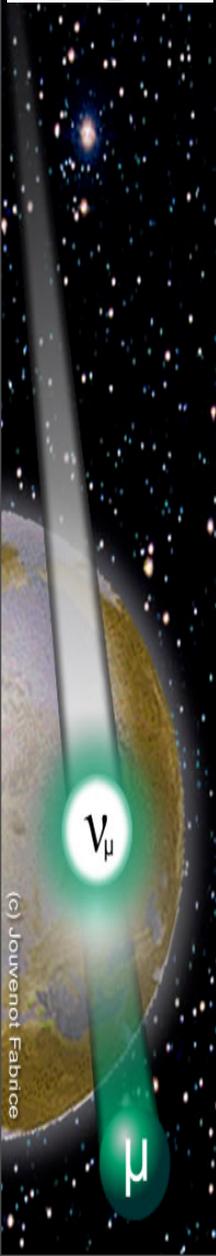
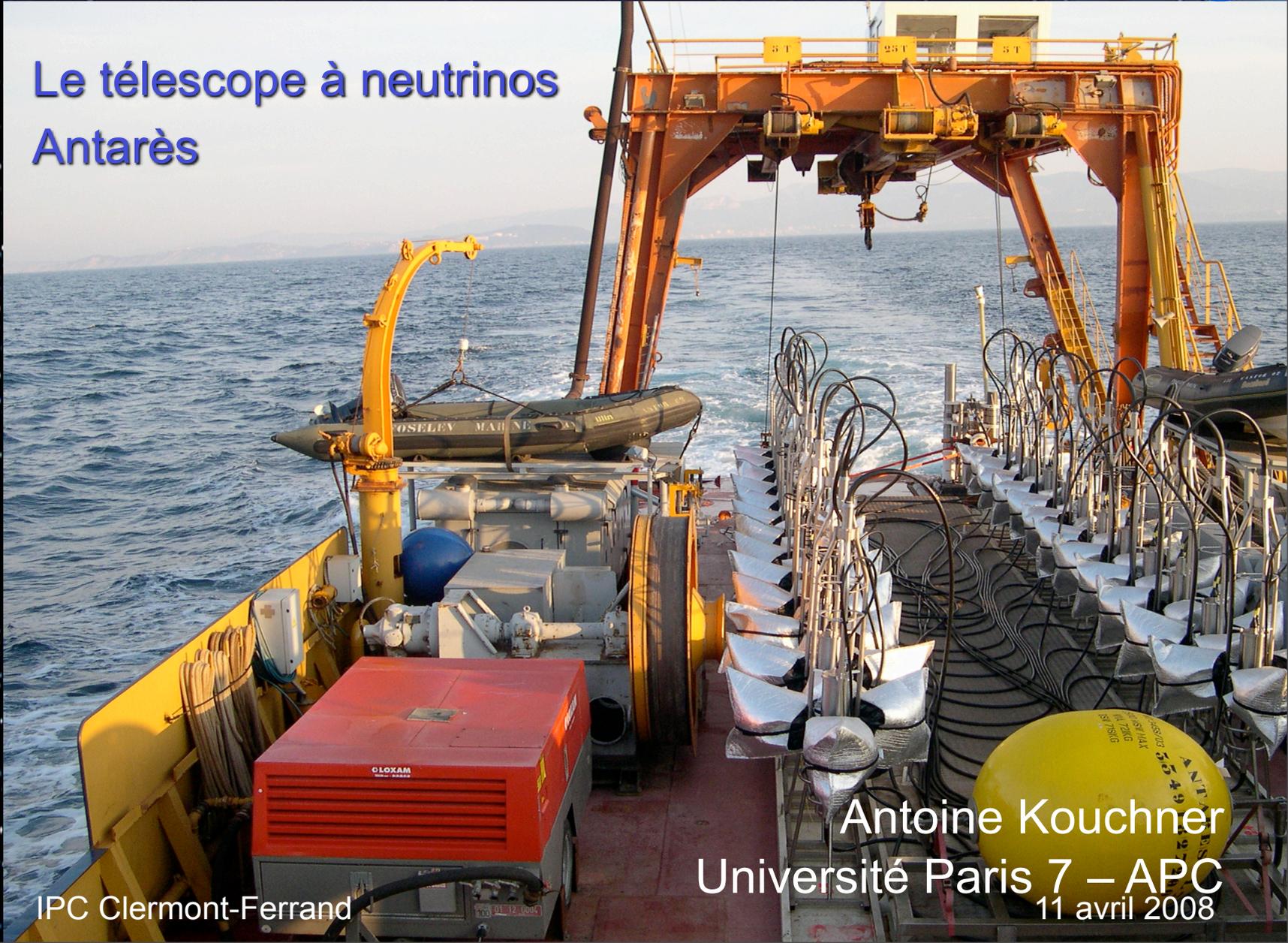




# Le télescope à neutrinos Antarès



(c) Jouvenot-Fabrice

# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

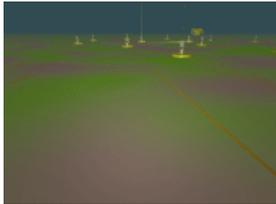
Sources de neutrinos



## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels



## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

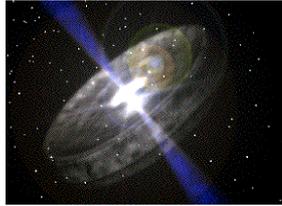
Etapes de la construction

Analyses en cours



## Le projet KM3NeT

# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

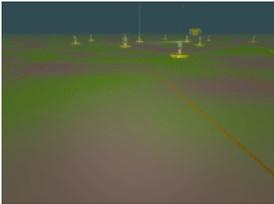
Sources de neutrinos



## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels



## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

Etapes de la construction

Analyses en cours



## Le projet KM3NeT

# Motivations scientifiques

Ouvrir une fenêtre  
complémentaire  
d'observation du ciel à  
haute énergie (>100 GeV)

Etude des  
phénomènes  
violents dans Univers

Origine des  
rayons cosmiques  
de haute énergie

Matière noire

~0.1 meV

~0.1  
eV

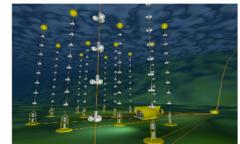
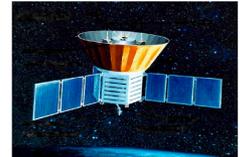
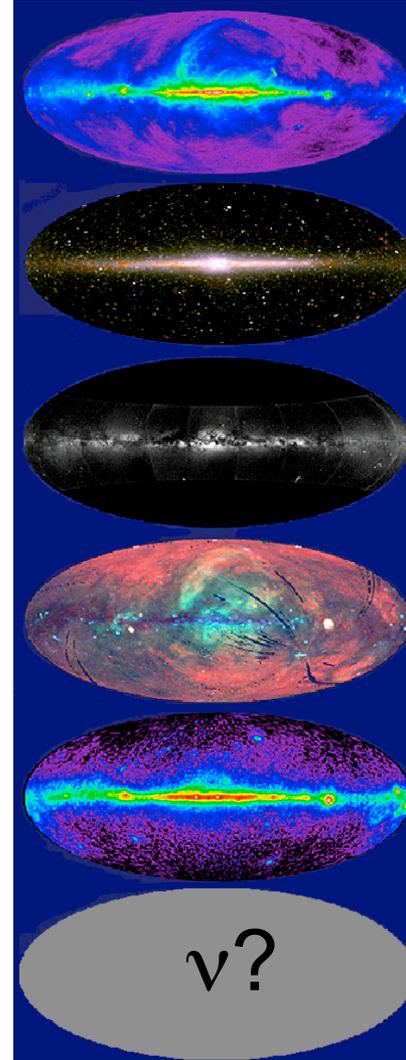
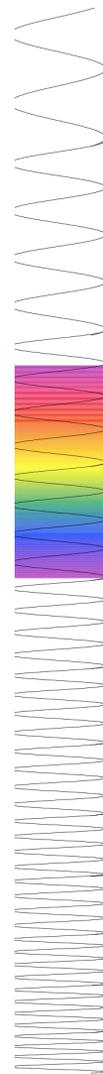
~2 eV

~ 5  
keV

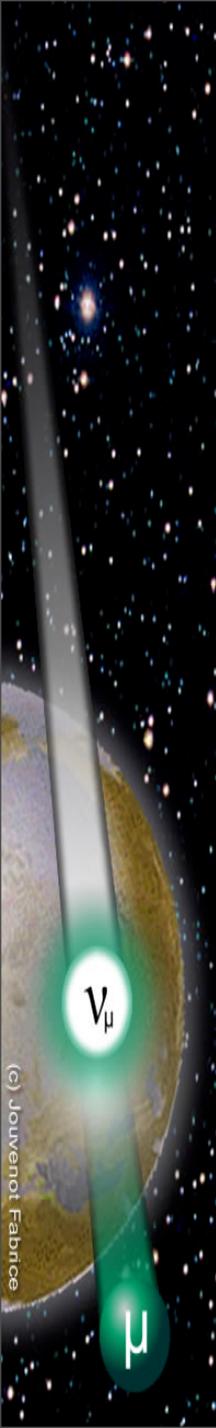
~10 MeV

~10  
TeV

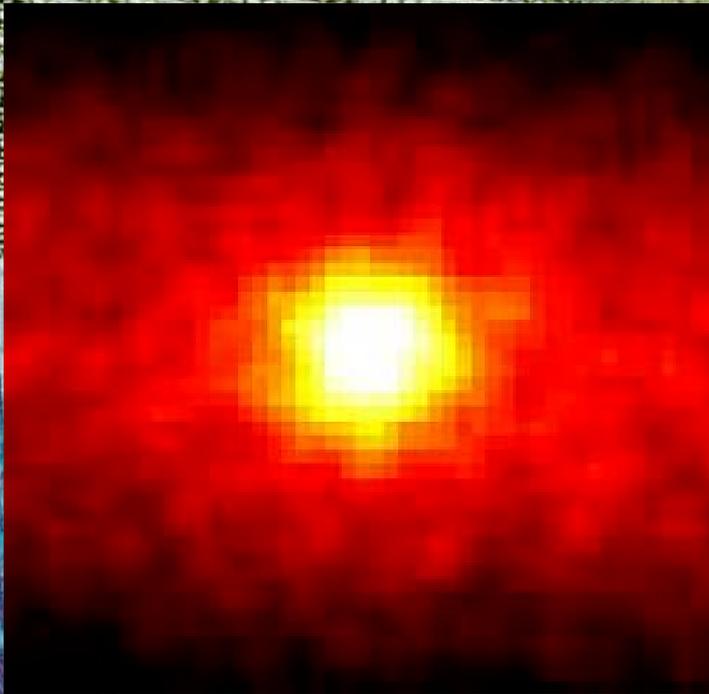
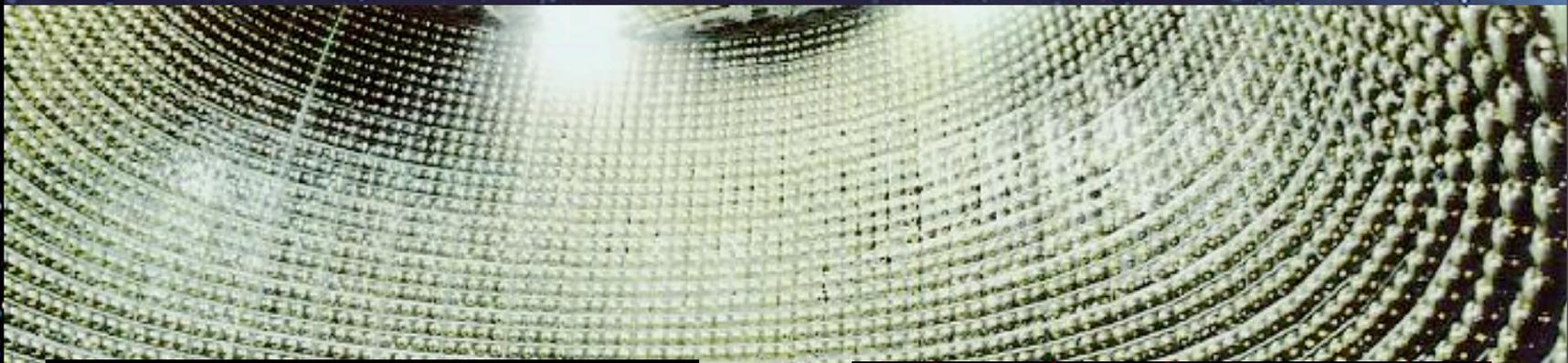
Energie  
e



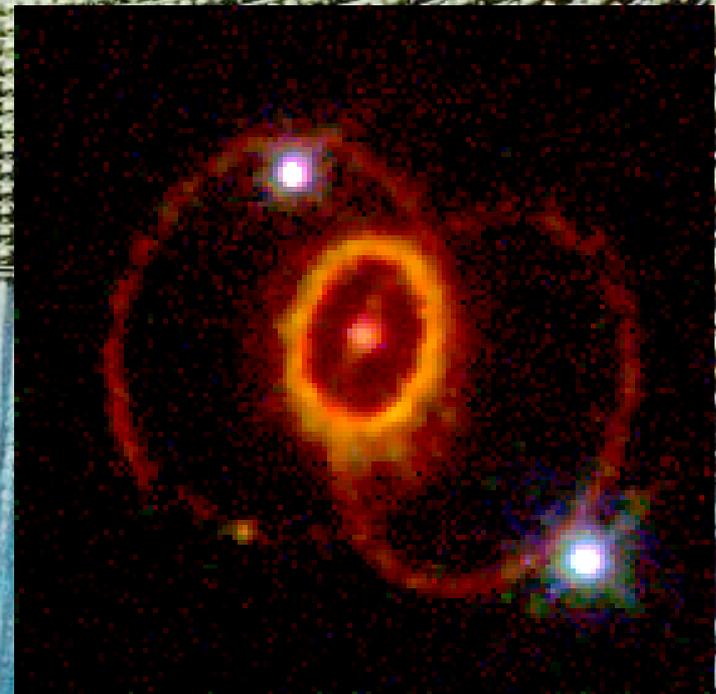
# Premiers neutrinos extraterrestres!



(c) Jouvenot Fabrice



Le soleil vu par  
l'expérience  
SuperKamiokande

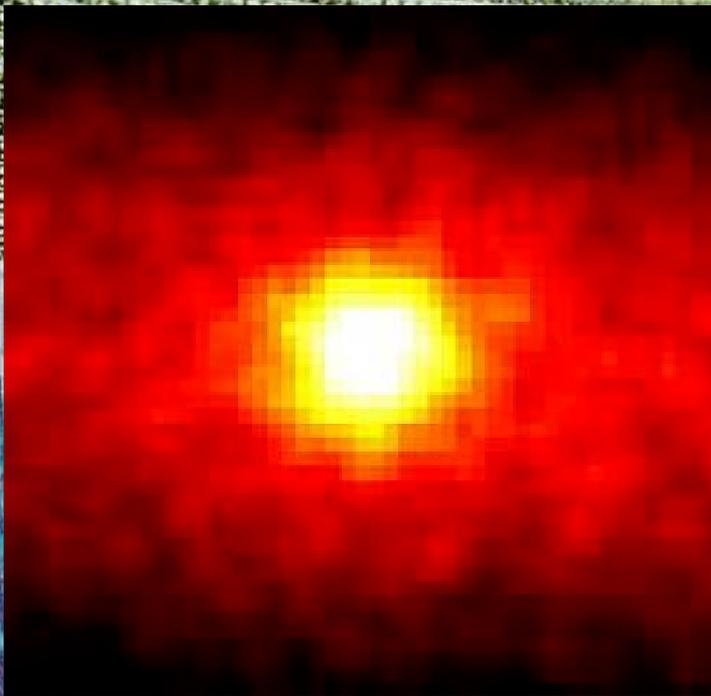


Neutrinos issus de la  
supernova 1987A (MeV)

~MeV

# Premiers neutrinos extraterrestres!

Présence de  $\nu$  cosmiques  $E > \text{GeV}$ ?  
Galactiques  
Extragalactiques



Le soleil vu par  
l'expérience  
SuperKamiokande

$\sim \text{MeV}$



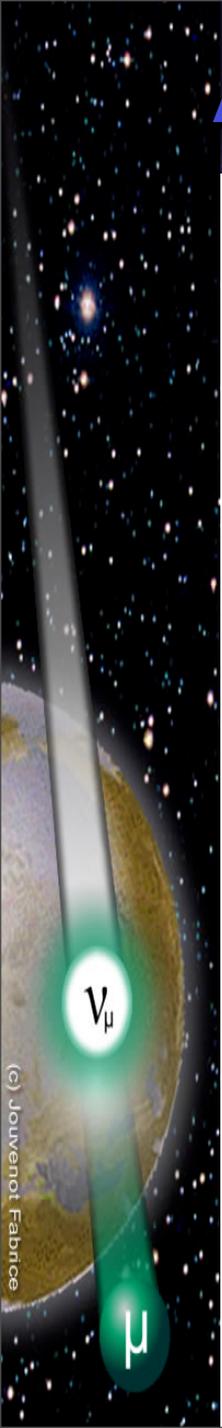
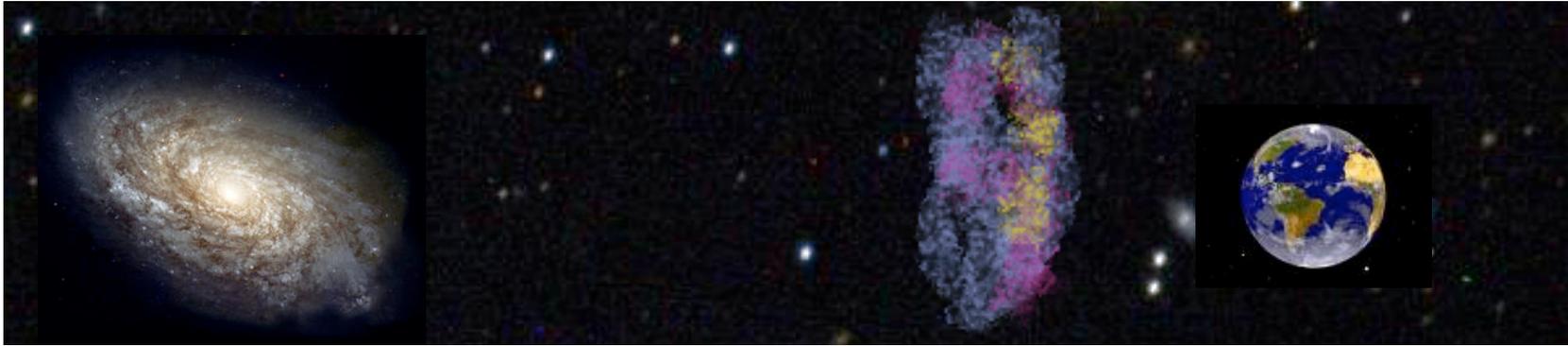
Neutrinos issus de la  
supernova 1987A (MeV)

(c) Jouvenot Fabrice

$\nu_\mu$

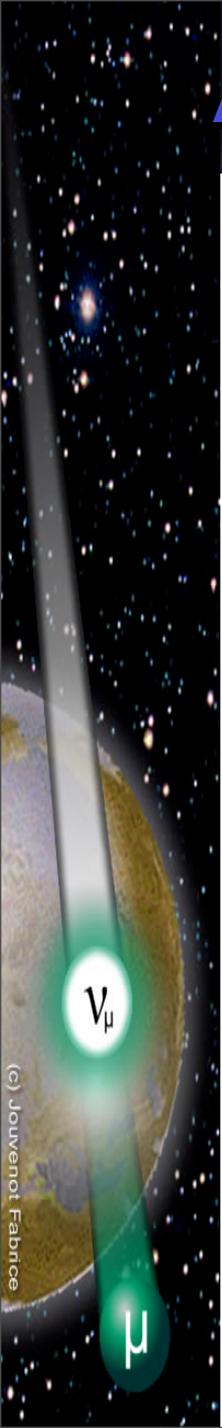
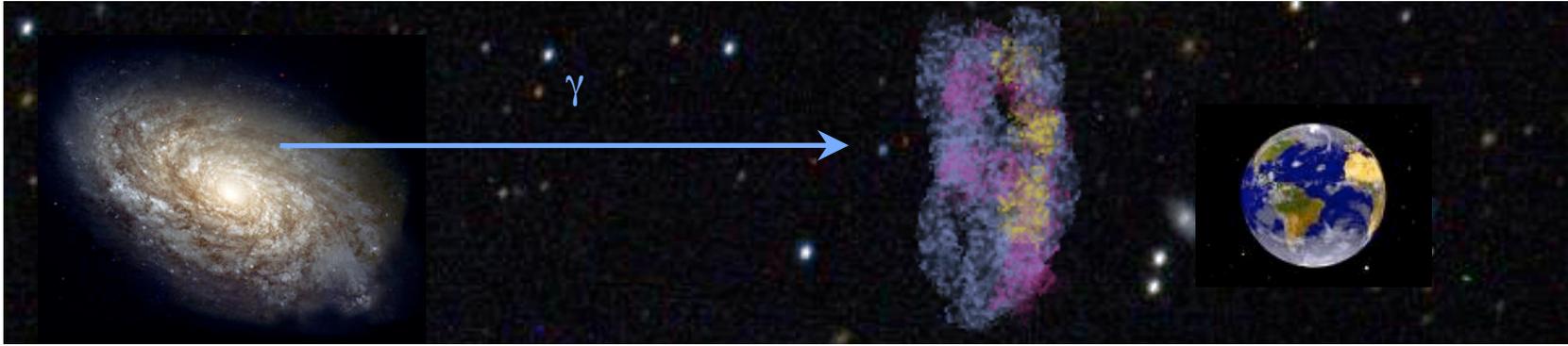
$\mu$

# Avantages des neutrinos en astronomie

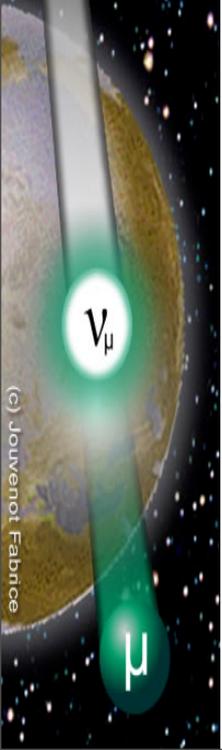
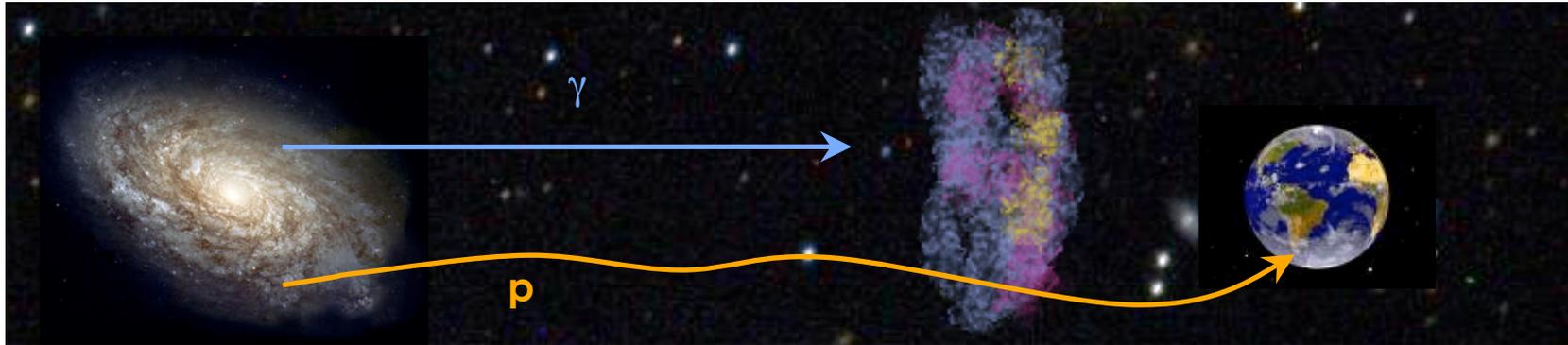


(c) Jouvenot Fabrice

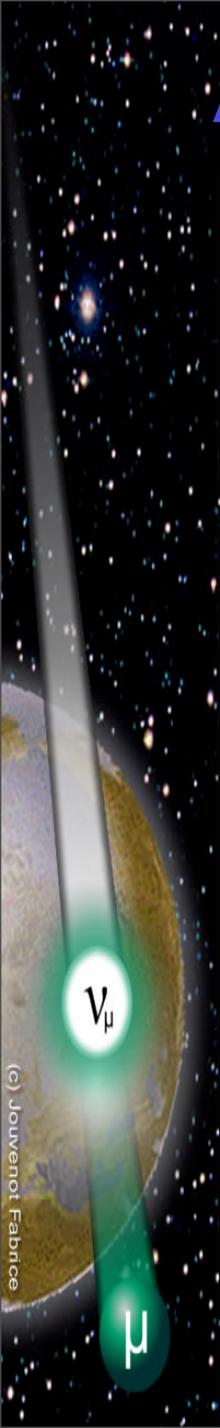
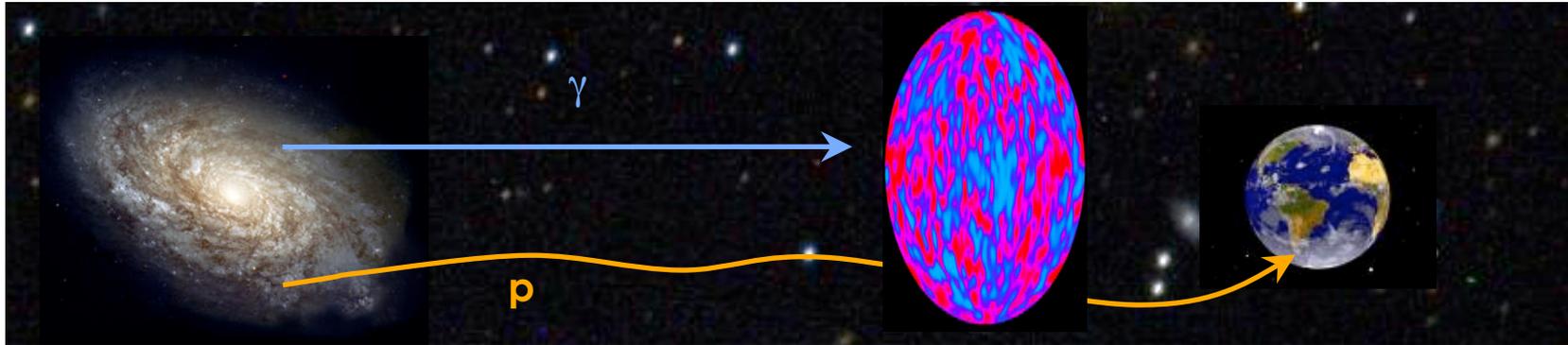
# Avantages des neutrinos en astronomie



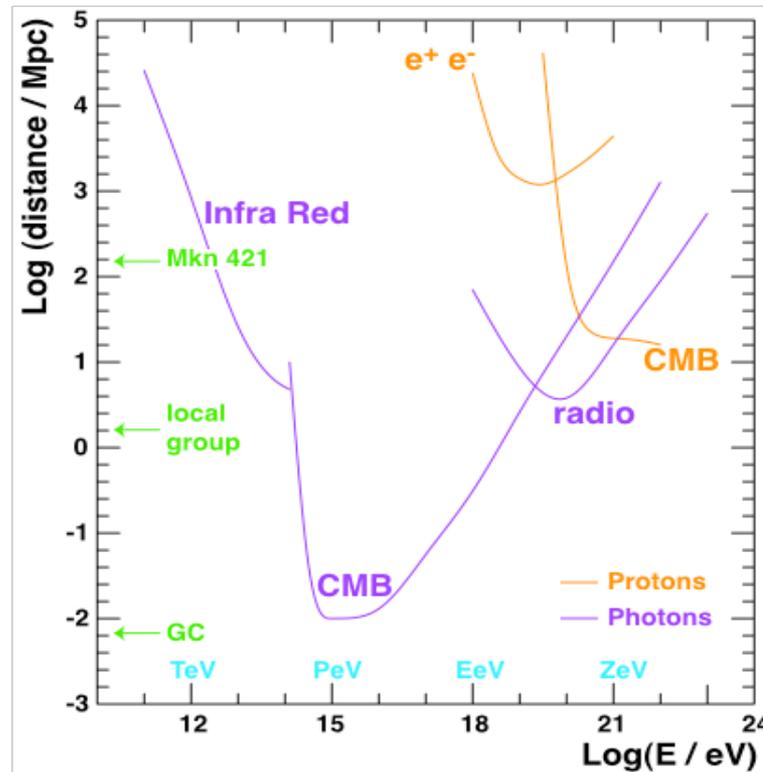
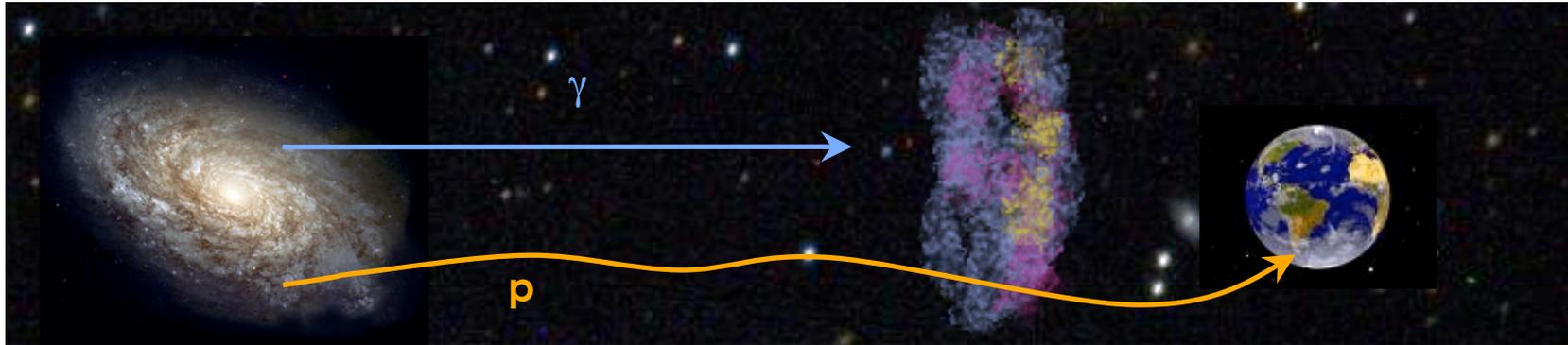
# Avantages des neutrinos en astronomie



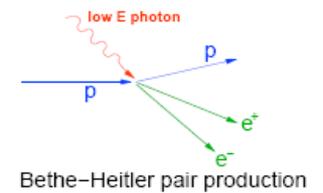
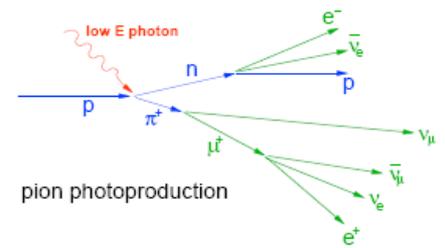
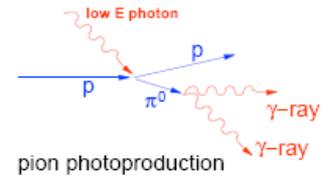
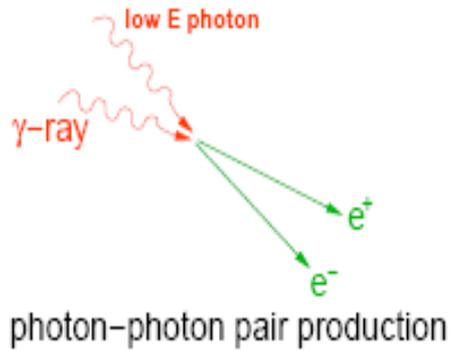
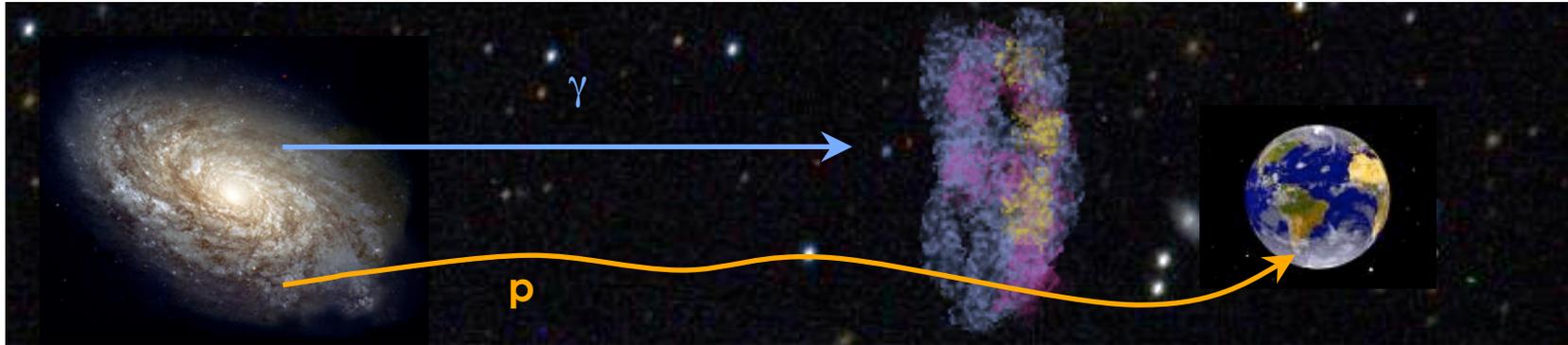
# Avantages des neutrinos en astronomie



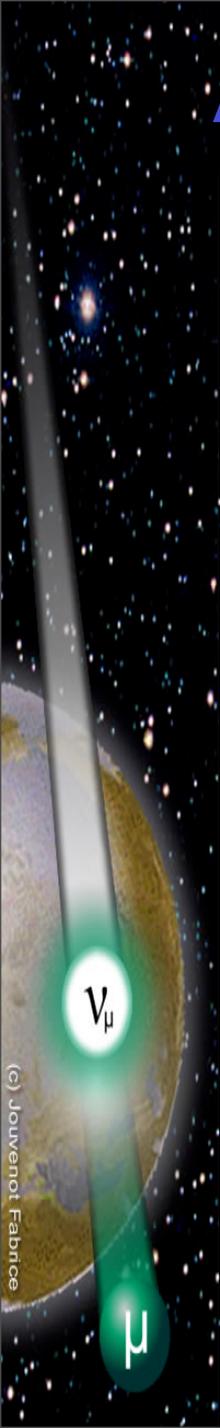
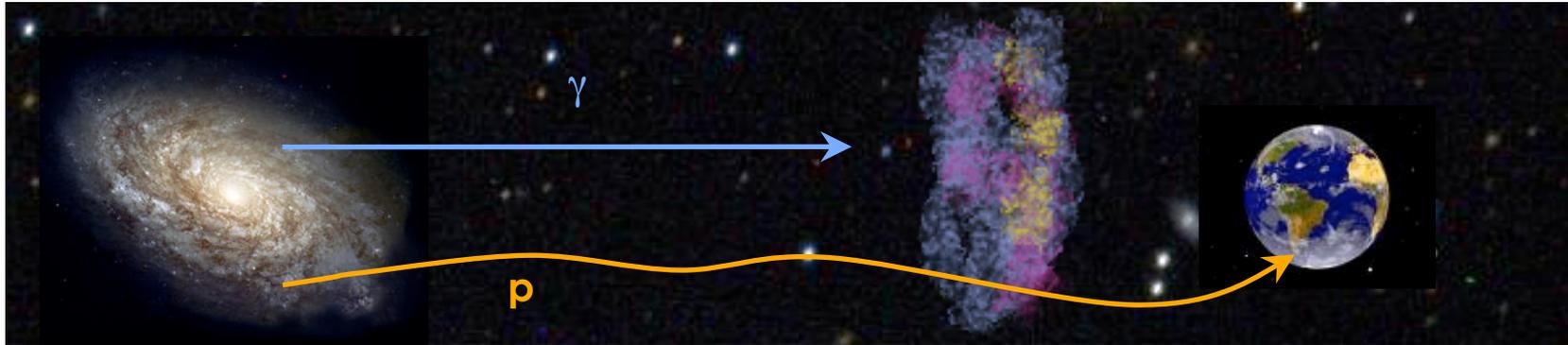
# Avantages des neutrinos en astronomie



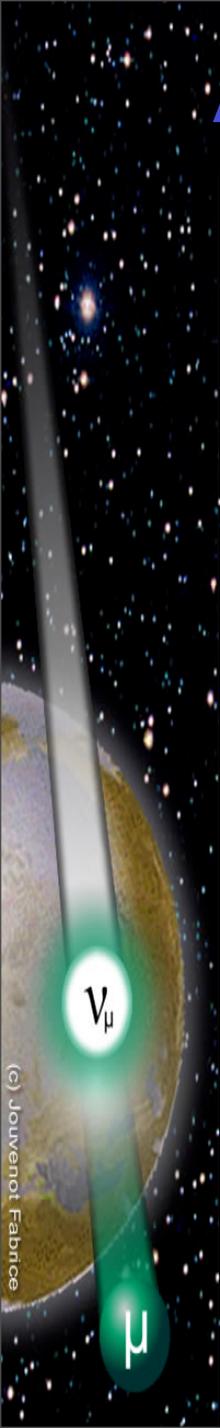
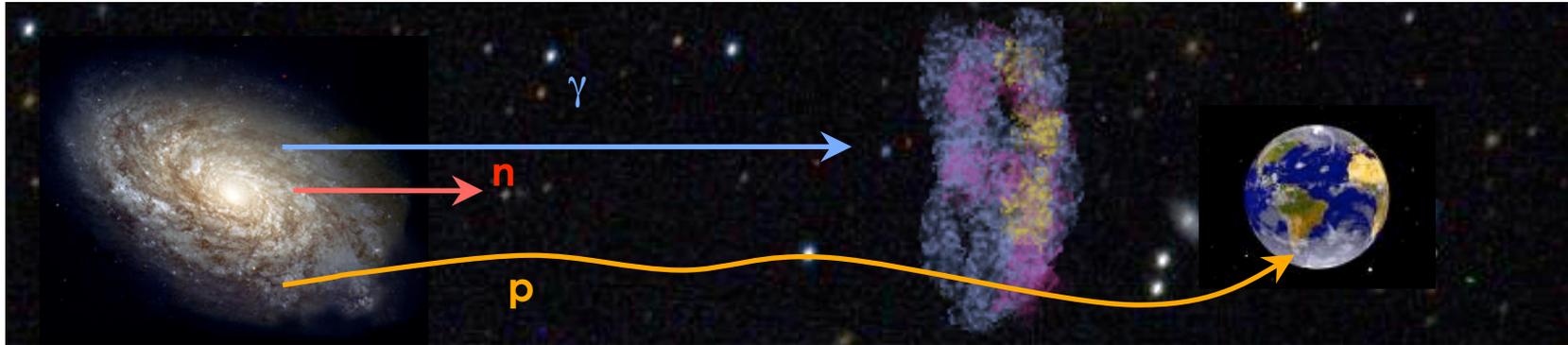
# Avantages des neutrinos en astronomie



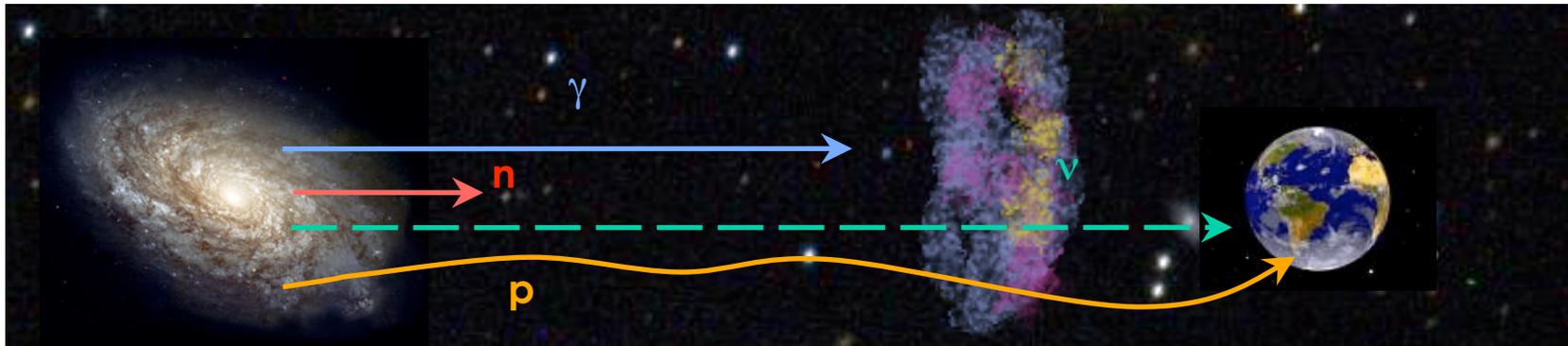
# Avantages des neutrinos en astronomie



# Avantages des neutrinos en astronomie



# Avantages des neutrinos en astronomie

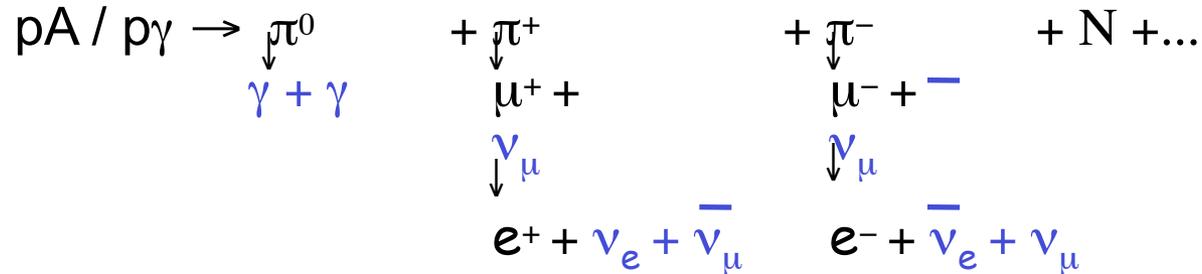


## Neutrino

- ⇒ Sensible aux variations temporelles
- ⇒ Distances cosmologiques
- ⇒ Cœur des sources
- ⇒ Sources ponctuelles

# Mécanismes de production

- Mêmes processus (cascades) que les gerbes atmosphériques



$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0 \text{ source} \quad \xrightarrow{\text{oscillations} \textcircled{R}} \quad \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1 \text{ Terre !}$$

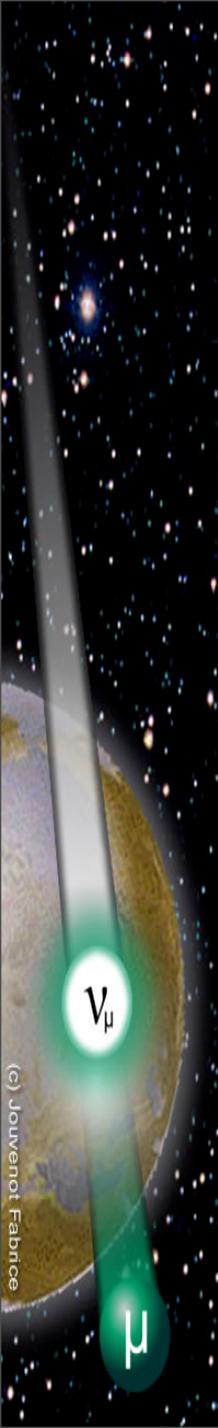
- Les  $\gamma$  de HE peuvent venir de processus électromagnétiques  
Synchrotron Inverse Compton

- Accélération des primaires («Bottom-Up»)

Chocs stochastiques (mécanismes de Fermi)  
Explosion violente  
Accrétion / effondrement gravitationnel

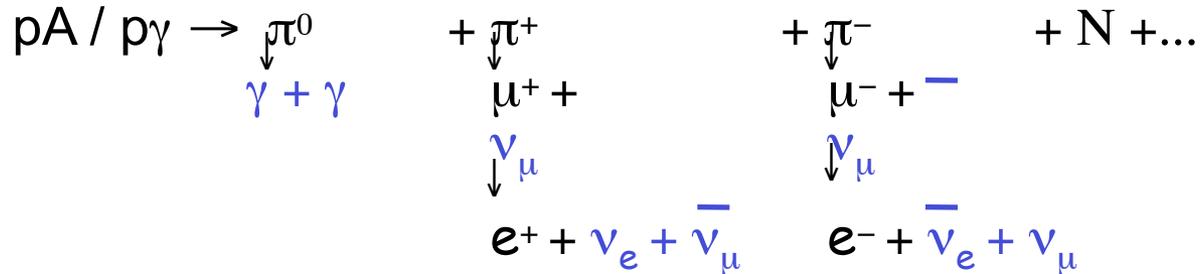
- Modèles sans accélération («Top-down»)

Désintégration de particules supermassives héritées du Big-Bang



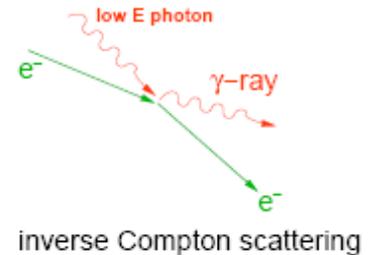
# Mécanismes de production

- Mêmes processus (cascades) que les gerbes atmosphériques

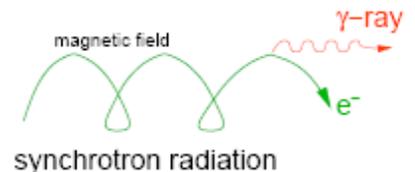


$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0 \text{ source} \xrightarrow{\text{oscillations} \textcircled{R}} \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1 \text{ Terre !}$$

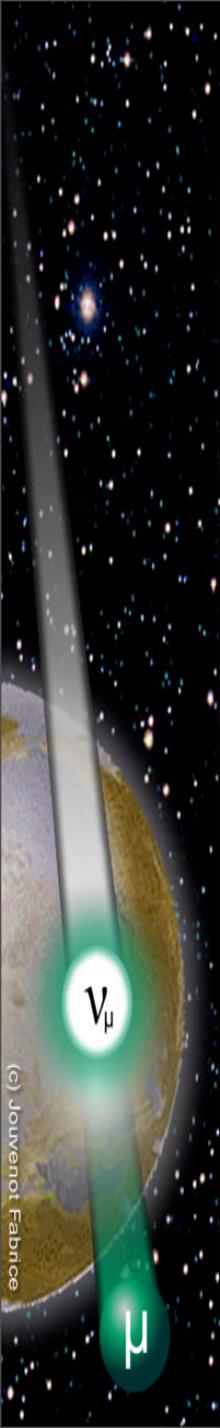
- Les  $\gamma$  de HE peuvent venir de processus électromagnétiques  
Synchrotron Inverse Compton



- Accélération des primaires («Bottom-Up»)
  - Chocs stochastiques (mécanismes de Fermi)
  - Explosion violente
  - Accrétion / effondrement gravitationnel

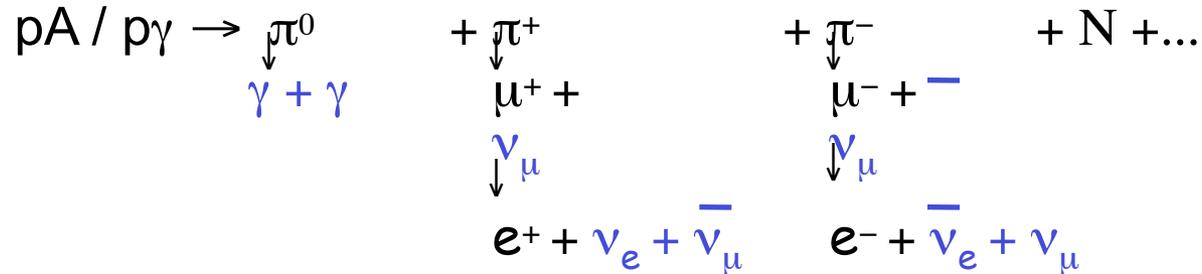


- Modèles sans accélération («Top-down»)
  - Désintégration de particules supermassives héritées du Big-Bang



# Mécanismes de production

- Mêmes processus (cascades) que les gerbes atmosphériques



$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0 \text{ source} \quad \xrightarrow{\text{oscillations} \textcircled{R}} \quad \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1 \text{ Terre !}$$

- Les  $\gamma$  de HE peuvent venir de processus électromagnétiques  
Synchrotron Inverse Compton

- Accélération des primaires («Bottom-Up»)

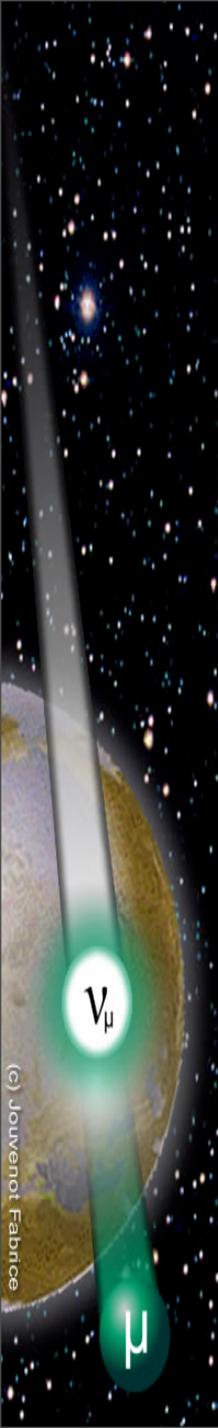
Chocs stochastiques (mécanismes de Fermi)

Explosion violente

Accrétion / effondrement gravitationnel

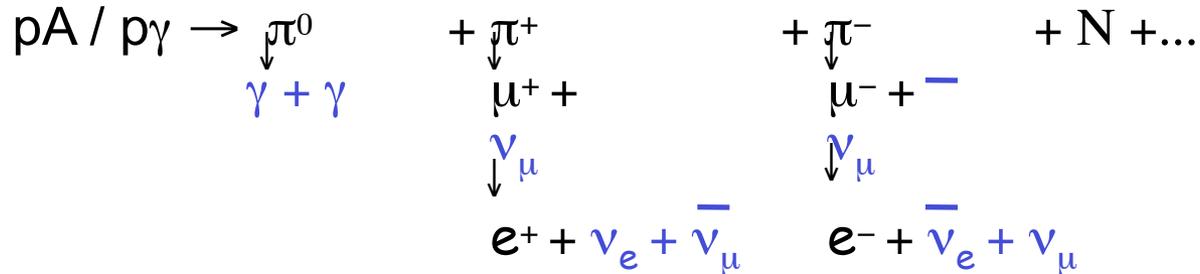
- Modèles sans accélération («Top-down»)

Désintégration de particules supermassives héritées du Big-Bang



# Mécanismes de production

- Mêmes processus (cascades) que les gerbes atmosphériques



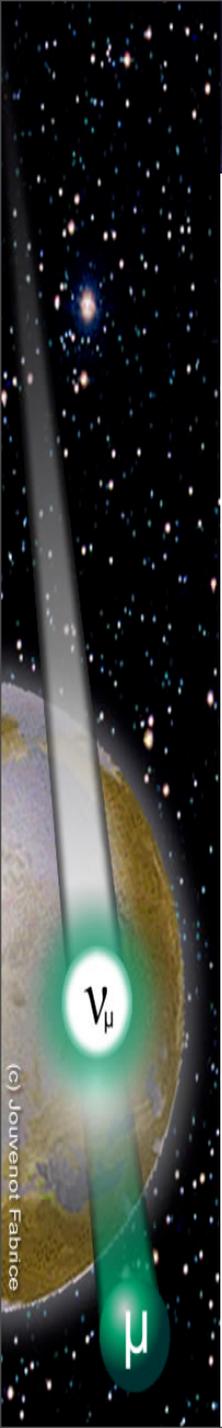
$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:2:0 \text{ source} \quad \xrightarrow{\text{oscillations} \textcircled{R}} \quad \nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1 \text{ Terre !}$$

- Les  $\gamma$  de HE peuvent venir de processus électromagnétiques  
Synchrotron Inverse Compton

- Accélération des primaires («Bottom-Up»)
  - Chocs stochastiques (mécanismes de Fermi)
  - Explosion violente
  - Accrétion / effondrement gravitationnel

Les RC de  $10^{20}$  eV existent !

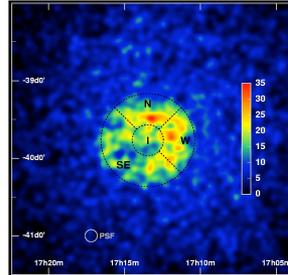
- Modèles sans accélération («Top-down»)
  - Désintégration de particules supermassives héritées du Big-Bang



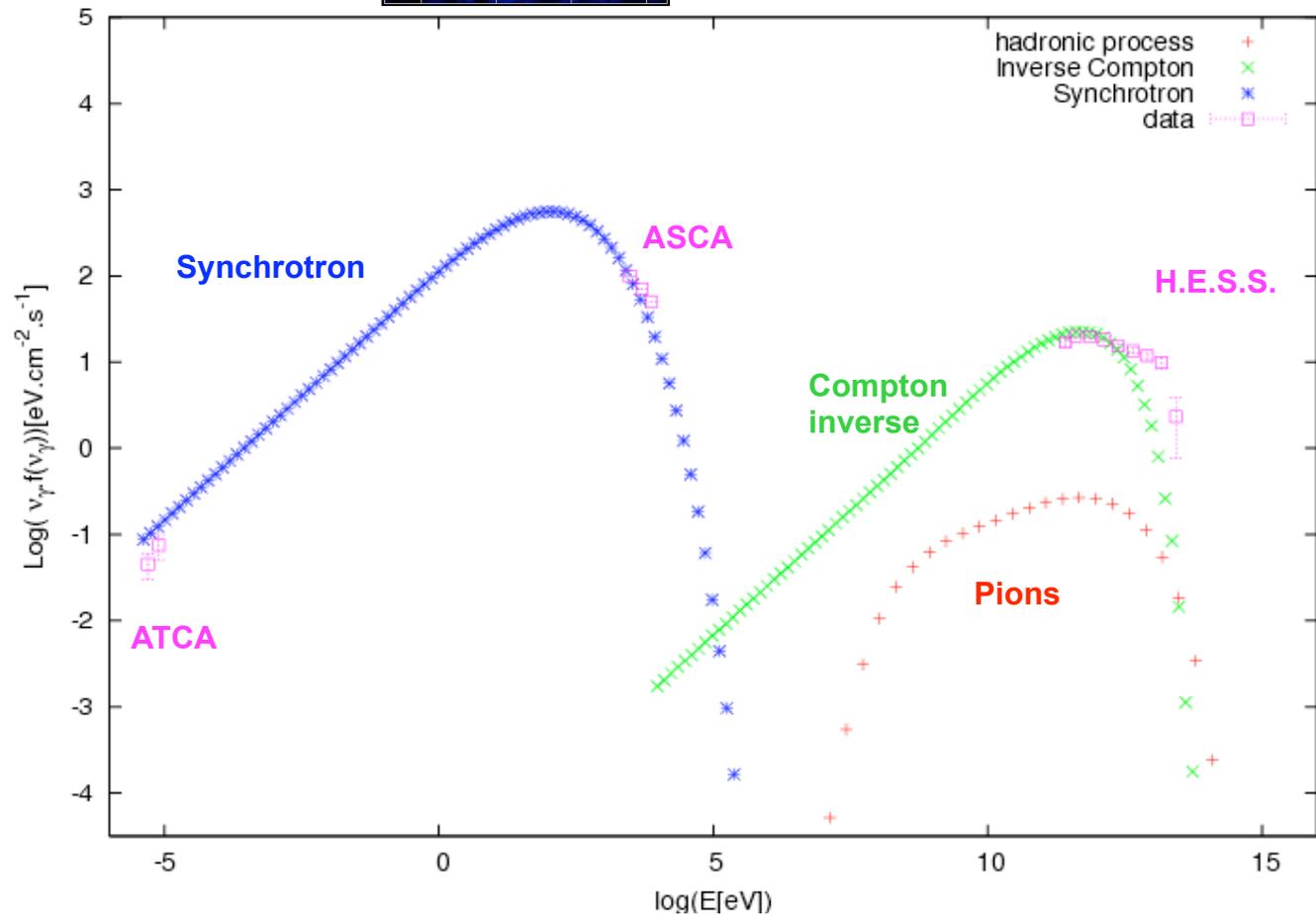
# Hadronique versus leptonique (SIC)

Hypothèses :

- Champ : 6  $\mu\text{G}$
- $e^-/p$  accélérés :  $9 \cdot 10^{-3}$
- Densité :  $0,08 \text{ part.cm}^{-3}$
- Interactions CMB seul



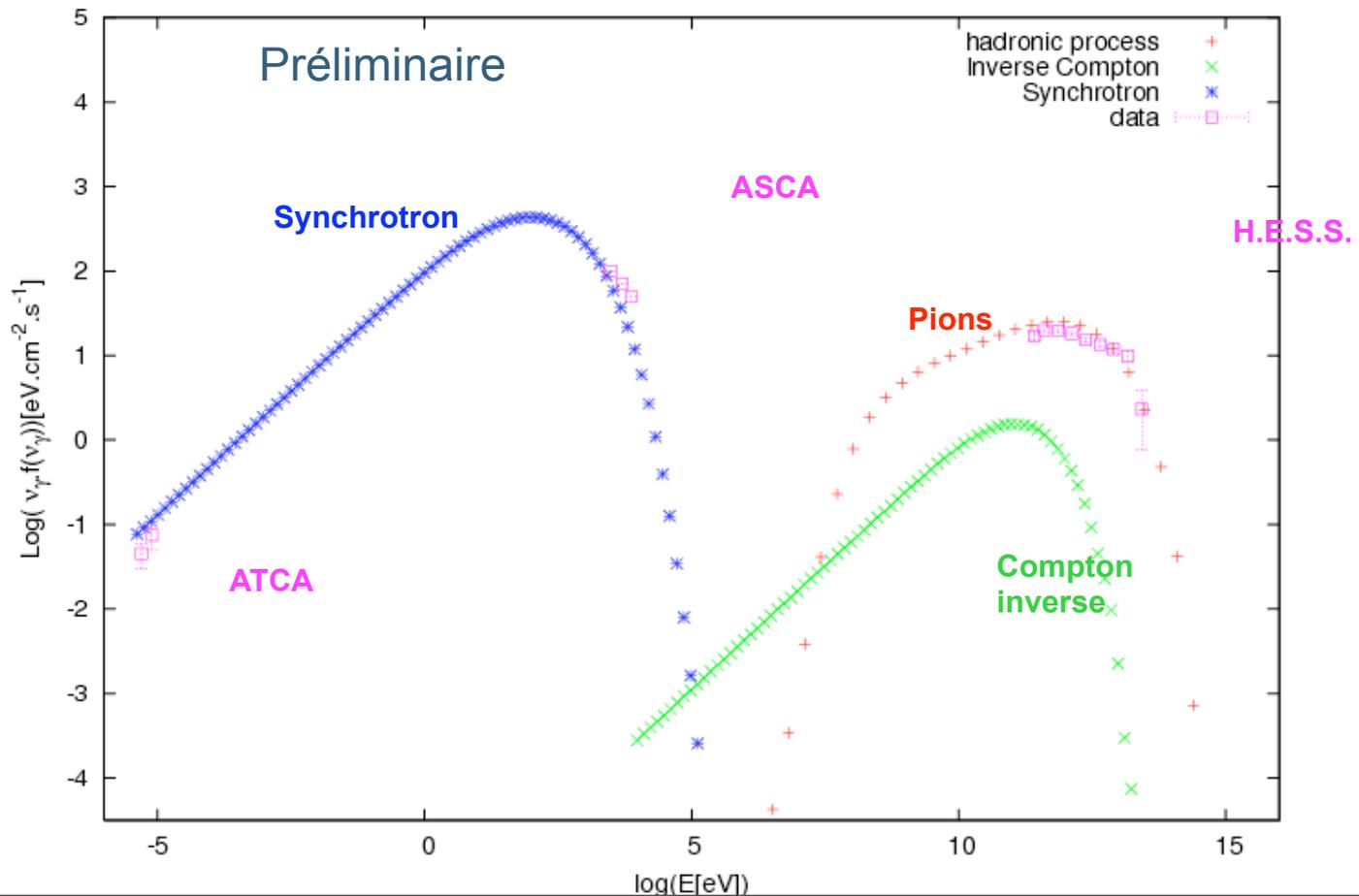
Modèle  
hydrodynamique  
RXJ 1713  
G. Maurin et al.,



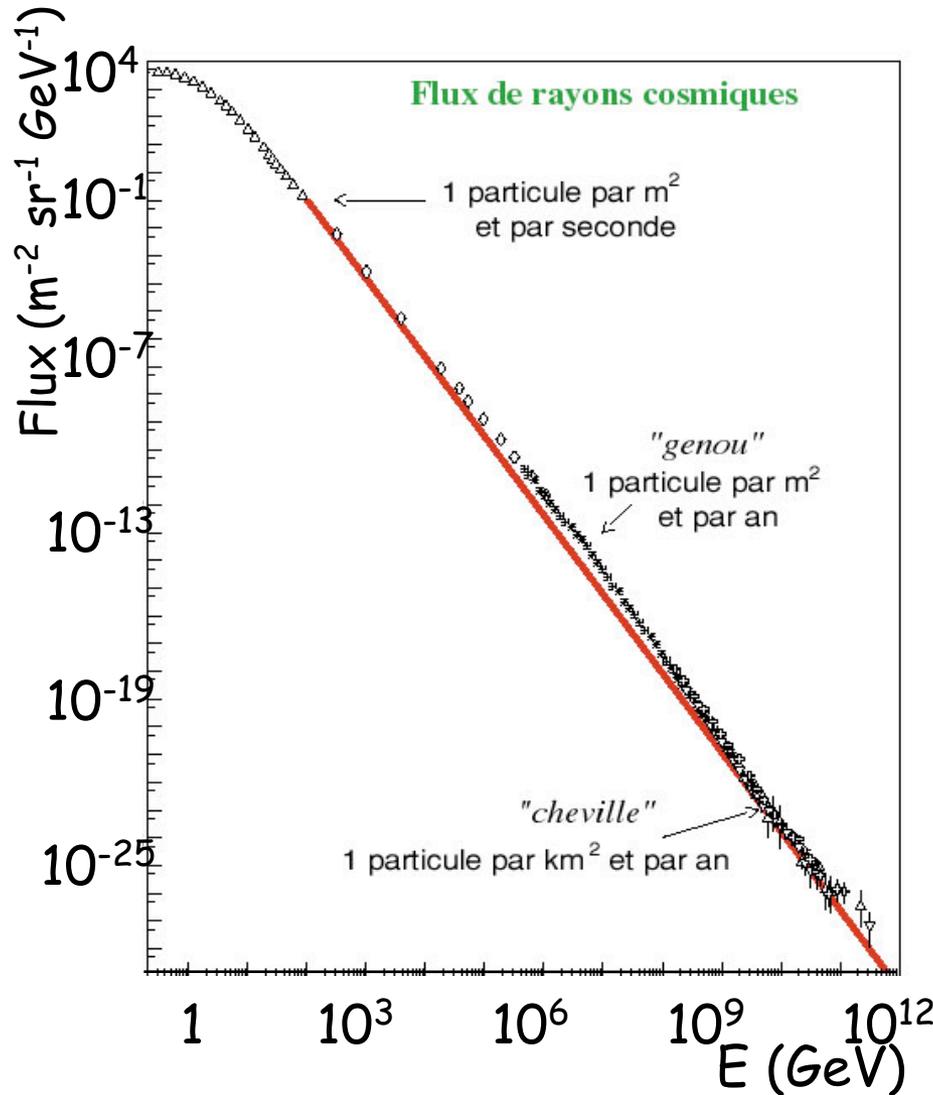
# Hadronique versus leptonique (SIC)

Hypothèses :

- Champ :  $12 \mu\text{G}$
- e-/p accélérés :  $5 \cdot 10^{-4}$
- Densité :  $1,5 \text{ part.cm}^{-3}$
- Interactions CMB seul



# Les rayons cosmiques de HE



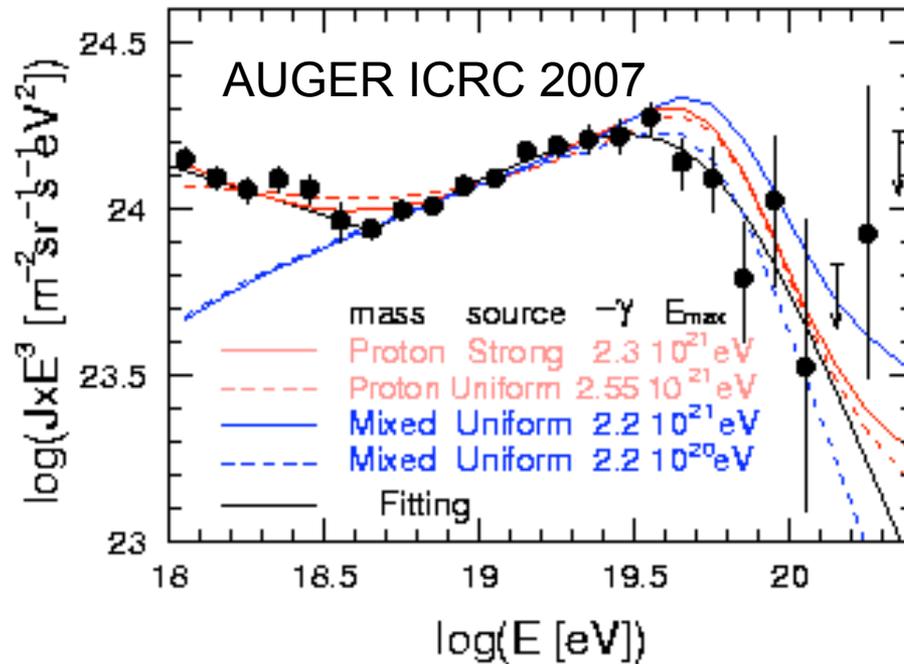
La coupure à UHE est confirmée  
mais ...

Nature  
Origine  
Production

?

# Les rayons cosmiques de HE

La coupure à UHE est confirmée  
mais ...



Nature  
Origine  
Production

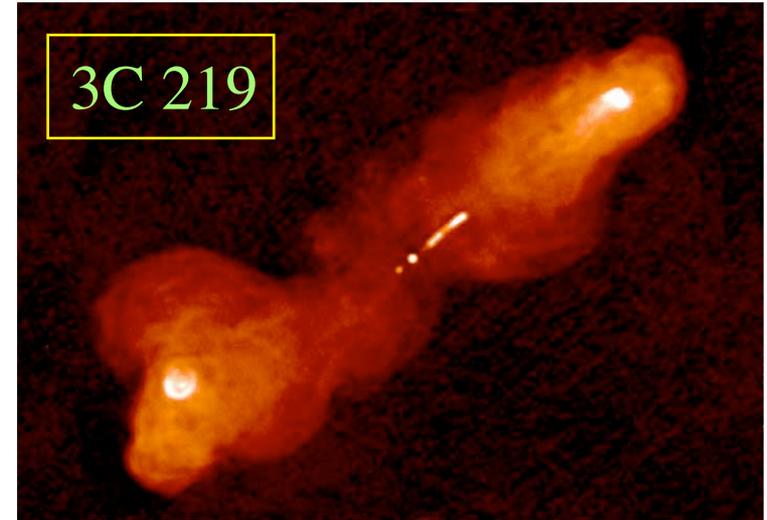
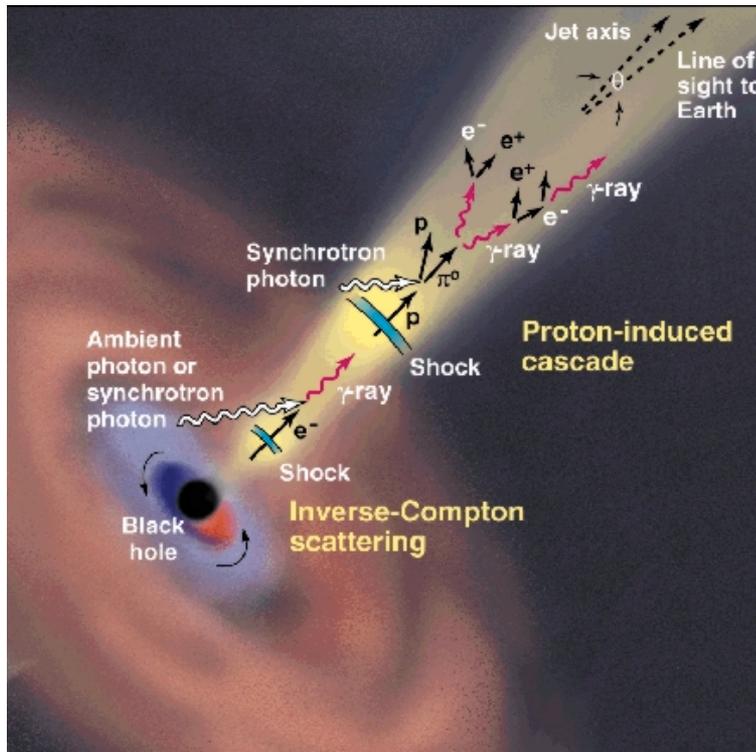
?

# Sources extragalactiques potentielles

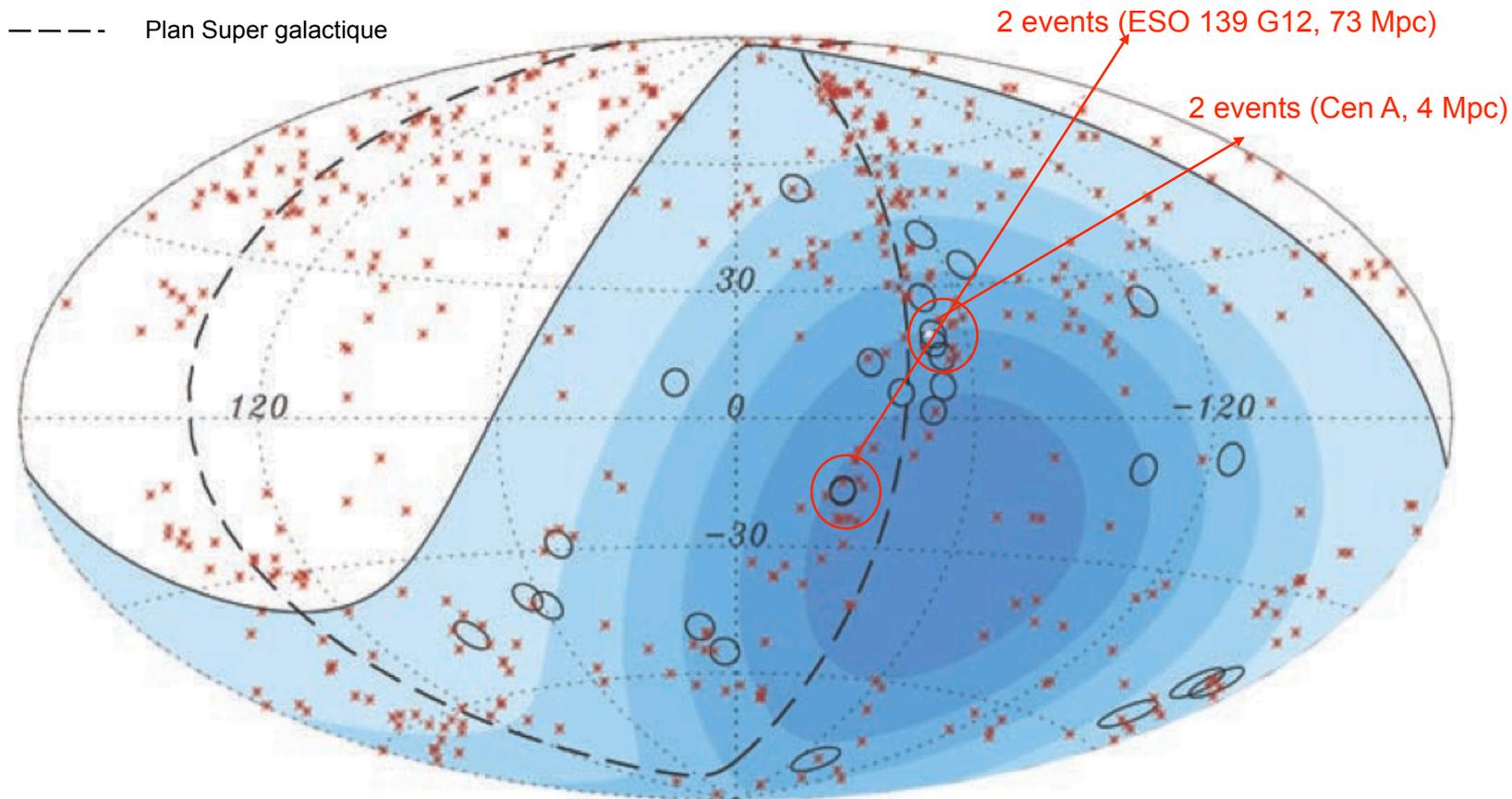
Noyaux actifs de galaxie (AGN)

Sources variables mais continues

Luminosités observées  
 $10^9 - 10^{15} \times L_{\odot}$



# AUGER : corrélation AGN



- 21 événements  $E > 57 \text{ EeV}$
- dont 19 à  $3.2^\circ$  d' AGN de redshift  $z < 0.018$  (75 Mpc)

# Sources extragalactiques potentielles

## Sursauts gamma (GRB)

Émissions très courtes ( $\sim 1\text{s}$ )  
et très intenses  $\sim 10^{18} \times L_{\odot}$

Émission en 1 s  $E_{\odot}$  en...  
300 000 000 000 années !



- Découverte fortuite émission prompte en 1967 par VELA, publiée en 1973
- Observation satellite C.G.R.O (EGRET, BATSE, Beppo-SAX,...) de 1991 à 2000
- **Origine extragalactique**  
distribution spatiale isotrope + contreparties  $z \Rightarrow \in [0.43; 4.50]$

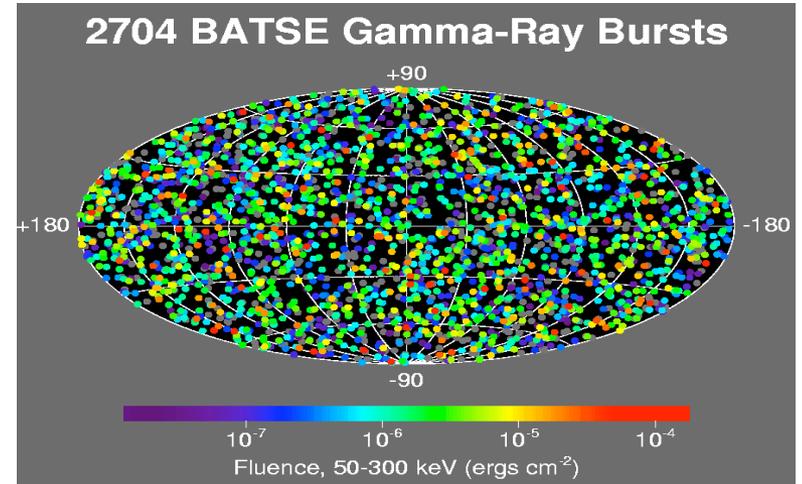
# Sources extragalactiques potentielles

## Sursauts gamma (GRB)

Émissions très courtes ( $\sim 1\text{s}$ )  
et très intenses  $\sim 10^{18} \times L_{\odot}$

Émission en 1 s  $E_{\odot}$  en...  
300 000 000 000 années !

*BATSE : 1 sursaut /jour ( $4\pi/3$  sr)*



- Découverte fortuite émission prompte en 1967 par VELA, publiée en 1973
- Observation satellite C.G.R.O (EGRET, BATSE, Beppo-SAX,...) de 1991 à 2000
- **Origine extragalactique**  
distribution spatiale isotrope + contreparties  $z \Rightarrow \in [0.43; 4.50]$

# Sources extragalactiques potentielles

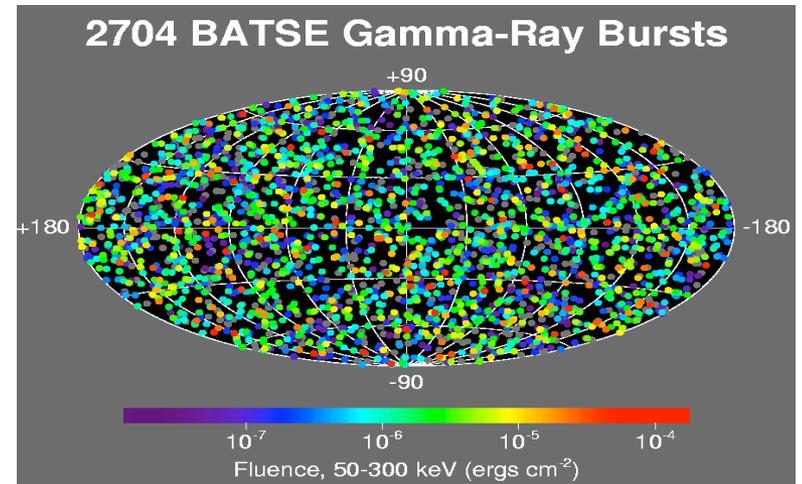
## Sursauts gamma (GRB)

Émissions très courtes ( $\sim 1\text{s}$ )  
et très intenses  $\sim 10^{18} \times L_{\odot}$

Émission en 1 s  $E_{\odot}$  en...  
300 000 000 000 années !

Différents modèles d'émission  
WB, MPR, Guetta et al.  
0.5 – 10 neutrinos / an

*BATSE : 1 sursaut /jour ( $4\pi/3$  sr)*



- Découverte fortuite émission prompte en 1967 par VELA, publiée en 1973
- Observation satellite C.G.R.O (EGRET, BATSE, Beppo-SAX,...) de 1991 à 2000
- **Origine extragalactique**  
distribution spatiale isotrope + contreparties  $z \Rightarrow \in [0.43; 4.50]$

Trigger spécial développé pour ANTARES

# Limites théoriques supérieures ( $\nu_\mu$ )

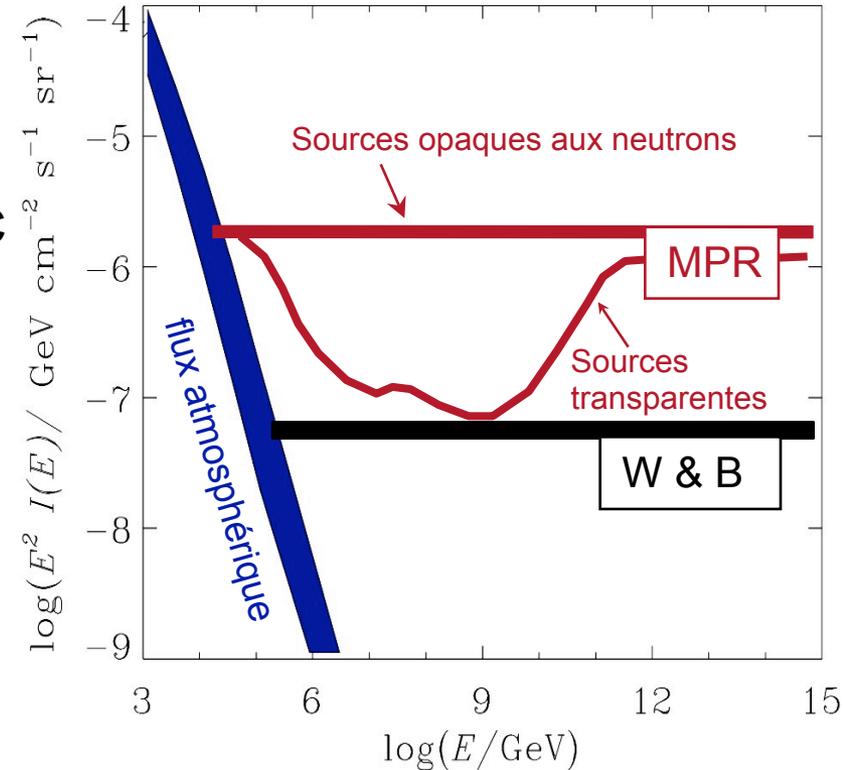
## ➤ Waxman & Bahcall, 1999

- $dN/dE \propto E^{-2}$  spectre primaire
- Normalisation avec le spectre de RC observé entre  $10^{19}$  -  $10^{20}$  eV

$$E^{-2} I(E) = 4.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

## ➤ Mannheim, Protheroe, Rachen, 2001

- Spectre des primaires libre
- Normalisation à la contribution extragalactique du spectre des RC
- Considèrent aussi les sources opaques aux neutrons



# Limites théoriques supérieures ( $\nu_\mu$ )

## ➤ Waxman & Bahcall, 1999

- $dN/dE \propto E^{-2}$  spectre primaire
- Normalisation avec le spectre de RC observé entre  $10^{19}$  -  $10^{20}$  eV

$$E^{-2} I(E) = 4.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

## ➤ Mannheim, Protheroe, Rachen, 2001

- Spectre des primaires libre
- Normalisation à la contribution extragalactique du spectre des RC
- Considèrent aussi les sources opaques aux neutrons

« High Energy Neutrinos from Astrophysical Sources: An Upper Bound »

PRD 59 (1999)

« On the Cosmic Ray Bound for models of Extragalactic Neutrino production »

PRD 63 (2001)

« High Energy Astrophysical Neutrinos: The Upper Bound is Robust »

PRD 64 (2001)

« The relation of extragalactic cosmic rays and neutrino fluxes: the logic of the upper bound debate »

Astro-ph/990831

1999-08-17

# Limites théoriques supérieures ( $\nu_\mu$ )

## ➤ Waxman & Bahcall, 1999

- $dN/dE \propto E^{-2}$  spectre primaire
- Normalisation avec le spectre de RC observé entre  $10^{19}$  -  $10^{20}$  eV

$$E^{-2} I(E) = 4.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

## ➤ Mannheim, Protheroe, Rachen, 2001

- Spectre des primaires libre
- Normalisation à la contribution extragalactique du spectre des RC
- Considèrent aussi les sources opaques aux neutrons

« High Energy Neutrinos from Astrophysical Sources: An Upper Bound »

PRD 59 (1999)

« On the Cosmic Ray Bound for models of Extragalactic Neutrino production »

PRD 63 (2001)

« High Energy Astrophysical Neutrinos: The Upper Bound is Robust »

PRD 64 (2001)

« The relation of extragalactic cosmic rays and neutrino fluxes: the logic of the upper bound debate »

Astro-ph/990831

1999-08-17

⇒ Limites controversées

# Sources galactiques potentielles

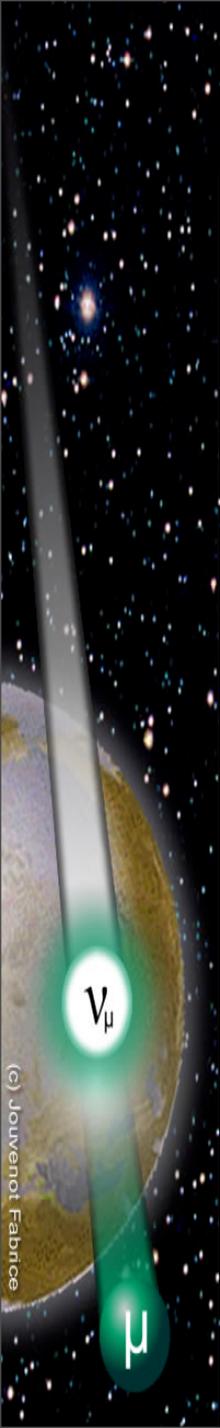
- *Binaires*  
*Micro-quasars*



- *Vestiges de supernovae*  
*pulsars, étoiles à neutrons*



- *Structures denses*  
*Soleil, centre galactique,*  
*matière interstellaire*



# Sources galactiques potentielles

- *Binaires*  
*Micro-quasars*



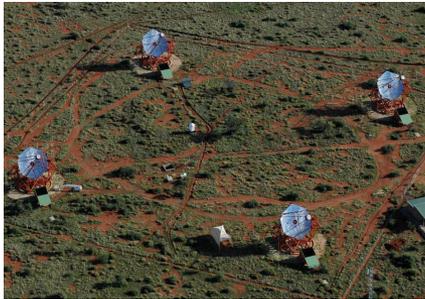
- *Vestiges de supernovae*  
*pulsars, étoiles à neutrons*



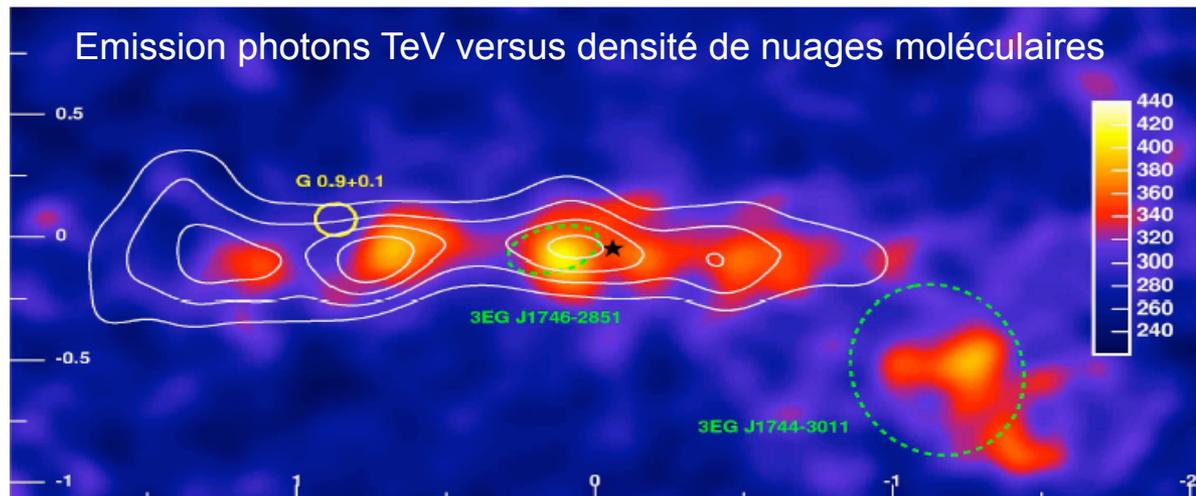
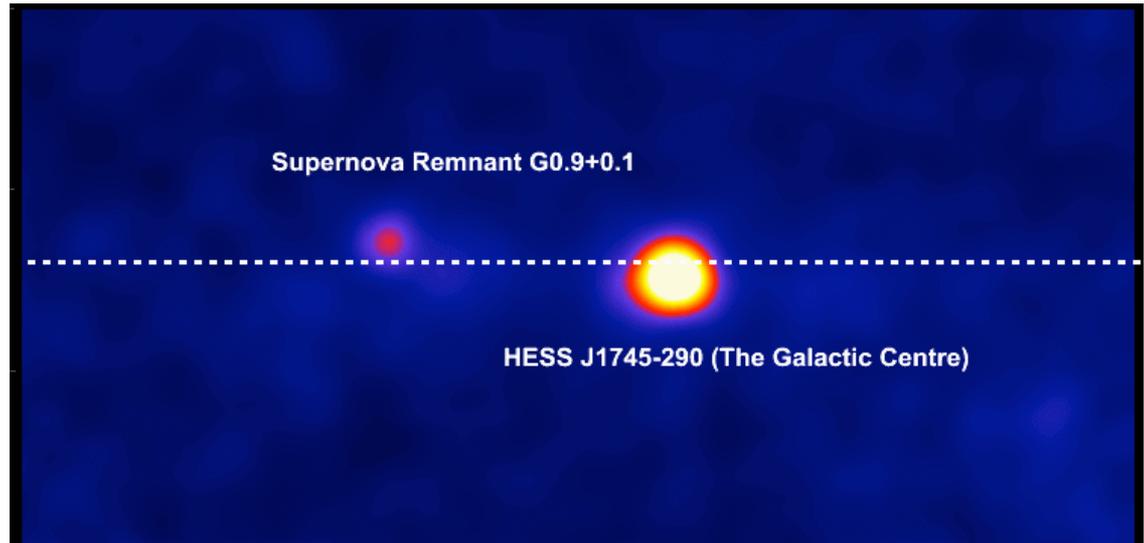
- *Structures denses*  
*Soleil, centre galactique,*  
*matière interstellaire*

# Région centrale de la Galaxie

- Haute densité de matière
- Source compacte Sgr A<sup>\*</sup>
- Trou Noir  $\sim 3 \cdot 10^6 M_{\odot}$
- Sgr A East SNR

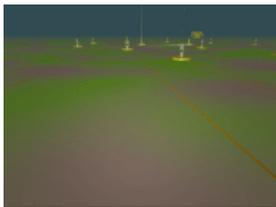


HESS



→ champs de vue des télescopes à neutrinos de l'hémisphère nord

# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

Sources de neutrinos

## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels

## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

Etapes de la construction

Analyses en cours

## Le projet KM3NeT

# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

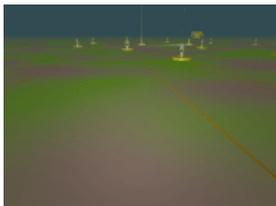
Sources de neutrinos



## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels



## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

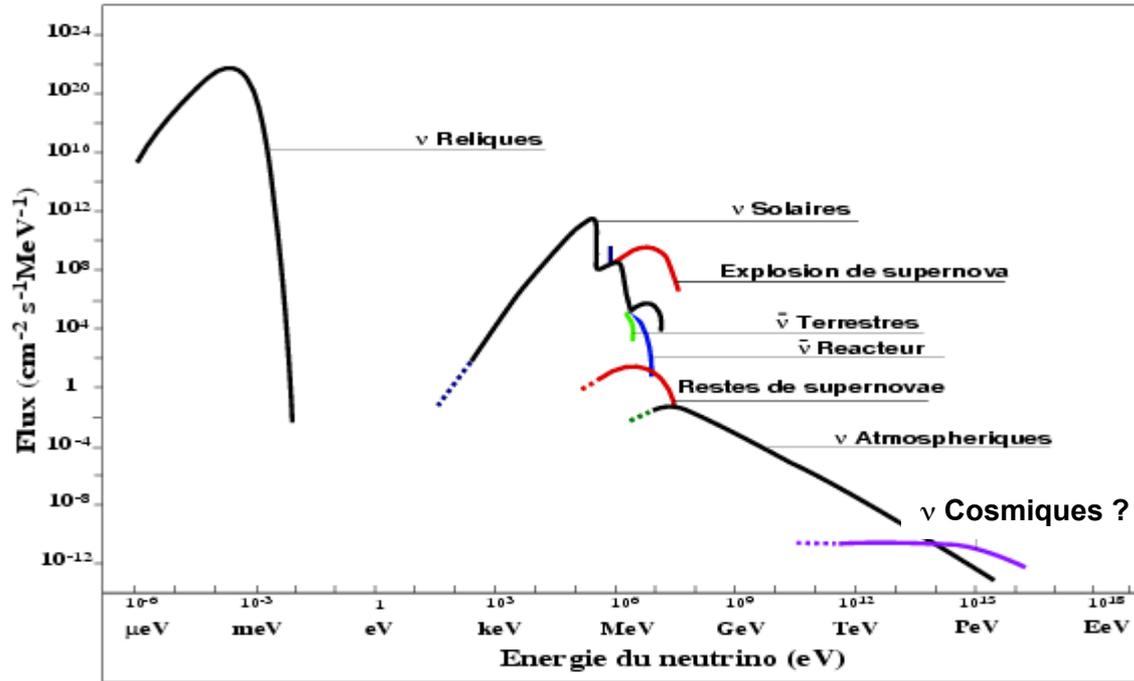
Etapes de la construction

Analyses en cours

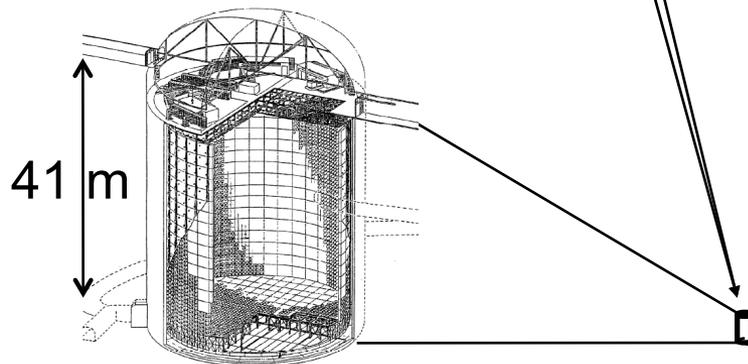
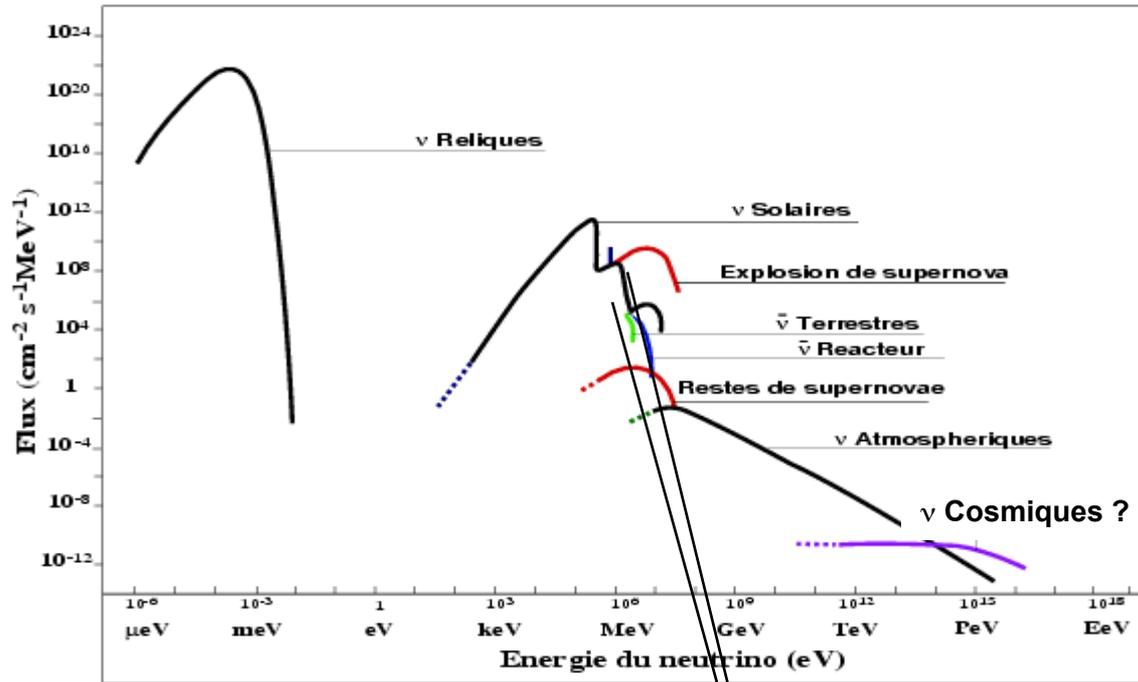


## Le projet KM3NeT

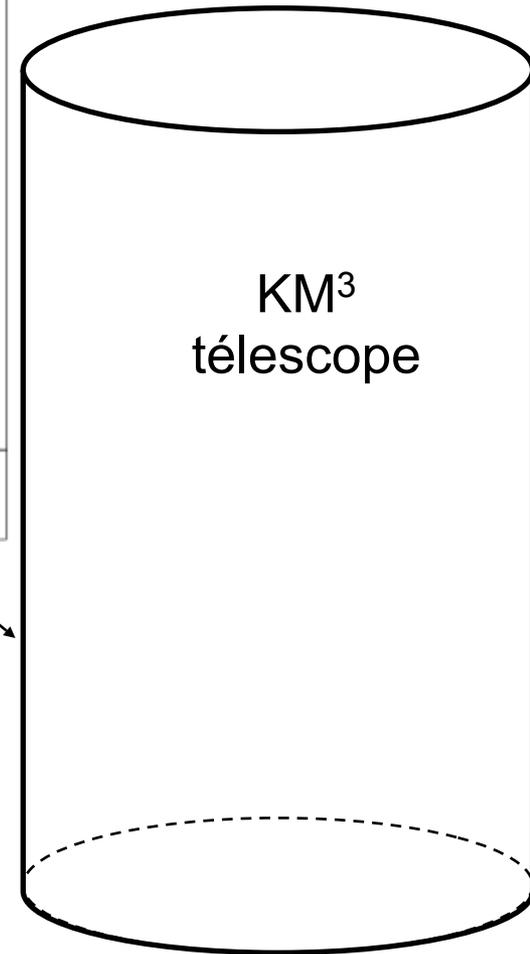
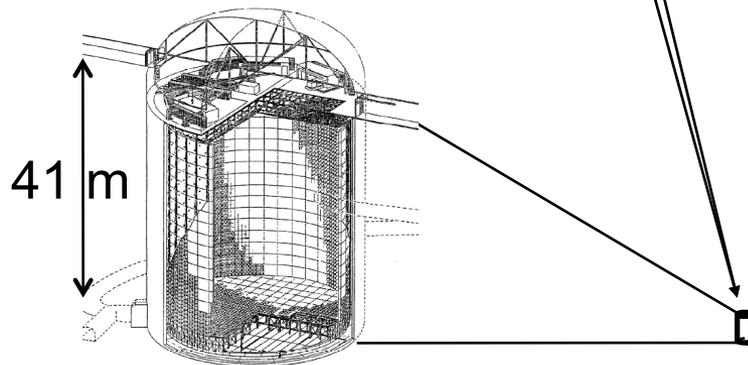
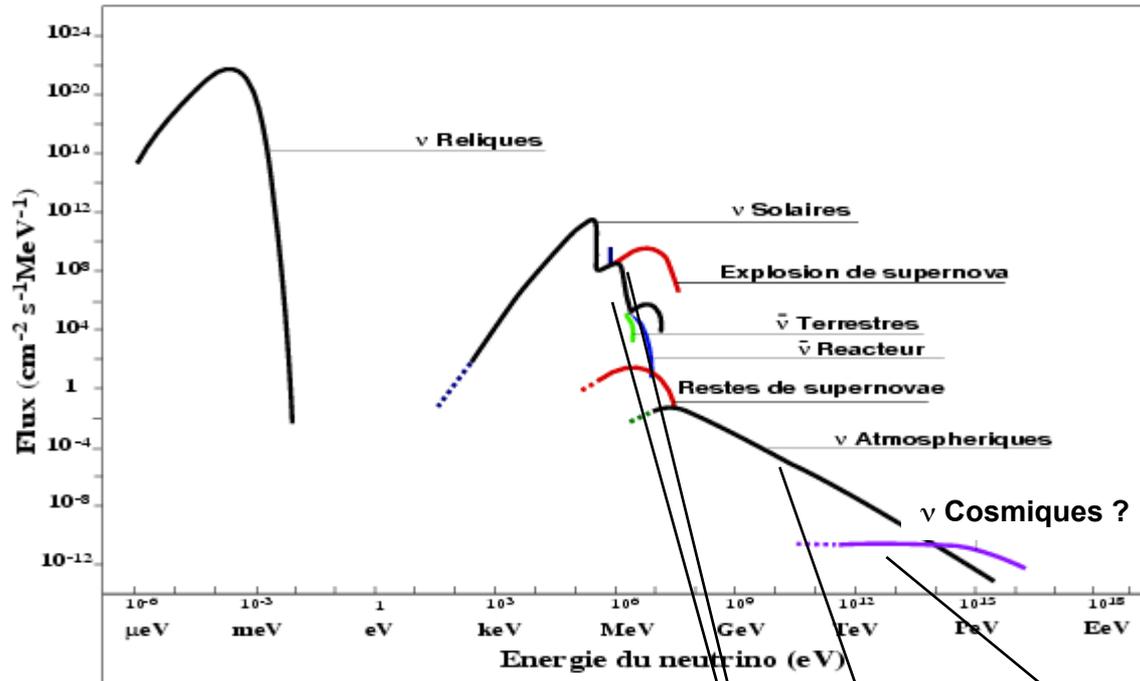
# Défi de la détection à haute énergie



# Défi de la détection à haute énergie



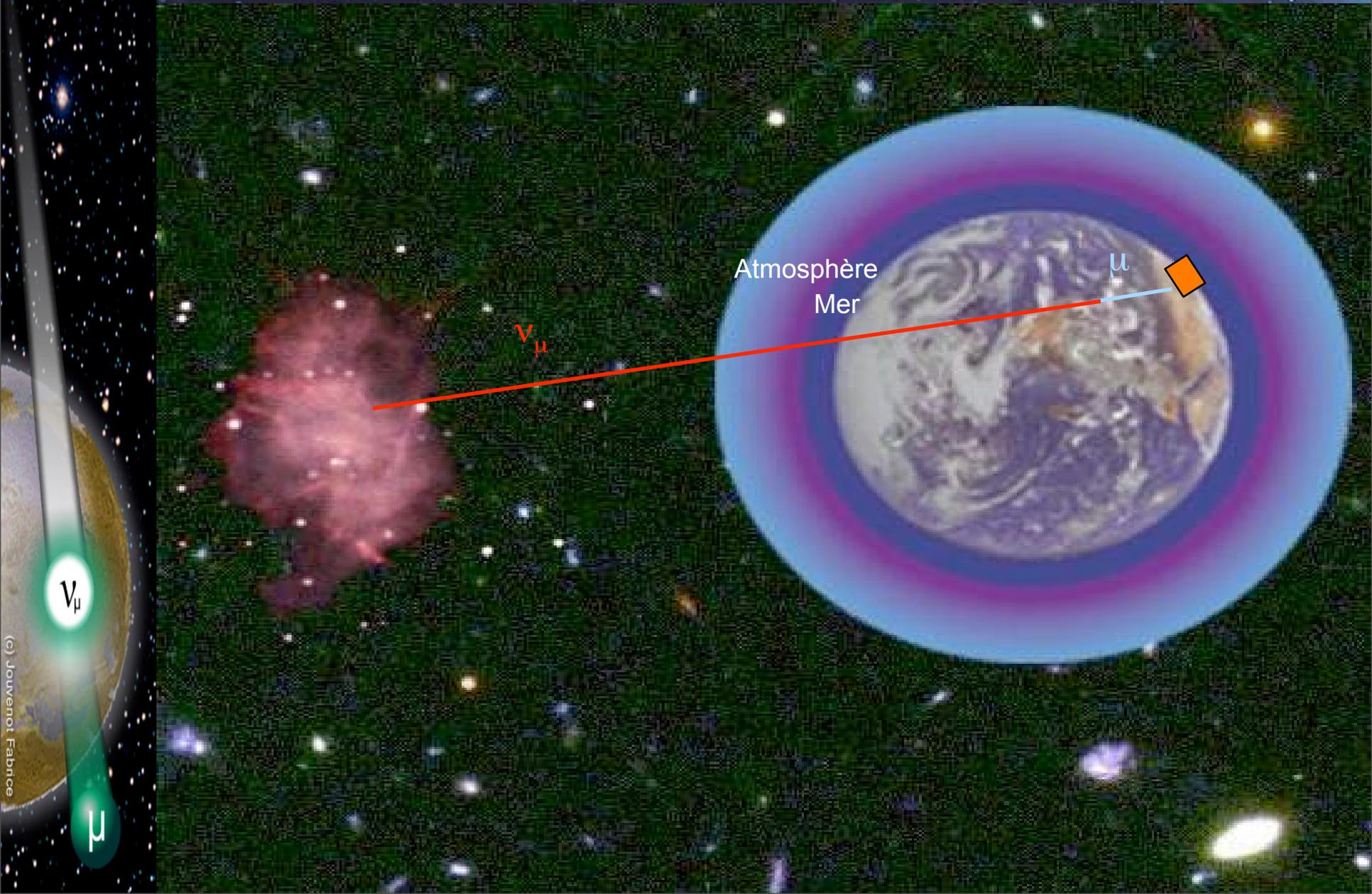
# Défi de la détection à haute énergie



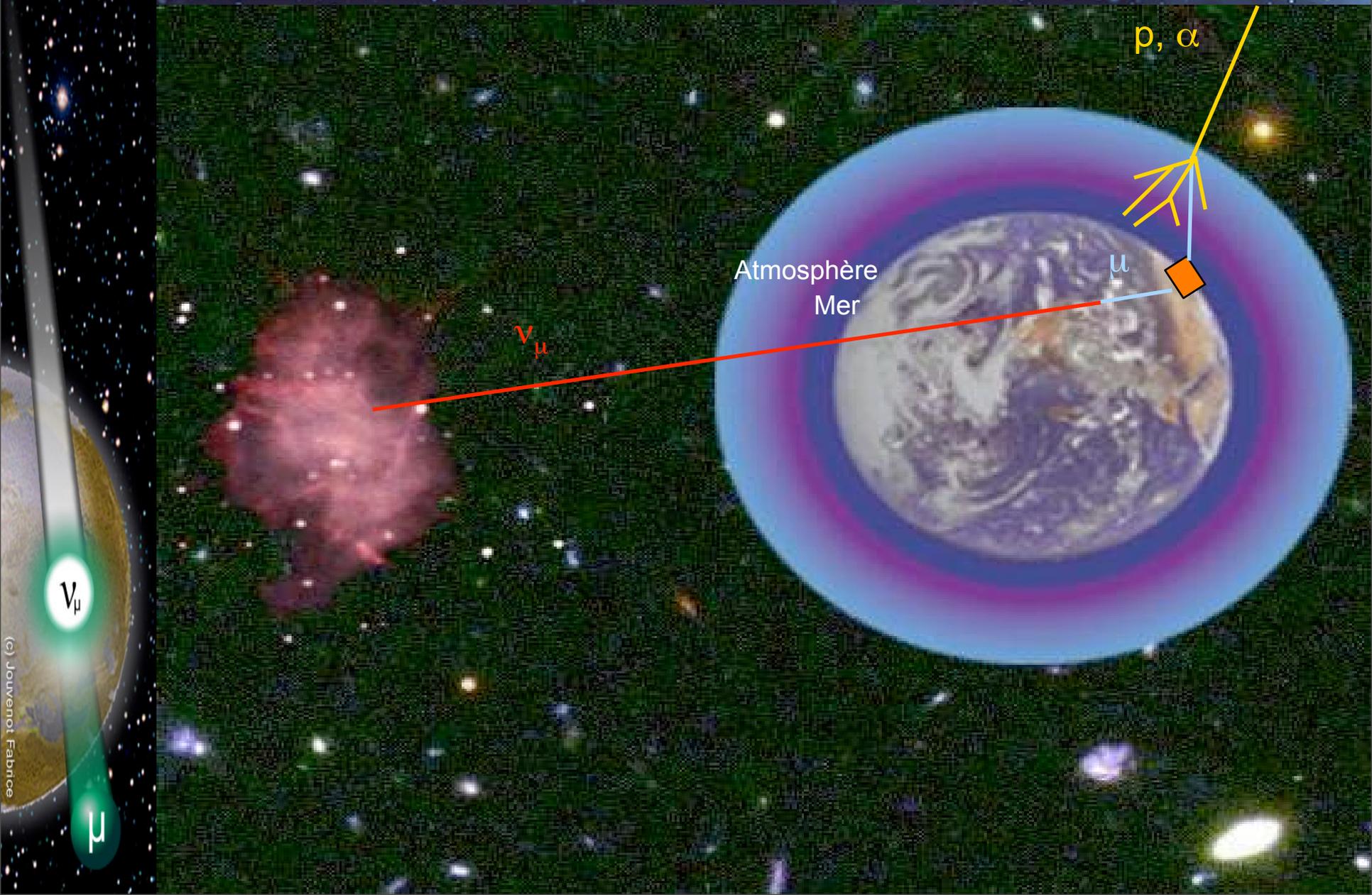
# Contraintes des bruits de fond



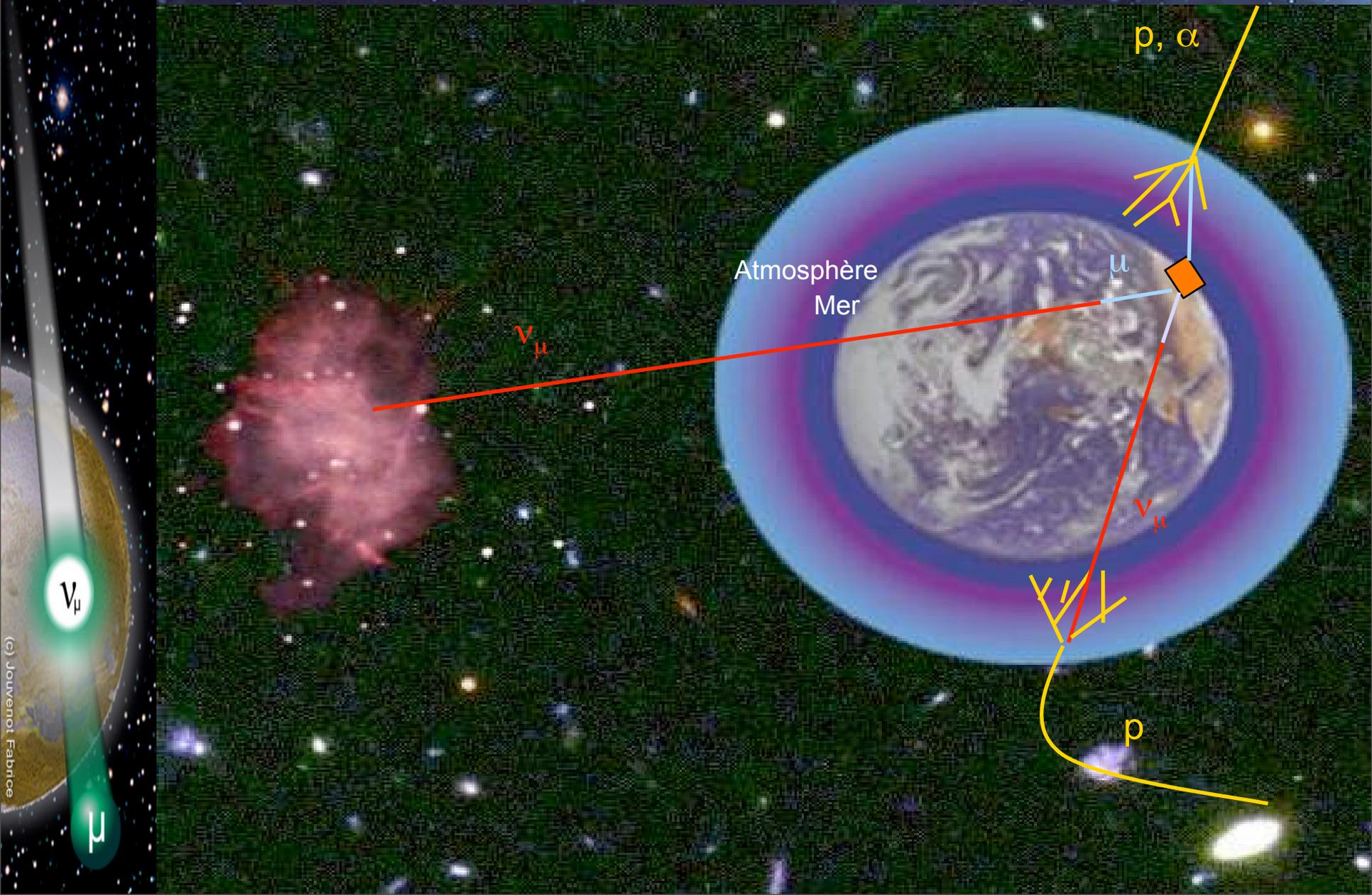
# Contraintes des bruits de fond



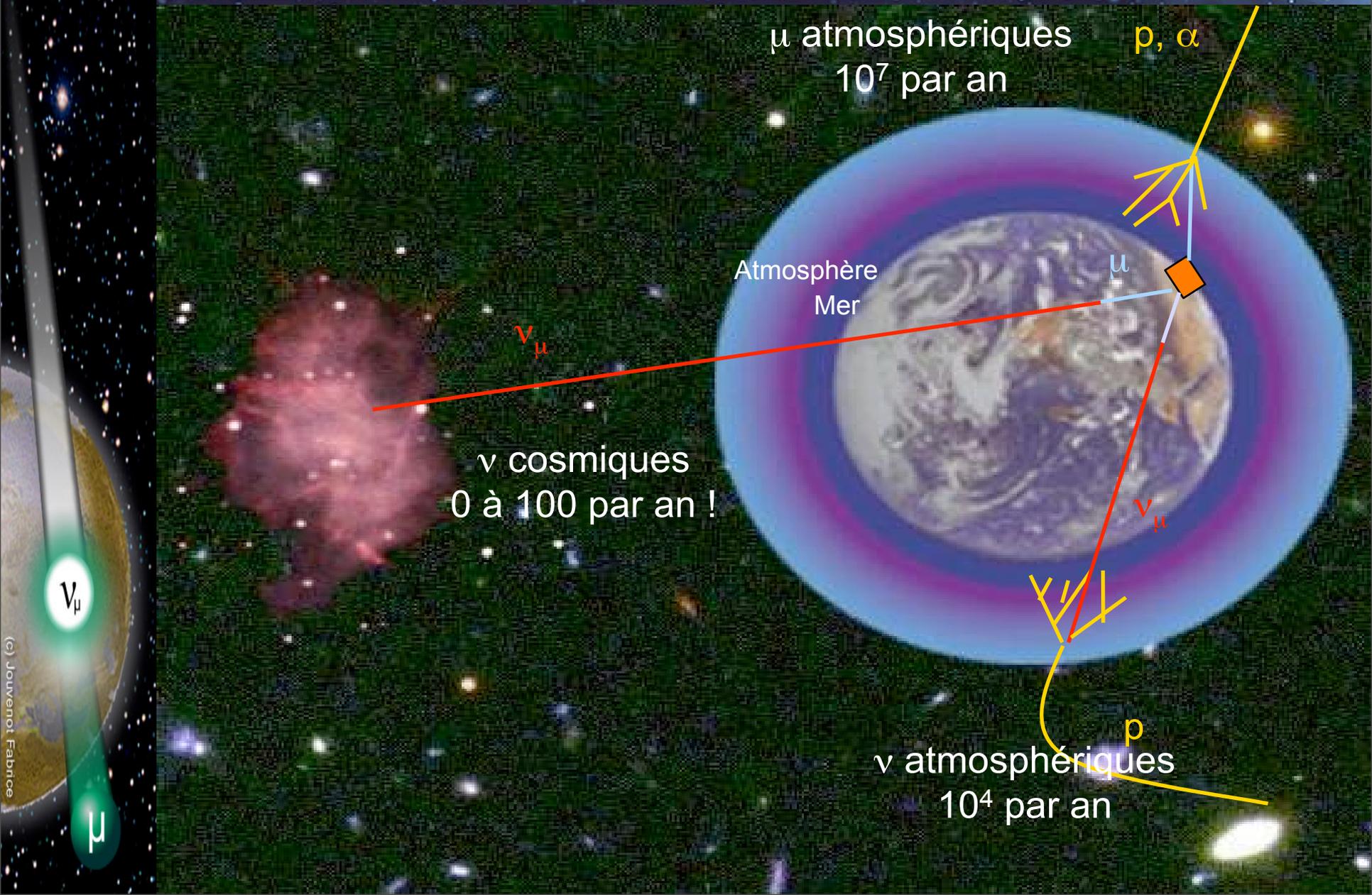
# Contraintes des bruits de fond



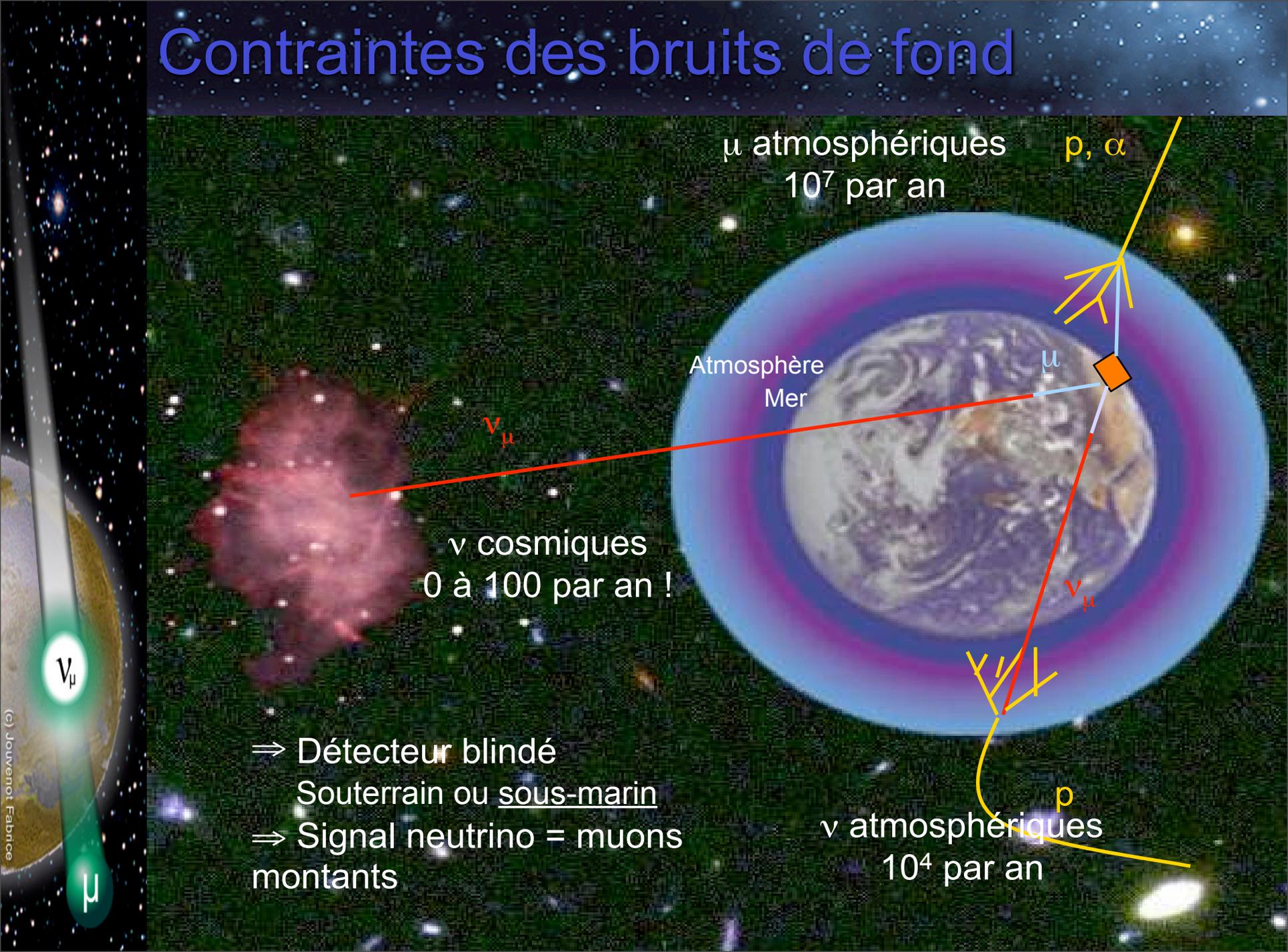
# Contraintes des bruits de fond



# Contraintes des bruits de fond

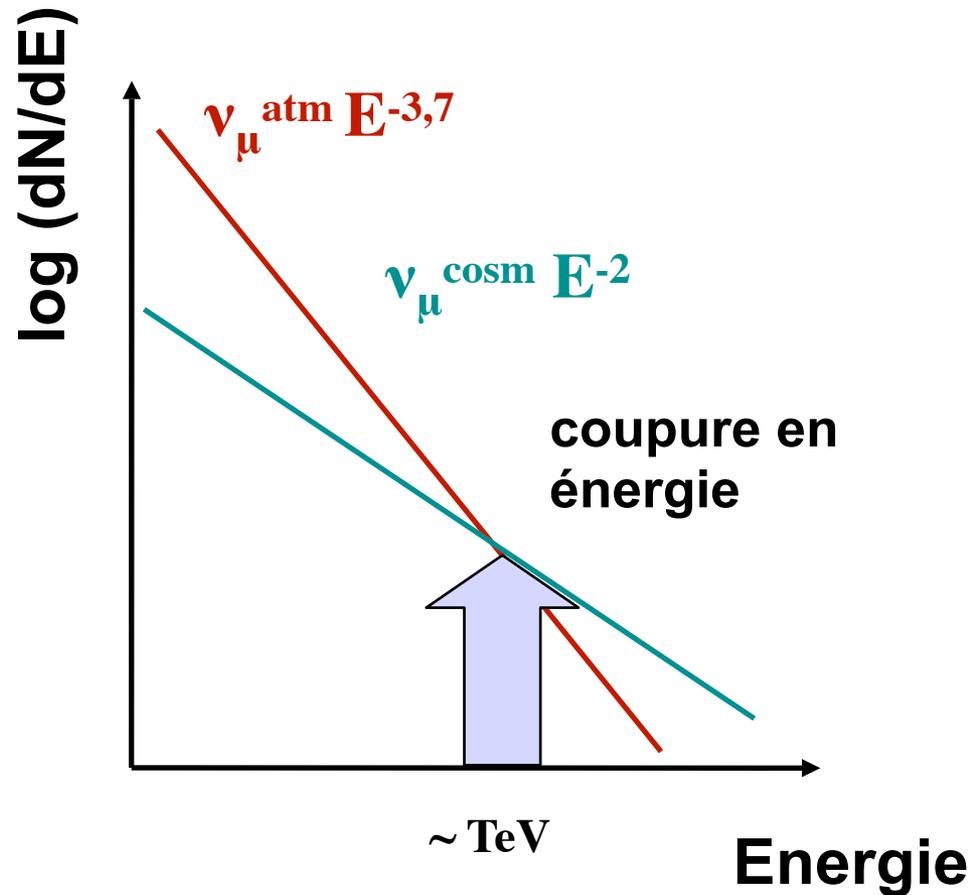


# Contraintes des bruits de fond



- ⇒ Détecteur blindé
- Souterrain ou sous-marin
- ⇒ Signal neutrino = muons montants

# Détection à haute énergie



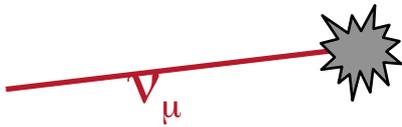
ANTARES va d'abord détecter les  $\nu$  atmosphériques.  
Excès à haute énergie  $\Rightarrow$  Neutrinos cosmiques

# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon



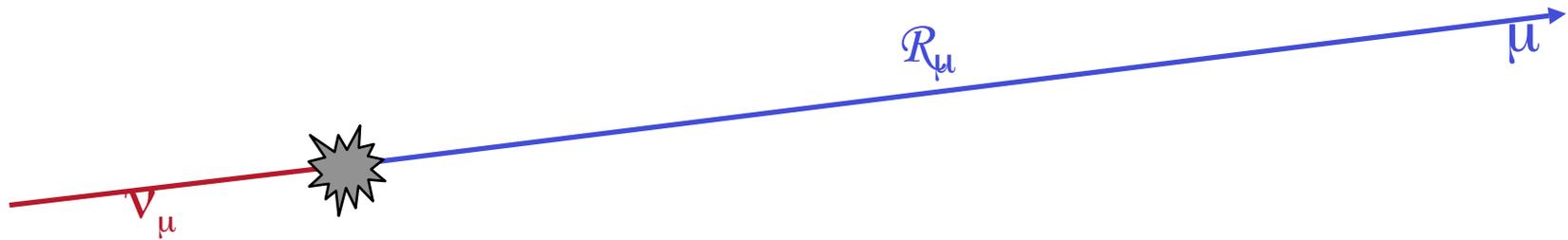
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



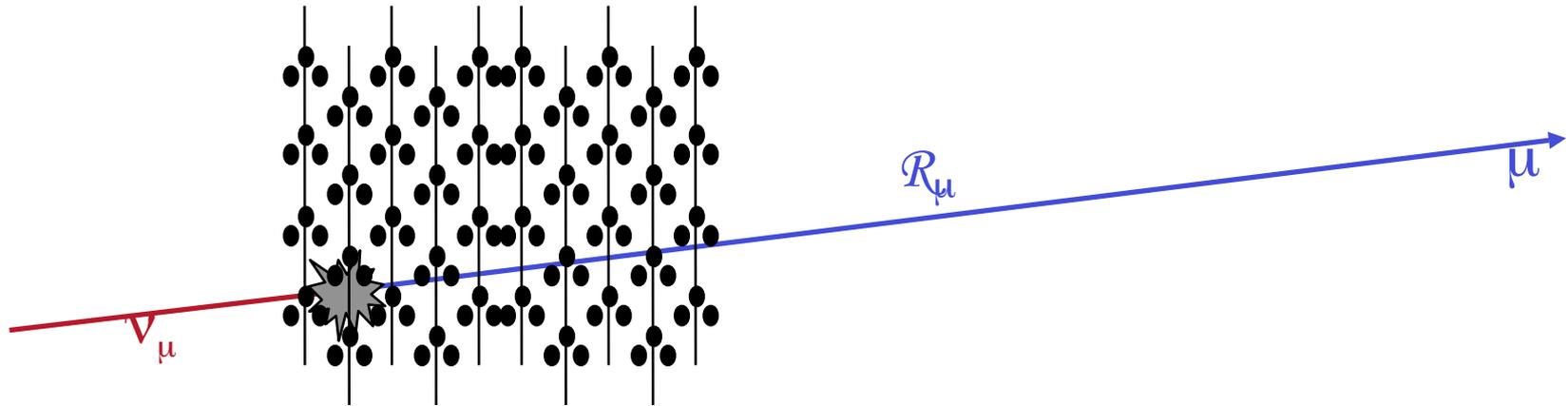
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



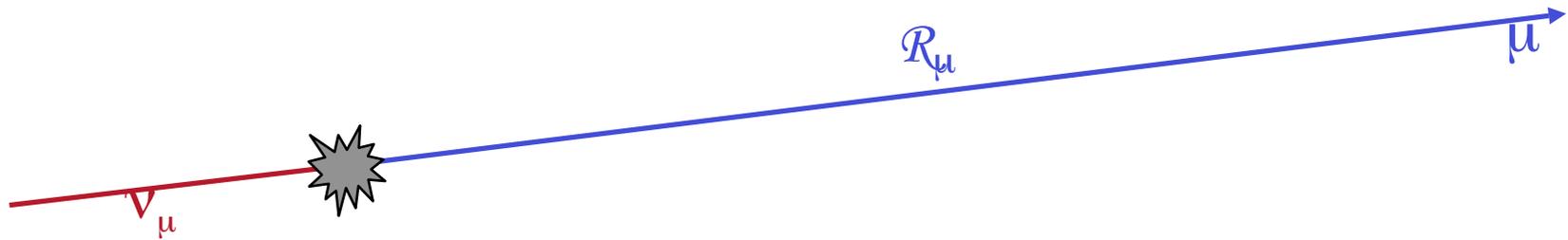
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les m issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



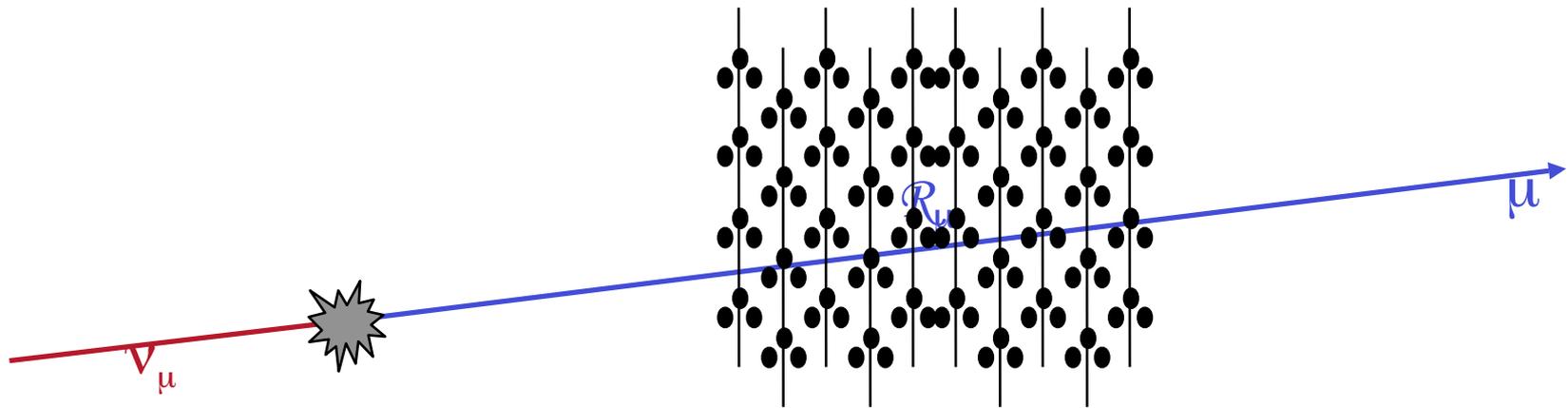
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



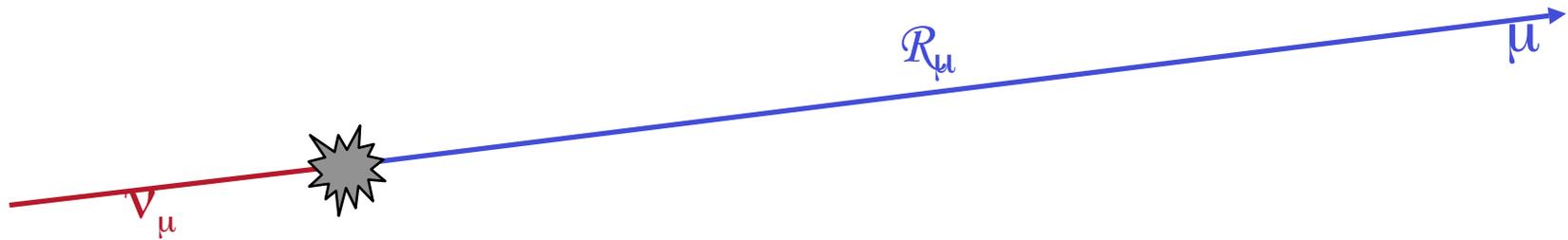
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



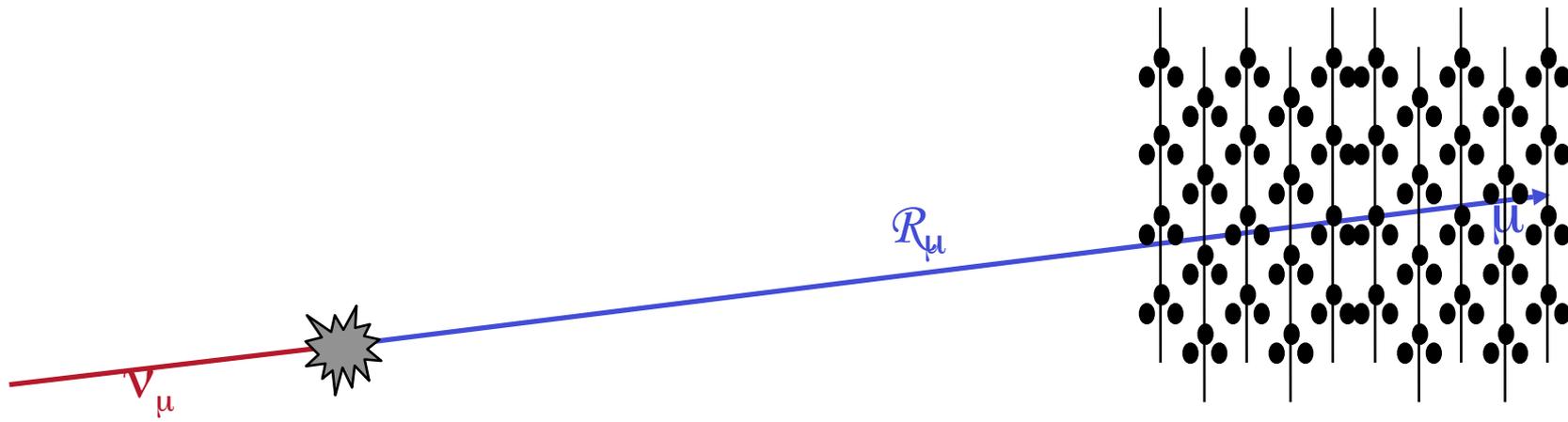
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



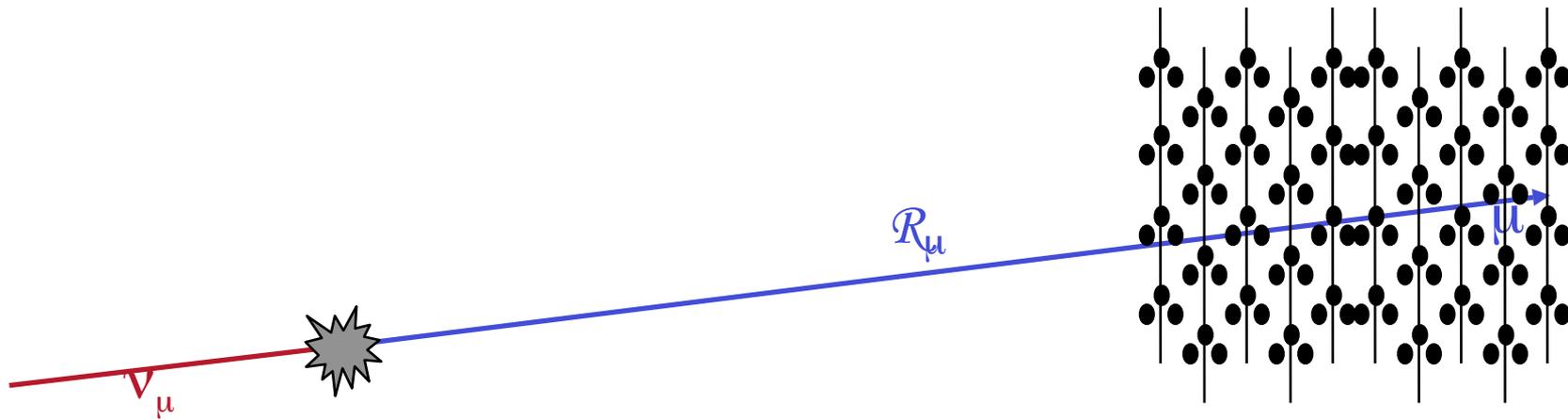
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



- Volume effectif de détection **augmente** avec  $E_\nu$



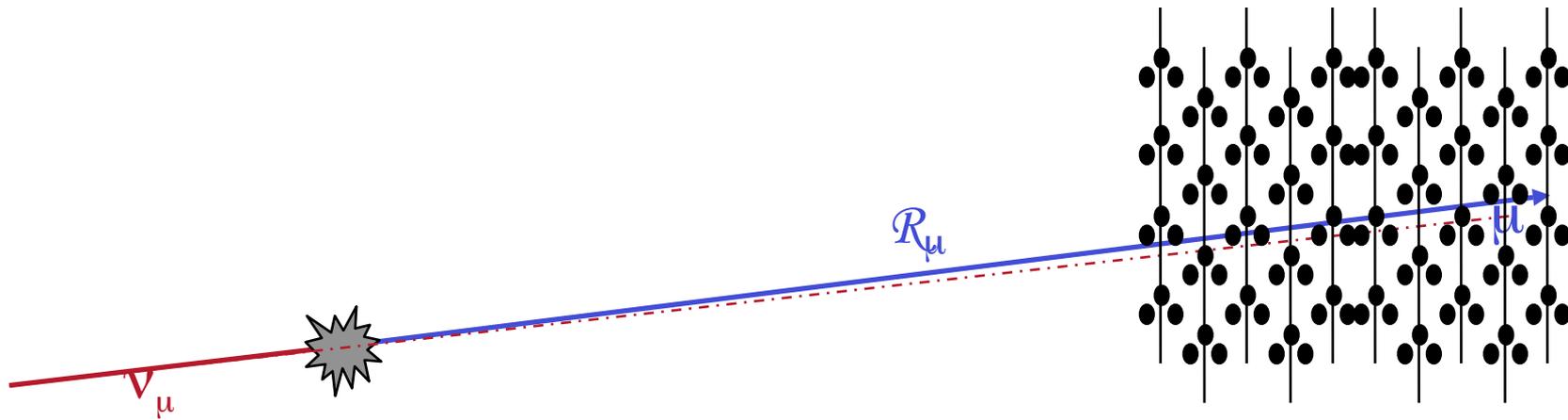
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



- Volume effectif de détection **augmente** avec  $E_\nu$

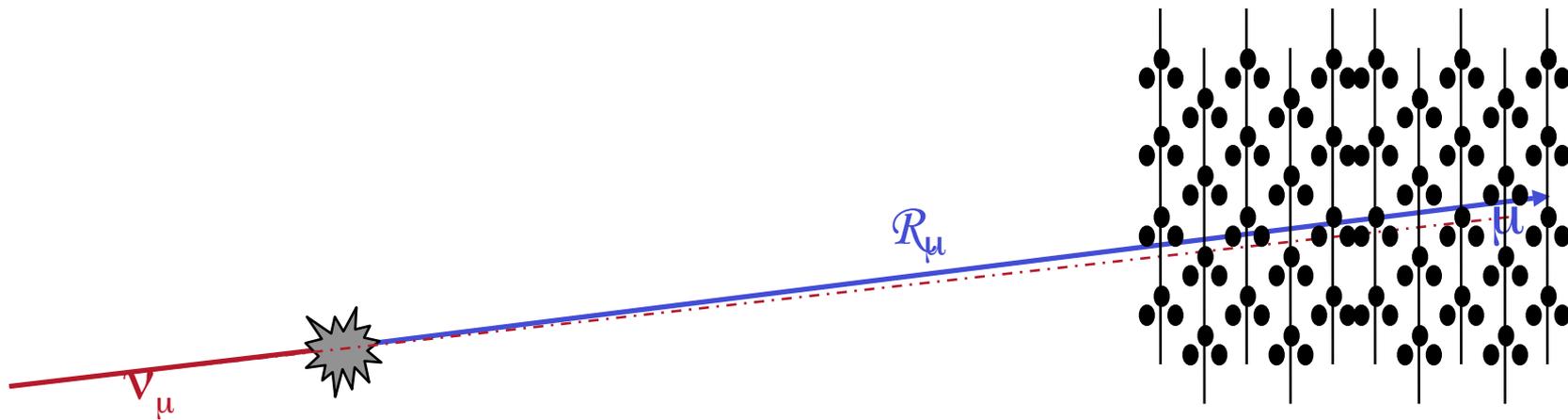
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



- Volume effectif de détection **augmente** avec  $E_\nu$
- La déviation entre le  $\nu$  et le  $\mu$  **diminue** avec  $E_\nu$



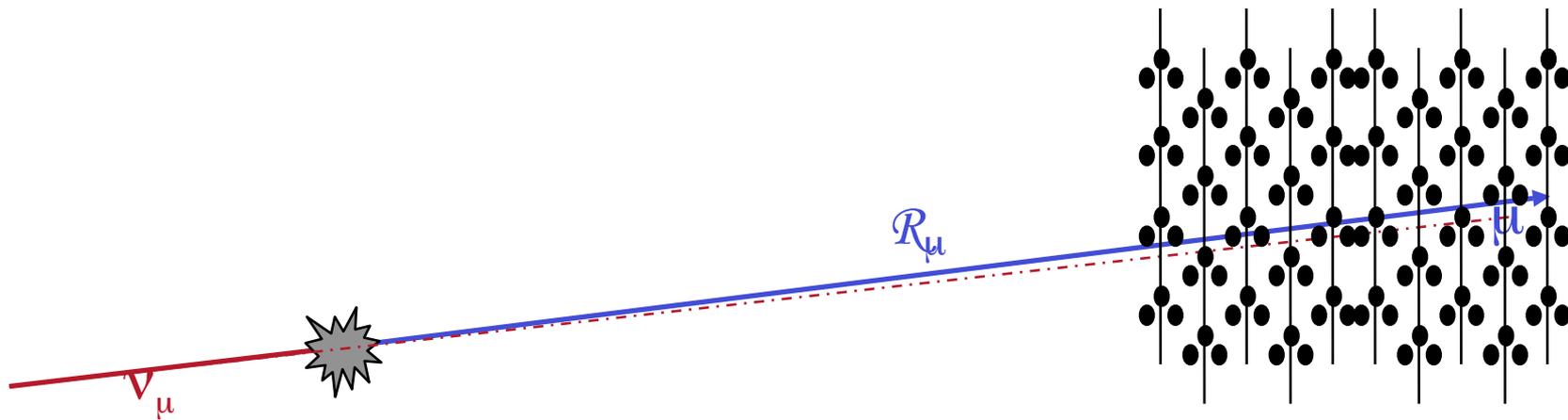
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$



- Volume effectif de détection **augmente** avec  $E_\nu$
- La déviation entre le  $\nu$  et le  $\mu$  **diminue** avec  $E_\nu$
- Section efficace d'interaction **augmente** avec  $E_\nu$

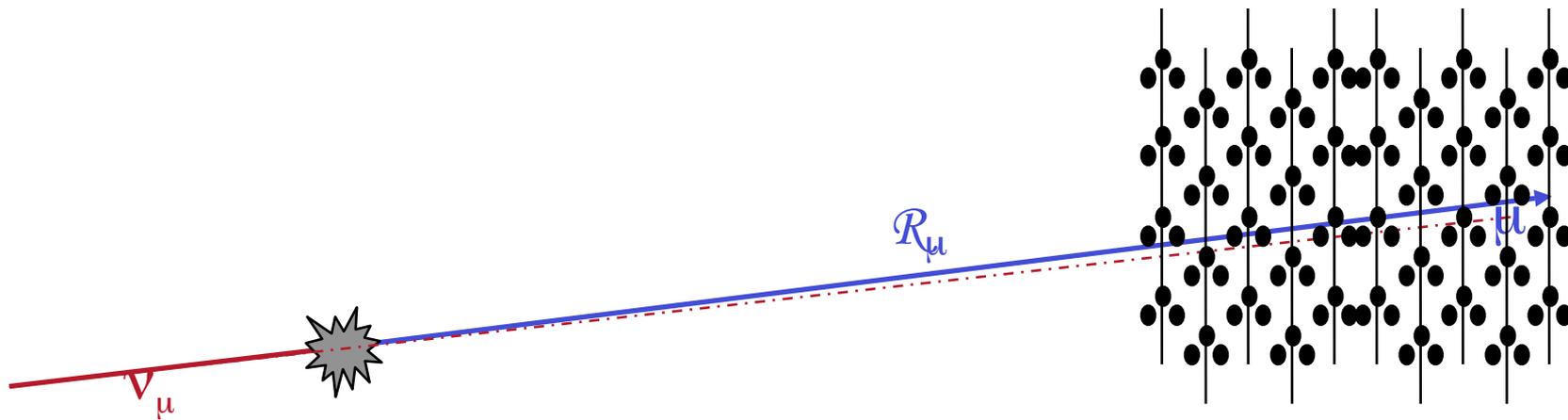
# Les $\nu_\mu$ mieux adaptés pour la détection

Idée de Markov (1960) :

Détecter les  $m$  issus de  $\nu_\mu + N \longrightarrow \mu + X$

Tirer avantage du parcours  $R_\mu$  du muon

Dans l'eau  
 $R_m(1 \text{ TeV}) = 3 \text{ km}$   
 $R_m(1 \text{ PeV}) = 14 \text{ km}$

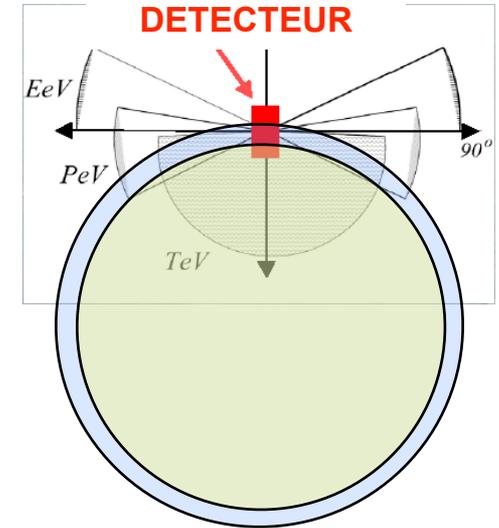
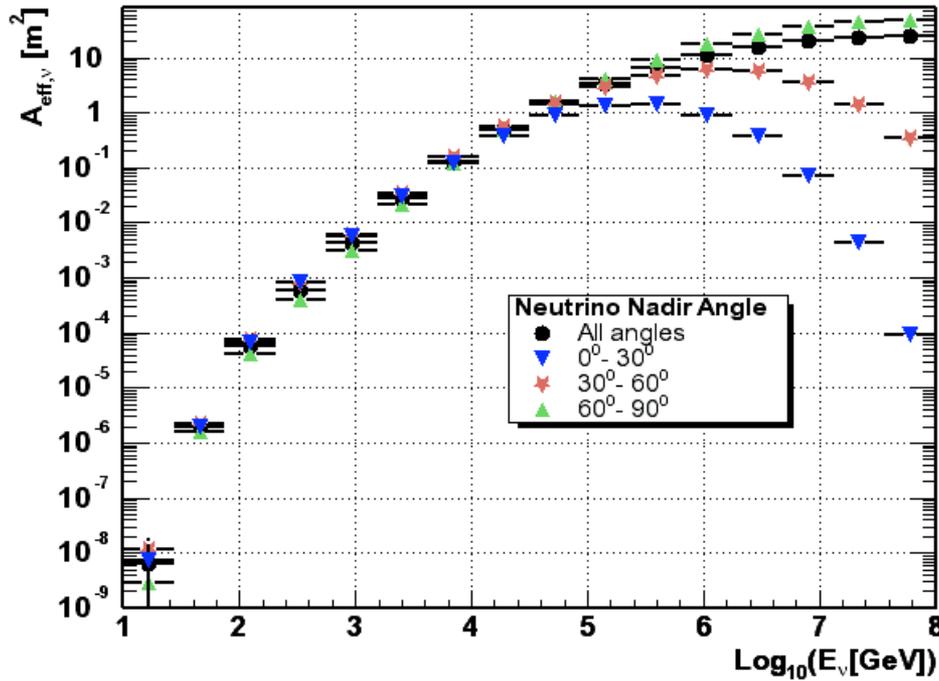


- Volume effectif de détection **augmente** avec  $E_\nu$
- La déviation entre le  $\nu$  et le  $\mu$  **diminue** avec  $E_\nu$
- Section efficace d'interaction **augmente** avec  $E_\nu$

La détection des neutrinos muoniques de HF est favorisée

# Surface effective – taux de détection

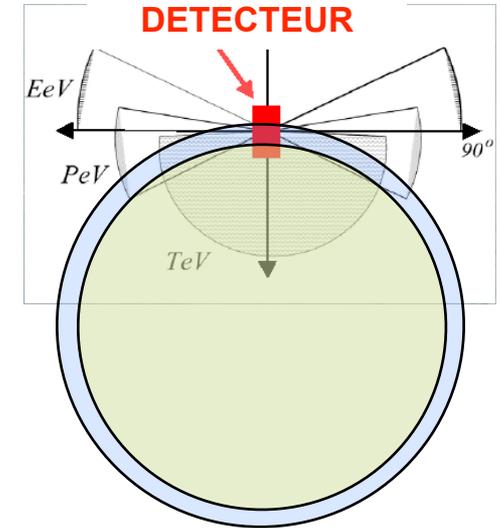
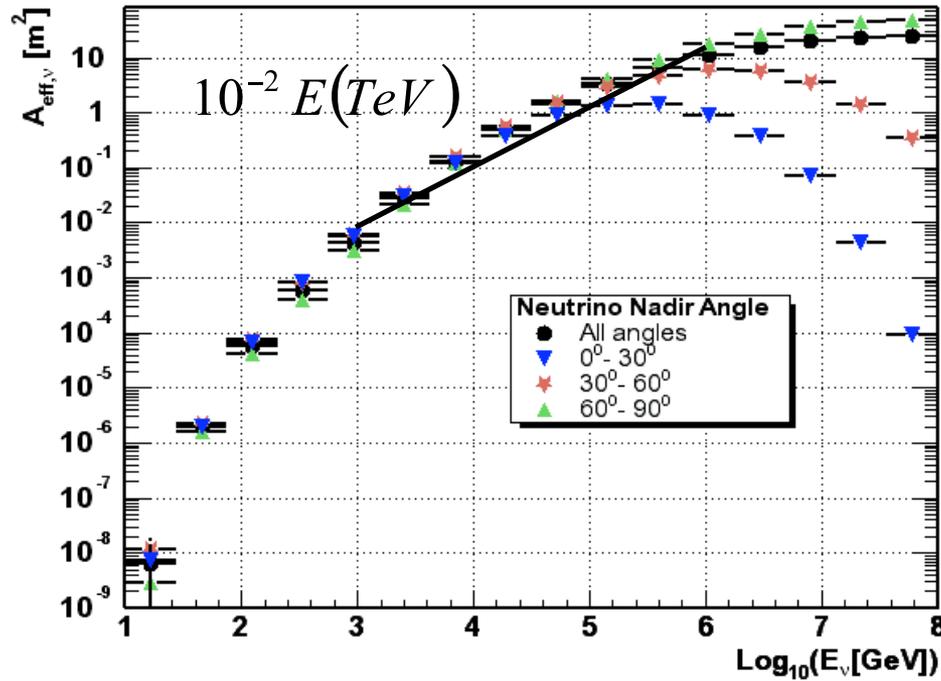
## Neutrino Effective Area



La Terre devient opaque au PeV

# Surface effective – taux de détection

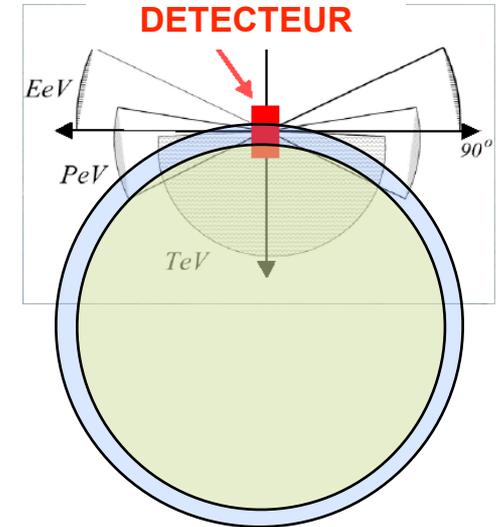
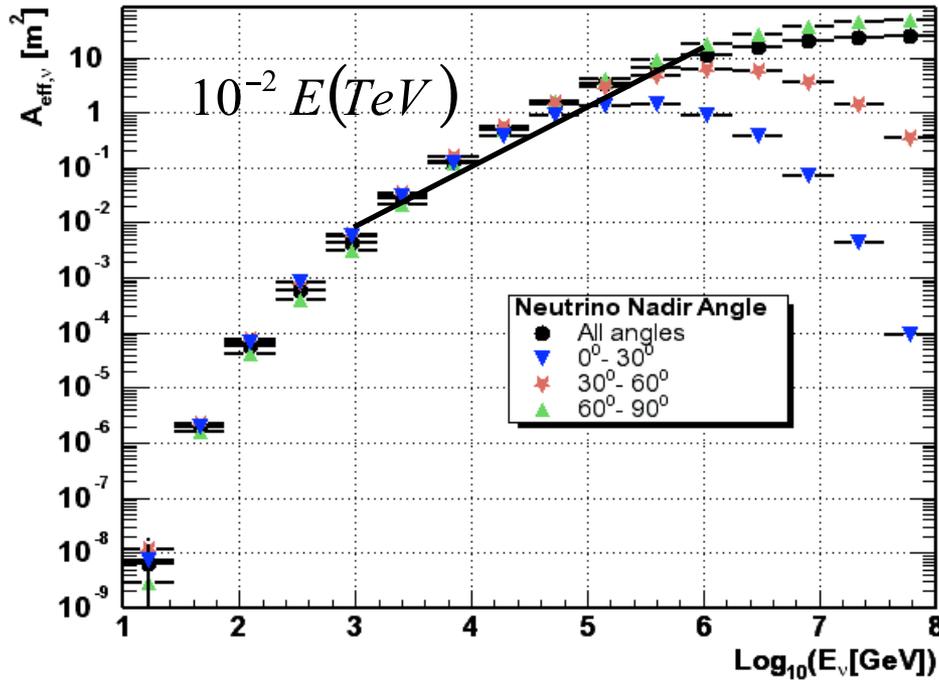
## Neutrino Effective Area



La Terre devient opaque au PeV

# Surface effective – taux de détection

Neutrino Effective Area



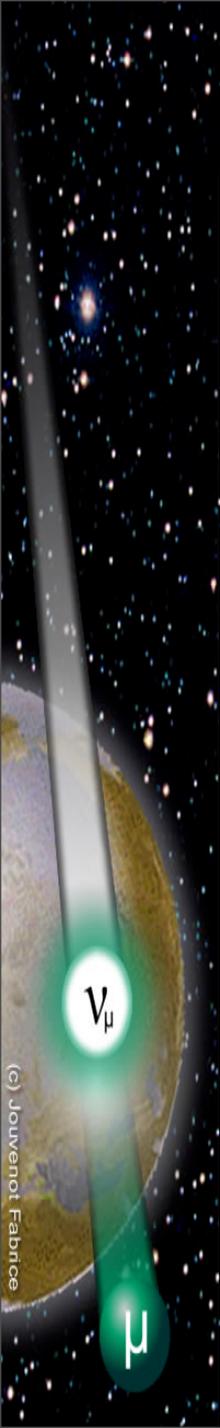
La Terre devient opaque au PeV

oscillations

$$N = 2\pi \times \Delta t \times \int_{1\text{TeV}}^{1\text{PeV}} \frac{dN}{dE} A_{\text{eff},\nu}(E) dE \times \frac{1}{2}$$

WB :  $\frac{dN}{dE} = \frac{4.5 \times 10^{-11}}{E^2} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$

$N \sim 3 / \text{an}$



(c) Jouvenot Fabrice



# Les télescopes à neutrinos

{ANTARES, NEMO, NESTOR} ∈ Consortium KM3NeT

**ANTARES**  
La-Seyne-sur-Mer, France



**NEMO**  
Catane, Italie

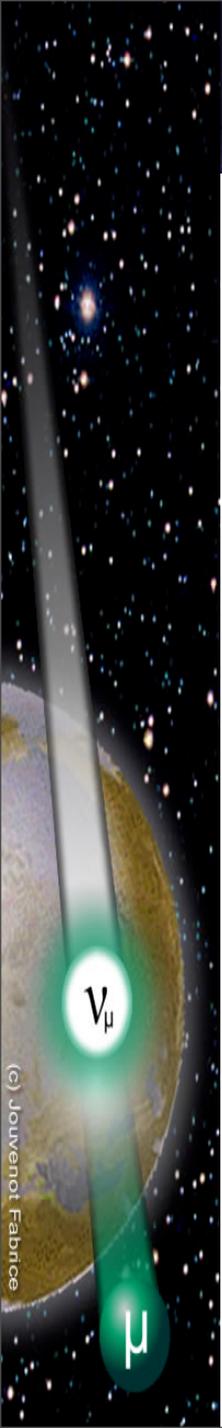
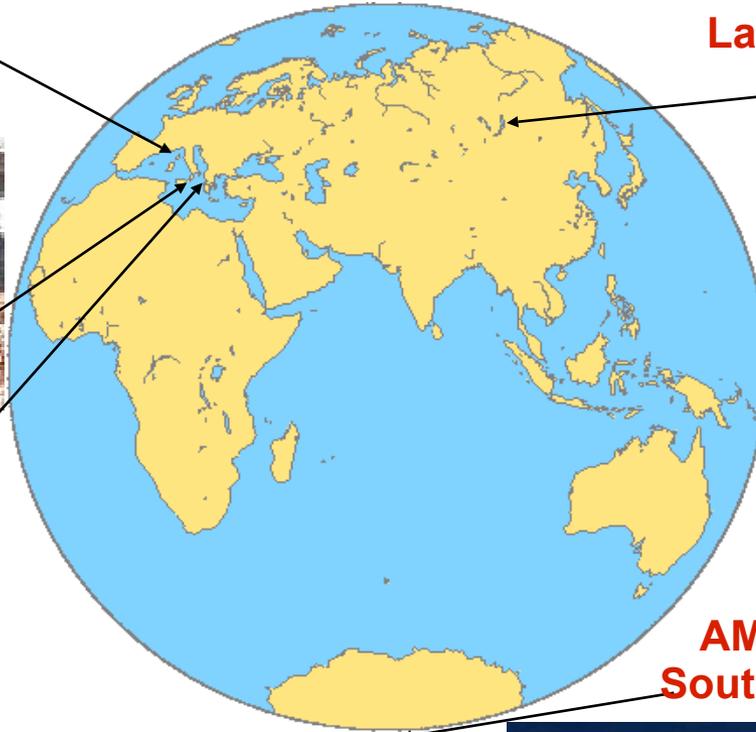
**Nestor**  
Pylos, Grèce



**BAIKAL**  
Lac Baikal, Sibérie



**AMANDA, / IceCube**  
South Pole, Antarctique



# Les atouts de la mer Méditerranée

- Couverture céleste complémentaire (/PS)

- ☞ Centre galactique

- Grandes profondeurs jusqu'à 5000m

- Infrastructures proches de la côte

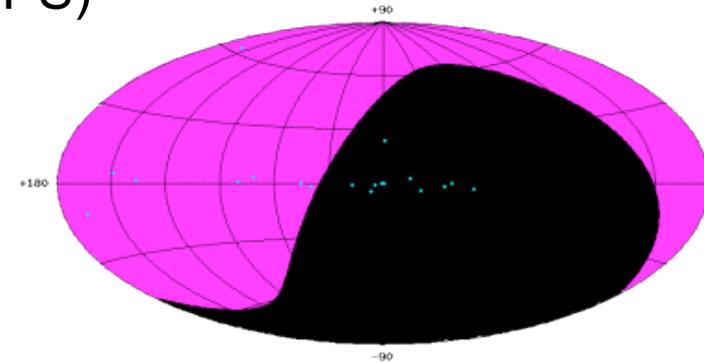
- ☞ Logistique accessible

- Récupération et redéploiement possibles

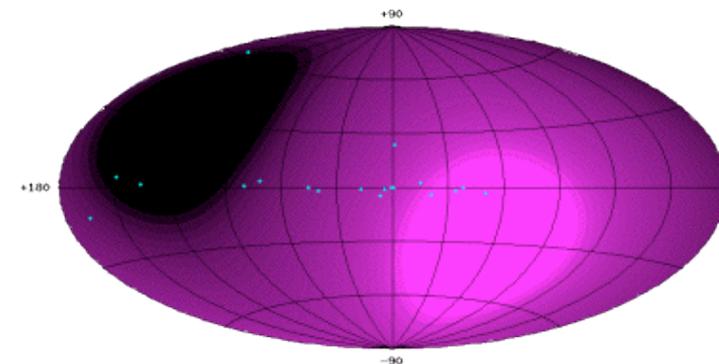
- Peu de diffusion de la lumière

- ☞ Bonne précision angulaire

Ciel visible au Pôle Sud



Ciel visible en Méditerranée



# Choix du site d'immersion

- Profondeur → Réduction bruit de fond atmosphérique ( $\mu$ )
- Longueur absorption  
Longueur diffusion → Volume de détection  
Résolution angulaire

$[\lambda \sim 460 \text{ nm}]$ (bleu)	Longueur d'absorption (m)	Longueur de diffusion effective (m)	Résolution Angulaire( $^\circ$ ) ( $< 0.1 \text{ km}^2$ , $E > 10 \text{ TeV}$ )
Pôle Sud	$\leq 100$	$\leq 25$	<b><math>3^\circ</math></b>
Lac Baikal	$\geq 15$	$> 300$	<b><math>1.5^\circ</math></b>
Méditerranée	55	$> 300$	<b><math>0.2^\circ</math></b>

- Activité optique  
mer]

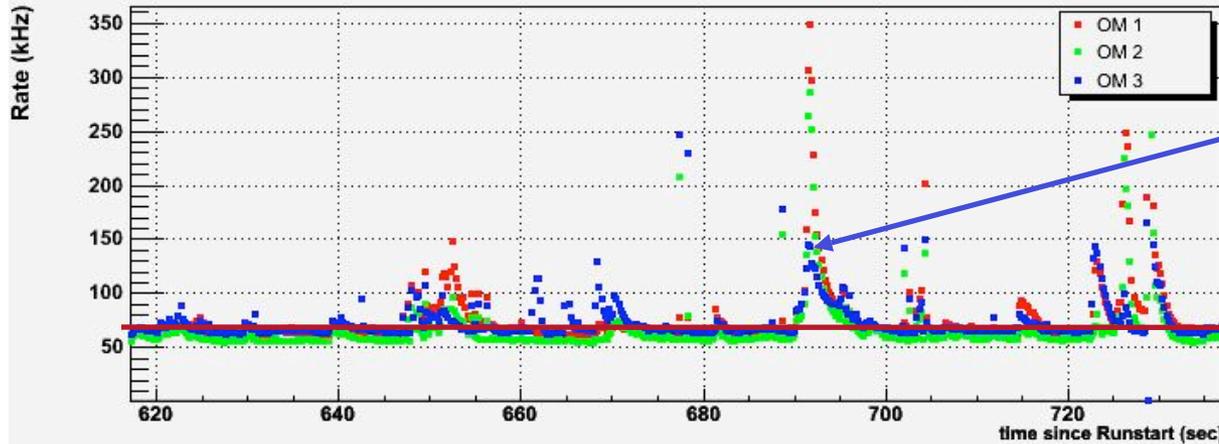
- organismes marins
- désintégration radioactive  $^{40}\text{K}$

[ seulement dans l'eau de

} filtre de causalité nécessaire  
99 % signaux = bruit de fond

# Bruit de fond optique

Run 27812 Line 1-5 Physics Trigger (thr=tuned, allsamp=1, HRV=500kHz) Line 4 Floor 13 Mon May 21 17:39:37 2007



*Sursauts*

*Ligne de base*

*Ligne de base*

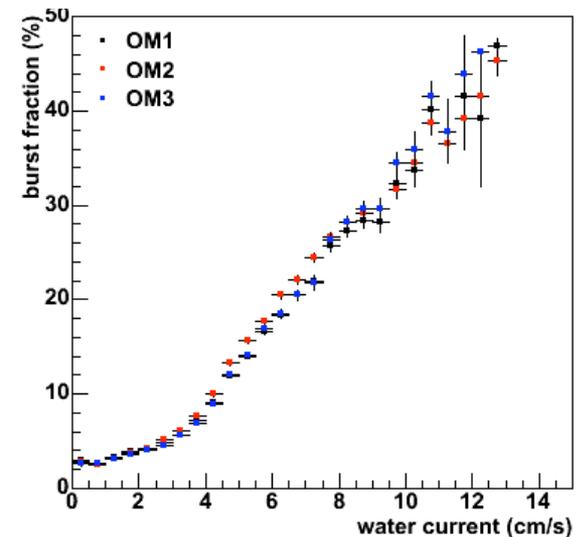
$^{40}\text{K}$

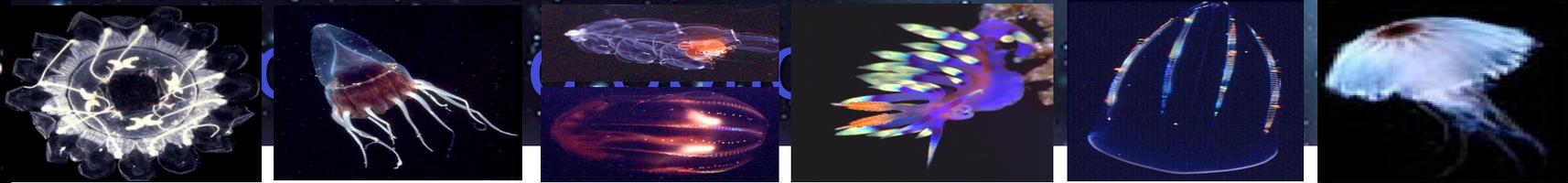
*Bio-luminescence*

*Sursauts de bio-luminescence:*

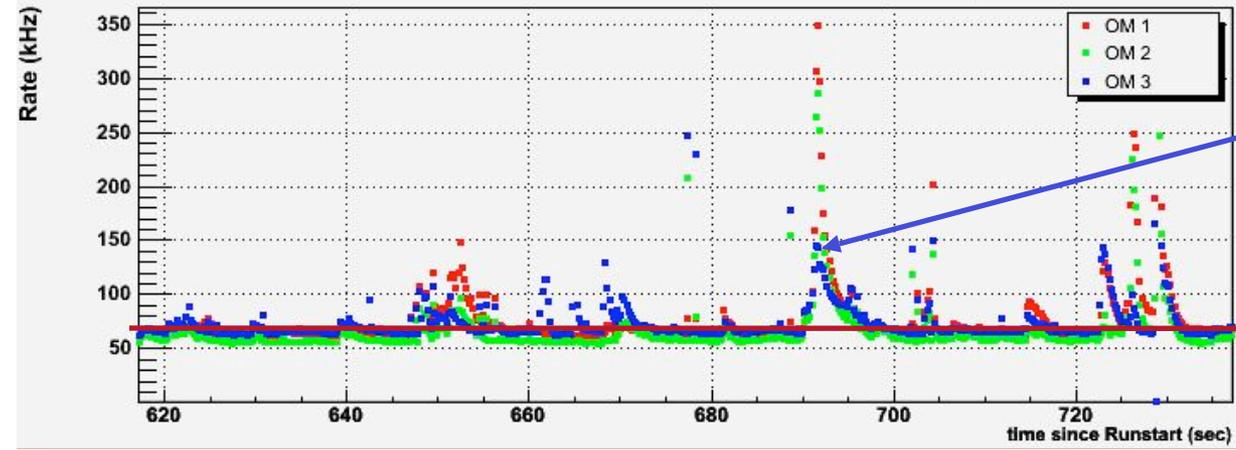


*Espèces animales photo-émettrices*





Run 27812 Line 1-5 Physics Trigger (thr=tuned, allsamp=1, HRV=500kHz) Line 4 Floor 13 Mon May 21 17:39:37 2007



*Sursauts*  
*Ligne de base*

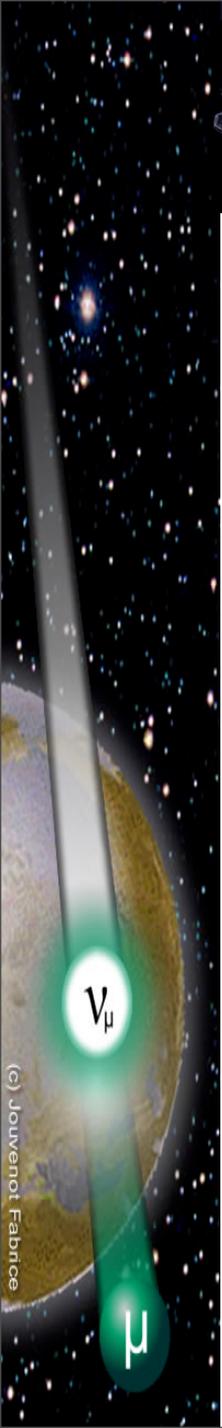
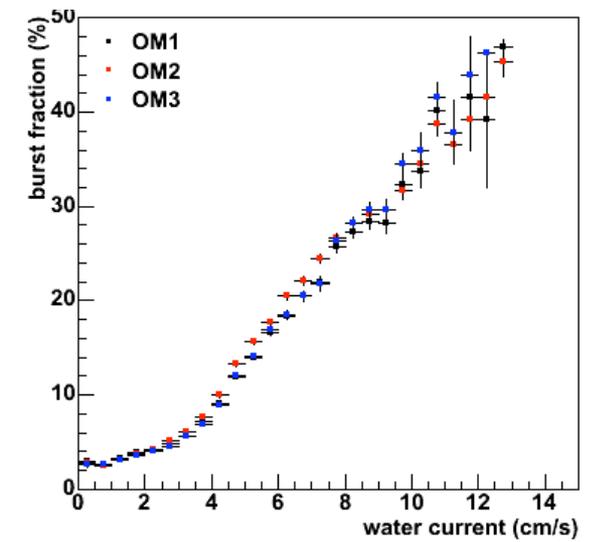
*Ligne de base*

$^{40}\text{K}$   
*Bio-luminescence*

*Sursauts de bio-luminescence:*



*Espèces animales photo-émettrices*



# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

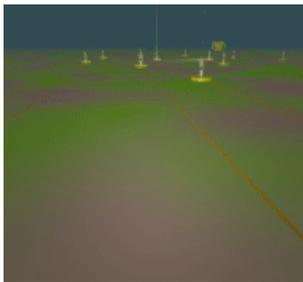
Sources de neutrinos



## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels



## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

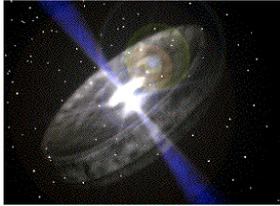
Etapes de la construction

Analyses en cours



## Le projet KM3NeT

# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

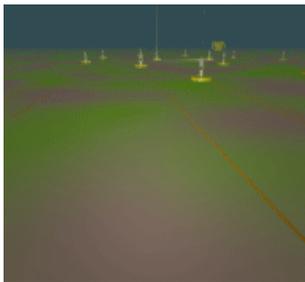
Sources de neutrinos



## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels



## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

Etapes de la construction

Analyses en cours



## Le projet KM3NeT

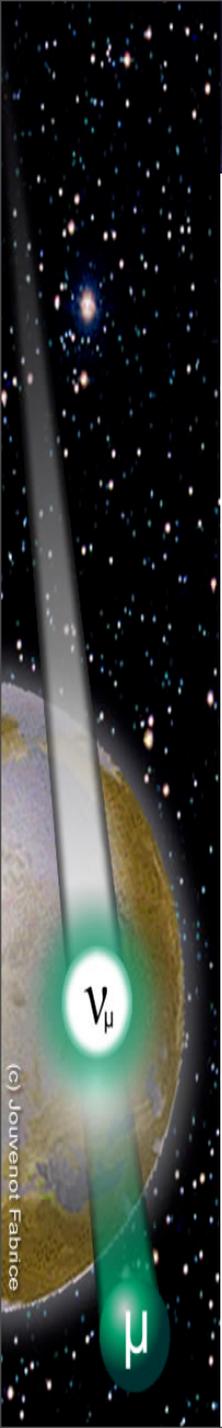
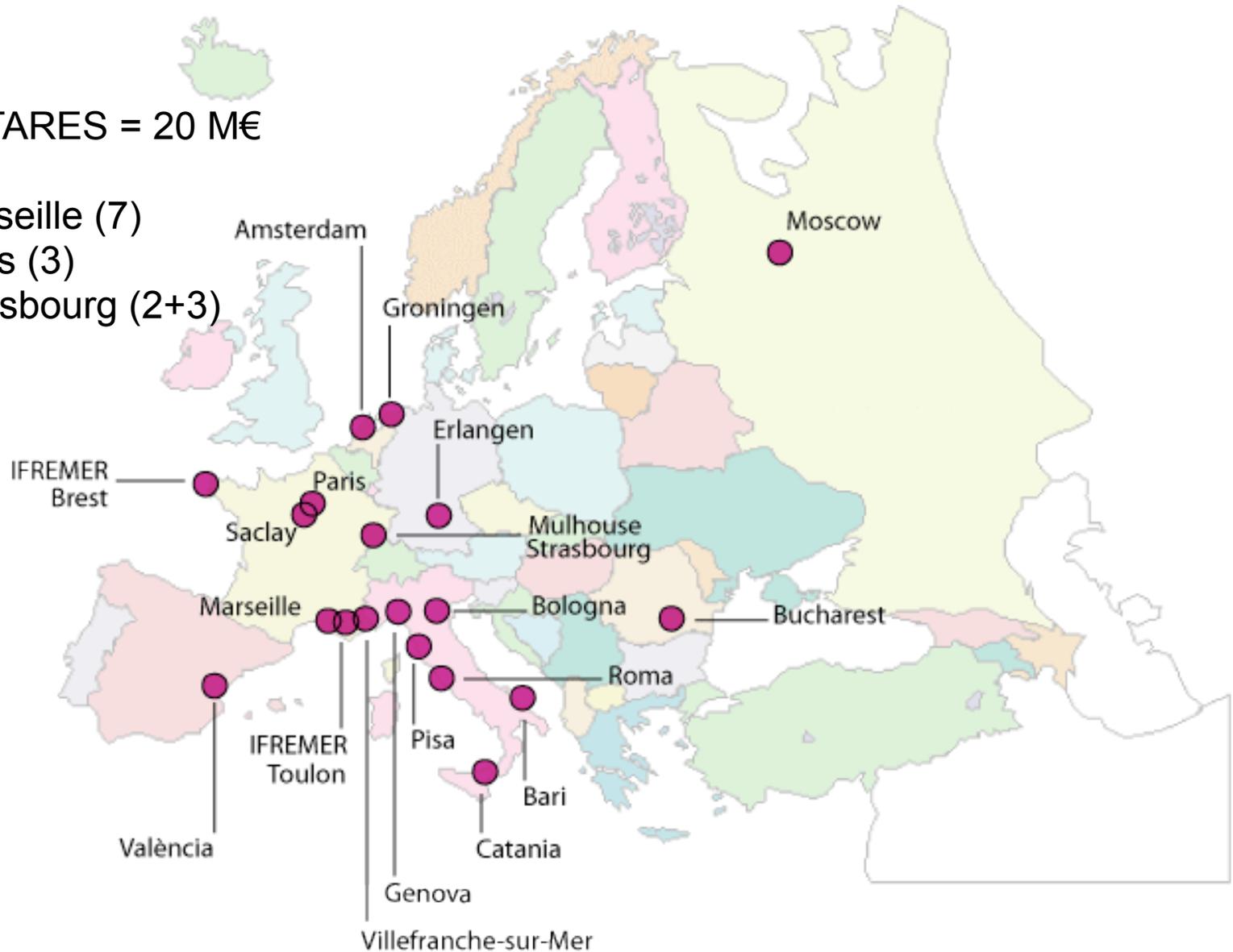
# La collaboration Antares

ANTARES = 20 M€

Marseille (7)

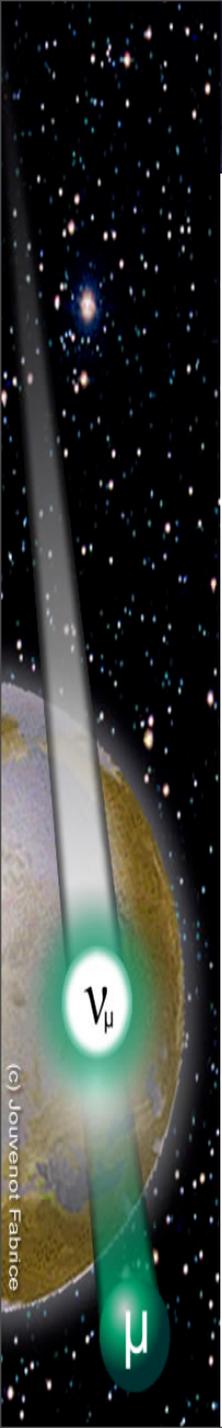
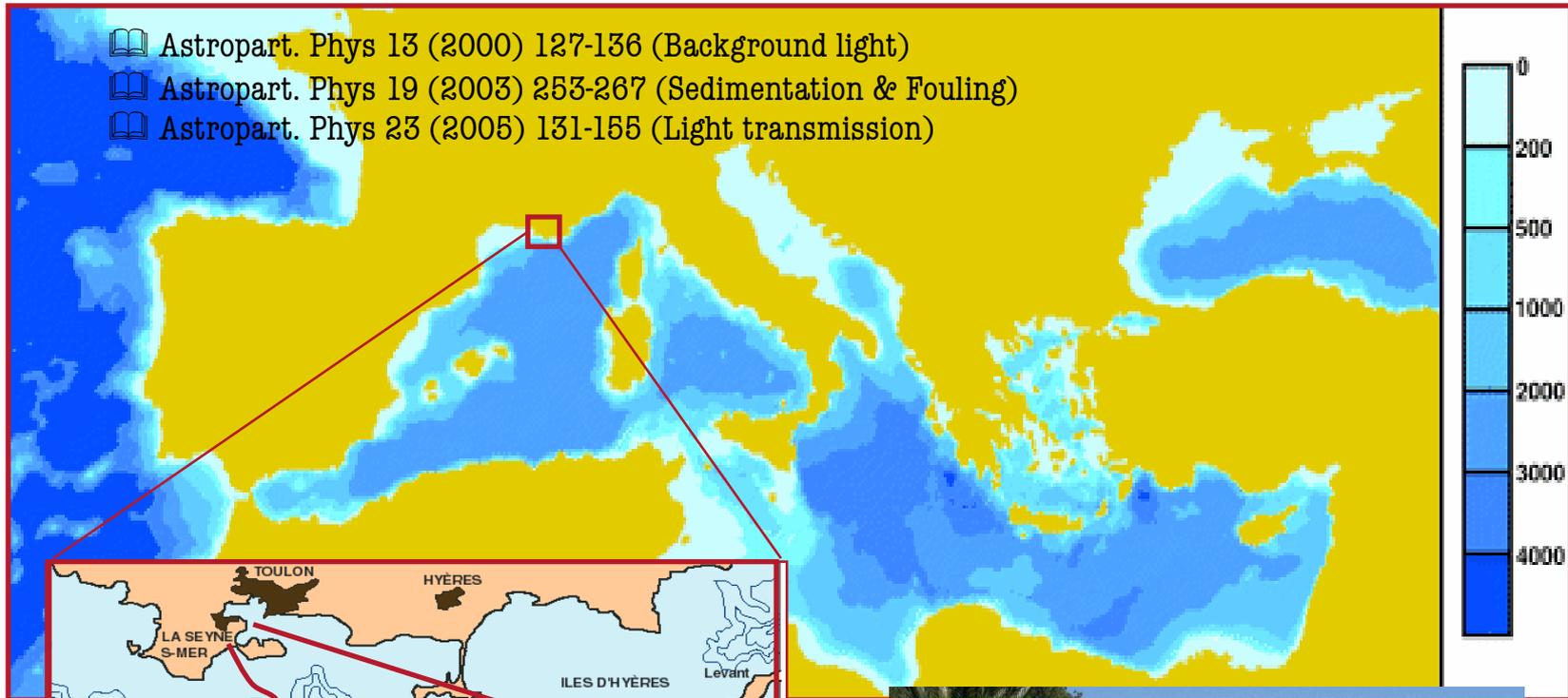
Paris (3)

Strasbourg (2+3)



# Le site ANTARES

- 📖 Astropart. Phys 13 (2000) 127-136 (Background light)
- 📖 Astropart. Phys 19 (2003) 253-267 (Sedimentation & Fouling)
- 📖 Astropart. Phys 23 (2005) 131-155 (Light transmission)



# Le télescope Antares

- 25 étages / ligne
- 3 PMs / étage
- 900 PMs

Temps  $\alpha$ (ns), position  $\alpha$ (10 cm), amplitude  $\alpha$ (30%)  
des signaux de PM  $\Rightarrow$  trajectoire du muon

350 m

100 m

~60-75 m

14.5 m

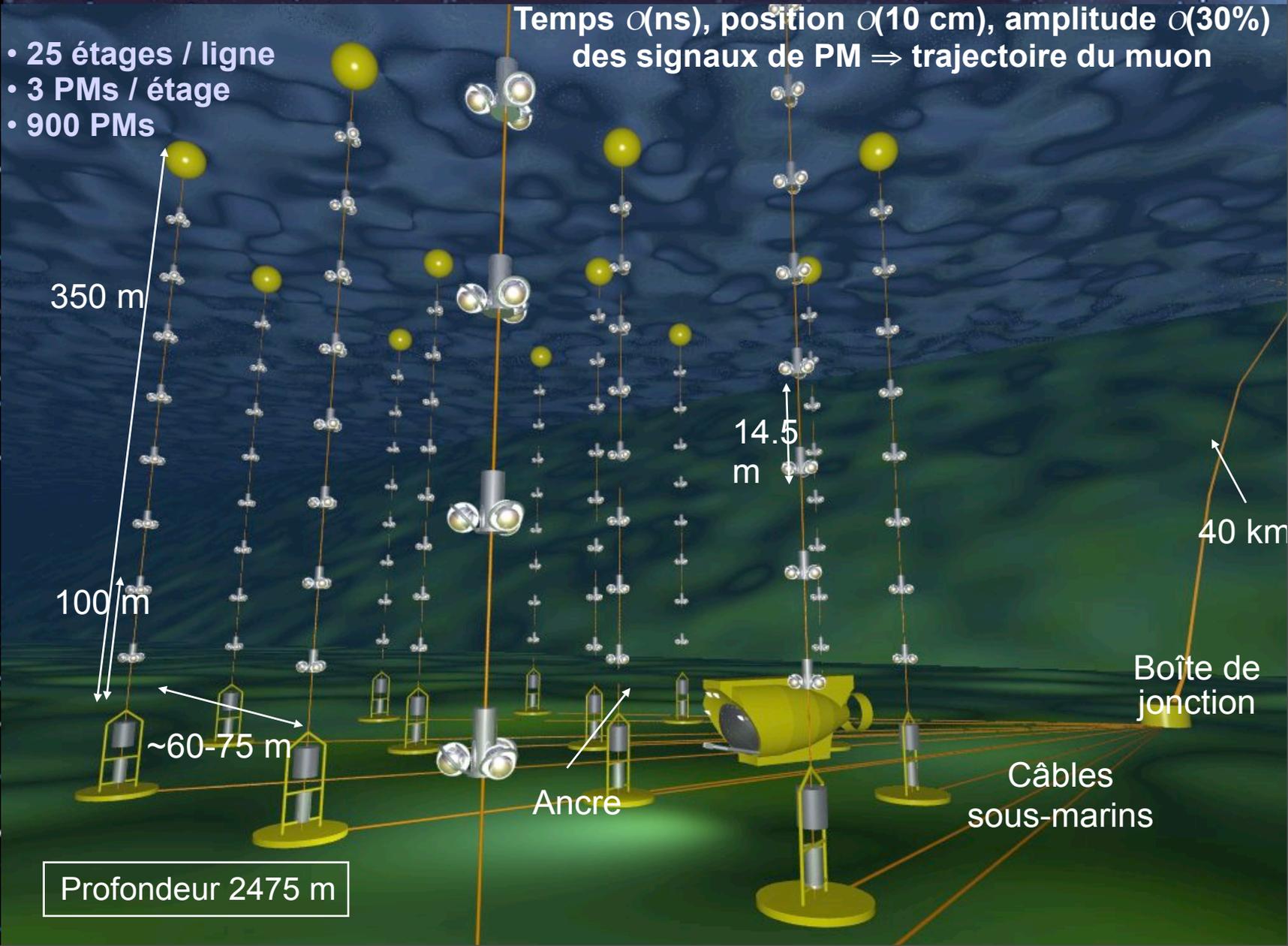
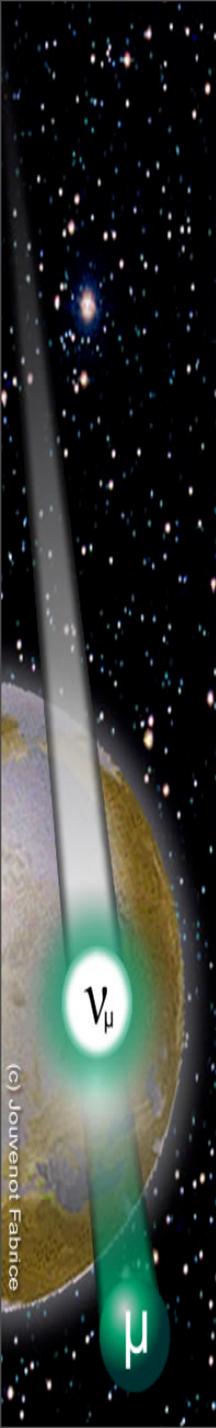
40 km

Boîte de jonction

Ancre

Câbles sous-marins

Profondeur 2475 m



# Le télescope Antares

- 25 étages / ligne
- 3 PMs / étage
- 900 PMs

Temps  $\alpha$ (ns), position  $\alpha$ (10 cm), amplitude  $\alpha$ (30%)  
des signaux de PM  $\Rightarrow$  trajectoire du muon

350 m

100 m

$\sim 60-75$  m

14.5 m

1 étage



40 km

Boîte de jonction

Câbles sous-marins

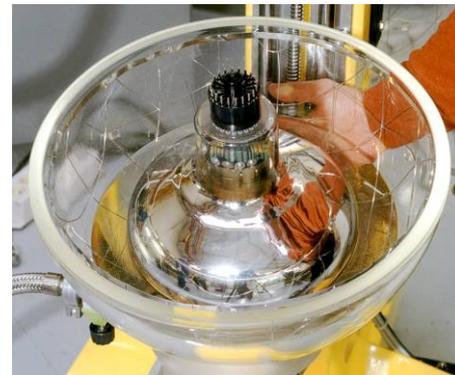
Ancre

Profondeur 2475 m

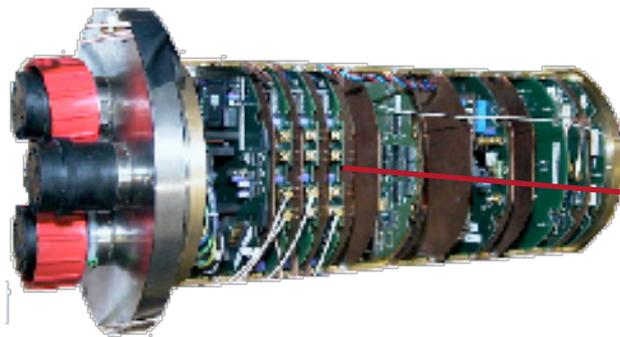
# Un étage de détection

Cadre en Titane : support mécanique

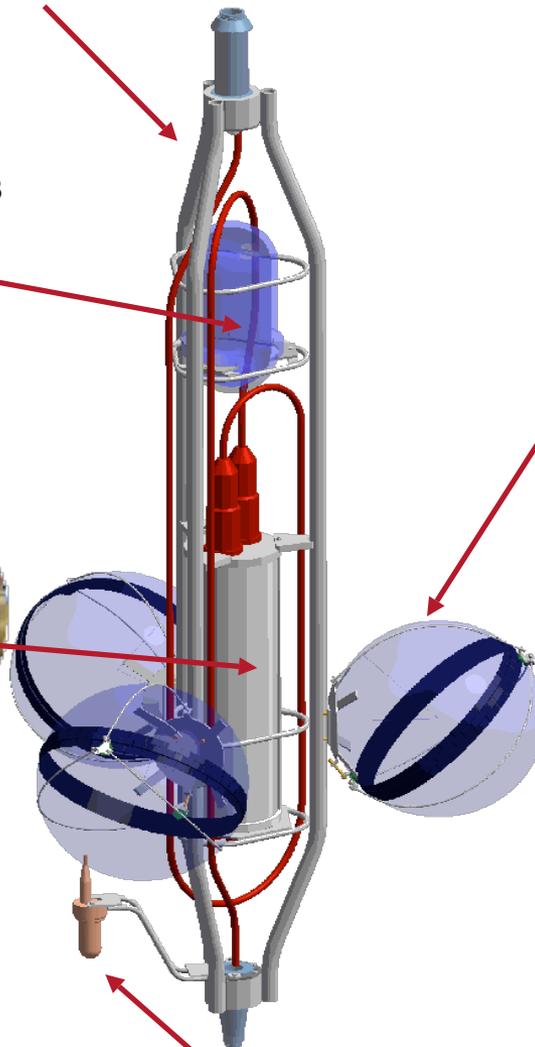
Balise Optique  
LEDs bleu:  
Étalonnage temps  
📖 NIM A578 (2007) 498



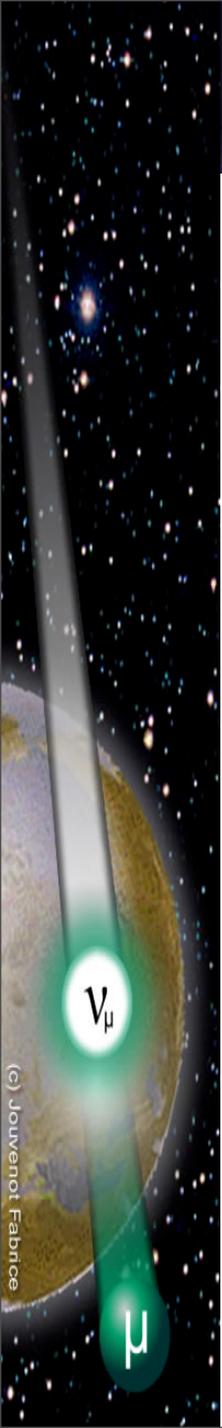
Module optique:  
10" Hamamatsu PM  
Photon-détection  
📖 NIM A484 (2002) 369  
📖 NIM A555 (2005) 132



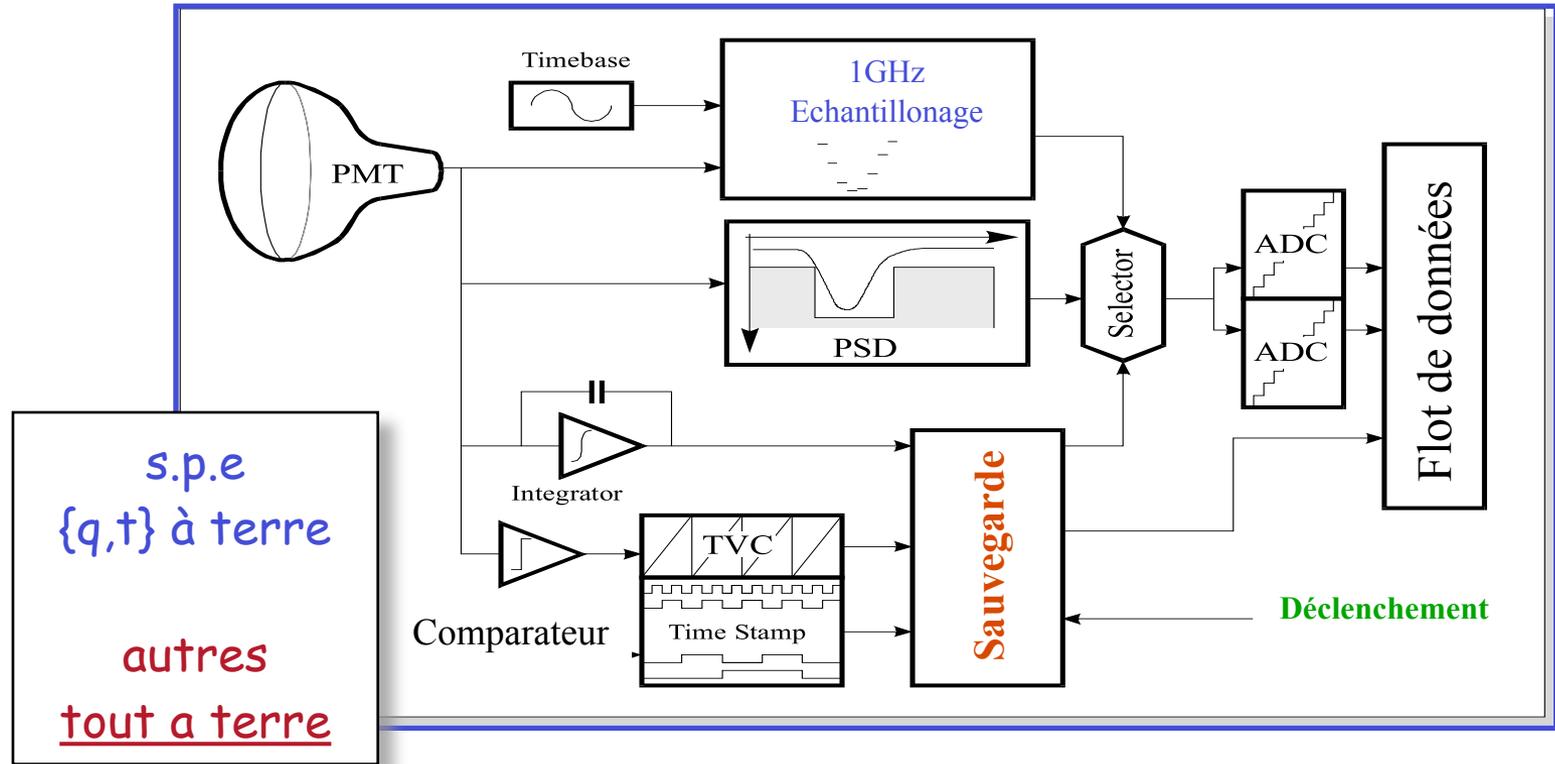
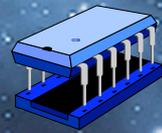
Local Control Module (Ti):  
Front-end ASIC, DAQ/SC,  
Horloge, tilt/compas



hydrophone:  
Positionnement  
acoustique



# Acquisition des signaux



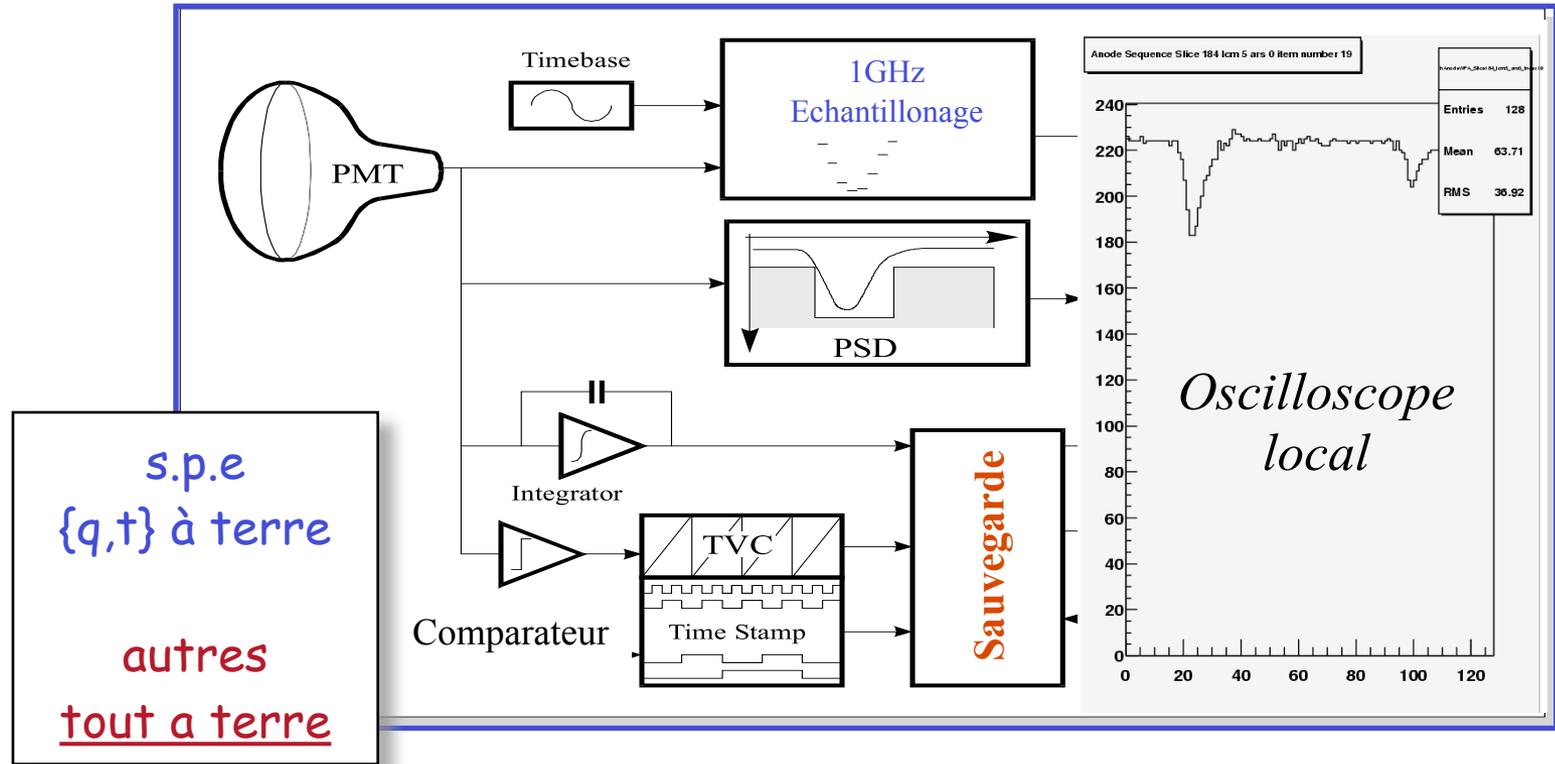
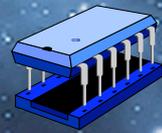
L0: PSD ~ 1/3 photo-électron

L1: Coïncidences locales (1 étage) si taux >200kHz possibles

L2: Coïncidences entre étages → pas nécessaire tant que <1Gb/s/ligne

L3: Filtrage en temps à terre (ferme de PC)

# Acquisition des signaux



L0: PSD ~ 1/3 photo-électron

L1: Coïncidences locales (1 étage) si taux >200kHz possibles

L2: Coïncidences entre étages → pas nécessaire tant que <1Gb/s/ligne

L3: Filtrage en temps à terre (ferme de PC)

# Performances attendues

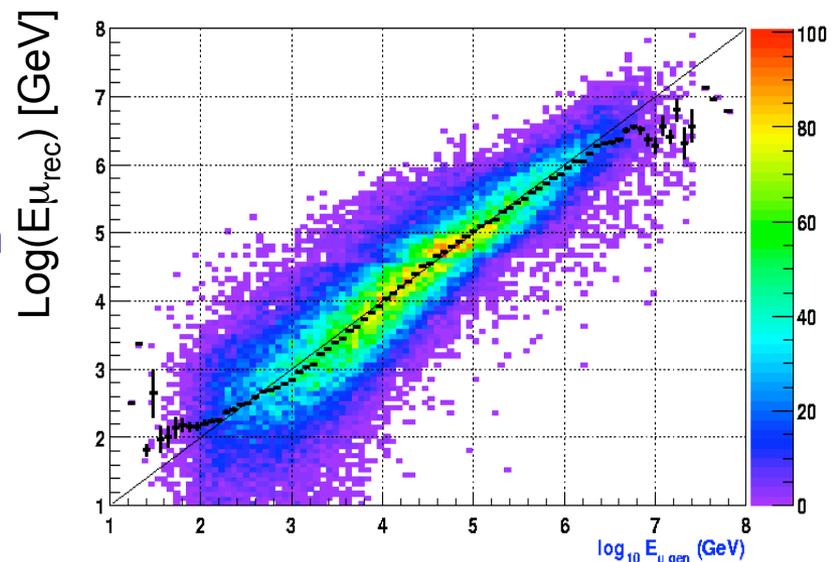
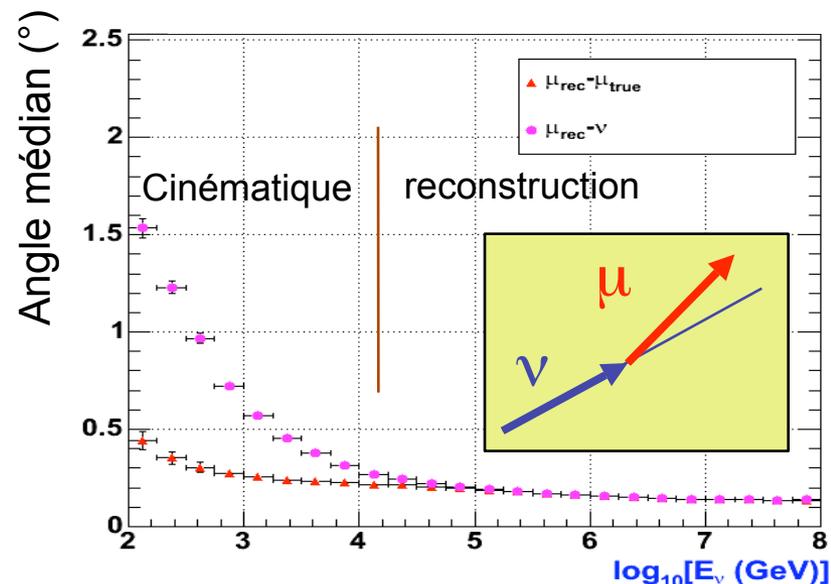
## ➤ Résolution angulaire

- $E_\mu > 10 \text{ TeV} \Rightarrow \sim 0.2^\circ$
- $E_\mu < 10 \text{ TeV} \Rightarrow$  Dominée par l'interaction

## ➤ Résolution en énergie

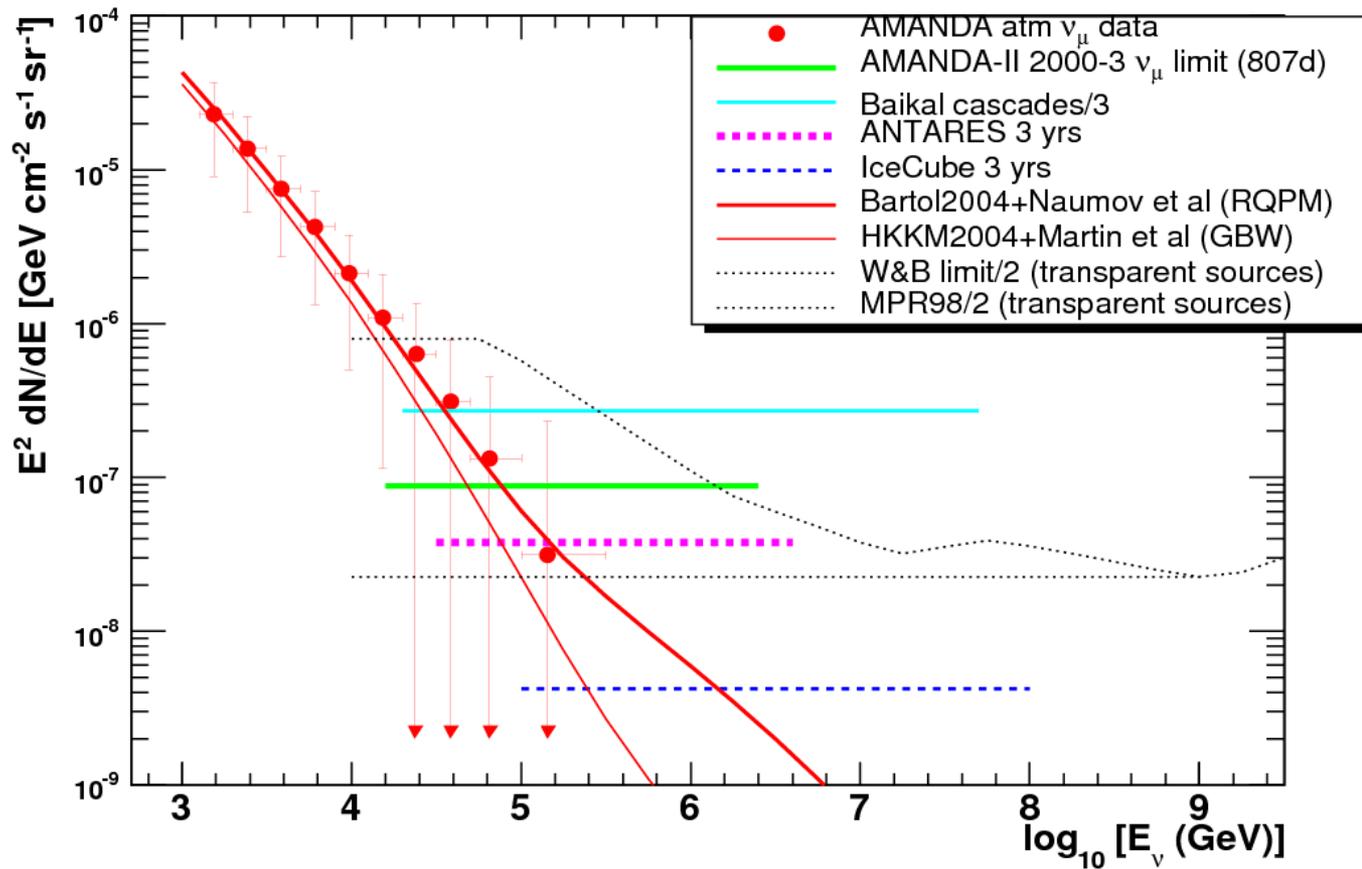
$$\frac{dE}{dx} = a + bE$$

- $10 \text{ GeV} < E_\mu < 100 \text{ GeV}$  parcours du muon
- $E_\mu > 1 \text{ TeV} \Rightarrow E$  à un facteur 2-3

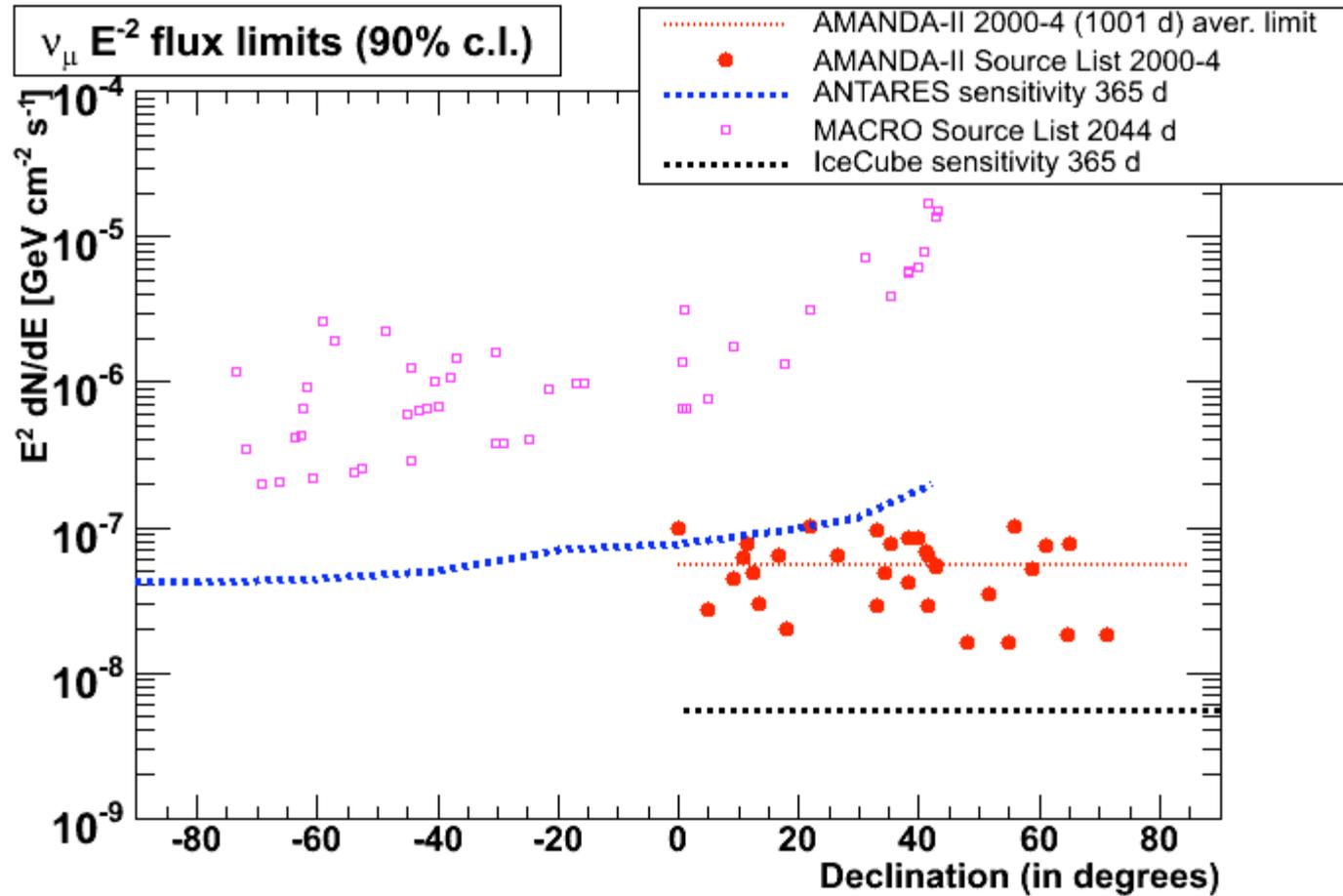


# Flux diffus

90% c.l. limits and sensitivities on  $\nu_\mu E^{-2}$  diffuse fluxes



# Sensibilité aux sources ponctuelles



# Oct. 2001 Déploiement du câble principal



# Dec. 2002 Boîte de jonction



# Dec. 2002 Boîte de jonction

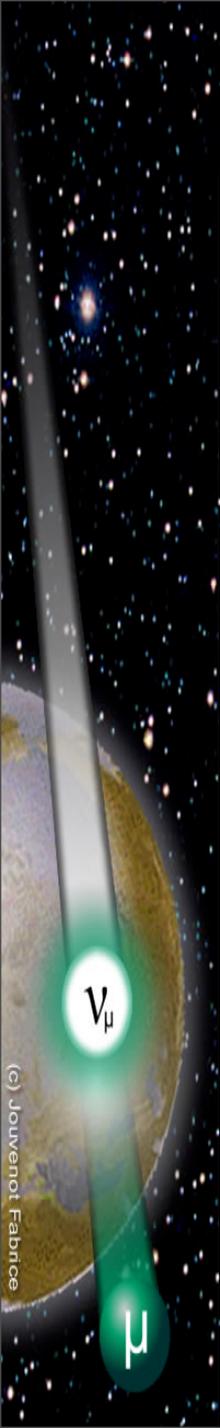


→ 2006 : déploiement de plusieurs prototypes, résolution de pbs techniques

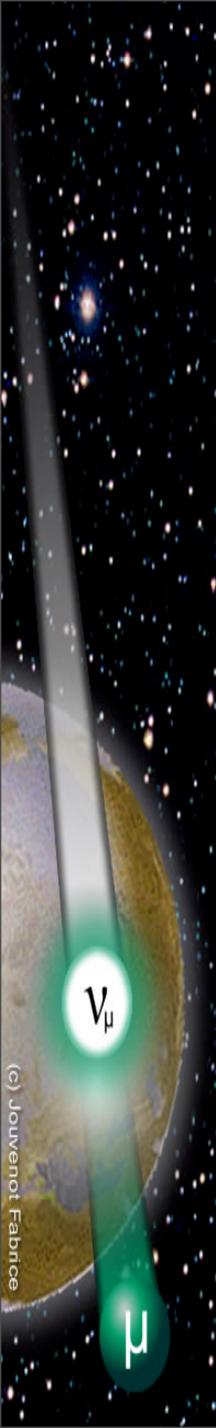
14 février 2006 : La ligne n°1



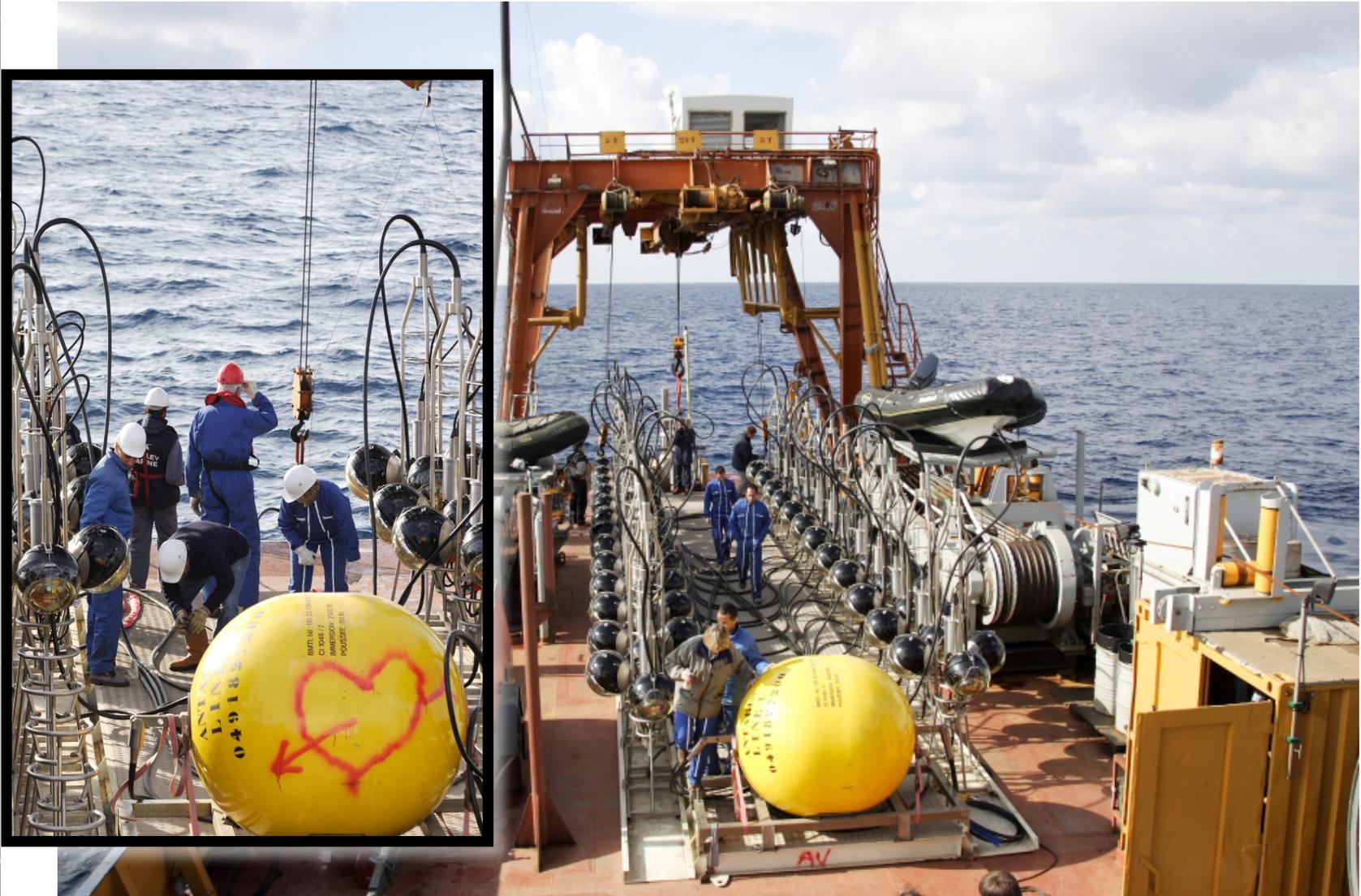
# 14 février 2006 : La ligne n°1



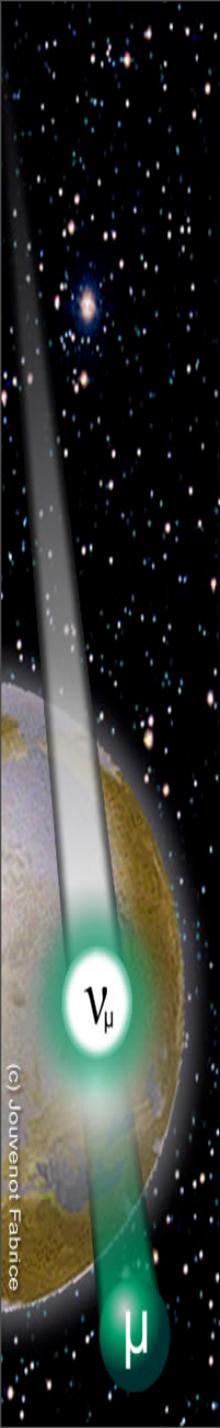
# 14 février 2006 : La ligne n°1



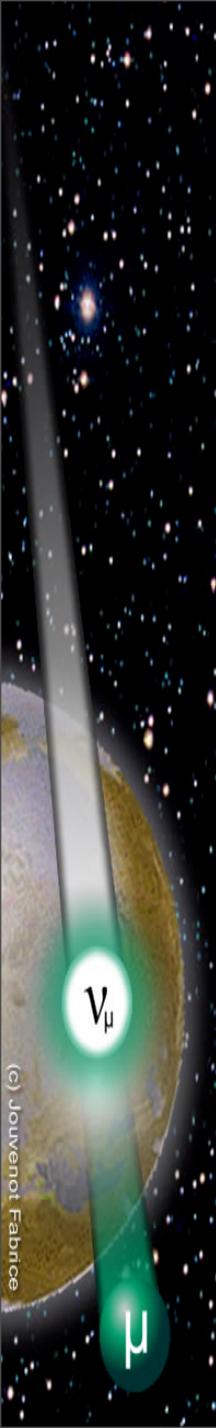
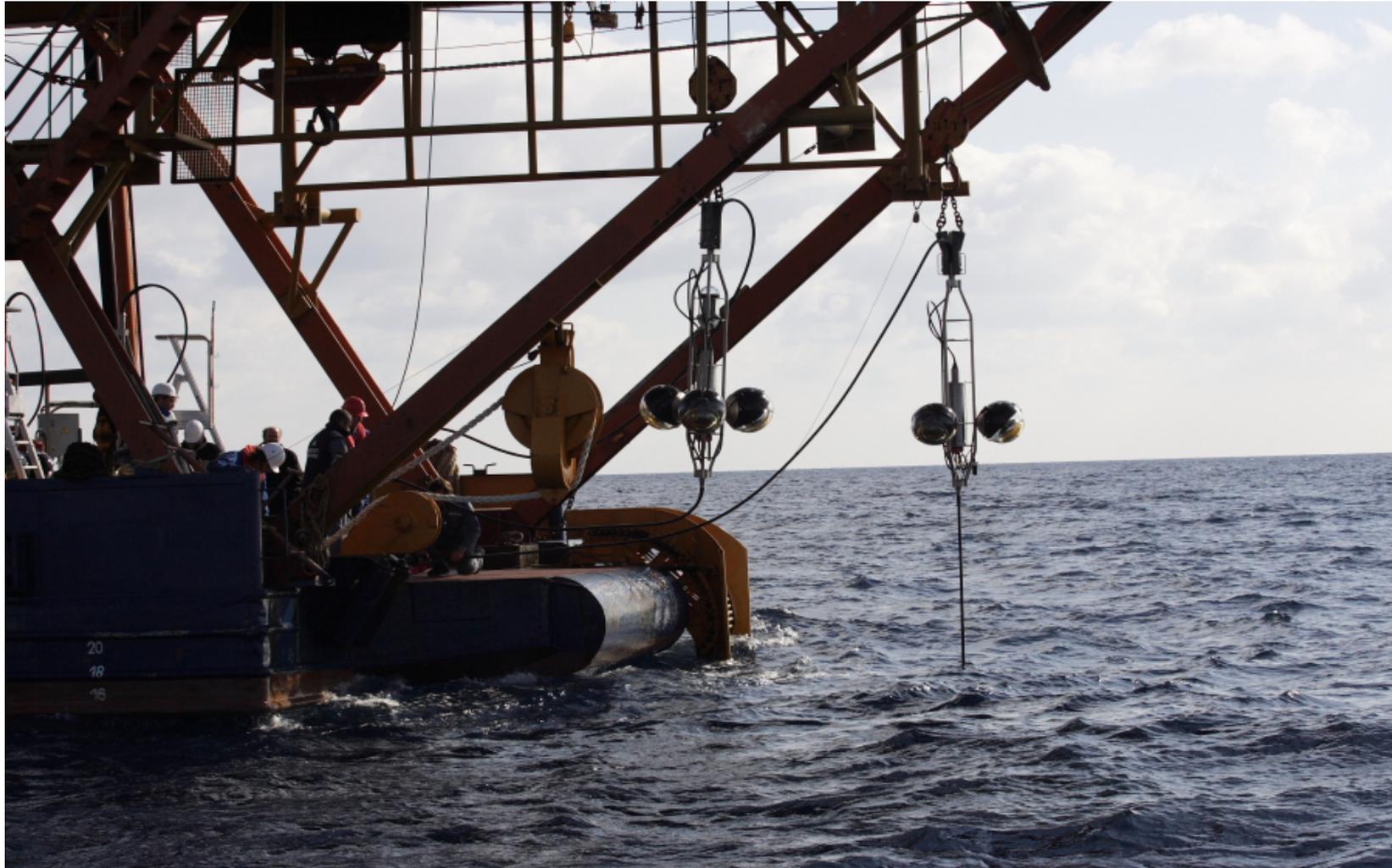
# 14 février 2006 : La ligne n°1



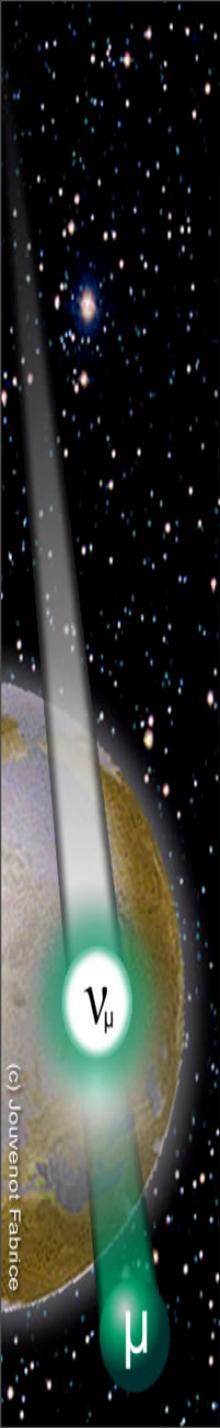
# 14 février 2006 : La ligne n°1



# 14 février 2006 : La ligne n°1

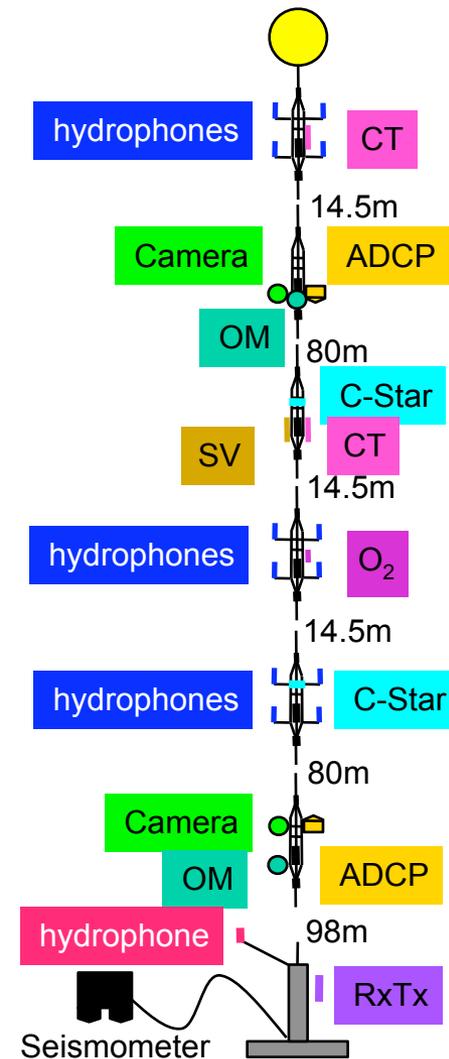
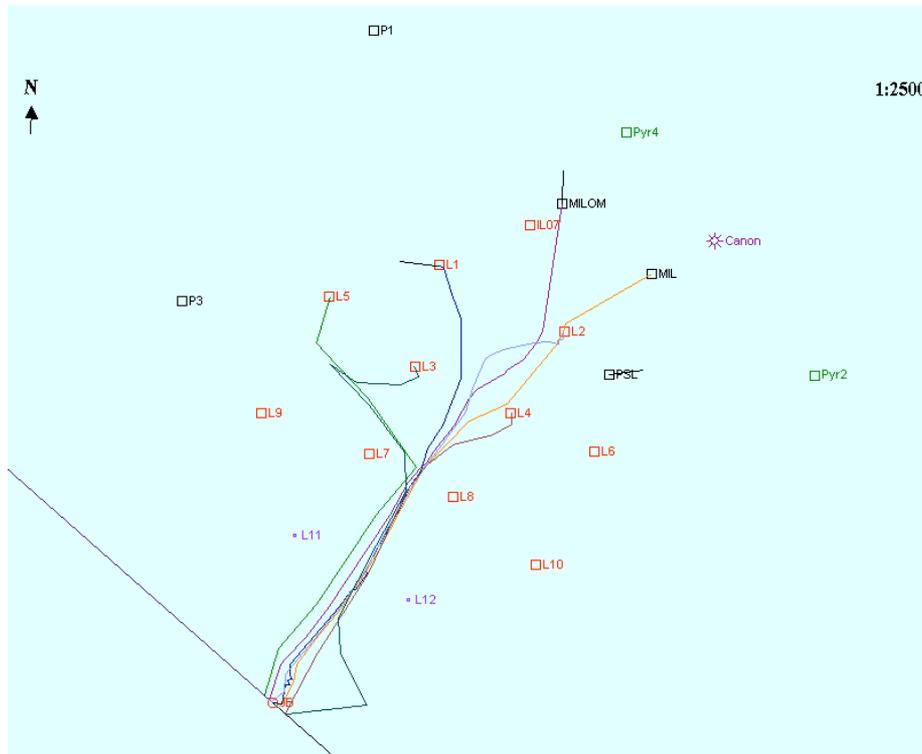


# Connexion : 2 mars 2006



# Les étapes plus récentes

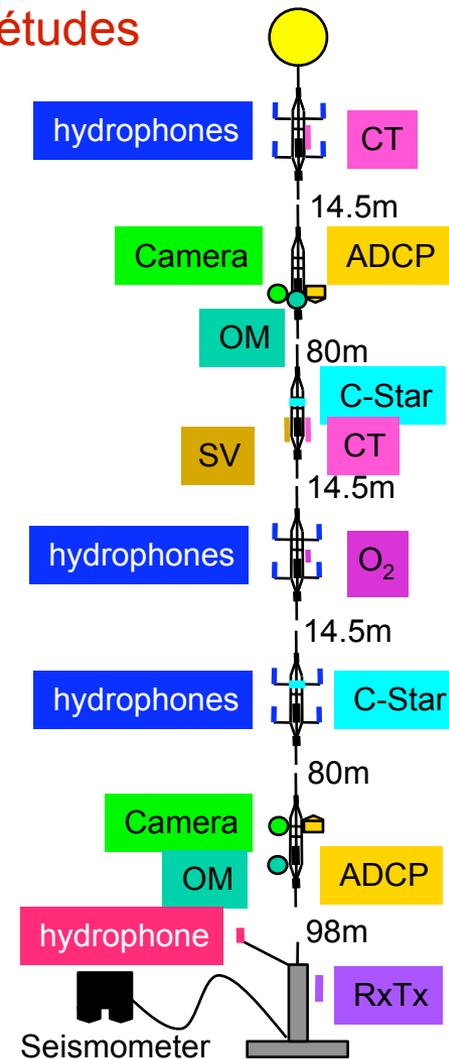
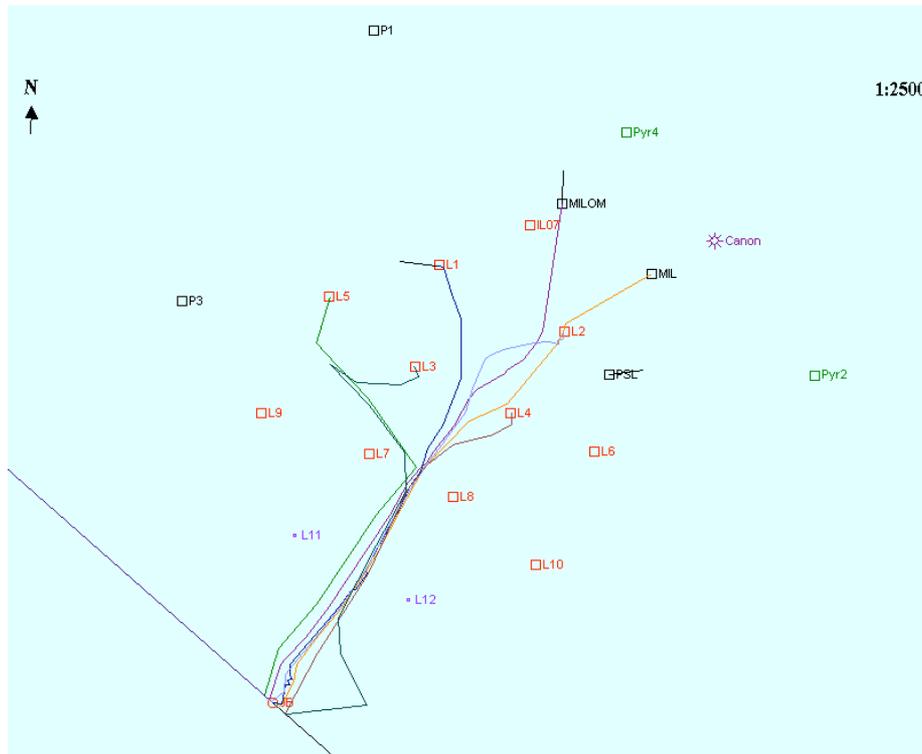
- 2006: Ligne 1 (Mars)  
Ligne 2 (Octobre)
- 2007: Lignes 3,4,5 (Mars)  
Lignes 6,7,8,9,10 +IL (Décembre)



# Les étapes plus récentes

- 2006: Ligne 1 (Mars)  
Ligne 2 (Octobre)
- 2007: Lignes 3,4,5 (Mars)  
Lignes 6,7,8,9,10 +IL (Décembre)

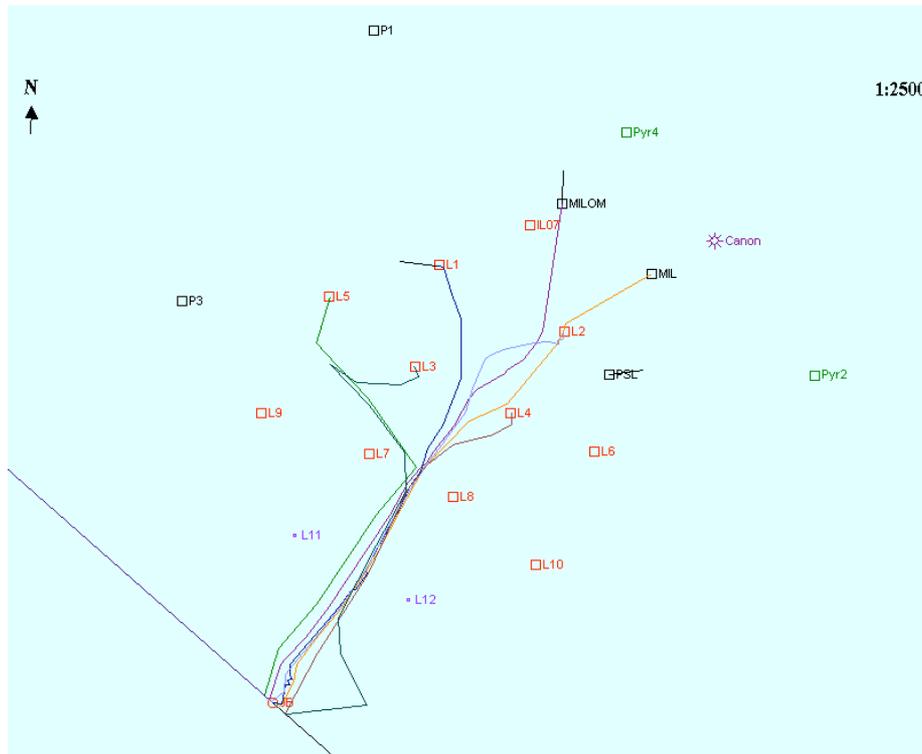
Données à 5 lignes  
⇒ Premières études



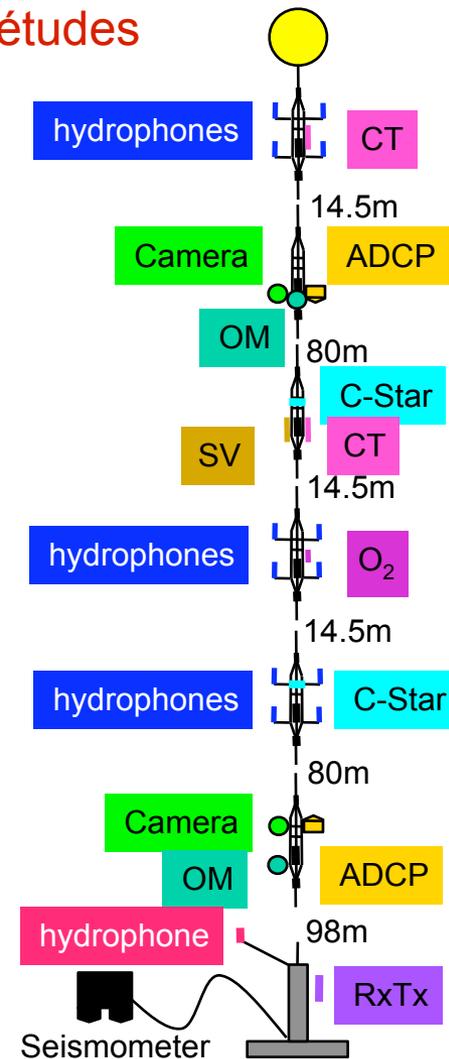
# Les étapes plus récentes

- 2006: Ligne 1 (Mars)  
Ligne 2 (Octobre)
- 2007: Lignes 3,4,5 (Mars)  
Lignes 6,7,8,9,10 +IL (Décembre)

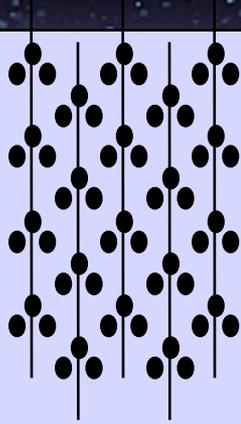
Données à 5 lignes  
⇒ Premières études



Détecteur final (12 +1IL lignes) été 2008

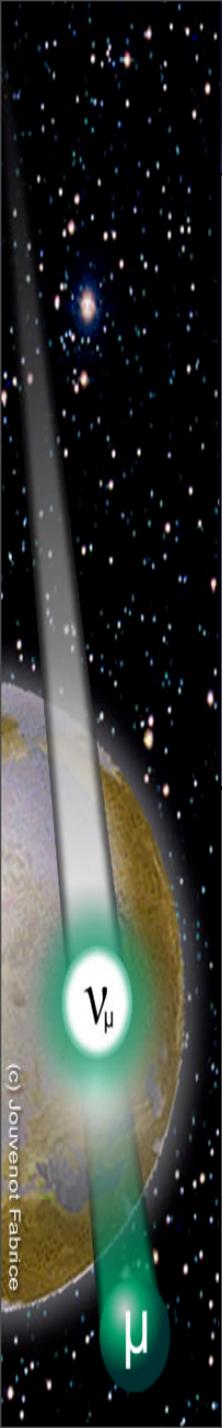


# DAQ: Filtrage à terre



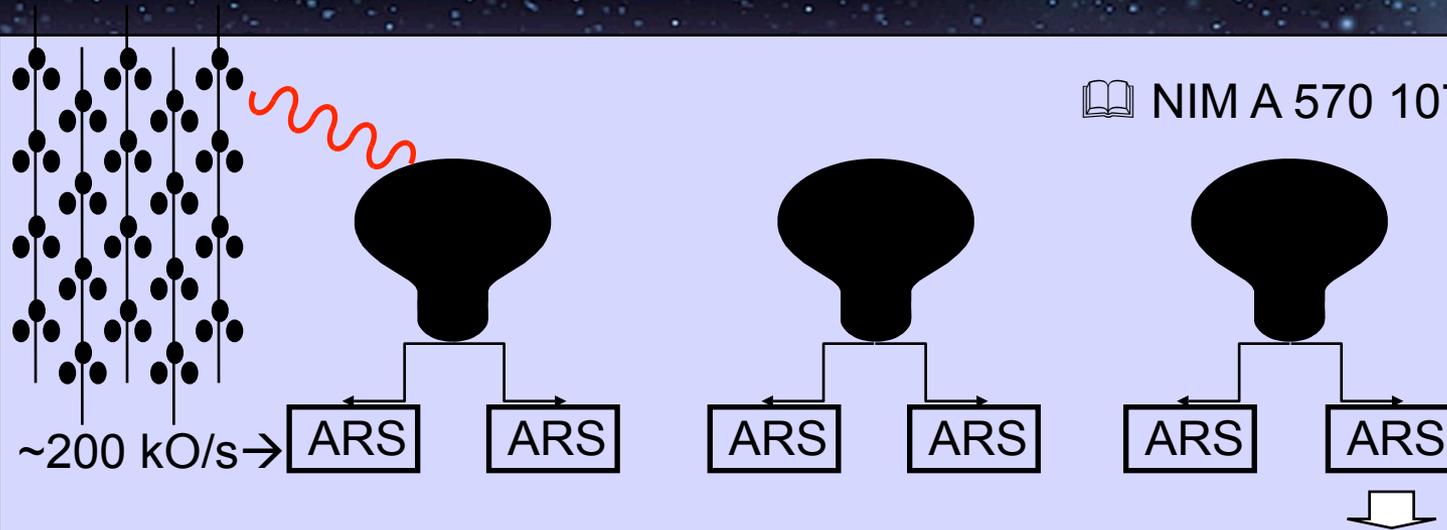
 NIM A 570 107-116 2007

off-shore  
on-shore



# DAQ: Filtrage à terre

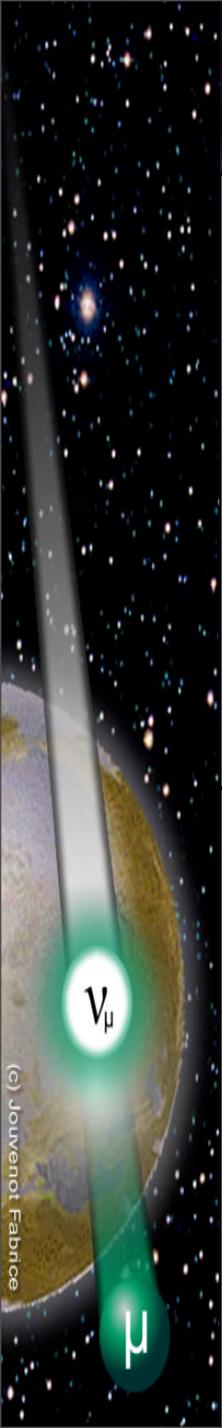
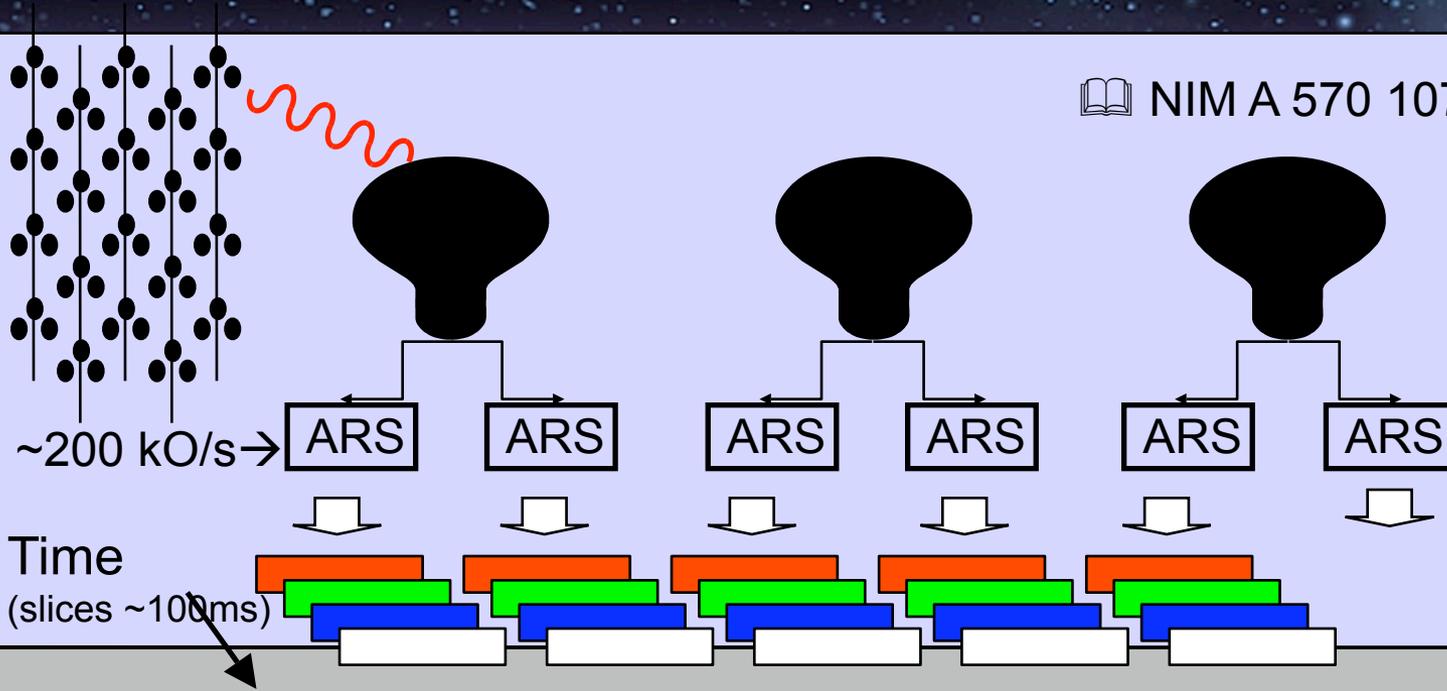
 NIM A 570 107-116 2007



off-shore  
on-shore

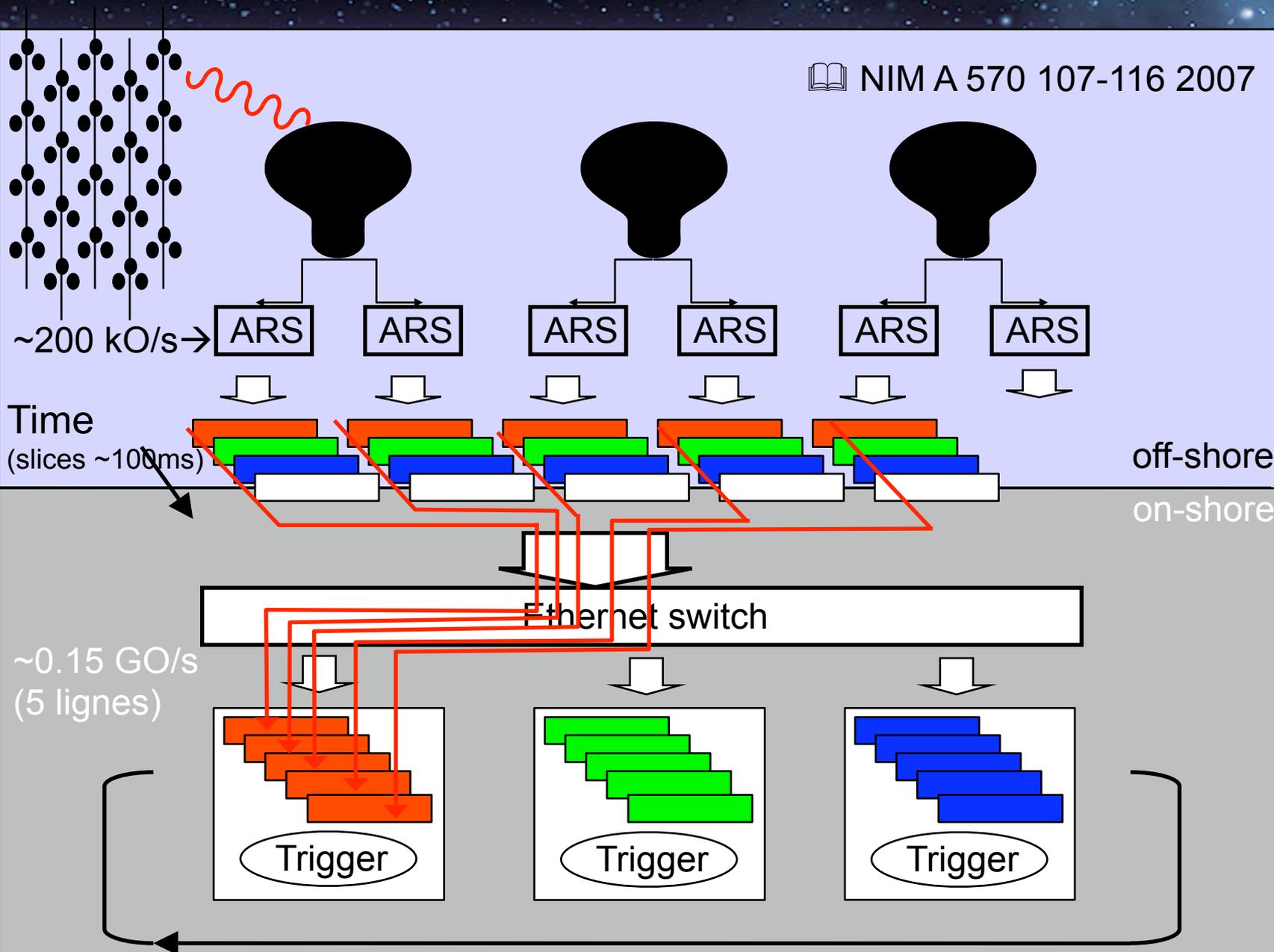
# DAQ: Filtrage à terre

NIM A 570 107-116 2007



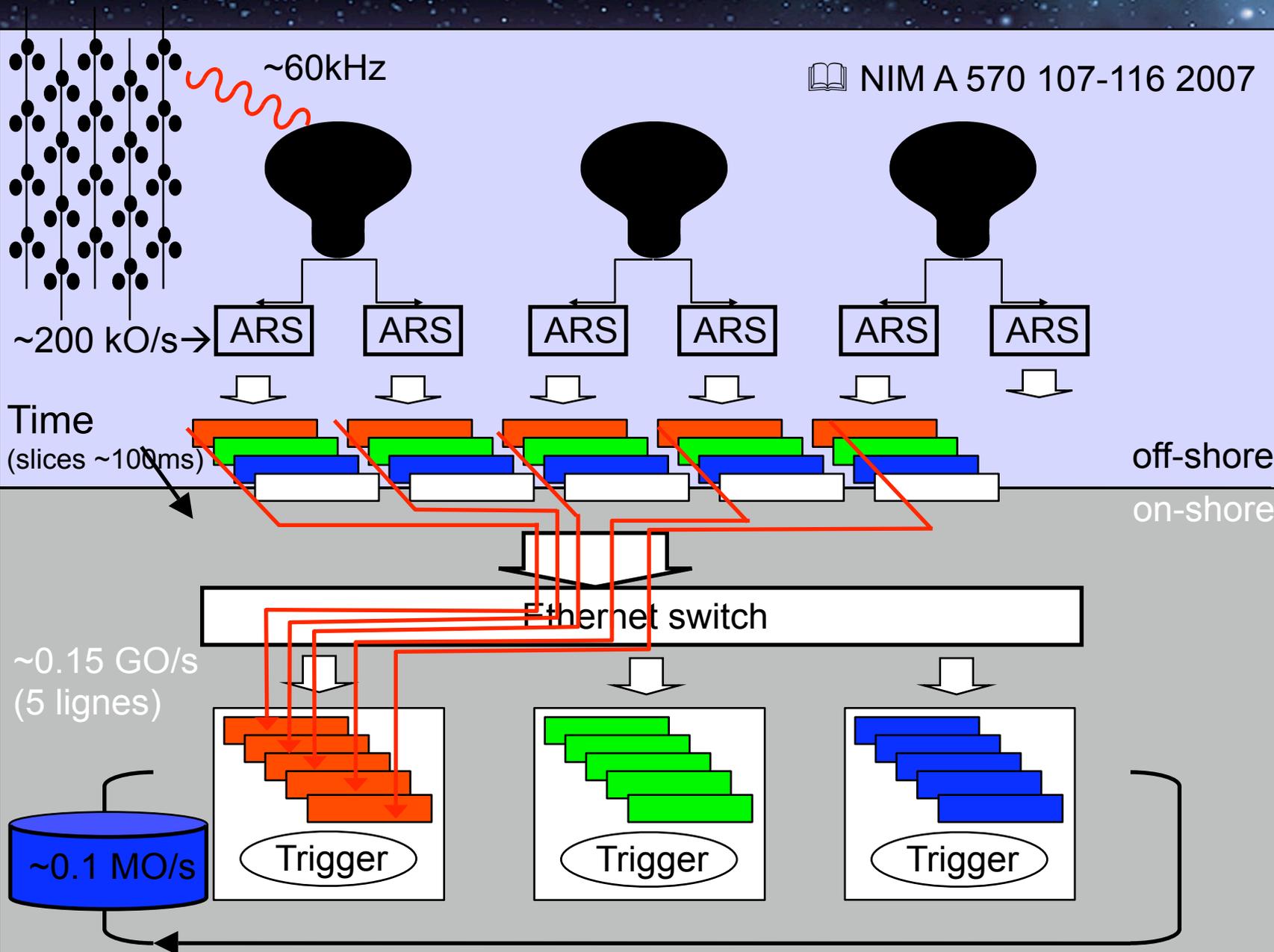
# DAQ: Filtrage à terre

NIM A 570 107-116 2007

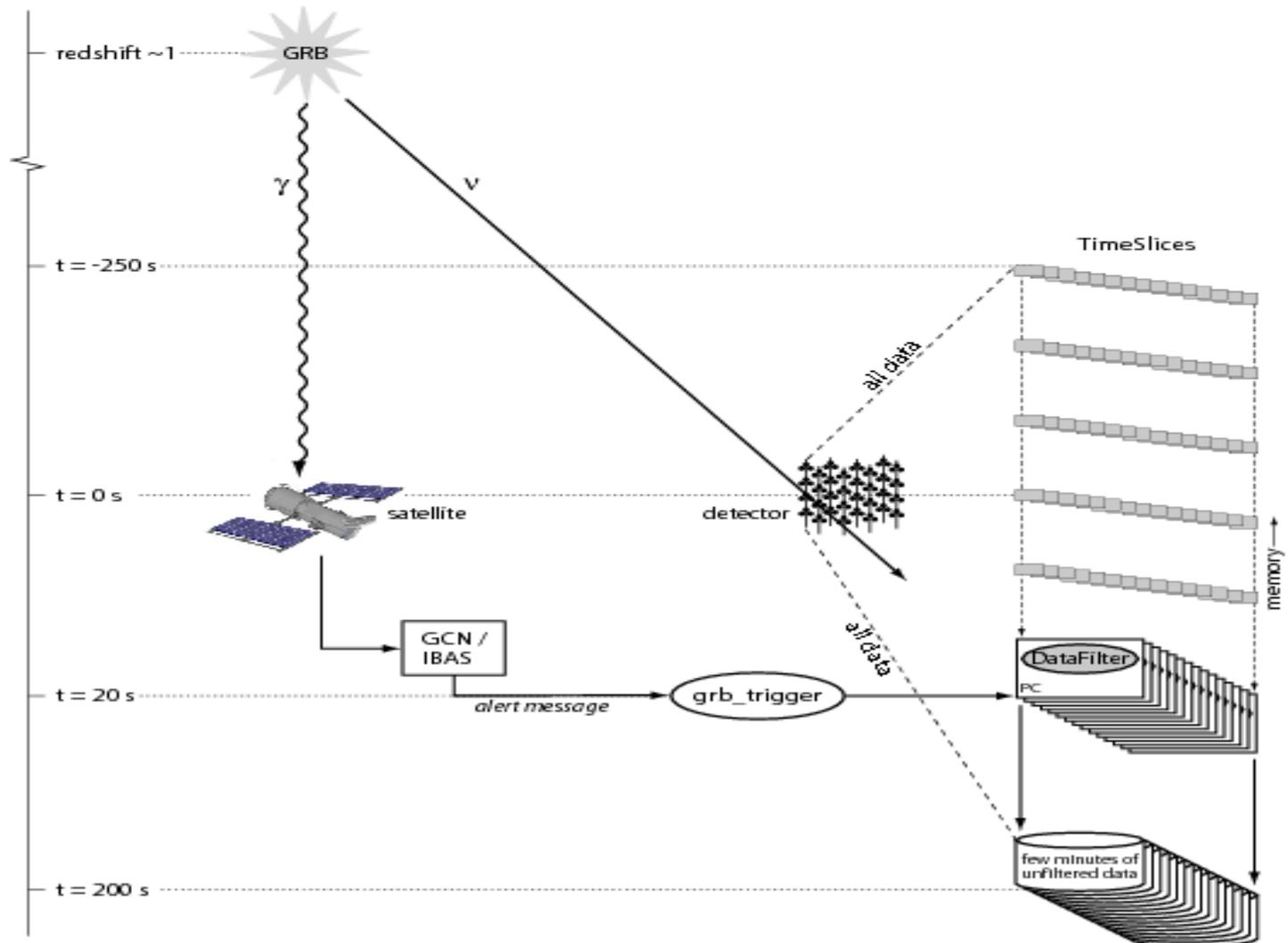


# DAQ: Filtrage à terre

NIM A 570 107-116 2007

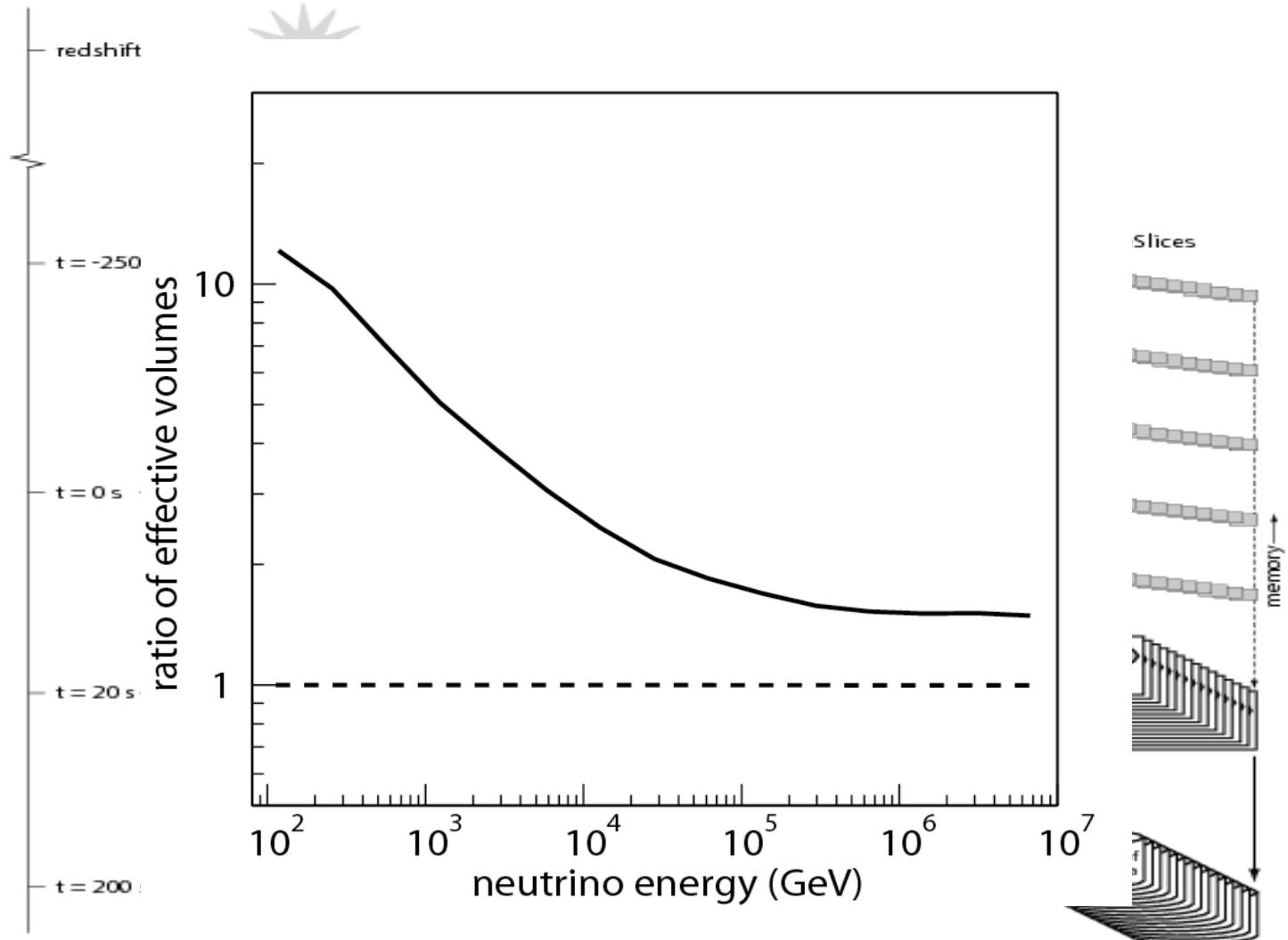


# Antares sur le réseau d'alerte

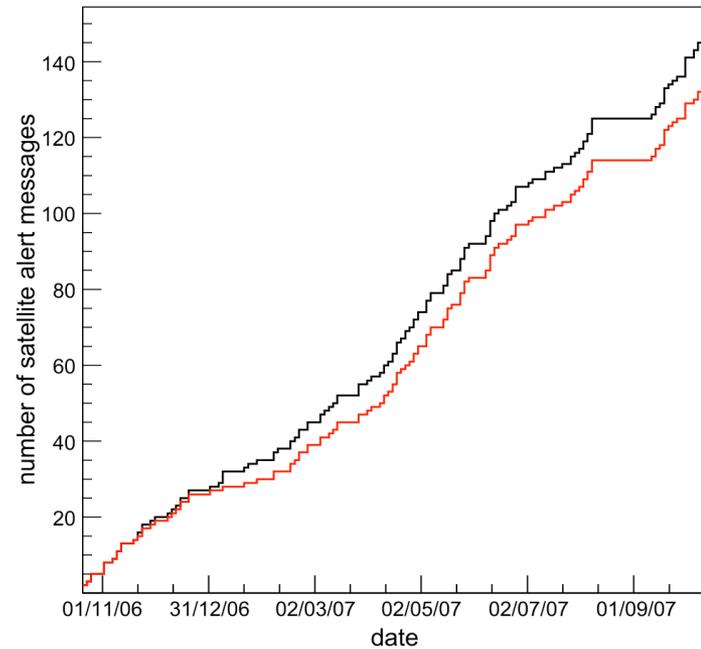
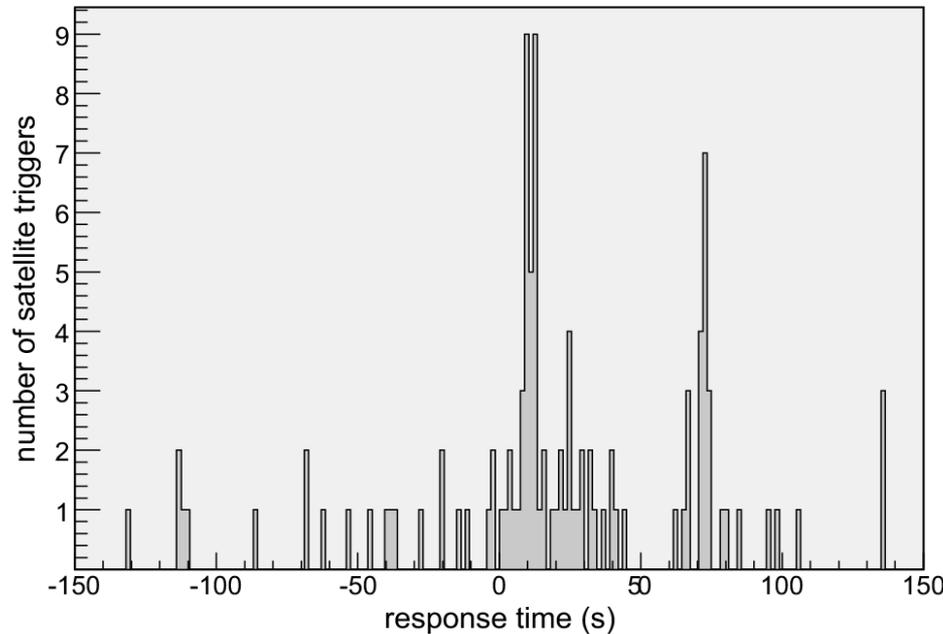


# Antares sur le réseau d'alerte

Augmente les chances de détections



# Réponse aux alertes satellitaires



Localisation et durée du sursaut

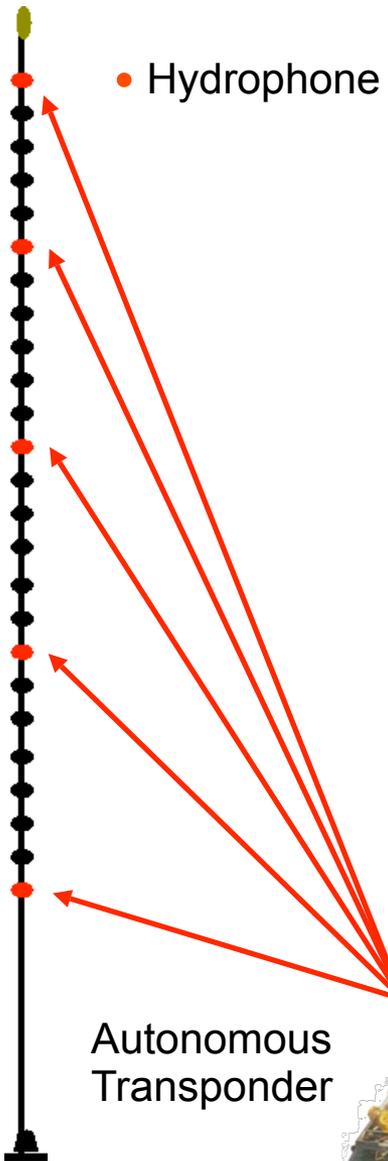


Faible bruit de fond

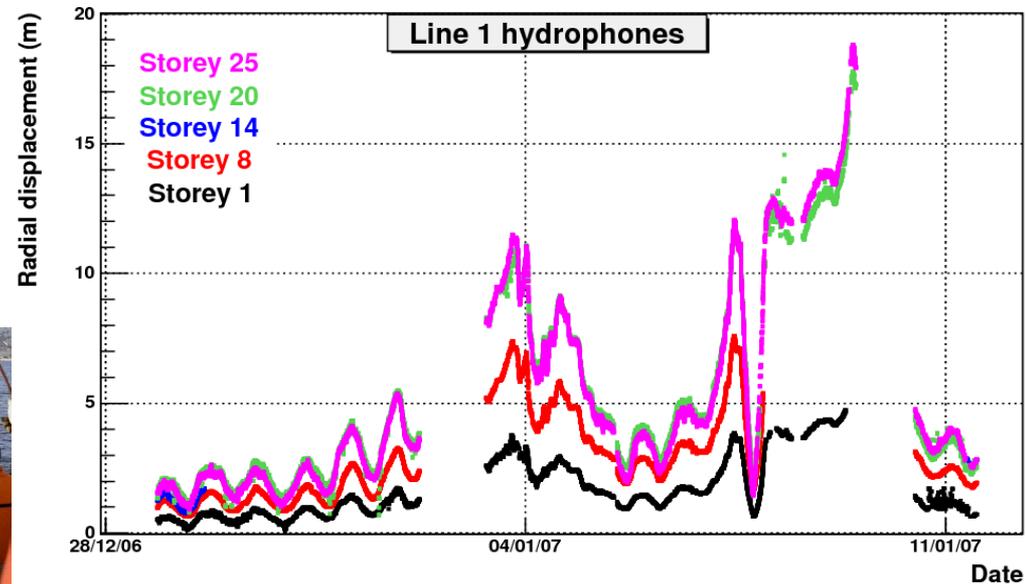
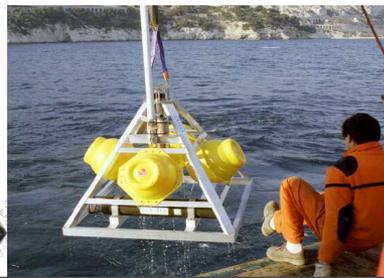


Relâcher les coupures

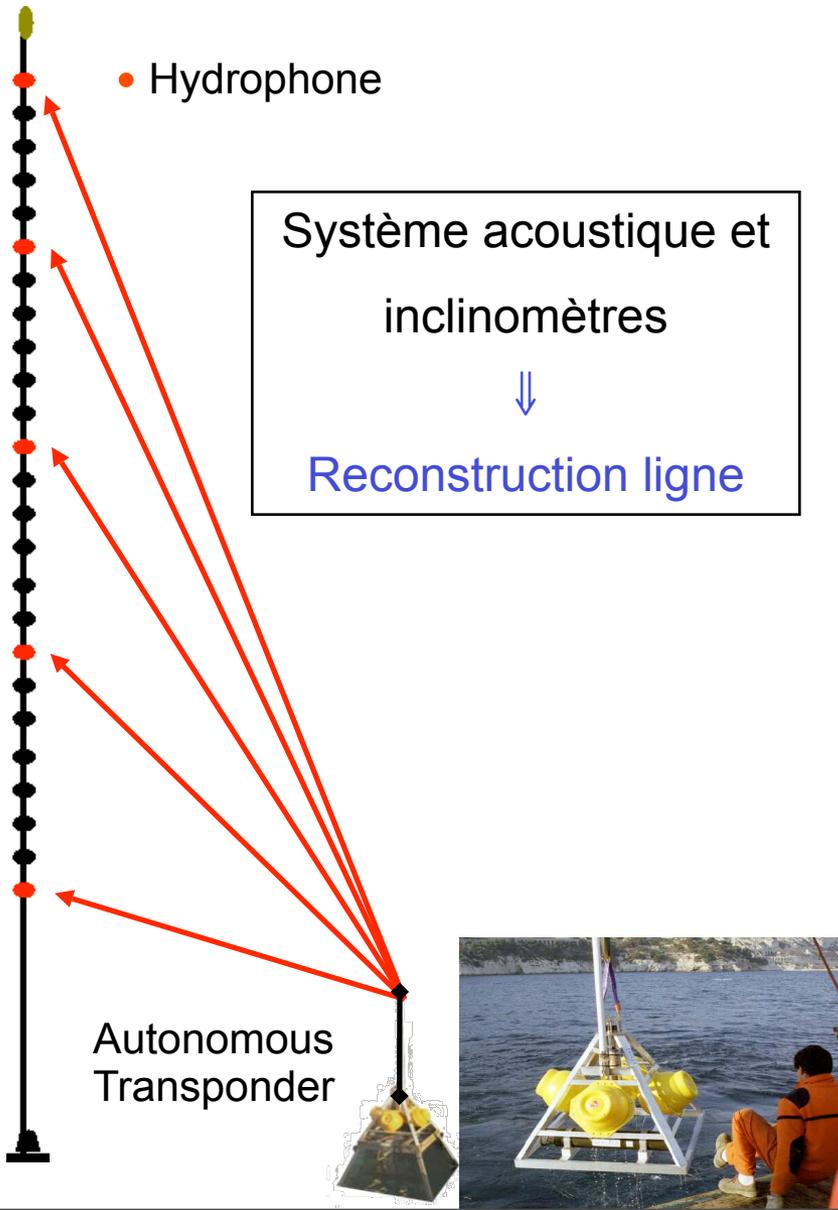
# Systeme de positionnement <10 cm



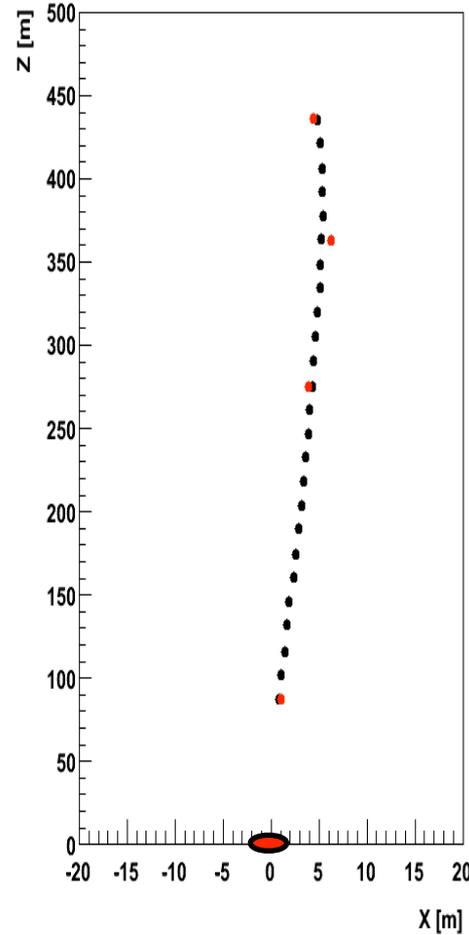
Triangulations acoustiques entre émetteurs fixes et transpondeurs autonomes



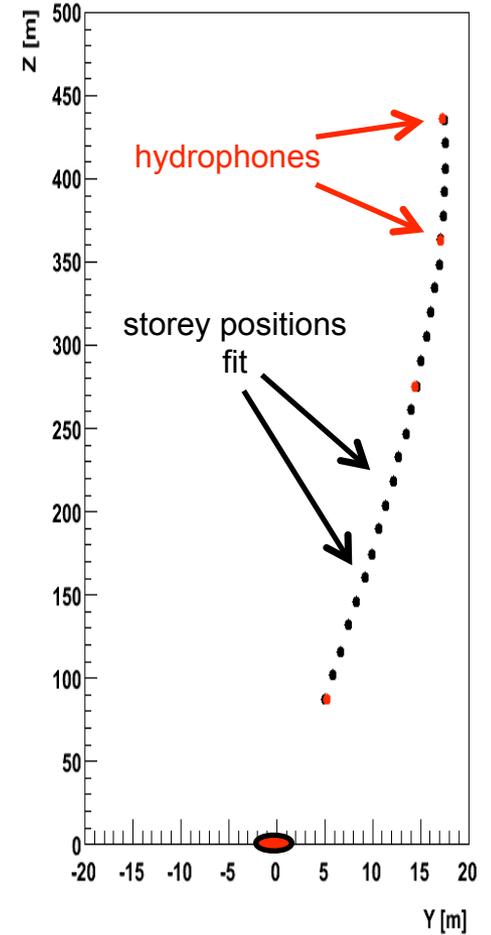
# Systeme de positionnement <10 cm



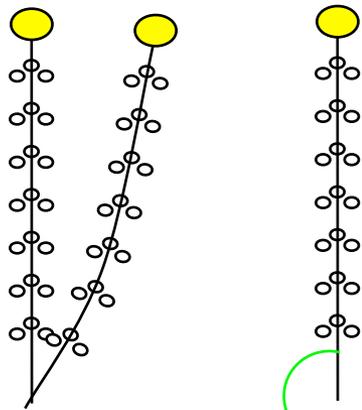
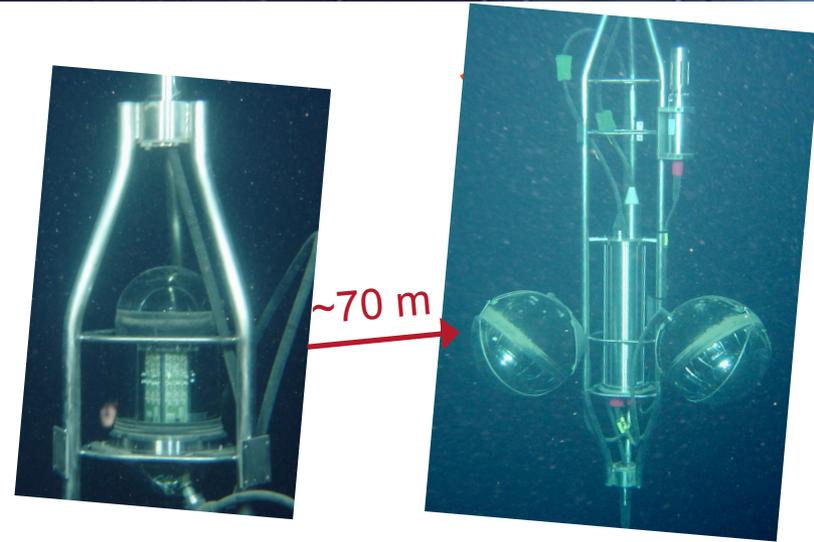
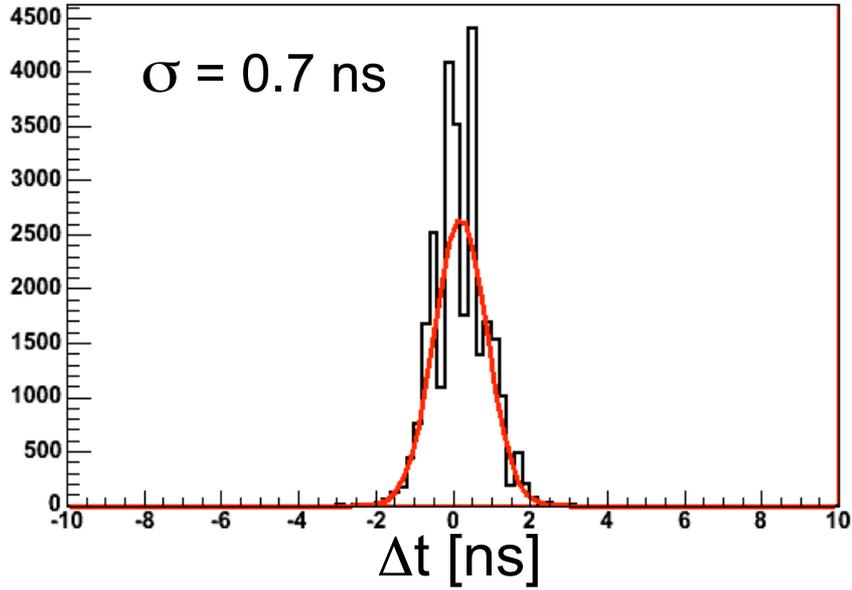
Line shape XZ



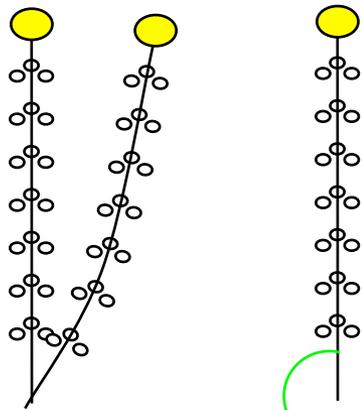
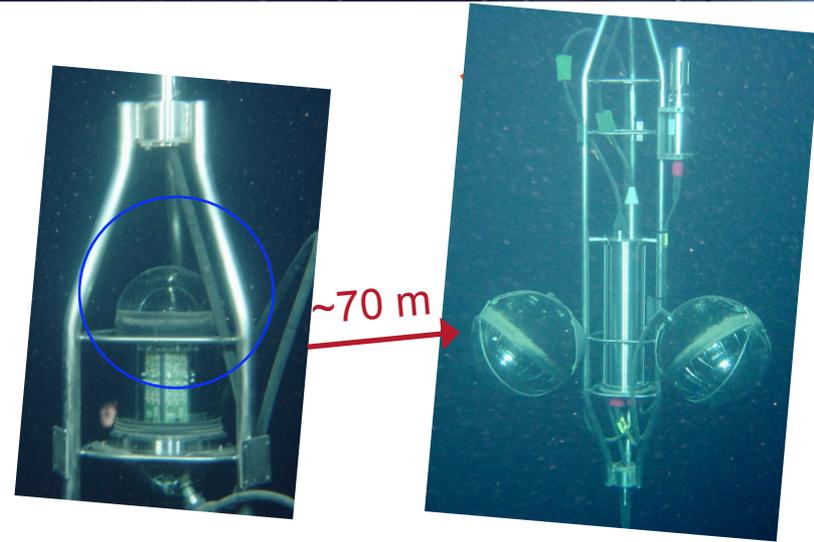
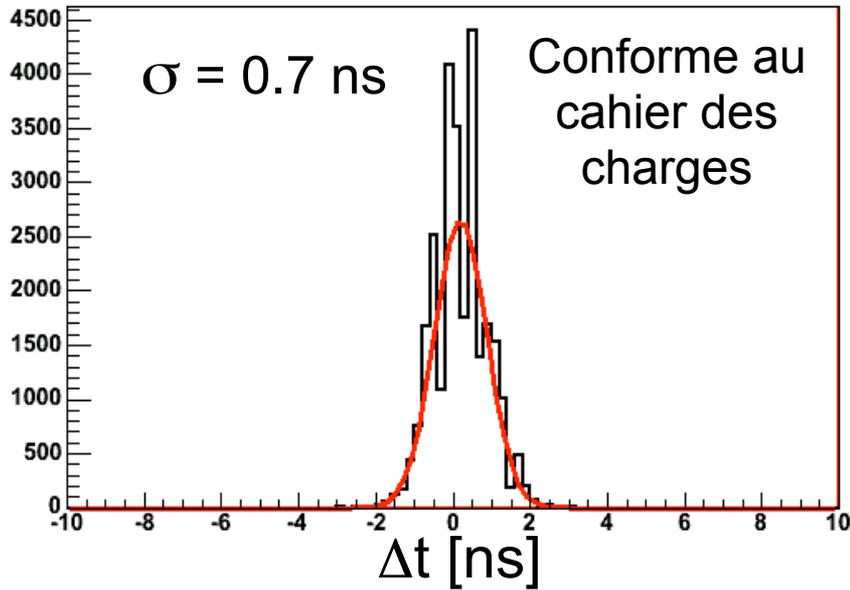
Line shape YZ



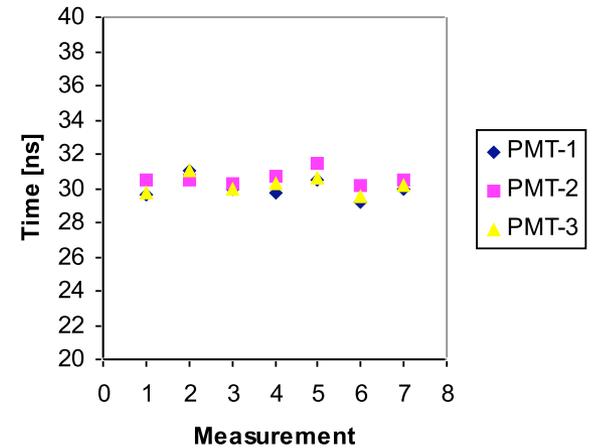
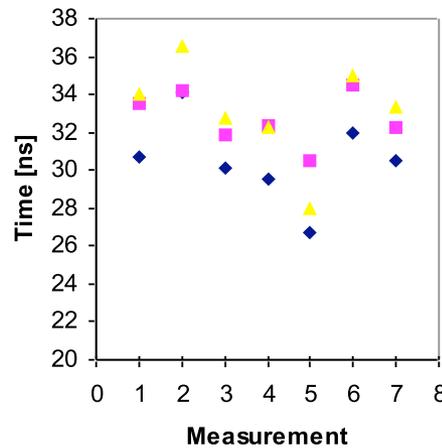
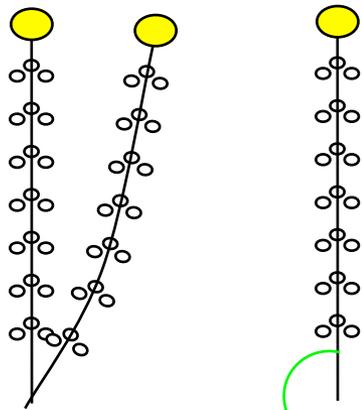
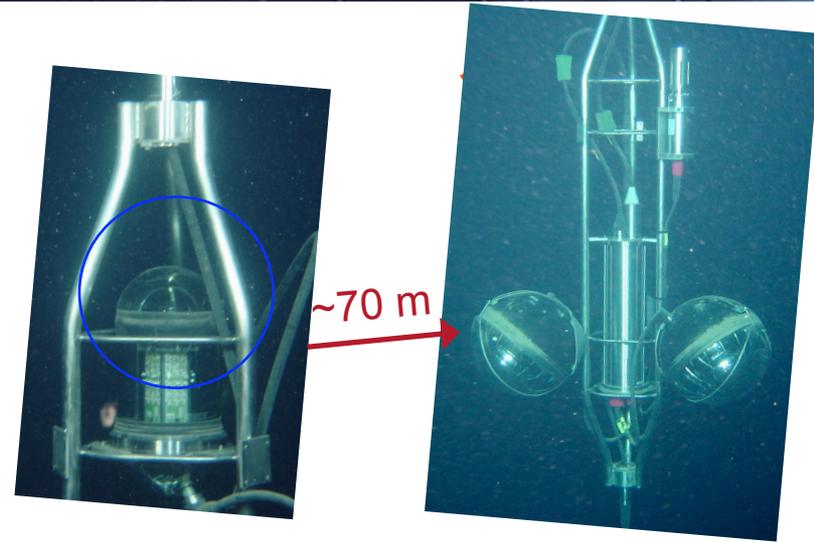
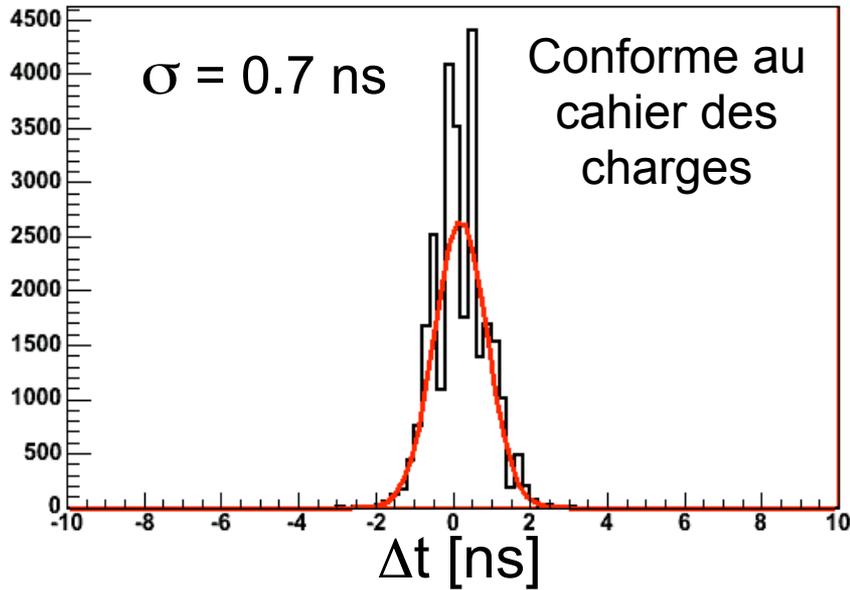
# Etalonnage temporel : LED



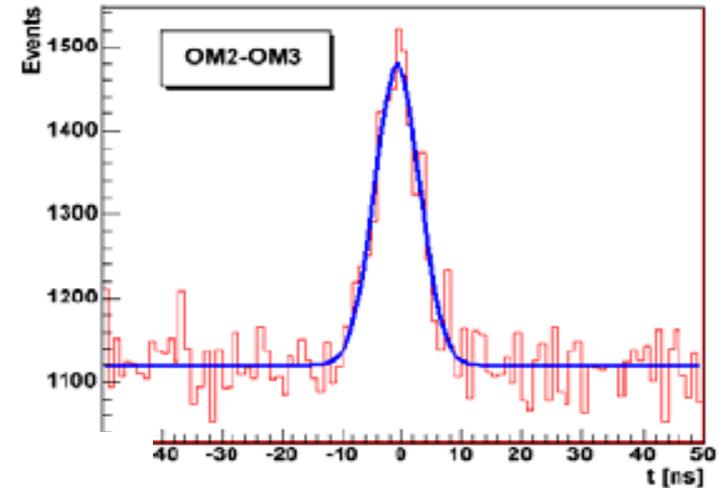
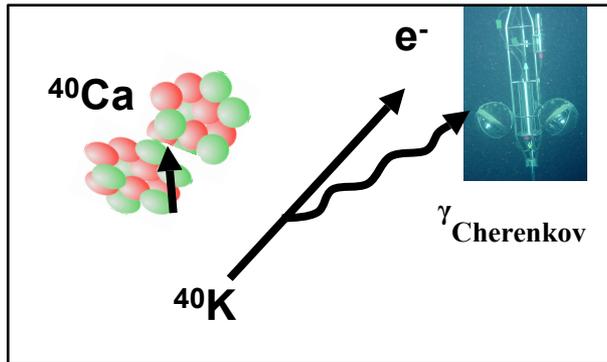
# Etalonnage temporel : LED



# Etalonnage temporel : LED



# Coïncidences dues au $^{40}\text{K}$



## Données :

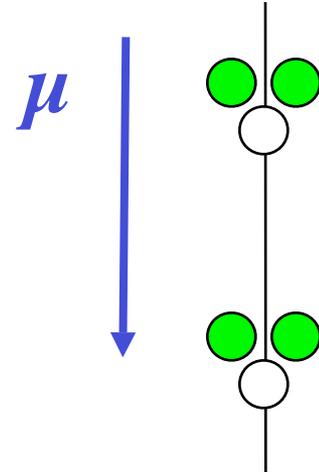
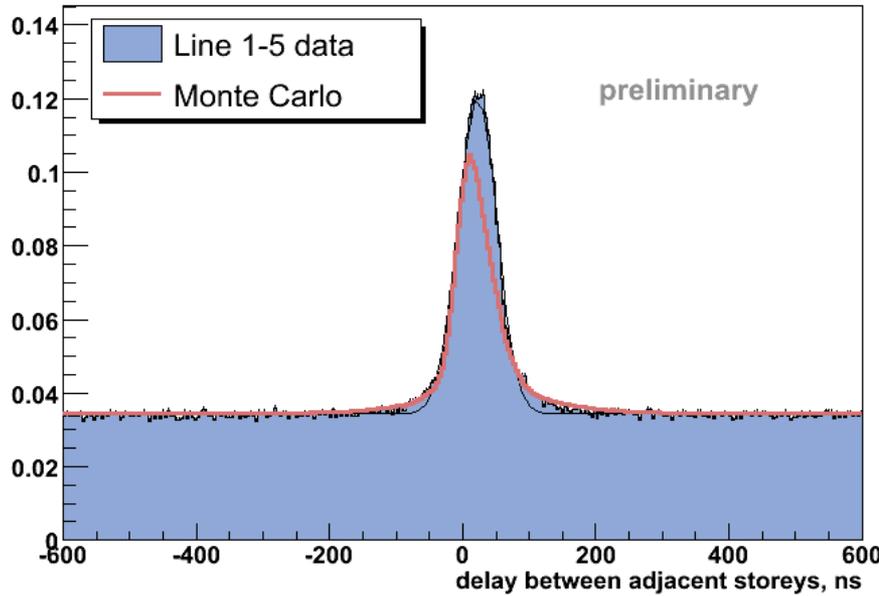
Taux de coïncidence (fit gaussien)  
13.4 Hz en moyenne 20% dispersion

## Simulation :

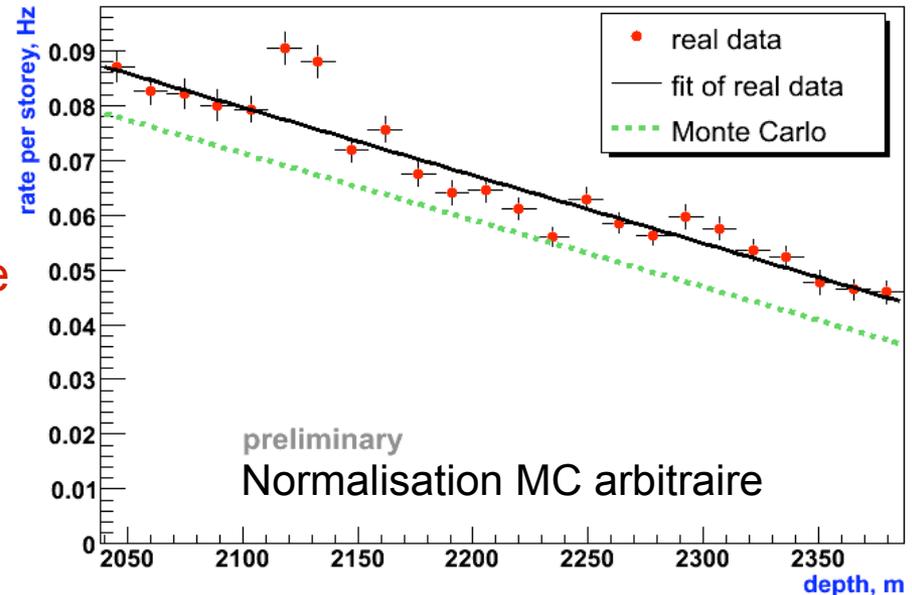
Contribution  $^{40}\text{K}$  constante de 40 kHz  
12 Hz  $\pm$  4 Hz (sys)

Efficacité des PM au cours du temps

# Muons: $\Delta T$ entre deux étages



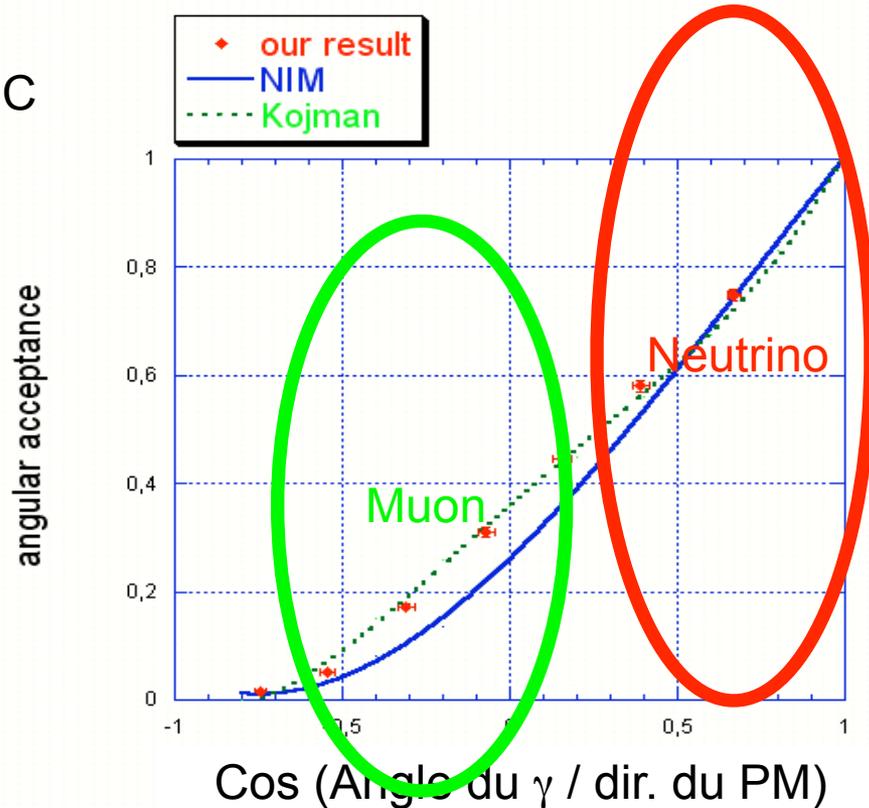
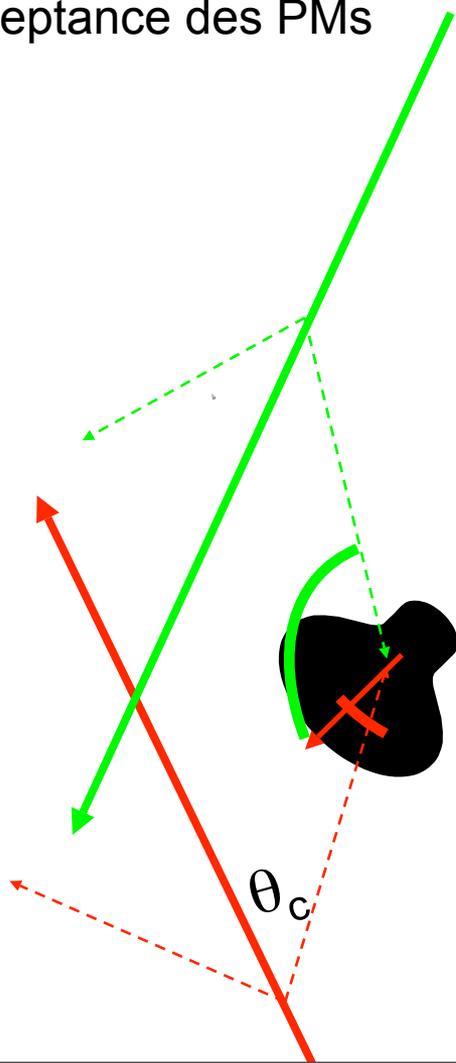
Simple signature de la présence de muons atmosphériques



# Etude des systématiques ( $\mu$ )

Excès de muons descendants / MC

Acceptance des PMs

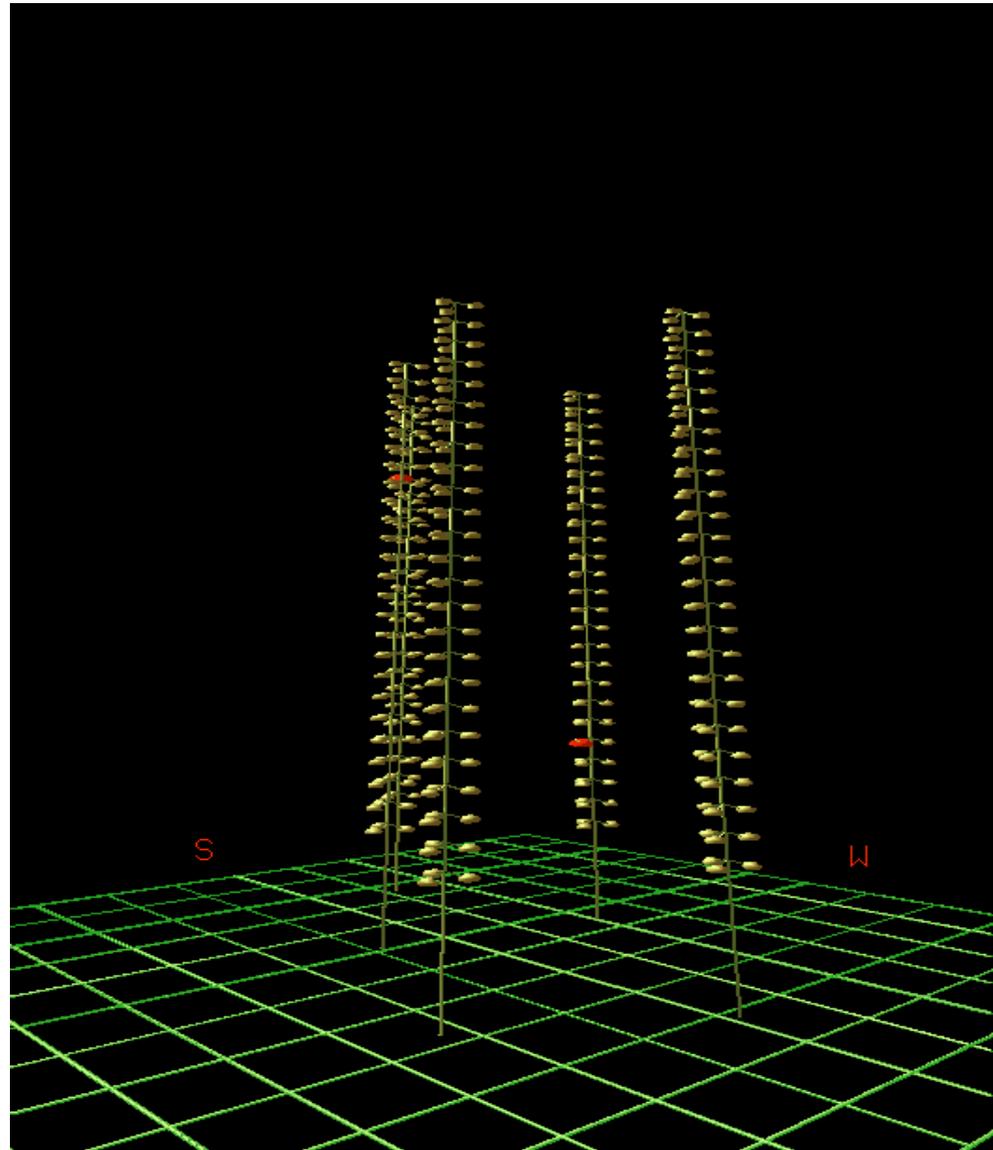


**Action:** Nouvelles mesures (Gênes)  
Meilleur accord MC/Données

# Événements à 5 lignes

Taux de filtrage  
~1 Hz (5 lignes)

$19 \times 10^6 \mu$   
detectés  
à 5 lignes



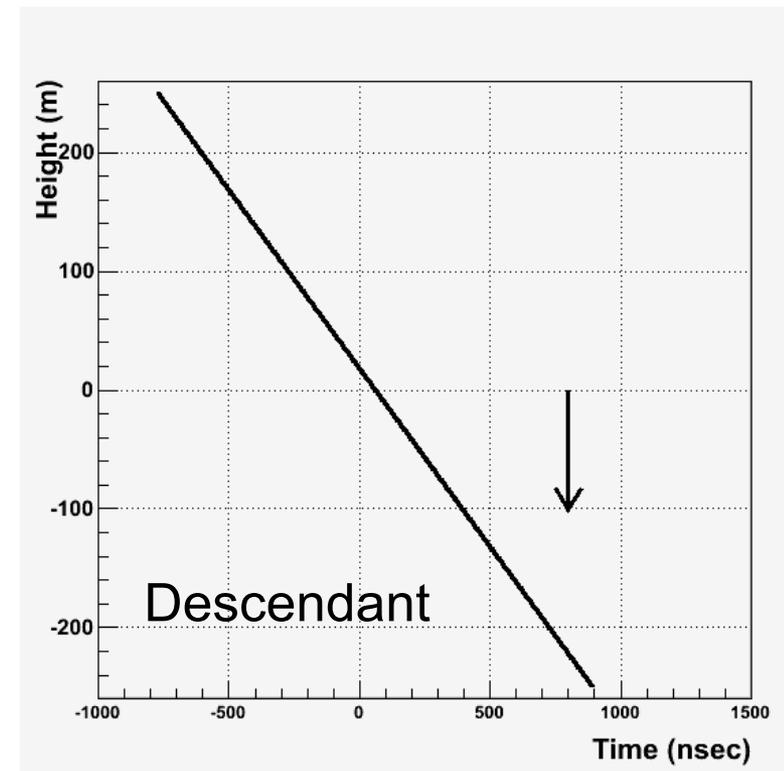
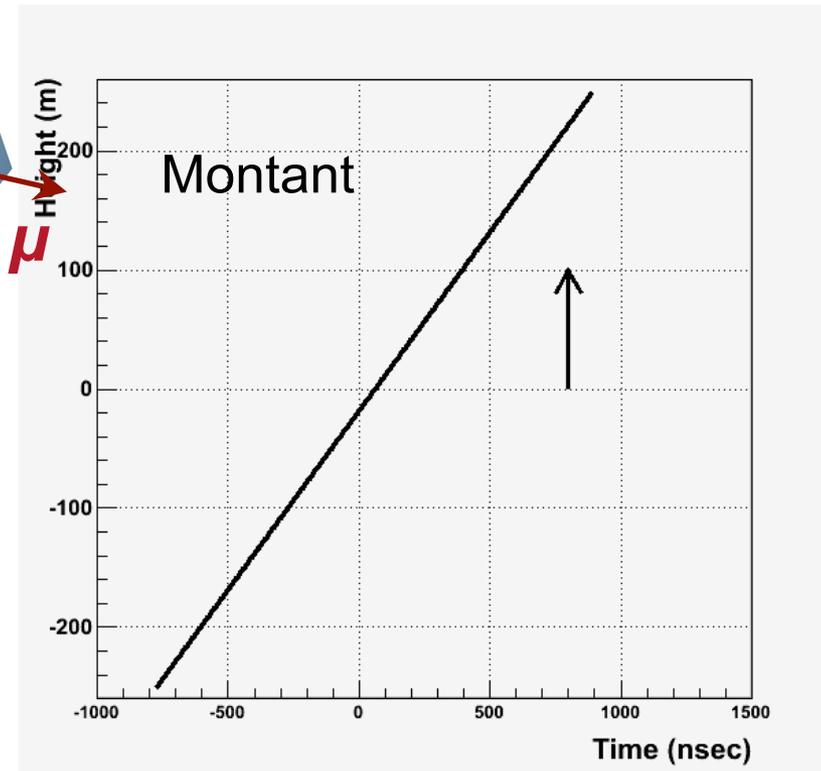
# Evénements reconstruits

Temps d'arrivée ( $t$ ) des  $\gamma$  en fonction de l'altitude ( $z$ )



Fonction de l'angle zénithal et de la distance

Plusieurs algorithmes utilisés par la collaboration 1D, 3D,  $\chi^2$ , ML

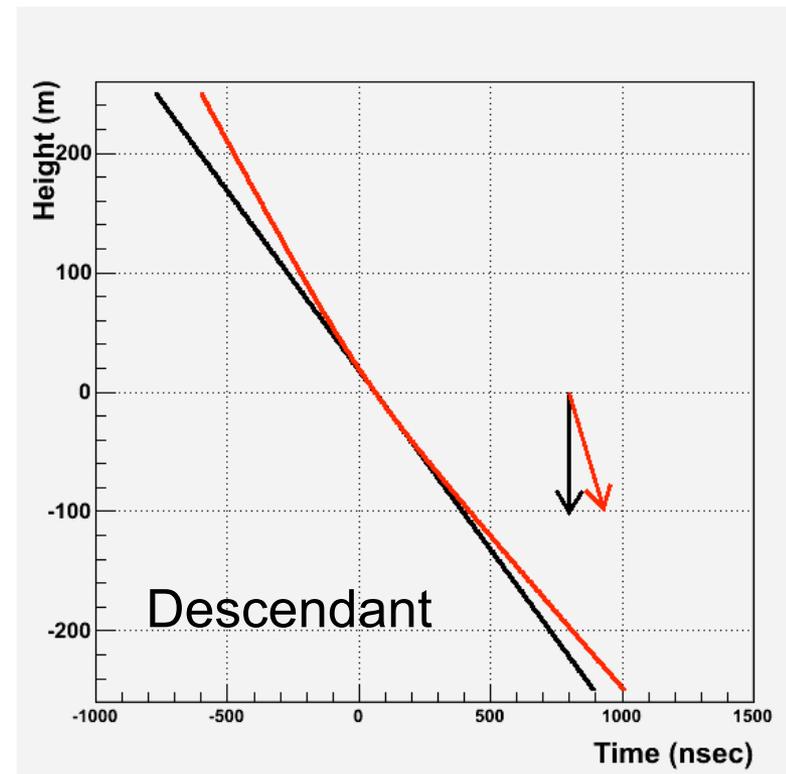
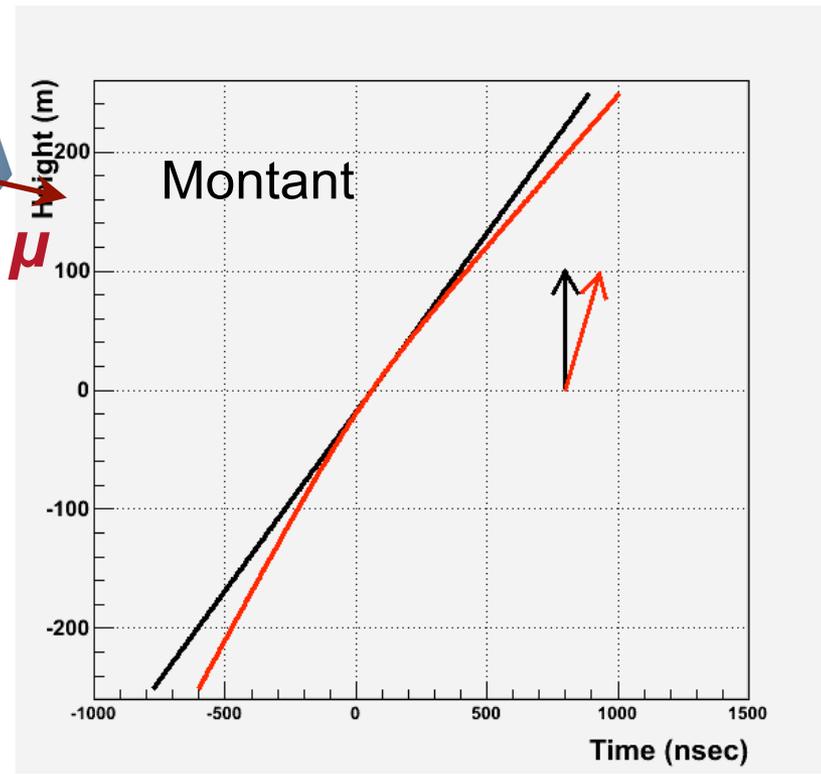


# Evénements reconstruits

Temps d'arrivée ( $t$ ) des  $\gamma$  en fonction de l'altitude ( $z$ )

⇒ Fonction de l'angle zénithal et de la distance

Plusieurs algorithmes utilisés par la collaboration 1D, 3D,  $\chi^2$ , ML

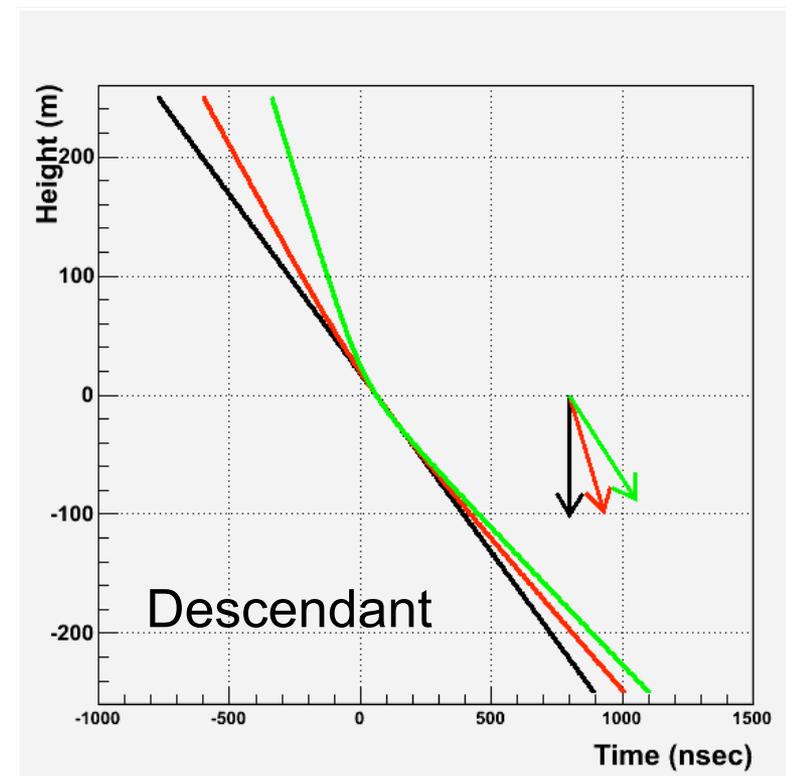
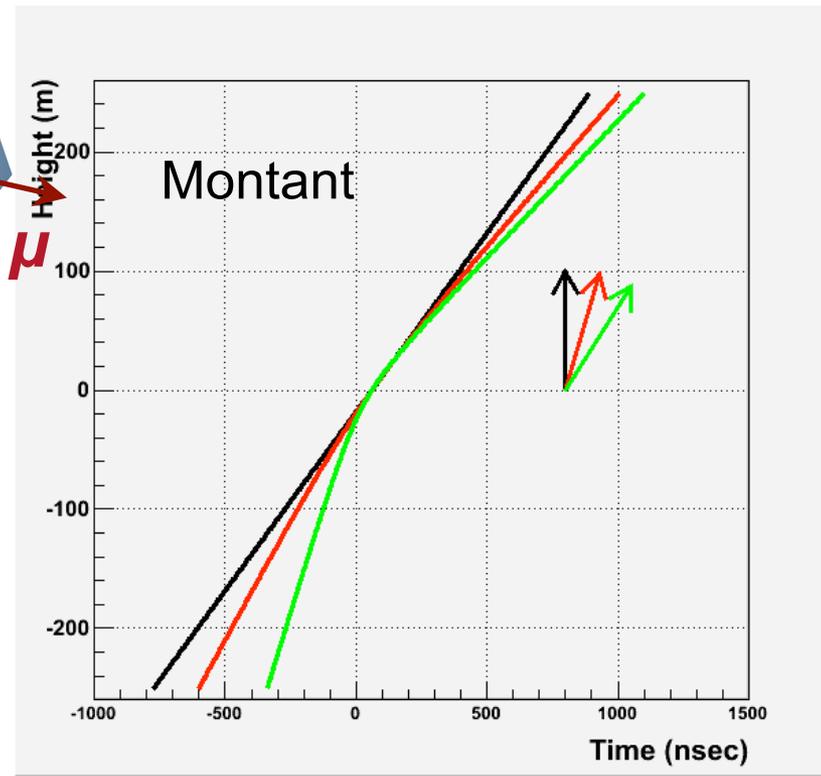


# Evénements reconstruits

Temps d'arrivée ( $t$ ) des  $\gamma$  en fonction de l'altitude ( $z$ )

⇒ Fonction de l'angle zénithal et de la distance

Plusieurs algorithmes utilisés par la collaboration 1D, 3D,  $\chi^2$ , ML



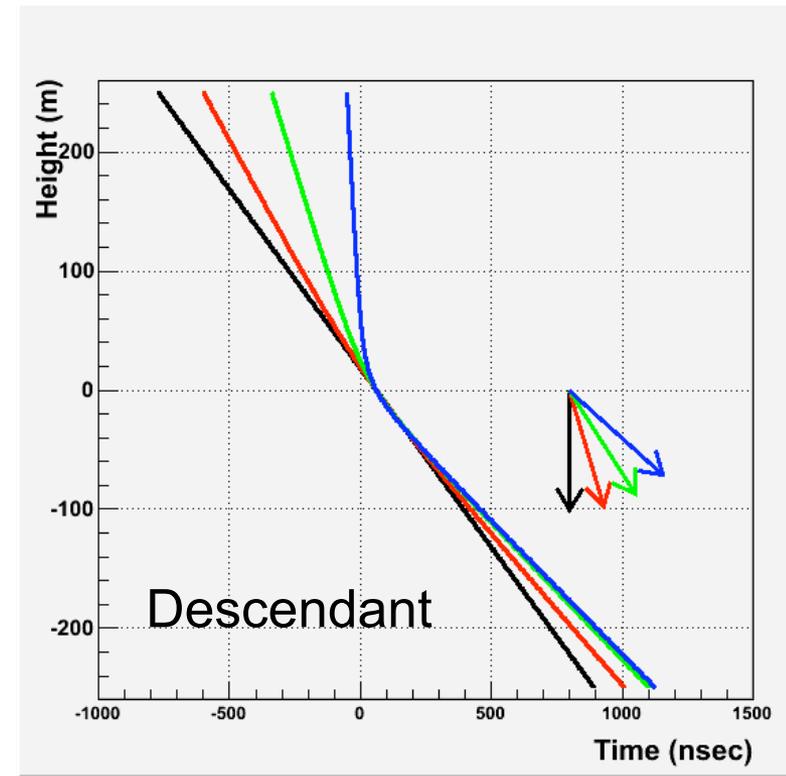
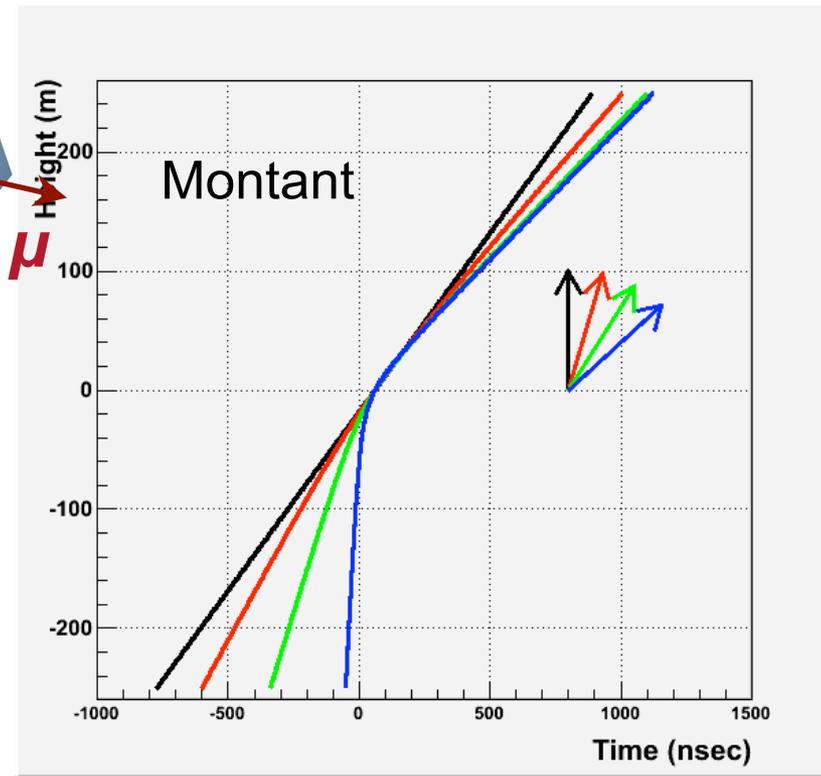
# Événements reconstruits

Temps d'arrivée ( $t$ ) des  $\gamma$  en fonction de l'altitude ( $z$ )



Fonction de l'angle zénithal et de la distance

Plusieurs algorithmes utilisés par la collaboration 1D, 3D,  $\chi^2$ , ML

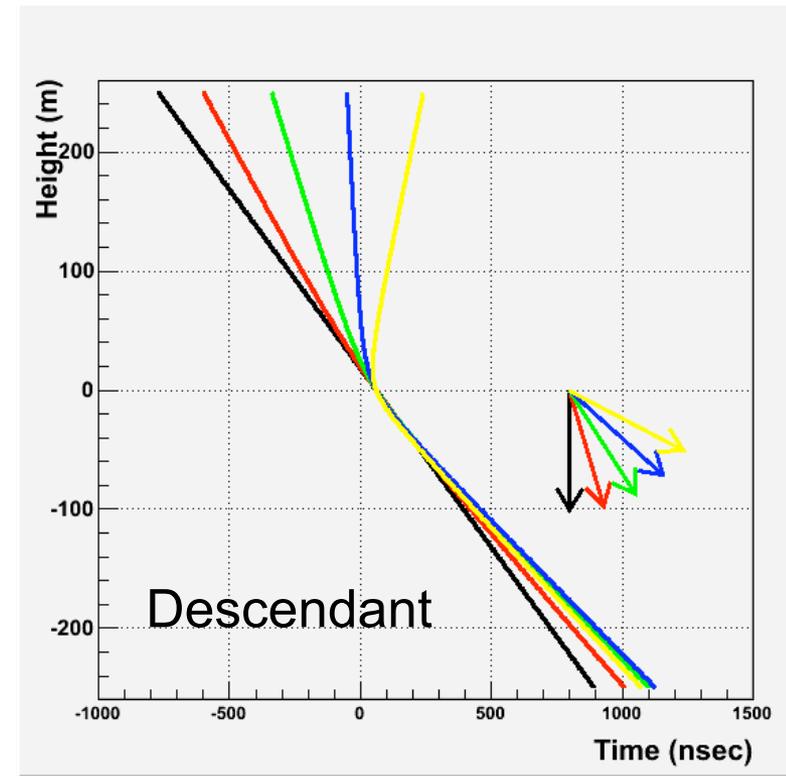
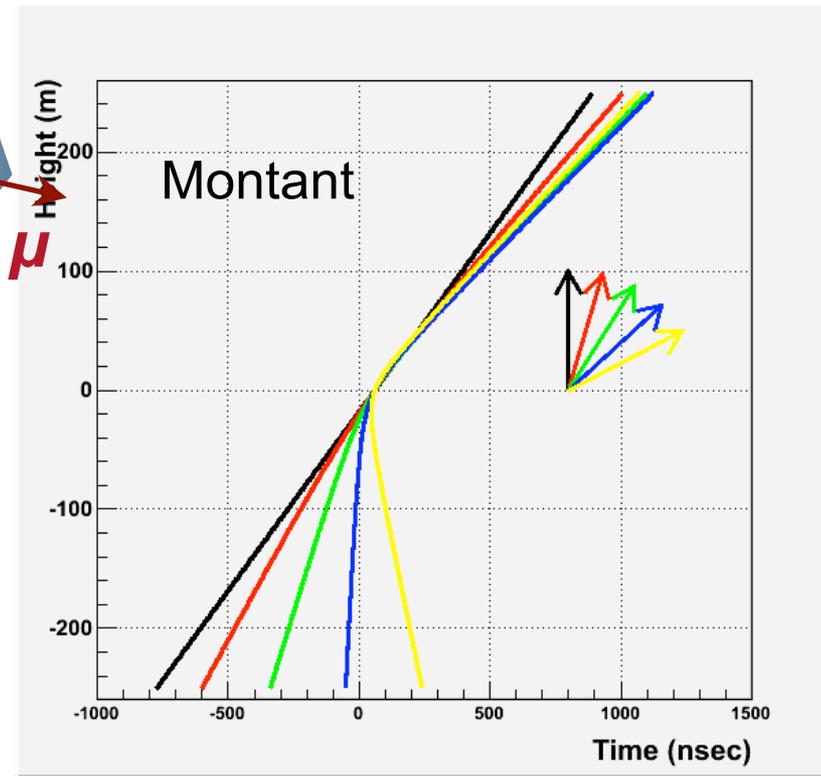


# Evénements reconstruits

Temps d'arrivée ( $t$ ) des  $\gamma$  en fonction de l'altitude ( $z$ )

⇒ **Fonction de l'angle zénithal et de la distance**

Plusieurs algorithmes utilisés par la collaboration 1D, 3D,  $\chi^2$ , ML

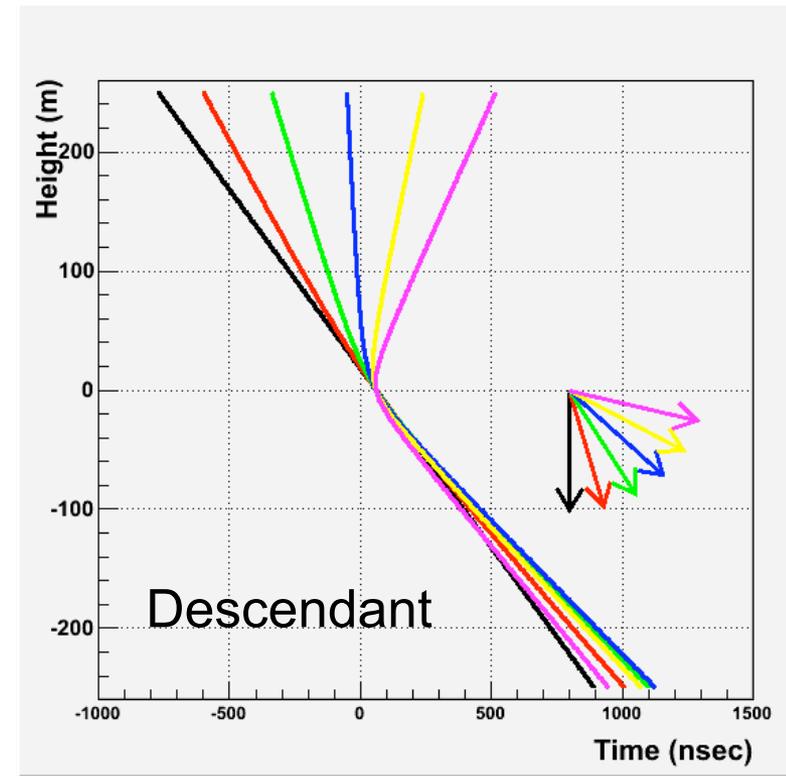
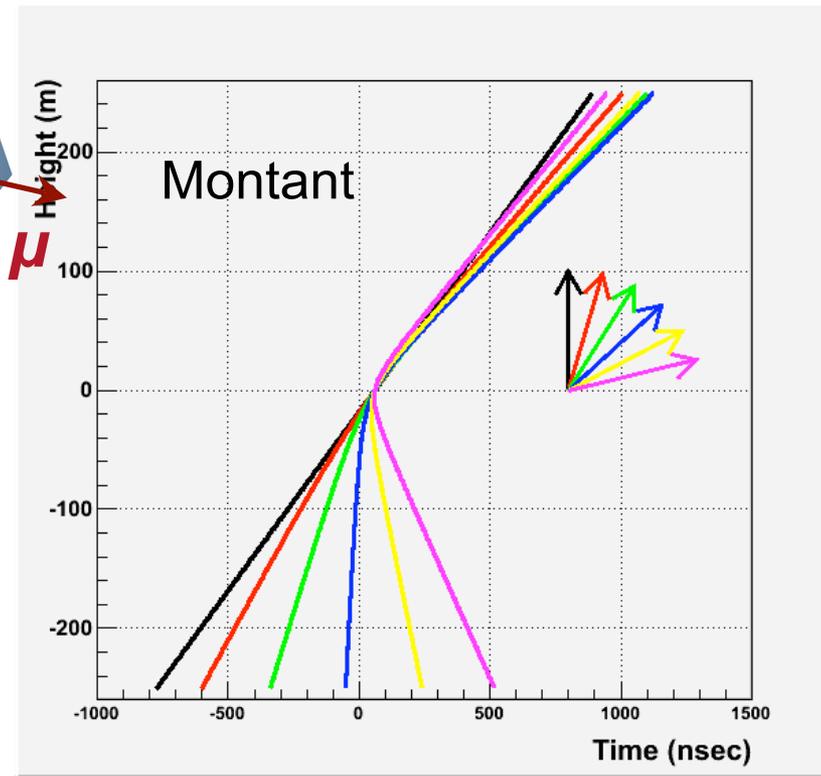


# Evénements reconstruits

Temps d'arrivée ( $t$ ) des  $\gamma$  en fonction de l'altitude ( $z$ )

⇒ Fonction de l'angle zénithal et de la distance

Plusieurs algorithmes utilisés par la collaboration 1D, 3D,  $\chi^2$ , ML

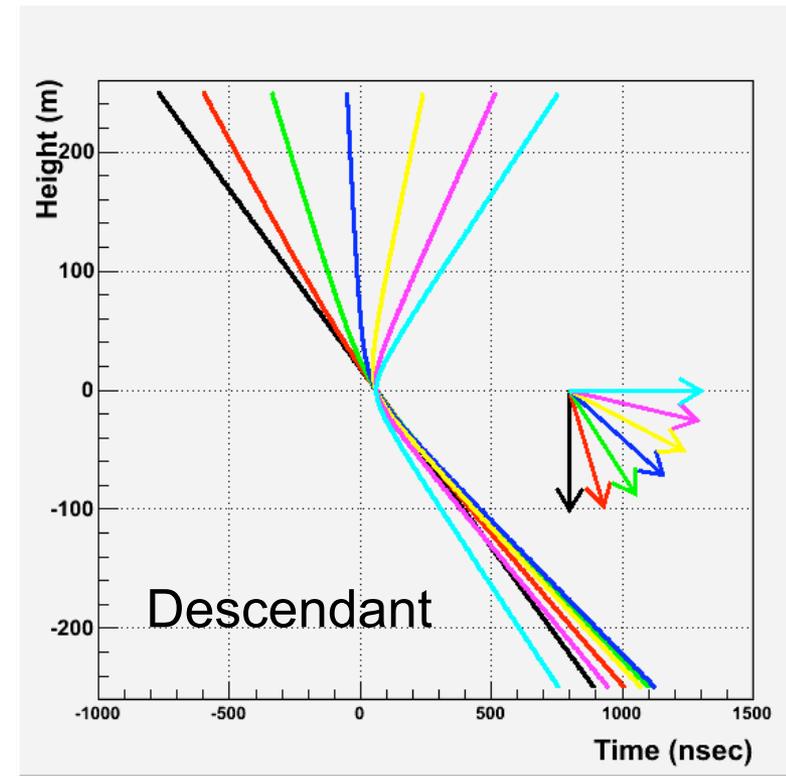
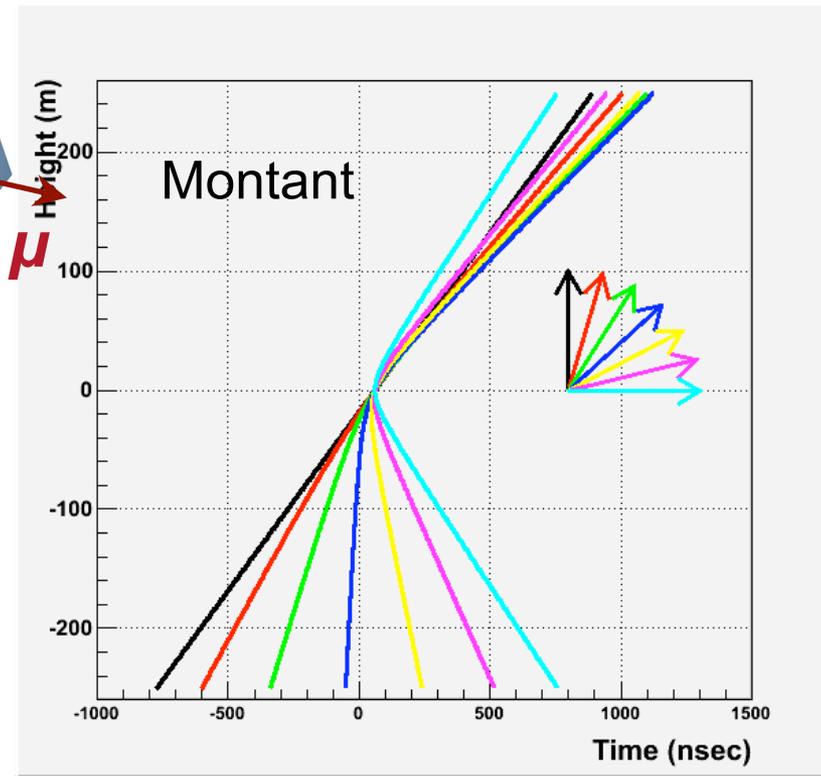


# Evénements reconstruits

Temps d'arrivée ( $t$ ) des  $\gamma$  en fonction de l'altitude ( $z$ )

⇒ Fonction de l'angle zénithal et de la distance

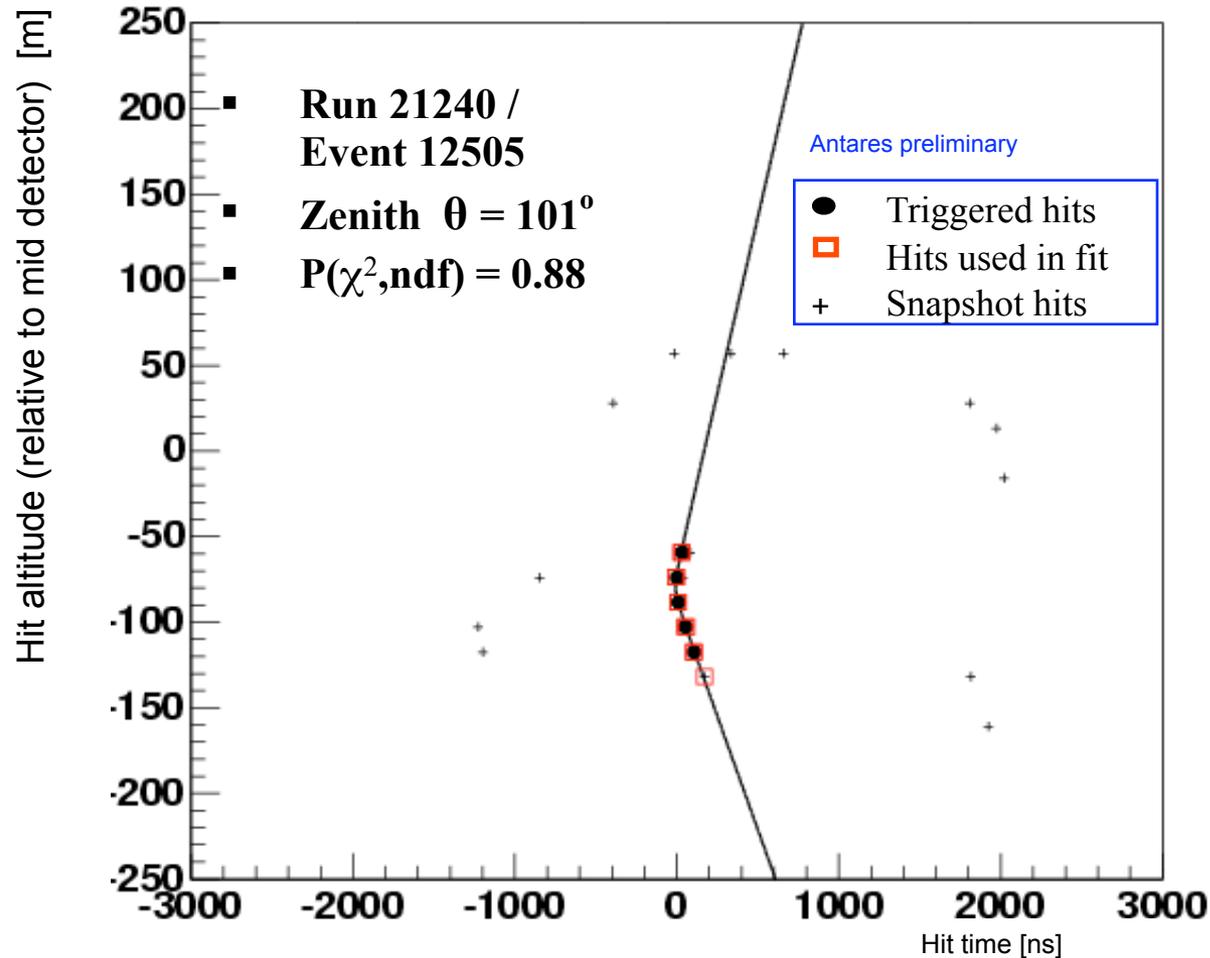
Plusieurs algorithmes utilisés par la collaboration 1D, 3D,  $\chi^2$ , ML



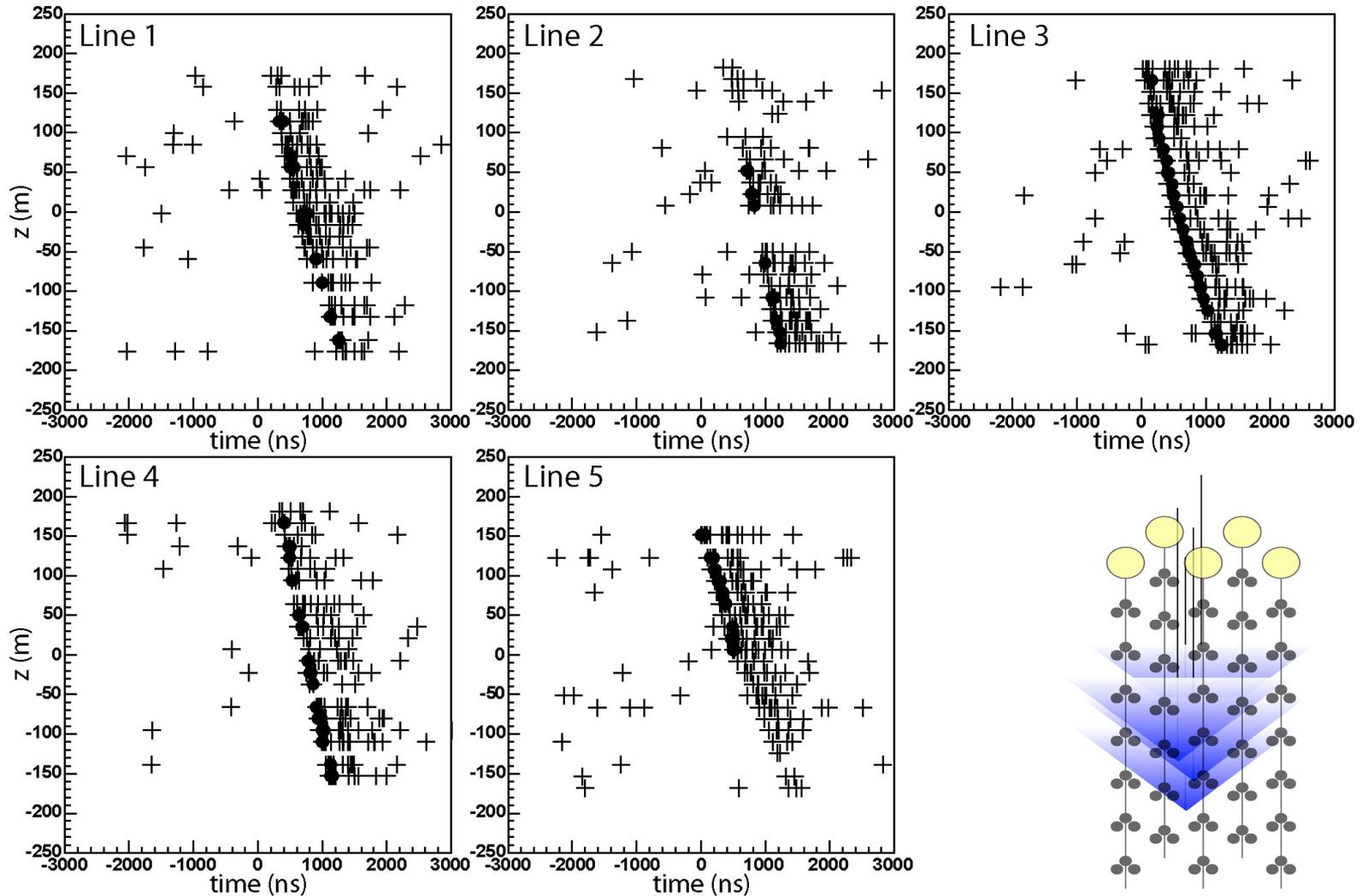
# Muon atmosphérique (L1)

Reconstruction à 1 ligne (peu sensible à l'azimuth) :

Minimisation  $\chi^2$  pour estimer l'angle zénithal

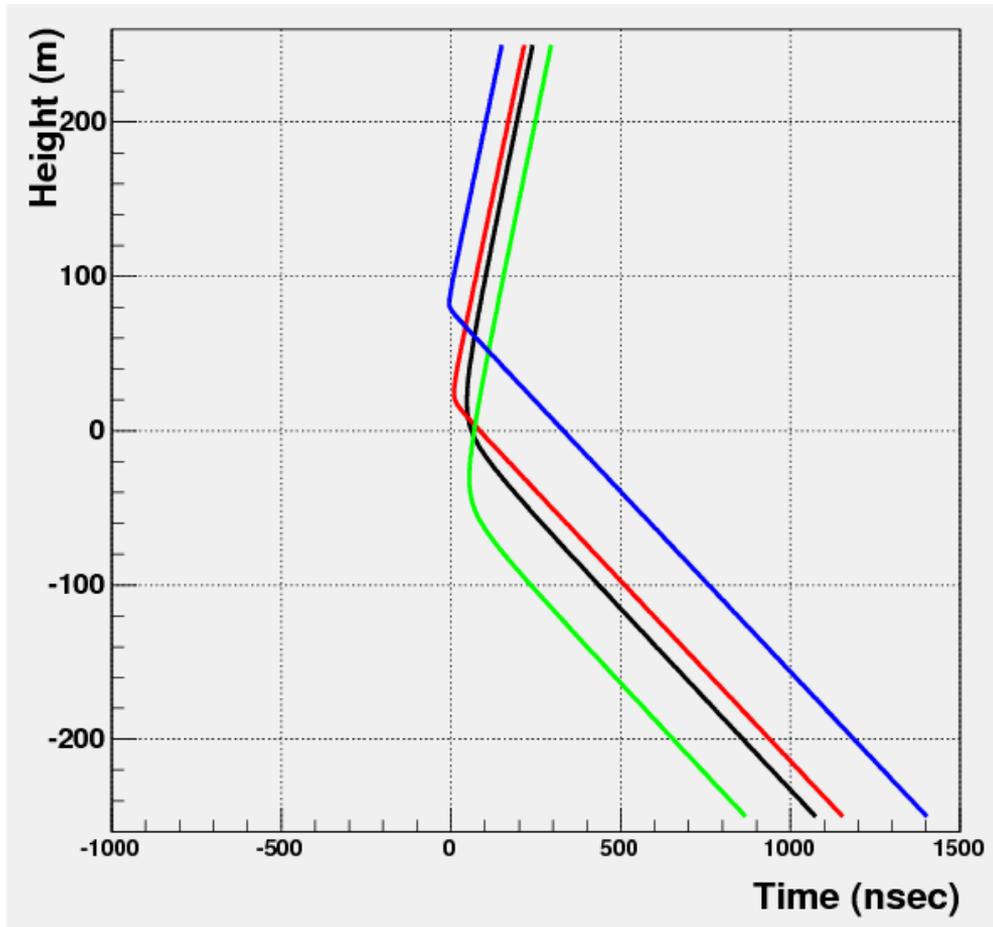


# Multi-muons à 5 lignes ?



Etudes en cours pour distinguer ces topologies

# Gerbe de multi-muon (MC)

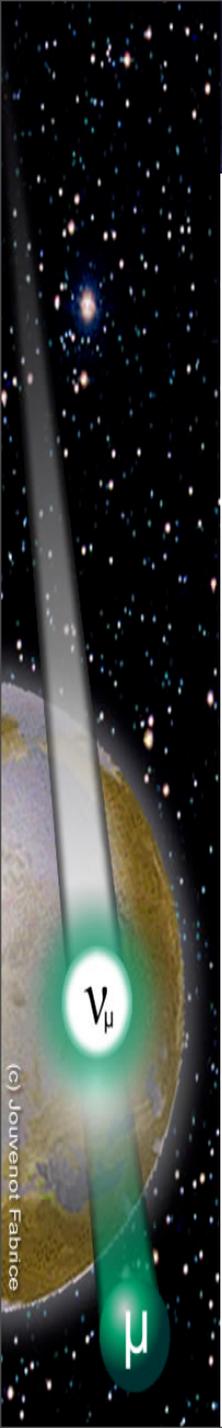
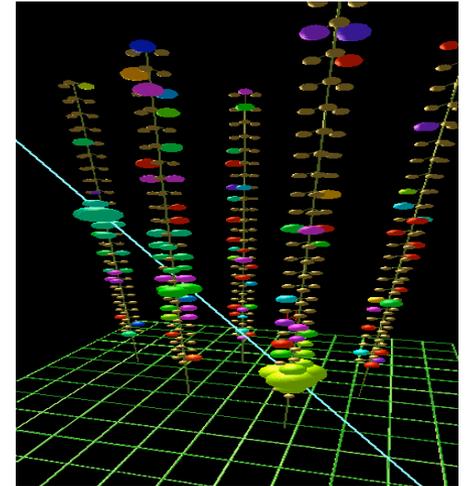
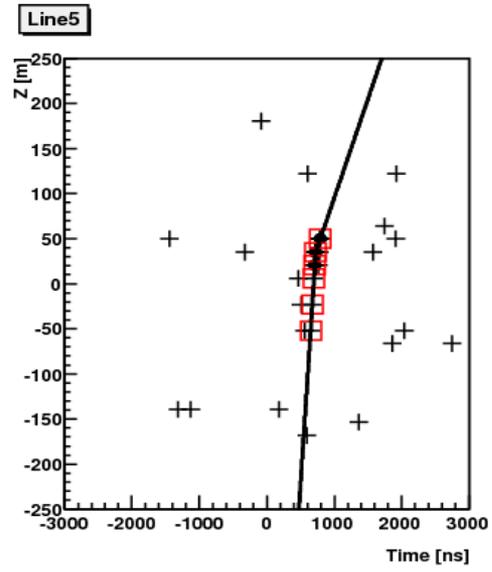
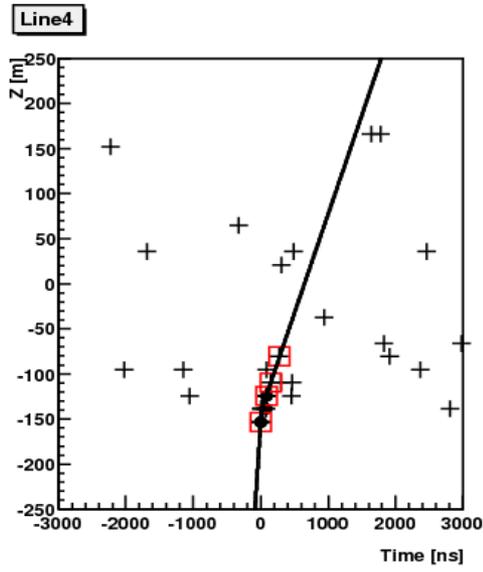
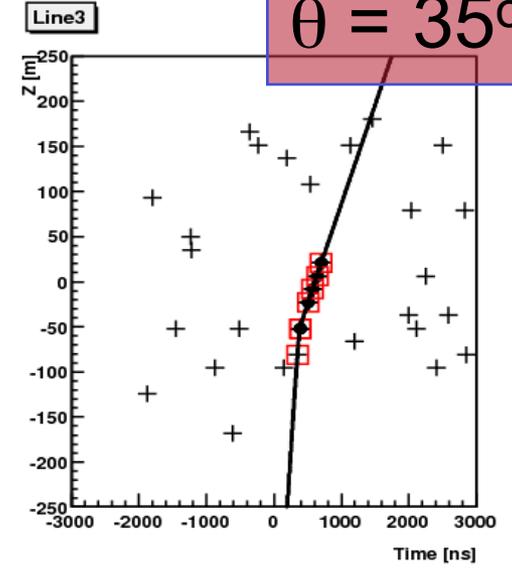
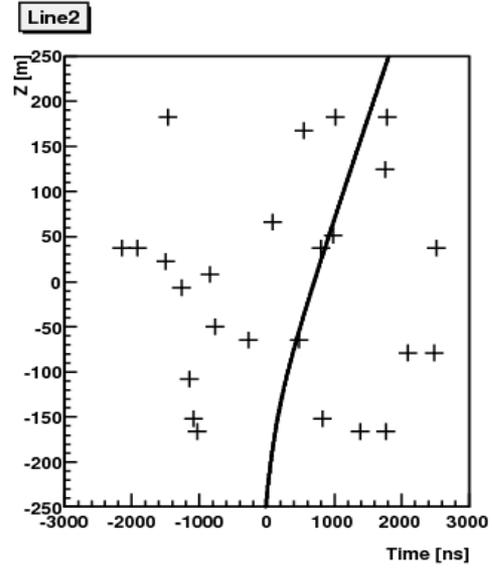
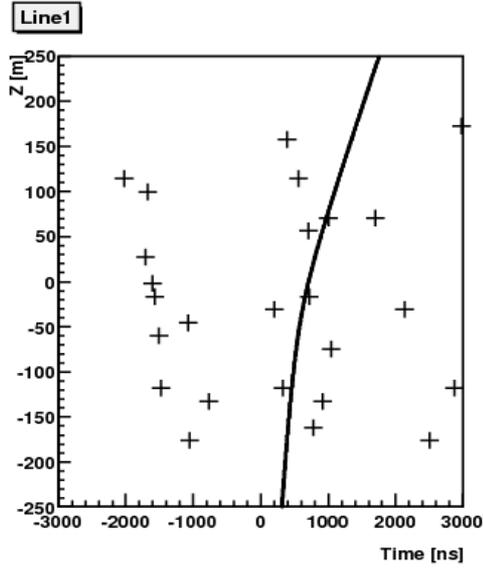


Dominant après filtrage  
(trigger)

Ex: Gerbe de multi-muons descendante à  $\theta = 120^\circ$   
Distances à la ligne 20m, 5m, 20m, 3m (black, red, green, blue )

# Candidat neutrino atmosphérique

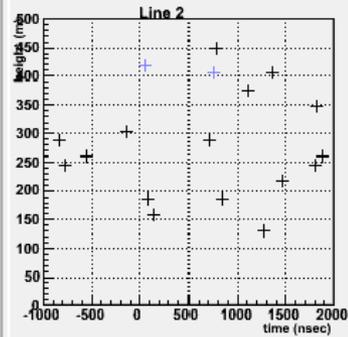
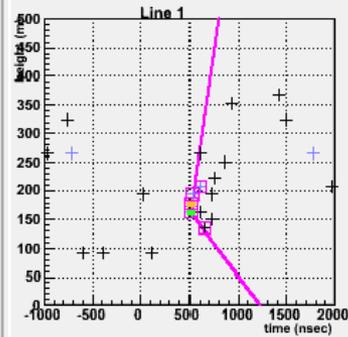
$\theta = 35^\circ$



# On-line event display

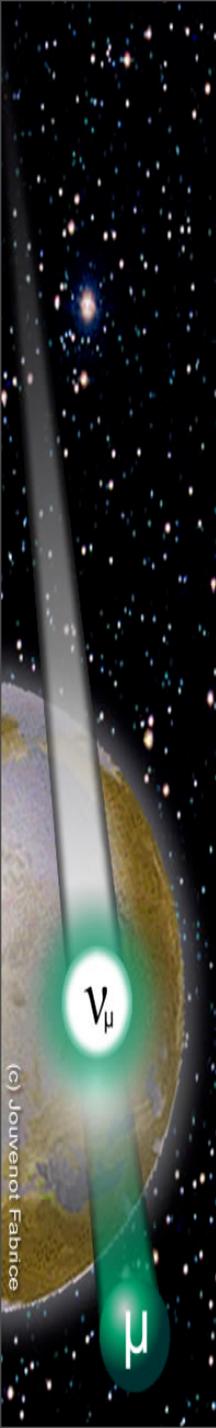
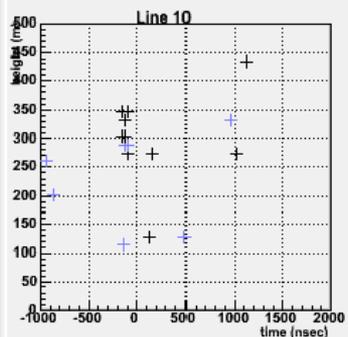
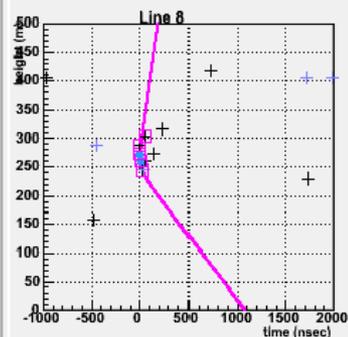
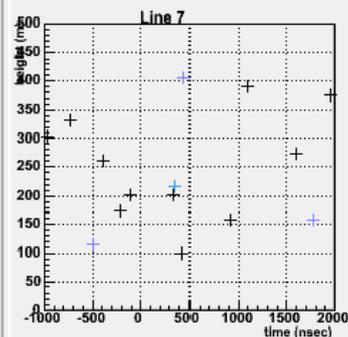
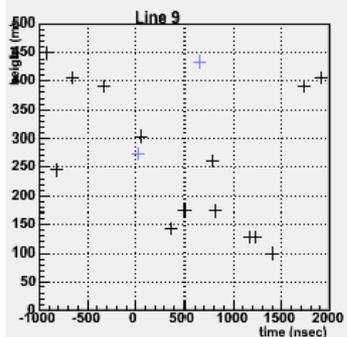
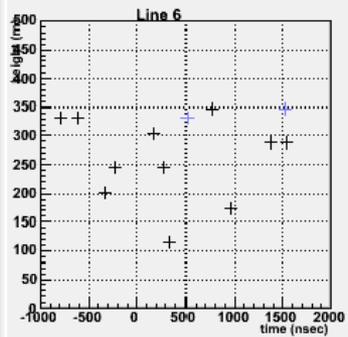
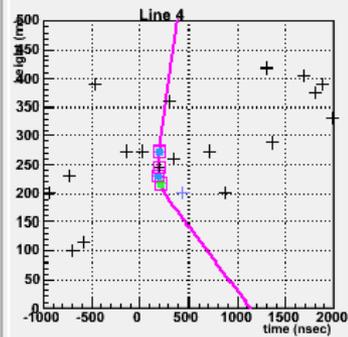
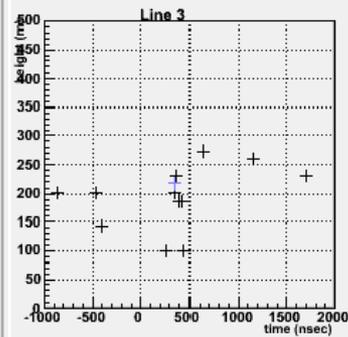
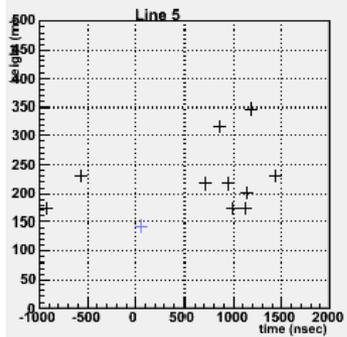
<http://www.nikhef.nl/~sottoriv/display/>

Zenith : 122.7  
Fit on 3 line(s)

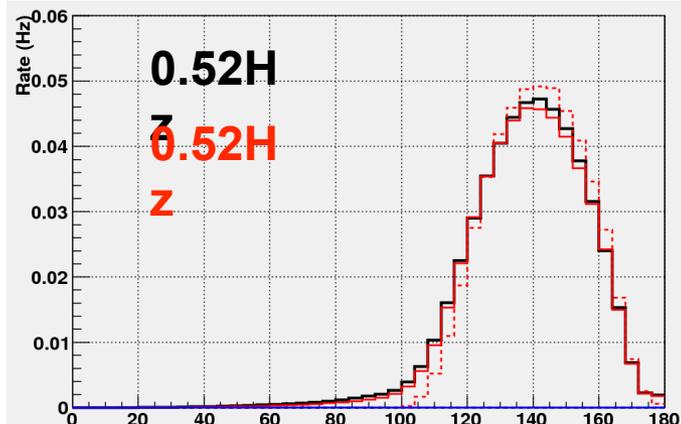


Run 31783 Frame 17925  
Mon Feb 4 18:50:52 2008  
Trigger bits 80000020  
Line 1-10 Physics Trigger tu

1 2 3 4 5 6 photons  
● ● ● ● ● ●



# Comparaison MC-Données (Nadir)



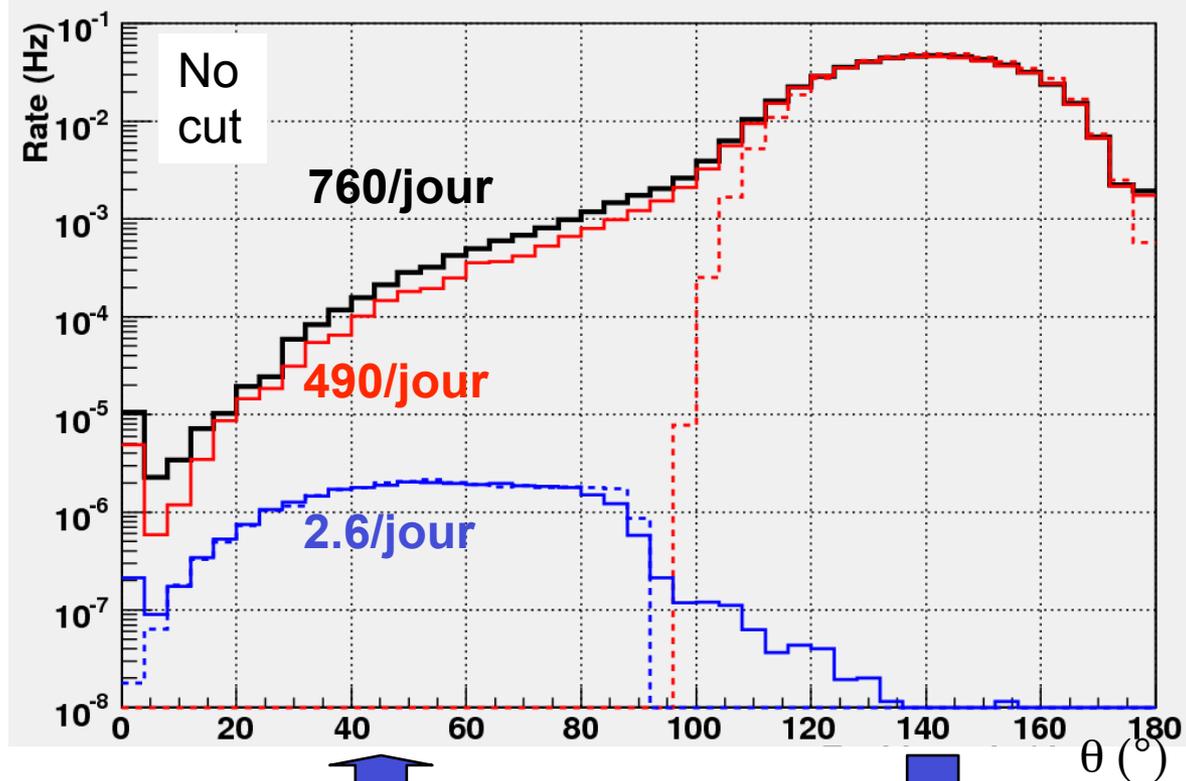
**PRELIMINARY**

**Muons** — Reconstruction  
**Neutrinos** - - - Vérité MC  
**Data**

Ajustement  
à plusieurs lignes

Reconstruction  
quasi-online

36,8 jours cumulés  
01/02/07 - 25/05/07

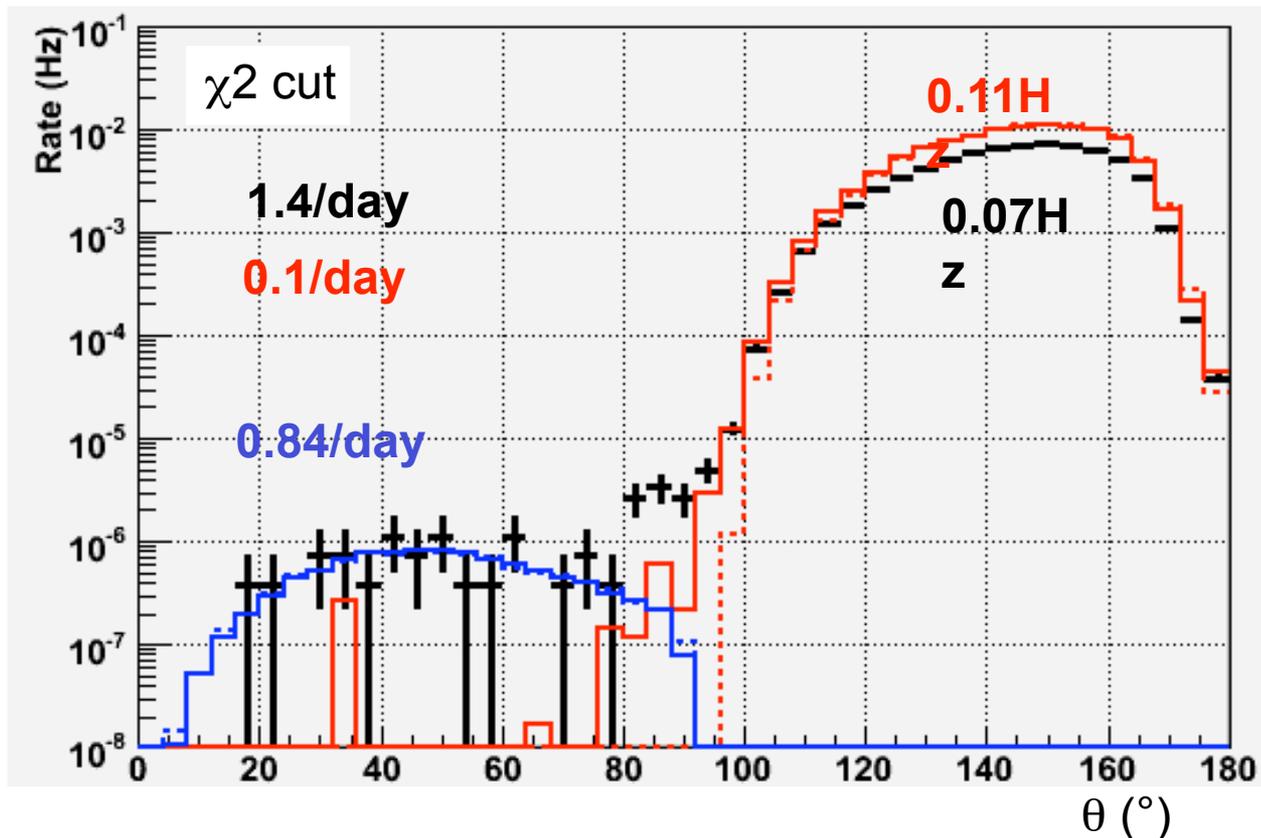


# Comparaison MC-Données (Nadir)

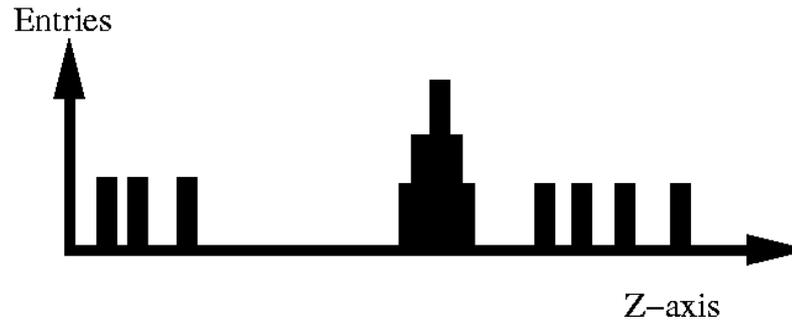
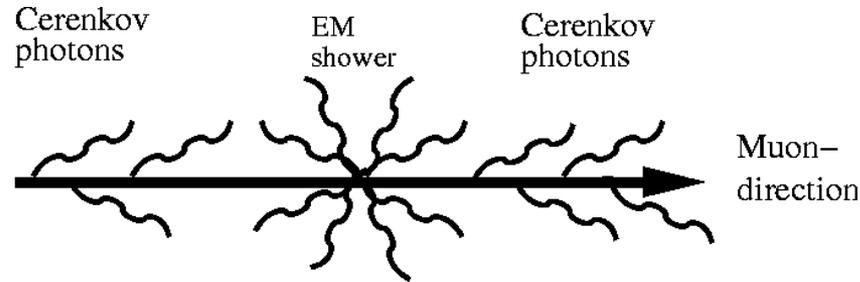
MC = Corsika  
Horandel flux  
QGSJET hadronic model

**PRELIMINARY**

— Reconstruction  
- - - MC



# Gerbes électromagnétiques



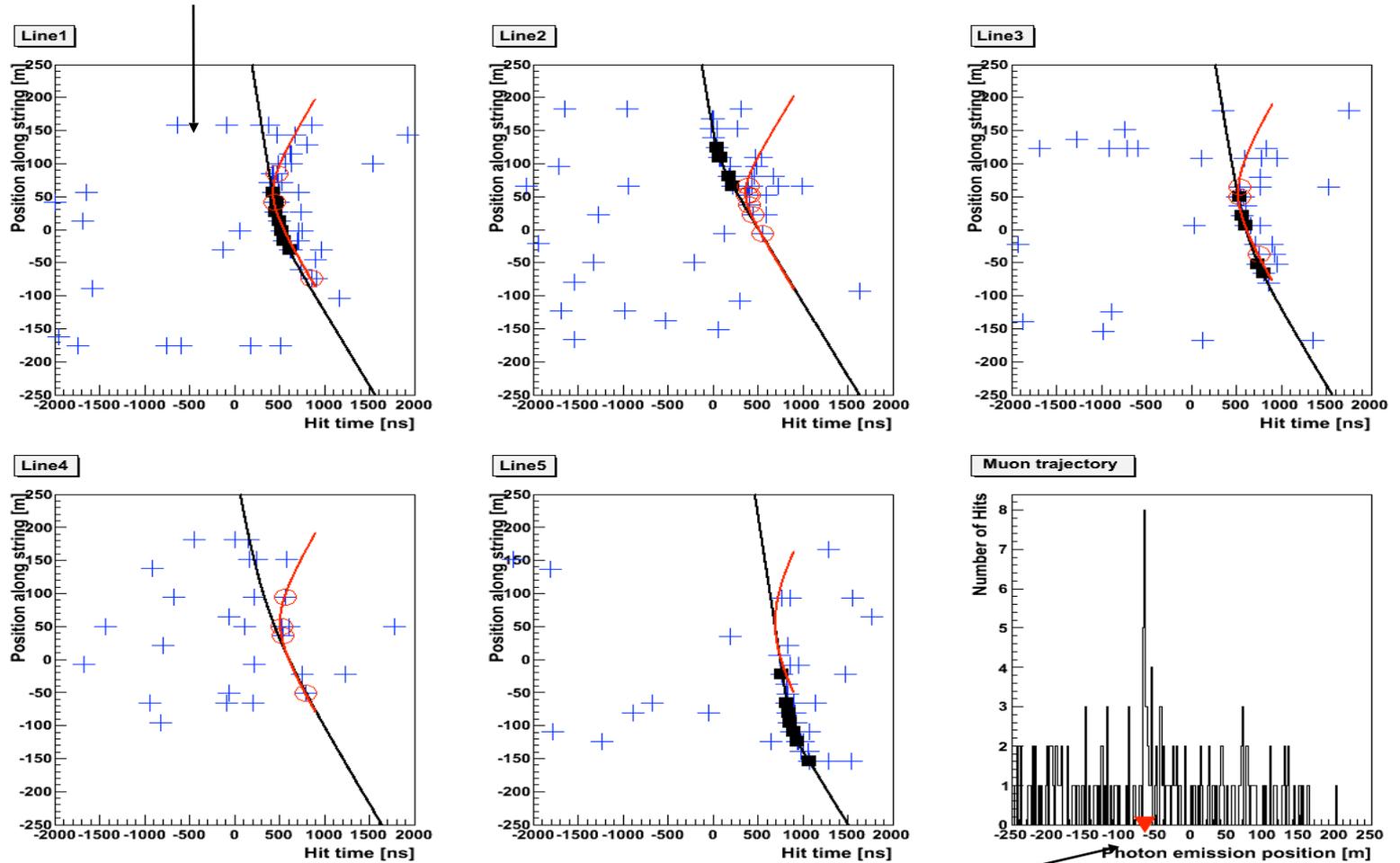
Emission du muon :

- Lumière Tcherenkov continue
- Gerbes électromagnétiques discrètes (quasi-ponctuelles)

Transformation le long de la trajectoire du muon, nettoyage des hits  
⇒ Pic indique la position de la gerbe

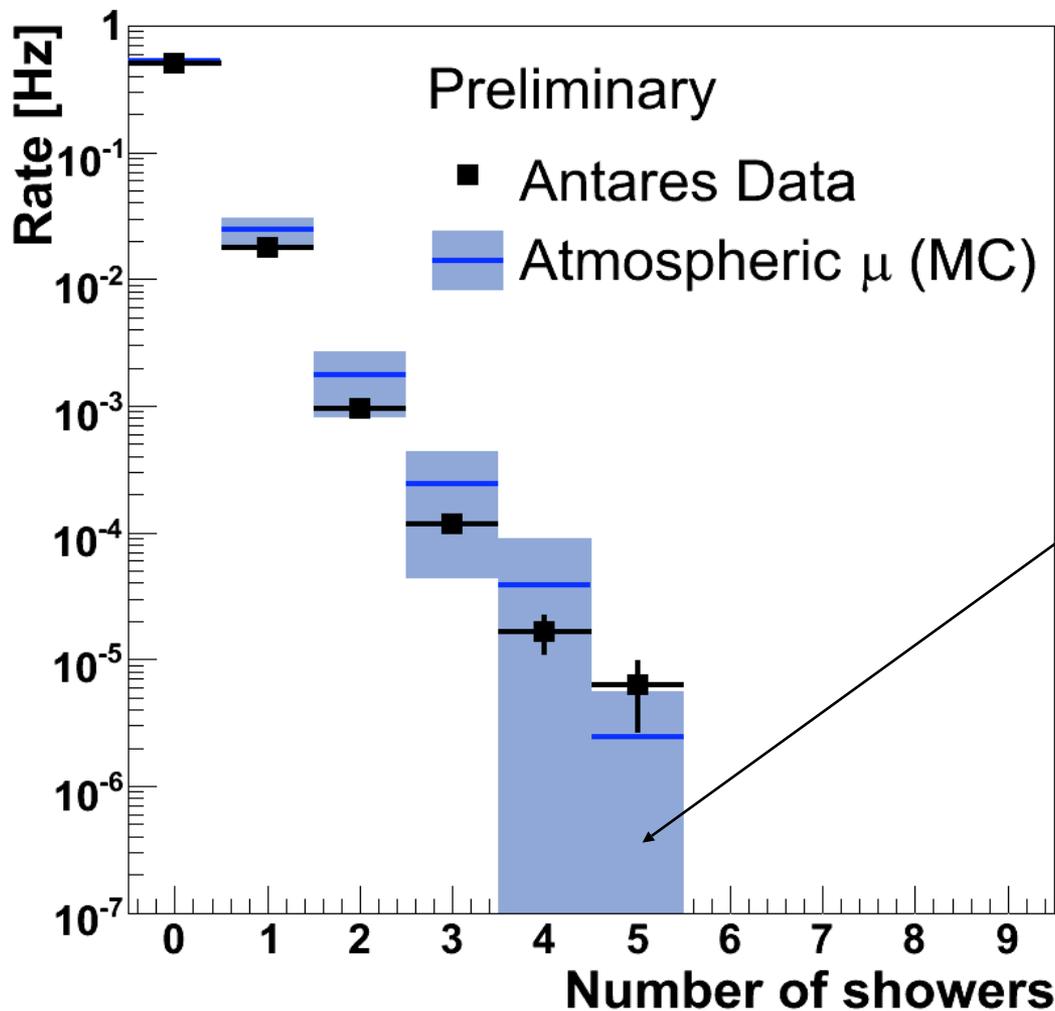
# Gerbes électromagnétiques

Exemple avec résultat d'une reconstruction de la gerbe à 3D



Pic = Position de la gerbe le long de la trajectoire du muob

# Gerbes électromagnétiques

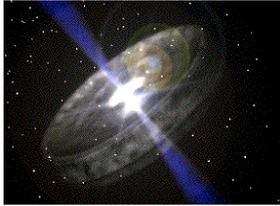


Données : 5,6 jours  
BG : 61 kHz

MC (MUPAGE) normalisé  
Erreurs systématiques

- Taux de bruit
- $dE/dX$  muon
- Acceptance
- Absorption
- $\mu$  Multiplicité

# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

Sources de neutrinos

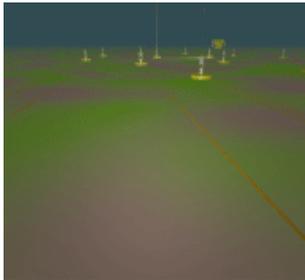


## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels

Quelques résultats



## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

Etapes de la construction

Analyses en cours



## Le projet KM3NeT

# Plan de l'exposé



## Astronomie neutrino

Motivations scientifiques

Sources de neutrinos

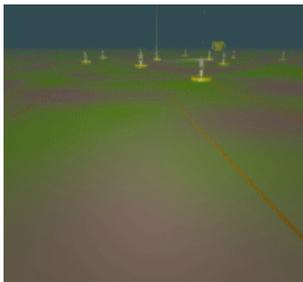


## Les télescopes à neutrinos

Principes de détection

Les télescopes actuels

Quelques résultats



## Le télescope Antares

Le détecteur

Les performances attendues

Etapes de la construction

Analyses en cours



## Le projet KM3NeT

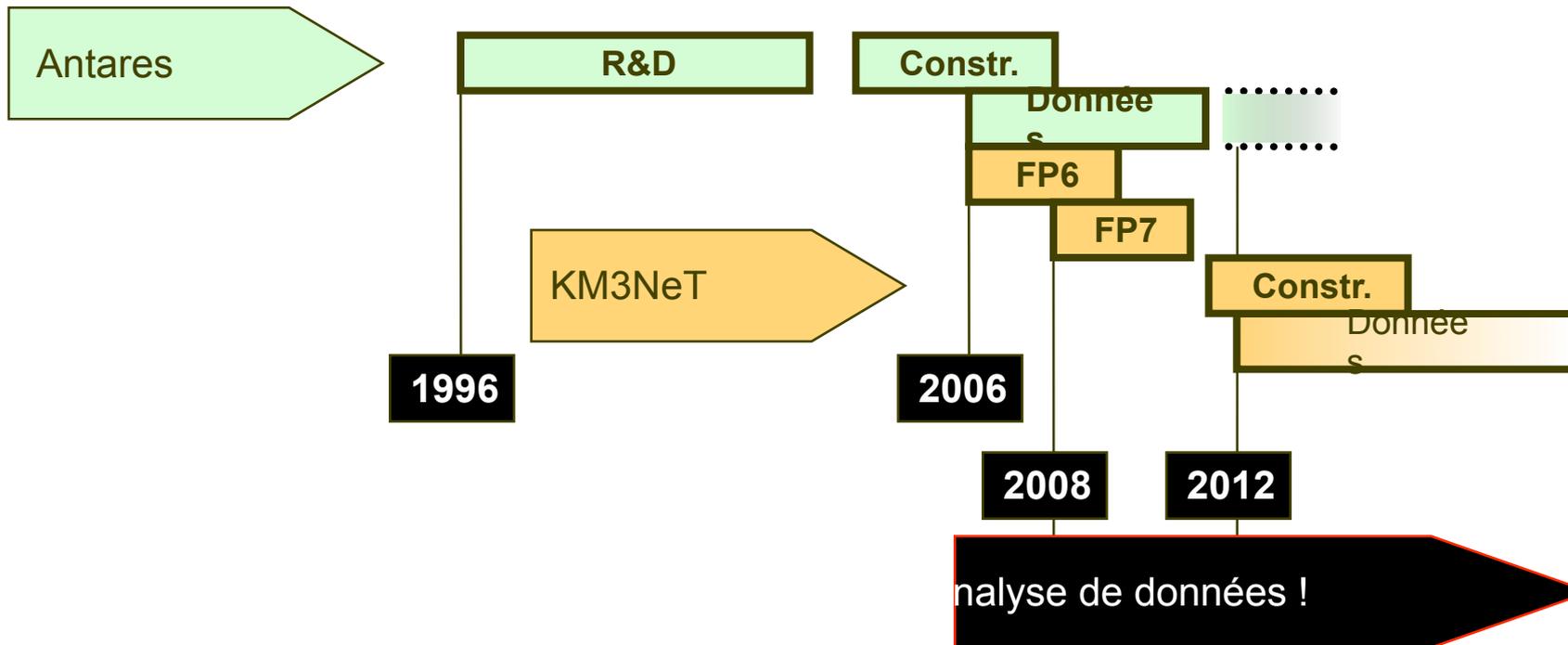
# Calendrier

## FP6 design study

- But : définir le futur détecteur km<sup>3</sup>
- Démarré le 1<sup>er</sup> février 2006 pour 3 ans
- Moyens 9 M€
- Etapes
  - CDR, +18 mois  
→ prêt
  - TDR, fin de contrat  
→ 9 mois de prolongation demandés

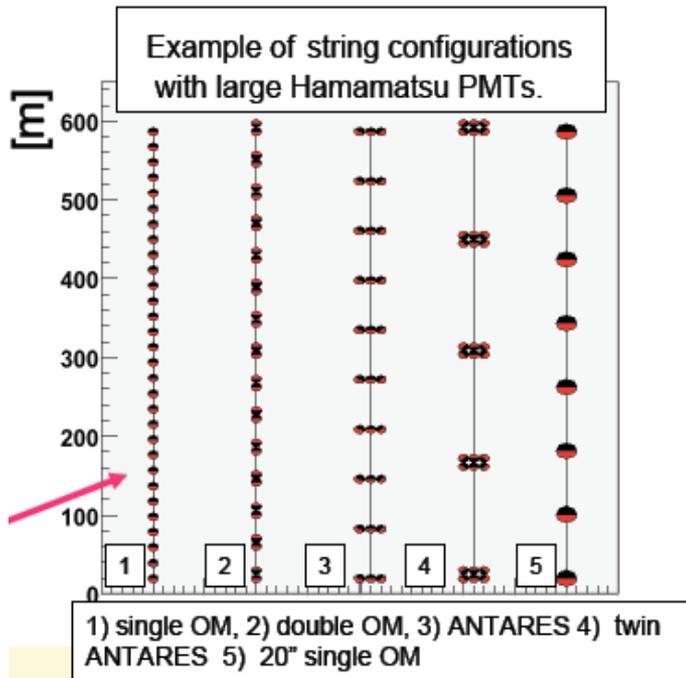
## FP7 preparatory phase

- But : préparer la construction du km<sup>3</sup>
  - Moyens de productions
  - Accords stratégiques ( site, MOU...)
- Démarré en mars 2008 pour 3 ans
- 5 M€ attribués
- Interconnexion EMSO et ESONET

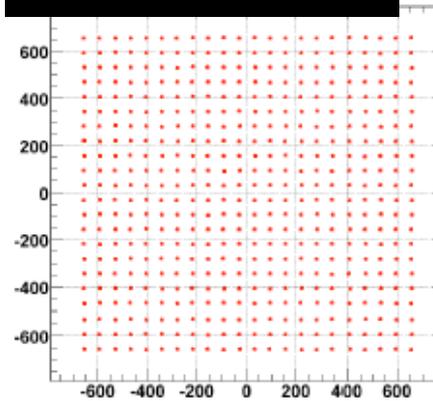


# WP2 : physique et analyse

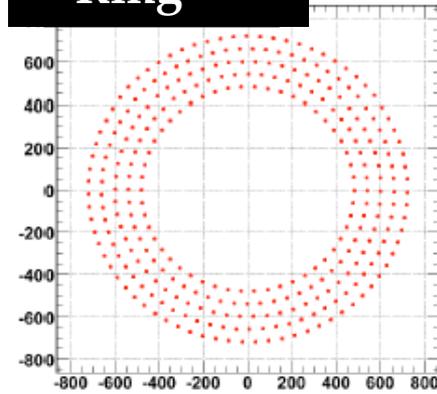
Différentes géométries sont à l'étude – Optimisation du détecteur 1 TeV- 1 PeV



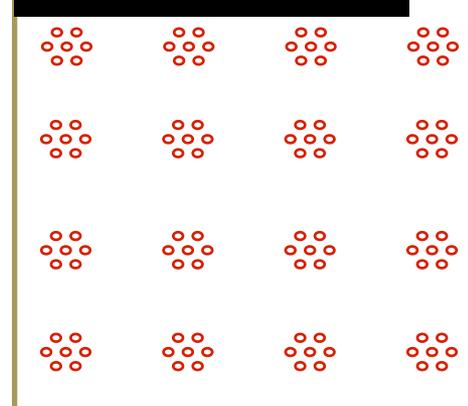
## Cuboid



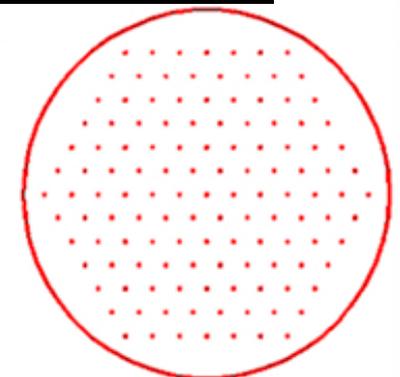
## Ring



## Clustered



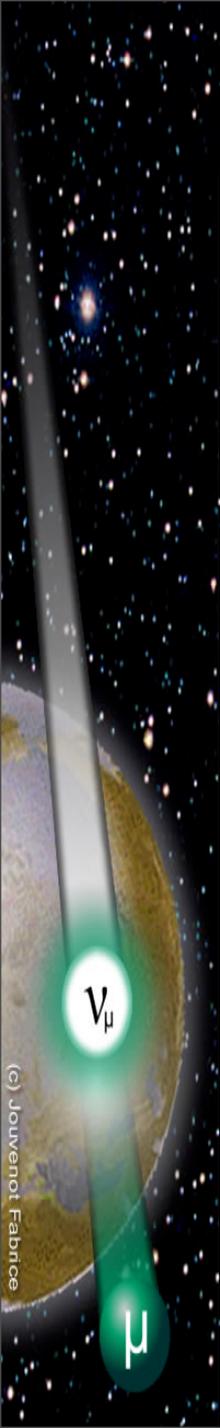
## Hexagonal



# Choix du site

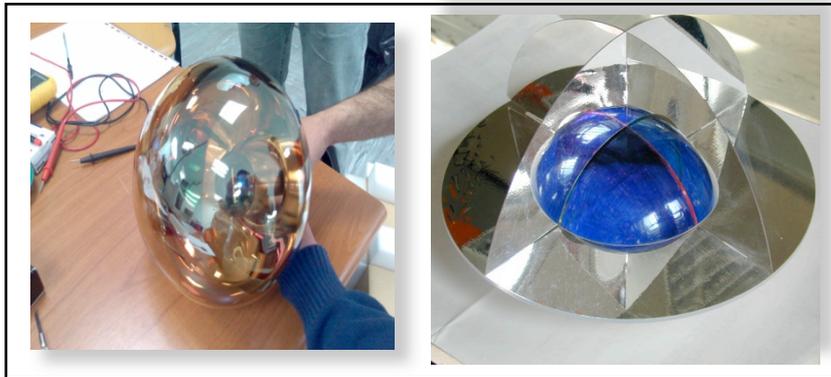
Site choice will depend on:

- Depth
- Distance from shore
- Bioluminescence rate
- Sedimentation
- facilities
- Biofouling
- Sea currents
- Earth quake profile
- Access to on-shore

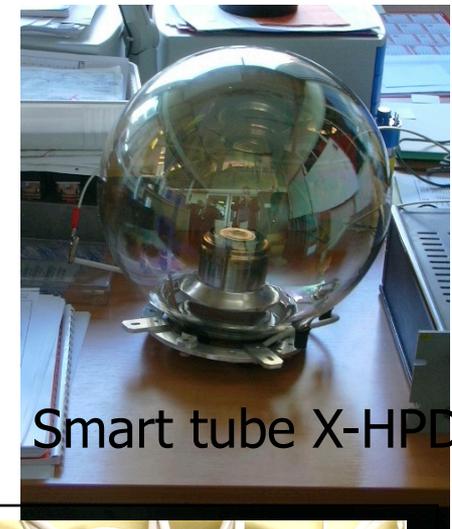


# Choix des modules optiques

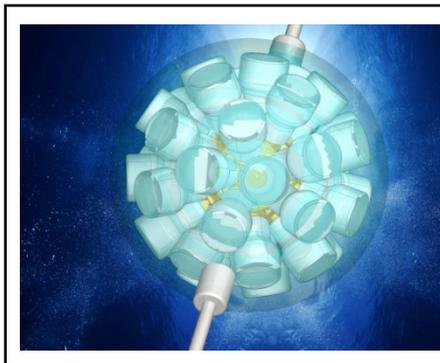
Réduction du nombre de connecteurs par surface de détection



Segmentation of photo cathode of 10" PMT



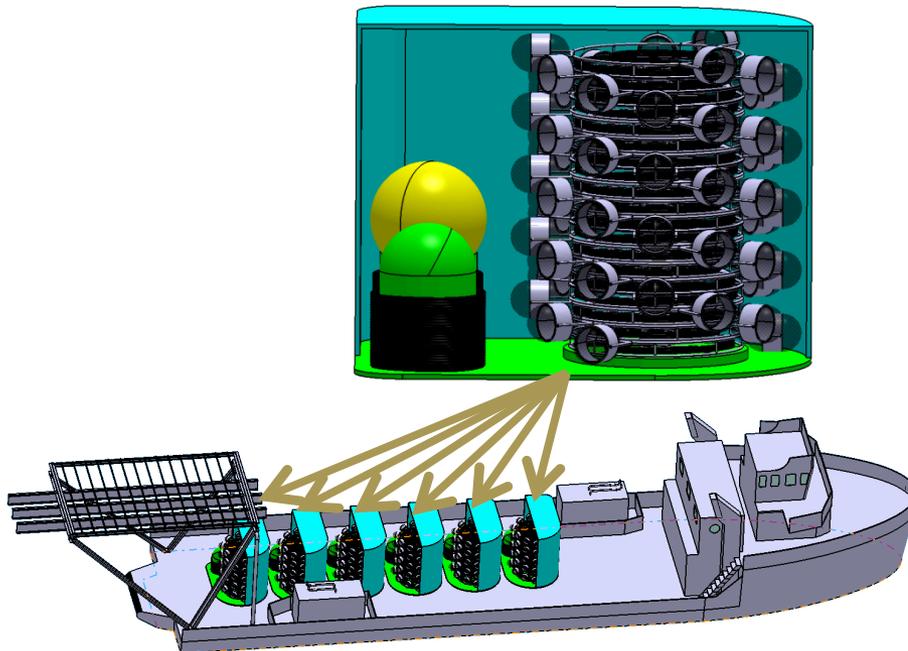
Smart tube X-HPD



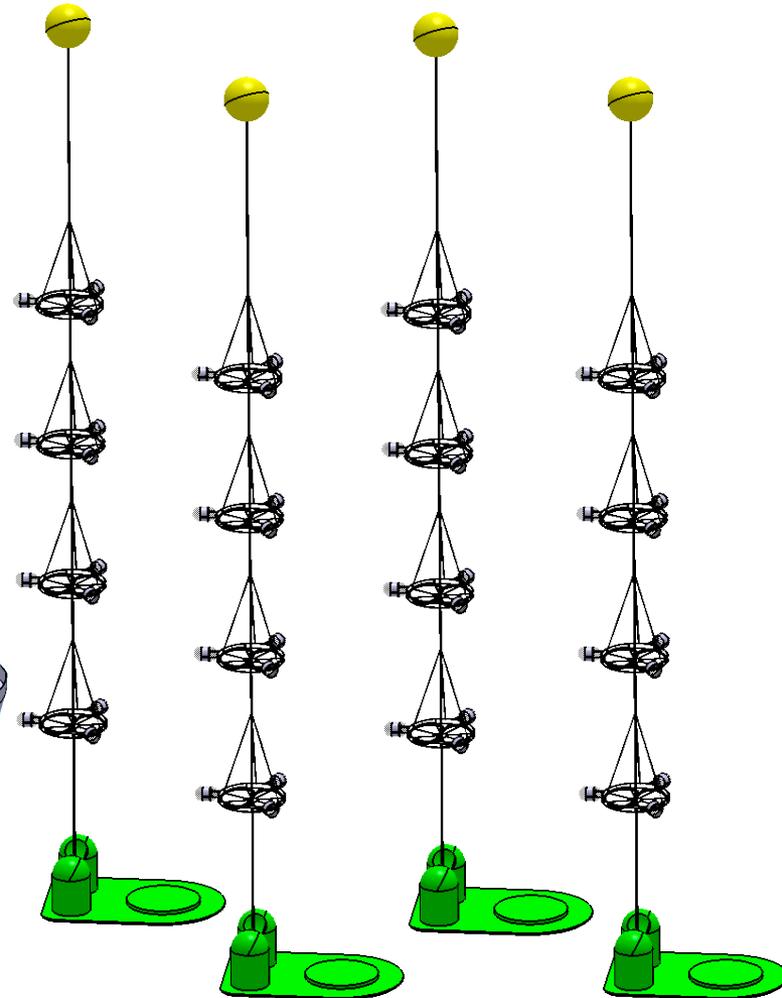
Multi PMTs in one glass sphere

# Technique de déploiement

Furled detector unit before the deployment



Unfurled detector units



Many detector units can be deployed in one mission saving time and money

# Les sciences associées

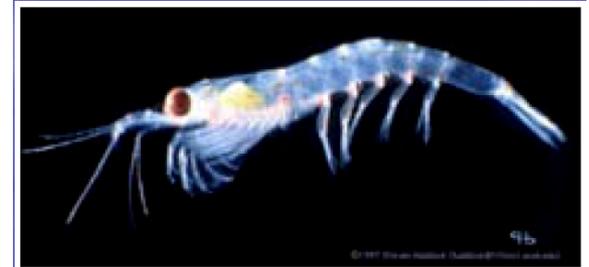
**KM3NeT observatoire multidisciplinaire :**

**Océanologie**

**Biologie marine**

**Climatologie**

**Géologie et géophysique**



KM3NeT, un site relais pour

- **ESONET** (European Sea-floor Observatory NETwork): strategic long term monitoring capability in geophysics, geo-technics, chemistry, biochemistry, oceanography, biology and fisheries.
- **EMSO** (European Multi-disciplinary Sea-floor Observatory research infrastructure): management and conservation of marine resources, geo-hazards and climate change in the deep-sea

# Conclusions

- Démonstration de la faisabilité d'un détecteur à  $\nu$  sous-marin
- ANTARES est le plus grand TN de l'hémisphère nord...
- 10 lignes en fonctionnement
- Une plateforme pour les sciences associées
- Premiers neutrinos sous-marins observés
- Détecteur final 12 lignes début 2008 :  
Exploitation scientifique  $\geq 5$  ans
- Etape majeure vers un détecteur  $\text{KM}^3$  méditerranéen