

Expérience OPERA sur le faisceau neutrino CNGS du CERN

Participation du LAPP

Expérimentateurs : A. Degré, D. Duchesneau, J. Favier, M. Lavy, H. Pessard

Equipe technique : G. Gaillard, L. Giacobone, P. Mugnier, F. Peltier

Collaboration

33 Instituts (Allemagne, Belgique, Chine, CERN, Croatie, France, Israël, Italie, Japon, Russie, Suisse, Turquie) dont 4 laboratoires français : LAPP Annecy, IPN Lyon, LAL Orsay, IreS Strasbourg.

Dates Clés

Juin 1998 : Super-Kamiokande annonce la découverte d'oscillations dans les neutrinos atmosphériques

Décembre 1999 : Le CERN décide la construction du faisceau neutrino CNGS

Septembre 2000 : Acceptation de l'expérience OPERA par les comités du CERN et du LNSG

Abstract

The observation by Super-Kamiokande of neutrino oscillations in atmospheric muon-neutrinos has led to several projects to confirm and further study the effect with accelerator produced neutrinos. OPERA is the first accepted experiment for operation in the future neutrino beam from CERN to the Gran Sasso underground site in Italy. The aim of OPERA is to discover the apparition of tau-neutrinos in the CNGS muon-neutrino beam. The experiment is in preparation and is expected to take data in May 2005. A group of LAPP contributes to the OPERA experiment. It actively participates in the design of the detector and its data taking strategy, as well as in the preparation of the analysis. The group contributes to the realisation of the OPERA detector by the construction of a system of automated manipulators for the emulsion target elements.

De Super-Kamiokande à OPERA

Lors de l'annonce historique en 1998 de la première mise en évidence d'une disparition de neutrinos avec la distance, Super-Kamiokande avait des données en neutrinos atmosphériques indiquant une oscillation de ν_μ en ν_τ dans une gamme de Δm^2 entre 5.10^{-4} et 8.10^{-3} eV². Aujourd'hui, après les considérables progrès des analyses et de la statistique, l'effet observé ne fait plus aucun doute et son interprétation par une oscillation $\nu_\mu - \nu_\tau$ s'est renforcée tandis que la zone à 90% C.L. des paramètres de cette oscillation s'est réduite à $\Delta m^2 = (1.6 - 4) \cdot 10^{-3}$ eV² et $\sin^2 2\theta > 0.89$. L'hypothèse d'une oscillation en $\nu_{\text{stérile}}$ n'a pu cependant être exclue à mieux que 2.6σ .

Dans la continuité d'une ligne de recherche sur les oscillations neutrinos poursuivie depuis 1981 au LAPP, avec les expériences Bugey, puis Chooz et NOMAD, une équipe du LAPP s'est engagée dès 1998 dans le démarrage d'un groupe de travail français voulant mettre sur pied un programme expérimental pour mesurer l'oscillation indiquée par Super-Kamiokande.

Le LAPP avec l'IPN-Lyon, le LAL-Orsay et des laboratoires allemands de Berlin, Bochum et Hambourg, a étudié une stratégie basée sur un détecteur massif situé dans les halls souterrains du Gran Sasso (Italie), à 730 km du CERN. Ce détecteur devait mesurer en neutrinos atmosphériques la forme caractéristique d'une oscillation en L/E, pour être sensible à une oscillation même si le Δm^2 était en dessous de 10^{-3} eV², et d'autre part mesurer l'apparition de ν_τ dans un faisceau de ν_μ en provenance du CERN avec la technique du projet OPERA. Ce n'est que lorsque de nouvelles données ont fait

évoluer la zone de paramètres de Super-Kamiokande vers de plus grands Δm^2 qu'après nous être investis dans l'étude du calorimètre massif, nous avons focalisé nos efforts sur le projet OPERA qui permet de couvrir toute cette zone. Le volet neutrinos atmosphériques avec un calorimètre massif magnétisé a abouti de son côté au projet MONOLITH.

Le CERN ayant décidé la construction du faisceau CNGS pour un programme d'apparition de ν_τ , complémentaire du programme américain NUMI axé sur la disparition de ν_μ , le groupe du LAPP et les groupes français ont travaillé à l'élaboration de la proposition d'expérience OPERA. Le projet OPERA a reçu l'approbation des comités d'expériences du CERN et du LNSG en septembre 2000.

OPERA : des émulsions «en ligne»

L'objectif principal de l'expérience OPERA est de mettre en évidence d'une façon indiscutable l'apparition correspondant à la zone d'oscillation de Super-Kamiokande de ν_τ dans un faisceau de ν_μ . Cette découverte doit pouvoir confirmer que la disparition des ν_μ atmosphériques est liée à un phénomène d'oscillation, que l'oscillation $\nu_\mu - \nu_\tau$ en est la cause, et mesurer plus précisément les paramètres de cette oscillation. OPERA est aussi sensible à l'oscillation $\nu_\tau - \nu_e$ (la structure de ses modules de cible est très bien adaptée à l'identification des électrons et à leur distinction par rapport aux π^0) et aura accès, dans le cadre d'analyses à 3 neutrinos, à un autre paramètre de la matrice MNS, l'angle de mélange θ_{13} .

Principes de l'expérience

OPERA utilise la détection directe du ν_τ , par la mesure de la trace du lepton τ produit par interaction courant chargé. Dans ce cas, la seule méthode envisageable à l'échelle d'une cible massive est l'utilisation d'émulsions photographiques dont la résolution de l'ordre du micron permet l'identification de la «cassure» de la désintégration du τ . Les progrès remarquables réalisés dans le domaine du scanning automatisé des émulsions et l'industrialisation de la production d'émulsions en feuilles permettent d'envisager une expérience de la taille d'OPERA avec ce principe. Cette approche à «zéro bruit de fond» a été préférée à l'approche statistique du nombre de ν_τ par sélection cinématique choisie par le projet ICARUS, dont la résolution spatiale est insuffisante pour séparer la trace sub-millimétrique du τ .

OPERA utilise des cibles élémentaires, ou «briques», composées de 56 films d'émulsions intercalés entre des feuilles de plomb de 1 mm d'épaisseur et de 10 x 13 cm² de surface. Le projet OPERA nécessite la mise en œuvre de 240.000 briques pour constituer une cible de près de 2 kilotonnes tout en préservant le principe de base démontré.

Le détecteur OPERA et son exploitation

Le détecteur OPERA est une succession de murs de briques et de détecteurs électroniques (les «trackers») permettant de reconstruire les traces et de désigner dans quelle brique a eu lieu l'interaction. Comme le montre la Figure 1, il est composé de trois sections constituées d'un bloc cible suivi d'un spectromètre à muons. Un bloc cible comporte 24 «murs» de briques et autant de plans croisés de 256 scintillateurs. Le détecteur a environ 25 m de long et 10m de hauteur et de largeur.

Au cours de la prise de données, le nombre de briques candidates à l'analyse est d'environ 30 par jour. Ce nombre est largement dominé par les interactions neutrinos du faisceau car le tunnel est protégé des événements cosmiques par 1.400 m de roche. Ces briques sont extraites journalièrement à l'aide d'un système de manipulation automatisé, pour un dépouillement et une sélection des événements quasi en ligne. La contribution du LAPP à la construction du détecteur OPERA est le développement et la réalisation du système de manipulation des briques cibles.

L'émulsion peut être vue comme un milieu temporaire de stockage analogique de l'information. Un scanning primaire intensif aura lieu dans quelques centres qui produiront les segments numérisés des amorces de traces. Le suivi des traces, la recherche des vertex, la sélection et l'analyse détaillée des événements candidats à une cassure de trace pourront ensuite avoir lieu dans différents autres centres. Les laboratoires de l'IN2P3 impliqués dans OPERA, l'IPN-Lyon, l'IreS Strasbourg, le LAL et le LAPP, veulent intervenir conjointement dans cette seconde phase d'extraction des données ainsi que dans l'analyse.

Activités pour la préparation d'OPERA

a) Travaux de simulation du détecteur

Lors de la conception du détecteur et du développement de la proposition d'expérience, les physiciens du LAPP ont réalisé un important travail de simulation couvrant différents sujets. L'optimisation des paramètres du Target Tracker (TT) (distance des plans, largeur des strips, etc...) a été réalisée par rapport à l'efficacité de désigner la brique contenant le vertex de l'interaction neutrino (Brick Finding Efficiency ou BFE). La Figure 2 montre un événement simulé dans les briques et les trackers d'un bloc cible OPERA. Cette simulation a été validée sur des résultats obtenus en faisceau test. Elle a déterminé la sensibilité aux distances briques scintillateurs et aux défauts d'alignement, permettant de définir les tolérances mécaniques à respecter.

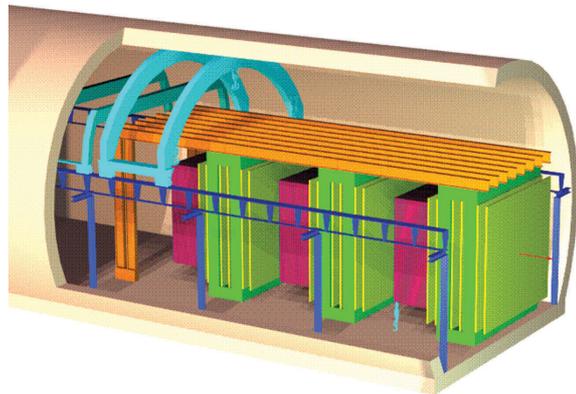


Figure 1 : Vue générale du détecteur OPERA implanté dans le hall B du site du Gran Sasso. Le faisceau neutrino du CERN venant de la gauche rencontre une succession de trois «super-modules» constitués chacun d'un bloc cible (en rouge) suivi d'un spectromètre à muons (en vert).

L'effet des interactions du faisceau avec la cible offerte par la roche devant et autour du détecteur sur le déclenchement a aussi été étudié par simulation. Cette étude a démontré, devant une augmentation de 30% des faux déclenchements, la nécessité pour OPERA d'introduire un ensemble de plans veto pouvant être réalisés à l'aide de RPC (Resistive Plate Chambers).

Une option RPC a par ailleurs été étudiée pour le Target Tracker. Les détecteurs RPC ont des avantages de simplicité et de performances mais n'ont jamais été utilisés pour la détection simultanée de plusieurs particules dans une petite surface auquel cas des effets de saturation peuvent être nuisibles. L'exploitation des résultats d'un test de RPC en faisceau a permis de modéliser cette saturation. Nous avons alors comparé les performances de l'option RPC du TT avec d'autres options basées sur des scintillateurs.

b) Travaux de simulation en vue de l'analyse

Un autre volet du travail effectué au LAPP concerne la préparation de l'analyse. Un premier sujet impliquant l'utilisation de l'information issue des émulsions a été l'étude de l'introduction d'un film amovible placé derrière la brique dont nous avons proposé l'idée. Sa simulation a montré que seule une faible amélioration de la BFE pouvait être obtenue.

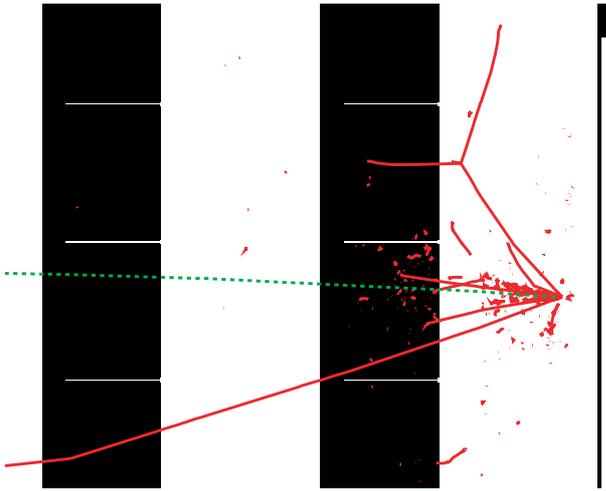


Figure 2 : Visualisation d'un événement $\nu_\tau \rightarrow \tau \rightarrow \mu$ simulé avec GEANT3 dans un bloc cible OPERA ; la trace verte est le muon, les traces rouges d'autres particules chargées. La position du vertex sera donnée par les barycentres des dépôts d'énergie laissés par les traces chargées dans les éléments d'odoscopes.

La justification restant pour ce film supplémentaire est une possible diminution importante de la charge de travail des microscopes de mesure.

Dans la préparation de l'analyse, l'équipe du LAPP a étudié une méthode de mesure des impulsions des particules chargées basée sur la diffusion coulombienne multiple dans les fines plaques de plomb des briques cibles. L'ensemble des mesures dans les émulsions des déviations subies par une particule traversant une brique permet de remonter à son impulsion. La méthode a été améliorée au LAPP par l'utilisation de toutes les combinaisons possibles des mesures de déviation. La résolution $\Delta p/p$ en fonction de l'impulsion (Figure 3) est améliorée de plus de 10% par rapport à une précédente analyse de la collaboration. Des données réelles

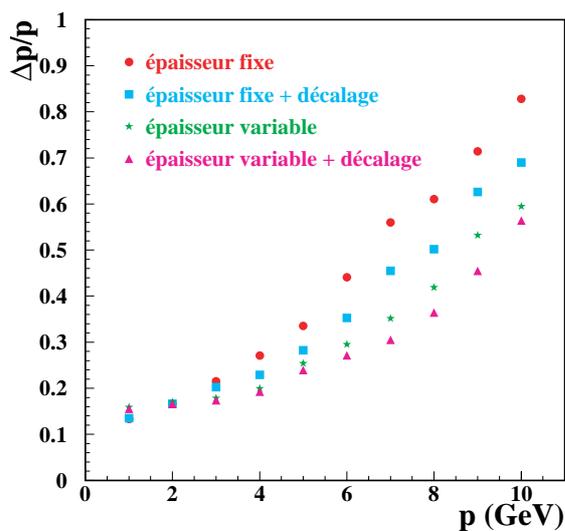


Figure 3 : Résolution sur l'impulsion de muons mesurée par diffusion coulombienne multiple dans une brique d'OPERA. Les différents symboles correspondent à différentes méthodes pour traiter les mesures de diffusion par les plaques de plomb. L'ajout de mesures décalées améliore sensiblement aussi bien les résultats de la méthode utilisant une épaisseur fixe d'échantillonnage que ceux de la méthode utilisant la dépendance de la diffusion avec l'épaisseur d'échantillonnage.

d'émulsions exposées en faisceau ont été analysées et ont montré de façon convaincante le potentiel de cette méthode.

c) Le robot manipulateur de briques

L'équipe du LAPP a en charge la responsabilité du système de manipulation des briques d'émulsions de l'expérience OPERA. Ce système a pour fonction, d'abord d'installer au début de l'expérience les 240.000 briques cibles dans leur structure de support, et d'assurer ensuite pendant l'exploitation du faisceau l'extraction et le remplacement des briques devant être analysées. La première opération doit commencer au printemps 2004, une année environ avant le démarrage du faisceau CNGS, prévu en 2005.

Le chargement initial doit suivre la cadence de production de la machine à assembler les briques et limiter le stockage intermédiaire, et les opérations d'extraction des briques doivent être effectuées chaque jour en un temps limité. Les briques doivent être positionnées avec une précision du millimètre. Ces points imposent la mise au point d'un système mécanique robuste et précis ainsi que d'un automatisme d'opération de fiabilité industrielle.

Le système de manipulation de briques

Après le choix de principes généraux pour le manipulateur en 2000, l'année 2001 a permis l'étude détaillée du manipulateur de briques et la construction de prototypes à échelle réelle. La structure porteuse, à l'étude de laquelle le LAPP a contribué, se compose de demi murs verticaux faits de plateaux horizontaux superposés. L'accès aux briques ne peut se faire que par le côté des murs et tout ou partie d'une ligne de briques doit être tirée à l'extérieur pour accéder à une brique donnée.

Deux plates-formes agissant indépendamment de chaque côté du détecteur sont prévues. Comme le montre la Figure 4, des portiques verticaux circulent parallèlement au faisceau. Les plates-formes s'y déplacent verticalement pour se placer en face d'une ligne de briques déterminée. Les ajustements fins de la position se font au niveau des plates-formes qui comportent des tables croisées horizontales. Ils s'effectuent avec l'aide d'un système robotisé de vision par caméra CCD.

Après des essais pratiques, le principe de manipulation retenu est de faire glisser les briques, munies de patins, sur les plateaux. Leur introduction sur les plateaux se fait à partir d'un carrousel sur la plate-forme à l'aide d'un vérin puis d'un poussoir agissant sur l'ensemble du train de briques. Un test important effectué au LAPP a montré que la friction entre films et plaques de plomb était assez grande sous vide pour permettre des mouvements collectifs de briques en les poussant les unes contre les autres.

Pour extraire les briques des plateaux, soit une fine bande d'acier passant entre les patins et terminée par un rebord permet de tirer en arrière la ligne de briques, soit un véhicule muni d'une ventouse permet de ramener une à une les briques. Les deux alternatives sont étudiées et testées. La Figure 5 montre une vue détaillée des dispositifs de la plate-forme dans ce cas.

Motorisation, automatisation et études diverses

La motorisation et l'automatisation du manipulateur de briques sont une partie importante du projet. Le groupe du LAPP, après avoir recherché des solutions dans ce domaine auprès d'industriels, s'est tourné vers des collaborations extérieures, avec une équipe du CERN puis avec une équipe de l'École Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy pour trouver les compétences requises pour le système d'automatisation. Les choix de matériels, de bus de terrain, de software à utiliser ont été précisés. L'étude du positionnement à l'aide d'un système à caméra CCD a commencé ainsi que celle du contrôle des divers mouvements motorisés.

Le système de manipulation intègre un certain nombre de capteurs tant pour la sécurité que pour assurer des éléments de redondance dans les mouvements (approche finale des plateaux, évitement des capots des trackers, identification par code barres, etc...). Cet aspect est pris en compte dans les études et les séquences opératoires en cours de définition. Sont également étudiées les relations entre le manipulateur et les bases de données, et son interface avec la machine à assembler les briques.

Le robot manipulateur de briques est développé au LAPP avec une équipe du Service Mécanique. Les prototypes assemblés au laboratoire seront testés à l'aide d'une portion de mur porteur fabriquée par les laboratoires de Frascati et de Naples.

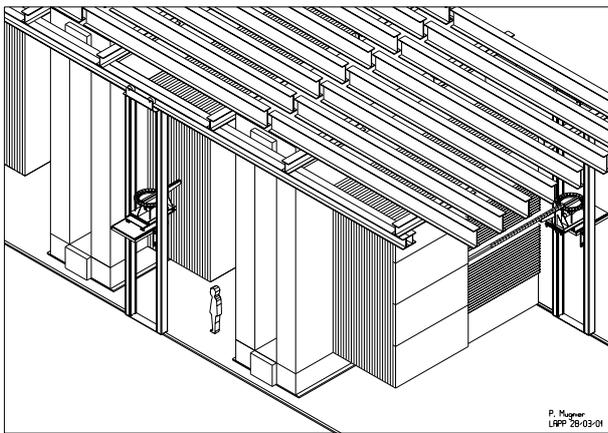


Figure 4 : Vue générale du système de manipulation de briques montrant les portiques circulant le long du détecteur entre les différents super-modules, les plateformes à mouvement vertical supportant les carrousels de stockage des briques, leurs tables de positionnement et le dispositif d'introduction des briques dans les plateaux de support.

Conclusions et perspectives

Un groupe du LAPP participe au projet OPERA mis en route pour mesurer l'apparition de ν_τ par oscillation dans le nouveau faisceau neutrino en construction au CERN en direction du Laboratoire du Gran Sasso. Ce groupe a travaillé à l'élaboration de la proposition d'expérience d'OPERA et a contribué à la faire accepter en septembre 2000 par les comités du CERN et du Gran Sasso. La participation du LAPP se situe dans un effort concerté avec Strasbourg, Lyon et Orsay pour que la France contribue de façon sensible à ce programme.

Le projet de construire et mettre au point le robot manipulateur de briques du détecteur est pris en charge par les équipes du LAPP et constitue une contribution importante à la réalisation du détecteur OPERA. Le groupe du LAPP s'est aussi impliqué dans la préparation de l'analyse de l'expérience, au niveau de la reconstruction des événements par les détecteurs électroniques et à celui de l'exploitation des informations recueillies dans les émulsions. Une activité dans l'extraction des données des émulsions est envisagée en collaboration étroite avec nos collègues français.

Le groupe souhaite avoir une participation plus active, lorsque la construction du manipulateur sera lancée ou dès que son renforcement par d'autres chercheurs le permettra, à des projets neutrinos futurs utilisant des faisceaux intenses de basse énergie ou des usines à neutrinos.

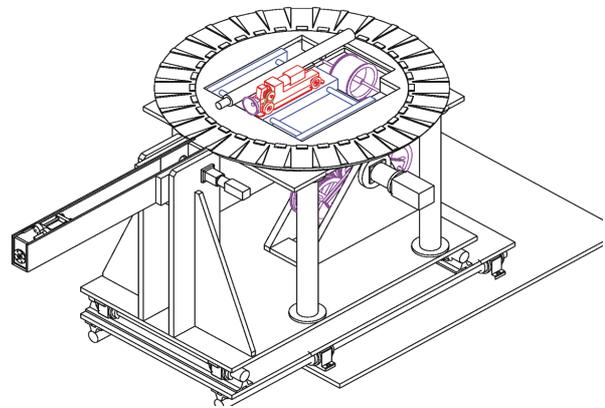


Figure 5 : Vue détaillée des dispositifs de la plate-forme d'un manipulateur dans l'option comportant un véhicule avec ventouse pour extraire les briques de la structure porteuse.