

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

FACULTÉ DES SCIENCES

MÉMOIRE DE MASTER EN SCIENCES PHYSIQUES

Caractérisation en faisceau d'un prototype
de module en vue de l'upgrade du
trajectographe de CMS.

Auteur :
Martin DELCOURT

Promoteur :
Christophe DELAERE
Lecteurs :
Giacomo BRUNO
Eduardo CORTINA GIL

10 juin 2014



Table des matières

1	Upgrade de CMS	6
1.1	Description du détecteur CMS	6
1.2	Description de la deuxième phase de mise à niveau	7
1.2.1	Dommages liés aux radiations	8
1.2.2	Défis liés aux nouvelles conditions	9
1.3	Mise à niveau du trajectographe	11
1.3.1	Description générale du trajectographe	11
1.3.2	Description d'un module 2S	13
2	Test faisceau	16
2.1	Description de l'expérience	17
2.1.1	Description générale	17
2.1.2	Origine du faisceau	17
2.1.3	Système d'acquisition et connexion des modules	18
2.2	Prise de données	20
2.2.1	Développement software et firmware	20
2.2.2	Problème du télescope	20
2.2.3	Données collectées	21
3	Analyse des données	23
3.1	Introduction	23
3.2	Bruit sans faisceau	25
3.3	Optimisation des paramètres du module	28
3.3.1	Paramètres de latence	28
3.3.2	Détermination de VCTH	30
3.4	Caractérisation du faisceau	32
3.4.1	Profil du faisceau	32
3.4.2	Divergence du faisceau	34
3.4.3	Multiplicité du faisceau	35
3.5	Signal secondaire induit par le faisceau	38
3.6	Efficacité des senseurs	41
3.6.1	Méthode employée	41
3.6.2	Premières mesures d'efficacité	42

3.6.3	Efficacité en fonction du seuil du comparateur	44
3.7	Analyse angulaire	50
3.7.1	Alignement des modules	51
3.7.2	Discrimination en p_T des modules	52
4	Montage à l'UCL	55
4.1	Description mécanique	55
4.2	Description électrique	56
4.2.1	Alimentation du module et acquisition des données	56
4.2.2	Système déclencheur	58
4.3	État du montage et perspectives	63
5	Conclusion	65

Remerciements

Merci à mon promoteur Christophe Delaere qui était toujours disponible pour me conseiller et me guider tout au long de ce mémoire.

Merci également à toute l'équipe du test faisceau à Hambourg et l'équipe de l'UCL sur l'upgrade du tracker pour m'avoir permis de m'intégrer dans une équipe de recherche et pour m'avoir aidé tant durant la prise de données que durant l'analyse.

Merci à ma famille et à mes amis pour m'avoir soutenu durant mes études et mon mémoire et à Hugo Leemans pour avoir relu le texte.

Enfin, merci à la communauté du logiciel libre pour m'avoir fourni les outils nécessaires à la réalisation de ce travail.

Introduction

Le 4 juillet 2012, les collaborations CMS (*Compact Muon Solenoid*) et ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*) ont annoncé la découverte d'une nouvelle particule scalaire compatible avec le boson de Higgs. Bien que cette découverte complète le modèle standard et qu'elle soit un triomphe de la physique des particules, certaines questions restent ouvertes.

Premièrement, le modèle standard reste bien incapable d'expliquer de quoi est composée la matière noire. Cette matière a été prédite par les cosmologistes il y a maintenant 80 ans et qui, selon de nombreuses mesures, compose plus d'un quart de l'énergie de notre univers.

Ensuite, le modèle standard souffre d'un problème intrinsèque de stabilité. En effet, on s'attendrait à ce que la masse nue du boson de Higgs soit énorme à cause de grandes corrections quantiques liées à des effets se produisant à l'échelle de Planck. Le fait que sa masse soit si faible impliquerait des corrections radiatives annulant exactement les corrections quantiques (*fine-tuning*), ce qui est très inélégant.

Enfin, des questions restent ouvertes en physique des particules. Parmi celles-ci, les questions d'une possible unification des forces ou de l'origine de la saveur dans le modèle standard peuvent être mentionnées.

Pour tenter de répondre à ces grandes questions, de nouvelles théories ont été établies comme la super-symétrie (SUSY) ou encore la théorie technicolor.

Il est donc nécessaire d'établir des expériences permettant de mesurer les effets de telles théories. Pour cela, le Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN) a approuvé un projet de mise à niveau du Large Hadron Collider (LHC), un accélérateur de particules situé près de Genève. Ce projet impliquerait la transformation du LHC en accélérateur de particule à Haute Luminosité, le HL-LHC.

Ce nouvel accélérateur permettrait un nombre de collisions par croisement de faisceau beaucoup plus important que le LHC, et donc de permettre des nouvelles gammes de mesures aux différents détecteurs utilisant son faisceau. Ainsi, la collaboration CMS a un programme ambitieux visant - entre autres - à découvrir une physique au delà du modèle standard (*Beyond the Standard Model* ou *BSM*) [1].

Maintenant que le boson de Higgs a été découvert, le dernier paramètre libre du modèle standard (sa masse) a été mesuré expérimentalement. Il est donc possible d'effectuer de nombreuses prédictions et de les confronter avec l'expérience.

Ainsi, tous les couplages entre les fermions et le boson de Higgs peuvent être utilisés

pour tester le modèle standard. Une mesure assez précise de ceux-ci permettrait soit de mettre en évidence des déviations par rapport au modèle, et donc de démontrer l'existence d'une nouvelle physique, soit de poser des contraintes sur ces nouvelles théories si le modèle standard est confirmé.

Si le CMS garde une efficacité inchangée lors de la mise à niveau, des simulations ont montré que le couplage du boson de Higgs avec les photons, W, Z, gluons, quarks bottom, top et lepton τ pourront être mesurés avec une incertitude inférieure à 10% pour une luminosité intégrée de 3000 fb^{-1} [2]. La mesure du couplage du boson de Higgs avec lui-même pourrait également être mesurée.

En plus de laisser des traces indirectes dans les rapports de branchement, les théories BSM pourraient également être observées directement.

Par exemple, dans le cadre de certains modèles supersymétriques, les particules les plus légères ne pourraient être produites que par l'interaction faible. Il serait donc nécessaire d'accumuler énormément de statistique pour les détecter. Dans ce cadre, des études ont été effectuées et des partenaires supersymétriques pourraient être découverts avec le HL-LHC si leur masse est de l'ordre du TeV.

Ensuite, avec les statistiques promises par le HL-LHC, des désintégrations ayant un rapport de branchement très faible peuvent être observées, permettant par exemple d'étudier les courants neutres altérant la saveur (*Flavor-Changing Neutral Current*, FCNC). Dans le modèle standard, ceux-ci requièrent des interactions du second ordre et n'ont des rapports de branchement que de l'ordre de 10^{-14} . L'observation d'un tel signal serait donc le signe clair d'une nouvelle physique. Dans certains modèles BSM, des rapports qui vont jusque 10^{-4} sont en effet prédits.

Enfin, des mesures sur les événements $t\bar{t}$ peuvent être utilisées afin de déterminer la masse du top (m_t). Bien que le top est déjà le quark le mieux étudié, les imprécisions sur m_t sont souvent le facteur limitant pour de nombreux calculs. En effet, ceux-ci sont dominants lors du calcul des corrections quantiques aux processus électro-faibles ou encore pour le couplage du top au boson de Higgs.

Afin de permettre au CMS d'effectuer ce vaste programme de mesures, il est nécessaire de le mettre à niveau afin qu'il puisse supporter les nouvelles conditions après la mise en place du HL-LHC et continuer à prendre des mesures de manière efficace.

En particulier, ce mémoire décrit une campagne de test sur un prototype de module pour le trajectographe externe de CMS en vue de la dernière phase de mise à niveau pour le HL-LHC.

Ce document sera structuré en trois grandes parties. La première partie consistera en une description sommaire de la mise à niveau de CMS ainsi qu'en une description plus complète de la mise à niveau de son trajectographe.

Ensuite, un test faisceau ayant eu lieu en novembre dernier au centre de recherche DESY près de Hambourg et auquel j'ai participé sera décrit dans le chapitre 2, ainsi que tous les résultats que nous avons pu en tirer (chapitre 3).

La dernière partie s'occupera de décrire la mise en place d'un dispositif expérimental à l'Université catholique de Louvain (UCL) afin de prendre des données sur un prototype.

Chapitre 1

Upgrade de CMS

L'apparition du nouveau projet d'accélérateur qu'est le HL-LHC pose directement la question de l'avenir des détecteurs utilisant son faisceau.

Parmi ceux-ci, le CMS a joué un rôle central non seulement dans la découverte du boson de Higgs, mais aussi dans de nombreuses mesures repoussant les limites expérimentales sur les paramètres libres du modèle standard.

Ce chapitre discutera de l'avenir du CMS au delà de l'upgrade du LHC. Trois défis devront être relevés :

- Les détecteurs actuels ainsi que l'électronique associée sont en train de vieillir à cause des radiations reçues.
- La luminosité instantanée accrue générera un grand nombre d'événements simultanés dans le détecteur.
- La dose reçue par les détecteurs sera grandement augmentée à cause des nouvelles conditions

Les mises à jour qui seront apportées au détecteur afin d'adresser ces défis seront brièvement décrites avant de passer à une discussion plus détaillée sur le trajectographe. Les différentes modifications proposées pour ce dernier seront décrites en se concentrant sur les prototypes de module testés à Hambourg.

1.1 Description du détecteur CMS

Le CMS est un détecteur polyvalent placé sur l'anneau du LHC et analysant le résultats de collisions de protons à haute énergie (7 TeV initialement et 14 TeV sont prévus pour 2015) ou d'ions lourds. Le CMS a une structure en couches représentée sur la figure 1.1 [3].

Le détecteur a été conçu autour d'un aimant super-conducteur solénoïdal fournissant un champ magnétique de 4 teslas. Ce champ magnétique permet de déduire la quantité de mouvement des particules à partir de leur trajectoire dans le détecteur.

Les particules produites au point d'interaction commencent par traverser le trajectographe (ou tracker). Celui-ci est composé de deux parties, le détecteur pixel au centre et le trajectographe externe formé de détecteurs à bandes autour. Le tracker permet

Détecteur CMS

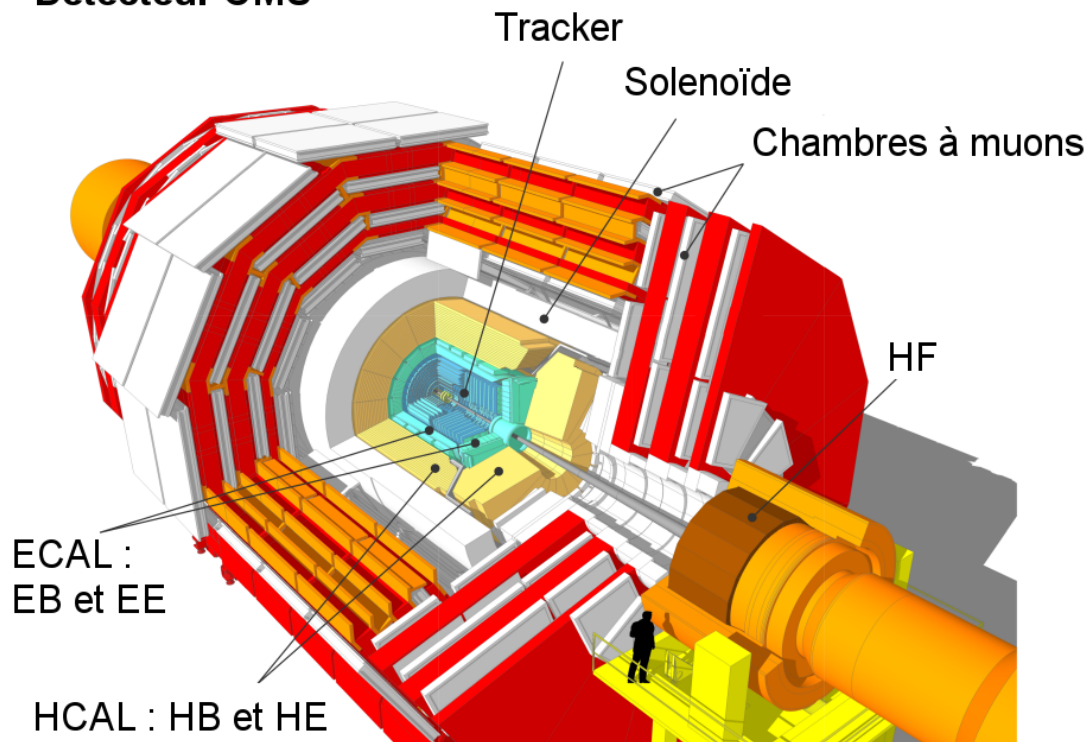


FIGURE 1.1 – Schéma du Compact Muon Solenoid [3].

de reconstruire la trajectoire des particules chargées et d'en déterminer la quantité de mouvement.

Autour du tracker se trouve le calorimètre électromagnétique (ECAL), composé d'un tonneau (*Barrel* ou *EB*) et de deux bouchons (*Endcap* ou *EE*), qui mesure l'énergie des électrons et des photons. La couche suivante est formée par le calorimètre hadronique (HCAL) qui, en plus d'être composé d'un tonneau et de deux bouchons (*HB* et *HE*) a également un second baril à l'extérieur du solénoïde (*Outer* ou *HO*) et deux calorimètres dans les régions avancées (*Forward* ou *HF*).

La couche la plus externe du détecteur permet de détecter et de reconstruire la trajectoire des muons qui sont les seules particules (à l'exception des neutrinos) qui n'ont pas été arrêtées dans le détecteur.

1.2 Description de la deuxième phase de mise à niveau

Dans le calendrier de fonctionnement du LHC, un certain nombre d'arrêts de longue durée (*Long Shutdown* ou *LS*) ont été prévus afin de permettre l'entretien ou d'éventuelles modifications tant à l'accélérateur qu'aux détecteurs.

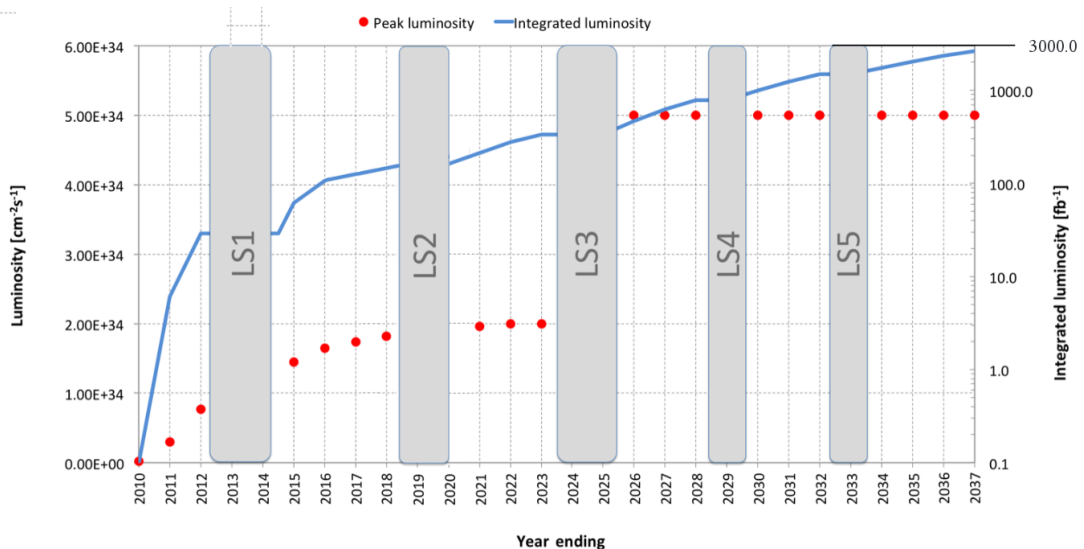


FIGURE 1.2 – Plan de fonctionnement du LHC pour les années à venir [4].

Le premier (LS1) est en cours et durera jusqu'à l'automne 2014 avant une seconde période d'arrêt en 2019. Une première série de modifications verra le jour au détecteur CMS au cours de cette période, appelée phase 1 de la mise à niveau. Enfin, vers 2024, une troisième période d'arrêt permettra une mise à niveau complète du détecteur en vue du HL-LHC, la phase deux.

Le but de cette seconde phase est de maintenir les capacités de détection du CMS, voire les améliorer lorsque c'est possible, dans les conditions difficiles du HL-LHC. Il est donc primordial d'une part de remplacer les détecteurs endommagés par les radiations et d'autre part d'améliorer certains composants pour qu'une bonne reconstruction des événements reste possible.

1.2.1 Dommages liés aux radiations

Pour le trajectographe externe, on peut mesurer l'endommagement à l'aide du courant de fuite dans les senseurs qui entraîne une diminution du rapport signal sur bruit et qui peut même rendre l'alimentation des senseurs impossibles [5]. En comparant ces mesures avec les doses reçues et en extrapolant, il a été montré qu'une portion importante du tracker externe sera inutilisable peu après le LS3 (figure 1.3). L'endommagement du détecteur pixel a également été étudié et malgré un remplacement lors de la phase 1, l'activité intense régnant au cœur du détecteur imposera un remplacement complet durant la phase 2.

Les calorimètres électromagnétiques, souffrent eux-aussi des radiations. Pour ceux-ci, les dégâts dépendent beaucoup de η . Alors que le tonneau pourrait survivre au HL-LHC, les bouchons devront être remplacés.

En effet, des dommages engendrés sur les cristaux et les photo-détecteurs induisent

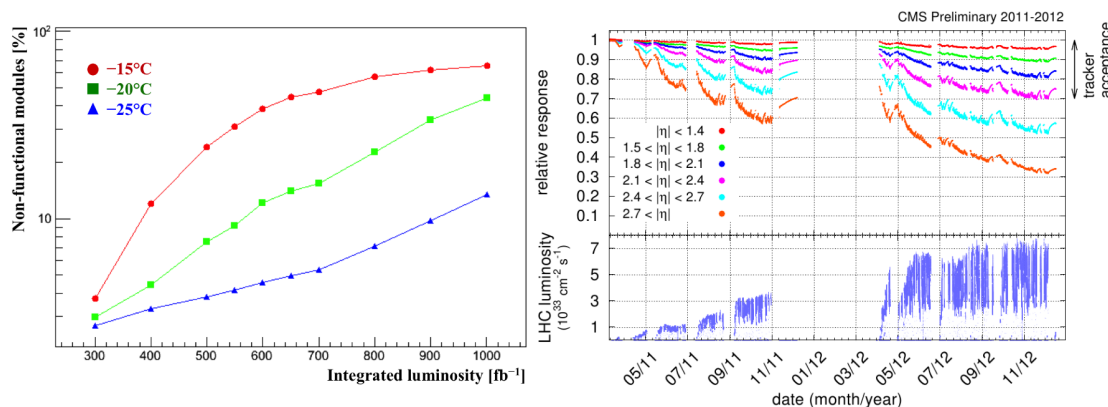


FIGURE 1.3 – Simulation de la proportion de senseurs inutilisables en fonction de la luminosité à gauche [5] et évolution de la réponse des calorimètres électromagnétiques à droite [6].

une perte de luminosité qui, selon des simulations, pourraient réduire la collection de la lumière d'un facteur dix sur près de la moitié de leur couverture angulaire au terme des 3000 fb⁻¹. Pour des raisons de prix et de dangers liés aux radiations, l'entièreté des EE seront remplacés durant le LS3.

Les effets liés aux radiations sont assez semblables pour les calorimètres hadroniques. L'électronique de lecture du HCAL aura été remplacée lors de la phase 1 et a été prévue pour fonctionner après la phase 2. Les scintillateurs plastique utilisés dans le tonneau et dans les bouchons subiront des dommages importants, mais surmontables pour le BH. Le EH, quand à lui, devra être remplacé. Les scintillateurs du calorimètre en avant sont d'un type différent et plus résistants aux radiations. Des études sont toujours en cours pour savoir si ils devront être remplacés.

Pour ce qui est des chambres à muon, aucun signe de vieillissement n'a été observé pour le moment et celles-ci devraient continuer à opérer de manière efficace après la phase 2. Néanmoins, des dommages causés à l'électronique de lecture des tubes à dérive (*Drift Tubes*) vont sans doute imposer un remplacement de celle-ci lors du LS3.

1.2.2 Défis liés aux nouvelles conditions

Alors que l'accélérateur a été initialement conçu pour délivrer une luminosité instantanée de $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ [1] (objectif qu'il devrait atteindre peu après le LS1) et qu'il est prévu qu'il atteigne les $2 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ peu après le LS2, le projet HL-LHC rendrait possible une luminosité instantanée de $\mathcal{L} = 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (voir la figure 1.2). Une telle luminosité correspond à plus ou moins 260 interactions par croisement du faisceau (*Pile-Up* ou *PU*). Un tel taux d'interactions rendrait toute analyse de données très difficile et les performances du détecteur seraient fortement diminuées.

Ces valeurs correspondent au pic de luminosité et ne sont valables que peu de temps après l'injection du faisceau, la luminosité diminue peu à peu lors de l'utilisation du

faisceau. Afin de maintenir une activité supportable dans le CMS, le faisceau sera décentré au point d'interaction en début de run afin que la luminosité soit nivelée à une valeur de $5 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ qui correspond à un PU moyen de 128. Comme ce nombre fluctue d'un croisement à l'autre, une marge de manœuvre a été prévue et le détecteur sera donc conçu afin de supporter un PU de 140.

Pour supporter une telle activité, deux grandes facettes du problème doivent être abordées. Il faut d'un côté que le système de déclenchement puisse rester efficace dans cet environnement hostile et d'un autre côté, il faut améliorer la capacité de distinction des différentes collisions au sein d'un même événement pour que l'analyse hors-ligne reste possible.

Le système de déclenchement (ou *trigger*) de CMS, décidant quels sont les événements à enregistrer et ceux à ignorer, est composé de deux parties qui devront chacune être améliorée [5] (voir figure 1.4). La première partie du trigger est électronique, très rapide, rigide et n'utilise qu'une partie de l'information venant du détecteur. Elle est appelée trigger de niveau 1 ou L1-Trigger. La seconde partie de la sélection est effectuée par une ferme de processeurs, est beaucoup plus lente mais beaucoup plus souple et a accès à la totalité de l'information venant des détecteurs. Elle est appelée trigger de haut niveau ou High-Level Trigger, HLT.

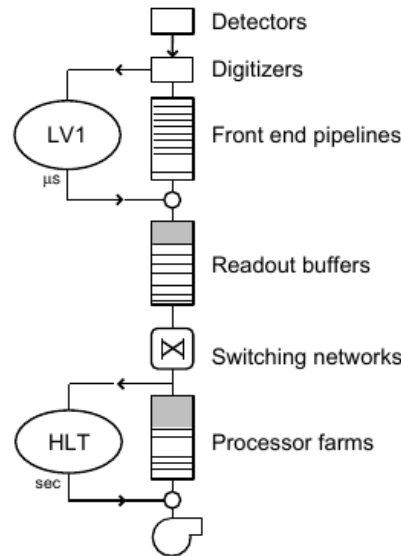


FIGURE 1.4 – Schéma du système de trigger de CMS [7].

Comme les processeurs sont en constante et nette progression, les fermes de processeurs du HLT seront remplacées lors du LS3. La puissance des nouveaux processeurs couplés à des algorithmes de reconstruction toujours plus efficaces permettront au HLT d'accepter un taux d'événements dix fois supérieur.

Du côté du L1-Trigger, le remplacement de l'électronique, bien que nécessaire afin

de faire passer son taux d'acceptance de 100kHz à 1MHz, ne sera pas suffisante pour maintenir les performances physiques du CMS. Afin de palier à l'activité importante dans le détecteur, une partie des données du trajectographe seront utilisées par le trigger qui pourra ainsi mieux identifier les différentes particules.

1.3 Mise à niveau du trajectographe

Le taux de radiation important, la nécessité d'améliorer la granularité ainsi que le besoin de fournir des informations au trigger L1 imposent un remplacement et une nouvelle conception du trajectographe. En plus de ces exigences, d'autres éléments sont pris en compte dans la conception du nouveau tracker afin d'améliorer les capacités physiques du détecteur CMS tels qu'une diminution de la quantité de matière ou une augmentation de l'acceptance angulaire.

Nous verrons dans un premier temps quels sont les plans pour le nouveau tracker externe (le pixel ne sera pas détaillé) avant de décrire en détail les modules dont des prototypes ont été analysés dans ce mémoire.

1.3.1 Description générale du trajectographe

La proposition en cours pour l'agencement du trajectographe est représentée sur la figure 1.5.

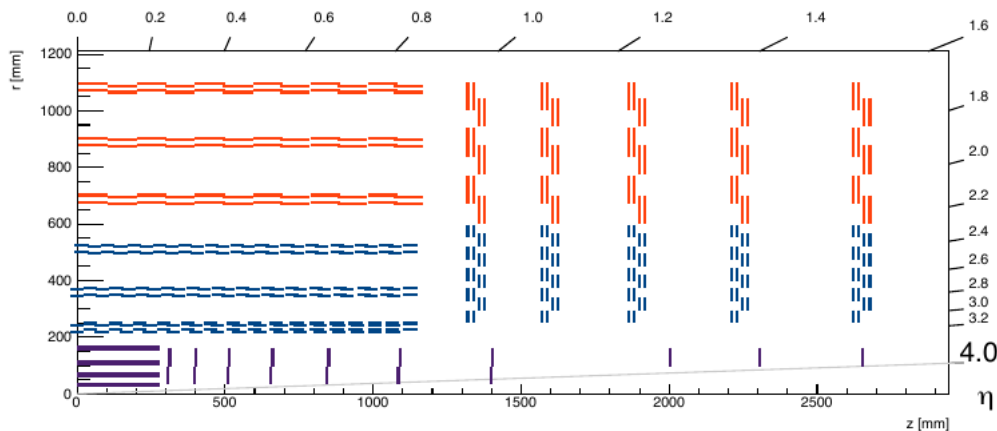


FIGURE 1.5 – Projet d'agencement du tracker [5].

Le trajectographe est composé de deux parties principales, le détecteur pixel au centre et le trajectographe externe composé de détecteurs à bandes. Celui-ci est également séparé en deux parties qui auront chacune un type de capteur différent. Les capteurs internes sont formés d'un détecteur pixelisé et d'un détecteur en bande. Les capteurs externes quant à eux sont composés de deux détecteurs en bande (*2 strips* ou *2S*).

Deux types de données sont renvoyés par les modules du tracker externe. À chaque croisement du faisceau, des données simplifiées sont envoyées au trigger de niveau 1 et les données complètes sont envoyées à chaque décision positive du trigger de niveau 1.

Pour permettre au trigger de prendre en compte les informations du trajectographe, il est nécessaire d'effectuer au préalable une réduction importante de la quantité de données à analyser. Les modules ont donc été conçus afin d'ignorer toutes les traces ayant une quantité de mouvement transverse (p_T) inférieure à un certain seuil. Une coupure à 2 GeV permettrait par exemple une réduction de plus d'un ordre de grandeur.

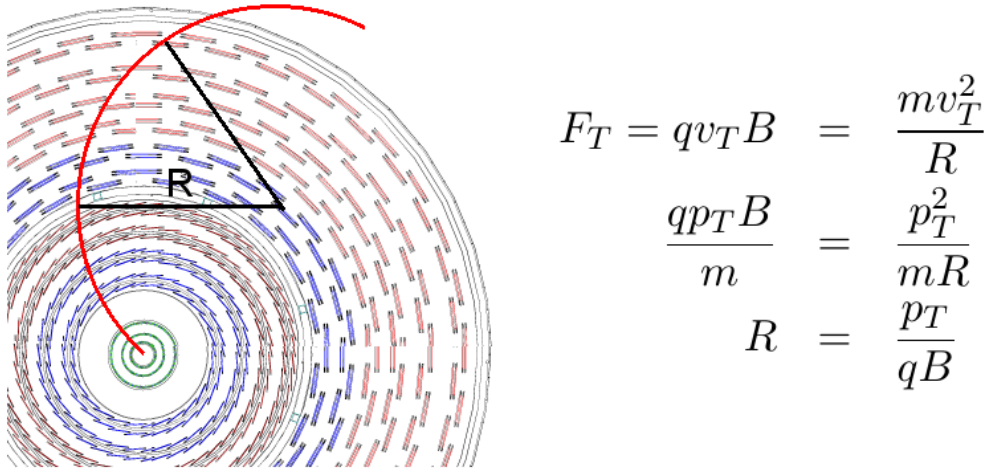


FIGURE 1.6 – Schéma représentant le lien entre le champ magnétique, la quantité de mouvement transverse et le rayon de courbure.

Afin d'effectuer cette coupure, le champ magnétique intense du CMS sera utilisé. En effet, une particule à haut p_T aura une trajectoire moins courbée qu'une particule à bas p_T (figure 1.6). En comparant la position de ces particules entre deux senseurs au sein d'un même module, il est donc possible d'avoir une idée du p_T et donc de diminuer la quantité d'information à analyser par le trigger en ne prenant en compte que les couples de coups dans une même fenêtre.

La figure 1.7 illustre cette prise de décision au sein de l'électronique de lecture. Un élément de trace à haut p_T est également appelé *stub*.

Comme l'espacement entre les coups dans les deux senseurs dépend de la position dans le trajectographe, la taille de la fenêtre ainsi que son décalage peuvent être changés d'un module à l'autre.

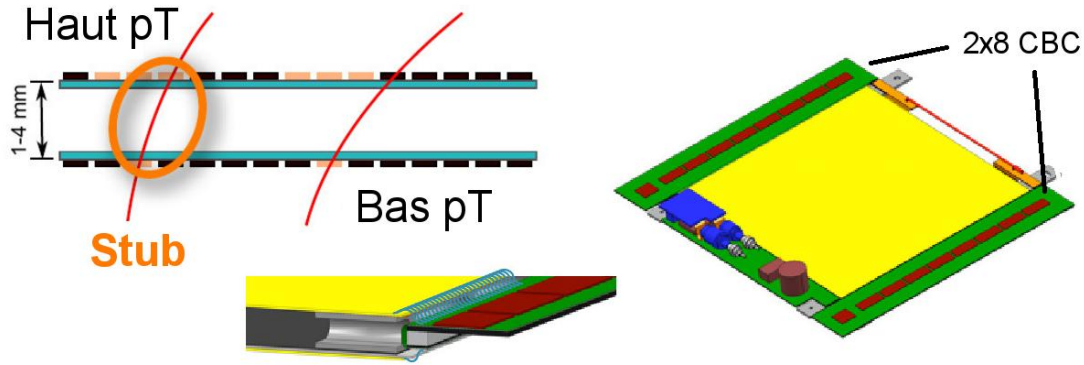


FIGURE 1.7 – Principe de stub pour le trigger L1 et schémas d'un module 2S.

1.3.2 Description d'un module 2S

Le test faisceau faisant l'objet de ce mémoire a été effectué sur deux prototypes de modules 2S. Chaque module est composé de deux parties, le senseur et l'électronique de lecture.

Les senseurs d'un module 2S seront chacun formés d'un détecteur au silicium (de type n sur p) en bande faisant au total une taille de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Le senseur est composé de deux séries de bandes de 5cm de long et de $90 \mu\text{m}$ de largeur (figure 1.7).

Lors du passage d'une particule chargée dans un senseur, des paires électrons-trous sont produites. Le champ électrique régnant dans le détecteur va faire bouger ces charges qui induiront un signal sur les pistes en aluminium connectées capacitivement aux senseurs.

Ensuite, ce signal sera analysé par des puces de microélectronique, seize *CMS binary chip* ou *CBC* placées de part et d'autre du module et analysant une partie des pistes des deux senseurs. Ces puces peuvent être séparées en deux grands domaines, le premier étant analogique alors que le deuxième est digital.

Le rôle de la première partie est de mettre en forme le signal avant digitisation. Un schéma reprenant cette logique de détection est repris sur la figure 1.8.

Après être passé à travers un pré-amplificateur, la différence entre le signal et un voltage constant (VPLUS) est amplifiée. Ensuite, un certain décalage est ajouté au signal (offset) avant qu'il soit comparé à un voltage seuil, le *Voltage Comparator THresold* ou *VCTH*.

Trois paramètres entrent donc en jeu dans la logique de détection, deux paramètres communs à toutes les pistes, le VPLUS et le VCTH et un paramètre variable, l'offset.

Le rôle du VPLUS est de donner la valeur DC à la sortie de l'amplificateur. Celui-ci est choisi afin qu'une valeur VCTH permettant de discriminer un signal physique du bruit se trouve au milieu de sa gamme de valeurs possibles. Ceci assure une meilleure linéarité du seuil du comparateur.

Comme toutes les pistes ne sont pas rigoureusement identiques, le signal récolté pour

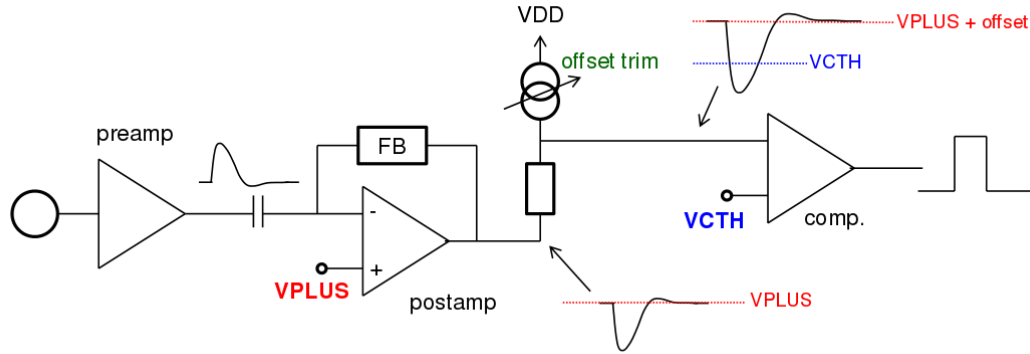


FIGURE 1.8 – CBC : logique de détection [8].

une charge déposée donnée ne sera pas constant. Le rôle de l'offset est de palier aux différences de pré-amplification piste par piste.

Une fois que le signal digital est produit au rythme d'une horloge de 40MHz, il va suivre deux chemins parallèles distincts représentés sur la figure 1.9.

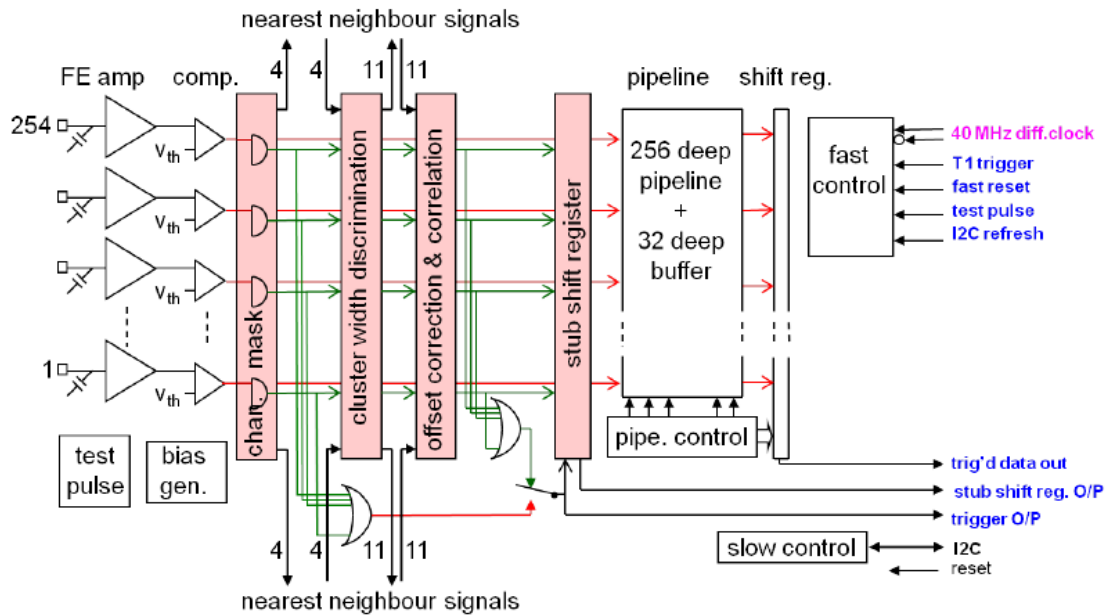


FIGURE 1.9 – Schéma d'un CBC. Partie analogique (à gauche) et digitale [9].

Le premier chemin mène directement vers un pipeline où 256 événements consécutifs peuvent être stockés en attente du trigger qui a $6.4\mu s$ pour prendre sa décision. Si elle est positive, l'événement sélectionné sera envoyé dans une mémoire tampon de 32 événements

(*buffer*) avant d'être lue par le système d'acquisition.

Le second chemin permet la construction de stubs pour le Trigger-L1. Dans un premier temps, certaines strips peuvent être masquées artificiellement en cas de défauts.

Les différents hits entrent ensuite dans le *Cluster Width Discriminator* (CWD). Cet élément regarde l'ensemble de hits adjacents (*clusters*) et les ignore si ils sont supérieurs à une certaine taille. Ce filtre permet d'ignorer les particules à très grand angle qui actionnent un grand nombre de strips. Ensuite, le CWD renvoie la position centrale de chaque cluster (arrondi à l'unité inférieure).

Les clusters d'un des deux senseurs sont ensuite déplacés d'un certain offset afin de prendre en compte la direction vers le point d'interaction avant d'être comparés à ceux du second senseur. Pour chaque couple de clusters endéans une certaine fenêtre, un stub est produit et enregistré dans un registre lu par le trigger L1. Si au moins un stub est produit, un stub-bit est produit. Si aucune coïncidence n'est trouvée, un signal nul est envoyé.

Les données des CBC sont ensuite envoyées à un circuit imprimé concentrateur (*Concentrator IC* ou *CIC*). Celui-ci enregistrera les stubs produits par les CBC et les données complètes sous demande du trigger L1, les encodera et les enverra via une interface optique à l'électronique de lecture.

Chapitre 2

Test faisceau

Afin de vérifier le bon fonctionnement de prototypes de modules expérimentalement, un test faisceau d'une semaine au *Deutsches Elektronen-Synchrotron* (DESY) a été effectué fin 2013.

Le faisceau de ce centre de recherche aux alentours d'Hambourg a pu être utilisé du 25 novembre au premier décembre par une équipe d'une bonne dizaine de chercheurs et de doctorants affiliés au CMS à laquelle j'ai pu me joindre.

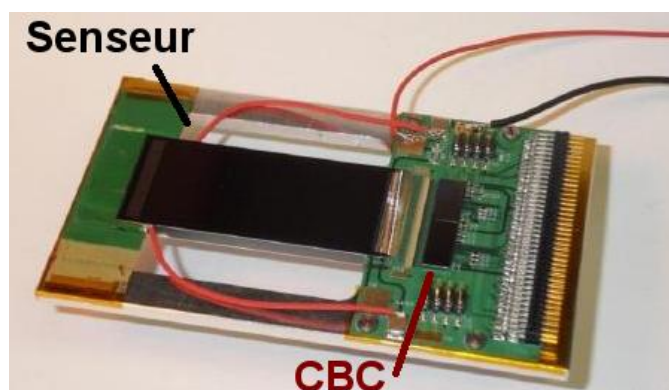


FIGURE 2.1 – Photographie d'un prototype de module.

Les prototypes utilisés lors du test faisceau étant de taille réduite (figure 2.1), les senseurs avaient une taille d'approximativement $25 \times 50 \text{ mm}^2$. Deux mini-modules différents ont été testés. Le premier, produit par le Centre National de Microélectronique d'Espagne (CNM), est de type p et a 254 pistes de $90 \mu\text{m}$ ($+20 \mu\text{m}$ d'implantation). Le second, produit par la compagnie Infineon, est de type n et a 256 pistes de $80 \mu\text{m}$ ($+20 \mu\text{m}$ d'implantation).

Dans les mini-modules testés, seule une partie de l'électronique de lecture a été développée. Les CBC utilisés sont des prototypes de deuxième génération (CBC2) et n'ont pas encore toutes les fonctionnalités prévues. Entre autres, les stubs ne sont pas encore produits, seuls les stub bits peuvent être lus.

Le concentrateur, le lien optique et l'alimentation ne sont également pas présents sur le mini-module. Les fonctionnalités manquantes sont simulées par une carte de développement et le lien entre cette carte et le mini-module ainsi que l'alimentation du mini-module sont assurés par une carte d'interface.

2.1 Description de l'expérience

2.1.1 Description générale

Le montage utilisé est représenté sur la figure 2.2. Le faisceau employé est un faisceau secondaire formé de positrons dont l'origine est détaillée dans la section 2.1.2.

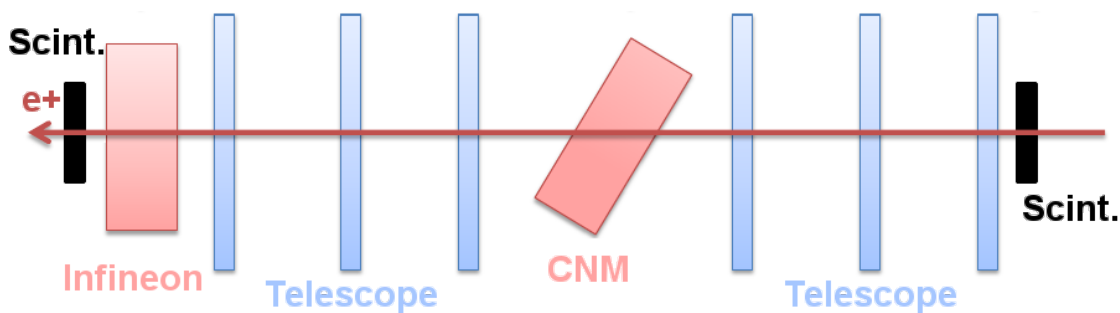


FIGURE 2.2 – Schéma du montage [10].

Les signaux nécessaires au système déclencheur étaient fournis par deux couples de scintillateurs placés de part et d'autre du montage mis en coïncidence.

Deux modules ont été soumis au faisceau, le senseur Infineon restant fixe alors que le senseur CNM était placé sur une plaque tournante dont l'orientation pouvait être contrôlée à distance. Une description de l'assemblage effectué avec les modules ainsi que du système d'acquisition des données est faite dans la section 2.1.3.

Enfin, six plans de détecteurs pixel formaient un télescope qui aurait dû nous fournir des informations sur la position de chaque particule traversant le montage.

2.1.2 Origine du faisceau

Le faisceau utilisé lors de cette campagne de tests était formé de positrons d'une énergie pouvant aller de 1 à 6 GeV et arrivant à une fréquence de l'ordre du kilohertz.

La méthode de production de ce faisceau est décrite sur la figure 2.3. Un faisceau primaire d'électrons ou de positrons est accéléré à 6-7 GeV dans le synchrotron DESY II. Le rôle principal de cet accélérateur est de fournir des électrons/positrons à deux autres accélérateurs, mais il est également utilisé pour fournir des faisceaux tests [11].

À plusieurs endroits le long du synchrotron, le faisceau primaire passe à travers une fibre de carbone de quelques micromètres d'épaisseur. Lorsque les électrons la traversent, ils produisent du rayonnement de freinage.

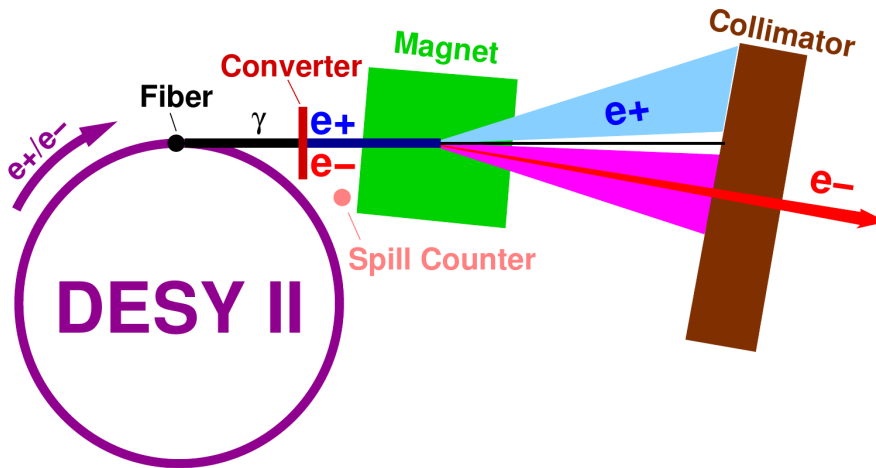


FIGURE 2.3 – Méthode de production du faisceau [11].

Ces photons sont ensuite convertis en paires électrons/positrons lorsqu'ils heurtent une pièce de métal. Un dipôle sépare les particules sortantes en fonction de leur quantité de mouvement et de leur charge et un collimateur amovible permet de sélectionner l'énergie désirée.

2.1.3 Système d'acquisition et connexion des modules

Afin de simplifier les connexions électriques et de protéger les modules, ceux-ci étaient placés dans des boîtes métalliques (figure 2.4).

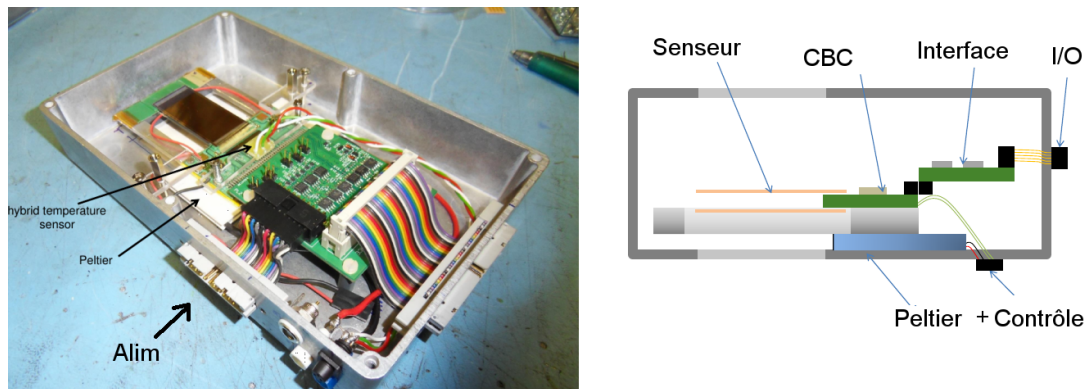


FIGURE 2.4 – Photo d'un module complet utilisé lors du test faisceau et schéma correspondant.

Les mini-modules sont connectés à une interface qui joue deux rôles, elle permet d'alimenter électriquement les CBC et de communiquer avec le système d'acquisition des données.

Un système de refroidissement est également présent afin de garantir une température constante sur le senseur et l'électronique. Un peltier a donc été installé sous le détecteur. Enfin, une connexion a été prévue afin d'apporter la haute tension nécessaire pour polariser le silicium.

Un schéma simplifié reprenant le système d'acquisition est représenté sur la figure 2.5. Lorsqu'un électron traverse le montage, les deux couples de scintillateurs vont émettre un signal. Ceux-ci seront lus par le *Trigger and Logic Unit* (TLU) qui enverra un signal de trigger s'il y a une coïncidence entre les quatre scintillateurs. Le signal de trigger fourni par le TLU étant peu précis lorsque tous les scintillateurs étaient mis en coïncidence, seul le dernier scintillateur a été utilisé lors des prises de données en fin de semaine.

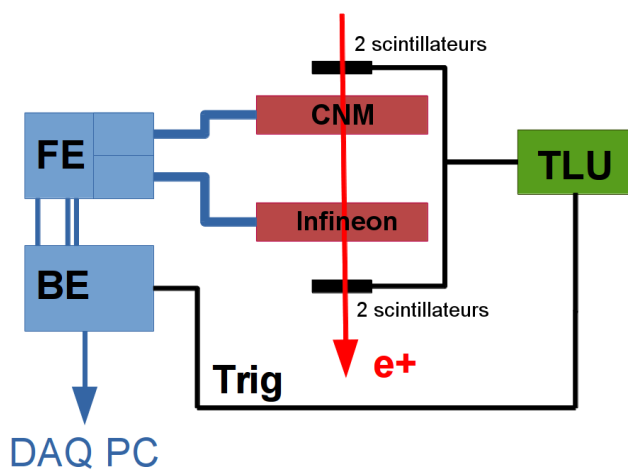


FIGURE 2.5 – Schéma du système d'acquisition.

Deux cartes d'électronique vont ensuite lire les données provenant des modules. Celles-ci sont des *Gigabit Link Interface Board* ou, plus simplement, GLIB. La présence de deux cartes plutôt qu'une n'était pas strictement nécessaire, mais chaque carte joue un rôle différent. La carte de frontend (FE) émule le comportement de composants manquants sur la carte (lien optique et, dans le futur, concentrateur). La carte de backend (BE) joue le rôle des cartes de lecture de CMS (les *Front-End Driver* ou *FED*).

Dans notre montage, la première carte à entrer en jeu est le backend. Lorsqu'un signal de trigger est produit, le BE retransmet ce signal au frontend qui va communiquer avec les modules afin de récupérer toutes les données correspondant à cet événement avant de les renvoyer au BE.

Les données relatives au stubs ne sont pas enregistrées dans les modules, mais envoyées directement au FE après avoir été produites. Les stub-bits seront ensuite envoyées au BE toutes les 25ns où elles seront stockées en l'attente d'un éventuel signal de trigger.

Les modules étant conçus pour fonctionner au CMS, ils sont synchronisés par une horloge de 40MHz produite par le BE. Comme le trigger n'est pas synchronisé avec les modules, la différence de temps entre le signal et l'horloge influencera le comportement des senseurs. Un *Time to Digital Converter* (TDC) a donc été implémenté dans le BE

afin de mesurer cette phase.

Lorsque le BE reçoit les données complètes liées à l'événement, il va rechercher le signal L1 correspondant, y ajoute la valeur renvoyée par le TDC ainsi que des données sur les conditions de la prise de donnée (*Condition Data*). Ces dernières reprennent tous les paramètres entrant en jeu, l'angle du module CNM ou l'adresse en mémoire dans le buffer des modules en sont deux exemples.

Le backend prend toutes ces données et les encode avant de les envoyer à l'ordinateur effectuant l'acquisition des données (DAQ PC). Les données stockées ne sont pas directement utilisables, elles doivent d'abord être traduites par un logiciel lisant les données produites, *l'unpacker* qui est développé par une équipe de l'UCL. Enfin, les données passent à travers un dernier filtre dans lequel seuls les numéros de strips où un coup a été détecté sont enregistrés.

En plus du système d'acquisition, le TLU permettait également de récolter les données des détecteurs pixel. Celles-ci étaient stockées sur un autre ordinateur qui contrôlait au passage l'angle entre le module CNM et le faisceau.

2.2 Prise de données

Lors de la prise de données sur place, un certain nombre de tâches ont dû être accomplies. En effet, afin de pouvoir prendre des données propres, des développements ont dû être effectués tant sur la partie software (unpacker) que sur la logique installée sur les GLIB (firmware). De plus, un certain nombre de problèmes sont inévitablement survenus.

2.2.1 Développement software et firmware

Une grande quantité de travail a été fournie par certains chercheurs de l'équipe afin de faire évoluer les systèmes de lecture.

Pour la partie software, les changements ont été réalisés suite d'une part à la découverte de bugs et d'autre part à une évolution du format de données venant des GLIB.

J'ai pu personnellement contribuer à une de ces mises à jour en mettant en évidence un problème avec l'unpacker. Une erreur s'était introduite dans la conversion des données venant du module et les hits provenant d'un senseur étaient parfois dupliqués sur le second senseur. Après être rentrés en contact avec les développeurs de Louvain, le problème a pu être rapidement résolu.

De très nombreuses modifications ont également été effectuées sur le firmware des GLIB, mais n'étant impliqué que dans l'analyse de données, les détails m'en sont étrangers.

2.2.2 Problème du télescope

En plus d'être utilisé par les GLIB, le signal de trigger généré par le TLU est également envoyé au télescope. Les détecteurs pixel renvoient ensuite leurs données à un second ordinateur d'acquisition où une heure leur est assignée (*timestamp*).

Pour utiliser les données venant du télescope, il faut pouvoir les synchroniser avec celles provenant des modules. Comme les timestamp sont produits sur deux ordinateurs différents qui ne sont pas synchronisés, ils ne sont pas directement utilisables.

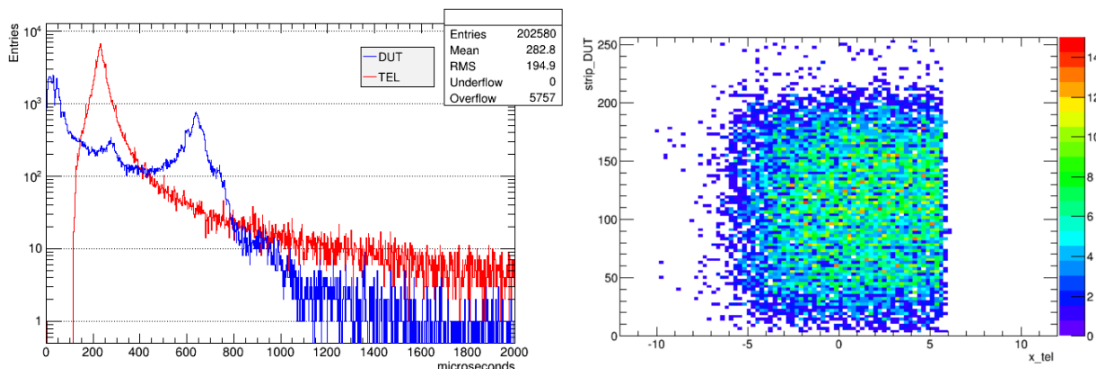


FIGURE 2.6 – Différence de temps entre deux événements à gauche [12] et corrélation entre la position des hits dans les deux systèmes à droite [13].

Un doctorant de DESY, a tenté de synchroniser ces deux flux de données au cours du second quadrimestre. Malheureusement, plusieurs problèmes ont rendu cette tâche impossible :

- Le taux de données dans les deux systèmes est différent ($\sim 25\%$ d'écart [12]). Ceci rend donc une identification directe des événements impossible.
- La distribution en temps entre deux événements est très différente dans les deux systèmes (figure 2.6). Cette différence empêche d'effectuer une corrélation des timestamp pour les deux flux de données.
- Aucune corrélation entre la position des hits dans les deux systèmes n'a été trouvée (figure 2.6). Il n'est donc pas possible d'utiliser les données du télescope pour préciser la trajectoire des particules détectées.

2.2.3 Données collectées

Vers la fin de semaine, après que différents problèmes aient été résolus, des données ont pu être enregistrées de manière continue. Des équipes de deux personnes se sont relayées jour et nuit afin d'optimiser le temps restant. Pour avoir suffisamment de statistiques, des runs de plus ou moins 20 minutes ont été effectués. Mon promoteur et moi-même avons ainsi dû effectuer une permanence de nuit, ce qui m'a permis de me familiariser avec la méthode concrète de prise de données à l'aide des logiciels *Run Control and Monitoring System* (RCMS) et xDAQ.

À la fin de la semaine, des données relatives aux différentes latences, au seuil VCTH, à l'angle ou aux paramètres de reconstruction de stubs ont pu être collectées et font l'objet du chapitre suivant.

TABLE 2.1 – Liste des prises de données principales. Liste complète disponible en annexe.

Date	Runs		Type
Mercredi 27/11	219	238	Scan VCTH
Jeudi 28/11	296	302	Scan latence L1
Jeudi 28/11	331	342	Scan latence des données
Vendredi 29/11	350	357	Scan latence L1
Vendredi 29/11	365	373	Scan Angulaire
Vendredi 29/11	375	386	Scan Angulaire inversé
Samedi 30/11	413	457	Scan VCTH
Dimanche 01/11	467	477	Scan latence des données & L1
Dimanche 01/11	478	496	Scan VCTH
Dimanche 01/11	499	503	Scan Angulaire
Lundi 02/12	504	540	Scan VCTH à angle fixé
Lundi 02/12	541	543	Scan de Cluster Width Disc

Chapitre 3

Analyse des données

3.1 Introduction

Lors du test faisceau à Hambourg, des millions d'événements ont été enregistrés. Afin de pouvoir interpréter ces données, ces événements ont dû être analysés au cours du second quadrimestre, chaque personne volontaire analysant les résultats l'intéressant avant de les présenter aux autres membres de l'équipe par vidéoconférence.

Il m'a ainsi été possible d'assister à plusieurs vidéoconférences et à effectuer des présentations d'une dizaine de minutes sur mes données à cinq reprises. Les résultats présentés dans ce mémoire sont mes propres résultats obtenus avec l'aide de mon promoteur et à l'aide de suggestions venant du reste de l'équipe dans certains cas.

Le but de cette analyse a été de déterminer et de comprendre le plus précisément possible quelle était la réponse du module CNM afin de pouvoir vérifier en faisceau le fonctionnement de la discrimination en p_T . Pour y parvenir, les étapes suivantes ont été effectuées :

- Détermination du bruit intrinsèque au module
- Caractérisation du faisceau (profil, divergence, ...)
- Compréhension de signaux induits par le faisceau
- Optimisation des paramètres du module
- Mesure de l'efficacité du module
- Discrimination en p_T

Les données du télescope étant inaccessibles, la sélection des données sur lesquelles se basent l'analyse doit être faite en utilisant uniquement les informations provenant des modules eux-mêmes. Pour que l'interprétation des résultats soit la plus simple possible, nous nous sommes basés sur un sous ensemble d'événements particuliers que nous avons appelés *événements propres*.

Les événements propres sont définis comme les événements qui ont un et un seul hit (ou ensemble de hits adjacents appelés *clusters*) par senseur qui n'est pas testé. En sélectionnant ces événements particuliers, il est possible de prédire où les hits sont attendus sur le senseur testé. La proportion de ces événements est représentée sur la figure 3.1.

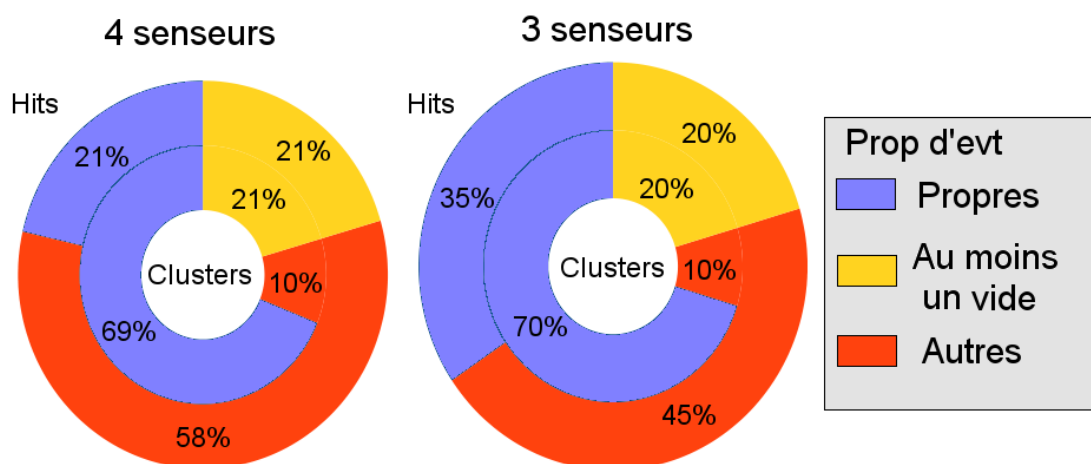


FIGURE 3.1 – Proportion d'événements propres, ayant au moins un senseur sans activité (vide) ou ayant plusieurs hits/clusters par senseur (autres) lors du run 513 pour une sélection de trois ou de tous les quatre senseurs.

Par exemple, pour déterminer l'efficacité sur le senseur 1, les événements sélectionnés sont ceux qui ont un et un seul hit sur les senseurs 0, 2 et 3 et on regarde l'activité dans une fenêtre autour de la position attendue sur le senseur 1 (voir figure 3.2).

Similairement, pour analyser le bruit induit par le faisceau, on regardera les événements qui auront un hit là où ils ne sont pas attendus. On parlera de *hits célibataires* (voir figure 3.2).

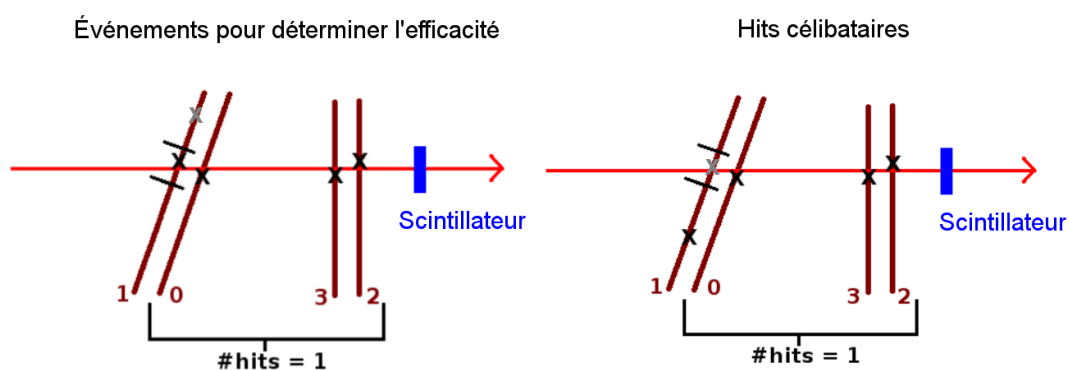


FIGURE 3.2 – Événements propres sur les trois derniers senseurs utilisés pour déterminer l'efficacité (à gauche) et définition de hits célibataires (à droite).

3.2 Bruit sans faisceau

La première analyse effectuée sur nos modules est celle du bruit intrinsèque. Pour ce faire, nous avons analysé la réponse du module alors qu'il n'était pas soumis au faisceau, en utilisant un déclencheur aléatoire à une fréquence de 1kHz.

Lors de cette prise de données, plus ou moins 17 millions d'événements ont été enregistrés dans différents fichiers en contenant chacun un million. Seul le premier de ces 17 fichiers a été analysé sur place. Plus tard dans la semaine, le format des données sortant de la GLIB a été modifié, et l'unpacker également pour suivre les changements. Malheureusement, ceci a rendu les fichiers antérieurs illisibles.

Il a été décidé par la suite de ne pas assurer la compatibilité de l'unpacker avec les formats de données précédents. En effet, cela demanderait plus de travail que la reprise des données manquantes. Les 16 fichiers d'analyse du bruit ne sont donc plus utilisables et l'analyse discutée ici repose sur le premier million d'événements pris. Un montage similaire à celui développé à l'UCL peut être utilisé afin d'accumuler plus de statistiques et avoir des mesures plus précises.

La figure 3.3 reprend, pour ce million d'événements, le nombre de coups détectés par piste.

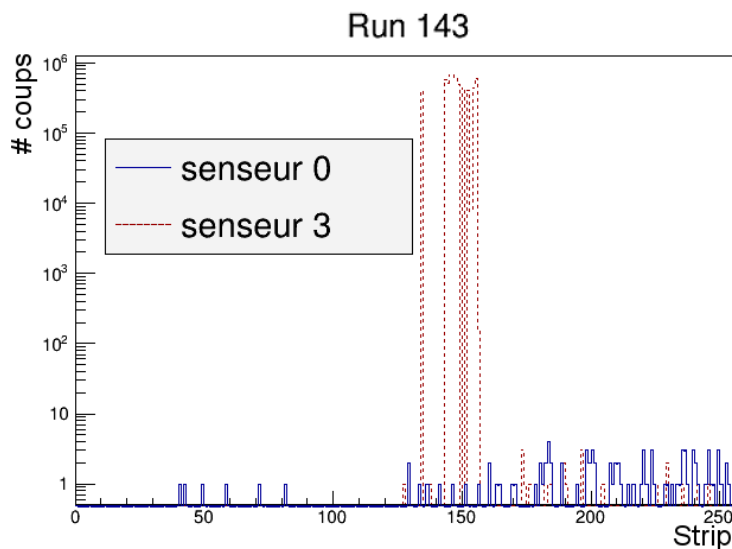


FIGURE 3.3 – Nombre de fois où un signal a été vu par piste pour un million d'événements aléatoires dans les senseurs 0 et 3. Les senseurs 1 et 2 ont un comportement similaire aux senseurs 0 et 3 respectivement.

Les deux senseurs du module Infineon (senseurs 2 et 3) ont un certain nombre de pistes très bruyantes, correspondant à une mauvaise connexion d'un CBC sur le module. Ces pistes n'étant pas connectées, les seuils sur le module ont été mal fixés et du bruit apparaît, rendant ces pistes inutilisables. Dans toute la suite de la discussion, ces pistes seront ignorées, masquées par un filtre software dans un premier temps et bloquées sur

le CBC même dans un second temps.

Même sur les pistes bien connectées, un certain bruit reste présent, tout particulièrement dans la partie droite des senseurs, et donc dans les CBC correspondants.

Si chaque strip a une certaine probabilité p de se déclencher, et que cette probabilité est constante au sein d'un CBC, la distribution du nombre de strips réparties par nombre de coups détectés est sensée se distribuer comme une binomiale. Un fit a donc été réalisé pour chaque couple CBC-senseur et des exemples de ceux-ci sont représentés sur la figure 3.4.

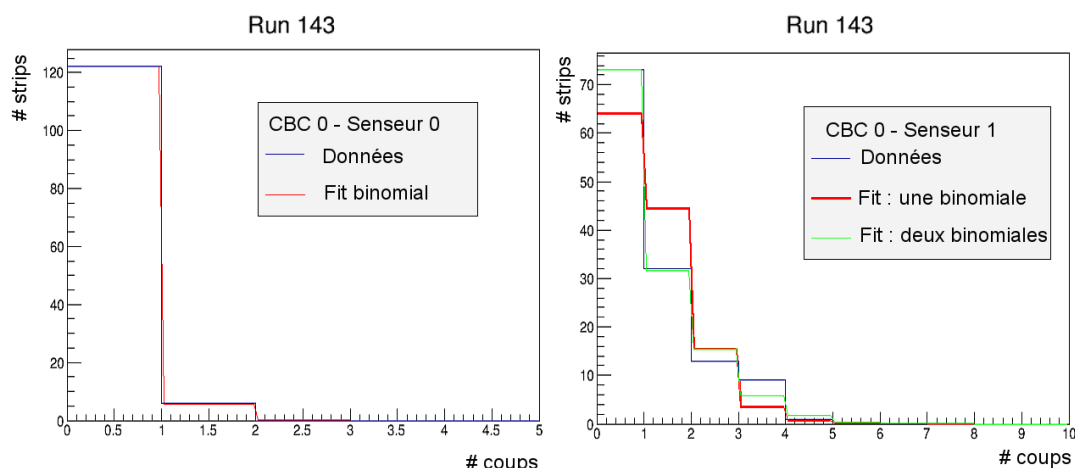


FIGURE 3.4 – Exemple de fits binomiaux sur les données. Les autres senseurs se comportent comme la figure de gauche.

Pour sept des huit couples CBC - senseur, les données sont relativement bien décrites par une binomiale unique. En revanche, pour le senseur 0 - CBC 1, le fit avec une binomiale unique n'est pas bon. En effet, un calcul numérique de p-valeur a été fait afin de déterminer la probabilité d'avoir un échantillon dont le χ^2 est supérieur à celui des données et on obtient pour le couple CBC 0 - senseur 0, une p-valeur de 5.28%.

Il est donc assez peu probable que ce couple soit correctement représenté par une probabilité constante et un fit a été effectué si l'on suppose que les strips peuvent se classer en deux catégories différentes, chacune avec sa propre probabilité. Dans ce cas-là, on obtient un résultat avec une bonne p-valeur, mais des incertitudes très grandes sur les paramètres.

Les différentes probabilités pour chaque couple CBC-senseur sont représentées graphiquement dans la figure 3.5 et les données complètes sont disponibles dans les tables 3.1 et 3.2.

Pour résumer, le bruit intrinsèque des modules est de l'ordre de 10^{-7} par strip et par déclenchement, avec un cas particulier à 10^{-6} .

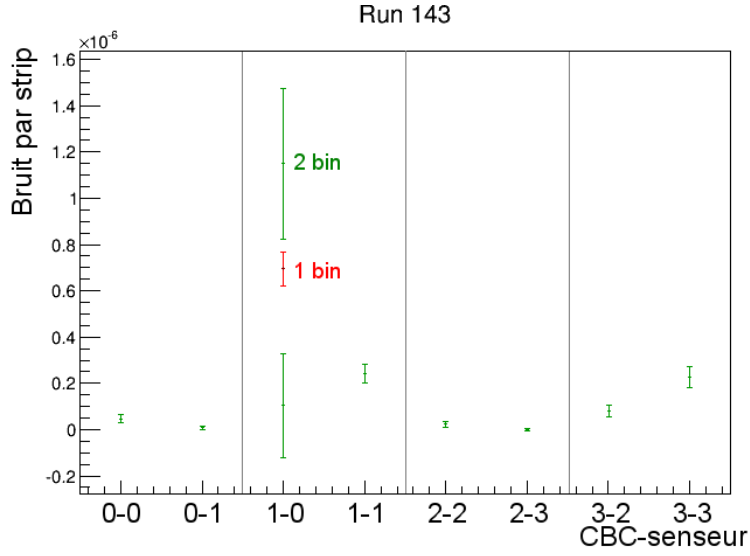


FIGURE 3.5 – Représentation graphique des différentes probabilités d’avoir un signal par strip avec un trigger aléatoire.

TABLE 3.1 – Résultats de l’analyse du bruit sans faisceau, décrit par une seule binomiale.

Bruit $\sim N_0 \cdot \text{Bin}(x, p_0)$ où N_0 est le nombre de strips (128-strips masquées) et x est le nombre de trigger (ici, 1 million) :

CBC	sensor	$p_0(10^{-8})$	σ_{p_0}	p-valeur
0	0	4.69	1.91	87.60%
0	1	0.78	0.78	
1	0	69.53	7.31	5.28%
1	1	24.22	4.21	41.41%
2	2	2.34	1.35	24.60%
2	3	0	0.39	
3	2	8	2.5	27.92%
3	3	22.61	4.43	15.78%

TABLE 3.2 – Résultats de l’analyse du bruit sans faisceau, décrit par une deux binomiales.

Bruit $\sim N \cdot \text{Bin}(x, p_0) + (N_0 - N) \cdot \text{Bin}(x, p_1)$ où N_0 est le nombre de strips (128-strips masquées) et x est le nombre de trigger (ici, 1 million) :

CBC	senseur	$p_0(10^{-8})$	σ_{p_0}	p_1	σ_{p_1}	N	σ_N	p-valeur
1	0	115	32.7	10.41	22.3	72.38	30	66.5%

3.3 Optimisation des paramètres du module

Pour pouvoir prendre des données de manière la plus efficace possible, trois paramètres doivent au préalable être optimisés. Les deux premiers sont relatifs à la latence du montage et le dernier est le seuil du comparateur.

3.3.1 Paramètres de latence

Comme indiqué dans le chapitre 1, deux flux de données différents viennent des modules, le premier venant des hits dans les senseurs et le second venant des stubs produits.

Pour compenser la latence, deux paramètres doivent donc être ajustés. Le premier déterminant l'adresse dans la mémoire interne du module où les données doivent être lues, le second dans la mémoire de la GLIB où les stubs sont stockés.

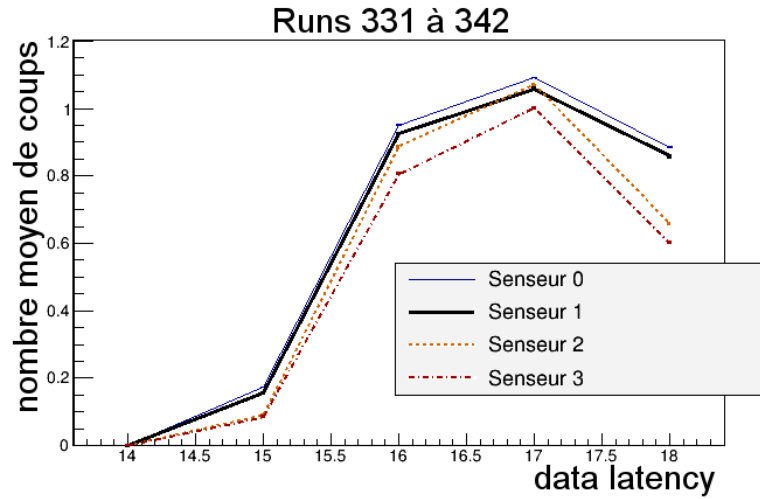


FIGURE 3.6 – Nombre moyen de hits par événement pour différents paramètres de latence.

Pour déterminer le paramètre compensant la latence des données, le nombre moyen de hits par événements est comparé. La figure 3.6 indique que le paramètre de latence optimal est de 17 qui correspond à une latence de $17 \cdot 25\text{ns} = 475\text{ns}$.

Pour déterminer le paramètre de latence des stubs, ceux-ci ont été simulés depuis les hits provenant des senseurs.

La simulation reprends exactement ce que l'électronique était censée faire. Depuis les hits dans les senseurs, des clusters sont formés en réunissant les signaux adjacents. Ensuite, la position centrale (à strip entière près) est calculée en fonction de la largeur du cluster. À ce moment là, les clusters de taille trop grande sont rejetés afin de nettoyer les modules de hits à très grand angle. Enfin, les clusters des deux senseurs sont comparés (sans distinction de CBC) et si la position relative est inférieure à une certaine borne (± 7), un stub simulé est produit.

Ensuite, l'ensemble des événements où un stub bit a été produit et/ou simulé a été divisé en trois groupes, produit et simulé, produit et non simulé et enfin, non produit et simulé. Il est ainsi possible de voir l'efficacité de l'électronique de reconstruction des stubs pour les différents paramètres de latence.

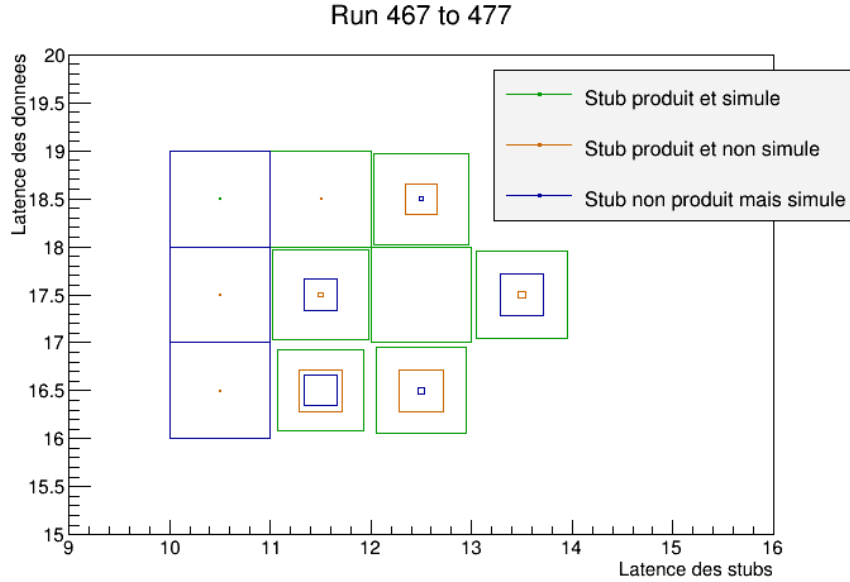


FIGURE 3.7 – Comparaison entre stubs produits et simulés pour différents paramètres de latence.

Le graphe de la figure 3.7 nous indique de manière directe les paramètres latences à utiliser. En effet, si le paramètre de latence des stubs est de 12 (qui équivaut à une latence de 300ns) et des données est de 17 (celle qui maximise également les hits dans le senseur), on a une correspondance parfaite entre les stubs produits et simulés.

Au cours de tous les scans à ces paramètres de latence lors desquels des stubs étaient produits, l'équivalence entre stubs produits et simulés était parfaite. L'efficacité de production de stub est donc de 100% et le taux de faux-positifs est nul.

Le comportement du reste de la figure 3.7 est également facilement explicable. En effet, si le paramètre de latence des stubs est trop faible, les données lues sont antérieures au passage de la particule et un stub ne sera pas produit. Pour des paramètres intermédiaires, les stubs qui sont produits sont causés par un signal qui a une certaine extension temporelle.

Lors de la fin de la semaine, une prise de donnée a été effectuée en modifiant les paramètres relatifs au cluster width discriminator. Ainsi, la taille des clusters à rejeter à été variée dans un premier temps avant de complètement désactiver la reconstruction en clusters. Les stubs produits ont été confrontés aux stubs simulés avec un algorithme de reconstruction reprenant les modifications du CWD. De nouveau, les résultats obtenus sont en accord complet avec la reconstruction avec une efficacité de 100% et aucun faux-positif.

3.3.2 Détermination de VCTH

Comme présenté lors du chapitre 1, un des paramètres centraux dans l'électronique de lecture est le seuil du comparateur, le VCTH. Ce paramètre a dû être ajusté lors de la prise de données à Hambourg pour prendre des données de la manière la plus efficace possible.

Multiplicité en fonction du comparateur

La première chose à regarder pour analyser le comportement du module en fonction du VCTH est le nombre de hits par capteur. Ceci est repris sur la figure 3.8.

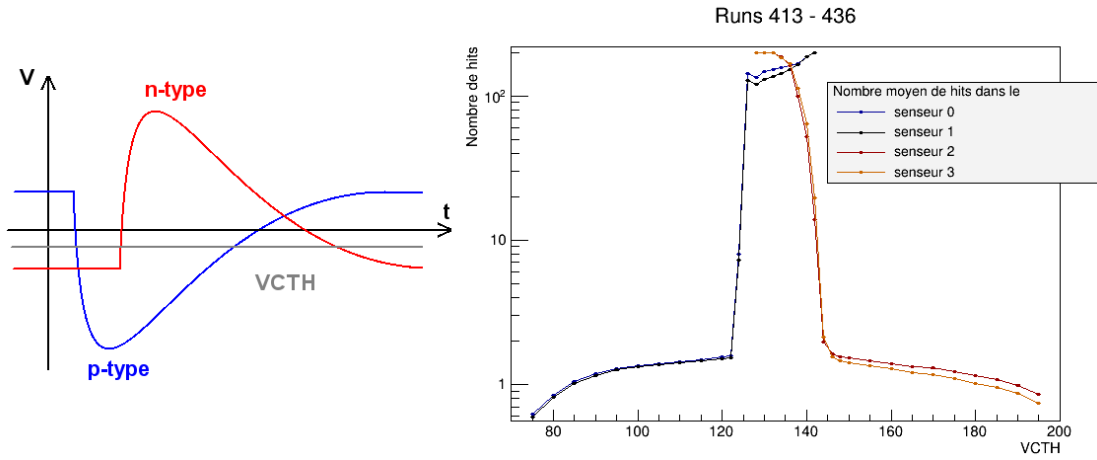


FIGURE 3.8 – Signal dans l'électronique de lecture après le passage d'une particule (à gauche) et hits par capteur en fonction de VCTH (à droite).

Comme expliqué au chapitre 1, lorsqu'une particule traverse un capteur de type-p, un signal similaire à celui représenté sur la figure 3.8 sera produit dans le CBC. Ensuite, ce signal va passer par un comparateur vérifiant si il est inférieur (supérieur pour un capteur de type-n) au seuil VCTH.

Comme on peut le voir sur le schéma de gauche, si le seuil VCTH est trop petit, aucun signal n'est suffisamment grand pour déclencher le comparateur et le nombre de hits diminue fortement. En augmentant le seuil, on commence à voir des signaux d'amplitude de plus en plus petite (correspondant à une énergie déposée plus faible). Enfin, lorsque le seuil VCTH est trop grand, toutes les strips sont déclenchées par du bruit électronique et le nombre de hits augmente jusqu'à atteindre le nombre de strips.

La discussion pour le capteur de type-n sera analogue, en demandant un signal supérieur au seuil VCTH.

La position à laquelle le bruit apparaît dans les capteurs est fixée arbitrairement en modifiant le paramètre VPLUS. Le choix de le mettre pour une valeur de VCTH avoisinant les 127 a été fait afin d'assurer une bonne linéarité du seuil.

En plus d'illustrer le fonctionnement du comparateur, ce graphe nous permet déterminer le seuil à partir duquel les senseurs deviennent inutilisables. Pour le module 1, cette limite est légèrement supérieure à 120.

Détermination du seuil optimal pour la calibration

Afin d'optimiser la prise de données, on cherche un paramètre de VCTH nous le meilleur équilibre possible entre efficacité et bruit.

Une première mesure pour optimiser ce paramètre est la proportion d'événements propres en fonction du seuil appliqué. Ce résultat est présenté sur la partie gauche de la figure 3.9. Si le seuil est trop faible, la proportion d'événements propres chute à cause d'une mauvaise efficacité. D'un autre côté, un seuil trop élevé induit plus de signal et donc, des clusters plus grands ou plus de bruit. Pour maximiser la proportion d'événements propres, le seuil idéal se situe vers 105.

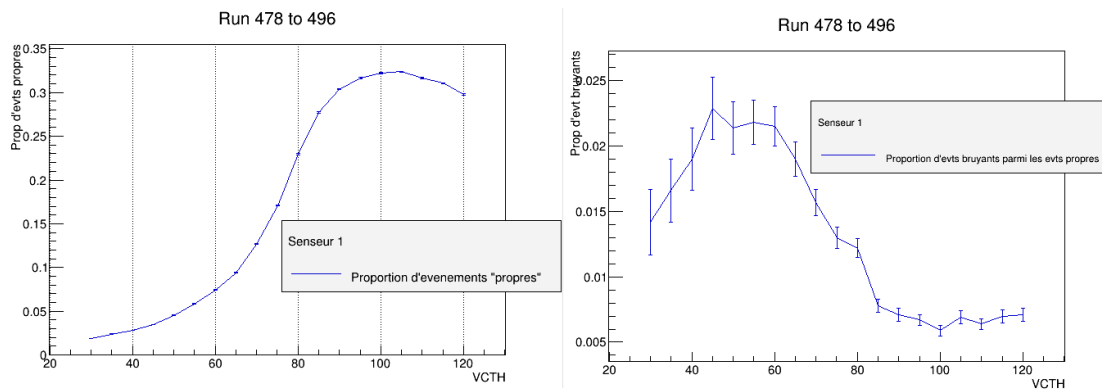


FIGURE 3.9 – Proportion d'événements propres sur les senseurs 0, 2 et 3 (à gauche) et parmi ces événements, proportion d'événements avec un hit célibataire sur le senseur 1 (à droite).

La partie droite de la figure 3.9 représente, pour des événements propres, la proportion de cas où un hit est présent sur le senseur 1 loin de sa position attendue (voir section 3.1).

La proportion de bruit est plus importante avec des valeurs de VCTH faibles, et donc des seuils élevés. Une explication possible serait liée à la très grande perte de statistique liée à la modification du seuil sur le senseur 0. Si 2 positrons sont émis lors du même événement mais que l'un d'eux n'est pas détecté sur le second module en raison des strips masquées, un seuil faible aura tendance à favoriser la caractérisation de ces événements comme étant propres à cause d'une faible efficacité. D'un autre côté, sur le senseur 0, il est possible que le positron détecté ne soit pas celui qui aie été détecté par le senseur 1, et donc, cet événement sera caractérisé comme du bruit.

Si le seuil devient vraiment très faible, la proportion de hits célibataires commence à chuter, sans doute à cause d'une efficacité de plus en plus faible.

Avec l'augmentation du seuil et de l'efficacité de détection, les événements constitués de deux positrons ne seront plus caractérisés comme propres, et on a donc une diminution

du bruit. Si le seuil continue à augmenter, le bruit reste plus ou moins constant avec une très faible tendance à la hausse.

Si l'on veut minimiser les événements célibataires, il est donc favorable de travailler avec un seuil de 100.

On voit donc que si l'on veut maximiser les événements propres ou minimiser le bruit parmi ceux-ci, il est favorable de ne pas travailler là où l'efficacité est maximale (vers 120), mais à un seuil intermédiaire aux alentours de 100.

3.4 Caractérisation du faisceau

Avant de pouvoir passer à une analyse plus approfondie du fonctionnement des modules, il est nécessaire de se donner une idée plus précise du faisceau.

3.4.1 Profil du faisceau

Pour commencer à caractériser le faisceau, la distribution générale des événements dans les modules placés perpendiculairement au faisceau a été analysée. Il est important de noter que cette distribution n'est pas la forme du faisceau, mais bien la convolution de celle-ci avec l'acceptance du système de trigger et l'efficacité des senseurs.

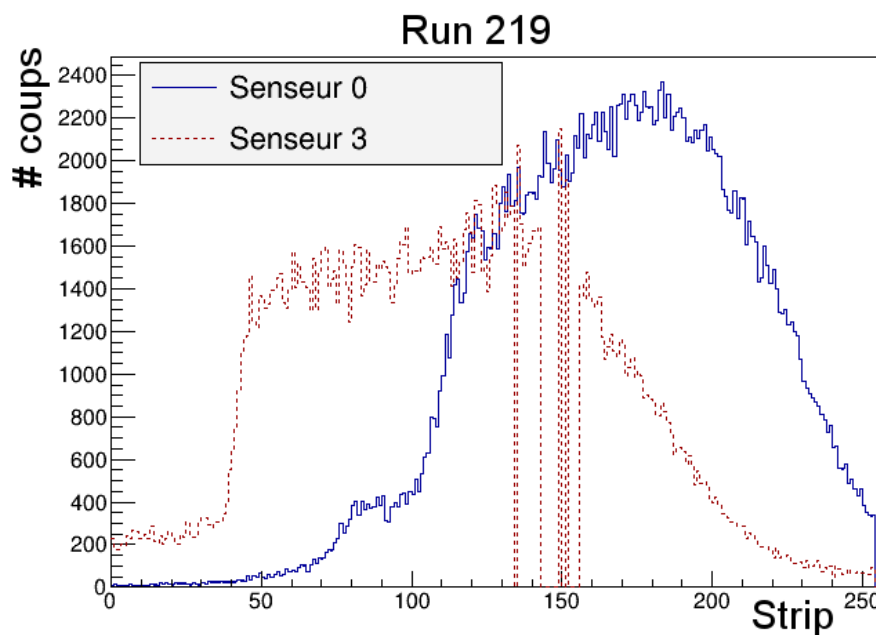


FIGURE 3.10 – Répartition de hits dans les modules en début de semaine (avant les scans de latence) pour 301582 événements.

Les figure 3.10 et figure 3.11 montrent la répartition des événements dans les senseurs 0 et 3 lors des runs 219 (en début de semaine) et 478 (en fin de semaine). Les distributions

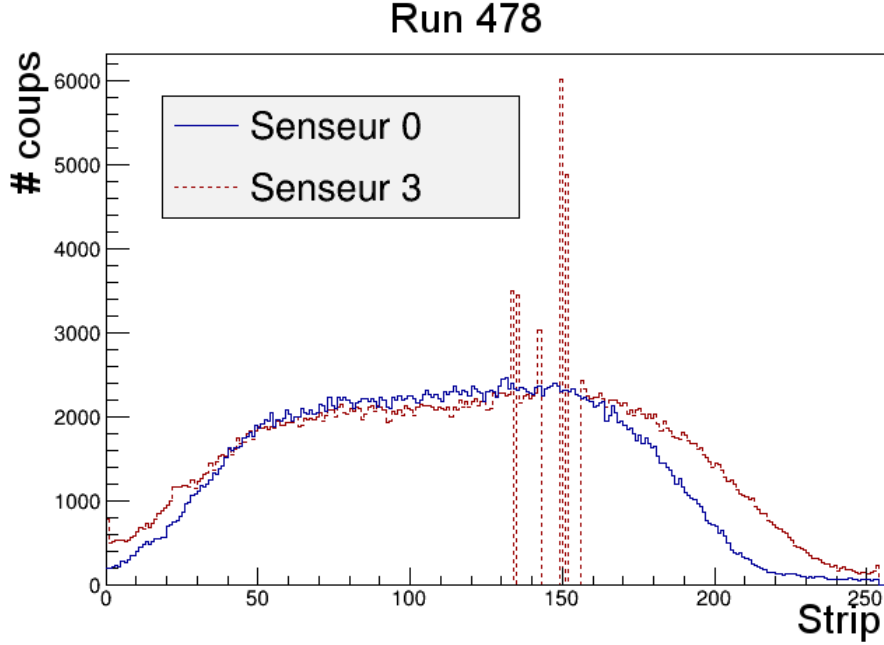


FIGURE 3.11 – Répartition de hits dans les modules en fin de semaine (après les scans de latence) pour 319527 événements.

dans les senseurs 1 et 2 ressemblent respectivement à celles dans les senseurs 0 et 3.

Ces figures montrent tout d’abord que le faisceau est bien centré sur les modules et que l’acceptance du système déclencheur est plus petite que la taille de nos senseurs. Dans les analyses qui suivent, on aura donc beaucoup moins de statistiques sur les bords des senseurs.

Entre les deux prises de données, les modules ont été déplacés afin d’être mieux alignés avec le faisceau. Cet effet est particulièrement visible sur les graphes reprenant la position des hits sur le senseur 0.

Dans le senseur 3, les pistes proches des pistes déconnectées se déclenchent beaucoup plus souvent que les autres. Cet effet est plus visible lorsque la latence est bien compensée (run 478) et disparaît totalement si ce paramètre est très mal ajusté. Il est donc probable que ces pistes soient influencées par les pistes voisines lorsqu’une particule les traverse. Dans la suite de l’analyse, les pistes voisines des pistes déconnectées ont donc également été ignorées.

Enfin, pour le run en début de semaine, la distribution a une forme en double gaussienne. Néanmoins, le petit pic dans le senseur 0 est fortement atténué en fin de semaine. Ceci résulte sans doute de l’utilisation d’un seul scintillateur et cet épaulement était probablement une conséquence d’un effet d’acceptance des scintillateurs.

3.4.2 Divergence du faisceau

Afin de pouvoir faire des prédictions sur la propagation des positrons à travers le montage, la divergence du faisceau a été étudiée.

Sans les données provenant du télescope, seuls les modules peuvent être utilisés pour la déterminer. Comme ceux-ci n'ont pas de résolution verticale, on ne pourra donc connaître que la divergence horizontale.

Sur base des événements propres, on peut reconstruire la position sur chaque module (qui sera la moyenne des hits dans les deux senseurs) et regarder la différence de position entre les deux modules (figure 3.12).

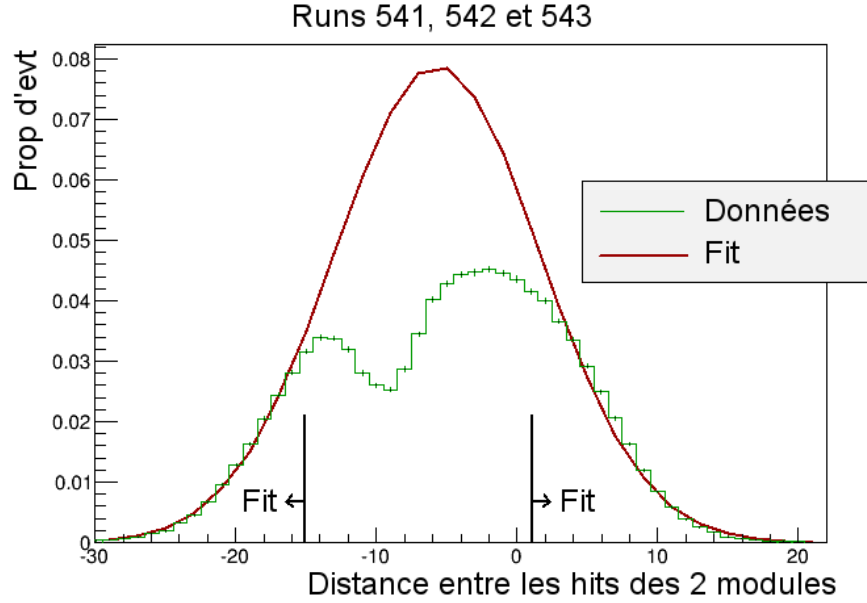


FIGURE 3.12 – Différence de position de hits entre les deux modules et exemple de fit gaussien sur l'extérieur de la distribution.

Bien que les bords de ce graphe se comportent comme une gaussienne, le centre a un comportement très différent dû aux strips masquées dans le module lointain.

Pour connaître la divergence du faisceau, il faut donc essayer de fiter une gaussienne sur la partie extérieure de cette distribution. Différentes fenêtres ont été utilisées afin de masquer le comportement anormal au centre de la gaussienne.

Les résultats obtenus indiquent que le faisceau a une divergence de :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sigma \cdot l}{d} \right) = 2.8 \pm 0.1 \text{ mrad} , \quad (3.1)$$

où σ est la largeur des fits gaussiens, l est la largeur d'une strip ($100\mu\text{m}$) et d est la distance entre les modules (30 cm). L'incertitude sur ce chiffre est dominée par la différence de largeur pour les fits correspondants à différentes fenêtres.

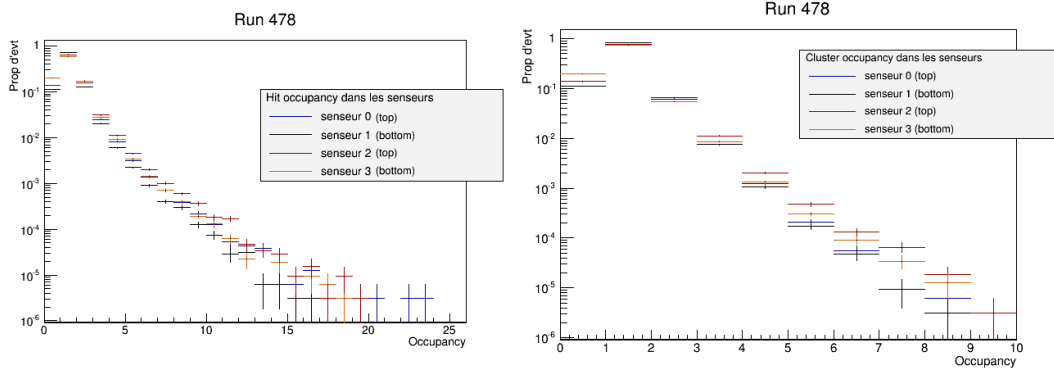


FIGURE 3.13 – Occupancy de hits (à gauche) et de clusters (à droite).

Ce résultat est compatible avec l'ordre de grandeur de 1 mrad donné par DESY [11]. De plus, comme les positrons doivent traverser une certaine quantité de matière (scintillateurs, télescope et boîtes), leur divergence sera augmentée par le diffusion multiple.

3.4.3 Multiplicité du faisceau

Le paramètre suivant analysé est l'*occupancy*, c'est à dire le nombre de strips touchées ou de clusters reconstruits par événement. La figure 3.13 reprend, pour un run standard effectué en fin de semaine, les occupancy normalisées de hits ou de clusters.

Pour ce qui est de l'occupancy des hits, dans la majorité des cas, une seule strip a été touchée par senseur. Il y a également beaucoup d'événements où aucun hit n'a été détecté pour un senseur donné. Ceux-ci ont plusieurs causes possibles.

Tout d'abord, comme ces données ont été récoltées en fin de semaine, le trigger était déclenché à l'aide d'un seul scintillateur, ce qui le rend assez bruyant.

Même si un positron a traversé le dispositif, plusieurs raisons peuvent expliquer une occupancy nulle. La première, la plus évidente, est la présence de strips mortes dans les senseurs 2 et 3. Ces senseurs ont en effet un nombre d'événements d'occupancy nulle plus grand que les autres. Une autre raison amenant à une absence de hits dans un senseur est l'inefficacité de ceux-ci. Néanmoins, comme nous le verrons plus tard, très peu de positrons traversant les senseurs ne sont pas détectés. Une dernière raison menant à une occupancy nulle est le fait que même si un positron traverse le dispositif, il ne va pas forcément croiser les senseurs. Il est en effet possible qu'ils soient déviés par diffusion multiple et atteignent le scintillateur en bout de ligne sans traverser les senseurs.

Pour les occupancy plus élevées, la décroissance est très rapide. De nouveau, plusieurs explications sont possibles pour ces événements.

Tout d'abord, comme le faisceau de positrons est créé à partir de photons produits à intervalles réguliers, il est naturel que ce faisceau secondaire soit composé de paquets de particules. Ensuite, il est possible que plusieurs positrons aient une énergie proche et passent le filtre et on aura finalement plusieurs particules arrivant simultanément sur notre montage.

Dans le même ordre d'idées, il est possible que des particules secondaires soient créées par le passage du faisceau, tout particulièrement des électrons par effet compton ou encore des photons par rayonnement de freinage.

Ensuite, les positrons n'arrivent pas toujours au centre d'une piste et il est possible que plusieurs pistes adjacentes soient déclenchées par la même particule.

Enfin, comme nous l'avons vu précédemment, les détecteurs ont un bruit intrinsèque qui peut ajouter des hits pour un événement donné. Néanmoins, ce genre d'effets est négligeable.

Sur la partie droite de la figure 3.13, on peut voir la proportion d'événements ayant un nombre de clusters donné. Le comportement est très semblable au graphe de gauche (car l'origine est similaire) mais la chute est beaucoup plus rapide.

On peut expliquer cette différence en regardant l'origine des événements à haute occupancy. Comme il est extrêmement peu probable d'avoir 20 particules émises en même temps ou d'avoir un tel bruit, l'origine de ceux-ci est à expliquer autrement. Il est possible lors du passage d'un positron dans le silicium que celui-ci perde suffisamment d'énergie pour produire un rayon δ . Un rayon δ est un électron de valence qui aura été éjecté de son orbite et qui déposera ensuite de l'énergie dans le senseur. Ces électrons peuvent être produits dans la direction du senseur, et donc, peuvent déclencher plusieurs strips adjacentes pour former un large cluster.

Pour ce qui est des clusters occupancy supérieures à 1, il est important de noter que ce n'est pas nécessairement plusieurs particules différentes. En effet, il est possible qu'une strip ne soit pas déclenchée au milieu d'un grand cluster. Le détecteur verra donc deux clusters différents l'un à côté de l'autre.

Finalement, on peut regarder la différence de comportement entre les différents senseurs. La forme des graphes est la même pour tous les senseurs bien que les valeurs elles-mêmes soient différentes. Il n'est néanmoins pas judicieux de conclure quoi que ce soit sur les senseurs en se basant sur ces graphes car ils ne prennent pas en compte le nombre de particules les traversant. En effet, chacun aura une acceptance différente par rapport au trigger et la quantité de matière à traverser sera également variable. En l'absence des données du télescope, une simulation Monte Carlo complète prenant en compte l'ensemble du système aurait été nécessaire avant de pouvoir conclure.

L'occupancy totale de notre montage, c'est à dire la somme du nombre de hits ou clusters dans les quatre senseurs peut également nous apprendre des choses.

La figure 3.14 reprend la somme de l'occupancy pour les quatre senseurs. Il ressort de ce graphe qu'un pic très important est présent pour une occupancy de quatre. Ce pic est majoritairement composé d'événements ayant un hit/cluster par senseur et correspond, en général, à une particule déclenchant une fois chaque senseur. Comme il est possible qu'une particule déclenche plusieurs strips adjacentes, il est normal que le pic pour une occupancy de quatre soit beaucoup plus étroit pour les clusters que pour les hits.

Ensuite, on peut remarquer une certaine périodicité dans le comportement pour les clusters. En effet, malgré une décroissance très rapide avec l'occupancy, les multiples de quatre ont subitement un regain d'événements. Ceci illustre bien que le faisceau est parfois composé de plusieurs particules simultanées. Ces événements particuliers ont été

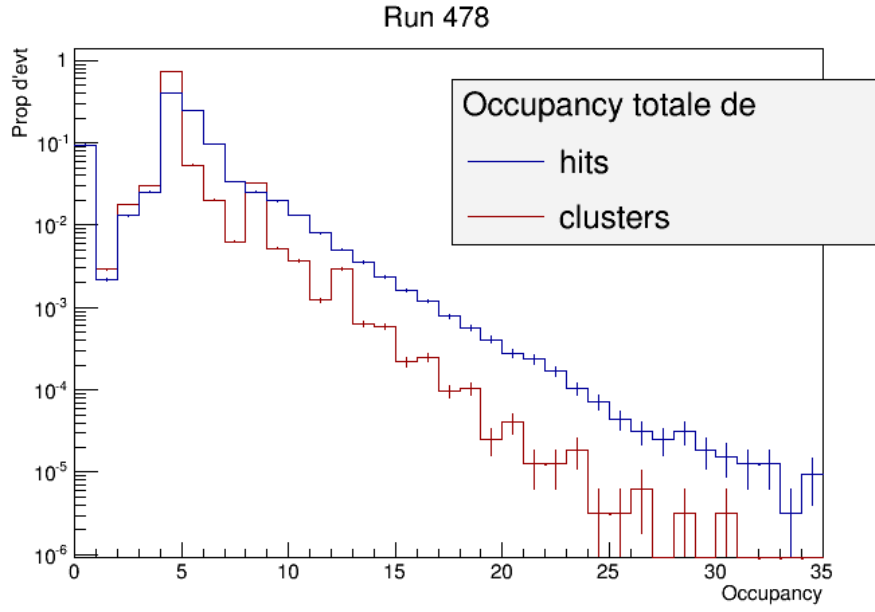


FIGURE 3.14 – Somme de l'occupancy sur les 4 senseurs.

représentés sur la figure 3.15 où un fit selon la fonction $p_0 e^{-p_1 \cdot x}$ a été effectué.

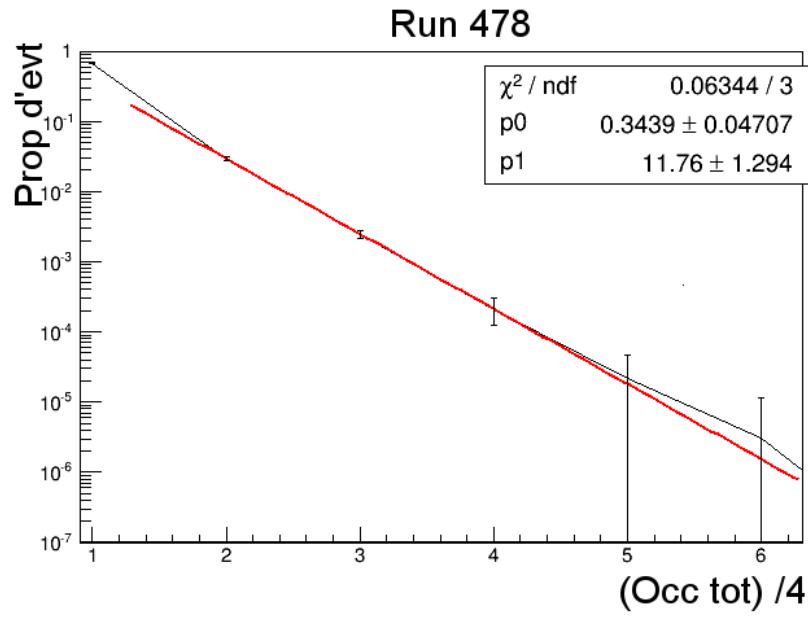


FIGURE 3.15 – Distribution des événements ayant une occupancy totale valant un multiple de quatre.

Cette figure montre clairement que les événements à plus de deux particules sont produits avec une probabilité exponentiellement décroissante. Le nombre d'événements avec une et une seule particule quand à lui est beaucoup plus élevé.

Un dernier commentaire pouvant être fait à partir de la figure 3.14 concerne la proportion d'événements avec une occupancy totale plus petite que 4 mais non nulle. Il y a en effet un nombre non négligeable d'événements qui ont déclenché deux ou trois senseurs mais un nombre beaucoup plus faible ayant déclenché un seul senseur. Une analyse complète du bruit et de l'efficacité des senseurs est nécessaire avant de tirer des conclusions quantitatives et nous essaierons donc d'expliquer ce comportement dans la section suivante.

3.5 Signal secondaire induit par le faisceau

Comme nous l'avons vu dans la section précédente lors de l'analyse du nombre de clusters par événements, un grand nombre de ceux-ci n'ont pas une occupancy totale valant un multiple de quatre.

Par exemple, certains événements présentent cinq clusters sur les quatre senseurs et il y a donc un senseur contenant plusieurs clusters, ce qui pose la question de l'origine de ces clusters.

Dans cette section, nous essaierons de comprendre l'origine des hits célibataires (voir figure 3.2), c'est à dire de hits présents dans un senseur alors qu'ils n'y étaient pas attendus. Il faut donc au préalable déterminer la zone dans un senseur où aucun hit n'est attendu. Pour cela, nous pouvons nous baser sur la différence de position moyenne entre les hits sur deux senseurs du même module (cf figure 3.16). La fenêtre choisie fait neuf strips de largeur centrée en la position du hit sur l'autre senseur ± 5 pour le premier module et ± 1 pour le second.

La normalisation du graphe est effectuée en divisant le nombre de hits célibataires pour une strip donnée par le nombre de fois où cette strip ne faisait pas partie de la fenêtre d'exclusion. Ces distributions sont représentées sur la figure 3.17.

Ces runs ont été utilisés car ils ont eu lieu en fin de semaine (avec un trigger propre) et permettent d'avoir beaucoup de statistiques. Il est important de noter pour la suite de la discussion que le module CNM était incliné de 8° par rapport au faisceau au cours de ces runs.

Le taux d'événements célibataires observé est de l'ordre du pour mille, soit quatre ordres de grandeur de plus que pour le bruit intrinsèque discuté précédemment. De plus, contrairement au bruit intrinsèque, ce signal n'est pas du tout constant pour un CBC donné. Il a plutôt une distribution qui rappelle la forme du faisceau.

Les strips extrêmes dans les senseurs présentent une proportion d'événements célibataires bien plus grande que leurs voisines, surtout pour le module en amont. Ce phénomène peut être expliqué par la présence d'une deuxième particule qui frôle un des senseurs sans toucher les autres, ce qui est amplifié par l'inclinaison du premier module.

Dans le second module, un nombre plus élevé d'événements célibataires est présent près des strips masquées. Ceci peut avoir deux causes différentes. Tout d'abord, il est

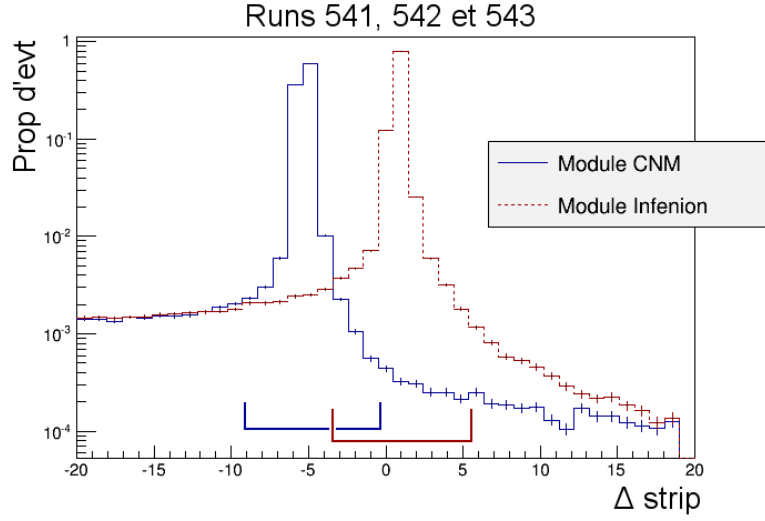


FIGURE 3.16 – Distribution du nombre de strips d'écart entre les hits dans les deux senseurs d'un même module et fenêtres sélectionnées pour les événements célibataires.

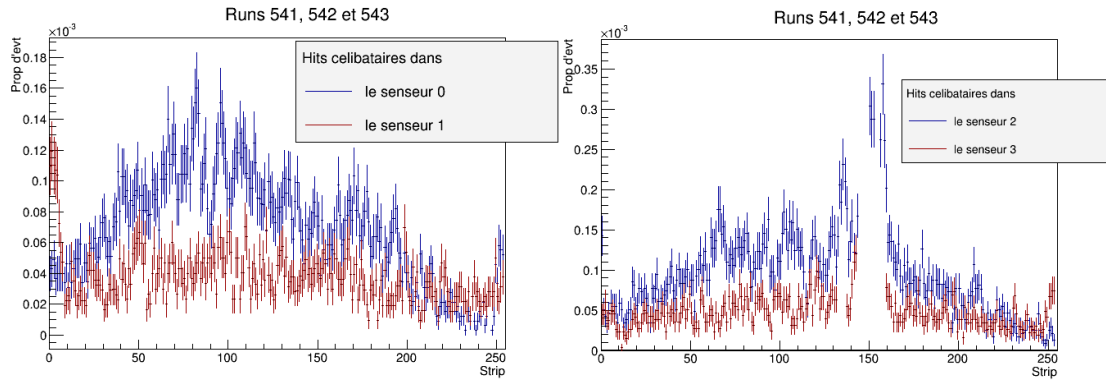


FIGURE 3.17 – Distribution de hits célibataires dans les quatre senseurs.

possible que des effets électriques soient induits par les strips déconnectées, mais comme les strips voisines ont également été masquées, cet effet est sans doute assez faible. Une autre explication possible serait la présence de positrons secondaires ratant le premier senseur et étant déviés vers le second par diffusion multiple. Ensuite, si ce positron passe à travers les strips défectueuses avant de traverser le dernier senseur, il n'aura été détecté qu'une seule fois.

Enfin, plus le senseur est situé en aval, plus ce bruit est important. Cela nous suggère que ces hits pourraient être des particules secondaires créées par le faisceau perdant de l'énergie dans la matière et qui seraient soit arrêtées avant d'atteindre le senseur suivant, soit produites à trop grand angle pour atteindre les autres détecteurs.

Malheureusement, il est difficile de tester ces différentes hypothèses sans faire une

simulation Monte-Carlo complète de la salle, ce qui serait très laborieux.

D'autres indices peuvent néanmoins être obtenus en regardant d'autres caractéristiques de ces hits célibataires. Comme ces hits disparaissent totalement lorsque la latence du module est mal compensée, ce signal est nécessairement lié directement au faisceau.

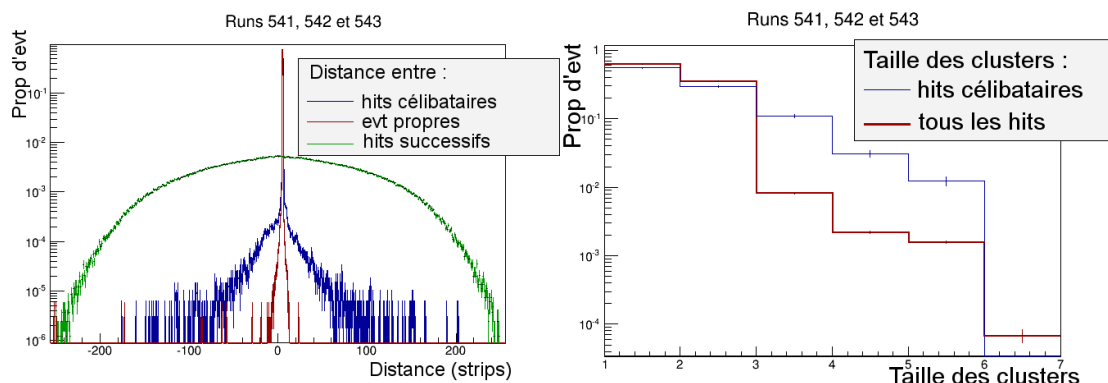


FIGURE 3.18 – Distance entre les hits dans le module 1 pour des événements propres et des événements avec célibataires et distance dans le senseur 0 entre 2 événements propres consécutifs (le tout à gauche). Taille des clusters pour les événements de bruit ou tous les événements dans le senseur 0 (à droite).

Le partie gauche de la figure 3.18 montre que la distribution d'événements avec célibataires présente non seulement un pic correspondant au passage de la particule principale, mais aussi une queue d'événements qui a une forme très différente. Une explication possible pour ceux-ci aurait été une seconde particule du faisceau qui n'a pas été détectée par le senseur 1. Il est possible d'éliminer cette hypothèse en comparant cette queue avec la position relative de deux événements successifs. Les deux distributions ont une forme très différente et la queue de la distribution bleue n'est donc pas formée par une deuxième particule du faisceau.

L'hypothèse restante - celle d'une particule secondaire créée par interaction avec le télescope ou le détecteur lui-même - est par contre supportée par la figure 3.18 (droite). On y voit que les clusters célibataires sont en moyenne plus larges, ce qui est compatible avec des particules produites à grands angles.

Le signal induit par des particules secondaires doit toujours être accompagné par une particule primaire. Ce signal est donc incapable d'expliquer les événements où un seul cluster est présent parmi les quatre senseurs. La figure 3.14 indique que ces événements représentent une fraction de l'ordre du pour mille des événements totaux, ce qui est incompatible avec le bruit intrinsèque.

Afin de mieux comprendre l'origine de ce signal, la figure 3.19 indique la distribution de ces événements sur les deux derniers senseurs (les senseurs du module CNM se comportent comme le senseur 3).

Sur les trois premiers senseurs du montage, ces événements sont très peu présents et leur répartition semble uniforme. Dans le dernier senseur en revanche, un nombre beau-

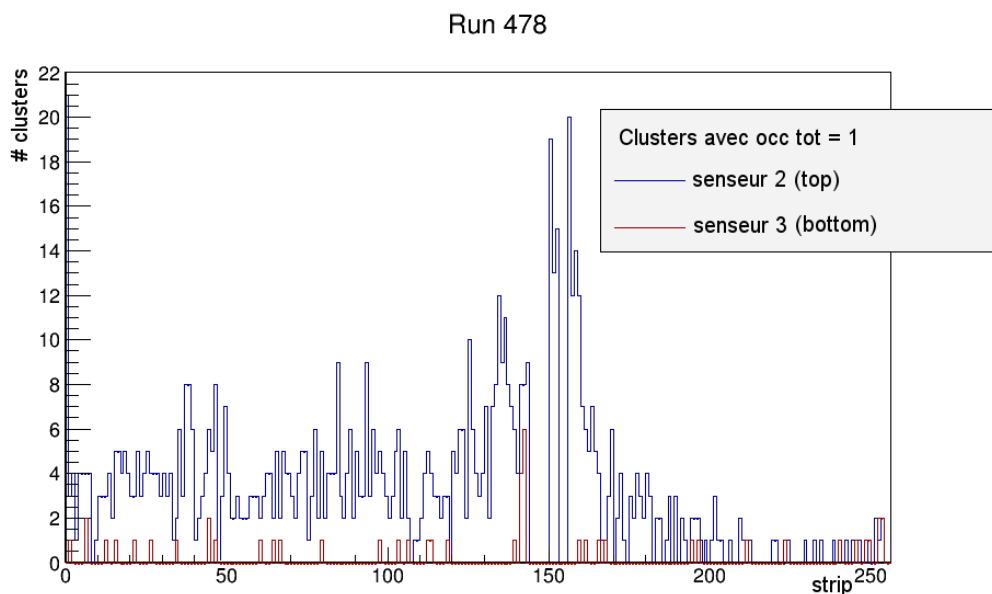


FIGURE 3.19 – Distribution de clusters sur les deux derniers senseurs si l’occupancy totale vaut un. Les deux senseurs du module CNM se comportent comme le senseur 3.

Le coup le plus important de ces clusters est présent. Une hypothèse pouvant expliquer ce genre d’événements serait des particules rétro-diffusées dans le scintillateur et s’arrêtant dans le premier senseur qu’elles croisent. Pour confronter cette hypothèse, une simulation Monte-Carlo complète du montage devrait être effectuée, ce qui serait très laborieux et ne nous apporterait que très peu d’information.

3.6 Efficacité des senseurs

Maintenant que l’on a pu déterminer quel bruit règne dans nos senseurs, une mesure centrale pour comprendre leur comportement est celle de l’efficacité de détection qui est définie comme étant la probabilité pour le senseur de détecter une particule le traversant.

3.6.1 Méthode employée

Malheureusement, nous n’avons pas accès aux données du télescope et le trigger ne nous permet pas de déterminer si une particule a réellement traversé un senseur. Les seules données à notre disposition viennent directement des senseurs eux-mêmes.

En ne prenant que des événements propres, on peut regarder la probabilité qu’un hit se trouve dans une fenêtre de plus ou moins 3 strips autour de la position attendue (voir figure 3.2). Ce nombre vaudra :

$$\alpha = \frac{\# \text{ Evt ac hit}}{\# \text{ Evt}} \quad (3.2)$$

$$= \frac{\#(\text{hits} \mid \text{Particule}) + \#(\text{hits} \mid \text{Pas Particule})}{\# \text{ Evt}} \quad (3.3)$$

$$= \mathcal{P}_1 \cdot \mathcal{P}(\text{Particule}) + \mathcal{P}_2 \cdot \mathcal{P}(\text{Pas particule}), \quad (3.4)$$

où $\mathcal{P}(\text{Particule})$ est la probabilité qu'un événement soit sélectionné alors qu'il s'agit bien d'un positron et $\mathcal{P}(\text{Pas particule})$ réciproquement. D'un autre côté, la probabilité $\mathcal{P}_1$ d'avoir un hit alors qu'une particule a traversé la fenêtre est précisément l'efficacité du senseur et nous la noterons ϵ . Enfin, $\mathcal{P}_2$ correspond au bruit dans la fenêtre.

Comme le bruit intrinsèque aux modules est de l'ordre de 10^{-6} , $\mathcal{P}(\text{Pas particule}) \sim 0$, $\mathcal{P}(\text{Particule}) = 1 - \mathcal{P}(\text{Pas particule}) \sim 1$ et on a donc $\alpha \sim \epsilon$. Un calcul plus complet peut être trouvé en annexe à ce document.

Dans cette discussion, tous les effets angulaires ont été négligés. En effet, en bordure de module, il est possible qu'un positron ayant été détecté dans les autres senseurs soit dévié et ne touche plus le dernier senseur. Pour éviter ce problème, les mesures d'efficacité seront toujours réalisées au centre des senseurs.

L'efficacité étant définie comme la probabilité de détecter une particule dans une fenêtre autour de la position attendue, nous n'avons qu'une indication indirecte de l'efficacité strip par strip.

3.6.2 Premières mesures d'efficacité

La première mesure d'efficacité qui a été réalisée est de nouveau en se basant sur les runs de cluster width effectués en fin de semaine. Il peut être intéressant de noter que le fait que le premier module soit tourné a sans doute une influence sur l'efficacité. En effet, la distance à parcourir étant plus grande, l'énergie déposée par le positron sera également plus élevée. D'un autre côté, comme les clusters sont plus grands, l'énergie déposée devra être divisée en un plus grand nombre de strips.

L'efficacité calculée pour une fenêtre de 7 strips est reprise sur la gauche de la figure 3.20 pour le senseur 0. Cinq zones sont à dégager de ce graphe.

Tout d'abord, les deux extrémités du senseur sont à abandonner. En effet, les effets angulaires discutés plus tôt (qui sont accentués par le fait que le module est incliné) rendent notre définition d'efficacité inutilisable.

Ensuite, une zone au centre du module est également à bannir. Celle-ci correspond à une perte énorme de statistique due aux strips défectueuses sur le second module. De plus, les hits restants sont à plus grand angle ce qui influence l'efficacité.

Il reste donc deux zones utilisables, une au centre de chaque CBC. On peut vérifier que l'efficacité est bien constante dans chacune de ces zones. Bien que ceci semble montrer que toutes les strips ont le même comportement, il faut néanmoins nuancer notre conclusion. En effet, cette efficacité reste une moyenne sur un certain nombre de strips. Il est donc possible que l'efficacité varie d'une strip à l'autre mais que ces effets soient brouillés en passant à la moyenne.

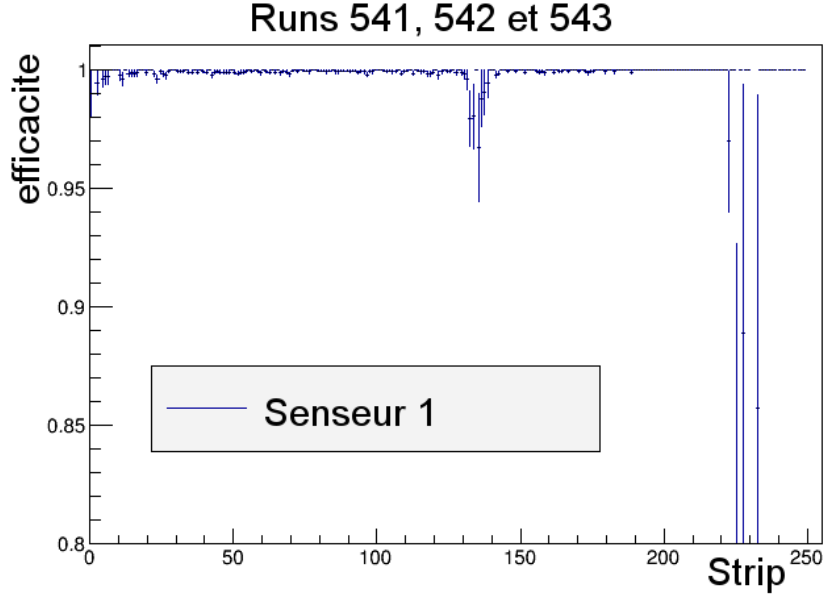


FIGURE 3.20 – Efficacité par strip sur le senseur 1.

L'efficacité moyenne de nos modules pour les couples CBC-senseurs est reprise dans la table 3.3.

TABLE 3.3 – Efficacité pour les différents couples CBC-senseurs comme défini plus tôt.

det	CBC	$\epsilon(\%)$	σ_ϵ
0	0	99.92	0.01
0	1	99.89	0.01
1	0	99.54	0.01
1	1	99.45	0.03
2	2	99.07	0.03
2	3	99.31	0.04
3	2	99.39	0.02
3	3	99.45	0.03

Pour ces runs, l'efficacité est toujours supérieure à 99 % avec le meilleur couple CBC-senseur ayant une efficacité supérieure à 99.9%.

Le premier module a également l'air plus efficace que le second. Il faut néanmoins nuancer ce propos par le fait que ce module est incliné et que tous les scans de latence et de VCTH ont été réalisés en regardant se concentrant sur le premier module.

Finalement, l'efficacité semble plus ou moins groupée par senseur et non par CBC.

3.6.3 Efficacité en fonction du seuil du comparateur

En modifiant le seuil du comparateur, il faudra plus ou moins d'énergie déposée dans le capteur pour déclencher l'électronique. Il est donc naturel de vérifier le comportement de l'efficacité en fonction de ce paramètre.

Efficacité par couple CBC/senseur

La partie gauche de la figure 3.21 reprend, pour le capteur 0, l'efficacité moyennée par tranche de dix strips.

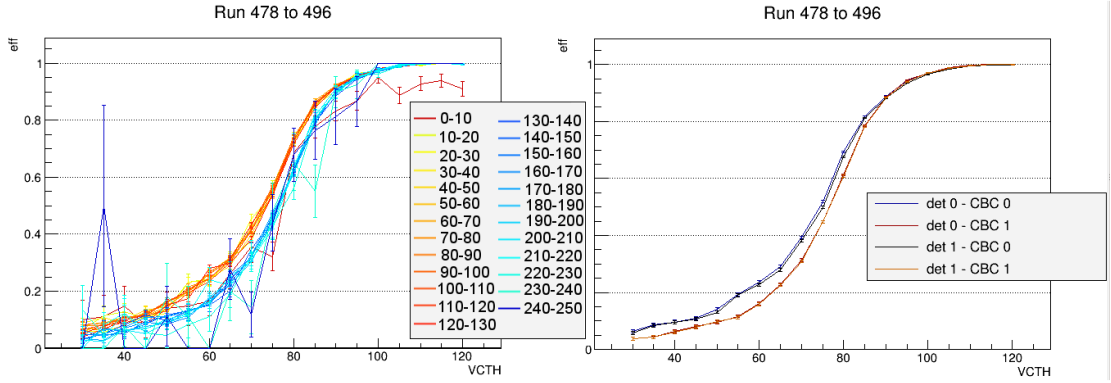


FIGURE 3.21 – Efficacité en fonction de VCTH. À gauche, efficacité du capteur 0 moyennée par dix strips, en rouge pour le CBC0 et bleu pour le CBC1. À droite, efficacité groupée par couple CBC/senseur.

Les deux CBC ont un comportement légèrement différent mais que dans le capteur 0, les strips d'un même CBC ont un comportement très semblable. Les seules exceptions sont pour les strips extrêmes qui souffrent d'un problème d'acceptance angulaire.

Le comportement semblable des strips au sein du même CBC nous autorise à tracer le graphique de droite dans la figure 3.21. Ici, la moyenne a été faite pour une cinquantaine de strips au centre de chaque couple CBC/senseur.

Le comportement dans un module est influencé par le CBC et aucune différence significative n'est visible entre les deux capteurs. La différence entre les deux CBC est naturelle car tant le VCTH que le VPLUS sont des paramètres communs pour une même puce.

Dépendance temporelle

Lors du passage d'une particule dans un capteur, un signal sera produit dans l'électronique de lecture. Celui-ci sera ensuite comparé toutes les 25 ns dans le CBC. Comme le signal produit n'est pas constant sur une période d'échantillonnage, la détection ou non d'une particule pourra donc dépendre du moment auquel celui-ci aura débuté par rapport à l'horloge interne de l'électronique.

La différence de temps entre le déclenchement du trigger et l'horloge de l'électronique (appelée *phase*) est mesurée par le TDC et enregistrée pour chaque événement. Comme la latence du trigger est constante (en fin de semaine), cette phase encode à une constante près le moment auquel un positron aura traversé les senseurs, et donc l'instant auquel le signal aura été échantillonné.

La même analyse d'efficacité peut être effectuée en ne sélectionnant que les événements ayant la même phase. Ces mesures sont représentées sur la partie gauche de la figure 3.22. L'efficacité est assez semblable pour des phases intermédiaires, tandis qu'elle commence à chuter pour les valeurs extrêmes de TDC.

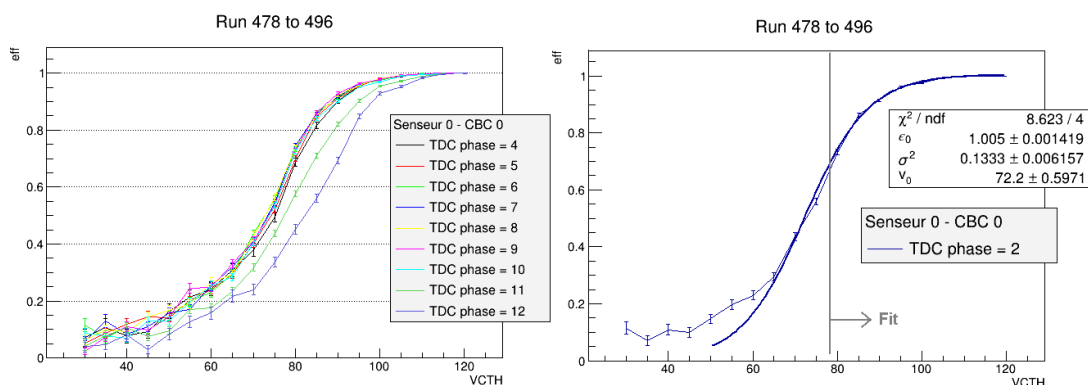


FIGURE 3.22 – Efficacité en fonction de VCTH pour différentes phases (à gauche). Exemple de fit avec une sigmoïde à droite.

Pour avoir une meilleure intuition, la forme générale du signal peut être grossièrement reconstruite depuis ces données. En effet, il est possible (pour de grandes valeurs de VCTH) de décrire ces données de manière ad-hoc à l'aide d'une sigmoïde (Eq 3.5). La partie droite de la figure 3.22 donne un exemple d'un fit utilisant cette fonction. Il fonctionne très bien à des grandes valeurs de VCTH mais ne peut pas être utilisé pour prédire l'efficacité à plus faible seuil.

$$f = \frac{\epsilon_0}{1 + e^{-\sigma^2(v-v_0)}} \quad (3.5)$$

Cette fonction étant inversible, il est possible de déterminer la valeur de VCTH nécessaire pour avoir une efficacité donnée. En supposant que tous les événements génèrent un signal de la même forme, le seuil en fonction du paramètre TDC nous donnera donc une idée de la forme du signal aux bornes du comparateur (figure 3.23).

Comme attendu, le comportement dépend principalement du CBC. Les phases extrêmes nécessitent un VCTH plus grand, signe que le signal devient plus faible. Les phases comprises entre 5 et 11 seront donc privilégiées pour les études fines de la réponse du détecteur.

Enfin, ces graphes ont une forme semblable à 50 ou 95 %. Ceci nous donne donc une première idée (très vague) de la forme du signal induit par le passage d'une particule.

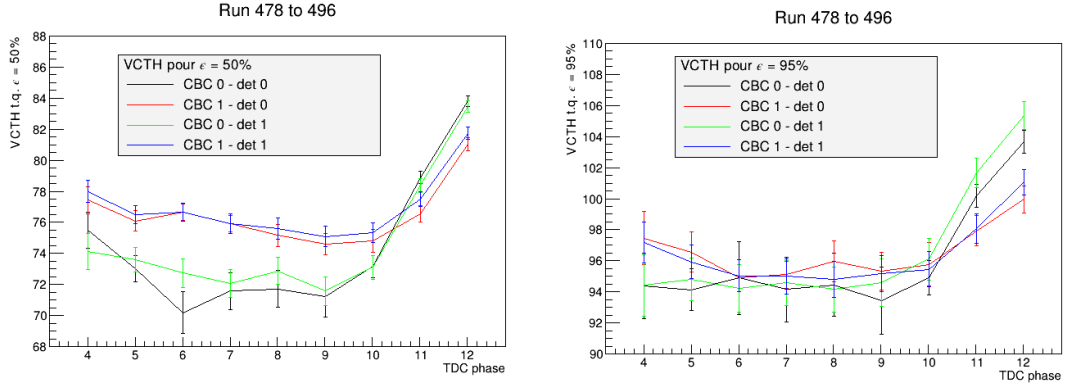


FIGURE 3.23 – VCTH nécessaire pour avoir une efficacité de 50% (à gauche) ou de 95% (à droite) en fonction de la phase.

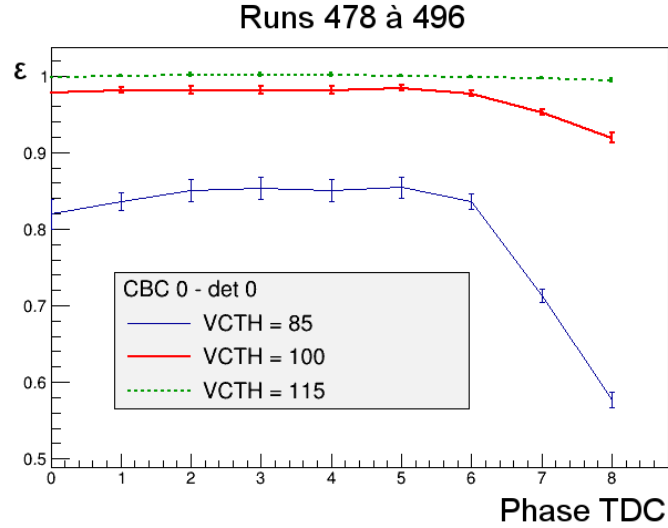


FIGURE 3.24 – Efficacité en fonction de la phase du TDC pour VCTH = 85, 100 et 115.

La faible statistique et la mauvaise résolution horizontale ne nous permettent pas d'avoir une idée précise de la forme du signal.

La résolution horizontale pose le plus grand problème car les points présentés sur le graphique doivent être interprétés comme une moyenne. C'est pourquoi une mesure supplémentaire à Louvain-La-Neuve (dont le setup dispose d'un TDC très précis, voir section 4.2.2) serait intéressante.

Explication de la forme de l'analyse VCTH

Dans la sous-section précédente, nous avons utilisé une sigmoïde pour décrire nos données. Bien que cela nous permettait de bien décrire les résultats obtenus pour des

seuils élevés, cette fonction n'est pas justifiée et ne permet pas de décrire le comportement de tout le graphe.

Lorsqu'une particule traverse le senseur, comme la perte d'énergie moyenne est fixée par l'équation de Bethe-Block, la distribution de celle-ci sera décrite par une fonction de Landau. Dès lors, on pourrait s'attendre à ce qu'une particule soit détectée si le signal généré soit supérieur au seuil VCTH et donc, que l'efficacité doive se comporter comme l'éq 3.6 où $E(\text{VCTH})$ est l'énergie correspondante à un seuil donné, μ' l'énergie moyenne déposée et c' la largeur de la Landau.

$$f_1(\text{VCTH}) = \int_{E(\text{VCTH})}^{\infty} \text{Landau}(E'; \mu', c') dE' \quad (3.6)$$

On peut réécrire cette équation en terme de paramètres dépendant du CBC :

$$f_1(\text{VCTH}; \mu, c) = \int_{\infty}^{\text{VCTH}} \text{Landau}(-v'; \mu, c) dv' \quad (3.7)$$

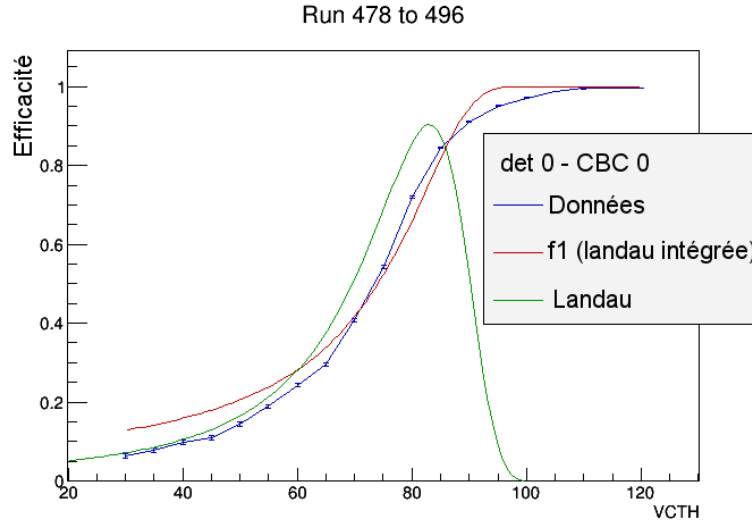


FIGURE 3.25 – Ajustement avec une landau intégrée et landau correspondante.

La partie gauche de la figure 3.25 reprend les données du scan VCTH approximées par la fonction f_1 . La distribution de Landau qui s'est faite intégrer est également représentée sur le graphe (après renormalisation).

Bien que la distribution aie la bonne forme générale, elle reste néanmoins fort différente des données expérimentales. En effet, le début de la pente est beaucoup plus raide et la queue de la Landau est trop grande. Il doit y avoir un effet qui n'a pas été pris en compte. Trois hypothèses ont été étudiées pour tenter de comprendre cet effet :

- La distribution énergétique du faisceau. L'énergie déposée dépendant de l'énergie d'une particule, la courbe serait adoucie si le faisceau n'était pas mono-énergétique.

- La largeur des pistes. En fonction de l'endroit où le positron traverse une piste, plus ou moins de signal sera induit.
- Une incertitude sur le seuil. Si le seuil VCTH n'est pas constant sur tout le capteur suite à des offsets mal fixés, l'énergie déposée pour générer un hit sera variable.

Le pouvoir d'arrêt pour un électron dans du silicium est représenté sur la figure 3.26. Pour les énergies considérées, le cas du positron sera très similaire. Le capteur étant mince, seule l'énergie de collision induira un signal dans l'électronique. Aux échelles d'énergies utilisées lors du test faisceau (2 à 4 GeV), ce pouvoir d'arrêt est constant et ne peut donc pas expliquer la fig 3.25.

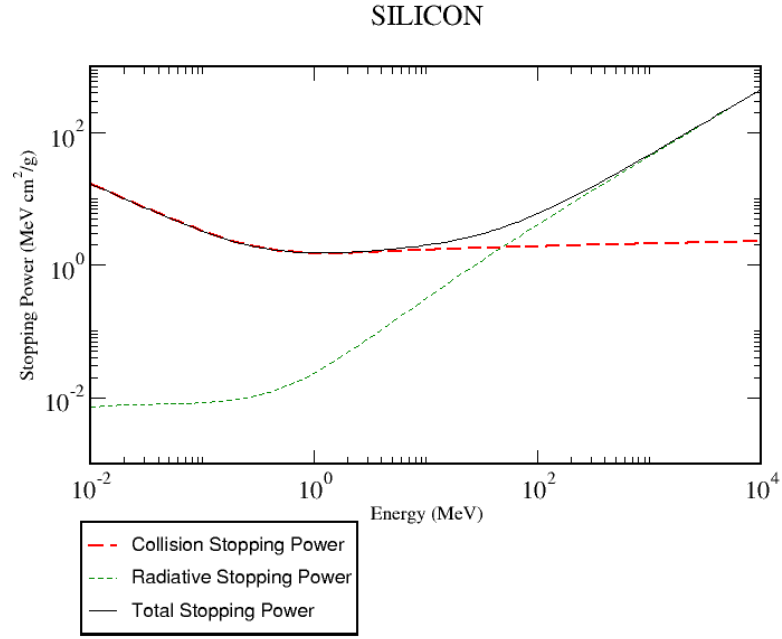


FIGURE 3.26 – Pouvoir d'arrêt d'un électron dans le silicium.

Pour tenir en compte l'effet de la largeur des strips, on suppose que le profil de l'énergie déposée dans le silicium suit une distribution gaussienne de largeur constante. Dès lors, l'énergie déposée sous une strip de largeur w pour un dépôt centré à une distance x du bord de la piste (voir figure 3.27) vaut

$$E_{\text{dep}}(x) = \frac{E_{\text{tot}}}{\sigma\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-\frac{(x'-x)^2}{\sigma^2}} dx' \quad (3.8)$$

$$= \frac{E_{\text{tot}}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{x}{\sigma}}^{\frac{w-x}{\sigma}} e^{-s^2} ds \quad (3.9)$$

$$= \frac{E_{\text{tot}}}{2} \left(\text{erf}\left(\frac{w-x}{\sigma}\right) + \text{erf}\left(\frac{x}{\sigma}\right) \right) \quad (3.10)$$

où l'on a fait le changement de variable $s = \frac{x' - x}{\sigma}$.

Si le signal induit dans l'électronique est proportionnel à l'énergie déposée, l'efficacité se comportera comme

$$\begin{aligned}
f_2(\text{VCTH}) &= \frac{1}{w} \int_0^w \epsilon(\text{VCTH}, x) dx \\
&= \int_0^1 \epsilon(\text{VCTH}, wt) dt \\
&= \int_0^1 dt f_1(\text{VCTH}; \alpha \frac{E_{\text{tot}}}{2} \left(\text{erf}\left(\frac{w}{\sigma}(1-t)\right) + \text{erf}\left(\frac{w}{\sigma}t\right) \right), c) \\
&= \int_0^1 dt f_1(\text{VCTH}; \mu \frac{(\text{erf}(\frac{w}{\sigma}(1-t)) + \text{erf}(\frac{w}{\sigma}t))}{\langle \text{erf}(\frac{w}{\sigma}(1-t')) + \text{erf}(\frac{w}{\sigma}t') \rangle_{t'}}, c) \quad (3.11)
\end{aligned}$$

où le changement de variable $t = \frac{x}{w}$ a été effectué et $\mu = \alpha \langle E_{\text{dep}} \rangle$ est la valeur VCTH correspondant à l'énergie moyenne déposée sous la strip.

Le fit effectué avec la fonction f_2 est représenté sur la figure 3.27 et le paramètre w/σ indique que la largeur du dépôt d'énergie vaut $\sigma = (0.74 \pm 0.01)w = 74 \pm 1 \mu\text{m}$. Bien que le fit se rapproche des données, l'effet n'est pas encore suffisant pour expliquer complètement la forme de la courbe.

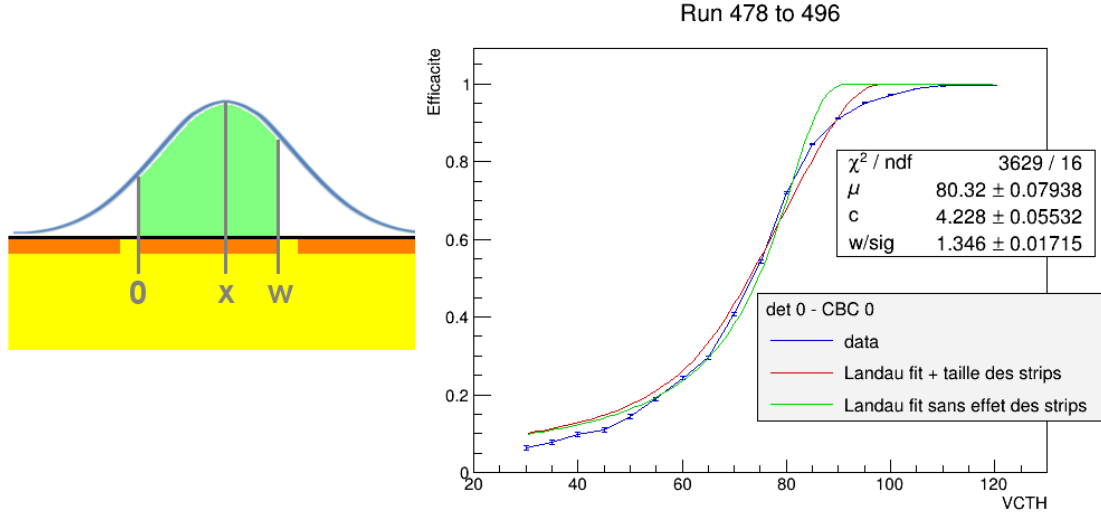


FIGURE 3.27 – Schéma de l'effet dû aux strips à gauche et fit à l'aide de la fonction f_2 à droite ainsi que la fonction f_1 correspondante.

Pour implémenter la troisième hypothèse, une incertitude sur VCTH, on suppose que

ce paramètre varie d'une strip à l'autre de manière gaussienne. L'efficacité deviendrait :

$$f_3(\text{VCTH}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(x) \cdot \text{Gaus}(x; \text{VCTH}, \sigma_{\text{VCTH}}) dx \quad (3.12)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f_2(\text{VCTH} + \sigma_{\text{VCTH}} x) \cdot \text{Gaus}(x; 0, 1) dx \quad (3.13)$$

Si tous les paramètres sont laissés libres lors de l'ajustement, la valeur de w/σ renvoyée devient très grande, correspondant à un faible effet des strips. Si la valeur de w/σ est fixée à 1.346, le fit converge vers la figure 3.28.

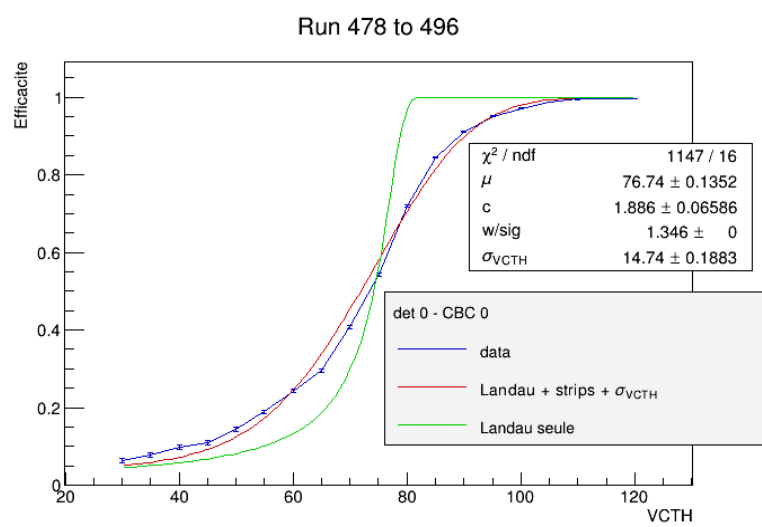


FIGURE 3.28 – Fit à l'aide de la fonction f_3 à droite ainsi que la fonction f_1 correspondante.

Ce graphe nous renvoie une incertitude sur le VCTH de $\sigma_{\text{VCTH}} = 14.7 \pm 0.2$ (16.7 ± 0.2 en laissant les paramètres libres). Malheureusement, les données provenant de la calibration des modules n'ont pas été enregistrées et ils auraient été recalibrés depuis, ce qui rend la vérification de ces résultats difficile.

3.7 Analyse angulaire

Les sections précédentes nous ont permis d'avoir une bonne idée du fonctionnement de nos modules. Il est maintenant possible de passer à l'analyse angulaire qui permettra de tester ce qui rend ces prototypes si différents, la production de stub bits.

Cette analyse se passera en deux parties. Nous essayerons de déterminer l'alignement du module rotatif par rapport au faisceau avant de pouvoir confronter cette mesure avec la production de stubs.

3.7.1 Alignement des modules

La première phase de l'analyse angulaire consiste à tenter de déterminer l'angle que le faisceau fait par rapport à notre montage. Cette mesure sera utile par la suite car elle sera utilisée pour simuler la distribution de stubs produits par rapport à l'angle donnée par la plaque tournante.

Pour déterminer cet angle, la différence de position entre les hits sur les deux senseurs du module rotatif a été utilisée. Comme le faisceau a une certaine divergence et que la résolution des senseurs n'est pas parfaite, la différence de position suit grossièrement une distribution gaussienne. Un ajustement de fonctions gaussiennes a donc été effectué pour chaque angle. Un exemple d'un tel ajustement est repris sur la partie gauche de la figure 3.29.

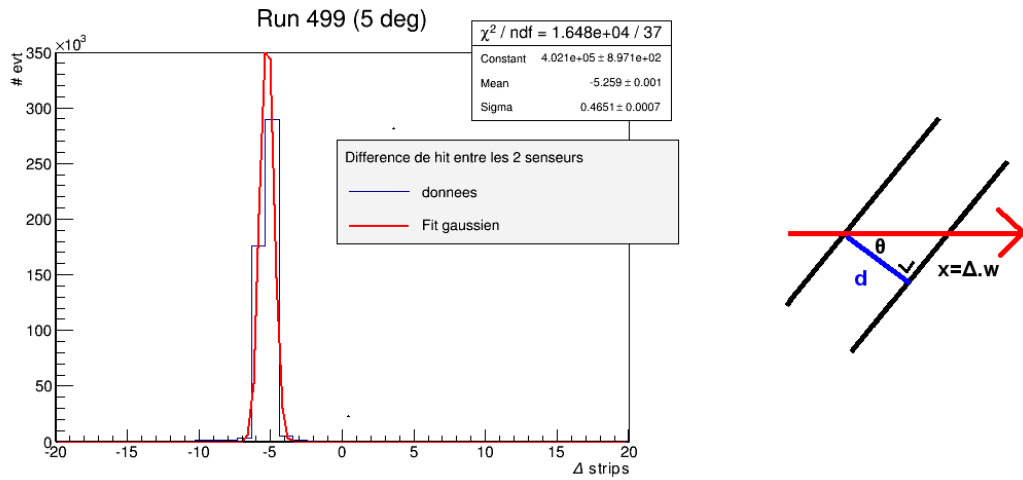


FIGURE 3.29 – Différence de position des hits entre le senseur 0 et le senseur 1 à gauche et schéma descriptif à droite.

Il est donc possible d'obtenir la moyenne de la différence de position entre les hits dans les deux senseurs. Comme le montre le schéma présenté à la figure 3.29,

$$\tan(\theta) = \frac{x}{d} \quad (3.14)$$

Si l'on admet un décalage Δ_0 entre les strips des deux senseurs, et que w est la largeur d'une strip, on aura donc que la différence de strips entre les hits sur les deux senseurs vaudra :

$$\Delta = \Delta_0 + \frac{d}{w} \tan(\theta) = \Delta_0 + \frac{d}{w} \tan(\theta_0 + \theta_{CNM}), \quad (3.15)$$

Où θ_{CNM} est l'angle fourni par le rotatif et θ_0 est l'inclinaison du montage par rapport au faisceau.

On peut donc reporter sur un graphe les moyennes de nos approximations gaussiennes en fonction de l'angle du DUT. Nous obtenons les résultats présentés sur la gauche de la

figure 3.30, où les erreurs sur les moyennes ont été manuellement ajustées pour avoir un $\chi^2/\text{ndf} = 1$

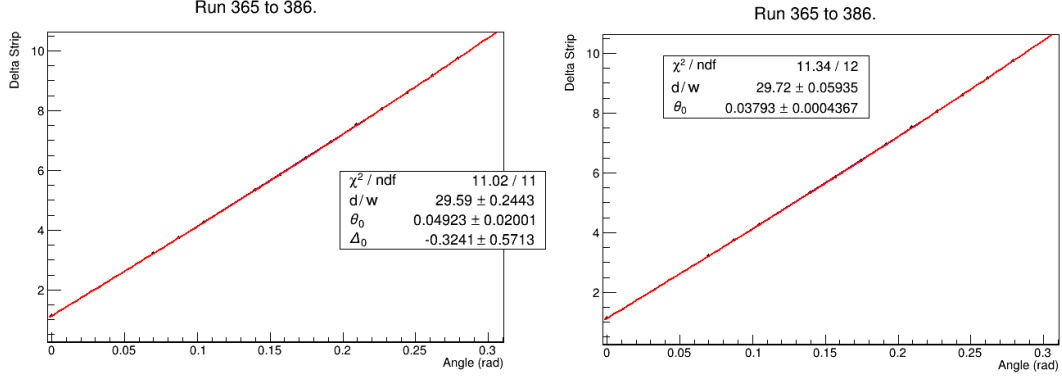


FIGURE 3.30 – Différence de position entre les hits sur les deux senseurs et ajustement avec Δ_0 libre (à gauche) et fixé à 0 (à droite).

Il ressort de ce fit que :

- d/w valant 29.6 ± 0.2 et les strips étant distantes de $100\mu\text{m}$, l'écart entre les senseurs est de 2.96 ± 0.02 mm.
- Δ_0 est compatible avec 0.
- Si on fixe $\Delta_0 = 0$, les incertitudes diminuent fortement et on obtient une distance de 2.972 ± 0.003 mm entre les modules et un offset de $\theta_0 = 0.0379(4)\text{rad} = 2.17^\circ \pm 0.03$.

3.7.2 Discrimination en p_T des modules

Toutes les analyses réalisées précédemment nous permettent enfin d'analyser ce qui rend ce prototype si différent des modules du tracker actuel, la production de stub-bits.

En utilisant les paramètres déterminés dans les sections précédentes, le taux de production de stubs en fonction de l'angle du module peut être prédit. Cette mesure permet de vérifier que les modules effectuent bien une discrimination en p_T et représente un des résultats centraux de ce test faisceau.

En prenant une position au sein d'une piste x et un angle θ aléatoire, on peut prédire l'endroit où une particule traversera le second senseur, et donc prédire si un stub sera produit.

Au total, six paramètres issus des données ont été utilisés pour faire ces simulations. La proportion de stubs à angle nul prend en compte l'efficacité et l'acceptance des senseurs et le taux de faux positifs du trigger. L'angle θ_0 et la divergence du faisceau permettent de donner un angle à chaque particule simulée. Ensuite, la distance entre les deux senseurs et la longueur d'une strip permettent de propager le positron sur l'autre senseur. Enfin, il faut prendre en compte un éventuel décalage entre les deux senseurs.

Il est ensuite possible de convertir la valeur de l'angle en fonction en terme de la quantité de mouvement transverse qu'aurait une particule dans le CMS. Si le module est

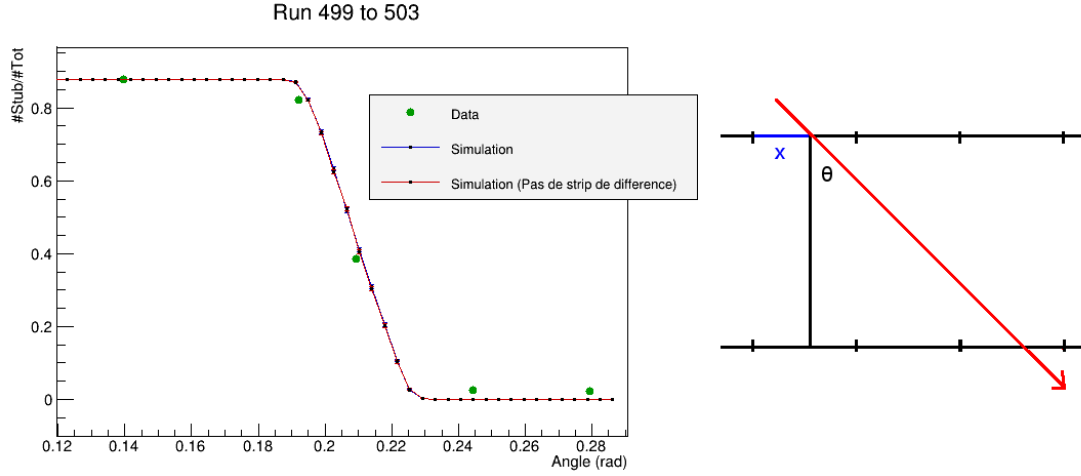


FIGURE 3.31 – À gauche, comparaison de la proportion de stubs produits avec des simulations Monte-Carlo simplifiées. À droite, principe du Monte-Carlo simplifié

placé à une distance D du centre du CMS et que la particule fait un angle θ par rapport au senseur comme représenté sur la partie gauche de la figure 3.32, en remarquant que l'angle θ est égal à l'angle α , on a la relation

$$\theta = \text{asin}\left(\frac{D}{2R}\right) \quad (3.16)$$

et en utilisant la relation $R[m] = \frac{p[GeV]}{0.3B[T]}$ (figure 1.6), avec un champ magnétique de 3.8T,

$$p_T[GeV] = \frac{0.57D[m]}{\sin(\theta)}. \quad (3.17)$$

La simulation présentée dans la figure 3.31 (en laissant Δ_0 libre) a été traduite en terme de quantité de mouvement transverse pour différentes distance dans le détecteur sur la figure 3.32 (droite) pour des rayons de 0.6 et 1.1 m correspondant aux extrémités du tonneau.

Ce dernier résultat indique que les prototypes de modules permettent comme prévu d'effectuer la discrimination en p_T nécessaire à l'upgrade du CMS.

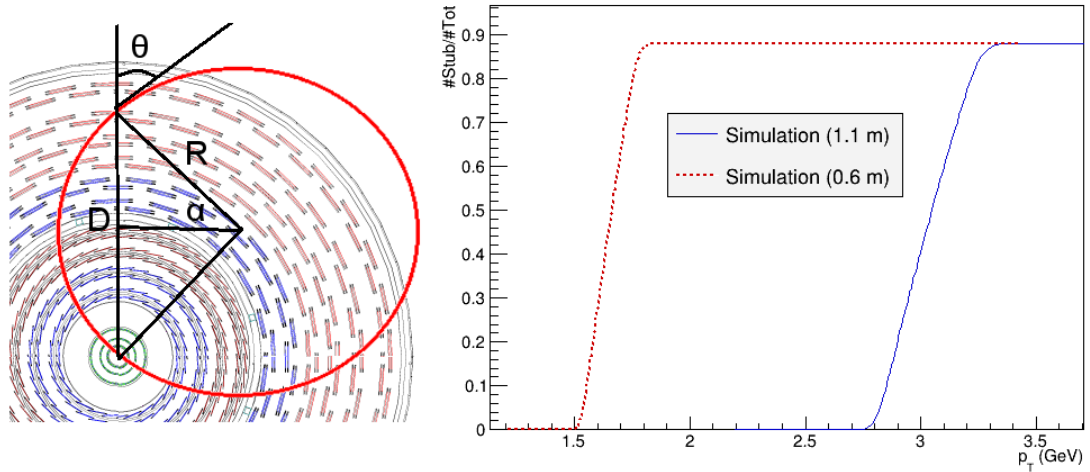


FIGURE 3.32 – Schéma faisant le lien entre θ et p_T à gauche et simulation de la production de stubs pour des rayons de 0.6 et 1.1m.

Chapitre 4

Montage à l’UCL

Afin de continuer à effectuer des mesures sur les différents prototypes de modules, la collaboration CMS a distribué ceux-ci à différentes universités européennes. Ainsi, l’UCL s’est vue accorder un mini-module en début mai. Un dispositif expérimental a été développé afin de pouvoir analyser ce prototype. Malheureusement, l’arrivée tardive de ce dernier a empêché l’obtention de résultats suffisamment tôt pour être présentés dans ce mémoire.

Ce chapitre discutera du montage effectué pour accueillir le module et du système de trigger associé. Cette description sera effectuée en deux parties, en parlant tantôt des aspects mécaniques, tantôt des aspects électriques. Finalement, les perspectives pour les mois qui viennent seront abordées dans la dernière section.

4.1 Description mécanique

Le module étant sensible à la lumière, il est nécessaire que le montage soit placé dans un environnement obscur. Un système déclencheur composé de plusieurs scintillateurs doit aussi être présent afin d’avertir le module du passage d’une particule lors de tests utilisant des muons cosmiques ou une source radioactive.

Un ancien projet [14] avait été réalisé par des étudiants il y a quelques années afin de détecter des muons cosmiques. Étant basé sur une boîte étanche à la lumière et n’étant plus utilisé, ce montage a été modifié afin de pouvoir accueillir un module.

Le module n’étant pas de la même taille que les scintillateurs, la structure a dû être complètement changée. Les plans du nouveau montage sont représentés sur la partie droite de la figure 4.1.

La structure est assurée par quatre profilés en aluminium verticaux (Rosen+Krieger) attachés deux à deux par un profilé horizontal. Ceux-ci sont ensuite fixés sur la partie interne du couvercle de la boîte à l’aide d’équerres soudées à celle-ci.

Cinq échancrures ont été réalisées dans chacun des profilés verticaux afin de pouvoir venir y fixer des équerres perpendiculaires faisant toute la largeur de la structure. Un détecteur peut ensuite être fixé sur chaque niveau d’équerre, l’étage central accueillant

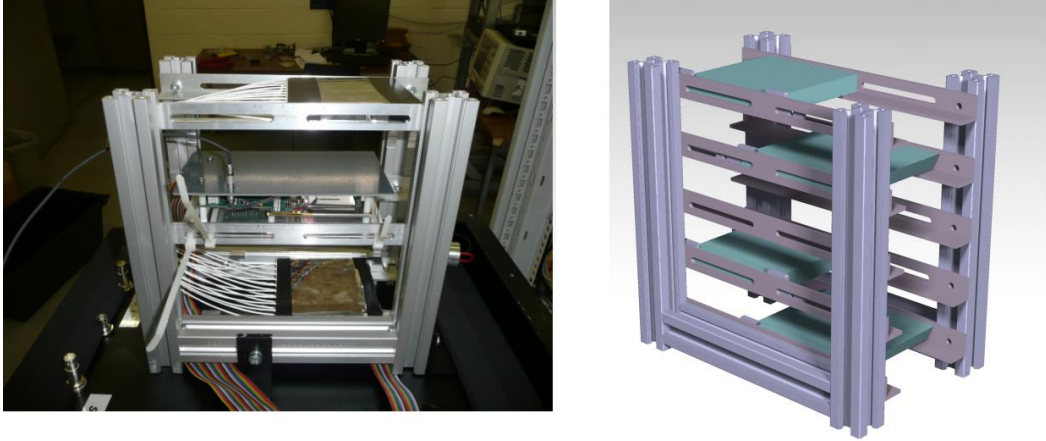


FIGURE 4.1 – Plans du montage à droite état du montage à gauche.

le module et les quatre autres les scintillateurs plastiques du système déclencheur. Les photomultiplicateurs branchés aux scintillateurs seront attachés sur les profils verticaux.

Pour protéger mécaniquement le module, celui-ci et une carte électronique effectuant l'interface électrique sont fixés à une plaque métallique à l'aide de tiges de plastique verticales. Une plaque de plastique horizontale sur laquelle le connecteur haute tension est fixé est attachée sur le haut des tiges (voir fig 4.1).

Des orifices supplémentaires ont dû être percés dans le couvercle de la boîte afin d'assurer l'alimentation du module en haute et basse tension ainsi que pour le transfert des données.

Une fois tous les détecteurs fixés à la structure, la boîte peut être fermée. L'ensemble du montage est donc bien protégé dans une boîte métallique de $\sim(40\text{ cm})^3$ dont seuls les connecteurs dépassent. Une photo de la boîte fermée et connectée à côté du système de trigger est présente sur la figure 4.2

4.2 Description électrique

Comme on le montre le schéma simplifié de la figure 4.3, le montage électrique peut-être séparé en deux parties communicant entre-elles, le système d'acquisition et d'alimentation du module d'une part, le système de trigger d'autre part.

4.2.1 Alimentation du module et acquisition des données

L'alimentation électrique du module a deux origines différentes, une pour le capteur et l'autre pour l'électronique.

Le capteur devant être inversement polarisé, il a été connecté via un câble haute tension à un générateur pouvant être piloté à distance.

L'électronique de lecture nécessite quatre sources basse tension différentes de 1.2, 3.3

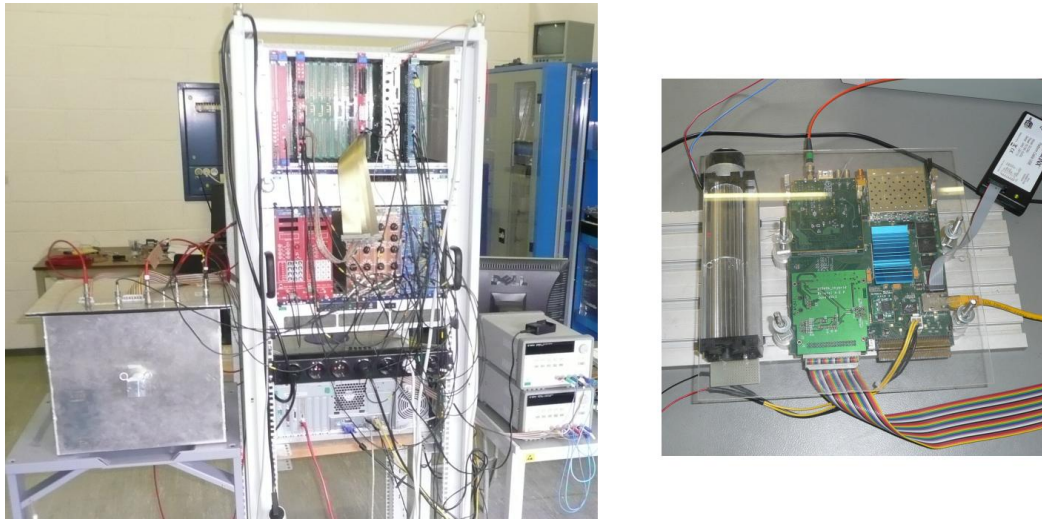


FIGURE 4.2 – Photographie du laboratoire avec la boîte contenant le module et les scintillateurs à gauche et logique du trigger à droite. Photographie de la carte GLIB avec deux mezzanines, une pour lire les données du module et l'autre pour le signal de trigger.

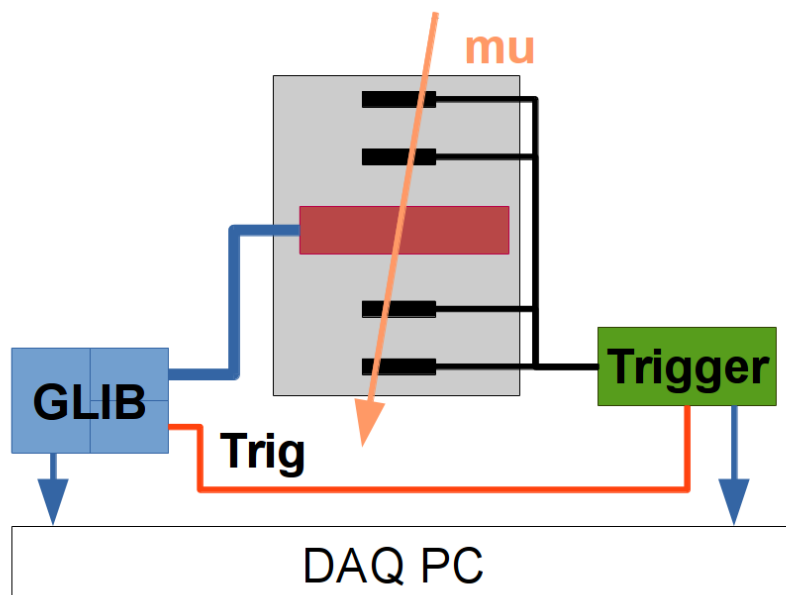


FIGURE 4.3 – Schéma électrique simplifié.

et ± 5 Volts. Plusieurs générateurs réunissent ces différentes différences de potentiel sur une nappe de câbles qui est ensuite envoyée dans la boîte hermétique à la lumière avant d'arriver sur la plaque faisant l'interface avec le module. Ceux-ci sont visibles dans le

coin inférieur droit de la figure 4.2.

La dernière connexion avec le module permet la communication via une nappe de câbles. Contrairement au montage utilisé à Hambourg, une seule carte GLIB est présente et un firmware différent a donc été installé.

La carte d'électronique est connectée à l'ordinateur d'acquisition qui, grâce à une machine virtuelle développée par l'université de Strasbourg, collectera et enregistrera les données venant du module.

À l'heure actuelle, des premières communications ont pu être établies avec le module. Du travail supplémentaire sera néanmoins indispensable afin de pouvoir modifier et calibrer les paramètres des CBC et de pouvoir prendre des données.

4.2.2 Système déclencheur

Le signal de trigger envoyé à la GLIB est construit comme la coïncidence des signaux venant de quatre photomultiplicateurs (PM) connectés à un scintillateur chacun.

Description de l'électronique

La figure 4.4 décrit le fonctionnement du système déclencheur de manière simplifiée.

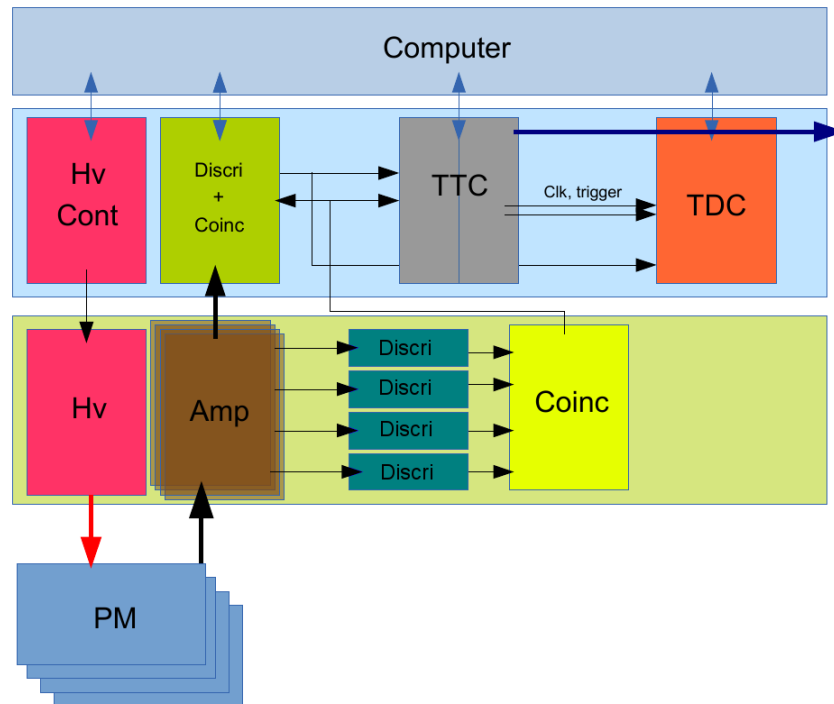


FIGURE 4.4 – Schéma électrique simplifié du trigger.

Il est composé de deux châssis contenant des cartes d'électronique de standard NIM ou VME. Une carte faisant la connexion VME-USB permet à l'ordinateur d'acquisition de données de contrôler toutes les cartes VME et, via une carte d'interface spécifique, les sources haute-tension.

Les signaux sortant des PM étant trop faibles pour être directement utilisés, ceux-ci passent d'abord par un amplificateur chacun. La sortie des amplis suivent deux chemins parallèles fournissant deux méthodes redondantes d'obtenir un signal de trigger.

D'un côté, ces signaux sont envoyés à des discriminateurs NIM. Ceux-ci génèrent un pulse d'une durée modulable lorsque le signal venant des amplificateurs dépasse le seuil fixé à 500mV. Ces signaux sont ensuite envoyés dans une unité de coïncidence. Celle-ci revoie un pulse d'une cinquantaine de nanosecondes si un pulse est présent sur les quatre entrées. Enfin, ce signal est nourri à l'unité de contrôle du temps et des trigger (*Time and Trigger Control, TTC*).

De l'autre côté, les signaux venant des amplificateurs sont envoyés à une carte VME effectuant simultanément la discrimination et la coïncidence. Le signal sortant est ensuite envoyé au TTC. Cette carte présente l'avantage d'être complètement pilotable à distance, ce qui peut être utile si le montage est réutilisé dans un environnement inaccessible. De plus, contrairement au système NIM dont les paramètres sont ajustés à l'aide de vis sur la face avant des cartes, cette carte est facilement configurable par ordinateur.

Le TTC est en quelque sorte le chef d'orchestre du système. En plus de générer un signal d'horloge pouvant être utilisé pour synchroniser les différentes cartes, c'est cette unité qui va sélectionner l'origine du trigger (soit le signal venant des cartes NIM, soit celui renvoyé par le discrin VME) et générer deux signaux, un signal de trigger et un signal de commande (non utilisé dans notre cas).

Ensuite, ces deux signaux sont envoyés dans une seconde carte TTC qui va multiplexer le trigger, le signal de commande et l'horloge avant de le convertir en signal optique transmis à la GLIB.

Comme nous l'avons vu lors de l'analyse des données du test faisceau, une information précise sur le temps lors duquel une particule a traversé le module est importante lorsque le trigger et l'horloge ne sont pas en phase.

Pour déterminer cette information temporelle, une carte convertissant le temps en valeur digitale (*Time to Digital Converter, TDC*) a été utilisée. Cette carte a deux entrées différentes, un signal déclencheur et 256 canaux dont les signaux sont analysés.

À chaque fois qu'un signal déclencheur est reçu par la carte, toute activité sur les 256 canaux sera analysée pendant une fenêtre en temps ajustable. Si un signal est présent sur une piste, l'unité enregistrera le temps en unités arbitraires. La position exacte de la fenêtre étant imprécise, seules des mesures relatives sont possibles. Toutes les données correspondant à un signal de trigger seront enregistrées dans une mémoire interne avant d'être lue par l'ordinateur d'acquisition.

Dans notre cas, le signal de trigger était fourni par le TTC et les canaux d'entrées connectées étaient les quatre canaux du discriminateur VME, le signal de coïncidence VME, le signal de coïncidence NIM (après passage par le discriminateur VME pour des raisons de connexions) et le signal d'horloge du TTC.

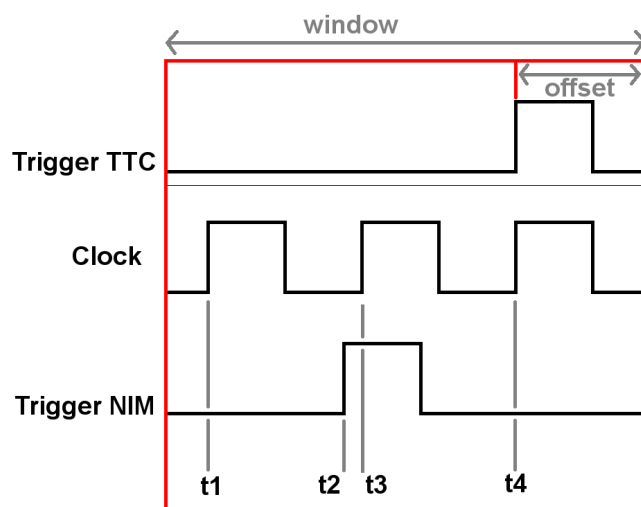


FIGURE 4.5 – Principe de fonctionnement du TDC. Valeurs enregistrée pour cet événement : t_1, t_2, t_3 et t_4 et la phase correspondante est $t_2 - t_1$.

En plus des cartes représentées sur le schéma, une unité de comptage était aussi présente afin d'enregistrer le nombre de coups sortant des discriminateurs NIM et le nombre de signaux de trigger venant des deux systèmes.

Le contrôle des cartes VME est effectué grâce à la connexion VME-USB qui permet à l'ordinateur d'acquisition de changer des valeurs dans les registres internes des cartes. Afin de simplifier le contrôle, une librairie a été développée pour permettre d'effectuer des scripts de haut niveau en C++ sans connaître le fonctionnement interne des cartes.

Cette librairie fait grossièrement 2000 lignes de code et a été prévue afin de pouvoir être facilement adaptée en cas de changement de matériel (migration vers un châssis μ TCA par exemple).

Calibration du système

Avant de pouvoir utiliser le système de trigger, un certain nombre de paramètres doivent être ajustés. Le premier paramètre à déterminer est la valeur de la haute tension optimale pour alimenter les photomultiplicateurs.

Pour déterminer celui-ci, la valeur de la haute tension fournie à un PM a été variée en maintenant les autres constantes. Pour chaque valeur de haute tension, le nombre de signaux dépassant 500mV ainsi que le nombre de coïncidences venant du système NIM a été enregistré. La tension idéale peut être déterminée en se basant sur des graphes semblables à ceux présentés sur la figure 4.6. La tension choisie doit être suffisamment élevée pour que les coïncidences arrivent à un plateau sans pour autant être trop grande pour éviter le bruit. Dans ce cas-ci, cette tension doit être aux alentours de 1100V.

Ces graphes permettent également d'avoir une estimation de la probabilité de bruit dans notre trigger. Avec une tension de 1100V, le nombre de coups par seconde dans

TABLE 4.1 – Liste du matériel électronique utilisé pour le trigger

Chassis	Type	Fabriquant	Référence	Nombre
	Photomultiplicateur	Hamamatsu	H3164-10	4
NIM	Amplificateur	Ortec	474	4
NIM	Discriminateur	LeCroy	821CS	2
NIM	Coïncidence	LeCroy	465	1
NIM	Alimentation	CAEN	N470	2
VME	VME-USB Bridge	CAEN	V1718	1
VME	H.S. Caenet Controller	CAEN	V288	1
VME	Discr-coïncidence	CAEN	V812	1
VME	TDC	CAEN	V1190A	1
VME	TTC	CERN	TTCvi	1
VME	TTC	CERN	TTCvx	1
VME	Scaler	LeCroy	1151N	1

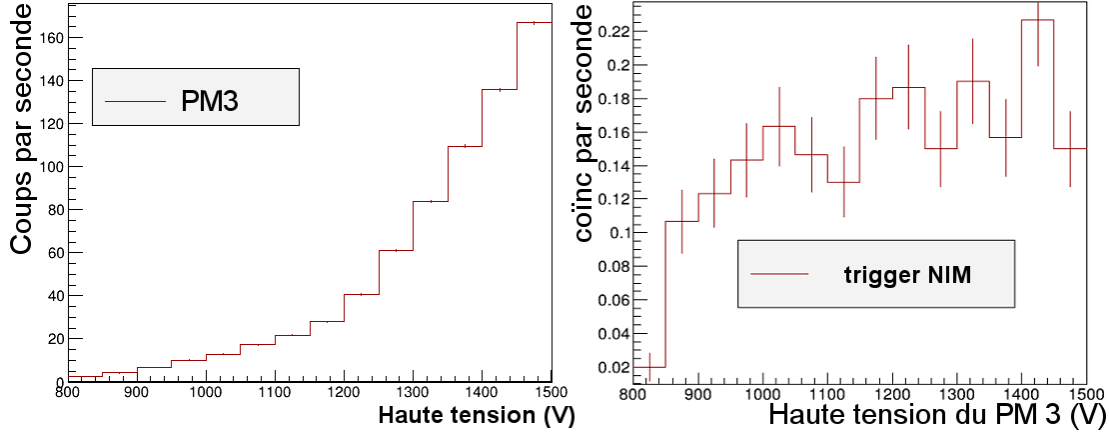


FIGURE 4.6 – Exemples de courbes utilisées pour déterminer la valeur de la haute tension pour alimenter les photomultiplicateurs.

les quatre PM est inférieure à $\nu = 50 \text{ s}^{-1}$. Comme la probabilité d'avoir une coïncidence sur deux pistes est donnée par $\nu_{\text{coinc}} = (T_1 + T_2)\nu_1\nu_2$ et que le temps des pulses vaut $T = 50\text{ns}$, la probabilité d'avoir une coïncidence vaut :

$$\nu_2 = (T + T) \cdot \nu\nu \quad (4.1)$$

$$\nu_4 = (T + T) \cdot \nu_2\nu_2 \quad (4.2)$$

$$= 2T \cdot (2T\nu^2)^2 \quad (4.3)$$

$$= 8T^3\nu^4 \quad (4.4)$$

$$= 8(50\text{ns})^3(50\text{s}^{-1})^4 \quad (4.5)$$

$$\nu_4 = 6.2 \cdot 10^{-15} \text{s}^{-1} \quad (4.6)$$

Le taux de coïncidences causées par des déclenchements aléatoires est inférieur à $r_c \leq 10^{-14} s^{-1}$. Comme le taux de coïncidences est de l'ordre de 0.15 par seconde, les déclenchements aléatoires peuvent être négligés.

Ensuite, pour déterminer les seuils de discrimination à utiliser, la fréquence des coïncidences en fonction du seuil dans le module VME a été enregistrée (figure 4.7). Si le seuil VME est inférieur à deux millivolts, le bruit électrique commence à exploser et le nombre de coïncidences ne correspond plus à des muons traversant le montage. À des seuils supérieurs, le taux de déclenchements devient constant et c'est donc dans ces gammes de valeurs que l'on doit fixer le seuil.

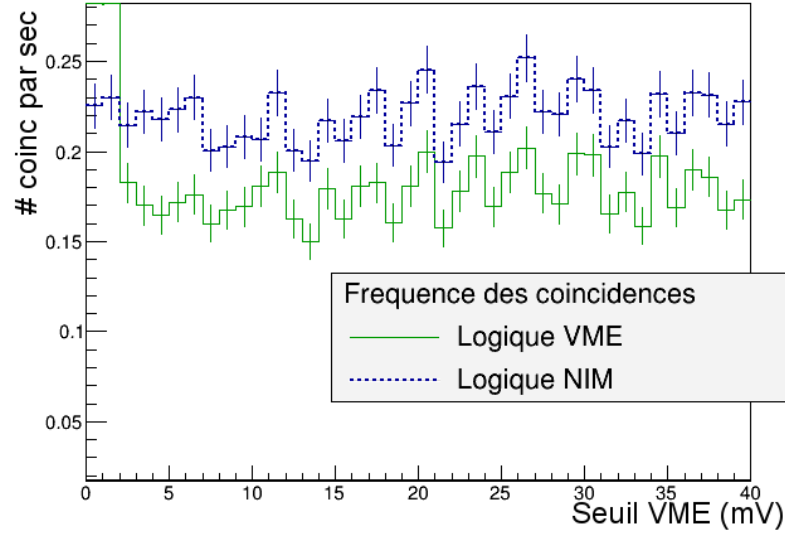


FIGURE 4.7 – Fréquence des coïncidences dans les logiques NIM et VME en fonction du seuil du discriminateur VME.

Le taux de déclenchement fourni par la logique NIM est supérieure à celui de la logique VME pour des seuils supérieurs à 2mV. Ceci est causé par un temps mort dans la carte VME qui n'a pas été implémenté dans la logique NIM qui peut se déclencher plusieurs fois après le passage d'un même muon.

Le dernier élément du système à calibrer est le TDC. Pour traduire les temps en unité arbitraires en temps physique, le signal d'horloge généré par le TTC a été utilisé. À chaque déclenchement du TDC, plusieurs signaux d'horloge sont analysés par la carte et la différence en temps entre ces signaux est enregistrée.

La figure 4.8 reprend la distribution de la valeur TDC renvoyée entre trois signaux d'horloge. De l'ajustement gaussien effectué, la conversion entre valeur TDC et temps ainsi que la résolution peuvent être obtenus.

$$75\text{ns} = 768.5\text{bin} \rightarrow 1\text{bin} = 97.6\text{ps} \quad (4.7)$$

$$\sigma_{\text{TDC}} = 0.4516 \pm 0.0003\text{bin} = 44.08 \pm 0.03\text{ps}, \quad (4.8)$$

Ces résultats sont en accord complet avec les datasheet indiquant un facteur de conversion de 98ps et une incertitude inférieure à 80ps.

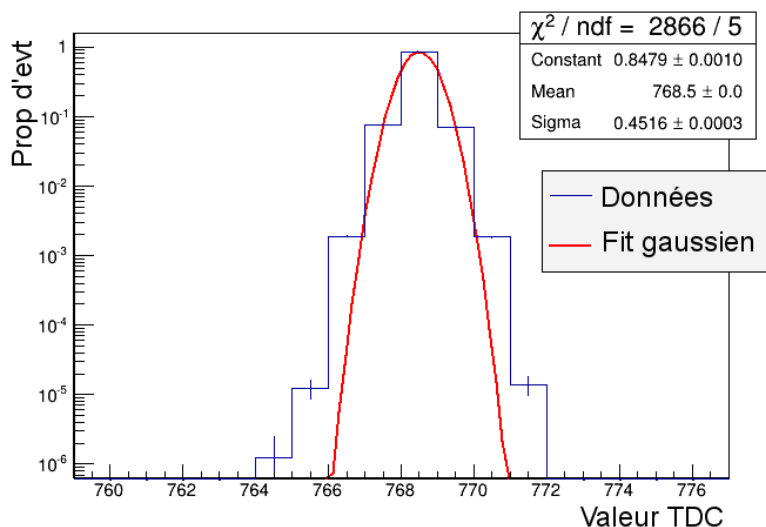


FIGURE 4.8 – Distribution des valeurs renvoyées par le TDC entre 3 signaux d’horloges et fit gaussien.

Grâce à cette calibration, il est possible de vérifier l’indépendance des signaux de coïncidence par rapport à l’horloge. La distribution de la phase de ces coïncidences est représentée sur la figure 4.9.

4.3 État du montage et perspectives

Lors de la rédaction de ce document, le montage n’a pas encore été finalisé. La structure de base a été mise en place, un module y a été fixé et son alimentation basse tension a été assurée.

Les logiciels de lecture ont été installés sur une machine virtuelle dans l’ordinateur d’acquisition et des premières communications ont été effectuées avec le module sans pour autant réussir à modifier les paramètres internes des CBC.

Une fois que toutes les communications nécessaires avec le module auront été réalisées, il faudra encore s’assurer de l’alimentation haute tension du senseur. Après avoir monté les différents scintillateurs et photomultiplicateurs à la nouvelle structure, le montage sera enfin finalisé et prêt à prendre des données. Les différentes prises de données prévues sont les suivantes :

- Une étude du bruit en fonction de VCTH. En faisant varier le paramètre VCTH lors des prises de données avec déclenchement aléatoire il serait possible de déterminer la valeur du courant de fuite dans le senseur.
- Une étude plus précise de l’efficacité en fonction de la phase.

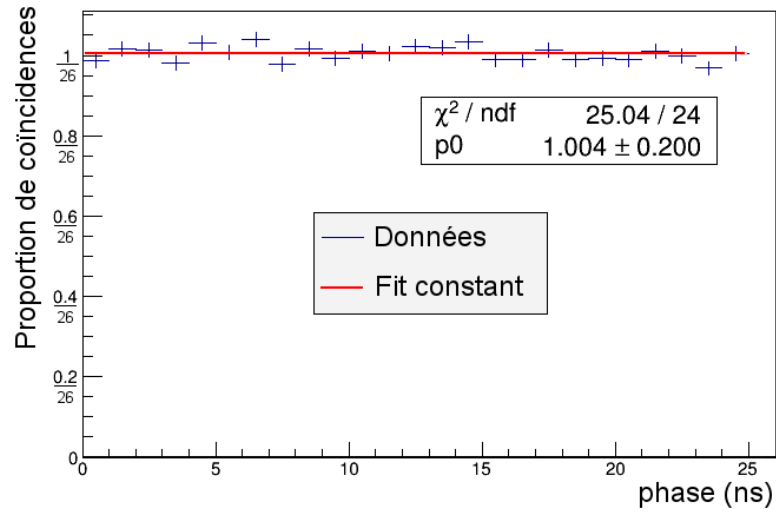


FIGURE 4.9 – Distribution de la phase des coïncidences par rapport au signal d’horloge et fit selon $f(x) = p_0/26$.

- Préciser le scan VCTH en effectuant des mesures sur un nombre plus important de seuils.

De plus, une partie de ce montage pourra être utilisée en septembre par une équipe du CMS lors d’un test d’irradiation d’une puce CBC à l’aide d’un faisceau de protons généré au cyclotron de Louvain-La-Neuve.

Chapitre 5

Conclusion

L'arrivée du LHC haute luminosité amènera une série de défis qui doivent être adressés par les différentes expériences utilisant son faisceau.

Pour permettre au détecteur CMS de conserver ses capacités dans ce nouvel environnement, le trajectographe a été complètement repensé et des nouveaux prototypes de détecteurs ont été développés. La différence la plus importante entre ces modules et ceux du détecteur actuel est la présence de couples de senseurs afin de pouvoir sélectionner les événements à haut p_T à chaque croisement de faisceau et d'utiliser cette information dans le trigger de niveau 1.

Le test faisceau ayant eu lieu à Hambourg en novembre dernier a eu une importance particulière pour ces prototypes. En effet, en plus d'avoir été la première prise de données en faisceau à l'aide des nouvelles puces d'électronique CBC2 et des senseurs CNM, il s'agissait également du premier test faisceau d'un prototype ayant une paire de senseurs.

L'analyse des données ayant eu lieu au second quadrimestre a permis d'effectuer une calibration et une mise en service complète d'un module, en allant de la mesure du bruit à la détermination de l'efficacité en passant par l'optimisation des paramètres de lecture.

Le résultat le plus important qui a été mis en évidence lors du test faisceau est la confirmation du principe de stub-bits. La prise de donnée à l'aide du module rotatif a démontré que les modules permettent bien d'effectuer la discrimination en p_T indispensable pour utiliser les données du trajectographe dans le trigger de niveau 1 et ainsi adresser le problème de pile-up dans le détecteur.

Maintenant que le concept de base a été démontré, de nombreuses tâches doivent encore être accomplies. Plusieurs mesures restent encore à être effectuées sur les modules déjà produits et des montages doivent être réalisés dans différentes universités afin de les analyser.

Le montage en cours de développement à l'Université catholique de Louvain devra être finalisé pour prendre des mesures précises sur le bruit intrinsèque des senseurs ou sur la dépendance temporelle de l'efficacité.

À plus long terme, de nouvelles campagnes de tests devront être réalisées sur de nouveaux prototypes se rapprochant progressivement des modules finaux contenant seize CBC, un concentrateur et un lien optique.

Beaucoup de recherche et de développement reste nécessaire mais celle-ci permettrait, à terme, de mettre en place un détecteur performant supportant les conditions difficiles du HL-LHC et d'effectuer des mesures cruciales pour tester le modèle standard et éventuellement mettre en évidence une nouvelle physique.

Bibliographie

- [1] D Contardo and J Spalding. CMS Phase 2 Upgrade : Preliminary Plan and Cost Estimate. Technical Report CERN-RRB-2013-124, CERN, Geneva, Oct 2013.
- [2] Projected Performance of an Upgraded CMS Detector at the LHC and HL-LHC : Contribution to the Snowmass Process. Technical Report CMS-NOTE-2013-002. CERN-CMS-NOTE-2013-002, CERN, Geneva, Jun 2013. Comments : to be included in the Snowmass 2013 report.
- [3] Lucas Taylor. CMS detector design. <http://cms.web.cern.ch/news/cms-detector-design/>, 2011.
- [4] Frédérick Bordry. The High Luminosity LHC. <http://indico.cern.ch/event/252045/session/1/contribution/1>, 2013.
- [5] Phase II Technical proposal - Tracker chapter. Technical report, CERN, Geneva, Jun 2014. Version préliminaire interne.
- [6] 2012 ECAL detector performance plots. Mar 2013.
- [7] Cittolin, Sergio and Rácz, Attila and Sphicas, Paris. CMS The TriDAS Project : Technical Design Report, Volume 2 : Data Acquisition and High-Level Trigger. CMS trigger and data-acquisition project. Technical report, Geneva, 2002.
- [8] J. Goldstein, M. Grimes, A. Kokabi, K. Uchida, F. Ball. FE Hybrid and module Test systems, status at CERN and IC and roadmap towards 8xCBC2. <https://indico.cern.ch/event/312869/session/1/contribution/5>, 2013.
- [9] Davide Braga. CBC2 (CMS Binary Chip 2) User Guide 1.1. Technical report, CERN, Geneva, Mar 2013.
- [10] Alexander DIERLAMM. Discussion on Beam Test programme and goals. <https://indico.cern.ch/event/280231/contribution/2>, Mar 2013.
- [11] DESY test beam website. <http://testbeam.desy.de/e130573>, 2010.
- [12] Ali Harb. Status of telescope timestamp. <https://indico.cern.ch/event/308921/contribution/3>, Mar 2014.
- [13] Ali Harb. Test Beam Analysis Status - Telescope & DUT correlation. <https://indico.cern.ch/event/321861/contribution/2>, May 2014.
- [14] Le Maire, V. and Jago, A. and Mertens, A. and de Crombrugghe, G. and Reydamas, M. and van Vynckt, D. and Denies, J. and de Lobkowicz, Y. . The JADE project : an angular cosmic ray detector. Technical report, 2010.

Annexes

Calcul d'efficacité

Dans la section 3.6.1, une mesure de l'efficacité a été effectuée. La définition utilisée pour celle-ci était la probabilité qu'un hit se trouve dans une fenêtre de plus ou moins 3 strips autour de la position attendue pour des événements propres (voir figure 3.2). Il a ensuite été argumenté que ce nombre α pouvait approximer l'efficacité.

Pour s'en convaincre de manière plus rigoureuse, revenons à la définition de α :

$$\alpha = \frac{\# \text{ Evt ac hit}}{\# \text{ Evt}} \quad (5.1)$$

$$= \frac{\#(\text{hits} \mid \text{Particule}) + \#(\text{hits} \mid \text{Pas Particule})}{\# \text{ Evt}} \quad (5.2)$$

$$= \mathcal{P}_1 \cdot \mathcal{P}(\text{Particule}) + \mathcal{P}_2 \cdot \mathcal{P}(\text{Pas particule}), \quad (5.3)$$

où $\mathcal{P}(\text{Particule})$ est la probabilité qu'un événement soit sélectionné alors qu'il s'agit bien d'un positron et $\mathcal{P}(\text{Pas particule})$ réciproquement. Ces deux probabilités correspondent respectivement à la proportion de signal de notre trigger et à celle de bruit et nous appellerons donc ces valeurs $\mathcal{S}_t$ et $\mathcal{N}_t$.

D'un autre côté, la probabilité $\mathcal{P}_1$ d'avoir un hit alors qu'une particule a traversé la fenêtre est précisément l'efficacité du senseur et nous la noterons ϵ . Enfin, $\mathcal{P}_2$ correspond au bruit dans la fenêtre et sera noté $\mathcal{N}_0$.

Puisque $\mathcal{S}_t + \mathcal{N}_t = 1$, on peut réécrire α comme :

$$\alpha = \frac{\epsilon \mathcal{S}_t + \mathcal{N}_0 \mathcal{N}_t}{\mathcal{S}_t + \mathcal{N}_t} = \frac{\epsilon + \mathcal{N}_0 \cdot \frac{\mathcal{N}_t}{\mathcal{S}_t}}{1 + \frac{\mathcal{N}_t}{\mathcal{S}_t}} \quad (5.4)$$

En posant $t \equiv \frac{\mathcal{N}_t}{\mathcal{S}_t}$, on a donc

$$\alpha = \frac{\epsilon + \mathcal{N}_0 t}{1 + t} \quad (5.5)$$

Et enfin, l'efficacité vaudra

$$\epsilon = \alpha \cdot (1 + t) - \mathcal{N}_0 t = \alpha + (\alpha - \mathcal{N}_0) t \quad (5.6)$$

Pour simplifier cette équation, on peut essayer d'évaluer le paramètre t . Pour cela, il faut tout d'abord déterminer quelle est la probabilité qu'un événement soit sélectionné alors qu'il ne corresponde pas à une particule du faisceau ($\mathcal{N}$).

Si on suppose que ces événements sont provoqués par du bruit électrique, $\mathcal{N}$ vaudra le produit de la probabilité d'avoir un hit de bruit pour chaque senseur qui est inférieure à la probabilité d'avoir au moins un hit par senseur :

$$\mathcal{N} \leq \prod_{i=1,2,3} (1 - (1 - p_i)^{N_i}) \quad (5.7)$$

Où N_i est le nombre de strips du senseur, p_i la probabilité d'avoir du bruit sur une piste du senseur et donc $(1 - p_i)^{N_i}$ est la probabilité de ne pas avoir de bruit sur ce senseur.

Comme $p_i \leq 1.2 \cdot 10^{-6}$ et $N_i \leq 255$, on a donc :

$$\mathcal{N} \leq (1 - (1 - 1.2 \cdot 10^{-6})^{255})^3 \leq 3 \cdot 10^{-11} \quad (5.8)$$

Ce nombre est tellement faible que même avec un trigger très peu efficace, la proportion d'événements sélectionnés correspondant à ce bruit sera très faible et t sera lui aussi très faible. Comme α est de l'ordre de 1, le terme proportionnel à t dans l'éq 5.6 devient totalement négligeable. En pratique, le bruit dans le senseur est tellement petit que l'incertitude sur l'efficacité sera dominée par les fluctuations statistiques.

Le faible bruit dans le senseur nous permet donc bien de justifier l'approximation $\alpha \sim \epsilon$ effectuée dans la section 3.6.1.

Liste complète des runs

Date	Type	Run	θ	VCTH _{inf}	VCTH _{CNM}	Data	Stub	CWD	Energy (GeV)
27/11 02 :11 :35	Threshold	219	0	0x96	0x78	0x10		b11	2.2
27/11 02 :30 :59	Threshold	220	0	0x9B	0x73	0x10		b11	2.2
27/11 02 :44 :15	Threshold	221	0	0xA0	0x6E	0x10		b11	2.2
27/11 02 :58 :27	Threshold	222	0	0xA5	0x69	0x10		b11	2.2
27/11 03 :11 :05	Threshold	223	0	0xAA	0x64	0x10		b11	2.2
27/11 03 :25 :14	Threshold	224	0	0xAF	0x5F	0x10		b11	2.2
27/11 03 :40 :28	Threshold	225	0	0xB4	0x5A	0x10		b11	2.2
27/11 03 :57 :15	Threshold	226	0	0xB9	0x55	0x10		b11	2.2
27/11 04 :15 :38	Threshold	227	0	0xBE	0x50	0x10		b11	2.2
27/11 04 :27 :42	Threshold	228	0	0xC3	0x4B	0x10		b11	2.2
27/11 04 :39 :30	Threshold	229	0	0xC8	0x46	0x10		b11	2.2
27/11 04 :49 :32	Threshold	230	0	0xCD	0x41	0x10		b11	2.2
27/11 05 :00 :43	Threshold	231	0	0xD2	0x3C	0x10		b11	2.2
27/11 05 :10 :58	Threshold	232	0	0xD7	0x37	0x10		b11	2.2
27/11 05 :21 :25	Threshold	233	0	0xDC	0x32	0x10		b11	2.2
27/11 05 :31 :10	Threshold	234	0	0xE1	0x2D	0x10		b11	2.2
27/11 05 :42 :40	Threshold	235	0	0xE6	0x28	0x10		b11	2.2
27/11 05 :52 :57	Threshold	236	0	0xEB	0x23	0x10		b11	2.2
27/11 06 :02 :48	Threshold	237	0	0xF0	0x1E	0x10		b11	2.2
27/11 06 :13 :00	Threshold	238	0	0xF5	0x19	0x10		b11	2.2
28/11 03 :52 :36	Stub Latency	296-302	0					b11	2.2
28/11 19 :33 :24	Latency	331	0			0x0E		b11	4
28/11 20 :29 :18	Latency	339	0			0x0F		b11	4
28/11 20 :58 :32	Latency	340	0			0x10		b11	4
28/11 22 :55 :40	Latency	341	0			0x11		b11	4
28/11 23 :38 :50	Latency	342	0			0x12		b11	4
29/11 00 :23 :45	Latency	339 - 342	0			0x11		b11	4
29/11 01 :24 :00	Stub Latency	350	0			0x11	0x07	b11	4
29/11 01 :28 :05	Stub Latency	351	0			0x11	0x08	b11	4
29/11 01 :35 :25	Stub Latency	352	0			0x11	0x09	b11	4
29/11 01 :45 :14	Stub Latency	353	0			0x11	0x0A	b11	4
29/11 01 :55 :33	Stub Latency	354	0			0x11	0x0B	b11	4
29/11 02 :03 :12	Stub Latency	355	0			0x11	0x0C	b11	4
29/11 02 :04 :17	Stub Latency	356	0			0x11	0x0D	b11	4
29/11 02 :21 :42	Stub Latency	357	0			0x11	0x0E	b11	4

Date	Type	Run	θ	VCTH _{inf}	VCTH _{CNM}	Data	Stub	CWD	Energy (GeV)
29/11 05 :18 :58	Angular	365	0			0x11	0x0B	b11	4
29/11 06 :19 :44	Angular	368	5			0x11	0x0B	b11	4
29/11 06 :58 :35	Angular	369	10			0x11	0x0B	b11	4
29/11 07 :32 :19	Angular	370	15			0x11	0x0B	b11	4
29/11 07 :37 :10	Angular	371	13			0x11	0x0B	b11	4
29/11 08 :21 :28	Angular	372	14			0x11	0x0B	b11	4
29/11 09 :11 :15	Angular	373	16			0x11	0x0B	b11	4
29/11 09 :59 :13	Angular rev.	375	15			0x11	0x0B	b11	4
29/11 10 :26 :11	Angular rev.	376	14			0x11	0x0B	b11	4
29/11 11 :04 :14	Angular rev.	378	13			0x11	0x0B	b11	4
29/11 11 :45 :48	Angular rev.	379	12			0x11	0x0B	b11	4
29/11 12 :42 :02	Angular rev.	381	11			0x11	0x0B	b11	4
29/11 13 :20 :55	Angular rev.	382	10			0x11	0x0B	b11	4
29/11 13 :57 :44	Angular rev.	383	9			0x11	0x0B	b11	4
29/11 14 :35 :35	Angular rev.	384	8			0x11	0x0B	b11	4
29/11 15 :11 :24	Angular rev.	385	6			0x11	0x0B	b11	4
29/11 15 :51 :38	Angular rev.	386	4			0x11	0x0B	b11	4
30/11 03 :42 :02	Threshold	413	0	0x96	0x78			b11	2
30/11 03 :54 :12	Threshold	414	0	0x9B	0x73			b11	2
30/11 04 :05 :27	Threshold	416	0	0xA0	0x6E			b11	2
30/11 04 :23 :29	Threshold	417	0	0xA5	0x69			b11	2
30/11 04 :41 :18	Threshold	419	0	0xAA	0x64			b11	2
30/11 05 :32 :19	Threshold	420	0	0xAF	0x5F			b11	2
30/11 05 :54 :17	Threshold	421	0	0xB4	0x5A			b11	2
30/11 06 :11 :29	Threshold	422	0	0xB9	0x55			b11	2
30/11 06 :35 :41	Threshold	423	0	0xBE	0x50			b11	2
30/11 07 :00 :01	Threshold	424	0	0xC3	0x4B			b11	2
30/11 07 :18 :53	Threshold	425	0	0x94	0x7A			b11	2
30/11 07 :37 :00	Threshold	426	0	0x92	0x7C			b11	2
30/11 08 :00 :22	Threshold	427	0	0x90	0x7E			b11	2
30/11 08 :29 :28	Threshold	428	0					b11	2
30/11 08 :56 :13	Threshold	429	0	0x8E	0x80			b11	2
30/11 09 :23 :41	Threshold	430	0	0x8C	0x82			b11	2
30/11 09 :47 :02	Threshold	431	0	0x8A	0x84			b11	2
30/11 10 :19 :43	Threshold	432	0	0x88	0x86			b11	2
30/11 10 :44 :07	Threshold	433	0	0x86	0x88			b11	2
30/11 11 :09 :04	Threshold	434	0	0x84	0x8A			b11	2
30/11 11 :56 :17	Threshold	435	0	0x82	0x8C			b11	2
30/11 12 :02 :39	Threshold	436	0	0x80	0x8E			b11	2
30/11 12 :27 :03	Threshold	438	5	0x96	0x78			b11	2

Date	Type	Run	θ	VCTH _{inf}	VCTH _{CNM}	Data	Stub	CWD	Energy (GeV)
30/11 13 :14 :38	Threshold	439	5	0x96	0x73			b11	2
30/11 13 :39 :55	Threshold	441	5	0x96	0x78			b11	2
30/11 14 :18 :06	Threshold	442	5	0x96	0x69			b11	2
30/11 14 :31 :44	Threshold	443	5	0x96	0x64			b11	2
30/11 14 :34 :46	Threshold	440	5	0x96	0x6e			b11	2
30/11 14 :45 :49	Threshold	444	5	0x96	0x5f			b11	2
30/11 15 :03 :52	Threshold	445	5	0x96	0x5a			b11	2
30/11 15 :21 :49	Threshold	446	5	0x96	0x55			b11	2
30/11 15 :38 :31	Threshold	447	5	0x96	0x50			b11	2
30/11 15 :55 :14	Threshold	448	5	0x96	0x4b			b11	2
30/11 16 :15 :05	Threshold	449	5	0x96	0x46			b11	2
30/11 16 :31 :02	Threshold	450	5	0x96	0x41			b11	2
30/11 16 :51 :12	Threshold	451	5	0x96	0x3c			b11	2
30/11 17 :09 :09	Threshold	452	5	0x96	0x37			b11	2
30/11 17 :25 :50	Threshold	453	5	0x96	0x32			b11	2
30/11 17 :43 :27	Threshold	454	5	0x96	0x2d			b11	2
30/11 18 :03 :14	Threshold	455	5	0x96	0x28			b11	2
30/11 18 :23 :51	Threshold	456	5	0x96	0x23			b11	2
30/11 18 :41 :58	Threshold	457	5	0x96	0x1e			b11	2
01/12 04 :07 :35	Stub & L1	467	0			0x10	0x0A	b11	4
01/12 04 :13 :55	Stub & L1	468	0			0x10	0x0B	b11	4
01/12 04 :22 :26	Stub & L1	469	0			0x10	0x0C	b11	4
01/12 04 :30 :48	Stub & L1	470	0			0x11	0x0A	b11	4
01/12 04 :40 :06	Stub & L1	471	0			0x11	0x0B	b11	4
01/12 04 :52 :26	Stub & L1	472	0			0x11	0x0C	b11	4
01/12 05 :01 :27	Stub & L1	473	0			0x12	0x0A	b11	4
01/12 05 :09 :35	Stub & L1	474	0			0x12	0x0B	b11	4
01/12 05 :19 :21	Stub & L1	475	0			0x12	0x0C	b11	4
01/12 05 :57 :52	Stub & L1	477	0			0x11	0x0D	b11	4
01/12 06 :34 :33	Threshold	478	0	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 06 :54 :34	Threshold	479	0	0x96	0x73	0x11	0x0C	b11	4
01/12 07 :17 :07	Threshold	480	0	0x96	0x6E	0x11	0x0C	b11	4
01/12 07 :40 :25	Threshold	481	0	0x96	0x69	0x11	0x0C	b11	4
01/12 08 :02 :04	Threshold	482	0	0x96	0x64	0x11	0x0C	b11	4
01/12 08 :25 :14	Threshold	483	0	0x96	0x5F	0x11	0x0C	b11	4
01/12 08 :47 :19	Threshold	484	0	0x96	0x5A	0x11	0x0C	b11	4
01/12 09 :10 :04	Threshold	485	0	0x96	0x55	0x11	0x0C	b11	4
01/12 09 :41 :22	Threshold	486	0	0x96	0x50	0x11	0x0C	b11	4
01/12 10 :28 :19	Threshold	487	0	0x96	0x4B	0x11	0x0C	b11	4
01/12 10 :48 :21	Threshold	488	0	0x96	0x46	0x11	0x0C	b11	4
01/12 11 :10 :00	Threshold	489	0	0x96	0x41	0x11	0x0C	b11	4

Date	Type	Run	θ	VCTH _{inf}	VCTH _{CNM}	Data	Stub	CWD	Energy (GeV)
01/12 11 :35 :38	Threshold	490	0	0x96	0x3C	0x11	0x0C	b11	4
01/12 11 :57 :52	Threshold	491	0	0x96	0x37	0x11	0x0C	b11	4
01/12 12 :19 :02	Threshold	492	0	0x96	0x32	0x11	0x0C	b11	4
01/12 12 :40 :10	Threshold	493	0	0x96	0x2d	0x11	0x0C	b11	4
01/12 12 :58 :36	Threshold	494	0	0x96	0x28	0x11	0x0C	b11	4
01/12 13 :15 :25	Threshold	495	0	0x96	0x23	0x11	0x0C	b11	4
01/12 13 :35 :00	Threshold	496	0	0x96	0x1E	0x11	0x0C	b11	4
01/12 14 :04 :50	Angular	498	5	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 14 :38 :02	Angular	499	8	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 15 :05 :19	Angular	500	11	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 15 :36 :09	Angular	501	12	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 16 :06 :06	Angular	502	14	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 16 :31 :37	Angular	503	16	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 17 :07 :10	Threshold	504	10	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 17 :21 :25	Threshold	505	10	0x96	0x69	0x11	0x0C	b11	4
01/12 17 :36 :20	Threshold	506	10	0x96	0x5a	0x11	0x0C	b11	4
01/12 17 :51 :44	Threshold	507	10	0x96	0x4b	0x11	0x0C	b11	4
01/12 18 :23 :53	Threshold	508	10	0x96	0x3c	0x11	0x0C	b11	4
01/12 18 :24 :03	Threshold	509	10	0x96	0x2d	0x11	0x0C	b11	4
01/12 18 :36 :29	Threshold	510	10	0x96	0x1e	0x11	0x0C	b11	4
01/12 18 :52 :05	Threshold	511	13	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 19 :09 :22	Threshold	512	13	0x96	0x69	0x11	0x0C	b11	4
01/12 19 :26 :52	Threshold	513	13	0x96	0x5A	0x11	0x0C	b11	4
01/12 19 :42 :00	Threshold	514	13	0x96	0x4b	0x11	0x0C	b11	4
01/12 20 :00 :36	Threshold	515	13	0x96	0x3c	0x11	0x0C	b11	4
01/12 20 :27 :28	Threshold	516	13	0x96	0x2d	0x11	0x0C	b11	4
01/12 20 :43 :04	Threshold	517	13	0x96	0x1e	0x11	0x0C	b11	4
01/12 20 :58 :53	Threshold	518	15	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
01/12 21 :14 :27	Threshold	519	15	0x96	0x69	0x11	0x0C	b11	4
01/12 21 :30 :08	Threshold	520	15	0x96	0x5A	0x11	0x0C	b11	4
01/12 21 :45 :29	Threshold	521	15	0x96	0x4B	0x11	0x0C	b11	4
01/12 23 :12 :23	Threshold	522	15	0x96	0x4B	0x11	0x0C	b11	4
01/12 23 :25 :19	Threshold	523	15	0x96	0x3c	0x11	0x0C	b11	4
01/12 23 :40 :27	Threshold	524	15	0x96	0x2d	0x11	0x0C	b11	4
01/12 23 :54 :39	Threshold	525	15	0x96	0x1e	0x11	0x0C	b11	4
02/12 00 :46 :00	Threshold	526	20	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
02/12 00 :47 :33	Threshold	527	20	0x96	0x69	0x11	0x0C	b11	4
02/12 01 :07 :42	Threshold	528	20	0x96	0x5A	0x11	0x0C	b11	4
02/12 01 :24 :32	Threshold	529	20	0x96	0x4B	0x11	0x0C	b11	4
02/12 01 :41 :13	Threshold	530	20	0x96	0x3C	0x11	0x0C	b11	4

Date	Type	Run	θ	VCTH _{inf}	VCTH _{CNM}	Data	Stub	CWD	Energy (GeV)
02/12 02 :08 :18	Threshold	531	20	0x96	0x2D	0x11	0x0C	b11	4
02/12 02 :18 :53	Threshold	532	20	0x96	0x1E	0x11	0x0C	b11	4
02/12 02 :36 :23	Threshold	533	30	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4
02/12 02 :53 :05	Threshold	534	30	0x96	0x69	0x11	0x0C	b11	4
02/12 03 :13 :27	Threshold	535	30	0x96	0x5A	0x11	0x0C	b11	4
02/12 03 :30 :52	Threshold	536	30	0x96	0x4B	0x11	0x0C	b11	4
02/12 03 :46 :56	Threshold	538	30	0x96	0x3C	0x11	0x0C	b11	4
02/12 04 :05 :36	Threshold	539	30	0x96	0x2D	0x11	0x0C	b11	4
02/12 04 :21 :08	Threshold	540	30	0x96	0x1E	0x11	0x0C	b11	4
02/12 05 :40 :07	CWD	541	8	0x96	0x78	0x11	0x0C	b00	4
02/12 05 :46 :09	CWD	542	8	0x96	0x78	0x11	0x0C	b01	4
02/12 05 :52 :35	CWD	543	8	0x96	0x78	0x11	0x0C	b10	4
02/12 06 :13 :58	Ali's bonus	544	0	0x96	0x78	0x11	0x0C	b11	4