

# Actualités

Décembre 2015

## Retour sur l'Année 2015 : Les articles diffusés sur le site extranet du LAL

### **Janvier :**

- Contrôle-commande du vide pour le futur détecteur Advanced Virgo p 2

### **Mars :**

- Giulia Manca, lauréate du dernier appel à projet ERC « Consolidator Grant »  
pour son projet EXPLORINGMATTER (expérience LHCb) qui sera réalisé au LAL p 3

### **Avril :**

- Le Higgs Boson Machine Learning Challenge»: une compétition à succès et la  
promesse de collaborations fructueuses entre physiciens et informaticiens p 4

### **Mai :**

- La plate-forme LEETECH p 6  
- L'interféromètre « PAON » p 9

### **Juin :**

- Nouvelles récentes de l'ILC p 10

### **Juillet :**

- Visite d'une délégation française en Ukraine p 13  
- CABAC et ASPIC : 2 ASICs pour piloter la caméra CCD de l'expérience LSST p 15

### **Septembre :**

- Visite d'un groupe « d'Instagramers » au LAL p 20  
- Premiers électrons de PHIL produits grâce à Laserix p 21

### **Décembre :**

- L'appareil de mesure du flux de protons Cherenkov (CpFM) d'UA9 p 24  
- Prix Jean-Louis Laclare 2015 pour Walid Kaabi, ingénieur de recherche au LAL p 29



Janvier :

## Contrôle-commande du vide pour le futur détecteur Advanced Virgo

Pour la construction d'Advanced Virgo, une des responsabilités du LAL est la jouvence du contrôle-commande du vide et la réalisation des baies pilotant les nouveaux appareillages associés. Cette activité implique la réalisation d'une trentaine de baies électrotechniques de types différents associées aux volumes à contrôler : tours sous UHV (« Ultra High Vacuum », ultravide) contenant les miroirs, banc suspendus sous vide, tube dans lequel se propage le faisceau laser (2 × 3 km de long)...

Par rapport à la configuration utilisée dans Virgo, il a été décidé d'ajouter des trappes cryogéniques entre les tours des bras et les tubes kilométriques. En effet, à cause de la grande quantité de matière susceptible de dégazer à l'intérieur des tours (miroir et système de suspension), il est nécessaire d'avoir une capacité de pompage élevée sans introduire de vibrations qui nuiraient à la sensibilité de l'instrument. Une solution est de refroidir une partie du tube à vide à la température de l'azote liquide, formant ainsi un piège pour les molécules qui viennent littéralement se coller sur sa surface. Si le groupe de Nikhef est responsable de la réalisation mécanique de ces trappes et de la circulation d'azote liquide (en collaboration avec le groupe de Gênes), elles doivent être intégrées dans un ensemble plus large comprenant différentes pompes (primaire, turbo-moléculaire ou puits de titane), des jauges de pression, des analyseurs de gaz et des vannes. Au total, pour chaque cryotrappe, une vingtaine d'organes sont commandés et surveillés. En outre, de nombreuses protections hardware et software doivent être implémentées afin d'assurer en permanence la sécurité des personnes et du matériel.

Après une phase de conception entièrement réalisée au laboratoire, une première baie prototype a été construite en 2013 et validée sur un banc de test fourni par le groupe Vide de EGO (« European Gravitational Observatory », la structure qui gère le site de Virgo à Cascina). Cette étape a aussi permis la validation de l'automate Beckhoff qui gère l'ensemble de la baie et de son software associé – lequel permet un pilotage en local via un écran tactile et en mode distant via un client graphique qui tourne sous Linux et Windows en utilisant le framework TANGO.

Suite à cette validation, l'équipe du LAL a réalisé en interne (seules les enveloppes ont été fabriquées par un industriel) les quatre baies nécessaires au contrôle des quatre cryotrappes qui ont ensuite été livrées à Cascina en février 2014. En mai, la baie contrôlant la cryotrappe à l'extrémité du bras Ouest a été installée par l'équipe du LAL, mais les retards dans la mise en place de la cryotrappe elle-même n'ont pas permis de réaliser à ce moment des tests de la baie aussi complets que nous le souhaitions. Depuis, il a été possible de faire la mise sous vide de la trappe cryogénique et de suivre depuis Orsay l'évolution du système, lequel donne entière satisfaction. En novembre, la trappe a été chauffée à 50 degrés Celsius afin d'évacuer la vapeur d'eau et une descente en température jusqu'à 77 K (-196 degrés Celsius) a été réalisée avec succès courant décembre.

La semaine du 24 novembre, la seconde baie a été mise en route avec succès à l'extrémité du bras Nord, clôturant ainsi l'activité pour 2014. Il faudra attendre février 2015 pour installer le contrôle pour l'entrée du bras Nord, puis le printemps pour celui du bras Ouest. En parallèle, la réalisation des baies pour le pilotage du vide dans 10 tours HV et UHV a débuté et devrait se poursuivre par une installation sur le site courant 2015 – les trois premières baies de ce type devant être livrées au printemps.



*Figure 1 : Vue de la cryotrappe à l'extrémité Ouest de Virgo, empaquetée dans son isolant, et de la baie produite par le LAL permettant son contrôle.*

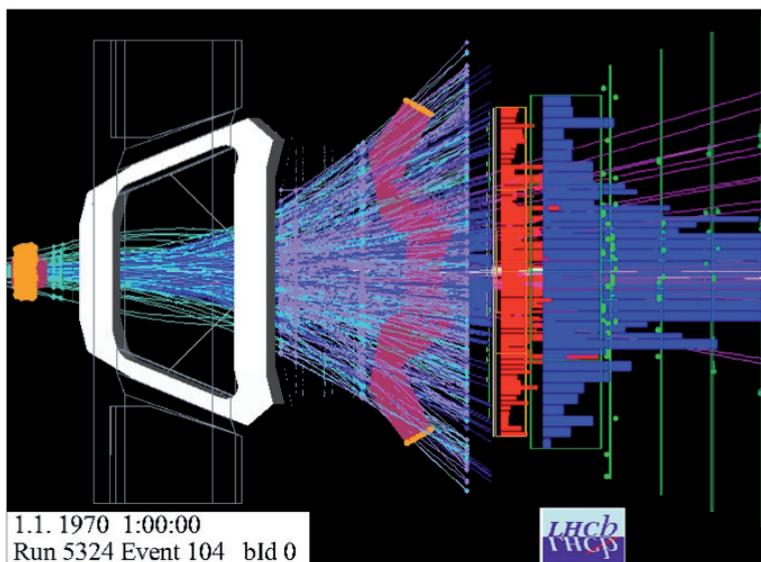
L'équipe Contrôle-Commande Vide du LAL pour Advanced Virgo : P. Cornebise, M. Gaspard et E. Jules, avec le support de F. Campos pour le câblage des baies « cryogéniques ».

## Mars :

### Giulia Manca, lauréate du dernier appel à projet ERC « Consolidator Grant » pour son projet EXPLORINGMATTER (expérience LHCb) qui sera réalisé au LAL

Le présent appel à projet « consolidator grant » de l'ERC finance des chercheurs ayant obtenu leur doctorat depuis au moins sept ans et moins de 12 ans au 1er janvier 2014. Les bourses récompensent des projets de recherche exploratoire, sélectionnés en premier lieu sur le critère de l'excellence scientifique.

Le projet EXPLORINGMATTER, porté par Giulia Manca, physicienne dans l'expérience LHCb, a pour sujet l'étude de collisions d'ions lourds avec l'expérience LHCb au CERN. Les collisions de noyaux ultra-relativistes sont un moyen d'atteindre d'énormes densités d'énergie et ainsi de former un nouvel état de la matière appelé plasma de quarks et de gluons (PQG), dans lequel les quarks et les gluons se déplacent librement. Un certain nombre d'expériences ont déjà étudié la formation éventuelle de PQG mais le comportement des particules lourdes (contenant des quarks charmés ou beaux) qui traversent ce milieu est encore largement inconnu. Son étude est un des moyens les plus puissants pour prouver l'apparition du PQG puis le caractériser. Giulia Manca : « Pendant le projet EXPLORINGMATTER, nous allons effectuer de nouvelles mesures dans le secteur de la physique du charme et de la beauté, en utilisant le détecteur LHCb au CERN. Ce dernier couvre une région cinématique unique et permet d'obtenir des mesures très précises. En plus des collisions habituelles proton-proton et proton-plomb que LHCb étudie déjà, nous allons étudier avec EXPLORINGMATTER les collisions de protons ou d'ions de plomb avec du gaz injecté dans le détecteur et formant une cible fixe. Cette nouvelle configuration n'a jamais été étudiée auparavant et sera unique au LHC. Ces conditions ressembleront à celles des expériences sur cible fixe telle que NA50, mais avec une énergie dans le centre de masse encore jamais atteinte. »



*Collision simulée entre un ion plomb et un atome d'Argon dans le détecteur LHCb. Le projet EXPLORINGMATTER va notamment étudier ce type d'événement.*

La durée du projet EXPLORINGMATTER sera de cinq ans, pour un budget total d'environ 1,9 millions d'euros, lequel permettra, en plus d'accueillir au LAL la responsable du projet, de recruter trois post-docs et de financer une thèse de doctorat. Pour Giulia Manca, le LAL est l'endroit idéal pour entreprendre ce projet puisque le groupe LHCb du LAL compte quelques-uns des plus grands experts des mesures proposées. En outre, l'emplacement central du LAL sur le campus d'Orsay de l'Université Paris-Sud permettra une collaboration fructueuse avec d'autres physiciens de l'IPNO, du CEA Saclay ou du LLR, spécialistes de la physique des ions lourds et dont l'aide sera cruciale pour le succès du projet.



*Giulia Manca, responsable du projet ERC EXPLORINGMATTER, photographiée ici au CERN devant l'ancienne chambre à bulles BEBC.*

Avril :

## Le « Higgs Boson Machine Learning Challenge » : une compétition à succès et la promesse de collaborations fructueuses entre physiciens et informaticiens

L'apprentissage automatique (« Machine Learning » en anglais) est une discipline à la croisée de l'informatique et de l'intelligence artificielle qui a pour objet la conception de systèmes capables « d'apprendre » à partir d'un ensemble de données d'entraînement puis de prendre des décisions sans recourir à des algorithmes explicites. Cette discipline est presque aussi ancienne que l'informatique, mais elle a connu une explosion depuis une dizaine d'années avec l'apparition de grands ensembles de données (le « Big Data »), d'une demande pour leur analyse (les publicités ciblées par exemple) et de ressources informatiques suffisantes pour les exploiter.

En physique des hautes énergies, les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés marginalement dès les années 1990, notamment au LEP. Les arbres de décision boostés ont beaucoup été utilisés au Tevatron par les expériences  $D\bar{0}$  et CDF dans les années 2000, puis au LHC ces dernières années. Cependant, les progrès dans les algorithmes de Machine Learning sont très rapides et les techniques utilisées actuellement en physique des hautes énergies sont obsolètes.

Pour combler ce retard, un concours (le « Higgs Machine Learning Challenge », <https://higgsml.lal.in2p3.fr>) a donc été conçu en 2014 par une équipe interdisciplinaire de physiciens d'ATLAS et d'informaticiens spécialistes du Machine Learning : Claire Adam-Bourdarios et David Rousseau physiciens ATLAS au LAL (Université Paris Sud et CNRS/IN2P3), Balazs Kegl informaticien au LAL, Cécile Germain informaticienne au LRI (Université Paris Sud, CNRS et INRIA), Glen Cowan, physicien ATLAS au Royal University College et Isabelle Guyon informaticienne à ChaLearn. Le but était de créer puis de favoriser les échanges entre spécialistes du « Machine Learning » et les physiciens, ainsi que de tester les algorithmes de « Machine Learning » les plus récents sur un problème de physique simplifié. Le choix s'est porté sur l'optimisation de la recherche de la désintégration du boson de Higgs en paires  $\tau^+\tau^-$ , un canal difficile, mais important car sa découverte apporterait la preuve que le champ de Higgs est bien responsable de la masse des particules élémentaires de matière (les fermions).

Pour la première fois, l'expérience ATLAS au CERN a rendu publique une partie de ses données de simulation utilisées en interne par les physiciens pour optimiser leurs analyses. Le Challenge a été hébergé par la société Kaggle de mi-mai à septembre 2014. Aucune connaissance en physique des particules n'était nécessaire pour y participer. Il était doté de trois prix de plusieurs milliers de dollars chacun ; en outre, les auteurs des méthodes d'analyse les plus intéressantes étaient invités au CERN.

En pratique, comment s'est déroulé le concours ? Les participants devaient télécharger sur le site internet du Challenge un échantillon d'entraînement de 250 000 événements (30 variables par événement), chacun étiqueté « signal » ou « bruit de fond ». Ils mettaient ensuite au point un algorithme de séparation signal/bruit de fond, basé sur des techniques comme les « réseau de neurone », les « arbres de décision boostés », etc. La qualité de leur algorithme était quantifiée par un score, une estimation de la signification statistique de l'analyse— et donc de sa performance. Puis ils téléchargeaient un échantillon de test de 550 000 événements où les étiquettes « signal » ou « bruit de fond » étaient masquées, y appliquaient leur algorithme et soumettaient la solution sur le site, lequel calculait en ligne leur score et mettait à jour le tableau des classements. Un forum permettait les échanges entre participants et avec les organisateurs du Challenge.

Le succès du Challenge a dépassé toutes les attentes : 1 788 équipes ont participé, un record sur la plate-forme Kaggle. Ils s'agissaient aussi bien de physiciens que de spécialistes de « Machine Learning », ou d'étudiants. Les équipes ont soumis 35 772 solutions au total et le forum a été très actif avec 1 100 messages postés. Le gagnant, Gabor Melis est un programmeur de langage Lisp hongrois ; le second, Tim Salimans est un consultant en sciences de données néerlandais ; le troisième, Pierre Courtiol est un

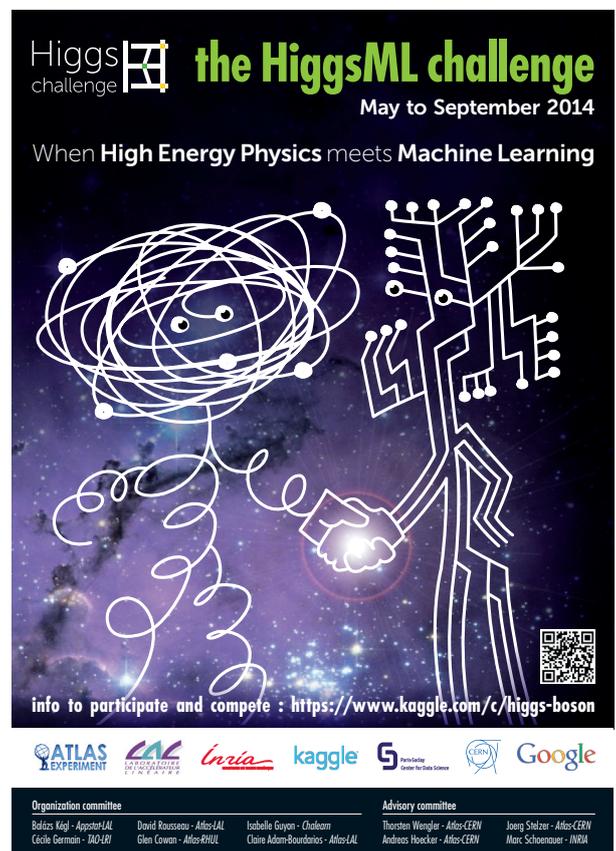


Figure 1 : Poster annonçant le « Challenge ».

Français. Un prix spécial « HEP meets ML » a été attribué à une équipe de deux jeunes Chinois, Tianqi Chen et Tong He, doctorants en sciences des données à Seattle et à Vancouver. Sans avoir un des meilleurs scores, ils ont développé un logiciel (XGBoost, <https://github.com/tqchen/xgboost>) à la fois très performant et simple d'utilisation et l'ont rendu public très rapidement. Tous ces lauréats bénéficient d'une invitation au CERN tous frais payés.

#	Δ1w	Team Name <small>‡ model uploaded * in the money</small>	Score <small>👤</small>	Entries	Last Submission UTC (Best - Last Submission)
1	↑4	Gábor Melis ‡ *	3.80581	110	Sun, 14 Sep 2014 09:10:04 (-0h)
2	↓1	Tim Salimans ‡ *	3.78913	57	Mon, 15 Sep 2014 23:49:02 (-40.6d)
3	—	nhlx5haze ‡ *	3.78682	254	Mon, 15 Sep 2014 16:50:01 (-76.3d)
4	↑55	ChoKo Team 🇰🇷	3.77526	216	Mon, 15 Sep 2014 15:21:36 (-42.1h)
5	↑23	cheng chen	3.77384	21	Mon, 15 Sep 2014 23:29:29 (-0h)
6	↓2	quantify	3.77086	8	Mon, 15 Sep 2014 16:12:48 (-7.3h)
7	↑73	Stanislav Semenov & Co (HSE Yandex)	3.76211	68	Mon, 15 Sep 2014 20:19:03
8	↓1	Luboš Motl's team 🇸🇰	3.76050	589	Mon, 15 Sep 2014 08:38:49 (-1.6h)
9	↓1	Roberto-UCIIM	3.75864	292	Mon, 15 Sep 2014 23:44:42 (-44d)
10	↑5	Davut & Josef 🇹🇷	3.75838	161	Mon, 15 Sep 2014 23:24:32 (-4.5d)

**Figure 2 : Classement final des premiers participants au Challenge.**

Chaque soumission est évaluée par sa signification statistique. Pour référence, le logiciel TMVA communément utilisé en physique des particules a obtenu un score de 3.2. Le gagnant a lui atteint un score de 3.8, ce qui signifie que son algorithme peut atteindre la sensibilité de TMVA en utilisant 30 % de données en moins. Pour obtenir ce résultat, il a utilisé des réseaux profonds de neurones tandis que le deuxième du concours a utilisé des arbres de décision boostés. Les éléments clés qui ont fait la différence ont été l'optimisation des paramètres de ces algorithmes et le contrôle du surentraînement — pour éviter que l'algorithme ne soit trop spécialisé sur les données d'entraînement. Le portage de ces techniques à la physique des hautes énergies est en cours. Il permettra certainement des progrès dans beaucoup d'analyses où une séparation signal-bruit de fond doit être construite en combinant un nombre de variables important. Mais le processus prendra du temps, car il ne s'agit pas de logiciels presse-bouton mais de tout un savoir-faire qu'il faut acquérir.

Un atelier satellite de la conférence NIPS 2014 à Montréal (une conférence importante de « Machine Learning ») a été organisé sur le Challenge : ses compte rendus sont en cours de rédaction. L'échantillon de données du Challenge vient d'être publié sur le « CERN Open Data Portal » (<http://opendata.cern.ch/collection/ATLAS-Higgs-Challenge-2014>) et peut donc être utilisé par quiconque souhaite relever le défi. Le 19 mai 2015 à 15h, aura lieu au CERN un atelier spécial webcasté (<http://cern.ch/higgsml-visit>), avec des interventions des organisateurs du Challenge et de ses lauréats : Tianqi Chen, Tong He et Gabor Melis. Au-delà du problème spécifique posé pour le Challenge, cette compétition a permis de concrétiser des rencontres entre physiciens et informaticiens, deux communautés scientifiques qui souvent s'ignoraient, alors que les premiers ont des problèmes intéressants pour les seconds. L'enjeu est maintenant que ces rencontres perdurent et se traduisent par des progrès concrets. À ce propos, la liste de diffusion [HEP-data-science@googlegroups.com](mailto:HEP-data-science@googlegroups.com) vient d'être créée. Au carrefour entre science des données et physique des hautes énergies, elle permettra de diffuser de nombreuses informations : annonces d'ateliers, discussions thématiques, futurs challenges, articles publiés, outils d'analyse, etc. Cette liste est ouverte à tous sur simple souscription — en envoyant un courriel à [HEP-data-science+subscribe@googlegroups.com](mailto:HEP-data-science+subscribe@googlegroups.com).

**Mai :**

## La plate-forme LEETECH

Les premiers électrons sortant du spectromètre LEETECH ont été détectés fin octobre 2014. LEETECH (Low Energy Electrons TECHnique) est une plate-forme de R&D détecteurs polyvalente qui utilise le faisceau d'électrons de basse énergie du photoinjecteur PHIL.

Le but de cette plate-forme est de fournir à ses utilisateurs des paquets d'électrons dont l'énergie (dans tous les cas inférieure à l'énergie du faisceau de PHIL, au plus quelques MeV) et l'intensité sont ajustables. LEETECH servira de banc de test pour :

- des détecteurs gazeux, par exemple pour des tests de performance de la technologie Micromegas/InGrid et pour l'optimisation de la couche de protection du chip TIMEPIX. Il s'agit d'une activité de R&D générique intégrée dans le programme RD51 mené par le CERN avec des perspectives d'applications pour l'ILC (avec une TPC à lecture Micromegas/InGrid), pour la TPC de CLIC, pour le télescope à axions CAST, etc.
- des études de propriétés des cristaux utilisés par l'expérience UA9 et les tests des technologies associées.
- des activités de R&D pour des détecteurs basés sur le concept du « Forward Time-Of-Flight » (FTOF) envisagé pour SuperB. Ce type d'instrument, basé sur la mesure du temps de vol des particules, peut être utilisé pour l'identification des particules chargées ou le suivi du niveau de bruit de fond dans un détecteur.
- des mesures des propriétés de scintillateurs, par exemple pour SuperNEMO.
- des tests de capteurs diamant utilisés pour mesurer le profil d'un faisceau ou reconstruire des traces chargées.
- des tests d'éléments en silicium pour le calorimètre de l'ILC.

De plus, l'utilisation de la technologie InGrid/TIMEPIX pour mesurer les caractéristiques des électrons fournira de nouvelles mesures de précision des pertes d'énergie d'électrons peu relativistes. La plate-forme servira également pour des travaux pratiques d'étudiants en Master.

Le dispositif LEETECH est basé sur la réduction de l'énergie et de l'intensité des électrons de PHIL au moyen d'un bouchon d'aluminium. La direction des électrons après le bouchon est sélectionnée par un jeu de collimateurs situés en amont d'un dipôle fourni par le CERN. Les électrons font un demi-tour dans le champ magnétique du dipôle, et l'énergie du paquet en sortie est donnée par la valeur du champ. L'intensité et la dispersion en énergie du paquet d'électrons sont ajustées en utilisant les collimateurs positionnés à la sortie du dipôle et devant un détecteur test. Les électrons de LEETECH possèdent des énergies faibles et donc un vide primaire est nécessaire pour ne pas dégrader les performances de la sélection en énergie par champ magnétique.

LEETECH est un projet commun entre le LAL, le CERN, l'université de Kiev et l'IRFU. Il a été financé par le LAL et l'appel à projet « TP » du labex P2IO. Le dipôle du spectromètre a été fabriqué au CERN et fournit un champ magnétique homogène entre 200 et 2 000 gauss. Le champ de dipôle mesuré est en accord avec les résultats de simulation préalable, avec et sans écran de protection contre le champ de dispersion (*Fig. 1*).

La chambre à vide est connectée avec le système de pompage et les trois enceintes contenant les collimateurs (*Fig. 2*). La collimation dans les directions verticale et horizontale est assurée par les différents jeux de

collimateurs. Les trois enceintes correspondent à la ligne d'entrée et aux deux lignes de sortie du dispositif – une prévue pour les essais détecteurs et l'autre pour les travaux pratiques des étudiants. Le blindage à l'intérieur de la chambre à vide a été optimisé grâce à une simulation Geant4. Le vide primaire fourni par le système du pompage est inférieur à  $10^{-4}$  bar.

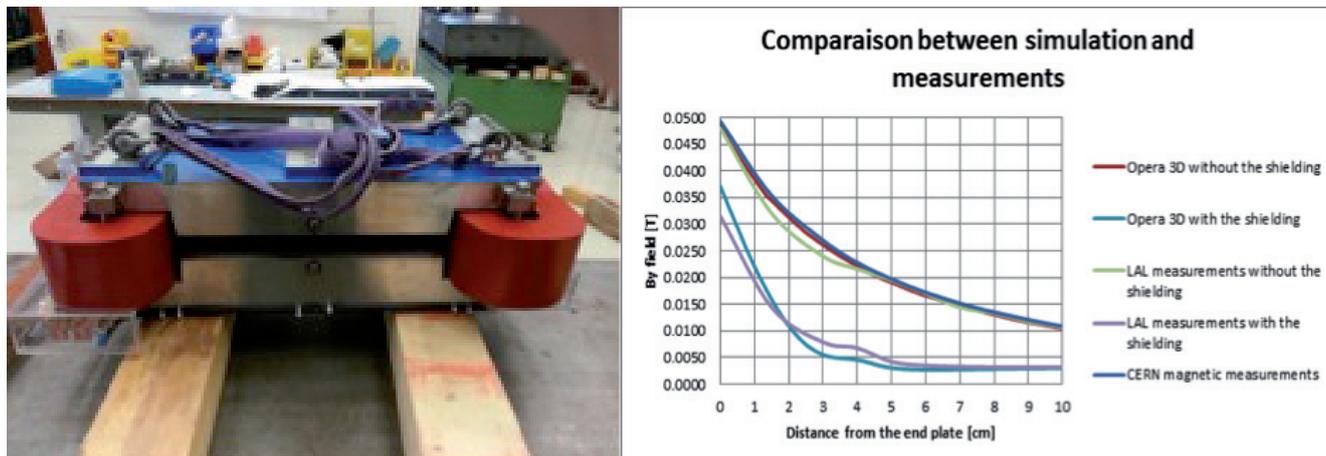


Figure 1 : À gauche, le dipôle du CERN avant son transport au LAL ; à droite, comparaison entre les profils de champ magnétique mesurés et simulés – avec et sans écran de protection.

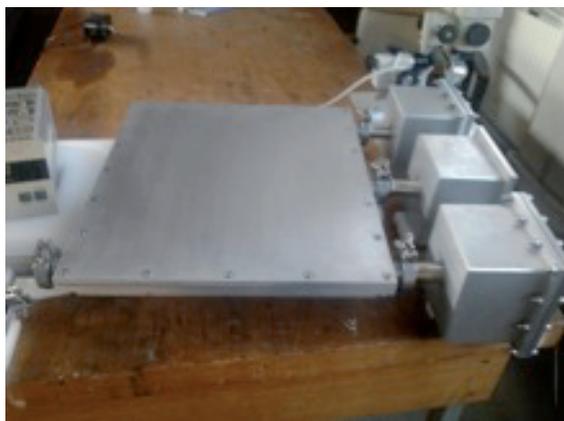


Figure 2 : Chambre à vide et enceintes pour les collimateurs (Université de Kiev).

Afin de maintenir en permanence la plate-forme en position opérationnelle, une extension du faisceau PHIL a été construite (Fig. 3). Les électrons de PHIL sont transférés sur plus de 2 mètres dans un vide de haute qualité jusqu'à l'entrée de LEETECH. Ce transport de particules s'effectue actuellement sans système de focalisation dédié.

La construction de la plate-forme LEETECH sur le photo-injecteur PHIL a commencé en 2013, avec un assemblage des différents éléments en 2014, et les premiers faisceaux en sortie de LEETECH ont été détectés en octobre 2014.

La performance de la plate-forme est étudiée grâce à un détecteur composé d'un scintillateur couplé avec un MCP-PMT. Les caractéristiques des faisceaux



Figure 3 : Prolongement du faisceau PHIL vers LEETECH (LAL).

de PHIL utilisés pour les études du fonctionnement du LEETECH sont les suivantes : énergie des électrons de 3,7 MeV et charge jusqu'à quelques centaines de pC.

L'intensité des paquets fournis par LEETECH est ajustée en faisant varier l'ouverture des collimateurs (Fig. 4). De plus, les ouvertures des collimateurs horizontaux en entrée et en sortie de LEETECH contrôlent le RMS de l'énergie des paquets fournis.

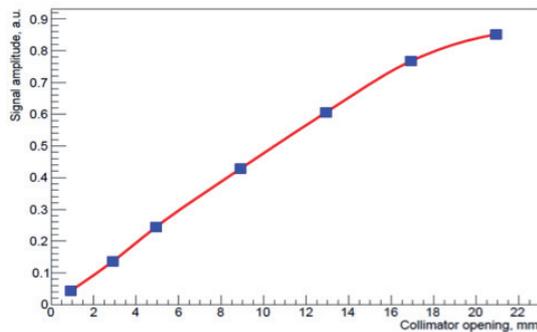


Figure 4 : Contrôle de l'intensité du signal avec les collimateurs à la sortie du LEETECH.

Des paquets d'électrons de basse énergie peuvent être obtenus en utilisant des atténuateurs de faisceau de différentes épaisseurs. La Fig. 5 compare les spectres simulé et mesuré (avec les premières données de LEETECH) des électrons en sortie de l'atténuateur en fonction de l'épaisseur de ce dernier.

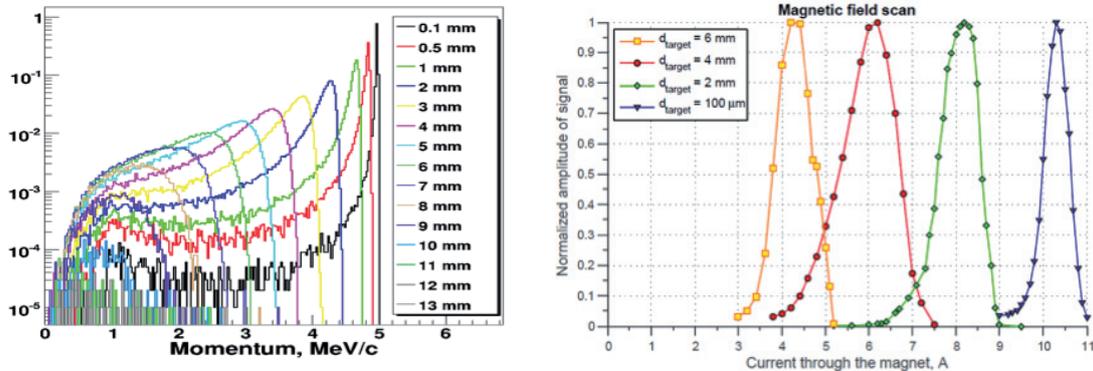


Figure 5 : À gauche, spectres simulés (Geant4) des électrons en sortie de l'atténuateur de faisceau en fonction de l'épaisseur de ce dernier. À droite, premières données montrant l'amplitude normalisée du signal en sortie de LEETECH en fonction du courant dans l'aimant (en ampères) et pour différentes épaisseurs de l'atténuateur. Pour obtenir une énergie du paquet donnée, il faut optimiser l'épaisseur de l'atténuateur et la choisir d'autant plus grande qu'on veut une énergie des électrons faible.

La plate-forme LEETECH devrait pouvoir être utilisée pour tester des détecteurs à partir de l'été 2015.

## L'interféromètre « PAON4 »

Les questions concernant la nature et les propriétés de la matière noire et de l'énergie noire (cette composante mystérieuse responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers), se trouvent au coeur de la Cosmologie et de la Physique aujourd'hui.

L'étude des propriétés statistiques de la distribution de la matière dans l'Univers et des oscillations acoustiques baryoniques (BAO) permet de reconstituer l'histoire de l'expansion et de contraindre ainsi l'équation d'état de l'énergie noire.

Les grandes structures de matière, habituellement observées dans le domaine optique, peuvent également être cartographiées à travers l'émission radio de l'hydrogène atomique à 21 cm (raie HI). Depuis 2007, le LAL (CNRS/IN2P3), l'IRFU (CEA) et plusieurs laboratoires de l'Observatoire de Paris, le GEPI, le LESIA et l'USN, collaborent au sein du projet BAORadio pour développer les méthodes et techniques nécessaires pour les relevés cosmologiques de la raie HI.

L'interféromètre PAON (PARaboles à l'Observatoire de Nançay) est un des volets de ce projet qui a pour objectif d'évaluer la viabilité d'un interféromètre utilisant de petites paraboles d'environ ~5 mètres de diamètre. L'instrument envisagé pour les relevés cosmologiques pourrait en effet être un réseau dense, composé de quelques centaines d'antennes de ce type, réparties sur une surface d'un hectare.

Le projet PAON a débuté par une version à deux paraboles de 3 mètres de diamètre (PAON2). Ce petit interféromètre a fonctionné pendant quatre mois à partir de la fin septembre 2012 et a permis de qualifier le site et d'étudier le bruit des antennes par le biais d'observations de radiosources telles que Cygnus A.

A la mi-2013, le budget imparti étant insuffisant pour commander des paraboles de 5 mètres, la collaboration a pris la décision de concevoir quatre nouvelles paraboles qui constituent la version actuelle de l'instrument « PAON4 ». Le financement a été assuré en grande partie par le LAL et l'Observatoire de Paris ; la mécanique est de la responsabilité du GEPI, l'électronique frontale a été mise au point par l'IRFU tandis que le LAL (SERDI) a eu en charge la partie digitale et l'acquisition.

L'installation sur le site de Nançay s'est terminée en novembre 2014 pour la partie mécanique, et l'instrument est en phase de test depuis janvier 2015. Plusieurs transits de Cygnus A, Cassiopée A, et du Crabe ont été observés durant les mois de mars et avril. L'inauguration officielle de l'installation a eu lieu le 2 avril 2015. A terme, PAON-4 a vocation à être utilisé pour des Travaux Pratiques et des mini-projets pour des étudiants de niveau master en astrophysique.



*Les quatre paraboles installées à Nançay avec trois personnes du LAL impliquées dans leur réalisation.*



*La photo de la collaboration lors de l'inauguration officielle à Nançay le 2 avril 2015.*

Juin :

## Nouvelles récentes de l'ILC

Après une période dominée par la physique (avec la découverte du boson de Higgs au LHC en 2012) et par les aspects techniques du projet (notamment la publication des « Technical Design Reports » de l'accélérateur et des détecteurs associés en 2013), l'ILC est maintenant entré dans une phase plus politique qui doit se conclure par une décision du Japon de s'engager (ou non) sur la construction de cette machine. Le LAL est partie prenante de ce processus de décision, comme le démontrent la visite de la société NOMURA à Orsay mi-janvier et l'organisation du premier « Project Advisory Committee » (PAC) de l'ILC au mois d'avril. Sur le plan international, le début de l'année 2015 a également été marqué par un événement spécial organisé à Tokyo en avril.

Le gouvernement du Japon travaille actuellement sur la possibilité d'accueillir l'ILC sur son territoire. Ainsi, le Ministère MEXT, chargé de l'Education, de la Science et du Sport, mène une étude pour mesurer l'impact que ce projet aurait sur le pays à tous les niveaux. En parallèle à ces discussions internes, des délégations japonaises rendent visite à leurs partenaires internationaux impliqués dans l'ILC pour vérifier l'intérêt des différentes régions pour ce projet. Ainsi, le gouvernement japonais a mandaté la société NOMURA – un cabinet de conseil phare au Japon – pour :

- quantifier l'intérêt scientifique de l'ILC, dans le paysage global de la physique des particules et pour les décennies à venir ;
- tester la motivation des partenaires du Japon et leur capacité à soutenir le projet si le pays décidait d'accueillir l'ILC ;
- évaluer le potentiel des technologies accélérateur développées autour de l'ILC pour déboucher sur des applications dans d'autres disciplines scientifiques ainsi qu'aux niveaux économique et sociétal.

En France, NOMURA a choisi de rencontrer le LAL et le CEA/IRFU, deux grands laboratoires européens engagés dans la réalisation d'accélérateurs de pointe et qui jouent des rôles moteurs dans les grandes collaborations de physique des particules. Une délégation japonaise a ainsi visité le LAL dans la matinée du 15 janvier dernier (*figure 1*). La réunion s'est déroulée dans une atmosphère amicale et productive qui a permis de mettre en avant la capacité du LAL à s'engager dans les grands projets et à y avoir un impact significatif. Cet atout est souligné dans le rapport publié par NOMURA mi-avril – et qui n'est pour l'instant disponible qu'en japonais. Ce rapport étudie les retombées économiques de l'ILC pour le Japon et détaille la position actuelle des partenaires potentiels pour ce projet. Il fait partie de l'audit global de l'ILC demandé par le MEXT. Le

rapport de cet audit sera présenté au MEXT au plus tard en mars 2016. Ce rapport aura un poids très important dans la décision finale du gouvernement japonais au sujet du projet ILC.

Le « Project Advisory Committee » (PAC) de l'ILC rassemble une vingtaine d'experts internationaux chargés d'accompagner le développement de l'ILC en portant un œil à la fois bienveillant et critique sur l'ILC. Ce comité est

*Figure 1 : La délégation de la société NOMURA et leurs interlocuteurs français (notamment du LAL, mais aussi de l'IPNO et du CEA/IRFU).*



présidé par Norbert Holtkamp du laboratoire SLAC (Californie) et son vice-président est Michel Davier du LAL. La première réunion de ce comité nouvellement formé a d'ailleurs eu lieu au laboratoire du 13 au 15 avril 2015 (figure 2).



Figure 2 : Photo du Project Advisory Committee de l'ILC présidé par Norbert Holtkamp (au premier rang, le quatrième en partant de la droite) et Michel Davier (à sa gauche).

Les conclusions du PAC peuvent être résumées de la façon suivante. L'ILC est un projet mature dont le potentiel scientifique est exceptionnel. Mais le manque d'investissements au niveau R&D est susceptible de mettre en danger l'ensemble du projet. Un signal clair du Japon en faveur de l'ILC aiderait beaucoup à franchir les prochaines étapes. Cette demande forte de la collaboration ILC est à mettre en perspective avec les débats en cours actuellement au Japon : le pays prend son temps – mais la cause de l'ILC progresse, d'après les représentants japonais au PAC.

Au mois d'avril, le laboratoire KEK a également accueilli l'atelier ALCW2015 destiné à la région Asie et dont le thème était les collisionneurs linéaires. À cette occasion, un symposium sur l'ILC a été organisé à l'université de Tokyo le 22 avril : il a rassemblé trois cents participants et a bénéficié d'une bonne couverture médiatique (fig. 3 et 4). Au nombre des orateurs on comptait Lyn Evans (le directeur de la collaboration



Figure 3 : vue des participants du symposium ILC à l'Université de Tokyo.



Figure 4 : Table ronde lors de ce symposium. De droite à gauche Hitoshi Murayama, Joachim Mnich, Lyn Evans, Hiroake Aihara.

« collisionneur linéaire »), Ryu Shionoya (un parlementaire japonais) et Hiroya Masuda (le président du « Japan Policy Council »). [La Déclaration de Tokyo](#) (« Tokyo Statement »), publiée le même jour, réitère l'objectif de la communauté ILC qui est d'obtenir un démarrage rapide du projet. La situation actuelle du projet ILC a été débattue lors d'une table ronde rassemblant Hitoshi Murayama (directeur adjoint de la collaboration « collisionneur linéaire » et directeur de l'Institut Kavli de Tokyo), Lyn Evans, Joachin Mnich

(directeur adjoint du laboratoire DESY à Hambourg), Jonathan Bagger (directeur du laboratoire TRIUMF en Colombie Britannique) et Hiroake Aihara (président de l'Université de Tokyo). Des points de vue différents se sont fait entendre. D'un côté, une certaine impatience des partenaires internationaux – qui attendent un signal fort du Japon –, exprimée par Lyn Evans. De l'autre, la confirmation de l'approche prudente suivie par les Japonais et réitérée par Hiroake Aihara. Ce dernier a laissé entendre que l'ILC était sur la bonne voie au Japon mais qu'il fallait respecter les craintes et les réserves de la communauté scientifique japonaise vis-à-vis d'un projet de la taille de l'ILC.

En résumé, le début de l'année 2015 a été marqué par plusieurs réunions importantes pour le futur du projet ILC. Le LAL est très impliqué dans ce processus, à plusieurs niveaux. Les prochaines échéances majeures sont le symposium LCWS15 à Whistler au Canada en novembre 2015 et bien sûr la publication du rapport demandé par le MEXT en mars 2016. En France, il y aura une réunion ILC-France fin novembre ou début décembre.

**Juillet :**

## Visite d'une délégation française en Ukraine et création du Laboratoire International Associé (LIA) « IDEATE » France-Ukraine

Une délégation française composée d'une trentaine de représentants de l'enseignement supérieur et de la recherche s'est récemment rendue à Kiev. Elle était conduite par Messieurs Vincent BERGER (conseiller du Président de la République pour l'Education, l'Enseignement Supérieur et la Recherche), Roger GENËT (directeur général pour la recherche et l'innovation du ministère de l'Education, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche) et Jean-Loup SALZMANN (président de la Conférence des Présidents d'universités françaises). L'Université Paris-Sud y était représentée par son président, M. Jacques BITTOUN, le CNRS par le directeur du LAL, M. Achille STOCCHI, et le CEA par le directeur des recherches de l'IRFU, M. Nicolas ALAMANOS.

La délégation a participé du 22 au 25 juin à un forum réunissant les représentants des établissements d'enseignement supérieur et de recherche des deux pays, organisé par le ministère de l'Education et de la Science d'Ukraine et l'Ambassade de France en Ukraine. Ses objectifs étaient de renforcer les liens académiques entre la France et l'Ukraine, d'approfondir la coopération des deux pays dans le domaine de l'enseignement supérieur et de la recherche et de développer des échanges d'expertise au moment où l'Ukraine se réforme en profondeur.

Lors du Forum, plusieurs rencontres politiques ont eu lieu, associant la Conférence des Présidents d'université française, la Conférence des écoles d'ingénieurs françaises, le Conseil des Recteurs des établissements d'enseignement supérieur d'Ukraine et l'Association des Recteurs des établissements supérieurs d'enseignement technique d'Ukraine. Plusieurs accords de coopération ont également été signés. Ils visent à renforcer les capacités d'évaluation de l'enseignement supérieur et de la recherche, à développer les doubles diplômes, les projets scientifiques conjoints, les mécanismes de soutien à la mobilité des étudiants et chercheurs ukrainiens et à généraliser les thèses franco-ukrainiennes en cotutelle.



*Photos prises lors du Forum franco-ukrainien.*

Parmi les événements en marge du forum, la délégation française a rencontré le 22 juin le gouvernement de l'Académie de Sciences d'Ukraine (NASU) à la Présidence de l'Académie. Le 23 juin, les mêmes représentants de la délégation ont visité le cyclotron de l'Institut des Recherches Nucléaires de Kyiv (NASU) et le Centre Scientifique et Technologique d'Ukraine (STCU), un organisme qui soutient les projets de recherche civile menés par des chercheurs ukrainiens qui travaillaient dans le domaine militaire au temps de l'Union Soviétique.



Sur la photo de gauche à droite : M. Sergey MYAKUSHKO, responsable de la DRI NASU ; M. Sergey BARSUK, directeur du LIA/ France ; M. Gilles MAMETZ, attaché scientifique et universitaire de l'Ambassade de France en Ukraine ; M. Achille STOCCHI, directeur du LAL ; M. Roger GENËT, directeur général pour la recherche et l'innovation du ministère de l'Éducation, de l'enseignement supérieur et de la recherche ; M. Sergey PIROZHKO, vice-président de la NASU ; M. Boris PATON, président de la NASU ; M. Vincent BERGER, conseiller du Président de la République pour l'éducation, l'enseignement supérieur et la recherche ; M. Nicolas ALAMANOS, directeur des recherches de l'IRFU ; M. Anatoli ZAGORODNY, vice-Président de la NASU ; M. Maxim TITOV, vice-directeur de LIA/France.

Lors du Forum, un accord bilatéral portant sur la création d'un Laboratoire International Associé en physique des hautes énergies, physique hadronique et physique nucléaire – intitulé « Développement d'instrumentations pour les expériences auprès des accélérateurs et les techniques accélératrices » (LIA « IDEATE ») – a également été signé par le CNRS, le CEA, l'Université Paris-Sud, l'Académie des Sciences d'Ukraine, l'Agence d'Etat pour les Recherches Fondamentales d'Ukraine, l'Université Nationale T. Chevtchenko de Kyiv et l'Université Nationale V.N. Karazin de Kharkiv. Ce nouveau laboratoire est l'extension du projet PICS porté par le LAL et l'Université Nationale Chevtchenko de Kyiv ; il réunit dix laboratoires français et sept établissements de la recherche et de l'enseignement supérieur ukrainiens.



Signature de l'accord de création du LIA « IDEATE ». De gauche à droite au premier rang : M. Jacques BITTOUN, président de l'Université Paris-Sud ; M. Achille STOCCHI, directeur du LAL ; M. Anatoli ZAGORODNY, vice-Président de la NASU ; M. Boris GRYNIOV, directeur du Fond ukrainien pour la Recherche Fondamentale ; M. Zarif NAZYROV, vice-Recteur de l'Université V.N. Karazin de Kharkiv. Au deuxième rang : Mme Olga DOROSH, responsable du CAMPUS France – Ukraine ; M. Maxim STRIHA, vice-Ministre de la Recherche et de Education.

## CABAC et ASPIC : 2 ASICs pour piloter la caméra CCD de l'expérience LSST

### Le projet LSST

Ce projet, en cours de construction sur le site de Cerro Pachón au Chili, comprend un télescope à très grand champ de 8,40 m de diamètre (*Figure 1*, à gauche), équipé d'une caméra de 3,2 milliards de pixels qui couvre un champ de 3,5°. Son objectif est de produire des images profondes de l'ensemble du ciel visible depuis le Chili (20 000 degrés-carré), au rythme d'un balayage complet tous les quatre jours environ. Chaque région du ciel sera observée au total 800 fois entre 2020 et 2030, à travers six filtres de couleurs différentes, ce qui permettra de détecter tous les objets en mouvement et les astres de luminosité variable comme les supernovæ. Mais l'objectif premier de LSST sera la production d'une carte du ciel extrêmement profonde en six couleurs (et donc six gammes de longueur d'onde différentes), obtenue par la superposition de toutes les images, indispensable aux recherches sur la matière noire et l'énergie noire qui nécessitent de mesurer les paramètres cosmologiques avec une précision de l'ordre du pourcent.

Le système optique du télescope (*Figure 1*, à droite) se compose de trois surfaces réfléchissantes, dont deux sont taillées sur le même bloc de verre, et d'un correcteur de champ à trois lentilles qui produit une image plane dans la caméra. Un obturateur mécanique et un filtre, qui peut être changé grâce à un système de carrousel, complètent l'ensemble optique.

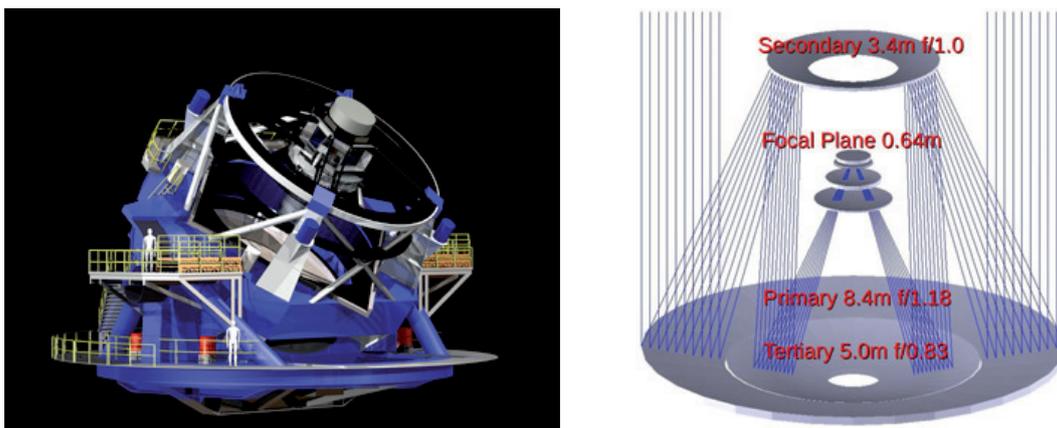


Figure 1 : À gauche, vue 3D du télescope LSST ; à droite, Système optique à 3 surfaces réfléchissantes et 3 lentilles.

Le plan focal comprend 189 capteurs photographiques CCD (« Charge-Coupled Device », en français « Dispositif à Transfert de Charges ») de 4096×4096 pixels chacun, répartis dans 21 tours de 3×3 CCDs (carrés rouges sur la partie gauche de la figure 2), et 12 CCDs disposés dans les coins (carrés verts et jaunes sur la figure), employés pour le guidage et le contrôle de la focalisation. La température des détecteurs de ce plan focal sera maintenue à -100° Celsius, pour éviter les bruits de fond d'origine thermique.

Les tours (*Figure 2*, à droite) comprennent des cartes d'électronique disposées dans l'ombre des CCDs, qui permettent une lecture hautement parallélisée de la caméra en seulement deux secondes. Cette configuration, qui nécessite 16 canaux vidéo par CCD dans un très faible espace, a dicté un cahier des charges contraignant en matière d'intégration des circuits, de diaphonie entre voies (c'est-à-dire d'interférences entre les signaux de voies différentes) et de bruit de lecture sur les circuits intégrés CABAC et ASPIC de pilotage et de lecture des CCDs.

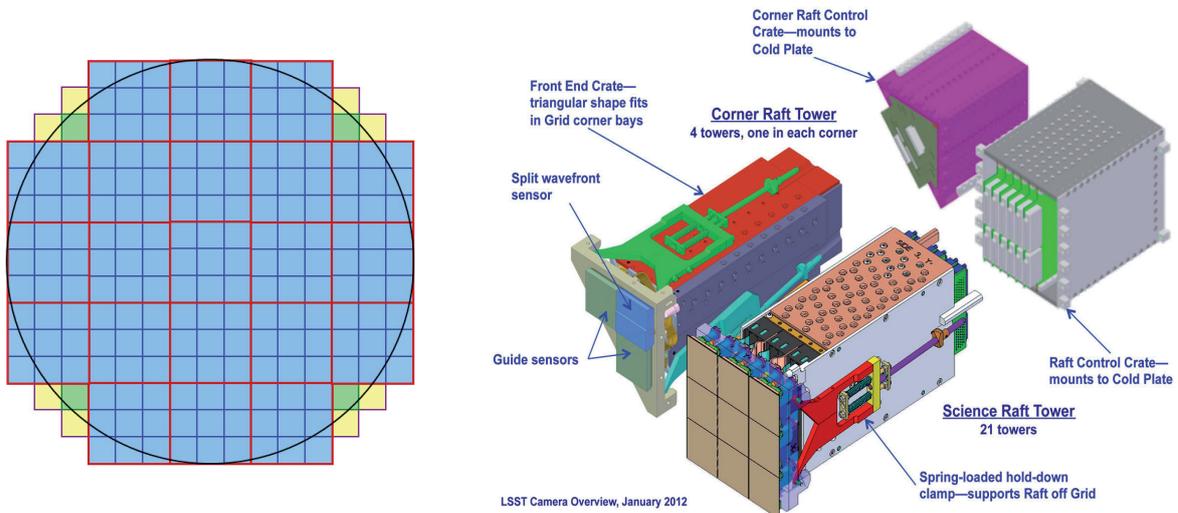


Figure 2 : À gauche, la mosaïque des CCDs répartis dans 21 tours (les carrés bleus inclus dans le quadrillage rouge), plus 4 unités de guidage/focalisation (carrés jaunes et verts). À droite, la structure des tours de CCDs.

Le LAL fait partie des neuf laboratoires de l'IN2P3 impliqués dans la collaboration LSST. Le groupe travaille sur la caméra depuis décembre 2006 (figure 3). Dans un premier temps il s'est impliqué, en collaboration avec le LPNHE, sur le design de l'ASPIC, un circuit intégré dédié à la lecture des signaux provenant des CCDs. Par la suite, le CABAC, un autre circuit intégré utilisé pour le pilotage des CCDs, a été conçu. La description de ces deux circuits intégrés et les résultats des tests des différentes versions sont donnés dans la suite de cet article.

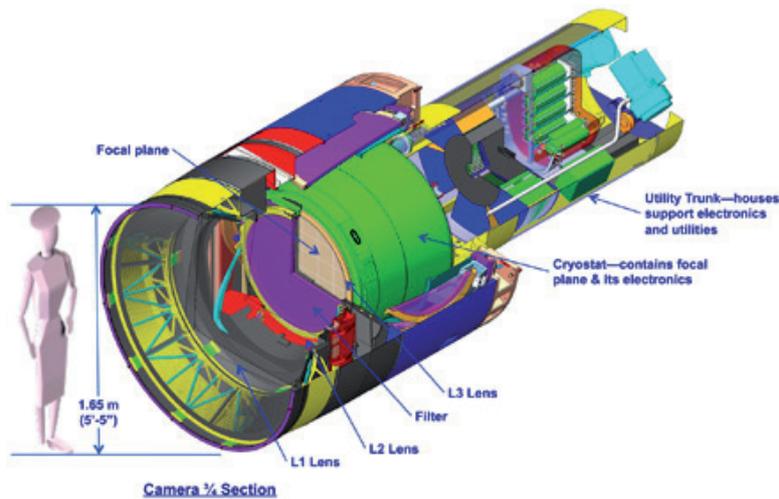


Figure 3 : La caméra et ses principaux éléments. Données physiques : diamètre 1,6 m, longueur 3 m, masse 2 800 kg.

## L'électronique frontale

Même si certaines caractéristiques comme le nombre de canaux de sortie ou la taille des capteurs sont connues, le choix définitif du type de CCD utilisé sur le projet n'est pas encore arrêté. Par conséquent, la chaîne d'électronique frontale, et principalement les deux circuits ASPIC et CABAC mentionnés plus haut, a été conçue de façon à pouvoir s'adapter aux différentes options possibles. Cette contrainte est venue s'ajouter à l'ambitieux cahier des charges.

Le design actuel de la caméra prévoit d'associer chaque groupe de trois CCDs à une carte d'électronique (REB pour « Raft Electronic Board ») contenant six ASPICs et six CABACs. La figure ci-dessous donne une vue schématique de cette carte, où un FPGA (« Field Programmable Gate Array », un circuit logique programmable) contrôle l'ensemble des éléments de la carte et réalise l'interface avec la chaîne d'acquisition (DAQ).

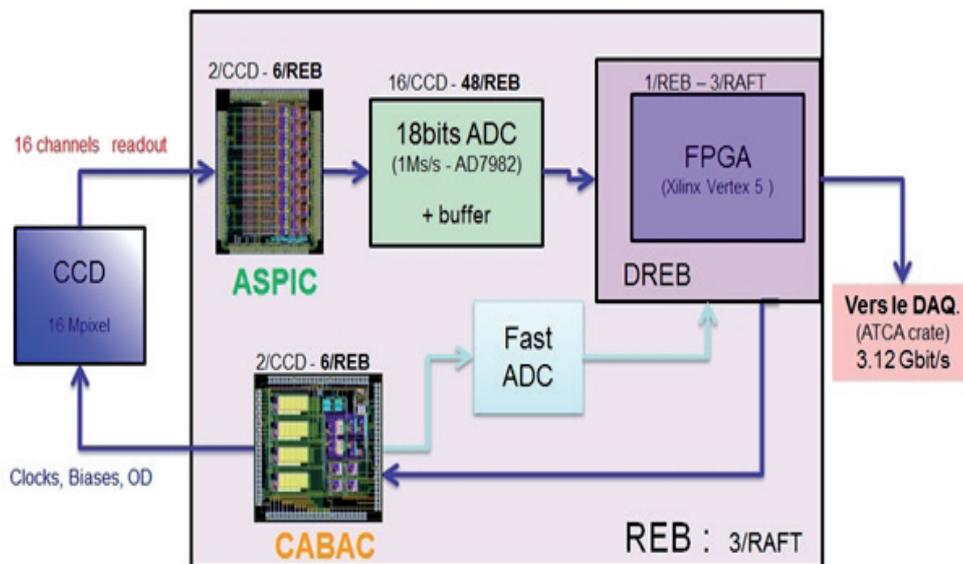


Figure 4 : Schéma de la carte REB avec ses principaux éléments et les interfaces internes et externes.

## ASPIC

Chaque CCD possède 16 canaux de sortie correspondant chacun à 2048×512 pixels. Les signaux de sorties analogiques de chaque canal seront lus par le circuit ASPIC (Analogue Signal Processing Integrated Circuit) sur laquelle le groupe de microélectronique du LAL a commencé à travailler fin 2006. Ce circuit (voir *figure 5*, partie gauche) à huit voies a été développé dans la technologie AMS CMOS 0,35 µm 5 V « C35B4 » ; il a pour rôle d'amplifier les signaux d'entrée avec un gain programmable et d'effectuer un double échantillonnage corrélé (« Correlated Double Sampling »). Pour ce faire, la technique d'intégration double rampe (Double Slope Integration) est utilisée. Elle consiste en un cycle qui intègre le signal (avec son bruit) avec une rampe positive, puis intègre le seul bruit avec une rampe négative, ce qui élimine la contribution commune du bruit de réinitialisation des CCDs. Cette technique permet d'atteindre un niveau de bruit résiduel extrêmement faible (au niveau de la dizaine de microvolts, à comparer avec la gamme dynamique du CCD qui va de 0 à 400 millivolts), indispensable à la mesure des plus petits signaux des CCDs.

Plusieurs versions se sont succédé pour atteindre les performances requises, comme par exemple une diaphonie inférieure à 0,05% ou une puissance dissipée inférieure à 25 mW. La quatrième version, conçue par le groupe de microélectronique du LAL à l'automne 2014, a été réceptionnée en mars 2015. Les tests menés au LPNHE, avec le soutien du LAL, sur une quarantaine de circuits ont permis de valider définitivement ce circuit et de lancer la production de 1000 autres en mai. Les tests de série auront lieu à partir du mois de septembre et seront menés conjointement par le LAL et le LPNHE.

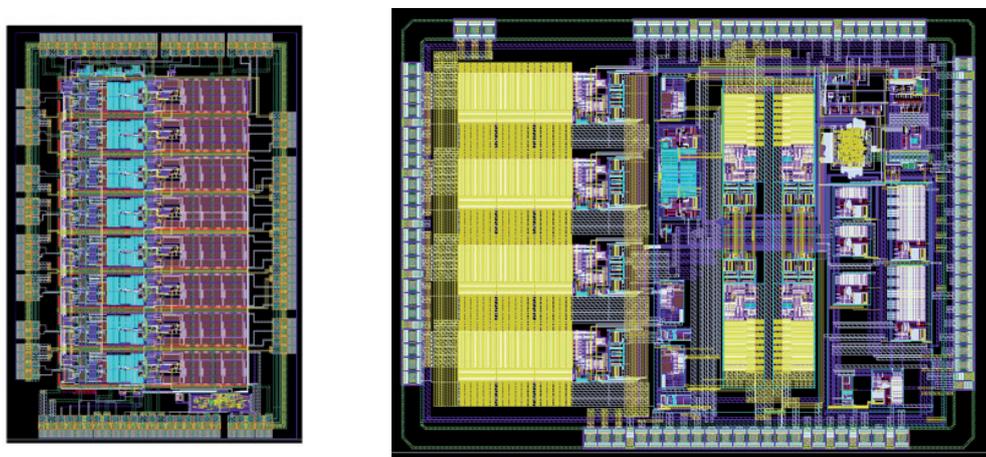


Figure 5 : À gauche, ASPIC4. À droite, CABAC2.

## CABAC

Le second circuit intégré, développé dans la technologie AMS CMOS 0,35  $\mu\text{m}$  50 V « H35B4D3 » par le LAL et le LPNHE, s'appelle CABAC (« Clocks And Biases ASIC for CCDs »). Son rôle est de fournir toutes les horloges (quatre parallèles et quatre séries) et les tensions de polarisation (bias) nécessaires au bon fonctionnement des CCDs. Tous ces paramètres sont finement configurables ce qui permet de les ajuster individuellement pour chaque CCD quel que soit son type. La première version de CABAC (CABAC0) a néanmoins été conçue en prenant comme référence le CCD « e2v », favori pour être sélectionné par LSST au moment de la conception du circuit (début 2012) et qui ne requiert pas de tensions négatives pour son fonctionnement. Les tests ont abouti à des résultats très encourageants eu égard à la complexité d'une technologie jamais utilisée à l'IN2P3. Un banc de tests comprenant une carte FPGA commerciale, une carte « fille » conçue au LAL, une carte frontale avec un boîtier permettant le test individuel de chaque circuit, plusieurs alimentations et un système d'acquisition de signaux (oscilloscopes ou module CAEN), a été développé pour mener tous ces essais à bien (figure 6). Il a été réutilisé pour les versions suivantes du circuit, moyennant quelques ajustements sur les cartes, le firmware du FPGA et les programmes Labview de tests.

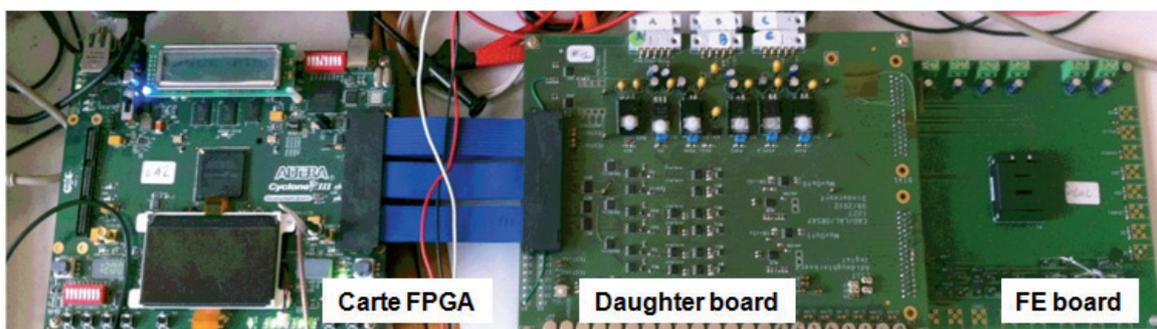


Figure 6 : Vue de la chaîne de cartes d'électronique du banc de tests CABAC0.

La troisième version (CABAC2 – voir figure 5 - partie droite) de ce circuit intégré a été conçue en seulement trois mois. Les premiers circuits encapsulés ont été réceptionnés au début du mois de mai. Depuis, ils sont testés intensivement pour vérifier leurs performances, leur robustesse et la quantité opérationnelle sur un échantillon représentatif (une centaine de circuits). Pour l'instant tous les voyants sont au vert, le taux de

circuits conformes atteint 95 % environ et chaque paramètre (horloge ou bias) peut être ajusté précisément, comme par exemple le temps de montée et de descente des horloges parallèles et séries (figure 7).

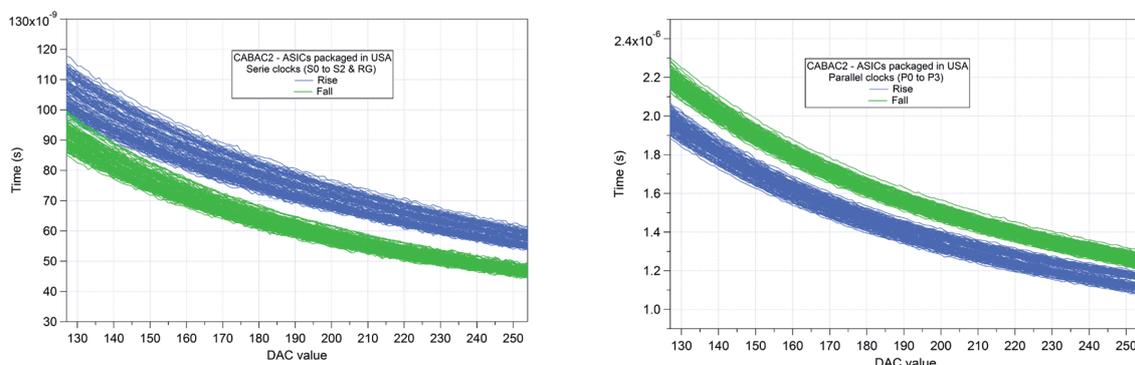


Figure 7 : Temps de montée (« rise », en bleu) et de descente (« fall », en vert), en fonction du paramètre de configuration, pour les horloges parallèles (à gauche) et séries (à droite) pour 40 circuits.

## Conclusions et perspectives

Tout comme ce fut le cas pour ASPIC4, le but sera de valider CABAC2 (via une revue menée au sein de la collaboration) de façon à pouvoir lancer la production de 1 000 circuits. Pour ce faire, toutes les fonctionnalités doivent avoir été testées et la preuve faite que ce circuit est la solution idéale pour le pilotage des CCDs du projet LSST. Outre les tests de caractérisation du circuit en banc de tests de laboratoire (température non contrôlée), il est prévu de le tester dans un cryostat pouvant atteindre des températures de  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , les plus basses auxquelles l'électronique frontale pourra être confrontée. Dans ce but, une carte dédiée a été réalisée au LAL qui sera bientôt réceptionnée. En attendant, une carte équipée d'un CABAC0 a été placée plus d'un mois dans le cryostat. La température au niveau du circuit a été maintenue à  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant toute la période sans que celui-ci ne montre de signes de faiblesse. En plus de ces essais à froid, un CCD sera associé à un ASPIC4 et un CABAC2 pour effectuer des tests complets de la chaîne au LPNHE.

Si tous ces tests sont concluants et que la collaboration donne son accord pour lancer la production des CABAC2, ceux-ci seront réceptionnés fin 2015 et leurs tests feront suite à ceux des ASPIC4. Le but est de pouvoir fournir à LSST l'ensemble des circuits ayant passé avec succès les tests de série en mars 2016 au plus tard, date à partir de laquelle l'assemblage de la caméra pourra démarrer.

**Septembre :**

## Visite d'un groupe « d'Instagramers » au LAL

Vendredi 28 août 2015 au soir, un groupe d'une quinzaine de photographes amateurs, actifs sur le réseau social Instagram, est venu prendre des photos au LAL. Cette visite a été organisée par Ignazio Mottola dans le cadre de l'association « Instagramers France » (<http://www.instagramersfrance.fr>) et la direction du laboratoire. Au menu : le toit du bâtiment 206, l'intérieur de l'Igloo, le musée Sciences ACO, le hall de l'accélérateur linéaire, PHIL, le hall Lagarrigue, la salle blanche XFEL (vue de l'extérieur) et Virtual Data.

Le résultat de cette séance est visible sur Instagram via les deux mots clefs « lalorsay » et « sciencesaco » :

<https://instagram.com/explore/tags/lalorsay> - <https://instagram.com/explore/tags/sciencesaco>

Guides côté LAL : Nicolas Arnaud, Nicolas Delerue, Michel Jouvin, Bruno Mansoux, Alain Porcher, Marie-Hélène Schune, Achille Stocchi.

Quelques-unes des photos mises en ligne avec les pseudos Instagram de leurs auteurs :



[https://instagram.com/marc\\_nouss](https://instagram.com/marc_nouss)



<https://instagram.com/marietchin>



<https://instagram.com/spiritualwalker>



<https://instagram.com/metadio>

## Premiers électrons de PHIL produits grâce à Laserix

Les premiers tests de couplage du laser de puissance Laserix sur le photoinjecteur PHIL ont eu lieu du 15 au 17 juillet 2015. Une telle configuration permet d'envisager la production de paquets d'électrons courts (longueur<sup>1</sup> comprise entre 50 à 100 fs), suivie de leur accélération par un champ de sillage dans un plasma<sup>2</sup>.

Le but principal de ces tests préliminaires était d'identifier et de résoudre les difficultés techniques liées à un tel couplage. Ainsi, il a été constaté qu'ajuster la fréquence de tir de Laserix à 5 Hz pour être compatible avec PHIL posait des problèmes d'instabilité de température, puisque le laser a été conçu pour fonctionner à 10 Hz. Plusieurs difficultés ont aussi été rencontrées au niveau des éléments optiques qui permettent d'amener le faisceau laser depuis Laserix jusqu'à la photocathode de PHIL et de changer sa longueur d'onde de l'infrarouge (IR : 800 nm) à l'ultraviolet (UV : 266 nm).

Toutes ces difficultés ont été surmontées et le vendredi 17 juillet vers 16 h les premiers électrons obtenus en envoyant des photons de Laserix sur une photocathode de PHIL ont été observés – voir Figure 1. La charge produite a été estimée à 100 pC – soit 625 millions d'électrons.



*Fig. 1 : Observation sur un écran scintillant des électrons produits par un tir du laser de Laserix sur la photocathode de PHIL.*

<sup>1</sup> En physique des accélérateurs, il est d'usage d'utiliser une durée pour quantifier la longueur d'un paquet de particules. Implicitement, cette durée doit être multipliée par la vitesse de la lumière dans le vide ( $c \approx 300\,000\,000$  km/s environ) pour obtenir la longueur du paquet. Ainsi, 50 (100) femtosecondes correspondent à environ 15 (30) micromètres.

<sup>2</sup> Les techniques actuelles d'accélération utilisées en physique des particules semblent atteindre leurs limites : la taille des accélérateurs nécessaires pour obtenir des énergies toujours plus élevées devient prohibitive. C'est pour s'affranchir de ces limites technologiques que des activités de R&D portant sur des méthodes d'accélération alternatives sont en cours dans de nombreux laboratoires dans le monde. Ces nouvelles approches, dont l'accélération par un champ de sillage dans un plasma, doivent permettre à terme d'obtenir des accélérations beaucoup plus fortes, et donc de réduire de façon importante l'encombrement des futures machines.

Seule une toute petite partie du potentiel de Laserix a été utilisée pour ces tests : le faisceau laser IR envoyé à PHIL avait une énergie de seulement 1 mJ (alors que Laserix peut atteindre 1 joule), de façon à produire des impulsions UV de l'ordre de 20  $\mu$ J. Des modifications relativement légères de l'installation ont été identifiées pour améliorer ce faible rendement de conversion de l'IR vers l'UV : le compresseur et le module de triplement de fréquence seront déplacés dans la salle du photoinjecteur, au plus près de la photocathode.

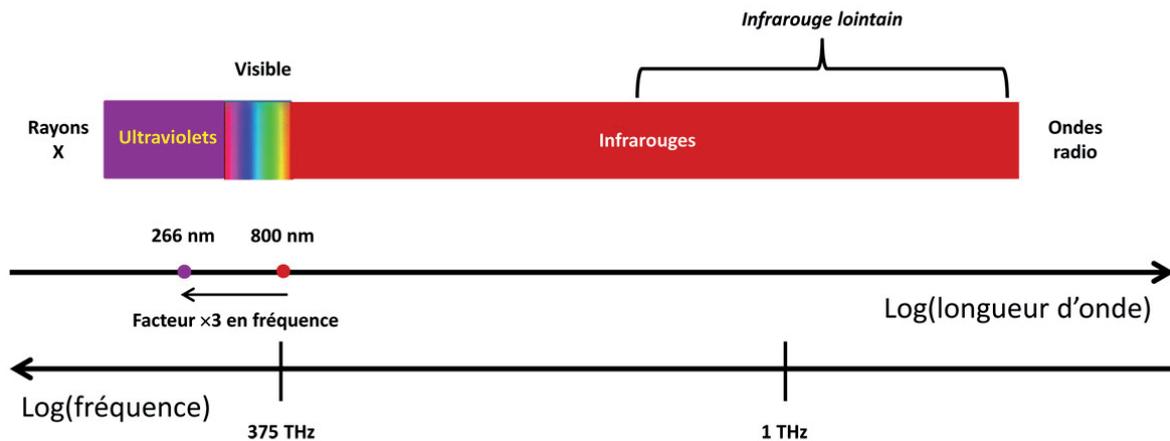


Fig. 2 : Représentation simplifiée du spectre électromagnétique permettant de mettre en perspective les différentes informations de longueur d'onde et de fréquence données dans cet article.

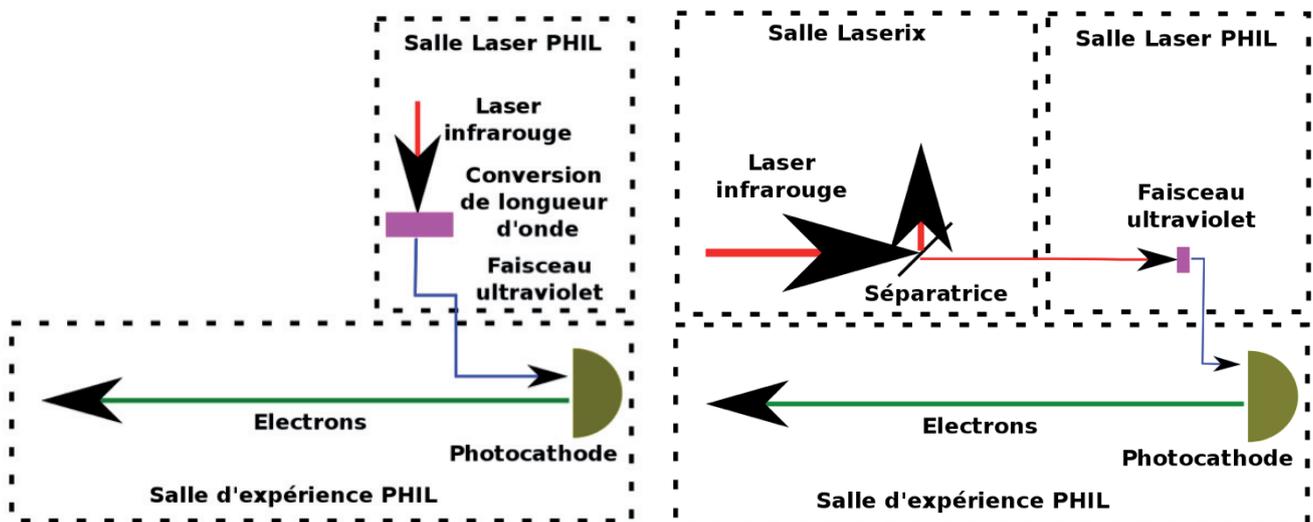


Figure 3 : À gauche, schéma laser actuel pour PHIL. Un laser IR, situé dans la salle laser de PHIL, envoie des impulsions vers la photocathode, située dans la salle d'expérience. En chemin, la longueur d'onde du faisceau est modifiée pour passer de l'IR à l'UV. À droite, organisation future permettant la production dans PHIL de paquets d'électrons courts à l'aide du laser de Laserix. Son faisceau, généré dans la salle Laserix, traverse une lame séparatrice qui le divise en deux parties. Le faisceau principal est envoyé vers les expériences Laserix tandis que le faisceau auxiliaire part pour PHIL. Sa longueur d'onde est également modifiée de l'IR à l'UV avant de venir illuminer la photocathode.

L'énergie prélevée sur le laser de Laserix pour PHIL étant faible, on envisage d'utiliser simultanément cette installation pour alimenter le photoinjecteur et pour ses expériences propres. On peut ainsi imaginer au LAL un programme de recherche utilisant des paquets courts d'électrons pour produire du rayonnement dans l'infrarouge lointain et le THz. Cette activité (projet DRUM) vient d'ailleurs de recevoir un soutien financier du Labex P2IO via l'appel d'offre R&D 2015. Avec ces paquets courts et en utilisant toute la puissance de Laserix, il sera également possible de tester l'accélération d'électrons dans le champ de sillage créé soit par un laser à haute puissance, soit par un autre paquet d'électrons.

Les équipes qui ont participé à ces tests prometteurs sont les groupes PHIL et ETALON du département Accélérateurs du LAL, l'équipe Laserix (affiliée au CLUPS et au LPGP, hébergée au LAL) et le groupe SLIC du CEA/DSM/IRAMIS/LIDyL.

Décembre :

## L'appareil de mesure de flux de protons Cherenkov (CpFM) d'UA9

UA9 est une expérience de collimation du faisceau de protons du SPS utilisant un cristal courbé de Silicium. L'interaction cohérente (canalisation) des protons du halo du faisceau (source de bruit de fond) avec ce cristal permet de défléchir de façon importante les protons et donc d'améliorer l'efficacité de la collimation.

L'étude du processus de canalisation requiert le développement d'un nouveau type de détecteur inséré dans le vide primaire du tube faisceau et fonctionnant dans un milieu radioactif très hostile. Le LAL a la responsabilité du développement du détecteur chargé de mesurer l'efficacité de la collimation en comptant le nombre de protons du halo défléchis par le cristal courbé avec une précision de 5 %. En collaboration avec le CERN et l'INFN, nous avons conçu puis installé dans le SPS le détecteur CpFM : Cherenkov proton Flux Measurement.

Ce projet complet comportant des études de simulation, de la conception et du montage mécanique, de la caractérisation de photodétecteurs et le développement de l'électronique de lecture associée, a impliqué tous les services techniques et administratif du laboratoire.

Les études préliminaires ont porté sur le choix des composants de la chaîne de détection. Ces derniers seront placés, à terme, dans le tube faisceau du LHC et devront répondre à des contraintes fortes : vide primaire et radioactivité ambiante très élevée (dose en Gamma de 10 MGy et fluence de  $10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup>). De plus, le nombre de protons défléchis doit être déterminé avec une précision de 5 %.

Le quartz (fused silica) constituant le radiateur et les fibres transportant la lumière a été choisi pour ses qualités inhérentes à sa résistance aux radiations et à son faible impact sur l'impédance du système. Des photomultiplicateurs (PMT) de technologie très ancienne mais ayant une très bonne sensibilité et un fort gain sont les seuls photodétecteurs à pouvoir supporter le taux de radiation proche du tube faisceau. La mesure de la charge générée par les PMTs est réalisée par le WaveCatcher développé au LAL en collaboration avec le CEA/IRFU.

Dans le cadre de son utilisation au SPS, le CpFM (Fig. 1) est constitué de deux radiateurs en quartz émettant de la lumière Cherenkov au passage d'un proton, reliés à deux PMTs par l'intermédiaire d'un faisceau de fibres de quartz de 4 m de longueur. Le signal des photodétecteurs est ensuite transmis à un module WaveCatcher 8 voies situé à 40 m du tube faisceau dans une zone non radioactive. Le premier radiateur est dédié à la mesure du halo, le deuxième à la mesure du bruit de fond.

Fort de notre expérience acquise sur SuperB en simulation de détecteur Cherenkov, une dizaine de géométries différentes ont été simulées dans GEANT4 (Fig. 2) afin d'optimiser la configuration quartz-faisceau de fibres-PMT.

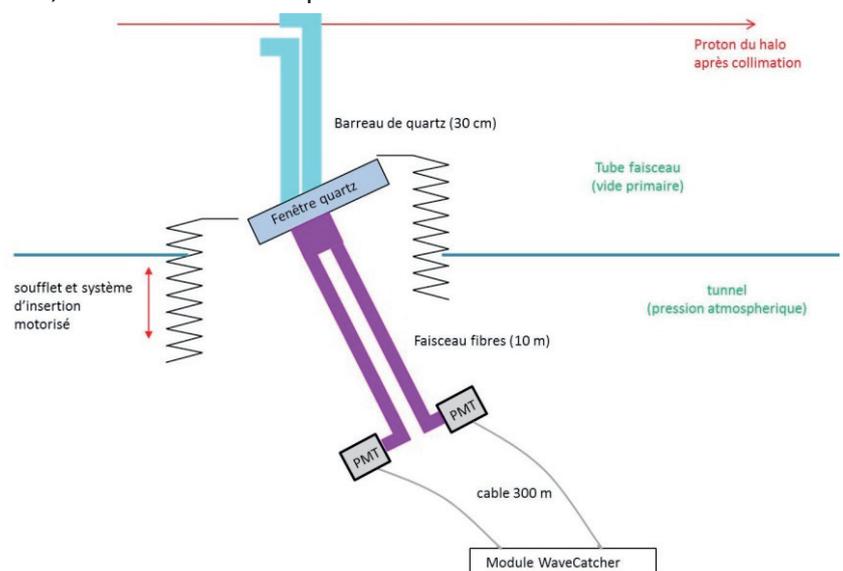


Figure 1 : Dessin de principe du CpFM.

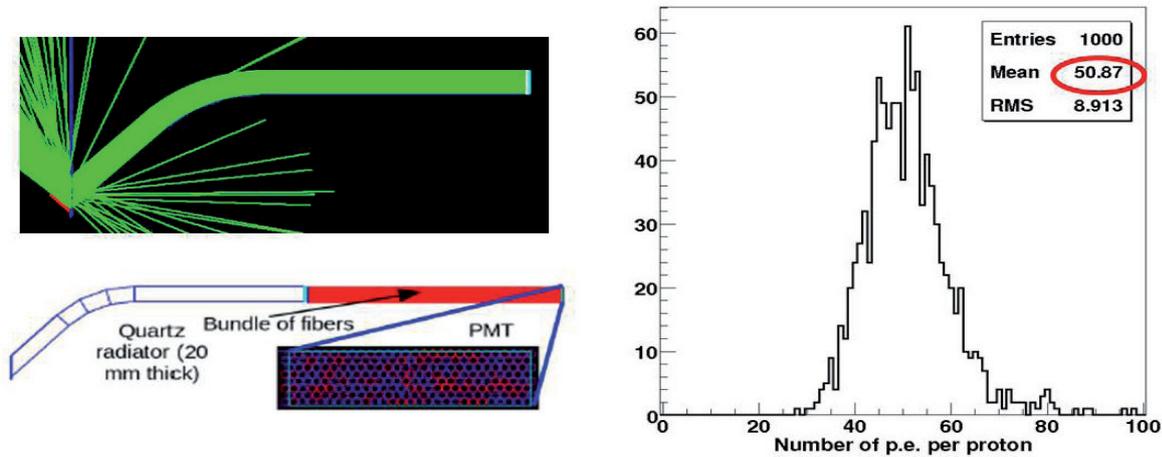


Figure 2 : Simulation GEANT4 du nombre de photoélectrons émis en sortie de la photocathode du PMT par proton incident sur le barreau de quartz pour l'une des géométries étudiées.

Un premier prototype du CpFM (Fig. 3) a été construit au LAL puis testé au BTF (Beam Test Facility) de Frascati (Fig. 4.a) en octobre 2013. Il était constitué d'un barreau de quartz droit (10 cm de long,  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  de côté), couplé à un faisceau de fibres de quartz fabriqué au LAL et transportant la lumière jusqu'au PMT HAMAMATSU R772 dont les signaux étaient lus et enregistrés par le module WaveCatcher 2 voies.

Les différentes études menées avec des faisceaux d'électrons (500 MeV) ont montré un bon accord entre la simulation et les résultats des tests et prouvé que le signal maximum était bien atteint lorsque l'angle entre la direction des particules incidentes et l'axe des fibres était de  $47^\circ$  (Fig 4.b). Ces test ont permis de prouver la faisabilité de notre projet au comité du SPS. Celui-ci a accepté que la collaboration UA9 installe le CpFM pour mesurer le flux de protons défléchis par le cristal de silicium positionné en amont, lançant ainsi l'étape de production du détecteur.

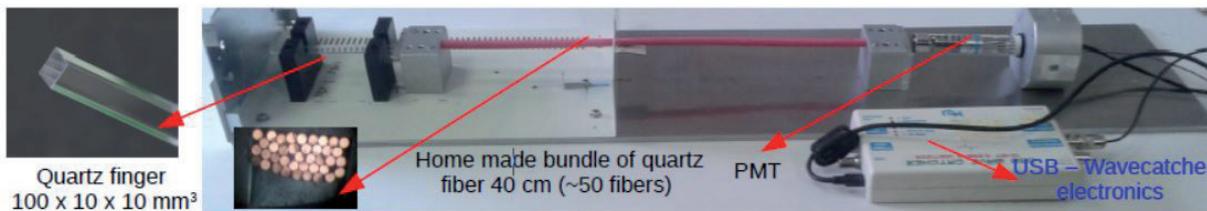


Figure 3 : Prototype 1 du CpFM.

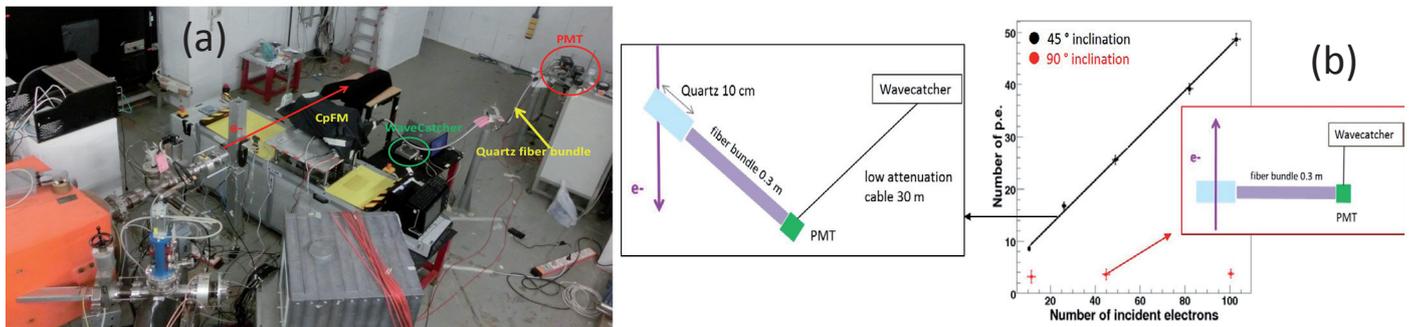


Figure 4 : a) zone de tests en faisceau au BTF. b) les mesures du nombre de photoélectrons enregistrés par électron incident dans la configuration quartz + PMT via le faisceau de fibres : les points rouges correspondent au quartz positionné à  $90^\circ$  par rapport au faisceau, les points noirs à un angle de  $47^\circ$ .

Le brasage des barreaux de quartz à travers une bride en inox s’est avéré impossible à réaliser par notre sous-traitant américain spécialisé dans ce type de travaux. Nous avons donc revu notre design initial et réalisé de nouvelles simulations pour optimiser une nouvelle configuration où la lumière émise par le quartz passe à travers une fenêtre avant d’être transportée par le faisceau de fibres jusqu’aux PMTs. En parallèle, nous avons comparé une nouvelle référence de PMT (HAMAMATSU R7378A) à celui utilisé jusqu’alors et choisi ce second détecteur pour sa meilleure linéarité (Fig. 5).

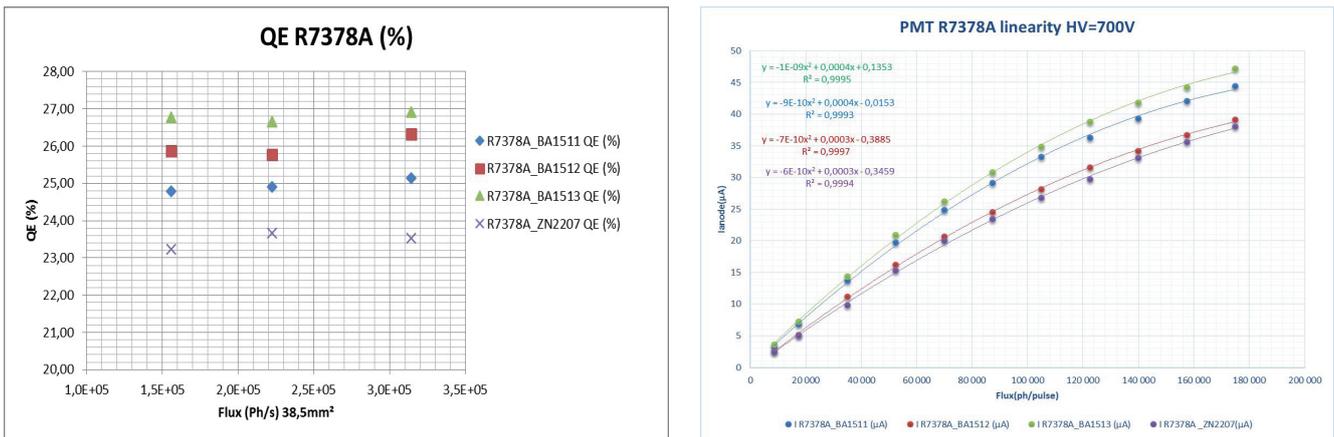


Figure 5 : efficacité quantique (figure de gauche) et courbe de linéarité (figure de droite) de 4 PMTs R7378A.

Un deuxième prototype (Fig. 6) permettant de comparer des barreaux de quartz (formes « I » et « L » et de qualité de polissage différentes) provenant de deux producteurs a été testé au BTF en avril 2014. Ce prototype était constitué de deux barreaux de quartz maintenu par une bride en Teflon (fabriqué par l’INFN de Rome) couplés à 47° au faisceau de fibres de 4 m de longueur (100 fibres par voies) grâce à une pièce spéciale réalisée au LAL. Chaque PMT (R7378A) était relié au module WaveCatcher 8 voies par l’intermédiaire d’un câble faible atténuation de 30 m de longueur.

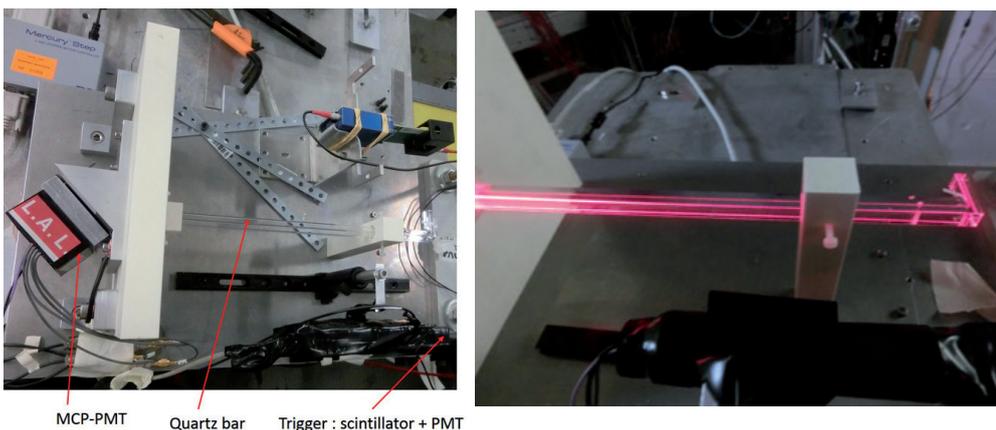


Figure 6 : Le second prototype du CpFM en tests au BTF. Les deux barreaux de quartz de forme « L » (à droite) sont connectés à 47°, soit au MCP-PMT de test, soit au faisceau de fibres.

Ces études nous ont permis de confirmer que, malgré la perte sur le signal d’un facteur 2 (Fig. 7) lorsqu’une fenêtre de verre est insérée entre les barreaux et le faisceau de fibres, celui-ci était suffisamment élevé pour permettre une mesure précise à 15 % du flux de particules. L’amélioration des supports mécaniques et des contacts entre les différents étages de la chaîne de détection permettant une diminution des pertes de photons a été confiée à l’INFN.

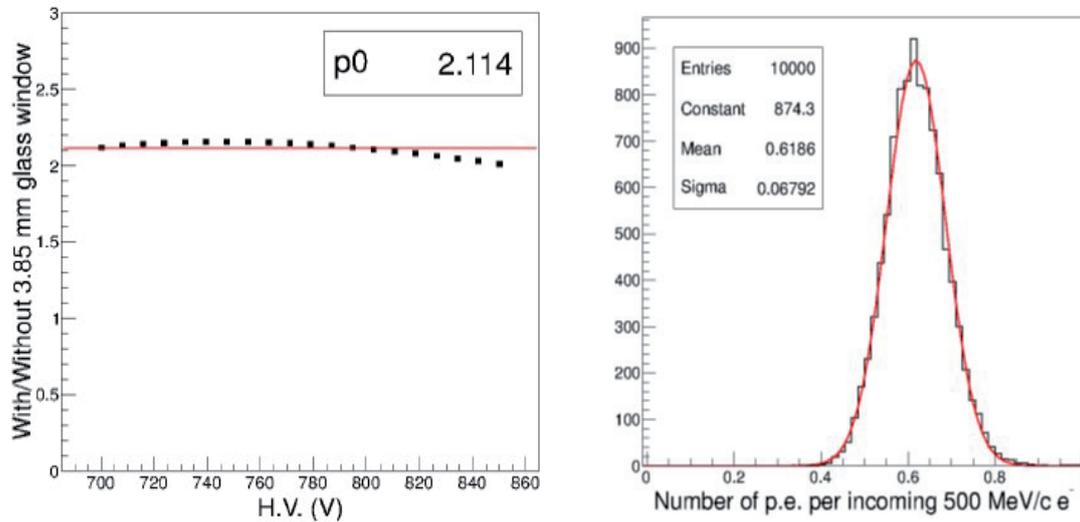


Figure 7 : À gauche : rapport entre le signal mesuré lorsque le PMT est en contact direct avec les barreaux de quartz et le signal mesuré lorsqu'une fenêtre de 3,85 mm de verre est insérée entre ces deux composants de la chaîne de détection. La moitié de la lumière produite est perdue au passage de cette fenêtre. À droite : histogramme du nombre de photo-électrons produits par électron incident dans la configuration : barreau de quartz de forme « I » + fenêtre de verre + faisceau de fibres de 4 m + câble de 30 m + PMT + module WaveCatcher 8 voies.

D'autres études ont été réalisées lors de trois tests en faisceau dans le hall Nord (H8) de Preessin au CERN avec des pions de 180 GeV (Fig. 8). Elles ont permis de valider le CpFM dans sa version finale qui a été installé dans le tube faisceau du SPS en Janvier 2015 (Fig. 9).

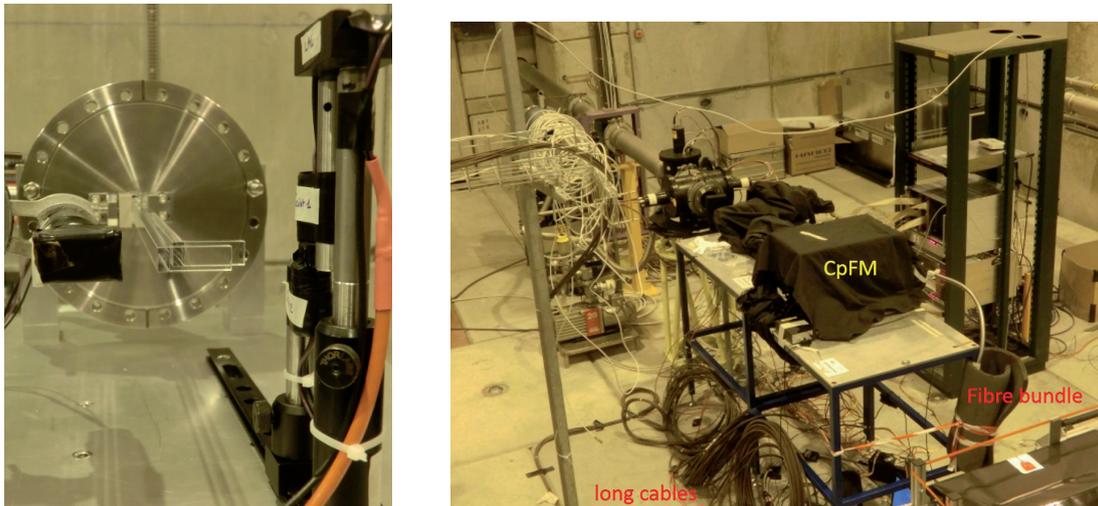


Figure 8 : À gauche, le CpFM composé des 2 barreaux de quartz, d'une bride CF150 pour assurer l'étanchéité avec le vide du tube faisceau, d'une fenêtre en quartz, du faisceau de 200 fibres de quartz de 4 mètres connecté à 2 PMTs. Les signaux sont lus par un module WaveCatcher 8 voies. À droite, l'installation des tests en faisceau dans le hall H8 du CERN sur le site de Préveessin.



Figure 9 : le CpFM installé dans le SPS.

Le CpFM a été mis en service en juillet 2015 pendant deux jours de faisceau dédiés à UA9. Trois autres périodes de prise de données (2 avec des protons de 120 GeV/c et une avec des ions Plomb de 270 GeV/c) ont permis d'étudier le fonctionnement du CpFM qui donne entière satisfaction. La figure 10 montre le nombre de protons défléchis par le cristal courbé (situé 58 m en amont du CpFM) en fonction de la position de l'extrémité du barreau de quartz à l'intérieur du tube faisceau : le CpFM intercepte le halo défléchi à 75 mm de sa position de parking.

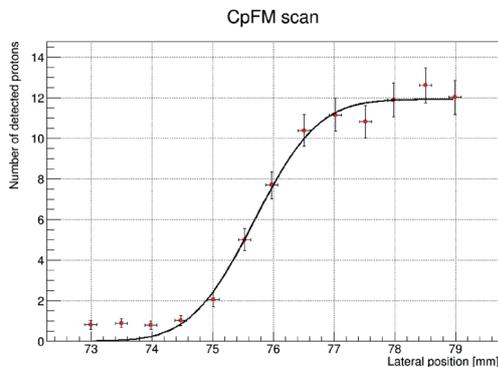


Figure 10 : nombre de protons défléchis par le cristal courbé en fonction de la position de l'extrémité du barreau de quartz du CpFM à l'intérieur du tube faisceau.

Nous avons été sollicités fin 2014 pour décliner une nouvelle version du CpFM dans le cadre du projet d'extraction lente du faisceau au SPS avec une installation prévue pour la mi 2016. Ce détecteur aura pour mission de décrire le contenu harmonique du faisceau extrait.

**Équipe UA9/CpFM au LAL** : A. Stocchi, D. Breton, L. Burmistrov, F. Campos, S. Conforti, V. Chaumat, J. Jeglot, J. Maalmi, V. Puill, J.-F. Vagnucci.

## Prix Jean-Louis Laclare 2015 pour Walid Kaabi, ingénieur de recherche au LAL

La division Accélérateurs de la Société Française de Physique a décerné le prix « Jean-Louis Laclare 2015 » à Marie Labat (division sources du synchrotron SOLEIL) et Walid Kaabi (département accélérateur du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, LAL, CNRS/IN2P3 et Université Paris-Sud). Ce prix (<http://accélérateurs.fr/prix-jean-louis-laclare>), décerné tous les deux ans lors des « Journées Accélérateurs de la SFP », est destiné à récompenser un(e) physicien(ne) de moins de 40 ans pour ses travaux remarquables en physique ou en technologie des accélérateurs. Jean-Louis Laclare (1942-2003) était un physicien français spécialiste des accélérateurs de particules.

C'est la première fois que ce prix est décerné à un membre du LAL. Walid Kaabi a été récompensé pour sa capacité à gérer, depuis plus de cinq ans, un projet très complexe : la production de 800 coupleurs de puissance (des composants essentiels des accélérateurs linéaires de particules) pour la future machine XFEL (un laser à électrons libres dans le domaine des rayons X), en cours de construction au laboratoire DESY près de Hambourg (Allemagne). Ce projet associe :

- compétences techniques (conditionnement des coupleurs de puissance, contrôle-qualité) et
- qualités d'encadrement (gestion d'une équipe d'une dizaine de personnes au LAL et contacts permanents avec les différents corps de métier et services du laboratoire).



*Le lauréat du LAL, Walid Kaabi. ©LAL2015.*

Il demande également un travail de planification très poussé : suivi des cadences de production des coupleurs à conditionner ; envoi des coupleurs conditionnés au CEA pour assemblage dans les éléments de l'accélérateur qui sont ensuite livrés à DESY ; interactions régulières avec tous les acteurs du projet XFEL, des industriels qui produisent les coupleurs aux responsables de l'accélérateur linéaire de DESY.



*La station de conditionnement des coupleurs XFEL au LAL. ©LAL2015.*

Walid Kaabi a récemment pris la direction du Département Accélérateur du LAL qui coordonne toutes les activités du laboratoire portant sur la physique et les technologies des accélérateurs de particules.