

LOPES GOMES Paul  
Promotion 2015  
2015-2016

Rapport de stage de 5 pages en français :

***“Développement de photodétecteurs pour  
l'expérience nEXO”***

**TRIUMF**

4004 Wesbrook Mall V6T 2A3  
Vancouver BC Canada  
Tel(Fax) 604.222.1047(1074)  
[www.triumf.ca](http://www.triumf.ca)



**RETIERE Fabrice**  
Tel 604.222.7572  
Fax 604.222.1074  
[fretiere@triumf.ca](mailto:fretiere@triumf.ca)

Du 2 Mars 2015 au 31 Août 2015

## Introduction

J'ai effectué mon stage de fin d'étude à TRIUMF . Situé à Vancouver au Canada, TRIUMF est un laboratoire de recherche sur la physique nucléaire et la physique des particules. Comme tous les laboratoires de recherche, TRIUMF accueille d'autres expériences dont l'expérience nEXO.

Le but de nEXO est de mettre en évidence que la particule élémentaire -le neutrino- est une particule de Majorana. Pour cela nEXO utilise une désintégration bêta : la désintégration double bêta sans émission de neutrino. Plusieurs éléments chimiques, dont le Xénon, peuvent donner lieu à cette désintégration :



L'expérience est donc constituer d'un cuve contenant 5 tonnes de Xénon liquide. Les électrons 1 éjectés avec une grande énergie cinétique peuvent percuter d'autres électrons liés à d'autres atomes de Xénon. Ces derniers, alors excités, vont se désexciter en émettant de la lumière (photon). La lumière produite a une longueur d'onde de 175 nm.

Pour mesurer, avec une grande précision, cette énergie de scintillation, nEXO étudie des photo-détecteurs qui doivent satisfaire trois conditions :

1) l'efficacité quantique (PDE) doit être supérieur à 15%, 2) le bruit thermique doit être inférieur à 50Hz/mm<sup>2</sup>, 3) le nombre moyen d'impulsions corrélées à une impulsion primaire doit être inférieur à 0.2 par impulsion primaire.

## Photo-détecteurs au silicium (SiPM)

Les SiPMs sont des photo-détecteurs, constitués d'une matrice de pixels. Chaque pixel est une photodiode à avalanche fonctionnant en mode Geiger. Quand un/des photon(s) traverse(nt) la surface d'un pixel, il(s) déclenche(nt) à l'intérieur de celle ci une/des avalanche(s) de paires de porteurs de charges (électrons et trous). Le signal issue de ce courant d'avalanche(s) provenant d'un pixel est caractérisé par une impulsion (dite impulsion primaire). Le courant d'avalanches est ensuite coupé grâce à une résistance<sup>1</sup> et le pixel est de nouveau prêt pour être irradié.

Trois problèmes principaux sont liés à l'utilisation de tels détecteurs :

- Le bruit thermique. Des porteurs de charges sont générés thermiquement à l'intérieur d'un pixel puis déclenchent des avalanches. L'impulsion résultante ressemble parfaitement à une impulsion primaire.
- Les post-impulsions. Certaines impuretés contenues dans un pixel retiennent des porteurs de charges. Ces derniers sont ensuite libérés quelques secondes plus tard, ce qui donne lieu à de multiples impulsions très rapprochées en temps.
- Les impulsions d'interférences. Une avalanche déclenchée à l'intérieur d'un pixel a une certaine probabilité d'émettre à son tour des photons. Ces photons peuvent déclencher, en même temps, d'autres avalanches dans les pixels adjacents. L'impulsion obtenue est la somme des impulsions primaires indépendantes.

---

1. Dite résistance de shunt.

La figure ci-dessous résume ces trois issues<sup>2</sup> :

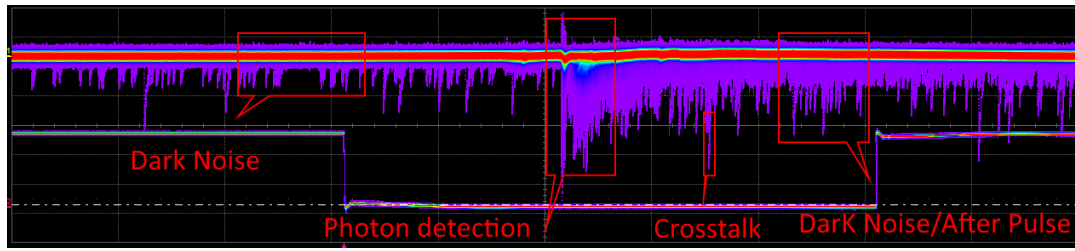


FIGURE 1 – Les trois problèmes principaux. L’axe horizontal est le temps ( $1\mu\text{s}/\text{div}$ ), l’axe vertical est la tension ( $10\text{mV}/\text{div}$ ).

### Notre expérience

Pour rester proche des conditions expérimentales de nEXO, notre expérience consiste en une boîte en aluminium contenant une lampe flash au Xénon ainsi qu’un système de refroidissement permettant de travailler à  $-100^\circ\text{C}$ .

Un filtre placé devant la lampe permet de sélectionner la longueur d’onde de 175 nm et d’autres filtres identiques atténuent la lumière. Le faisceau se sépare ensuite en deux à l’aide d’un séparateur de faisceau. L’un des faisceaux va irradier la surface d’un premier photo-détecteur (VUV2 SiPM), non refroidi. L’autre fera de même sur un deuxième photo-détecteur (VUV3 SiPM) refroidi à  $-100^\circ\text{C}$ . Le premier permet de vérifier si la quantité de lumière reçue par la seconde est constante au cours du temps. Il permet aussi de calculer l’efficacité absolue du second. Il s’agira de caractériser ce deuxième photodétecteur. Enfin la boîte est remplie d’un gaz  $-\text{N}_2-$  afin de permettre la propagation des photons vers les photo-détecteurs mais aussi d’éviter la présence de gel sur la surface du photodétecteur refroidi.

Cependant un problème majeur de bruit électronique a retardé la prise de données. En effet la lampe en fonctionnement émet des ondes radio qui sont transmises par toutes surfaces métalliques de la boîte. Ainsi les deux signaux reçus des différents photodétecteurs s’en trouvent déformés à tel point qu’il n’est plus possible d’identifier les précédentes impulsions noyées dans ce bruit d’origine électronique. Une des solutions fut d’enrouler les fils transportant les impulsions avec une feuille d’aluminium. De cette manière les amplificateurs sont reliés à la terre via une des pattes des photodétecteurs.

### L’efficacité quantique

La lampe est allumée sur une période de  $10\mu\text{s}$ , avec une fréquence de répétition de 100Hz. Pendant cette période, elle envoie un flash d’une durée d’environ  $1.4\mu\text{s}$  après plus de  $4\mu\text{s}$  de chargement. L’écran de l’oscilloscope, et donc chacun des signaux enregistrés<sup>3</sup>, est divisé en deux zones de  $3\mu\text{s}$  chacune. La première, dite “zone de lumière” est située après que la lampe a envoyé un flash (à partir de  $4\mu\text{s}$ ). Dans cette zone les impulsions primaires peuvent être soit déclenchées par des photons soit à cause du bruit thermique. La deuxième, dite “zone d’ombre”, est située avant que la lampe ait envoyé un flash (avant  $4\mu\text{s}$ ). Dans cette zone les impulsions primaires ne peuvent être déclenchées que par le bruit thermique avec la même probabilité que

2. Dark noise = bruit thermique, Crosstalk = impulsions d’interférence, after pulse = post-impulsions, photon detection = impulsions primaires déclenchées par la détection d’un photon.

3. Un signal enregistré correspond à une capture d’écran de l’oscilloscope

dans la “zone de lumière”.

L’efficacité quantique se mesure donc de cette manière :

$$\langle PE \rangle = -\ln\left(\frac{P_{L0}}{P_{D0}}\right), \quad (2)$$

où  $\langle PE \rangle$ ,  $P_{L0}$  and  $P_{D0}$  sont le nombre moyen de photon-électrons, la probabilité de n’observer aucune impulsion dans la “zone de lumière” et celle d’en observer aucune dans la “zone d’ombre”, respectivement.

Cependant les mesures de l’efficacité effectuées pour un photo-détecteur -VUV3 SiPM- dans les mêmes conditions expérimentales, donnent des résultats différents. Si certains paramètres<sup>4</sup> ont été testé, le mauvais alignement du faisceau lumineux avec la surface des photodétecteurs semble en être la cause principale. Cet effet s’amplifie au fur et à mesure que la structure supportant le séparateur de faisceau se refroidit lorsque le système de refroidissement impose une température de  $-100^\circ\text{C}$  au photodétecteur à caractériser.

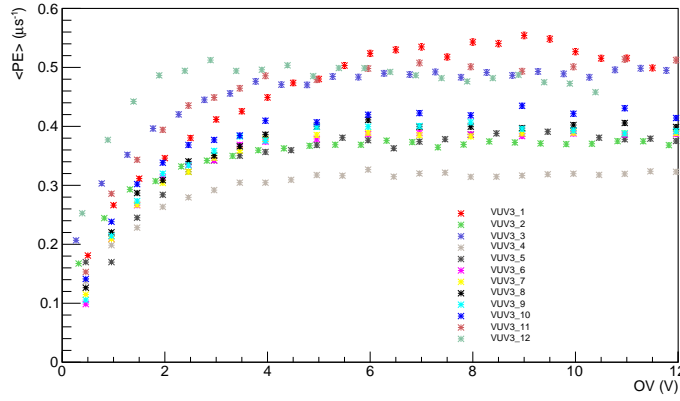


FIGURE 2 – Les mesures de l’efficacité  $\langle PE \rangle$  ne sont pas reproductibles à  $-100^\circ\text{C}$ .

### Le bruit thermique

La même logique des deux zones est utilisée pour calculer le nombre moyen d’implusions déclenchées par du bruit thermique. Afin d’augmenter la probabilité d’observer du bruit thermique et d’éviter la région de  $1.4\mu\text{s}$ <sup>5</sup>, les deux zones sont restreintes à  $1\mu\text{s}$  chacune et séparées de  $4\mu\text{s}$ .

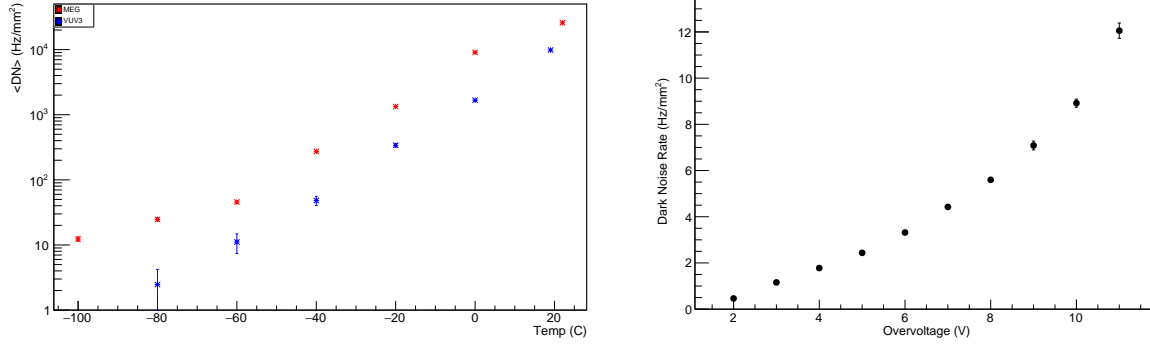
Le taux de bruit thermique (qui est le bruit thermique par seconde par unité de surface millimétrique)  $\langle DN \rangle$  se calcule donc de cette manière :

$$\langle DN \rangle = \ln \frac{1}{2} \cdot (P_{D0} + P_{L0}) \quad (3)$$

Ce taux en fonction de la température<sup>6</sup> ainsi qu’ en fonction de l’excès de tension (OV)<sup>7</sup> sont représentés :

---

4. Position et tension de lampe, quantité de N2, poussière sur la surface des photodétecteurs  
5. Là où les photons de la lampe apparaissent  
6. Du faite que ce bruit soit généré thermiquement  
7. Information extraite de la méthode d’ interpolation



(a) Le taux de bruit thermique du détecteur VUV3 SiPM et du MEG MPPC.

(b) Ce même taux en fonction l'OV pour le VUV3 SiPM à  $-100^{\circ}\text{C}$ .

FIGURE 3 – Pour le VUV3 SiPM le taux de bruit thermique est inférieur à  $12\text{Hz}/\text{mm}^2$ .

### Les avalanches corrélées

Comme le nom l'indique, les avalanches corrélées ne peuvent être produites qu'à partir d'une impulsion primaire. Pour mesurer le nombre moyen d'impulsions d'interférence  $\langle CT \rangle$ , l'idée est de déclencher l'enregistrement du signal provenant d'un photodétecteur sur la détection d'une impulsion et non plus sur la détection d'un flash provenant de la lampe. Faisant apparaître les impulsions au centre de l'écran, une zone de 200ns est définie par rapport à ce centre. De plus l'amplitude des impulsions d'interférence est le double de celle des impulsions primaires. Le nombre moyen d'impulsions d'interférence se calcule ainsi :

$$\langle CT \rangle = -\ln\left(\frac{N_{1PE}}{N_{>1PE}}\right), \quad (4)$$

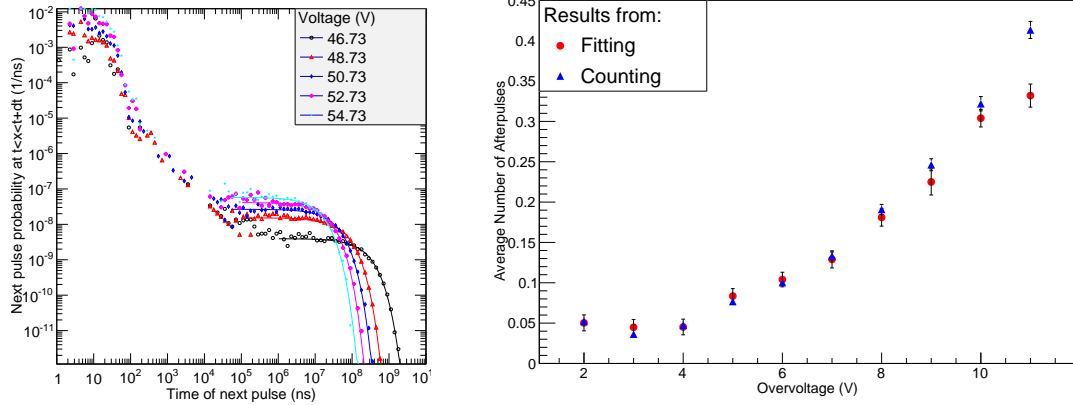
où  $N_{1PE}$  et  $N_{>1PE}$  sont respectivement le nombre d'impulsions primaires et le nombre total d'impulsions en comptant à partir de  $N_{1PE}$  (inclu). Comme la probabilité d'observer des impulsions d'interférence augmente avec l'excès de tension (OV) appliquée au photodétecteur, il est logique de représenter  $\langle CT \rangle$  en fonction de OV 5.

De plus un algorithme permet de compter le nombre d'impulsions à partir de la première impulsion du premier signal enregistré (sur 15000 par exemple). Cette méthode de comptage permet donc de tracer la probabilité d'observer une post-impulsion en fonction du temps 4(a). Deux formes distinctes séparées à  $50\mu\text{s}$  sont assez remarquables. Toutes les impulsions avant  $50\mu\text{s}$  sont considérées comme étant des post-impulsions alors que celles après  $50\mu\text{s}$  sont considérées comme étant des impulsions primaires générées thermiquement.

Par ailleurs à partir de  $50\mu\text{s}$  il est possible d'extraire le nombre moyen de post-impulsions  $\langle AP \rangle$  ainsi que le taux de bruit thermique  $\langle DN \rangle$ . C'est la méthode d'interpolation :

$$P_{total} = P_{0AP} \cdot \langle DN \rangle \cdot e^{-\langle DN \rangle \cdot t}, \quad (5)$$

où  $P_{0AP}$  est la probabilité de pas observer de post-impulsion et  $\langle DN \rangle$  définie précédemment. En combinant les résultats de la méthode de comptage et ceux d'interpolation pour les post-impulsions, on obtient 4(b) :



(a) La probabilité d'observer une impulsion après la première impulsion primaire du premier signal enregistré.

(b) Les deux méthodes donnent les mêmes résultats pour différents OV pour le VUV3 SiPM à  $-100^\circ\text{C}$ .

FIGURE 4 – Comptage et interpolation donnent le nombre de post-impulsions.

Enfin additionner  $\langle CT \rangle$  et  $\langle AP \rangle$  donne le nombre moyen d'impulsions corrélées à une impulsion primaire :

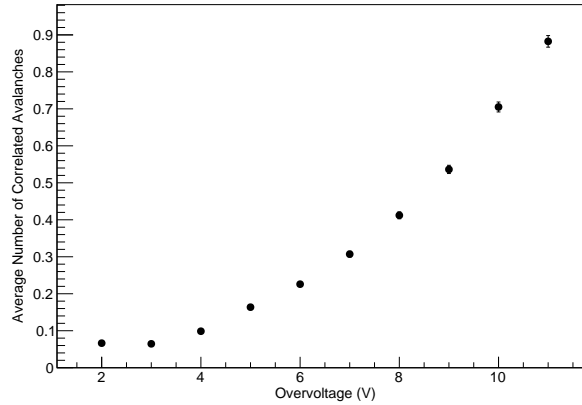


FIGURE 5 – Le nombre moyen d'impulsions corrélées pour le VUV3 SiPM à  $-100^\circ\text{C}$ .

### Conclusion et recommandations

Bien que la mesure de l'efficacité quantique soit un des buts premiers du stages, le mauvais alignement de la lampe avec les photodétecteurs ne permet pas de le faire. Nous recommandons d'agrandir le faisceau avec une lentille.

Cependant les résultats prometteurs pour le VUV3 SiPM intéresseront l'expérience nEXO puisque le taux de bruit thermique par seconde et par unité de surface millimétrique est moins de  $12\text{Hz}/\text{mm}^2$  à  $-100^\circ\text{C}$  et que le nombre moyen d'impulsions corrélées est moins de 0.2 par impulsion primaire, et ceci jusqu'à un excès de tension de 5V à cette température. Nous recommandons de confirmer des résultats pour d'autres photo-détecteurs (MEG MPPC, coated SiPM, FBK).