



## ILC : Recherche et Développement pour les détecteurs d'un Collisionneur Linéaire

Pour apporter des réponses décisives sur la brisure de symétrie électrofaible, la supersymétrie, les extra-dimensions et plus généralement sur de nouveaux phénomènes physiques, un collisionneur électron-positron donnant accès au domaine d'énergie du TeV est indispensable. Autour du projet mondial de l'ILC (International Linear Collider), trois concepts de détecteur ont émergé. Au sein du concept SiD (Silicon Detector) nous participons au design et à l'optimisation du calorimètre hadronique. De plus, dans la collaboration CALICE (CALorimetry for a LInear Collider Experiment), nous développons des détecteurs gazeux MICROMEGAS (MICRO MESH GASEOUS STRUCTURE) ainsi que leur électronique de lecture appropriés à un type novateur de calorimètre hadronique. Récemment nos activités se sont étendues aux études d'un détecteur auprès du futur collisionneur linéaire CLIC (Compact Linear Collider) en projet au CERN. Le groupe a aussi rejoint la collaboration RD51 du CERN dans laquelle nous faisons avancer le développement de détecteurs MICROMEGAS de grande surface.

### Introduction

Les expériences au LHC ont été optimisées pour découvrir le boson de Higgs ou sa forme en multiplet ; cependant il sera difficile de vérifier qu'il est responsable de la masse des particules et de déterminer son spin et sa parité. Un collisionneur linéaire permettra de répondre à ces questions grâce aux mesures des couplages du Higgs avec les quarks et les bosons vecteurs, dix fois plus précises qu'au LHC. Si le boson de Higgs léger est d'origine supersymétrique, le LHC devrait trouver le signal de ses superpartenaires. Toutefois, la mesure d'un signal supersymétrique au LHC ne permettra pas d'identifier avec certitude si la particule en jeu est un superpartenaire du Higgs ; c'est un collisionneur linéaire qui apportera une réponse sans équivoque. Si des composants de la matière noire existent à l'échelle du TeV, ils pourraient être produits au collisionneur linéaire. Les mesures de leurs propriétés aboutiraient à une compréhension de leur contribution à la matière noire, de l'évolution de l'Univers et d'une possible relation avec des nouveaux principes ou forces de la nature. Aujourd'hui deux projets de collisionneurs linéaires sont à l'étude, l'ILC (International Linear Collider) doté d'une énergie nominale dans le centre de masse de 500 GeV avec montée possible à 1 TeV et le CLIC (Compact Linear Collider) avec une énergie nominale dans le centre de masse de 0,5 à 5 TeV.

### Points forts

La structure du calorimètre hadronique dessinée au LAPP est choisie comme référence pour le concept SiD en septembre 2008.

Participation à la lettre d'intention du concept SiD.

Les résultats des tests en faisceau des prototypes MICROMEGAS démontrent leur utilisation en calorimétrie hadronique.

Le LAPP a réalisé les premiers détecteurs MICROMEGAS au monde avec électronique de lecture intégrée.

La carte de lecture numérique développée au LAPP donne les premières données CALICE issues de MICROMEGAS et RPC.

### Les collaborations

#### CALICE

53 instituts, 16 pays de 4 continents (Afrique, Amérique, Asie et Europe), 297 physiciens et ingénieurs.

6 laboratoires français : Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, Laboratoire de Physique Corpusculaire, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Institut de Physique Nucléaire de Lyon, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Laboratoire Leprince-Ringuet.

#### RD51

60 instituts, 21 pays.

5 laboratoires français : Laboratoire d'Annecy-le-



Vieux de Physique des Particules, Institute Laue-Langevin, Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Institut de Recherches sur les lois Fondamentales de l'Univers.

#### SiD

50 instituts, 10 pays.

4 laboratoires français : Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Institut de Recherches sur les lois Fondamentales de l'Univers, Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies.

### Activités de recherche du groupe du LAPP

Le projet mondial ILC mobilise un effort considérable dans la communauté de la physique des hautes énergies au niveau de la R&D sur les détecteurs, de la simulation et de la compréhension des signaux physiques. Les algorithmes PFA (*Particle Flow Algorithm*), la clef pour accéder aux phénomènes recherchés, requièrent pour les expériences une calorimétrie à imagerie très granulaire située à l'intérieur de l'aimant. Avec environ 3 000 m<sup>2</sup> de surface et 30 millions de voies électroniques, un calorimètre hadronique muni de détecteurs gazeux MICROMEGAS avec lecture à seuil intégrée est une possibilité séduisante. Le LAPP développe de tels détecteurs MICROMEGAS ainsi que leur système de lecture. La première étape a été de munir ces détecteurs d'une lecture analogique et de les caractériser avec une source radioactive, sous rayons cosmiques et en faisceau. Nous sommes ensuite passés à la lecture à seuil pour aboutir à des détecteurs de 1 m<sup>2</sup> qui équiperont un prototype de calorimètre de 1 m<sup>3</sup>. Ce prototype est indispensable pour valider la calorimétrie à

seuil dans le cadre des algorithmes PFA et pour tester les simulations de ce nouveau genre de calorimètres. C'est pourquoi le groupe s'investit aussi dans la simulation et l'optimisation du prototype de 1 m<sup>3</sup> et du calorimètre au sein du concept SiD. Parallèlement, des études sur la structure mécanique d'un tel calorimètre ont été poursuivies au LAPP et aujourd'hui la structure du calorimètre hadronique conçue au LAPP est choisie comme référence pour le concept SiD.

#### Projets techniques

##### Etude de la structure du calorimètre hadronique du SiD :

L'étude mécanique d'une structure originale de détecteur hadronique comprend à la fois la conception et les calculs mécaniques de dimensionnement qui y sont associés. Ainsi, nous prévoyons l'utilisation de plaques d'inox pour les absorbeurs du HCAL (*Hadronic CALorimeter*). La longueur de radiation de l'acier inoxydable ( $X_0 = 1,8$  cm) et sa longueur d'interaction ( $\lambda_i = 16,8$  cm) font de ce matériau l'un des plus intéressants parmi les matériaux classiquement utilisés, compte tenu du faible rapport  $X_0/\lambda_i$ . Pour la partie « tonneau », l'épaisseur totale d'absorbeur est de  $4,5 \lambda_i$ , répartie sur 40 couches de 18,9 mm d'épaisseur, elles-mêmes séparées par 8 mm : distance permettant l'insertion des parties sensibles aux gerbes de particules.

Les diamètres internes et externes du HCAL de SiD sont respectivement de  $R_{int} = 1 419$  mm et  $R_{ext} = 2 583$  mm, pour une longueur de 6 036 mm.

La partie « tonneau » du détecteur est divisée en 12 modules. Afin de ne pas avoir de fissures dans le détecteur (c'est-à-dire de zones sans détection par lesquelles les particules pourraient s'échapper sans être vues), les bords de ces modules ne doivent pas être alignés sur le point d'interaction. L'originalité du design réside dans le découpage d'une section transverse du HCAL. En effet avec une segmentation azimutale en 6 modules rectangulaires et 6 modules « pseudo-trapézoïdaux », comme le présentent les Figures 1a et 1b, toutes les particules rencontrent un volume de détection. La Figure 1b esquisse l'idée de

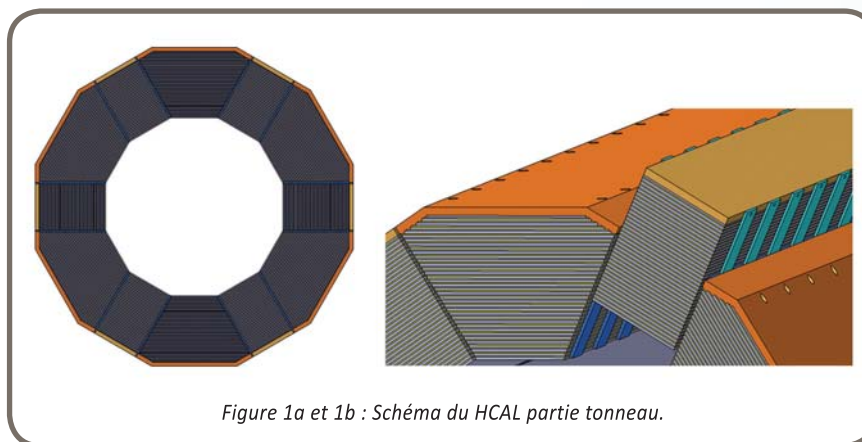


Figure 1a et 1b : Schéma du HCAL partie tonneau.

l'assemblage des modules pour former un tonneau.

Finalement, concernant les bouchons du HCAL, les dimensions sont les suivantes :  $R_{int} = 206$  mm et  $R_{ext} = 1 404$  mm, pour une longueur de 1 222 mm. Dans la même optique que pour le tonneau, nous avons conçu les bouchons de telle sorte qu'il n'y ait aucun bord projectif vis-à-vis du point d'interaction. Pour cela, chaque plan d'absorbeur constituant les deux bouchons est réalisé par l'assemblage de deux parties en forme de C, les parties concaves venant épouser le tube à vide (Figure 1c). Par ailleurs, afin d'éviter la seule fissure possible au niveau de l'interface des pièces en demi-cercle, il est prévu que chaque plaque soit biseautée (Figure 1d).

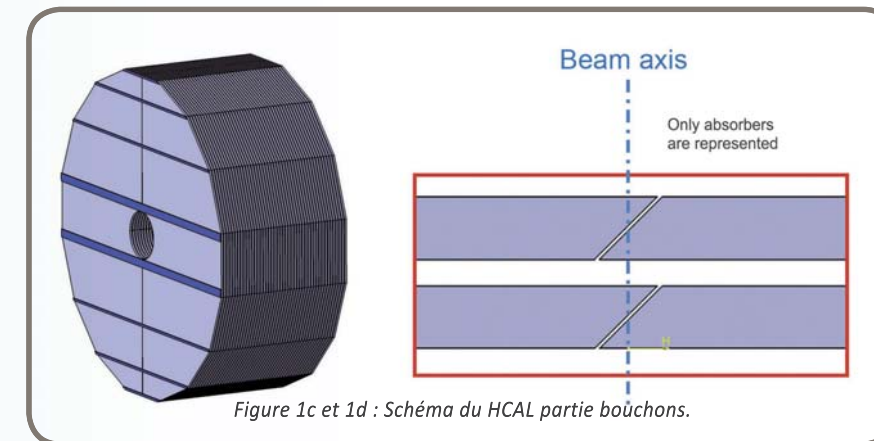


Figure 1c et 1d : Schéma du HCAL partie bouchons.

Ainsi, un design original de HCAL a été proposé par le groupe du LAPP, que ce soit pour la partie tonneau ou bien pour les bouchons, optimisant ainsi l'acceptance du HCAL. Cette proposition a été retenue comme la structure de référence présentée dans la lettre d'intention du projet SiD qui sera prochainement soumise au comité international IDAG (*International Detector Advisory Group*) chargé d'examiner les projets de détecteurs.

#### Développement du détecteur gazeux MICROMEGAS pour la calorimétrie hadronique à seuil :

Nos prototypes MICROMEGAS consistent en une fine grille de 20  $\mu$ m d'épaisseur qui sépare l'espace d'amplification (128  $\mu$ m) de l'espace d'ionisation aussi appelé espace de dérive (3 mm). La technologie choisie, nommée *bulk*, fournit un bloc robuste composé du circuit imprimé segmenté en

unités de lecture de 1 cm<sup>2</sup> et de piliers isolants soutenant la grille (voir Figure 2). Cette structure simple, fonctionnant à des tensions inférieures à 500 V, fournit une excellente homogénéité du gain sur toute la surface, une efficacité totale pour les particules de minimum d'ionisation, un gain stable jusqu'à des taux d'ionisation très élevés et une multiplicité faible. Différents types de chambres MICROMEGAS ont été réalisés au LAPP. Les premières munies d'une lecture analogique pour une surface de 6 x 16 ou 12 x 32 cm<sup>2</sup> ont été testées rigoureusement avec une source de <sup>55</sup>Fe, sous rayons cosmiques et en faisceau au CERN. Les chambres suivantes sont munies d'une électronique à seuil intégrée aux circuits imprimés ce qui en fait les premiers prototypes au monde de ce genre (voir Figure 2). Tous nos prototypes ont, au dessus du volume d'ionisation, une électrode de dérive collée à 2 mm d'acier pris dans l'absorbeur. De la sorte, le capot ne contribue pas à l'épaisseur de la partie active du futur calorimètre. Le gaz utilisé est un mélange d'argon et d'isobutane 95/5.

Le design d'un prototype MICROMEGAS de 1 m<sup>2</sup> a vu le jour en 2008. Notre choix, essentiellement motivé par la nécessité d'éviter des décharges destructrices pour l'électronique de lecture, s'est porté sur l'assemblage de 6 bulks sur deux

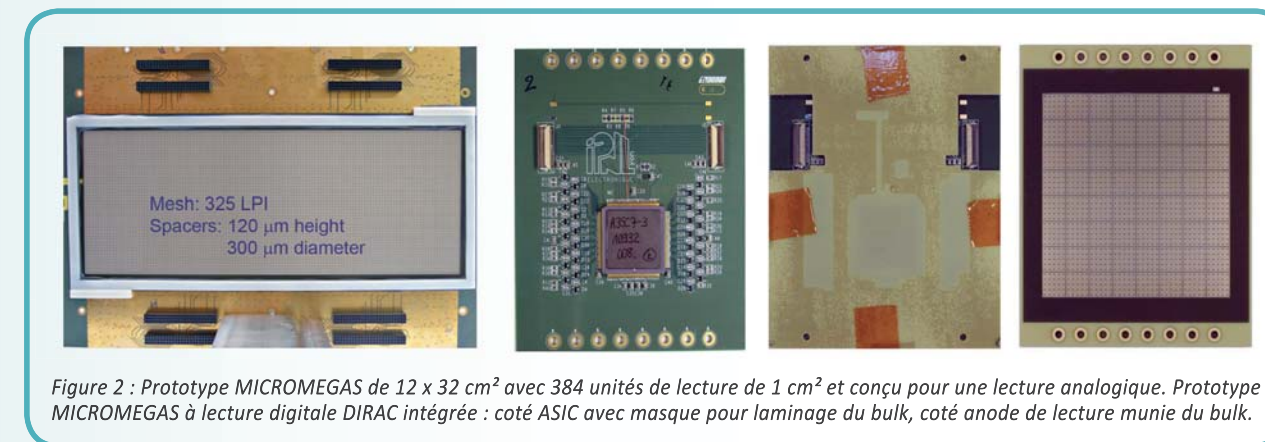


Figure 2 : Prototype MICROMEGAS de 12 x 32 cm<sup>2</sup> avec 384 unités de lecture de 1 cm<sup>2</sup> et conçu pour une lecture analogique. Prototype MICROMEGAS à lecture digitale DIRAC intégrée : coté ASIC avec masque pour laminage du bulk, coté anode de lecture munie du bulk.



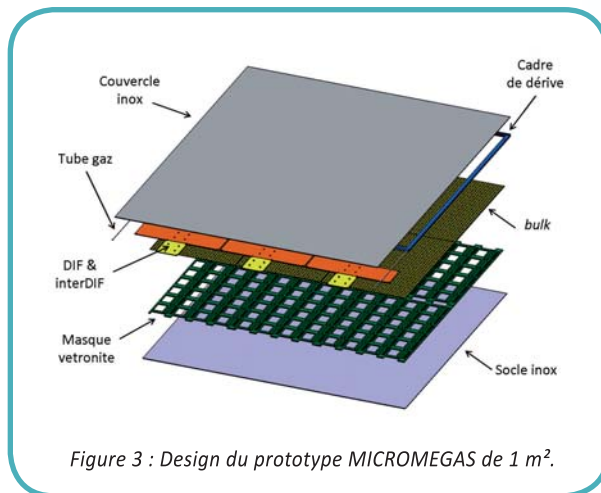


Figure 3 : Design du prototype MICROMEGAS de 1 m<sup>2</sup>.

masques (voir Figure 3). Deux plans de 2 mm d'acier viendront fermer la chambre et son épaisseur ne dépassera pas 12 mm, dont seulement 8 mm de partie active avec électronique de lecture à seuil, intégrée aux circuits imprimés. Ce détecteur a été conçu pour convenir à la production de 40 plans qui équiperont un prototype de calorimètre de 1 m<sup>3</sup>. De la sorte, nous contribuons fortement à l'effort de la collaboration RD51 pour développer des détecteurs MICROMEGAS de large surface.

#### Développement des cartes de lecture numérique :

Au sein de la collaboration CALICE, l'équipe du LAPP est également responsable des cartes de lecture numérique. Appelées DIF (Detector InterFace), ces cartes permettent de lire les circuits intégrés situés au plus près des détecteurs et de transmettre les données au système d'acquisition. Pour les MICROMEGAS, nous avons fait le choix d'utiliser et tester les circuits intégrés HARDROCs développés au LAL et les circuits intégrés DIRACS développés à l'IPNL. Grâce à l'utilisation d'un composant programmable de type FPGA, les cartes DIF sont très modulaires : elles peuvent faire l'intermédiaire entre plusieurs types d'électronique frontale et un système d'acquisition de laboratoire ou le système d'acquisition de CALICE qui satisfait les contraintes d'une acquisition pour l'ILC. Une première version des cartes DIF a été dessinée et produite en 2008 pour être utilisée en test faisceau en novembre 2008 sur les détecteurs MICROMEGAS du LAPP et les RPCs de l'IPNL. La nouvelle version de ses cartes permettra la lecture du prototype de calorimètre de 1 m<sup>3</sup>. Pour ceci un ingénieur de l'équipe développera en 2009 le code du FPGA nécessaire pour la prise de données via le système d'acquisition de CALICE.

**Développement des circuits intégrés de lecture :**  
Le grand nombre de voies électroniques (de 30

à 50 millions selon la configuration) qui seront utilisées dans un calorimètre hadronique à l'ILC, nécessite des circuits intégrés en silicium spécifiques à très faible consommation et à encombrement minimum. Le circuit intégré DIRAC a été spécifiquement conçu pour lire les charges issues des détecteurs MICROMEGAS. A partir de 2009, la maîtrise d'œuvre du développement et des tests du circuit intégré DIRAC sera assurée par l'équipe du LAPP, en raison de la venue au laboratoire de son concepteur principal. L'IPNL continuera de collaborer sur ce projet de R&D en microélectronique.

#### Analyse de physique et résultats

Le gain de nos prototypes MICROMEGAS a été mesuré à l'aide d'une source <sup>55</sup>Fe. Il peut s'élever jusqu'à 10<sup>4</sup> avec une résolution en énergie de 8,5 % correspondant à une largeur à mi-hauteur de 19,6 % (voir Figure 4). Ces quantités sont mesurées en fonction du champ de dérive, du champ d'amplification, du flux de gaz, de la température et de la pression. Comme attendu, nos prototypes montrent bien une croissance exponentielle du gain en fonction du champ de dérive. La dépendance absolue de la réponse de nos MICROMEGAS en fonction de la pression s'élève à -2fC/mbar.

En 2008, quatre prototypes avec lecture analogique, un prototype muni de l'ASIC de lecture DIRAC et trois prototypes munis de l'ASIC de lecture HARDROC ont été testés sous flux de muons et de pions avec et sans absorbeur au CERN.

L'analyse des données des prototypes avec lecture analogique a permis diverses études. Le bruit de fond électronique a été quantifié en mesurant un

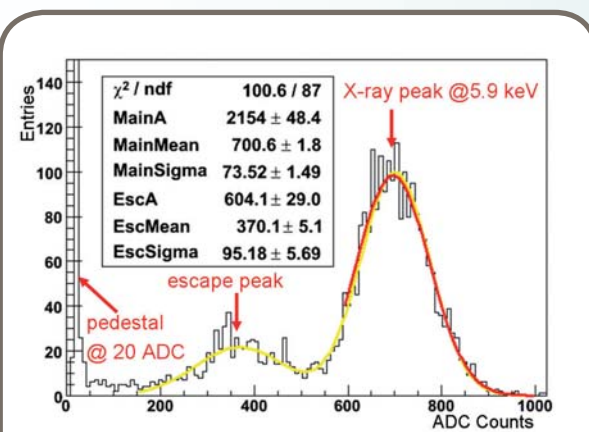


Figure 4 : Réponse d'un prototype MICROMEGAS aux photons d'une source de <sup>55</sup>Fe.

sigma des piédestaux à 0,6 fC. La valeur la plus probable du signal interpolé par une distribution de Landau (MPV) a été mesurée pour chaque voie de l'ordre de 20 fC. La disparité globale de la réponse des prototypes a été mesurée à 11 % (voir Figure 5). Des cartes de disparité géographique ont été dressées pour les moyennes et sigmas des piédestaux, pour les MPV et les sigmas des distributions de Landau ainsi que pour les efficacités. Les efficacités ont été calculées pour chaque chambre en utilisant les trois autres comme « trajectographe », reconstruisant des droites permettant d'extrapoler la position de la réponse dans la chambre à tester. La présence ou l'absence de signal à la position attendue permet de déduire l'efficacité ; le nombre de canaux bruyants en dehors de la zone où le signal est attendu va fournir la probabilité d'efficacité fortuite (responsable d'une hausse artificielle de l'efficacité mesurée au premier abord). Les efficacités globales corrigées des quatre chambres sont répertoriées dans le tableau 1. De même la multiplicité du signal a été évaluée à 1,1.

Efficacité des prototypes Micromegas à lecture Analogique	
Prototype	Efficacité (charge > 2.8 fC)
Prototype 0 (96 voies)	97,23 ± 0,11 %
Prototype 1 (96 voies)	97,66 ± 0,10 %
Prototype 2 (96 voies)	91,14 ± 0,19 %
Prototype 3 (384 voies)	97,04 ± 0,12 %

Tableau 1 : Efficacité des prototypes MICROMEGAS à lecture analogique.

Une puce DIRAC a été intégrée à un circuit imprimé de 8 x 8 cm<sup>2</sup> muni de protection contre les étincelles (voir Figure 2) et équipé de la technologie bulk, pour une épaisseur totale de 12 mm, incluant les 2 mm d'absorbeur que constitue le capot d'acier. Pour la première fois un tel prototype a été assemblé et exposé à un faisceau de particules. Ce test a eu lieu sur la ligne H2 du SPS au CERN avec un faisceau de pions à 200 GeV en août 2008. Le profil du faisceau a pu être observé avec un seuil de 19 fC (voir Figure 6) prouvant la capacité de la puce DIRAC à lire les détecteurs MICROMEGAS. Des tests avec plusieurs chambres ainsi équipées

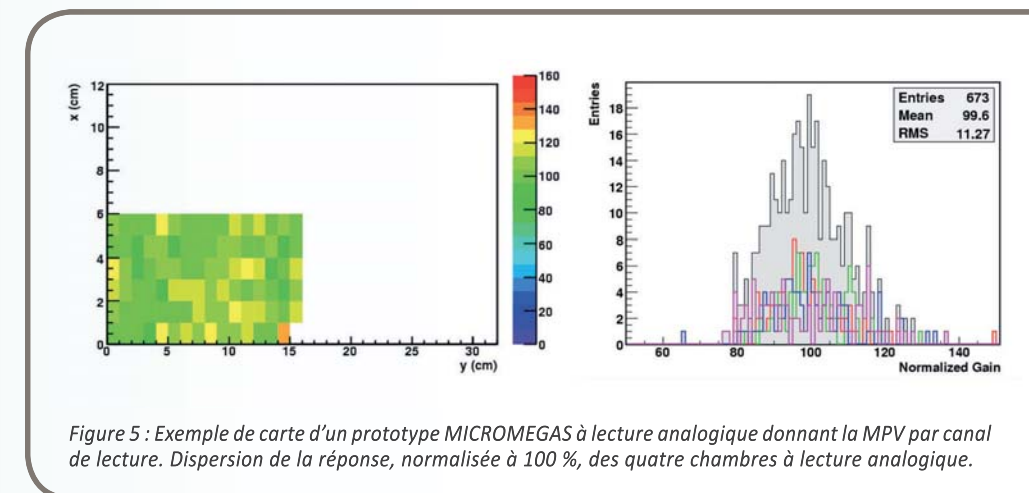


Figure 5 : Exemple de carte d'un prototype MICROMEGAS à lecture analogique donnant la MPV par canal de lecture. Dispersion de la réponse, normalisée à 100 %, des quatre chambres à lecture analogique.

seront indispensables pour mesurer les efficacités, les multiplicités et toutes les dépendances relatives au seuil de lecture.

Plusieurs prototypes à 8 x 32 voies ont été réalisés et équipés chacun de quatre puces HARDROC intégrées au circuit imprimé. Leur lecture est assurée par une carte DIF (Detector InterFace) conçue au LAPP dans le cadre du système d'acquisition de donnée du DHCAL (Digital HCAL) de la collaboration CALICE. Ces prototypes ont été mis sous un faisceau de pion à 7 GeV en novembre 2008 sur la ligne T9 du PS au CERN. L'analyse des données recueillies est en cours.

Parallèlement aux études des détecteurs, nous avons développé la simulation d'un calorimètre hadronique, en utilisant GEANT4 et l'environnement software du concept SiD. En utilisant les ressources de la ferme MUST, nous avons simulé plusieurs configurations dans le but d'optimiser le calorimètre hadronique mais aussi pour permettre la confrontation aux données des prototypes. La Figure 7 montre les voies du détecteur touchées pour une simulation d'un pion de 100 GeV interagissant avec l'absorbeur.

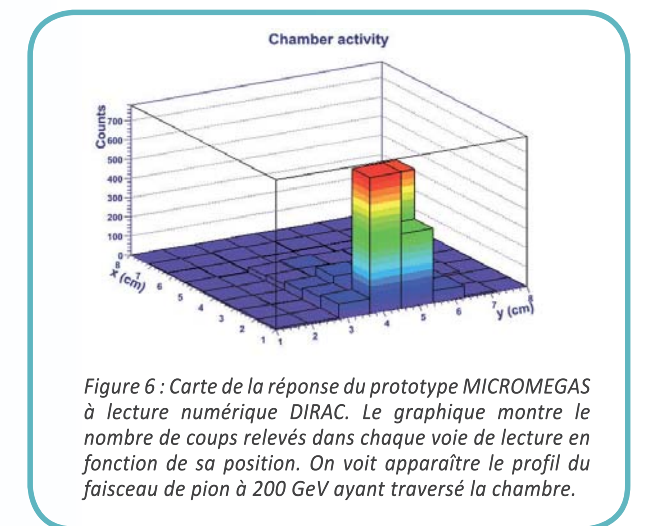


Figure 6 : Carte de la réponse du prototype MICROMEGAS à lecture numérique DIRAC. Le graphique montre le nombre de coups relevés dans chaque voie de lecture en fonction de sa position. On voit apparaître le profil du faisceau de pion à 200 GeV ayant traversé la chambre.



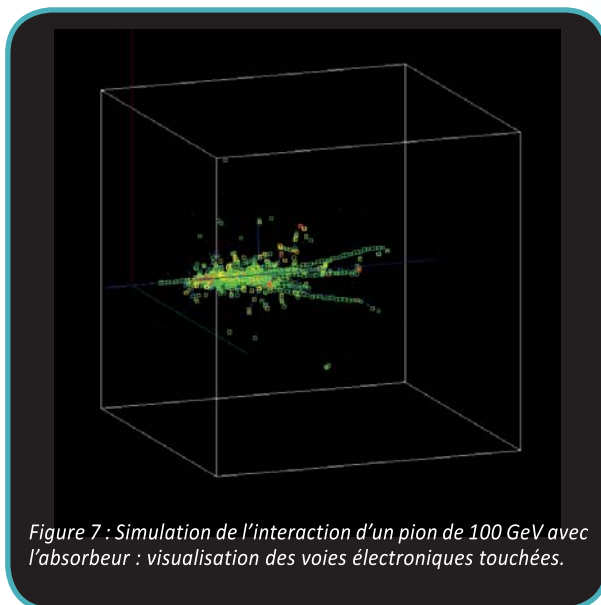


Figure 7 : Simulation de l'interaction d'un pion de 100 GeV avec l'absorbeur : visualisation des voies électroniques touchées.

## Plan pour 2010-2014

Après les tests du premier m<sup>2</sup> de MICROMEGAS avec électronique à seuil intégré, nous prévoyons, dans le cadre de CALICE, la production d'un minimum de dix plans de un mètre carré de MICROMEGAS par an pour équiper un prototype de calorimètre hadronique. Cet effort sera accompagné d'une part d'études poussées sur les protections de l'électronique de lecture et d'autre part de la suite des développements des circuits intégrés DIRACs ; deux activités à forte visibilité dans la collaboration RD51 du CERN. En parallèle, nous prévoyons de continuer et de renforcer notre effort dans les simulations et optimisations des détecteurs de l'ILC et de CLIC en nous basant sur des canaux de physiques de référence, des études qui seront enrichies par la proximité des physiciens théoriciens du LAPH.

Ces activités, ainsi que l'exploitation des données des tests faisceau du prototype de 1 m<sup>3</sup>, représentent un budget de l'ordre de 80 kEuros par an. Elles reposent sur le maintien et le renforcement de l'équipe par la continuité d'un poste de physicien sur deux ans à partir de 2011 et d'un poste de physicien entrant permanent.

## Publications importantes

1. «CALICE Report to the Calorimeter R&D Review Panel». By CALICE Collaboration (C. Adloff et al). ILC-DET-2007-024, Jul 2007., 77pp. e-Print: arXiv:0707.1245 [physics.ins-det].

2. «International Linear Collider Reference Design Report. 1: Executive summary. 2: Physics at the ILC. 3: Accelerator. 4: Detectors». J. Brau, (ed.) et al. ILC-REPORT-2007-001, AAI-PUB-2007-002, BNL-79150-2007, CERN-2007-006, CHEP-A07-001, CLNS-07-1991, COCKCROFT-07-04, DESY-07-046, FERMILAB-TM-2382, JAI-2007-001, JINR-E9-2007-039, JLAB-R-2007-01, KEK-REPORT-2007-2, LBNL-62867, LNF-07-9-NT, SLAC-R-857, Aug 2007., 778pp.
3. «Response of the CALICE Si-W Electromagnetic Calorimeter Physics Prototype to Electrons». By CALICE Collaboration (C. Adloff et al). Nov 2008., 21pp. e-Print: arXiv:0811.2354 [physics.ins-det].
4. «Large Area MICROMEGAS with Embedded Front-End Electronics for a Digital Hadronic Calorimeter». C. Adloff, A. Espargilière and Y. Karyotakis. Nuclear Science Symposium Conference Record, NSS '08. IEEE, ISSN: 1082-3654, ISBN: 978-1-4244-2714-7, 2008, p. 1433 – 1435.

## Présentation dans des conférences

Y. Karyotakis, « MICROMEGAS pour le GHCAL », Séminaire orienté vers une contribution au linéaire à électrons, Orsay, 5-6 Octobre 2006.

C. Adloff, «MICROMEGAS for a Gas HCAL», International Linear Collider Workshop (ILC-ECFA and GDE Joint Meeting ), Valencia, 6-10 November 2006.

J. Prast, « La DAQ pour les projets ANR et EUDET », Séminaire orienté vers une contribution au linéaire à électrons, Clermont-Ferrand, 19-20 Novembre 2007.

J. Blaha, «DHCAL», CLIC08 Workshop, CERN, 14-17 October 2008.

C. Adloff, «Large Surfaces MICROMEGAS with Embedded Front-End Electronics for a Digital Hadronic Calorimeter», IEEE Nuclear Science Symposium, Dresden, 19-25 October 2008.

C. Adloff, « MICROMEAS DHCAL : Résultat des tests en faisceau et simulation », Séminaire orienté vers une contribution au linéaire à électrons, Annecy-le-Vieux, 8-9 Décembre 2008.

J. Blaha, «Development on MICROMEGAS for a Digital Hadronic Calorimeter», LCWS'08, 15-20 nov. 2008, Chicago.

## L'équipe du LAPP

**Physiciens** : C. Adloff (Maître de Conférence), J. Blaha (oct. 2008 - oct. 2010), J.-J. Blaising, M. Chefdeville (déc. 2008 - déc. 2010), Y. Karyotakis

**Doctorant** : A. Espargilière (oct. 2008 - oct. 2011)

**Equipe Technique** : S. Cap, A. Dalmaz, C. Drancourt, D. Fougeron, R. Gaglione, R. Gallet, N. Geffroy, C. Girard, R. Hermel, J. Jacquemier, I. Monteiro, F. Peltier, J. Prast, J. Tassan, G. Vouters (CDD sept. 2008-juin 2009)

**Stagiaires** : M. Breton (IUT, 2007), A. Espargilière (Master 2, 2007), K. Karakostas (Master 1, visiteur étranger, 2006), G. Vouters (Ingénieur 2008), G. Rosaz (IUT, 2006)

## Responsabilités du groupe

**Membre de la « task force » DIF de la collaboration CALICE** : J. Prast (2007-2008).

**Membre du comité exécutif de la collaboration SiD** : Y. Karyotakis.

