

# Première analyse du canal hadronique $\tau \rightarrow 3$ hadrons dans l'expérience OPERA

M. Lavy

► **To cite this version:**

M. Lavy. Première analyse du canal hadronique  $\tau \rightarrow 3$  hadrons dans l'expérience OPERA. Journées Jeunes Chercheurs, Nov 2003, La-Roche-en-Ardennes, France. pp.93-96. in2p3-00025215

**HAL Id: in2p3-00025215**

**<http://hal.in2p3.fr/in2p3-00025215>**

Submitted on 12 Dec 2005

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Première analyse du canal hadronique $\tau \rightarrow 3$ hadrons dans l'expérience OPERA

Murièle LAVY

Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules, LAPP



## Résumé

OPERA est une expérience sur faisceau de neutrinos produit au CERN. Ce faisceau parcourt une distance de 732 km, c'est pourquoi on parle de "long baseline experiment". OPERA a pour objectif la première observation directe d'apparition de neutrinos  $\nu_\tau$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$ . Cette observation permettrait de corroborer les hypothèses d'oscillation qui ont été avancées pour expliquer le déficit de neutrinos atmosphériques observé par l'expérience Super-Kamiokande[1]. Après une brève description du faisceau de neutrinos, j'expliquerai rapidement le principe de l'expérience OPERA. Dans une deuxième partie, je détaillerai une première analyse du canal de désintégration hadronique du tau en trois hadrons.

## 19.1 Introduction

### 19.1.1 Le faisceau de neutrinos CNGS

Le projet CNGS[2](CERN Neutrino to Gran Sasso) a pour but de produire un faisceau de neutrinos  $\nu_\mu$  au CERN et de le diriger vers le laboratoire souterrain du Gran Sasso(LNGS), où se trouve le détecteur OPERA [3]. Les neutrinos interagissant très peu avec la matière, le faisceau va traverser l'écorce terrestre sur 732 km sans être atténué. L'angle entre l'axe du faisceau et l'horizontale au Gran Sasso est de  $3.2^\circ$ . Ce faisceau de neutrinos dont la gamme d'énergie est 3-100 GeV est optimisé pour l'apparition de neutrinos  $\nu_\tau$ . L'énergie moyenne du faisceau est de 17 GeV et 98% des neutrinos ont une énergie supérieure à 3,5 GeV permettant d'être au-delà du seuil de production d'un lepton  $\tau$ .

**Production du faisceau :** Ce faisceau de neutrinos est généré en envoyant des protons de 400 GeV sur une cible de graphite. Les particules secondaires résultant de cette interaction, principalement des pions et des kaons, sont focalisés par un système de cornes magnétiques en direction du Gran Sasso. Ces particules secondaires se désintègrent ensuite dans un tube à vide de 1 km de long, produisant ainsi les neutrinos. Enfin un arrêt de faisceau permet de stopper les hadrons restants.

**Caractéristiques du faisceau :** Le nombre d'interactions  $\nu_\mu$  courant chargé est déterminé grâce à la section efficace de cette interaction et à la connaissance du flux de  $\nu_\mu$  du CNGS arrivant au Gran Sasso. La

probabilité d'oscillation  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  donnée ici<sup>1</sup> :

$$\mathcal{P}_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(L, E) \approx \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2 L}{E}\right)$$

où  $\theta_{23}$  est l'angle de mélange et  $\Delta m^2$  la différence des masses au carré, et la section efficace  $\nu_\tau$  courant chargé permettent d'estimer le nombre d'interactions  $\nu_\tau$  courant chargé dans le détecteur OPERA. Le nombre d'évènements attendus dans OPERA pour une année est indiqué dans la Table 19.1 pour différentes valeurs de  $\Delta m^2$ .

Nombre d'interactions neutrinos par an		
$\nu_\mu$ courant chargé		7993
$\nu_\tau$ courant chargé	$\Delta m^2 = 1,3 \cdot 10^{-3} eV^2$	11
	$\Delta m^2 = 2 \cdot 10^{-3} eV^2$	25
	$\Delta m^2 = 3 \cdot 10^{-3} eV^2$	56
$\nu_\mu$ courant neutre		2665

TAB. 19.1 – Nombre d'interactions neutrinos attendus dans le détecteur OPERA sur une année.

### 19.1.2 L'expérience OPERA

Pour mettre en évidence l'oscillation  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ , OPERA cherche à détecter un lepton  $\tau$  provenant d'une interaction  $\nu_\tau$  courant chargé. Comme le temps de vie du  $\tau$  aux énergies du CNGS est de l'ordre de  $1,6 \cdot 10^{-12}$  s, ce qui correspond à une longueur de parcours de 480  $\mu\text{m}$ , des émulsions photographiques dont la précision atteint le micron sont utilisées. Une base plastique de 200 microns sur laquelle sont fixées de chaque coté des couches d'émulsions photographiques de 50  $\mu\text{m}$  constitue un film d'émulsion. Une brique est constituée de 57 films d'émulsions intercalés avec 56 plaques de plomb de 1 mm. Ces briques sont assemblées pour former des murs. Des détecteurs électroniques (scintillateurs plastique) sont placés derrière chacun des ses murs pour signer le passage des particules et désigner la brique où a eu lieu l'interaction. La brique est alors retirée et, après développement, les émulsions de cette brique sont scannées pour reconstruire l'évènement.

Le détecteur OPERA est constitué d'environ 200 000 briques Plomb-émulsion. La masse résultante de 1.8 kilotonnes permet de favoriser les interactions des neutrinos. Le détecteur possède également deux spectromètres magnétiques dans lesquels sont placés des

<sup>1</sup>L est en km et E en GeV

chambres RPC et des tubes à dérive pour mesurer la charge et l'impulsion des muons les traversant. Les performances attendues pour le détecteur OPERA en 5 ans de fonctionnement sont reportées dans la table 19.2 pour différents  $\Delta m^2$ .

Canal	signal			$\epsilon$ .BR	Bruit de fond
	$\Delta m^2 \ 10^{-3} eV^2$				
	1,3	2,0	3,0		
e	1,8	4,1	9,2	3,4%	0,31
$\mu$	1,4	3,4	7,6	2,8%	0,33
h	1,5	3,5	7,8	2,9%	0,42
total	4,7	11,0	24,6	9,1%	1,06

TAB. 19.2 – Performances du détecteur OPERA pour 5 ans de prises de données

Le canal de désintégration  $\tau \rightarrow 3$  hadrons chargés n'est pas pris en compte actuellement dans les performances du détecteur OPERA (Table 19.2). La partie suivante présente la première analyse de ce canal qui est également le sujet de ma thèse. Cette analyse est effectuée à partir d'évènements Monte Carlo générés selon les caractéristiques du faisceau CNGS.

## 19.2 Première analyse du canal de désintégration $\tau \rightarrow 3$ hadrons

### 19.2.1 Canal de désintégration $\tau \rightarrow 3h$ et bruit de fond

Le taux de branchement de ce canal est de 15%, il est plus faible que ceux des autres canaux (Table 19.3) et le bruit de fond est important comme on le verra dans la suite, cependant l'analyse de ce canal peut contribuer à améliorer la sensibilité de l'expérience.

$\tau^- \rightarrow e^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_e$	17.5%
$\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_\mu$	17.5%
$\tau^- \rightarrow h^- + \nu_\tau$	50%
$\tau^- \rightarrow h^- + h^- + h^+ + \nu_\tau$	15%

TAB. 19.3 – Canaux de désintégration du  $\tau$ .

Le bruit de fond provient principalement des particules charmées  $D^+$ ,  $D_s^+$ ,  $\Lambda_c^+$  produites dans les interactions  $\nu_\mu$  courant chargé pour lesquelles le muon n'est pas détecté<sup>2</sup> et dans les interactions  $\nu_\mu$  courant neutre. La topologie de ce type d'évènement est très similaire à une interaction  $\nu_\tau$  courant chargé comme l'illustrent les figures 19.1 et 19.2. La seule différence, puisque les particules charmées et le tau ont une masse et un temps de vie similaire, est l'énergie manquante du  $\nu_\tau$  produit lors de la désintégration du  $\tau^-$ .

<sup>2</sup>95% des muons dont l'impulsion est supérieur à 1 GeV sont détectés

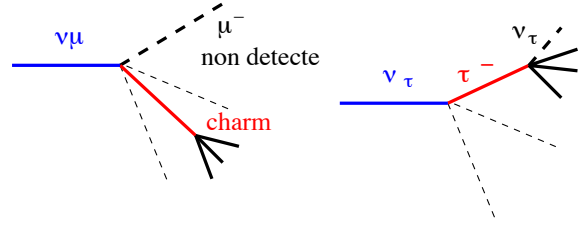


FIG. 19.1 – Interaction  $\nu_\mu$  courant chargé avec une particule charmée. FIG. 19.2 – Interaction  $\nu_\tau$  courant chargé.

Les interactions  $\nu_\mu$  courant chargé dans lesquelles des particules charmées sont produites représentent 3,3% du total des interactions  $\nu_\mu$  courant chargé total, soit 265 évènements par an, à comparer avec les 25 évènements  $\nu_\tau$  courant chargé attendus pour un an, en prenant  $\Delta m^2 = 2.10^{-3} eV^2$ . Dans les deux analyses présentées ici, seuls les évènements pour lesquels la désintégration est longue sont sélectionnés. Les particules charmées et le tau ont une désintégration dite "longue" lorsqu'ils traversent au moins un film d'émulsion avant de se désintégrer, ils peuvent ainsi être détectés.

### 19.2.2 Analyse cinématique avec coupures séquentielles

Des variables cinématiques utilisant la seule différence topologique entre le fond (particules charmées) et le signal ( $\tau$ ), à savoir l'énergie manquante du neutrino, sont utilisées pour développer cette analyse.

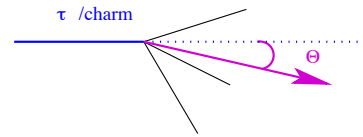


FIG. 19.3 – Angle entre la somme vectorielle (représentée par la flèche) des impulsions de particules issues de la désintégration et la direction initiale de la particule se désintégrant.

La première variable cinématique est l'angle entre la somme vectorielle des impulsions des particules issues de la désintégration et la direction initiale de la particule "mère". Cette variable  $\Theta$  est représentée sur la figure 19.3. On comprend que si les impulsions des particules sont bien reconstruites, l'angle  $\Theta$  est proche de zéro pour les particules charmées puisqu'il n'y a pas d'énergie manquante, alors que pour le signal, cet angle est différent de zéro. C'est ce que montre la figure 19.4 sur laquelle cette variable  $\Theta$  est représentée pour le signal en haut et pour le fond en bas.

La moyenne de la variable  $\Theta$  est de 0.047 rad pour les particules charmées et de 0.052 rad pour le signal<sup>3</sup>. Néanmoins, la différence entre le fond et le signal est suffisante pour faire une coupure. Si on demande un angle total supérieur à 0.02 rad, on garde 80% du signal

<sup>3</sup>La résolution en impulsion sur les traces reconstruites est de  $\frac{\Delta P}{P} = 20\%$  dans cette analyse

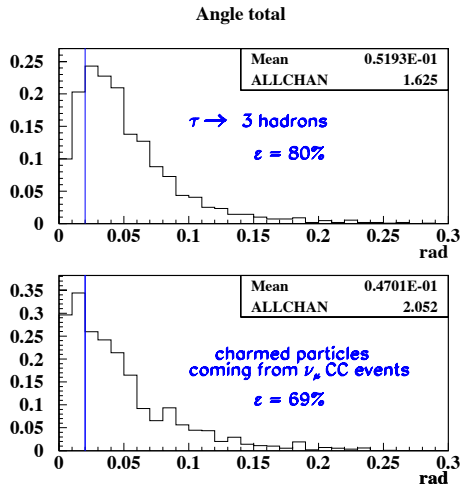


FIG. 19.4 – Angle entre la somme vectorielle des impulsions de particules issues de la désintégration et la direction initiale de cette particule pour le signal (haut) et pour le fond (bas).

et on rejette déjà 31% du fond. Deux autres variables cinématiques sont utilisées dans cette analyse :

- l’impulsion transverse totale  $P_{trans}$
- l’énergie totale  $Etot$  des particules issues de la désintégration

Pour discriminer le signal du fond, on requiert une impulsion transverse totale supérieure à 0.3 GeV et une énergie totale supérieure à 7 GeV. Cette variable est d’ailleurs représentée sur la figure 19.5 avec toutes les coupures mentionnées précédemment. La distribution avec le pic le plus élevé correspond à la somme (signal+fond), celle située en dessous correspond au fond uniquement. La différence entre ces deux distributions représente donc le signal.

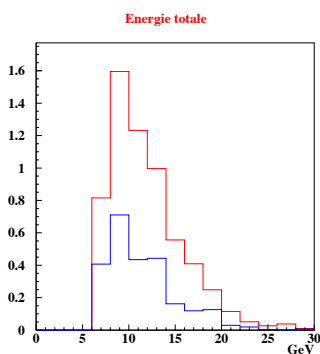


FIG. 19.5 – Energie totale des particules issues de la désintégration de particules charmées ou du tau.

Les efficacités pour le signal et le fond, ainsi que la pureté sont indiquées de manière séquentielle pour chaque coupure dans la Table 19.4. Le nombre d’évènements attendus dans le détecteur OPERA pour 5 ans de fonctionnement est également mentionné pour le signal et le fond.

Avec cette analyse basée sur des coupures cinématiques appliquées séquentiellement, on obtient une ef-

	$\epsilon_\tau$	$N_\tau$	$\epsilon_c$	$N_c$	Pureté
coupures 0	30%	8	2.4%	10.5	47%
$\Theta > 0.02$ rad	24%	6.5	1.6%	7	48%
$P_{trans} > 0.3$ GeV	20%	5.5	1.1%	4.5	53%
$Etot > 7$ GeV	13%	3.5	0.6%	2.5	59%

TAB. 19.4 – Efficacités pour le signal  $\epsilon_\tau$  et le fond  $\epsilon_c$ , nombre d’évènements attendus dans le détecteur OPERA (signal :  $N_\tau$ , fond  $N_c$ ) et pureté pour chaque coupure et pour 5 ans de fonctionnement.

ficacité de 13% pour une pureté de 59%. Ce n’est pas suffisant pour que le canal  $\tau \rightarrow 3h$  soit compétitif avec les autres canaux. Il faudrait une efficacité de l’ordre de 10% avec une pureté approchant les 80%. C’est pour atteindre cet objectif que j’ai développé une autre analyse cinématique se basant cette fois sur une variable de vraisemblance.

### 19.2.3 Analyse cinématique avec variable de vraisemblance

Dans cette partie, je définis la variable de vraisemblance comme le produit de probabilités issues des quatre variables (eq 19.1) suivantes :

- à nouveau  $\Theta$ ,  $P_{trans}$ ,  $Etot$
- et l’énergie totale de la gerbe hadronique produite lors de l’interaction d’un neutrino :  $Ehad$

En normalisant les distributions de ces 4 variables pour le signal et le fond à 1, on obtient la probabilité que la variable prenne une valeur donnée en utilisant des évènements Monte Carlo générés pour le signal et le fond. La variable de vraisemblance est alors construite par le produit de ces quatre probabilités comme expliqué dans la formule suivante :

$$L = Prob(\Theta = \theta_i) \times Prob(P_{trans} = P_{trans_i}) \times Prob(Etot = Etot_i) \times Prob(Ehad = Ehad_i) \quad (19.1)$$

Ensuite je construis un rapport de vraisemblance qui se définit comme le rapport de la variable de vraisemblance pour le signal sur la somme des variables de vraisemblance pour le signal et le fond. Ce rapport est détaillé dans l’équation 19.2. On comprend que ce rapport tend vers 0 pour le fond et au contraire tend vers 1 pour le signal.

$$R = \frac{L_s(\theta_i, P_{t_i}, E_{t_i}, E_{h_i})}{L_s(\theta_i, P_{t_i}, E_{t_i}, E_{h_i}) + L_f(\theta_i, P_{t_i}, E_{t_i}, E_{h_i})} \quad (19.2)$$

Ce rapport est représenté sur le graphique du haut de la figure 19.6 pour le fond en vert et pour le signal en rouge. On voit effectivement que le signal tend vers 1 et le fond vers 0 mais la discrimination n’est pas franche. Pour estimer l’efficacité et la pureté de cette analyse, j’applique une coupure sur le rapport de vraisemblance. Ainsi, si je demande à ce que ce rapport soit supérieur à 0.7, j’obtiens une efficacité de 14% et une pureté de 64%. Les efficacités et puretés sont indiquées dans le

graphe du bas de la figure 19.6 en fonction de la coupure sur R appliquée et reportées dans la table 19.5.

Coupure sur R	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
Efficacité (%)	29	29	24	14	2
Pureté (%)	45	47	54	64	79

TAB. 19.5 – Efficacité du canal  $\tau \rightarrow 3h$  et pureté en fonction de la coupure sur le rapport de vraisemblance

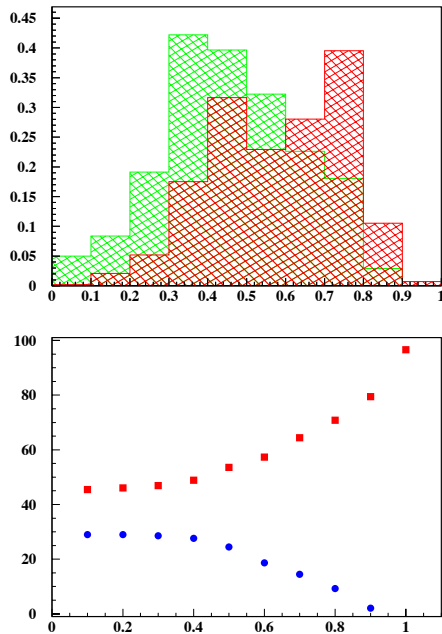


FIG. 19.6 – Rapport de vraisemblance pour le signal en rouge et pour le fond en vert et efficacités et puretés de l'analyse suivant la coupure sur ce rapport

## 19.3 Conclusions

L'analyse avec la variable de vraisemblance est plus performante que celle avec les coupures cinématiques séquentielles mais le résultat reste loin des objectifs désirés pour rendre ce canal aussi performant que les trois autres. D'autres études sont actuellement en cours pour essayer d'améliorer la discrimination signal/fond de ce canal et ainsi augmenter la sensibilité du détecteur OPERA. En particulier, les désintégrations "courtes", c'est à dire qui ne traversent pas un film d'émulsion, vont être intégrées à l'analyse. En effet grâce aux traces laissées par les particules, on peut reconstruire les deux vertex de l'interaction même si ceux-ci sont dans la même plaque de plomb (les particules pointent sur deux points d'interaction) et donc mettre en évidence les particules charmées ou le tau.

## Remerciements

Je remercie chaleureusement les coordinateurs de la session Astroparticules et Neutrinos Céline Boehm et Matthieu de Naurois pour leurs conseils et leur gentillesse. Leur patience et leur bonne volonté ont contribué à rendre cette session très intéressante. Je n'oublie pas le comité d'organisation des JJC 2003 : l'efficacité et le dynamisme des organisateurs nous ont permis d'avoir un cadre de travail très agréable et convivial.

## Références

- [1] K. Okumura, SK atmospheric neutrinos results (NOVE-3 décembre 2003)
- [2] Ed. K. Elsener, The Cern Neutrino beam to Gran Sasso (CNGS) CERN 98-02, INFN/AE-98/05. <http://proj-cngs.web.cern.ch/proj-cngs/>
- [3] The OPERA Collaboration, M. Guler et al., Experiment Proposal, CERN/SPSC 2000-028 LNGS P25/2000