

<p>Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite</p> 	<p>Réf. : SCI-NT-02 Edition : 1    Date : XX-XX-XX Révision : 0    Date : <span style="float: right;">Page : 1</span></p>
---	---

 	<p>Réf. : SCI-NT-02 Edition : 1    Date : XX-XX-XX Révision : 0    Date :</p>
 	 <p>Ionospheric and gamma-ray Observations Satellite</p>

<b>RAPPORT CHARGE UTILE SCINTILLATEUR</b>
---

<b>Résumé</b>
---------------

	Date	Signature
Préparé par : <p style="text-align: center;">Léa Bourhis</p>	25/08/2015	
Approuvé par : <p style="text-align: center;">Philippe Laurent</p>	10/09/2015	



### HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Ed.	Rev.	Date	Modifications	Visa
1	0	25/08/15	Création du document	



## TABLE DES MATIÈRES

1.INTRODUCTION.....	4
2.COMPOSITION DE LA CHARGE UTILE.....	4
2.1. SCINTILLATEUR.....	4
2.2. SIPM.....	4
2.3. CARTE EASIROC.....	5
3.SIMULATIONS NUMÉRIQUES.....	5
3.1. MEGALIB.....	5
3.2. DIMENSIONNEMENT DU SHIELDING.....	6
3.3. DIMENSIONNEMENT DU SCINTILLATEUR.....	7
4.BANC DE TESTS.....	8
4.1. COMPOSITION DU BANC DE TEST.....	8
4.2. LABVIEW.....	9
4.3. LIMITE DE DETECTION DU SIPM.....	10
5.CONCLUSION.....	11
6.BIBLIOGRAPHIE.....	11



## 1. INTRODUCTION

L'objectif de la charge utile scintillateur est de réaliser des spectres en énergie des photons gammas et des électrons dans les ceintures de radiations en orbite basse (LEO). A cette altitude, les ceintures de radiations peuvent être observées aux niveau des cornets polaires et de la SAA (Anomalie de l'Atlantique Sud).

La charge utile permettra également la caractérisation en vol d'une matrice SiPM associée à l'électronique de lecture EASIROC.

Ce rapport présente la charge utile et les travaux réalisés de mai à juillet 2015.

## 2. COMPOSITION DE LA CHARGE UTILE

### 2.1. SCINTILLATEUR

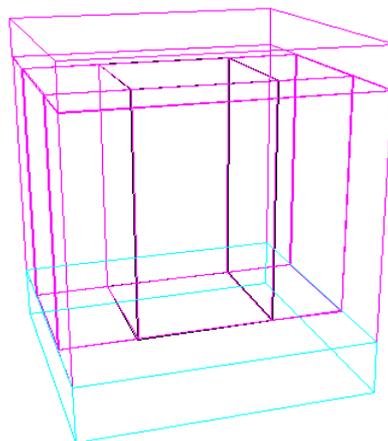
Un scintillateur est un matériel qui, lorsqu'il absorbe une particule, émet un nombre de photons de scintillation proportionnel à l'énergie déposée par la particule dans le scintillateur.

On utilisera deux types de scintillateurs :

- Un scintillateur plastique en BC412 sensible aux électrons
- Un scintillateur cristal en LaBr3 sensible aux électrons et aux photons gammas

Pour pouvoir différencier les électrons des photons, le scintillateur cristal sera incorporé dans le plastique. Ainsi, tous les électrons déposeront forcément de l'énergie dans le plastique avant d'en déposer dans le cristal.

Le schéma ci-dessous représente le scintillateur plastique (rose) entourant le scintillateur cristal (bleu foncé) tous les deux reposant sur le SiPM (Silicon PhotoMultiplier, bleu turquoise) :



### 2.2. SiPM

Le SiPM est un semi conducteur composé de matrice de photodiode à avalanche (APD). Ce détecteur va permettre de compter les photons de scintillation et de transformer cette information en signal analogique.

Notre SiPM sera composé d'une matrice de 4x4 pixels. Pour différencier les photons de scintillation provenant du scintillateur cristal de ceux provenant du scintillateur plastique, les 4 pixels du centre seront réservés au scintillateur cristal tandis que les 12 autour seront réservés au scintillateur plastique.

Pour le moment deux SiPM ont été commandés chez HAMAMATSU :

- S13361-3050NE-04
- S13361-3050AE-04



La seule différence entre les deux modèles réside dans la matière de « la fenêtre de détection ». Ces modèles ne sont à la base pas destinés au vol spatial. Des tests sous vide devront donc être effectués sur les deux modèles.

Pour le moment, nous possédons deux SiPM : une matrice 4x4 et un pixel simple. Ils nous permettent de réaliser des tests préliminaires sur le banc de test.

Pour fonctionner le SiPM doit être alimenté avec une tension de 70 V. Cette tension sera obtenue à l'aide d'un « DC to HV DC converter » qui se trouvera sur la carte EASIROC.

### 2.3. CARTE EASIROC

La carte EASIROC est une carte électronique de test. Elle va permettre d'amplifier le signal reçu du SiPM et de le transformer en signal numérique. Ce signal est ensuite transféré à l'ordinateur de bord via le microcontrôleur. La carte EASIROC est alimentée sous 5V.

La carte actuelle ne correspond pas au modèle de vol de par sa trop grande taille et du surplus de fonctionnalités inutiles pour notre projet. Une nouvelle carte basée sur la carte EASIROC va être réalisée. Elle ne contiendra que les composants nécessaires à notre mission et sera aux bonnes dimensions.

## 3. SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Le tableau « simulation.odt » résume les simulations que j'ai réalisées au cours de mon stage. Le tableau comprend : le numéro de la simulation, le nombre d'électrons détectés, le type de détecteur utilisé, nb d'e- envoyés, leur énergie, la géométrie utilisée, le type de la source et enfin des commentaires.

Certaines simulations peuvent vous paraître étrange (29 et 35 par ex.), elles m'ont servi à mieux comprendre le fonctionnement de MEGALib.

Chaque simulation est stockée dans un répertoire contenant la géométrie, le fichier source, les résultats et un fichier texte d'information sur la simulation.

### 3.1. MEGALIB

Les simulations numériques se font à l'aide du logiciel MEGALib. On utilise principalement 3 toolkits de ce logiciel :

- Geomega permet de réaliser la géométrie de la simulation et de définir les détecteurs que l'on souhaite utiliser ;
- Cosima permet de définir les caractéristiques de la simulation : type de particule, flux, condition d'arrêt etc... ;
- Revan permet d'analyser les simulations.

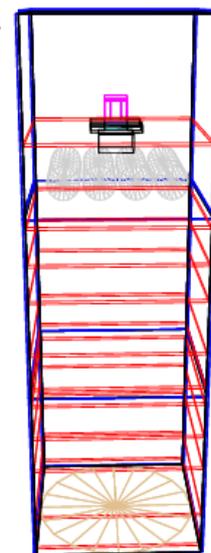
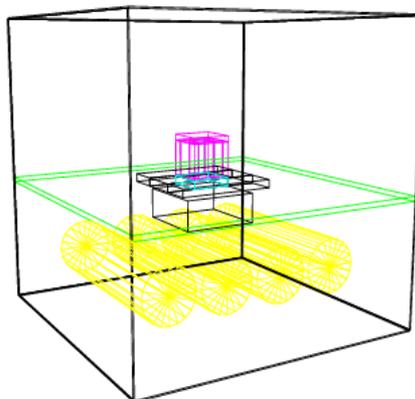
Un document d'utilisation se trouve dans le drive ainsi que deux manuels d'instructions (un pour Geomega et un pour Cosima) qui sont complets et bien expliqués.

Les simulations vont nous permettre de réaliser plusieurs choses :

- Dimensionnement shielding ;
- Dimensionnement scintillateur ;
- Réalisation de spectres.

Pour réaliser les simulations, on doit d'abord construire la géométrie du nanosatellite.

La charge utile scintillateur se trouve dans le cube supérieur du nanosat (pour avoir le meilleur champ de vue possible).





On peut voir dans la première figure à droite la géométrie du cube supérieur : les scintillateurs plastiques sont représentés en rose (le scintillateur cristal est en bleu à l'intérieur des plastiques mais n'est pas visible ici). Les scintillateurs reposent sur le SiPM (bleu turquoise) qui lui même reposent sur la carte EASIROC (en vert). Les batteries du nanosat sont représentées en jaune. Enfin, le blindage en aluminium (en noir) est composé de deux parties : une autour du SiPM et un bloc en dessous de la carte EASIROC.

La figure de droite représente le nanosatellite dans son ensemble. Les parois sont en carbone sur lesquelles reposent les plaques PCB et les panneaux solaires (en ArGI). Pour modéliser les cubes inférieurs, j'ai disposé des plaques PCB espacées de deux cm environ. Le cercle marron sur la face inférieure du nanosat correspond à l'antenne GPS (en cuivre).

### 3.2. DIMENSIONNEMENT DU SHIELDING

Comme dit précédemment, le cristal sera imbriqué dans le plastique pour pouvoir différencier les électrons des gammas. Seulement une seule face du cristal sera en contact avec le SiPM. Si un électron passe par cette face et est entièrement absorbé dans le cristal, il sera alors considéré comme étant un photon. Comme le flux d'électron est très supérieur au flux de photon, cela pourrait induire beaucoup de bruit dans nos mesures. On veut donc mettre en place un blindage autour du SiPM et sous la carte EASIROC qui empêcherait les électrons de passer par la face du cristal en contact avec le SiPM. Une première étude du dimensionnement du blindage a été réalisée (cf document « Dimensionnement Shielding » dans le drive Etude/Scintillateur/Charge utile scintillateur Paul 2014/Dimensionnement Scintillateur). L'étude était arrivée à la conclusion qu'un blindage autour du SiPM de 1.1 cm d'épaisseur et un pavé sous la carte EASIROC de dimension 2.5\*2.5\*1.1 cm était le meilleur compromis pour absorber les électrons sans avoir un blindage trop lourd.

Cependant ces simulations ont été réalisées sans tenir compte de la géométrie complète du nanosatellite. J'ai donc testé le blindage en considérant cette géométrie.

Pour voir l'évolution du nombre de détections en fonction du nombre de composants dans la géométrie, j'ai réalisé 19 simulations en rajoutant à chaque nouvelle simulation un élément de la géométrie en plus. **Je ne me suis intéressée qu'aux électrons détectés uniquement par le scintillateur cristal** (cad que les détecteurs plastiques sont en Veto et le cristal en Trigger). Les caractéristiques des simulations sont les suivantes :

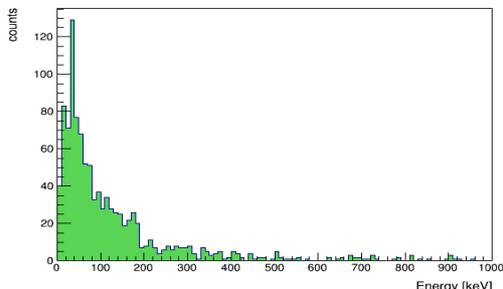
- type de particule : électron
- Nombre de particules envoyées : 10 000 000
- Flux de particule : 100 000
- Energie des particules : 5 MeV

Les caractéristiques et les résultats de chaque simulations sont répertoriés dans le tableau « simulations.ods » (dont un extrait est donné ci-dessous). On remarque que lorsque l'on rajoute un composant dans la géométrie, le nombre de particules détectées uniquement par le cristal a tendance à augmenter... L'hypothèse avancée pour expliquer ce phénomène est que les particules sont fortement déviées par les composants et peuvent donc être détectées plusieurs fois. Cependant elles devraient déposer beaucoup moins d'énergie dans les scintillateurs.

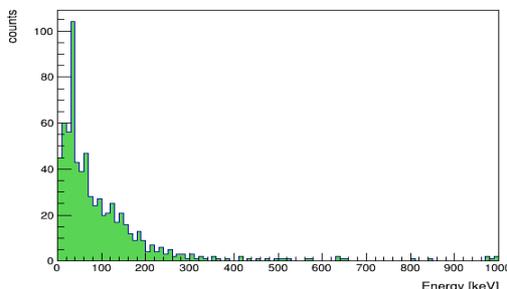
Le graphique de gauche représente les hits se produisant uniquement dans le cristal en considérant la géométrie du satellite en entier sans le blindage (simulation 17). La figure de droite représente la même chose mais en tenant compte du blindage (simulation 19). On peut voir que les hits sont moins nombreux et ont une énergie plus faible lorsque le blindage est présent.



Cristal



Cristal



SimulD	Resultas
	Ndetect
17	505
19	447

Un détails important à souligner est que l'on a utilisé des détecteurs « idéaux » cad que le seuil de détection de tous les détecteurs (cristal et plastique) est à 0 KeV. Ce qui n'est évidemment pas le cas dans la réalité. J'ai donc réalisé des simulations en augmentant le seuil de détection à 10 KeV (une particule doit déposer au moins 10 KeV dans le scintillateur pour être détectée). On doit modifier dans le fichier contenant la géométrie l'option « TriggerThreshold ». Cependant, les simulations (36 à 43) m'ont permis de comprendre qu'on ne peut pas modifier ce trigger sur les détecteurs en mode Veto (sinon le nb de détections par le cristal uniquement augmente fortement...).

Il n'est pas nécessaire de refaire les même simulations en modifiant uniquement le trigger, il suffit juste de modifier la valeur dans les simulations déjà faites et de relancer Revan en utilisant bien le fichier contenant la géométrie modifiée.

### 3.3. DIMENSIONNEMENT DU SCINTILLATEUR

A la suite de la revue de fin de phase A, la question du dimensionnement du scintillateur est devenue crucial. Deux de ses dimensions sont fixées par les dimensions du SiPM. Reste à déterminer la hauteur du cristal et du plastique de telle sorte que le SiPM ne sature par lors des acquisitions. Une étude à également été réalisée sur ce sujet (voir le document « Dimensionnement scintillateur » dans le drive). Hélas, le modèle du SiPM présent sur le banc de test étant obsolète, un nouvel SiPM (avec des dimensions différentes) vient d'être commandé. J'ai tout de même commencé à travailler sur le sujet. L'étude réalisée est théorique, elle n'a donc pas été vérifiée par les simulations. Dans cette étude, il a été estimé que le SiPM peut détecter au maximum 100 000 particules/s sans saturer. Sachant que 2 des 3 dimensions du scintillateur sont fixée par les dimensions du SiPM, il ne restait qu'a trouver la hauteur de ces derniers. Cette hauteur a été déduite des valeurs de flux d'électron dans les zones les plus denses (calculées par le logiciel OMERE). On ne considère que les électrons car leur nombre est très grand devant le nombre de photons gamma détectés par seconde.

Dans cette étude le scintillateur plastique ne recouvre par le haut du scintillateur cristal et la géométrie totale du nanosatellite n'est pas prise en compte (beaucoup de particules seront entièrement absorbées avant d'arriver sur le scintillateur). J'ai cependant réalisé une simulation pour essayer de vérifier si les dimensions du scintillateur permettaient effectivement de détecter au maximum 100 000 particules/s dans le cas pire (cad au niveau de la SAA où le flux d'électrons a été estimé à 233 894 particules/(cm<sup>2</sup>.s)).

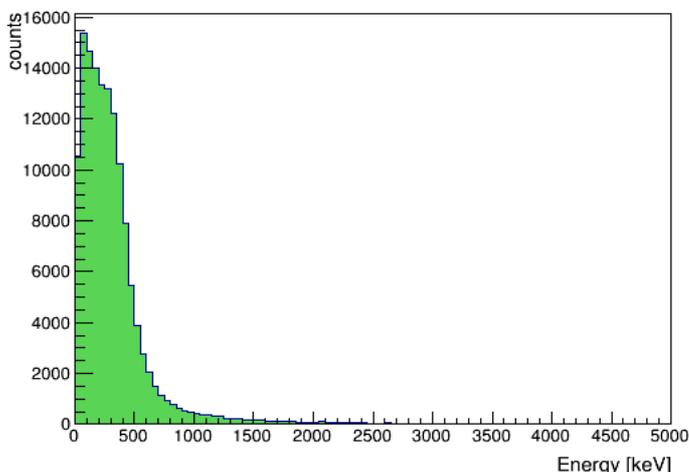
J'ai donc fais une simulation (simulation 33) qui envoie pendant 1s des électrons de 5 MeV (oui c'était peut être un peu trop élevé...) en utilisant la géométrie du scintillateur et du SiPM. J'ai obtenu un nombre d'événements supérieur à 700 000... Cependant, il faut prendre en compte le fait que je n'ai pas inclus la géométrie totale du nanosatellite (avec le blindage) et que les électrons avaient une énergie assez élevée.



Par la suite j'ai réalisé une simulation (simulation 34) avec les mêmes conditions mais en considérant la géométrie totale du nanosatellite et les dimensions du nouvel SiPM (la hauteur a été fixé arbitrairement). J'ai obtenu plus de 300 000 événements.

Pour avoir une meilleur estimation du nombre de particules détectées par le SiPM en condition réelle, la simulation 46 a été réalisée en utilisant un flux de la forme  $E^{-\lambda}$  avec E l'énergie des particules envoyés (allant de 1 à 20 MeV). La valeur de  $\lambda$  provient du document « Calcul du rapport Signal-Bruit » et vaut 3,61. Au bout d'1s, les scintillateurs ont détecté 137 408 particules, ce qui est beaucoup plus proche du résultat souhaité ! Ci dessous est représenté (à l'aide de Revan) le spectre en énergie des particules détectées par les scintillateurs.

Energy spectrum BEFORE reconstruction



On peut voir d'après le spectre que les particules déposent peu d'énergie dans les scintillateurs (la plupart entre 10 et 500 KeV). On pourrait croire que d'après le graphique il y a des événements détectés avec une énergie comprise entre 0 et 10 KeV mais c'est juste un problème de « binning ». Pour obtenir le spectre en énergie des particules arrivant sur le nanosatellite, il faut construire une matrice de réponse et la convoluer avec le spectre mesuré. Il serait également intéressant de réaliser par la suite la même simulation sans le blindage pour tester son efficacité.

## 4. BANC DE TESTS

### 4.1. COMPOSITION BANC DE TESTS

Le banc de test est composé actuellement de :

- Un SiPM (1 seul pixel)
- Un SiPM (matrice de 4x4 pixel)
- La carte EASIROC
- Une LED bleu modélisant les photons de scintillation
- Une boîte noire pour isoler la LED et le SiPM
- Une alimentation pour le SiPM (75V)
- Une alimentation pour la carte EASIROC (5V)
- Une alimentation pour la LED
- Un oscilloscope





Comme le SiPM à 16 pixels, il sera relié à la carte EASIROC par 16 pins. Pour le moment le SiPM n'est relié qu'à un seul pin faute de branchement adéquat. En fait, chaque pin est composé d'un pin haut et d'un pin bas. Le pin haut est alimenté par la carte EASIROC (à une tension de 4.5 V max) et le pin bas est alimenté par l'alim HT du SiPM (environ 75 V). Il y a donc aux bornes du SiPM une différence de tension qu'il faut maintenir à une valeur particulière (71.42V) pour avoir le meilleur rendement du SiPM. Lorsqu'un photon arrive sur le SiPM, il va être convertit en une tension qui va donc entraîner une modification de la différence de tension aux bornes du SiPM. Cette variation va être mesurée par la puce EASIROC qui va amplifier le signal et le transformer en signal numérique. Ce signal est transmit à l'ordinateur via le port USB.

## 4.2. LABVIEW

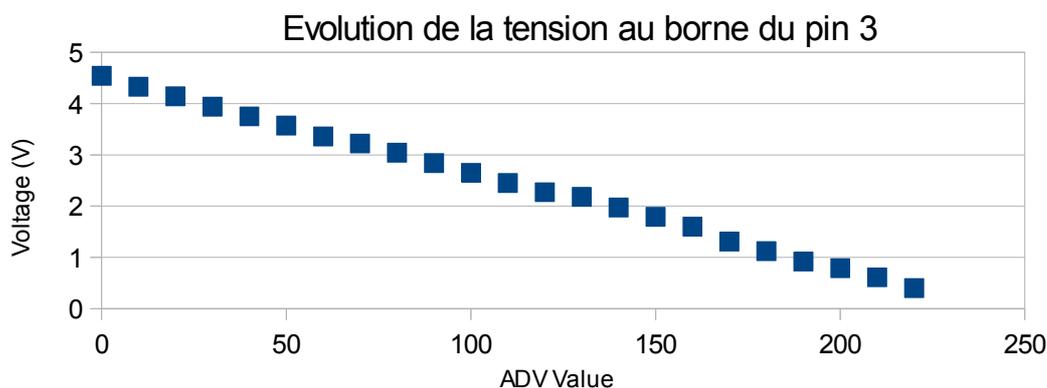
Pour contrôler la carte EASIROC et visualiser le signal reçu, on utilise le logiciel LabView. Ce logiciel est bien décrit dans les rapports précédents, je rappellerai donc uniquement les informations principales concernant le fonctionnement de ce logiciel.

Tout d'abord avant de lancer LabView, il faut s'assurer que l'ordinateur détecte bien la carte EASIROC. Pour cela, cliquez sur le « Test245 » sur le bureau. Si il a bien détecté la carte, on peu ensuite lancer LabView.

Sur l'onglet d'accueil, il faut changer le « ER\_01 » en « ER\_04 », appuyer sur la flèche en haut à gauche et enfin sur le bouton « transmit slow control ».

L'onglet Slow control 1 permet de régler la valeur en ADC du trigger de la carte entre 0 et 1023. Ce trigger définit le seuil à partir duquel l'information qui arrive est considérée comme étant du signal ou du bruit. 0 étant le seuil le plus haut (rien ne passe) et 1023 le plus bas (tout passe).

L'onglet Slow control 2 permet de régler la valeur de la tension appliquée aux pins hauts de la carte. Cette valeur est en ADC (comprise entre 0 et 225). Chaque valeur en ADC correspond à une valeur en volt particulière pour chaque pin. Pour une valeur en ADC, la valeur en volt n'est pas la même pour chaque pin. Il faut donc réaliser des courbes d'étalonnage pour différentes valeurs en ADC et pour au moins 16 pins. Le tableau « réponse pin SiPM » (dans le gdrive) contient , pour des valeurs en ADC allant de 0 à 220, les valeurs en volt correspondantes pour les pins 3 à 18. Ci-dessous la courbe d'étalonnage du pin 3 :

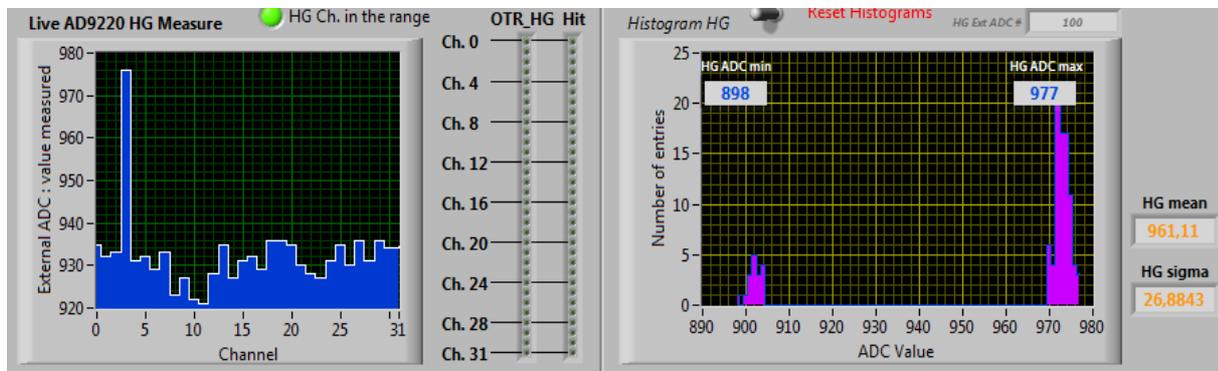


Attention tout de même, pendant la réalisation des courbes d'étalonnage, j'ai remarqué que certaines valeurs en volt pouvaient varier du jour au lendemain pour une même valeur en ADC... Il est donc prudent de revérifier quelques valeurs avant de commencer à faire des tests.

L'onglet external ADC test permet de visualiser le signal reçu sous forme de 4 graphiques :  
- deux histogrammes (HG et LG) représentant le signal reçu pour chaque pin



- deux histogrammes (HG et LG) représentant le nombre de détection pour chaque valeur en ADC



L'image ci-dessus représente justement ces deux histogrammes pour le HG. Sur le graphique de gauche, on voit nettement que le SiPM est relié au pin 3... On voit également que les autres pins captent quelque chose alors qu'ils ne sont reliés à rien, cela correspond au bruit électronique de la carte EASIROC. On voit sur le graphique de droite deux pics : celui de gauche correspond au bruit électronique tandis que celui de droite correspond au signal reçu. En modifiant la valeur du trigger dans l'onglet Slow control 1, on peut réussir à enlever le pic correspondant au bruit électronique de la carte.

**Attention** : lorsqu'on lance une simulation, toutes les données sont stockées dans un fichier. Il faut donc le vider régulièrement sinon on ne peut plus faire d'acquisition. Pour le vider appuyer sur « Clean ADC »

### 4.3. LIMITE DE DÉTECTION DU SiPM

L'un des buts du banc de test est de déterminer les limites de détection du SiPM. Pour cela, on fixe tout les paramètres de l'expérience : niveau du trigger de la carte, amplitude LED, tension SiPM, tension pin etc. Puis on fait varier la fréquence de la diode. On obtiendra ainsi la limite haute et basse du nombre de coups/s pour que le SiPM détecte les photons.

J'ai réalisé ce test sur la matrice 4x4 actuellement présente sur le banc de test sachant qu'un nouvel SiPM arrivera dans les prochains mois, cela permet d'avoir une idée des valeurs.

En réalisant cette expérience j'ai trouvé une limite basse de 35 Hz (35 événements par seconde) et une limite haute de 23 kHz (23 000 événements par seconde) pour une amplitude de la diode fixée à 1,7V. Attention ces résultats ne tiennent compte que d'un seul pin. Pour les 16 pins on a donc une limite basse de 560 événements/s et une limite haute de 368 000 événements/s. On ne tient pas compte du « cross talk » (un photon optique devant déclencher un pixel particulier déclenche le pixel voisin), on est cependant bien au dessus des 100 000 evt/s de la théorie.

On veut ensuite déterminer le nombre de photons minimal pour que le SiPM détecte un événement. Pour réaliser cela on fixe les paramètres du banc de test et on fait varier l'amplitude de la diode. En réalisant cette expérience j'ai trouvé une amplitude minimale de 1,44 V. On souhaite déduire de cette valeur le nombre de photons correspondant.

Pour cela, on fait l'hypothèse que l'intensité de la diode suit une loi du type  $\exp(\lambda x) - 1$ . D'après la datasheet de la diode, à 3,2 V on a une intensité lumineuse de 140 mcd. Donc  $\exp(3,2 * \lambda) - 1 = 140$ , on en déduit  $\lambda = -1,54$ . Donc pour 1,44 V on trouve 8,18 mcd. Hélas, le montage de la LED et du SiPM dans la



boite noir n'étant pas très stable, on ne peut pas dire que la LED est bien en face du SiPM, on ne considère alors que 70% du flux soit  $8,18 \times 0,7 = 5,726$  mcd.

Ensuite on considère un angle de vision de  $27^\circ$  soit 0,66 sr. Cela donne une puissance lumineuse de 0,00378 lm. Sachant qu'une LED produit environ 60 lm/W on a donc une puissance lumineuse de  $6,3 \times 10^{-5}$  W.

Sachant que l'énergie d'un photon est donnée par  $E=hc/\lambda$ , avec  $\lambda = 458$  nm d'après la datasheet, on trouve  $E = 0,04 \times 10^{-17}$  J. On doit diviser cette valeur par la durée de l'événement, à savoir 100 ns (paramètre fixé sur l'alimentation de la diode).

On obtient finalement pour un photon, un énergie de  $0,04 \times 10^{-10}$  J. Le nombre total de photons envoyés pendant l'événement est donc 15 750 000 photons. D'après la datasheet du scintillateur, celui-ci émet 63 photons/KeV donc 63 000/MeV. On trouve finalement qu'une particule doit déposer au minimum 250 MeV pour être détecté... Ce résultat est évidemment complètement aberrant. La principale source d'erreur provient de la valeur de l'angle de vision. En effet, lorsque l'on ferme la boite noire, la LED bouge... il est donc difficile d'estimer correctement cette angle. L'erreur peut également venir de la carte EASIROC, en effet, elle produit un bruit électronique très élevé. Avec le nouvel SiPM et la nouvelle carte, on peut espérer obtenir un résultat bien plus satisfaisant.

## 5. CONCLUSION

Il faut refaire les calculs de limite de détection avec le nouvel SiPM. Comme il est censé être plus performant que le modèle actuel, on pourrait revoir la condition de saturation du SiPM à la hausse et du coup les dimensions actuelles du scintillateur pourrait être validées définitivement. Pour réaliser les test sur le nouvel SiPM, il faudrait trouver un nouveau système pour maintenir la diode bien fixe à l'intérieur de la boite noire et ainsi avoir une meilleure précision sur nos calculs.

Par la suite des tests sous vide devront être effectués sur le nouvel SiPM pour voir s'il serait capable de fonctionner correctement dans l'espace. La matrice de réponse du système de détection pourra également commencer à être réalisée pour permettre de revenir au spectre d'énergie des particules incidentes sur le nanosatellite en partant du spectre d'énergie mesuré.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

Tous les documents ci-dessous se trouvent dans le drive :

- « Calcul du rapport Signal-Bruit.pdf »
- « Dimensionnement Shielding.pdf »
- « DimensionnementScintillateur.pdf »
- « Rapport Charge utile scintillateur.docx »