Université Pierre et Marie Curie Paris VI

Thèse

présentée par

Bob OLIVIER

pour obtenir le titre de

Docteur de l'Université Paris VI
(spécialité Physique des Particules)

Recherche du partenaire supersymétrique du quark Top et contribution à l'amélioration de la calorimétrie de l'expérience DØ pour la Phase II du Tevatron

soutenue le 9 avril 2001 devant le jury composé de

J.E.	Augustin	
U.	Bassler	
M.	Baubillier	
G.	Bernardi	
A.	Djouadi	
J.	Lefrançois	(Rapporteur)
H.	Montgomery	(Rapporteur)

Introduction

Depuis une trentaine d'années le Modèle Standard rend compte avec succès de tous les phénomènes élémentaires. On s'attend cependant à ce que cette théorie ne soit qu'une limite à basse énergie d'une théorie plus vaste et plus fondamentale, et la recherche d'indices expérimentaux qui confirmerait cette hypothèse se poursuit avec acharnement. La recherche du sTop, hypothétique partenaire scalaire du quark Top, que nous avons effectuée avec les données de la Phase I du Tevatron et dans le cadre du Modèle Standard Supersymétrique Minimal (MSSM) s'inscrit dans cet effort de mise en évidence d'une physique au-delà du Modèle Standard.

L'augmentation de la luminosité attendue dans la Phase II du Tevatron qui a démarré le 1^{er} Mars 2001 et l'amélioration du détecteur qui a été réalisée ces trois dernières années permettront d'étendre ce domaine. Pour ces recherches, la calorimétrie joue un rôle central du point de vue expérimental. Nous décrivons donc également dans cette thèse notre contribution à l'amélioration de la calorimétrie, tant sur la calibration électronique du calorimètre à Argon Liquide du détecteur DØ que sur les logiciels de reconstruction de l'énergie calorimétrique.

Cette thèse se divise en huit chapitres et commence par une brève revue du Modèle Standard, suivie d'une introduction à la Supersymétrie comme théorie plus achevée que le Modèle Standard. Nous nous limitons ensuite à sa représentation la plus simple, le MSSM. Sont alors rappelés les différents secteurs de ce modèle en insistant sur le secteur des sfermions et sur le sTop qui est un candidat privilégié à la recherche de supersymétrie. Nous décrivons dans le chapitre 2 les différents processus de production et de désintégration du sTop, et nous justifions l'originalité des canaux étudiés dans cette thèse : les désintégrations en trois ($\tilde{t} \to bl\tilde{\nu}$) et quatre corps ($\tilde{t} \to b\tilde{\chi}^o_1 l\nu_l$) du sTop, qui supposent le $\tilde{\nu}$ ou le $\tilde{\chi}^o_1$ comme particule supersymétrique la plus légère (LSP).

Après avoir présenté le dispositif expérimental sur lequel est basée cette étude, à savoir le collisionneur Tevatron (chapitre 3) et le détecteur DØ (chapitre 4), en insistant sur leurs évolutions récentes, nous décrivons dans le chapitre 5 la calibration électronique du calorimètre DØ qui a dû être entièrement repensée et remplacée pour la Phase II du Tevatron. Les contraintes de performances qui lui sont imposées par les nouveaux paramètres de l'accélérateur sont rappelées. Nous présentons ensuite ce nouveau système de calibration que nous avons développé au laboratoire en collaboration avec le LAL-

Orsay et sa place dans le nouveau système d'acquisition en-ligne du détecteur. Ses performances intrinsèques sont décrites, ainsi que celles du calorimètre.

Les stratégies de recherche de nouvelles particules font souvent appel à une variable cinématique d'une grande importance, l'énergie transverse manquante dans le détecteur, qui peut signer par exemple le passage de la particule supersymétrique la plus légère (LSP) qui est stable et ne laisse pas de trace dans le détecteur. Nous étudions dans le chapitre 6 comment la mesure de l'énergie transverse manquante peut être dégradée par le bruit dans le calorimètre, et décrivons le nouvel algorithme (NADA) que nous avons développé et qui minimise cet effet.

Dans le chapitre 7 nous présentons notre recherche du sTop dans les données prises par l'expérience DØ entre 1992 et 1996. Nous avons selectionné les événements avec un électron, un muon et de l'énergie transverse manquante dans l'état final, qui peuvent être le produit de désintégration d'une paire de sTops en 3 ou en 4 corps. En l'absence d'événements candidats à ce signal, les résultats sont interprétés en terme de limites de section efficace de production du sTop et de régions d'exclusion dans l'espace des paramètres $(m_{\tilde{t}}, m_{LSP})$. L'utilisation inédite au Tevatron de cet état final pour la recherche du sTop nous a permis d'établir des contraintes nettement plus fortes que celles obtenues précédemment au LEP ou au Tevatron dans le canal $\tilde{t} \to bl\tilde{\nu}$ et les premières limites jamais établies dans le canal de désintégration à quatre corps $\tilde{t} \to b\tilde{\chi}_1^0 l\nu_l$. Ces résultats ont été présentés aux conférences de Moriond 2001 et sont en cours de revue pour publication dans la collaboration.

Enfin nous présentons nos conclusions et terminons cette thèse par les perspectives de recherche et de découverte du sTop au Run II du Tevatron et au futur accélérateur du CERN, le LHC.

Table des matières

Chapitre 5

La calibration en-ligne du calorimètre

La pièce maîtresse du détecteur DØ est son calorimètre à Argon liquide. La calibration des mesures d'énergie qu'il permet d'effectuer conditionne l'ensemble des résultats de l'expérience, qui reposent toujours sur une mesure calorimétrique, que ce soit celle des objets électromagnétiques, des jets ou de l'énergie manquante associée aux particules invisibles (neutrinos ou certaines particules supersymétriques).

La calibration du calorimètre s'effectue en plusieurs étapes principales : on calibre d'abord la chaîne d'électronique (calibration en-ligne), ce qui constitue le sujet de ce chapitre, puis on effectue une calibration hors-ligne en se servant d'événements physiques possédant une contrainte en énergie (par exemple la masse du Z^o). Cette deuxième étape est en cours de développement dans la collaboration et n'est pas traitée dans cette thèse. Dans le contexte de la mesure de la masse du W [1], l'objectif est de contrôler la chaîne de calibration électronique du Run II à mieux que 1% afin qu'elle ne constitue pas la partie dominante dans le terme constant de la résolution en énergie des électrons [2].

Les objectifs de la calibration électronique sont :

- d'intercalibrer les voies de l'électronique du calorimètre (dont l'intercalibration des gains des préamplificateurs),
- de contrôler la stabilité de cette intercalibration en fonction du temps,
- de détecter les canaux morts,
- de déterminer la linéarité, la calibration en temps et la diaphonie du système électronique,
- de permettre la qualification du calorimètre, y compris de son système de déclenchement.

5.1 Description du système de calibration en-ligne

La calibration électronique consiste à envoyer une quantité de charge connue avec une très bonne précision (de l'ordre d'un pour mille) à l'entrée de la chaîne d'acquisition du détecteur afin de connaître les caractéristiques de celle-ci et son évolution dans le temps. Le niveau de la charge doit être ajustable de manière à couvrir l'ensemble de la gamme dynamique de l'électronique de lecture. Dans le cas de conditions temporelles contraignantes, la rapidité de la chaîne de lecture nécessite un contrôle précis de la forme du signal de calibration. La charge délivrée sert à la fois de signal de calibration mais aussi d'indicateur du bon fonctionnement de chaque canal.

Pour un calorimètre à Argon liquide il existe deux types de calibrations possibles, différenciés par le point dans la chaîne d'électronique où est injecté le signal de calibration. Une première méthode est d'injecter les signaux de calibration directement au niveau des cellules de lecture dans le cryostat (calibration "froide") ; les impulsions délivrées à ce niveau ont des effets très similaires aux charges créées par une particule. Le problème principal de cette méthode est la difficulté d'accès aux composants du système qui sont dans le cryostat. La deuxième méthode de calibration permet d'éviter cette difficulté en utilisant un point d'injection du signal à l'extérieur du cryostat (d'où le nom de calibration "chaude"). Le signal arrive cette fois au niveau de l'entrée des préamplificateurs, donc assez loin de la source du signal réel. A DØ, la méthode utilisée est la calibration "chaude". Le principal désavantage de la calibration "chaude" est que, à la sortie du module de mise en forme, le signal de calibration chaud peut être légèrement différent du signal physique qui serait créé au niveau des cellules de lecture. L'origine de ces différences et leurs effets sont détaillés dans le paragraphe 5.2.

5.1.1 Le système du Run I

L'électronique du calorimètre au Run I

Le signal en provenance de chaque cellule est transporté à travers un câble coaxial jusqu'au "feed through port" permettant la traversée du cryostat. Il est ensuite envoyé jusqu'aux préamplificateurs (de gain 1 et 8) qui sont situés près du détecteur afin de limiter les effets de bruit. Finalement, le signal en sortie des préamplificateurs parcourt une trentaine de mètres de câbles vers un soustracteur de ligne de base (BLS), un circuit de mise en forme et un échantillonneur de signal.

Ce dernier prend un échantillon du signal juste avant la croisée des faisceaux pour avoir une valeur de référence et 2.2 μs après pour obtenir l'amplitude maximale du signal. La différence entre les deux valeurs ainsi obtenues est alors digitisée (cette différence est proportionnelle à la charge collectée) et suivant la valeur de celle-ci, le résultat obtenu avec le gain 1 ou le gain 8 est conservé. Ceci permet d'augmenter de 3 bits l'échelle dynamique de l'électronique. La digitisation est effectuée par des convertisseurs analogique-digital (ADC) 12 bits et l'échelle dynamique totale est alors de 2^{15}. Les valeurs d'amplification ont été ajustées de manière à ce qu'un coup ADC corresponde à environ 4 MeV dans les différentes couches électromagnétiques. La figure 5.1 donne une vue schématique de cette chaîne d'électronique.

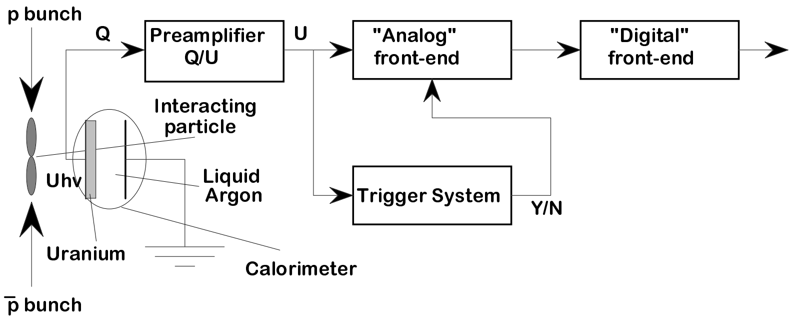

FIG. 5.1 – Vue schématique du parcours du signal électronique du calorimètre dans la configuration du Run I.

Le système de calibration au Run I

Lors du Run I, le temps de croisement important de 3.5 μs entre deux paquets du Tevatron ne nécessitait pas une électronique rapide. Le temps de mise en forme et d'échantillonnage du signal de 2.2 μs permettait l'utilisation d'un signal de calibration de forme rectangulaire, très éloignée de la forme du signal physique, mais facile à générer. Grâce à ce long temps de mise en forme, la forme du signal n'avait pas d'incidence sur la calibration et permettait de minimiser l'effet de la propagation et de la réflexion des signaux dans les câbles.

Les signaux de calibration étaient produits par douze systèmes de calibration ("pulseurs-Run I") couvrant l'ensemble du calorimètre. Chacune des 12 boîtes de préamplificateurs, contenant chacune 4096 préamplificateurs, avait son propre système de calibration. Un de ces systèmes est représenté dans la figure 5.2. Ces pulseurs-Run I fournissaient des impulsions rectangulaires à une fréquence maximale de 1 kHz avec une largeur fixe de 400 ns et avec un temps de montée et de descente de 10 ns pour une amplitude maximale de 135 V. Pour chaque boîte de préamplificateurs, un signal de calibration était réparti par une boîte de distribution ("switch box") sur 32 chemins différents ; un même signal de calibration était alors envoyé à 144 préamplificateurs différents. Des relais de Mercure étaient utilisés afin de sélectionner le chemin désiré, ce qui présentait le désavantage de ne pouvoir envoyer un signal de calibration que sur un seul chemin à la fois.

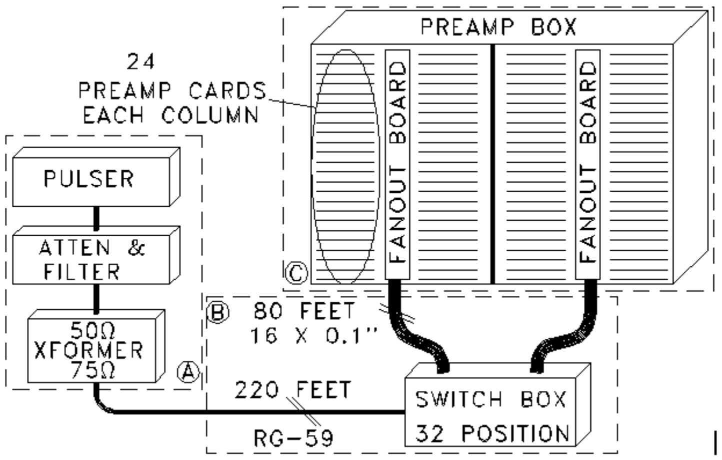

FIG. 5.2 – Système de calibration électronique du Run I.

La procédure de calibration au Run I

Lors du Run I, la procédure de calibration en-ligne du calorimètre était effectuée tous les deux jours par le programme CALIB, avec deux objectifs principaux :

- obtenir l'information nécessaire pour calibrer l'électronique du calorimètre,
- détecter les défaillances de l'électronique.

Ces défaillances peuvent modifier la réponse relative des canaux du calorimètre et affecter les taux de déclenchement. Elles peuvent apparaître de façon subite ou sur une plus grande échelle de temps ce qui se produit lorsque la réponse d'un canal évolue lentement au cours du temps. CALIB devait pouvoir identifier ces défaillances électroniques afin d'être corrigées.

La procédure de calibration était divisée en deux étapes et prenait en général moins d'une heure pour :

- mesurer les piédestaux de tous les canaux du calorimètre (5 à 10 minutes),
- mesurer les gains en utilisant les pulseurs (30 à 45 minutes).

Les mesures des piédestaux étaient effectuées avec 500 événements enregistrés en l'absence de faisceau dans le Tevatron ou l'injecteur. Les nouvelles valeurs moyennes des piédestaux calculées par CALIB étaient ensuite chargées dans les ADC avant la prochaine prise de données physiques, afin d'actualiser la soustraction en-ligne des piédestaux. Les largeurs des piédestaux étaient utilisées pour calculer les seuils de "zéro-suppression" des canaux (2σ) et réduire ainsi le volume de données à traiter.

Les gains des canaux étaient calculés grâce aux pulseurs avec 200 événements de calibration. Ils étaient calculés en utilisant une valeur fixe de l'amplitude du signal de calibration qui était choisie pour évaluer les réponses en gain 1 et en gain 8 simultanément. Aucune étude de linéarité en-ligne des canaux n'était effectuée par CALIB.

Les gains n'étaient pas utilisés en-ligne, mais hors-ligne, afin de corriger les variations relatives des canaux entre eux. Le système de déclenchement de niveau 2 utilisait une version figée des valeurs des gains. CALIB était aussi utilisé afin d'identifier les canaux défaillants (environ 1% des canaux, soit environ 500 canaux).

Lors du Run I, les piédestaux et les gains étaient très stables. A moins d'une modification de l'électronique, même sur de longues périodes de temps les piédestaux variaient de moins de 1 coup d'ADC (sur 30 000). Pendant les Run Ib (1993-95) et Ic (1995-96), les corrections des gains variaient de moins de 10 coups d'ADC, soit moins de 0.3% . Les valeurs des piédestaux utilisées pour le système de déclenchement de niveau 1 ont été stables à 0.1 coup d'ADC près pendant les quatre années de prises de données du Run I. Les gains utilisés pour le système de déclenchement de niveau 2 étaient stables à 0.5 coup d'ADC près, soit mieux que 1% [3].

5.1.2 Le système du Run II

L'électronique du calorimètre au Run II

Afin de s'adapter au nouveau temps de croisement des paquets dans le Tevatron (396 puis 132 ns) et de maintenir les performances du Run I en terme d'empilement et de bruit, une nouvelle conception de l'électronique du calorimètre est nécessaire [4]. Elle nécessite d'être capable de stocker les signaux analogiques pendant 4 μs afin d'attendre la décision du système de déclenchement de niveau 1, de générer un signal de déclenchement calorimétrique rapide qui sera utilisé par le déclenchement de niveau 1 et d'adopter de nouvelles stratégies pour la soustraction de la ligne de base du signal.

La figure 5.3 représente la chaîne de lecture du calorimètre pour le Run II et les changements apportés par rapport au Run I. Afin de minimiser les réflexions des signaux, de nouveaux câbles ont été installés - situés entre la sortie des cryostats et les nouveaux préamplificateurs bas bruit - d'impédance adaptée aux câbles situés à l'intérieur des cryostats (30 Ω), qui remplacent les anciens câbles de 110 Ω. Le remplacement de ces câbles a permis de minimiser la dispersion de la longueur totale de câble entre les cellules de lecture et les préamplificateurs afin de minimiser les variations des retard des signaux. Le temps de mise en forme du signal a été réduit de 2.2 μs à 400 ns. Pour le déclenchement, un signal rapide et moins précis est échantillonné après 100 ns. Des circuits de stockage analogiques (SCA) conservent les signaux pendant 4 μs en attendant la décision du système de déclenchement de niveau 1. Ces mémoires analogiques contiennent également le signal lu 3 croisements de faisceau plus tôt, et ce dernier est soustrait par les soustracteurs de ligne de base (BLS) en cas d'une décision positive du signal de déclenchement. Des circuits de stockage analogiques sont à nouveau nécessaires afin d'attendre la décision du système de déclenchement de niveau 2. Le nouveau système de calibration adapté aux nouvelles contraintes en temps permet de générer un signal de calibration plus proche du signal physique qu'au Run I. Enfin, une nouvelle électronique

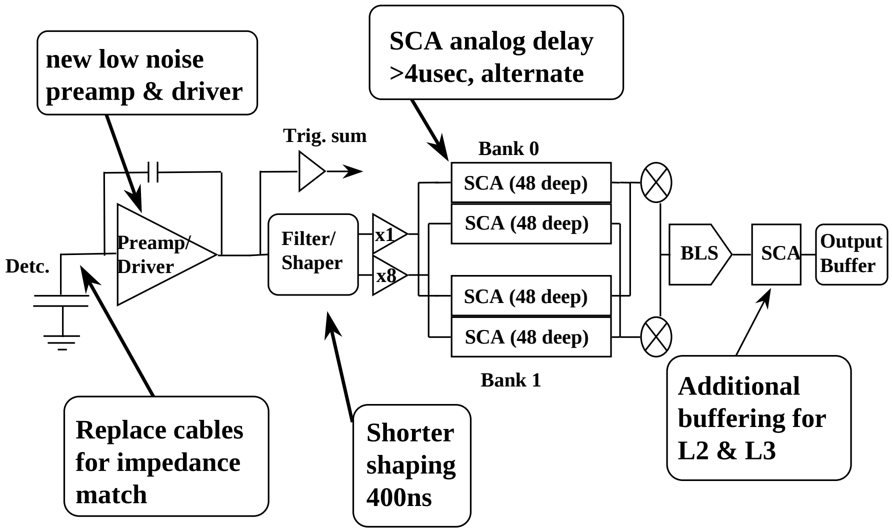

FIG. 5.3 – Vue schématique du parcours du signal électronique du calorimètre dans la configuration du Run II.

de lecture est nécessaire afin de contrôler la pureté et la température de l'Argon liquide. La synchronisation temporelle de l'ensemble de l'électronique du calorimètre est effectuée par la carte "Timing and Control" ("T&C") qui génère entre autres les commandes de digitisation du signal (à l'échantillonnage ainsi que pour la ligne de base) et de déclenchement du système de calibration.

Le système de calibration au Run II

Le système de calibration doit être modifié afin de générer un signal proche du signal physique ce qui permet de remplir des fonctionnalités similaires au système du Run I [5]. Des modifications ont été effectuées afin de tenir compte des réflexions dans le système de distribution des impulsions de calibration dues à des terminaisons imparfaites et à l'atténuation du signal dans les câbles qui créeront dans les conditions du Run II des variations plus élevées qu'au Run I.

La modification la plus importante est la diminution drastique de la valeur de la résistance d'injection. Les résistances d'injection sont situées sur les cartes des préamplificateurs de manière à réduire leur influence en tant que capacité parasite, qui devient plus importante lorsque le temps de mise en forme du signal diminue. Nos études ont montré qu'une variation de 0.25 pF de la capacité parasite dans les conditions du Run II entraîne une variation de 23 % de l'amplitude du signal en utilisant des résistances d'injection de 500 kΩ comme au Run I, mais entraîne une variation de moins de 0.1% lorsque la résistance d'injection est ramenée à 20 kΩ. La résistance d'injection a donc été réduite à 20 kΩ (pour les préamplificateurs ayant une capacité de 10 pF) et à 40 kΩ (pour les préamplificateurs ayant une capacité de 5 pF). Ces valeurs de résistances d'injection permettent d'utiliser des signaux de calibration de faible amplitude (5 V au lieu de 135 V au Run I) qui peuvent être produits avec plus de précision. Afin de minimiser toute perturbation, le signal de calibration est maintenant produit aussi proche que possible des préamplificateurs et est injecté par un câble court d'environ 10 cm, contre 90 m au Run I.

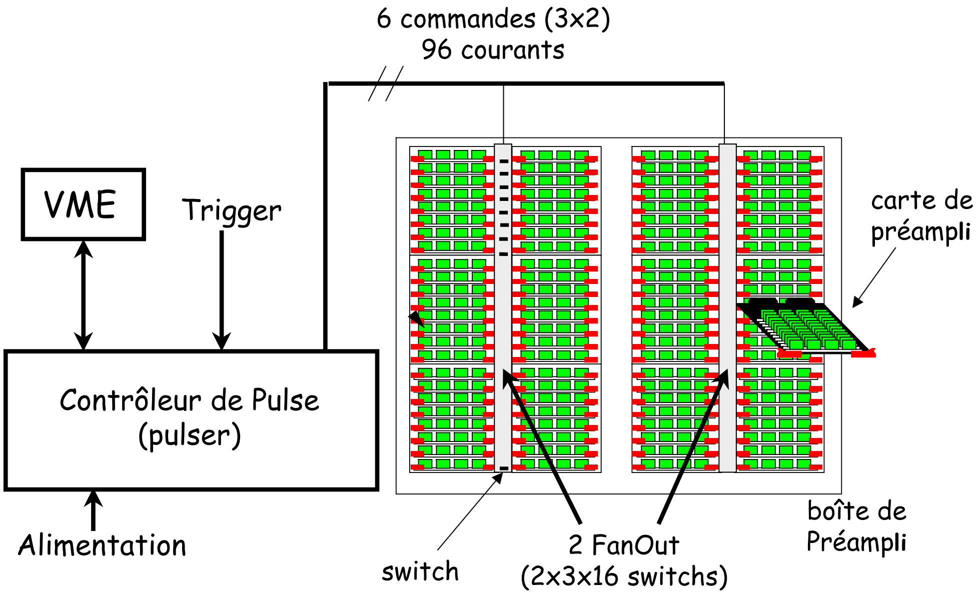

FIG. 5.4 – Système de calibration électronique du Run II.

Le système de calibration du calorimètre DØ au Run II reprend la subdivision initiale en douze sous-systèmes identiques. Chacun est composé d'un "pulseur-Run II" (appelé simplement pulseur dans la suite) dont la fonction est d'envoyer des signaux de commandes et des courants continus à deux sous-systèmes, comme représenté dans la figure 5.4, appelés "fanouts actifs". Ces derniers remplacent les "fanouts passifs" du Run I et sont situés comme auparavant dans les boîtes de préamplificateurs. Alors qu'au Run I ces "fanouts" n'avaient qu'un rôle de distribution, dans notre nouveau schéma nous les avons rendus "actifs" en y plaçant aussi les générateurs d'impulsion ("switch"). Les "pulseurs" (Pulser Mother Board, cf. figure 5.5) sont connectés via un bus-série à une carte entrée-sortie VME ce qui permet de contrôler l'amplitude et le retard du signal de calibration, ainsi que de choisir les canaux auxquels envoyer les signaux de calibration (aussi un même signal de calibration peut être envoyé sur plusieurs "chemins" à la fois, contrairement au Run I, cf. paragraphe "Système de calibration au Run I"). Le

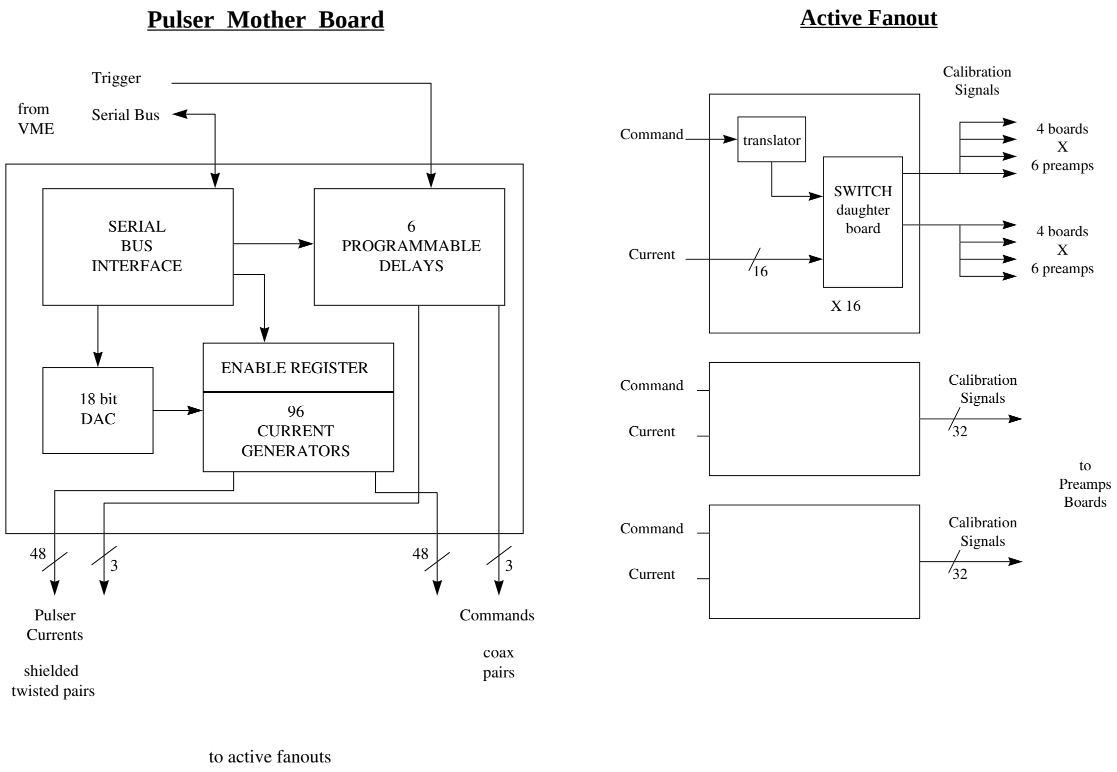

FIG. 5.5 – Schéma de la carte pulseur et des “fanouts actifs”.

FIG. 5.6 – Photographies (a) d'un pulseur (module du bas) avec son alimentation (module du haut), (b) d'un tiers d'un "fanout actif". Ces deux modules sont utilisés dans la calibration en-ligne du calorimètre dans sa configuration du Run II.

protocole-série est composé de 4 lignes : un signal de contrôle afin d'effectuer la coordination, une horloge, une entrée signal afin d'écrire dans les pulseurs, une sortie afin d'effectuer une relecture des pulseurs.

Les pulseurs (cf. figure 5.4 et photographie 5.6a).
Chaque pulseur contient :
- une interface par bus-série,
- un registre de validation des canaux du pulseur,
- un convertisseur numérique-analogique (DAC) de 18 bits signés,
- six retards programmables,
- 96 générateurs de courants continus programmables par le DAC.

A la réception du signal de déclenchement de la carte "Timing and Control" ("T&C"), des commandes de retard sont envoyées à chacun des "fanouts actifs" correspondants. Les commandes sont des signaux différentiels ECL qui sont envoyés à travers des câbles de 75 Ω qui avaient été déjà installés pour la calibration en-ligne du Run I. Ces courants dont l'intensité est programmable sont envoyés à chaque "fanout actif" grâce à des paires de câbles blindés et torsadés. Le principal avantage de notre nouveau schéma de fonctionnement est que seuls les courants continus et les signaux logiques sont envoyés à travers de long câbles. Les impulsions de calibration sont ensuite générées sur les cartes filles des "fanouts actifs", proches des préamplificateurs. La conversion du courant continu en signal de calibration est détaillée dans le paragraphe suivant. Les courants peuvent être inhibés grâce au registre de validation des canaux des pulseurs.

Les "fanouts actifs" (cf. figure 5.5 et photographie 5.6b).

Chaque "fanout actif" est divisé en trois parties identiques. Chacune reçoit une commande et seize courants continus. Sur ces tiers de "fanout" se trouve un convertisseur de logique ECL vers une logique TTL et seize cartes "switch" (cf. figure 5.7) qui transforment les courants continus en impulsions de calibration. Chaque carte "switch" délivre deux signaux de calibration. En l'absence de commande, le courant traverse un transistor PMOS puis une inductance de 1 mH. A la réception d'une commande un transistor NPN dirige rapidement (1 ns) ce courant continu vers la masse. Ceci crée une tension aux bornes de l'inductance proportionnelle à la dérivée du courant. Cette tension est alors mise en forme par un réseau formé de résistances et de capacités (de précision de 1%). Ces dernières sont constituées de composants sur le circuit des "switch" et de la capacité des pistes des cartes de préamplification, laquelle est connue avec une très bonne précision. Ceci permet de produire un signal de forme exponentielle avec un temps de montée très court (60 ns), suivi par un signal décroissant exponentiellement avec un temps de descente de 400 ns. Chaque signal délivré par une carte "switch"est envoyé par deux câbles courts (1 ns) vers les préamplificateurs. Le signal de chacun des câbles courts est injecté dans le fond de panier ("backplane") de la boîte des préamplificateurs et est distribué vers quatre cartes de préamplification atteignant six préamplificateurs sur chacune de ces 4 cartes. Ainsi, un même signal de calibration est envoyé vers 48 préamplificateurs, contre 144 au Run I, permettant une plus grande flexibilité dans les configurations de calibration souhaitées.

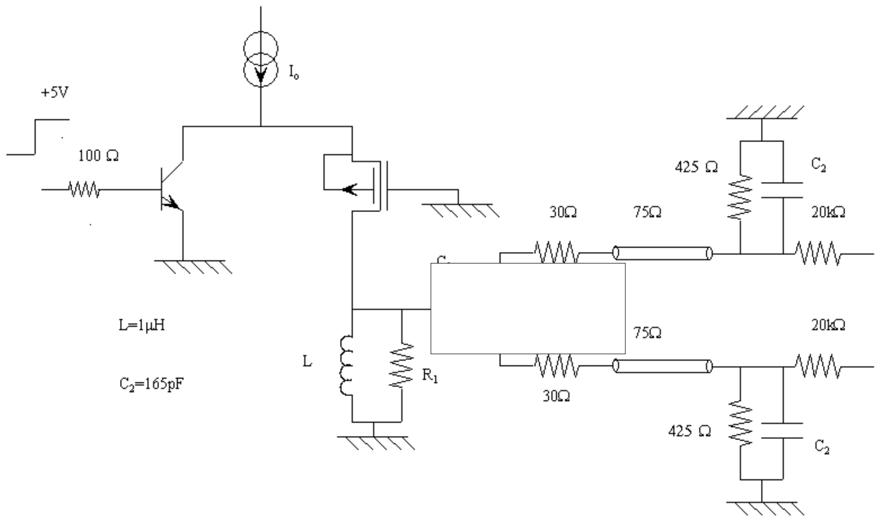

FIG. 5.7 – Schéma électronique des cartes “switch” transformant les courants continus en impulsions de calibration.

5.2 Comparaison du signal physique et du signal de calibration

Le temps de mise en forme du signal étant du même ordre de grandeur que le temps de collection des charges sur les électrodes, la forme du signal est un paramètre crucial, ce qui n'était pas le cas lors du Run I. Comme il est impossible d'injecter le signal de calibration directement au niveau des cellules de lecture dans le cryostat, mais seulement au niveau des préamplificateurs, il est important de contrôler avec précision la forme du signal afin de pouvoir minimiser la dépendance de la calibration des autres paramètres du système électronique, tels que l'impédance des câbles et des préamplificateurs et les capacités des cellules du détecteur. Ces difficultés proviennent du fait que le courant de calibration est divisé en 2 parties : une partie allant directement aux préamplificateurs et une autre allant à travers le détecteur jusqu'à la cellule de lecture et étant réfléchie, retardée de deux fois la longueur du câble détecteur. Cela implique, comparé au signal venant directement du détecteur, une forme de signal différente et une sensibilité différente à l'impédance et à la longueur du câble détecteur, à l'impédance d'entrée des préamplificateurs et des capacités des cellules du détecteur. L'influence de ces effets a été étudiée lors de simulations de l'évolution du signal physique et du signal de calibration dans la chaîne électronique du calorimètre (cf. figure 5.8) montrant qu'il est possible de choisir une forme du signal de calibration ayant une sensibilité similaire à ces paramètres (cf. table 5.1). La plus grande variation en amplitude des signaux physique et de calibration est due à la varation de l'impédance des préamplificateurs. La différence en amplitude entre le signal physique et de calibration est de moins de 1% lorsque la longueur du câble détecteur varie de 10%.

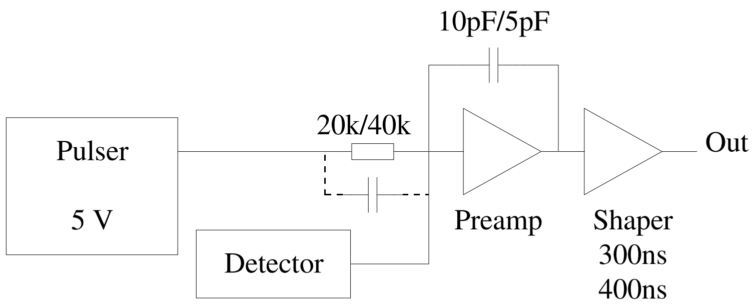

FIG. 5.8 – Schéma utilisé pour la simulation du signal physique et du signal de calibration dans la chaîne électronique du calorimètre.

paramètre	signal physique	signal de calibration
impédance du préamplificateur	+8.3 %	+8.7 %
impédance du câble signal	+1.7 %	+1.2 %
capacité d'une cellule du détecteur	−.03 %	−0.1 %
δt câble détecteur	+.02 %	−0.9 %

TAB. 5.1 – Résumé de l'effet d'une variation de 10% des paramètres électroniques sur le signal physique et le signal de calibration.

5.3 Installations et mesures des performances du système de calibration

Durant les deux années de conception et de mises au point du système de calibration électronique du calorimètre, de nombreux tests ont été effectués sur différents bancs de tests au LPNHE et sur le site de Fermilab (appelé "Test 5000" car il permet de tester une boîte entière de préamplificateurs, soit près de 5 000 canaux), avant l'installation finale du système de calibration dans l'électronique du calorimètre de DØ. Le tableau 5.2 reprend chronologiquement l'ensemble des tests effectués, de la conception à l'installation.

Période	Station de test	Modules testés / installés / type d'étude
Mars – octobre 98	Paris/Orsay	Conception et réalisation des cartes pulseurs et des "fanouts" prototypes
Novembre 98	Test 5000	Premiers tests des cartes pulseurs prototypes
Février – juin 99	Paris/Orsay	Finalisation de la conception des cartes pulseurs et des cartes "fanout"
Mai – Juillet 99	Paris	Mesures des 15 pulseurs sur le banc de test à Paris
Juillet 99	DØ	Installation des câbles de courants des calorimètres central et nord
Décembre 99	DØ	Installation des 12 cartes pulseurs
Janvier– mai 00	Test 5000 / DØ	Tests du système de calibration dans la station Test 5000 et sur le détecteur
Juin 00	DØ	Installation d'un filtrage capacitif des alimentations des pulseurs Installation des alimentations Installation et câblage de la PIB
Octobre 00	DØ	Installation des câbles de courant ECS
Décembre 00	DØ	Mesures de réflectométrie
Décembre 00 – janvier 01	DØ	Mesures des formes d'ondes

TAB. 5.2 – Les différentes campagnes de tests et d'installation du système de calibration électronique du calorimètre.

5.4 Mesures sur le banc de test à Paris

Quinze pulseurs ont été produits. Douze d'entre eux sont nécessaires pour le calorimètre de DØ et un pour le détecteur inter-cryostat ICD [6]. Les 2 pulseurs restants ont été produits afin de pallier une éventuelle défaillance d'un des autres pulseurs.

Une bonne uniformité entre les douze pulseurs utilisés pour le calorimètre est souhaitée afin de ne pas avoir recours à des corrections logicielles additionnelles qui seraient alors à appliquer soit au niveau de l'amplitude des signaux de calibration (afin d'uniformiser les 12 pulseurs), soit au niveau des signaux mesurés en sortie de chaîne d'acquisition (ce qui pourrait introduire des biais). De même, une bonne linéarité est nécessaire.

Un banc de test a été développé au LPNHE au printemps 1999 afin de tester le bon fonctionnement des 15 pulseurs, la linéarité des 96 canaux de chaque pulseur et l'uniformité des pulseurs entre eux. Une vue schématique du banc de test est donnée dans la figure 5.9. Le système d'acquisition utilisé pour ce banc de test réside sur un P.C. Il pilote le pulseur par le bus-série et permet de modifier la hauteur du signal et les commandes de validation envoyées à une carte "fanout" prototype (représentant un tiers d'une carte "fanout" totale). A la sortie de la carte "fanout" les 96 signaux de calibration sont multiplexés par une carte développée à cet effet [7] avant d'être digitisés par un ADC contrôlé par le programme d'acquisition.

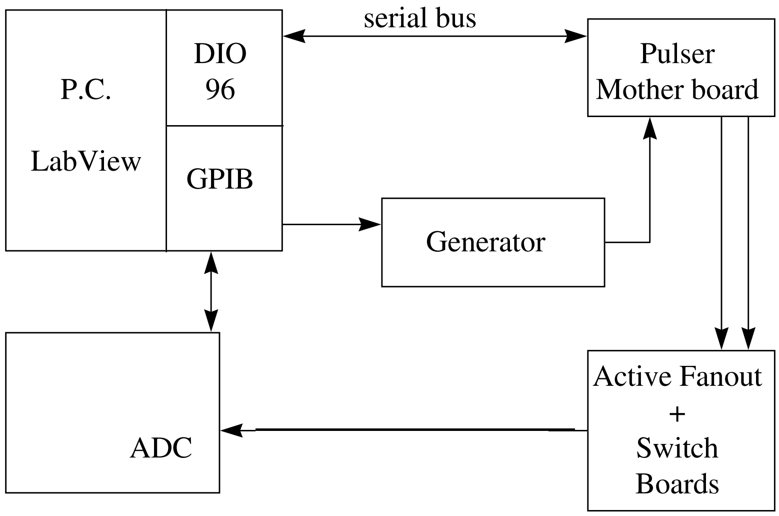

FIG. 5.9 – Banc de test des pulseurs développé à Paris.

La figure 5.10 représente les résultats des mesures des courants des pulseurs en fonction de la valeur de DAC fournie. Ces mesures ont été effectuées sur ce banc avec un ampèremètre de précision. La distribution des pentes des 96 canaux des 15 pulseurs

(1440 canaux au total) est représentée dans la figure 5.10a. La valeur moyenne des pentes est de 8.25 10^{-7}A par unité de DAC (u.DAC). Le courant maximum délivré est d'environ 100 mA (la dynamique du DAC étant de 17 bits), ce qui est supérieur au courant nécessaire pour saturer les préamplificateurs (50 mA). La plage dynamique qui sera utilisée lors de la calibration dans des conditions physiques sera donc de 16 bits. On note dans la distribution de la figure 5.10a la présence d'un pic séparé du reste des canaux à une valeur moyenne de 8.28 10^{-7} A/u.DAC. Ce pic correspond aux 96 canaux d'un même pulseur, pour lequel des résistances de précision d'une série de production différente ont été utilisées, augmentant de façon uniforme les pentes de tous les canaux de ce pulseur. Ce pulseur ne sera pas utilisé pour l'un des 12 modules du calorimètre afin de ne pas dégrader l'uniformité des pulseurs, mais pourra être utilisé pour la calibration du détecteur inter-cryostat, puisque sa calibration est indépendante de celle du calorimètre. La dispersion de l'ensemble des pentes est inférieure à 0.2%.

La figure 5.10b représente la dispersion des pentes des canaux normalisées à la valeur moyenne des pentes de chaque pulseur, ce qui représente l'uniformité des 96 canaux de chaque pulseur. Dans ce cas, l'uniformité est meilleure que 0.1%. La figure 5.10c représente la dispersion des pentes des canaux normalisées à une valeur globale correspondant à la valeur moyenne des 1440 canaux, représentant ainsi l'uniformité des pulseurs entre eux. Dans ce cas, l'uniformité est meilleure que 0.2%. On note ici aussi le pic correspondant aux canaux du pulseur qui sera utilisé pour l'ICD.

5.5 Mesures sur le banc de test à Fermilab

Avant d'être installés dans l'électronique finale du calorimètre, les pulseurs ont été testés à Fermilab dans un banc de test (Test 5000). Une vue schématique du Test 5000 est donnée dans la figure 5.11. Ce banc de test a aussi été utilisé pour tester l'électronique du calorimètre de façon générale lors des différentes étapes de son développement, à savoir les nouveaux préamplificateurs, leurs alimentations, les nouveaux soustracteurs de ligne de base. Il est également utilisé pour tester la stabilité de l'électronique sur une grande échelle de temps ("burn-in") et étudier les taux de défaillance prématurés, ainsi que pour tester la synchronisation des systèmes de temporisation avec les systèmes de digitisation.

Dans le banc de Test 5000 la chaîne électronique est assemblée de façon identique à celle utilisée pour le détecteur. Le système de calibration a été inséré dans cette chaîne. Les cellules du calorimètre sont simulées par des capacités adaptées et protégées par un blindage électromagnétique.

Le système d'acquisition utilisé pour ce banc de test consiste en un ordinateur personnel connecté aux ADC. Le programme d'acquisition utilisé, appelé B3Run, permet de configurer le banc de test, de lire et de contrôler en ligne les données, ainsi que de sauvegarder les événements pour les étudier ultérieurement. Nous avons modifié ce

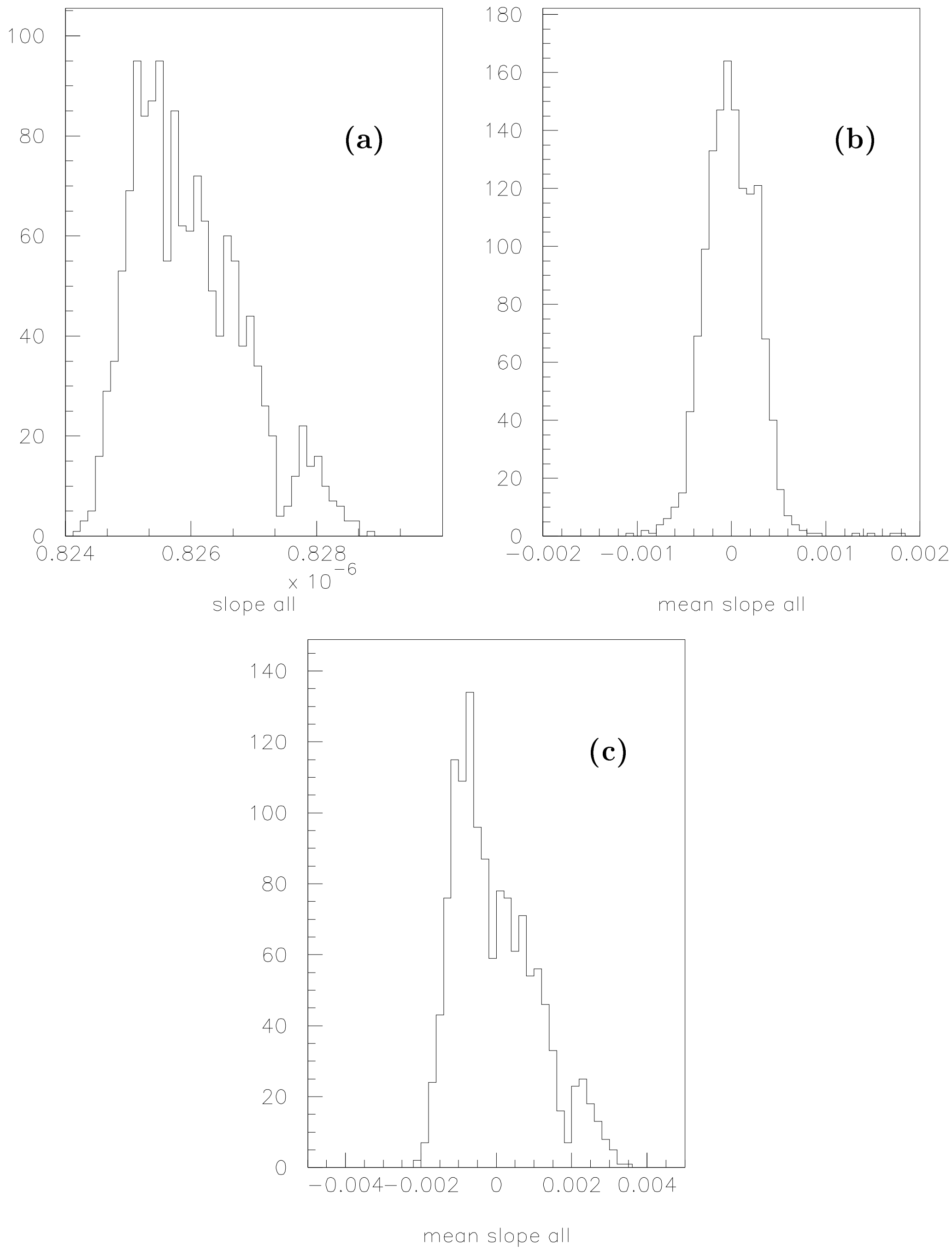

FIG. 5.10 – Mesures de l'uniformité des courants continus délivrés par les pulseurs sur le banc de test à Paris.

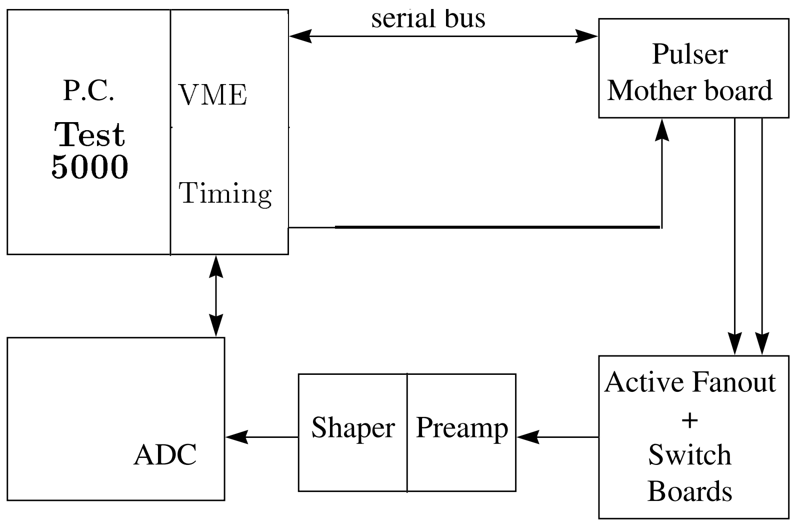

FIG. 5.11 – Banc de test (Test 5000) à DØ représentant un douzième de l'électronique du calorimètre.

programme afin de pouvoir configurer les pulseurs Run II, à savoir :

- la hauteur du signal (valeur DAC),
- les validations pour chaque canal des pulseurs,
- les commandes pour chaque groupe de 16 canaux,
- les retards des signaux.

De plus, nous avons implémenté un certain nombre d'automatisations afin de pouvoir effectuer des prises de données en faisant varier de façon automatique la hauteur du signal et les retards des signaux.

5.5.1 Mesures du bruit du système de calibration

Avant de déterminer les performances du système de calibration dans l'ensemble du système électronique du calorimètre, des mesures du bruit ajouté par le système de calibration dans l'électronique ont été effectuées. L'idée est d'étudier la variation de la hauteur et de la largeur des piédestaux des canaux du calorimètre dans différents modes de fonctionnement des pulseurs (pulseurs non alimentés, pulseurs alimentés mais sans injecter de courant, pulseurs fonctionnant mais avec les courants bloqués au niveau des “fanouts” (le courant est bloqué avant les préamplificateurs)). Plusieurs acquisitions de données ont été effectuées, en faisant varier la valeur du DAC par pas de 1000 unités sur environ la moitié de la gamme dynamique (au maximum 75 000 unités de DAC) et en forçant le gain des préamplificateurs à 1. Pour chaque valeur de DAC, 100 mesures des valeurs des piédestaux ont été effectuées.

La figure 5.12 représente les mesures des largeurs des piédestaux (en coups ADC) pour 3 canaux dans le cas où les pulseurs injectent des courants dans les "fanouts". On note une augmentation de la largeur des piédestaux d'environ 35 coups ADC, ce qui semble signifier que les pulseurs injectent du bruit dans l'électronique du calorimètre. A petites valeurs de DAC (jusqu'à 10 000), le bruit augmente jusqu'à environ 50 coups ADC puis présente un plateau à environ 35 coups ADC indépendant de la hauteur du signal. On note ensuite une légère décroissance du bruit pour les grandes valeurs de DAC (au-delà de 50 000). Cette augmentation du bruit n'est pas rédhibitoire pendant les prises de données physiques car les pulseurs ne seront pas utilisés et n'injecteront pas de courant dans ce cas. Par contre, ils nécessiteront lors des procédures de calibration d'accumuler un grand nombre de points mesurés pour chaque valeur utilisée de hauteur de signal afin de réduire statistiquement l'erreur due au bruit des pulseurs.

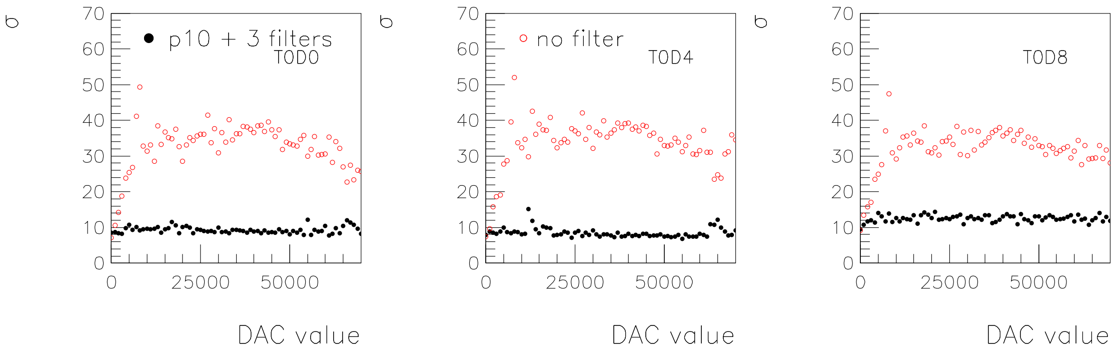

FIG. 5.12 – Largeurs des piédestaux en coups ADC pour 3 canaux de lecture lorsque les pulseurs injectent des courants avant (points ouverts) et après (point fermés) filtrage capacitif des alimentations des pulseurs.

Optimisation du bruit du système de calibration

Plusieurs études ont été effectuées afin de comprendre l'origine du bruit rajouté par le système de calibration. Il s'est avéré que le bruit était dû à un problème de stabilité à haute fréquence des alimentations des pulseurs, provoquant une instabilité du courant engendré par les pulseurs. Ce problème a été résolu par l'ajout d'un filtrage capacitif sur l'arrivée des alimentations. L'effet de ce filtrage est représenté sur la figure 5.12 où les points fermés représentent les largeurs des piédestaux mesurés dans les mêmes conditions que précédemment. Le bruit présente un plateau indépendant de la hauteur du signal y compris à très faible et très grande hauteur du signal, ce qui n'était pas le cas avant filtrage. La largeur des piédestaux est d'environ 10 coups ADC, soit 4 fois moins qu'avant filtrage, et correspond à la largeur des piédestaux lorsque les pulseurs ne sont pas alimentés, signifiant que le système de calibration n'injecte plus de bruit significatif dans le reste de la chaîne électronique du calorimètre.

5.5.2 Linéarité

La linéarité des pulseurs en fonction de la hauteur du signal (DAC) a été mesurée en faisant varier la valeur du DAC par pas de 1000 unités sur environ l'ensemble de la gamme dynamique et en forçant le gain des préamplificateurs à 1. Pour chaque valeur de DAC 100 mesures ont été effectuées. La figure 5.13a représente la variation de la hauteur du signal lu (en coups ADC) en fonction de la valeur du DAC pour un canal électromagnétique. La pleine échelle est obtenue à environ 85 000 unités de DAC (correspondant à un courant délivré d'environ 70 mA) lors de la saturation des préamplificateurs. En dessous de 85 000 unités de DAC, le comportement est linéaire sauf à 70 000 unités de DAC où on note un décrochage. Ce comportement n'est pas dû au système de calibration mais au système de lecture présentant une instabilité à environ 25 000 coups ADC. La figure 5.13b représente l'erreur en coups ADC sur la mesure de chaque point en fonction de la valeur DAC. L'erreur est constante à environ 10 coups ADC jusqu'à la zone de saturation des préamplificateurs (à environ 85 000 unités de DAC) où elle augmente brutalement à environ 25 coups ADC.

Afin de déterminer la linéarité, un ajustement linéaire est effectué entre 5 000 et 60 000 unités de DAC. L'écart à la linéarité est défini comme

$$\frac{ADC_{ajusté} - ADC_{mesuré}}{ADC_{maximum}} \tag{5.1}$$

où $ADC_{ajusté}$ et $ADC_{mesuré}$ représentent les valeurs ajustées et mesurées pour une valeur de DAC donnée, et $ADC_{maximum}$ correspond à la plus grande valeur ADC lue, obtenue à saturation (en l'occurence 32 768, correspondant à la dynamique de 15 bits des ADC).

Cet écart est représenté dans la figure 5.13c pour le même canal que précédemment. L'écart à la linéarité en utilisant cette définition est inférieur à 0.25% pour la région DAC utilisée lors de l'ajustement. Au-delà, le décrochage à ∼70 000 unités de DAC est visible par un écart à la linéarité de 0.8%. L'écart à la linéarité à petite valeur de DAC est inférieur à 1%. L'origine de cet écart à grande valeur de DAC n'est pas totalement identifiée mais il y a de fortes indications qu'il soit lié à un défaut dans les prototypes de cartes BLS.

L'influence du choix du gain des préamplificateurs (gain 1 ou gain 8) sur la linéarité a été étudiée. La figure 5.14a compare la variation de la hauteur du signal lue (en coups ADC) en fonction de la valeur du DAC pour ces deux valeurs de gain. La gamme dynamique du gain 8 correspond à des valeurs DAC inférieures à 10 000. La figure 5.14b représente l'écart à la linéarité dans le cas du gain 8 pour un ajustement linéaire entre 300 et 8 000 unités de DAC. Dans cette zone, l'utilisation du gain 8 permet d'obtenir un écart à la linéarité inférieur à 0.1%, plus faible qu'en gain 1. Au-delà de la zone considérée lors de l'ajustement (entre 8 000 et 12 000 unités de DAC), on note une augmentation de la non-linéarité jusqu'à 0.3% en s'approchant de la zone de saturation pour des valeurs ADC de 30 000. Cet effet sera partiellement compensé par l'ajustement du seuil de basculement entre le gain 8 et le gain 1.

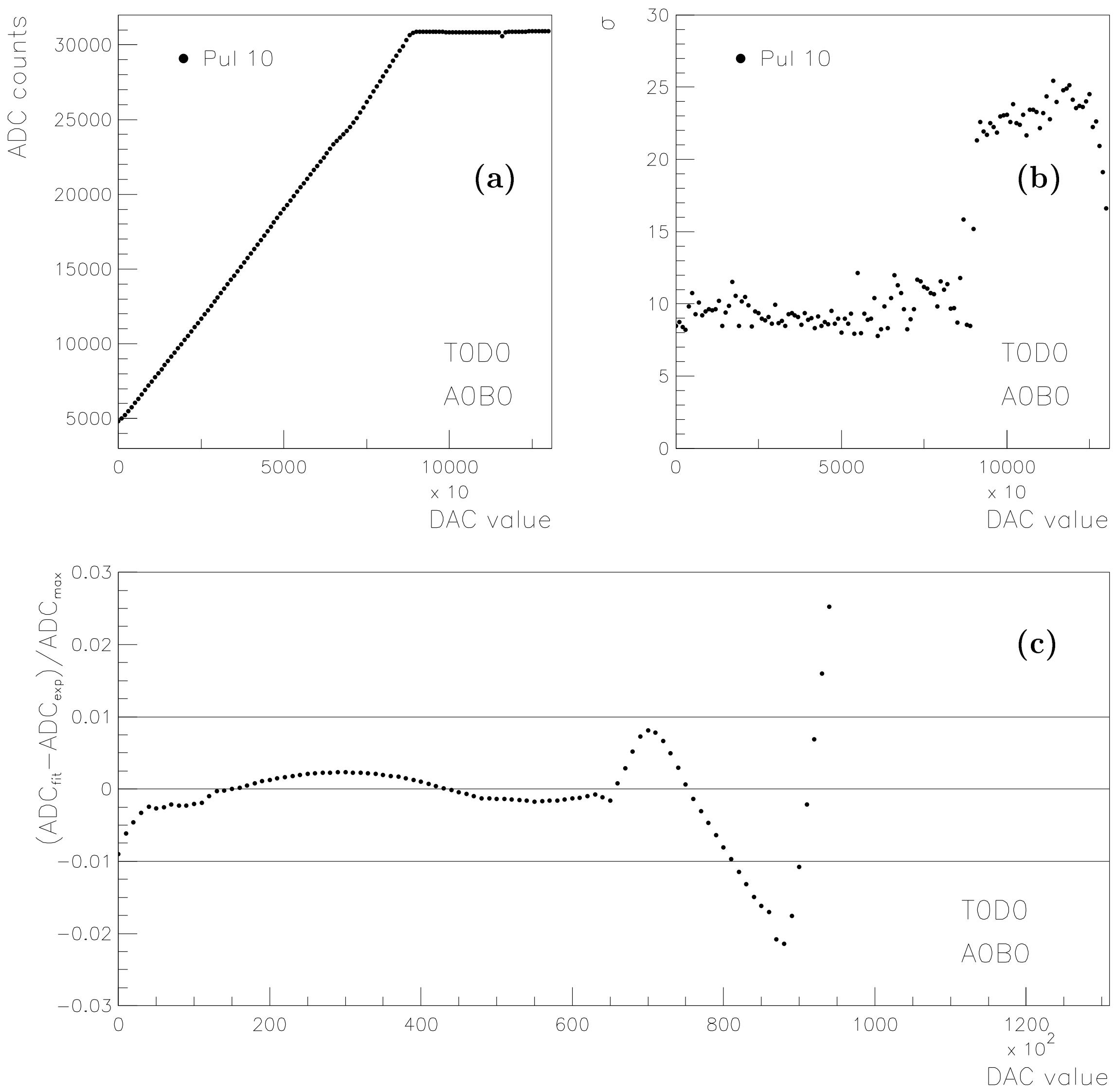

FIG. 5.13 – Mesures après filtrage capacitif des alimentations des pulseurs. (a) Variation de la hauteur du signal (en coups ADC) en fonction de la valeur du DAC pour un canal électromagnétique. (b) Largeur du signal en fonction de la valeur du DAC. (c) Ecart à la linéarité.

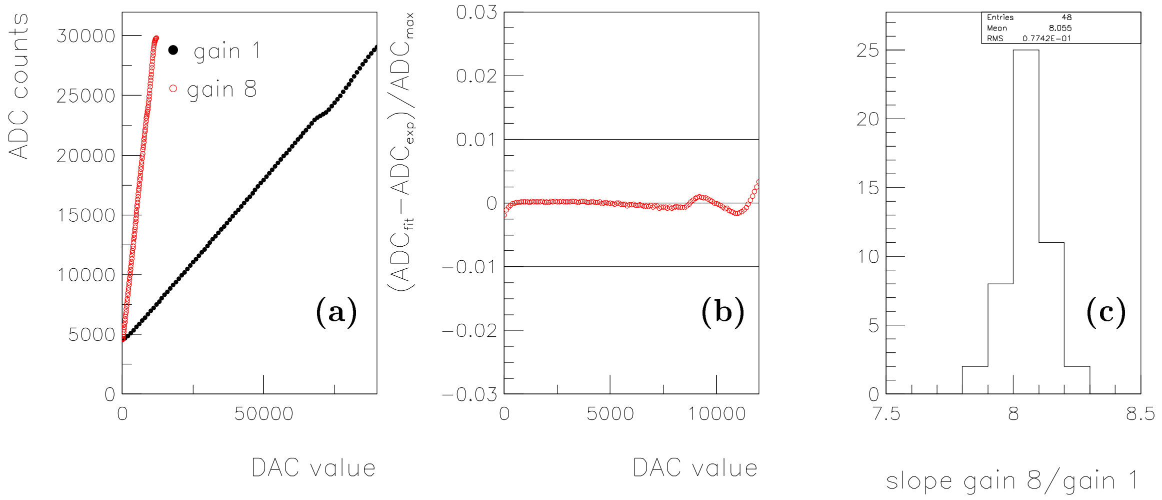

FIG. 5.14 – Comparaisons des linéarités pour les 2 valeurs de gain des préamplificateurs (gain 1 et gain 8). (a) Variations des hauteurs des signaux (en coups ADC) en fonction de la valeur du DAC pour un canal électromagnétique. (b) Ecart à la linéarité dans le cas du gain 8. (c) Distribution du rapport mesuré entre les gains 8 et 1 pour 48 canaux correspondant à une carte de 48 préamplificateurs.

La figure 5.14c représente la distribution du rapport mesuré entre les gains 8 et 1, correspondant au rapport des pentes obtenues lors des ajustements linéaires, et ceci pour 48 canaux correspondant à une carte de 48 préamplificateurs. Pour cette carte de préamplificateurs, la valeur moyenne des rapports des gains est de 8.06 avec une dispersion de 1%. L'un des objectifs de la calibration électronique est de pouvoir corriger une éventuelle non-uniformité des gains des préamplificateurs, ce qui sera possible grâce à la précision élevée du système de calibration de 0.1%.

5.5.3 Uniformité

L'uniformité des différents pulseurs a été mesurée lors de plusieurs campagnes, et les mesures finales ont été effectuées à l'été 2000, avant l'installation finale des pulseurs dans le détecteur. Lors de cette dernière prise de données, l'uniformité des 1440 canaux des 15 pulseurs qui ont été installés dans l'électronique du calorimètre a été déterminée grâce au banc de Test 5000.

La figure 5.15 représente la dispersion des pentes des canaux normalisées à la valeur moyenne des pentes de chaque pulseur. Pour chaque pulseur, 12 des 96 canaux sont mesurés par un même canal de lecture du calorimètre afin de s'affranchir de la non-uniformité des canaux de lecture. L'uniformité de l'ensemble pulseurs et "fanouts" dans la chaîne de lecture complète est meilleure que 0.4%. Cette valeur est à comparer à la valeur de 0.1% mesurée avec le banc de test à Paris qui avait été obtenue avec les

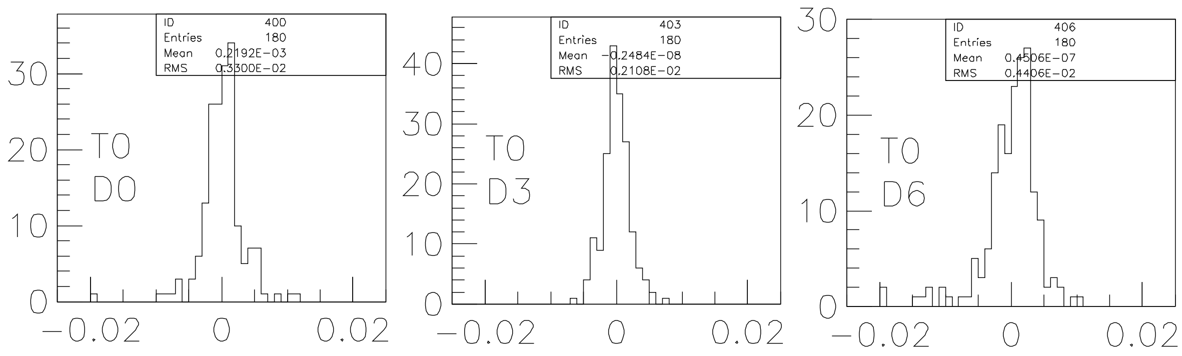

FIG. 5.15 – Mesures de l'uniformité des pentes de l'ensemble des canaux des 15 pulseurs.

pulseurs seuls (sans "fanouts") en mesurant directement les courants délivrés.

5.5.4 Calibration en temps

Plusieurs paramètres temporels interviennent dans l'électronique du calorimètre. Le paramètre temporel principal pour la synchronisation des différents systèmes de l'électronique du calorimètre est le délai t_{sync} entre l'échantillonnage du signal venant du détecteur par rapport au signal de déclenchement de la carte "T&C", envoyé aux pulseurs. Pour la calibration électronique, il est indispensable de connaître cette information afin de savoir à quel moment envoyer les impulsions de calibration afin qu'elles soient échantillonnées à leur maximum. Le délai t_{sync} est contrôlé par la carte "T&C"de synchronisation temporelle du calorimètre. Ce délai peut être ajusté de façon logicielle par pas de 132 ns. Un ajustement fin de ce délai peut être effectué en retardant le signal grâce à des câbles.

La figure 5.16 donne une représentation schématique de l'influence de t_{sync}. Les possibilités d'échantillonnage sont représentées par des flèches pour différents pas de 0, ± 3 et + 6 pas de 132 ns. Les impulsions de calibration représentées atteignent leur maximum (après mise en forme) après un temps de montée de 400 ns. Afin que les impulsions soient échantillonnées à leur maximum pour mesurer correctement leur amplitude, les impulsions doivent être retardées. Ceci est possible grâce au retard fin de 2 ns (avec une dynamique 8 bits de 512 ns) généré par les lignes à retard des pulseurs.

Reconstruction temporelle des signaux de calibration

La variation des retards des pulseurs permet aussi de reconstruire la forme des impulsions de calibration après mise en forme par pas de 2 ns en utilisant l'électronique d'acquisition du calorimètre. La figure 5.17 représente la forme des signaux mesurés pour

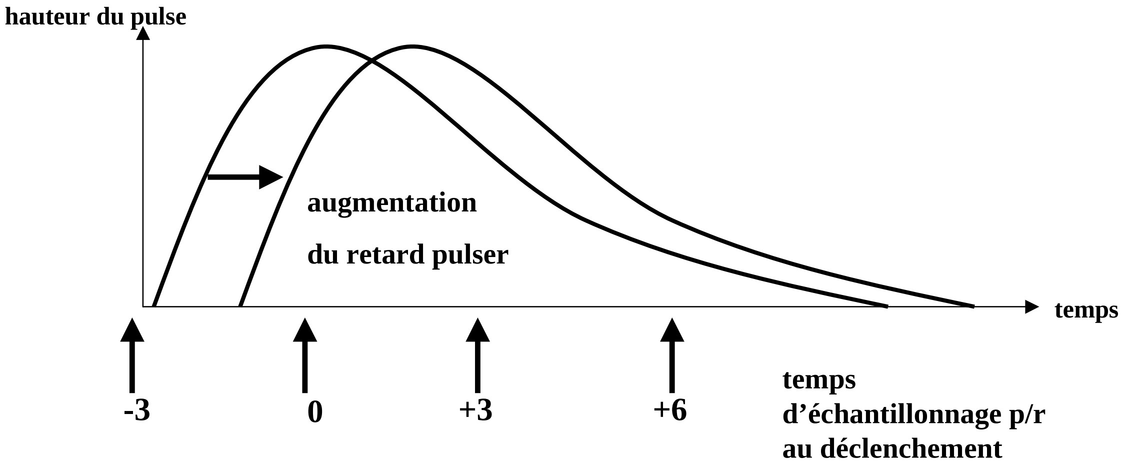

FIG. 5.16 – Représentation schématique de l'influence de l'intervalle en temps t_{sync} entre l'échantillonnage et le déclenchement de la carte "Timing and Control". Les valeurs -3, 0, $+3$ et $+6$ correspondent à des multiples du temps de croisement de 132 ns.

un canal électromagnétique (a) et hadronique (b) du calorimètre. Les signaux ont été reconstruits en effectuant deux mesures, l'une avec un temps d'échantillonnage t_{sync} de 396 ns, et la seconde avec un temps d'échantillonnage de 792 ns, tout en faisant varier les retards des pulseurs sur l'ensemble de la gamme dynamique de 512 ns. Ceci permet de reconstruire la forme des signaux sur une échelle de temps égale à deux fois 396 ns, soit environ 800 ns. Les impulsions de calibration étant *retardées*, le sens de l'écoulement du temps est inversé sur la figure 5.17, la montée du signal débute à droite de la figure à $\sim$700 ns et le maximum du signal est atteint à gauche de la figure à $\sim$300 ns. Le maximum du signal n'est pas très prononcé et est atteint pour des temps différents pour les canaux électromagnétiques et hadroniques, à $\sim$390 ns pour le canal électromagnétique et $\sim$375 ns pour le canal hadronique.

La forme des signaux reconstruits varie fortement avec la valeur de la capacité détecteur équivalente à chaque cellule du calorimètre, ce qui se traduit par un comportement différent pour les canaux électromagnétiques (capacité $\sim$ 0.4 nF) et hadroniques (capacité $\sim$ 4 nF). Cette variation est due à la reflexion du signal de calibration par le détecteur qui dépend de cette capacité. Le signal après mise en forme sera donc une superposition du signal de calibration en temps et du signal de calibration réfléchi. Pour les canaux électromagnétiques, cet effet est faible (cf. figure 5.17c) mais il est bien visible dans le cas des canaux hadroniques à grande capacité (cf. figure 5.17d) où la réflexion apparaît à 600 ns.

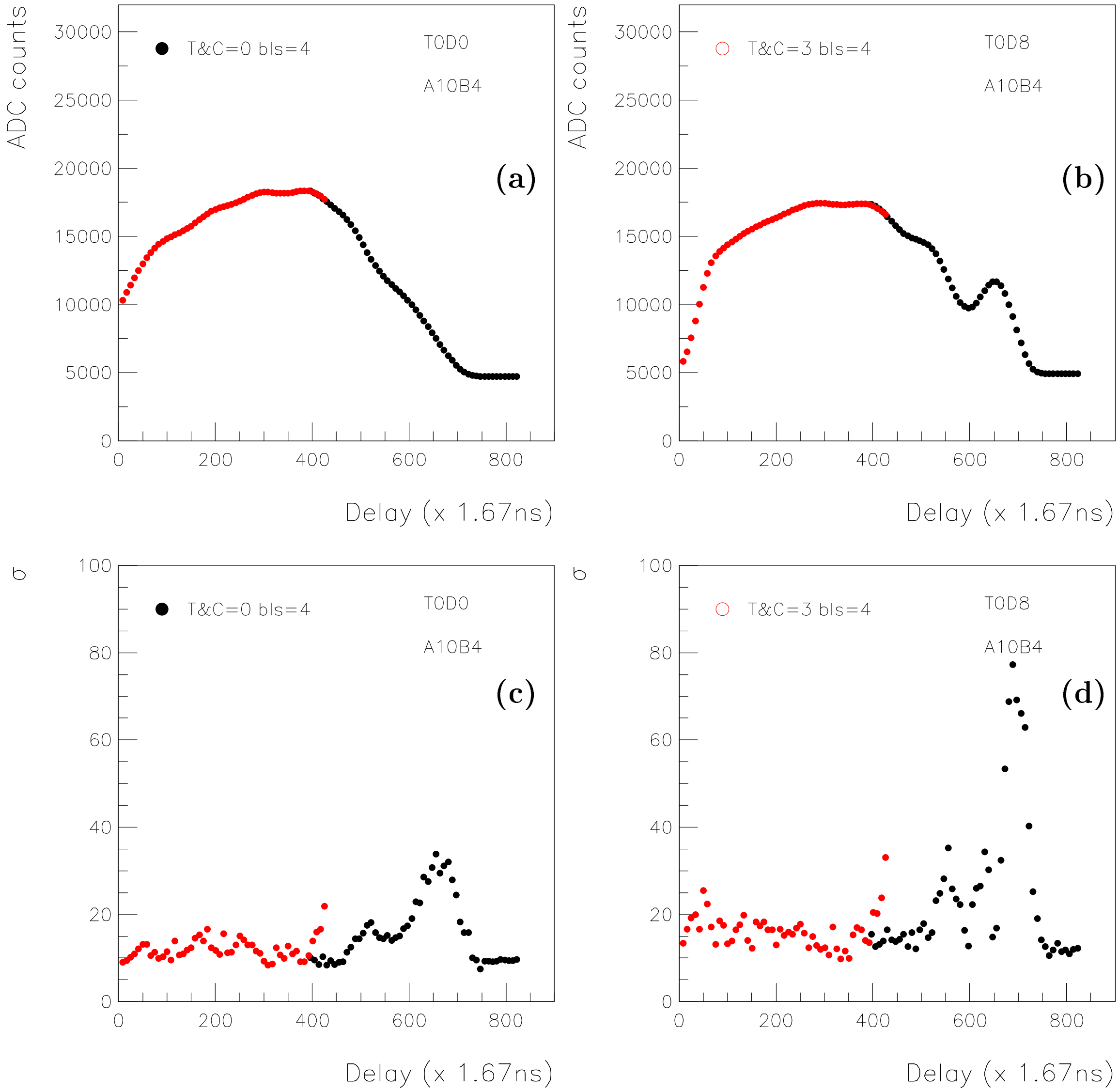

FIG. 5.17 – Formes des signaux mesurés pour deux canaux électromagnétique (a) et hadronique (b) du calorimètre et largeurs correspondantes (c,d).

Calibration des lignes à retard

La calibration des lignes à retard des pulseurs a été effectuée en déterminant la valeur du pas qui est donnée nominalement à 2 ns en utilisant des délais t_{sync} du calorimètre de 396 ns et 792 ns et en ajustant l'unité du retard jusqu'à ce que les deux courbes se superposent. La valeur moyenne du pas de retard a été mesurée à 1.67 ns.

Effet de la soustraction de ligne de base

L'amplitude mesurée des signaux après mise en forme est la différence entre l'amplitude maximale mesurée et la ligne de base du signal déterminée à l'instant t_{zero} après le maximum. La valeur de t_{zero} est un multiple de 132 ns, et doit être choisie suffisamment grande sous peine d'échantillonner la ligne de base pendant la montée du signal. Les figures 5.17c,d représentent les largeurs des signaux (en coups ADC) correspondant aux figures 5.17a,b pour un choix $t_{zero} = 528$ ns en fonction de la valeur des retards des pulseurs. Ceci explique la descente rapide du signal à partir de ~ 100 ns. Il en résulte que pour les mesures de calibration la soustraction de la ligne de base sera effectuée à 5 fois la valeur du temps entre deux croisements (5×132 ns) au lieu de 3×132 ns nominalement.

Conclusions pour la détermination des stratégies de calibration

Ces études ont permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres temporels intervenant dans l'électronique du calorimètre, et plus particulièrement les temps choisis pour l'échantillonnage maximal du signal et la détermination de la ligne de base du signal. Par la suite il s'agira de déterminer les temps d'échantillonnage maximal de toutes les voies du calorimètre, qui seront stockés dans une base de données. La stabilité de ces valeurs en fonction de la hauteur des signaux de calibration devra également être étudiée et éventuellement corrigée. Cependant les prises de données de calibration ont une contrainte de rapidité (elles devront pouvoir s'effectuer en environ 30 minutes) et une optimisation de la calibration canal par canal est impossible. Par contre il sera possible de choisir des valeurs temporelles en fonction des valeurs des capacités des cellules du détecteur ce qui correspondrait à une différentiation entre les canaux électromagnétiques et hadroniques. Ceci nécessiterait d'effectuer des prises de données de calibration en utilisant différentes valeurs de retard des signaux de calibration. Une autre possibilité serait de déterminer une fonction de correction des amplitudes mesurées en fonction du type de canal électromagnétique ou hadronique.

5.5.5 Diaphonie

Les mesures de diaphonie sont effectuées en envoyant un signal de calibration sur un canal en faisant varier sa hauteur sur l'ensemble de la gamme dynamique, afin d'étudier la présence de signal dans les canaux voisins. Ces mesures ont été effectuées en faisant varier la valeur du DAC par pas de 500 unités en forçant le gain des préamplificateurs à la valeur unité.

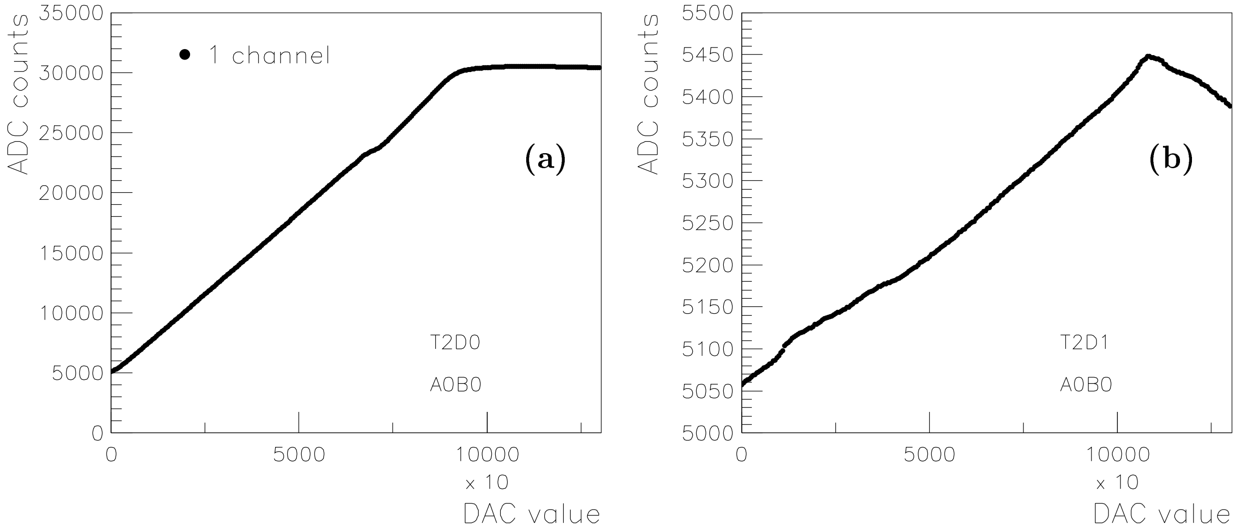

FIG. 5.18 – Hauteur du signal en fonction de la valeur de DAC pour un canal du calorimètre recevant le signal de calibration (a) et mesure de la diaphonie pour le canal immédiatement voisin longitudinalement dans la même tour et situé sur la même carte de préamplificateurs.

La figure 5.18 représente le signal observé en fonction de la valeur de DAC pour un canal du calorimètre recevant le signal de calibration (a) et pour le canal immédiatement voisin longitudinalement dans la même tour et situé sur la même carte de préamplificateurs. Pour le canal calibré, la hauteur du signal mesuré varie entre 5 000 [1] (correspondant à la valeur de son piédestal) et 32 000 coups ADC (à saturation). On observe pour le canal voisin une augmentation du signal mesuré, signant la présence de diaphonie. Cette augmentation est linéaire en fonction de la valeur du DAC et atteint un maximum de 400 coups ADC, soit 1.5% de la valeur ADC du canal pulsé, après soustraction des piédestaux.

La figure 5.19 représente la mesure de la diaphonie pour l'ensemble des 12 canaux d'une tour du calorimètre. Un même signal de calibration (correspondant à un canal pul-

[1]La valeur élevée du piédestal par rapport à la gamme dynamique disponible a été choisie afin de pouvoir détecter d'éventuels problèmes de soustraction de ligne de base.

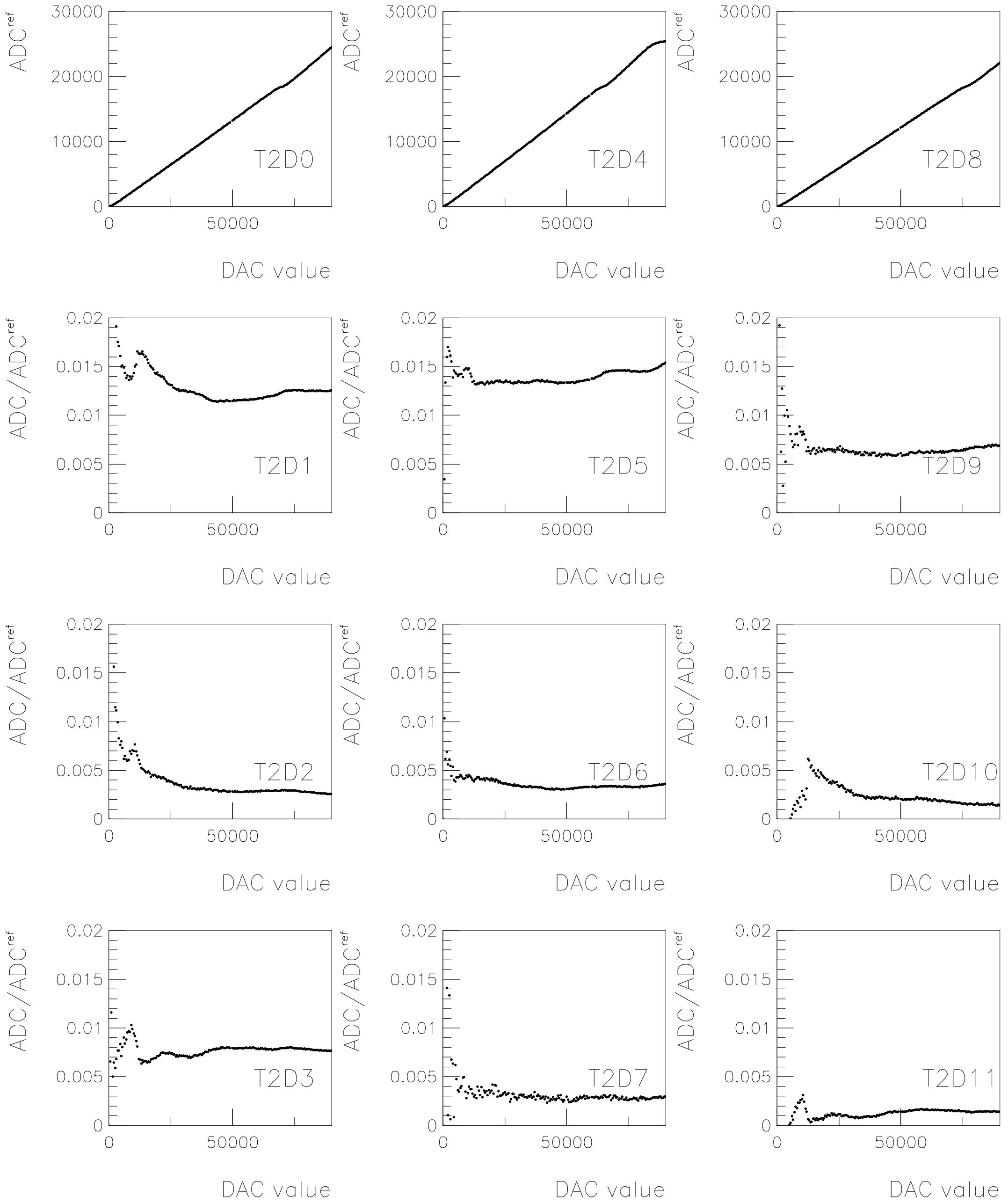

FIG. 5.19 – Hauteur du signal en fonction de la valeur de DAC pour les canaux T2D0, T2D4 et T2D8. Mesures de diaphonie pour les 9 autres canaux de la même tour du calorimètre en pourcentage du signal injecté dans les trois canaux ci-dessus. Les indices des figures T2D0 à T2D11 désignent la position longitudinale des canaux dans la tour 2.

seur et un "switch" de "fanout") est envoyé sur 3 des canaux de cette tour, correspondant aux positions notées D0, D4 et D8. La valeur de diaphonie est maximale pour les canaux voisins immédiatement supérieurs longitudinalement aux canaux calibrés (1.5%), et elle diminue pour les canaux plus éloignés des canaux calibrés (au maximum 0.75%). Le signal de calibration est aussi envoyé sur 3 canaux d'une deuxième tour de la carte de préamplificateurs où des résultats similaires sont obtenus. En ce qui concerne les 2 tours de 12 canaux qui ne sont pas calibrées, la diaphonie mesurée est proportionnelle là aussi à la valeur de DAC mais elle est très faible en amplitude, au maximum de 15 coups ADC, soit 0.05% du signal injecté dans les tours voisines.

La provenance de cette diaphonie a été déterminée et a deux origines : d'une part les couplages au niveau des connecteurs de sortie des cartes de préamplification (deux signaux provenant de deux canaux adjacents sortent sur deux pattes consécutives des connecteurs) ; d'autre part elle provient des couplages entre les câbles transportant le signal entre les boîtes de préamplification et le système de soustraction de ligne de base (câbles torsadés non-blindés). Aussi cette diaphonie affectera de façon identique le signal physique et le signal de calibration.

D'autres mesures seront nécessaires afin d'étudier la variation de la diaphonie sur un plus grand nombre de canaux, ainsi que sa variation en fonction des types de canaux électromagnétiques et hadroniques du calorimètre, et enfin sa variation en fonction du nombre de canaux des pulseurs envoyant des courants de calibration.

5.6 Mesures *in situ* auprès du calorimètre

Afin de préparer la qualification du calorimètre, des mesures *in situ* du système de calibration ont été effectuées directement auprès du calorimètre en février 2000 et de décembre 2000 à janvier 2001. A cette époque seule une partie des nouveaux préamplificateurs dans la configuration du Run II étaient installés, le reste de l'électronique de lecture (circuits de mise en forme et de soustraction de la ligne de base du signal) correspondait à la configuration du Run I. De plus le développement du système d'acquisition du calorimètre à ces périodes ne permettait pas son utilisation de façon intensive. Aussi un système de mesures a été developpé afin de s'affranchir du système d'acquisition.

La figure 5.20 donne une vue schématique de la configuration utilisée. Une carte développée à cet effet ("waveform scanner") prend la place d'une carte de préamplification et permet de mesurer simultanément 8 signaux de calibration à l'entrée des préamplificateurs sans être affectée par les reflexions dues au détecteur. Les formes d'ondes sont mesurées par un oscilloscope et transférées par un P.C. contrôlant l'acquisition. Elles sont analysées en terme d'amplitude du signal, de temps de montée et de descente du signal, de temps de pic du signal et de la charge collectée (intégrale du signal).

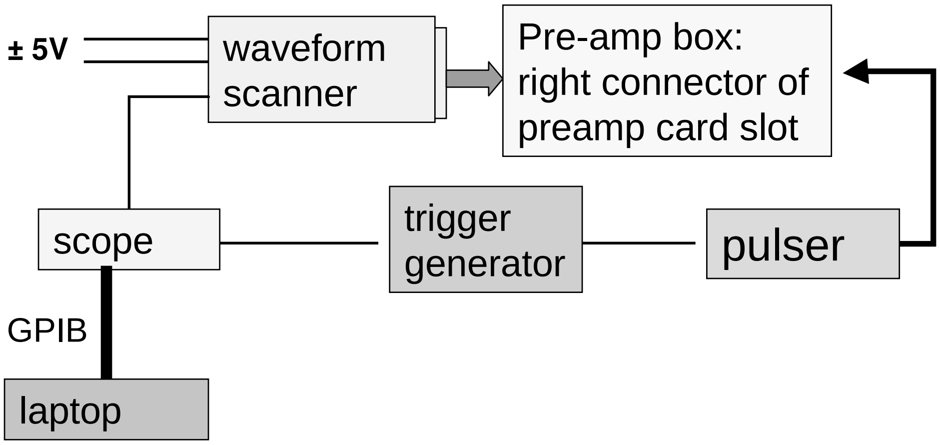

FIG. 5.20 – Vue schématique de la configuration utilisée pour la mesure des formes d'ondes auprès du calorimètre.

Ce système de mesure a tout d'abord été utilisé afin de détecter les canaux ne fonctionnant pas correctement à cause de mauvaises connexions au niveau des boîtes de préamplification (câbles courts entre les cartes "switch" générant les impulsions de calibration et les cartes de préamplification, mauvaise connexion des cartes "switch" sur les "fanout") et afin de vérifier le câblage des pulseurs (câbles de courants et de commandes entre les pulseurs situés sous le calorimètre et les boîtes de préamplification situées au-dessus du calorimètre).

Les mesures *in situ* ont été effectuées sans préamplificateurs installés. La figure 5.21a représente les amplitudes en Volt des signaux mesurés en sortie des 8 cartes "switch" en fonction du numéro de canal de lecture de la carte "waveform scanner" pour une hauteur de signal de 30 000 unités DAC. La figure 5.21b représente les mêmes mesures en fonction de la position du "switch" mesuré. Les mesures ont été effectuées en plaçant la carte "waveform scanner" sur 4 positions consécutives de cartes de préamplification sur une même boîte de préamplificateurs (correspondant aux 4 labels "slot" sur la figure). Ceci permet d'étudier des effets systématiques, car la connectique du fond de panier des boîtes de préamplificateurs envoie le signal d'un seul "switch" sur des canaux différents de la carte testée lorsque l'on change sa position. La figure 5.21 montre que les différences des mesures sont corrélées au canal de la carte test et non pas au "switch". Ceci est dû principalement aux capacités parasites utilisées sur chaque canal de la carte pour mesurer les préamplificateurs.

En supposant la non-uniformité des amplitudes due uniquement à la carte-test, une fonction de correction a été déterminée en normalisant les amplitudes à la valeur moyenne des amplitudes de chaque canal.

L'uniformité des 1152 canaux des 12 pulseurs installés dans l'électronique du calorimètre a ensuite été déterminée en utilisant ce système de mesures. La figure 5.22

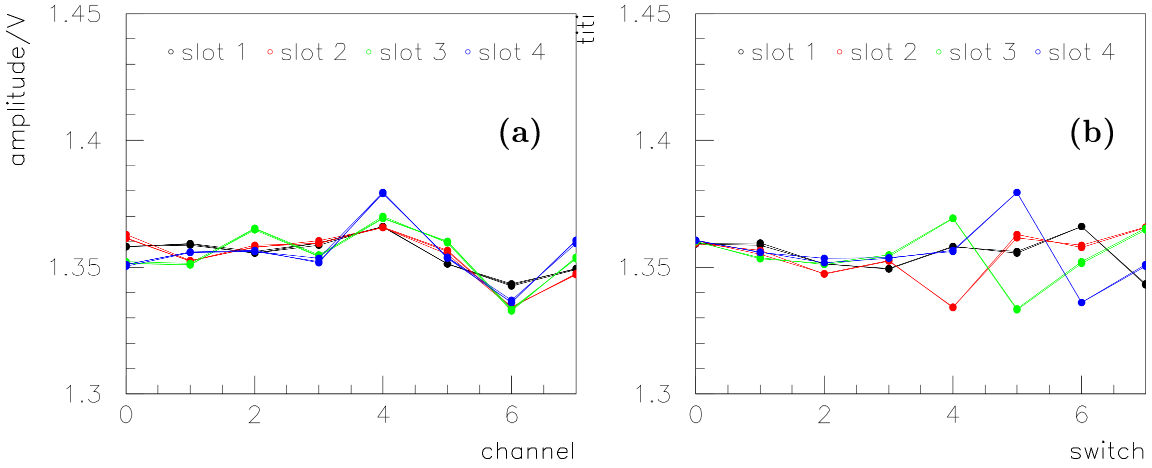

FIG. 5.21 – Amplitudes en volts des signaux mesurés en sortie des 8 cartes "switch" pour une hauteur de signal de 30 000 unités DAC en fonction du numéro de canal de lecture de la carte "waveform scanner" (a) et en fonction de la position du "switch" mesuré (b).

représente la distribution des amplitudes de ces 1152 canaux après correction de l'effet de la carte-test. La non-uniformité est inférieure à 0.8%, à comparer à la non-uniformité de 2% des amplitudes mesurée avant application de cette correction. Cette valeur de 0.8% est aussi à comparer à la valeur de 0.4% obtenue dans le Test 5000.

Par la suite l'effet résiduel des capacités parasites des pistes en fond de panier des boîtes de préamplification pourra être déterminé et corrigé en appliquant des facteurs de correction directement sur les constantes de calibration.

5.7 Système de calibration et système d'acquisition

5.7.1 La carte PIB

Nous avons développé au laboratoire une carte interface entre les pulseurs et le système d'acquisition de DØ ("Pulser Interface Board"). Elle a pour objectif de diminuer le temps passé par le système d'acquisition pour programmer les pulseurs et d'automatiser certaines opérations de calibration.

La figure 5.23 représente une photographie et une vue schématique du fonctionnement de la carte PIB.

La carte PIB permet de

- minimiser le nombre de transferts entre le système d'acquisition et le système de calibration du calorimètre,

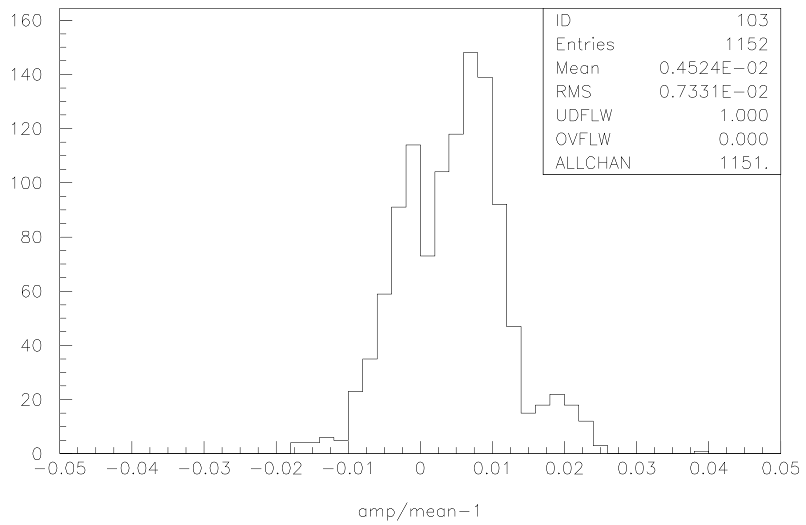

FIG. 5.22 – Mesures de l'uniformité des pentes de l'ensemble des 1152 canaux des 12 pulseurs et "fanouts" installés dans l'électronique finale du calorimètre après correction de l'effet de la carte "waveform scanner".

- effectuer des rampes automatisées sur les valeurs de DAC et des retards sans intervention du système d'acquisition, en comptant le nombre d'événements acceptés par le système de déclenchement de niveau 3,
- fournir au système de déclenchement de niveau 3 l'état de la carte PIB et la configuration exacte des pulseurs.

La PIB consiste en une carte basée sur une carte CPU commerciale (FIC 8320, processeur Motorola 68020) ayant une entrée VME et générant en sortie le protocole-série nécessaire à la communication avec les pulseurs. Le système d'acquisition ne fait plus que modifier l'état de la carte PIB et ainsi ne peut pas modifier directement la configuration des pulseurs.

Le volume d'informations nécessaires pour programmer un pulseur est de 168 bits, comprenant 18 bits de DAC, 6 bits de commandes pour les "fanouts", 96 bits de validation des canaux de chaque pulseur et 48 bits pour les 6 lignes à retard de 8 bits, soit un total de 2016 bits pour programmer les 12 pulseurs du calorimètre. Sans l'utilisation de la carte PIB, le système d'acquisition de DØ aurait dû envoyer ces 2016 bits en 2016 commandes VME 32 bits contenant chacune 1 bit d'information utile. Le temps nécessaire pour l'accomplissement d'une requête VME à DØ étant d'environ 1 ms, le temps nécessaire pour programmer entièrement les pulseurs aurait été d'environ 2 secondes (la séquentialité des commandes étant nécessaire) ce qui est rédhibitoire et occupe de façon inutile la bande passante du système d'acquisition. De plus, la nécessité de modifier la configuration des pulseurs lors d'études de linéarité ou de calibration en temps des canaux augmente également le temps d'occupation.

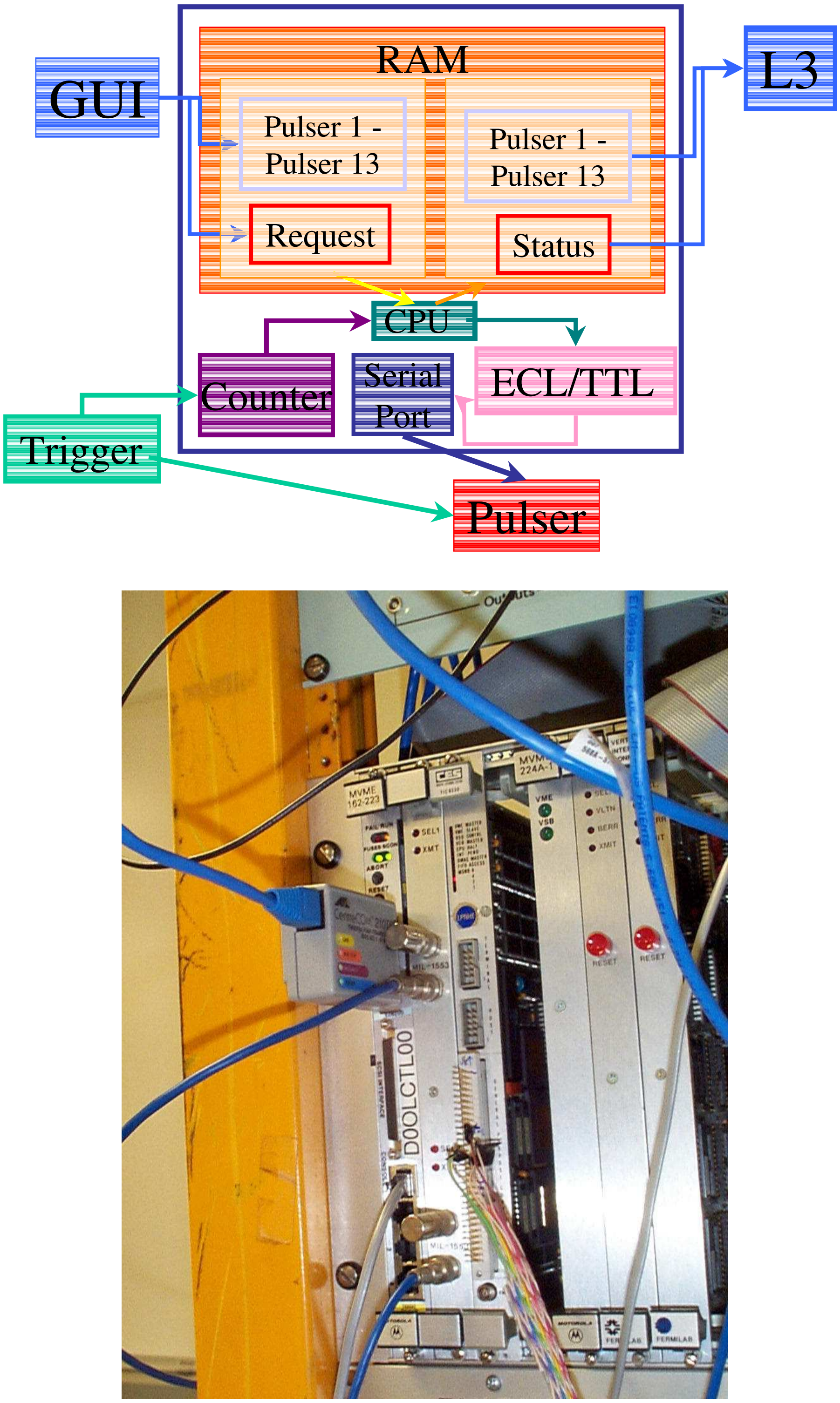

FIG. 5.23 – Vue schématique du fonctionnement et photographie de la carte PIB.

Le protocole de communication développé entre la carte PIB et les pulseurs afin de résoudre le problème de temps de communication est le suivant : les 168 bits composant la configuration complète d'un pulseur sont arrangés en 6 mots de 32 bits, envoyés par le système d'acquisition lors de 6 commandes VME, réduisant le temps nécessaire pour programmer l'ensemble des pulseurs à environ 70 ms. La carte PIB se charge ensuite de décoder les 6 mots de 32 bits avant d'envoyer chaque bit aux pulseurs via le bus-série.

Afin d'optimiser partiellement les procédures de calibration lors de rampes de linéarité et de retard, la carte PIB a été programmée afin de pouvoir modifier localement la valeur des DAC et des retards des pulseurs en recevant comme commandes les valeurs initiales et finales des rampes, le pas en unités de DAC ou de retard entre chaque point ainsi le nombre d'acquisitions à effectuer pour chaque point. La carte PIB reçoit le signal de commande de relecture des convertisseurs ADC analogique-digital envoyé par le système de déclenchement de niveau 3 et permet ainsi de compter le nombre d'acquisitions effectuées par le niveau 3 pour chaque valeur de DAC ou de retard.

La relecture de l'état des pulseurs par la carte PIB est possible et peut être comparée à l'information qui a été envoyée aux pulseurs. Le résultat de cette comparaison et de l'état de la carte PIB (transfert de données en cours ou non, relecture correcte ou non des pulseurs, configuration des pulseurs) est accessible par le déclenchement de niveau 3 et sera stocké dans l'en-tête des événements de calibration, afin de pouvoir rejeter les événements acquis lors de périodes de transition (modification de l'état des pulseurs), et de connaître pour chacun de ces événements la configuration exacte des pulseurs.

Nous avons effectué l'intégration de la carte PIB dans le système d'acquisition de DØ. Les outils génériques aux différents sous-détecteurs de DØ ont été utilisés. Nous avons développé une interface graphique permettant de choisir la configuration des différents pulseurs, à savoir la hauteur du signal, le registre de validation des canaux des pulseurs, les commandes de validation pour chaque groupe de 16 canaux et les retards des signaux. Cette interface est invoquée avant le début d'une prise de données de calibration par le programme COOR responsable de coordonner les modifications des configurations des composants électroniques faisant partie du système d'acquisition de données. COOR s'assure que les différentes requêtes qui lui sont adressées ne sont pas en conflit (de façon générale COOR interdit des modifications de la configuration de l'électronique lors d'une prise de données). Les requêtes de début et de fin de prises de données sont également gérées par COOR. L'information de la configuration des pulseurs est ensuite divisée en instructions VME avant d'être communiquée à la carte PIB.

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le nouveau système de calibration en-ligne du détecteur DØ pour le Run II. Nous avons montré que les performances atteintes respectent les contraintes imposées, à savoir des performances en linéarité et uniformité inférieures à 1% sans rajout de bruit dans la chaîne de lecture électronique.

Depuis le 1er mars 2001, date du début de la prise de données du Run II, notre système de calibration et les logiciels de pilotages de la calibration en-ligne sont utilisés intensivement par la collaboration pour la qualification du nouveau système de lecture du calorimètre et de son système de déclenchement.

Bibliographie

[1] Collaboration DØ, Phys. Rev. D **62** (2000) 092006.

[2] U. Baur, R. Ellis et D. Zeppenfeld, FERMILAB-PUB-00-297.

[3] J. Guida et D. Schamberger, *Calorimeter Studies*, Note DØ 3112 (1996).
J. Guida, *Calorimeter Hot Channel Study*, Note DØ 3080 (1996).
J. Guida et D. Schamberger, *Calorimeter Electronics Stability*, Note DØ 2928 (1996).
F. Wen, J. Guida et D. Schamberger, *DC gain fitting in DØ calorimeter electronics*, Note DØ 2927 (1993).
J. Guida, D. Schamberger et R. Smith, *Flagging Calorimeter Noisy Cells*, Note DØ 2379 (1994).

[4] A. Kotwal *et al.*, *Calorimeter Electronics Upgrade for Run 2*, DØ Technical Design Report (1998).

[5] P. Cornebise, P. Imbert Y. Jacquier, G. Martin, P. Petroff, C. de la Taille, P. Bailly, U. Bassler, G. Bernardi, J.F. Huppert, H. Lebbolo, F. Machefert, B. Olivier et A. Vallereau, *Run II Calorimeter Calibration System*, Note DØ 3731 (2000).

[6] L. Sawyer *et al.*, *Technical Design Report for the Upgrade of the ICD for DØ Run II*, Note DØ 2686 (2000).

[7] M. Motoya, *Développement d'un banc de test du système de calibration électronique du calorimètre de l'expérience DØ pour le Run II*, Rapport de stage de DUT (1999).