CHAPITRE 4 Les détecteurs Silicium à micropistes de CMS

Ce chapitre est consacré aux détecteurs à micropistes de silicium qui ont été choisis pour remplacer les MSGC du trajectographe de CMS. En effet, avant décembre 1999, le trajectographe de CMS était sensé être constitué de détecteurs gazeux à micropistes, de détecteurs silicium à micropistes et de détecteurs silicium à pixel. Puis, la collaboration CMS a pris la décision d'abandonner le projet MSGC et fait le choix d'un trajectographe tout silicium.

A l'automne 2001, six détecteurs à micropistes silicium ainsi que l'électronique de contrôle et de lecture ont été testés en faisceau de pions et de muons échantillonné à 25 ns au CERN.

Après un bref rappel historique et avoir résumé le principe de fonctionnement des détecteurs silicium à micropistes, nous présenterons les choix technologiques des détecteurs silicium à micropistes de CMS. Enfin, nous détaillerons le dispositif de test sous faisceau et nous présenterons les résultats obtenus.

4.1 Historique

L'histoire de la physique des semiconducteurs commence en 1833 avec M. Faraday qui remarque que le pouvoir conducteur de certains matériaux augmente avec la température, contrairement à ce qui se passe habituellement pour les métaux. La même année, A. Becquerel constate qu'en éclairant le point de contact entre un conducteur et un électrolyte une différence de potentiel est détectable : c'est l'effet photovoltaïque. En 1879, E. H. Hall observe une différence de potentiel dans du cuivre dans la direction perpendiculaire au courant et au champ magnétique : c'est l'effet Hall. Mais c'est en 1931 que K. G. Wilson jeta les bases de la théorie moderne des semiconducteurs comme des isolants à faible bande interdite et introduisit la notion de trou. L'effet transistor fut découvert en 1948 par John Bardeen, William H. Brattain et William Shockley, les premiers transistors au

silicium furent fabriqués en 1954 et dès février 1954, les premiers ordinateurs complètement transistorisés virent le jour.

En 1949, K. G. Mac Kay a observé la détection de particules alpha au moyen de jonction dans un cristal semi-conducteur de germanium. Dès lors, de nombreux laboratoires se sont intéressés au développement de détecteurs semi-conducteurs soit sous la forme de pixel, soit sous la forme de micropistes. Depuis, leur excellente résolution en énergie et en position ainsi que leur excellente réponse temporelle en ont fait des détecteurs populaires en physique des particules.

4.2 Les détecteurs silicium à micropistes

4.2.1 Raisons de l'utilisation des détecteurs silicium à micropistes au LHC

Environ mille fois plus denses que les détecteurs gazeux classiques, les détecteurs silicium à micropistes sont néanmoins d'excellents candidats pour la détection des particules de haute énergie. S'il faut environ 30 eV dans un gaz pour créer une paire électron-ion, environ 3 eV sont suffisants pour créer une paire électron-trou dans un semi-conducteur ce qui permet d'obtenir de très bon rapport signal sur bruit pour une faible tension d'alimentation (quelques centaines de volts). D'autre part, l'excellente résolution spatiale de ces détecteurs, de l'ordre de quelques dizaines de micromètres, est associée à un temps de réponse rapide proche d'une dizaines de nanosecondes.

Le silicium a aussi l'avantage d'avoir une faible masse atomique, ce qui minimise la contribution à la diffusion multiple avant le calorimètre, ainsi que d'excellentes propriétés mécaniques et une grande pureté possible.

A titre comparatif, le tableau 4.1 fournit les critères de l'utilisation de silicium dans le détecteur CMS et dans d'autres détecteurs de la physique des particules.

expérience	nb de détecteurs	nb de canaux	surface de silicium (en m^2)
CMS	$\simeq$ 16000	10 10^6	223
ATLAS	$\simeq$ 16000/2	6,15 10^6	60
CDF II	720	405 000	1,9
Aleph	144	95 000	0,49
L3	96	86 000	0,23

Tableau 4.1 – Comparaison de l'utilisation de silicium dans quelques grands détecteurs.

4.2.2 Description

La présence d'impuretés de substitution (le dopage), pentavalentes ou trivalentes, dans un cristal semiconducteur tétravalent (silicium, germanium) favorise la création de porteurs de charges : les électrons (pour un semiconducteur de type n) et les trous (pour un semiconducteur de type p). Lorsque deux zones de dopage différents (n et p) sont mises en contact (jonction pn), les charges diffusent d'une zone à l'autre en donnant naissance à un champ électrique. Il se crée alors une zone de transition désertée de porteurs libres (la zone désertée) où règne un champ électrique intense de quelques kilovolts/cm (figure 4.1).

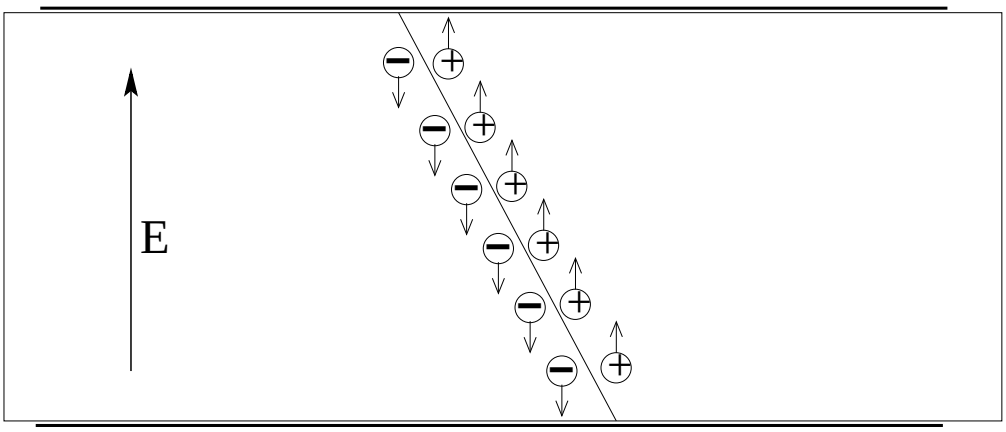

Figure 4.1 – Déplacement d'électrons et de trous dans un semiconducteur.

En augmentant le champ électrique, on confère aux électrons une énergie suffisante pour qu'ils créent des paires électron-trou et induisent une avalanche, donnant un détecteur plus rapide et plus efficace. Pour cela, on relie la face arrière du substrat à une tension positive (la tension de désertion) d'une centaine de volts à quelques centaines de volts.

Un détecteur silicium à micropistes est généralement composé d'un substrat silicium dopé n de quelques centaines de micromètres d'épaisseur sur lequel on implante des pistes fortement dopées p (par des atomes pentavalents de phosphore) d'une vingtaine de micromètres de large, espacés d'une centaine de micromètres et d'une dizaine de millimètres de long.

4.2.3 Principe de fonctionnement

Lorsqu'une particule (au minimum d'ionisation) traverse le détecteur silicium à micropistes (figure 4.2), elle perd de l'énergie par ionisation et crée au maximum 72 paires électrons-trous par micromètre le long de sa trajectoire, soit 22 000 paires électrons-trous pour un substrat de 300 μm. Sous l'action d'un champ électrique intense (de quelques

kV/cm), les charges dérivent en quelques dizaines de nanosecondes vers la face arrière du substrat (zone n+ sur la figure 4.2) et les pistes (zone p+ sur la figure 4.2). C'est le déplacement de ces charges qui va induire un courant sur les pistes reliées à l'électronique de lecture.

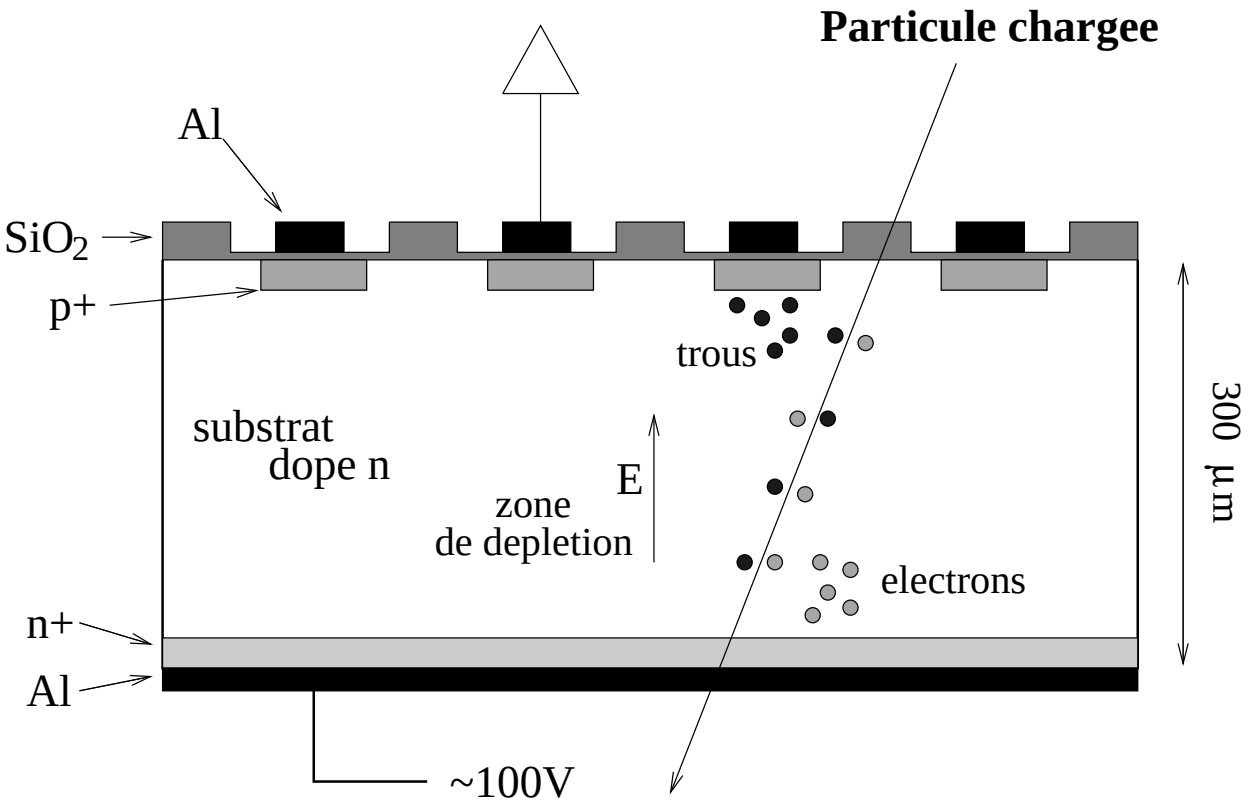

Figure 4.2 – Coupe d'une galette de silicium pour les détecteurs à micropistes du trajectographe.

Par ailleurs, un faible courant de fuite apparaît, principalement suite à la génération thermique de paires électrons-trous et contribue au bruit du détecteur.

4.2.4 Effets des radiations

Un fort taux de radiation peut détériorer le substrat à la fois en profondeur et en surface. Les détériorations en profondeur résultent du déplacement ou de l'éjection d'atomes du réseau cristallin suite à des collisions directes entre les hadrons ou les fragments nucléaires et les atomes de silicium. Les sites inoccupés et les atomes libérés modifient les propriétés du semiconducteur comme la durée de vie des porteurs, ce qui entraîne :

- une augmentation du courant dû à la génération thermique de porteurs de charges dans la zone désertée (le courant de fuite) qui se traduit par une amplification du bruit (figure 4.3) ;
- une réduction du nombre de porteur de charges ce qui peut entraîner une inversion du type de semiconducteur que l'on peut contrer par une augmentation de la tension de désertion mais qui implique une augmentation du risque de claquage ;
- un piégeage des charges qui conduit à un temps de collection plus long qui peut aboutir à une réduction de l'amplitude du signal.

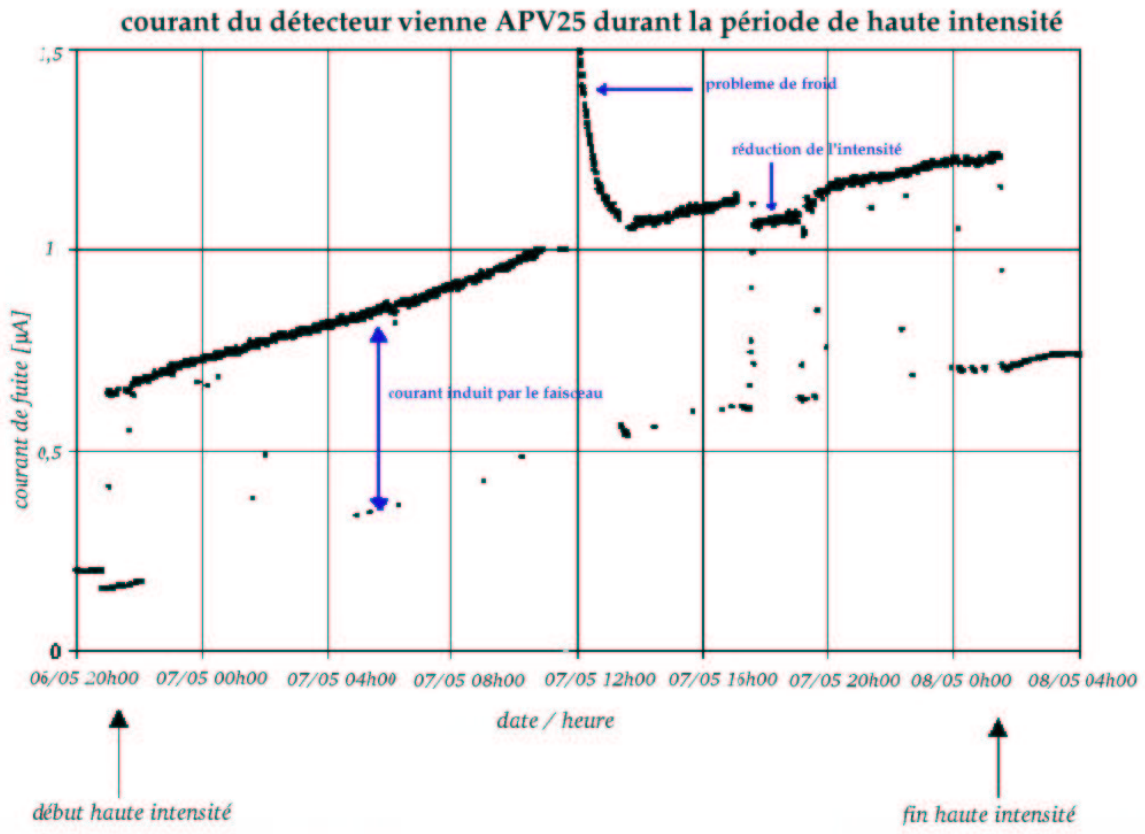

Figure 4.3 – Evolution du courant de fuite d'un détecteur type CMS durant un test haute intensité au PSI [ALB01a].

Quant aux détériorations surfaciques, elles sont principalement dues au piégage des charges à l'interface oxyde-silicium, ce qui provoque une augmentation de la capacité interpiste et conduit donc à une augmentation du bruit.

Pour limiter les risques de claquage et réduire le courant de fuite, le trajectographe de CMS sera placé à -10 ^0C de façon permanente. La réduction du dopage entraînera une

inversion du type de silicium (après ~10 ans de LHC) et demandera l'utilisation de tension de plus en plus importante pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de volts (~ 500 V).

4.2.5 Qualité du substrat

CMS utilise un substrat silicium de type n de grande pureté (produit par la métode de zone flottante) pour une grande uniformité de la concentration du dopant (le phosphore), ce qui réduit les risques de détérioration en profondeur dues aux radiations. Le choix de l'épaisseur du substrat est un compromis entre un fort rapport S/N, une faible tension de désertion et une faible quantité de matière présente dans le trajectographe. Une couche d'aluminium à l'arrière du substrat permet d'éviter l'accumulation de charges en les évacuant.

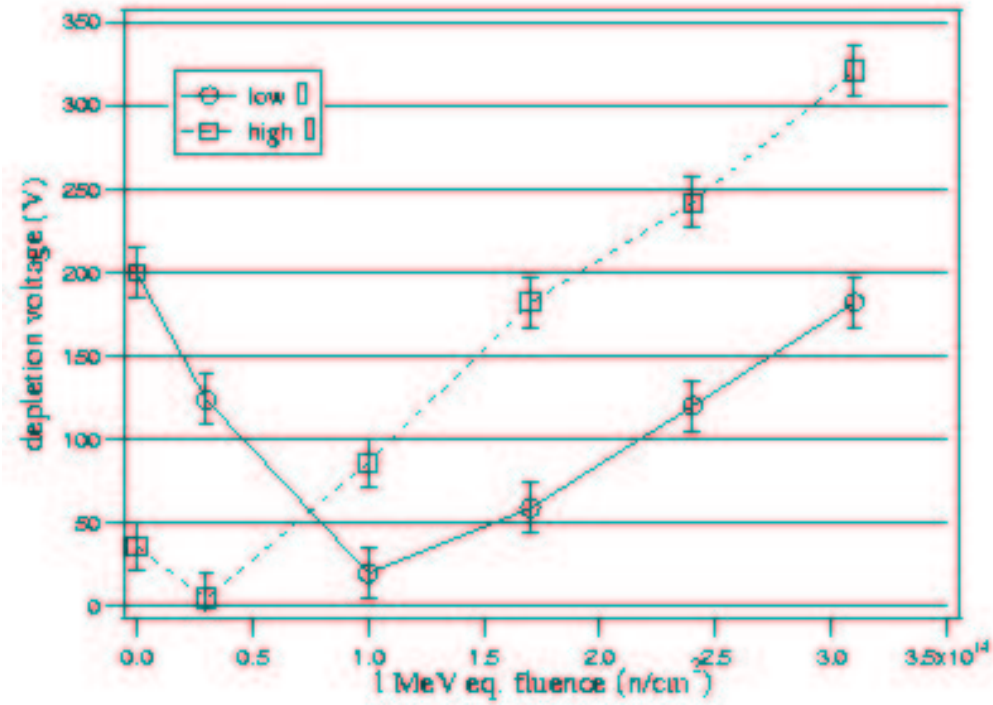

Figure 4.4 – La tension de désertion en fonction du flux de particules pour deux substrats de résistivités différentes [ANG02].

Une faible résistivité variant entre 1,5 et 8 kΩcm pour ce substrat permet d'obtenir une tension de désertion entre 50 et 200 V (figure 4.4). Après l'inversion de pente, un substrat de faible résistivité de ce type permet un fonctionnement à une tension de dépletion plus basse, ce qui limite les risques de claquage.

De plus une faible capacité entre les pistes (la capacité interpiste) permet un bon rapport S/N. Cette capacité interpiste augmente pour un cristal orienté <111> après irradiation alors qu'elle reste stable pour un cristal orienté <100> (figure 4.5).

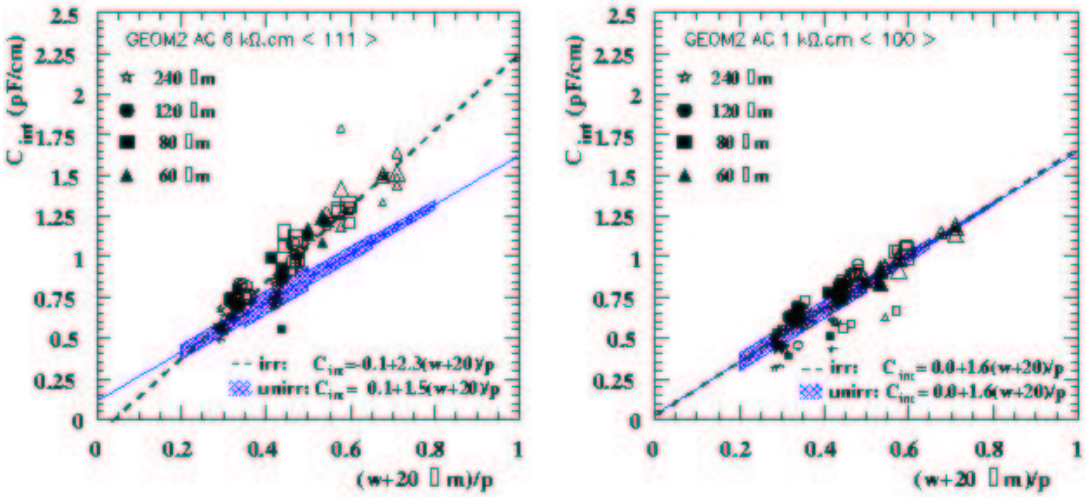

Figure 4.5 – Capacité interpiste avant et après irradiation d'un cristal <111> (à gauche) et <100> (à droite) [ANG02].

4.2.6 Caractéristiques des pistes

Le substrat est fortement dopé p au niveau des pistes pour une tension de désertion aussi faible que possible. Il est aussi fortement dopé n sur la face arrière (du substrat) de façon à minimiser le bruit. Les pistes sont recouvertes de un ou deux micromètres d'aluminium pour collecter rapidement et efficacement les charges, ce qui assure un bon contact entre ces pistes et l'électronique de lecture. Une couche d'oxyde de silicium de quelques micromètres d'épaisseur entre la zone p et le métal des pistes (le couplage AC) permet de réduire la capacité interpiste et d'augmenter la stabilité du détecteur pour une collection plus efficace des charges. Par ailleurs, une valeur de 0,25 pour le rapport largeur des pistes sur le pas des pistes permet un faible bruit.

Une résistance polysilicium de quelques MΩ entre les pistes et l'alimentation garantit une bonne uniformité et une chute de tension négigeable, ce qui contribue à minimiser le bruit.

4.3 Les détecteurs silicium à micropistes du trajectographe avant de CMS

4.3.1 Le trajectographe avant de CMS

Le nouveau trajectographe avant de CMS est composé de deux bouchons de neuf disques, chaque disque étant divisé en sept couches concentriques (à droite de la figure 4.6). Chacune de ces couches est constituée d'un certain nombre de modules de détecteurs silicium à micropistes allant de 144 à 1440 modules. Il existe différents types de module suivant les caractéristiques suivantes :

- le nombre et l'épaisseur du(des) substrat(s) (soit un substrat de 320 μm d'épaisseur, soit deux substrats de 500 μm d'épaisseur) ;
- le nombre d'APV relié au substrat (4 ou 6) ;
- si le module est simple face ou double face, le module double face est composé de deux substrats (ou deux couples de substrat) montés dos à dos, les pistes faisant un angle de 100 mrad.

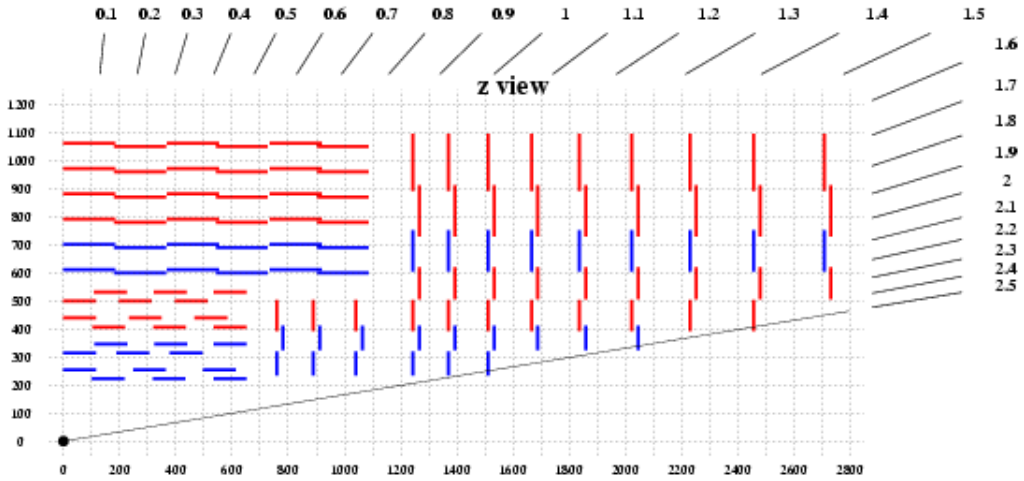

Figure 4.6 – Le trajectographe avant de CMS après 2000 : les modules en rouges représentent les modules doubles faces et les modules en bleus, les modules simple face [TkTDR00]. On numérote les couches de haut en bas.

Les couches un, deux, quatre et cinq sont composées de modules double face et les trois autres couches de modules simple face. Les trois couches extérieures (un, deux et trois) sont composées de substrats de 500 μm d'épaisseur permettant de réduire le nombre de canaux de lecture pour maintenir le rapport S/N dégradé par de longues pistes (jusqu'à 21 cm). Et les quatre autres couches sont composées de substrats de 320 μm d'épaisseur.

4.3.2 Les détecteurs silicium à micropistes

Les détecteurs silicium à micropistes du trajectographe avant de CMS ont les caractéristiques suivantes :

- un ou deux substrats trapézoïdaux en silicium de type n de 320 et 500 μm d'épaisseur, fortement dopé p (couche de 1 μm) au niveau des pistes et fortement dopé n (couche de 1 μm) sur toute le face arrière du substrat ;
- une basse résistivité (entre 1,5 et 3 kΩ cm) pour les substrats de 320 μm d'épaisseur et une résistivité légèrement plus élevée (entre 4 et 8 kΩ cm) pour les substrats de 500 μm d'épaisseur ;
- 512 ou 768 pistes (selon le type de module : simple ou double face) en aluminium de 18-35 μm de large, espacées de 89 à 205 μm et satisfaisant la condition $\frac{\text{largeur de la piste}}{\text{pas entre les pistes}} = 0,25$;
- la polarisation du détecteur se fait par l'intermédiaire d'une résistance implantée en polysilicium avec $R_{polysilicium} = 2,0 \pm 0,6 M\Omega$.

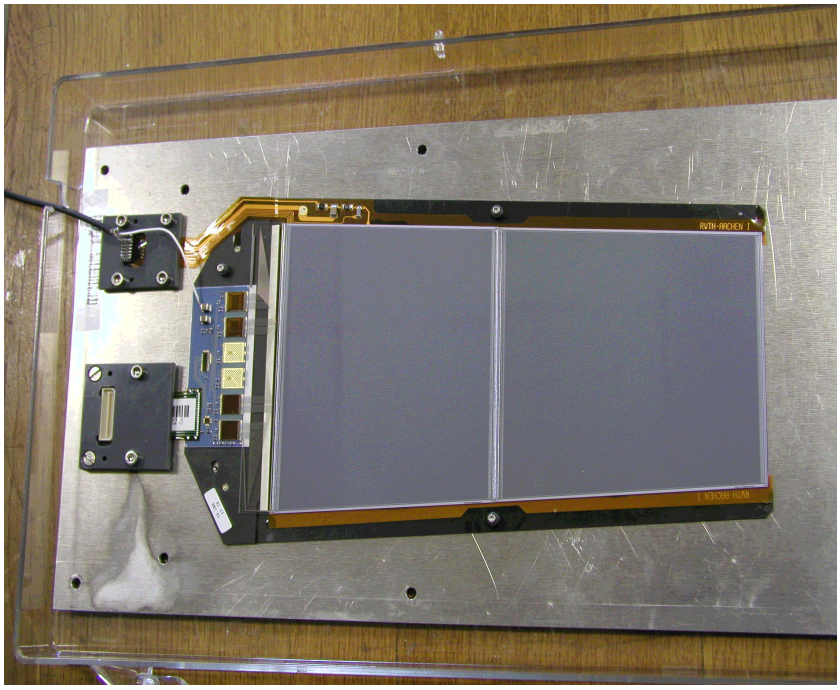

Figure 4.7 – Photographie d'un détecteur silicium.

4.3.3 L'hybride de lecture

Les pistes des substrats silicium sont lues par 4 ou 6 puces APV (Analogue Pipeline Voltage), chaque APV traitant 128 pistes. Chaque piste est lue par un préamplicateur de

charge suivi d'un étage de mise en forme de 50 ns. Puis le signal est échantillonné à la fréquence du LHC (40 MHz) et stocké dans une mémoire analogique.

La figure 4.8 montre la forme des données à la sortie de l'APV. La trame se décompose en trois parties :

1. un ensemble de 3 bits généralement à 1 ;
2. un ensemble de 8 bits définissant l'adresse de la mémoire analogique stockant les 128 échantillons que l'on désire lire ;
3. un bit indiquant la présence d'une erreur ;
4. la sucession des 128 niveaux analogiques représentant les voies du circuit ;
5. et l'impulsion de synchronisation.

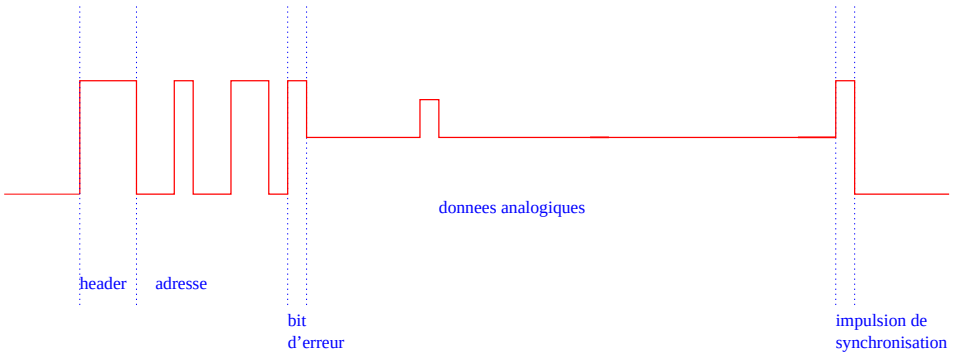

Figure 4.8 – Trame de sortie du circuit APV.

Les principales fonctions de l'hybride (figure 4.9) sont de supporter et de traiter la sortie des APV, de fournir un environnement peu bruyant, de contrôler le fonctionnement général du module. Trois ASICs (Application Specific Integrated Circuit) supplémentaires y sont intégrés :

- le circuit intégré PLL (Phase Locked Loop) décode le signal provenant du système de déclenchement du premier niveau sur un signal horloge à 40 MHz et synchronise la phase de l'horloge,
- le MUX multiplexe les signaux analogiques (à 20 MHz) provenant de 2 APV en un seul signal à 40 MHz,
- le DCU (Detector Control Unit) mesure la température de l'hybride, la puissance consommée par l'hybride et le courant de fuite du détecteur.

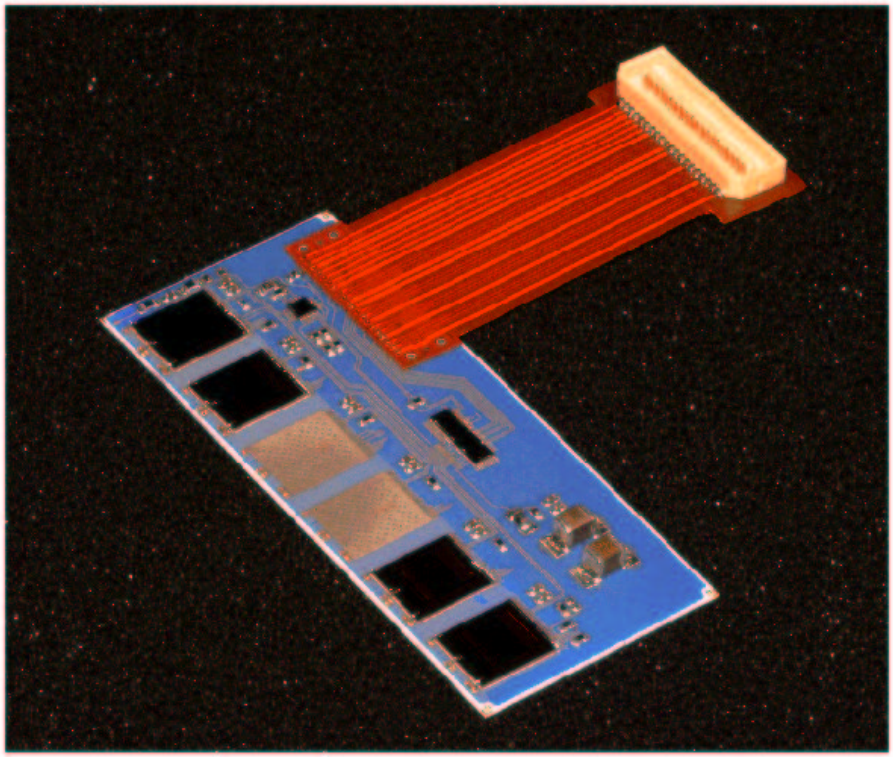

Figure 4.9 – Photographie d'un hybride supportant 4 APVs pour les détecteurs silicium à micropistes.

L'hybride a donc en charge le système de lecture. Il doit pouvoir supporter de fort taux de radiations et être suffisamment plat et rigide pour un assemblage automatique des modules de détection. De plus, il doit être thermo-mécaniquement compatible avec le cadre en fibre de carbone et pouvoir efficacement évacuer la chaleur due à l'électronique.

4.3.4 L'adaptateur de pas et le cadre

L'adaptateur de pas, en verre de 300 μm d'épaisseur, transmet les données analogiques des pistes aux APVs via 512 lignes en Chrome.

Les substrats, l'hybride et l'adaptateur de pas sont placés sur un cadre en fibre de carbone (figure 4.9) alliant légèreté, rigidité et forte conductivité thermique. Cette forte conductivité permet d'évacuer efficacement la chaleur due au fonctionnement des APV (60 mW) et de l'hybride (3 W) vers le système de refroidissement au C_4H_{16} liquide.

4.3.5 Le système de lecture

A la sortie des APV de lecture, les données analogiques des APV sont combinées deux à deux et transférées au FED (Front End Driver, figure 4.10) situé dans la salle d'acquisition ("test beam area", figure 4.10).

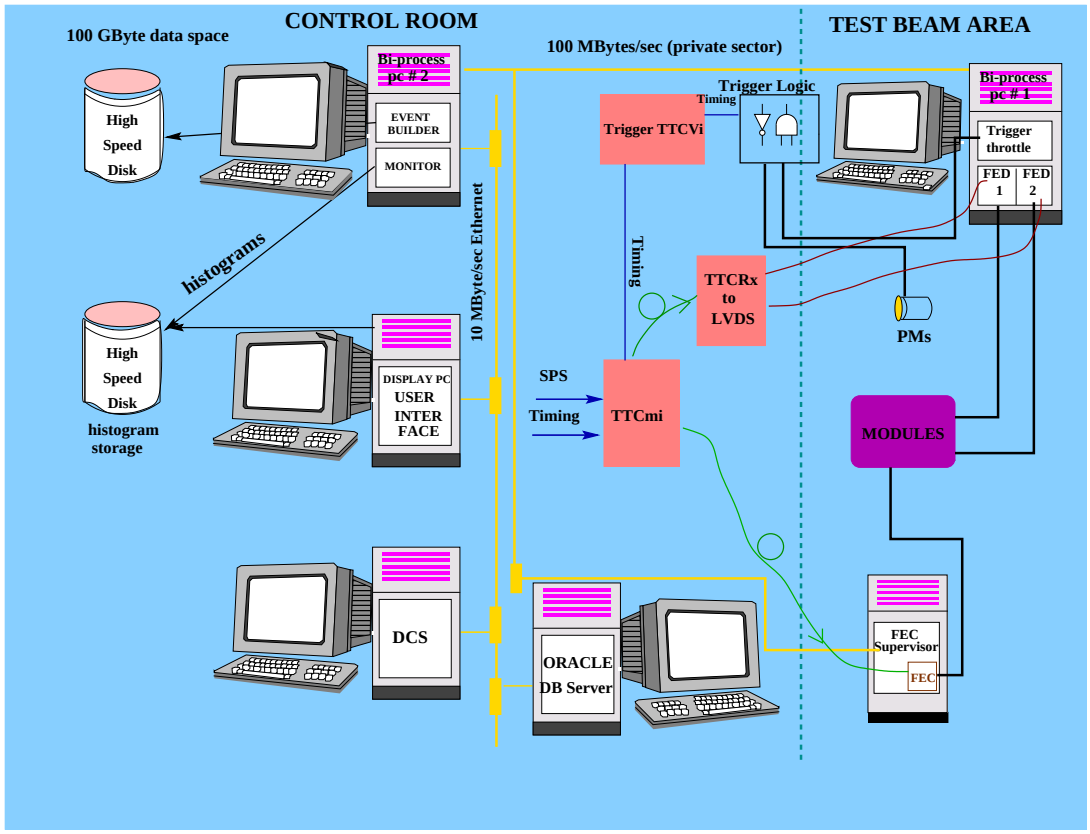

Figure 4.10 – Vue générale du test sous faisceau.

Les données analogiques sont alors numérisées par le module FED, chaque module FED pouvant traiter 4 modules de détection. Le FED initie également le traitement des données comme la soustraction des piédestaux et le réarrangement, puis les stocke dans une mémoire locale jusqu'à l'arrivée d'un signal de déclenchement (Trigger throttle, figure 4.10).

Le module FEC (Front End Controller, figure 4.10) situé dans la salle d'acquisition est responsable du contrôle des circuits APV. Il sert également d'interface avec le système global TTC (Timing Trigger and Command) qui distribue l'horloge du LHC (TTCrx, figure 4.10) et le signal du premier niveau de déclenchement (TTCvi, figure 4.10) aux APV. Ces signaux sont envoyés au travers de fibres optiques, d'où la carte CCU (Communication and Control Unit) les distribue aux APV.

4.4 Test sous faisceau : le test M200

4.4.1 Objectifs

Le but de cette campagne de mesures était de tester à la fois l'électronique de lecture, l'électronique de contrôle, le système d'acquisition et les détecteurs silicium sous un faisceau échantillonné à 25 ns composé de π^+ ou de μ de 120 GeV/c d'impulsion.

4.4.2 Faisceau X5 du CERN

Le faisceau X5 du CERN du début novembre 2001 est un faisceau de π^+ ou de μ de 120 GeV/c d'impulsion avec un taux de particules de $\sim$ 100 kHz mm^{-2} et où les paquets de particules sont espacés de 25 ns comme pour le LHC.

Le faisceau est considéré de forme gaussienne avec un étalement de 10 $\times$ 10 cm^2 et traverse généralement les pistes reliées au troisième APV.

4.4.3 Description

Après une semaine de mise au point de l'électronique et de conditionnement des détecteurs, six détecteurs silicium ont été testés (figure 4.11) durant 9 jours entre le 25 octobre et le 3 novembre 2001 à une température d'environ 16 ^0C et avec une humidité de 6 %.

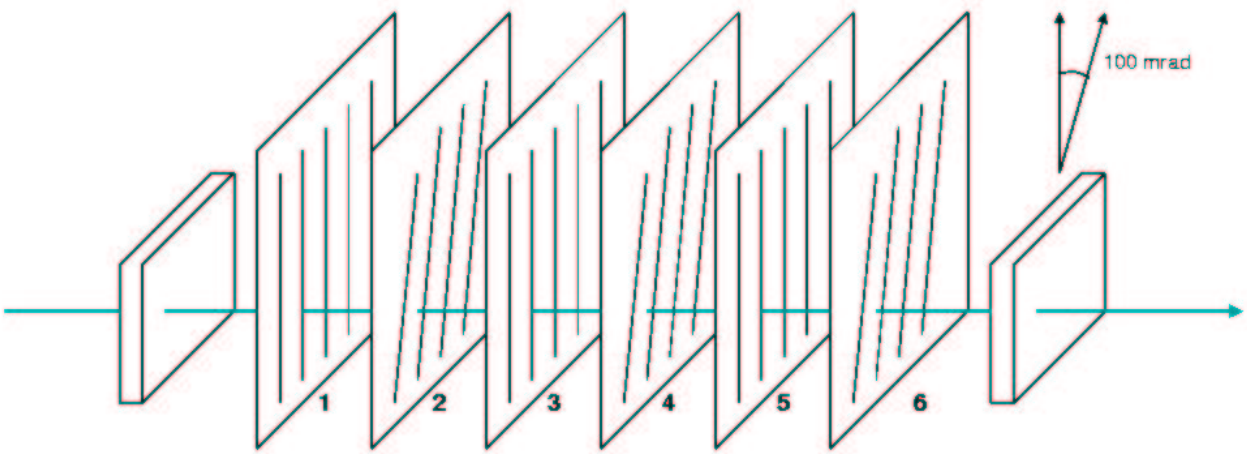

Figure 4.11 – Schéma des six modules sour le faisceau du CERN.

Figure 4.12 – Installation des modules au CERN.

Les 6 détecteurs sont des détecteurs à micropistes de silicium de type TOB (partie centrale externe du trajectographe silicium, figure 2.13), espacés de 50 mm. Un module sur deux est incliné d'un angle de 5 *degrés* avec la verticale dans le but de reconstruire les traces. Chacun de ces détecteurs est composé de 2 galettes rectangulaires de silicium (de 500 μm d'épaisseur) et d'un hybride de lecture à 4 APV25. La surface active pour un module est de $94 \times 86mm$ et l'espacement entre chacune des 512 pistes est de 183 μm. Ces détecteurs sont alimentés sous une tension de 300 V, ce qui donne une capacité interpistes entre 12 et 16 pF (piste de 12 cm de long). On lit au total 3072 canaux et durant ce test, on a accumulé 50 millions d'événements (340 GB de données).

Le système électronique de lecture utilisé pour ce test correspondait au système final prévu pour CMS excepté l'absence des liaisons optiques (figure 4.13).

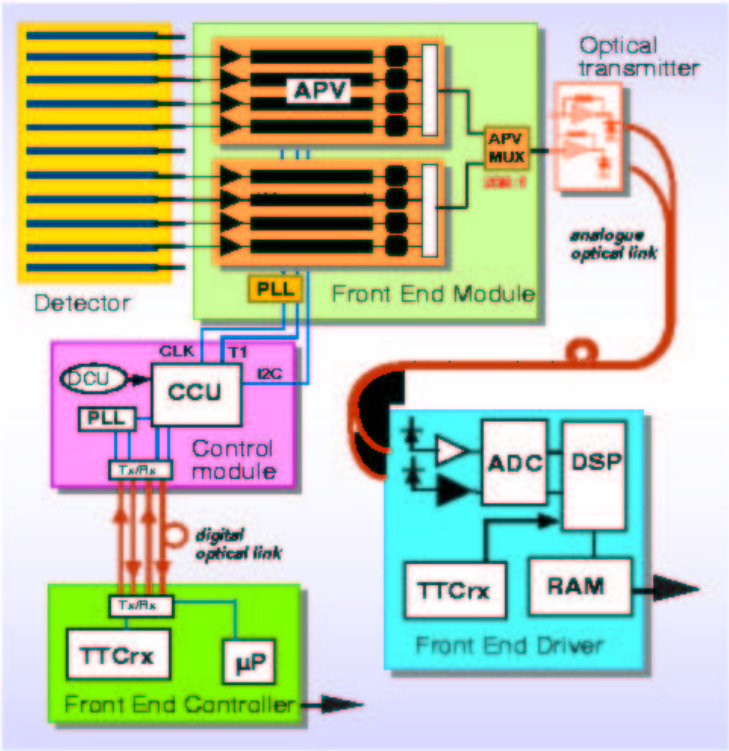

Figure 4.13 – Système électronique de lecture des 6 détecteurs. Durant la campagne de test M200, les liaisons optiques analogiques n'étaient pas encore opérationnelles.

4.4.4 Analyse des données

Les fichiers de données sont sauvegardés dans une base de données au format *Zebra* [ZEB]. Une fois les données extraites de cette base, le piédestal, le mode commun APV par APV et le bruit sont déterminés pour obtenir le signal de chacunes des pistes. Puis on reconstruit les traces des particules. Tous les programmes d'extraction du signal et de reconstruction ont été écrits en C++ et développés en se basant sur O.R.C.A., le programme officiel de reconstruction et d'analyse de CMS.

4.4.4.1 Extraction du signal

On sélectionne un certain nombre n_0 d'événements ($n_0 \sim 1000$), d'où on extrait les données APV par APV et piste par piste.

Pour chaque piste i, on calcule la moyenne ($\overline{data_i}$) et l'écart-type (σ_{data_i}) des données brutes ($data_{i,k}$) pour un certain nombre d'événements ($k \leq n_0$). Le piédestal d'une piste i (ped_i) est évalué comme la moyenne arithmétique des données brutes recalculée sur les n_0

événements en excluant les événements avec des données trop disparates (n_1 événements) et on calcule de même l'écart-type :

$$ped_i = \frac{1}{n_1}\Sigma_{k=1}^{n_1 \leq n_0} data_{i,k} \qquad \text{avec} \qquad data_{i,k} - \overline{data_i} < Th_0$$

$$\sigma_{ped,i} = \frac{1}{n_1}\Sigma_{k=1}^{n_1 \leq n_0} (data_{i,k} - \overline{data_i})^2 \qquad \text{avec} \qquad data_{i,k} - \overline{data_i} < Th_0$$

Ensuite, on évalue la moyenne et l'écart-type des données $data_{i,k} - ped_i$ pour chaque piste i (sans signal) et pour tous les événements (n_2) tels que $data_{i,k} - ped_i < Th_1 \times \sigma_{ped,i}$. La fluctuation du mode commun (cm_j) est évaluée comme la moyenne de ($data_{i,k} - ped_i$) sur les 128 pistes i d'un APV et sur les n_2 événements :

$$cm_j = \frac{1}{128}\Sigma_{i=1}^{128} \left[\frac{1}{n_2}\Sigma_{k=1}^{n_2 \leq n_0}(data_{i,k} - ped_i)\right] \qquad \text{avec} \qquad data_{i,k} - ped_i < Th_1 \times \sigma_{ped,i}$$

Le bruit ($N_{i,k}$) est alors évalué comme l'écart-type des données $data_{i,k} - ped_i - cm_{i \in j}$ pour les n_2 événements et le piédestal est réévalué comme la moyenne des données $data_{i,k} - cm_{i \in j}$ pour les n_2 événements.

Une fois tous ces paramètres estimés et réévalués, on les recalcule plus précisément en éliminant toutes les pistes i ayant reçues du signal à l'événement k : $data_{i,k} - ped_i - cm_{i \in j} < Th_2 \times N_{i,k}$ (n_3 événements) :

- le piédestal d'une piste (Ped_i) est la moyenne sur les n_3 événements de $data_{i,k} - cm_{i \in j}$;
- la fluctuation du mode commun (CM_j) d'un groupe j de 128 pistes reliées au même APV est la moyenne sur les n_3 événements et sur les 128 pistes de $data_{i,k} - Ped_i$;
- le bruit d'une piste $N_{i,k}$ est l'écart-type de $data_{i,k} - Ped_i - CM_{i \in j}$.

Le signal $S_{i,k}$ d'une piste i et pour l'événement k est alors obtenu par la formule suivante $S_{i,k} = data_{i,k} - Ped_i - CM_{i \in j}$.

De plus, on élimine les pistes endommagées et les pistes trop bruyantes. Une piste est considérée comme bruyante si $N_{i,k}^2 > 1$ coup ADC. Une piste est considérée comme morte si $N_{i,k}^2 < 5\sigma_N$.

Le piédestal est relativement stable pour les 4 puces APV des 6 détecteurs silicium (figure 4.14) à la fois pour un faisceau composé de muons et pour un faisceau composé de pions. Les pistes mortes sont reconnaissables par un piédestal nul (piste 93 reliée à l'APV 2 du détecteur 2, figure 4.14).

De plus, le bruit N est très stable et reste en-dessous des 3 coups ADC que ce soit pour un faisceau composé de muons ou pour un faisceau composé de pions (figure 4.15). Les pistes mortes (déjà identifiées par un piédestal nul, figure 4.14) sont reconnaissables par un faible bruit. D'autre part, les pistes bruyantes sont facilement reconnaissables par un bruit plus important que la moyenne de 3 coups ADC (piste 102 reliée à l'APV 4 du détecteur 6, figure 4.15).

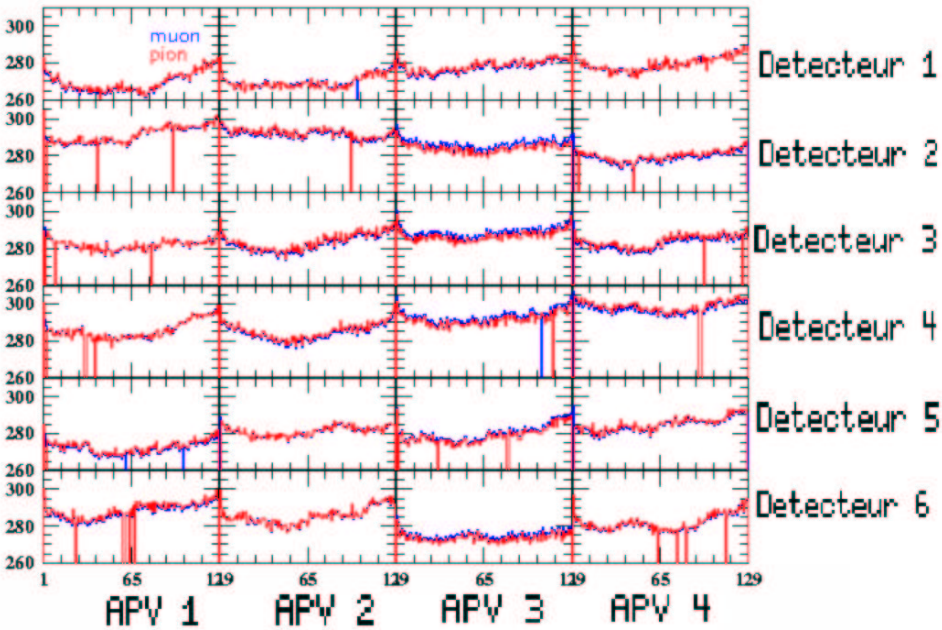

Figure 4.14 – Le piédestal pour les 128 pistes de chacun des 4 APV (en abscisse) des 6 détecteurs (en ordonnée) pour 100 événements muons (en bleu) et 100 événements pions (en rouge).

4.4.4.2 Reconstruction des amas

Avant de reconstruire les traces, on recherche, APV par APV, les pistes qui ont reçu un signal. On procède de la manière suivante :

1. on sélectionne toutes les pistes telles que $S/N > 2$ et toutes les pistes sélectionnées voisines forment un amas potentiel ;
2. Si l'amas potentiel ne contient qu'une piste, alors il n'est sélectionné que si $S_{clu}/N_{clu} > 5$;
3. Puis, le rapport signal sur bruit, S_{clu}/N_{clu}, d'un amas est calculé en fonction du signal S_i et du bruit N_i des pistes i par la formule : $S_{clu}/N_{clu} = \frac{\Sigma_i S_i}{(\Sigma_i N_i^2)^{1/2}}$.

Après analyse, la plupart des amas sélectionnés ont 2 ou 3 pistes et ces pistes sont, la plupart du temps, reliées au troisième APV (là où le faisceau est centré). Le rapport signal sur bruit S_{clu}/N_{clu} obtenu est d'environ 20 (figure 4.16). Le fait que le faisceau composé de muons est beaucoup moins collimé que le faisceau composé de pions induit un maximum plus important sur les APV 2 et 3, pour les événements muons que pour les événements pions (figure 4.16).

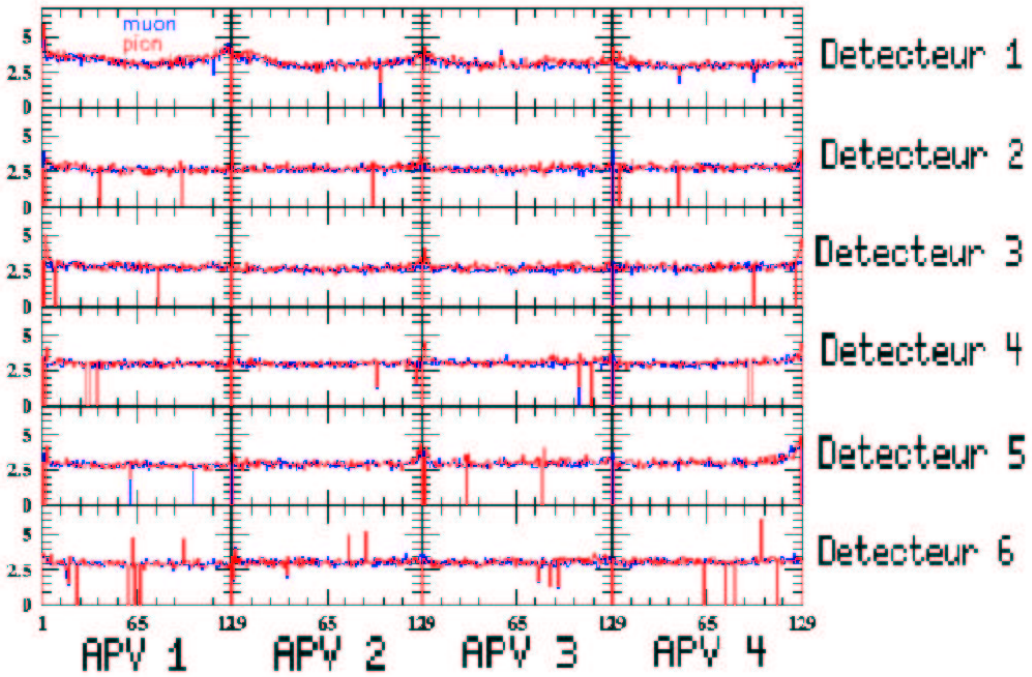

Figure 4.15 – Le bruit pour les 128 pistes de chacun des 4 APV (en abscisse) des 6 détecteurs (en ordonnée) pour 100 événements muons (en bleu) et 100 événements pions (en rouge).

4.4.4.3 Reconstruction des traces

Dans le but de déterminer l'efficacité de reconstruction des détecteurs 3 et 4, on se base sur les signaux des détecteurs 1, 5 et 2, 6 pour reconstruire les traces.

Une fois que les amas sont identifiés, on peut reconstruire les traces dans les six détecteurs dont certains ont des pistes qui font un angle de 5 *degrés* avec la verticale (figure 4.17). Les modules 4 et 6 (figure 4.17) sont alignés sur le module 2 grâce aux amas laissés par une même trace (les événements "muon" n'ont généralement qu'une seule trace, figure 4.17), puis on fait de même avec les modules 3, 5 et 1 (figure 4.17). Puis on recherche les amas en coïncidence d'une part avec les modules 1 et 5 puis d'autre part avec les modules 2 et 6 pour construire les traces. Enfin, on recherche s'il y a un amas à plus ou moins 10 pistes du passage des traces dans les modules 3 et 4 et on détermine l'efficacité de reconstruction $\epsilon_{3(4)}$ par :

$$\epsilon_{3(4)} = \frac{\text{Nombre de fois qu'un amas est trouvé dans le détecteur } 3(4)}{\text{Nombre de traces}}. \qquad (4.1)$$

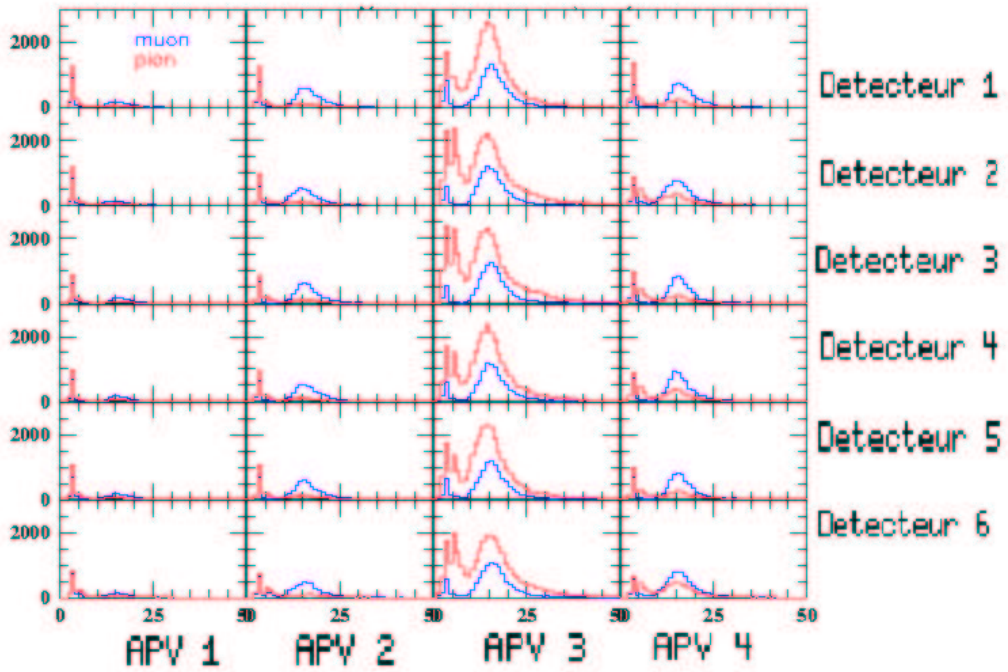

Figure 4.16 – Le rapport signal sur bruit pour les amas de chacun des 4 APV (en abscisse) des 6 détecteurs (en ordonnée) pour une centaine d'événements muons (en bleu) et une centaine d'événements pions (en rouge).

4.4.4.4 Etude du délai

Lorsqu'une particule traverse les six détecteurs et le scintillateur, celui-ci envoie un signal au système de déclenchement. Ce système de déclenchement traite ce signal puis l'achemine aux APVs des six détecteurs environ 850 ns (34 $\times$ 25 ns) après le passage de la particule. Ce délai peut être modifié en faisant varier le paramètre "délai" de l'APV (par pas de 25 ns) et de la PLL (par pas de 1 ns). Puis en calculant le rapport signal sur bruit pour un délai fixé, on peut en déduire l'influence du délai sur le rapport signal sur bruit (figure 4.18).

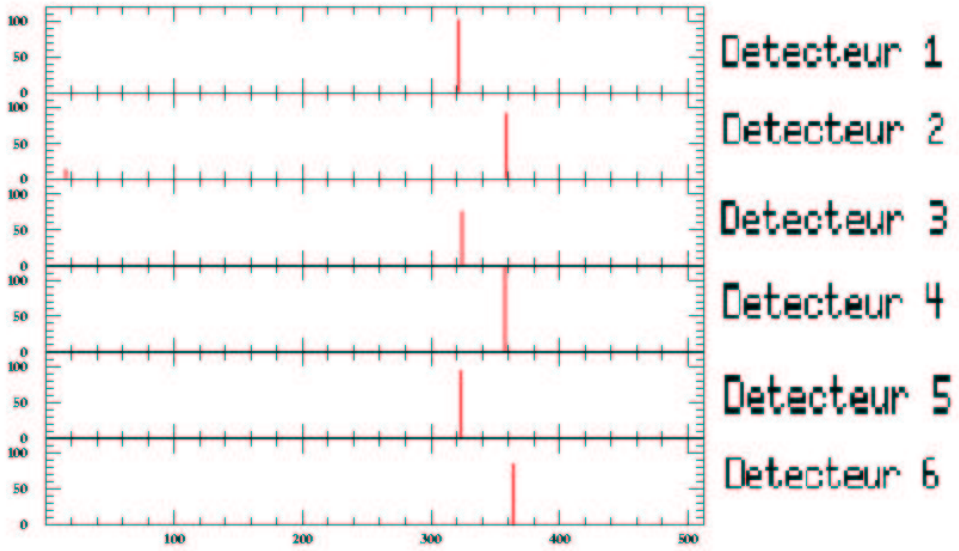

Figure 4.17 – Le signal des 512 pistes (en abscisse) des 6 détecteurs (en ordonnée) pour un événement "muon".

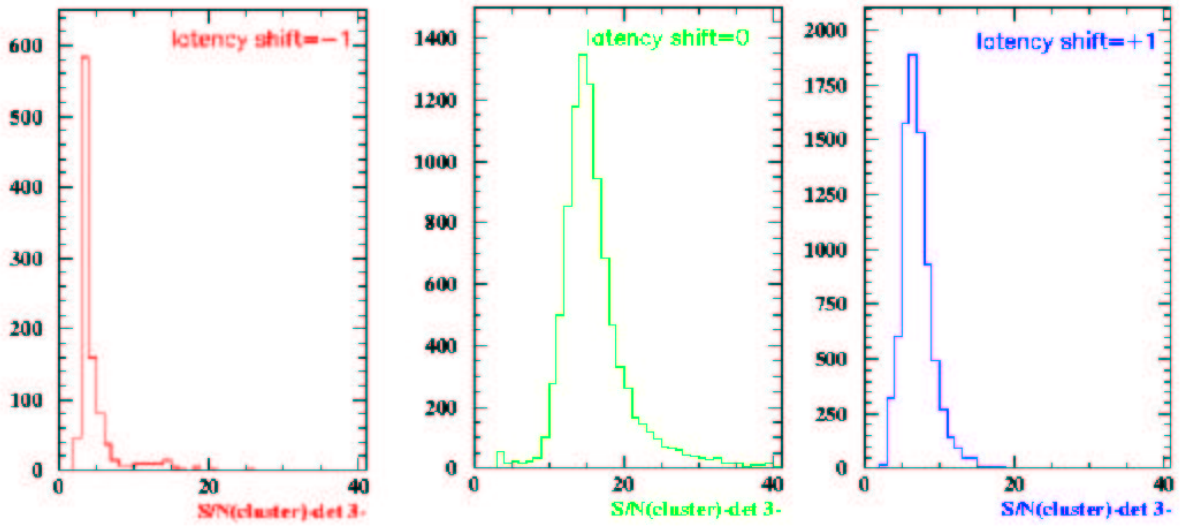

Figure 4.18 – Le rapport signal sur bruit (du détecteur 3) pour un déclenchement du système de lecture optimal (courbe au centre), pour un déclenchement 25 ns plus tôt (courbe à gauche) et pour un déclenchement 25 ns plus tard (courbe à droite).

Un délai mal réglé par rapport au passage de la particule entraîne une perte d'information et donc un rapport signal sur bruit plus faible (première et troisième courbes, figure 4.18).

4.4.5 Résultats

4.4.5.1 Etude du délai

Les courbes de délai (figure 4.19) montrent que le rapport signal sur bruit est maximum pour un délai de $\sim$ 75 ns. De plus, on observe une asymétrie des courbes de délai, ce qui traduit à la fois un couplage capacitif et un mauvais réglage de l'électronique de lecture dû à une mauvaise appréciation de l'influence de la température sur celle-ci. En effet, l'électronique de lecture avait été réglée pour une température différente de la salle de test. Mais étant donné la difficulté du réglage de ces paramètres et la courte période de temps de test sous ce faisceau, les détecteurs n'ont pas été reparamètrés.

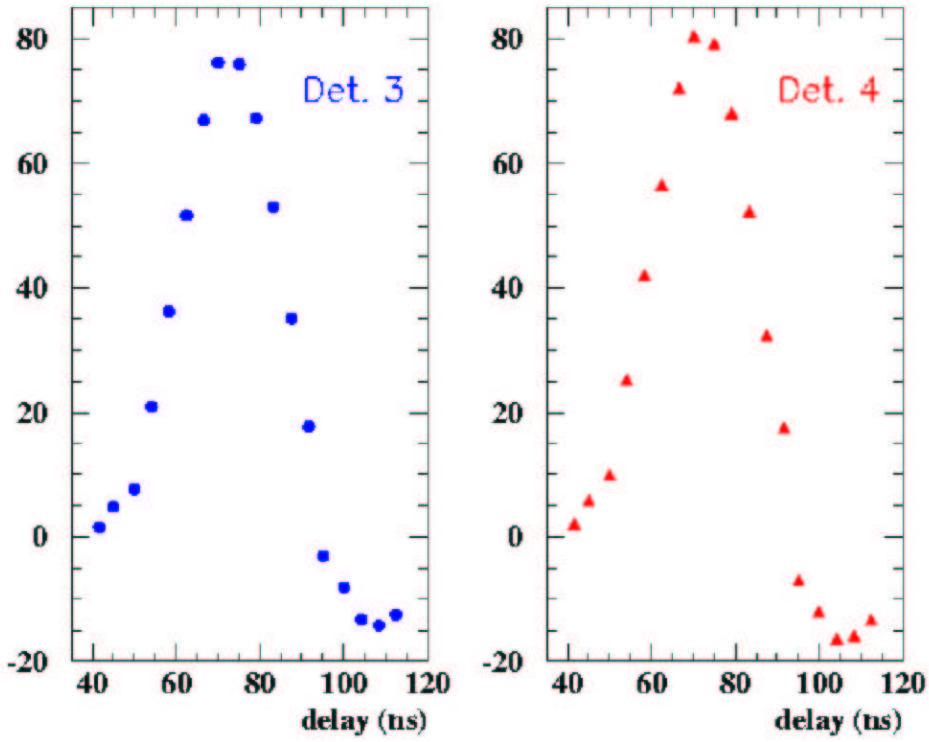

Figure 4.19 – Nombre moyen de coups ADC en fonction du délai pour le détecteur 3 (à gauche) et 4 (à droite).

De plus, on remarque un nombre moyen de coups ADC négatif ce qui semble difficilement explicable. En réalité, ceci est dû à la reconstruction du signal par l'algorithme

de déconvolution qui est très sensible aux paramètres internes des puces APV. Si ces paramètres ne sont pas parfaitement réglés, cet algorithme peut produire des résultats semblables à une injection de charge "négative" car le filtre "digital" responsable de la déconvolution est optimisé pour une réponse CR-RC parfaite à une impulsion de Dirac mais la réponse des préamplificateurs est d'impulsion bien plus large ($\sim$ 10-20 ns pour collecter la charge).

4.4.5.2 Etude de l'efficacité de reconstruction

Pour évaluer les performances d'un détecteur, on détermine son efficacité, $\epsilon_{3(4)}$ (équation 4.1), c'est-à-dire sa capacité à détecter le passage d'une particule.

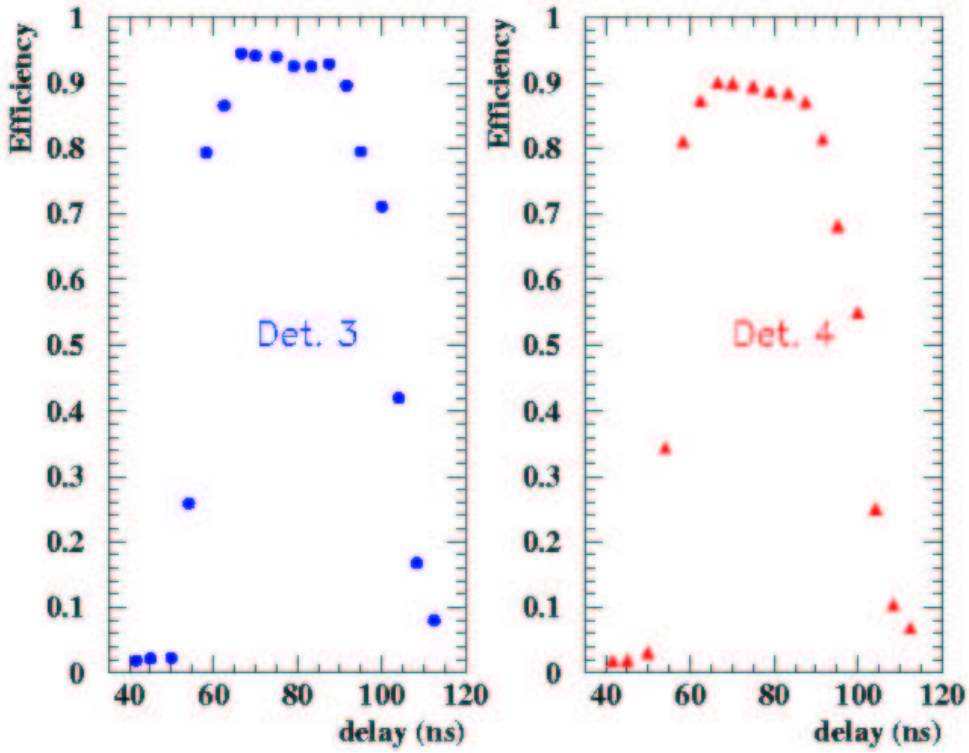

Figure 4.20 – Efficacité de recherche d'un amas en fonction du délai pour le détecteur 3 (à gauche) et 4 (à droite).

L'efficacité de reconstruction est du même ordre de grandeur pour le détecteur 4 que pour le détecteur 3 (figure 4.20). La perte d'efficacité s'explique par un algorithme d'alignement des détecteurs et de reconstruction des traces peu performant. De plus la différence d'efficacité de détection entre le détecteur 3 et 4 provient du fait que le détecteur 4 est légèrement incliné. D'autre part, le plateau d'efficacité à 95% est assez peu sensible au délai

(figure 4.20) et indépendant du type de sélection des amas. Cette largeur du plateau d'efficacité d'environ 25 ns pourrait conduire à l'empilement de données provenant de plusieurs croisements de faisceau et doit être réduite.

4.5 Conclusion

Au regard de ces tests, l'électronique de contrôle et d'acquisition se sont bien comportées sous un faisceau échantillonné à 25 ns. Mais le système de lecture nécessite que ses différents paramètres soient exactement réglés et chaque problème a été étudié, compris et résolu. Ces test ont d'autre part permis d'évaluer les performances des détecteurs silicium sous un faisceau échantillonné à 25 ns, similaire au faisceau du LHC. Et, ni les détecteurs silicium à micropistes, ni l'électronique associée n'ont subi de fortes dégradations dues au taux de radiation.

La conception des détecteurs à micropistes est une première étape pour l'expérience CMS. La deuxième étape consiste à produire et tester 15 200 de ces détecteurs.