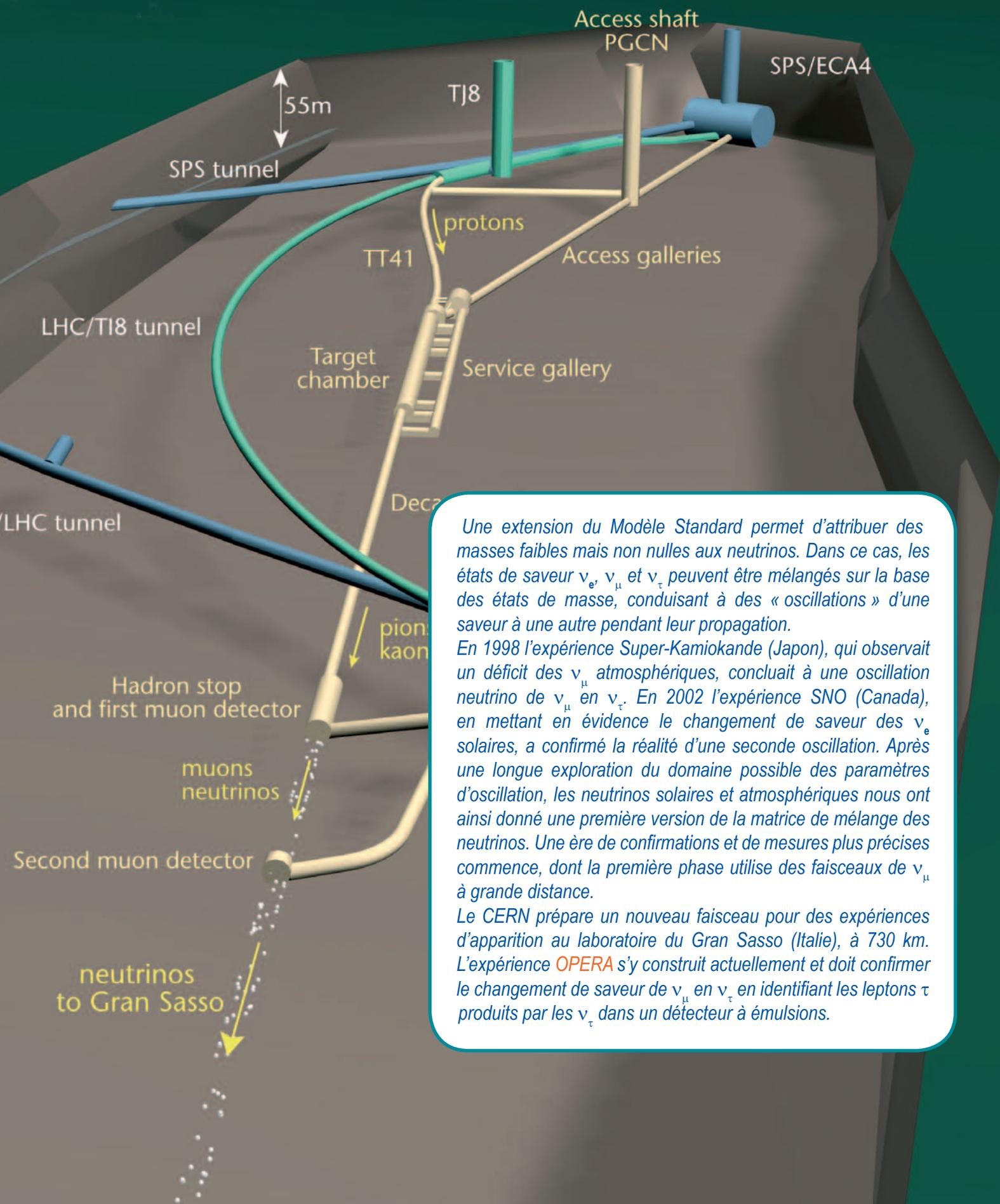


# La physique des neutrinos



Une extension du Modèle Standard permet d'attribuer des masses faibles mais non nulles aux neutrinos. Dans ce cas, les états de saveur  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$  peuvent être mélangés sur la base des états de masse, conduisant à des « oscillations » d'une saveur à une autre pendant leur propagation.

En 1998 l'expérience Super-Kamiokande (Japon), qui observait un déficit des  $\nu_\mu$  atmosphériques, concluait à une oscillation neutrino de  $\nu_\mu$  en  $\nu_\tau$ . En 2002 l'expérience SNO (Canada), en mettant en évidence le changement de saveur des  $\nu_e$  solaires, a confirmé la réalité d'une seconde oscillation. Après une longue exploration du domaine possible des paramètres d'oscillation, les neutrinos solaires et atmosphériques nous ont ainsi donné une première version de la matrice de mélange des neutrinos. Une ère de confirmations et de mesures plus précises commence, dont la première phase utilise des faisceaux de  $\nu_\mu$  à grande distance.

Le CERN prépare un nouveau faisceau pour des expériences d'apparition au laboratoire du Gran Sasso (Italie), à 730 km. L'expérience OPERA s'y construit actuellement et doit confirmer le changement de saveur de  $\nu_\mu$  en  $\nu_\tau$  en identifiant les leptons  $\tau$  produits par les  $\nu_\tau$  dans un détecteur à émulsions.



# Expérience OPERA sur le faisceau neutrino CNGS du CERN

## Participation du LAPP

**Expérimentateurs :** J. Damet, A. Degré, D. Duchesneau, J. Favier, **H. Pessard**

**Equipe technique :** G. Gaillard, R. Gallet, L. Giacobone, T. Le Flour, S. Lieunard, I. Monteiro, F. Moreau, P. Mugnier, F. Peltier

**Doctorant :** M. Lavy

**Stagiaires :** B. Elkassaby, M. Faivre, D. Goujet, O. Ménagé, G. Ordureau, M. Porez, M. Soljanek-Métral

## Abstract

*In the oscillation parameter range revealed by atmospheric neutrinos, investigations are pursued in Europe for the confirmation of the neutrino flavour change, by looking for tau-neutrino appearance in a beam of muon-neutrinos. The construction of the long baseline neutrino beam CNGS from CERN to the Gran Sasso underground laboratory in Italy is progressing well and the beam will deliver its particles for physics by the summer of 2006. OPERA is an experiment designed to detect tau-neutrinos using targets made of lead and nuclear photographic emulsions, complemented by electronic detectors. A group at LAPP contributes to this project. It actively participates in the realisation of the detector, as well as in the preparation of the analysis. Its contribution to the detector is the development and the construction of a system of automated manipulators for the emulsion targets.*

## A la poursuite des oscillations de neutrinos atmosphériques

À la suite de la découverte en 1998 de la disparition des neutrinos atmosphériques de type muon par Super-Kamiokande, plusieurs projets d'expériences à longue distance sur faisceaux neutrino d'accélérateurs se sont développés dans le monde, pour confirmer le phénomène et son explication par des oscillations de neutrinos. En Asie et aux Etats-Unis les projets se sont axés sur de nouvelles mesures de la disparition des  $\nu_\mu$ . Au CERN, le choix européen a été de mesurer l'apparition de  $\nu_\tau$  pour mettre en évidence le changement de saveur favorisé par les données de Super-Kamiokande. La zone à 90% de confiance des paramètres de cette oscillation s'est à présent beaucoup réduite mais l'hypothèse d'oscillation en  $\nu_{\text{stérile}}$  n'est pas exclue jusqu'à une proportion de 45 %.

Poursuivant la recherche sur les oscillations neutrinos après Bugey, Chooz et NOMAD, une équipe du LAPP s'est engagée dès 1998 dans les groupes de travail qui ont élaboré le programme expérimental européen. La possibilité d'exploiter un détecteur massif situé dans le site souterrain du Gran Sasso, à 730 km du CERN, a été étudiée. Le choix final des équipes françaises d'Annecy, Lyon, Orsay et Strasbourg et de groupes européens et japonais est OPERA. Ce projet mesurera l'apparition de  $\nu_\tau$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$  dirigé du CERN vers le Gran Sasso, le CNGS.

La proposition d'expérience OPERA a été approuvée par les comités d'expériences en septembre 2000 et le groupe du LAPP prépare activement l'expérience dont le démarrage est prévu mi-2006. La construction du faisceau CNGS est déjà bien avancée, celle du détecteur OPERA a débuté en mai 2003.

## L'expérience OPERA

L'objectif principal de l'expérience OPERA est de prouver l'apparition de  $\nu_\tau$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$ .

Le taux d'apparition apporte également une mesure plus précise des paramètres de l'oscillation. En outre, OPERA est très bien adapté à l'identification des électrons et peut être sensible à l'oscillation  $\nu_\mu - \nu_e$  par apparition de  $\nu_e$ , d'où une contrainte sur un autre paramètre de la matrice MNS de mélange des neutrinos, l'angle  $\theta_{13}$ .

## Les principes de détection dans OPERA

OPERA détecte le  $\nu_\tau$  de façon directe en mesurant la trace du lepton  $\tau$  produit par interaction courant chargé. Cette trace s'étend sur une fraction de millimètre et la seule méthode pour la distinguer dans une cible massive est l'émulsion photographique. Sa résolution de l'ordre du micron permet de voir la « cassure » de trace due à la désintégration. L'industrialisation de la production de films portant des émulsions et les énormes progrès réalisés dans la numérisation automatisée des films ont permis d'envisager une expérience de la taille d'OPERA avec cette technique.

OPERA utilise des cibles élémentaires, ou « briques », composées de 57 films de 10 x 13 cm<sup>2</sup> portant une couche d'émulsion sur chaque face et de 56 feuilles de plomb de 1 mm d'épaisseur. Le projet OPERA met en œuvre 206.000 briques pour assembler une cible de près de 1.800 tonnes. Cette modularité permet de maintenir un alignement relatif très précis pour l'ensemble de détecteurs de traces que constituent les films.

Les sections de cible du détecteur OPERA présentent au faisceau une succession de « murs » de briques et de plans croisés de détecteurs à scintillation. Ces derniers permettront de reconstruire en ligne les traces émises dans l'interaction pour désigner dans quelle brique celle-ci a eu lieu. Les deux sections de cible, comportant 31 plans de briques et autant de plans croisés de 2 x 256 scintillateurs, sont suivies chacune d'un spectromètre à muons instrumenté à l'aide de RPC (Resistive Plate Chambers) et de tubes à dérive.

## L'exploitation du détecteur

Au cours de la prise de données, le nombre de briques candidates à l'analyse atteindra 45 par jour. Les briques candidates sont extraites journalièrement à l'aide d'un système de manipulation automatisé, pour un dépouillement quasi en ligne. La contribution du LAPP à la construction du détecteur OPERA est le développement et la réalisation de ce système. La Figure 1 présente une vue générale du détecteur OPERA où l'on voit un des deux manipulateurs circulant de chaque côté du détecteur, formé d'un portique permettant l'élévation verticale d'une plate-forme de manipulation.

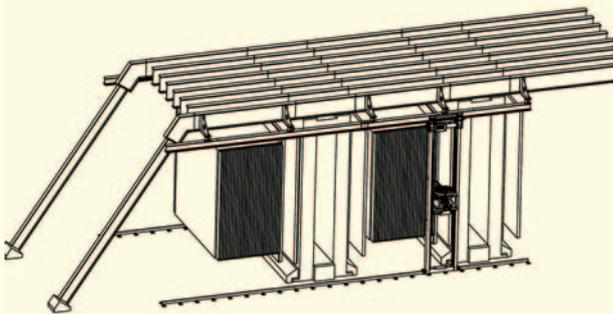


Figure 1 : Dessin du détecteur OPERA implanté dans le hall C du site du Gran Sasso.

Les cibles comportent dans une enveloppe séparée et amovible un film supplémentaire dont l'examen sert à la décision définitive d'envoi de la brique à l'analyse. La numérisation des films amovibles sera effectuée dans un ou deux grands centres. Celle des films internes aux briques aura lieu dans les différents laboratoires équipés de microscopes. Les segments numérisés constituant les traces seront produits et publiés immédiatement dans les bases de données de l'expérience. L'analyse des données sera ainsi accessible à l'ensemble des groupes de la collaboration.

Les laboratoires de l'IN2P3 impliqués dans OPERA se sont groupés pour développer un premier centre de numérisation français à Lyon, destiné à leur initiation pour approfondir cette phase différée d'acquisition des données de l'événement et pouvoir par la suite intervenir conjointement dans l'analyse.

## Activités logicielles de préparation d'OPERA

### Travaux de simulation pour l'optimisation du détecteur

Lors de la conception du détecteur, le groupe du LAPP avait réalisé un travail de simulation sur l'effet des interactions du faisceau avec la roche sur le déclenchement. Cette étude a démontré la nécessité d'inclure des plans veto. Ce travail a été poursuivi pour lutter contre les interactions du faisceau avec toute matière autour des cibles, aimants,

supports, etc. Le veto complété par des algorithmes exploitant les informations des scintillateurs permet de réduire le taux accidentel d'extraction de briques à environ 5%, au prix d'une légère diminution de l'efficacité de sélection.

Le groupe a également étudié le taux de traces parasites subsistant dans le film amovible spécial (un mois de mémoire). Les divers fonds physiques ont été simulés, radioactivité du tunnel, du plomb, du radon, influence des cosmiques et des événements associés au faisceau. Cette étude a conduit à proposer une méthode de suivi de la calibration des scintillateurs avec la radioactivité gamma environnante, venant du béton du tunnel. La réalisation pratique de cette calibration a été intégrée au système d'acquisition par nos collègues de l'IPNL.

### Développement du logiciel de simulation d'OPERA

Un autre volet du travail effectué au LAPP concerne la préparation de l'analyse. Le groupe s'est investi dans le développement du logiciel de simulation d'OPERA. Ce travail est orienté vers le traitement des informations qui sortiront des tables de lecture des émulsions sous la forme de segments de traces. Le groupe a mis en place le principe d'une simulation des traces laissées dans les émulsions intégrée au programme général de simulation de l'expérience.

Depuis février 2002 le groupe participe à l'élaboration du programme de simulation officiel d'OPERA. Il a pris en charge la partie concernant la simulation des briques cibles d'OPERA. Ce travail est illustré par la Figure 2 qui montre les traces reconstruites dans les films d'émulsions pour un événement courant chargé.

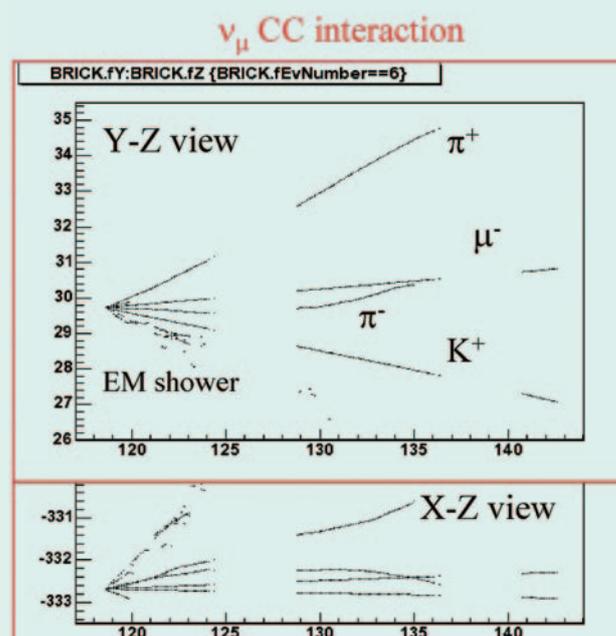


Figure 2 : Visualisation d'un événement courant chargé simulé dans les films d'émulsions.

### Développement de méthodes d'analyse avec les émulsions

L'équipe du LAPP a poursuivi l'étude de la méthode de mesure des impulsions des particules chargées basée sur la diffusion multiple dans les plaques de plomb des cibles. La mesure dans les émulsions des déviations subies par une particule 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. Des données réelles d'émulsions exposées en faisceau ont été analysées et ont montré le potentiel de cette méthode.

Les derniers développements ont consisté à déterminer la résolution en impulsion en fonction de la longueur de parcours des particules dans les briques. Cette étude a permis de trouver une paramétrisation générale de la résolution en fonction de l'impulsion et du nombre de cellules traversées. Les résultats de cette étude ont été publiés dans des notes internes OPERA.

### Etude du canal de désintégration $\tau^- \rightarrow h^+ h^- \nu_\tau$

Le groupe du LAPP s'implique directement dans l'analyse de physique en développant l'étude du canal de désintégration du tau en 3 hadrons chargés (sujet de thèse de M. Lavy). Ce canal n'avait pas encore été exploité dans OPERA bien que le taux de branchement  $h^+ h^-$  soit de l'ordre de 15 %. Le rapport signal sur bruit est moins favorable que dans les autres canaux, mais une première analyse effectuée au LAPP a montré que son utilisation pourra améliorer les performances actuelles d'OPERA.

### Participation à la réalisation du détecteur OPERA

L'équipe du LAPP a la responsabilité du système de manipulation des éléments de cible de l'expérience OPERA. Ce système a pour fonction d'abord d'installer les 206.000 briques cibles dans leur structure de support, et d'assurer ensuite l'extraction et le remplacement des briques devant être analysées. La première opération doit suivre la cadence de production des briques et durer un an. L'extraction des briques, après le démarrage du CNGS, prévu mi-2006, doit être effectuée chaque jour en un temps limité. Les briques sont positionnées avec une précision du millimètre. Ces points imposent la mise au point d'un système mécanique robuste et précis et d'un automatisme d'opération de fiabilité industrielle.

### Le système de manipulation de briques

La structure supportant les briques se compose de demi-murs verticaux faits de plateaux suspendus par des rubans d'acier. L'accès aux briques ne peut se faire que par les côtés du détecteur et tout ou partie d'une rangée de briques doit être retirée pour accéder à une brique placée plus en profondeur. Dans une première phase, les principes de la manipulation ont été définis et testés. Deux plates-formes,

agissant indépendamment de chaque côté du détecteur, se déplacent verticalement dans des portiques qui circulent parallèlement au faisceau, pour se placer en face d'une rangée déterminée. Les ajustements de position horizontale se font avec des tables croisées qui équipent les plates-formes.

Le principe retenu est de faire glisser les briques, munies de patins, sur les plateaux. La plate-forme comporte un carrousel à 32 cases et un pont pour introduire les briques sur les plateaux à l'aide d'un vérin central puis d'un poussoir interne au pont. Pour extraire les briques, un véhicule muni d'une ventouse ramène une à une les briques sur le carrousel qui contient aussi les briques de rechange. Vérin et véhicule extracteur sont placés côte à côte et échangeables. L'ensemble d'une plate-forme est représenté Figure 3.

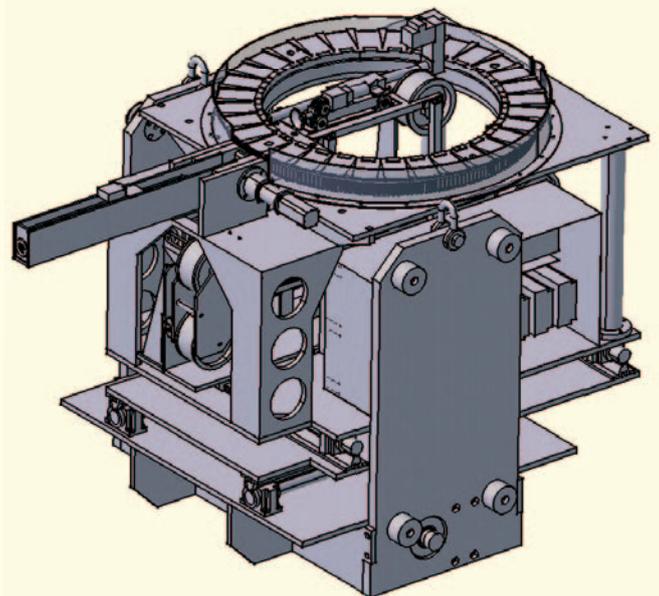


Figure 3 : Dessin général d'une plate-forme de manipulation de briques.

Après une période de validation et de tests, la construction a commencé en 2003. La majeure partie des plates-formes et les structures de déplacement sont fabriquées, le montage des portiques est en cours. La motorisation des différents éléments a été étudiée et mise en place.

### Automatisation et supervision des manipulateurs

L'automatisation est une partie importante de la réalisation du projet. Le groupe du LAPP a acquis des compétences dans ce domaine grâce à P. Aygalinc, enseignant chercheur en automatisation à l'ESIA, qui a assuré la formation de l'équipe et prodigué ses conseils. Les manipulateurs intègrent un grand nombre de capteurs pour la sécurité et comme éléments de mesure pour l'asservissement des mouvements. Leur mise en œuvre dans les programmes automatisant les mouvements a été testée à l'aide d'une plate-forme prototype et plus tard avec certains éléments définitifs.

L'automate industriel commandant un manipulateur envoie ses ordres aux actionneurs et reçoit les réponses des capteurs via un bus de terrain Profibus. La programmation des automates à l'aide du logiciel PL7Pro s'est développée au cours des années 2002 et 2003. Les modules de programmes correspondant à divers mouvements ont été écrits et testés. Les séquences des mouvements d'insertion et d'extraction des briques dans les murs sont opérationnelles.

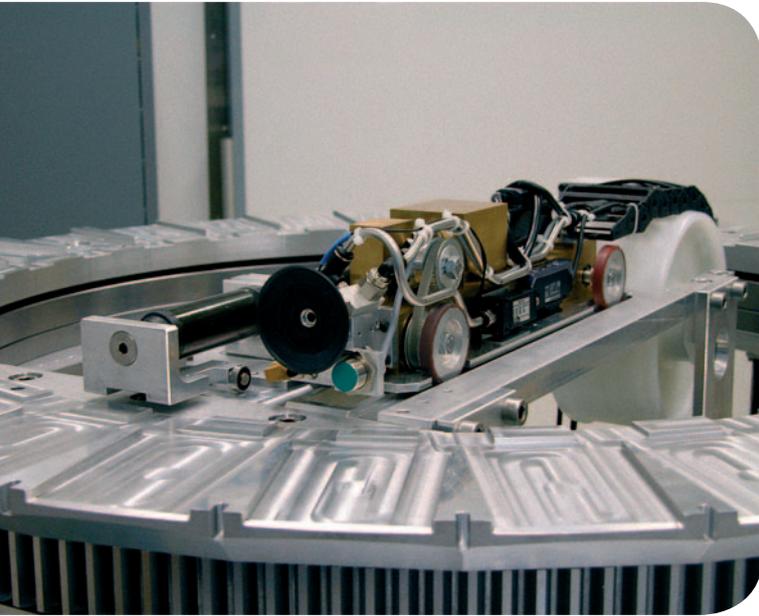


Figure 4 : Le véhicule à ventouse dans sa position de garage au centre du carrousel sur la plate-forme d'un manipulateur. On peut voir la ventouse, le système de contrôle du vide ainsi que quelques capteurs. L'extrémité du vérin principal, monté sur un axe parallèle, est visible sur la gauche.

Un programme de supervision des automates a également été développé depuis mars 2003. Ce programme organise le travail des deux automates à partir des directives globales reçues, transmet aux automates les séquences à exécuter, reçoit et répercute les comptes-rendus de mission et les identificateurs des briques pour la mise à jour en ligne des données de position des briques.

### Système de base de données de manipulation des briques

Depuis mai 2003 le groupe développe un système de base de données pour la manipulation des briques. Ce système permettra de suivre la manipulation des briques et des feuilles amovibles dès leur entrée sur le manipulateur et tout au long de leur parcours jusqu'à leur envoi au développement.

Le parcours des briques impose de prendre en compte les

procédures ayant lieu à différents endroits (salle de stockage des briques, laboratoire d'analyse des films amovibles etc.). La manipulation est effectuée par divers acteurs humains ou informatiques, le principal étant le système manipulateur du LAPP. Les tâches principales de ce système sont de :

- Transmettre au superviseur les ordres venant de l'extérieur, par exemple la liste des briques à extraire.
- Récupérer les données pour mettre à jour la base de données de manipulation des briques.
- Communiquer avec les autres systèmes en rapport avec le manipulateur et la base de données.
- Fournir des informations sur les positions des briques, le contenu des murs etc. au cours du temps, à travers un certain nombre d'interfaces utilisateurs.

### Conclusions et perspectives

Un groupe du LAPP participe à l'expérience OPERA actuellement en construction pour mesurer par apparition les oscillations neutrino dans le faisceau CNGS du CERN vers le site du Gran Sasso. Le groupe construit et met au point le système manipulateur de cibles de l'expérience. Cette réalisation est une contribution unique au détecteur OPERA.

Le groupe OPERA est aussi impliqué au niveau des simulations pour l'optimisation du détecteur et la préparation de l'analyse des données, en particulier dans l'exploitation des informations recueillies dans les émulsions. La participation du LAPP à l'analyse des émulsions se situe dans un effort concerté des laboratoires français impliqués dans l'expérience.

Dans l'avenir le groupe souhaite participer, à l'issue de cette phase de construction et de préparation et quand son renforcement par d'autres chercheurs le permettra, à des projets neutrinos futurs utilisant des faisceaux intenses de neutrinos.



Collaboration internationale regroupant 33 instituts dont 4 laboratoires français : LAPP Ancey, IPN Lyon, LAL Orsay, IReS Strasbourg.

Pour en savoir plus  
<http://www.lapp.in2p3.fr/Opera/index.html>