



*L'expérience OPERA et le projet de super
faisceau de neutrinos
SPL-Fréjus*

Antoine Cazes

Università di Padova



ν

La physique des
oscillations de
neutrinos



L'expérience
OPERA



Le projet de super
faisceau *SPL-Fréjus*



Les oscillations de neutrinos

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Si $\nu = \bar{\nu}$ deux phases supplémentaires apparaissent sans intervenir dans les oscillations

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = | \langle \nu_\beta | e^{-iHt} | \nu_\alpha \rangle |^2$$

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = \sum_i |U_{\beta i}|^2 |U_{\alpha i}^*|^2 + \sum_{i \neq j} U_{\beta i} U_{\beta j}^* U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* \exp\left(i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E_\nu}\right)$$

On trouve expérimentalement que : $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2$ et $\theta_{13} \ll 1$

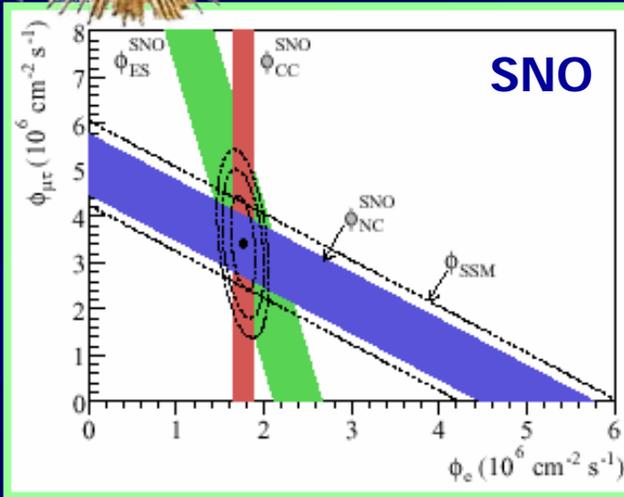


Découplage possible.
Oscillation à deux saveurs.

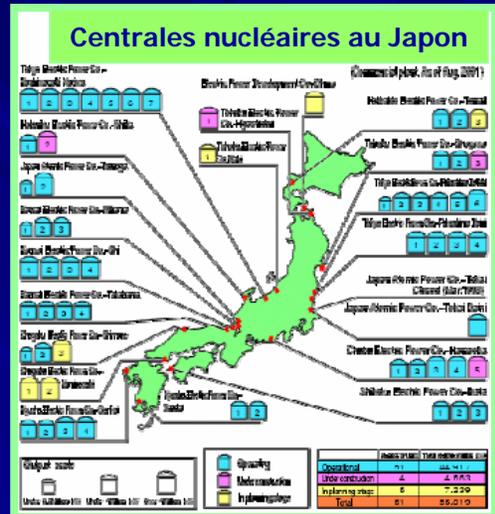
- Neutrino solaire
- Neutrino atmosphérique



Les neutrinos solaires

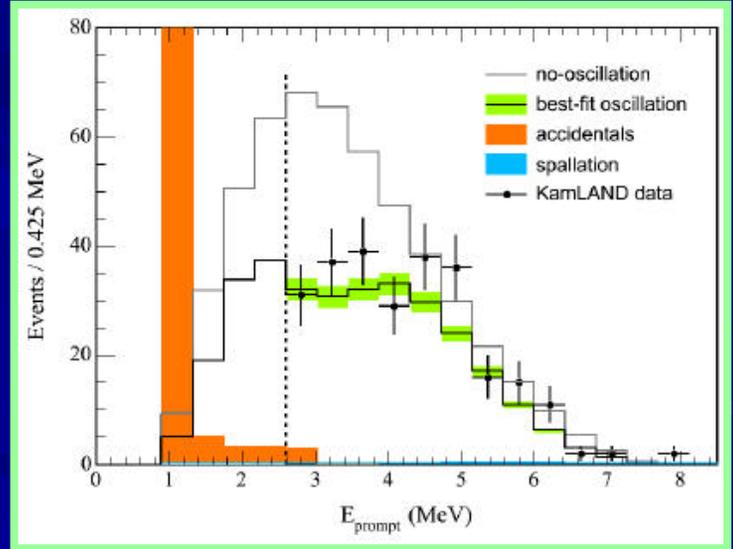


KamLAND: Détecte les anti-neutrinos des centrales nucléaires dans 1 kt de scintillateur liquide.



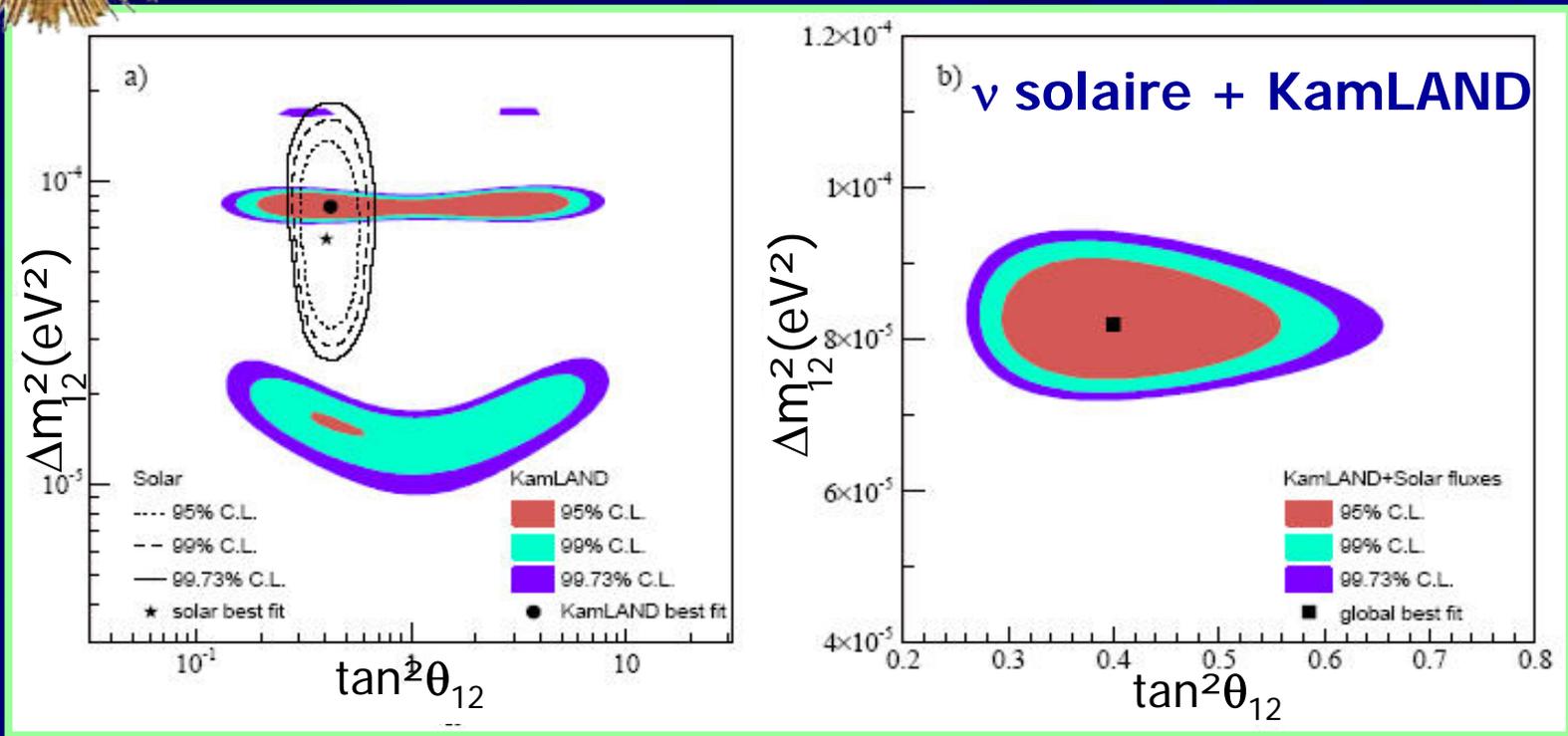
- SNO : 1 kt d'eau lourde
- • Interaction courants neutres
 $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$
 - • Interaction courants chargés
 $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$
 - • Interaction quasi élastique
 $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

} SK, IMB





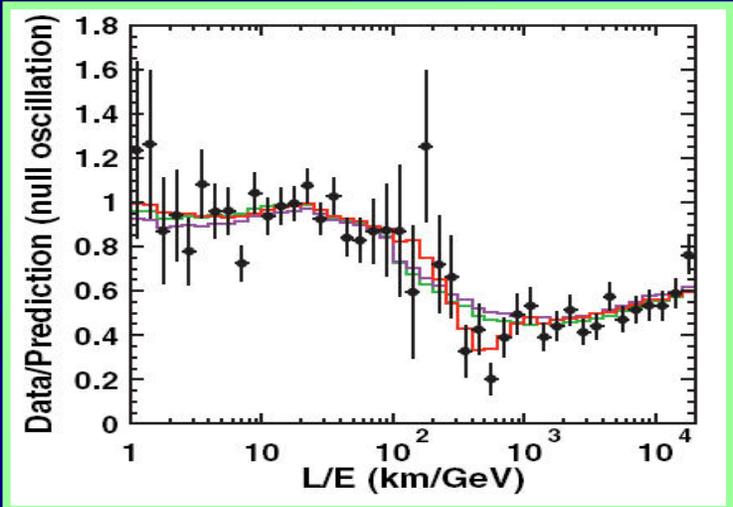
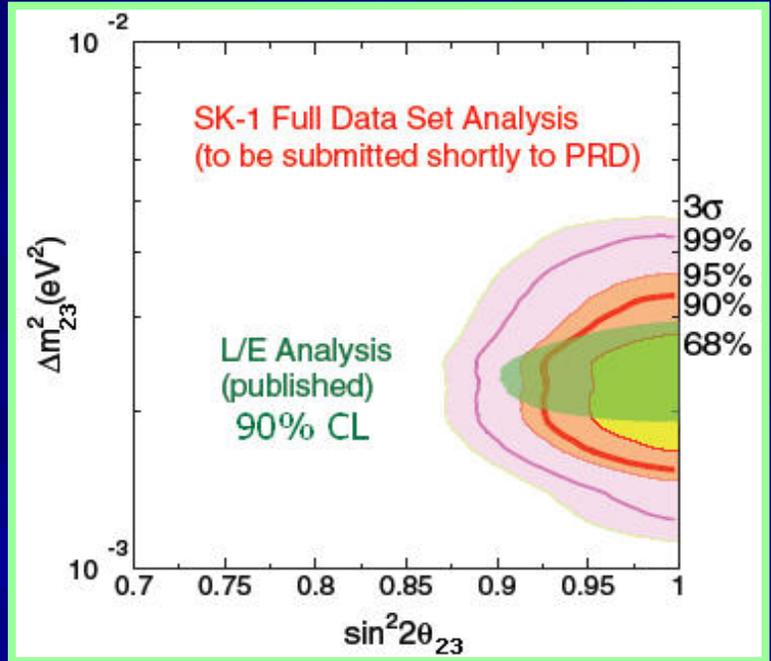
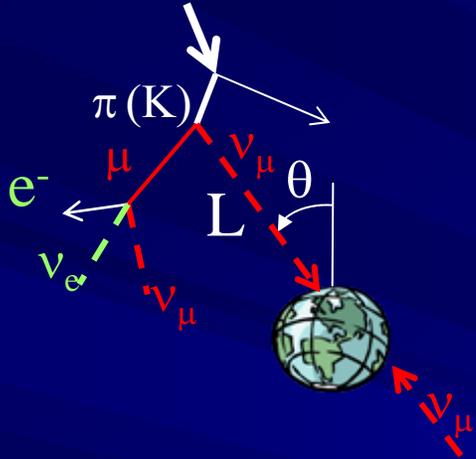
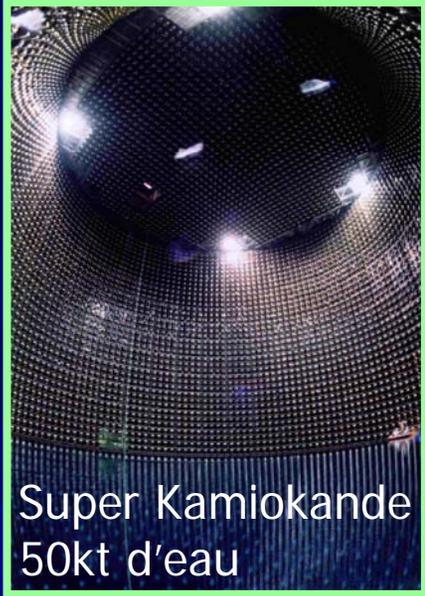
Les neutrinos solaires



L'effet MSW dans le soleil permet de déterminer que $\Delta m_{12}^2 > 0$

$$\Delta m_{12}^2 = 8,2 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2 ; \theta_{12} = 32^\circ$$

Neutrinos atmosphériques

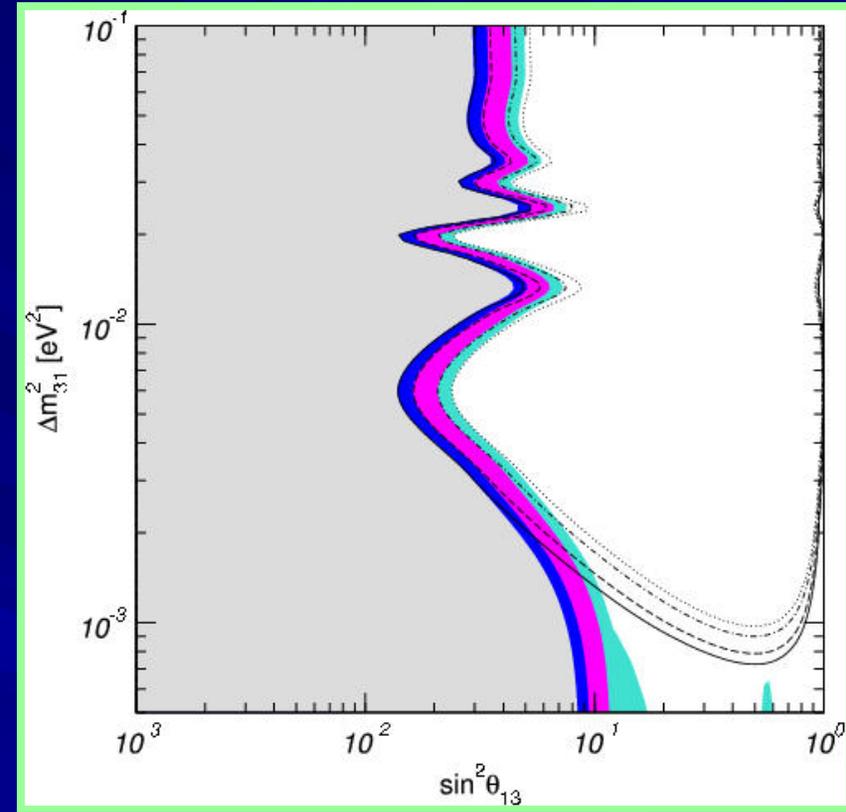
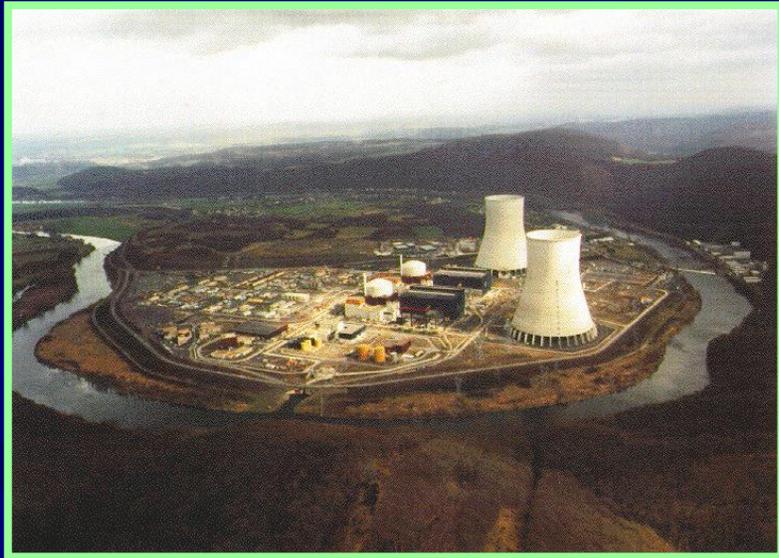


$$\Delta m_{23}^2 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 ; \theta_{23} = 45^\circ$$



Les derniers paramètres inconnus

Le dernier angle θ_{13} n'est toujours pas mesuré, de même que la phase de violation de CP δ_{CP}



CHOOZ + ν solaire + KamLand

$$\theta_{13} < 10^\circ \text{ (90\% CL)}$$



Quelque questions...

- Quel est la valeur de Δm_{23}^2 à 10% près?



MINOS

- En quoi oscille le ν_μ pour Δm_{23}^2 ?



OPERA
ICARUS

- Quelle est la valeur de θ_{13} ?
- Y a-t-il de la violation de CP dans le domaine leptonique?



SPL-Fréjus

$$\mathcal{P}_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}} \simeq \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1,27 \Delta m_{23}^2 L}{E_{\nu}} \right)$$

$$\mathcal{P}_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}} \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1,27 \Delta m_{23}^2 L}{E_{\nu}} \right)$$

$$\triangleright \Delta m_{23}^2 \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$$

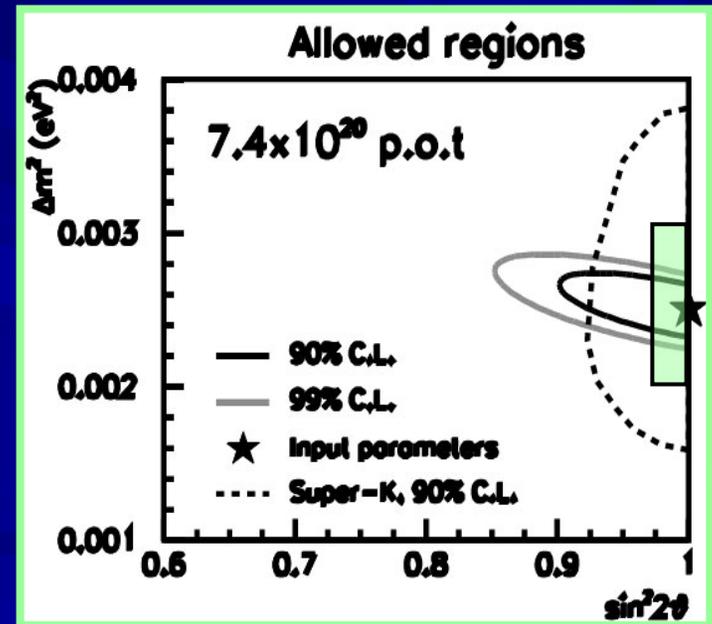
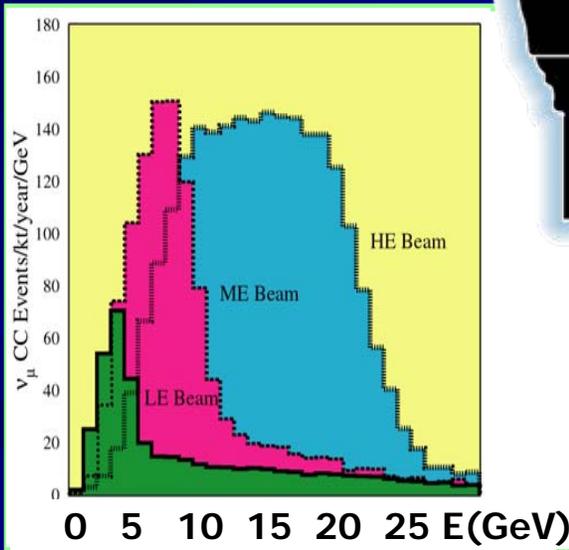
$$\triangleright L = 732 \text{ km}$$

Maximum d'oscillation :

$$E_{\nu} = 1,5 \text{ GeV}$$



MINOS



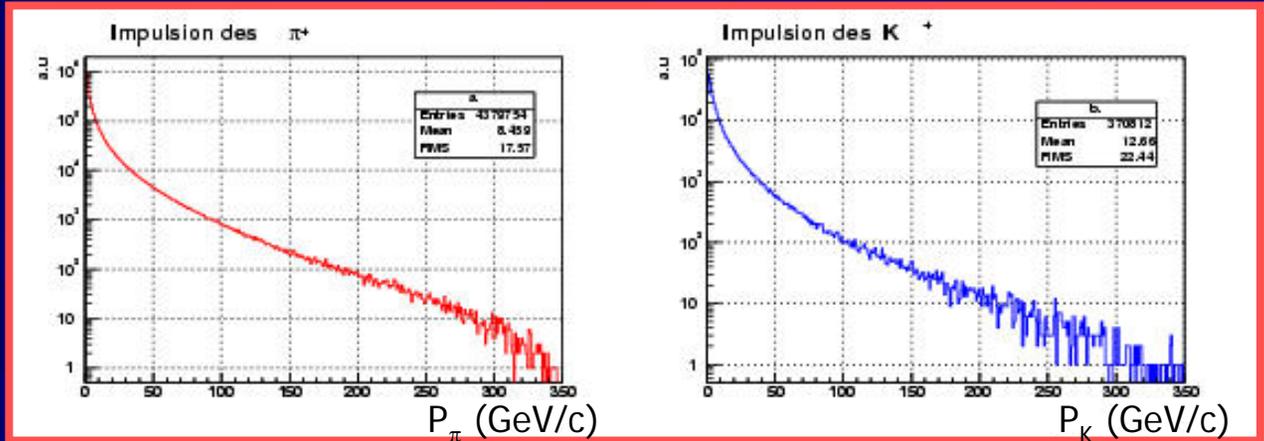
OPERA

- Le faisceau CNGS
- Le détecteur OPERA
- La reconstruction des événements dans les détecteurs électroniques
- Résultats escomptés

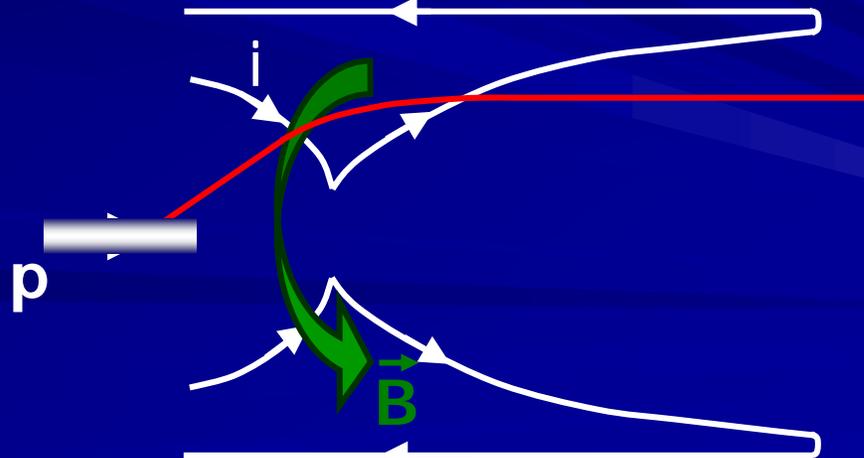


La fabrication d'un faisceau de neutrinos

CNGS : protons de 400 GeV sur une cible de Carbone



Les pions et les kaons d'un signe sont focalisés à l'aide d'une «corne»



S. Van der Meer, 1961

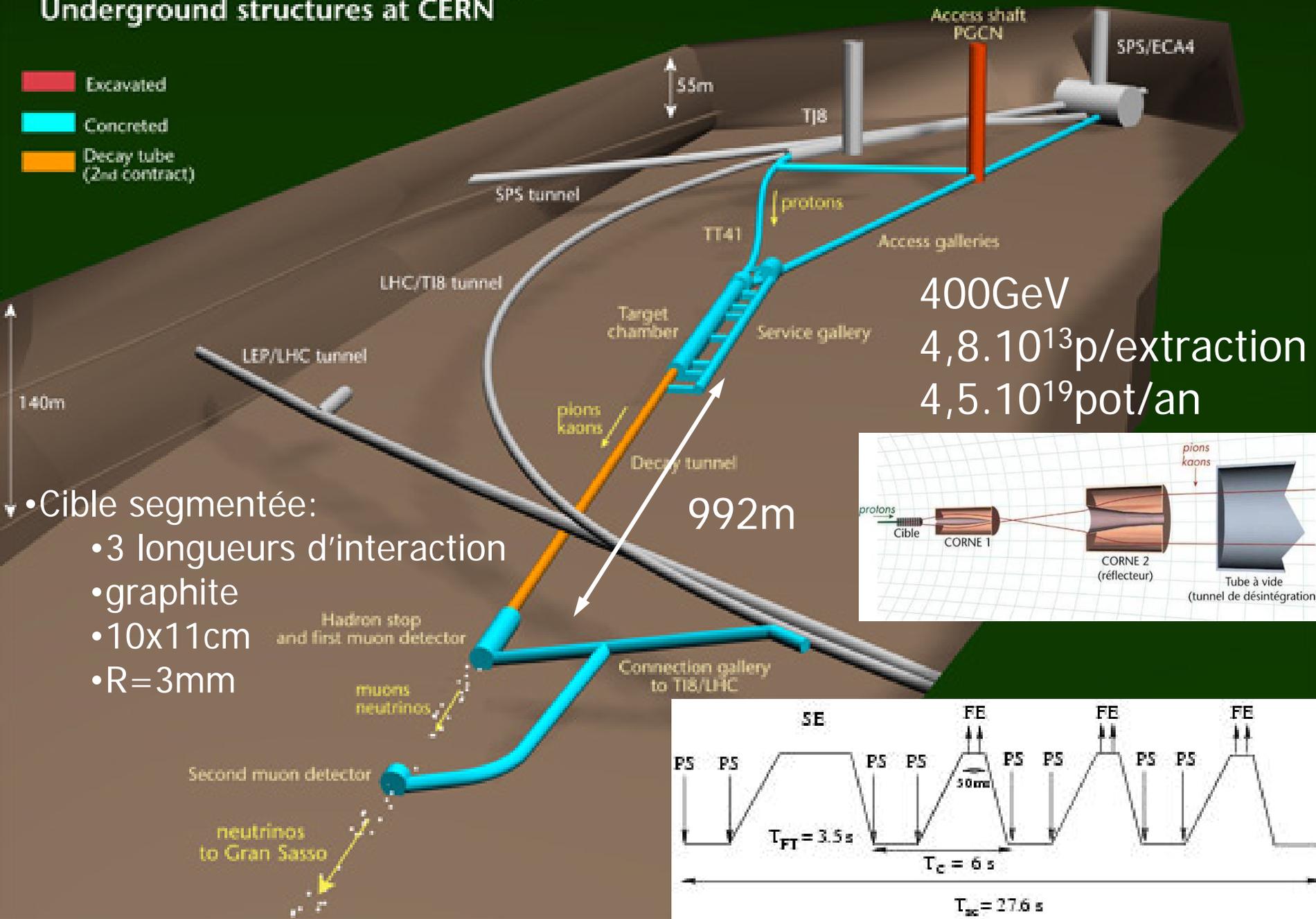
LPSC – 24 mars 2005

Antoine Cazes

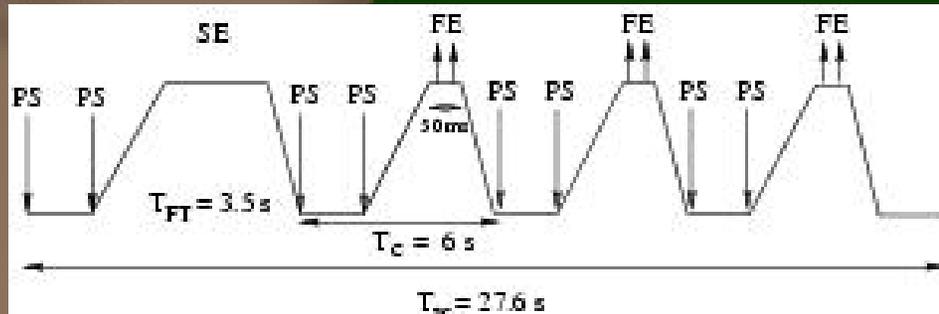
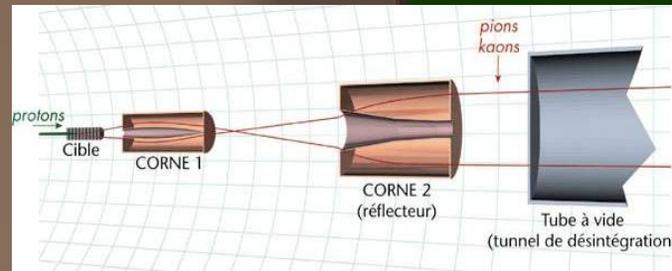
CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO

Underground structures at CERN

- █ Excavated
- █ Concreted
- █ Decay tube (2nd contract)

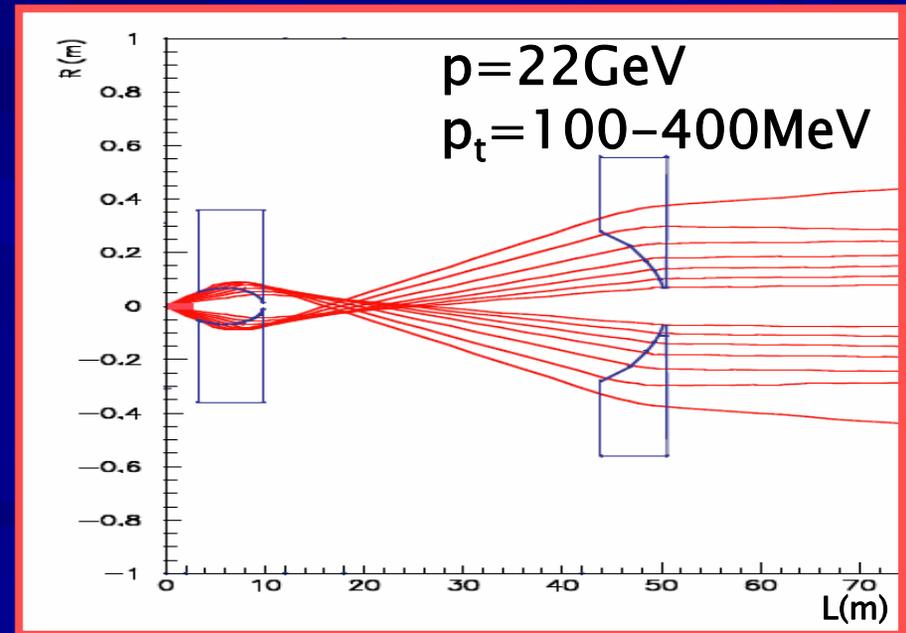
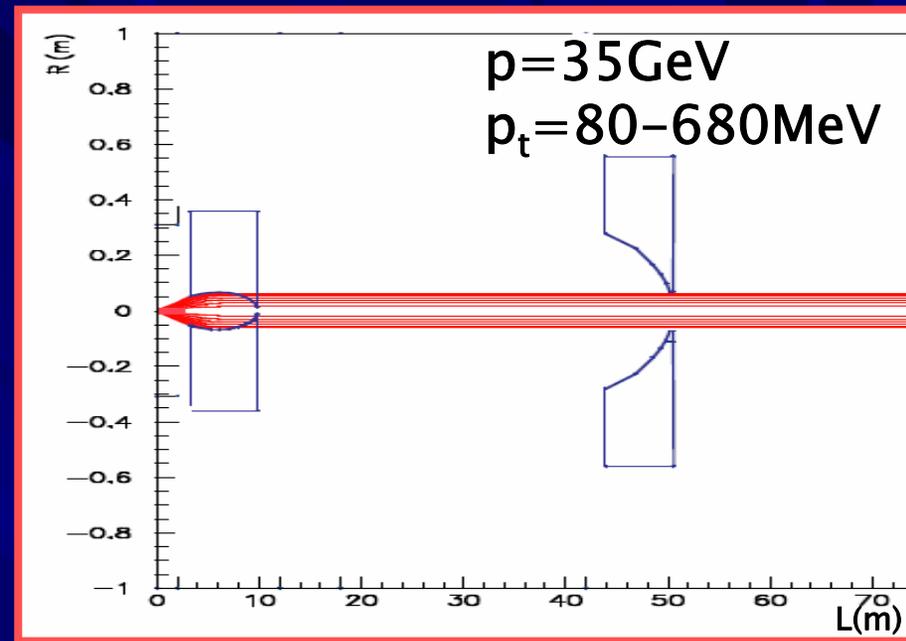
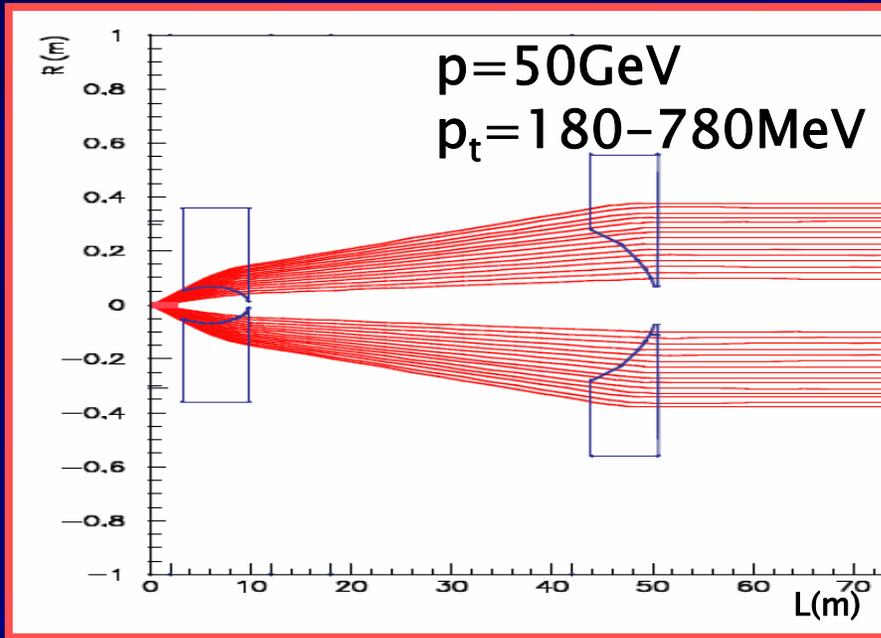


- Cible segmentée:
 - 3 longueurs d'interaction
 - graphite
 - 10x11cm
 - R=3mm



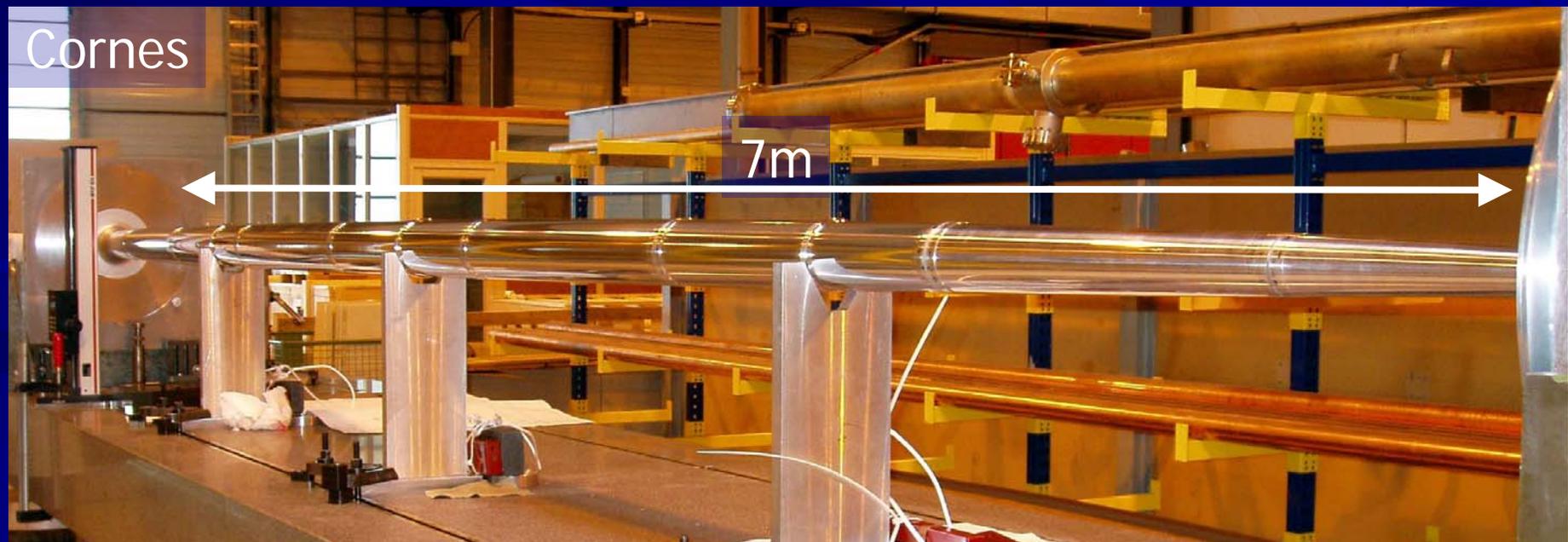
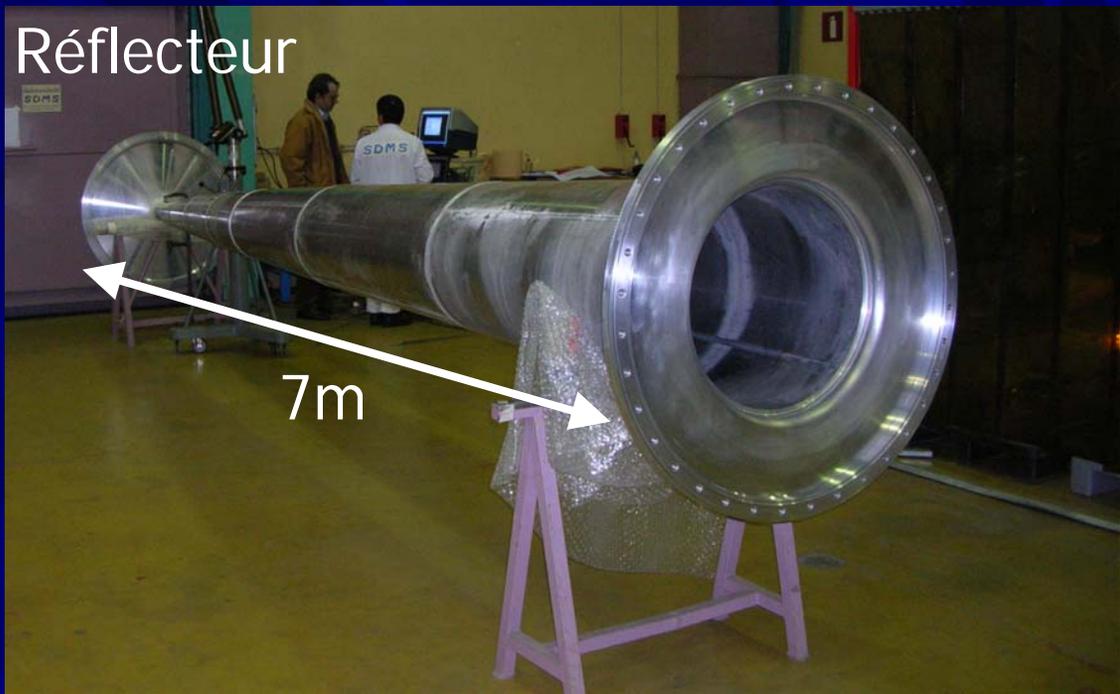


Focalisation des particules



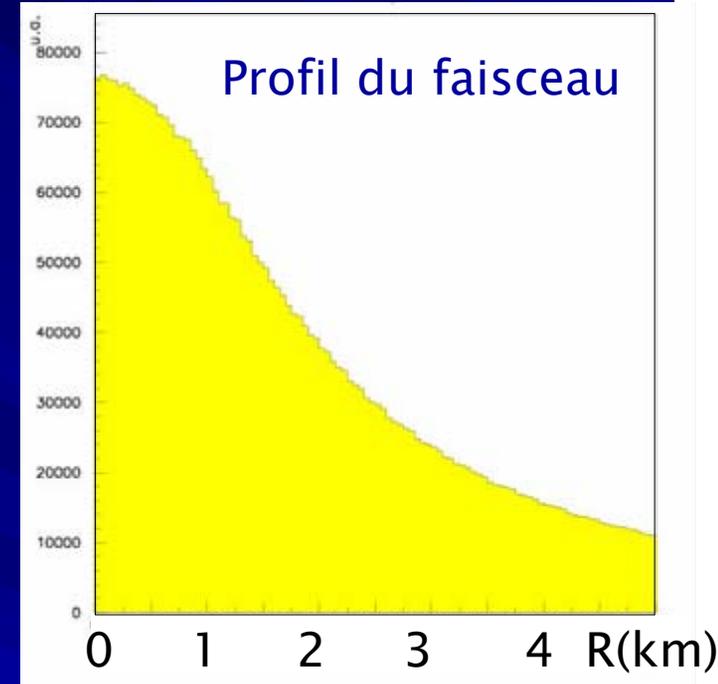
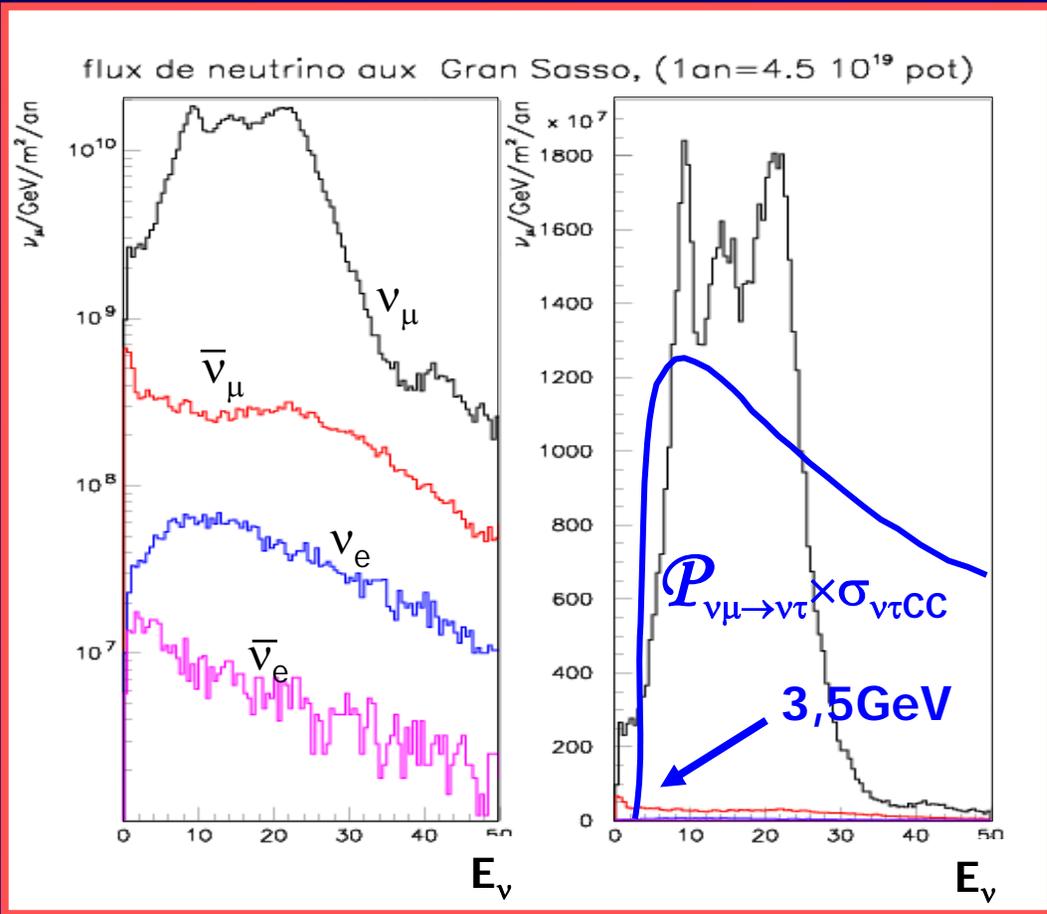


- Conducteurs internes.
- Corne
 - Taillé dans la masse.
 - De 1,8mm à 6,4mm d'épaisseur
- Réflecteur
 - 2mm d'épaisseur





Le flux de neutrino au Gran Sasso



- 96% ν_μ + 3,5% $\bar{\nu}_\mu$ + 0.5% ν_e
- $\langle E_\nu \rangle = 17\text{GeV}$
- Optimisé pour la détection de ν_τ

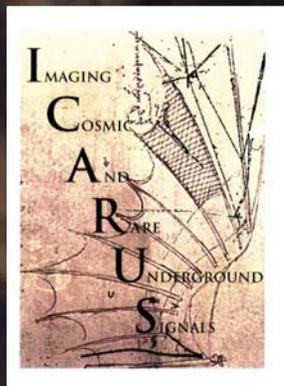
CERN

Laboratoire National du Gran Sasso

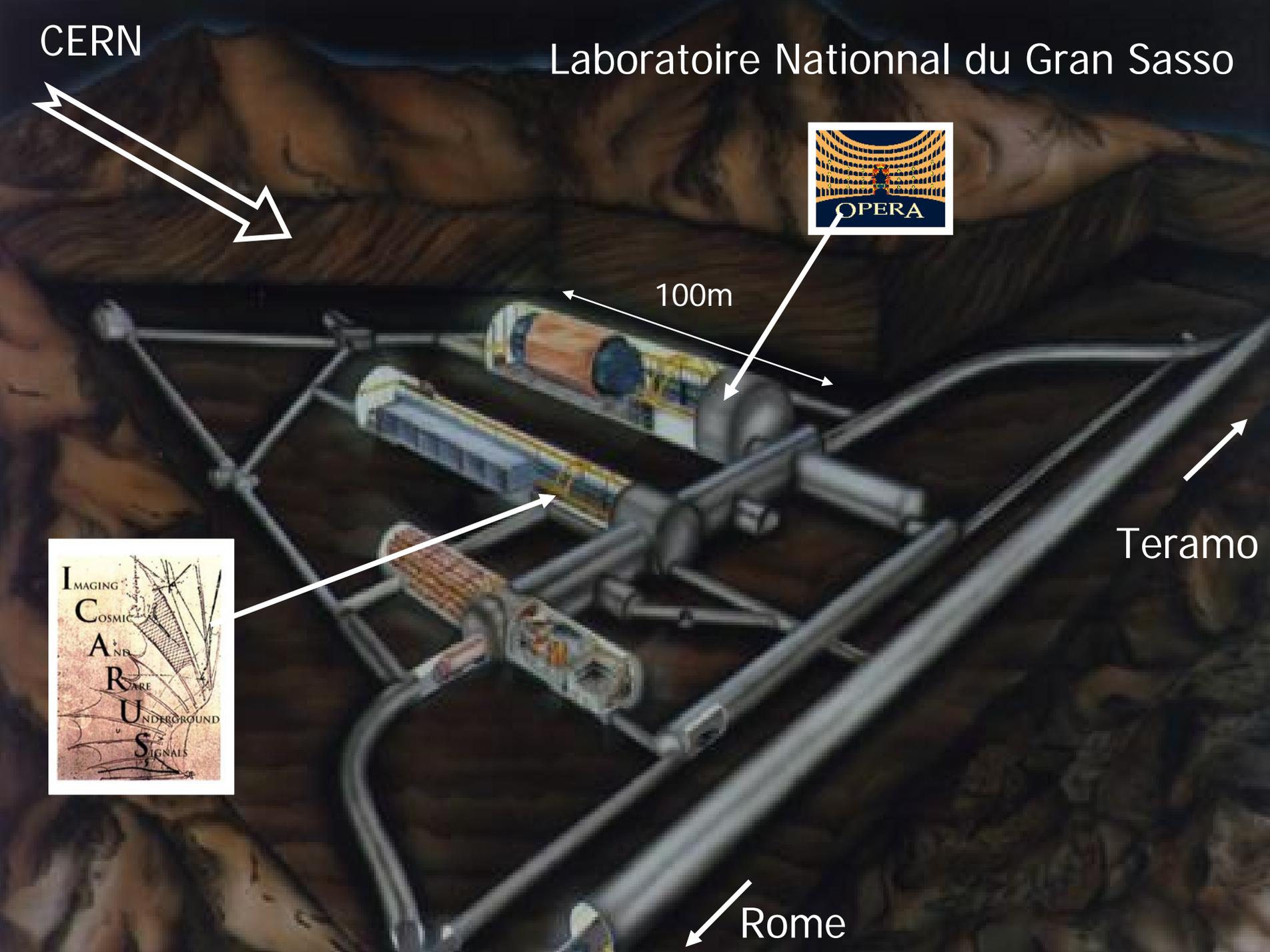


100m

Teramo



Rome

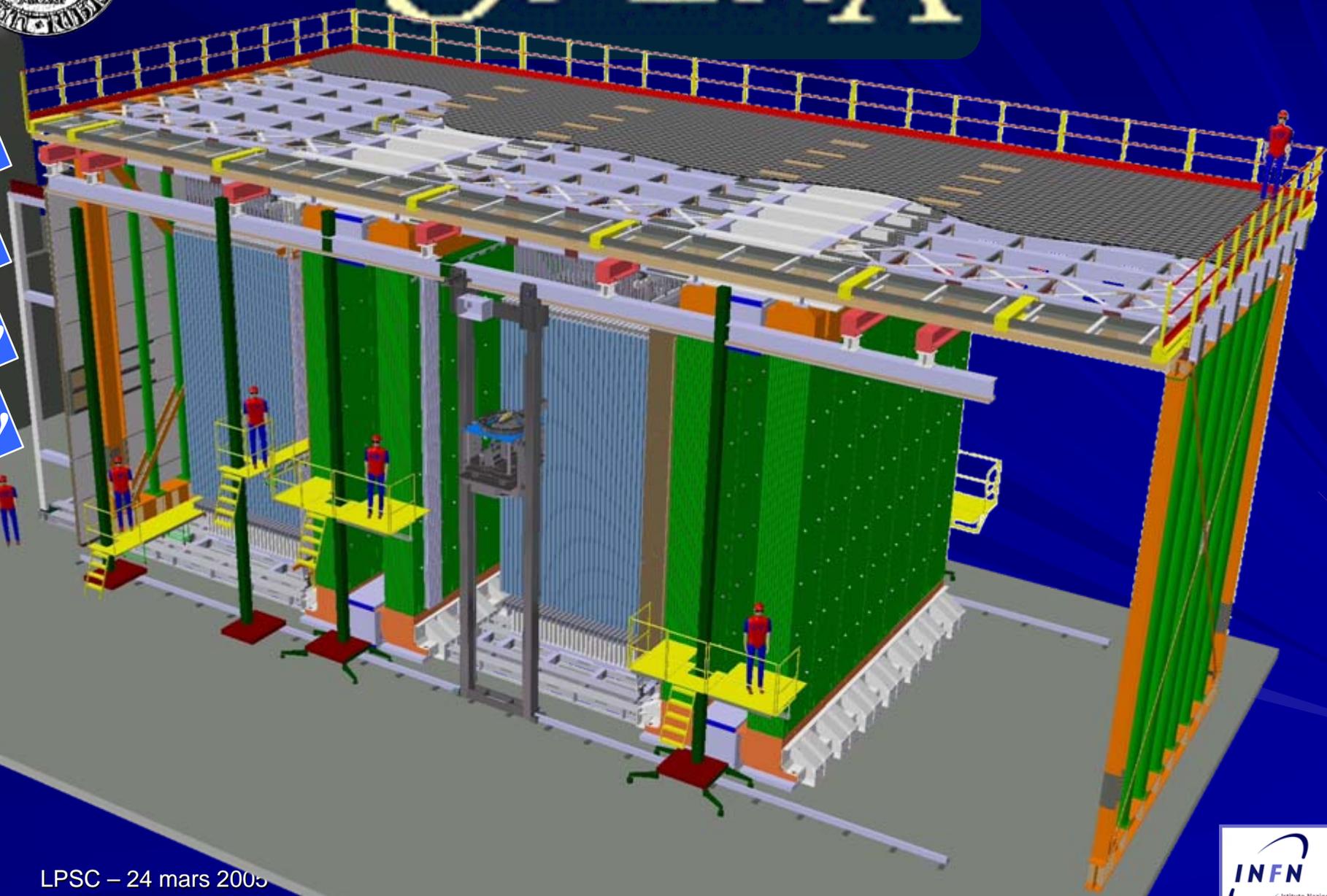


OPERA

- Le faisceau CNGS
- Le détecteur OPERA
- La reconstruction des événements dans les détecteurs électroniques
- Résultats escomptés



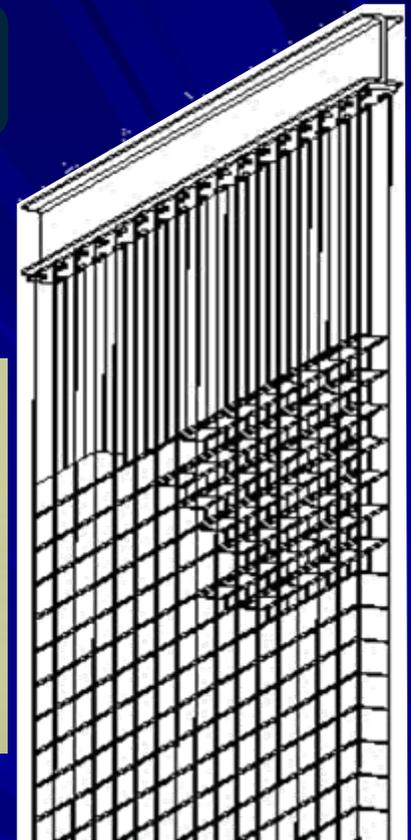
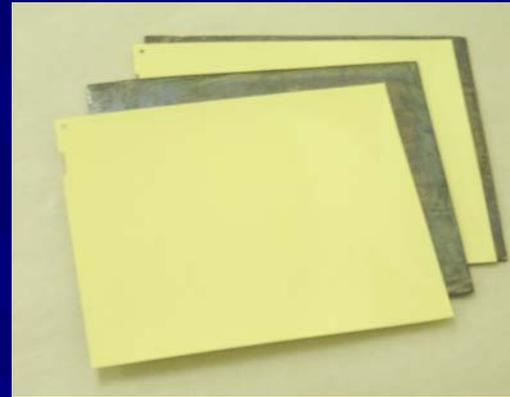
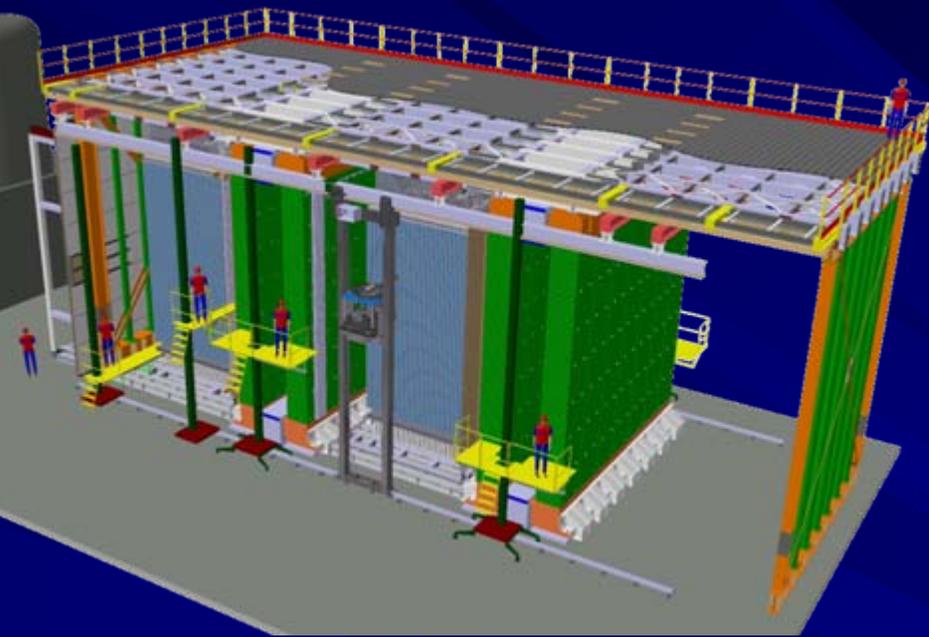
OPERA



LPSC – 24 mars 2005



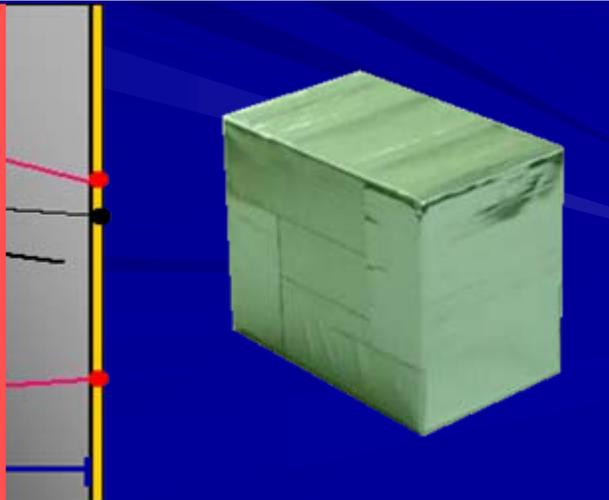
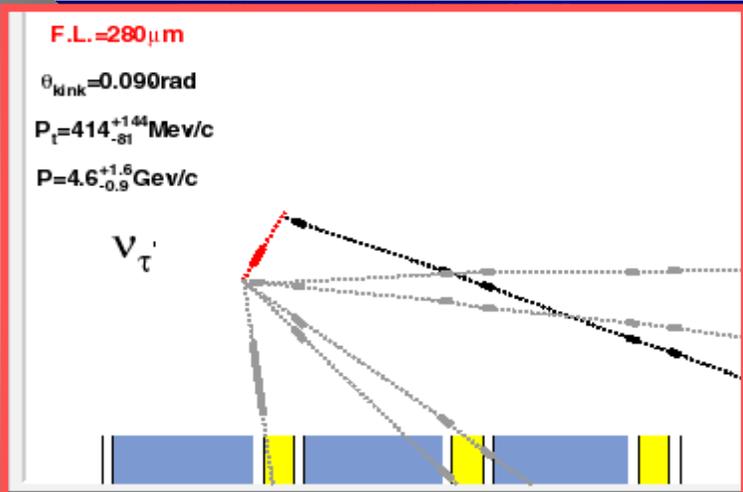
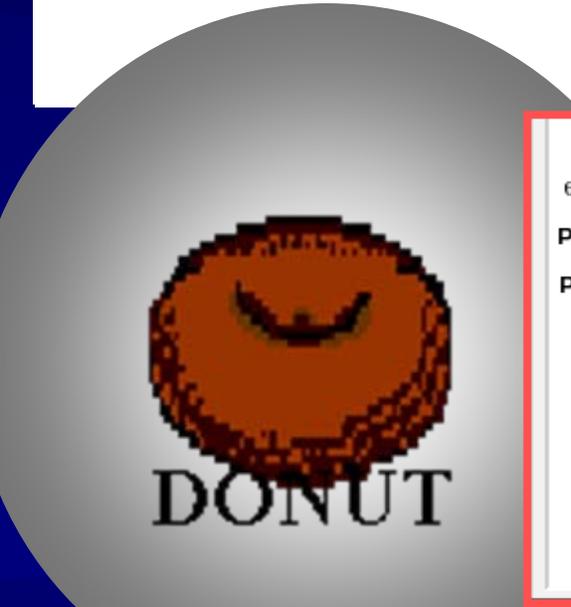
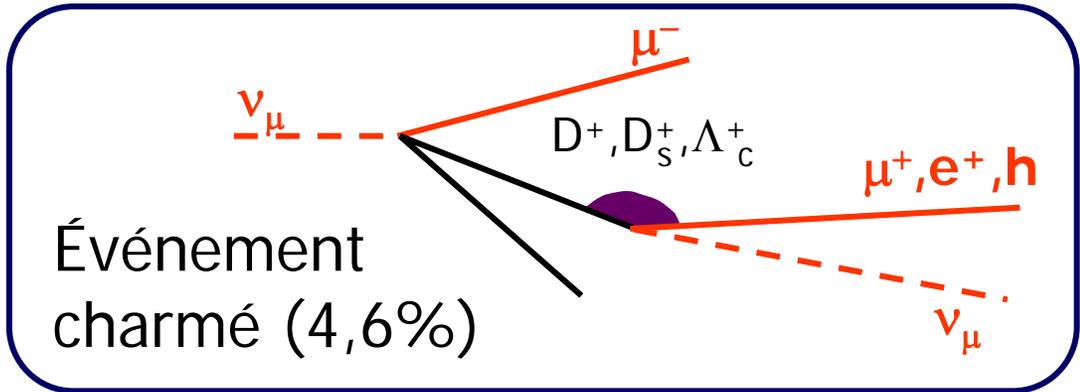
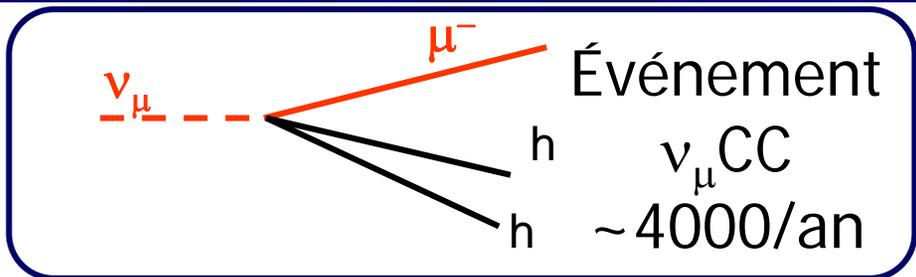
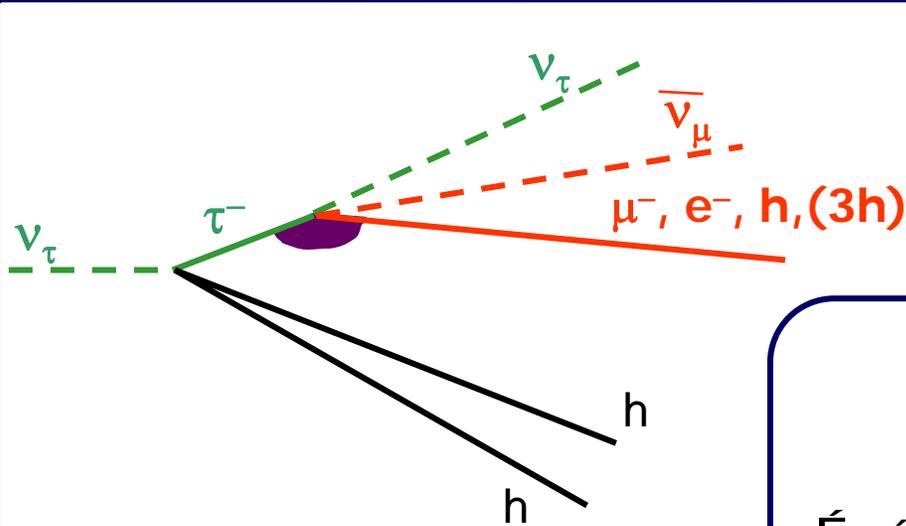
Les briques

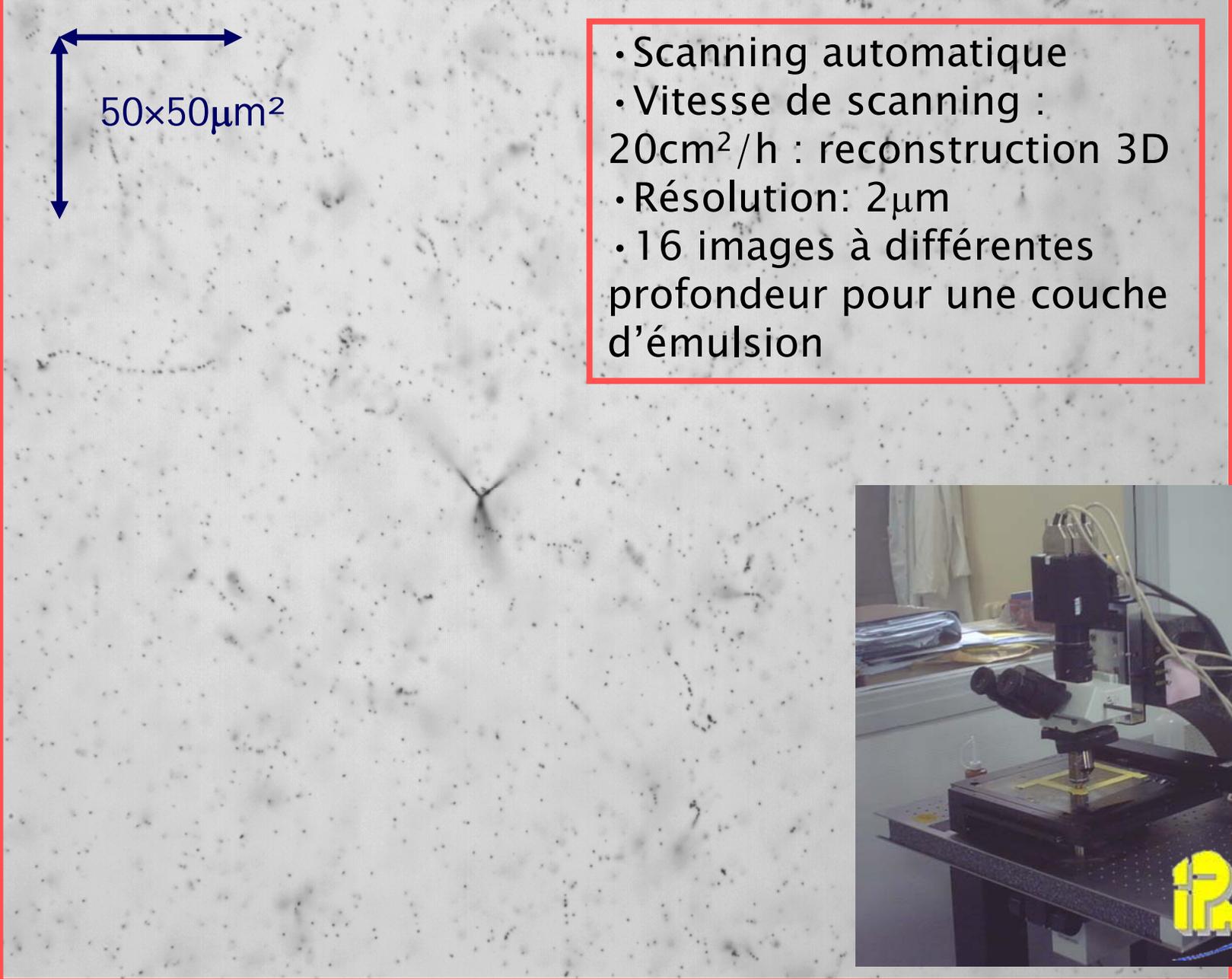


- 56 feuilles de plomb, 57 films d'émulsions, Un film amovible.
- 200.000 briques.
- 11 millions d'émulsions/de plaques de plomb.
- Résolution : $2\mu\text{m}$, 2mrad
- $10X_0$



Les événements dans OPERA



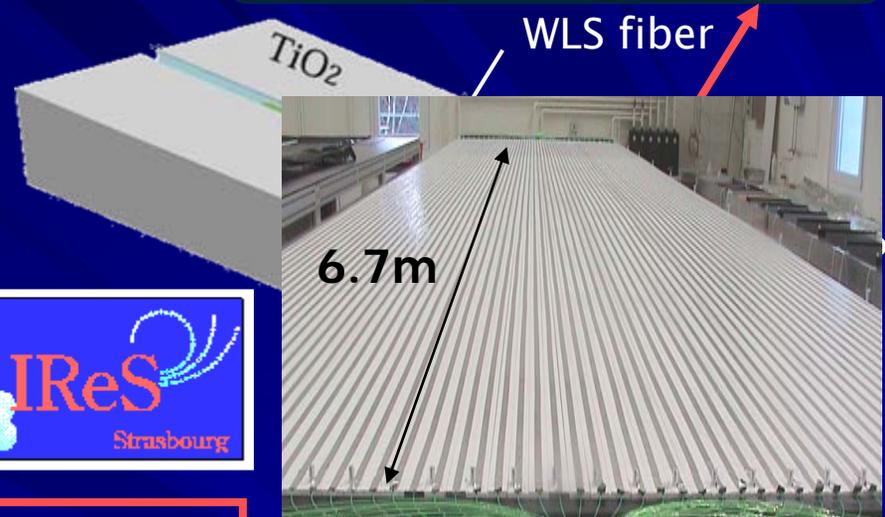
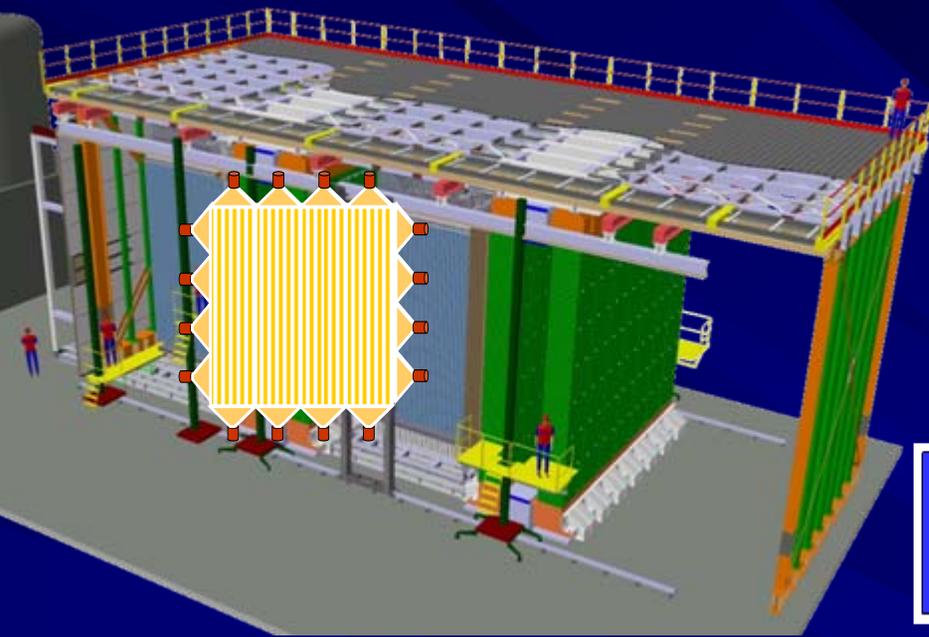


50x50 μm^2

- Scanning automatique
- Vitesse de scanning : 20cm²/h : reconstruction 3D
- Résolution: 2 μm
- 16 images à différentes profondeurs pour une couche d'émulsion

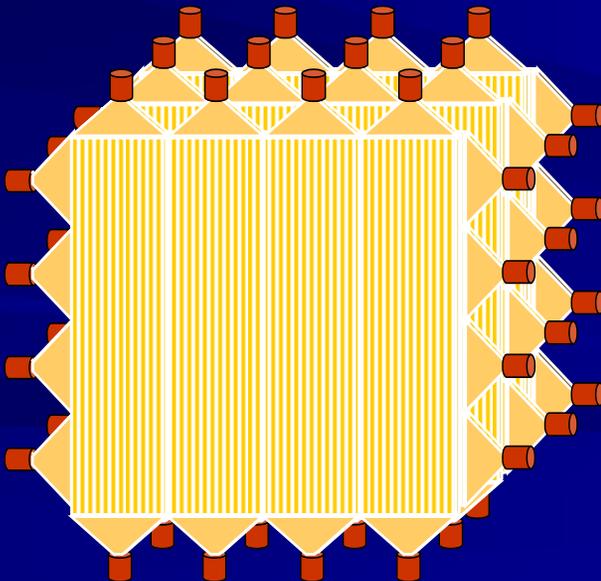
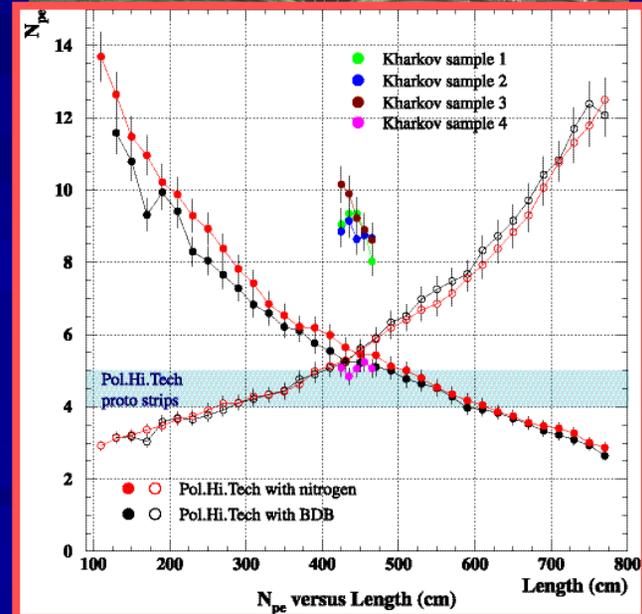


Le trajectographe

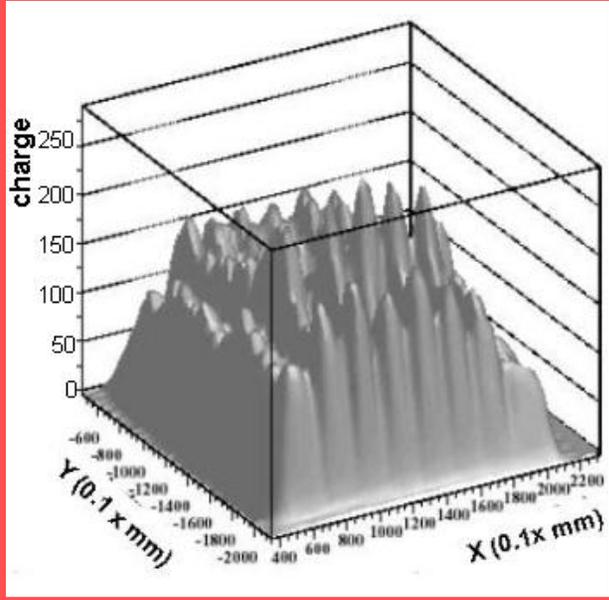


- 2x31 plans
- 4 x 64 barreaux en X et en Y
- Fabriqués par Karkov
- Calibrage par LED

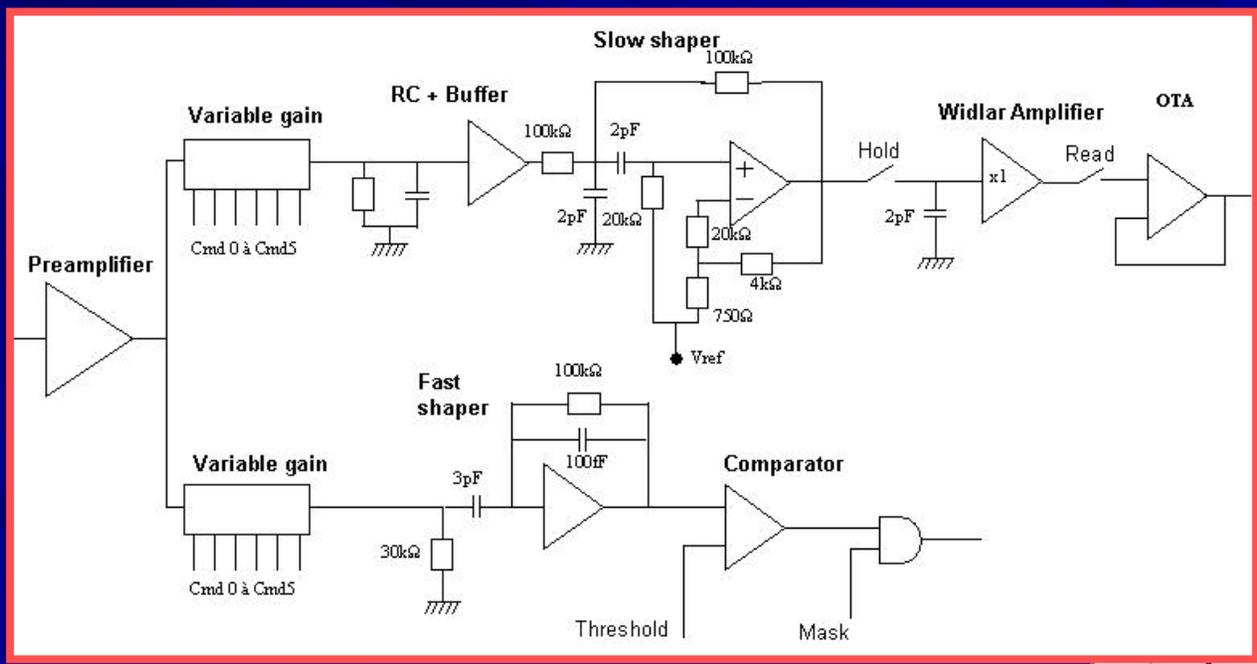
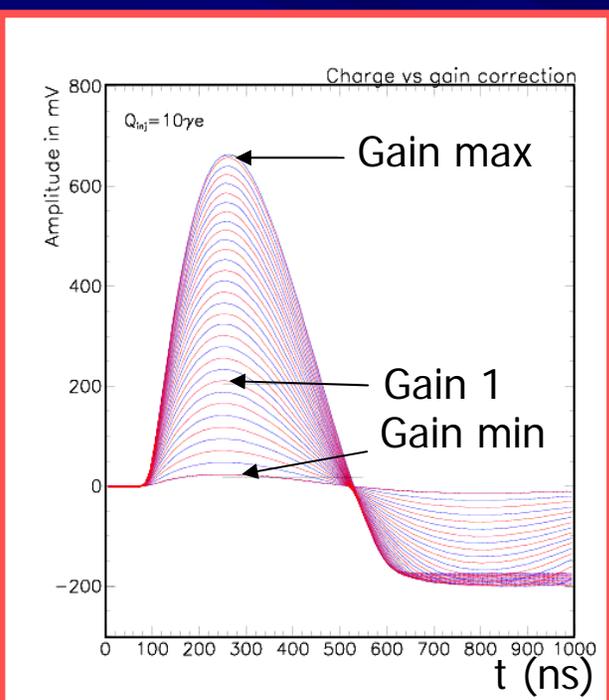
- PM Hamamatsu H7546 à 64 canaux
- OPERA ROC



Opera Read Out Chip



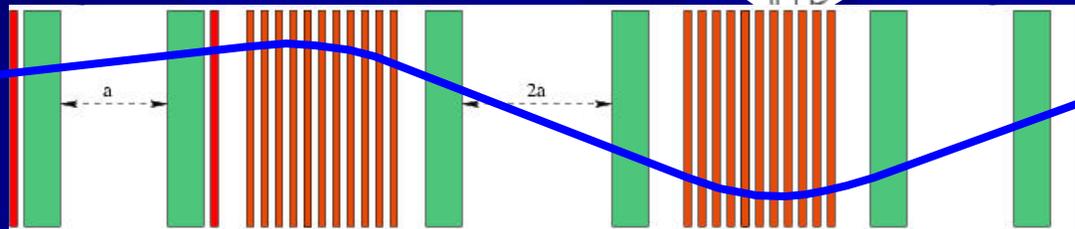
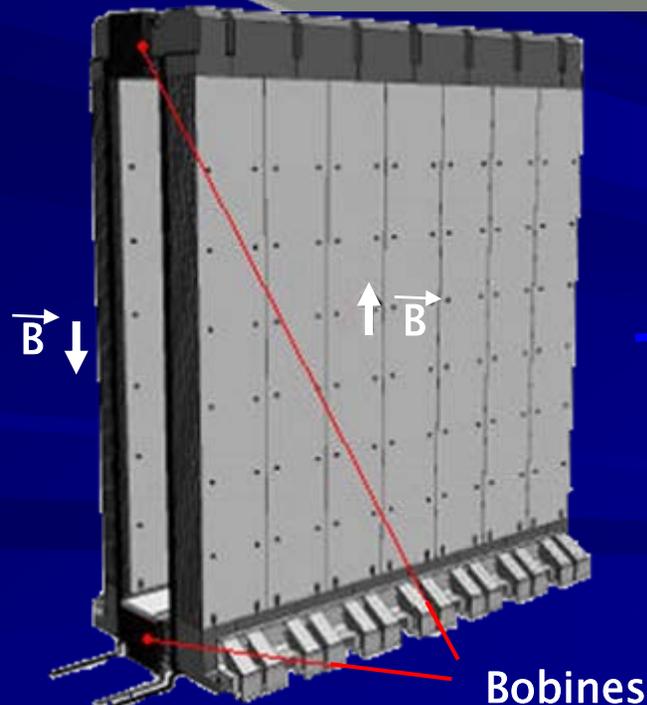
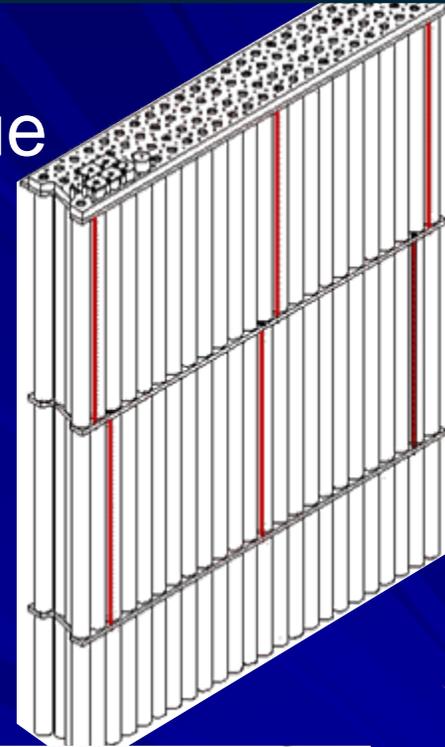
- 32 canaux de lecture + 1 canal pour soustraire le bruit de fond.
- Correction des gains $2^6=64$ niveaux de 0 à 3,55
- Auto déclenchement.
- Efficacité de 100% pour 1 / 3 de photo-electron (~50 fC)
- Sortie multiplexé



Les spectromètres

Frascatti/Padoue
Hambourg

- 2300 tubes à dérives verticaux
- 2 × 6 stations
- 7,9m de haut
- Résolution: 300 μ m



- 2 bobines forment un dipole de 1,5T
- 2×12 plans en Fer (5cm d'épaisseur)
- 2×12 plans de RPC (Resistive Plate Chamber)

9 décembre 2004



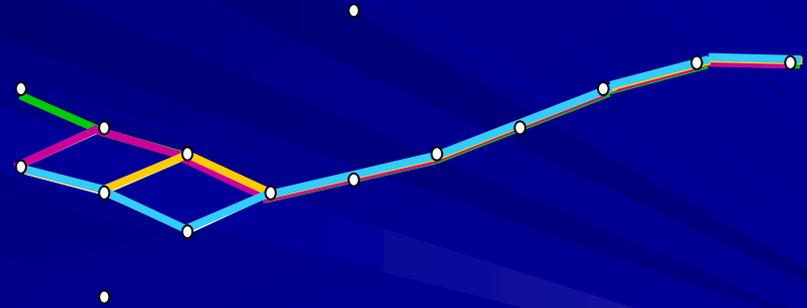
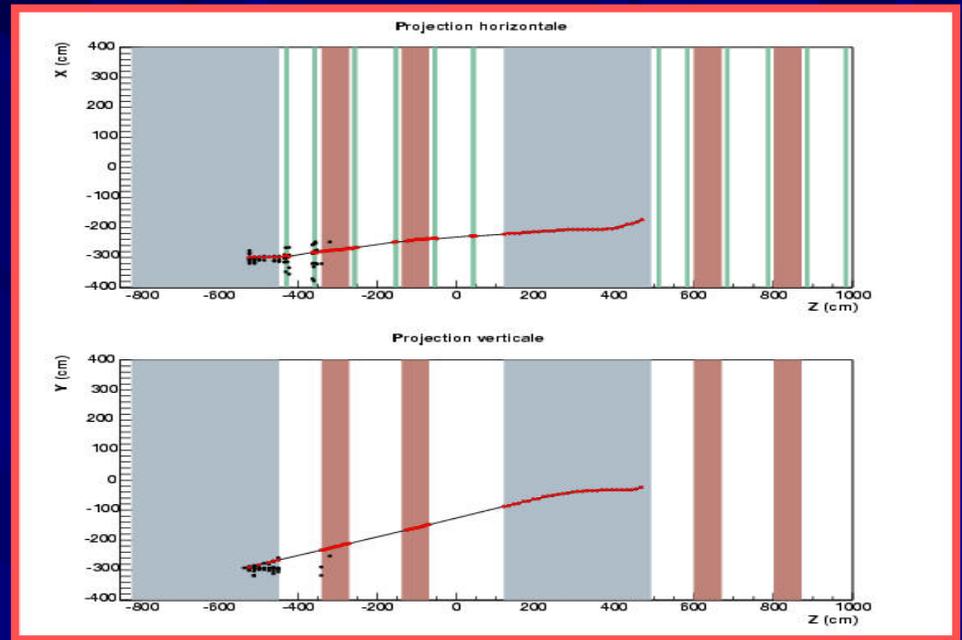
OPERA

- Le faisceau CNGS
- Le détecteur OPERA
- La reconstruction des événements dans les détecteurs électroniques
- Résultats escomptés



Reconstruction des traces

- Les segments sont reconstruits dans les sous détecteurs, puis connectés pour former une trace.
- Les deux plus longues traces des deux projections sont regroupées en une trace à trois dimensions
- Un filtre de Kalman permet de reconstruire la position, la pente, et l'impulsion à la sortie de la brique.



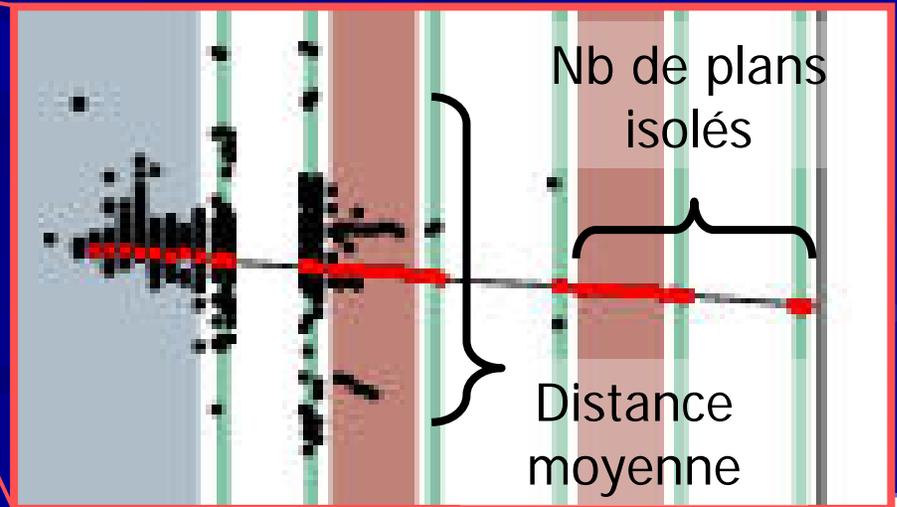
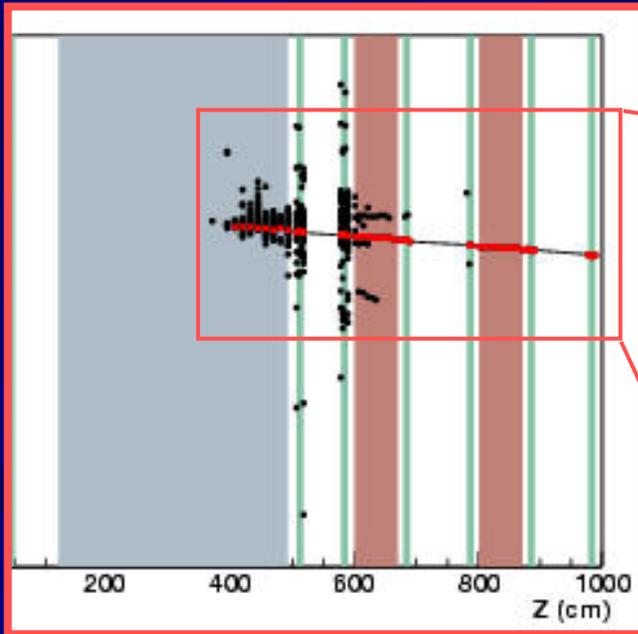
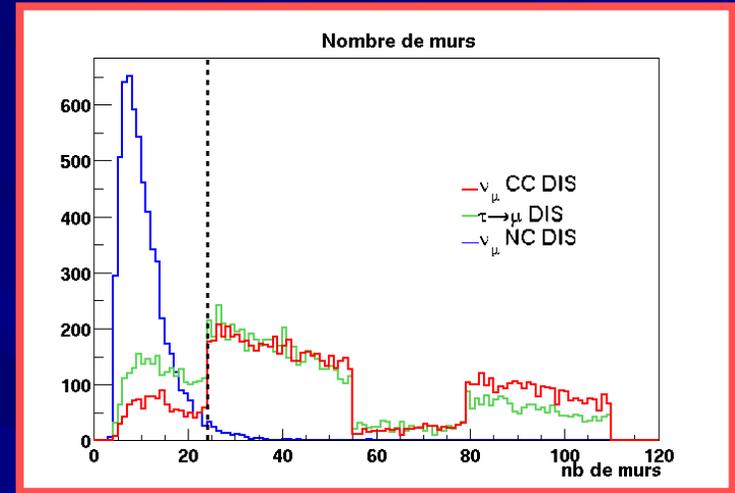
➤ Utilisé pour localiser la brique:
Efficacité entre 50% et 80%



Identification des muons

■ Longueur de la trace :

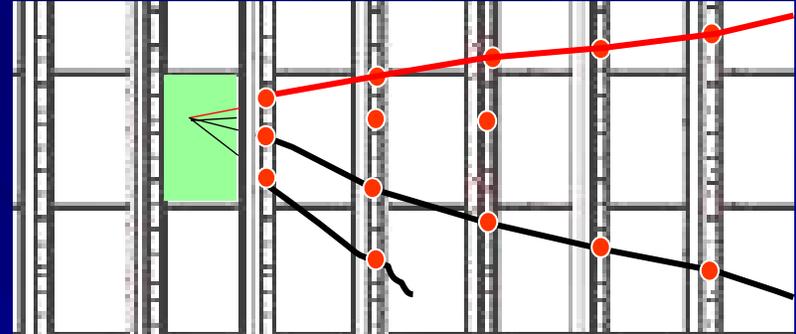
■ Critère d'isolation :



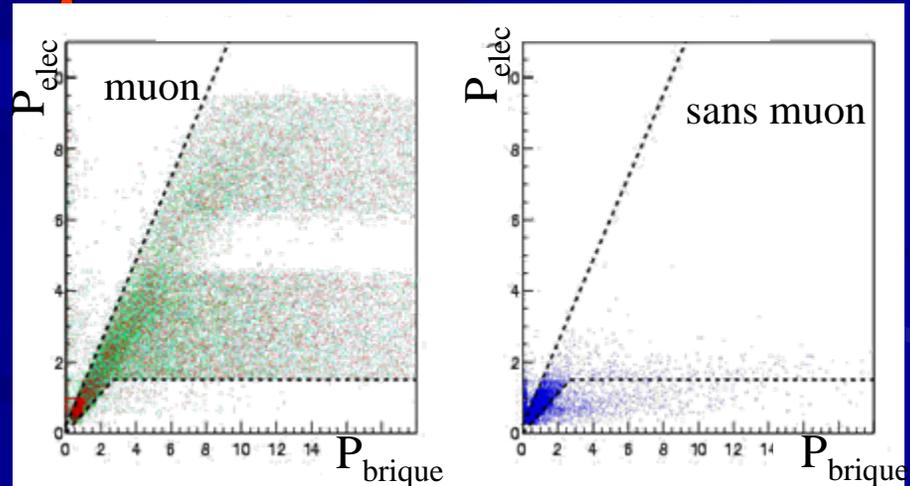
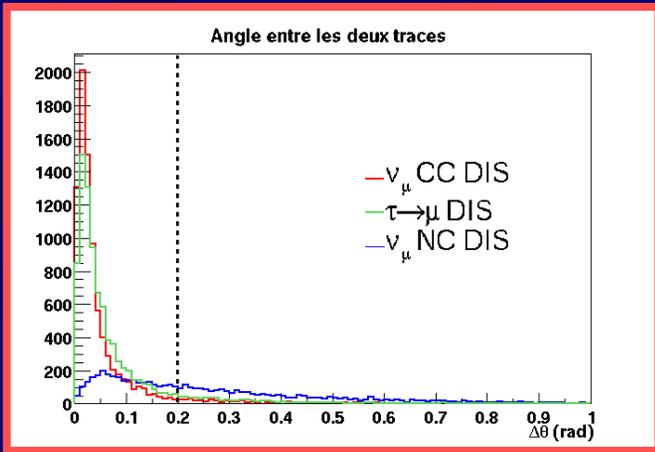


Association avec les trace de la brique

- Angle entre la trace reconstruite dans les détecteurs électroniques et dans la brique



5 traces en moyenne dans les briques

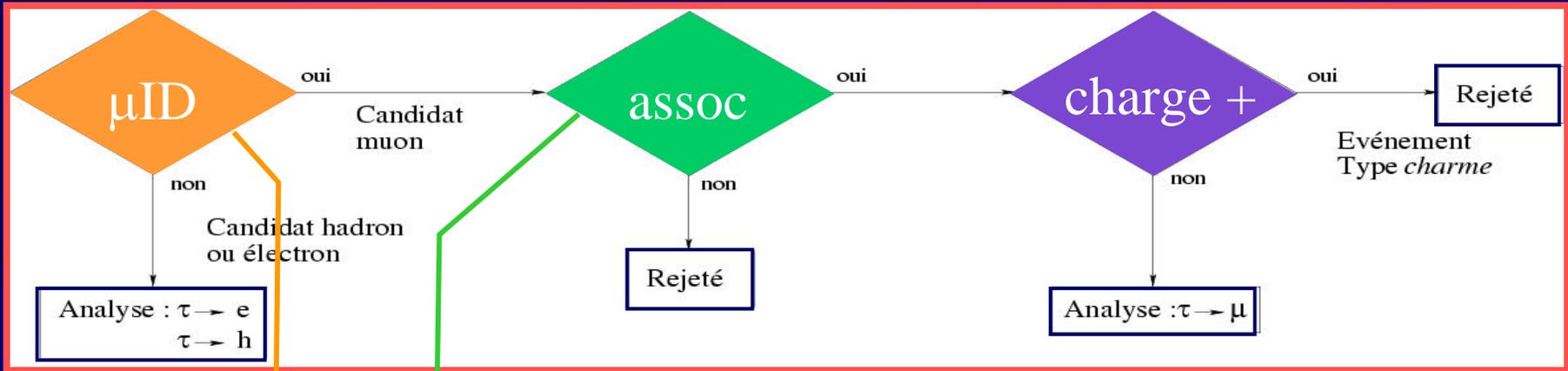


- P_{elec} est mesurée à partir du nombre de murs traversés.

- P_{brique} est mesurée à l'aide par la méthode des diffusions multiples



Analyse par les détecteurs électroniques



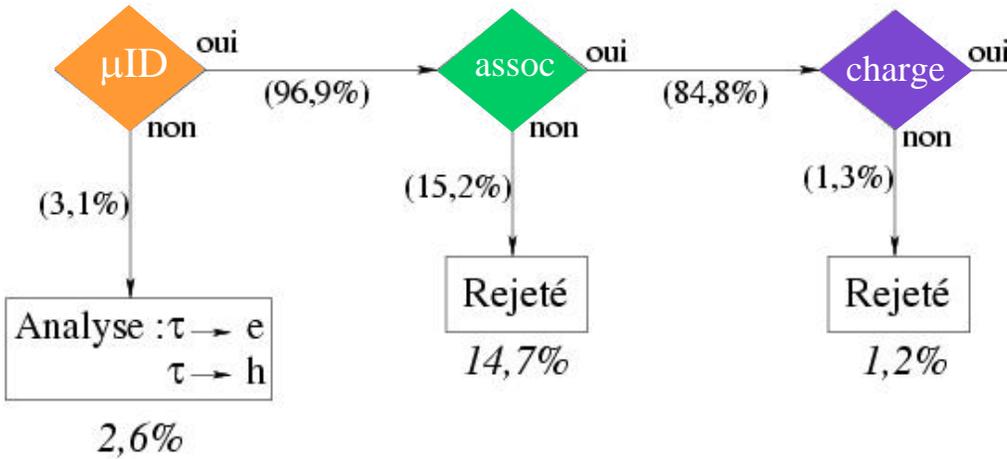
	$\epsilon_{\mu ID}$	ϵ_{assoc}	$\epsilon_{\mu ID} \times \epsilon_{assoc}$
$\nu_{\mu} CC$	96,9	85,1	82,4
charme	95,8	84,8	82,1
$\nu_{\mu} NC$	31,8	30,9	9,7
$\tau \rightarrow \mu$ DIS	93,1	84,8	78,8
$\tau \rightarrow \mu$ QE	93,0	89,5	83,3
$\tau \rightarrow e$ DIS	33,0	39,9	13,0
$\tau \rightarrow h$ DIS	49,7	35,3	17,6

	$\tau \rightarrow \mu$	$\tau \rightarrow e$	$\tau \rightarrow h$	rejeté
$\nu_{\mu} CC$	82,4	3,1		14,5
charme	81,0	3,1		15,9
$\nu_{\mu} NC$	9,7	65,7		22,0
$\tau \rightarrow \mu$ DIS	78,8	6,9		14,3
$\tau \rightarrow \mu$ QE	83,3	6,8		9,8
$\tau \rightarrow e$ DIS	12,8	66,9		20,2
$\tau \rightarrow e$ QE	0,4	97,4		1,3
$\tau \rightarrow h$ DIS	17,6	50,3		32,1



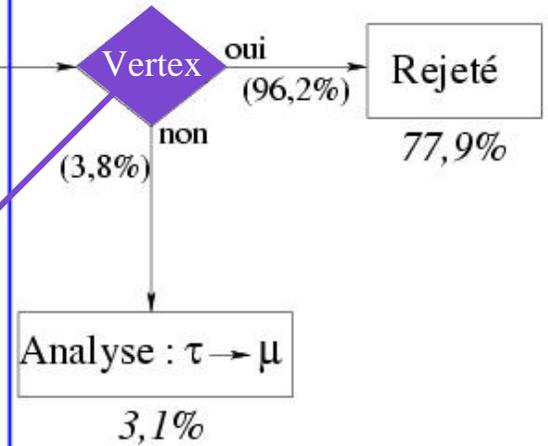
Les événements charmés

DETECTEURS ELECTRONIQUES



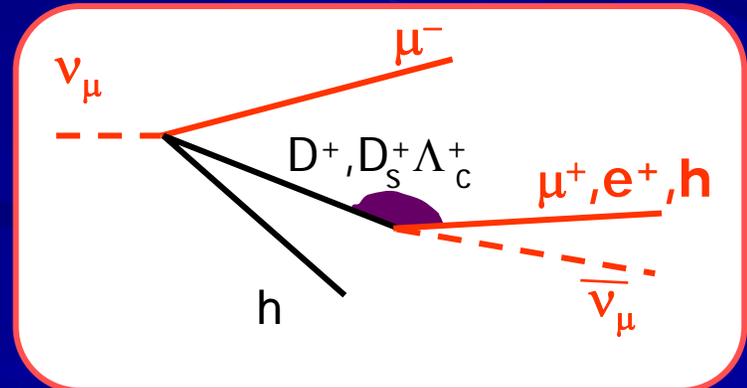
Événements non analysé : 0,5%

BRIQUES



Coupure du vertex obtenue avec les informations MC

Réjection : 93.8%



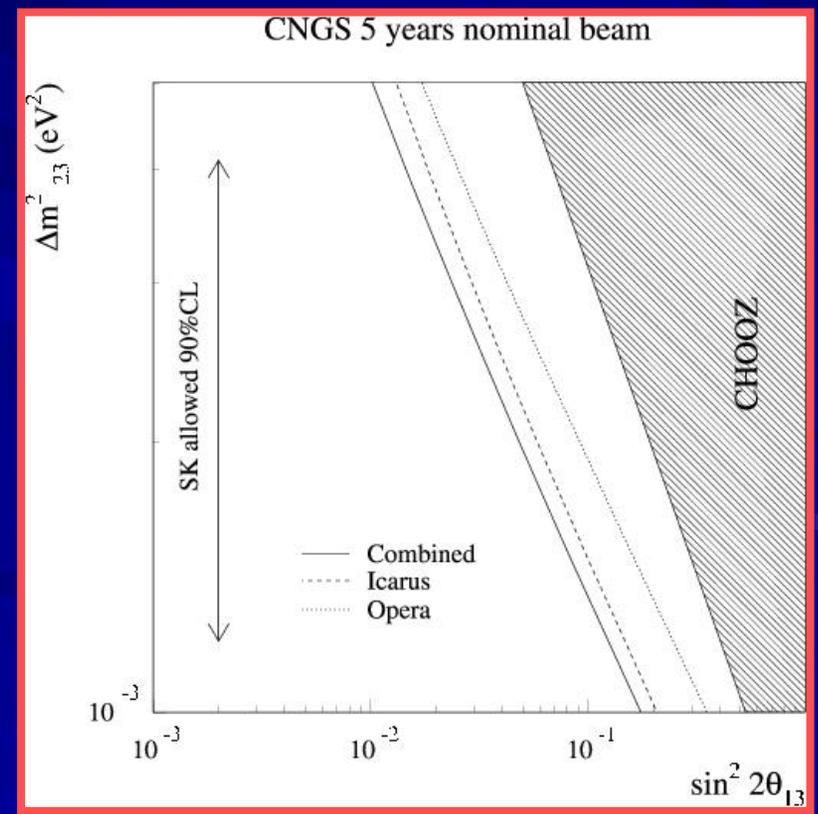
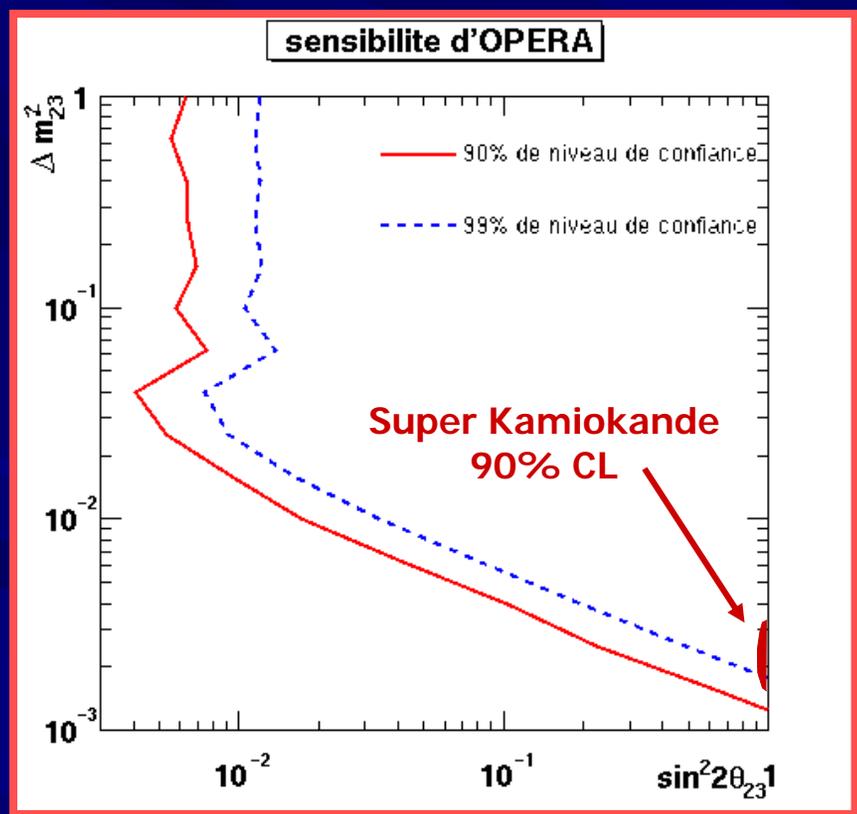
OPERA

- Le faisceau CNGS
- Le détecteur OPERA
- La reconstruction des événements dans les détecteurs électroniques
- Résultats escomptés

5ans, faisceau nominal.

	signal			Bruit de Fond
$\Delta m^2=1,9 \cdot 10^{-3}$	$\Delta m^2=2,4 \cdot 10^{-3}$		$\Delta m^2=3 \cdot 10^{-3}$	
6,6	10,4	$\left\{ \begin{array}{l} \tau \rightarrow \mu : 3,6 \\ \tau \rightarrow h : 3,1 \\ \tau \rightarrow e : 3,7 \end{array} \right.$	16,3	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Charme: } 0,4 \\ \text{Diffusion } \mu : 0,1 \\ \text{Diffusion } h : 0,2 \end{array} \right.$

Réduction du bruit de fond charmé: identification des muons dans la dernière briques s'il s'arrêtent dans les cible. Objectif -50% (test à KEK)



Le projet de super faisceau de neutrinos SPL–Fréjus

- La quête de θ_{13}
- Le projet SPL–Fréjus
- Optimisation de la ligne de faisceau

Consigné dans hep-ex/0411062 , soumis à EPJC.

- Expérience d'apparition de ν_e
- Donne accès à θ_{13} et à δ_{CP} .

$$\begin{aligned}
 \mathcal{P}_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}^{mat} = & \quad 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} \quad \text{Terme en } \theta_{13} \\
 & + 8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} c_\delta - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{23} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{12} \quad \text{CP pair} \\
 & - 8J \sin \Delta_{23} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{12} \quad \text{CP impair} \\
 & + 4s_{12}^2 c_{13}^2 (c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2c_{12} c_{23} s_{12} s_{23} s_{13} c_\delta) \sin^2 \Delta_{12} \quad \text{Terme solair} \\
 & - 8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \cos \Delta_{23} \sin \Delta_{31} \frac{V_{CL}}{2} (1 - 2s_{13}^2) \quad \text{Effet de matière}
 \end{aligned}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = A^2 + S^2 - 2AS \sin \delta$$

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = A^2 + S^2 + 2AS \sin \delta$$

$$\mathcal{A}_{CP} = \frac{2AS \sin \delta}{A^2 + S^2}$$

Avec

$$A \approx \sqrt{2} \theta_{13}$$

$$S \approx 0,025 \text{ (LMA)}$$

Amplitude faible, mais asymétrie grande!!!

- Bruit de fond : les neutrinos électroniques du faisceau:
 $\mu^\pm, K^0 \rightarrow$ neutrino électroniques



La quête de θ_{13} puis de δ_{CP}

année

$\text{Sin}^2 2\theta_{13}$

2005

- → 2010
 - K2K, OPERA/ICARUS, MINOS

10^{-1}

2010

- 2009-2015
 - T2K, NO ν A, Double CHOOZ,

10^{-2}

2020

- 2015-2025
 - Super faisceau et/ou faisceau bêta

10^{-3}

2025

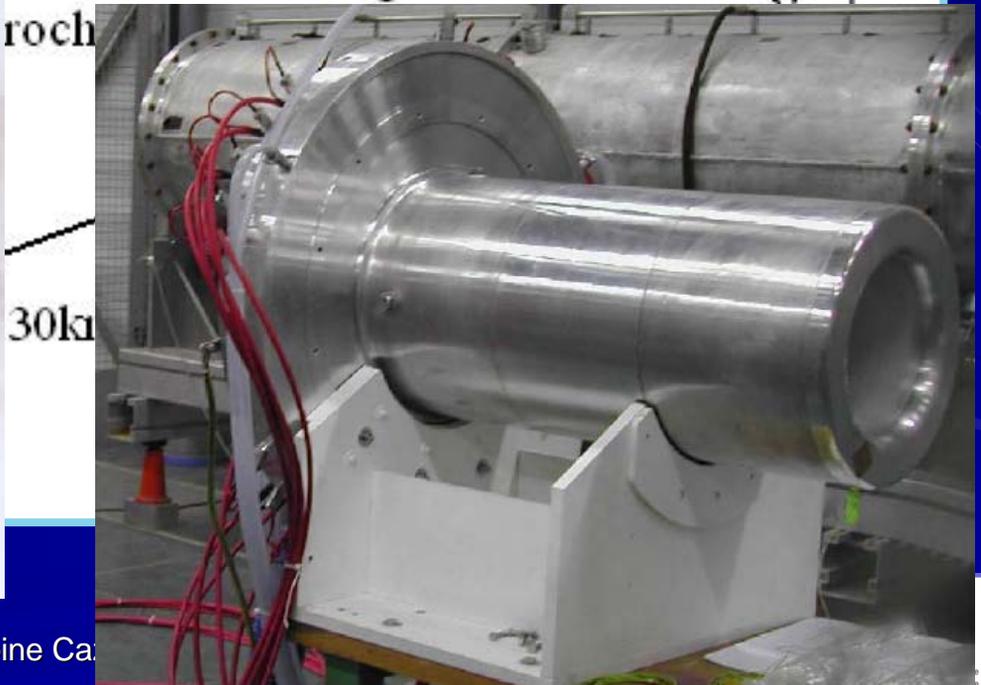
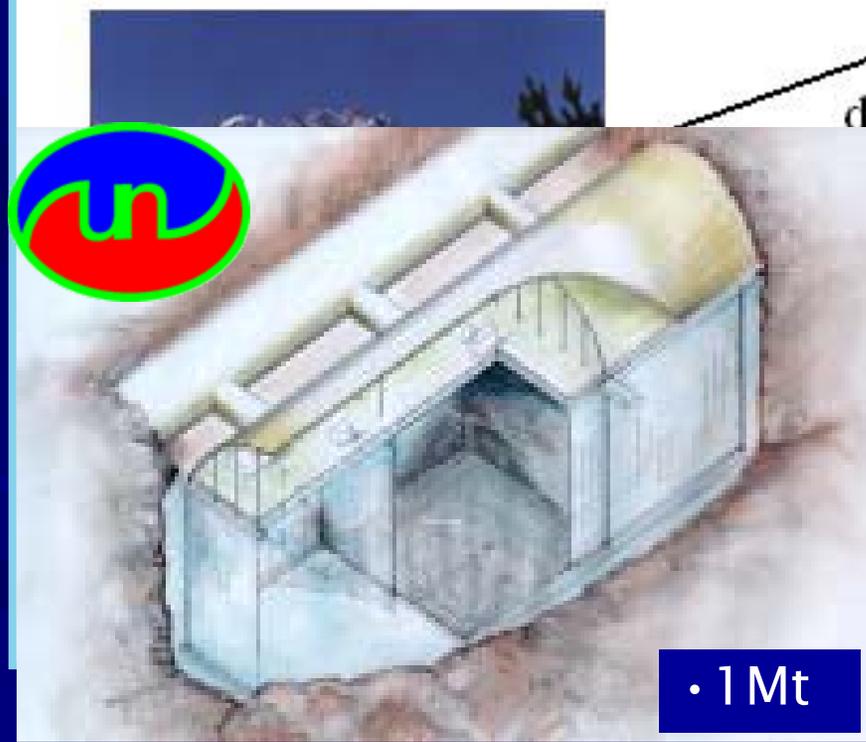
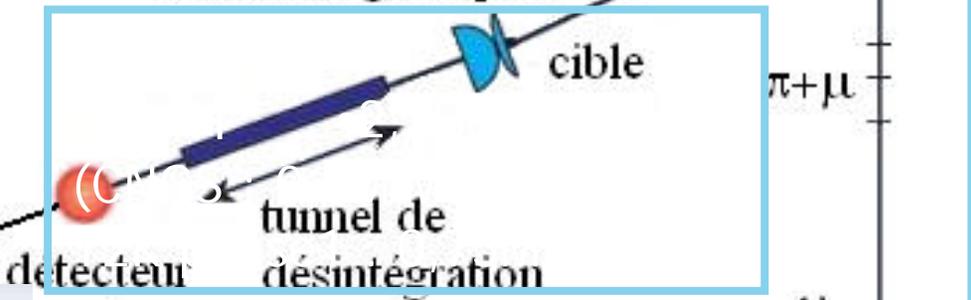
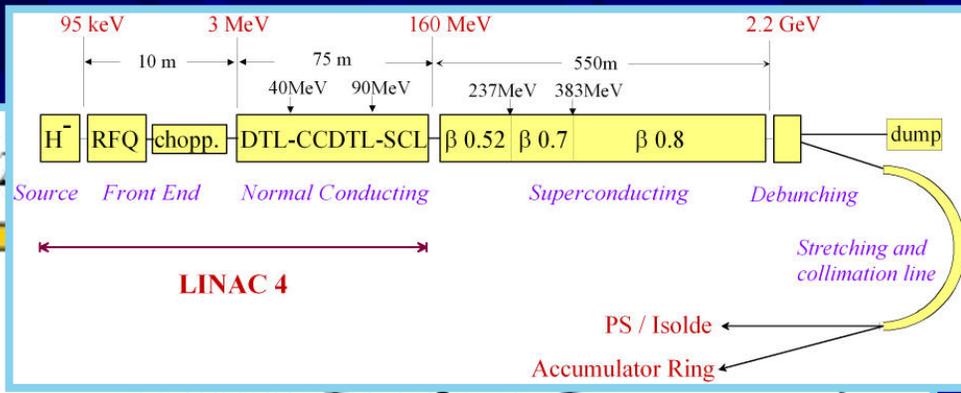
- 2025...
 - Usines à neutrinos

10^{-5}

Le projet de super faisceau de neutrinos SPL–Fréjus

- La quête de θ_{13}
- Le projet SPL–Fréjus
- Optimisation de la ligne de faisceau

H⁻ linac, 2

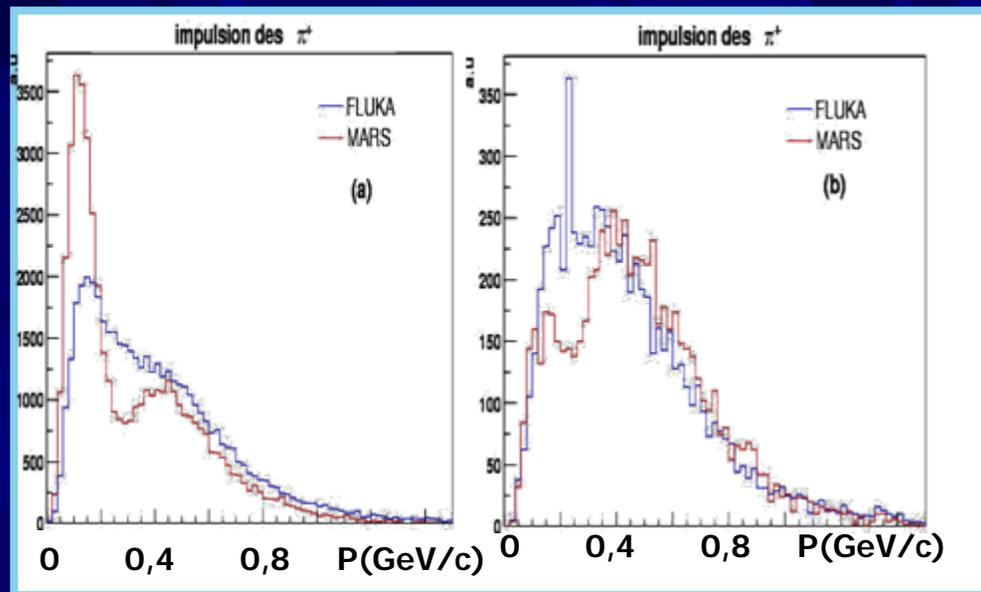


- Faisceau de protons :
 - filiforme
 - $E_k = 2.2\text{GeV}, 3.5\text{GeV}, 4.5\text{GeV}, 6.5\text{GeV}$ et 8GeV
 - $1,1 \cdot 10^{16} \text{pot/s@}2,2\text{GeV}$

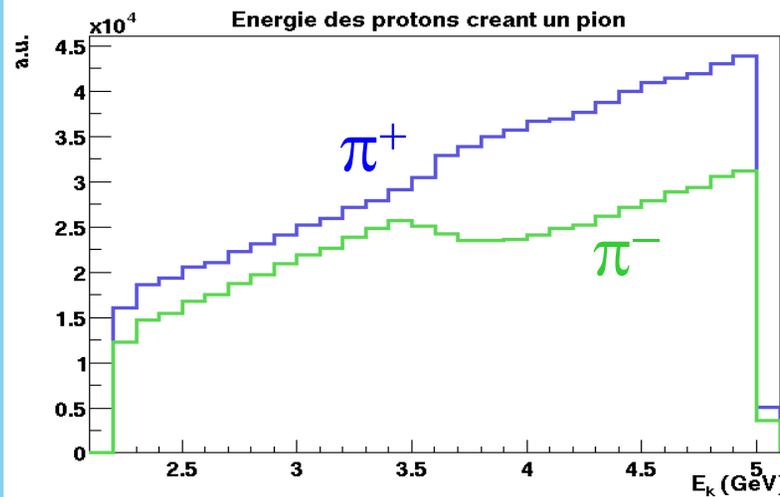
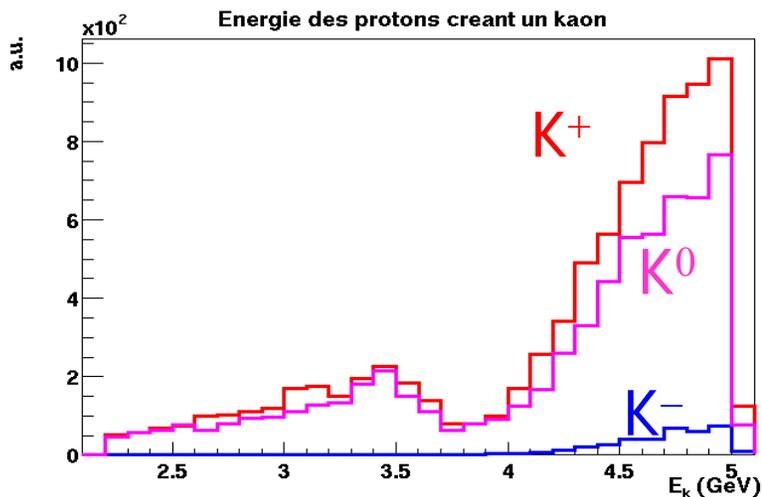
■ Normalisé à 4MW.

■ Cible :

- Cylindre de 30cm de long, $\varnothing 15\text{mm}$.
- Mercure liquide : $Z=80$
- 1MW déposé!!!
- FLUKA 2002.4 et MARS



	2,2GeV	3,5GeV	4,5GeV
π^+/s	0,26	0,29	0,32
K^+/s	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$

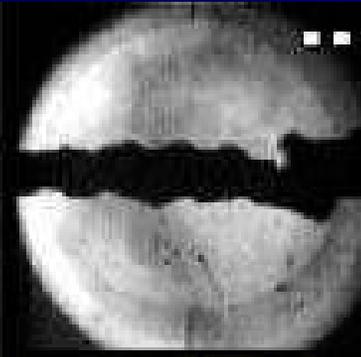




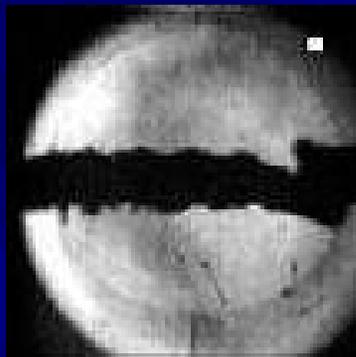
La cible en mercure liquide.

Test à BNL E-951

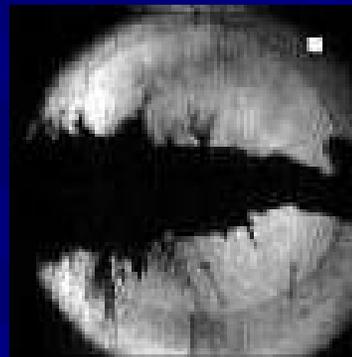
p



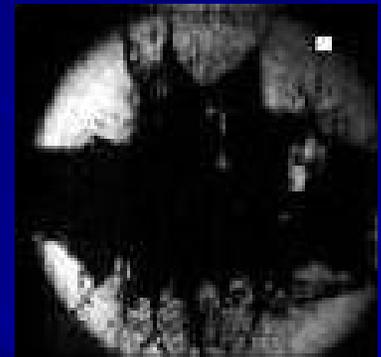
$t = 0\text{ms}$



0,75ms



4,5ms



13ms

■ Faisceau de protons :

- $2,7 \cdot 10^{12} \text{p/bunch}$
- $t_0 \approx 0,45\text{ms}$

■ Jet de mercure :

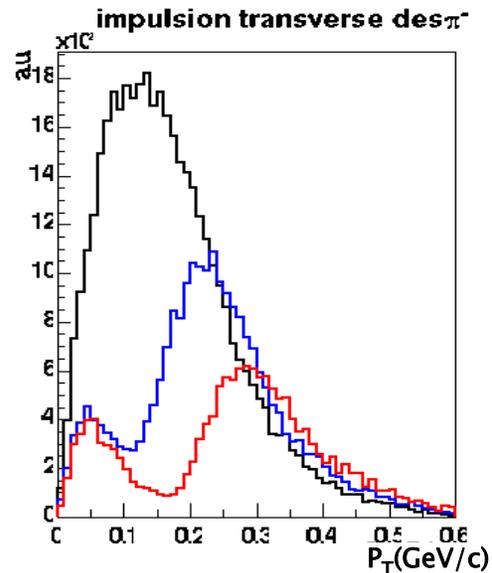
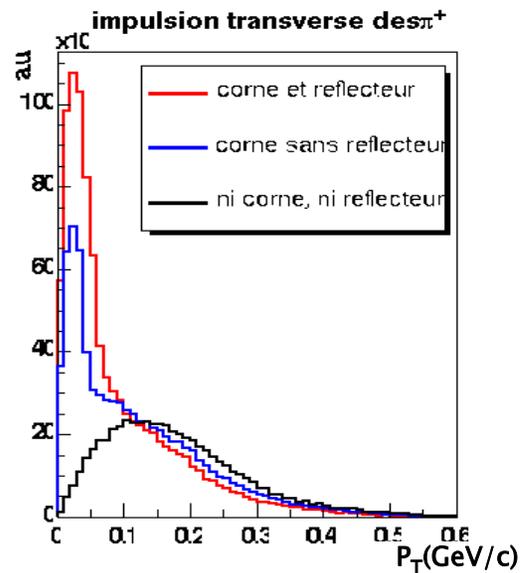
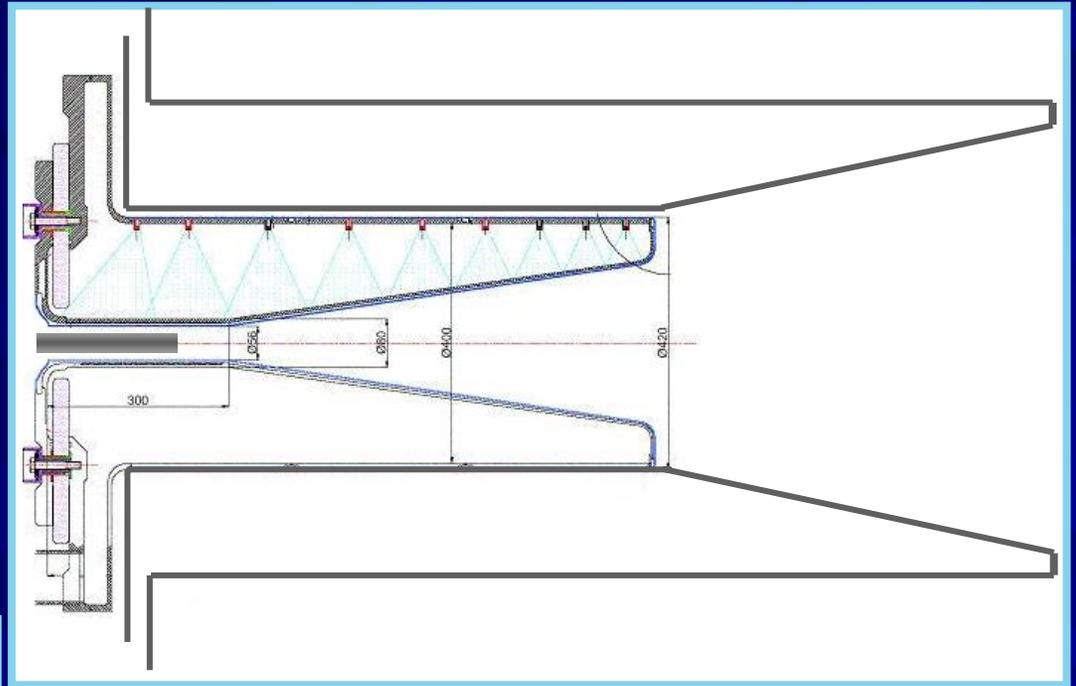
- $\varnothing 12\text{mm}$.
- Vitesse $2,5\text{m/s}$

K.Mc Donald, H. Kirk, A. Fabich



- 2 cornes concentriques
- 300kA et 600kA
- Épaisseur des conducteurs : 3mm

• Impulsion transverse des pions.



• Les particules sortent un grand angle:

- $\langle \theta_\pi \rangle = 60^\circ @ 2,2 \text{ GeV}$
- $\langle \theta_\pi \rangle = 55^\circ @ 3,5 \text{ GeV}$
- La corne doit entourer la cible.



Dépôt d'énergie dans la corne

4MW, 2.2GeV

47kW

34.0 kW

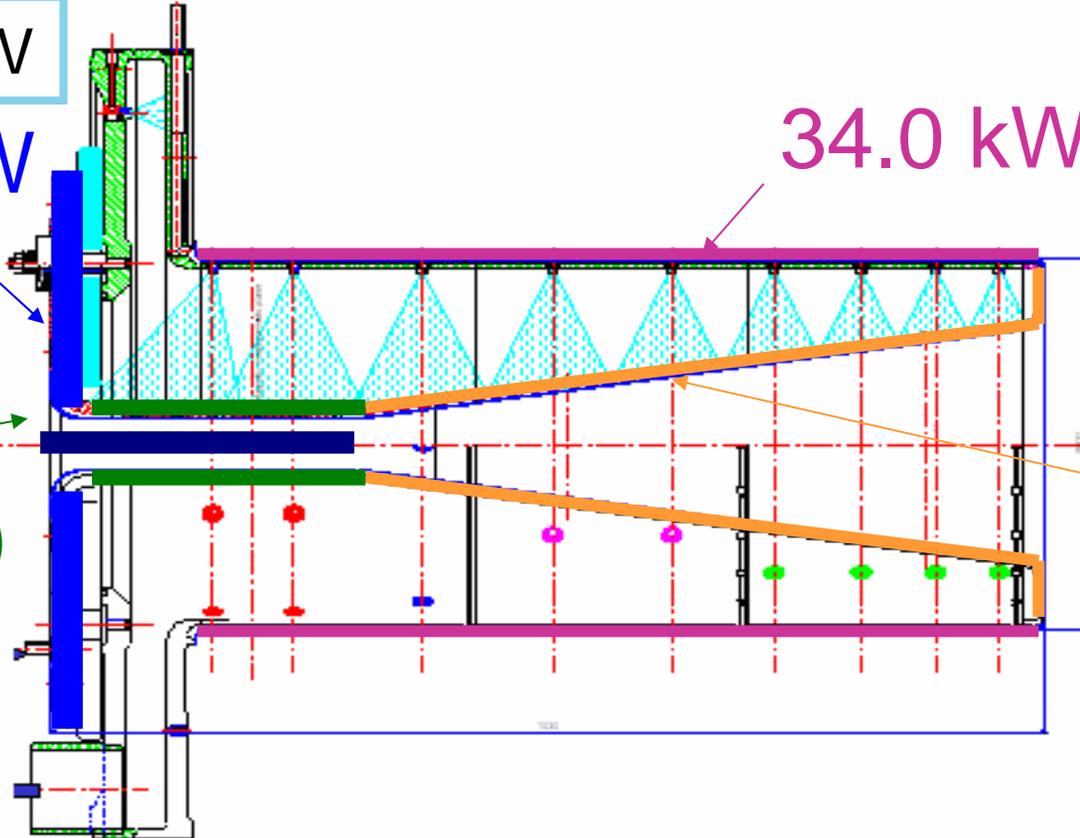
63kW

(8mm Al)

+7kW

d'effet
Joule

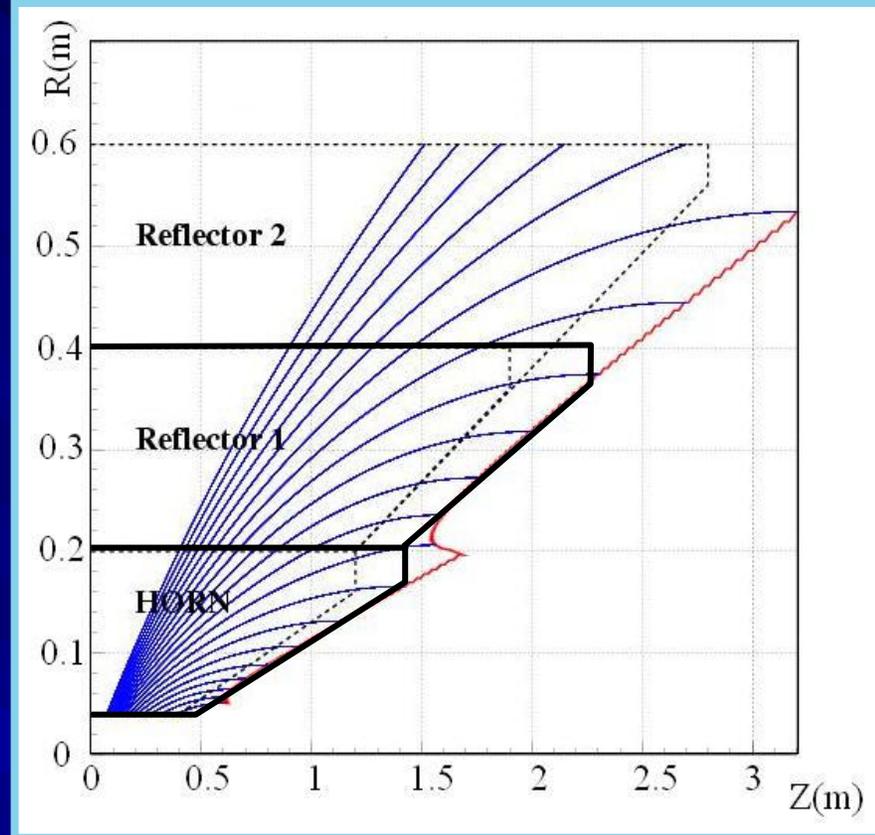
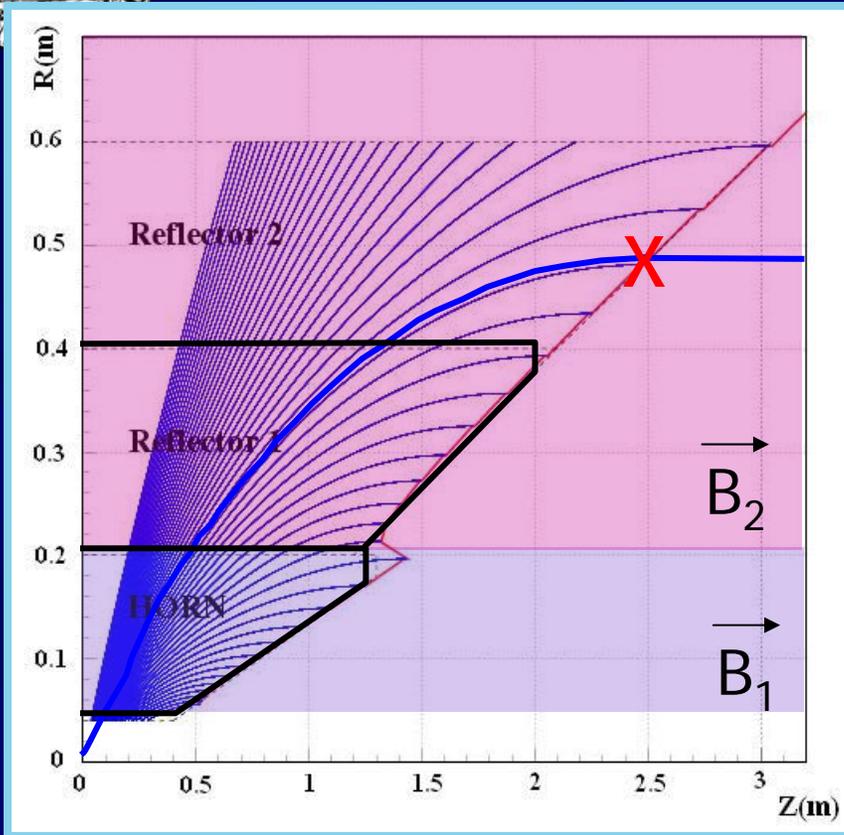
13.6kW



Solution en cours d'investigation : réduire l'épaisseur d'aluminium (3mm Al) + des renforts.



Optimisation de la forme des cornes



2 optimisations ont été étudiées :

• $E_\nu \sim 260\text{MeV}$

• $E_\nu \sim 350\text{MeV}$

($p_\pi = 600\text{MeV}/c$)

($p_\pi = 800\text{MeV}/c$)

Maximum d'oscillation



Le calcul du flux de neutrinos

- Faible énergie
- faible poussée de Lorentz
- faible focalisation!
- La simulation requiert un grand nombre d'événements ($\sim 10^{15}$ evts!!!)
- Quand un π , un μ ou un K se désintègre, la probabilité que le neutrino atteigne le détecteur est calculée
 - Cette probabilité est utilisée comme poids dans le calcul du flux de neutrinos au Fréjus.
 - 10^6 evts: plus raisonnable!



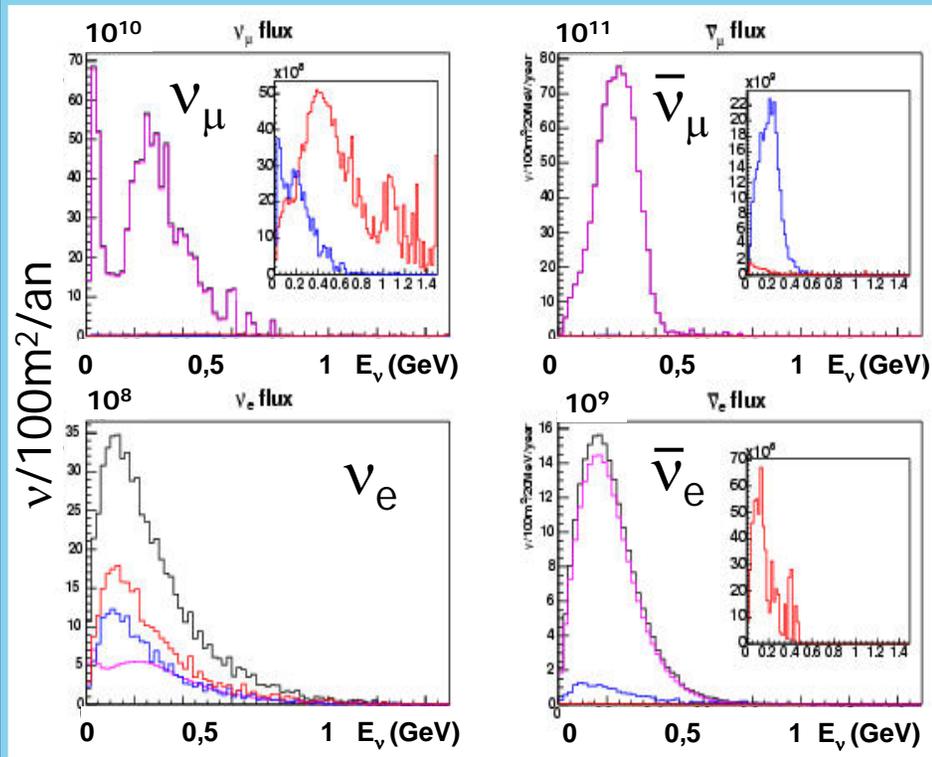
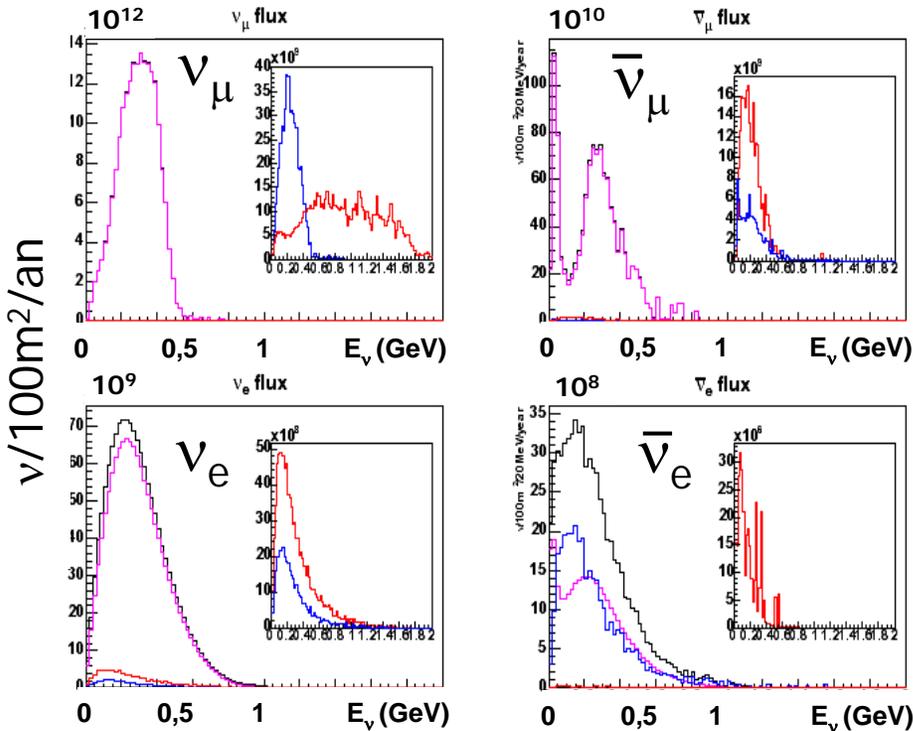
Flux de neutrinos à 100km du CERN

Focalisation positive

Neutrinos provenant

- des π et μ
- des K^\pm
- des K^0

Focalisation négative



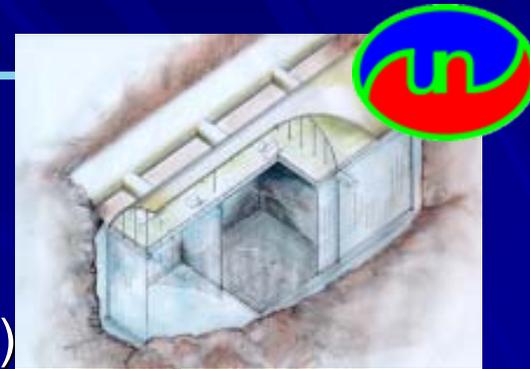
- $E_k = 3,5 \text{ GeV}$
- $E_\nu \sim 300 \text{ MeV}$
- $0,7 \cdot 10^{19} \text{ pot/a}$
- $L = 40 \text{ m}, R = 2 \text{ m}$



Calcul de la sensibilité à θ_{13} et δ_{CP}

■ Détecteur de type UNO:

- Cerenkov à eau (analyse à la Super Kamiokande)
- 440 kt
- A proximité du tunnel du Fréjus (130 km du CERN)



■ Conditions de fonctionnement possibles:

- 5 ans π^+
- 1 an π^+ + 4 ans π^-
- 2 ans π^+ + 8 ans π^-

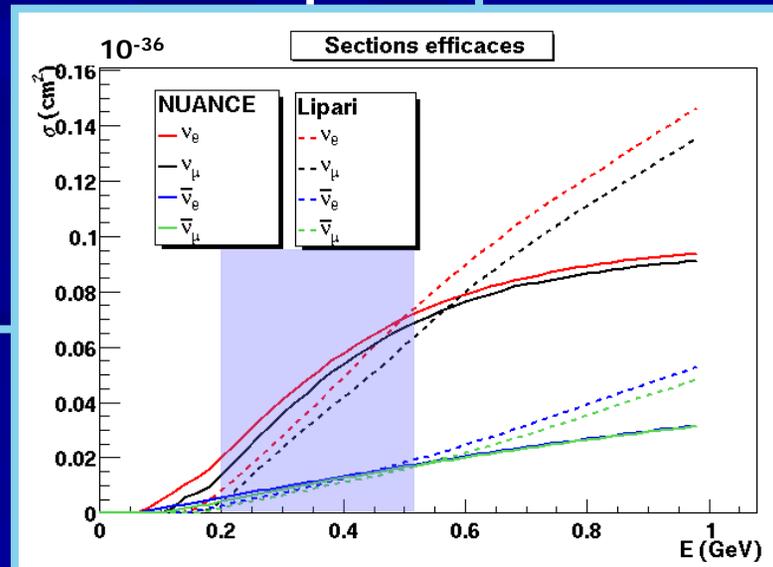
↻ Même durée

↻ Même statistique

■ Les autres paramètres sont:

- $\Delta m_{23} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 \cdot \sin^2 2\theta_{23} = 1.0$
- $\Delta m_{12} = 7.1 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2 \cdot \sin^2 2\theta_{12} = 0.82$

Section efficace
νCC sur H₂O



Le projet de super faisceau de neutrinos SPL–Fréjus

- La quête de θ_{13}
- Le projet SPL–Fréjus
- Optimisation de la ligne de faisceau



Optimisation du tunnel de désintégration

- Les particules vont se propager sur quelques dizaines de mètres dans un tunnel où le vide existe.
- Le tunnel débute juste après la corne.

■ La longueur du tunnel modifie la pureté du faisceau.

■ Test : $L=10\text{m}$, 20m , 40m et 60m .

– $10\text{m} \rightarrow 40\text{m}$

■ $v_\mu, \bar{v}_\mu + 50\%$ à 70%

■ $v_e, \bar{v}_e + 50\%$ à 100%

– $40\text{m} \rightarrow 60\text{m}$

➤ $v_\mu, \bar{v}_\mu + 5\%$

➤ $v_e, \bar{v}_e + 20\%$

■ 40m à l'air meilleur

■ Le rayon du tunnel modifie l'acceptance

■ Test: $R=1\text{m}$, 1.5m et 2m

– $1\text{m} \rightarrow 2\text{m}$ ($L=40$)

➤ $v_\mu, \bar{v}_\mu + 50\%$

➤ $v_e, \bar{v}_e + 50\%$ à 70%

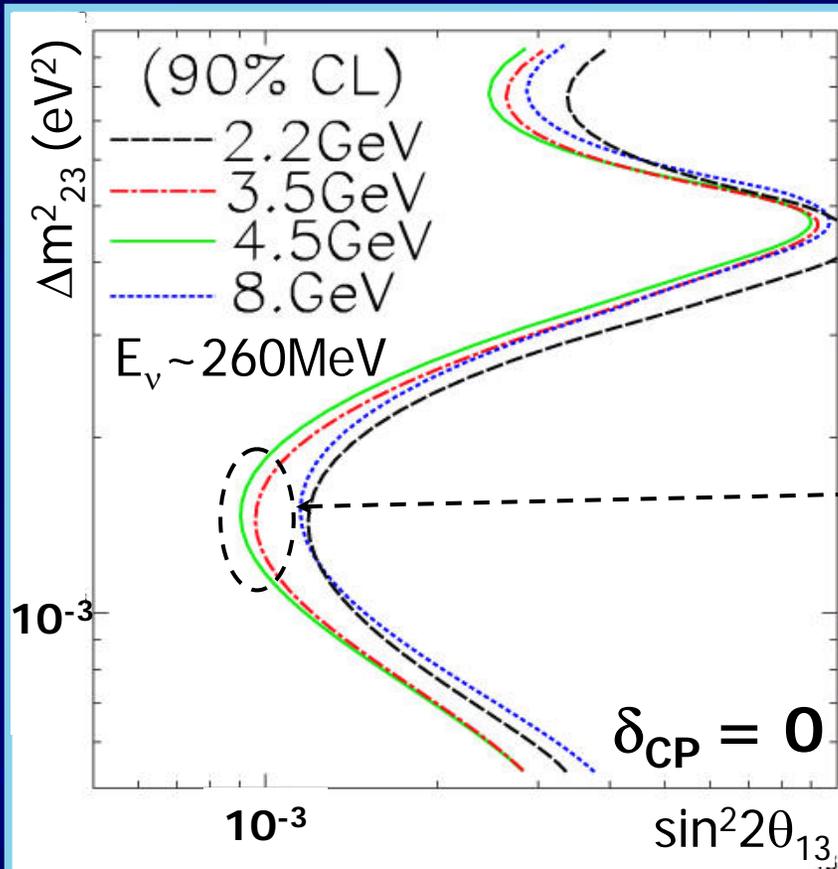
■ 2m à l'air meilleur

Ces résultats vont être vérifiés lors du calcul de la sensibilité à θ_{13} et à δ_{CP}

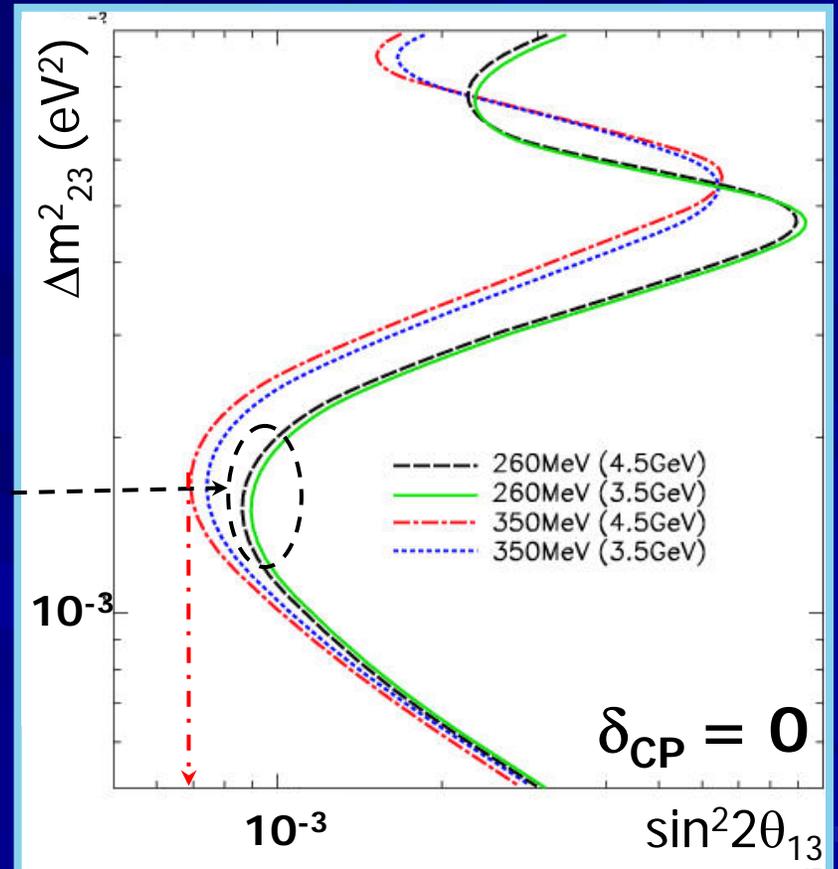


5 ans de focalisation positive

Comparaison de l'énergie



Comparaison des cornes



tunnel : long. 40m
rayon 2m

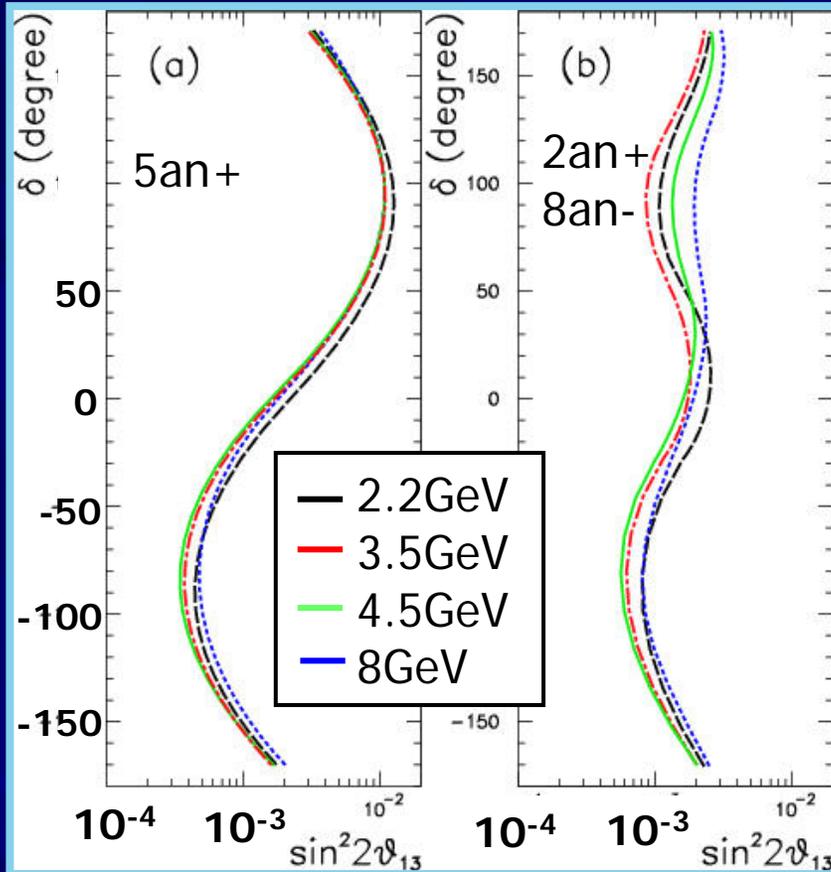
$E_p = 4.5 \text{ GeV}$
 $E_\nu = 350 \text{ MeV}$

$\sin^2 2\theta_{13} > 7,1 \cdot 10^{-4}$
90%CL

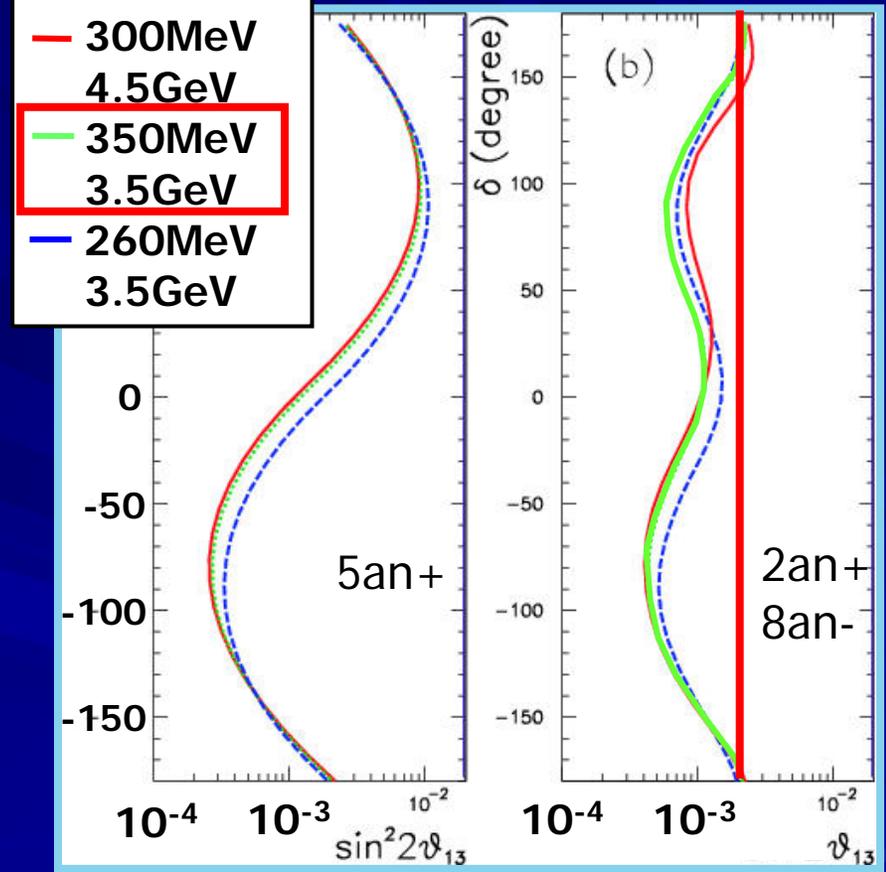


10 ans de focalisation mixte

Comparaison de l'énergie



Comparaison des cornes



tunnel : long. 40m
rayon 2m

$E_p = 3.5\text{GeV}$
 $E_\nu = 350\text{MeV}$

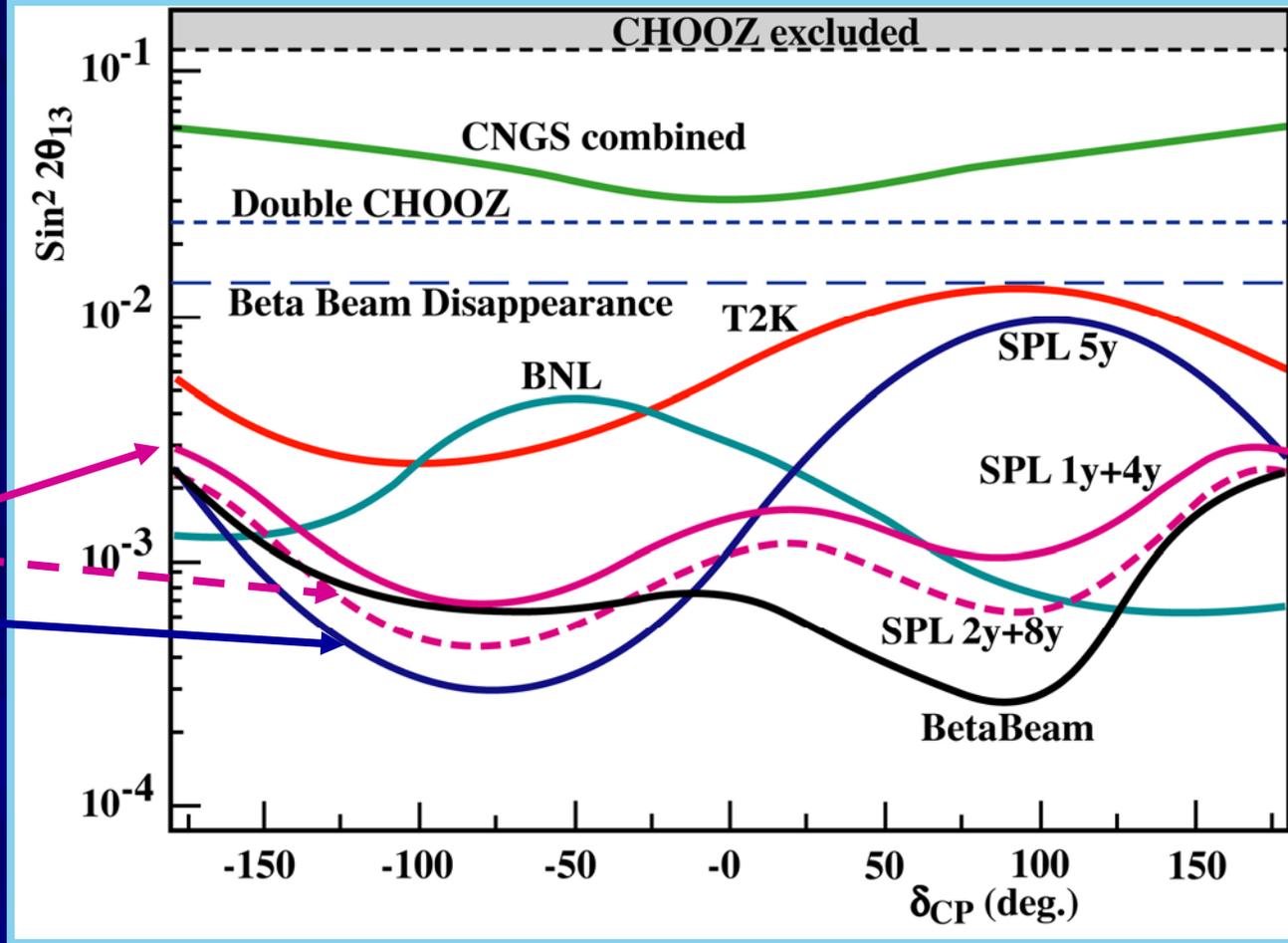
$\sin^2 2\theta_{13} > 2,02 \cdot 10^{-3}$
90%CL



Conclusion

5ans focalisation mixte
10ans focalisation mixte
5ans focalisation positive

hep-ex/0411062,
soumis à EPJC.



- Pour le scénario de 10 ans de focalisation mixte, on obtient une sensibilité autours de $\theta_{13} \sim 1^\circ$
- On constate une complémentarité avec les faisceaux bêta ($\delta_{CP} > 0$)



Conclusion

- Le domaine des neutrinos solaires est maintenant bien connu
- Le domaine des neutrinos atmosphériques occupe le futur proche
 - OPERA est en cours de construction
 - Démarrage à l'automne 2006
- Le futur va explorer les derniers paramètres : θ_{13} et δ_{CP}
 - Un facteur 4 a été gagné en sensibilité pour le projet *SPL-Fréjus*
 - Il peut atteindre la sensibilité de $\sin^2 2\theta_{13} > 2,02 \cdot 10^{-3}$