

L'expérience HARP

de la production hadronique aux faisceaux de neutrinos

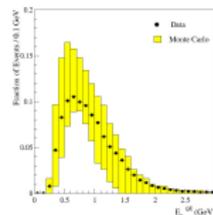
J. Dumarchez

LPNHE-Universités Paris 6&7

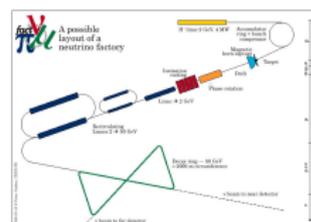
Les motivations de HARP

Faire des mesures précises de production hadronique pour:

- Calculer les flux de neutrinos produits dans les faisceaux classiques en particulier, pour les expériences **K2K** et **MiniBooNE**



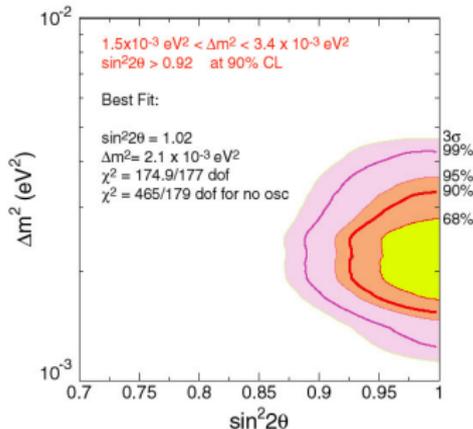
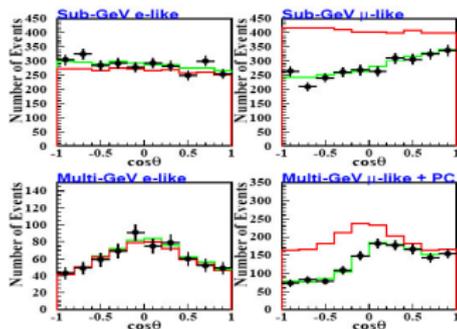
- Aider à la conception des futures usines à neutrinos (proton driver et station cible)



L'exemple de K2K

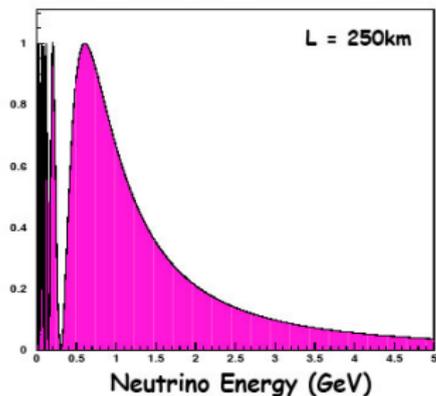
(expérience d'oscillations à grande distance pour confirmer les oscillations atmosphériques: oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, $\Delta m_{23}^2 = 2.1 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{23} \approx 1$)

Zenith angle distribution

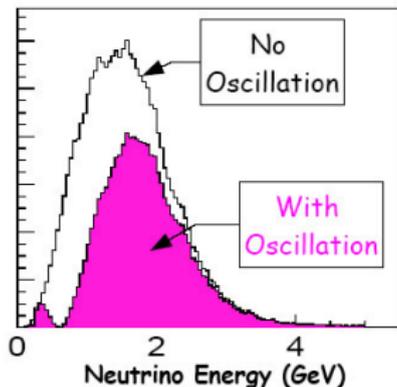


Oscillation Probability

$$\Delta m^2 = .003 \text{ eV}^2 \quad \sin^2(2\theta) = 1.0$$

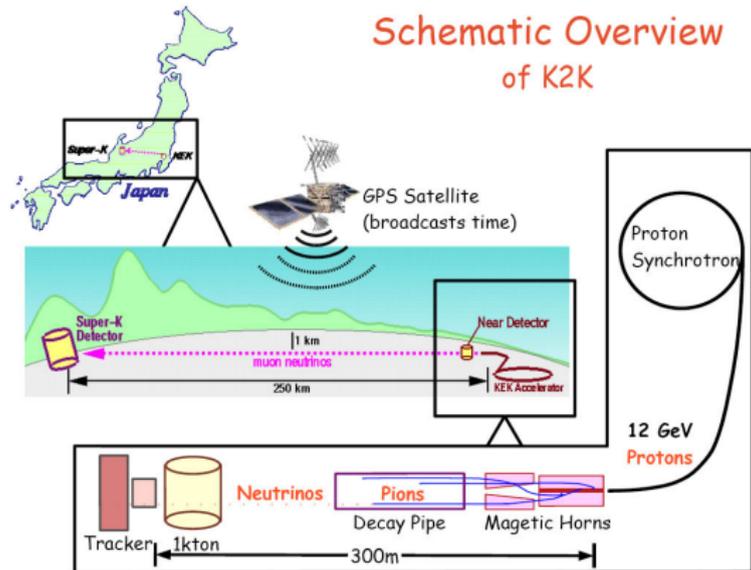


Expected Events



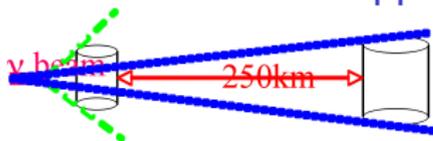
- proba d'oscillation à 250 km pour une source de ν de 1 GeV
- le spectre original doit être mesuré près de la source
- après oscillations le flux est réduit et le spectre en énergie est distordu

Schéma de l'expérience K2K



- SK (à 250 km) voit une source de neutrinos ponctuelle
- Les détecteurs proches sont sensibles à la taille fine du tunnel de désintégration

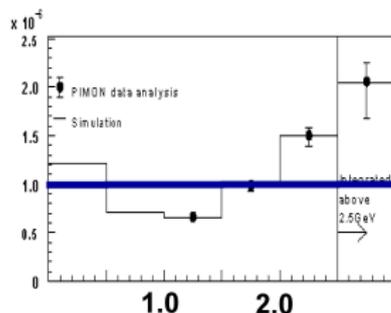
Rapport dét lointain / dét proche



Pour une source ponctuelle, le flux varie en $1/R^2$ en l'absence d'oscillations

$$\Phi(E_\nu)^{\text{far}} = R(E_\nu) \Phi(E_\nu)^{\text{near}}$$

Si le détecteur proche ne voit pas une source ponctuelle, on doit utiliser un facteur $R(E_\nu)$ pour prédire le spectre attendu dans le détecteur lointain

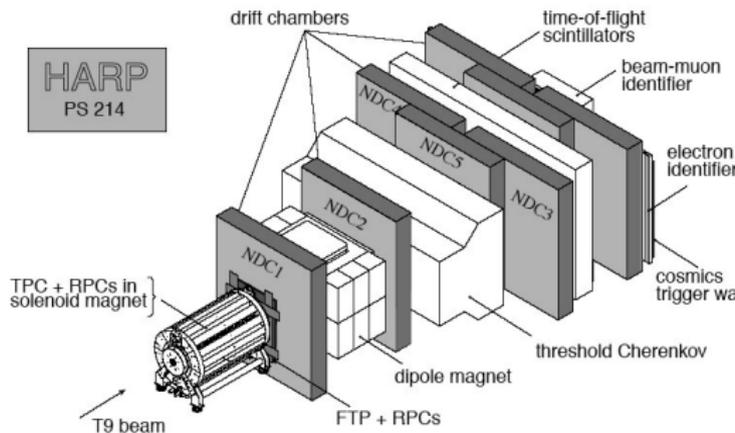


Une bonne détermination du rapport $R(E_\nu)$ est donc essentielle puisque le signal se traduit par une distorsion du spectre en énergie.

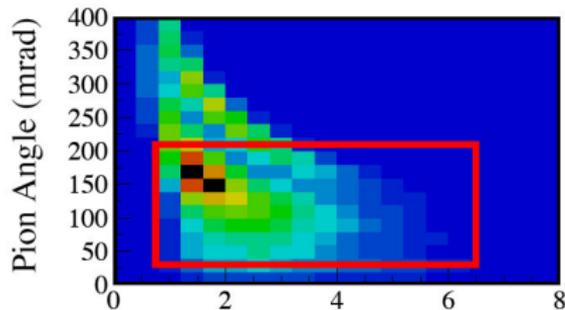
Pour calculer le spectre des ν_μ , on doit mesurer la section efficace de production de π^+ dans les interactions p-Al à 12.9 GeV/c (faisceau de K2K)

→ *HARP*

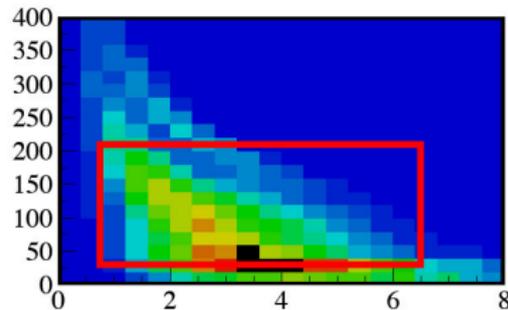
Les mesures de HARP pour K2K



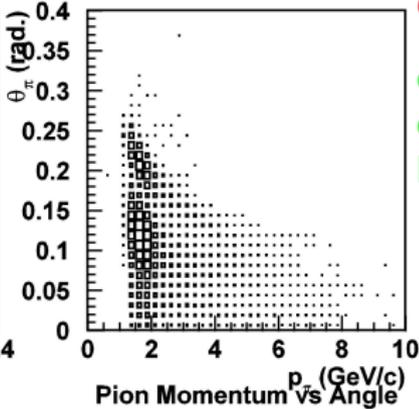
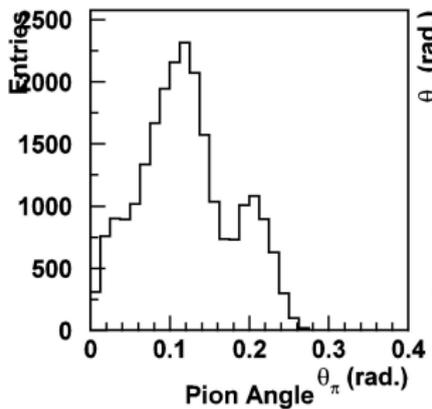
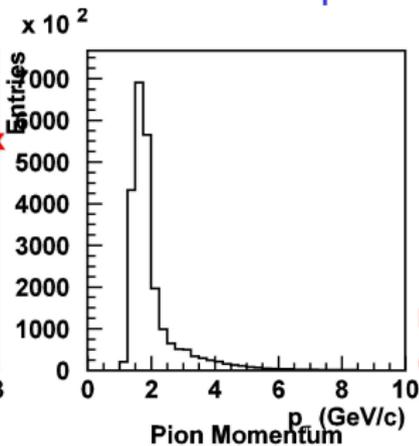
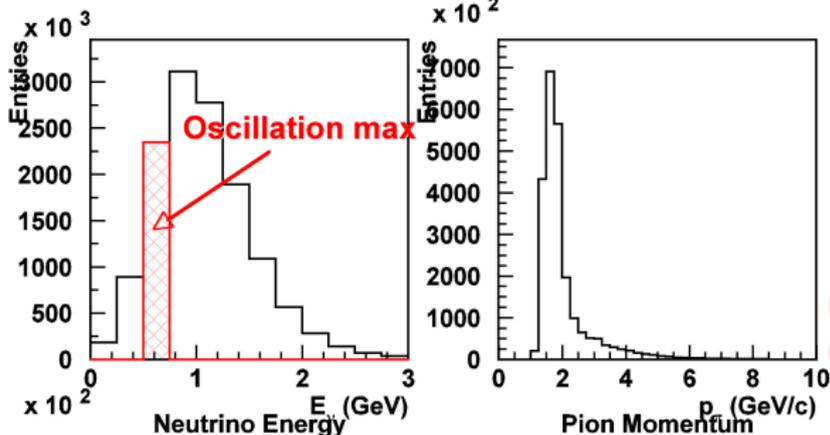
Near Detector Neutrinos



Far Detector Neutrinos



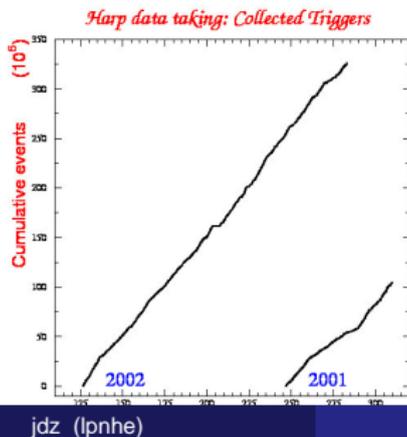
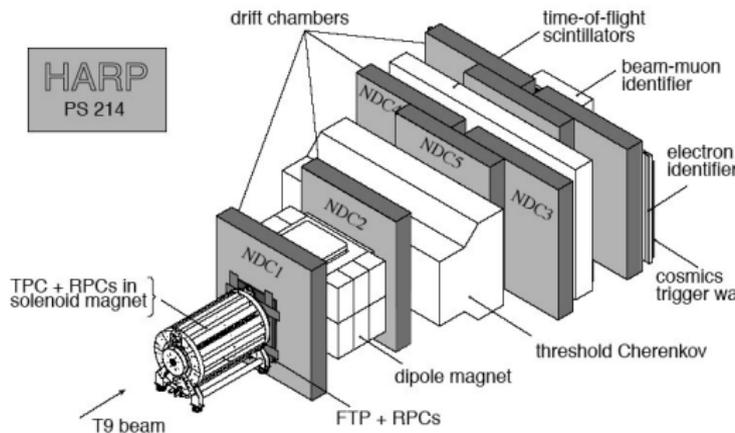
Zone d'intérêt pour K2K



région la plus importante
(max. de l'oscillation):
 $1 \text{ GeV}/c < P_\pi < 2 \text{ GeV}/c$
 $\theta_\pi < 250 \text{ mrad}$

correspond aux données
du spectromètre avant de
HARP

L'expérience HARP



- Impulsion du faisceau entre **1.5 GeV/c** et **15 GeV/c**
- cibles: de l'**hydrogène** au **plomb**

HARP: résumé des données prises

faisceau T9 du PS du CERN, en 2001-2002

Total: 420 M évts en 300 configurations



Be	C	Al	Cu	Sn	Ta	Pb	H ₂ O	Empty
2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	10%	0%
5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	100%	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		
+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+1.5, +3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+1.5, +3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+1.5, +3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c



H	D	N	O	Empty
0.8%				
2.4%	2.1%	5.5%	7.5%	0%
+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c	+3,+5,+8, +12,+15 -3,-5,-8, -12,-15 GeV/c

K2K: Al	MiniBooNE: Be	LSND: H ₂ O
5%	5%	10%
50%	50%	100%
100%	100%	
Replica	Replica	
+12.9 GeV/c	+8.9 GeV/c	+1.5 GeV/c

Current analysis

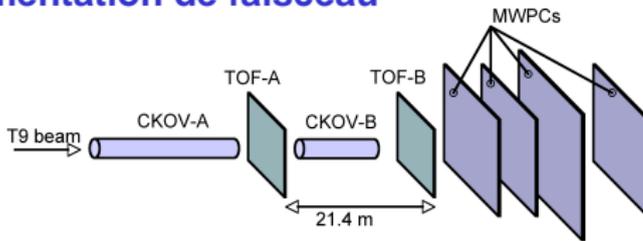
$$\frac{d^2\sigma^\pi}{dpd\Omega} \sim \frac{\Delta N^\pi}{\Delta p \Delta \theta} \cdot \frac{\text{correction factors}(p, \theta)}{N_{pot}}$$

- Sélection des événements identifiés comme proton primaire interagissant avec la cible
- Pour chaque événement reconstruction des traces et de leur impulsion
- Identification des pions et soustraction du bruit de fond
- Corrections
 - résolution en impulsion
 - efficacité de reconstruction
 - acceptance angulaire du spectromètre
 - efficacité et pureté de PID
 - soustraction cible vide
 - ...

Sélection des événements

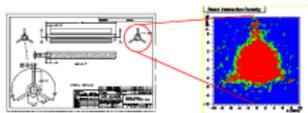
Instrumentation de faisceau

composition du faisceau,
direction et
normalisation (pot)



MWPCs

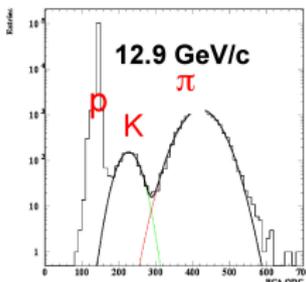
direction du faisceau inci-
dent



cible MiniBooNE

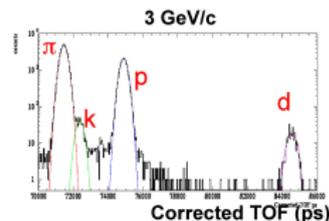
CHE faisceau

séparation $K/p/\pi$ à haute
énergie



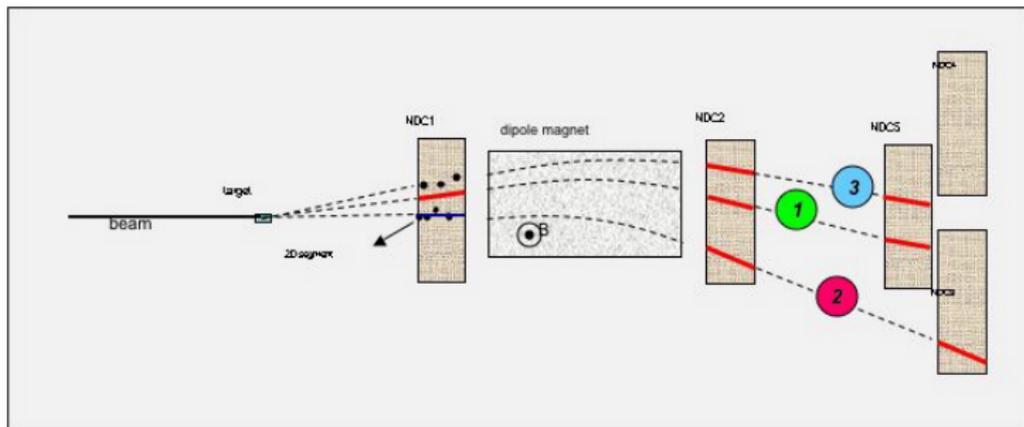
TOF faisceau

séparation $K/p/\pi$ à basse
énergie et t_0

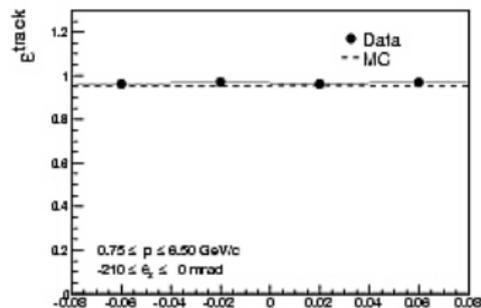


pureté de la sélection du proton incident: > 98.7%

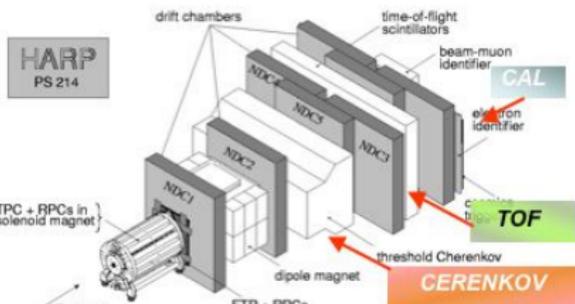
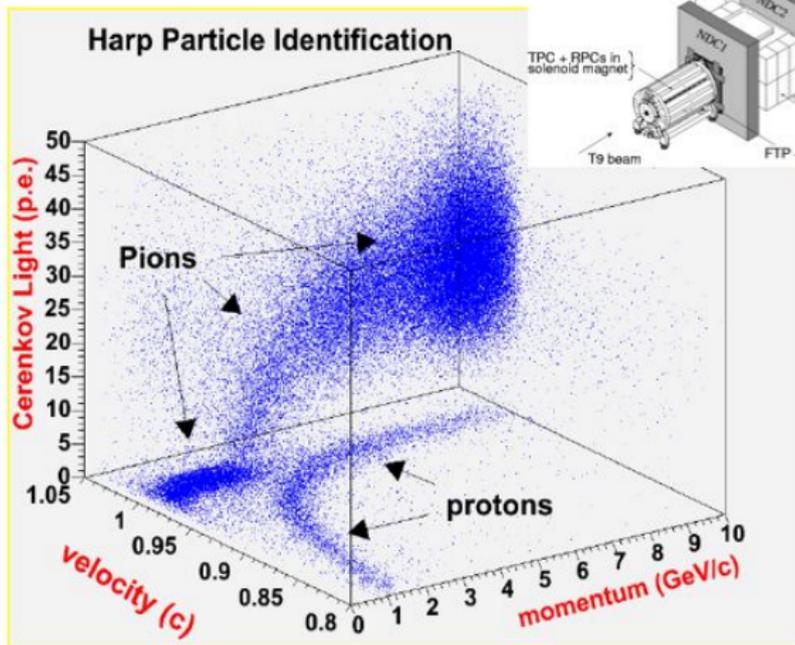
Reconstruction des traces



- la redondance dans les DC et dans les contraintes de vertex permet une détermination de l'efficacité de reconstruction par les données elles-mêmes
- **efficacité > 95%**



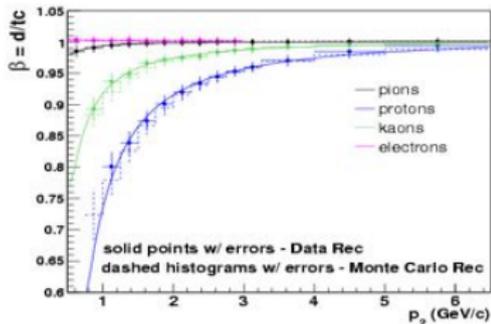
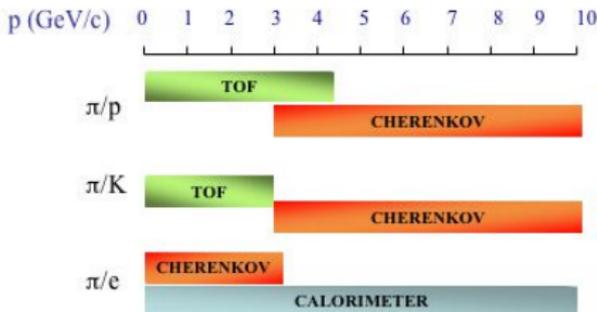
PID principle



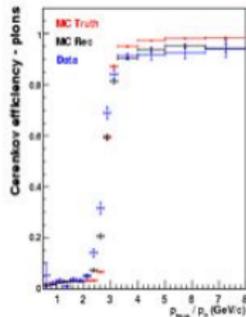
Identification des particules

HARP – PS214 at CERN

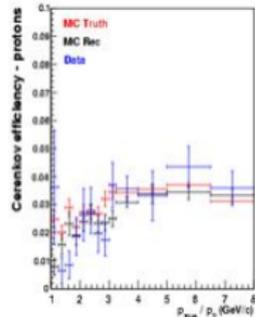
Particle identification in the forward spectrometer



TOF $\pi/p/K$ response



Cherenkov π/p response



PID algorithms for the forward spectrometer are described in

NIM A572 (2007) 899

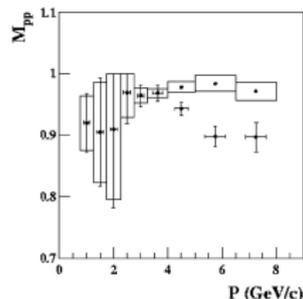
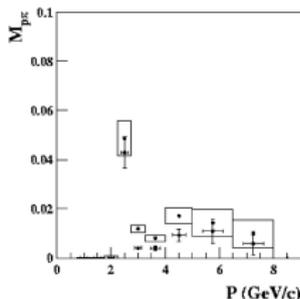
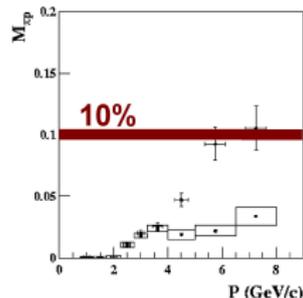
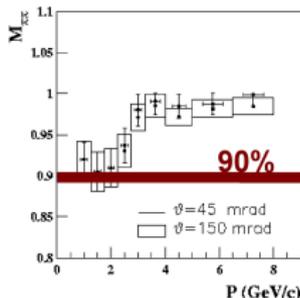
Efficacité et pureté de l'identification des pions

Pour chaque bin (p, θ) on calcule la matrice d'efficacité/migration de PID à partir des données

proba d'identifier correctement un pion

$$\begin{pmatrix} n_\pi \\ n_p \end{pmatrix}_{rec} = \begin{pmatrix} M_{\pi\pi} & M_{\pi p} \\ M_{p\pi} & M_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_\pi \\ n_p \end{pmatrix}_{true}$$

proba d'identifier faussement un proton comme pion



Section efficace

$$\frac{d^2\sigma_\alpha}{dp_i d\theta_j} = \frac{1}{N_{\text{pot}}} \frac{A}{N_A \rho t} M_{ij\alpha i' j' \alpha'}^{-1} \cdot \left[N_{i' j'}^{\alpha'}(\text{T}) - N_{i' j'}^{\alpha'}(\text{E}) \right]$$

$(p, \theta)_{\text{true}}$

normalisation
absolue

matrice eff.
migration
correction

mesure

soustraction
sans cible

primes: quantités reconstruites

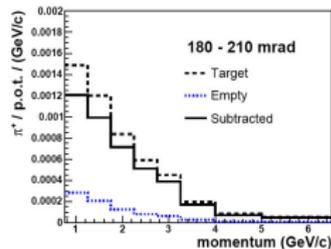
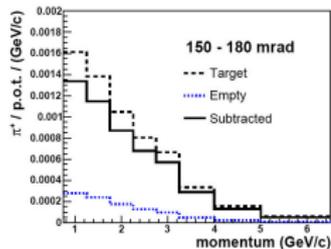
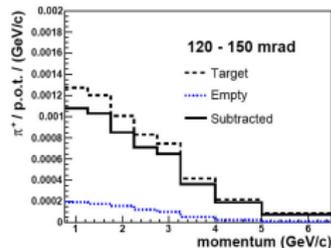
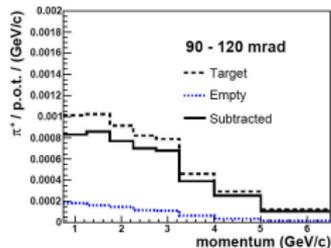
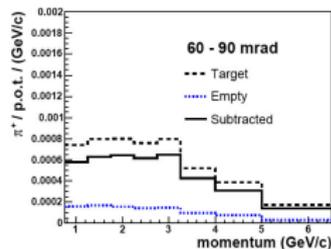
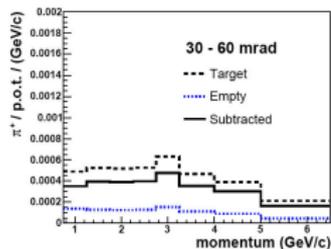
i,j: bins d'impulsion et d'angle

α : type de particule

Correction Factors

<u>Correction Type</u>	<u>Impact On Cross-section</u>	<u>Method</u>
Momentum Resolution	Shape	MC
Particle Efficiency	~15% up	Data
Geometric Acceptance	~100-160% up	MC/Analytic
Pion ID	Efficiency: ~5-10% up	Data
Pion ID	π -proton: migration < 5% down	Data
Absorption/decay	10-30% up	MC
Tertiary Production	< 5% down	MC
Electron Veto Eff	5-10% up	MC
Kaon Subtraction	1-3% down	Data/MC
Target-out subtraction	~20%	Data

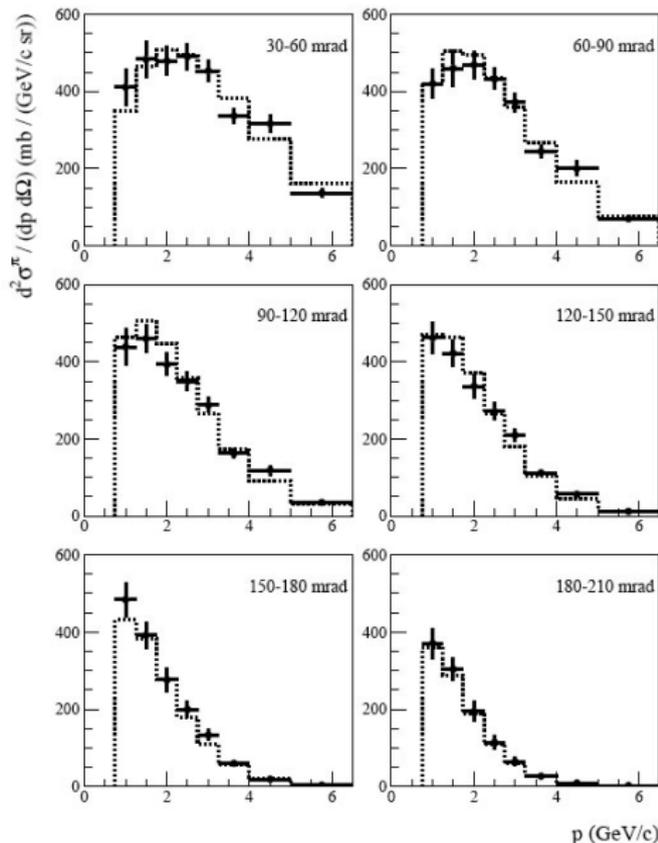
Soustraction cible vide



Résultats p-Al à 12.9 GeV/c

Section efficace déconvoluée

fit de la paramétrisation de Sanford-Wang sur la section efficace de production (pointillés)



Sanford-Wang Parameterization

$$\frac{d^2\sigma(p+A \rightarrow \pi^+ + X)}{dpd\Omega}(p, \theta) = c_1 p^{c_2} \left(1 - \frac{p}{p_{\text{beam}}}\right) \exp\left[-c_3 \frac{p^{c_4}}{p_{\text{beam}}^{c_5}} - c_6 \theta (p - c_7 p_{\text{beam}} \cos^{c_8} \theta)\right]$$

Parameter	Value
c_1	$(4.4 \pm 1.3) \cdot 10^2$
c_2	$(8.5 \pm 3.4) \cdot 10^{-1}$
c_3	(5.1 ± 1.3)
$c_4 = c_5$	(1.78 ± 0.75)
c_6	(4.43 ± 0.31)
c_7	$(1.35 \pm 0.29) \cdot 10^{-1}$
c_8	$(3.57 \pm 0.96) \cdot 10^1$

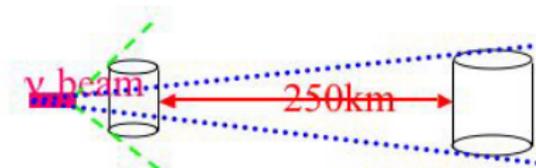
Parameter	c_1	c_2	c_3	$c_4 = c_5$	c_6	c_7	c_8
c_1	1.000						
c_2	-0.056	1.000					
c_3	-0.145	-0.691	1.000				
$c_4 = c_5$	-0.322	-0.890	0.831	1.000			
c_6	-0.347	0.263	-0.252	-0.067	1.000		
c_7	-0.740	0.148	-0.067	0.077	0.326	1.000	
c_8	0.130	-0.044	0.205	-0.040	-0.650	0.189	1.000

HARP measurements for p-Al at 12.9 GeV/c

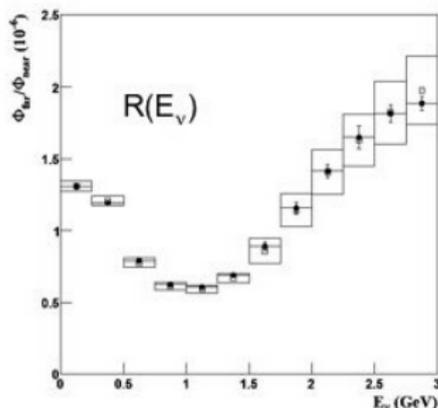
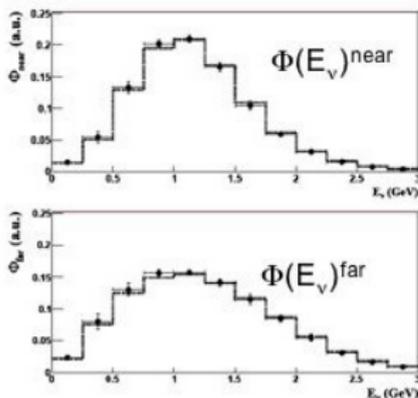
Error Analysis: Overall error ~ 6%

Error Category	Error Source	δ_{diff} (%)	δ_{int} (%)
Statistical	Al target statistics	1.6	0.3
	Empty target subtraction (stat.)	1.3	0.2
	Sub-total	2.1	0.4
Track yield corrections	Reconstruction efficiency	0.8	0.4
	Pion, proton absorption	2.4	2.6
	Tertiary subtraction	3.2	2.9
	Empty target subtraction (syst.)	1.2	1.1
	Sub-total	4.5	4.1
Particle identification	PID Probability cut	0.2	0.2
	Kaon subtraction	0.3	0.1
	Electron veto	2.1	0.5
	Pion, proton ID correction	2.5	0.4
	Sub-total	3.5	0.7
Momentum reconstruction	Momentum scale	3.0	0.3
	Momentum resolution	0.6	0.6
	Sub-total	3.2	0.7
Overall normalization	Sub-total	4.0	4.0
All	Total	8.2	5.8

K2K Near/Far Ratio



$$\Phi(E_\nu)^{\text{far}} = R(E_\nu) \Phi(E_\nu)^{\text{near}}$$

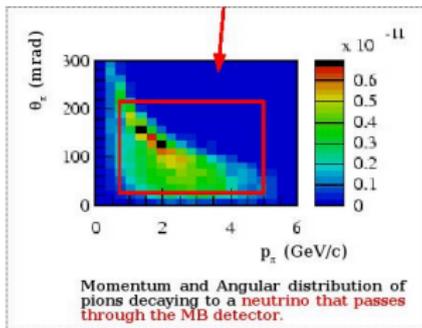


Résultat majeur de HARP: confirmé les simulations de faisceau mais surtout réduit d'un facteur 2 les incertitudes systématiques associées.

M. H. Ahn et al. K2K Collaboration, Phys. Rev. D74 (2006) 072003

Cible de Beryllium: MiniBooNE

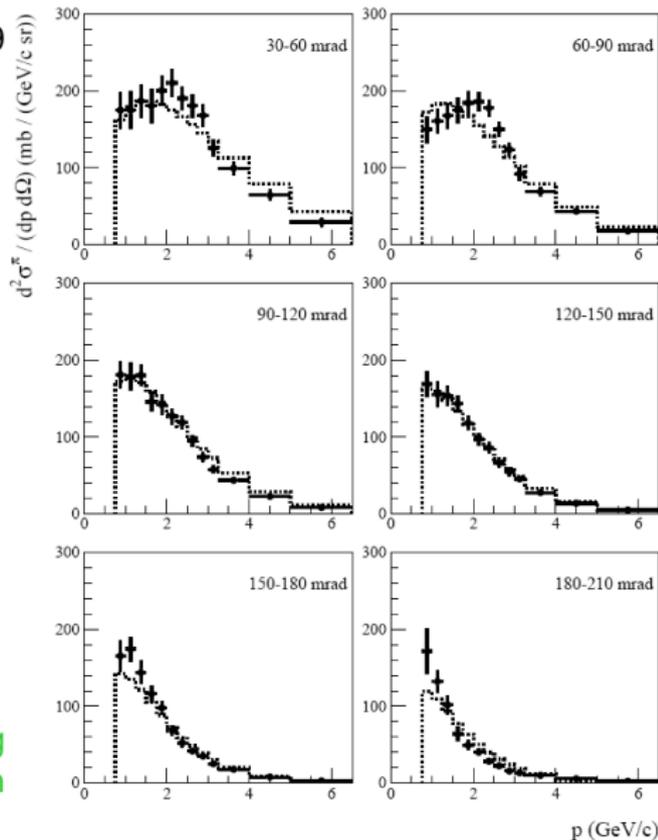
cible: Be 5% λ ; faisceau: protons de 8.9 GeV



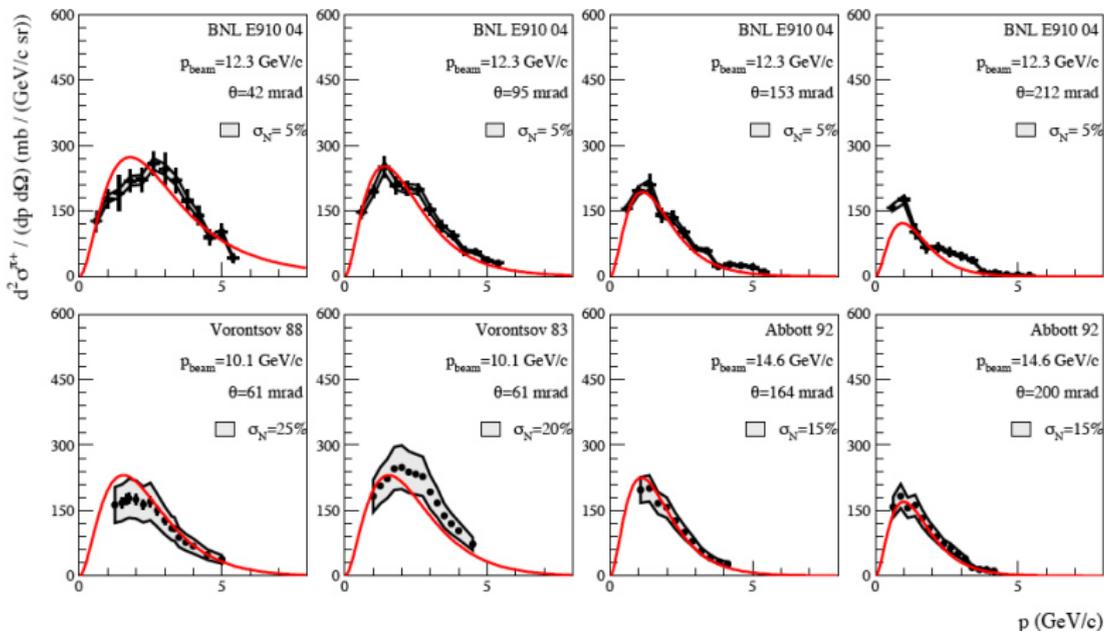
erreur typique par point: 9.8%
erreur sur l'intégrale: 4.9%

fit de la paramétrisation de Sanford-Wang sur la section efficace de production (pointillés)

hep-ex/0702034

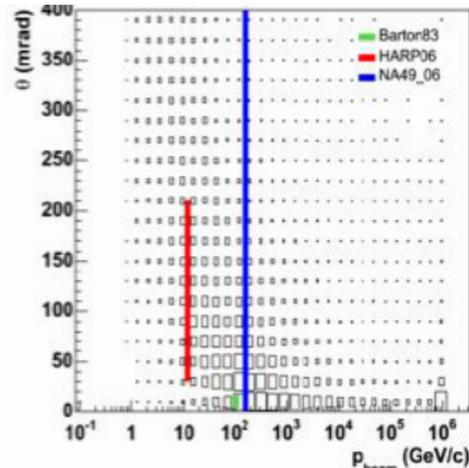
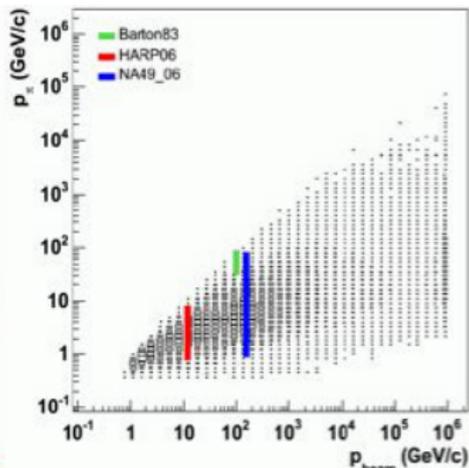
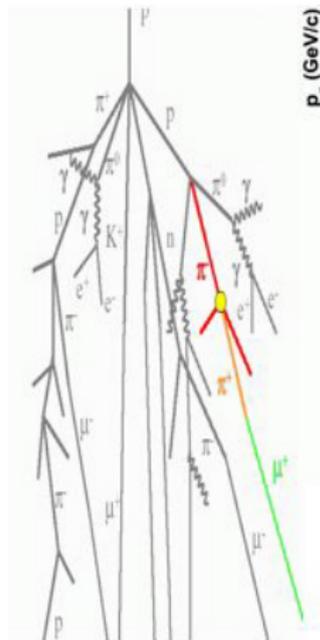


La paramétrisation de S-W est utilisée pour introduire les données de HARP dans les simulations de faisceau de K2K ou MiniBooNE, traduire les incertitudes sur la production des pions en incertitudes sur le flux de muon et comparer les résultats de HARP aux résultats plus anciens



Flux de neutrinos atmosphériques

Les données de HARP $p+C$ à 12 GeV/c et de NA49 $p+C$ à 158 GeV/c sont importantes pour le calcul des flux de neutrinos atmosphériques en attendant les données sur les cibles cryogéniques N_2 et O_2 .

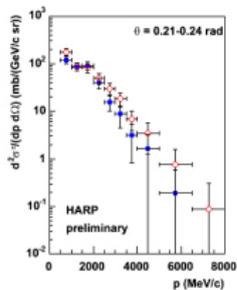
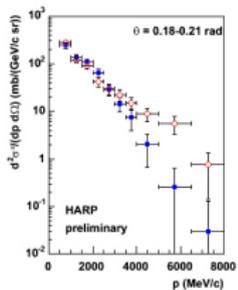
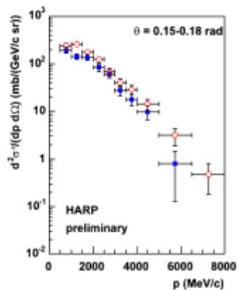
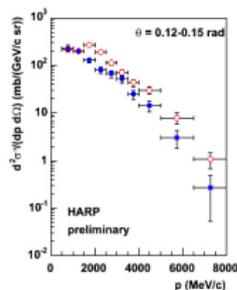
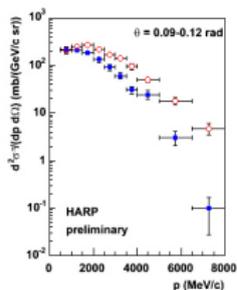
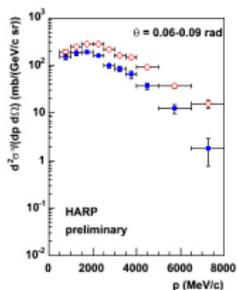
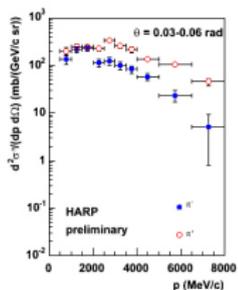


5 B Boron 10 811	6 C Carbon 12 001	7 N Nitrogen 14 003	8 O Oxygen 16 004	9 F Fluorine 18 998	10 Ne Néon 20 1797
---------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------	------------------------------	-----------------------------

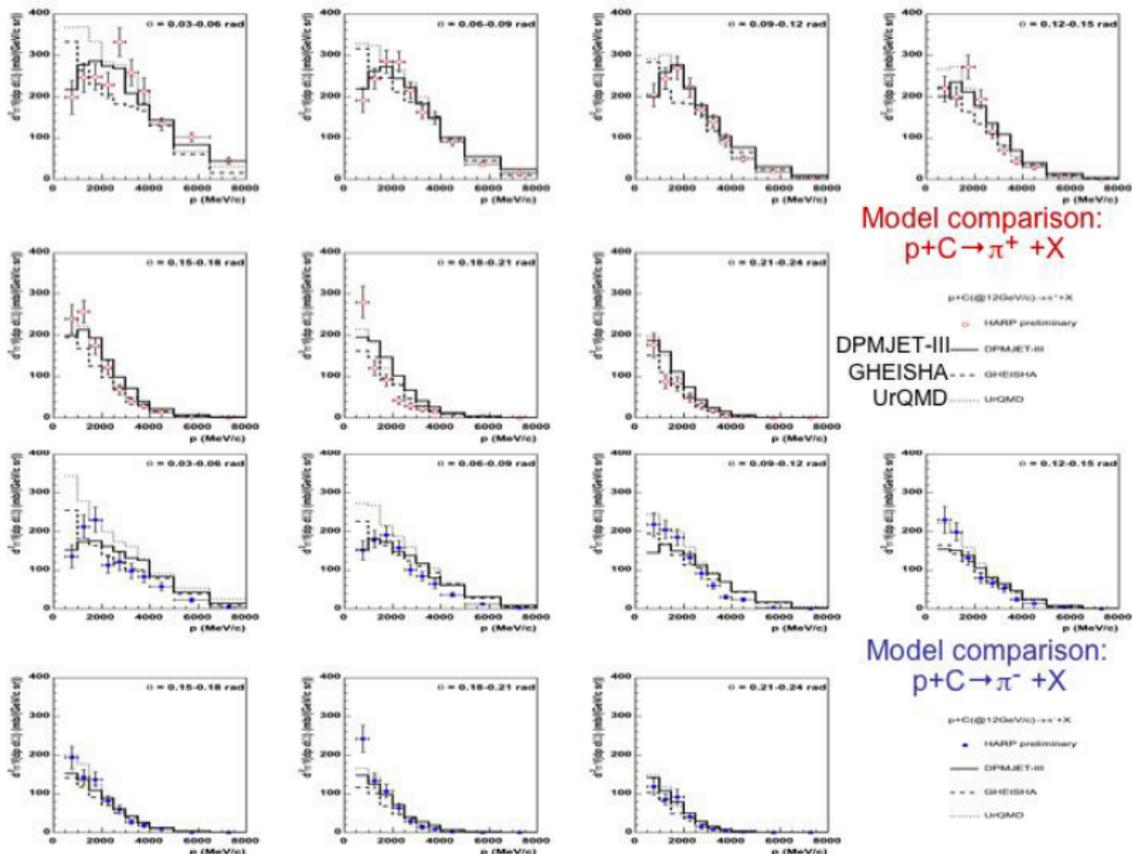
78% nitrogen
21% oxygen

$p+C$ à 12 GeV/c

π^+ π^-



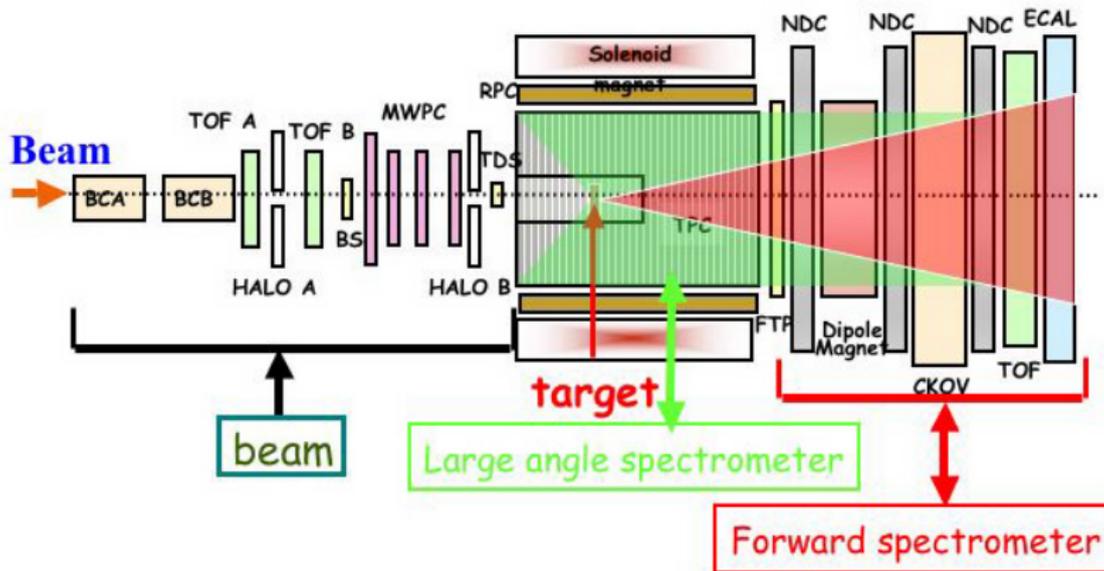
comparaison avec les modèles



Mesures avec le spectromètre à grand angle

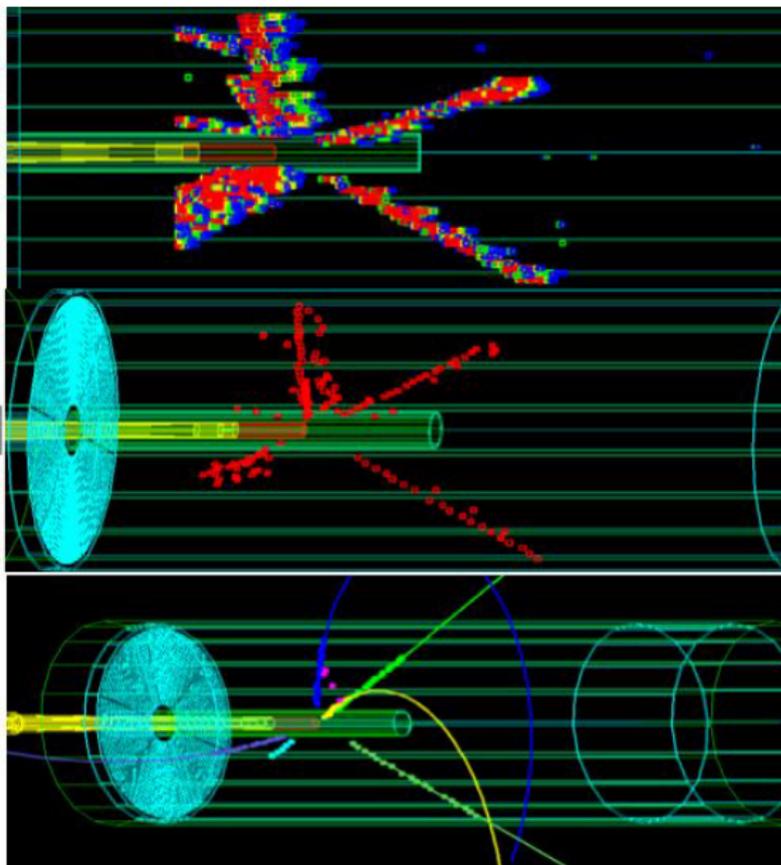
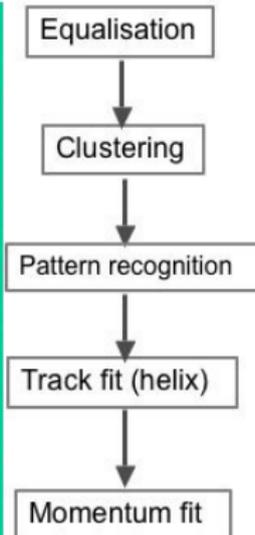
cibles à haut Z

$$0.35 < \theta < 2.15 \text{ mrad}$$



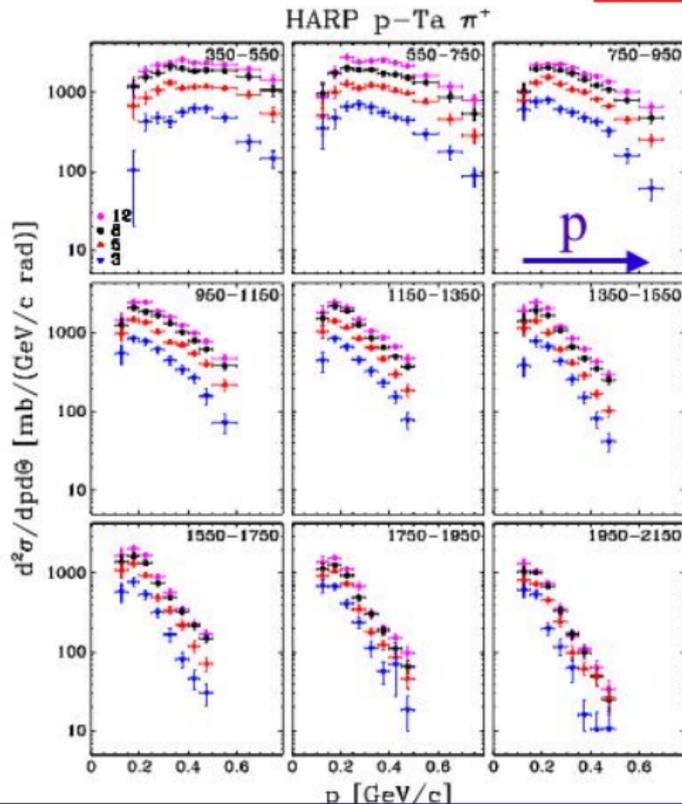
Reconstruction dans la TPC

TPC Track Reconstruction



9 angular bins: p-Ta π^+

Pion production yields



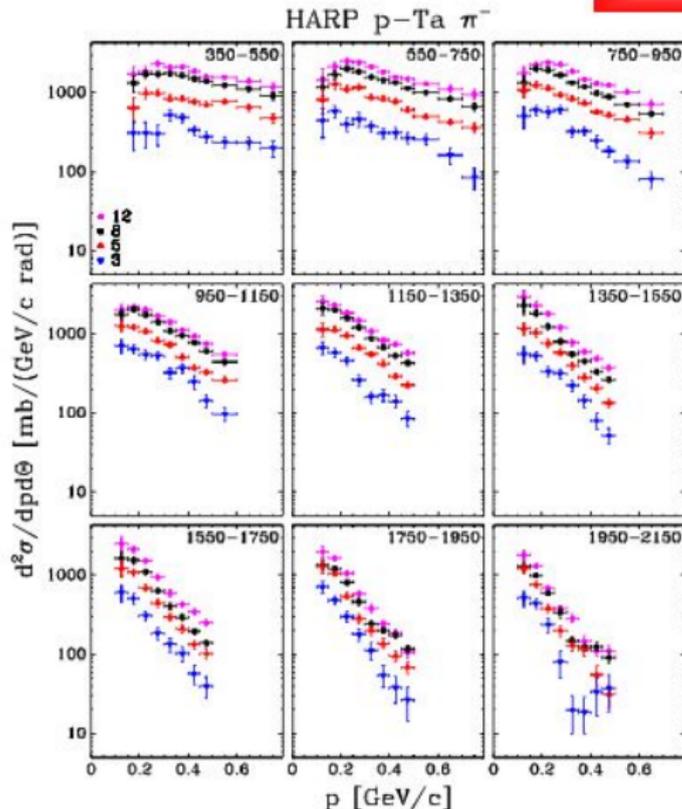
stat. and syst. errors combined

forward
 $0.35 < \theta < 1.55$

backward
 $1.55 < \theta < 2.15$

p-Ta π^-

Pion production yields

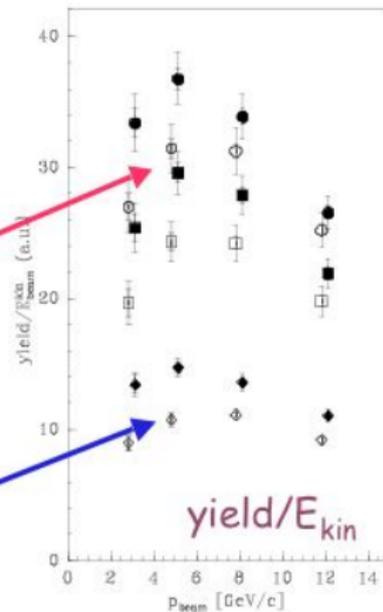
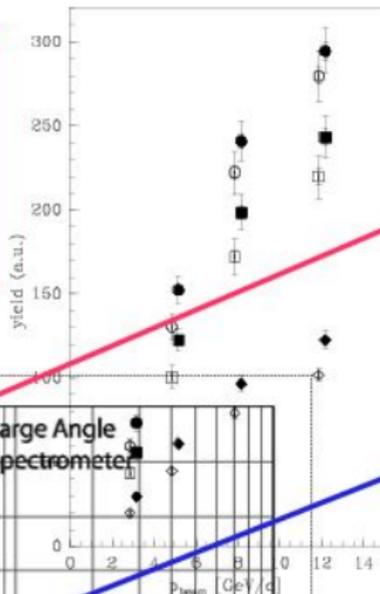
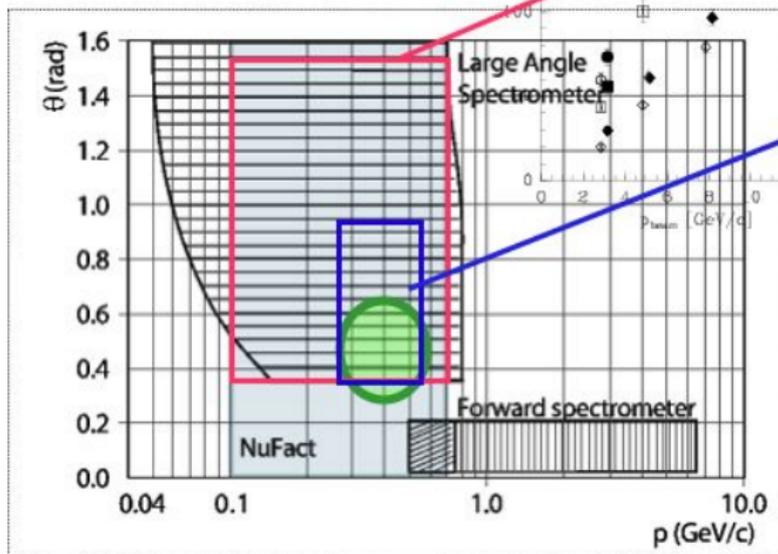


stat. and syst. errors combined

forward
 $0.35 < \theta < 1.55$

backward
 $1.55 < \theta < 2.15$

Neutrino factory study



π^- open symbols
 π^+ closed symbols

Cross-sections to be fed into neutrino factory studies to find optimum design

Conclusions

- L'expérience **HARP** a déjà fait d'importantes contributions pour la physique des neutrinos en mesurant les sections efficaces de production hadronique.
- Les résultats sur l'aluminium, utiles pour **K2K** ont été publiés et utilisés dans leur publication finale
Les résultats sur le beryllium, utiles pour **MiniBooNE** sont en cours de publication et ont été essentiels pour l'aboutissement de leur analyse
- Les résultats sur le tantalum, utiles pour les **usines à neutrinos** sont acceptés pour publication (le Pb suit)
- Les données carbone pour les **flux de neutrinos atmosphériques** sont disponibles (N_2 et O_2 vont suivre)
- La comparaison avec les modèles de production hadronique et l'intégration dans **GEANT4** restent à faire, ainsi que l'exploitation complète de toutes les données.
- Une expérience similaire (**NA61**) va être menée au CERN en 2007-08 pour jouer le même rôle auprès de **T2K**.