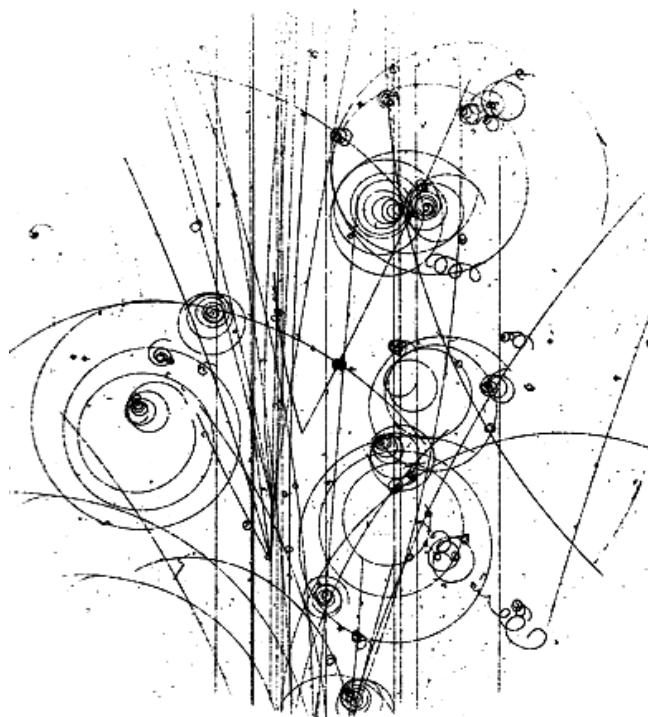


# LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES PARTICULES

Laboratoire PHYS-F-311 – *Version Assistants*

Author list to be defined...

19 décembre 2019



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
1.1	Rayons cosmiques . . . . .	2
1.2	Effet Tcherenkov . . . . .	2
1.3	Détecteur Tcherenkov . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Le matériel expérimental</b>	<b>4</b>
2.1	Scintillateurs . . . . .	4
2.2	Photomultiplicateurs . . . . .	4
2.3	Aquisition de données . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Méthodes d'analyse statistique</b>	<b>8</b>
3.1	Méthode Monte Carlo . . . . .	8
3.2	Ajustement . . . . .	9
3.3	Erreur sur l'ajustement . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Dispositif : Effet Tcherenkov par des électrons</b>	<b>12</b>
4.1	Agenda du laboratoire . . . . .	12
4.2	Dispositif expérimental . . . . .	12
4.3	Exercices Préparatoires . . . . .	13
4.4	Prise de mesure . . . . .	15
4.5	Analyse de données . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Dispositif : Effet Tcherenkov par des muons</b>	<b>19</b>
5.1	Agenda du laboratoire . . . . .	19
5.2	Dispositif expérimental . . . . .	19
5.3	Exercices Préparatoires . . . . .	19
5.4	Prise de mesure . . . . .	21
5.5	Analyse de données . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Dispositif : Temps de vie de muons</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Dispositif : L'arche cosmique</b>	<b>25</b>

## Attention !

Cette version contient des informations supplémentaires destinées aux assistants. Celles-ci sont indiquées par une barre grise située sur le côté gauche.

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Rayons cosmiques

La Terre est constamment bombardée par des rayons cosmiques, majoritairement composés de particules chargées dont des protons et noyaux d'Hélium. Ces particules peuvent atteindre des énergies très importantes ( $10^{15}$  à  $10^{20}$  eV). Lorsqu'elles pénètrent l'atmosphère, les particules primaires du rayonnement cosmique produisent des particules secondaires instables ayant un temps de vie très court. Ces particules secondaires sont très énergétiques et ultra-relativistes. Elles vont, à leur tour, interagir avec des molécules de l'atmosphère ou se désintégrer en particule plus légère, pour nous donner, entre autre, des muons et des neutrinos.

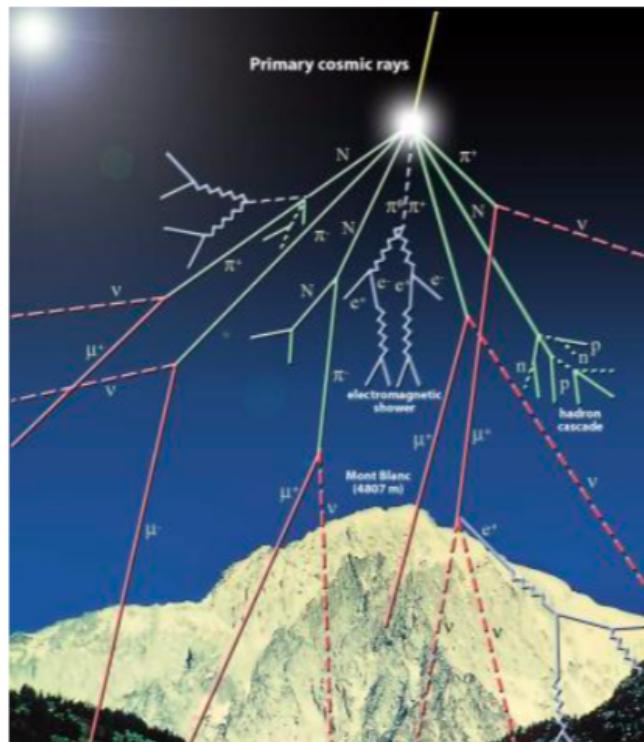


FIGURE 1 – Représentation schématique de rayons cosmiques interagissant dans la haute atmosphère.

Les muons ainsi produits se propagent jusqu'à la surface de la Terre et sont capables de voyager quelques dizaines de kilomètres sous la surface avant d'interagir. Les neutrinos atmosphériques, quant à eux, peuvent traverser la Terre sans interagir avec un nucléon. Les muons et neutrinos atmosphériques constituent le bruit de fond principal des détecteurs à neutrinos, tel qu'AMANDA et IceCube.

## 1.2 Effet Tcherenkov

L'effet Tcherenkov survient lorsqu'une particule chargée se déplace plus vite que la vitesse de la lumière dans un milieu diélectrique. Ce phénomène résulte de la superposition cohérente d'onde électromagnétique suite à la polarisation du milieu par le passage de la particule chargée.

Si la vitesse de la particule est supérieure au ratio  $c/n$  (où  $n$  est l'indice de réfraction et  $c$  la vitesse de la lumière), il y a formation d'un cône de lumière avec un angle de demi-ouverture  $\theta_c$  qui suit la relation :

$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (1)$$

où  $\beta = v/c$ ,  $v$  étant la vitesse de la particule dans le milieu. Le nombre de photons Tcherenkov émis par unité de longueur et de longeur d'onde est donné par la formule de Frank-Tamm :

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi \alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) \quad (2)$$

avec  $\alpha$  étant la constante de structure-fine. Comme le nombre de photons produits est inversement proportionnel à la longueur d'onde, la contribution des petites longueurs d'onde est plus importante.

### 1.3 DéTECTEUR TCHERENKOV

Compte tenu de leur faible section efficace d'interaction, la détection des neutrinos nécessite un détecteur de grand volume. Cela est réalisé par les détecteurs Tcherenkov en déployant des photomultiplicateurs (PMs) dans un volume de matériau diélectrique. Chaque PM est contenu dans une bulle de verre sous vide, l'ensemble étant appelé module optique (OM).

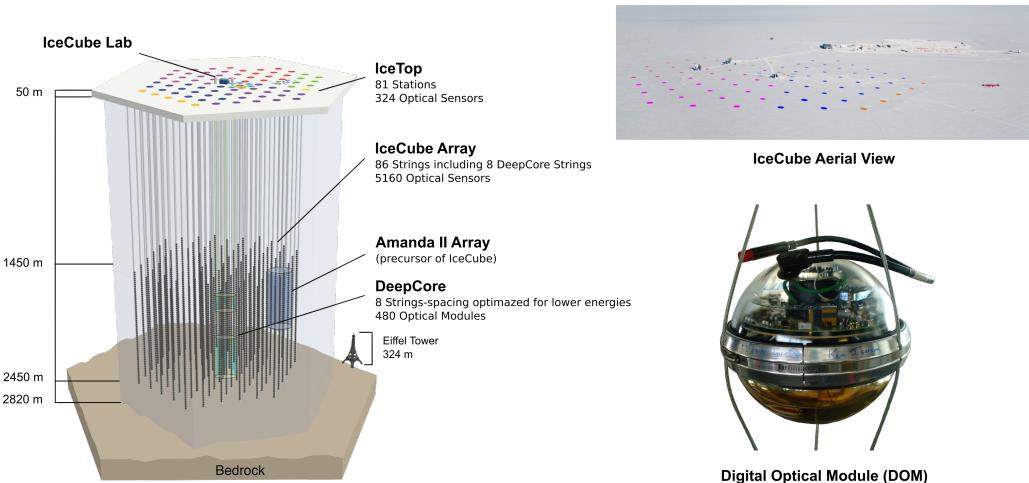


FIGURE 2 – Configuration du télescope à neutrinos IceCube.

#### AMANDA :

AMANDA (Antarctic Muon and Neutrino Detector Array) est un télescope à neutrino localisé au Pôle Sud. Lors de sa phase finale, le détecteur était composé de 677 modules optiques (OMs) disposés sur 19 câbles. Après 9 ans d'activité, AMANDA a été officiellement incorporé dans au détecteur IceCube en 2005. Ces modules retourne un signal analogique.

#### IceCube :

IceCube est un détecteur Tcherenkov d'un kilomètre cube enterré dans la glace du Pôle Sud. Il a pour but principal la détection des neutrinos à haute énergie. IceCube est composé de 5160 modules optiques numériques (DOMs ou Digital Optical Modules) placés sur 86 câbles.

Pour constituer un vaste réseaux d'OMs, il nous faut connaître la réponse de chacun de ceux-ci. La caractérisation de ces modules sera étudiée aux cours de deux manipulations (voir chapitres 4 et 5 )

## 2 LE MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

### 2.1 Scintillateurs

Un scintillateur est un matériau dans lequel se produit un phénomène de scintillation suite à l'absorption de radiations ionisantes. Lorsqu'une particule traverse le scintillateur, celui-ci absorbe son énergie et la ré-émet ensuite sous forme de lumière. Les scintillateurs présents dans vos dispositifs sont couplés à des photomultiplicateurs afin d'obtenir un détecteur à scintillation.

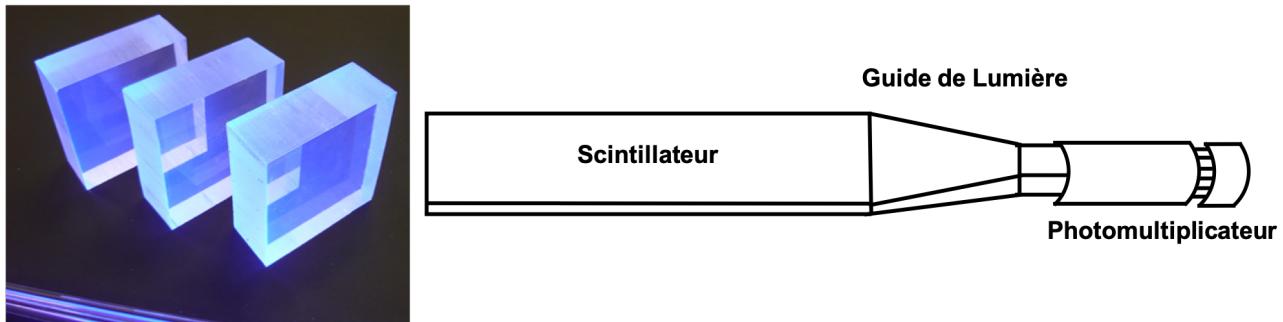


FIGURE 3 – Schema d'un détecteur à scintillation.

### 2.2 Photomultiplicateurs

Les photomultiplicateurs (PMs) sont des détecteurs basés sur l'effet photoélectrique. Lorsqu'un photon arrive à la photocathode, il lui arrache un électron par effet photoélectrique. Le faible courant ainsi produit est ensuite amplifié par une série de dynodes afin d'obtenir un gain important.

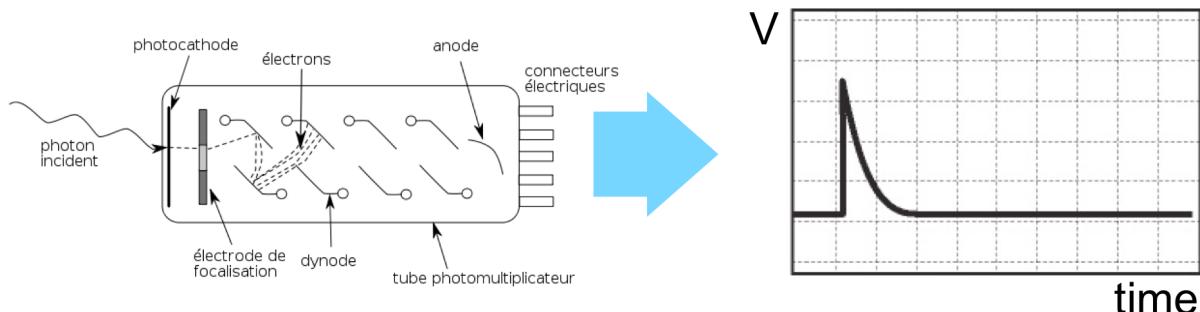


FIGURE 4 – Schema du fonctionnement d'un photomultiplicateur(PMT).

Le gain du photomultiplicateur est défini comme :

$$G = \frac{Q_{1pe}}{q_e} \quad (3)$$

où  $Q_{1pe}$  est la charge du premier photo-électron (pe) et  $q_e$  représente la charge d'un électron. La résolution du photomultiplicateur est donnée par :

$$\sigma_G = \frac{\sigma_{1pe}}{Q_{1pe}} * 100 \quad (4)$$

où  $\sigma_{1pe}$  est l'écart-type du pic du premier pe.

Nous allons à présent étudier les différentes composantes d'un spectre en charge typique de la réponse d'un photomultiplicateur.

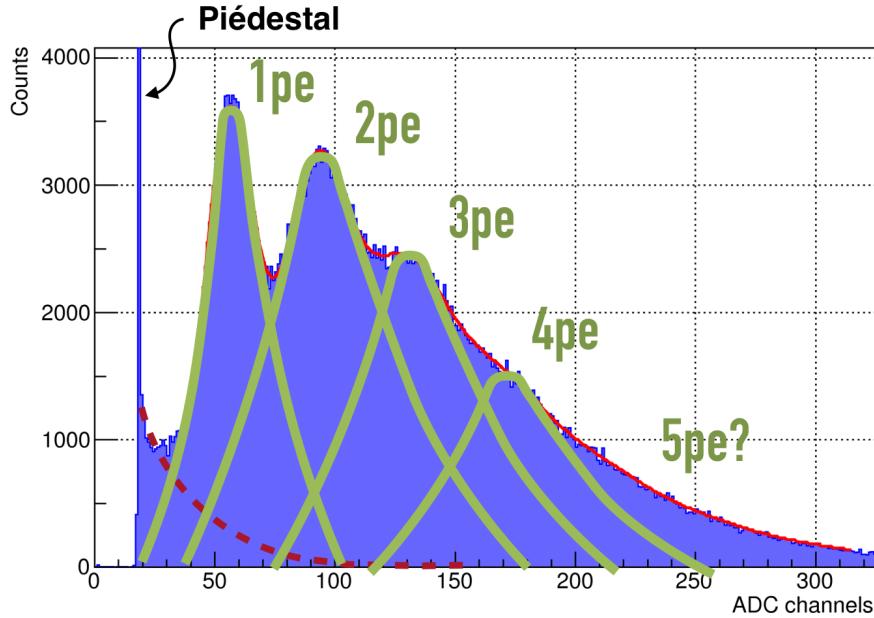


FIGURE 5 – Spectre en charge d'un photomultiplicateur.

**Piédestal :** Il s'agit d'événements sans charge qui prennent la forme d'un pic en zéro. Afin de se débarrasser de cet effet, il vous faudra régler au mieux votre seuil.

**Dark current :** Il s'agit de bruit associé au PM, il survient lorsqu'un électron est arraché à une dynode sans qu'un photon incident n'arrive à la photocathode. Il nous donne une exponentielle décroissante. Cet effet est exacerbé lorsque la tension aux bornes du photomultiplicateur est élevée.

**Pic des photo-électrons :** Ce sont le réponse en charge du PM pour différent nombre de photo-électrons.

Le largeur de la gaussienne du premier photo-électron (1pe) va nous donner la résolution en charge du PM. La relation entre la hauteur des gaussiennes nous est donné par la distribution de Poisson.

## 2.3 Aquisition de données

Nous allons à présent passer une revue les différents modules utilisés pour la prise de données.

**Alimentation** [figure 6a] :

Les modules d'alimentations haute-tension permettent de contrôler la tension appliquées aux PMs et à l'OM.

**Scaler** [figure 6b] :

Cette unité permet de compter les impulsions logiques entrantes. Le module de mesure standard CA-MAC possède 12 entrées indépendantes. Il existe également des modules NIM possédant la même fonction. Ces derniers fonctionne sans acquisition de données et permettent de lire directement les résultats sur un écran intégré.



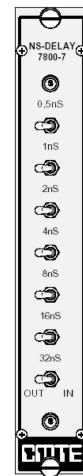
(a) Alimentation de haute tension



(b) Scaler NIM



(c) Distributeur de signal *fan-in-fan-out*



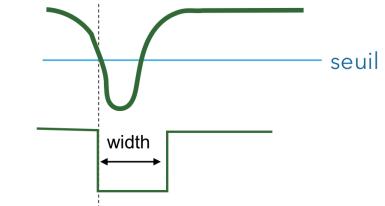
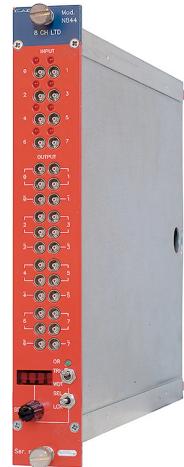
(d) Delayeur de signal



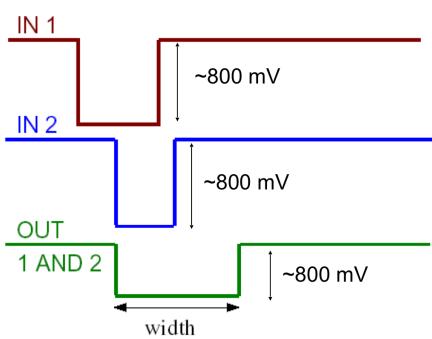
(e) Time to Digital Converter (TDC)



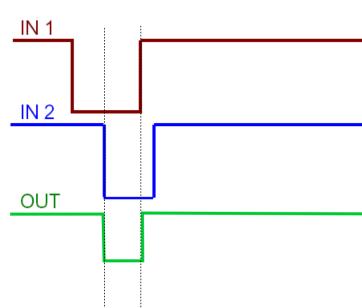
(f) Analogue to Digital Converter (ADC)



(g) Discriminateur



(h) Unité de coïncidence



(i) Unité logique programmable



FIGURE 6 – Appareils utilisés dans les dispositifs.

**Fan-in-fan-out (FIFO) [figure 6c] :**

Cette unité permet de dédoubler le signal. Il en existe 2 types :

- Logic FIFO : sort un signal logique
- Linear FIFO : sort un signal analogique

**Unité de délai [figure 6d] :**

Cette unité sort un signal identique au signal d'entrée en lui ajoutant un délai.

**Time to Digital Converter (TDC) [figure 6f] :**

Ce module permet de reconnaître un évènement et de fournir une représentation digital du moment auquel il est survenu. Ces unités sont communément utilisées pour mesurer un interval de temps et le convertir en une sortie digitale.

**Analogue to Digital Converter (ADC) [figure 6f] :**

Ce module mesure une charge ou une différence de potentiel. La charge, présentee à l'entree pendant un intervalle de temps fixe par un signal logique fourni à l'ADC (gate), est accumulée sur un condensateur. Dans un second temps, on laisse le condensateur se décharger au travers d'un circuit RC et on compte le temps nécessaire à cette décharge. Pour se faire, on compte les impulsions d'un oscillateur, au moyen d'une échelle de comptage (scaler). Chaque module possède 12 entrées.

**Discriminateur [figure 6g] :**

Donne un signal logique si le signal d'entrée atteint un certain seuil. Pour une unité de logique standard NIM, le "vrai" est fixé à -800 mV. Le seuil et la largeur du signal analogique peuvent être modifié.

**Unité de coïncidence [figure 6h] :**

Cette unité donne un signal logique lorsqu'on a un signal coïncident des entrées. On peut sélectionner la durée du signal sortant.

**Unité logique programmable [figure 6i] :**

Ce module permet d'effectuer des sorties selon une table de logique programmée au préalable. Il possède 4 entrées ainsi que 4 sorties, ce qui permet d'obtenir 16 lignes de logique. La durée de la sortie est déterminée par le temps durant lequel on a coïncidence.

### 3 METHODES D'ANALYSE STATISTIQUE

Au cours de ce laboratoire, il vous faudra analyser les données que vous aurez recueillies. Pour cela, vous aurez à votre disposition plusieurs iPython Notebook que vous étudierez en profondeur lors du cours de statistique. Ces différents outils sont accessibles via le lien suivant :  
<https://github.com/zemrude/PHYS-F-311>

#### 3.1 Méthode Monte Carlo

Afin de développer votre méthode d'ajustement, il vous sera demandé, dans un premier temps, de créer un ensemble de données que vous générerez via la technique de simulation Monte Carlo (MC). Vous avez à votre disposition deux méthodes pour générer vos données : la transformation inverse et le "Hit and Miss". A l'aide de ces deux techniques, vous serez en mesure de générer des événements aléatoires suivant la distribution de votre choix (gaussienne, loi exponentielle, ...).

##### 3.1.1 Hit & Miss

La méthode Hit & Miss ou méthode du rejet consiste à générer aléatoirement un grand nombre d'événements et à ne sélectionner ensuite que ceux remplissant les conditions pré-établies, i.e. les événements sous la courbe de la distribution choisie.

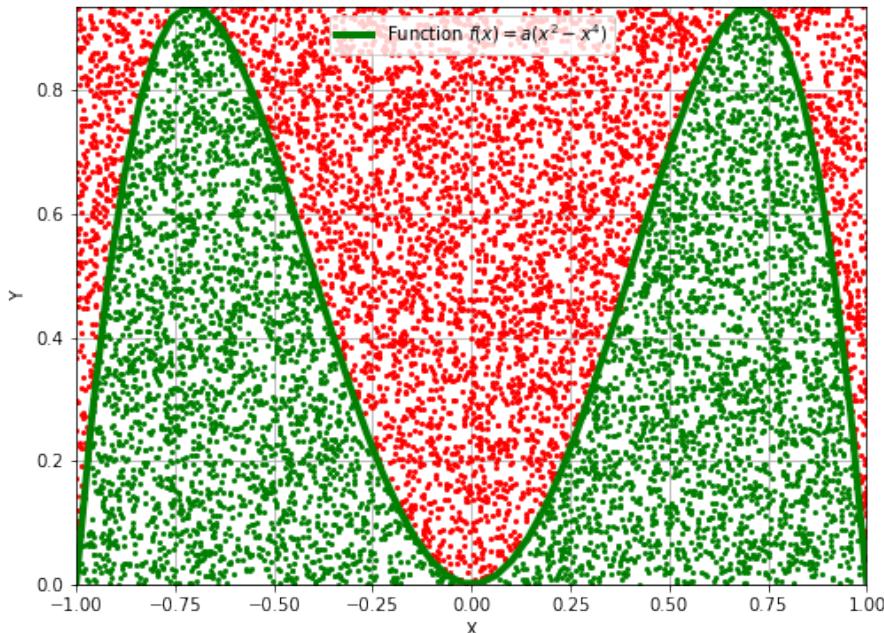


FIGURE 7 – Simulation obtenue par la méthode du Hit & Miss. Les points représentent les événements générés aléatoirement. Les éléments en vert sont ceux qui ont rempli la condition fixée pour suivre la distribution souhaitée. Les points rouges sont rejettés et auront donc été simulés en vain.

Pour notre exemple illustré par la figure 8, la fonction  $f(x) = a(x^2 - x^4)$  a été choisie. La figure 7 illustre la méthode du Hit & Miss en indiquant en vert les points qui sont sous la courbe de la distribution que l'on souhaite reproduire. Les points rouges seront rejettés. Cette méthode demande donc plus de ressources afin d'obtenir suffisamment de statistique puisqu'une partie des événements générés ne sera finalement pas utilisée.

### 3.1.2 Transformation inverse

A l'aide de cette méthode, un échantillon aléatoire de nombres suivant une distribution donnée peut être directement produit. Les données aléatoires sont obtenues à partir de l'inverse de la fonction de répartition. Cette méthode se base sur le théorème de la réciproque. Dans un premier temps, il nous faut calculer l'inverse de notre fonction,  $F(x)$ , en fonction de  $x$ . Les évènements générés aléatoirement seront ensuite passé dans la fonction inverse afin d'obtenir la distribution souhaitée.

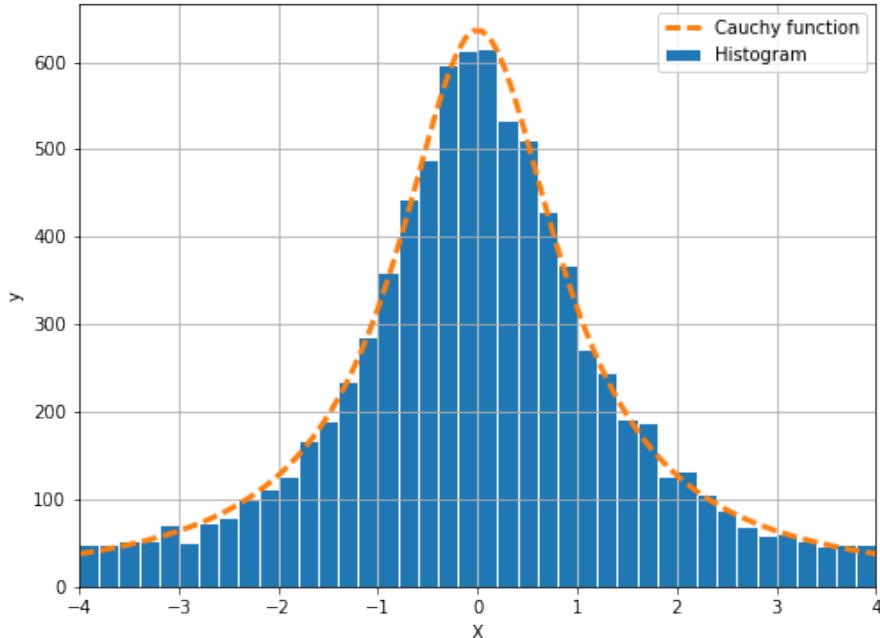


FIGURE 8 – Histogramme des évènements générés par la méthode de transformation inverse pour la distribution de Cauchy.

Pour notre exemple illustré par le graphique 8, nous allons considérer la loi de Cauchy, dont la fonction de répartition s'écrit :

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{x - x_0}{a} \right). \quad (5)$$

On a alors :

$$u = F(x) \iff x = x_0 + a \tan \left[ \pi \left( u - \frac{1}{2} \right) \right]. \quad (6)$$

La simulation peut donc être obtenue en suivant :

$$X = x_0 + a \tan \left[ \pi \left( U - \frac{1}{2} \right) \right]. \quad (7)$$

La fonction de Cauchy est indiquée en orange alors que les données simulées obtenues à partir de notre méthode inverse sont mise en histogramme. On peut voir que la distribution de ces évènements reproduit correctement la loi de Cauchy.

## 3.2 Ajustement

Nous allons à présent développer la méthode d'ajustement sur les données que vous venez d'obtenir par la méthode Monte Carlo de votre choix. Deux méthodes vous sont à nouveau proposées pour ce "fit" : la méthode des moindre carré ( $\chi^2$ ) et la méthode du maximum de vraisemblance. Ces deux méthodes permettent de comparer nos données avec les prédictions théorique de notre modèle. Une

fois au point, vous pourrez donc utiliser cet ajustement sur vos données réelles afin de confirmer que votre échantillon a bien le comportement attendu.

**Remarque :** La minimisation n'est pas effectuée directement sur les données mais sur les données déjà représentées en histogramme.

### 3.2.1 Moindre carré - $\chi^2$

Considérons la distribution de nos évènements générés par MC que l'on désire ajuster au mieux par une fonction  $f(x)$  que nous choisirons de façon pertinente en fonction du phénomène étudier. Nous cherchons les paramètres de cette fonction minimisant la somme des carrés des distances entre la hauteur de nos barres d'histogrammes,  $y_i$ , en  $x_i$  et  $f(x_i)$ , autrement dit :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i)]^2 . \quad (8)$$

Pour notre exemple, nous considérons une distribution d'évènement suivant une décroissance exponentielle dont nous tentons de trouver le temps de vie,  $\tau$ . Notre fonction est donc donnée par :

$$f(x) = \alpha \exp(-x/\tau) . \quad (9)$$

La valeur de  $\tau$  minimisant  $\chi^2$  est illustrée par la figure 9. Celle-ci est utilisée pour l'ajustement de la figure de droite.

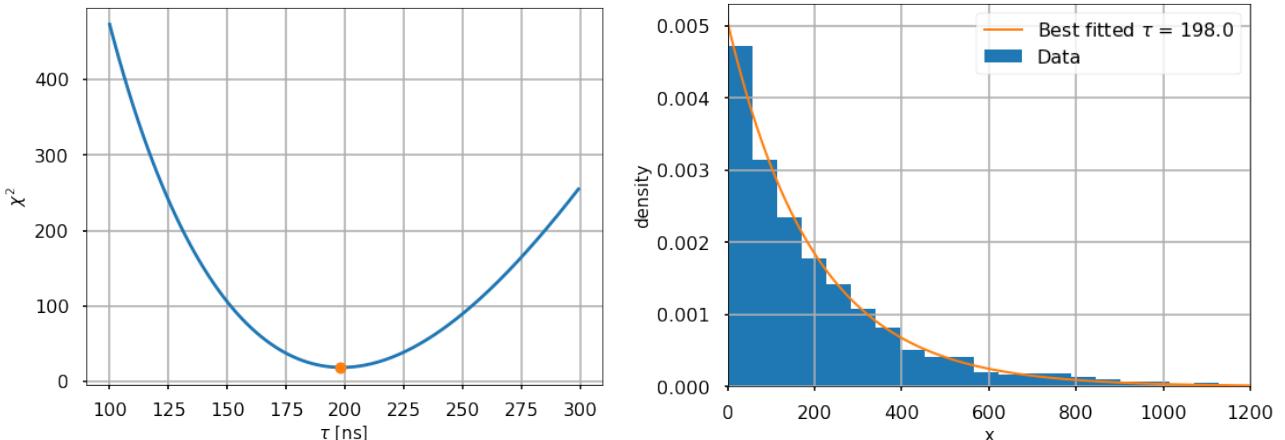


FIGURE 9 – **Gauche** : La valeur de  $\tau$  minimisant  $\chi^2$  est désignée par le point orange. **Droite** : Le fit obtenu à partir de  $\tau_{best}$  (orange) est mis en graphique au côté de la distribution des données MC que nous tentions d'ajuster.

### 3.2.2 Maximum de vraisemblance

La méthode de maximum de vraisemblance est une méthode statistique nous permettant d'évaluer la valeur la plus "vraisemblable" des paramètres d'un modèle probabiliste.

Pour notre exemple, nous considérons la loi normale exprimée comme suit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp -\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 , \quad (10)$$

où  $\sigma$  est l'écart type et  $\mu$  est la moyenne. Nous allons à présent tenter de trouver la valeur de  $\mu$  optimisant la fonction de vraisemblance,  $\mathcal{L}$ . Pour cela nous fixons l'écart type de la Gaussienne et laissons varier la moyenne. Nous trouvons ensuite la valeur de  $\mu$  qui minimise  $-\log \mathcal{L}$ , comme illustré par la figure 10.

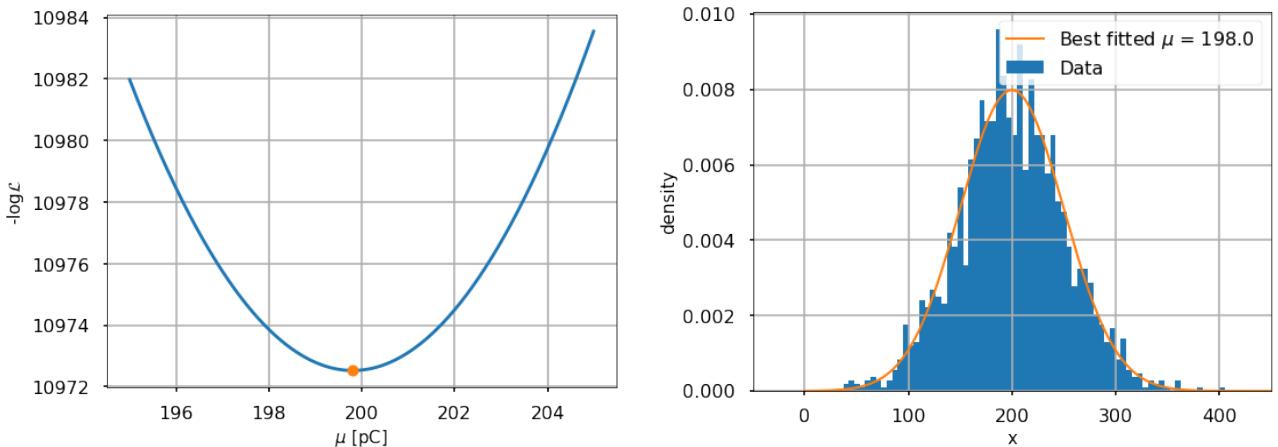


FIGURE 10 – **Gauche :** La valeur de  $\mu$  minimisant  $-\log \mathcal{L}$  est désignée par le point orange. **Droite :** Le fit obtenu à partir de  $\mu_{best}$  (orange) est mis en graphique au côté de la distribution des données MC que nous tentions d’ajuster.

### 3.3 Erreur sur l’ajustement

Nous pouvons également estimer l’erreur associée à une valeur ajustée. Nous allons pour cela faire varier de l’unité choisie (1, 2, 3, ...) la valeur minimale de la méthode choisie. Nous obtiendrons ainsi l’erreur en terme de  $\sigma$ . L’erreur sur le paramètre à ajuster nous indique alors dans quelle mesure ce paramètre varierait si on répétait le processus de minimisation plusieurs fois.

Pour notre exemple, nous nous intéresseront à la méthode de maximum de vraisemblance. Nous ferons donc varier d’une unité la valeur minimale de  $-\log \mathcal{L}$ . La barre noire sur le graphique 11 indique l’erreur sur  $\mu$  ainsi obtenue.

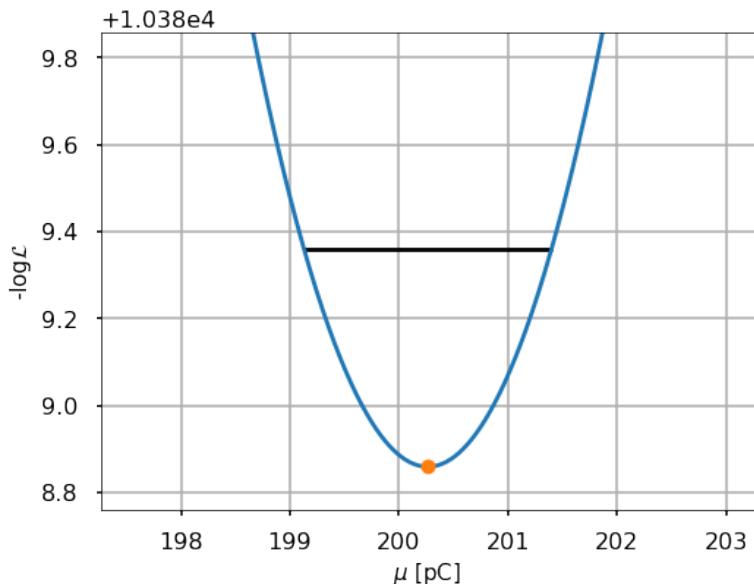


FIGURE 11 – Erreur de  $1\sigma$  obtenue pour l'exemple précédent de l'ajustement selon la méthode du maximum de vraisemblance.

## 4 DISPOSITIF : EFFET TCHERENKOV PAR DES ÉLECTRONS

Cette manipulation a pour but la caractérisation d'un module optique (OM) développé pour l'expérience AMANDA. Afin d'étudier les propriétés de cet OM, vous devrez mettre au point le dispositif nécessaire à la prise de mesure. Après avoir pris connaissance avec le dispositif, vous serez ainsi amené à développer vous même la logique d'acquisition des données. Vous analyserez ensuite celles-ci grâce aux outils statistiques et informatiques que vous aurez vu en cours.

### 4.1 Agenda du laboratoire

#### Lundi

- Prise de connaissance avec le matériel
- Vérification du signal analogique des PMs avec l'oscilloscope.
- Implémentation de la table de vérité pour la logique d'acquisition ou trigger.
- Mesure de l'efficacité

#### Mardi

- Calibration de l'ADC
- Préparation de l'acquisition de données
- Début de l'acquisition de données avec LabView

#### Mercredi

- Construction de la logique d'acquisition du bruit de fond.
- Écriture de la table de vérité pour définir un événement du bruit.
- Début de l'acquisition de données pour le bruit de fond

#### Jeudi et Vendredi

- Développement d'un programme de génération MC d'une distribution normale
- Développement des programmes d'analyse.
- Dernier jour pour présenter les résultats des exercices.
- Préparation de la présentation.

### 4.2 Dispositif expérimental

Cette manipulation utilise une source de radiation  $\beta^+$  composée de Strontium  $^{90}\text{Sr}$ . Les électrons émis par la source traverse ensuite une plaque de quartz d'indice de réfraction  $n = 1.478$ . Lors de leur passage, les électrons vont produire un rayonnement Tcherenkov qui pourra être détecté par l'OM. Dans ce dispositif, l'OM se trouve à une position fixe située à un angle de  $45^\circ$  par rapport à la direction d'émission des électrons. La source radioactive est combinée à un spectromètre qui va nous permettre de sélectionner l'énergie cinétique des électrons afin de récolter un maximum de rayonnement Tcherenkov dans l'OM. Pour déterminer l'intensité du courant à fournir au spectromètre pour obtenir des électrons de cette énergie, vous devrez d'abord résoudre l'exercice 2.

Une fois cette valeur trouvée, vous pouvez allumer le spectromètre. Celui-ci est calibré sur la partie descendante de la courbe d'hystérèse, il vous faudra donc respecter les conditions d'utilisation décrites ci-dessous.

#### Mode d'emploi du spectromètre :

- Démarrez à  $I = 0 \text{ A}$
- Aller à saturation  $I \sim 2,6 \text{ A}$

— Descendre à la valeur  $I_t$  désirée

**Remarque :** Si on veut changer  $I_t$  pour une valeur plus petite, on descend vers cette valeur. En revanche, si on veut augmenter cette valeur, on doit recommencer le cycle d'hystérèse.

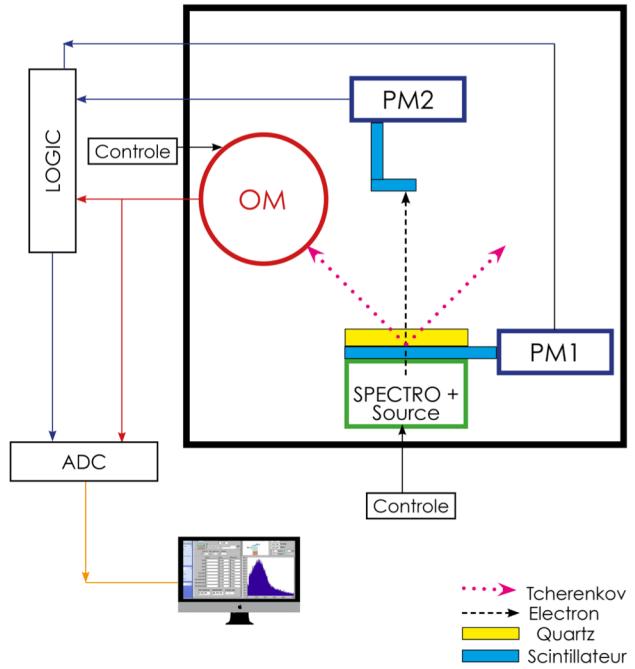


FIGURE 12 – Dispositif expérimental de l'effet Tcherenkov produit par des électrons.

Dans ce dispositif, sont également présent 2 photo-multiplicateurs (PMs) chacun relié à un scintillateur. Le premier (PM1) est situé entre la source et la plaque de quartz et nous permet de vérifier qu'un électron a été émis par la source. Le second PM confirme que l'électron a bien traversé le quartz. Ces PMs ont donc pour but d'assurer que le signal détecté par l'OM est en coïncidence avec un électron qui a produit des photons Tcherenkov.

## 4.3 Exercices Préparatoires

### 4.3.1 Exercice 1

Sachant que l'OM est placé à un angle de  $45^\circ$  par rapport à la direction d'émission des électrons ( $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ ) de la source de strontium, à quel courant faut-il régler le spectromètre pour récolter un maximum de rayonnement Tcherenkov dans l'OM, sachant que l'indice de réfraction du quartz est de 1.478 ?

Le graphique suivant vous donne la relation entre l'énergie cinétique des électrons et l'intensité du courant.

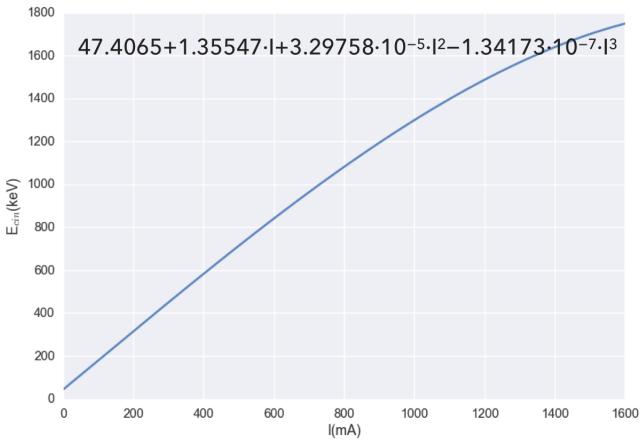


FIGURE 13 – Relation entre l'intensité du courant fourni au spectromètre et l'énergie cinétique des électrons.

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{1}{n \cos \Theta_c} = 0.9568 \\ &= \frac{pc}{E} \\ &= \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2 c^4}}{E}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E &= \sqrt{\frac{m_e^2 c^4}{1 - \beta^2}} = 1.7575 \text{ MeV} \\ E_{\text{cin}} &= E - m_e \\ &= 1.247 \text{ MeV} \\ \Rightarrow & [I \approx 950 \text{ mA}]\end{aligned}$$

#### 4.3.2 Exercice 2

Calculer l'ordre de grandeur du nombre de photons émis entre 350 et 500 nm par un électron de 1247 keV d'énergie cinétique traversant une fenêtre de quartz de 1 mm d'épaisseur, sachant que pour ce domaine de longueurs d'onde, l'indice de réfraction du quartz varie de moins de 1% et peut être considéré constant (1.478). Négliger la perte d'énergie de l'électron dans le quartz.

$$\alpha = 1/137$$

Formule de *Frank-Tamm* :

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dx} &= \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \Theta_c d\lambda \\ &= \frac{\pi}{137} \int_{350 \text{ nm}}^{500 \text{ nm}} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \\ N &= \frac{\pi}{137} \cdot \left( \frac{1}{350 \text{ nm}} - \frac{1}{500 \text{ nm}} \right) \cdot 1 \text{ mm} \\ &= [19.65]\end{aligned}$$

### 4.3.3 Exercice 3

En supposant que le diamètre du collimateur placé devant la photocathode de l'OM est de 6 cm et qu'il se trouve à 17 cm de la fenêtre de quartz, combien de photoelectrons l'OM peut-il enregistrer par électron de la source, en supposant une transmittance  $T$  de 90% et sachant que l'efficacité quantique est de  $\epsilon_q = 15\%$  ?

Avec  $N_\gamma^{\text{quartz}}$  trouvé avant, on obtient :

$$\begin{aligned}N_{\text{pe}} &= \epsilon_q \cdot T \cdot N_\gamma^{\text{OM}} \\&= \epsilon_q \cdot T \cdot \frac{6 \text{ cm}}{2\pi \cdot 17 \text{ cm} \cdot \sin \Theta_c} \cdot N_\gamma^{\text{quartz}} \\&= [3.58]\end{aligned}$$

## 4.4 Prise de mesure

Pour cette manipulation, il vous est demandé de préparer le dispositif expérimental nécessaire à la prise de mesure. Cela implique, dans un premier temps, de :

### Se familiariser avec le dispositif :

- vérifier le signal des différents PMs et de l'OM
- étudier l'efficacité des PMs
- calibrer l'ADC
- développer la logique d'acquisition de données
- mesurer le bruit de fond

### 4.4.1 Vérification du dispositif

Dans un premier temps, allumez votre dispositif et allumez la haute tension aux bornes des PM. Veillez ne pas changer la tension indiquée afin de ne pas endommager les PMs.

Après avoir calculé l'intensité du courant à fournir au spectromètre, allumer également celui-ci en suivant les instructions fournies précédemment.

A l'aide de l'oscilloscope, vérifiez le signal provenant des différents photo-multiplicateurs (PMs) et de l'OM. Transformez ensuite votre signal analogue en signal digital à l'aide du discriminateur et observez celui-ci sur l'oscilloscope.

### 4.4.2 Mesure de l'efficacité

Il vous est ensuite demandé de mesurer l'efficacité d'un des PMs présents dans votre dispositif. Vous devrez faire cette mesure en faisant varier dans un premier temps le seuil du PM pour lequel vous mesurer l'efficacité. Une fois la valeur optimale du seuil trouvée, répétez le processus en faisant cette fois varier la tension appliquée sur le PM en question. Pour ces deux mesures, veillez également à mesurer le taux d'événements détectés par le PM dont vous mesurez l'efficacité. Pour effectuer ces mesures, vous avez à votre disposition un scaler NIM. De quel PM allez-vous mesurer l'efficacité ?

- Mesure de l'efficacité de PM1
- Logique : (PM1 & PM2 & OM) et (PM2 & OM)
- Mesure du rate de PM1

#### 4.4.3 Calibration de l'ADC

Nous allons à présent procéder à la calibration du convertisseur analogique-numérique (ADC ou Analogue-to-Digital Converter). En effet, l'ADC vous donne des valeurs en ADC channel, il vous faut donc connaître à quelle charge équivaut un ADC channel.

Pour cette calibration, il faut fournir une charge connue et constante à l'ADC. Pour cela, vous avez à votre disposition un générateur de courant continu. Comment allez-vous procéder ?

- Charge de l'ADC de l'ordre du pC →  $Q \sim 100 \text{ pC}$
- Utilisation d'une résistance :  $U = RI$  avec  $R = 2.2 \text{ k}\Omega$
- Sachant que  $Q = I\Delta t$ , déterminer  $\Delta t$
- Le gate est ensuite créé à l'aide du dual-timer

#### 4.4.4 Prise de données

Afin de prendre les données nécessaires à la caractérisation de l'OM, nous devons réfléchir à la logique d'acquisition. Nous allons utiliser l'ADC que nous venons de calibrer et lui fournir le signal de l'OM ainsi qu'une porte logique (gate). Pour créer ce gate, nous avons besoin des modules logiques. Il nous faut réfléchir aux conditions dans lesquelles ont veut déclencher la prise de mesure. En d'autres termes, quand voulons nous considérer le signal de l'OM ?

Une fois que vous avez déterminé cela, vous pouvez implémenter votre logique à l'aide des modules à votre disposition. Il vous faudra ensuite vérifier que le signal de l'OM et votre porte logique sont en coïncidence à l'aide de l'oscilloscope. Lorsque vous avez effectué cette vérification, reliez le gate et le signal de l'OM à l'ADC pour commencer acquisition.

**Remarque :** Ayant plus d'évènements, la prise de mesure pour cette manipulation est plus rapide. De ce fait, il vous sera demandé d'effectuer plusieurs mesures en faisant varier la tension. Faites un graphique du gain et de la résolution en fonction de la tension.

- **Gate :** PM1 & PM2 & OM
- Faire passer le gate dans le dual-timer pour avoir des fenêtres de tailles constantes
- Vérifier que l'OM est en même temps que le gate
- Donner les deux infos à l'ADC et prendre les mesures
- Prendre des mesures en fonction de la tension pour voir la variation de la position du pic de 1 pe

#### 4.4.5 Mesure du bruit de fond

Intéressons nous au bruit de fond présent dans cette manipulation. Nous voulons connaître le taux de fausses coïncidences, c'dà les cas où l'OM nous envoie un signal qui n'est pas dû à un photon Tcherenkov alors que notre porte logique s'est déclenchée.

Dans un premier temps, il vous faut réfléchir à la manière dont vous pouvez implémenter la prise de mesure du bruit de fond. Une fois cette méthode mise en place, vous pouvez démarrer l'acquisition du bruit de fond. A l'aide de l'oscilloscope, pensez toutefois à vérifier que le signal de l'OM et votre gate arrivent en même temps à l'ADC.

- **Gate :** PM1 & PM2 & OM<sub>couver</sub>
- L'OM n'étant pas fixé au reste du dispositif, il est possible de le séparer physiquement à l'aide d'une couverture

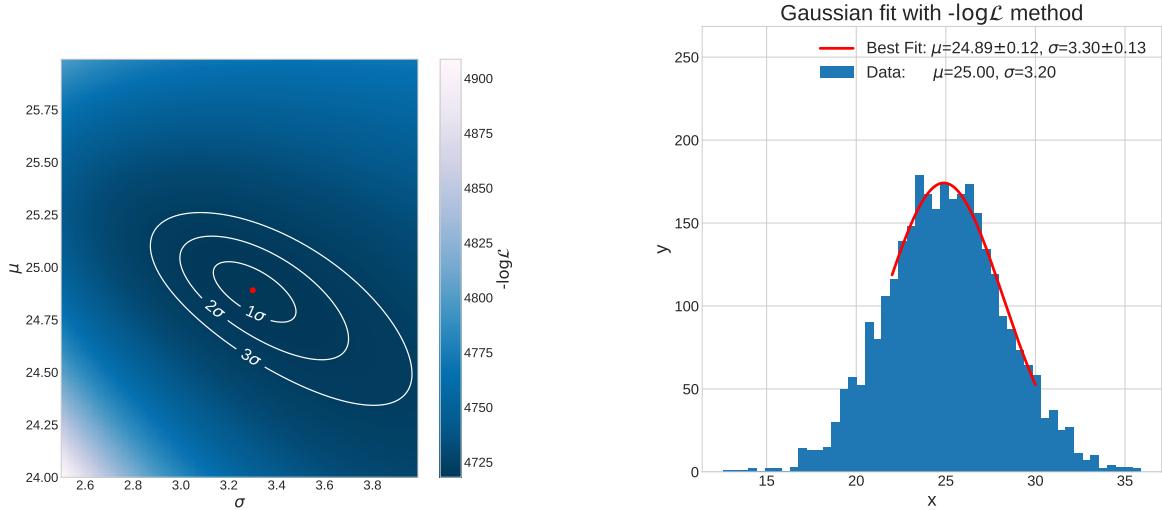
## 4.5 Analyse de données

A présent, nous pouvons nous concentrer sur l'analyse des données dans le but de caractériser l'OM. En vous basant sur les données, vous devrez calculer :

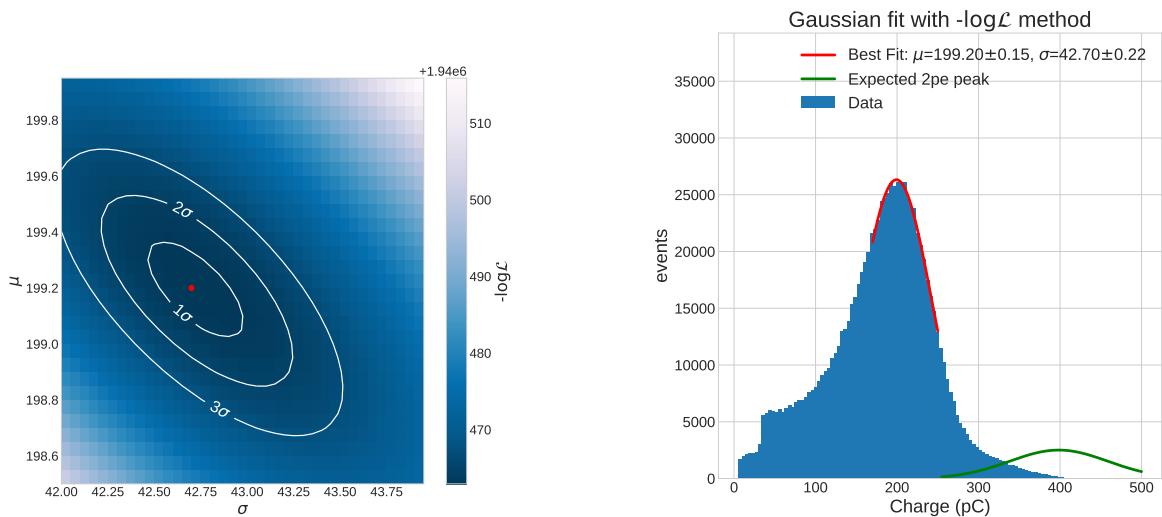
### Dispositif muon :

- le gain  $G$  de l'OM,
- la résolution  $\sigma_G$  de l'OM,
- le nombre moyen de photo-électrons  $\langle n_{pe} \rangle$  produit par trigger dans l'OM.

### Validation de la procédure d'ajustement :

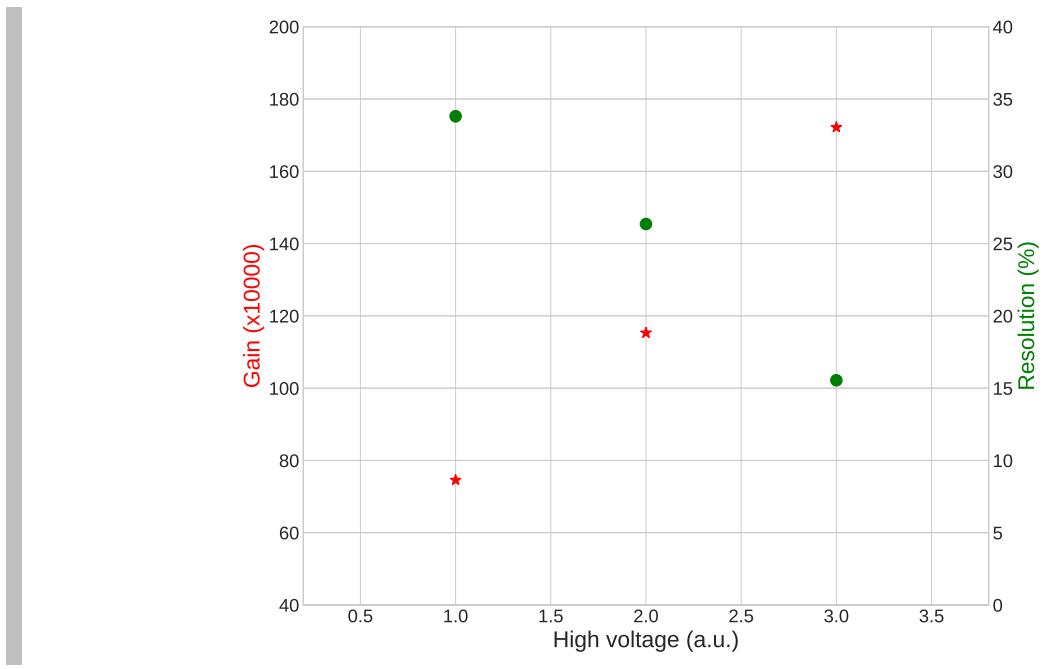


### Ajustement des données :



$$G = \mu_{\text{best}}/e = 1242670$$

$$\sigma_G = \sigma_{\text{best}}/\mu_{\text{best}} = 21.44\%$$



## 5 DISPOSITIF : EFFET TCHERENKOV PAR DES MUONS

Cette manipulation a pour but la caractérisation d'un module optique (OM) développé pour l'expérience AMANDA. Afin d'étudier les propriétés de cet OM, vous devrez mettre au point le dispositif nécessaire à la prise de mesure. Après avoir pris connaissance avec le dispositif, vous serez ainsi amené à développer vous même la logique d'acquisition des données. Vous analyserez ensuite celles-ci grâce aux outils statistiques et informatiques que vous aurez vu en cours.

### 5.1 Agenda du laboratoire

#### Lundi

- Prise de connaissance avec le matériel
- Vérification du signal analogique des PMs avec l'oscilloscope.
- Implémentation de la table de vérité pour la logique d'acquisition ou trigger.
- Mesure de l'efficacité

#### Mardi

- Calibration de l'ADC
- Préparation de l'acquisition de données
- Début de l'acquisition de données avec LabView

#### Mercredi

- Construction de la logique d'acquisition du bruit de fond.
- Écriture de la table de vérité pour définir un événement du bruit.
- Début de l'acquisition de données pour le bruit de fond

#### Jeudi et Vendredi

- Développement d'un programme de génération MC d'une distribution normale
- Développement des programmes d'analyse.
- Dernier jour pour présenter les résultats des exercices.
- Préparation de la présentation.

### 5.2 Dispositif expérimental

Pour cette manipulation, nous utilisons les muons atmosphériques afin d'obtenir l'émission Tcherenkov. Ce dispositif est composé de 4 scintillateurs chacun relié à un photo-multiplificateur (PM), d'un OM, une couche de plomb et d'un réservoir d'eau. Ce réservoir forme un angle de 45° avec la verticale. Les trois premiers PM (PM1, PM2 et PM3) assure la direction verticale du muon incident. La présence d'une couche de plomb avant le PM3 nous permet également de vérifier que le muon est suffisamment énergétique pour produire le rayonnement Tcherenkov avec l'angle souhaité. Un 4ème PM est placé au dessus de l'OM et est utilisé comme veto. Puisque les muons sont produits en "paquets", appelés muon bundles, ce veto exclu les évènements de l'OM qui seraient produits par un second muon plutôt que par un photon Tcherenkov.

### 5.3 Exercices Préparatoires

#### 5.3.1 Exercice 1

Calculez quelle sera l'angle d'émission du rayonnement Tcherenkov émis dans l'eau par des muons ( $m_\mu = 0.106 \text{ GeV}/c^2$ ) de  $1.5 \text{ GeV}/c$  de quantité de mouvement, sachant que l'indice de réfraction de l'eau à  $20^\circ\text{C}$  est 1.333.

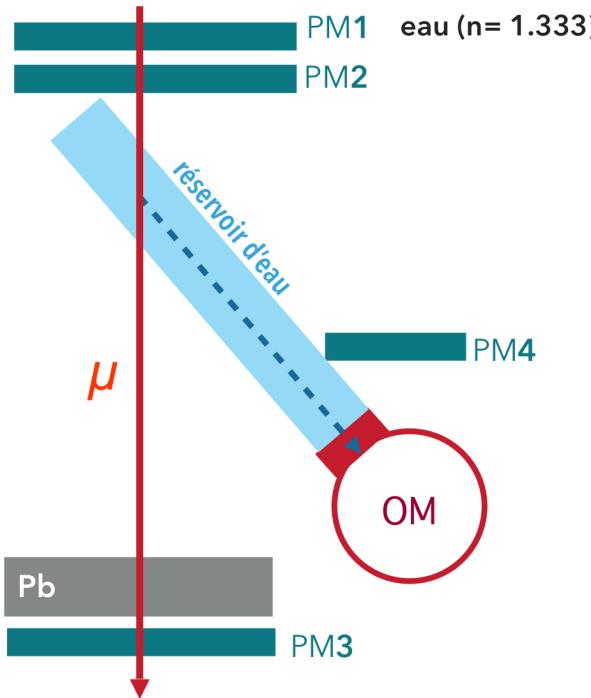


FIGURE 14 – Dispositif expérimental de l'effet Tcherenkov produit par des muons.

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{v}{c} = \frac{pc}{E} \\ &= \frac{pc}{\sqrt{p^2c^2 + m_\mu^2c^4}} \\ &= 0.9975 \end{aligned} \quad \begin{aligned} \cos \Theta_c &= \frac{1}{\beta n} \\ \Theta_c &= \arccos \frac{1}{0.9975 \cdot 1.33} \\ &= 41.2^\circ \end{aligned}$$

### 5.3.2 Exercice 2

We should modify this to the muon setup !

Pour le 1er dispositif, calculer l'ordre de grandeur du nombre de photons émis entre 350 et 500 nm par un 'électron de 1247 keV d'énergie cinétique traversant une fenêtre de quartz de 1 mm d'épaisseur, sachant que pour ce domaine de longueurs d'onde, l'indice de réfraction du quartz varie de moins de 1% et peut être considéré constant (1.478). Négliger la perte d'énergie de l'électron dans le quartz.  
 $\alpha = 1/137$

Formule de *Frank-Tamm* :

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \Theta_c d\lambda \\ &= \frac{\pi}{137} \int_{350 \text{ nm}}^{500 \text{ nm}} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \\ N &= \frac{\pi}{137} \cdot \left( \frac{1}{350 \text{ nm}} - \frac{1}{500 \text{ nm}} \right) \cdot 1 \text{ mm} \\ &= [19.65] \end{aligned}$$

### 5.3.3 Exercice 3

We should modify this to the muon setup !

En supposant que le diamètre du collimateur placé devant la photocathode de l'OM est de 6 cm et qu'il se trouve à 17 cm de la fenêtre de quartz, combien de photoelectrons l'OM peut-il enregistrer par électron de la source, en supposant la transmittance  $T$  à 90%, l'efficacité quantique est de  $\epsilon_q = 15\%$  ?

Avec  $N_\gamma^{\text{quartz}}$  trouvé avant, on obtient :

$$\begin{aligned}N_{\text{pe}} &= \epsilon_q \cdot T \cdot N_\gamma^{\text{OM}} \\&= \epsilon_q \cdot T \cdot \frac{6 \text{ cm}}{2\pi \cdot 17 \text{ cm} \cdot \sin \Theta_c} \cdot N_\gamma^{\text{quartz}} \\&= \boxed{3.58}\end{aligned}$$

## 5.4 Prise de mesure

Pour cette manipulation, il vous est demandé de préparer le dispositif expérimental nécessaire à la prise de mesure. Cela implique, dans un premier temps, de :

### Se familiariser avec le dispositif :

- vérifier le signal des différents PMs et de l'OM
- étudier l'efficacité des PMs
- calibrer l'ADC
- développer la logique d'acquisition de données
- mesurer le bruit de fond

### 5.4.1 Vérification du dispositif

Dans un premier temps, allumez votre dispositif et allumez la haute tension aux bornes des PM. Veillez ne pas changer la tension indiquée afin de ne pas endommager les PMs.

A l'aide de l'oscilloscope, vérifiez le signal provenant des différents photo-multiplicateurs (PMs) et de l'OM. Transformez ensuite votre signal analogue en signal digital à l'aide du discriminateur et observez celui-ci sur l'oscilloscope.

### 5.4.2 Mesure de l'efficacité

Il vous est ensuite demandé de mesurer l'efficacité d'un des PMs présents dans votre dispositif. Vous devrez faire cette mesure en faisant varier dans un premier temps le seuil du PM pour lequel vous mesurer l'efficacité. Une fois la valeur optimale du seuil trouvée, répétez le processus en faisant cette fois varier la tension appliquée sur le PM en question. Pour ces deux mesures, veillez également à mesurer le taux d'événements détectés par le PM dont vous mesurez l'efficacité. Pour effectuer ces mesures, vous avez à votre disposition un scaler NIM. De quel PM allez-vous mesurer l'efficacité ?

- Mesure de l'efficacité de PM2
- Logique : (PM1 & PM2 & PM3) et (PM1 & PM3)
- Mesure du rate de PM2

### 5.4.3 Calibration de l'ADC

Nous allons à présent procéder à la calibration du convertisseur analogique-numérique (ADC ou Analogue-to-Digital Converter). En effet, l'ADC vous donne des valeurs en ADC channel, il vous faut donc connaître à quelle charge équivaut un ADC channel.

Pour cette calibration, il faut fournir une charge connue et constante à l'ADC. Pour cela, vous avez à votre disposition un générateur de courant continu. Comment allez-vous procéder ?

- Charge de l'ADC de l'ordre du pC →  $Q \sim 100 \text{ pC}$
- Utilisation d'une résistance :  $U = RI$  avec  $R = 2.2 \text{ k}\Omega$
- Sachant que  $Q = I\Delta t$ , déterminer  $\Delta t$
- Le gate est ensuite créé à l'aide du dual-timer

#### 5.4.4 Prise de données

Afin de prendre les données nécessaires à la caractérisation de l'OM, nous devons réfléchir à la logique d'acquisition. Nous allons utiliser l'ADC que nous venons de calibrer et lui fournir le signal de l'OM ainsi qu'une porte logique (gate). Pour créer ce gate, nous avons besoin des modules logiques. Il nous faut réfléchir aux conditions dans lesquelles ont veut déclencher la prise de mesure. En d'autres termes, quand-est-ce que le signal de l'OM nous intéresse ? Une fois que cela est clair, vous pouvez l'implémenter à l'aide des modules logiques. Il vous faudra ensuite vérifier que le signal de l'OM et votre porte logique sont en coïncidence à l'aide de l'oscilloscope. Lorsque vous avez effectué cette vérification, reliez le gate et le signal de l'OM à l'ADC pour commencer la prise de mesure.

**Attention :** Pour la manipulation utilisant les muons, veillez à changer le nom du fichier pour ne pas qu'il soit écrasé lors de la prise de mesure suivante.

- **Gate :** (PM1 & PM2 & PM3) & (OM & !PM4)
- Faire passer le gate dans le dual-timer pour avoir des fenêtres de taille constante
- Vérifier que l'OM est en même temps que le gate
- On veut aussi le muon rate ( $\sim 1 \text{ Hz}$ ) donc on passe (PM1 & PM2 & PM3) dans le scaler relié au PC
- Donner le gate et le signal à l'ADC (taux de coïncidence  $\sim 0.2 \text{ Hz}$ ) et commencez la prise de mesure

#### 5.4.5 Mesure du bruit de fond

Intéressons nous au bruit de fond présent dans votre manipulation. Nous voulons connaître le taux de fausses coïncidences, c'est à dire les cas où l'OM nous envoie un signal qui n'est pas dû à un photon Tcherenkov alors que notre porte logique s'est déclenchée.

Dans un premier temps, il vous faut réfléchir à la manière dont vous pouvez implémenter la prise de mesure du bruit de fond. Une fois cette méthode mise en place, vous pouvez démarrer l'acquisition du bruit de fond. A l'aide de l'oscilloscope, pensez toutefois à vérifier que le signal de l'OM et votre gate arrivent en même temps à l'ADC.

- **Gate :** (PM1 & PM2 & PM3) & (OM<sub>delayed</sub>) & !(PM4)
  - A l'aide d'un câble, on ajoute un délai de 50 ns sur l'OM avant la logique
  - Cela permet la mesure du taux de fausses coïncidences
  - On obtient un taux très faible avec  $\sim 1$  évènement par heure
- **Gate :** !(PM1 & PM2 & PM3) & (OM) & !(PM4)
  - On s'intéresse ici à tous les évènements de l'OM qui ne sont pas dû à un photon Tcherenkov
  - A partir de cela, on peut néanmoins calculer le taux de fausses coïncidences
  - $R_{fc} = 2 \cdot R_{mu} \cdot R_{bf} \cdot f$
  - où  $R_{fc}$  est le taux de fausse coïncidence,  $R_\mu$  le taux de muons et  $f$  est la fenêtre de temps.

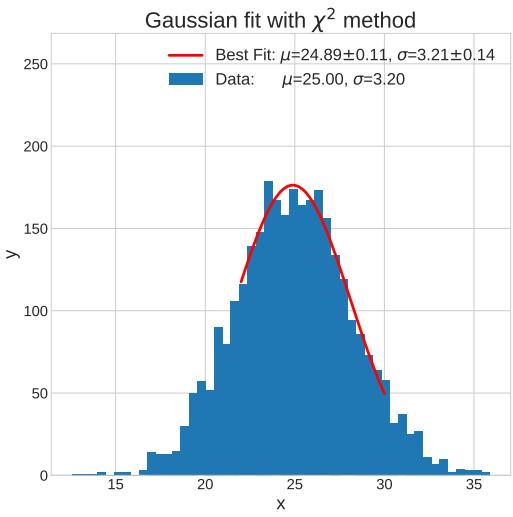
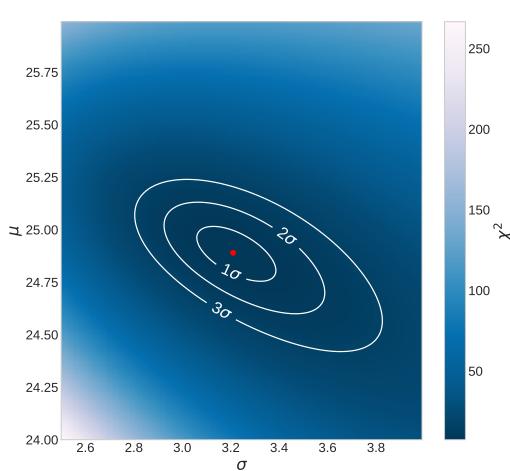
## 5.5 Analyse de données

A présent, nous pouvons nous concentrer sur l'analyse des données dans le but de caractériser l'OM. En vous basant sur les données, vous devrez calculer :

### Dispositif muon :

- le gain  $G$  de l'OM,
- la résolution  $\sigma_G$  de l'OM,
- le nombre moyen de photo-électrons  $\langle n_{pe} \rangle$  produit par trigger dans l'OM.

### Validation de la procédure d'ajustement :



### Ajustement des données :

$$G = \mu_{\text{best}}/e = \dots$$

$$\sigma_G = \sigma_{\text{best}}/\mu_{\text{best}} = \dots \%$$

$$\langle n_{pe} \rangle = \dots$$

## 6 DISPOSITIF : TEMPS DE VIE DE MUONS

## 7 DISPOSITIF : L'ARCHE COSMIQUE