param[0])/(sqrt(2)*param[2]))+
param[9]/(2.*param[3])*exp((x[0]-param[1])/param[3]+param[2]*param[2]/(2*param[3]*param[3]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[1]+param[2]*param[2]/param[3])/(sqrt(2)*param[2])))+
param[5]*((1.-param[9])/(2.*param[0])*exp((x[0]-
param[6])/param[0]+param[2]*param[2]/(2*param[0]*param[0]))*

```

```

TMath::Erfc((x[0]-param[6]+param[2]*param[2]/param[0])/(sqrt(2)*param[2]))+
param[9]/(2.*param[3])*exp((x[0]-param[6])/param[3]+param[2]*param[2]/(2*param[3]*param[3]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[6]+param[2]*param[2]/param[3])/(sqrt(2)*param[2]))+
param[7]*((1.-param[9])/(2.*param[0])*exp((x[0]-
param[8])/param[0]+param[2]*param[2]/(2*param[0]*param[0]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[8]+param[2]*param[2]/param[0])/(sqrt(2)*param[2]))+
param[9]/(2.*param[3])*exp((x[0]-param[8])/param[3]+param[2]*param[2]/(2*param[3]*param[3]))*
TMath::Erfc((x[0]-param[8]+param[2]*param[2]/param[3])/(sqrt(2)*param[2]));

return val;
}

```

On remarque que pour le programme concernant l'ajustement en convolution, il a fallu définir entièrement la fonction et fixer des paramètres de départ car elle n'existait pas dans la bibliothèque de ROOT, contrairement à la gaussienne. Les paramètres de départ fixés permettent au logiciel ROOT d'avoir un point de départ à ses calculs d'ajustement pour ensuite retourner les bonnes valeurs, notamment en ce qui concerne le centroïde des convolutions.

### Annexe 3 : Tableaux des différentes mesures

On donne dans cette annexe les tableaux de valeurs qui correspondent aux différentes mesures décrites précédemment. On a donc dans chaque tableau les valeurs des deux ajustements avec pour chacun les moyennes en ADC des pics, les pertes correspondantes en ADC et en énergie, puis l'épaisseur déduite de la feuille, le tout avec les valeurs d'erreur.

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3340,4 ±0,28	3557,2 ±0,24	3765,1 ±0,33
	ΔADC	-65,5 ±0,71	-62,0 ±0,68	-58,0 ±0,72
	ΔE [keV]	-102 ±1,11	-97 ±1,06	-91 ±1,13
	Epaisseur [μm]	0,88 ±0,05	0,87 ±0,04	0,85 ±0,04
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3351 ±1,64	3566,7 ±0,38	3772,3 ±0,50
	ΔADC	-59 ±1,77	-56,6 ±0,74	-55,2 ±0,82
	ΔE [keV]	-97 ±1,36	-96 ±1,24	-91 ±1,55
	Epaisseur [μm]	0,84 ±0,04	0,87 ±0,04	0,85 ±0,04

**Tableau 1.a :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de 0,9 μm en un point de celle-ci

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3336,0 ±0,35	3554,1 ±0,35	3761,7 ±0,84
	ΔADC	-69,9 ±0,74	-65,1 ±0,72	-61 ±1,1
	ΔE [keV]	-109 ±1,16	-102 ±1,13	-95 ±1,72
	Epaisseur [μm]	0,94 ±0,05	0,92 ±0,05	0,89 ±0,05
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3347,9 ±0,54	3561,8 ±0,46	3769,6 ±0,76
	ΔADC	-62,2 ±0,87	-61,5 ±0,79	-57,8 ±0,99
	ΔE [keV]	-97 ±1,36	-96 ±1,24	-91 ±1,55
	Epaisseur [μm]	0,84 ±0,04	0,87 ±0,04	0,85 ±0,04

**Tableau 1.b :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de 0,9 μm en un autre point de celle-ci

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3329,8 ±0,23	3547,2 ±0,22	3756,4 ±0,29
	ΔADC	-76,1 ±0,69	-72,0 ±0,67	-66,7 ±0,70
	ΔE [keV]	-119 ±1,08	-113 ±1,05	-104 ±1,09
	Epaisseur [μm]	1,03 ±0,05	1,02 ±0,05	0,98 ±0,05
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3337,2 ±0,26	3552,5 ±0,81	3762,6 ±0,47
	ΔADC	-72,9 ±0,72	-71 ±1,03	-64,8 ±0,80
	ΔE [keV]	-114 ±1,13	-111 ±1,61	-101 ±1,25
	Epaisseur [μm]	0,98 ±0,05	1,00 ±0,05	0,95 ±0,05

**Tableau 1.c :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de 0,9 μm avec un angle de 30°

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3361,1 ±0,21	3578,7 ±0,18	3785,2 ±0,26
	ΔADC	-44,8 ±0,68	-40,5 ±0,66	-37,9 ±0,69
	ΔE [keV]	-70 ±1,06	-63 ±1,03	-59 ±1,08
	Epaisseur [μm]	0,60 ±0,03	0,57 ±0,03	0,56 ±0,03
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3369,8 ±0,46	3585,1 ±0,27	3790,8 ±0,10
	ΔADC	-40,3 ±0,82	-38,2 ±0,69	-36,6 ±0,65
	ΔE [keV]	-63 ±1,28	-60 ±1,08	-57 ±1,02
	Epaisseur [μm]	0,54 ±0,03	0,54 ±0,03	0,54 ±0,03

**Tableau 2.a :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de 0,5 μm en un point de celle-ci

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3359,1 ±0,41	3576,4 ±0,28	3784,3 ±0,48
	ΔADC	-46,8 ±0,77	-42,8 ±0,69	-38,8 ±0,80
	ΔE [keV]	-73 ±1,20	-67 ±1,08	-61 ±1,25
	Epaisseur [μm]	0,63 ±0,03	0,60 ±0,03	0,57 ±0,03
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3369 ±2,81	3584,3 ±0,49	3790,5 ±0,38
	ΔADC	-41 ±2,89	-39,0 ±0,80	-36,9 ±0,75
	ΔE [keV]	-64 ±4,52	-61 ±1,25	-58 ±1,17
	Epaisseur [μm]	0,56 ±0,05	0,55 ±0,03	0,54 ±0,03

**Tableau 2.b :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de 0,5 μm en un autre point de celle-ci

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3391,2 ±0,26	3608,2 ±0,21	3813,2 ±0,33
	ΔADC	-14,7 ±0,70	-11,0 ±0,67	-9,9 ±0,72
	ΔE [keV]	-23 ±1,09	-17 ±1,05	-15 ±1,13
	Epaisseur [μm]	0,23 ±0,02	0,18 ±0,01	0,17 ±0,01
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3398 ±1,27	3613,6 ±0,27	3818,0 ±0,10
	ΔADC	-12 ±1,44	-9,7 ±0,69	-9,4 ±0,65
	ΔE [keV]	-18 ±2,25	-15 ±1,08	-15 ±1,02
	Epaisseur [μm]	0,18 ±0,02	0,16 ±0,01	0,16 ±0,01

**Tableau 3.a :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de moins de 0,2 μm avec des franges visibles en un point de celle-ci

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3396,7 ±0,15	3612,0 ±0,11	3816,9 ±0,17
	ΔADC	-9,2 ±0,67	-7,3 ±0,65	-6,3 ±0,66
	ΔE [keV]	-14 ±1,05	-11 ±1,02	-10 ±1,03
	Epaisseur [μm]	0,14 ±0,01	0,12 ±0,01	0,10 ±0,01
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3400,6 ±0,70	3617,0 ±0,16	3821,4 ±0,15
	ΔADC	-9,6 ±0,97	-6,2 ±0,66	-6,0 ±0,66
	ΔE [keV]	-15 ±1,52	-10 ±1,03	-9 ±1,03
	Epaisseur [μm]	0,15 ±0,02	0,11 ±0,01	0,10 ±0,01

**Tableau 3.b :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de moins de 0,2 μm avec des franges visibles en un autre point de celle-ci

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3396,4 ±0,31	3612,4 ±0,17	3816,2 ±0,21
	ΔADC	-9,5 ±0,72	-6,8 ±0,66	-6,9 ±0,68
	ΔE [keV]	-15 ±1,13	-11 ±1,03	-11 ±1,06
	Epaisseur [μm]	0,15 ±0,01	0,11 ±0,01	0,11 ±0,01
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3401,2 ±0,49	3616,6 ±0,23	3821,1 ±0,10
	ΔADC	-8,9 ±0,83	-6,6 ±0,68	-6,4 ±0,65
	ΔE [keV]	-14 ±1,30	-10 ±1,06	-10 ±1,02
	Epaisseur [μm]	0,14 ±0,01	0,11 ±0,01	0,10 ±0,01

**Tableau 4.a :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de moins de 0,2 μm sans franges visibles en un autre point de celle-ci

		<sup>239</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
Valeurs pour l'ajustement en gaussienne	Moyenne [ADC]	3396,0 ±0,26	3612,2 ±0,13	3816,4 ±0,16
	ΔADC	-9,9 ±0,70	-7,0 ±0,65	-6,7 ±0,66
	ΔE [keV]	-16 ±1,09	-11 ±1,02	-11 ±1,03
	Epaisseur [μm]	0,15 ±0,01	0,11 ±0,01	0,11 ±0,01
Valeurs pour l'ajustement en convolution	Moyenne [ADC]	3401,4 ±0,56	3616,4 ±0,15	3820,9 ±0,16
	ΔADC	-8,7 ±0,76	-6,9 ±0,49	-6,5 ±0,50
	ΔE [keV]	-14 ±1,19	-10,7 ±0,77	-10,2 ±0,78
	Epaisseur [μm]	0,13 ±0,01	0,11 ±0,01	0,11 ±0,01

**Tableau 4.b :** Valeurs des deux ajustements pour la mesure avec une feuille de moins de 0,2 μm sans franges visibles en un autre point de celle-ci

## Bibliographie :

- [1] [www.ganil-spiral2.eu/](http://www.ganil-spiral2.eu/)
- [2] H. Savajols & al., *Technical Proposal for the SPIRAL 2 instrumentation, S3: The Super Separator Spectrometer for LINAG Beams.*
- [3] [irfu.cea.fr/Phocea/Vie\\_des\\_labos/Ast/ast\\_technique.php?id\\_ast=943](http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_technique.php?id_ast=943)
- [4] J. Piot & al., *S<sup>3</sup> : Pushing spectroscopy forward.*
- [5] J. Pancin & al., *Secondary Electrons Detectors for beam tracking: Micromegas and wire chamber*, Jinst (2009).
- [6] Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, Chap. 11.
- [7] [www.canberra.com/pdf/Products/passivated\\_pips\\_C39313a.pdf](http://www.canberra.com/pdf/Products/passivated_pips_C39313a.pdf)
- [8] G. Bortels & al., *Analytical function for fitting peaks in alpha-particle spectra from Si-detectors*, Appl. Radiat. Isot. Vol.38, No.10, (1987) 831-837.
- [9] [root.cern.ch](http://root.cern.ch)
- [10] ICRU Report 49, *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles* (1993) 243.
- [11] D.C. Santry & al., *Stopping Power Measurements of C, Al, Si, Ti, Ni, Ag, Au and Mylar using Radioactive Alpha Sources*, Nucl. Instr. and Meth. B1 (1984) 13-15.