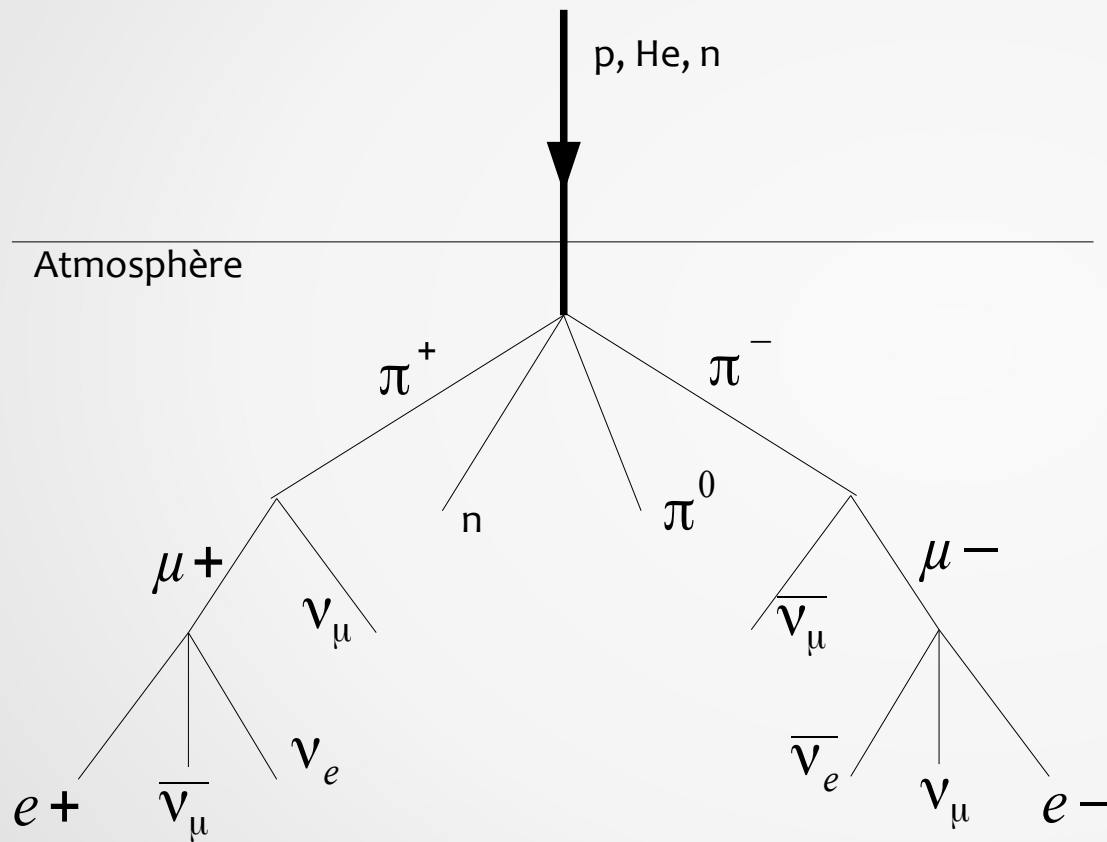




Neutrinos Atmosphériques et Hiérarchie de Masse

Les Neutrinos Atmosphériques



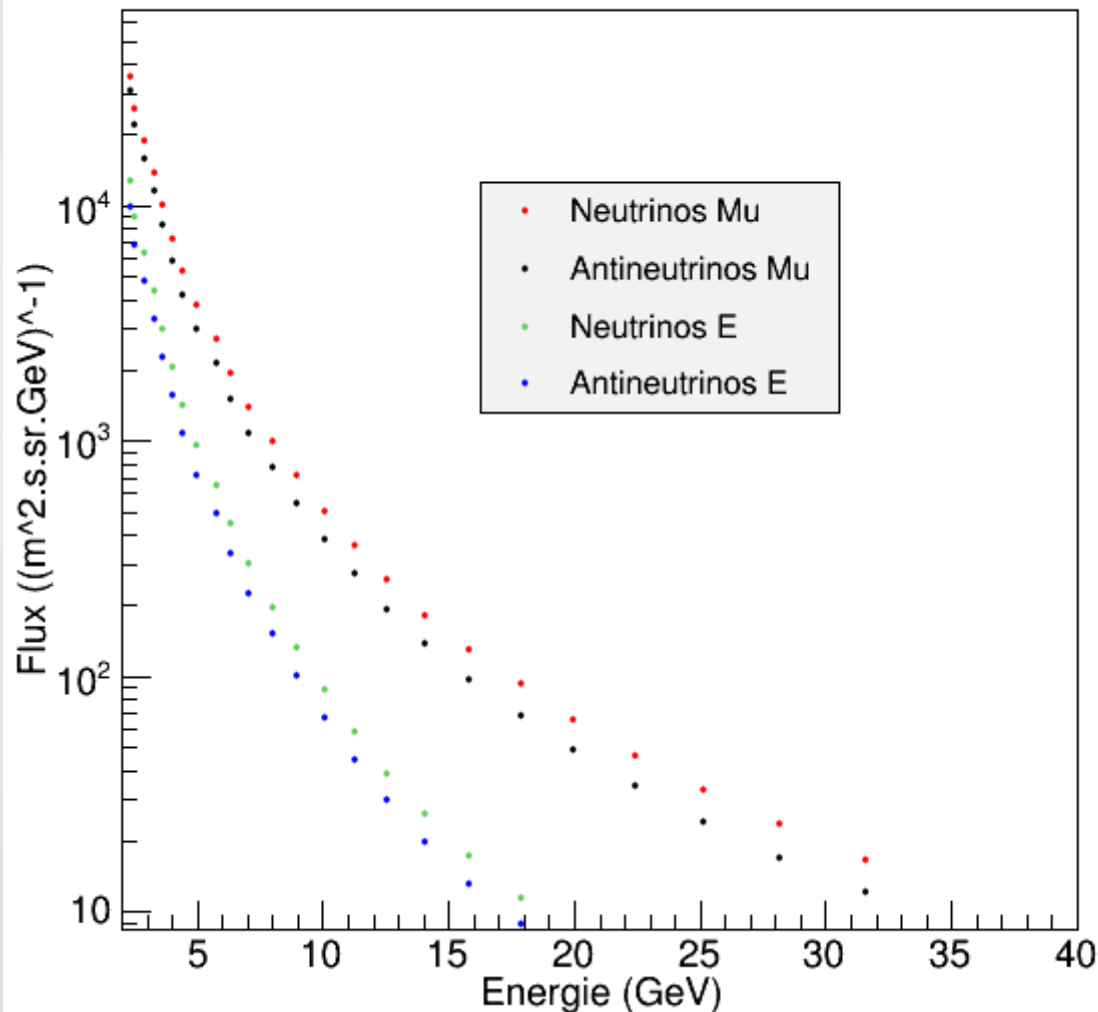
- Cascade hadronique riche en Pions

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$

- Production de $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$

Les Neutrinos Atmosphériques

Flux de neutrinos mu



⇒ On se concentre
sur les ν_{μ}

Plot réalisé à partir des données
du Modèle de Honda et al

L'oscillation des neutrinos

- Trois saveurs : ν_e, ν_μ, ν_τ
- Combinaison de trois états de masses ν_1, ν_2, ν_3

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = M_{PMNS} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

⇒ Mécanisme d'oscillation

⇒ **Une saveur peut osciller vers une autre**

L'oscillation des neutrinos

- Exemple de formule d'oscillation :

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}) = \cos^4(\theta_{13}) \cdot \sin^2(2\theta_{23}) \cdot \sin^2\left(1.27 \cdot \frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{E}\right)$$

L'oscillation des neutrinos

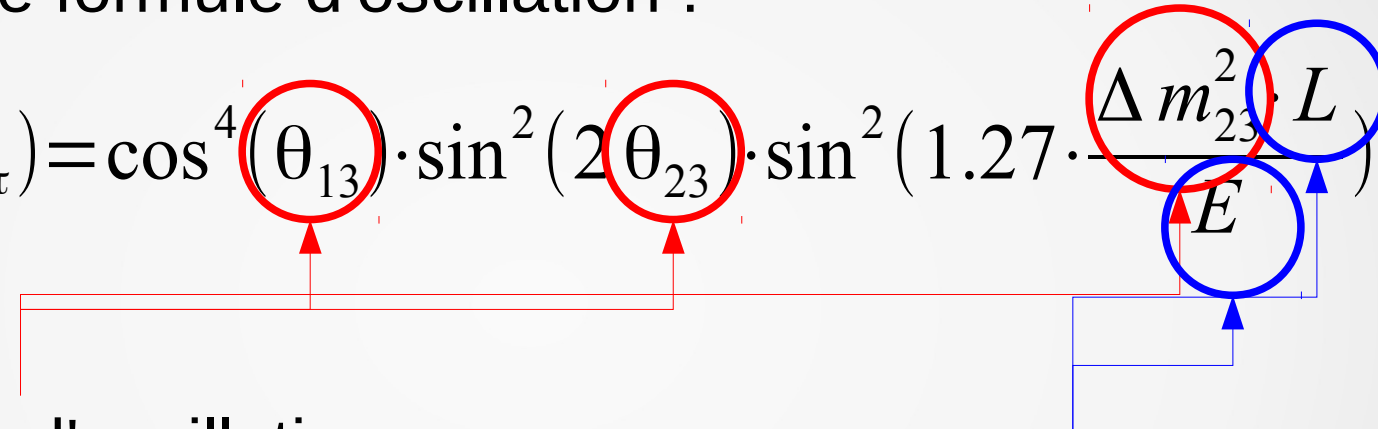
- Exemple de formule d'oscillation :

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}) = \cos^4(\theta_{13}) \cdot \sin^2(2\theta_{23}) \cdot \sin^2\left(1.27 \cdot \frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{E}\right)$$

paramètres d'oscillation

L'oscillation des neutrinos

- Exemple de formule d'oscillation :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \cos^4(\theta_{13}) \cdot \sin^2(2\theta_{23}) \cdot \sin^2\left(1.27 \cdot \frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{E}\right)$$


paramètres d'oscillation

2 variables

L'oscillation des neutrinos

- Exemple de formule d'oscillation :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \cos^4(\theta_{13}) \cdot \sin^2(2\theta_{23}) \cdot \sin^2\left(1.27 \cdot \frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{E}\right)$$

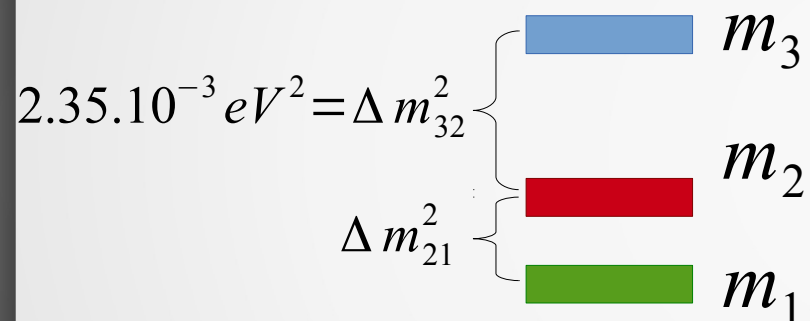
paramètres d'oscillation

2 variables

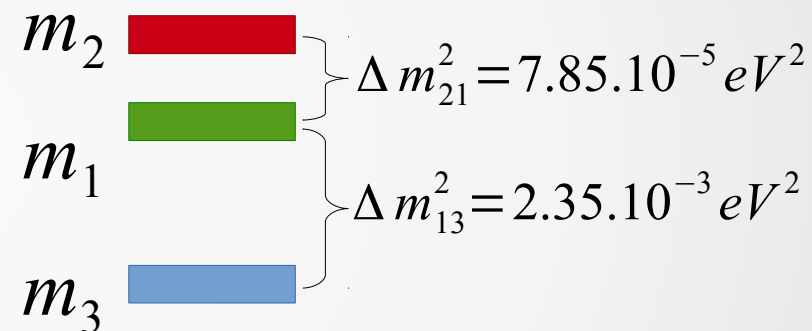
⇒ 5 paramètres d'oscillations : $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \Delta m_{12}^2, \Delta m_{13}^2$ (ou Δm_{23}^2)
⇒ Variable : $\frac{L}{E}$ (ici $\delta = 0$)

Hiérarchie de masse

Deux hiérarchie de masse possibles :



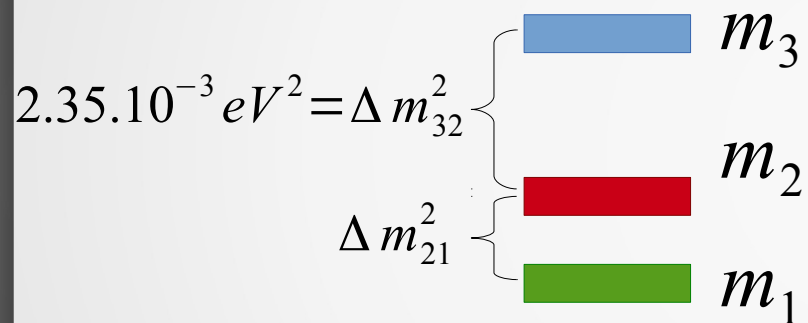
Hiérarchie normale
(NH)



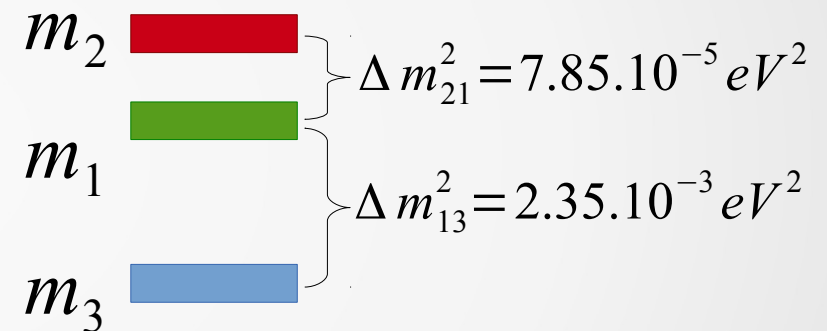
Hiérarchie inverse
(IH)

Hiérarchie de masse

Deux hiérarchie de masse possibles :



Hiérarchie normale
(NH)

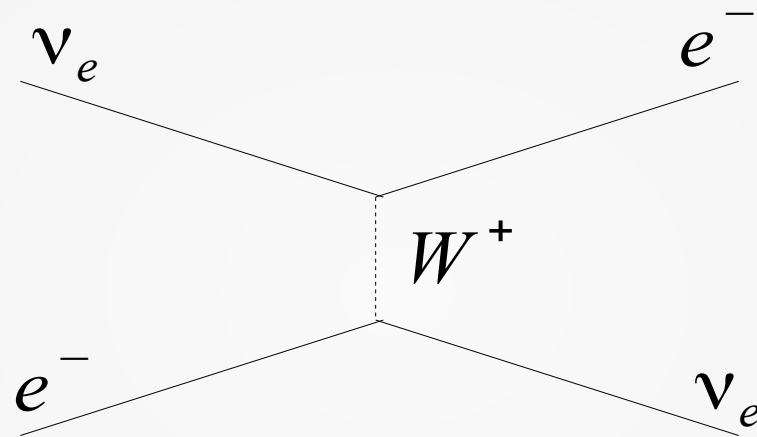


Hiérarchie inverse
(IH)

\Rightarrow Signe de Δm_{13}^2 ?

Les Effets de matière

Dans la matière :



⇒ Modification des probabilités d'oscillation

⇒ **Ces modifications peuvent-elles apporter une sensibilité à la hiérarchie de masse ?**

Présentation du projet

- Calcul du flux de neutrinos muons atmosphériques

Présentation du projet

- Calcul du flux de neutrinos muons atmosphériques
- Calcul de la probabilité de survie de ces neutrinos

Présentation du projet

- Calcul du flux de neutrinos muons atmosphériques
- Calcul de la probabilité de survie de ces neutrinos
- Calcul de leur section efficace

Présentation du projet

- Calcul du flux de neutrinos muons atmosphériques
- Calcul de la probabilité de survie de ces neutrinos
- Calcul de leur section efficace
- Détermination du nombre d'événements attendu

Présentation du projet

- Calcul du flux de neutrinos muons atmosphériques
- Calcul de la probabilité de survie de ces neutrinos
- Calcul de leur section efficace
- Détermination du nombre d'événements attendu
- Comparaison des hiérarchies normale et inverse

Calcul du flux de ν_μ atmosphériques

Ce flux dépend d'un grand nombre de paramètres, dont :

- Le flux initial de particules cosmiques
- L'énergie et l'impulsion de ces particules
- La densité de l'atmosphère
- La topologie magnétique terrestre

⇒ Il existe de nombreux modèles

⇒ Choix pour cette étude : modèle de Honda et al
Flux calculé au Gran Sasso
Phys. Rev. D 83, 123001 (2011)

Calcul du flux de ν_μ atmosphériques

Données du modèle Honda

```
average flux in [cosZ = 0.90 -- 1.00, phi_Az = 0 -- 30]
  Enu (GeV)      NuMu      NuMubar      NuE      NuEbar      (m^2 sec
sr GeV) ^-1
  1.0000E-01  7.2886E+03  7.3435E+03  3.5321E+03  3.4746E+03
  1.1220E-01  6.6023E+03  6.6505E+03  3.1970E+03  3.1358E+03
  1.2589E-01  5.9430E+03  5.9901E+03  2.8653E+03  2.7827E+03
  1.4125E-01  5.3043E+03  5.3399E+03  2.5414E+03  2.4368E+03
  1.5849E-01  4.6891E+03  4.7032E+03  2.2305E+03  2.1102E+03
  1.7783E-01  4.0813E+03  4.0852E+03  1.9369E+03  1.8224E+03
  1.9953E-01  3.4997E+03  3.5054E+03  1.6600E+03  1.5537E+03
  2.2387E-01  2.9804E+03  2.9695E+03  1.4111E+03  1.3050E+03
  2.5119E-01  2.5025E+03  2.4800E+03  1.1907E+03  1.0832E+03
  2.8184E-01  2.0700E+03  2.0547E+03  9.9203E+02  8.8634E+02
  3.1623E-01  1.6967E+03  1.6785E+03  8.1293E+02  7.2101E+02
  3.5481E-01  1.3888E+03  1.3586E+03  6.5881E+02  5.8841E+02
```

Calcul du flux de ν_μ atmosphériques

Données du modèle Honda

```
average flux in [cosZ = 0.90 -- 1.00, phi_Az = 0 -- 30]
  Enu (GeV)      NuMu      NuMubar      NuE      NuEbar      (m^2 sec
sr GeV) ^-1
1.0000E-01  7.2886E+03  7.3435E+03  3.5321E+03  3.4746E+03
1.1220E-01  6.6023E+03  6.6505E+03  3.1970E+03  3.1358E+03
1.2589E-01  5.9430E+03  5.9901E+03  2.8653E+03  2.7827E+03
1.4125E-01  5.3043E+03  5.3399E+03  2.5414E+03  2.4368E+03
1.5849E-01  4.6891E+03  4.7032E+03  2.2305E+03  2.1102E+03
1.7783E-01  4.0813E+03  4.0852E+03  1.9369E+03  1.8224E+03
1.9953E-01  3.4997E+03  3.5054E+03  1.6600E+03  1.5537E+03
2.2387E-01  2.9804E+03  2.9695E+03  1.4111E+03  1.3050E+03
2.5119E-01  2.5025E+03  2.4800E+03  1.1907E+03  1.0832E+03
2.8184E-01  2.0700E+03  2.0547E+03  9.9203E+02  8.8634E+02
3.1623E-01  1.6967E+03  1.6785E+03  8.1293E+02  7.2101E+02
```

Calcul du flux de ν_μ atmosphériques

Données du modèle Honda

```
average flux in [cosZ = 0.90 -- 1.00, phi_Az = 0 -- 30]
  Enu (GeV)      NuMu      NuMubar      NuE      NuEbar  (m^2 sec
ar GeV)^-1
1.0000E-01  7.2886E+03  7.3435E+03  3.5321E+03  3.4746E+03
1.1220E-01  6.6023E+03  6.6505E+03  3.1970E+03  3.1358E+03
1.2589E-01  5.9430E+03  5.9901E+03  2.8653E+03  2.7827E+03
1.4125E-01  5.3043E+03  5.3399E+03  2.5414E+03  2.4368E+03
1.5849E-01  4.6891E+03  4.7032E+03  2.2305E+03  2.1102E+03
1.7783E-01  4.0813E+03  4.0852E+03  1.9369E+03  1.8224E+03
1.9953E-01  3.4997E+03  3.5054E+03  1.6600E+03  1.5537E+03
2.2387E-01  2.9804E+03  2.9695E+03  1.4111E+03  1.3050E+03
2.5119E-01  2.5025E+03  2.4800E+03  1.1907E+03  1.0832E+03
2.8184E-01  2.0700E+03  2.0547E+03  9.9203E+02  8.8634E+02
3.1623E-01  1.6967E+03  1.6785E+03  8.1293E+02  7.2101E+02
```

E_ν

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~mhonda/>

Φ_ν

Calcul du flux de ν_μ atmosphériques

Données du modèle Honda $\cos \theta$

```
average flux in [cosZ = 0.90 -- 1.00, phi_Az = 0 -- 30]
  Enu (GeV)      NuMu      NuMubar      NuE      NuEbar      (m^2 sec
ar (GeV)^-1
1.0000E-01  7.2886E+03  7.3435E+03  3.5321E+03  3.4746E+03
1.1220E-01  6.6023E+03  6.6505E+03  3.1970E+03  3.1358E+03
1.2589E-01  5.9430E+03  5.9901E+03  2.8653E+03  2.7827E+03
1.4125E-01  5.3043E+03  5.3399E+03  2.5414E+03  2.4368E+03
1.5849E-01  4.6891E+03  4.7032E+03  2.2305E+03  2.1102E+03
1.7783E-01  4.0813E+03  4.0852E+03  1.9369E+03  1.8224E+03
1.9953E-01  3.4997E+03  3.5054E+03  1.6600E+03  1.5537E+03
2.2387E-01  2.9804E+03  2.9695E+03  1.4111E+03  1.3050E+03
2.5119E-01  2.5025E+03  2.4800E+03  1.1907E+03  1.0832E+03
2.8184E-01  2.0700E+03  2.0547E+03  9.9203E+02  8.8634E+02
3.1623E-01  1.6967E+03  1.6785E+03  8.1293E+02  7.2101E+02
```

E_ν

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~mhonda/>

Φ_ν

Calcul du flux de ν_μ atmosphériques

Données du modèle Honda $\cos \theta$ φ

```
average flux in [cosZ = 0.90 -- 1.00, phi_Az = 0 -- 30
Enu (GeV)      NuMu      NuMubar      NuE      NuEbar      (m^2 sec
ar (GeV)^-1
1.0000E-01  7.2886E+03  7.3435E+03  3.5321E+03  3.4746E+03
1.1220E-01  6.6023E+03  6.6505E+03  3.1970E+03  3.1358E+03
1.2589E-01  5.9430E+03  5.9901E+03  2.8653E+03  2.7827E+03
1.4125E-01  5.3043E+03  5.3399E+03  2.5414E+03  2.4368E+03
1.5849E-01  4.6891E+03  4.7032E+03  2.2305E+03  2.1102E+03
1.7783E-01  4.0813E+03  4.0852E+03  1.9369E+03  1.8224E+03
1.9953E-01  3.4997E+03  3.5054E+03  1.6600E+03  1.5537E+03
2.2387E-01  2.9804E+03  2.9695E+03  1.4111E+03  1.3050E+03
2.5119E-01  2.5025E+03  2.4800E+03  1.1907E+03  1.0832E+03
2.8184E-01  2.0700E+03  2.0547E+03  9.9203E+02  8.8634E+02
3.1623E-01  1.6967E+03  1.6785E+03  8.1293E+02  7.2101E+02
```

E_ν

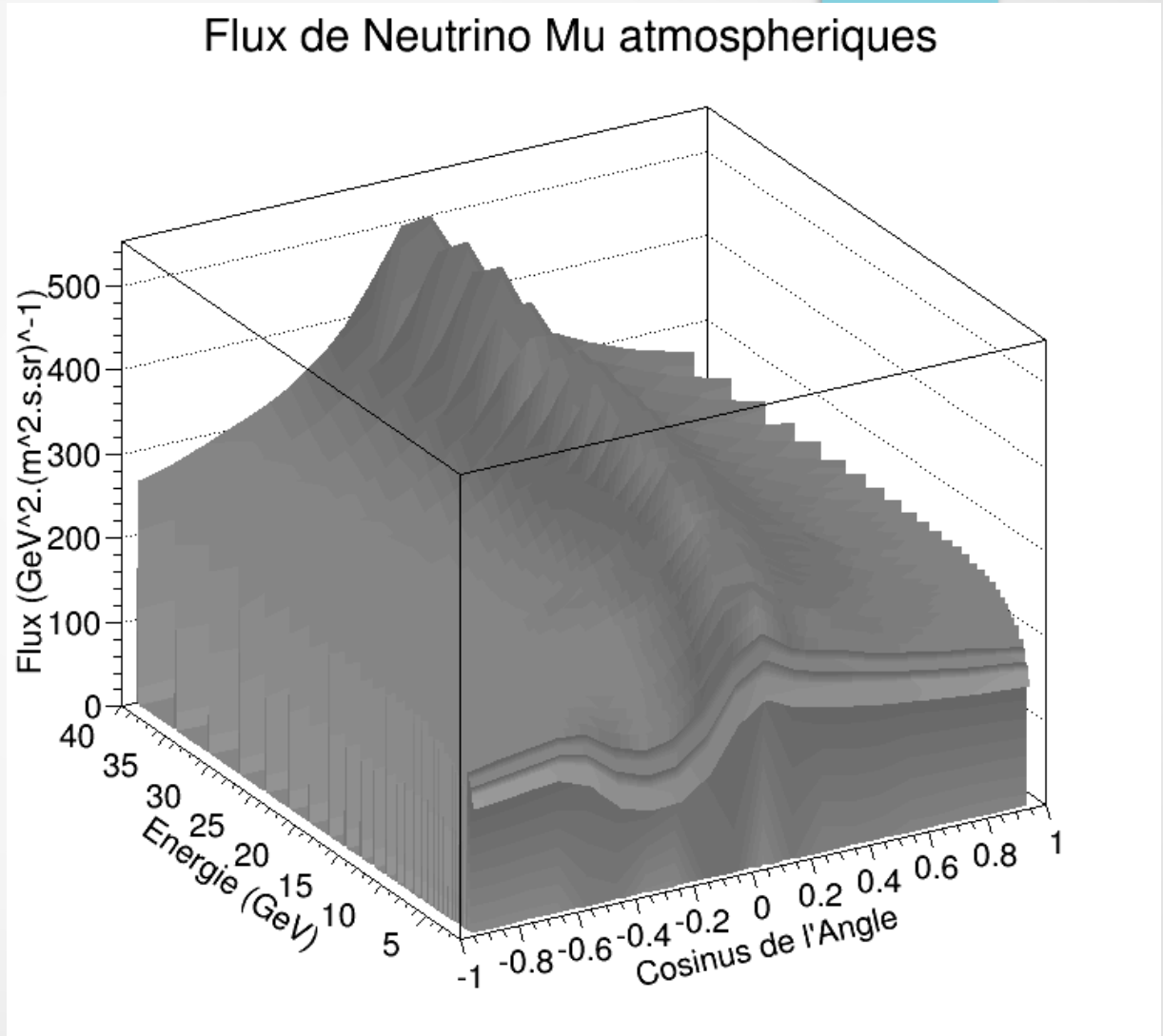
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~mhonda/>

Φ_ν

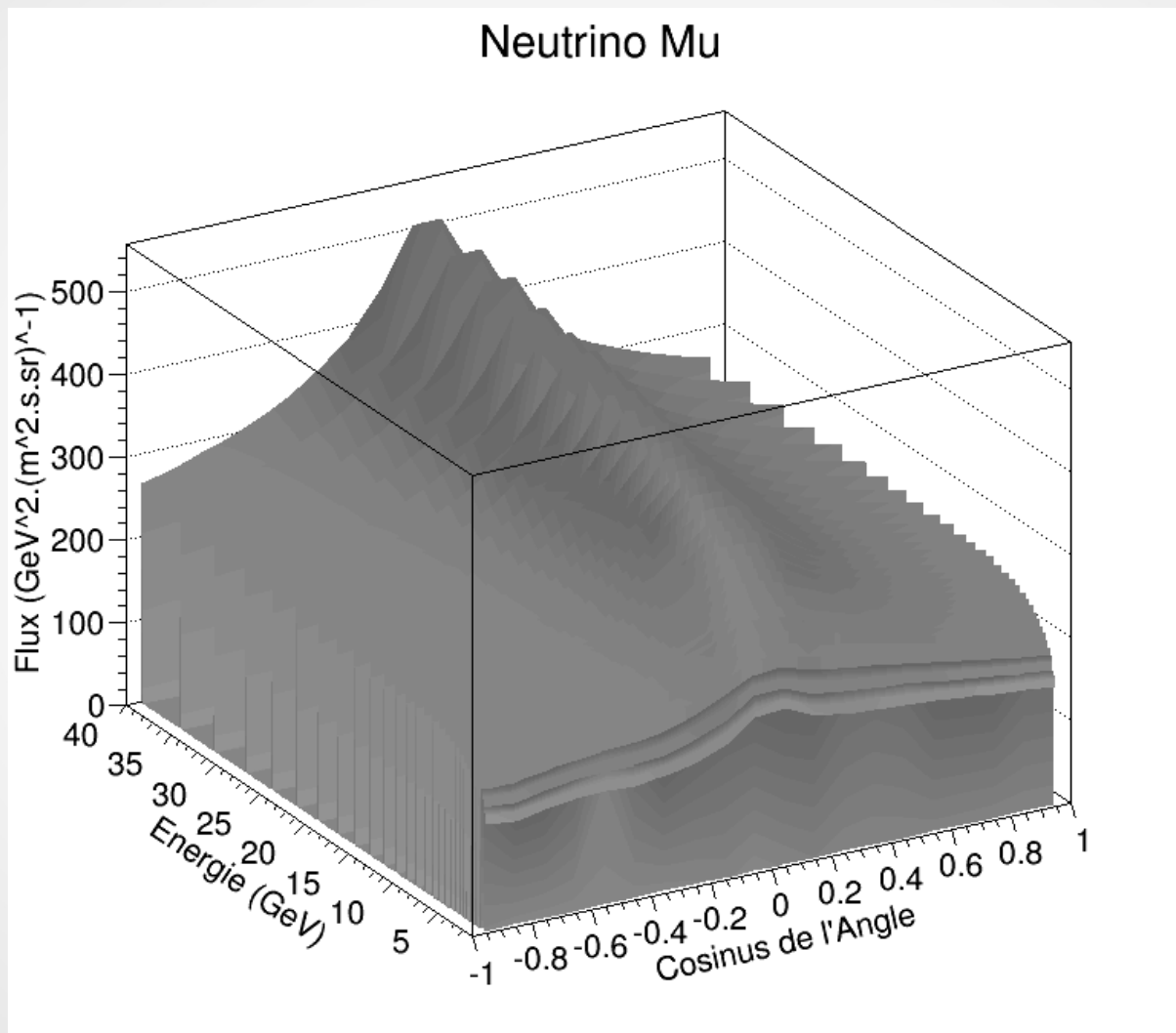
Calcul du flux de ν_μ atmosphériques

1er Plot à $0^\circ < \varphi < 30^\circ$

⇒ Asymétrie dans les énergies basses



Calcul du flux de ν_μ atmosphériques



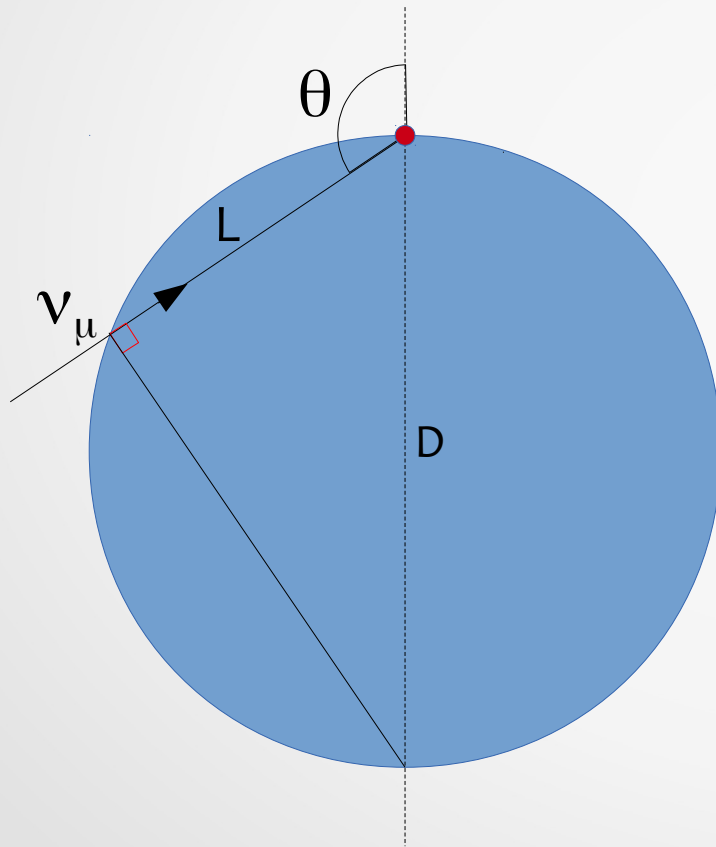
Plot du flux moyenné sur φ

Dépendance en $\cos \theta \Leftrightarrow L$

- La distance L varie selon l'angle

Dépendance en $\cos \theta \Leftrightarrow L$

- La distance L varie selon l'angle



On a $L = -D \cdot \cos \theta$

$$\Rightarrow L = -12000 \cdot \cos \theta$$

Remarque : on se limite à
 $-1 < \cos \theta < 0$

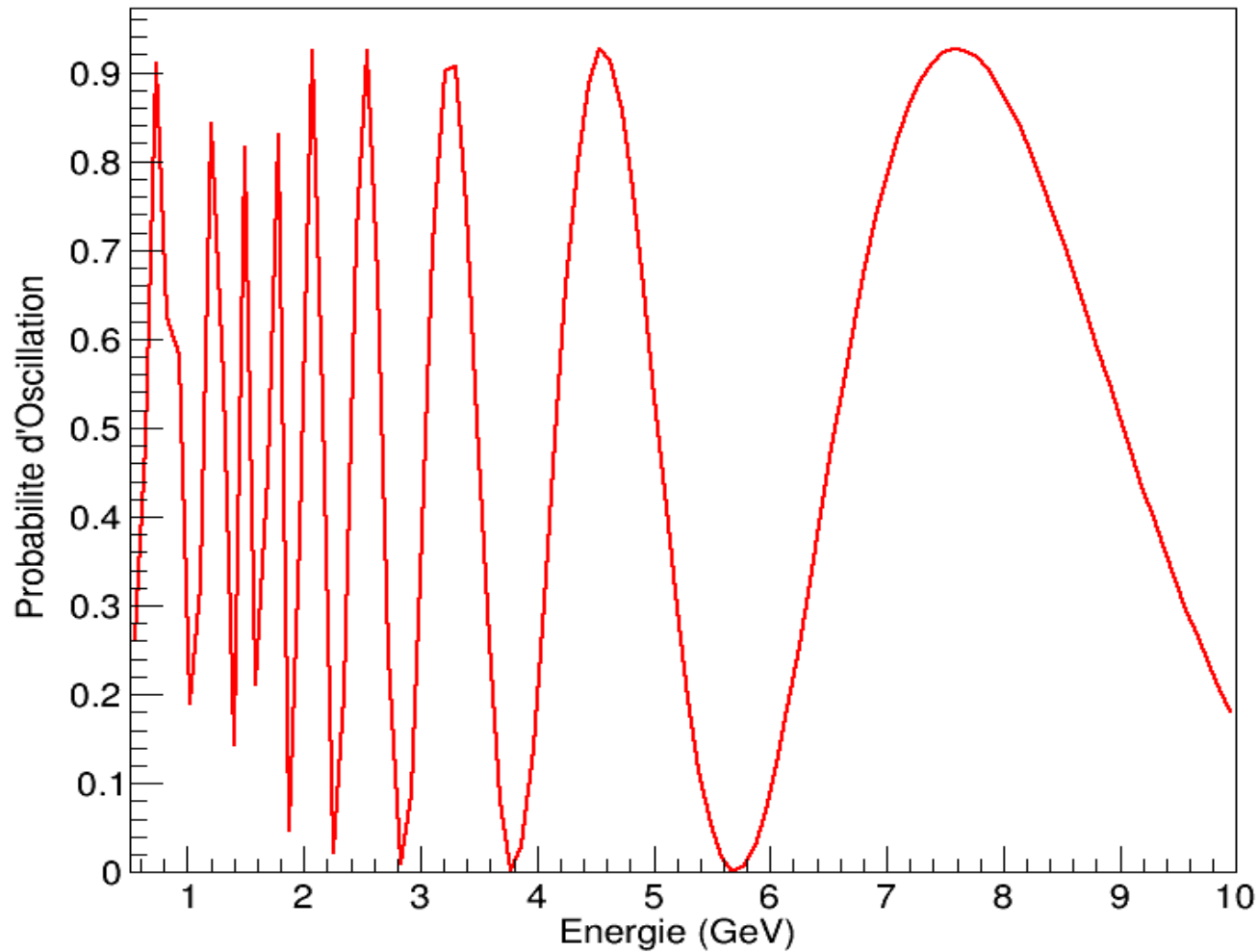
Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$

- Oscillation insensible aux effets de matière **mais** dominante par rapport à $\nu_\mu \Rightarrow \nu_e$
- On peut utiliser un modèle d'oscillation à 2 saveurs
- Formule utilisée :

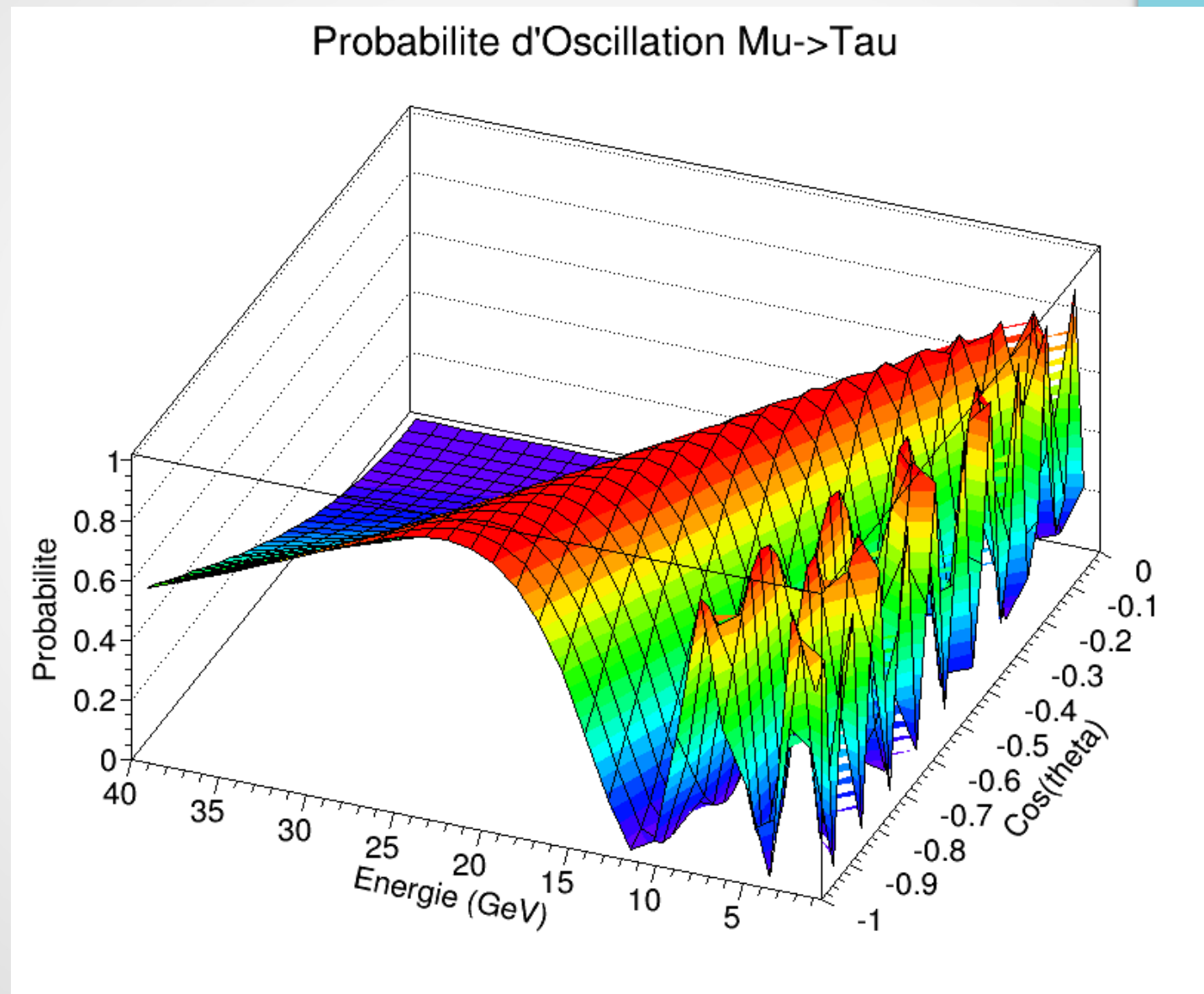
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \cos^4(\theta_{13}) \cdot \sin^2(2\theta_{23}) \cdot \sin^2\left(1.27 \cdot \frac{\Delta m_{23}^2 \cdot L}{E}\right)$$

Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$

Probabilité d'Oscillation Mu \rightarrow Tau (L=12000 km)



Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$



Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

- Nécessité d'utiliser le modèle à trois saveurs

Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

- Nécessité d'utiliser le modèle à trois saveurs
- Formule utilisée :

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 2\theta_{13} \cdot \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \cdot \Delta_{31}^2 \\
 + & \sin 2\theta_{23} \cdot \sin 2\theta_{13} \cdot \sin 2\theta_{12} \cdot \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \cdot \Delta_{31} \cdot \frac{\sin(aL)}{aL} \cdot \Delta_{21} \cdot \cos(\Delta_{31} + \delta) \\
 + & \cos^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 2\theta_{12} \cdot \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \cdot \Delta_{21}^2
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{G_F \cdot N_e}{\sqrt{2}}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_{ab} &= 1.27 \cdot \Delta m_{ab}^2 \cdot \frac{L}{E} \\
 \Delta m_{ab}^2 &= m_a^2 - m_b^2
 \end{aligned}$$

arXiv:0710.0554V2 (2008)
 Nunokawa, Parke, Valle
 CP Violation and Neutrino Oscillations

Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

- Nécessité d'utiliser le modèle à trois saveurs
- Formule utilisée :

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 2\theta_{13} \cdot \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \cdot \Delta_{31}^2 \\
 + & \sin 2\theta_{23} \cdot \sin 2\theta_{13} \cdot \sin 2\theta_{12} \cdot \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \cdot \Delta_{31} \cdot \frac{\sin(aL)}{aL} \cdot \Delta_{21} \cdot \cos(\Delta_{31} + \delta) \\
 + & \cos^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 2\theta_{12} \cdot \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \cdot \Delta_{21}^2
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{G_F \cdot N_e}{\sqrt{2}}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta_{ab} &= 1.27 \cdot \Delta m_{ab}^2 \cdot \frac{L}{E} \\
 \Delta m_{ab}^2 &= m_a^2 - m_b^2
 \end{aligned}$$

arXiv:0710.0554V2 (2008)

Nunokawa, Parke, Valle

CP Violation and Neutrino Oscillations

Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

- Nécessité de faire des approximations.

On prend $\delta = 0$

On considère la densité de la terre constante et $a = 5.34 \cdot 10^{-5}$

- Convention utilisée :

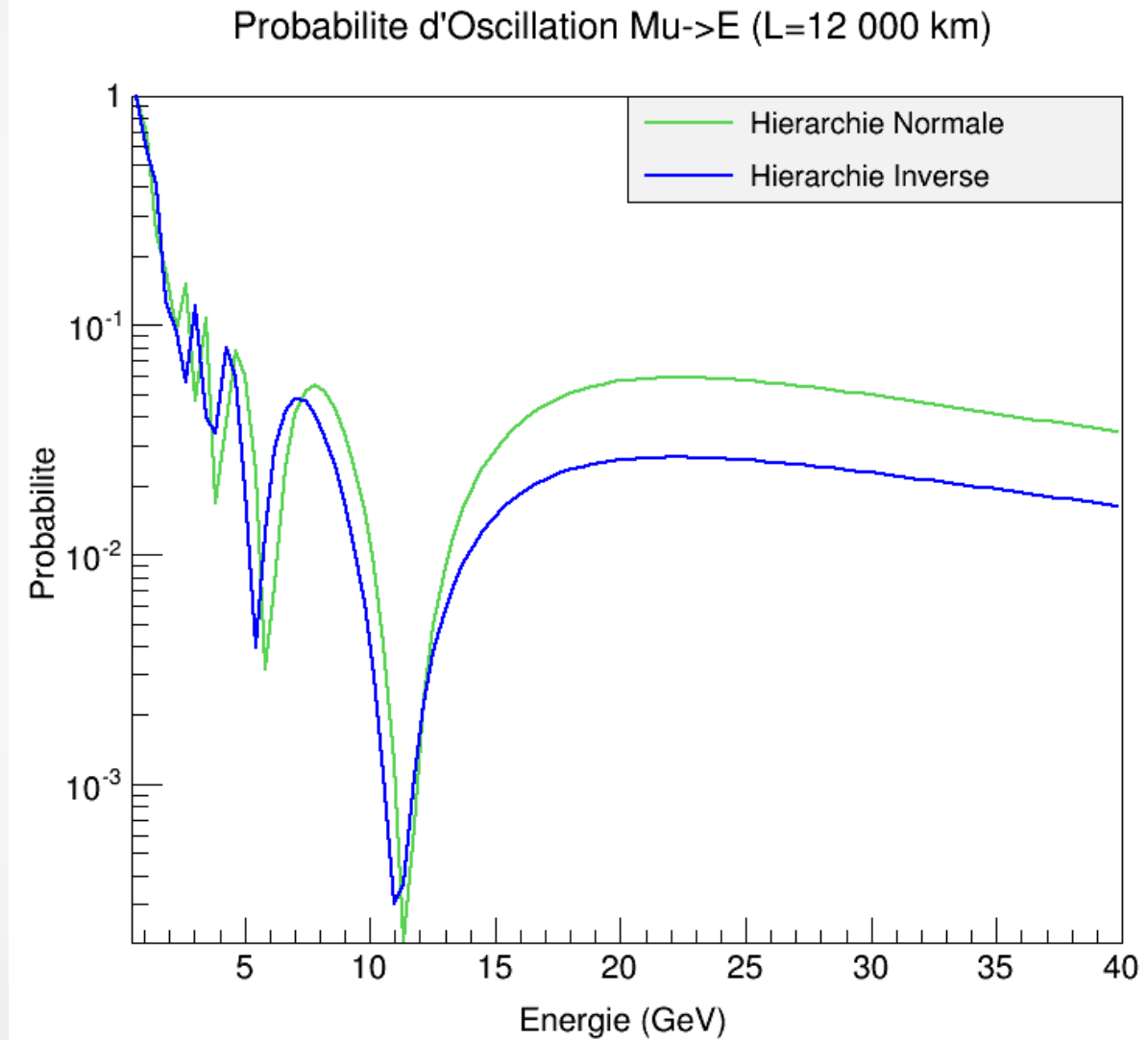
En hiérarchie normale (NH) $\Delta m_{31}^2, \Delta m_{32}^2 > 0$

En hiérarchie inverse (IH) $\Delta m_{31}^2, \Delta m_{32}^2 < 0$

Probabilité d'oscillation $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

Plots à 1 dimension

⇒ Il y a bien une différence de probabilité entre les deux hiérarchies



Probabilité de Survie

- On s'intéresse à la survie des v_μ

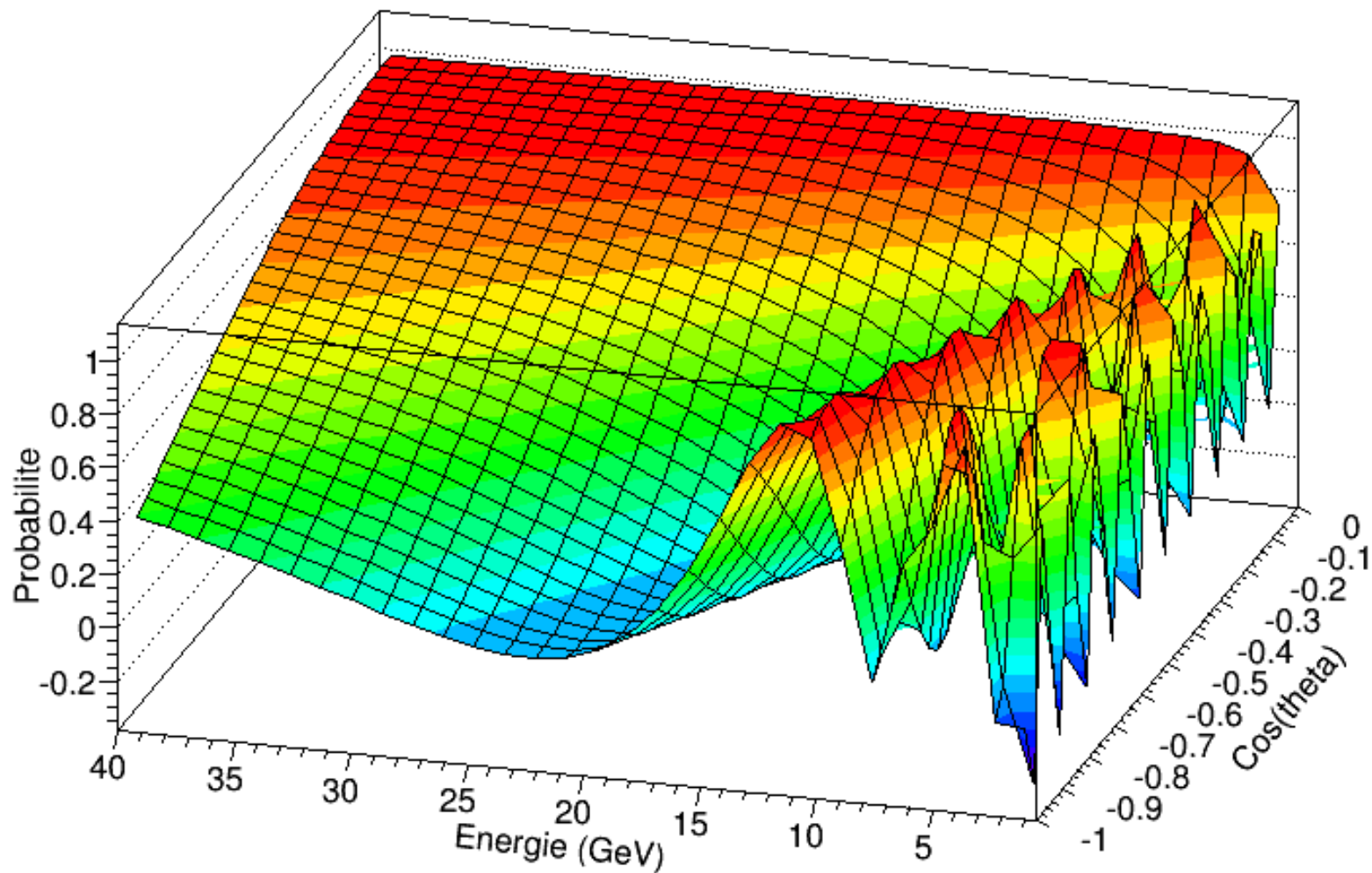
Probabilité de Survie

- On s'intéresse à la survie des ν_μ
- Il faut donc calculer leur probabilité de survie :

$$\begin{aligned} P_{survie} &= 1 - P_{osc} \\ &= 1 - \left(P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} + P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau} \right) \end{aligned}$$

Probabilité de Survie

Probabilité de Survie des neutrinos Mu (NH)



Section Efficace d'interaction des ν_μ

Problème à la détection : on ne sait pas détecter directement les ν_μ

$$\nu_\mu + N \Rightarrow \mu^- + X$$

On détecte les muons qui résultent de l'interaction des ν_μ avec la matière

Section Efficace d'interaction des ν_μ

⇒ On a besoin de connaître leur section efficace d'interaction

```
Cross sections used in the calculations of  
charged current event rates:
```

```
Column 1: Energy [GeV]  
Column 2: nu_mu total  
Column 3: nu_tau total  
Column 4: Ratio (nu_tau/nu_mu)
```

```
0.50000 0.58036 0.0000 0.0000  
1.5000 1.5283 0.0000 0.0000  
2.5000 2.2924 0.0000 0.0000  
3.5000 3.0347 0.040928 0.013487  
4.5000 3.7614 0.15911 0.042301  
5.5000 4.4817 0.29182 0.065114
```

Données prises sur le
site du CNGS

Section Efficace d'interaction des ν_μ

⇒ On a besoin de connaître leur section efficace d'interaction

Cross sections used in the calculations of charged current event rates:

Column 1: Energy [GeV]
Column 2: nu_mu total
Column 3: nu_tau total
Column 4: Ratio (nu_tau/nu_mu)

$\sigma(10^{-38} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{nucléon}^{-1})$

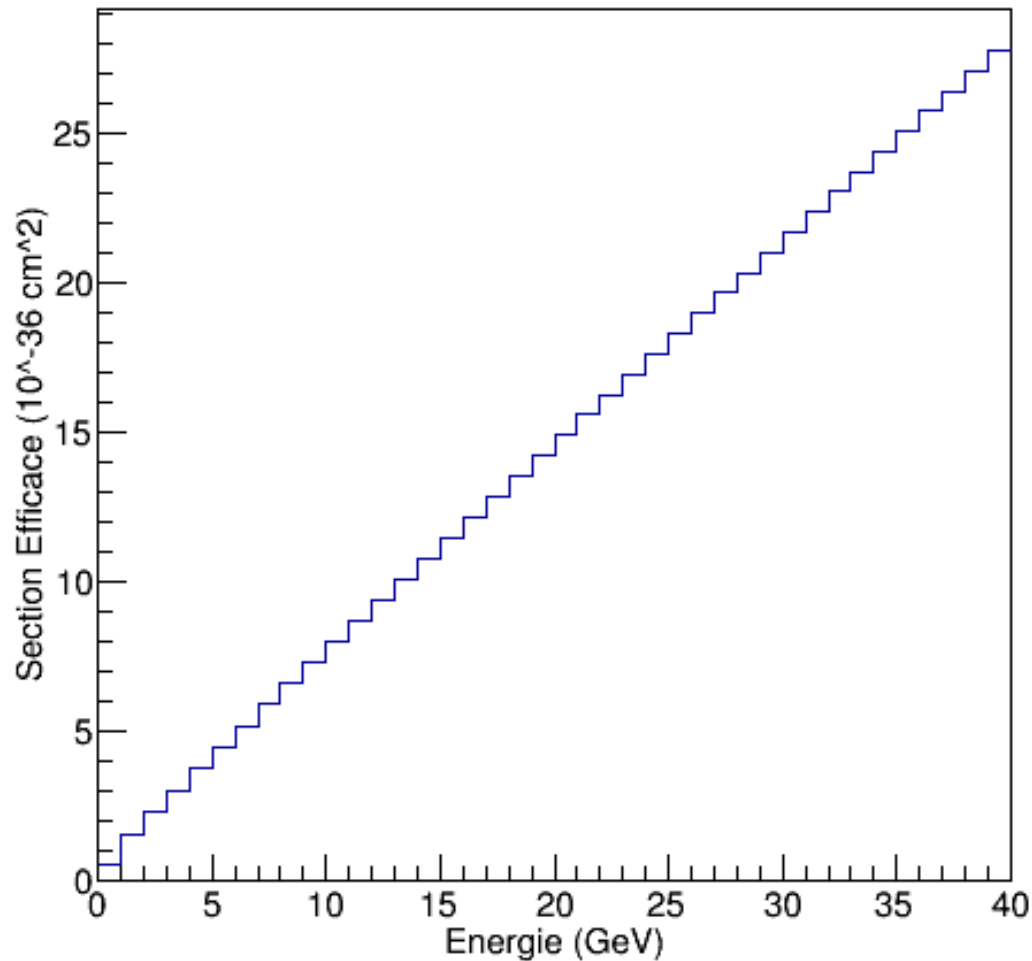
$E_\nu(\text{GeV})$

0.50000	0.58036	0.0000	0.0000
1.5000	1.5283	0.0000	0.0000
2.5000	2.2924	0.0000	0.0000
3.5000	3.0347	0.040928	0.013487
4.5000	3.7614	0.15911	0.042301
5.5000	4.4817	0.29182	0.065114

Données prises sur le site du CNGS

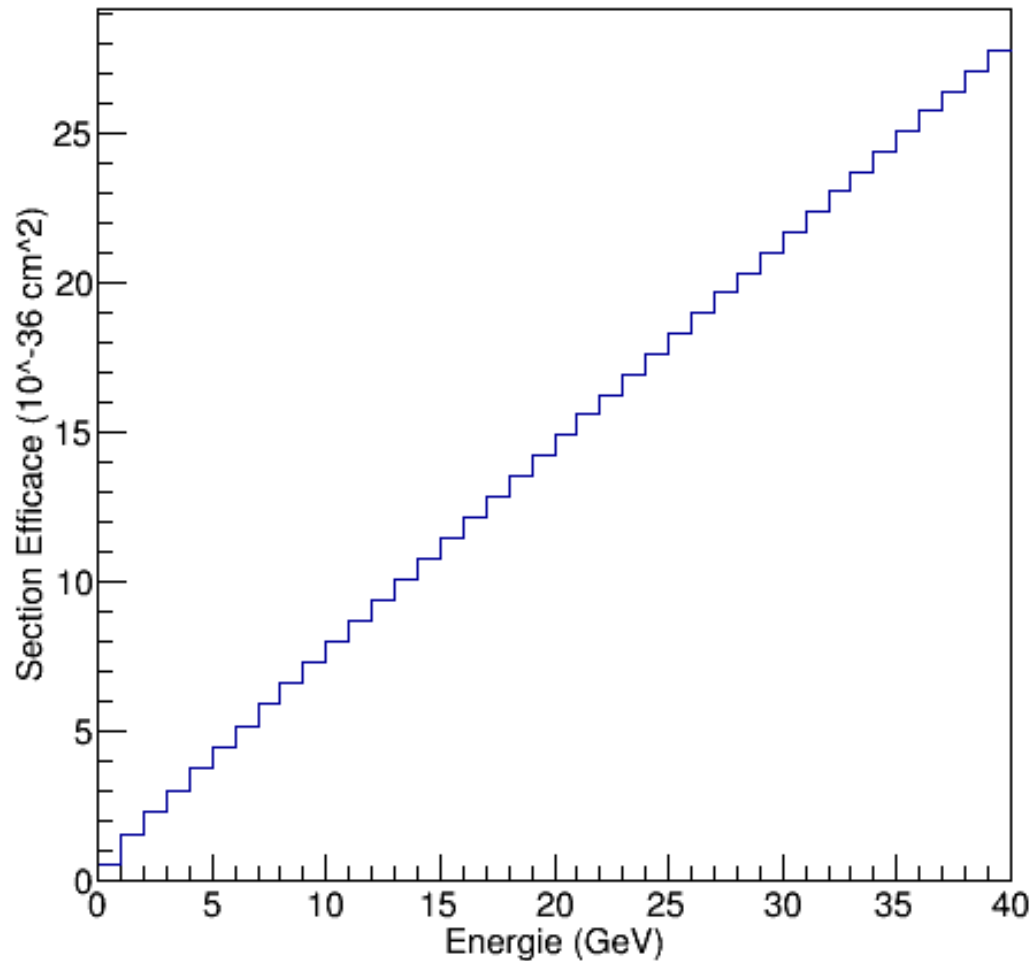
Section Efficace d'interaction des ν_μ

Sections efficaces des neutrinos Mu



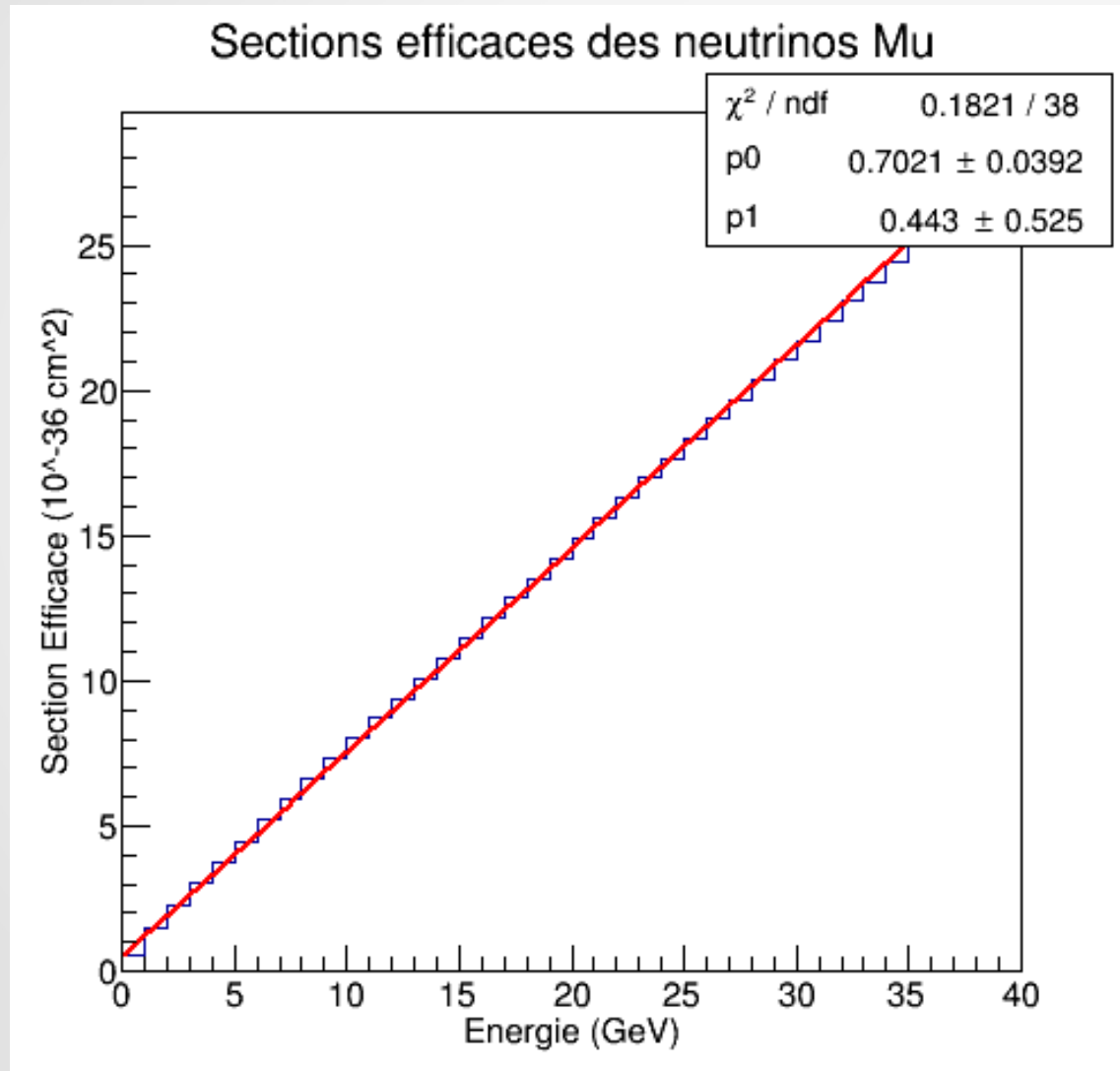
Section Efficace d'interaction des ν_μ

Sections efficaces des neutrinos Mu



⇒ Section efficace proportionnelle à l'énergie

Section Efficace d'interaction des ν_μ

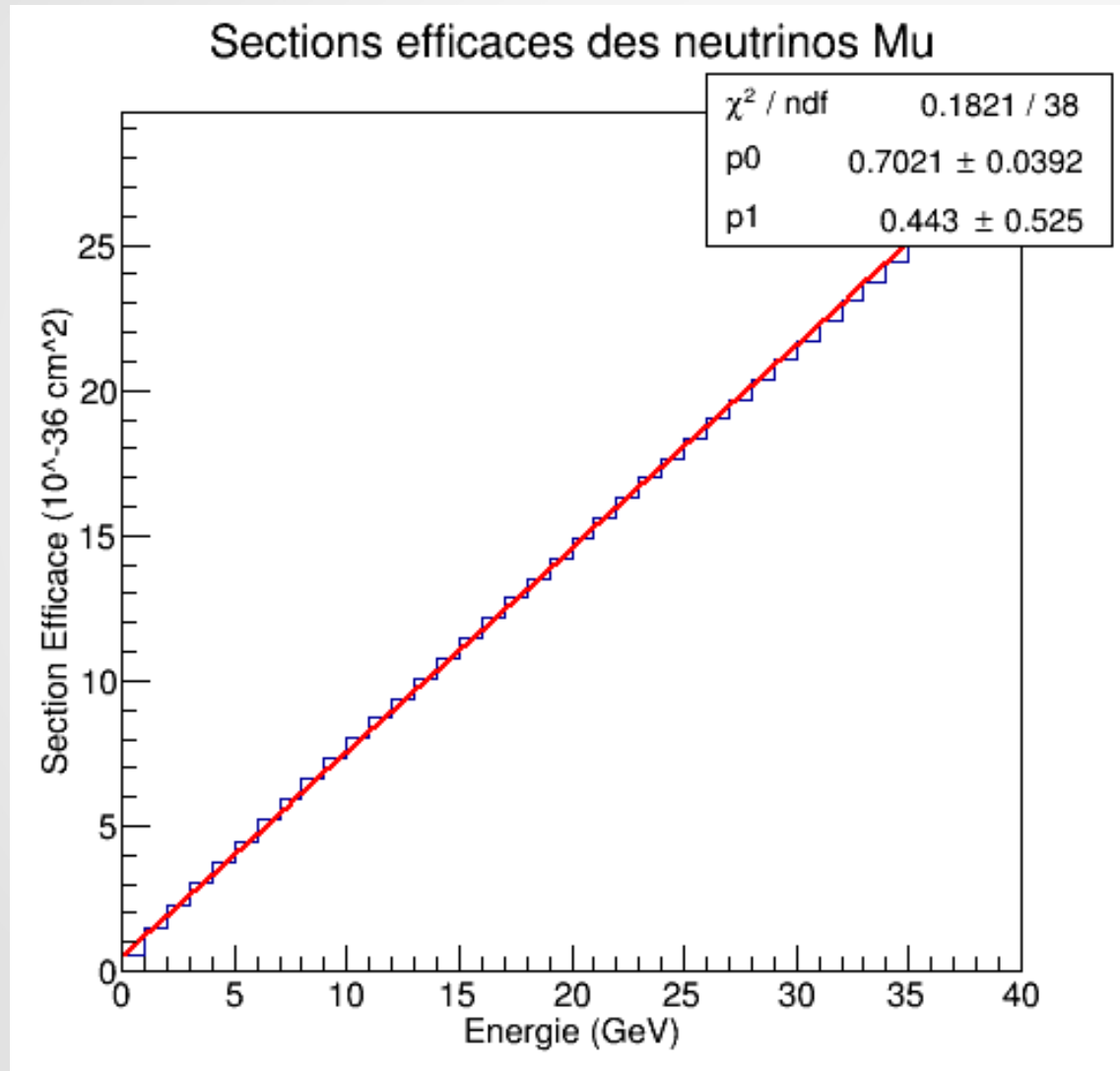


⇒ Section efficace proportionnelle à l'énergie

⇒ On Fit

$$\sigma = (0.70 \cdot E_\nu + 0.44) \cdot 10^{-38}$$

Section Efficace d'interaction des ν_μ



⇒ Section efficace proportionnelle à l'énergie

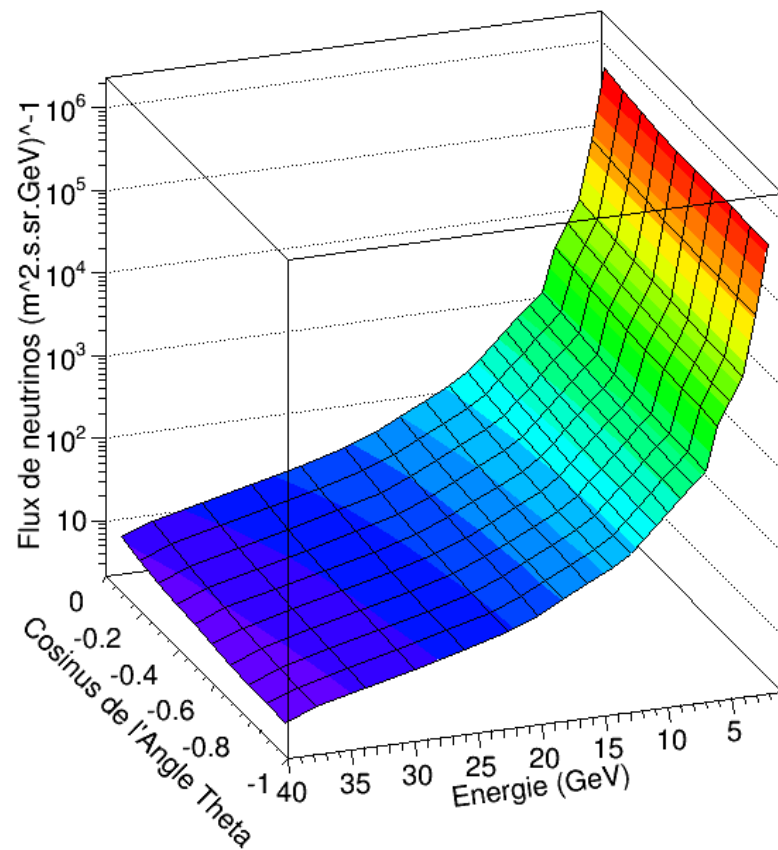
⇒ On Fit

$$\sigma = (0.70 \cdot E_\nu + 0.44) \cdot 10^{-38}$$

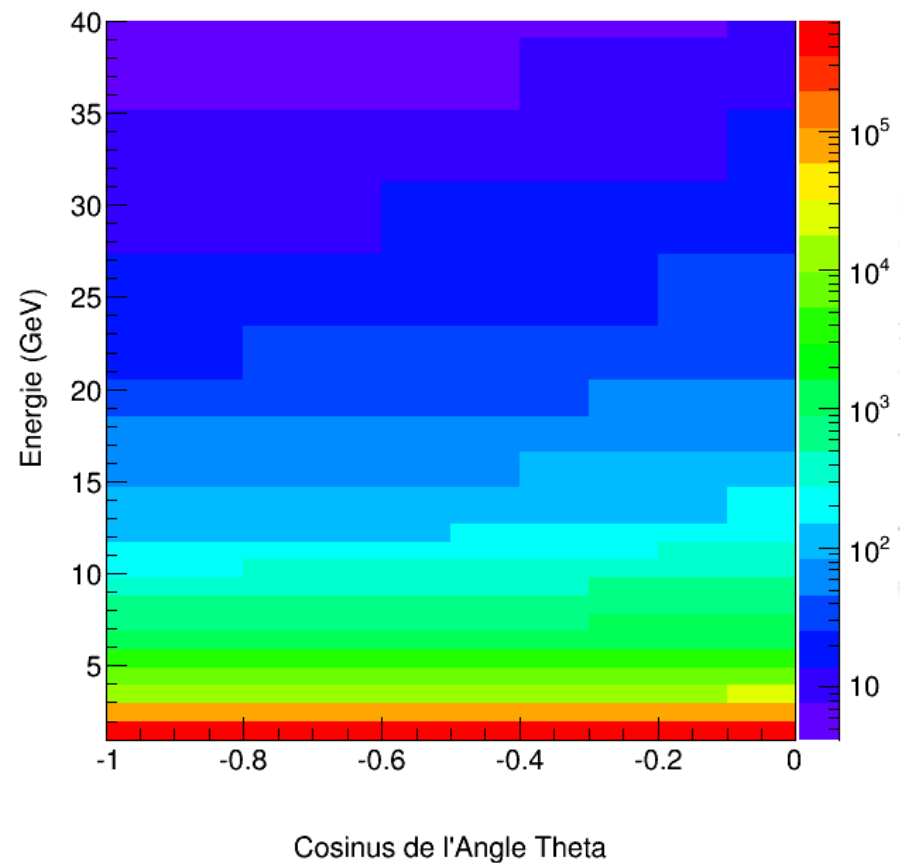
⇒ On dispose de la valeur de σ pour tout E_ν

Détermination du nombre d'événements

Distribution du Flux de base

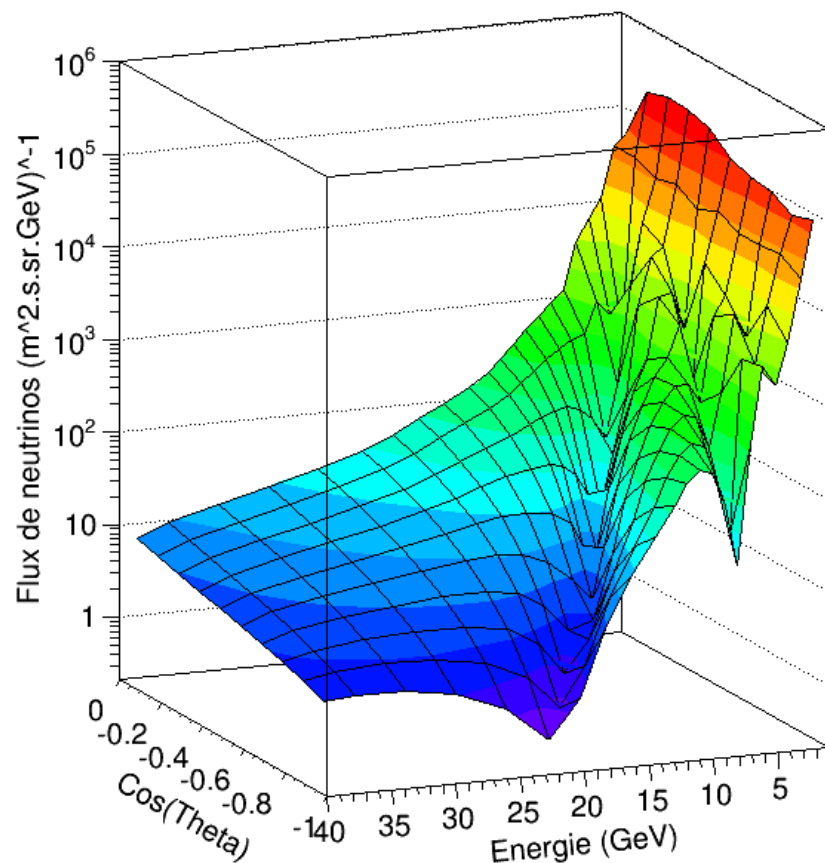


Distribution du Flux de base

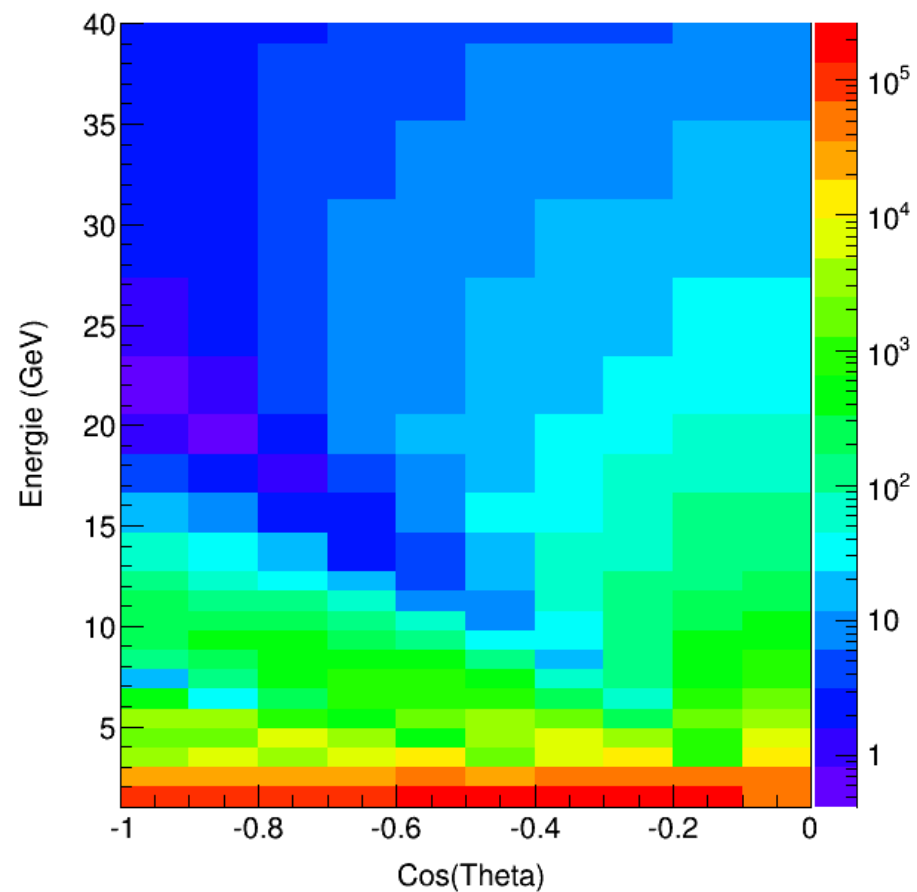


Détermination du nombre d'événements

Distribution du Flux Oscille (hierarchie normale)

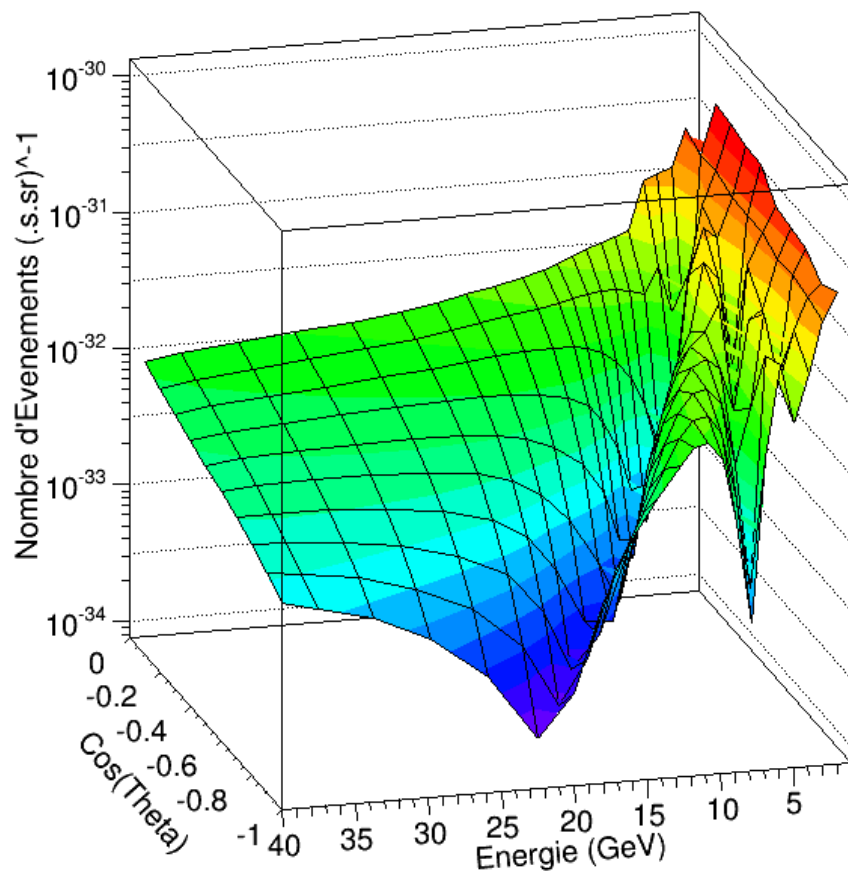


Distribution du Flux Oscille (hierarchie normale)

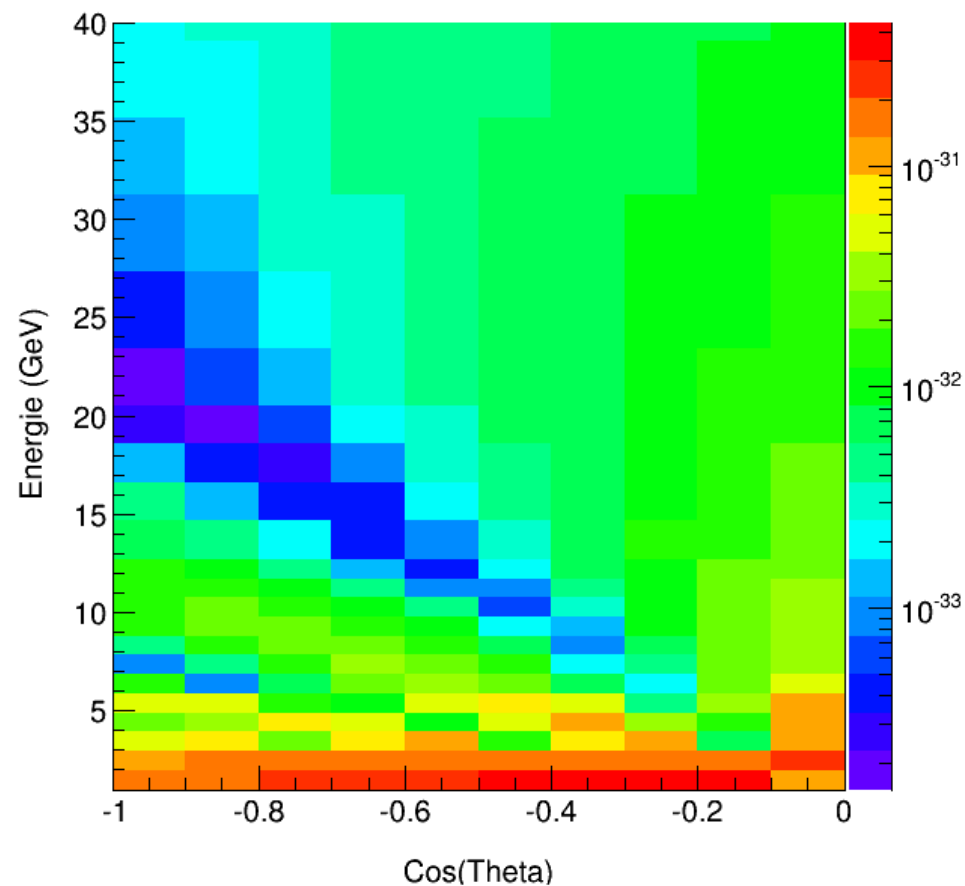


Détermination du nombre d'événements

Nombre d'Evenements (hierarchie normale)

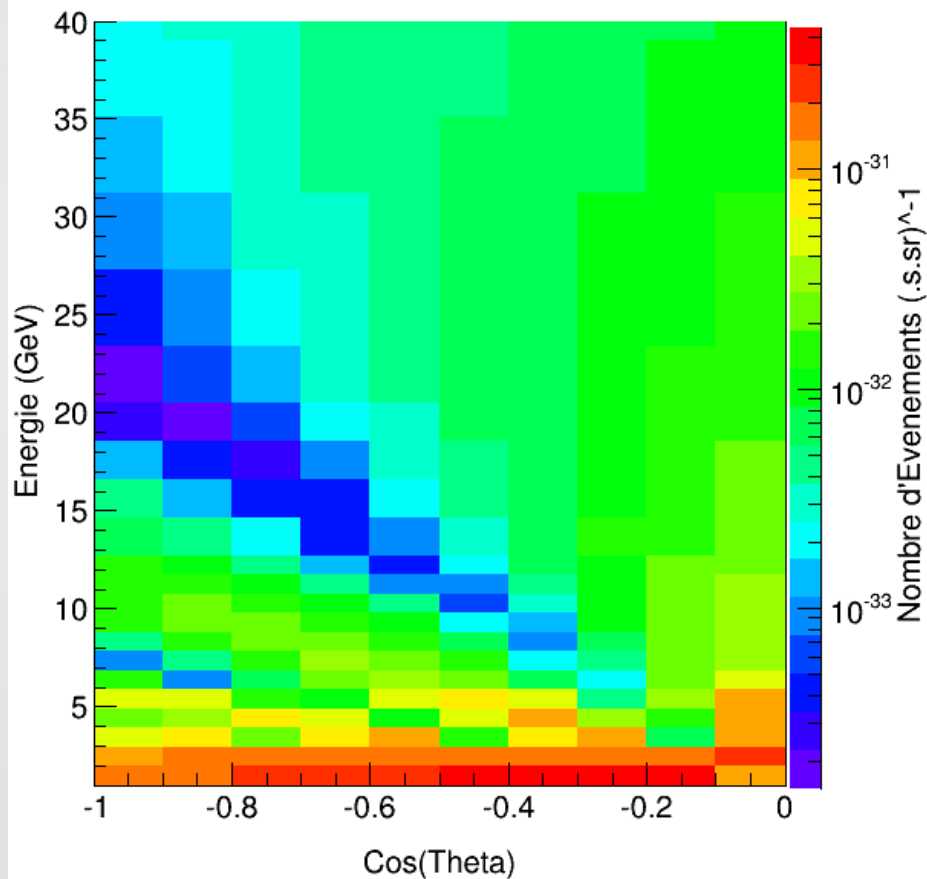


Nombre d'Evenements (hierarchie normale)

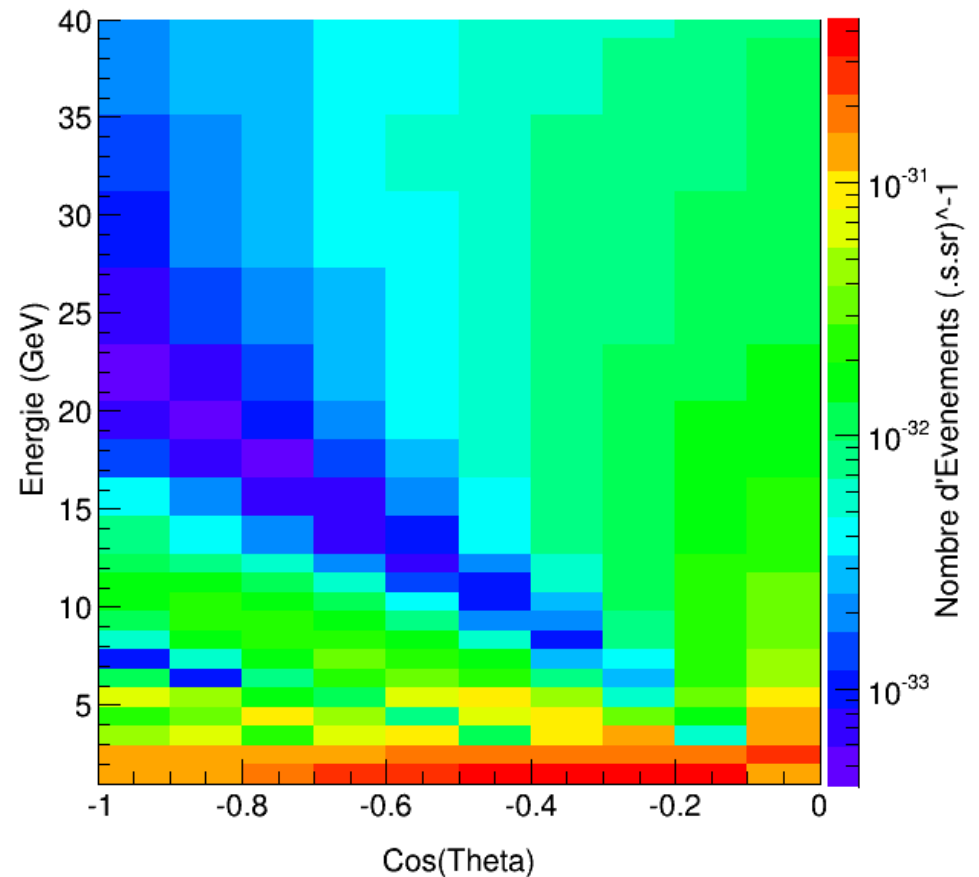


Comparaison des hiérarchies

Nombre d'Evenements (hierarchie normale)

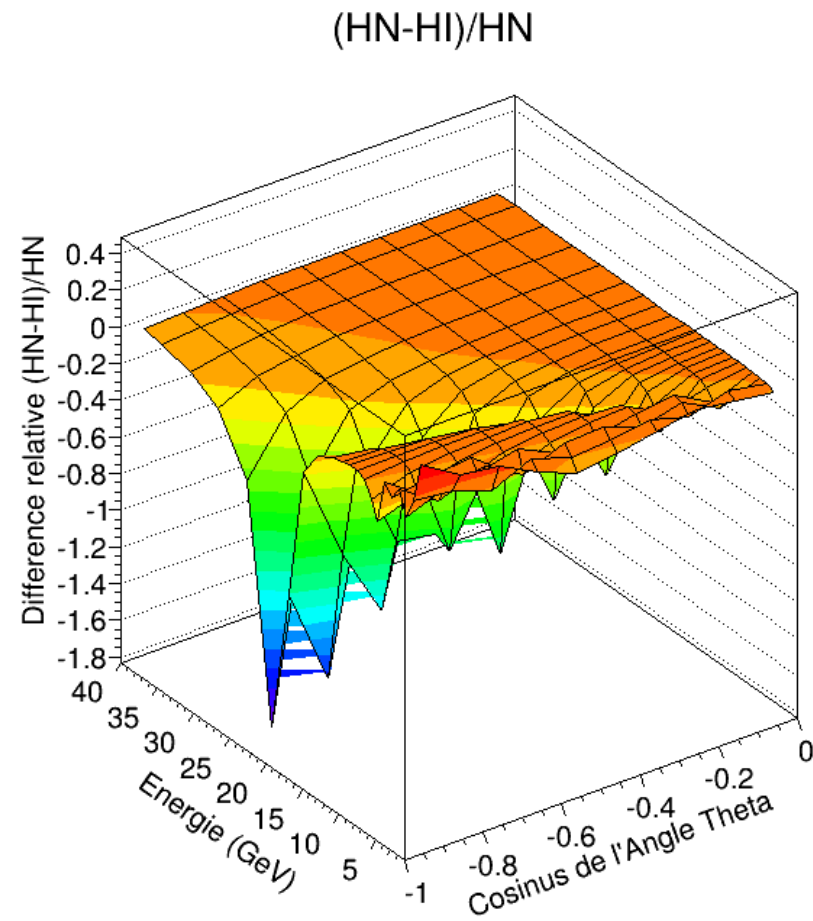
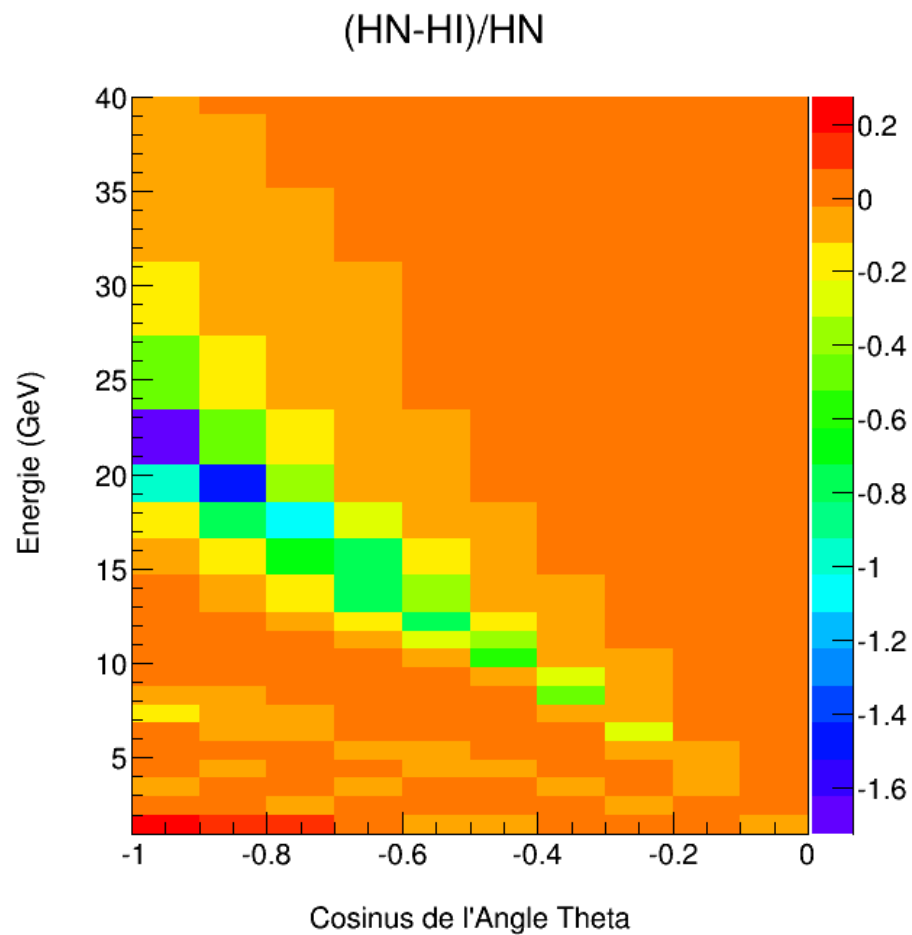


Nombre d'Evenements (hierarchie inverse)



Il y a bien une différence dans le nombre d'événements

Comparaison des hiérarchies



Conclusion

- Il y a bien une sensibilité à la hiérarchie de masse dans l'étude des neutrinos atmosphériques
- On distingue une zone particulière à étudier
- Les prochaines étapes :
 - Améliorer le modèle pris pour la Terre
 - Inclure les méthodes de détection et leur résolution dans l'analyse
 - Inclure la production de ν_μ par l'oscillation $\nu_e \Rightarrow \nu_\mu$
 - Déterminer la fraction de ν_μ qui interagissent avant le détecteur