

Expérience CMS au LHC

Participation du LAPP

Physiciens: J.P. Peigneux, G. Bassompierre, J.P. Guillaud, J.P. Mendiburu, P. Nédélec, M. Schneegans, A. Singovsky, D. Sillou, J.M. Thenard, J.P. Vialle

Ingénieurs, Techniciens: D. Boget, P-Y David, J. Ditta, N. Fouque, V. Hermel, M. Maire

Doctorants : Y. Baek, G. Drobychev, S. Murray

Stagiaires : D. Khaoustov, F. Melot, F. Vulliet

Collaboration

Collaboration internationale regroupant 151 instituts dont 5 laboratoires français: LAPP Annecy, IPN Lyon, Ecole Polytechnique Palaiseau, CEA-DAPNIA Saclay, CRN Strasbourg.

Dates clés

1990: Présentation du détecteur au workshop de Aachen

1992: Lettre d'intention déposée au CERN

1994: Choix des cristaux au tungstate de plomb pour le calorimètre électromagnétique

1995: Acceptation de l'expérience CMS par les Comités du CERN

Abstract

At LHC the CMS (Compact Muons Solenoid) detector will be built inside a 4 Teslas superconducting solenoid. The main characteristics of the detector are a good measurement of muons and a performant crystal based electromagnetic calorimetry for gammas and electrons detection. The choice by the CMS collaboration of lead tungstate crystals for its electromagnetic calorimeter, in the development of which LAPP was already deeply involved, has motivated a group from LAPP to join the CMS collaboration in 1995.

The LAPP group worked initially in crystal characterization and in the improvement of its qualities (prevention of slow light component, increase of radiation hardness). The calorimeter geometry design was studied at LAPP. The group has also developed an automatic bench (ACCOS) for the automatic control of the crystals quality. Several developments concerning the very front end electronics (photodetectors, preamplifier, compressor) as well as an electronic charge calibration system for the Calorimeter are in progress at LAPP. The group is also involved in the development of general software tools like the object oriented GEANT 4 and the new C.R.I.S.T.A.L. software dedicated to the management of the electromagnetic calorimeter database.

Les expériences auprès du LHC du CERN abordent un nouveau domaine d'énergie ainsi que des sujets de physique très ciblés : recherche du boson de Higgs, tests de la validité des théories supersymétriques. Le détecteur CMS prend en compte ces deux aspects qui imposent des performances très élevées dans la mesure de certaines topologies particulières, et une bonne qualité de détection pour l'ensemble des réactions possibles.

Le détecteur CMS est construit dans un solénoïde supraconducteur de 4 Tesla de 13 mètres de long et de 2,95 mètres de rayon et met l'accent sur la mesure des muons et des particules électromagnétiques (électrons, gammas). L'énergie de ces particules sera mesurée avec une précision de $2\% \sqrt{E} + 0.5\% + 200 \text{ MeV} / E$ par le calorimètre (ECAL) à cristaux de tungstate de plomb (PbWO_4). Ces cristaux, de courte longueur de radiation (9. mm), qui supportent des doses de radiations élevées, permettent de réaliser un calorimètre électromagnétique extrêmement compact.

Depuis 1996, le groupe a apporté une contribution reconnue sur ce détecteur, tant pour la technologie initiale de fabrication des cristaux que pour la création d'outils de contrôle performants. Par ailleurs, grâce à l'enthousiasme et au dynamisme du service informatique du LAPP, un programme innovant dans le domaine des techniques de programmation avancées orientées objet a pu être mené à bien.

L'activité du groupe se développe suivant trois axes principaux : développement des méthodes de fabrication des cristaux et

de leur contrôle, développements relatifs à l'électronique associée aux cristaux et enfin développements des logiciels concernant les simulations et l'analyse des données.

Caractérisation des cristaux

Un effort important a été fait dans le domaine de la caractérisation des cristaux, en étudiant les corrélations entre leurs propriétés et les processus de fabrication. Pour mener à bien les études correspondantes, le groupe a développé plusieurs «facilités» expérimentales:

- La source COCASE équipée par le groupe au CEA (Saclay) a permis d'effectuer toute une série de mesures concernant la tenue aux radiations des cristaux. Ces mesures ont permis de mettre au point les conditions industrielles de tirage des cristaux.
- La source GIF, au CERN, avec le banc automatique mis en place par le groupe CMS-LAPP (figure 1), permet l'irradiation et le contrôle en ligne des dégâts dus aux radiations. Ce dispositif a été utilisé intensivement en 1998-1999 permettant la mise au point de la technique double dopage et l'ajustement des conditions de préproduction des cristaux.

Tests et développements des cristaux

Le groupe a activement participé aux mesures effectuées dans le faisceau H4 du CERN qui ont permis de valider un certain

nombre de choix (concernant notamment la collection de lumière et l'électronique de lecture) et d'évaluer la résolution en énergie obtenue avec des matrices de cristaux prototypes. L'obtention d'une excellente résolution en énergie dépend

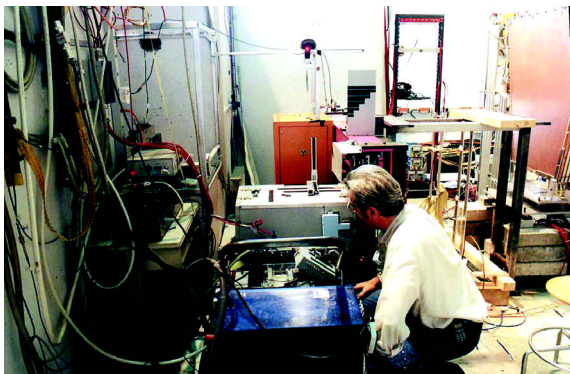


Fig. 1 : Banc de caractérisation des cristaux dans GIF, au CERN

en particulier du terme constant (estimé à 0.5%) qui intervient dans la résolution. L'obtention d'un terme constant aussi bas suppose un excellent contrôle des 80000 canaux du détecteur ainsi qu'une très grande stabilité.

Le Programme A.C.C.O.S. au LAPP (CMS/ECAL)

En 1995, il a été projeté de réaliser un banc automatique de contrôle de qualité (ACCOS) (figure 2) des 80000 cristaux de tungstate de plomb destinés au calorimètre de CMS. ACCOS permet de mesurer et d'enregistrer dans une base de données les principales caractéristiques de ces cristaux (dimensions précises, transparence, ainsi que la quantité, la rapidité et l'uniformité des lumières scintillantes émises et collectées le long du cristal). Les cristaux produits en Russie (BTCF) et en Chine (SIC) sont contrôlés dans deux centres régionaux à Rome (ENEA) et à Genève (CERN). Les deux centres producteurs et les deux centres régionaux sont ou seront équipés de bancs automatiques similaires.

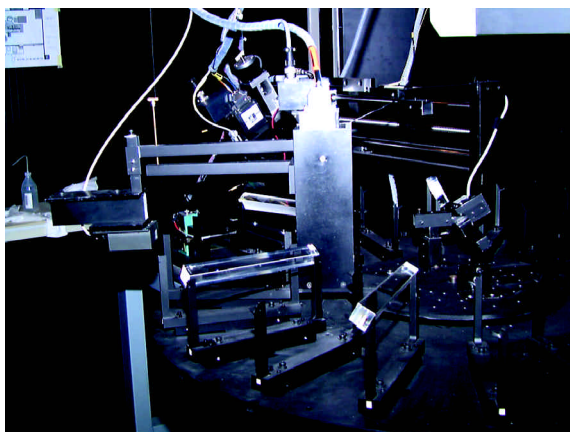


Fig. 2 : Banc de mesures automatiques ACCOS

Le LAPP a publié à l'automne 97 un rapport proposant à la collaboration CMS un appareillage intégré autour d'une machine de mesures tri-dimensionnelles permettant de mesurer à la fois les paramètres mécaniques et optiques des cristaux de PbWO₄ présentés sur un serveur circulaire. La collaboration a adopté ce concept pour son centre régional du CERN où

deux machines sont prévues et pour l'usine de production russe de Bogoroditsk. Un prototype de la partie mesures optiques (ACCOS1) a été réalisé et monté au LAPP en étroite collaboration avec l'INP de Minsk. Des méthodes originales et un appareillage spécifique pour les mesures optiques ont été développés, notamment pour la mesure de la quantité de lumière. La séquence et la lecture des mesures ont été couplées au logiciel C.R.I.S.T.A.L. (voir ci-dessous).

La machine ACCOS1 installée durant l'été 98 au CERN a été intégrée à la machine 3D et l'ensemble était opérationnel dès novembre 1998. Après 2 mois de tests de stabilité et de performances, par comparaison systématique avec les bancs classiques, plus de 2000 cristaux de préproduction ont été mesurés en mode entièrement automatique au rythme de 40 cristaux par jour, de mars à octobre 99. Un cristal de référence mesuré deux fois chaque jour a montré le niveau de fiabilité de ces mesures. En août 99, une réplique modifiée, capable de charger 30 cristaux sans manipulation, a été installée au BTCF en Russie. Une machine identique est en construction au CERN pour doter ce centre régional d'une deuxième machine.

Le projet C.R.I.S.T.A.L.

(Concurrent Repository Interface for Tracking and Assembly Lifecycle)

La gestion de 80000 cristaux et des pièces connexes (photodiodes à avalanche, amplificateurs...), des informations les concernant, de leur historique, entre différents centres de production et de réception distants, pose un problème à la fois très général et très complexe. Le groupe informatique du LAPP s'est impliqué fortement depuis 1996 à sa solution par le développement du logiciel C.R.I.S.T.A.L..

Ce logiciel comprend deux parties: la première, dite "off-line", permet de définir le schéma de production et son évolution. Elle réside dans le système central. La seconde, dite "on-line", centralise toutes les données relatives au détecteur, gère les mouvements des pièces entre centres, assure la caractérisation sur les bancs de mesure et l'assemblage des pièces suivant le schéma défini par les centres de production.

L'implémentation de C.R.I.S.T.A.L. s'est appuyée sur les techniques orientées objet. L'analyse du problème a utilisé la méthodologie OMT (Object Modeling Technics) avec la notation UML (Unified modeling Language) pour modéliser une solution. Une base de données orientée objet (Objectivity) a été utilisée pour stocker toutes les données (schéma de production, données de caractérisation...) tandis que la communication entre les différents modules s'appuie sur le standard de communication CORBA. Enfin, le code a été écrit en C++ et les interfaces utilisateurs en Java. Depuis le début de 1999, C.R.I.S.T.A.L. constitue l'outil de caractérisation et d'assemblage de toutes les pièces du ECAL.

Les perspectives ouvertes par la structure de C.R.I.S.T.A.L. sont très larges : gestion du détecteur, des résultats et des procédures de calibration, banques de gerbes voire gestion complète de l'expérience. La première extension de

C.R.I.S.T.A.L. constituera un outil d'exploitation des données de construction pour les faisceaux tests et la calibration. Initialement conçue pour le ECAL, C.R.I.S.T.A.L. constitue un outil très général applicable à la gestion et au contrôle de production ou à tout problème similaire. Plusieurs industriels se sont déclarés intéressés par le projet C.R.I.S.T.A.L.. Les trois organismes ayant contribué au projet, le CERN, le LAPP/IN2P3 et l'Université d'Angleterre Ouest (UWE/Bristol), ont donc entrepris une démarche commune pour faire un transfert de technologie vers l'industrie.

Collection de lumière et électronique de contrôle des signaux des cristaux

Le LAPP a participé à l'optimisation du signal lumineux et à sa détection dans les conditions imposées par le LHC, et notamment à l'évaluation de la meilleure interface optique cristal-photodétecteur. L'évaluation d'une interface optique active cristal-photodétecteur est encore en cours actuellement. En parallèle il participe, dans le cadre de son programme de R&D, à l'effort général entrepris pour le développement des photodiodes à avalanche, pour les applications en physique des hautes énergies, notamment à travers un programme de recherche avec des instituts de Minsk (Biélorussie) sur les diodes à avalanche à couche métallique résistive qui présentent des surfaces de détection intéressantes. Ce projet est financé à 80% par l'ISTC (International Scientific Technical Center) en partenariat avec l'IN2P3.

Electronique : la calibration électronique du ECAL.

Le calorimètre électromagnétique de CMS devra mesurer l'énergie des particules électromagnétiques dans une gamme très étendue (entre 50 MeV et 1 TeV), pour détecter un Higgs de basse masse, il devra permettre une résolution (6.10^{-3} à 100 GeV) jamais atteinte auparavant, même dans des dispositifs plus modestes. L'électronique 'front-end' est constituée de 80 000 canaux et est située immédiatement derrière les cristaux. Elle amplifie et digitalise le signal, puis l'information est transmise à la salle de contrôle par un ensemble de 120 000 fibres optiques travaillant à 1 GHz.

L'électronique de lecture doit fonctionner pendant environ 10 ans sans maintenance et il est clair qu'un tel ensemble de mesures précises nécessite un système redondant de calibration en ligne permettant le suivi des dérives liées aux variations de température, aux dommages par irradiation entre autres.

Depuis 1997 le LAPP a pris en charge ce système de calibration. La calibration s'effectue par injection d'une charge connue (figure 3), sur l'entrée de la chaîne de lecture, de forme identique à celle produite par les photodiodes à avalanche qui lisent les cristaux. La dynamique du signal de calibration est identique à celle exigée du détecteur et sa linéarité sur toute cette dynamique est meilleure que 0.5%. Pour ce système, une série de 4 circuits intégrés dédiés ont été étudiés au LAPP sur simulateur, puis fondus en technologie DMILL 0.8 μm pour résister à l'irradiation ambiante dans laquelle le système devra fonctionner.

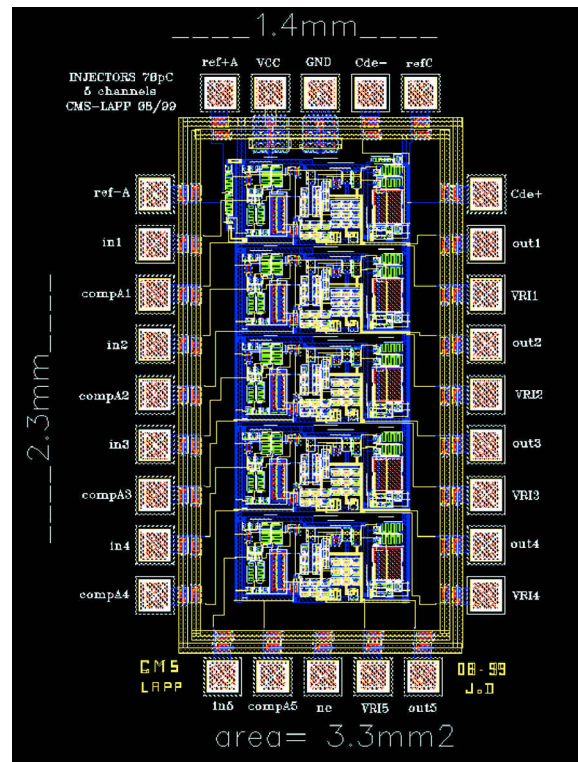


Fig. 3 : Circuit intégré de l'injecteur

Une chaîne de mesure a été montée au LAPP pour vérifier automatiquement les écarts de linéarité entre les amplitudes demandées et mesurées. Nous avons également vérifié la tenue aux irradiations de ce système jusqu'à 10^{14} neutrons/cm² au CERI (Orléans) et à PSI (Villigen, Suisse).

La version finale de ce système de calibration électronique intégrera toutes les fonctionnalités dans un seul circuit qui doit être fondu à la fin de 1999. Ce circuit alimente 5 canaux du calorimètre et comporte quatre parties :

1. La partie contrôle réception des informations globalement destinées à la commande de l'électronique frontale, désérialisation et distribution, ajustement des coupures pour le passage dans l'ampli multi-gains, mesure des températures, calibration etc.

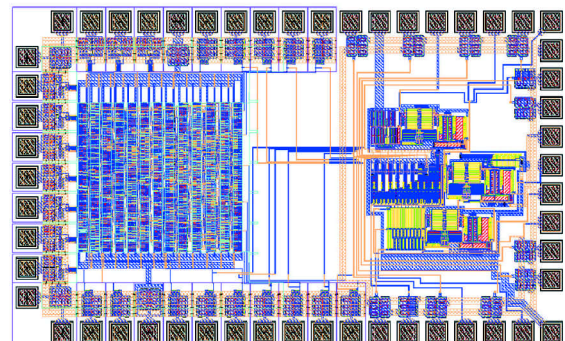


Fig. 4 : Circuit intégré du DAC

2. Une partie logique sélectionne les ordres de calibration, différencie l'ordre d'amplitude qu'elle envoie au DAC et l'ordre de déclenchement qu'elle envoie à la partie injecteur.

3. Un DAC de 10 bits qui devrait avoir une précision de 0.1%. Ce DAC (fig. 4) est le premier DAC de 10 bits à être fondu en technologie DMILL.
4. Une partie qui crée 5 impulsions pour les canaux d'une même carte front-end. Cette partie a particulièrement été étudiée en termes de bruit (elle ne doit rien ajouter au canal sur lequel elle est branchée), de précision et de robustesse (elle ne doit pas dériver sous irradiation).

Simulation et programmation

Enfin, un important travail d'optimisation du calorimètre a été réalisé avec des techniques de simulation. L'arrangement de cristaux retenu actuellement pour le tonneau est une proposition du LAPP. L'équipe du LAPP participe également à la remise à niveau des outils logiciels généraux pour le LHC tel que la version de GEANT4 en programmation orientée objet.

Au total, l'expérience CMS apporte des perspectives de physique enthousiasmantes, et le groupe CMS du LAPP prend toute sa part dans cette aventure.

Rapports CMS

PbWO4 crystals hardness test setup at the CERN general irradiation facility

J.P. Peigneux, A.V., A. Fedorov, M. Korzhik, O.V. Missevich, CMS note 1999/061 (Oct. 1999)

Results of PWO radiation hardness optimization

G.Y. Drobychev, A.N. Annenkov, E. Auffray-Hillemans, A.E. Borisevich, M.V. Korzhik, V.L. Kostylev, P. Lecoq, V.D. Ligoun, J.P. Peigneux, CMS note 1999/065 (July 1999).

Analysis of ACCOS system results reproducibility and results of first pre-mass production PWO certification

G.Y. Drobychev, E. Auffray-Hillemans, A.E. Borisevich, M.V. Korzhik, O.V. Missevich, J.P. Peigneux, M. Schneegans, R.F. Zouevski, LAPP-EXP 99-07 (Oct. 99).

Voir aussi liste des publications et communications à des conférences en fin de rapport.