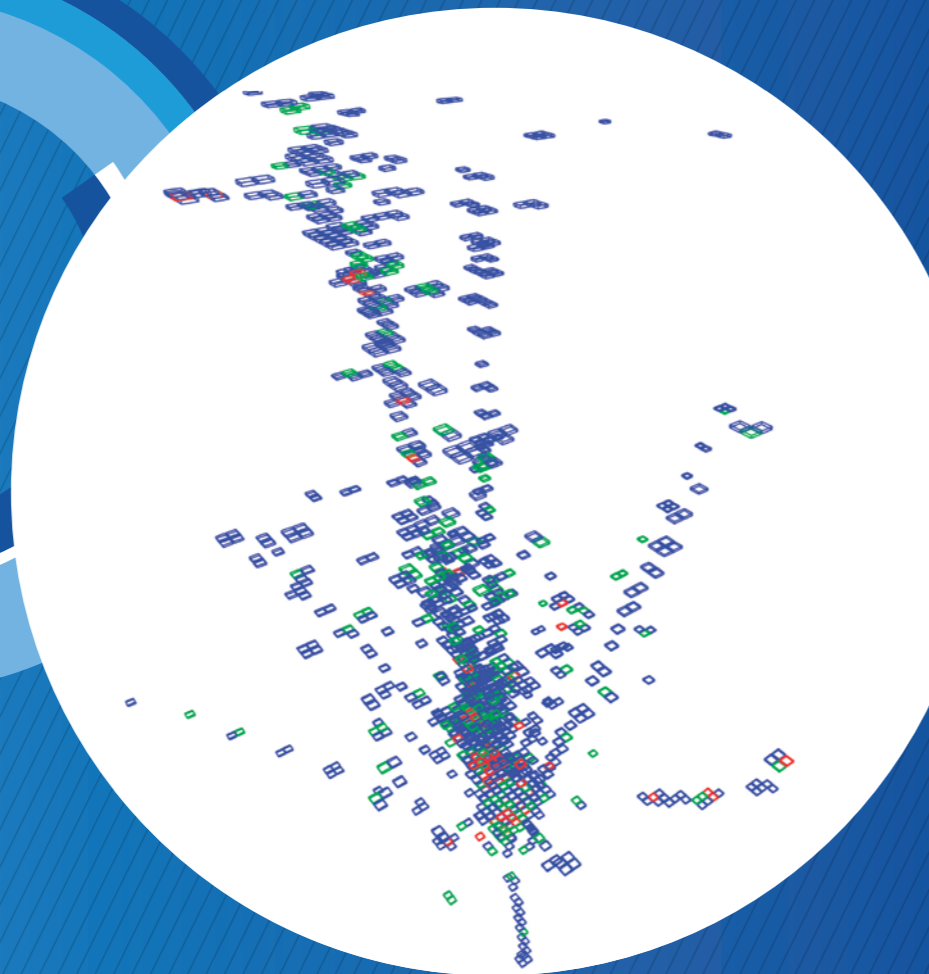


## FUTURS COLLISIONNEURS LINÉAIRES : R&D MICROMEGAS POUR LA CALORIMÉTRIE HADRONIQUE AUPRÈS D'UN FUTUR COLLISIONNEUR LINÉAIRE



Le groupe FLC-Detectors conçoit une nouvelle génération de détecteurs pour des expériences auprès d'un futur collisionneur linéaire à électrons (ILC ou CLIC). Le calorimètre à échantillonnage développé au LAPP utiliserait comme milieu actif des détecteurs gazeux Micromegas dotés de cellules de détection de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . Cette granularité doterait le calorimètre d'un pouvoir d'imagerie permettant une mesure de l'énergie des jets avec une précision remarquable, mais au prix d'un nombre de canaux électroniques très élevé et de contraintes mécaniques sévères. Les compétences techniques du groupe couvrent la conception de circuits intégrés, de cartes d'électronique, de système d'acquisition et de détecteurs Micromegas de grande taille ( $\sim 1 \times 1 \text{ m}^2$ ). Elles sont complétées par une expertise de physique qui se concentre sur l'étude de particules supersymétriques ou d'un nouveau boson de jauge à un collisionneur CLIC.

### INTRODUCTION

Le projet de calorimètre hadronique (HCAL) Micromegas a été initié au LAPP en 2006 par la construction de petits prototypes ( $\sim 100 \text{ cm}^2$ ). Ces premiers prototypes étaient dotés d'une électronique analogique hors détecteur idéale pour caractériser leur fonctionnement [1]. De 2009 à 2012, quatre prototypes de grande taille ( $\sim 1 \times 1 \text{ m}^2$ ) équipés d'une électronique à trois seuils et embarquée ont été construits [2] puis testés sur faisceaux, notamment dans le prototype de calorimètre SDHCAL conjointement avec les RPC (Resistive Plate Chambers) du

### L'ÉQUIPE DU LAPP

#### PHYSICIENS

C. Adloff, J.-J. Blaising,  
M. Chefdeville, Y. Karyotakis,  
I. Koletsou

#### POST-DOCS

J. Blaha, D. Girard, J. Samarati

#### DOCTORANT

A. Espargilière

#### EQUIPE TECHNIQUE

A. Dalmaz, C. Drancourt,  
R. Gaglione, N. Geffroy,  
J. Jacquemier, F. Peltier,  
G. Vouters

#### STAGIAIRES

M1 (1), M2 (1)

groupe de l'IPN de Lyon. Les contributions des services techniques du LAPP au projet sont résumées ici. Elles sont suivies d'un bref exposé des résultats du travail d'analyse de données des tests sur faisceau et de simulation Monte Carlo.

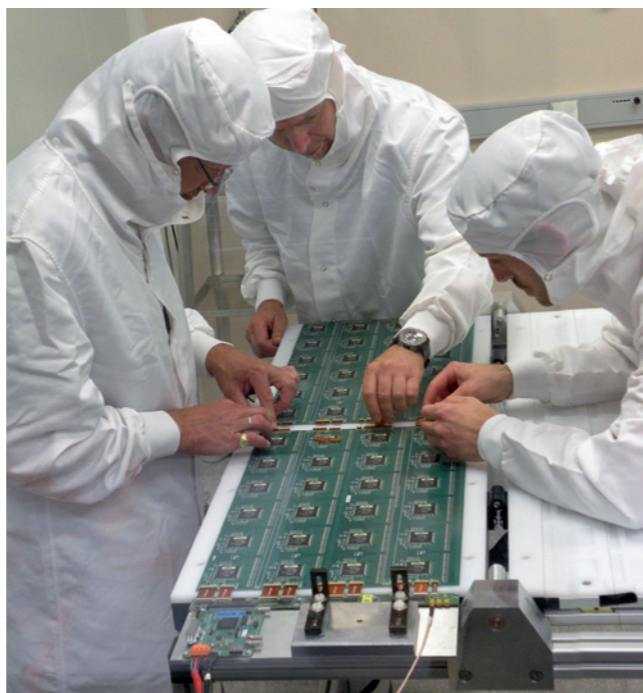
### COLLABORATIONS

Le groupe est impliqué dans deux collaborations internationales de R&D sur les calorimètres (CALICE) et sur les détecteurs gazeux à micro-structures comme le Micromegas (RD51). La collaboration CALICE développe des calorimètres à échantillonnage optimisés pour la mesure de l'énergie des jets par la méthode du Particle Flow. Plusieurs options technologiques pour le ECAL et le HCAL sont étudiées pour satisfaire les contraintes mécaniques (épaisseur, zones mortes) et électroniques (alimentation cyclique des circuits intégrés, électronique placée dans les détecteurs plutôt qu'à l'extérieur). Ainsi, un projet européen à scintillateurs (tuiles de  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ , SiPM 12-bit) et deux autres projets américain et européen de chambres gazeuses résistives (damiers de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ , RPC 1-bit et 2-bit) sont en concurrence sur le HCAL. Les Micromegas sont une alternative sérieuse aux scintillateurs et RPC. La construction de chambres Micromegas de grande taille soulève toutefois plusieurs problèmes techniques dont les solutions sont élaborées au sein de la collaboration RD51.



FIGURE 1

Montage des détecteurs micromegas.



## RÉALISATIONS TECHNIQUES

### Circuits intégrés (ASIC)

Les groupes de microélectronique du LAPP et d'Orsay (Omega) ont conçu un circuit intégré optimisé pour la détection des signaux Micromegas (1-100 fC) : le MICROROC. Chacun de ses 64 canaux de lecture est équipé d'un préamplificateur de charge et d'un étage de mise en forme du signal dessinés au LAPP. La numérisation des signaux est effectuée par trois discriminateurs dont l'état des sorties est enregistré automatiquement dans une mémoire avec un temps d'horloge. La lecture de la mémoire est déclenchée une fois celle-ci pleine ou par un signal externe. Un banc de calibration a été mis en place pour qualifier et calibrer plusieurs centaines de circuits. La dispersion des gains électroniques est faible (+/- 2 % RMS) et le bruit de 1 500 électrons (capacité détecteur comprise) permet d'atteindre des seuils de détection inférieurs à 10 000 électrons sur l'ensemble des canaux de lecture.

### Cartes de détection

Les cartes de détection sont des circuits imprimés de huit couches d'une taille de 32 x 48 cm<sup>2</sup> et de 1,5 mm d'épaisseur. Une face des cartes est recouverte d'une fine couche de cuivre segmentée en 1 536 damiers de

1 x 1 cm<sup>2</sup>, tandis que 24 circuits MICROROC sont soudés sur la face opposée. La grille Micromegas est ensuite déposée et maintenue au-dessus du plan de damiers à une distance de 128 μm grâce à de petits piliers isolants. Ces cartes, dessinées au LAPP, se connectent aux cartes de lecture mais aussi entre elles, de manière à couvrir des surfaces supérieures à 32 x 48 cm<sup>2</sup> (figure 1).

### Cartes de lecture

Les cartes DIF (Detector Interface board) et inter-DIF se connectent aux cartes de détection. Elles permettent d'alimenter et de configurer les MICROROC et de lire leurs mémoires. La DIF dispose d'un FPGA qui distribue les divers signaux d'acquisition et de ports USB et HDMI pour communiquer avec un ordinateur ou d'autres cartes. La responsabilité de la conception de ces cartes et la programmation du FPGA incombent au LAPP. Alors que l'inter-DIF est spécifique aux cartes de détection Micromegas, la DIF est compatible avec d'autres détecteurs comme les RPC du SDHCAL.

### Logiciels

Les prises de données sont pilotées par un programme Labview développé au LAPP. Il permet de qualifier, configurer et calibrer les MICROROC et de prendre des mesures avec déclenchement logiciel ou externe comme lors de tests sur faisceau. Ce programme pilote jusqu'à 12 DIF et gère l'écriture sur

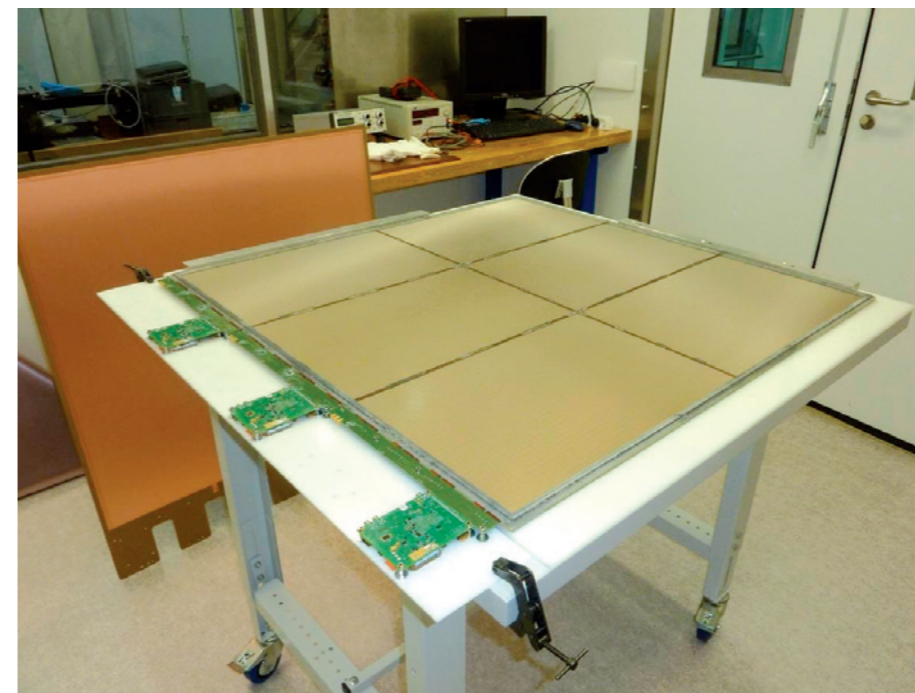


FIGURE 2

Assemblage d'un prototype Micromegas de 1 x 1 m<sup>2</sup>.

disque des données. La reconstruction et l'analyse des données enregistrées s'effectuent au sein d'un framework C++ orienté objet où les différents fichiers sources et bibliothèques sont maintenus par un logiciel de gestion des versions. Flexible, il intègre différents détecteurs (Micromegas, RPC, scintillateurs) ainsi que les formats de données associés.

### Grands prototypes

Les prototypes Micromegas de 1 x 1 m<sup>2</sup> sont construits à partir de six cartes de détection juxtaposées dans un même volume gazeux (figure 2). Ces cartes sont chaînées et lues par paires au moyen de trois jeux de DIF/inter-DIF (9 216 canaux au total). L'espace entre les cartes est réduit au minimum de telle sorte que la surface inactive des prototypes est de 2 %. L'espace de dérive (3 mm) est défini précisément par des espaceurs isolants placés dans les interstices entre les cartes. Ces derniers sont en contact avec un couvercle d'acier de 2 mm sur lequel est collée l'électrode de dérive. Ce dessin mécanique permet de fabriquer un prototype de 1 x 1 m<sup>2</sup> de 1 cm d'épaisseur.

### Prototype de calorimètre hadronique

Le SDHCAL est un calorimètre hadronique à échantillonnage acier/gaz équipé de 50 détecteurs de 1 x 1 m<sup>2</sup> (RPC et/ou Micromegas) et d'une profondeur de  $\sim 6 \lambda_{int}$

Plusieurs laboratoires de l'IN2P3 sont impliqués sur ce projet. Outre la construction de détecteurs Micromegas, le LAPP a pris en charge le développement du système d'acquisition, commun aux RPC et Micromegas. Celui-ci se compose de deux types de carte à base de FPGA : la DIF, conçue et produite en 150 exemplaires par le LAPP et la DCC (Data Concentrator Card) ; la seconde devant assurer deux fonctions différentes, 3 codes firmware ont été développés afin d'assurer la synchronisation du système ( $\sim 460\,000$  canaux) et la transmission des données depuis les détecteurs aux ordinateurs. Ce prototype a été testé sur faisceau de particules au CERN en 2011 et 2012 (figures 3a et 3b).

## RÉSULTATS DES TESTS SUR FAISCEAUX

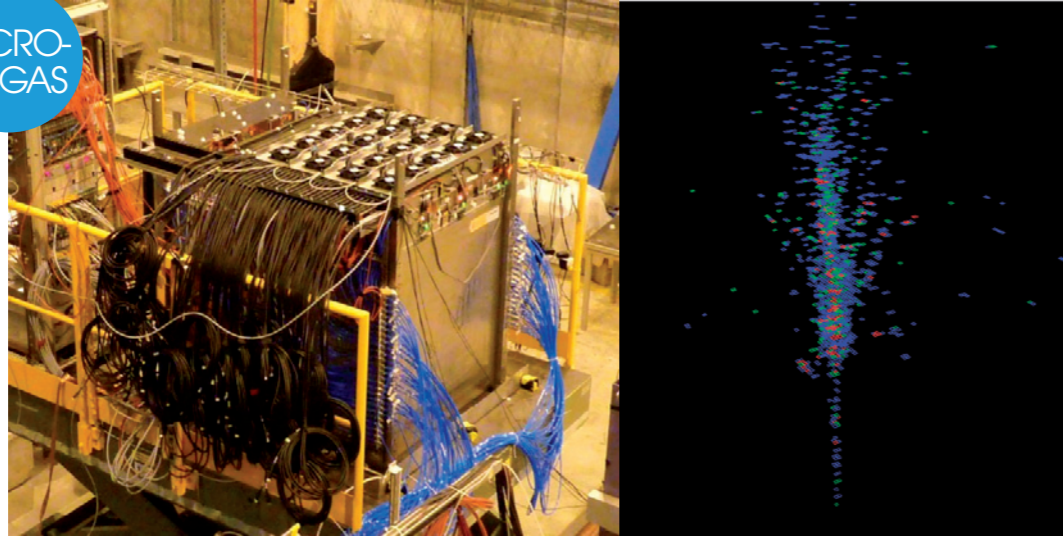
### Performances des prototypes Micromegas

Les grands prototypes ont été testés sur faisceau en 2011 et 2012. L'analyse des données collectées se poursuit mais déjà d'excellents résultats ont été obtenus. L'électronique bas bruit (MICROROC) permet de déclencher sur des charges de  $\sim 1$  fC et d'atteindre ainsi une efficacité supérieure à 95 % (figure 4) à un gain du Micromegas relativement faible ( $\sim 1\,000$ ).



FIGURES  
3A, 3B

Prototype SDHCAL sur une ligne de faisceau test au CERN (gauche). Interaction hadronique mesurée dans le SDHCAL (droite).



Grâce à un contrôle précis des seuils et de la distance damiers/grilles, la dispersion absolue de l'efficacité sur la surface totale de 3 prototypes est de quelques pourcentages, cela pour les 3 seuils.

La réponse des prototypes aux gerbes hadroniques (pions de 150 GeV, figure 5) est constante au-delà d'un gain de  $\sim 1\,000$ . A ce gain, et malgré une multiplicité importante de particules secondaires dans le cœur de gerbe, la probabilité d'étincelles reste négligeable et le comportement du détecteur est stable.

### Réponse d'un calorimètre Micromegas

Le système d'acquisition du SDHCAL a permis en 2012 de prendre des données simultanément avec 46 RPC et 4 Micromegas, notamment sur un faisceau de pions. Le profil longitudinal des gerbes de pions a été mesuré dans les Micromegas seules en mettant à profit les fluctuations importantes du point de départ des gerbes hadroniques. La réponse d'un calorimètre équipé exclusivement de Micromegas est obtenue par intégration du profil à plusieurs énergies, de 20 à 150 GeV (figures 6a et 6b). Profils et réponse sont mesurés pour les trois valeurs de seuils des MICROROC.

### Simulation

Un travail de simulation Monte Carlo (Geant4) des performances d'un SDHCAL est mené depuis le début du projet. Les causes de la non-linéarité de la réponse d'un HCAL à un seuil (figure 6b) observée

lors des tests sur faisceau sont aujourd'hui comprises. Des méthodes de compensation utilisant l'information des trois seuils ont été développées. L'intérêt d'une telle lecture apparaît clairement sur la figure 7 où, par une combinaison particulière de l'information des deux seuils, il est possible d'améliorer significativement la résolution sur l'énergie des hadrons.

### Futur

Afin de protéger les puces MICROROC des étincelles qui peuvent se produire dans le Micromegas, plusieurs centaines de composants électroniques sont soudés sur les cartes de détection. Pour simplifier la construction du détecteur, il est prévu de remplacer ces composants par des dépôts résistifs sur les damiers d'anode. Ce type de protection est étudié depuis 2012 et financé par l'ANR. Le principe réside sur la possibilité laissée à l'anode de changer de tension indépendamment du point de polarisation de l'électronique de lecture, mécanisme qui permet de désamorcer l'étincelle en annulant la différence de potentiel à ses bornes. Cette séparation est assurée par des éléments résistifs et isolants déposés et gravés sur le plan de damiers des cartes de détection. Plusieurs configurations de ces éléments sont appliquées sur des prototypes de taille intermédiaire.

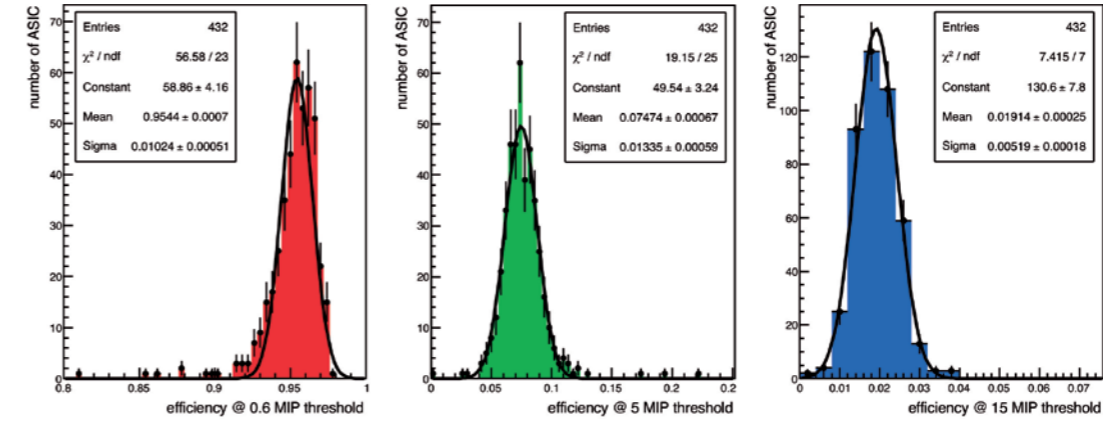


FIGURE 4

Efficacité de détection de particules au minimum ionisant pour les 3 seuils de lecture : 0.6, 5 et 15 MIP de gauche à droite. Les distributions contiennent 432 mesures de l'efficacité effectuées ASIC par ASIC sur 3 prototypes  $1 \times 1 \text{ m}^2$ .

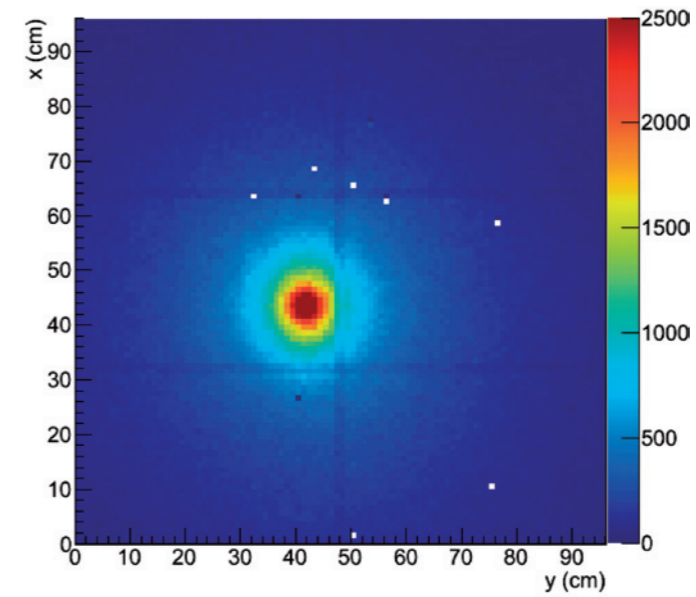
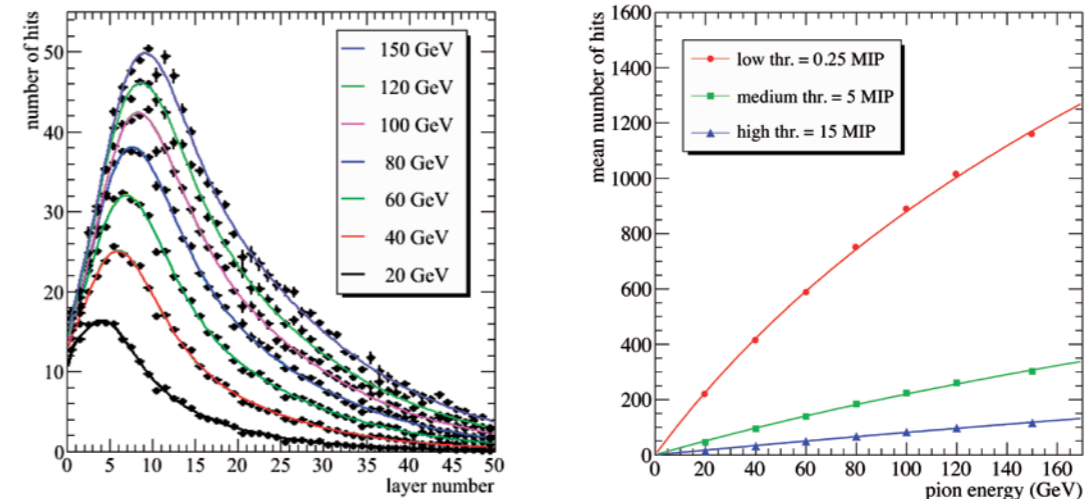


FIGURE 5

Réponse aux gerbes hadroniques d'un prototype Micromegas de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  mesurée dans le SDHCAL derrière  $2 \lambda_{\text{int}}$  d'acier.



FIGURES  
6A, 6B

Profil longitudinal des gerbes de pions mesurées avec les prototypes Micromegas dans le SDHCAL. Réponse aux pions des 3 seuils d'un SDHCAL/Micromegas obtenue par intégration des profils à différentes énergies.

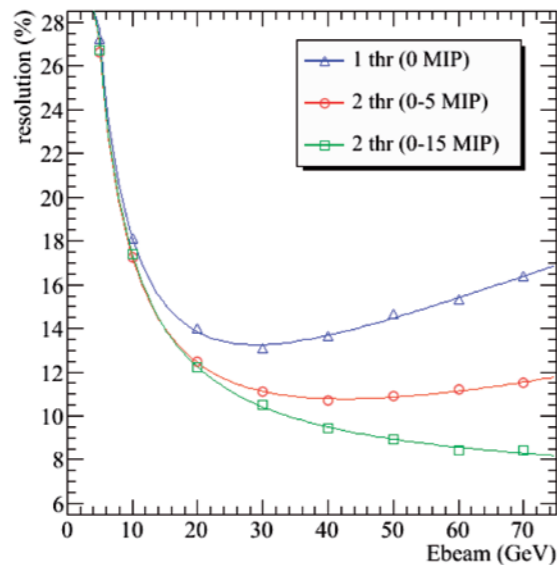


FIGURE 7

Simulation Geant4 de la résolution sur l'énergie de pions accessible avec un SDHCAL/Micromegas doté d'une lecture à 1 (proche de 0 MIP) et 2 seuils (0-5 et 0-15 MIP).

### Étude de faisabilité du collisionneur CLIC

Depuis 2009 le LAPP contribue à l'étude de faisabilité du CLIC. Celle-ci s'effectue dans le cadre d'une collaboration internationale CLIC-ILC. Le but est d'étudier les modifications qu'il faut apporter aux détecteurs ILC afin de couvrir une gamme d'énergie dans le centre de masse allant de 350 GeV jusqu'à 3 TeV. La structure en paquets du CLIC est très différente de celle de l'ILC, les bruits de fond de paires radiatives venant de la machine ou des interactions photon-photon imposent des contraintes supplémentaires aux détecteurs. Les principales contributions à cette étude sont :

- la définition des processus physiques de référence entre 350 GeV et 3 TeV ;
- la caractérisation des paramètres et des performances des détecteurs ;
- la simulation des détecteurs et l'évaluation des performances des détecteurs.

En 2011 le rapport de faisabilité a été finalisé [5], le LAPP était co-éditeur du chapitre sur les performances pour la physique. En 2012 un addendum [6] a détaillé les options de construction de la machine pour un programme de physique allant de 350 GeV à 3 TeV. Parmi les processus de référence étudiés par le LAPP, on peut citer la recherche à CLIC d'électron, muon et neutrino scalaires [7] et la recherche de boson  $Z'$  à 1.4 TeV et 3 TeV [8] (figures 8 et 9).

### PUBLICATIONS IMPORTANTES

- [1] *MICROMEAS chambers for hadronic calorimetry at a future linear collider*, C. Adloff et al., JINST 4 (2009) P11023
- [2] *Construction and test of a  $1 \times 1 \text{ m}^2$  Micromegas chamber for sampling hadron calorimetry at future lepton colliders*, C. Adloff, et al., Nuclear Instruments and Methods A729 (2013) 90-101
- [3] *Micromegas for imaging hadronic calorimetry*, C. Adloff et al., J. Phys. Conf. Ser. 293 (2011) 012078
- [4] *MICROROC: MICRO-mesh gaseous structure Read-Out Chip*, C. Adloff et al., JINST 7 (2012) C01029
- [5] *Physics and detectors at CLIC: CLIC conceptual design rReport*, L. Linssen et al. (editors), 2012, 162 ANL-HEP-TR-12-01, CERN-2012-003, DESY 12-008, KEK Report 2011-7, arXiv:1202.5940
- [6] *The CLIC programme: towards a staged  $e^+e^-$  linear collider exploring the TeV scale: CLIC conceptual design report*, P. Lebrun et al. (editors), CERN 2012-005, 2012
- [7] *Physics performances for scalar electron, scalar muon and scalar neutrino searches at 3 TeV and 1.4 TeV at CLIC*, M. Battaglia et al., arXiv:1304.2825 [hep-ex], 2013
- [8] *Physics performances for  $Z'$  searches at 3 TeV and 1.5 TeV CLIC*, J.-J. Blaising, J.-D. Wells, arXiv:1208.1148 [hep-ph], 2012

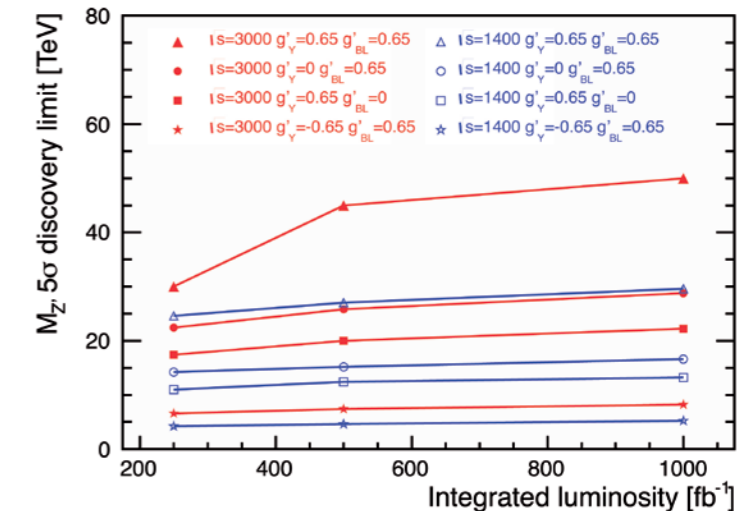
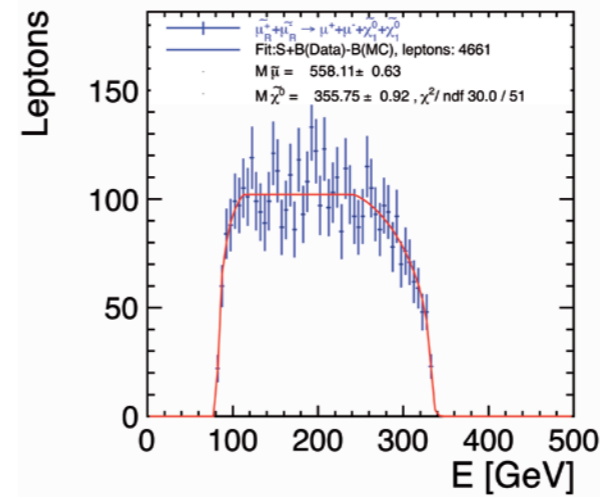


FIGURE 8

Distribution en énergie des muons issus du processus  $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \rightarrow \mu^+ \tilde{\chi}^0_1 \tilde{\chi}^0_1$  à 1.4 TeV. Le fit de cette distribution permet la détermination de la masse du muon scalaire et du neutralino.

FIGURE 9

Potentiel de découverte d'un boson  $Z'$  dans le processus  $e^+e^- \rightarrow Z' \rightarrow \mu^+\mu^-$  pour différentes valeurs des couplages  $g'_V$  et  $g'_{BL}$ . Ces limites sont déterminées à partir des mesures des sections efficaces et des asymétries avant arrière des sections efficaces.

### THÈSE

**A. Espargilière**, *Chambres MICROMEAS pour la calorimétrie hadronique, recherche d'une nouvelle physique dans le domaine de la quark top*, Université de Grenoble, thèse soutenue le 21 septembre 2011

### PRÉSENTATIONS DANS DES CONFÉRENCES

**A. White** on behalf of the LAPP LC group, *Status of the Micromegas SDHCAL project*, International Workshop on Future Linear Colliders, LCWS, Arlington, Etats-Unis, octobre 2012

**M. Chefdeville**, *Micromegas for Imaging Calorimetry*, International Conference on Calorimetry in High Energy Physics, CALOR2012, Santa Fe, Etats-Unis, juin 2012

**M. Chefdeville**, *Recent results of Micromegas SDHCAL with a new readout chip*, International Workshop on Future Linear Colliders, LCWS, Grenade, Espagne, septembre 2011

**J. Blaha**, *Large area Micromegas chambers with embedded front-end electronics for hadron calorimetry*, Technology and Instrumentation in Particle Physics, TIPP, Chicago, Etats-Unis, juin 2011

**J. Blaha**, *Micromegas for Imaging Hadron Calorimetry*, International Conference on Calorimetry in High Energy Physics, CALOR2010, Pékin, Chine, mai 2010

**M. Chefdeville**, *Status of the Micromegas semi-DHCAL*, International Workshop on Future Linear Colliders, LCWS, Pékin, Chine, mars 2010

### POUR EN SAVOIR PLUS

- La collaboration RD51 : <http://rd51-public.web.cern.ch/rd51-public/>
- La collaboration CALICE : <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CALICE>
- La collaboration collisionneur linéaire : <http://www.linearcollider.org/>