



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTÉ DES SCIENCES

Laboratoire de Physique III Physique Nucléaire et Corpusculaire

Mesure du temps de vie du muon

Professeur : Alessandro Bravar

Alessandro.Bravar@unige.ch

Assistant : xxxxx

xxxxx@unige.ch

Université de Genève

Section de Physique

Résumé

Le but de cette expérience est d'obtenir une mesure précise du temps de vie moyen des muons. Pour ce faire, nous allons mettre au point un appareillage capable de détecter les désintégrations des muons créés dans la haute atmosphère par les rayons cosmiques. En même temps nous étudierons l'absorption des muons dans la matière. Nous détecterons les muons avec des scintillateurs plastiques couplés à des photo-multiplieurs. Cette expérience est couplée à un système d'acquisition piloté par ordinateur et utilise une carte FPGA pour la logique du trigger et l'acquisition des données. Après avoir dans un premier temps calibré précisément les détecteurs, développé la logique du déclenchement (trigger), démarré le système d'acquisition et récolté assez de statistique, il faudra analyser de manière rigoureuse les données récoltées et estimer le temps de vie des muons ainsi que les erreurs associées aux mesures (erreurs statistiques et systématiques). L'analyse des données se fera en C++ et plus précisément avec un programme développé au CERN appelé ROOT, qui est essentiellement une collection de classes construites spécifiquement pour l'analyse de données en physique des particules.

Le but de ce document est de vous guider pendant votre travail dans le laboratoire et vous aider à mener à bien l'expérience. Cette note est loin d'être complète. Il revient à vous de faire des recherches bibliographiques pour compléter cette note, de trouver les réponses et solutions aux problèmes que vous rencontrerez dans l'exécution de l'expérience, etc. Pendant votre travail vous serez suivis en continuation par un(e) assistant(e). Donc il faut poser des questions ...

1 Généralité sur les muons

1.1 Origine des muons

Les muons, que nous allons étudier, sont créés suite à l'interaction de rayons cosmiques (pour la plupart des protons de très haute énergie) avec la haute atmosphère terrestre. Ces protons interagissent avec des noyaux de l'atmosphère et créent des particules secondaires donnant lieu à ce qu'on appelle des *gerbes de particules* (voir la figure 1). De nombreuses particules produites par les rayons primaires ne sont pas suffisamment stables pour atteindre le sol et se désintègrent en d'autres particules plus stables, comme les muons. D'autres interagissent très fortement avec le gaz atmosphérique et produisent encore des gerbes moins énergétiques. Au niveau du sol les rayons cosmiques sont principalement constitués de photons, d'électrons et de positrons, et de muons.

Les muons ont une masse environ 200 fois plus élevée que les électrons (i.e. $106 \text{ MeV}/c^2$), ce sont des particules instables qui se désintègrent par interaction faible en électron ou en positron avec leurs neutrinos :

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \quad \text{et} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu . \quad (1)$$

En général les muons qu'on étudie sont le produit de la désintégration des pions produits dans les gerbes cosmiques, selon les réactions :

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad \text{et} \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu . \quad (2)$$

Le but de cette expérience est d'effectuer la mesure du temps de vie du muon en arrêtant dans une plaque (absorbeur) les muons provenant de l'atmosphère et en observant l'électron émis dans la désintégration du muon. Selon la théorie de la relativité restreinte, le temps est une notion qui est étroitement liée au référentiel dans lequel on fait la mesure. On mesure donc le temps de vie du muon dans son référentiel de repos (temps de vie propre du muon). Cette expérience a été réalisée pour la première fois à Rome en 1946 par Conversi, Pancini et Piccioni [1]. Elle a été cruciale pour comprendre la nature de ces particules que l'on avait découvertes dans les rayons cosmiques dix ans plus tôt.

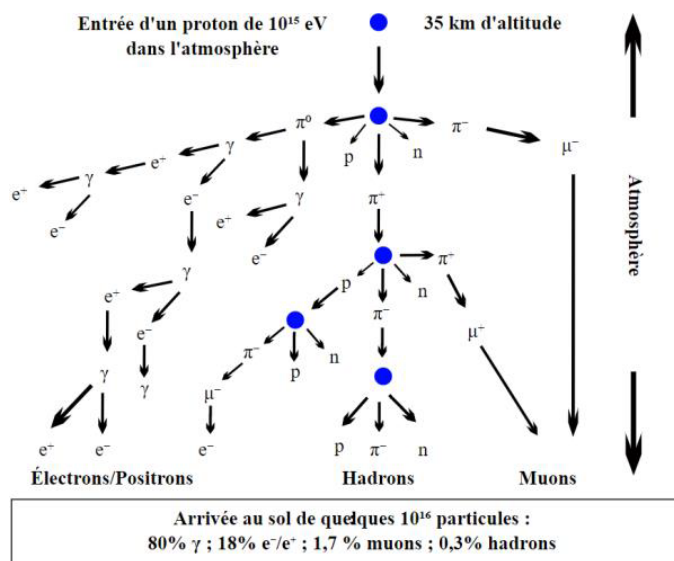


FIGURE 1 – Représentation des gerbes atmosphériques.

Pour un processus où la probabilité qu'une particule se désintègre est proportionnelle au temps écoulé Δt (i.e. désintégration radioactive), la probabilité de désintégration au temps t (plus précisément entre t et $t + dt$) est donnée par la loi de Poisson :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{\tau} \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

où τ est la durée de vie moyenne du muon, quantité que nous voulons déterminer. Le temps de vie d'un muon suit donc une loi exponentielle de désintégration radioactive (loi de Poisson). Ainsi le nombre de muons $N(t)$ qui ont survécu un temps de vie t est donné par :

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau), \quad (4)$$

où N_0 est le nombre des muons au départ.

- Démontrez les équations précédentes.
- Le muon a un temps de vie de $2.197 \mu\text{s}$. En physique classique quelle distance un muon allant à la vitesse de la lumière parcourra-t-il avant de se désintégrer ? Pourquoi les muons produits dans la haute atmosphère ($\sim 20 \text{ km}$) atteignent le niveau de la mer ? Quelle est la vitesse ($\beta = v/c$) d'un muon de 1 GeV ? Quelle distance aura-t-il parcouru, en moyenne, avant de se désintégrer ?
- Quel est le flux de muons que nous recevons en ce moment dans le laboratoire et quelle est leur énergie moyenne en GeV ? Les scintillateurs que nous utilisons font environ $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$, combien de muons environ les traversent par unité de temps et dans quelle direction ?

1.2 Constante de Fermi

Les muons se désintègrent via la force faible et la probabilité de désintégration Γ est donnée par [2] :

$$\frac{d\Gamma}{dE_e} = \frac{G_F^2}{12\pi^3} m_\mu^2 E_e^2 \left(3 - \frac{4E_e}{m_\mu} \right), \quad (5)$$

où G_F est la constante de couplage faible de Fermi. Avec une bonne approximation, la relation entre G_F et le temps de vie du muon τ_μ est donnée par :

$$\Gamma = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5 c^4}{192\pi^3 \hbar^7}. \quad (6)$$

A noter que la détermination la plus précise de G_F est obtenue à partir de la mesure de la durée de vie moyenne du muon.

1.3 Interactions des muons dans la matière

Les muons vont interagir électromagnétiquement avec la matière qu'ils traversent. Ils vont perdre leur énergie par collisions élastiques successives avec les électrons des atomes et cette perte d'énergie est décrite par l'équation de Bethe-Bloch [3]. Certains muons vont perdre leur énergie de cette façon jusqu'à arrêt total dans le milieu. Cependant les muons négatifs peuvent être capturés par les noyaux des atomes et former un "atome muonique". Ces muons vont ensuite interagir avec les protons par interaction faible :



C'est ce qu'on appelle la capture muonique. On peut montrer [4] que la probabilité de capture est proportionnelle à Z^4 .

Appelons τ_a le temps de vie moyen d'un μ^- avant qu'il ne soit capturé et τ la durée de vie moyenne du muon libre. Dans un laps de temps dt la probabilité qu'un muon disparaisse par capture est donc dt/τ_a et la probabilité qu'il disparaisse par *désintégration spontanée* est dt/τ . La probabilité totale de désintégration est donc donnée par :

$$\frac{dt}{\tau} + \frac{dt}{\tau_a} = dt \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_a} \right) . \quad (8)$$

Ainsi, la probabilité de survie d'un muon négatif en fonction du temps écoulé t dans un milieu dense suit toujours une loi exponentielle $\propto \exp -t/\tau^-$, mais avec un temps de vie moyen τ^- (plus court) donné par :

$$\frac{1}{\tau^-} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_a} . \quad (9)$$

Le temps de vie effectif moyen des μ^- dans la matière sera donc inférieur à celui des μ^+ . Pour cette raison nous allons mesurer le temps de vie avec différents absorbeurs, p.ex. en aluminium ($Z = 13$), en carbone ($Z = 6$), en cuivre ($Z = 29$), ou en plomb ($Z = 82$).

- Selon la formule de Bethe-Bloch les muons de haute énergie ($\beta\gamma > 4$) en traversant la matière perdent leur énergie de façon constante à environ $2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$. Quelle sera leur perte d'énergie dans la plaque de cuivre ? et d'aluminium ? Estimez l'énergie maximale des muons qui vont s'arrêter dans la plaque.
- Nous avons vu que nous allons mesurer deux temps de vie différents pour les μ^+ et μ^- à cause de la capture muonique. Pourquoi est-ce que les muons ont une forte probabilité de se faire capturer par le noyau beaucoup plus élevée que l'électron (voir [4]) ?

2 Dispositif expérimental

Le schéma du dispositif expérimental est montré en figure 2. Une plaque de métal (que nous appelons absorbeur) est placée entre 4 scintillateurs connectés à des photomultiplicateurs (PM) à l'aide d'un guide de lumière possédant une forme caractéristique permettant de minimiser la perte de lumière. Les muons et antimuons provenant de l'atmosphère sont dans un premier temps détectés par les 2 scintillateurs du haut. Certains muons s'arrêteront dans l'absorbeur et se désintégreront. Lors de leur désintégration, les muons/antimuons émettent des électrons/positron de façon isotropique. Ce sont ces particules qui sont, dans un second temps, détectées par les scintillateurs (soit les deux du haut soit les deux du bas). En mesurant la différence de temps entre l'entrée du muon et la sortie de l'électron de désintégration nous pourrions ainsi estimer la durée de vie moyenne des muons.

- Pourquoi nous utilisons deux scintillateurs en haut et deux en bas ou lieu d'un seul scintillateur en haut et en bas ?

3 Matériel à disposition

- **Scintillateurs** : Il existe différents types de scintillateurs. Ceux que nous utilisons ici sont des scintillateurs organiques (typiquement plastique), le passage d'une particule

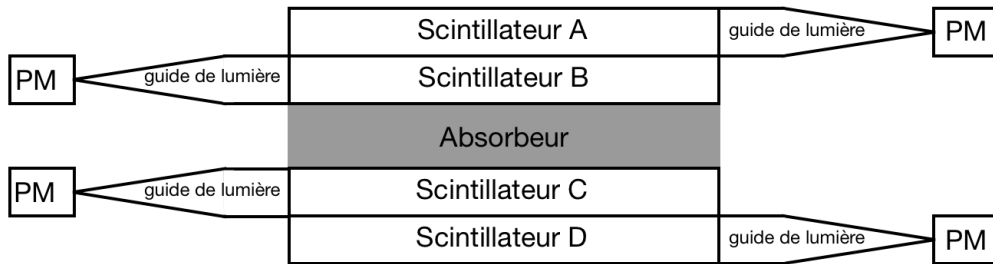


FIGURE 2 – Schéma du dispositif expérimental.

au travers du matériau produit une excitation de certains atomes qui émettent de la lumière en se désexcitant. La lumière émise appartient à la partie du spectre visible ou U.V. proche (d'où la couleur bleutée que l'on observe sur les scintillateurs). Ces scintillateurs doivent être soigneusement emballés pour éviter tout bruit provenant de la lumière ambiante qui perturberait l'observation du signal du muon.

- **Photomultiplicateurs (PM) :** Les PM transforment un signal lumineux même très faible (quelques photons) en un signal électrique mesurable. Ainsi les photons émis par les scintillateurs suite au passage d'un muon vont être collectés par le PM et convertis en signal électrique visible sur un oscilloscope (et par notre système d'acquisition). Nous allons dans un premier temps étudier la réponse des PMs.
 - Expliquez le principe de fonctionnement d'un PM [3]. A quoi ressemble le signal électrique observé à l'oscillo (forme du signal, durée du signal, temps de montée, etc.) ? Convertissez le signal observé en charge électrique.
 - Quelle est la tension optimale de fonctionnement de chaque PM que nous utiliserons ?
- **Discriminateurs :** Les discriminateurs servent à convertir un signal analogique (celui sortant des PM) en signal digital c'est à dire deux état 0 (pas de signal) ou 1 (signal) avec une amplitude de -0.8 V, si celui-ci dépasse une tension égale ou supérieure à une certaine tension appelée tension de seuil (voir la figure 3). On appelle le signal logique de -0.8 V signal NIM (standard international). Cette tension de seuil devra être réglée de manière à minimiser les comptages de bruit de fond (quels sont les bruits de fond potentiels ?). Il ne faut pas non plus mettre le seuil trop haut sous peine de rater des signaux valides. On peut régler le seuil du discriminateur et aussi la largeur du signal généré par le discriminateur avec un tournevis.
 - Comment aller vous estimer la tension de seuil à utiliser ici ?
- **Modules de coïncidences :** Ils fonctionnent comme une porte logique **et** (AND). Ces éléments n'émettront un signal de sortie que si tous les signaux NIM d'entrée sont activés simultanément (voir la figure 3). La coïncidence peut générer un signal de durée égale au temps de superposition des deux signaux entrants ou de durée fixe avec une amplitude de -0.8 V (signal NIM).
- **L'horloge ("Clock") :** Le clock que nous utilisons émet un signal toutes le 20 ns (fréquence de 50 MHz). Le temps sera calculé en comptant le nombre d'impulsions entre le passage du muon et sa désintégration. Ici on ne pourra donc pas mesurer des temps plus courts que 20 ns. Mais cela suffit amplement pour cette expérience qui consiste à mesurer le temps de vie du muon qui est de l'ordre de la μs .
- **Le Scaler (Echelle de comptage) :** Il s'agit d'un module qui compte les impulsions

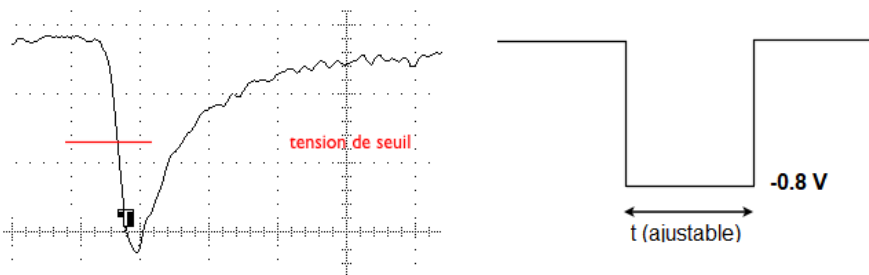


FIGURE 3 – Principe du discriminateur. Un signal logique est émis si la tension de sortie du PM est supérieure à un certain seuil.

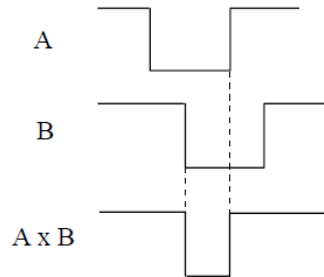


FIGURE 4 – Principe de fonctionnement de la coïncidence : le module peut générer un signal de durée égale au temps de superposition des deux signaux entrants ou de durée fixe.

digitales NIM et sert p.ex. à compter le nombre d'impulsions NIM de l'horloge.

- **FPGA (Field-Programmable Gate Array)** : Il s'agit d'un circuit intégré avec plusieurs millions des portes logiques. Les portes logiques sont connectées entre elles par une matrice de routage configurable. Ceci permet la reconfiguration à volonté du composant. Un bloc logique est constitué d'une table de correspondance (LUT ou Look-Up-Table) et d'une bascule (Flip-Flop en anglais). La LUT sert à implémenter des équations logiques ayant généralement 4 à 6 entrées et une sortie. Elle peut être considérée comme une petite mémoire, un multiplexeur ou un registre à décalage (shift register). Le registre permet de mémoriser un état (machine séquentielle) ou de synchroniser un signal (pipeline).

On utilisera un circuit logique programmable pour créer le trigger et l'acquisition des données. Ce sera la point central dans cette expérience pour déterminer les événements que vous souhaitez compter.

4 Expérience

4.1 Calibration des PM

Avant toute chose il faut vérifier que les scintillateurs ont été bien emballés (i.e. qu'il n'y ait pas de fuite de lumière) et les PM fonctionnent correctement. Vérifiez les signaux des 4 PM à l'oscilloscope. Montez la tension petit à petit jusqu'à observer un signal à l'oscilloscope, le signal devrait se manifester autour de 1'400 V (**Ne pas dépasser 2'000 V!**).

Il faut maintenant trouver une tension optimum de fonctionnement pour chaque PM.

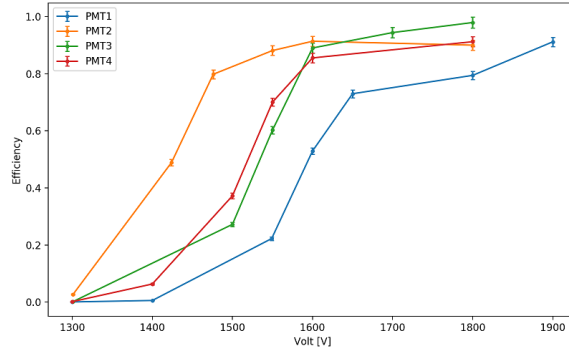


FIGURE 5 – Courbes de tension pour les PM.

Une façon de calibrer les PM est de comparer en fonction de la tension le nombre de coïncidences entre 3 PM (sans celui qu'on veut calibrer) et avec tous les 4 en faisant varier la tension de ce dernier. Par exemple si on veut calibrer le PM A on calculera, en fonction de la tension appliquée au PM A , le rapport :

$$\frac{\text{coïncidences } ABCD}{\text{coïncidences } BCD} . \quad (10)$$

Ce rapport devrait se rapprocher de 1 au fur et à mesure que l'on augmente la tension, comme montré dans la Figure 4.1. On observera en fait une brusque montée puis un plateau autour de 1, la tension de fonctionnement du PM se situera légèrement après le début du plateau (typiquement 50 V après).

Il faut donc passer les signaux analogiques des 4 PM dans un discriminateur. Les sorties des discriminateurs seront envoyées dans des modules de coïncidences et on lira le nombre de coïncidences avec le scaler.

4.2 Création du trigger et logique FPGA

Dans un premier temps nous voulons mesurer les muons qui rentrent par le toit du labo et qui sont stoppés par l'absorbeur (voir la figure 4.2). On veut donc un signal dans les 2 PM du haut et aucun dans ceux du bas, on notera un tel signal $AB\bar{C}\bar{D}$. Ce signal (appelé START) enclenchera la suite du dispositif électronique.

Après un événement START on doit prévoir 2 possibilités :

- 1) On observe quelques microsecondes après un deuxième signal dans les PM qui correspond à l'émission de l'électron/positron provenant de la désintégration du muon.
- 2) On n'observe aucun signal.

cas 1) On a affaire à une véritable désintégration, et dans ce cas, le signal de l'électron/positron est observé plus tard. Ce signal est récolté soit par les scintillateurs du haut (STOP HAUT) correspondant à la coïncidence $AB\bar{C}\bar{D}$, soit par les scintillateurs du bas (STOP BAS) correspondant à la coïncidence $\overline{AB}CD$. Ces deux cas appartiennent à la catégorie STOP NORMAL et on enregistre la durée (grâce à l'horloge et au scaler) entre l'événement START et STOP NORMAL. Après un STOP normal, le dispositif est réinitialisé et prêt à détecter un second événement.

cas 2) On ne mesure pas de 2ème signal. Il se peut que l'électron par exemple ne soit détecté pour des raisons d'acceptance des scintillateurs, qu'il ait été émis trop tôt ou tout

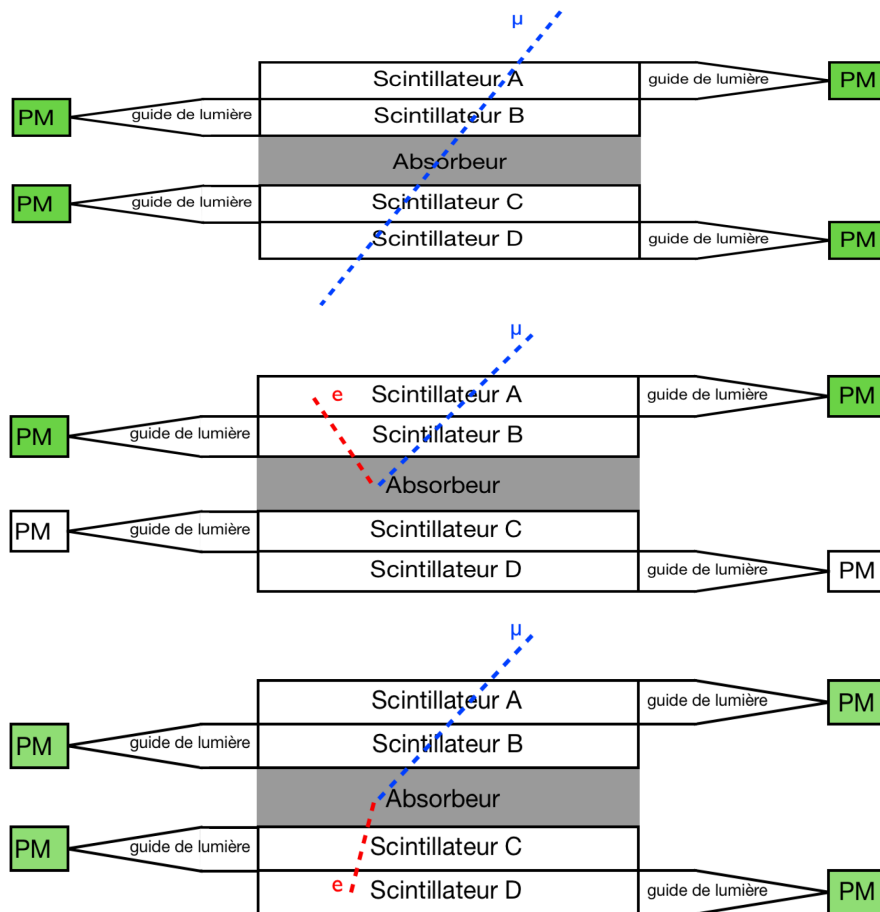


FIGURE 6 – Figure du haut : un muon passe dans les 4 scintillateurs sans s’arrêter, nous observerons 4 signaux en coïncidence ($ABCD$). Cette situation n’est pas intéressante pour nous et il ne faut donc pas déclencher le trigger. Figure du milieu : un muon traverse les 2 scintillateurs du haut, et s’arrête dans l’absorbeur. Il provoque une coïncidence $AB\bar{C}\bar{D}$. Cet événement est accepté et déclenche l’acquisition (le START). Quelques instants plus tard nous observons une seconde coïncidence $ABCD$ provoquée par l’électron de désintégration qui a été émis vers le haut (STOP HAUT). Figure du bas : même situation que précédemment mais avec une coïncidence $\bar{A}BCD$ appelée STOP BAS.

simplement que le START n’ait pas été déclenché par un muon. Cet événement est appelé STOP ARTIFICIEL. Il convient de déterminer un temps caractéristique (assez grand par rapport à la durée de vie du muon) après lequel l’événement STOP ARTIFICIEL est déclenché en l’absence de coïncidence. Après ce temps (typiquement $40 \mu\text{sec}$) le dispositif est réinitialisé et aucun temps n’est enregistré.

Vous commencerez par dessiner le schéma de la logique du trigger sur papier. Vous utiliserez des portes logiques AND pour former les coïncidences. Il faudra aussi utiliser une horloge et un compteur pour définir les STOP ARTIFICIEL. Une fois que vous aurez dessiné et bien compris votre schéma vous pourrez le reproduire à l’aide du logiciel Quartus dans un format qui pourra être compilé puis envoyé au FPGA. La figure 4.2 montre le schéma de la logique du trigger.

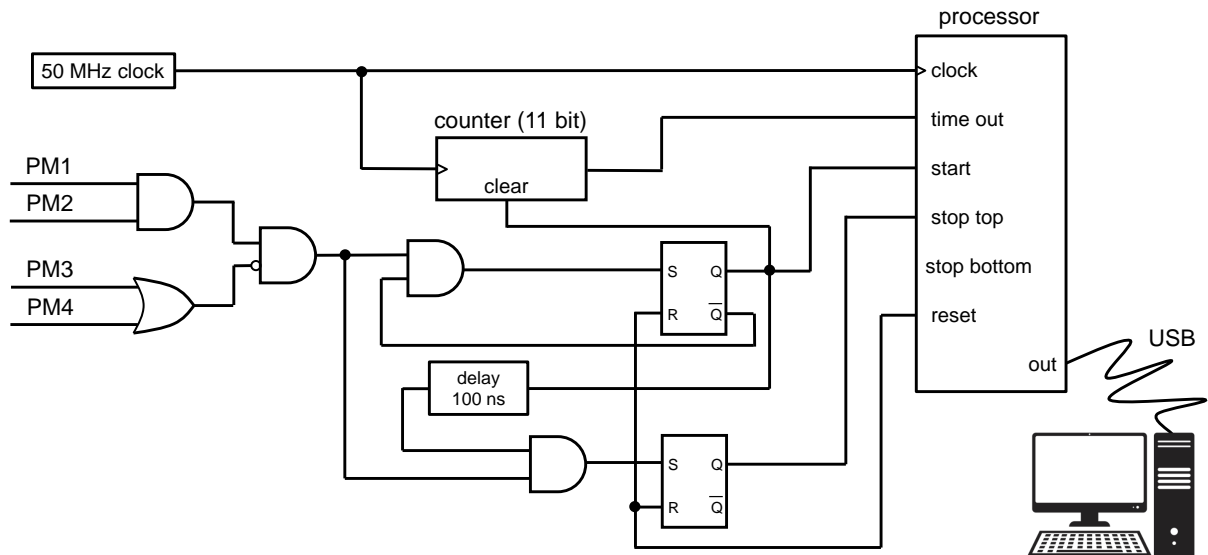


FIGURE 7 – Schéma de la logique du trigger pour le STOP HAUT. Il faudra compléter la schéma avec la logique pour le STOP BAS.

5 Analyse des données

Les données sont enregistrées sur le PC de l'expérience. Le programme `flipflop` génèrent des fichiers textes. Ces fichiers seront lus et analysés avec `ROOT` [5]. Pour déterminer le temps de vie du muon d'après vos mesures, vous devrez construire des histogrammes et les remplir avec les valeurs des fichiers textes. Un fit de chaque histogramme vous permet de déterminer le temps de vie du muon mesuré dans le laboratoire.

6 Plan de travail

Ce plan a été créé pour vous aider à mener l'expérience. Vous pourrez modifier ce plan au fur et à mesure pendant l'avancement de l'expérience en accord avec votre assistant(e).

- jour 1 : familiarisez-vous avec le dispositif expérimental et l'électronique ;
commencez par câbler les PM à l'alimentation HT ;
allumez la haute tension et vérifiez les signaux de chaque PM à l'oscilloscope ;
vérifiez le fonctionnement correct des PM, p.ex. qu'il n'y a pas de fuites de lumière ;
- jour 2 : utilisez le discriminateur pour jouer avec les différents signaux des PM. Vous pouvez changer la tension de seuil et la largeur des signaux à la sortie du discriminateur. Une fois que vous avez fixé la tension de seuil, utilisez les modules de coïncidences. Avant de commencer la calibration des PM, il est important d'avoir testé et avoir compris les signaux que vous aurez à la sortie des discriminateurs et des modules de coïncidences ;
trouvez les tensions optimales pour les PMs (voir Figure 4.1) ;
mesurez le flux des muons, qui traverse le dispositif expérimental (sans absorbeur) ;

jour 3 : développez la logique du trigger dans le FPGA (afin de suivre chaque étape de votre schéma, il est conseillé de souvent tester les signaux sur un oscilloscope) ;

jour 4 : déboguez la logique du trigger ;
lancez une première prise de données ;

jour 5 : analysez les données enregistrées et vérifiez la fonctionnalité du système ;
démarrez la prise de données avec la plaque de plomb (ou fer ou cuivre) ;

jour 6 : analysez les données et estimez la durée de vie moyenne des muons positifs ;
continuez la prise de données avec la plaque de plomb ;

jour 7 : analysez les données et estimez la durée de vie moyenne des muons positifs (avec plus de statistique) ;
changez l'absorbeur (aluminium ou plexiglas) et lancez une nouvelle prise de données ;

jour 8 : analysez les données et estimez la durée de vie moyenne des muons positifs et négatifs ;
continuez la prise de données ;

jour 9 : présentation ;
analysez les données et estimez la vie moyenne des muon positifs et négatifs (avec plus de statistique) ;
complétez l'expérience !

7 Macros ROOT

Il s'agit d'un logiciel développé au CERN pour l'analyse de données en physique des particules. Le logiciel est essentiellement une collection de classes, qui vous permettra de lire les données, remplir des histogrammes et faire des fits. L'assistant(e) vous aidera à démarrer avec ROOT. Ce logiciel peut être installé gratuitement à partir de <http://root.cern.ch>. Pour la version Windows il faut d'abord installer Visual C++.

Références

- [1] Conversi, Pancini et Piccioni, Phys. Rev. **70** (1946) 859 ; Phys. Rev. **71** (1947) 209.
- [2] D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, Wiley-VCH, 2008.
- [3] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1987.
- [4] T. Suzuki, *Total nuclear capture rates for negative muons*, Physical Review **C35** (1987) 2212.
- [5] ROOT, <http://root.cern.ch>