



OPERA : Révéler la nature des neutrinos

L'expérience OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) fait partie d'un programme international lancé en Europe après la découverte des oscillations dans les neutrinos atmosphériques. Un faisceau dédié, le CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso), a été mis en œuvre au CERN pour envoyer un flux intense de neutrino-mu en direction du laboratoire du Gran Sasso (Italie), où la construction du détecteur OPERA s'est effectuée de 2003 à 2008.

OPERA a été conçu pour mettre en évidence l'apparition de neutrino-tau parmi les neutrino-mu du faisceau émis par le CERN, après 730 km de parcours. L'expérience doit détecter les neutrino-tau en utilisant 150 000 cibles faites de plaques de plomb et d'émulsions photographiques, complétées par un ensemble de détecteurs électroniques. OPERA recherche aussi l'apparition de neutrino-électron pour contraindre l'angle θ_{13} entrant dans la matrice PMNS de mélange des neutrinos.

L'équipe du LAPP a contribué de façon importante à la construction du détecteur OPERA avec la réalisation d'un système automatisé pour installer les 150 000 cibles et extraire ensuite les cibles désignées pour analyse durant les périodes d'acquisition de données. Les physiciens du LAPP ont aussi contribué à la préparation des analyses de physique et participent activement à la prise des données et à leur exploitation.

Introduction

Après la première confirmation de l'existence des oscillations de neutrino par l'expérience Super-Kamiokande dans l'observation des neutrinos atmosphériques, plusieurs programmes ont été développés dans le monde à la fin des années 90 afin de poursuivre l'étude du mélange et des masses des neutrinos.

Dans le cadre d'un programme neutrino à grande distance lancé en Europe, le CERN a construit un faisceau de neutrinos, le CNGS, dirigé vers le laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie), distant de 730 km. OPERA est une des deux expériences destinées à mesurer le changement de saveur des neutrinos de ce faisceau, après un parcours permettant de reproduire l'effet des oscillations observé avec les neutrinos atmosphériques.

OPERA doit mesurer au Gran Sasso l'apparition directe de neutrinos-tau parmi les neutrinos-mu du faisceau CNGS. L'expérience est en mesure d'y rechercher également un excès de neutrinos-électron de façon à contraindre l'angle θ_{13} de la matrice de mélange des neutrinos.

Pour mesurer avec précision les interactions des neutrinos et signer la présence de leptons tau

Points forts

Construction du détecteur OPERA : de 2003 à mars 2007.

Chargement des cibles : de début 2007 à mi-2008.

Premières prises de données : de juin à novembre 2008.

résultant de l'interaction de neutrinos-tau, le détecteur OPERA utilise un ensemble très modulaire de cibles, appelées briques, comportant de fines plaques de plomb et des films d'émulsions photographiques dont la résolution, de l'ordre du micron, permet d'identifier la très courte trace du lepton tau. OPERA contient 150 000 de ces briques, pour une masse approchant 1 300 tonnes, arrangées en murs séparés par des plans d'hodoscoptes de scintillateurs (repérables par leurs capots noirs dans la photo du détecteur, Figure 1). Chacune des deux sections de cibles est suivie d'un spectromètre magnétique équipé de RPC et de tubes à dérive pour mesurer l'impulsion et la charge des muons émergeant des interactions.

L'information en temps réel des détecteurs à scintillateurs et de ceux des spectromètres

permet l'identification des briques où se produisent les interactions neutrino. Les briques candidates sont extraites des murs et, après marquage aux rayons X et exposition aux rayons cosmiques pour alignement, les films d'émulsions sont développés et envoyés dans les laboratoires de la collaboration équipés de microscopes, les « stations de scanning », afin d'obtenir les données précises des traces des interactions. Une phase intermédiaire utilise l'examen d'une paire détachable de films, les "Changeable Sheets" ou CS, attachés à chaque brique, pour valider la décision de l'analyse de la brique. La construction du détecteur OPERA au laboratoire du Gran Sasso a commencé en 2003 et s'est achevée durant l'été 2008 avec la mise en place de l'ensemble des briques. La dernière phase consistant à fabriquer en continu les 150 000 briques et à les insérer dans leurs structures de support a duré environ 18 mois. L'insertion des briques a été effectuée grâce à un système (réalisé par le groupe du LAPP) de manipulateurs automatisés mis au point également pour extraire les briques « candidates » désignées par la reconstruction en ligne des événements par les détecteurs électroniques.

Après une période de faisceau de quelques jours seulement en 2007, qui a servi à régler les détecteurs électroniques et à valider leurs programmes de reconstruction, l'expérience OPERA est entrée en phase effective d'acquisition des données en 2008. La quasi-totalité des cibles était alors installée et les différentes chaînes de traitement ont été testées. Les 1 700 événements correspondant à des interactions neutrino dans

les briques en 2008 sont en cours d'analyse, ils représentent seulement environ la moitié de la statistique attendue par année. L'expérience doit normalement enregistrer cinq ans de données à plein régime.

La collaboration

OPERA est une collaboration internationale regroupant 34 instituts dont 3 laboratoires français : LAPP Annecy-le-Vieux, IPN Lyon et IPHC Strasbourg. Les activités dans la construction de la composante française, en plus de la réalisation des manipulateurs de cibles, ont été la construction et la mise en œuvre des traceurs à scintillation, de leur électronique et du système d'acquisition de leurs données qui a été étendu à l'acquisition des données de l'ensemble des détecteurs électroniques d'OPERA. L'extraction des données des émulsions photographiques a également été parmi les activités de la composante française de 2006 à 2008.

Activités de recherche du groupe du LAPP

L'équipe du LAPP a eu la pleine responsabilité des manipulateurs de briques lors de la préparation de l'expérience, de sa construction et de sa mise en œuvre. Ce projet important et essentiel pour le détecteur OPERA a mobilisé, outre la plupart des chercheurs du groupe, une équipe nombreuse d'ingénieurs et de techniciens principalement en mécanique, en automatisme et en informatique.

Le groupe de chercheurs du LAPP a également été actif dans la conception de l'expérience et son optimisation à l'aide de simulations, ainsi que dans la préparation de l'analyse des données. Par ses études, il a contribué à améliorer les performances attendues en termes de résultats de physique.

Le système de manipulation de cibles et le chargement du détecteur

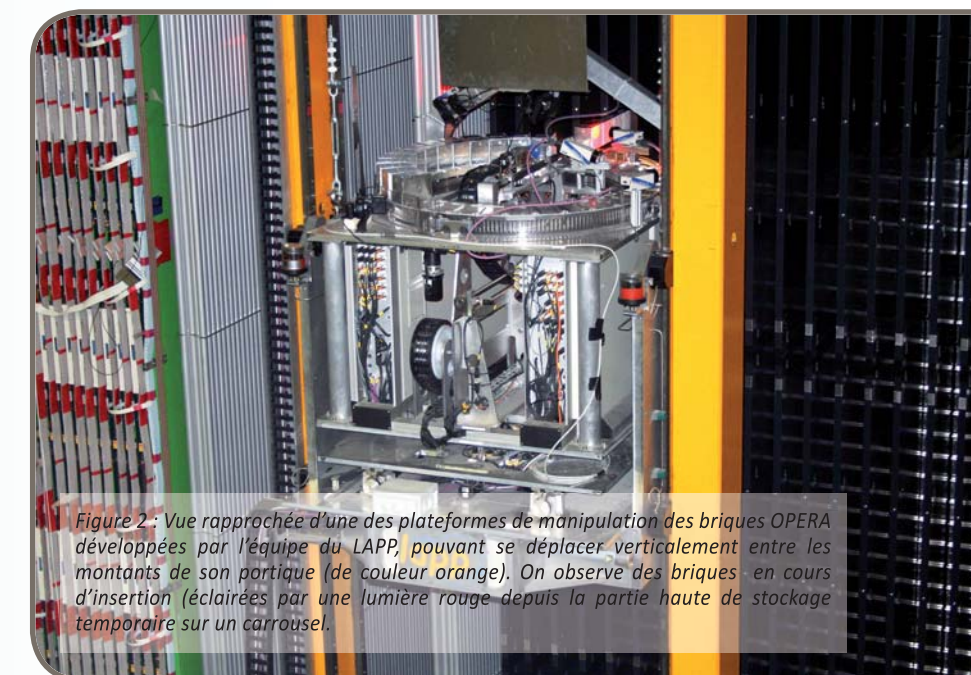
L'équipe du LAPP a conçu, développé et mis au point la mécanique, la motorisation et

l'automatisation des éléments des manipulateurs de briques et des diverses parties qui leur sont associées. Il en a aussi réalisé toutes les parties logicielles, qui ont été étendues à la gestion des briques dans l'ensemble des opérations subies entre leur insertion dans le détecteur et leur démantèlement avant de développer les films. En 2006, l'équipe technique dépassait 10 personnes. Jusqu'en 2009, de 4 à 6 ITA devaient encore intervenir pour perfectionner et assurer le bon fonctionnement de ces systèmes.

Chaque manipulateur se compose d'un portique circulant le long d'un côté du détecteur dans lequel une plateforme (Figure 2) peut se déplacer verticalement pour se positionner en regard d'un plateau de support de briques. Les plateformes comportent un carrousel de stockage temporaire pour les briques. Celles-ci sont montées sur des patins spéciaux et déplacées par glissement. Pour l'insertion des briques dans le détecteur, les plateformes utilisent un vérin électrique dont l'action répétée avec la rotation du carrousel permet de former un train de briques qui est poussé dans le plateau de support. Un dispositif intégré au pont reliant la plateforme au plateau permet de terminer l'insertion des briques dans une rangée.

Pour l'extraction de briques hors d'une rangée, la plateforme comporte un véhicule muni d'une ventouse qui ramène en succession les briques sur le carrousel jusqu'à la brique désirée. Celle-ci est remplacée par une brique, chargée à l'avance pour cela sur le carrousel, et le train de briques retirées est ensuite réinséré avec le vérin.

Le positionnement du pont de la plateforme, en regard d'une rangée, se fait avec un système de vision basé sur une camera numérique et l'accostage final à l'aide de divers capteurs de proximité, optiques ou magnétiques. Les manipulateurs intègrent un grand nombre de capteurs et sont commandés par des automates industriels dont la programmation a été mise en œuvre en 2005. La supervision informatique des automates a été développée en 2006 et mise au point au cours des périodes de test qui ont suivi.



Le groupe a également réalisé un ensemble informatique en liaison avec un système de base de données pour permettre le suivi et la gestion des briques tout au long de leur parcours.

En 2006, la construction des manipulateurs et de leurs stations de chargement s'est achevée et l'installation des manipulateurs au laboratoire du Gran Sasso a eu lieu, suivie par leur démarrage et l'ensemble des mises au point nécessaires.

Le premier manipulateur a été livré au Gran Sasso fin 2005, suivi en mars 2006 par le second. Ils ont été complétés par leurs deux stations de chargement, automatisées et intégrées au système, destinées à transmettre aux carrousels le contenu des paniers de transport des briques. Ces paniers cylindriques, également conçus et réalisés par le LAPP, comprennent neuf étages de 26 briques, soit la contenance d'un plateau de support sur un côté du détecteur. Au cours du remplissage du détecteur, ils étaient chargés dans l'atelier d'assemblage des briques, situé 300 m plus loin dans le laboratoire souterrain, et transportés jusqu'aux stations de chargement.

La mise en opération des deux systèmes a commencé avec les premiers prototypes de briques réelles mi-2006. Après de nombreux tests et réglages, le chargement en briques du détecteur a commencé avec une production pilote de l'ordre de 1 000 briques destinée au premier run du faisceau qui a duré quelques jours en octobre 2006. La production et le remplissage à grande échelle de la cible OPERA



Figure 1 : Vue de côté du détecteur OPERA, montrant la succession des zones cible (dont les capots noirs correspondent à l'électronique des scintillateurs) et de leurs spectromètres (les parties en rouge et blanc en indiquent l'instrumentation associée). Le dispositif entre les montants verticaux de couleur orange est l'une des deux plateformes de manipulation des briques.

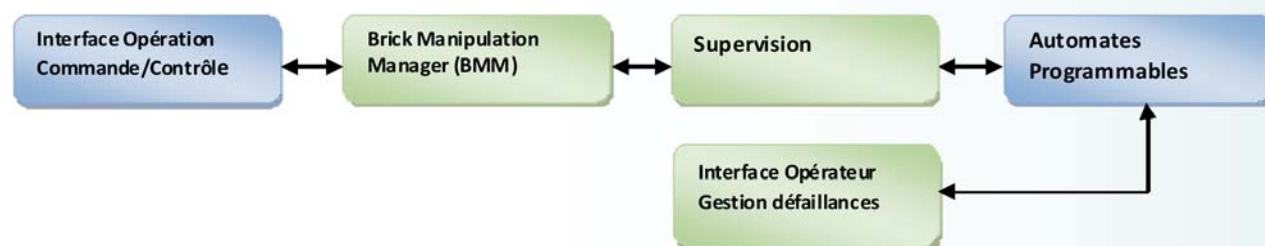
avec des briques ont repris ensuite en mars 2007 et se sont poursuivis pendant plus d'un an jusqu'à mi-juillet 2008, pour le début du run du faisceau CNGS 2008. Le nombre de briques a atteint alors 146 400, soit 97,5 % des 150 000 prévues, le reste des briques ayant été fabriqué début 2009.

Cette période d'installation des briques produites en continu a permis de terminer diverses mises au point et optimisations. Les difficultés rencontrées ont été principalement dues aux défauts de production des briques. Un travail particulier à cette adaptation a été l'implémentation de la logique et de composants de contrôle dans l'automatisme permettant de sécuriser le fonctionnement de tous les mouvements. Les différents logiciels ont été extensivement testés et les opérations d'extraction des briques ont ainsi pu être préparées.

Les logiciels de contrôle

Afin de disposer d'une parfaite connaissance à tout instant du contenu du détecteur et de connaître l'ensemble des opérations réalisées ou possibles sur chacun des éléments de détection (briques et CS), un système informatique a été développé pour suivre les opérations sur les briques. Ce système possède des composants de supervision, de contrôle et de monitoring permettant le suivi du chargement initial du détecteur puis la gestion des extractions de briques déclarées candidates. Il assure aussi le suivi de toutes les manipulations des briques à la sortie du détecteur et de manière générale permet de gérer le cycle de vie d'une brique depuis son insertion jusqu'à son démontage final.

Le schéma ci-dessous représente l'organisation des principaux composants du système.



Le logiciel de Supervision, directement connecté au serveur résidant dans les automates, assure l'exécution et la surveillance d'actions élémentaires telles que le positionnement du BMS devant une rangée, l'insertion ou l'extraction d'un nombre donné de briques ou le déchargement dans les paniers. Il prend également en charge l'ordonnancement des opérations d'extraction des briques candidates. Les actions sont organisées en services et assurent la transmission de l'information relative aux mouvements des briques vers le composant chargé du suivi et de la sauvegarde (BMM).

Le composant BMM prend en charge les actions de « haut niveau » fournies par les opérateurs, via des interfaces dédiées clientes. Organisé également en services, il ordonnance les actions de chargement ou déchargement et d'extraction de briques et initie les appels aux services de la supervision. Le BMM réceptionne les données liées aux mouvements des briques pour les sauvegarder dans le système de gestion de bases de données local (ORACLE) et il gère les transitions entre les états attribués aux briques. Dans les diverses opérations, la lecture du code d'identification de la brique permet de confirmer la présence de la brique au point de contrôle.

Un Interface Opérateur permet, en fonction d'un niveau d'expertise, d'initier un ensemble de mouvements élémentaires du BMS et d'invoquer des services proposés par la « Supervision ». Dans le cadre des opérations de chargement ou d'extraction des briques, il permet d'effectuer les actions nécessaires à la résolution des défaillances.

Chaque brique candidate extraite du détecteur doit subir un ensemble d'opérations manuelles et semi-automatiques figurant dans le schéma ci-dessous. Toutes ces actions sont parties intégrantes de l'histoire de la brique et doivent faire l'objet d'un suivi précis.



L'extraction de briques candidates

Les "runs" de physique du CNGS, en automne 2007 et durant une grande partie de 2008, ont marqué le début de l'exploitation des manipulateurs en mode de production de physique et leur intégration comme élément principal de la chaîne d'acquisition de l'expérience OPERA. Durant cette période, le faisceau du CNGS a pu délivrer plus de $1,86 \times 10^{19}$ protons sur cible, ce qui a permis d'enregistrer dans les blocs cible d'OPERA plus de 1 700 événements. L'équipe du LAPP a alors développé et mis en place les procédures d'extraction des briques candidates pouvant contenir des interactions de neutrino. Ces procédures reposent sur la disponibilité des prédictions de position dans la cible, obtenues par l'analyse des détecteurs électroniques dans une base de données centrale de l'expérience. Celle-ci est consultée par le logiciel de gestion des services de manipulation (BMM). La stratégie de remplacement des briques extraites par des briques issues de la périphérie du détecteur a été appliquée. Une optimisation des missions élémentaires d'automatisme a été effectuée pour réduire le temps des opérations.

Durant l'année 2008, l'équipe du LAPP a mis en fonctionnement un élément clé de l'expérience qui est la gestion informatique de toutes les activités de manipulation des briques, du détecteur jusqu'au développement final des briques dans lesquelles des interactions de neutrino ont été confirmées. Ceci s'est traduit par la manipulation et le suivi de près de 20 000 mouvements de briques dans le seul cadre du run de 2008.

Analyse de physique et résultats

L'identification du neutrino tau est délicate de par la faible distance de vol du lepton tau. Pour OPERA, la technique utilisée pour la détection des interactions de neutrino tau est celle des émulsions photographiques. La chaîne d'analyse, s'étendant de l'acquisition des détecteurs électroniques à la mesure avec des systèmes de

"scanning" automatique des traces laissées dans les émulsions, a été mise en œuvre en 2008 et a pu ainsi être validée. L'effort est maintenant mis sur la reconstruction et l'analyse détaillée des vertex d'interactions de neutrino. Des développements d'outils d'analyses spécifiques sont nécessaires afin d'atteindre les performances requises pour la détection du lepton tau dans ses différents modes de désintégration.

Le groupe du LAPP a développé certains de ces outils, en particulier ceux qui concernent la détermination de l'impulsion et la reconstruction de vertex dans les blocs cibles du détecteur OPERA. La détermination de l'impulsion des particules se fait par la mesure des angles de diffusion coulombienne multiple dans les briques cibles. La comparaison de la mesure de l'impulsion sur

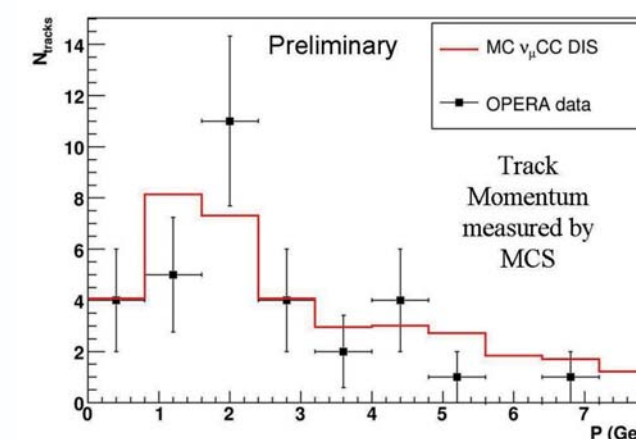


Figure 3 : Distribution en impulsion des traces des premiers événements reconstruits dans OPERA, extraite par l'équipe du LAPP dans l'analyse des interactions enregistrées lors du run 2007.

des données réelles et sur une simulation Monte Carlo, pour des pions de différentes énergies et angles connus, a permis d'améliorer la méthode pour tenir compte des grands angles de diffusion. Elle est maintenant utilisée par la collaboration pour la détermination de l'impulsion de toutes les traces issues des interactions neutrino et mesurées dans les émulsions.

Dans le cadre de l'étude du canal de désintégration du lepton tau en trois hadrons chargés, des outils de reconstruction de vertex pour des événements neutrino à deux vertex, où le vertex d'interaction est suivi d'un

vertex de désintégration d'une particule, ont été développés. Grâce en partie à ces outils et à la réalisation d'une analyse cinématique multivariées adaptée, la discrimination du bruit de fond charmé pour la détection du lepton tau dans le canal de désintégration en trois hadrons chargés a été rendue possible.

De plus, le groupe du LAPP a effectué une des premières analyses cinématiques globales sur des événements neutrino enregistrés et reconstruits dans les émulsions. L'étude a été réalisée sur la reconstruction d'événements publiés dans la base de données générale d'OPERA, utilisant les algorithmes de reconstruction d'impulsion et de vertex développés précédemment. Ce travail sur les premières interactions neutrino d'OPERA a permis de valider les approches expérimentales et de comparer, pour la première fois, des variables cinématiques entre les données d'OPERA et des données Monte Carlo d'interaction ν_{μ} CC et d'observer un bon accord (Figure 3).

Simulation des émulsions

Nous avons développé dans le groupe un logiciel de simulation capable de reproduire les images des traces de particules dans les émulsions telles qu'elles sont vues par les microscopes de la collaboration. Ce type de logiciel est unique dans le monde des utilisateurs d'émulsions photographiques nucléaires. Cet outil permet d'accéder à des résultats qu'il est long et compliqué d'obtenir par l'observation d'émulsions réelles. Par exemple, nous pouvons étudier systématiquement l'influence de la densité de fond (le "fog"), typique des émulsions, sur l'efficacité de reconstruction des traces. Il en est de même pour l'influence du fond Compton. Une note interne sur ce travail, limitée à l'étude de l'efficacité d'un seul champ de vue d'une émulsion, est achevée. Le logiciel capable de reproduire et de reconstruire toutes les traces d'un événement neutrino dans une brique complète est en test, ainsi que sa liaison avec les programmes d'analyse de la collaboration. Le but est d'obtenir une évaluation aussi précise que possible de l'efficacité de reconstruction des événements avec un vertex de désintégration tels que ceux qui mettront en évidence la présence de leptons tau. La capacité de calcul actuelle du LAPP permet d'effectuer localement ces simulations.

Plan pour 2010-2014

L'expérience OPERA a débuté en 2008 ses premières prises de données significatives, mais a alors bénéficié d'une intensité de faisceau intégrée de $1,8 \times 10^{19}$ pot (protons on target), soit moins de la moitié de l'intensité annuelle prévue initialement. Dans les années 2009 à 2013-2014, la prise de données va se poursuivre, en vue d'accumuler une intensité totale de $2,25 \times 10^{20}$ pot, jugée nécessaire pour atteindre pleinement les objectifs de physique. Les années à venir, après la période de mise en route de l'analyse sur les données de 2008, seront donc pour l'équipe une période d'acquisition et d'exploitation des données de l'expérience.

L'équipe OPERA du LAPP se concentrera sur la mise en place d'activités d'analyse dans plusieurs domaines spécifiques :

- La détection et la reconstruction d'événements comportant des particules charmées dans le but de valider le potentiel de détection de particules à vie courte comparable à celle du lepton tau et d'estimer les contributions de fond ainsi que les efficacités pour ce type d'événements.
- L'étude des gerbes électromagnétiques produites dans les interactions neutrino et reconstruites dans les briques, afin de contribuer à la recherche des modes de désintégration tau \rightarrow hadrons et tau \rightarrow électron.
- Dans le développement de ces activités, elle sera amenée à participer à l'exploitation des données des émulsions auprès des laboratoires spécialisés dans l'analyse par les microscopes.

Travaux de prospective et préparation d'une future expérience neutrino

Engagé depuis 2006 dans le projet ANR PMm², le groupe neutrino du LAPP a pris la responsabilité de la partie simulation du projet en février 2008. Le groupe est également impliqué dans le GDR Neutrino et y assume les coresponsabilités des groupes de travail GT1 (détermination des paramètres de neutrinos) et GT5 (outils communs). Un rapport d'étape a été rédigé en 2006.

Pour mettre à profit l'expérience acquise dans la physique du neutrino, l'équipe est motivée par la préparation de futures expériences neutrino à grande distance de la source sur des faisceaux d'accélérateurs. Elle compte dans le futur suivre cette voie et s'engager dans l'étude d'un des

détecteurs qui poursuivra la détermination de la matrice PMNS de mélange des neutrinos, de l'angle θ_{13} et de la phase δ . Une implication dans un projet tel que T2K/HK ou Nova permettant de répondre à ces problématiques pourrait ouvrir sur d'autres sujets de physique accessibles avec des détecteurs de grand tonnage (désintégration du proton, neutrinos de super novae, neutrinos reliques) et à plus long terme à d'autres projets utilisant des détecteurs de type mégatonne avec des super-faisceaux ou des beta-faisceaux de neutrinos.

Pour la période 2010-2014, à part les ressources financières nécessaires pour assurer la maintenance des manipulateurs d'OPERA et les prises de données au Gran Sasso, il est essentiel pour l'équipe de recevoir un apport en chercheurs supplémentaire, deux des quatre chercheurs du groupe seront retraités avant 2012.

Publications importantes

1. "First events from the CNGS neutrino beam detected in the OPERA experiment" R. Acquafredda et al, New Journal of Physics 8 (2006) 303.
2. "Emulsion sheet doublets as interface trackers for the OPERA experiment", A. Anokhina et al, Journal of Instrumentation 3 (2008) P07005.
3. "Study of the effects induced by lead on the emulsion films of the OPERA experiment", A. Anokhina, et al, Journal of Instrumentation 3 (2008) P07002.

Responsabilités du groupe

"Brick Manipulation project Leader" pour la construction d'OPERA : H. Pessard (2001 à mi-2008), D. Duchesneau (juin 2007 à juil. 2008).

"Brick manipulation Coordinator" : D. Duchesneau.
Membre de l'Executive Committee d'OPERA : D. Duchesneau.

"Co-convenir" du groupe d'analyse « Physique des Oscillations » dans l'expérience : D. Duchesneau.

Chef de groupe au "Collaboration Board" d'OPERA : H. Pessard.

Représentant des laboratoires français dans OPERA : H. Pessard.

Thèse

M. Besnier, « Reconstruction et analyse d'interactions de neutrinos dans les blocs cibles émulsions d'OPERA, et discrimination du fond charmé dans le canal tau \rightarrow 3h », Thèse soutenue le 10 juillet 2008.

Présentation dans des conférences

2007

M. Besnier, "Status of the OPERA long baseline experiment", Physics in Collision 2007, Annecy (France). Published in Acta Phys.Polon. Supp.1:299-300,2008.

2008

D. Duchesneau, "The OPERA long baseline experiment: status and first results", 34th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2008), Philadelphia (USA). arXiv:0810.2476 [hep-ex] to appear in the Proceedings.

M. Besnier, "The OPERA Long Baseline Neutrino Experiment: Status and First Results", 23rd Lake Louise Winter Institute, Alberta (Canada). Proceedings to be published.

L'équipe du LAPP

Physiciens : J. Damet, D. Duchesneau, J. Favier, H. Pessard, A. Zghiche

Doctorant : M. Besnier

Equipe Technique : D. Biaré, L. Fournier, G. Gaillard, R. Gallet, L. Giacobone, T. Hamane, J. Jacquemier, T. Le Flour, S. Lieunard, I. Monteiro, P. Mugnier, F. Peltier, V. Riva