CHAPITRE 3 Les détecteurs gazeux à micropistes de CMS

Conçus il y a une quinzaine d'années, les détecteurs gazeux à micropistes (MSGC) ont été utilisés comme détecteur de traces pour la première fois dans une expérience de physique des particules, NA12, en 1991 [ANG92]. Ces détecteurs ont également commencé à trouver des applications dans d'autres domaines de la physique comme l'astronomie [BUD91] et la radiologie [BAB95].

Une première version du trajectographe de CMS prévoyait d'inclure des MSGC sur une surface d'environ 120 m^2.

Après un bref historique et avoir rappelé le principe de fonctionnement des détecteurs gazeux, nous présenterons les détecteurs MSGC initialement prévus pour CMS. Enfin, nous détaillerons le dispositif de test sous faisceau à haute intensité que nous avons utilisé pour valider la technologie MSGC, laquelle était en concurence avec d'autres techniques jusqu'en 1999, et nous présenterons les résultats obtenus.

3.1 Historique

Le détecteur gazeux est l'un des plus anciens dispositifs de détection de particules ionisantes. Le premier, très populaire, était le compteur Geiger-Müller introduit en 1913.

Avec l'invention de la chambre proportionnelle multi-fils (MWPC) en 1968 par G. Charpak et son équipe au CERN [CHA68], ces types de détecteurs ont trouvé de nouvelles applications dans le domaine de la physique des hautes énergies. Les MWPC sont composées d'une série de fils métalliques parallèles, les anodes, mis à la masse et placés entre deux plans cathodiques portés à un potentiel négatif. Bien adaptés à la détection de particules chargées, ces détecteurs sont également utilisés pour des applications en imagerie X et gamma. Néanmoins, leur temps de réponse relativement élevé ($\sim$ 500 ns) et leur limitation en résolution spatiale ($>$ 200 μm) ont fait obstacle à une utilisation soutenue en physique des particules avec la mise en service des collisionneurs à haute intensité.

L'utilisation de la photolithographie[(1)] pour la fabrication des pistes a permis de diminuer la taille des anodes d'un facteur de 10 à 100 ainsi que le pas entre les anodes (100-200 μm au lieu de 1 mm) et ainsi de concevoir les MSGC (détecteurs gazeux à micropistes). Depuis l'invention du détecteur MSGC en 1988 à l'Institut Laue-Langevin de Grenoble par A. Oed [OED92], les détecteurs MSGC ont fait l'objet de nombreux tests en laboratoire et en faisceaux afin d'améliorer leurs performances pour l'expérience NA12 [ANG92], pour la chambre à échantillonnage temporelle de TESLA, avec des MSGC à double GEM pour COMPASS ainsi que les MSGC+GEM anciennement prévues pour HERA-B et CMS [SAU98] [MAC97].

3.2 Les détecteurs gazeux à micropistes (MSGC)

3.2.1 Raisons de l'utilisation des détecteurs gazeux à micropistes au LHC

Une des difficultés expérimentales majeures du LHC est représentée par l'empilement de 25 événements (lié à la forte luminosité du LHC) pour un seul événemnt intéressant. Dans l'optique de l'utilisation des MSGC comme détecteur de traces auprès du LHC, ces détecteurs doivent répondre aux exigences suivantes :

- un temps de réponse rapide, de l'ordre de 50 ns afin de ne pas intégrer le signal des détecteurs sur trop de croisement, de faisceaux (un croisement toutes les 25 ns au LHC contre un toutes les 22,5 μs au LEP) ;
- une granularité très fine permettant de reconstruire précisèment toutes les traces des 25 événements empilés : les MSGC devraient permettre de reconstruire pratiquement 100 % des traces avec une résolution de $\sim$ 40 μm dans le plan transverse ;
- une bonne résistance aux radiations permettant de conserver les performances tout au long des 10 à 15 ans de fonctionnement du LHC (voir partie 3.4) ;
- une faible quantité de matériau utilisé pour présenter le moins de matière possible le long de la trajectoire des particules pour de ne pas perturber la mesure de l'énergie faite par le calorimètre électromagnétique.

Un autre argument en faveur des MSGC est leur faible coût en comparaison avec celui des détecteurs silicium à micropistes [LOI].

3.2.2 Description

Sur un substrat isolant (figure 3.1) de quelques centaines de micromètres d'épaisseur, on dépose alternativement des anodes et des cathodes (d'une longueur pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres). Les anodes, d'une dizaine de micromètres de large, sont

[1]procédè utilisée pour la mise au point des masques de circuits imprimés.

espacées d'environ 200 μm, les cathodes ont une centaine de micromètres de large. Un plan de dérive placé à quelques millimètres au-dessus du plan des pistes définit le volume actif dans lequel circule le gaz.

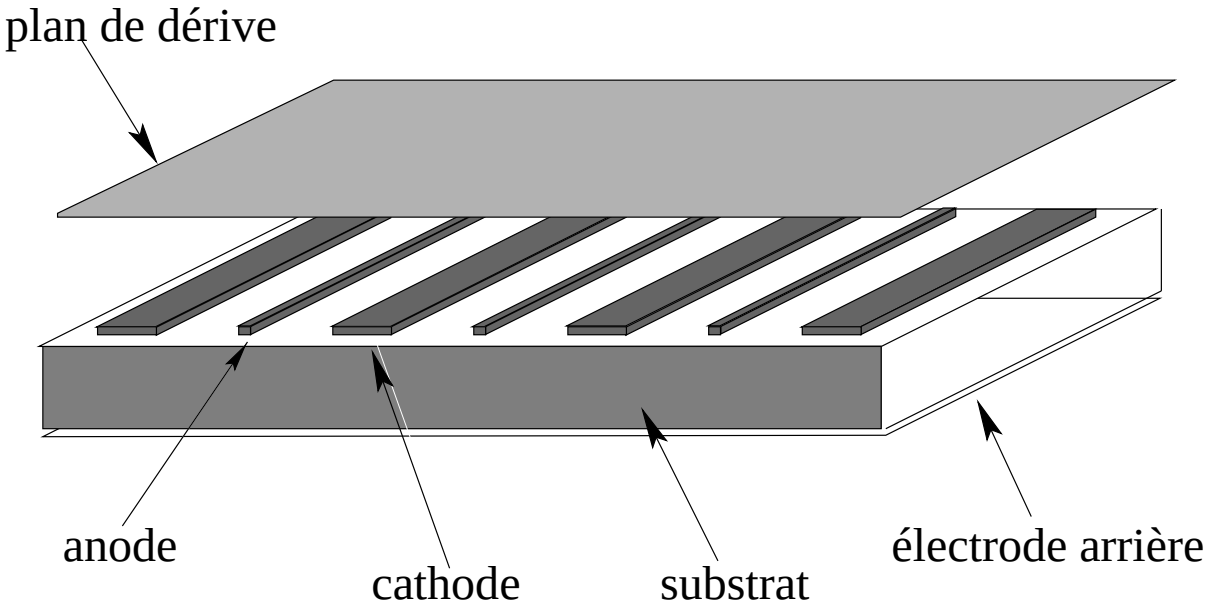

Figure 3.1 – Coupe d'une MSGC.

La face arrière du substrat peut être métallisée et généralement mise à un potentiel de 0 V. Les anodes sont reliées à la masse tandis que les cathodes et le plan de dérive sont portés à un potentiel négatif. Excepté au voisinage des pistes, les lignes de champ (crées par ces différences de potentiel) sont parallèles et le champ électrique est uniforme (figure 3.2).

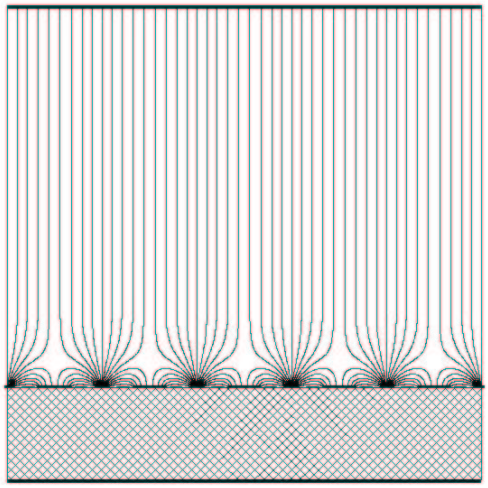

Figure 3.2 – Lignes de champ dans une MSGC.

3.2.3 Principe de fonctionnement

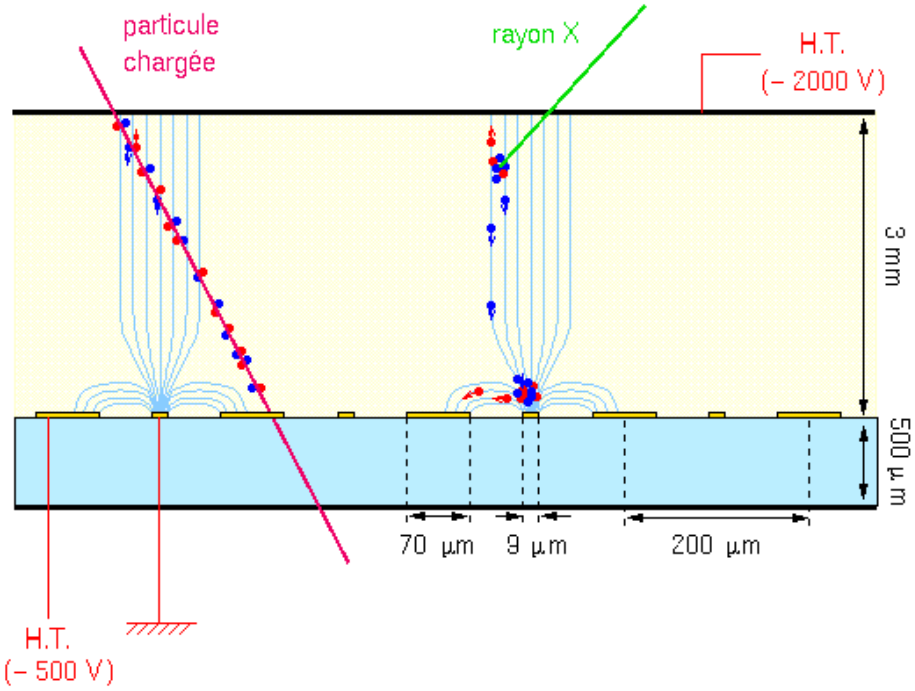

Figure 3.3 – Coupe d'une MSGC d'un substrat de 500 μm, d'anode de 9 μm de large, de cathodes de 70 μm et espacées de 200 μm.

Lorsqu'une particule chargée traverse une MSGC (voir figure 3.3), elle dépose une partie de son énergie le long de sa trajectoire, principalement par ionisation des molécules de gaz. Sous l'action du champ électrique (de quelques kV/cm), les ions positifs dérivent vers les cathodes (en quelques dizaines de nanosecondes) alors que les électrons dérivent vers les anodes (en quelques centaines de picosecondes).

A quelques dizaines de micromètres des électrodes, le champ est suffisamment intense (plusieurs centaines de kV/cm) pour initier une avalanche électronique (en quelques nanosecondes). Le déplacement des charges ainsi créées provoque un courant induit, à 10% par les électrons et à 90% par les ions [TkTDR98], sur les anodes pour être lu par l'électronique de lecture. La résolution spatiale obtenue est de l'ordre de 40 μm, et environ 80% du signal total produit par une avalanche sur l'anode est induit dans les 50 premières nanosecondes qui suivent l'avalanche [BEL94].

On définit le gain comme le rapport entre le nombre d'électrons collectés sur les anodes et le nombre d'électrons primaires produit le long de la trajectoire de la particule.

3.2.4 Effets des radiations

Dans le trajectographe de CMS, les MSGC devaient supporter à la fois un flux élevé de particules au minimum d'ionisation (MIPs) de $10^4 Hz.mm^{-2}$ ainsi qu'un flux plus faible (quelques $Hz.mm^{-2}$) de particules hautement ionisantes (HIPs). Les HIPs sont des particules produites par réactions nucléaires des hadrons sur les matériaux du trajectographe. Ces HIPs peuvent produire jusqu'à 1000 fois plus d'ionisation dans le gaz qu'une MIP et déclencher des décharges entre les électrodes, pouvant endommager les MSGC, l'énergie libérée étant suffisamment importante pour vaporiser le métal des anodes.

Ces décharges peuvent endommager les anodes parfois jusqu'à la coupure totale. Mais elles peuvent aussi entraîner des dépôts métalliques sur les cathodes et sur le substrat, des altérations du mélange gazeux (formation de polymères) ainsi qu'une accumulation de charges dans le substrat (la polarisation). Toutes ces détériorations se traduisent par une diminution irréversible de l'intensité du gain.

Toutes les caractéristiques d'une MSGC doivent donc être soigneusement choisies en tenant compte des effets néfastes dus aux radiations.

3.2.5 Choix du gaz

Le phénomène d'avalanche peut se produire dans tout mélange gazeux. Ce mélange doit cependant satisfaire certaines exigences pour le développement du signal :

- un nombre d'électrons primaires élevé pour réduire les fluctuations du signal ;
- une vitesse de dérive des électrons élevée pour permettre une collection rapide du signal ;

- un gain suffisamment élevé (dépassant 1000) pour obtenir une bonne efficacité de détection (figure 3.4) ;
- une diffusion transverse modérée pour obtenir une bonne résolution spatiale ;
- une faible émission de photons UV (par désexitation radiative) pour éviter l'apparition de décharges.

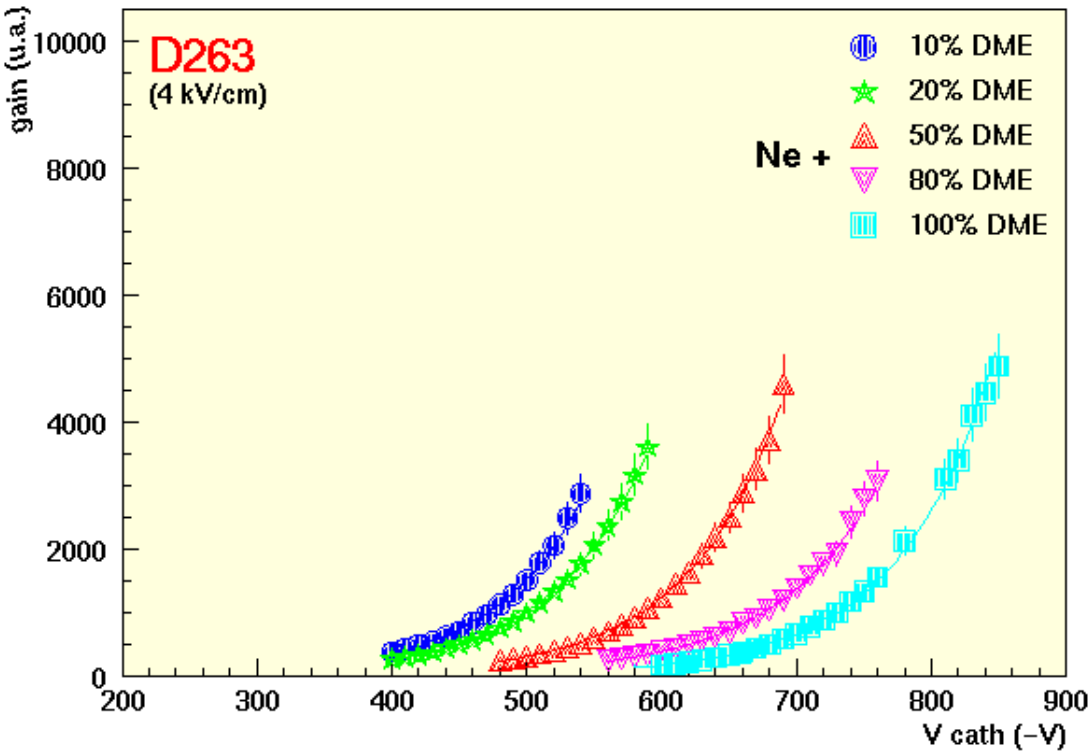

Figure 3.4 – Variation du gain en fonction de la tension cathodique d'une MSGC pour différents mélanges gazeux [MAC97].

Le mélange composé de 1/3 de DME (diméthyléther) et de 2/3 de néon semble un bon compromis à l'égard de ces exigences pour les MSGC de CMS. Le néon est un gaz rare qui émet peu de photons UV mais produit peu d'électrons primaires. Par contre, le DME produit un nombre élevé d'électrons primaires. En plus, le DME absorbe très bien les photons UV (c'est un gaz dit "quencher") et est très peu polymérisable, ce qui limite le phénomène de vieillissement du gaz.

Mais le désavantage majeur du DME est son incompatibilité avec certains matériaux employés dans la construction des détecteurs et des circuits d'alimentation en gaz. Par exemple, le DME est susceptible de réagir avec le téflon et de former des éléments

électronégatifs à base de fluor, très néfastes pour le fonctionnement des MSGC [BOU02]. Dès lors, le choix des composants d'une MSGC devient crucial.

3.2.6 Choix des tensions

Pour minimiser le temps de réponse de la MSGC, on applique une forte tension ($\sim$ -1200 V) au plan de dérive, ce qui entraîne une migration rapide des charges vers les pistes alors peu influencée par le champ magnétique de l'aimant de CMS. Néanmoins lorsque le champ de 4 T de l'aimant de CMS n'est plus parallèle au champ électrique, la trajectoire des charges fait un angle α_L, appelé angle de Lorentz, avec la direction des lignes de champ. Cet angle entraîne la dégradation des performances des MSGC (essentiellement la résolution) [ANG94]. Une inclinaison maximum de $3{,}6^0$/Tesla (pour 10 kV/cm) des MSGC permet de compenser les effets du champ magnétique de 4T et de retrouver les résolutions et efficacités mesurées en l'absence de champ magnétique [TkTDR98].

Le choix de la tension appliquée aux cathodes ($\sim$ quelques centqines de volts) est un compromis entre un faible taux de décharges et un fort gain.

3.2.7 Choix du substrat

Le choix du substrat des MSGC est essentiel pour assurer des performances stables à long terme sous haut flux de radiations. Les qualités recherchées pour ce substrat sont :
- un excellent état de surface pour assurer une bonne adhésion du métal des pistes ;
- une résistivité de surface modérée ($\simeq 10^{16}\ \Omega cm^{-2}$) pour limiter l'accumulation de charges à la surface de ce substrat ;
- une épaisseur et une densité suffisamment faible pour minimiser la perte d'énergie et la diffusion multiple des particules lorsqu'elles le traversent ;
- une bonne résistance mécanique ;
- un faible coût compte tenu du nombre élevé de modules de détection.

Mais les verres généralement utilisés ont une résistivité de $\simeq 10^{18}\ \Omega cm^{-2}$. Par contre, le dépôt d'une fine couche de matériau très légèrement conducteur permet d'obtenir la résistivité souhaitée mais une tension plus élevée doit être appliquée pour conserver le même gain (figure 3.5).

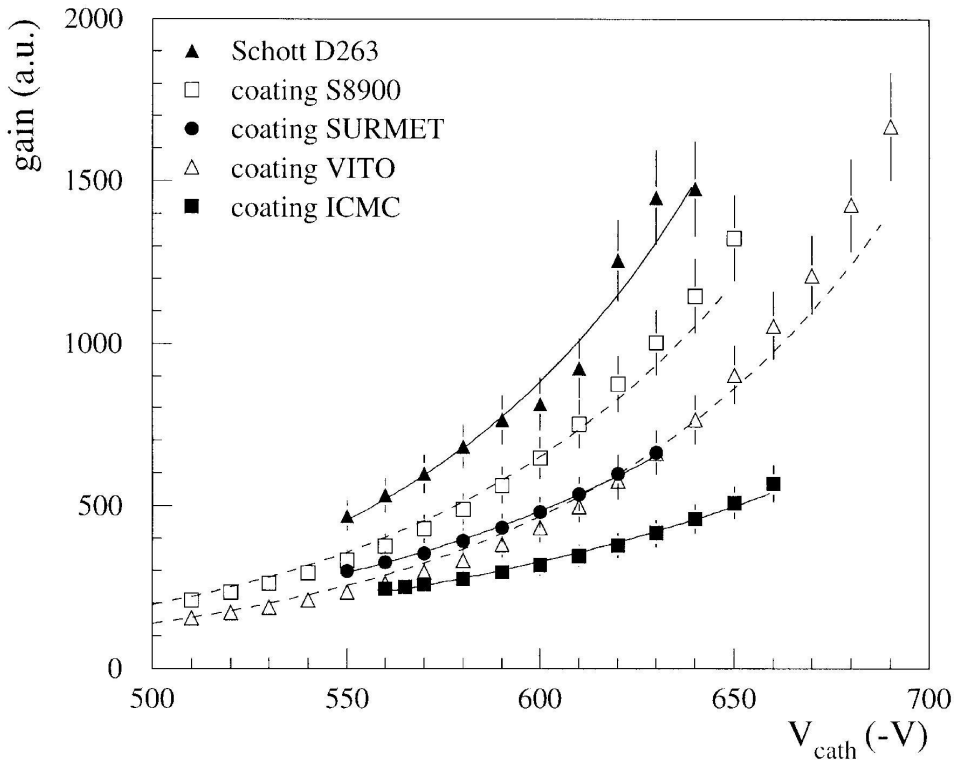

Figure 3.5 – Influence du dépôt de différents types de couche semiconductrice (coating S8900, coating SURMET, coating VITO, coating ICMC) ou aucune couche semiconductrice (Schott D263) en fonction du gain [MAC99].

Le choix de CMS est un substrat en verre D263 de 300 μm d'épaisseur recouvert d'une couche de $\sim$ 1 μm de verre semiconducteur de Pestov (verre fortement dopé au Fer).

3.2.8 Métallisation des pistes

Les qualités recherchées pour le métal des pistes sont :
- un métal faiblement résistif ($\leq 40\Omega cm^{-1}$) pour une propagation rapide et efficace des charges vers l'électronique ;
- une absence de réactivité en contact du mélange gazeux utilisé.

Le choix de CMS s'est donc porté sur une couche de 0,6 μm d'or (40 Ωcm^{-1}). Une fine couche de Nickel-Chrome assure l'adhésion des pistes sur substrat. Mais ce choix n'empêche pas la détérioration des pistes (figure 3.7) lors de fortes décharges (paragraphe 3.2.4).

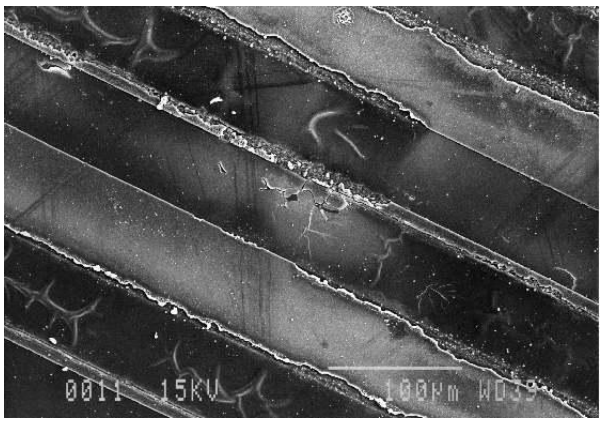

Figure 3.6 – Photographie au microscope électronique des pistes d'une MSGC avant une décharge.

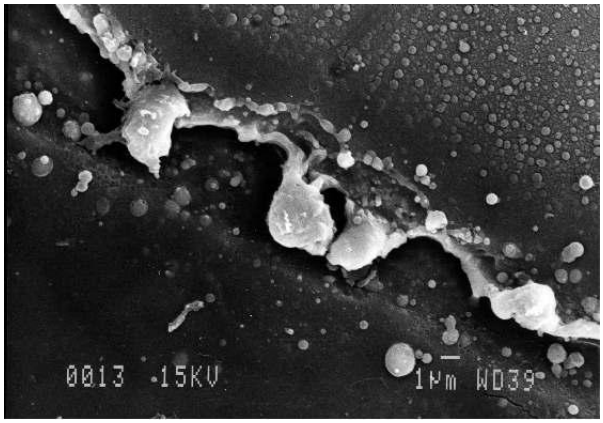

Figure 3.7 – Photographie au microscope électronique du bord d'une cathode après une décharge.

Pour limiter ces décharges, une première solution consiste à modifier les lignes de champ près des pistes grâce à une nouvelle géométrie, principalement aux extrémités et au bord des pistes [MAC97]. On peut aussi déposer une fine couche protectrice de matériau diélectrique, cette technique est appelée passivation.

Une autre solution réside dans l'utilisation d'une grille de préamplification (GEM) placée entre le substrat et le plan de dérive. Cette GEM a été introduite par F. Sauli et son équipe du CERN en 1997.

3.2.9 Avantages à l'utilisation d'une GEM

Une grille GEM (Gas Electron Multiplier) est une feuille de Kapton de 50 μm d'épaisseur, métallisée sur ses deux faces et percée de trous espacés d'un pas d'environ 200 μm (figure 3.8).

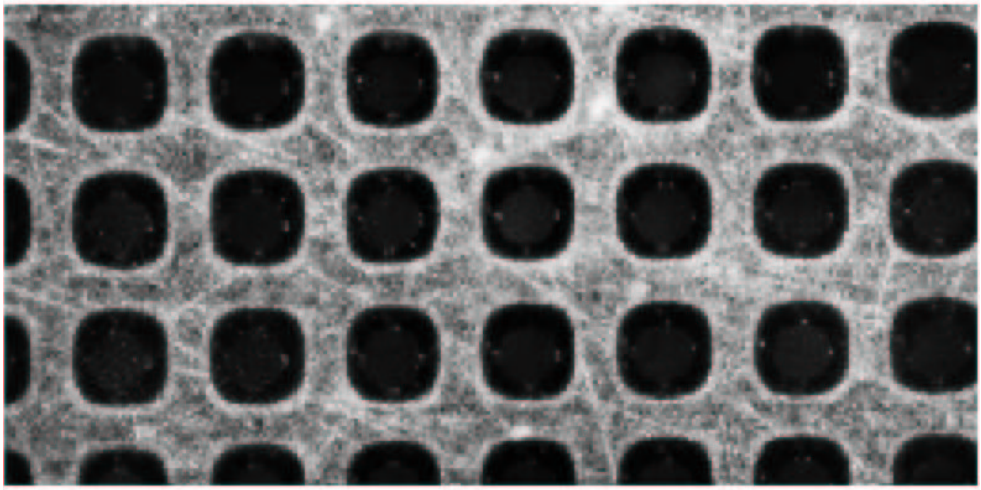

Figure 3.8 – Photographie d'une GEM.

L'application d'une différence de potentiel entre les deux faces de la grille GEM engendre un champ électrique (d'environ 50 kV/cm) dont les lignes de champ convergent dans les trous de la grille GEM (figure 3.9) et permettent une première amplification.

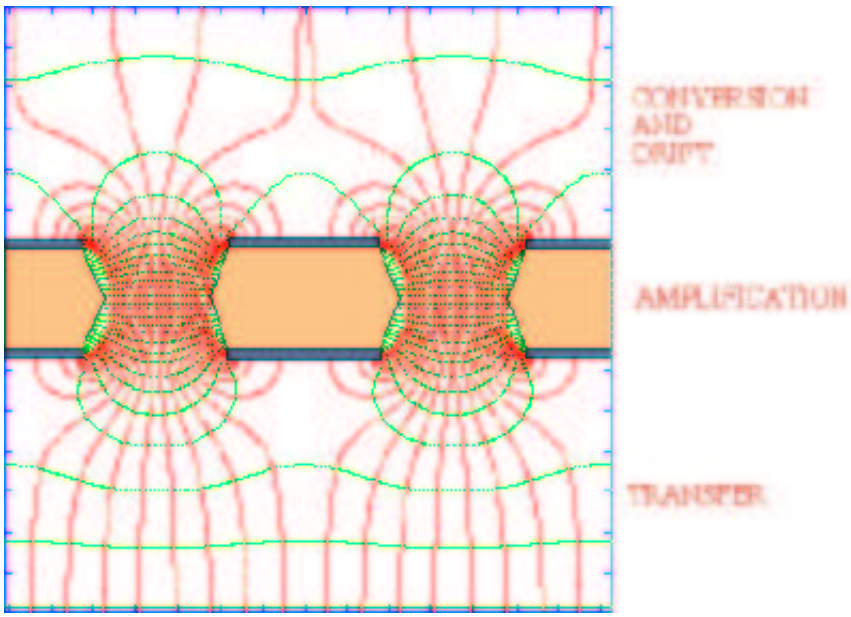

Figure 3.9 – Lignes de champ dans une GEM.

Grâce à l'utilisation de la GEM dans une MSGC (figure 3.10), l'amplification a lieu à la

fois au niveau des trous de la GEM et au niveau des pistes du détecteur MSGC.

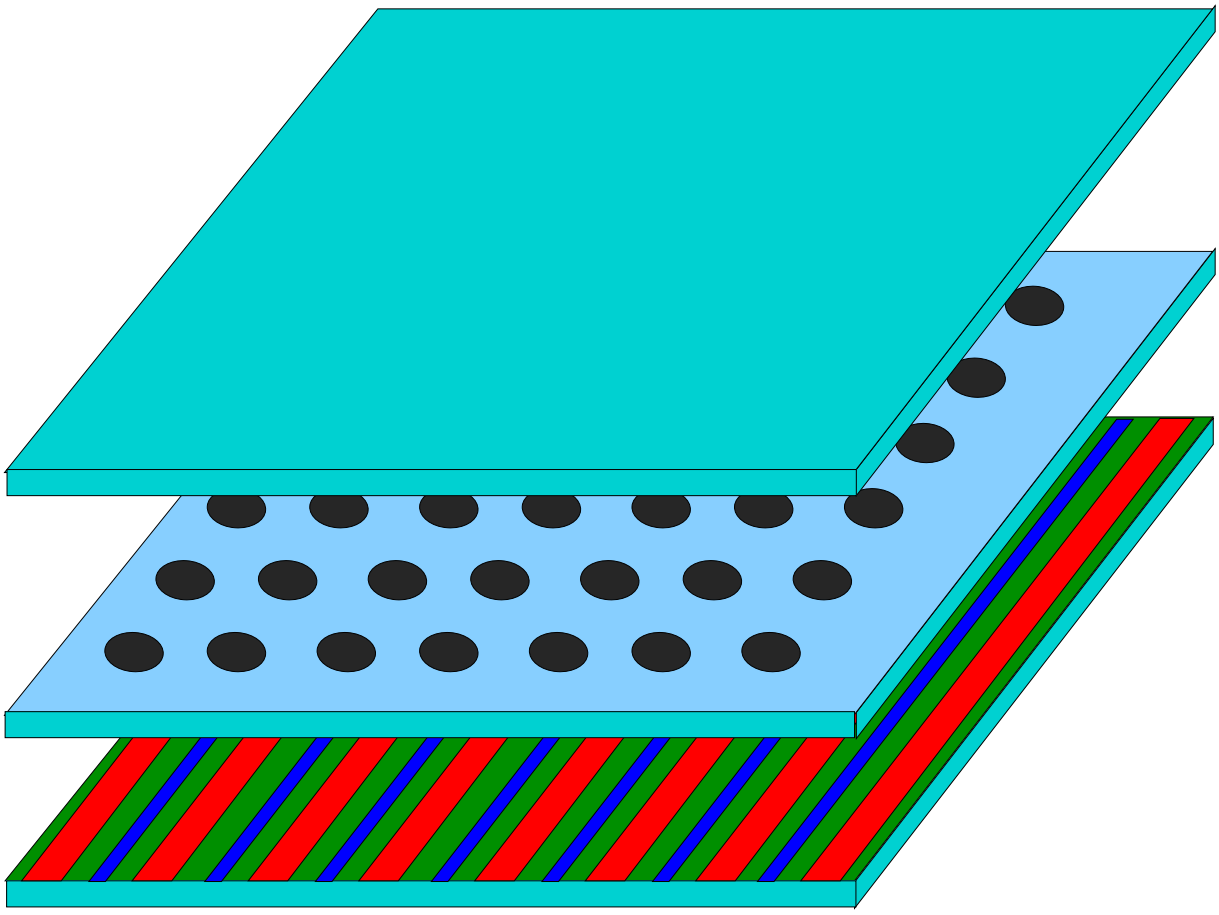

Figure 3.10 – Coupe d'une MSGC + GEM : du haut vers le bas, on a le plen de dérive, puis la GEM puis le substrat où les pistes sont déposées.

Cette double amplification permet de diminuer le champ au niveau des pistes, et donc les décharges, tout en gardant le même gain global et le même rapport signal sur bruit (figure 3.11). De plus, la présence de cette grille GEM ne détériore pas la résolution spatiale obtenue de 45 μm [BRO98]. Mais on observe un temps de réponse de 30 ns plus important dans une MSGC+GEM que dans une MSGC seule, ce qui est dû à une zone de dérive plus importante (5 mm au lieu de 3 mm dans les MSGC).

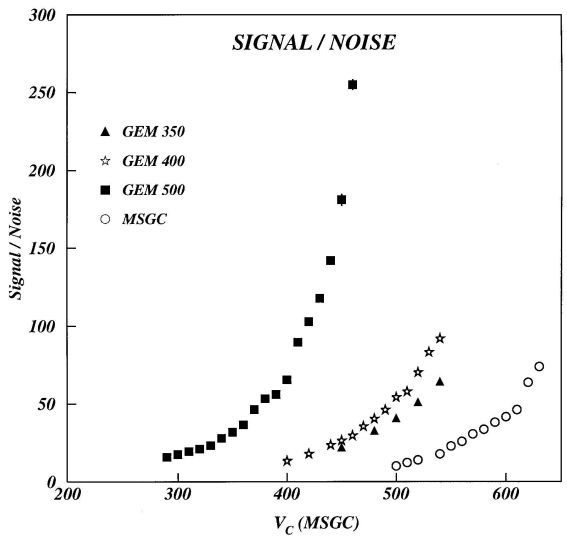

Figure 3.11 – Mesure du rapport signal sur bruit en fonction de la tension cathodique avec et sans GEM (avec différentes tensions d'alimentation) [BRO98].

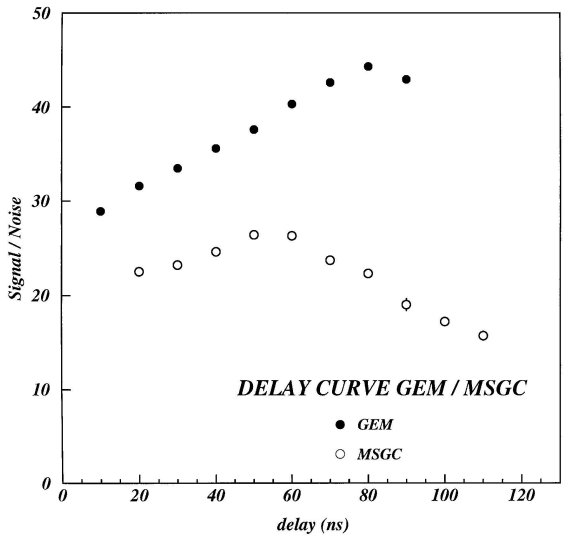

Figure 3.12 – Mesure du rapport signal sur bruit en fonction du temps de réponse avec et sans GEM (avec différentes tensions d'alimentation) [BRO98].

3.3 Les MSGC+GEM du trajectographe avant de CMS

3.3.1 Le trajectographe avant de CMS

L'ancienne version du trajectographe avant de CMS (avant décembre 1999) était composé de deux bouchons, chacun composé de onze disques (figure 3.13). Chaque disque était divisé en quatre couches concentriques et chacune de ces couches était constituée de douze à quinze modules MSGC. Chaque module est composé de quatre substrats MSGC (figure 3.14) dont les pistes sont perpendiculaires au faisceau et parallèles aux lignes du champ magnétique de l'aimant de CMS.

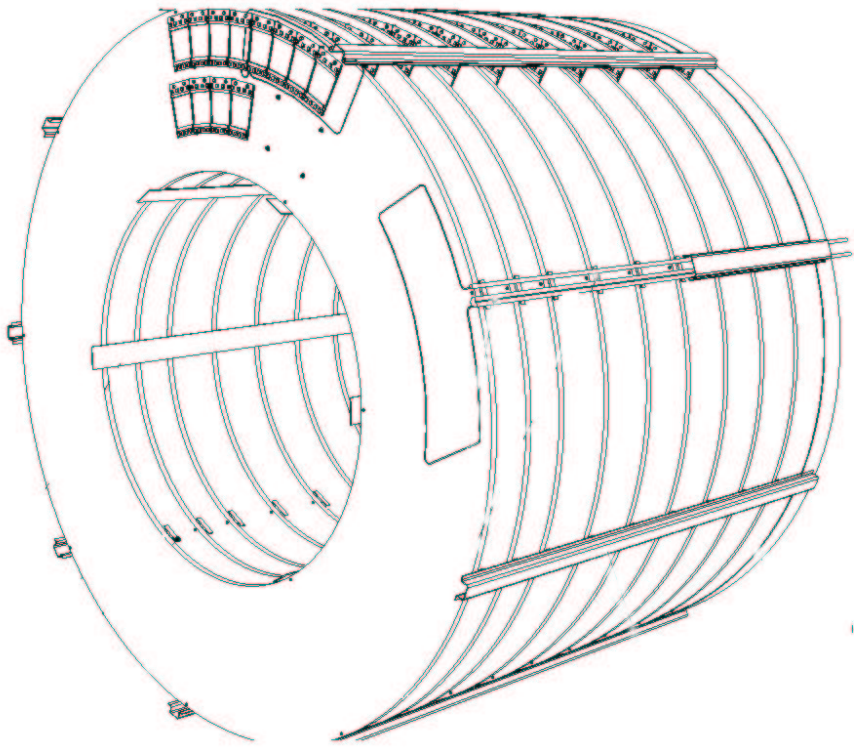

Figure 3.13 – Les 11 disques d'un des bouchons du trajectographe avant de CMS (avant 2000), chaque disque étant divisé en quatre couches concentriques mais dont seules deux sont représentées ici [TkTDR98].

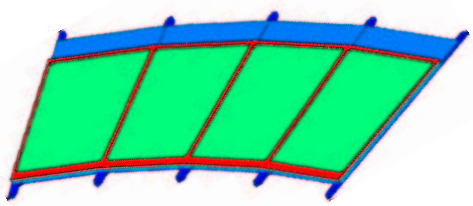

Figure 3.14 – Le module MSGC du trajectographe avant de CMS [TkTDR98].

Les couches deux et trois sont composées de modules MSGC simple face qui mesurent les coordonnées z et ϕ avec une résolution de 40 μm. Les couches un et quatre sont composées

de modules MSGC double face, deux détecteurs montés dos à dos avec un angle de 50 mrad, qui mesurent les coordonnées z, ϕ et r avec une résolution de 1 mm en z.

3.3.2 Les MSGC+GEM

Les MSGC+GEM prévues pour le trajectographe avant de CMS ont les caractéristiques suivantes :

- un substrat trapézoïdal en verre D263 de 300 μm d'épaisseur recouvert d'une couche semiconductrice de verre Pestov de $\sim$ 1 μm d'épaisseur ;
- 512 anodes (entre 7 et 10 μm de large) et 513 cathodes ($\sim$ 90 μm de large) en or de 0,6 μm d'épaisseur et de longueur variant entre 8,7 et 14,5 cm ;
- la grille GEM (à 2 mm au-dessus du substrat) est une feuille de kapton métallisé avec de fines couches de nickel-cuivre de 18 μm d'épaisseur, percée avec des trous de 100 μm de diamètre et espacés de 200 μm ;
- un plan de dérive (à 3 mm au-dessus de la GEM) en aluminium de $\sim$ 25 μm d'épaisseur ;
- un mélange gazeux composé à 1/3 de néon et à 2/3 de DME ;
- des cathodes alimentées par groupe de 16 via une résistance de 1 $M\Omega$;

De plus, pour conserver un gain constant le long des pistes d'un substrat trapézoïdal (figure 3.15), le pas (P en μm) entre les anodes et le pas anode-cathode (G en μm) doivent satisfaire la relation "de Nikhef" [TP94] : $G = P/8 + 20$.

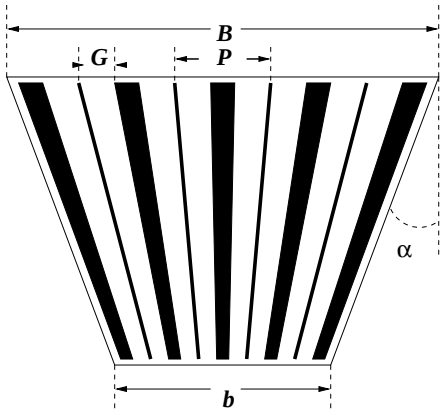

Figure 3.15 – Schéma d'un substrat MSGC trapézoïdal [TkTDR98].

3.3.3 Le système de lecture (du test MF2)

Les signaux de chaque piste d'un détecteur sont lus et traités par un circuit électronique : le PreMux (figure 3.16). Chaque PreMux lit 128 pistes : le signal provenant d'une piste est

amplifié puis un échantillonneur transfert le signal à une fréquence entre 20 et 25 MHz. Le signal est gardé dans une mémoire analogique (ADB : Analogue Data Buffer) en attendant un signal du trigger de niveau 1 (T1) qui sélectionne l'événement, le signal échantillonné est ensuite traité et les signaux des 128 pistes sont multiplexés en un signal unique.

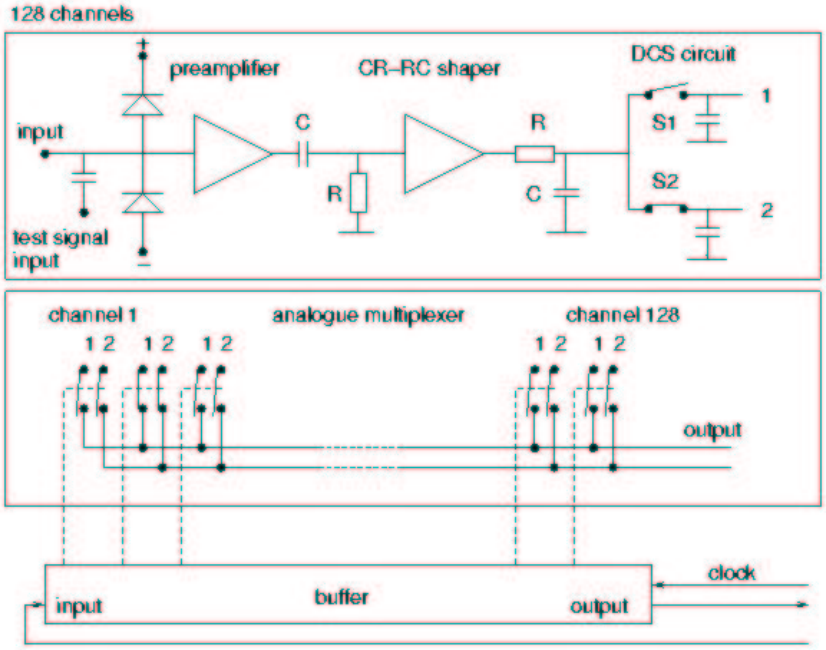

Figure 3.16 – vue schématique du fonctionnement du PreMux128.

Puis les sorties analogiques des PreMux sont multiplexées deux à deux grâce au MUX et transférées jusqu'au système d'acquisition.

3.4 Test sous faisceau : le test MF2

Dix-huit modules MSGC+GEM ont été placés sous un faisceau haute intensité au cyclotron du Paul Scherrer Institut à Villigen (Suisse) en novembre 1999, représentant une surface sensible de $0,72m^2$ ($\simeq 1\%$ de la surface totale initialement prévue). Ce test a permis de contrôler la résistance des pistes et de tester le comportement de ces modules dans les conditions du futur accélérateur LHC. Mais le but de ce test était avant tout de valider la technologie MSGC en vue de son intégration dans le trajectographe avant de CMS [TkTDR98].

3.4.1 Objectifs

Le but du test "milestone MF2" était de soumettre des MSGC équipées de leur électronique à un faisceau intense de pions de 350 MeV/c (proche des conditions du LHC), avant la production en masse des détecteurs. Les propriétés de ces détecteurs avaient déjà été étudiées lors des tests précédents mais leur résistance aux radiations n'avait pas encore été prouvée.

En particulier, la résistance aux radiations des pistes via la mesure du nombre de pistes coupées et du substrat via la mesure de la polarisation au début et en fin de test.

3.4.2 Faisceau du PSI

Le faisceau utilisé pour réaliser ce test est un faisceau de π^+ de basse impulsion (350 MeV/c) et de haute intensité. Ce faisceau produit un spectre d'énergie déposée dans une MSGC et un spectre de la charge d'ionisation des MSGC proche des conditions du LHC [HUH97].

Le faisceau est de forme gaussienne avec un étalement vertical de 90 mm et horizontal de 70 mm.

3.4.3 Dispositif expérimental

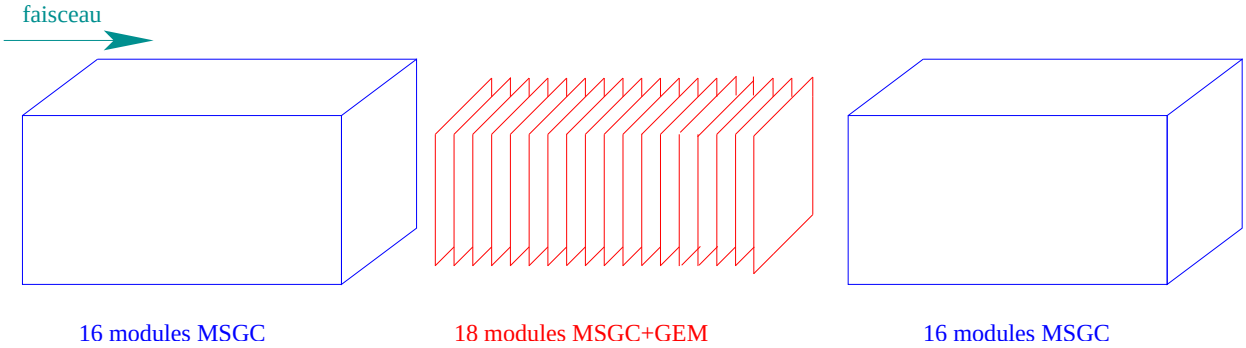

Figure 3.17 – Schéma des modules durant la campagne de test MF2.

Le faisceau traverse d'abord seize MSGC prévues pour le tonneau central du trajectographe de CMS avec un flux de $\sim$ 5,5 kHz/mm^2, puis dix-huit modules MSGC+GEM prévus pour le trajectographe avant de CMS (flux de $\sim$ 4 kHz/mm^2) et enfin seize autres MSGC prévues pour le bouchon central avec un flux de $\sim$ 1 kHz/mm^2 (figures 3.18 et 3.20). A titre comparatif, le flux attendu au LHC pour les MSGC les plus proches du faisceau est de 4 kHz/mm^2.

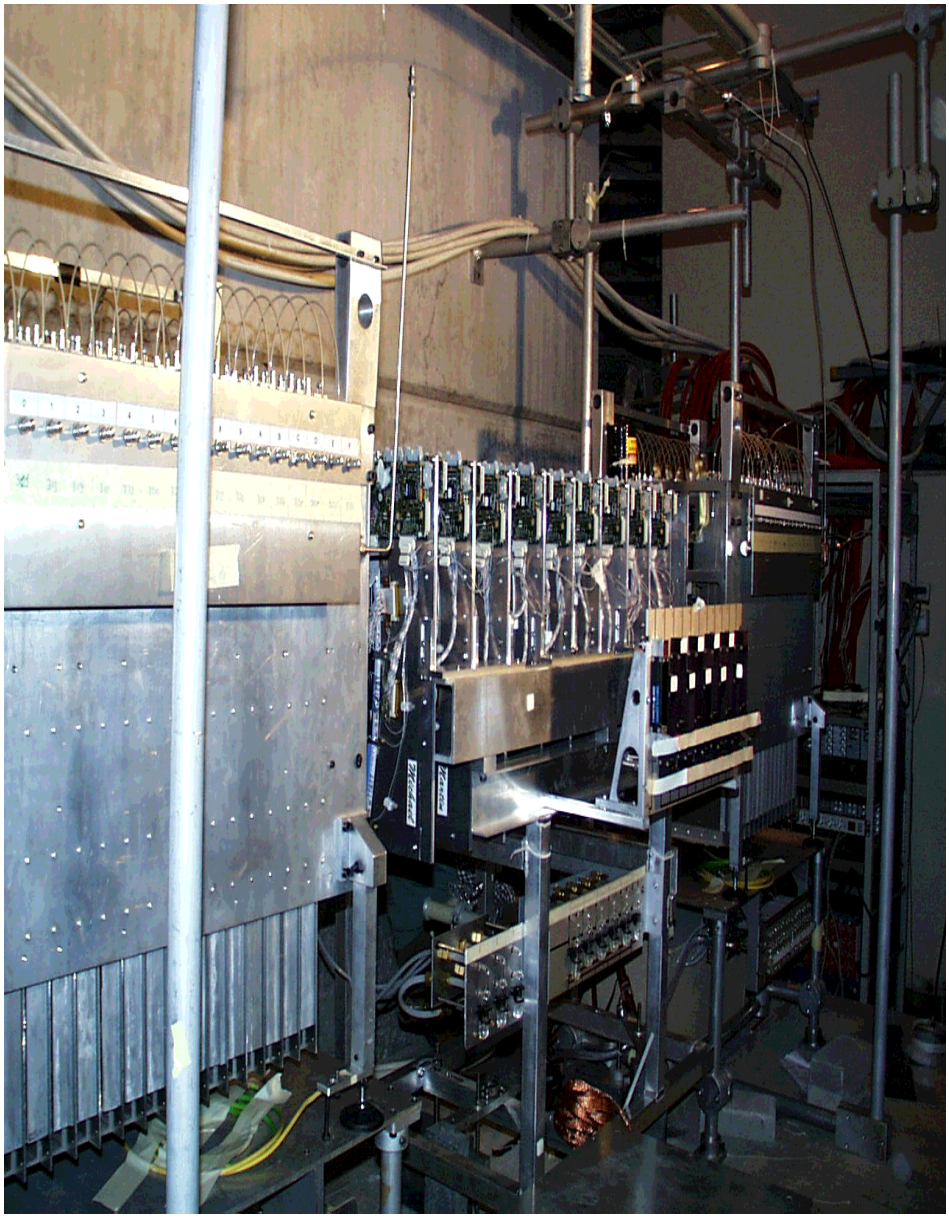

Figure 3.18 – Photographie de l'installation des modules non câblés au PSI.

Les modules MSGC+GEM du trajectographe avant (décrits partie 3.3.2) sont composés de 4 substrats trapézoïdaux sans couche semiconductrice, de 512 anodes longues de 10 cm et espacées de 200 μm du coté de la base la plus large (figure 3.15). Le mélange 2/3-1/3 néon-DME est partagé par les quatre substrats du module et est entièrement renouvelé toutes les 30 minutes (flux de 1 l/h). Les dix-huit modules sont montés par 2 dos à dos sur neuf supports en aluminium.

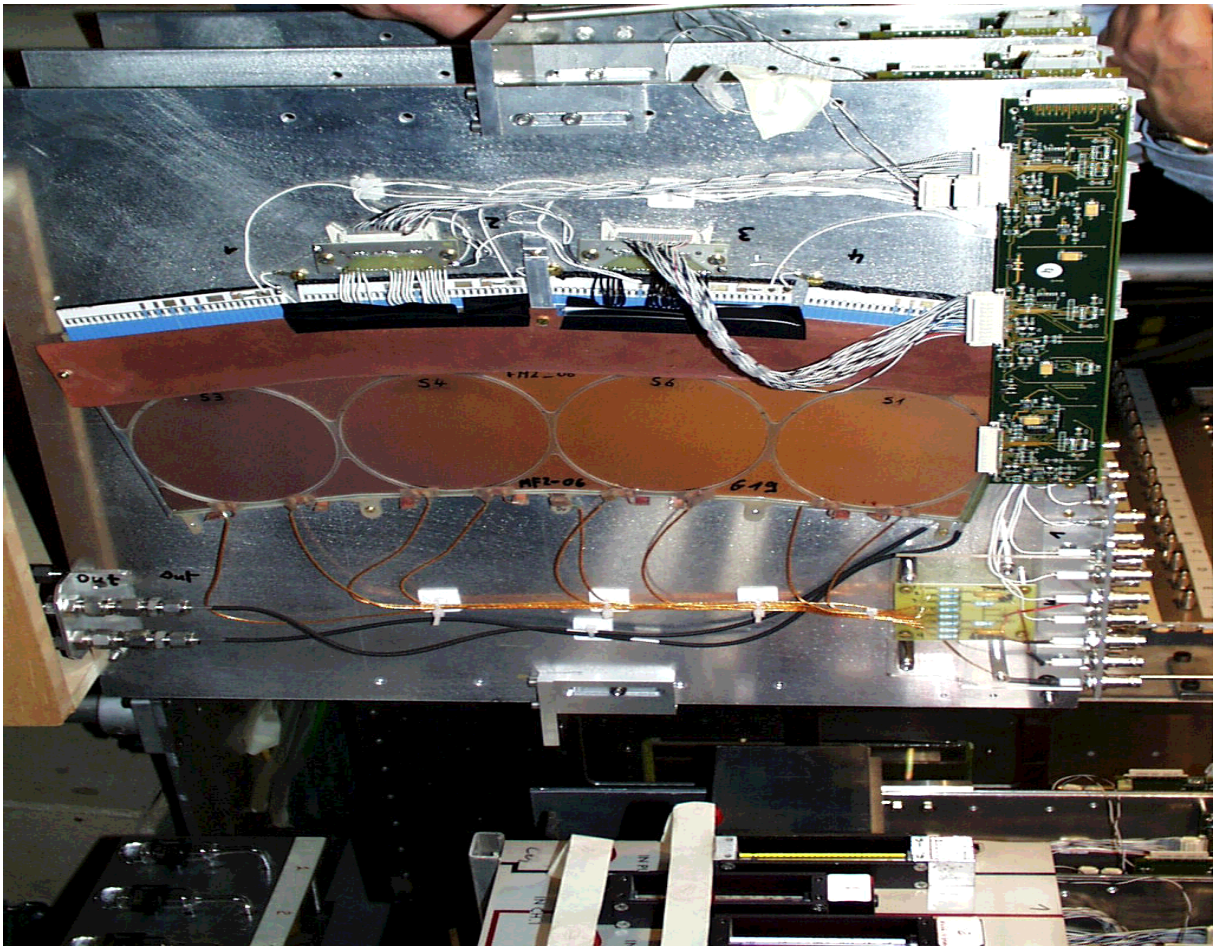

Figure 3.19 – Photographie des modules MSGC.

Compte tenu de l'étalement du faisceau, seuls les deux substrats centraux seront traversés par les particules et chacun équipés de quatre PreMux de 128 canaux. On aura donc un total de dix-huit modules représentant 36 substrats MSGC et 16 896 pistes dans le faisceau de pions du PSI.

Le système de déclenchement est constitué par des scintillateurs aux extrémités du banc de test. Ces scintillateurs donnent le flux de particules qui peut atteindre jusqu'à 10 kHz/mm^2 à haute intensité.

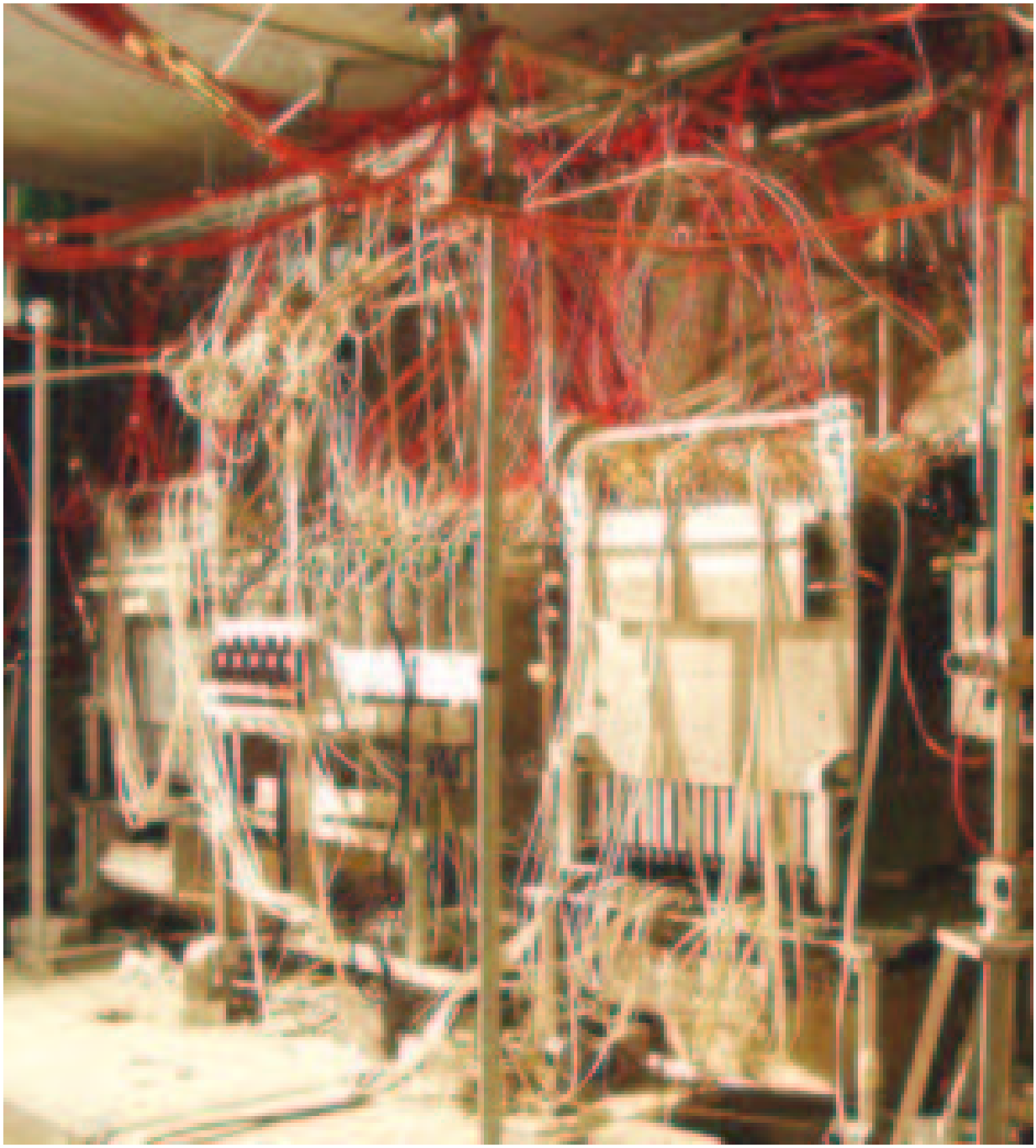

Figure 3.20 – Photographie de l'installation des modules câblés au PSI.

Les 5 semaines d'exposition au PSI ont été divisées en 4 phases :
- durant la 1ère phase de test, les modules ont été installés au cyclotron du Paul Scherrer

Institut (PSI) à Villigen (Suisse) ;
- les modules ont été conditionnés à haute intensité (HI) durant la 2ème phase, cette phase a permis de régler les différentes tensions pour pouvoir détecter plus de 98% des particules pour chacune des MSGC :
  - les tensions des cathodes varient entre -490 et -420 V,
  - la différence de tension au niveau de la GEM varie entre 320 et 410 V,
  - le champ entre la GEM et le plan des pistes varie entre 3,5 et 4,5 kV/cm,
  - le champ entre le plan de dérive et la GEM varie entre 3,5 et 4 kV/cm ;
- puis le test MF2 à haute intensité a duré 376 heures (troisième phase) ;
- et la 4ème phase a permis d'étudier les marges de sécurité, notamment les tensions maximales supportées par les détecteurs.

Durant les 376 heures du milestone MF2 (3ème phase), les dix-huit modules MSGC étaient sous un faisceau de haute intensité sauf lors des prises de données à basse intensité destinées à la calibration électronique des détecteurs (2 fois par jour). Ces prises de données à basse intensité permettaient de prendre des mesures de référence comme le piédestal et le gain des détecteurs à basse intensité et de vérifier leur stabilité d'une période sur l'autre.

3.4.4 Analyse des données

Les coupures sont choisises pour permettre une comparaison directe avec les précédentes études effectuées sous faisceau [BOU98] ainsi qu'avec les résultats déjà observés durant la première et deuxième période de la campagne de test.

3.4.4.1 Extraction du signal

3.4.4.1.1 Calcul du piédestal

Pour analyser les signaux propres à chaque piste, il est nécessaire de soustraire des données brutes la composante constante appelé piédestal de la piste, enregistré lors des prises de données à basse intensité.

Pour chaque piste i, on calcule la moyenne ($\overline{data_i}$) et l'écart-type (σ_{data_i}) des données brutes ($data_{i,k}$) sur tous les événements (k) de basse intensité de la demi-journée. Le piédestal d'une piste i (ped_i) est la moyenne arithmétique des données brutes recalculée sur les N événements de basse intensité en excluant les événements avec des données trop disparates (n événements) :

$$ped_i = \frac{1}{n}\Sigma_{k=1}^{n\leq N} data_{i,k} \text{ avec } -2\times\sigma_{data_i} < data_{i,k} - \overline{data_i} < 4\times\sigma_{data_i}$$

Bien que ce piédestal soit recalculé après chaque demi-journée (figure 3.21), il est resté stable tout au long du test MF2 avec moins de 0,01 $^0/_{00}$ de variation (figures 3.22 et 3.23).

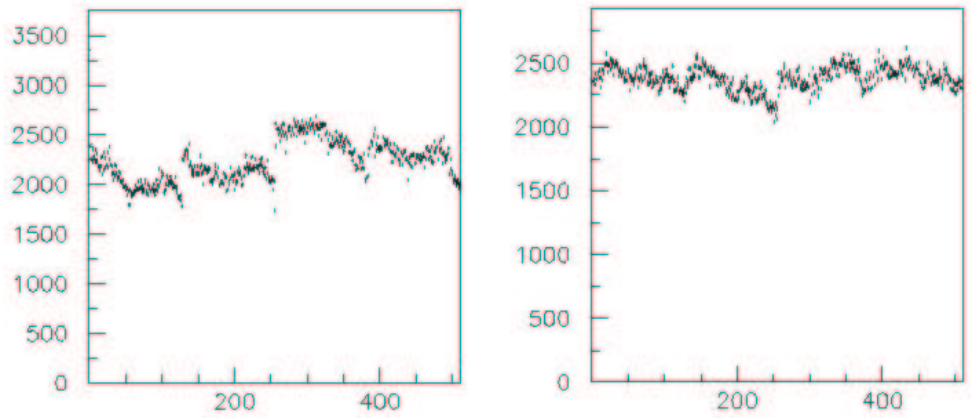

Figure 3.21 – Exemple de piédestal en nombre de coups ADC (en ordonnées) des 512 pistes (en abscisse) de deux modules MSGC.

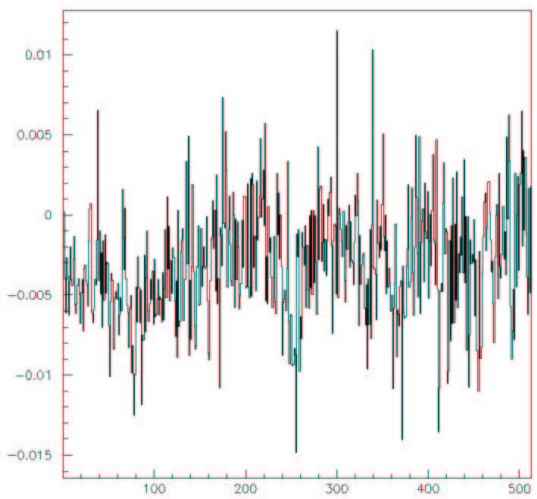

Figure 3.22 – Différence en nombre de coups ADC (en ordonnées) sur le piédestal des 512 pistes (en abscisse) d'une MSGC entre la prise de donnée basse intensité du matin et celle du soir.

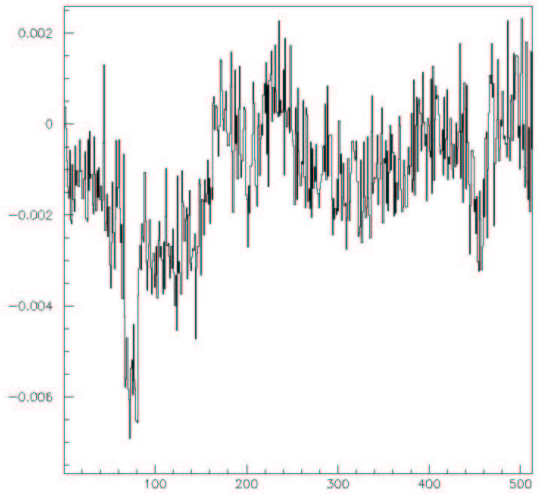

Figure 3.23 – Différence en nombre de coups ADC (en ordonnées) sur le piédestal des 512 pistes (en abscisse) d'une MSGC entre la première prise de donnée basse intensité de la troisième phase et la dernière 22 jours plus tard.

3.4.4.1.2 Calcul de la fluctuation du mode commun

Dans un premier temps, le signal ($S_{i,k}$) d'une piste i pour l'événement k est estimé par $S_{i,k} = data_{i,k} - ped_i$. Cette définition nous assure que le signal observé reste stable au cours

du temps (dans les même conditions de test) et que la valeur moyenne du signal reste proche de zéro. Cependant un décalage dans la ligne de base du signal, attribué aux fluctuations des générateurs de tension continue [FEZ96], peut apparaître sur chaque ensemble de 16 pistes (les cathodes sont alimentées par groupe de 16) ou sur chaque ensemble de 128 pistes d'un même PreMux (graphique de gauche de la figure 3.21), voire à l'ensemble des pistes d'un détecteur. Cette composante, nommée fluctuation du mode commun peut être estimée en calculant, événement par événement, la moyenne ($\overline{S_{j,k}}$) et l'écart-type ($\sigma_{S_{j,k}}$) des signaux appartenant à un même groupe j de 16 pistes voisines. La fluctuation du mode commun d'un groupe j de 16 pistes voisines ($CM_{j,k}$) est la moyenne arithmétique du signal recalculée pour les m pistes en excluant des 16 pistes voisines de celles ayant reçu du signal :

$$CM_{j,k} = \frac{1}{m}\Sigma_{i=1}^{m\leq j} S_{i,k} \text{ avec } S_{i,k} - \overline{S_{j,k}} < 2 \times \sigma_{S_{j,k}}$$

3.4.4.1.3 Extraction du signal et du bruit

Le signal ($S_{i,k}$) d'une piste i pour l'événement k est défini comme

$$S_{i,k} = data_{i,k} - ped_i - CM_{i\in j,k}$$

La moyenne du signal pour chaque piste i est nulle et l'écart-type (évalué par un ajustement gaussien) représente le bruit ($N_{i,k}$) de la piste (figure 3.24).

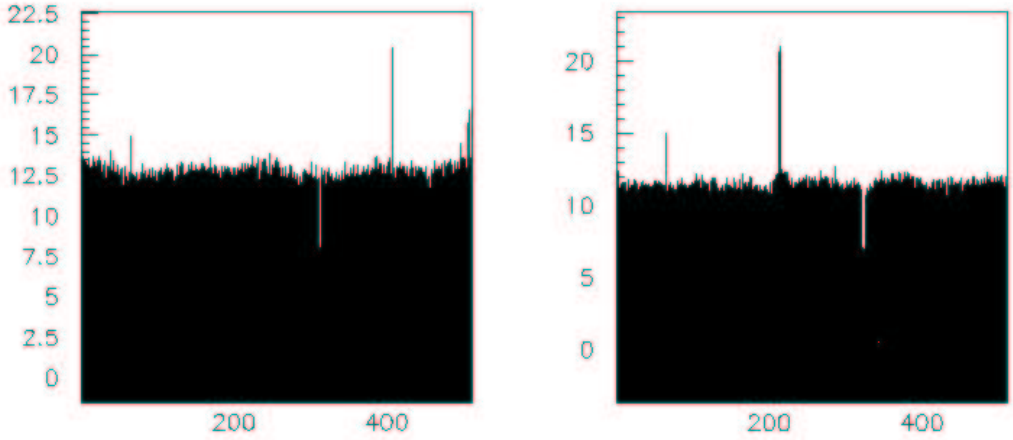

Figure 3.24 – Exemple de bruit en nombre de coups ADC (en ordonnées) des 512 pistes (en abscisse) de deux modules MSGC. On note la présence d'une piste bruyante (piste 402) et d'une piste morte (piste 328) pour le module de gauche et de deux pistes bruyantes (pistes 67) et de deux pistes mortes (pistes 311 et 312) pour le module de droite (paragraphe 3.4.4.3).

3.4.4.1.4 Construction des amas

Le passage d'une particule à travers une MSGC génère un signal sur une ou plusieurs pistes (trois pistes en moyenne). Cette piste ou l'ensemble de ces pistes constitue un amas (ou "cluster") que l'on sélectionne de la façon suivante :

1. Sélection des pistes :
   Pour chaque événement k, on sélectionne les pistes i tel que $S_{i,k} > 2 \times N_{i,k}$ et toutes les pistes voisines vérifiant cette condition forment un amas potentiel.
2. Calcul du signal et du bruit d'un amas potentiel :
   Le signal de l'amas potentiel A est défini comme la somme des signaux des pistes, et le bruit ($N_{A,k}$) comme la moyenne arithmétique du bruit des pistes de l'amas potentiel A :
   $$S_{A,k} = \Sigma_{i \in A} S_{i,k} \text{ et } N_{A,k} = \frac{\Sigma_{i \in A} N_{i,k}}{\text{Nombre de pistes } i \in A}$$
3. Sélection des amas :
   Pour chaque événement k, on ne sélectionne que les amas tel que $S_{A,k} > 4 \times N_{A,k}$.

3.4.4.2 Définition du rapport signal sur bruit (S/N)

3.4.4.2.1 Le rapport S/N

Pour chaque événement étudié, le rapport S/N est défini comme le rapport entre le maximum de probabilité du signal sur la piste collectant la plus importante fraction du signal (70%) et le bruit de cette piste [CLE97]. Cette définition a été adoptée pour permettre une comparaison directe avec les études précédentes.

Ce rapport S/N est calculé par deux méthodes différentes :
- la méthode par substrat :
  On sélectionne la piste collectant la plus importante fraction du signal pour chacun des deux subtrats centraux d'un module MSGC (les deux substrats externes n'étant pas pris en compte).
- la méthode par module (deux substrats joints) :
  On sélectionne la piste collectant la plus importante fraction du signal pour chaque module MSGC. Cette méthode permet de tenir entièrement compte des amas à la limite entre les deux substrats centraux d'un module MSGC et d'étudier la zone inactive entre ces deux substrats.

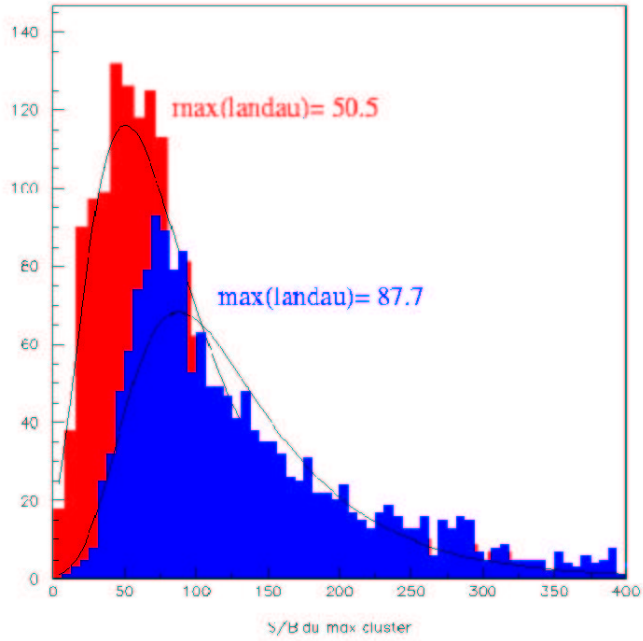

Figure 3.25 – Comparaison du rapport S/N évalué par la méthode "détecteur" (rapport S/N de 87,7) et par la méthode "substrat" (rapport S/N de 50,5).

Le rapport S/N (figure 3.29) calculé par la méthode par substrat (le rapport S/N est de 50,5) est plus faible que par la méthode par module (le rapport S/N est de 87,7) compte tenu de la plus grande multiplicité des amas. Le calcul du rapport S/N par module donne une valeur plus réaliste, compte tenu du fait que le faisceau du PSI était centré à la fontière des deux susbstrats.

3.4.4.2.2 L'efficacité

Les tensions, déterminées en phase 2 du test MF2, permettent d'obtenir un rapport S/N qui garantirait une efficacité de détection de 98% pour des MIPs [TkTDR98]. Un rapport S/N minimum de 18 a été mesuré au cours d'un précédent test sous faisceau au CERN [MAC00] mais ce rapport S/N a été réévalué pendant la phase 2 à basse intensité du faisceau de PSI.

A cette fin, l'efficacité de reconstruction des traces a été évaluée en fonction des tensions des deux modules en position 7 et 8 (figure 3.26) à l'aide des amas déterminés dans six modules placés avant et des huit modules placés après.

Une efficacité de 98% de détection est obtenu pour un S/N minimum de 17 (figure 3.26),

ce qui confirme les résultats obtenu au CERN. Si on tient compte du bruit supplémentaire introduit par l'électronique finale[(2)] et de la fréquence d'échantillonnage différente, le SNR doit être multiplié par un facteur de 2,2 pour garantir 98% d'efficacité de détection des MIP au LHC [TkTDR98], ce qui induit un rapport S/N minimum de 37 à basse luminosité.

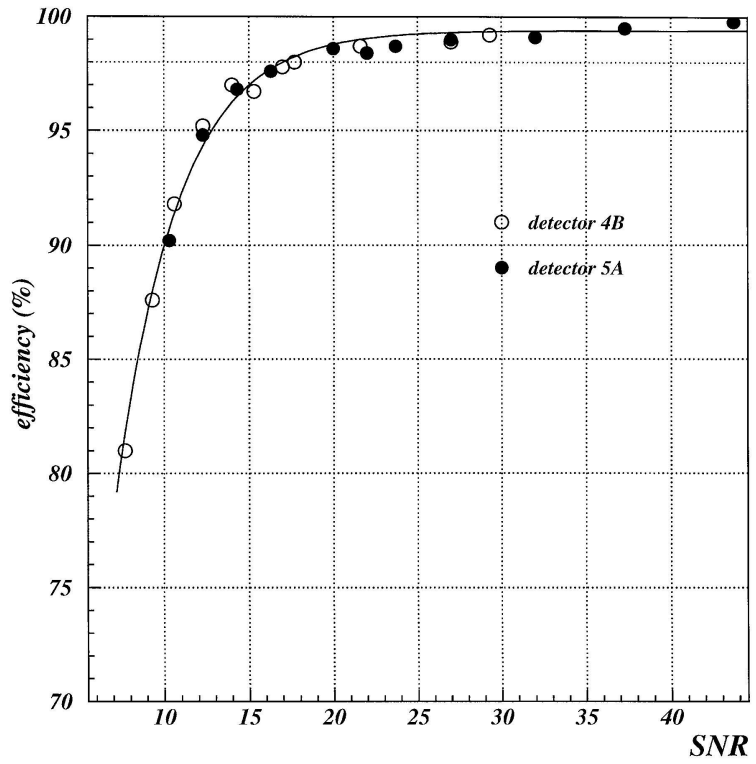

Figure 3.26 – L'efficacité de détection en fonction du rapport S/N pour deux modules centraux.

3.4.4.3 Caractérisation des pistes perdues

Une piste est dite perdue si le bruit de cette piste (à basse intensité) est à plus de 5 σ de la moyenne (M) du bruit des 512 pistes du substrat MSGC. On distingue sur la figure 3.27 deux pistes bruyantes : les pistes 129 et 180 (pistes ayant un bruit supérieur à $M + 5\sigma$) et deux pistes endommagées : les pistes 331 et 363 (pistes ayant un bruit inférieur à $M - 5\sigma$).

[2]L'amplification sera alors réalisée par des APV au lieu des PreMux128.

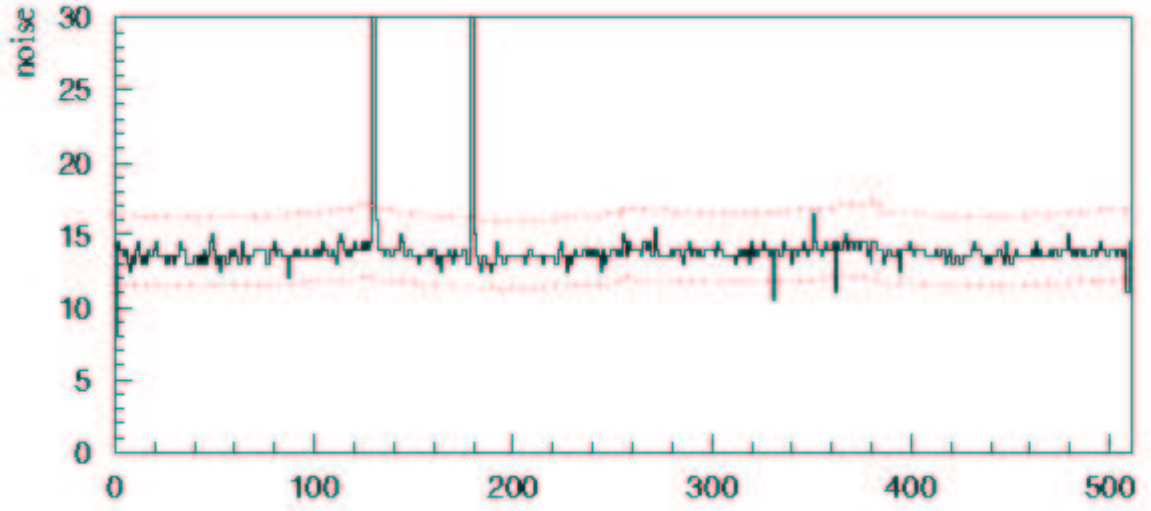

Figure 3.27 – Le bruit de 512 pistes d'un module MSGC avec 2 pistes bruyantes (les pistes 129 et 180) et 2 pistes endommagées (pistes 331 et 363) [NOW02].

La perte d'une piste ne conduit pas à une perte d'efficacité de détection car les charges se répartissent sur les anodes voisines (figure 3.28) mais cela implique malgré tout une dégradation de la résolution, l'amas étant plus large.

Figure 3.28 – Le profil du faisceau en fonction des 512 pistes d'une MSGC où le signal d'une piste endommagée se reporte sur ses voisines.

Un des objectifs de ce test était d'irradier des modules de détecteurs de type MSGC dans des conditions similaires à celle de CMS. Une limite du nombre de pistes perdues a été définie comme étant égal à moins de 10% de pistes perdues pour 10 ans de LHC, ce qui équivaut à 32 pistes perdues pour la phase 3 du test MF2. Ce plafond de 10% impliquait que sur 5% de l'aire de détection, la résolution spatiale de $\simeq 35\ \mu m$ aurait été dégradée au point d'atteindre la valeur de 60 μm en fonctionnement sur LHC [BOU95].

3.4.5 Résultats

3.4.5.1 Le rapport signal sur bruit

716 runs[3] de haute intensité et 96 runs[4] de basse intensité ont été analysés pour calculer le rapport S/N des 35 détecteurs.

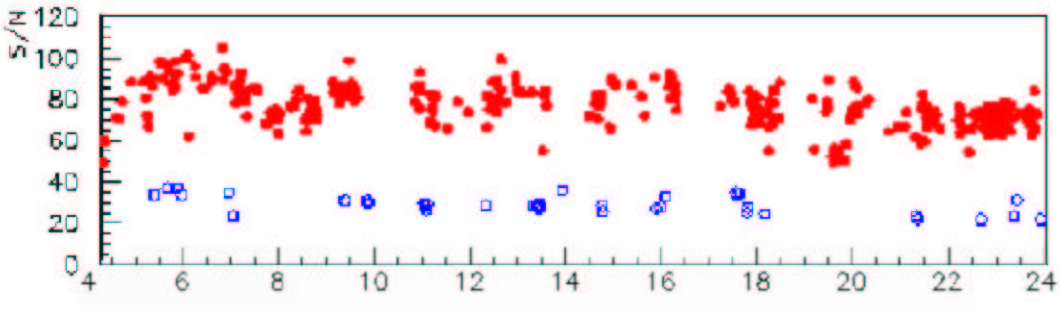

Figure 3.29 – La variation du rapport signal sur bruit (S/N) pendant les 20 jours de la phase 3 du test MF2.

Le rapport S/N à basse intensité (cercles creux de la figure 3.29) est proche de la limite MF2 de 37 à plus ou moins 10%. Le rapport S/N à haute intensité, d'environ 80 à plus ou moins 35 %, est 2 à 3 fois celui à basse intensité en raison de l'accumulation de particules à haute intensité. Les fortes variations du rapport S/N sont principalement dues à des chutes et remontées en tension suite à de fortes décharges.

Les faibles variations du rapport S/N (à basse et à haute intensité) mettent en évidence la stabilité des MSGC+GEM pendant les 20 jours de la phase 3 du test MF2.

3.4.5.2 Les pistes perdues

Après le montage et le conditionnement des modules en laboratoires et à la suite des phases 1 et 2 du test MF2, 1,7 % des pistes sont identifiées comme perdues. Ce taux initial est dû d'une part à des problèmes dans le processus de métallisation ($\simeq$ 1% d'anodes coupées) et d'autre part, dans le découpage des substrats. Ce taux de pistes perdues avant l'utilisation réelle des MSGC est considéré comme acceptable pour CMS.

[3]fichiers de données pouvant chacun contenir jusqu'à 30 000 événements dans le cas de MF2.
[4]fichiers de données pouvant chacun contenir 15 000 événements dans le cas de MF2.

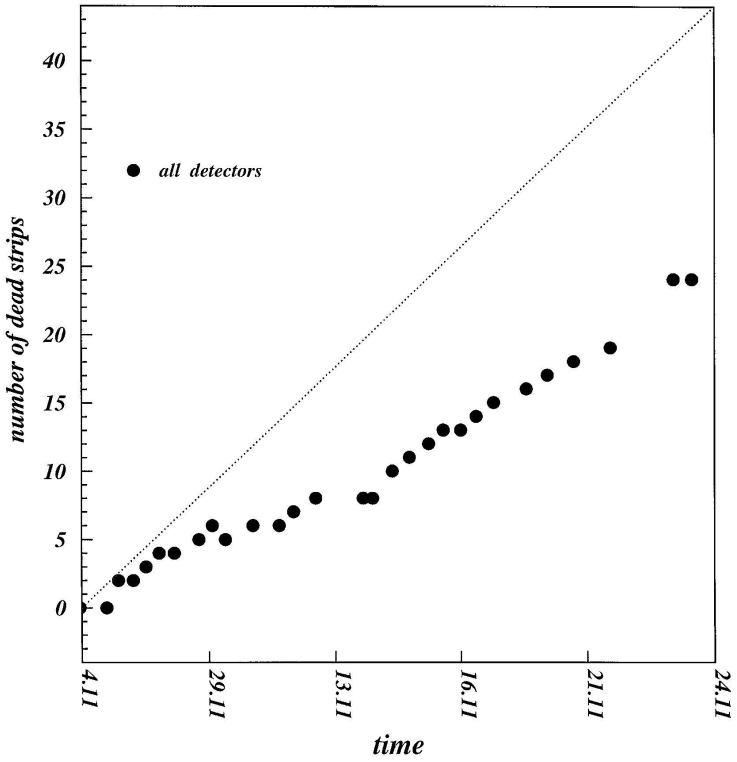

Figure 3.30 – Nombre cumulé de pistes endommagées pendant le test MF2 pendant les 20 jours de la phase 3 du test MF2 au regard de la limite requise de 10%.

Durant la phase 3 du test MF2, 24 anodes ont été perdues (figure 3.30) pour 33 substrats MSGC (soit un total de 16 896 anodes), ce qui correspond à 5,5 % de pistes perdues pendant 10 ans de fonctionnement au LHC (bien en dessous des 10% requis).

3.4.5.3 Influence de la pression sur le rapport signal sur bruit

Le rapport S/N des MSGC est stable au cours de la phase 3 du test MF2 mais des variations temporaires sont néanmoins visibles. Afin de vérifier si ces fluctuations sont dues à des variations de pression atmosphérique qui agiraient sur le gaz, et donc sur le gain des MSGC, nous avons comparé la moyenne des rapports S/N à haute intensité, jour par jour, aux mesures de la pression atmosphérique relevées à la station météorologique de Buchs-Suhr dans la même vallée et à 18 Km au sud-sud-ouest de Villigen.

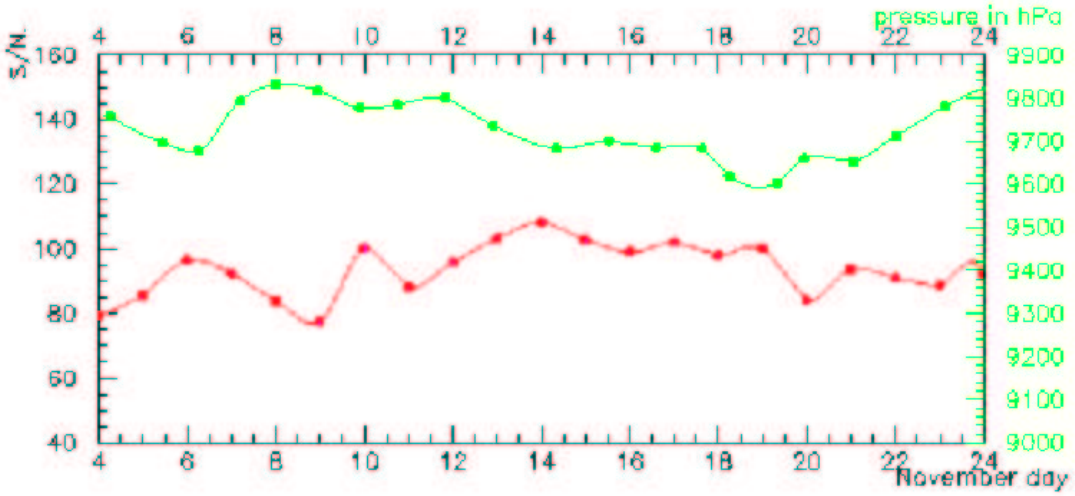

Figure 3.31 – Influence de la pression sur le rapport S/N pendant la campage de test MF2.

Nous remarquons sur la figure 3.31 une certaine anti-corrélation dans la partie centrale entre la courbe de la pression (en haut) et la courbe des rapports S/N (en bas). Cela est néanmoins insuffisant pour en déduire une influence quantifiable de la pression sur le rapport S/N. Mais d'autres paramètres comme la température ou l'intensité du faisceau peuvent produire des variations temporaires du rapport S/N.

L'étude de l'influence de la pression sur le rapport signal sur bruit à basse intensité aurait été plus significatif. Mais d'une part, le nombre de points de mesure à basse intensité est faible (2 fois par jour). Et d'autre part, la stabilité des détecteurs à haute intensité durant la phase 3 du test MF2 montrent que les variations temporaires du rapport S/N ne sont dues ni aux détecteurs, ni au faisceau mais à un paramètre extérieur.

Cependant, l'expérience CMS étant à plusieurs dizaines de mètres sous terre et le trajectographe étant climatisé, on peut penser que les variations en pression (et en température) seront négligeables.

3.4.5.4 La polarisation

En fonctionnement et sous radiation, il est possible que les modifications du substrat (parties 3.2.7 et 3.2.4) et son changement de résistance surfacique aient un effet non négligeable sur le comportement du détecteur : c'est ce qu'on appelle l'effet de polarisation. En effet, les charges peuvent s'accumuler à la surface du substrat provoquant une diminution de la résistance surfacique et entraînant une diminution du rapport S/N tant que ces charges ne sont pas évacuées.

Pour mesurer cet effet, nous calculons la variation relative du rapport S/N au début et à la fin d'une période HI (Haute Intensité) : $A = \frac{S/N(1)-S/N(2)}{S/N(1)}$ où $S/N(1)$ est le rapport S/N de basse intensité à la fin de la période HI et $S/N(2)$ le rapport S/N de basse intensité au début de la période HI.

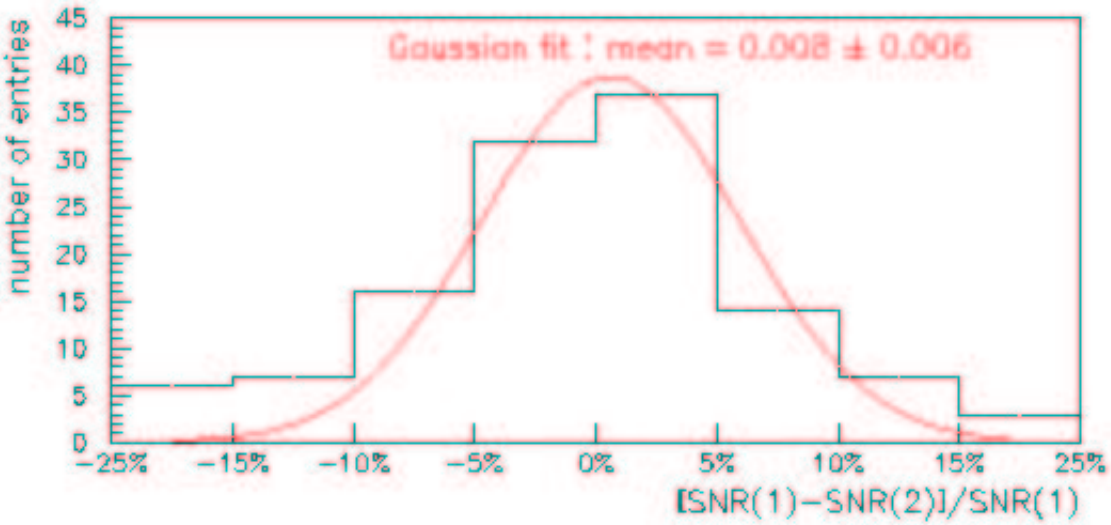

Figure 3.32 – L'effet de la polarisation durant la phase 3 du test MF2.

La figure 3.32 montre un effet quasi nul. S'il y avait eu un effet de polarisation, son amplitude moyenne se serait située autour de 50 à 60% [MAC97].

3.5 Conclusion

Le test MF2 a prouvé que les détecteurs MSGC+GEM ont un comportement stable dans un environnement radiatif intense et qu'ils répondaient à toutes les spécifications pour équiper le trajectographe de CMS :

- un fonctionnement stable dans le temps ;
- un nombre de pistes perdues inférieur à 10% ;
- une bonne tenue aux radiations.

Mais la collaboration a préférée opter pour un trajectographe entièrement équipé de détecteurs à volume sensible solide basé sur du silicium semiconducteur, remplaçant les détecteurs à volume sensible gazeux par des détecteurs à micro-pistes de silicium. Cette décision a été principalement justifiée par les progrès réalisés dans le domaine des technologies au silicium : fabrication de détecteurs de grande taille, disponibilité de grandes quantités dans l'industrie et réduction de leur coût.

Mentionnons enfin que si la mise en oeuvre des MSGC dans une expérience de type CMS peut être délicate, par contre leur excellente résolution spatiale en fait des détecteurs de position très précis avec de nombreuses applications possibles dans le domaine de la radiographie X par exemple.