

Service Détecteurs et Instrumentation

Patrick Stassi, Christian Barnoux, Christophe Bernard, René Blanc, Thierry Cabanel, Olivier Guillaudin, Muriel Heusch, Marc Marton, Gabriel Mondin, Jean-François Muraz, Alain Nicolle, Alain Pelissier, Myriam Tur, Olivier Zimmermann

The Detectors and Instrumentation Service (SDI) is a team of engineers and technicians with various and different skills and experiences. The service has two objectives: - to develop and set up instrumentation and detection systems for the laboratory projects, - to study and test new detection techniques. The SDI has participated in all the projects listed below, sometimes in collaboration with other technical services of the laboratory.

ALICE

Alice est la seule expérience exclusivement dédiée à l'étude des collisions d'ions lourds au LHC (CERN). La mise en évidence expérimentale du Plasma de Quarks et de Gluons (PQG) et son étude s'obtiendront grâce à la mesure des différentes particules émises dans différents ensembles et sous-ensembles de détecteurs spécifiques. Le SDI est impliqué dans deux de ces détecteurs.

GMS (Geometry Monitoring System) du spectromètre à muons

Un de ces détecteurs est le spectromètre à muon. Ce spectromètre, disposé à l'arrière du détecteur ALICE, doit permettre de reconstruire la trajectoire, courbée par le champ magnétique d'un aimant dipolaire, des muons issus des décroissances de résonances de quarks lourds. La précision requise pour cette reconstruction (résolution de masse invariante meilleure que 1 %) impose de connaître la position et la déformation des dix plans de chambres qui composent le spectromètre, à mieux que 40 μm . Le GMS a été développé pour atteindre ces performances. Pour permettre de valider les systèmes optiques choisis ainsi que les programmes de reconstruction géométrique développés, le LPSC a réalisé un banc de test représentant trois demi-chambres à l'échelle 1.

Notre service a pris en charge :

- La coordination technique de la réalisation du banc de test.
- L'étude et la réalisation du dispositif chauffant et soufflant permettant de recréer les conditions thermiques réelles subies par les chambres lors de leur fonctionnement.

- L'étude, le choix et la programmation (LabVIEW) des 3 tables motorisées permettant de générer des déplacements micrométriques connus sur la chambre centrale.

Les campagnes de mesures se sont déroulées durant l'année 2006. Ces mesures ont montré que le GMS permettait de déterminer la position des chambres avec une précision de 23 μm dans les conditions réelles et futures de l'expérience. Fin 2007, cette installation a été entièrement démontée.

Le calorimètre électromagnétique

L'autre détecteur d'Alice dans lequel notre service est impliqué est le calorimètre électromagnétique. Ce calorimètre, couvrant 110° azimutaux (figure 1) autour de la TPC et du TRD, augmentera considérablement les capacités d'ALICE dans les études relatives aux photons, aux jets de haute impulsion transverse, et au phénomène de « Jet-quenching ». Il reprend la technologie de type « Shashlik », alternant des couches de plomb et de scintillateurs dont la lumière produite est récoltée et conduite longitudinalement par l'intermédiaire de réseaux de fibres optiques jusqu'aux APD. La collaboration a attribué au LPSC la responsabilité du montage, du test et de la calibration de 7 des 11 SuperModules (SM) qui composent le calorimètre.

Le service a pris en charge :

- La coordination technique du projet au LPSC.
- La définition et le suivi de la mise en place des infrastructures.
- La conception et le suivi de réalisation des outillages de montage des SuperModules (figures 2 et 3).
- La conception, la réalisation et l'exploitation du banc cosmique de calibration des SM.
- La mise en place, au CERN, des chambres à fils per-

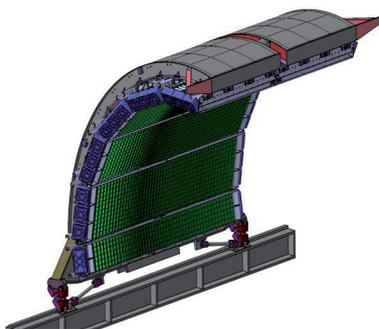


Figure 1 : Calorimètre électromagnétique.

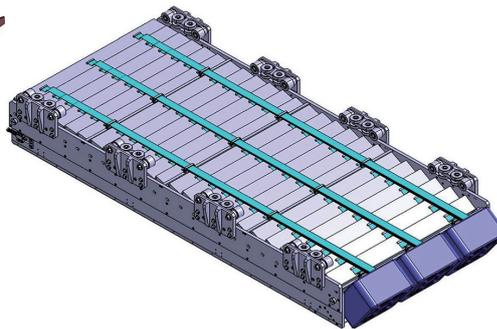


Figure 2 : SuperModule.

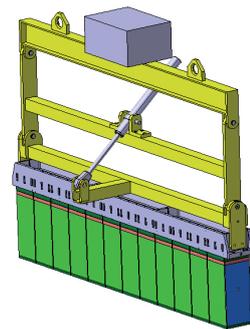


Figure 3 : Outillage d'insertion.

mettant le monitoring des faisceaux PS et SPS utilisés pour la validation des prototypes.

Début 2008, les infrastructures seront terminées et la plupart des outillages seront réalisés. Notre service participera alors activement à l'assemblage et à la calibration des 7 SM dont la réalisation s'échelonnnera jusqu'au début de l'année 2010.

Auger

Auger Sud

Dans le cadre de l'expérience Auger Sud, située à Malargüe, en Argentine, le SDI participe depuis 2006 aux trois activités suivantes :

- Dans le cadre du programme de R&D sur la radio-détection des rayons cosmiques, trois dispositifs de radio-détection autonomes ont été développés et installés sur le site en Argentine, en collaboration avec Subatech, Nantes. Le SDI a apporté une contribution importante à cette activité en développant la partie alimentation de puissance par panneaux solaires et batteries, ainsi que le support mécanique de l'ensemble. Nous avons également pris en charge la partie transport et logistique de l'ensemble du dispositif et participé activement à sa mise en œuvre sur le site dans une première mission en 2006 puis à sa mise à niveau dans une deuxième mission en 2007.



- La deuxième activité consiste à la mise au point d'un banc de test de photomultiplicateurs au LPSC, destiné à mettre en évidence les causes des pannes observées sur certains ensembles de détection (photomultiplicateurs et électronique associée), installés sur le site de l'expérience, afin de trouver d'éventuelles solutions de dépannage.



- La dernière activité prise en charge par le SDI sur le site sud, correspond au transfert de la procédure d'intégration des bases des photomultiplicateurs (PM). Ces bases ont été intégrées sur les PM à 90 % par la société Photonis à Brive-la-Gaillarde. Le travail du SDI en collaboration avec une personne du service électronique a été d'exporter ce savoir-faire ainsi que l'outillage associé vers une équipe de techniciens en Argentine, sous la forme d'une procédure sécurisée et appropriée pour ce travail. Un film DVD a été produit pour cette activité.



Auger Nord

Dans le contexte des activités de R&D pour un observatoire Auger site Nord, le SDI a en charge deux activités :

- Une activité de caractérisation et d'étalonnage de cartes GPS destinées au marquage en temps. Il s'agit

ici de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le meilleur choix de carte GPS parmi celles qui sont disponibles actuellement sur le marché ?
- Quelles sont les caractéristiques des cartes retenues et conviennent-elles aux spécifications ?
- De quelle façon ces produits doivent être utilisés pour effectuer une datation ?
- Peut-on, et de quelle façon, réutiliser la technique de datation de la phase Sud ?
- Quelles en sont les limites d'utilisation ?

Dans ce but, un banc de test est en train d'être mis en place, afin de travailler sur différentes cartes du marché.

• La deuxième activité consiste à étudier un nouveau dispositif de photo-détection pour les cuves du site Nord. En effet, les détecteurs de surface d'Auger seront amenés à fonctionner en continu. Les cuves étant disposées en plein air, les PM et l'électronique associée seront donc soumis à d'importantes variations climatiques (0 à 50°C, humidité).

En plus d'une isolation renforcée, il a été préconisé d'utiliser une enceinte étanche qui contiendrait la base du PM et l'électronique associée. Ceci permettrait à l'ensemble de se présenter sous la forme d'un module sensor compact facilitant les travaux de réparation et de contrôle.

Deux systèmes sont à l'étude, basés sur un corps conique en plastique moulé de forme proche de celle utilisée actuellement sur le site Sud pour isoler le PM de la lumière. Le premier comporte une fenêtre d'entrée en plexiglas épousant la surface de la photocathode. Le deuxième laisse libre cette surface, mais comporte un double joint torique au niveau du col du PM. Dans les deux solutions proposées, les systèmes seront fermés d'un fond métallique sur lequel sera fixé l'électronique.



CODALEMA

L'installation de l'expérience CODALEMA, sur le site du radiotélescope de Nançay, s'est poursuivie en 2006 et 2007. Le service a déployé quatre nouvelles stations de détection à scintillateurs en mars 2006, venant ainsi compléter les 5 stations déjà installées en 2005.

La prise de données avec ce réseau de neuf détecteurs s'est poursuivie jusqu'à la fin 2006. En janvier 2007, dans des conditions climatiques difficiles (photo 1), le service a de nouveau installé quatre nouvelles stations de détection, complétant ainsi le réseau des treize détecteurs à scintillateurs prévus à l'origine du projet (photo 2).



Photo 1



Photo 2

Le réseau de détecteurs étant complet, l'optimisation du système d'acquisition a été entreprise dès le début de l'année 2007. Un nouveau module de déclenchement sur niveau de multiplicité (« Trigger ») a été développé par les services électronique et informatique du LPSC (photo 3). Ce module télécommandable permet de définir et de générer un signal de déclenchement, à partir des treize détecteurs, vers l'ensemble de l'expérience. En parallèle, une nouvelle version du programme d'acquisition a été mise en place par le SDI (photo 4). Ce nouveau programme, développé sous LabVIEW, contient un « moteur » d'acquisition optimisé en vitesse et permet d'inclure, si besoin, l'acquisition des données provenant des antennes. L'ensemble a également été renforcé par de nouvelles alimentations plus puissantes (photo 5).



Photo 3

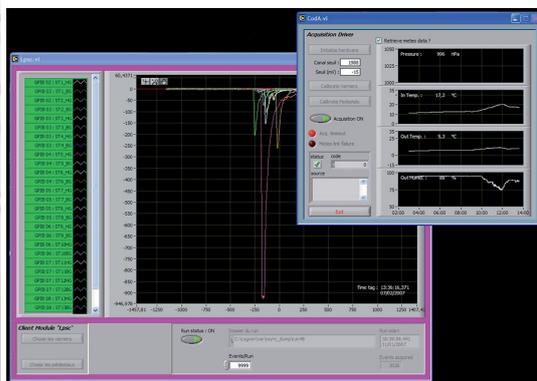


Photo 4

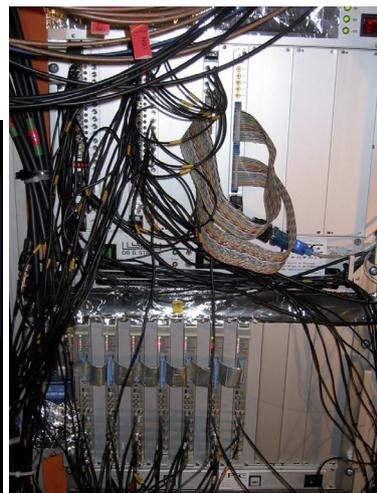


Photo 5

C'est avec ce nouveau dispositif que près de 10 000 événements ont pu être enregistrés en continu entre août et novembre 2007, sans révéler de défaillances.

CREAM

Pour cette expérience, le service a participé à l'intégration des modules optiques du détecteur ainsi qu'aux activités de tests et vérifications de la matrice composée de 1600 photomultiplicateurs (PM).

Cette intégration a consisté au montage du plan focal qui est composé de 25 modules contenant chacun 4 sous-modules. Chaque sous-module est équipé de 16 photomultiplicateurs. Les PM ont été au préalable appairés en fonction de leurs dimensions et de leur gain et leur mise en place (appareillage) a été faite selon ces informations.

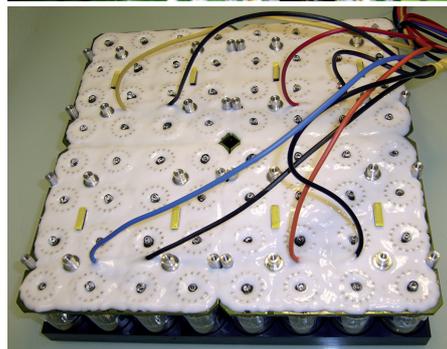
Un joint d'étanchéité entre le circuit imprimé et la base du PM a été mis en place, de façon à pouvoir effectuer un « potting », c'est-à-dire une isolation des électrodes du PM portées à la haute tension. Ceci permet de supprimer les claquages à basse pression dus au « minimum de Paschen » (plus la pression de l'air diminue et plus la décharge électrique survient à des tensions faibles. La courbe de Paschen, qui représente la tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes et de la pression, atteint une valeur minimale appelé le « minimum de Paschen »). Le « potting » a été effectué en injectant une résine de type Mapsil 213 B, 13 grammes de produit ont été utilisés par sous module et 18 minutes en moyenne sont nécessaires pour chaque injection, la polymérisation se faisant à température ambiante.

Une opération de « coating » a ensuite été effectuée pour les mêmes raisons que précédemment (Paschen). Celle-ci consiste à imprégner chaque sous-module, au niveau du circuit imprimé et sur chaque composant, avec une résine (Nusil CV1152), appliquée au pinceau, qui assure une protection de surface. Cette activité a nécessité la mise en étuve des sous-modules durant 6 heures à 40° C.

Enfin, une troisième opération a également été réalisée pour éviter les claquages. Celle-ci correspond à l'ajout d'une couche de micro ballons (micro billes de verre) mélangés à la résine (Mapsil 213 B), et appliquée à la seringue sur le verso du sous module.

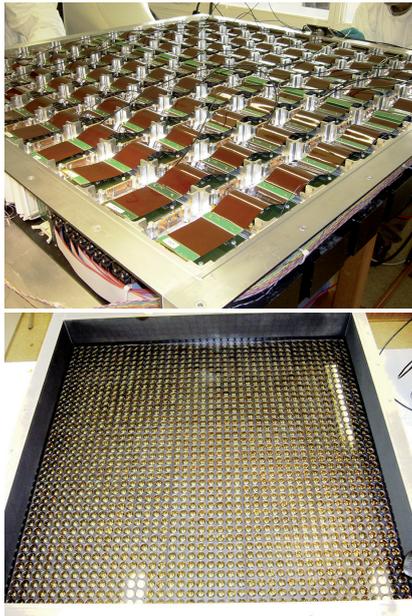
Des tests de chaque sous-module en haute tension et sous vide ont ensuite été menés pour vérifier qu'il n'y avait pas de claquages au passage du « minimum de Paschen ».

L'intégration se poursuit ensuite par le montage des sous-modules sur la grille support, la vérification du plan focal, le serrage mécanique et la mise en place de fibres optiques de test. Le montage des cartes électroniques d'acquisition « front-end » s'effectue ensuite avec la mise en place des ponts thermiques sur la grille support pour évacuer la chaleur via les colonnettes de montage des modules.



Pour finir, après avoir équipé le plan focal de sondes de température, des circuits de connexion de type « Flex » et des alimentations, le plan de tuiles d'aérogel est installé. Il est constitué de deux feuilles de mylar tendues et collées sur un cadre aluminium renfermant les tuiles d'aérogel. Deux protections mécaniques de type nid d'abeille sont ensuite installées au recto et au verso du dispositif.

Toutes ces opérations ont nécessité pas loin de 12 mois de travail, de janvier 2006 à janvier 2007.



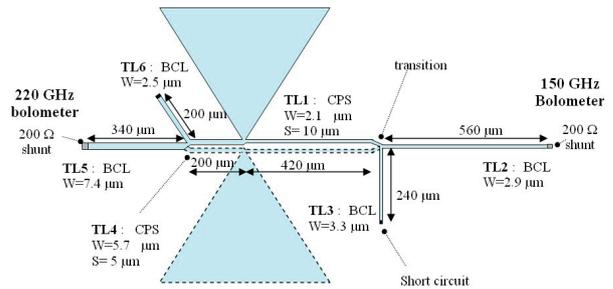
R&D DCMB

Le service est toujours impliqué dans la collaboration DCMB (Développement Concerté de Matrices de Bolomètres) qui propose de passer du détecteur unique à des matrices de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de bolomètres sensibles à la polarisation.

Le SDI s'est engagé sur l'étude du couplage du rayonnement avec le détecteur bolométrique. La voie explorée consiste à remplacer l'absorbeur et les filtres conventionnels par une antenne accordée en fréquence et sensible à la polarisation.

Ce développement s'appuie sur un logiciel commercial (HFSS) qui nous permet de modéliser la réponse de l'antenne pour une bande de fréquence allant de 50 à 500 GHz. Ce logiciel permet également de calculer les caractéristiques des filtres passe-bande utilisés sur les instruments scientifiques.

La collaboration s'oriente actuellement vers le design de pixels double bande (150 et 220 GHz). Chaque antenne de la future matrice sera alors reliée à deux bolomètres distincts par des lignes de transmission micro rubans adaptées à la fréquence souhaitée. Cette étude est menée en collaboration avec l'Institut Louis Néel, l'IMEP et l'Institut de Physique de Cantabria (Espagne).



Vue d'une antenne papillon avec deux lignes de transmission micro rubans assurant le filtrage fréquentiel.

ECRINS

Dans le cadre de l'activité pédagogique vers les lycées (ECRINS), le SDI a développé deux ensembles compacts de détection de rayons cosmiques baptisés « Mini ECRINS ». Ces systèmes sont constitués chacun de deux scintillateurs plastiques, associés à deux photomultiplicateurs alimentés par un dispositif sur batteries. L'acquisition des signaux est assurée par un mini oscilloscope USB (PicoScope®) piloté par un programme LabVIEW dédié. Si on utilise un ordinateur portable, ces ensembles deviennent complètement autonomes et transportables dans une valise appropriée.



Ces dispositifs sont des réalisations du SDI, non seulement de par leur conception et leur fabrication, mais aussi de par leur utilisation dans le cadre d'activités pédagogiques en 2007 comme l'exposition sur la physique au lycée S' Ambroise à Chambéry et la participation aux Olympiades de la physique 2007 avec le lycée Pierre et Marie Curie de Grenoble.

LOHENGRIN

Sur l'expérience LOHENGRIN installée à l'ILL, le SDI est intervenu pour la construction d'un double petit détecteur à neutrons, avec lecture de courant sur les fils d'anodes XY composé de 4 plans cathode et de 8 plans anode de dimensions extérieures 75 mm × 38 mm, la fenêtre utile de détection étant de 20 mm × 20 mm. Cette activité, qui s'est déroulée courant 2007, correspond à :

- La construction de 4 plans cathodes collés, soit 4 fois 2 cadres FR4/Cu, 2 faces de 16/10 d'épaisseur. Ces deux cadres sont en coïncidence avec, au milieu, une fenêtre de mylar/Al, 2 faces de 23 µm, avec les plots d'alimentation HT (photo 1).
- Le tissage de 2 plans de fils (cadres aluminium 250 × 140 × 10 mm). Les fils sont du type W/Au/Re de 30 µm, avec une tension de 30 g, au pas de 1 mm, soit 115 fils par cadre, pour transfert sur les cadres anodes.
- Le transfert, les soudures et les coupes des fils sur les pads des cadres anodes XY. Il y a 4 groupes XY, c'est à dire 8 cadres de FR4/Cu, deux faces de 16/10 d'épaisseur. Par anode, il y a donc 20 fils au pas de 1 mm par fenêtre utile de 20 mm × 20 mm (photo 2).

Chaque anode a son système électronique de lecture directement câblé sur le cadre (circuit imprimé).



Photo 1 : Cathodes Mylar/Al.

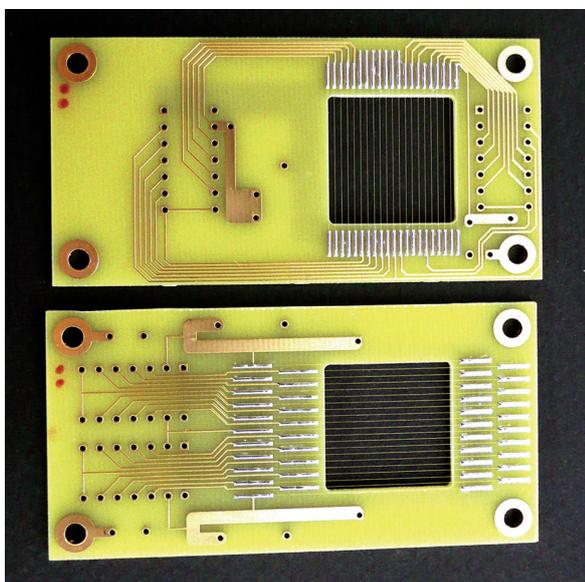


Photo 2 : Anodes XY.

MIMAC

Le concept du détecteur MIMAC repose sur une matrice de micro-TPC (micro Chambre à Projection Temporelle) utilisant les gaz hélium 3 et CF4 comme milieu sensible. Le projet est actuellement dans une phase de R&D avec pour objectif la construction et le test d'une micro-TPC à anode pixellisée, permettant la reconstruction des traces et la mesure d'énergie.

En 2006, le SDI a réalisé de nombreux tests avec des détecteurs de type « Micromegas » fournis par le CEA-Saclay (Micromegas, MicroBulk et Bulk, photos 1 et 2). Ces détecteurs remplaceront, à terme, les GEMs dans le prototype MIMAC.

Ces tests ont permis de caractériser le fonctionnement de ces détecteurs pour des mélanges gazeux à base d'Hélium et d'Isobutane.

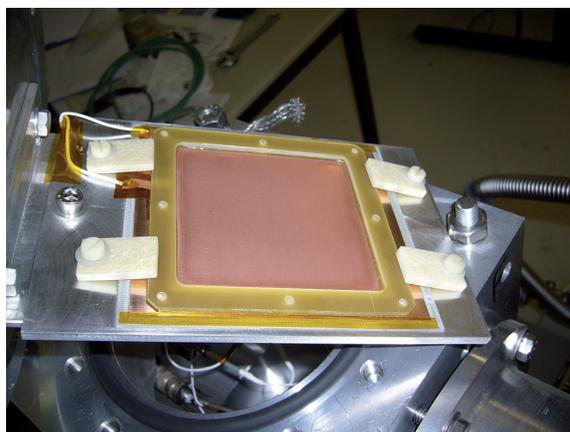


Photo 1 : Exemple de Grille Micromegas (CEA-Saclay).

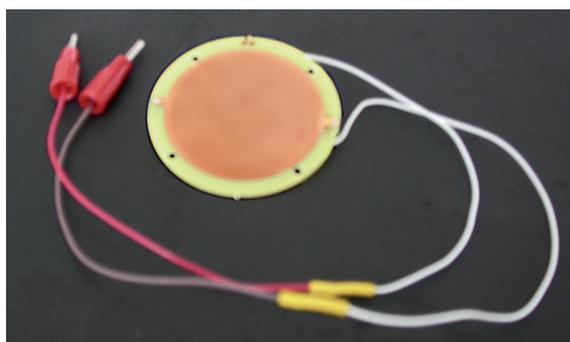
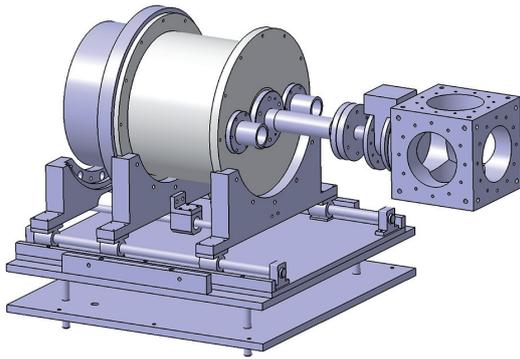


Photo 2 : Exemple d'un détecteur MicroBulk (CEA-Saclay).

Une calibration en énergie est réalisée pour la plage d'énergie de 0 à 6 keV avec des rayons X de différentes énergies.

Le prototype de TPC, dont la mécanique a été conçue par R. Guglielmini, est actuellement en cours d'intégration. Cette chambre sera couplée avec une source d'ions de très faible intensité construite par le service des sources d'ions du LPSC. Ce dispositif est destiné à mesurer la trace et l'énergie libérée par un noyau de recul de quelque keV dans l'Hélium gazeux.



Vue d'ensemble de la chambre MIMAC couplée avec le dernier cube de la source d'ions.

En 2006 et 2007, le service est intervenu à plusieurs niveaux dans la phase d'étalonnage de la source d'ions :

- Montage et étalonnage d'une mesure de temps de vol utilisant des Channeltron (photo 4) pour mesurer l'énergie des ions de la source.
- Fourniture d'un nouveau système d'acquisition sur PC.
- Développement d'une interface LabVIEW pour le pilotage des hautes tensions de la chambre.
- Montage et métallisation (Aluminium) de nouvelles membranes en Nitrure de Silicium (épaisseur 50 nm) servant d'interfaces entre la source d'ions (sous vide) et la TPC (hélium à la pression atmosphérique) (photo 4).

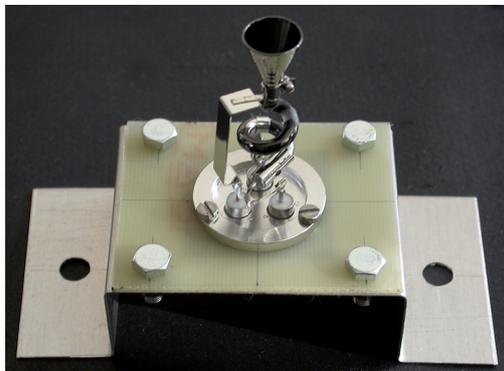


Photo 4: Vue d'un Channeltron sur son support.

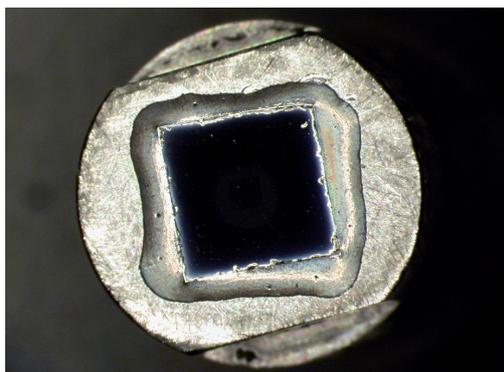


Photo 5: Vue d'une membrane de Nitrure de Silicium (50 nm d'épaisseur) métallisée sur son support.

nEDM

La phase d'amélioration du spectromètre nEDM OILL a débuté en 2006 par un gros travail de « reverse engineering » sur la mécanique du spectromètre. Les plans mécaniques sont utilisés par l'ensemble des collaborateurs de nEDM, leur permettant d'affiner leur simulation en vue de la conception d'un nouvel appareillage (nEDM II, Phase A et B).

Le SDI est en charge de coordonner les activités de maintenance et d'améliorations relatives à l'installation OILL.

Le système mécanique de cartographie du champ B a été réalisé et est en attente des sondes magnétiques.

Une bonne partie des sous-systèmes OILL sont en cours d'amélioration : la haute tension et le système de chauffage du mercure sont en développement chez des sous-traitants. Le dispositif de contrôle et de commande subit une refonte importante avec un remplacement complet de l'électronique existante par un module unique développé par le service électronique du LPSC. Le SDI a pris en charge l'adaptation de l'ancienne application développée sous LabVIEW, dans l'attente d'une nouvelle application en cours de réalisation par le service informatique.

Les perspectives pour 2008 de la phase 1-OILL sont le déménagement du blindage et des sous-systèmes (HT, électronique, PC acquisition et contrôle-commandes) du spectromètre OILL à l'Institut Paul Scherrer (Suisse). Les aspects techniques et logistiques de cette activité seront coordonnés et assurés par le SDI.

PEREN

Évolution du volet Chimie du projet PEREN

Durant l'année 2006 une série de tests ont permis de mettre au point le protocole de fabrication de cylindres massifs de LiF à partir de poudres. La fabrication consiste en une fusion suivie d'un refroidissement lent (une semaine) sous gradient thermique pour obtenir une structure de solidification correcte.



Demi cylindre de LiF.

Les blocs de ^7LiF destinés aux mesures de neutroniques du projet PEREN ont été réalisés durant le premier semestre 2007. Ils sont formés de deux massifs : un cylindre plein et un cylindre creux pour permettre l'introduction du détecteur. Le cylindre creux étant composé de deux demi cylindres pour des raisons de contraintes thermiques.

Planck - SCE

Le service continue à assurer la coordination technique des activités qui concernent l'électronique du Sorption Cooler (SCE). Les années 2006 et 2007 représentent une étape décisive sur ces activités.

En effet, durant le début du premier semestre 2006, EADS-CRISA (Madrid) a livré les trois modèles de vol du boîtier électronique SCE, deux modèles qui seront intégrés sur le satellite (FM1 et FM2) et un modèle de rechange (PFM). Le SDI a eu la responsabilité de la mise en place et de l'exécution des tests fonctionnels sur ces boîtiers, selon le plan de qualité spatial en vigueur, aux normes ESA.

Ces tests se sont déroulés au LPSC en salle blanche, jusqu'en juin 2006 (photo 1), date à laquelle les électroniques FM1 et FM2 (photo 2) ont été livrées au fabricant du satellite (Thales Alenia Space à Cannes) pour intégration. Le modèle de rechange reste au LPSC pour le moment.

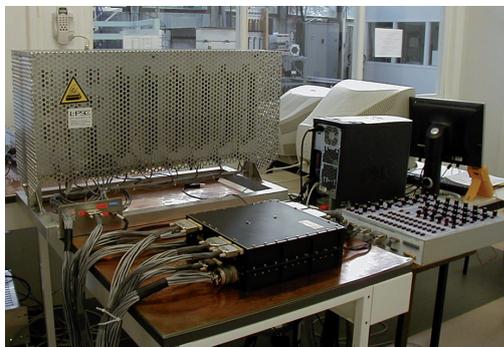


Photo 1



Photo 2

En parallèle à ces tests fonctionnels, une campagne de tests de validation cryogénique s'est déroulée au printemps 2006, mettant en œuvre les deux Sorption Coolers de vol, intégrés sur le modèle de qualification du satellite Planck, associés au boîtier SCE de qualification (CQM) testé et livré fin 2005. Ces tests se sont déroulés sur plusieurs semaines, au Centre Spatial de Liège en Belgique, et ont permis de valider une partie des aspects cryogéniques du Sorption Cooler et de son boîtier électronique de commande (photo 3).

À la fin de l'année 2006, le boîtier SCE de qualification est requalifié en boîtier avionique (AVM) pour faire partie des tests avioniques sur un modèle du satellite (photo 4). Ces tests, qui se focalisent essentiellement sur les aspects d'interface électrique du module de service du satellite se sont déroulés sur plusieurs jours, sur le site de Thales Alenia Space à Turin en Italie.

Enfin, au début de l'année 2007, de nouveaux tests avioniques ont eu lieu, mais cette fois-ci en pilotant le boîtier électronique à partir du « Mission Operating Center » de l'ESA (MOC), situé à Darmstadt en Allemagne.

Le SDI a organisé et a largement participé à l'ensemble de ces tests, tant au LPSC que sur sites.



Photo 3



Photo 4

Parallèlement à ces activités de test « hardware », le service a poursuivi les activités de tests unitaires sur le logiciel embarqué. En 2006, le code source du logiciel de vol du SCE s'est stabilisé, laissant place à de nombreux tests et à un certain nombre d'itérations d'ajustement, de correction ou de vérification. Le processus de tests unitaires s'est donc poursuivi d'une façon moins systématique.

Une première session de tests a eu lieu durant l'été et l'automne 2006 avec le concours de deux personnes en CDD que le SDI a formées et intégrées au processus de tests existants. Quatre modules évalués comme plus sensibles ont ainsi subi de nouveaux tests approfondis. Ce travail, achevé par l'équipe permanente, a permis un rapport préliminaire en mai 2007. De nouveaux ajustements se sont traduits par une dernière session de tests au printemps. La dernière livraison complète du logiciel et de ses documentations à l'ESA a ainsi eu lieu en juin 2007.

L'équipe intègre mieux à présent le processus de tests unitaires dans son cycle de développement du logiciel. Les tests unitaires du logiciel, au laboratoire, apparaissent non seulement comme un moyen d'identifier des défauts directs, mais aussi comme un levier pour améliorer la documentation du code, et par là, sa robustesse (facilité et rapidité d'identification des opérations programmées, intentionnellement ou non).

À ce stade, il apparaît clairement que l'effort de test unitaire pouvant être mené par le laboratoire, tant en volume qu'en technicité, n'est plus déterminant pour améliorer efficacement la qualité du programme. Mais si les campagnes de tests systématiques ne se justifient plus, le test des modifications (non régression) ou l'étude de points particuliers du code demeure et demeurera incontournable jusqu'à la fin de la vie du projet.

UCN

Dans le cadre d'une collaboration entre le groupe UCN du LPSC et l'Institut Paul Scherrer (Suisse), le SDI a valorisé son expérience passée dans le domaine de la cryogénie pour prendre en main le problème épineux de la conception et de la réalisation d'une sonde cryogénique de niveau de deutérium liquide, devant résister mécaniquement à la solidification du produit. La solution proposée est une sonde capacitive constituée de deux tubes concentriques ajustés de façon extrêmement précise. Cette solution très fiable n'existe pas sur le marché. Ces sondes seront reliées électriquement à un petit oscillateur électronique, dont le signal de sortie présente une fréquence proportionnelle au niveau du liquide. Des essais dans la glace ont montré que la solidification du liquide dans lequel est trempée la sonde ne la détériore pas et ne modifie pas ses caractéristiques. Quatre sondes ont ainsi été réalisées en 2007.

