

Astronomie des neutrinos de hautes énergies

Un aperçu (partiel) un peu biaisé en faveur de :

- Technique Tcherenkov
- ANTARES



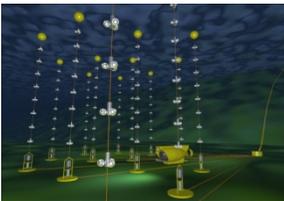
Antoine Kouchner
Université Paris 7 Diderot
Laboratoire APC

Plan de l'exposé



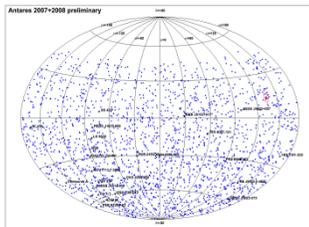
Astronomie neutrino

Rappels historiques
Motivations scientifiques
Sources de neutrinos



Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres
Principes de détection
Les télescopes actuels
Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques études

Etalonnage
Flux diffus
Recherche de sources ponctuelles
Analyses multi-messagers



Cours de S. Katsanevas (vendredi) → **Le projet KM3NeT**

Les télescopes à neutrinos (TeV)

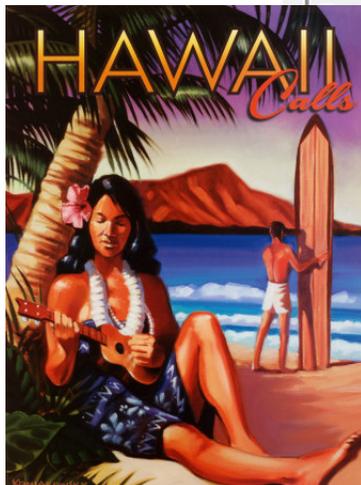
{ANTARES, BAIKAL, ICECUBE} en fonctionnement



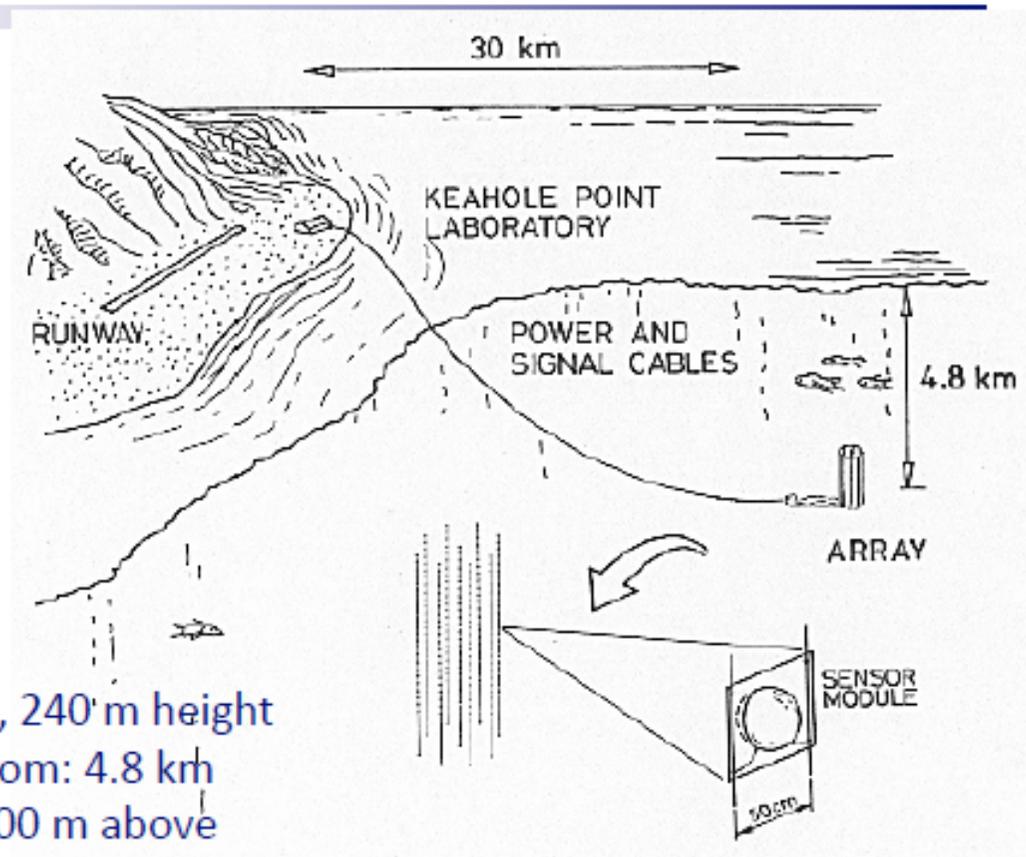
{ANTARES, NEMO, NESTOR} ∈ Consortium KM3NeT

Années 80 : le premier projet (concret)

See also: A.Roberts: The birth of high-energy neutrino astronomy: a personal history of the DUMAND project, Rev. Mod. Phys. 64 (1992) 259.



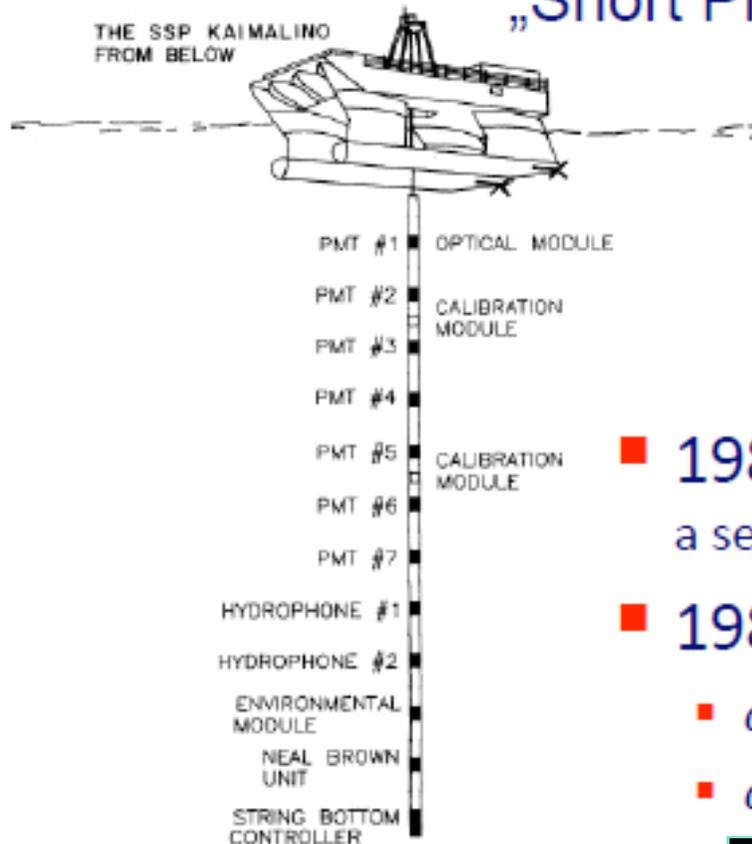
DUMAND-II (The Octagon)



- 9 strings
- 216 OMs
- 100 diameter, 240' m height
- Depth of bottom: 4.8 km
- Lowest OM 100 m above bottom

R&D à Hawaii

„Short Prototype String“



- 1982-87:
a series of 14 cruises, with two lost strings

- 1987: success !
 - *depth-intensity curve*
 - *angular distributions*

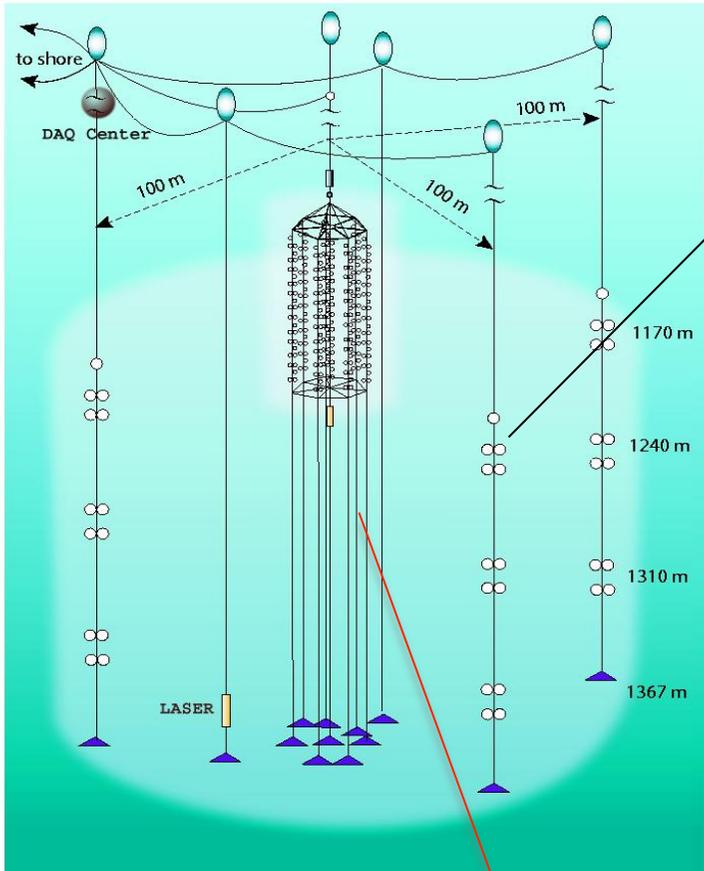
“At first, when we talked about DUMAND our accelerator friends laughed and said we were crazy. Now they ask why have you not got it operating yet !”
J G Learned (1992)

- December 1993: deployment of first string and connection to junction box. Failure after several hours

1995: DUMAND project is terminated



Baikal NT status



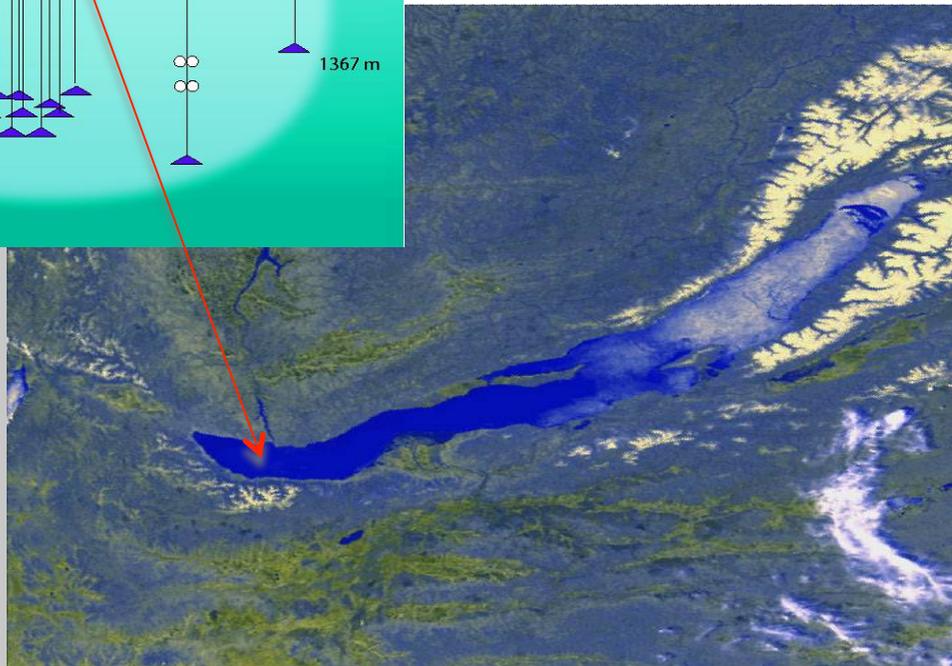
NT200+ is now operating



Quasar
photodetector
($\text{Ø}=37\text{cm}$)



**GVD TDR expected
in 2011**



~ 3.6 km
to shore
1070m depth

NT200 +

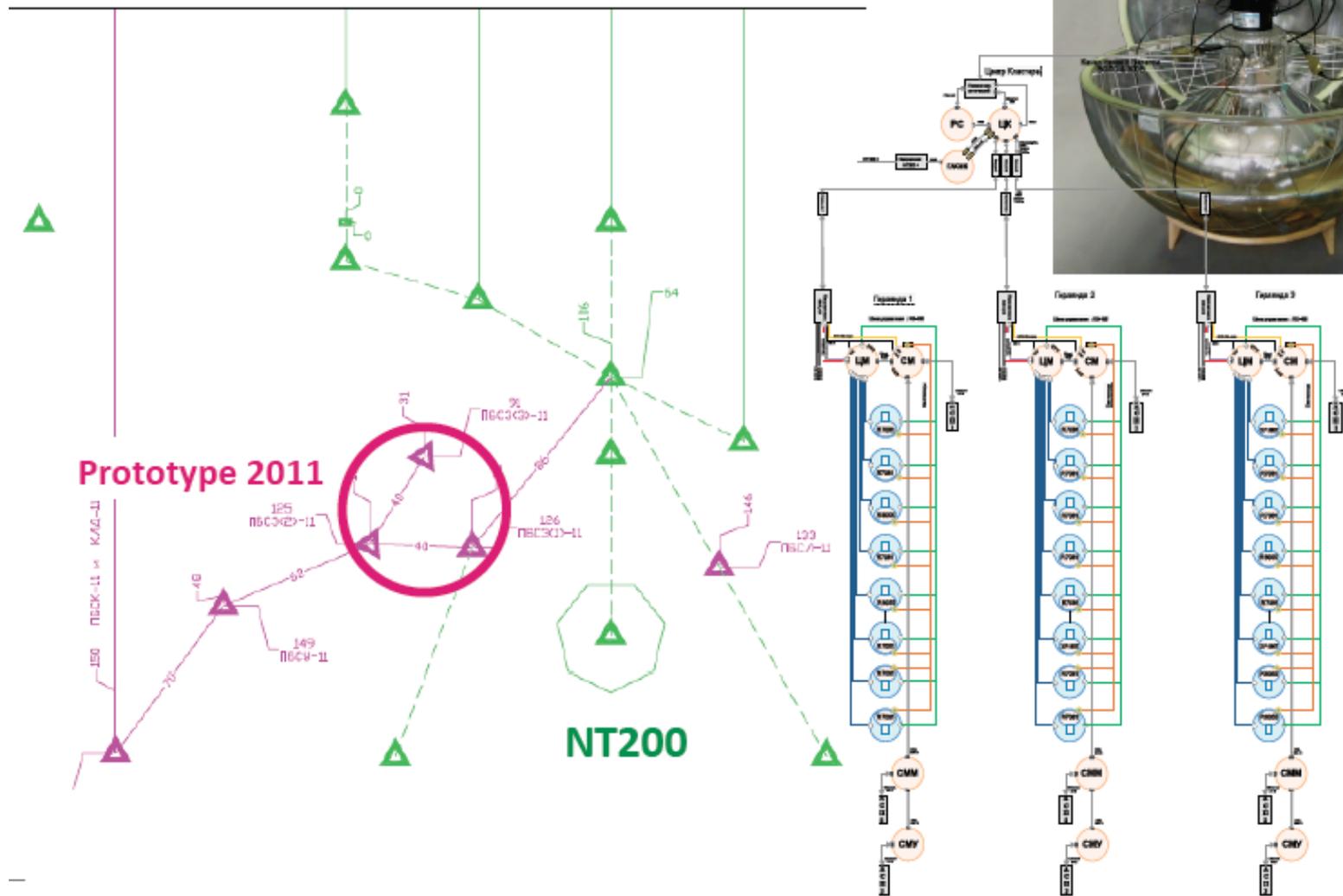
8 strings (192 OMs) +
3 outer strings (36 OMs)

Height x Ø
210m x 200m
 $V_{\text{inst}} = 4 \times 10^6 \text{m}^3$

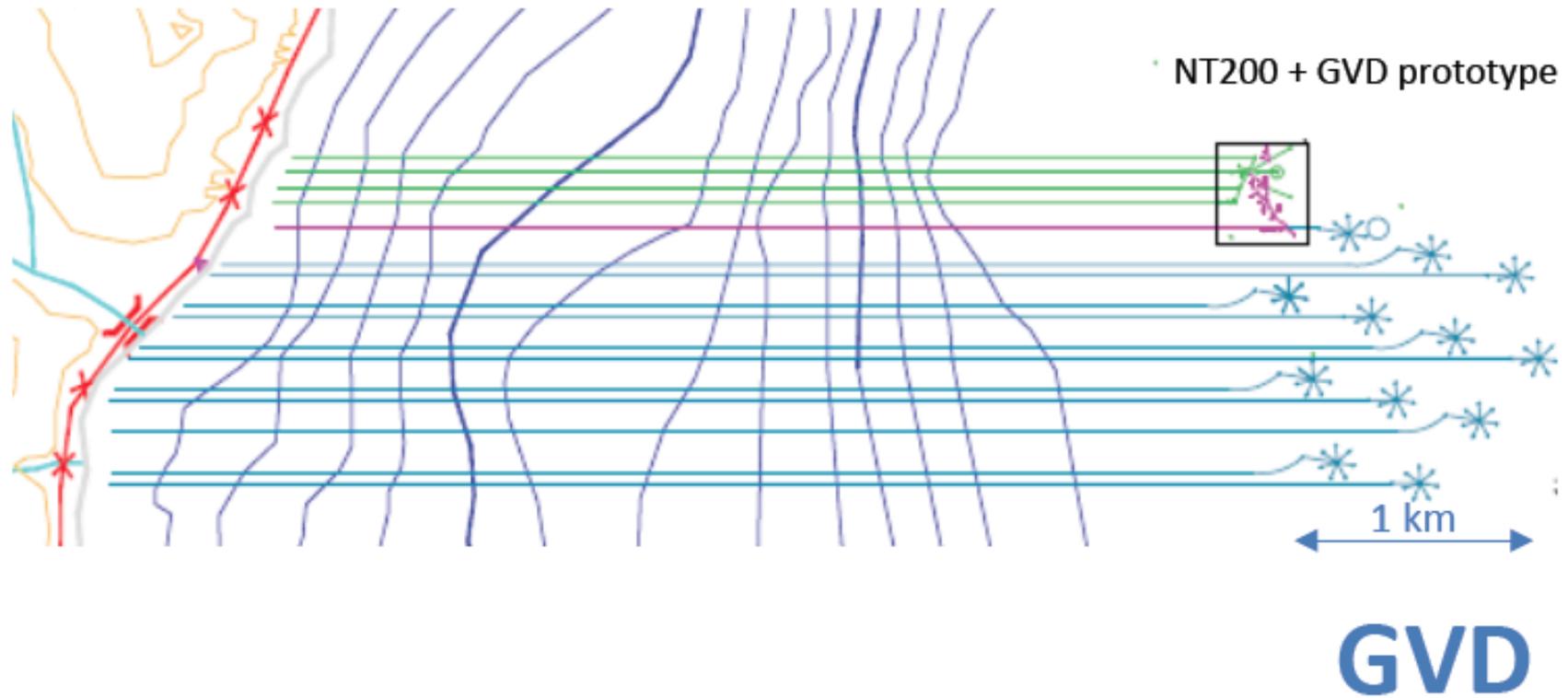
Eff. shower volume:
10 PeV ~ 10 Mton

Includes 2 prototype
strings for GVD
New OM, DAQ, cabling
triggering systems

Baikal status : prototypes pour GVD

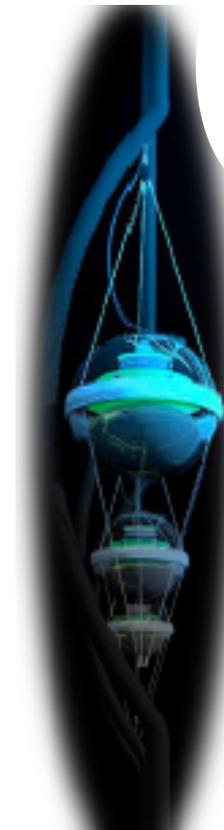
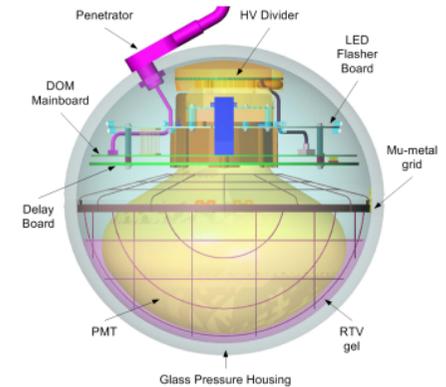
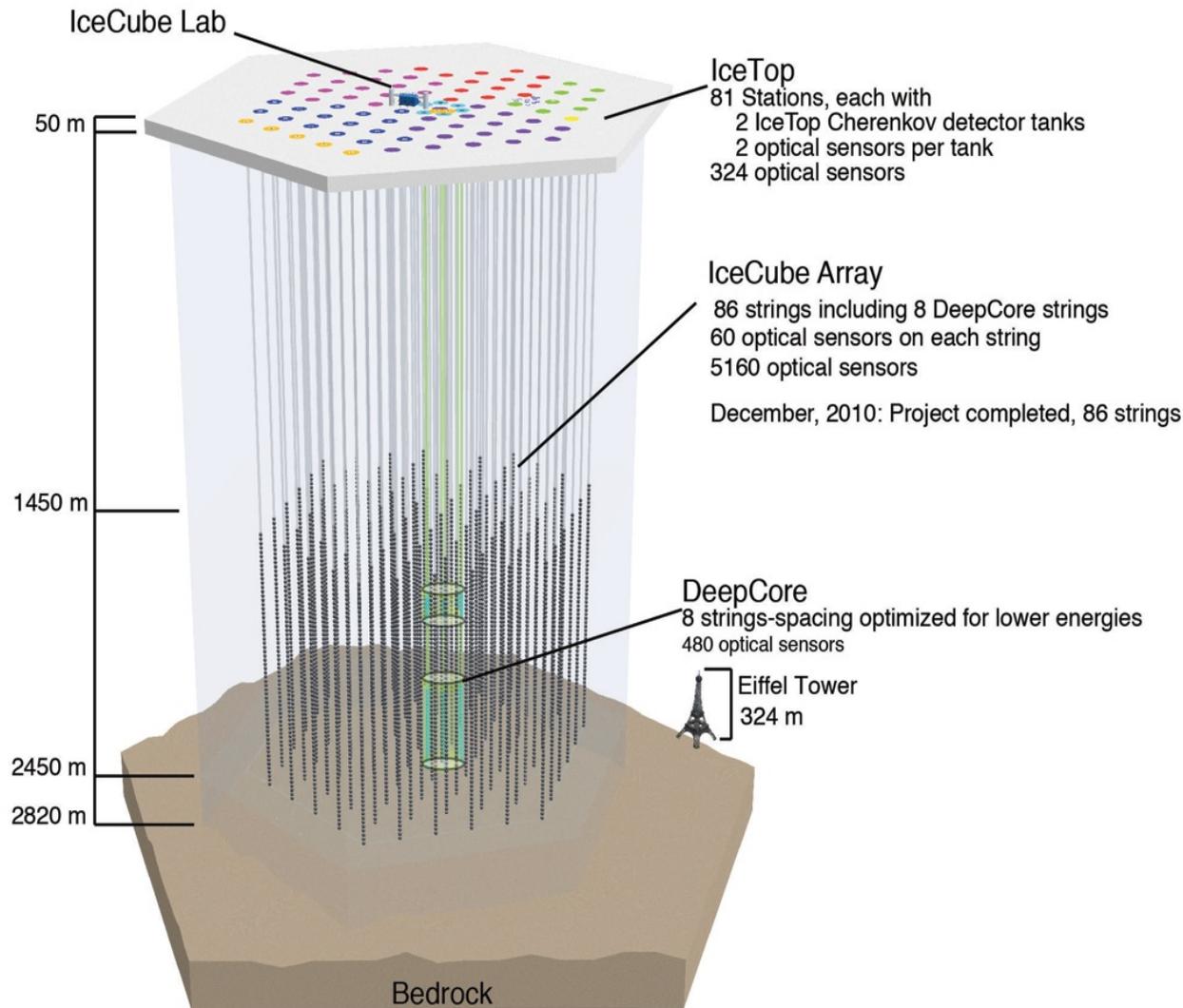


Vers un détecteur plus grand??



Le télescope IceCube

Complet depuis le 18 décembre 2010.
Inauguration fêtée mi-avril 2011.



Premiers pas

Observation of muons using the polar ice cap as a Cerenkov detector

**Nature
Sept 91**

D. M. Lowder*, **T. Miller***, **P. B. Price***, **A. Westphal***,
S. W. Barwick†, **F. Halzen‡** & **R. Morse‡**

* Department of Physics, University of California, Berkeley,
California 94720, USA

† Department of Physics, University of California, Irvine,
California 92717, USA

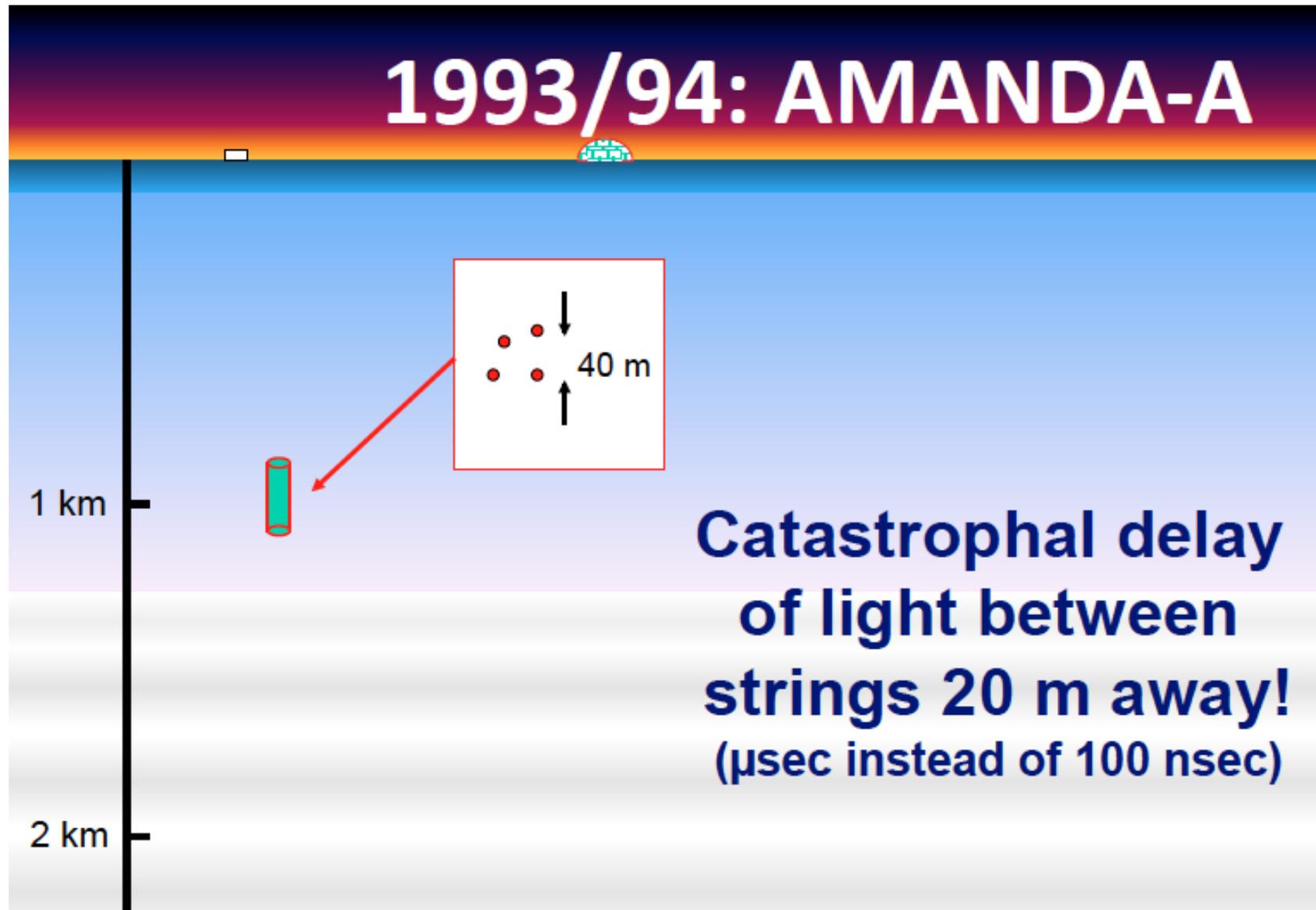
‡ Department of Physics, University of Wisconsin, Madison,
Wisconsin 53706, USA

ACKNOWLEDGEMENTS. We thank B. Koci and the entire PICO organization for the use of the borehole and for on-site assistance, E. K. Solarz and W. Williams for their help with the mechanical construction of the PMT string, J. Lynch and H. Zimmerman of the NSF, J. Learned for his sharing of DUMAND expertise, and E. Zeller of the University of Kansas for suggesting the idea of using South Pole ice in a neutrino telescope. This work was supported in part by the Division of Polar Programs of the US NSF and by the California Space Institute.

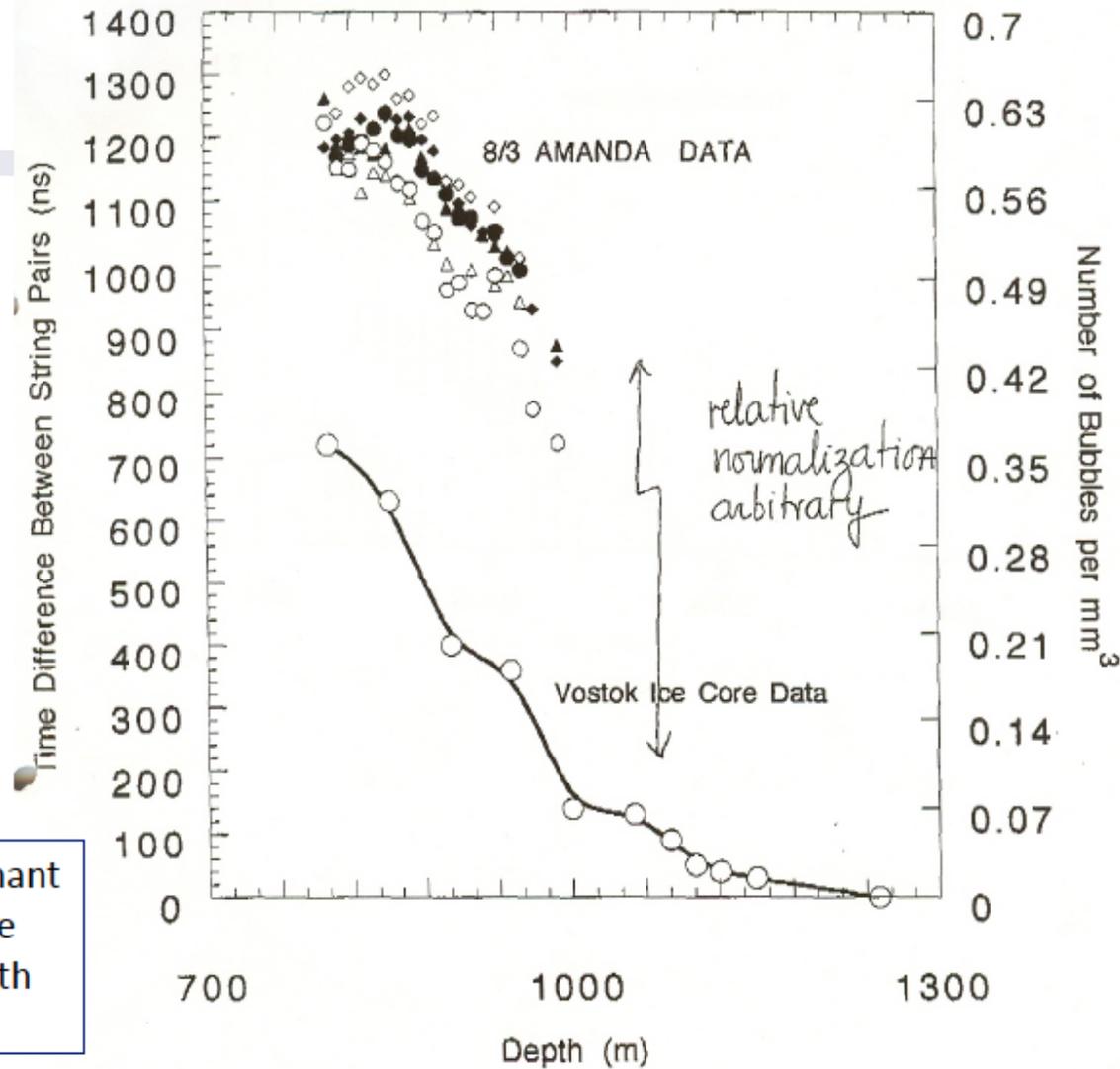
F. Halzen



Des débuts difficiles...



Des débuts difficiles



Explanation remnant bubbles which are disappearing with increasing depth.

...mais un résultat probant

Observation of high-energy neutrinos using Čerenkov detectors embedded deep in Antarctic ice

E. Andrés⁺, P. Askebjerg[†], X. Bai[‡], G. Barouch⁺, S.W. Barwick[§], R. C. Bay^{||}, K.-H. Becker[¶], L. Bergström[†], D. Bertrand[#], D. Bierenbaum[§], A. Biron[□], J. Booth[§], O. Botner^{**}, A. Bouchta[□], M. M. Boyce⁺, S. Carius^{††}, A. Chen⁺, D. Chirkin^{||¶}, J. Conrad^{**}, J. Cooley⁺, C. G. S. Costa[#], D. F. Cowen^{††}, J. Dalling[§], E. Dalberg[†], T. DeYoung⁺, P. Deslats[□], J.-P. Dewulf[#], P. Doksus⁺, J. Edsjö[†], P. Ekström[†], B. Erlandsson[†], T. Feser^{§§}, M. Gaug[□], A. Goldschmidt^{||}, A. Goobar[†], L. Gray⁺, H. Haase[□], A. Hallgren^{**}, F. Halzen⁺, K. Hanson^{††}, R. Hardtke⁺, Y. D. Heil[†], M. Hellwig^{§§}, H. Heukenkamp[□], G. C. Hill⁺, P. O. Hulth[†], S. Hundertmark[§], J. Jacobsen^{||}, V. Kandhadai⁺, A. Karle⁺, J. Kim[§], B. Koci⁺, L. Köpke^{§§}, M. Kowalski[□], H. Leich[□], M. Leuthold[□], P. Lindahl^{††}, I. Liubarsky⁺, P. Loaiza^{**}, D. M. Lowder^{||}, J. Ludvig^{||}, J. Madsen⁺, P. Marciniewski^{**}, H. S. Matis^{||}, A. Mihalyi^{††}, T. Mikolajski[□], T. C. Miller[†], Y. Minaeva[†], P. Miočnovič^{||}, P. C. Mock[§], R. Morse⁺, T. Neunhoffer^{§§}, F. M. Newcomer^{††}, P. Niessen[□], D. R. Nygren^{||}, H. Ögelman⁺, C. Pérez de los Heros^{**}, R. Porrata[§], P. B. Price^{||}, K. Rawlins⁺, C. Reed[§], W. Rhode[¶], A. Richards^{||}, S. Richter[□], J. Rodriguez Martino[†], P. Romanesko⁺, D. Ross[§], H. Rubinstein[†], H.-G. Sander^{§§}, T. Scheider^{§§}, T. Schmidt[□], D. Schneider⁺, E. Schneiders[§], R. Schwarz⁺, A. Silvestri[¶], M. Solarz^{||}, G. M. Spiczak[†], C. Spiering[□], N. Starinsky⁺, D. Steele⁺, P. Steffen[□], R. G. Stokstad^{||}, O. Streicher[□], Q. Sun[†], I. Taboada^{††}, L. Thollander[†], T. Thon[□], S. Tilav⁺, N. Usechak[§], M. Vander Donckt[#], C. Walck[†], C. Weinheimer^{§§}, C. H. Wiebusch[□], R. Wischmewski[□], H. Wissing[□], K. Woschnagg^{||}, W. Wu[§], G. Yodh[§] & S. Young[§]

NATURE 2001

AMANDA B10 (1996/97) IceCube will work !

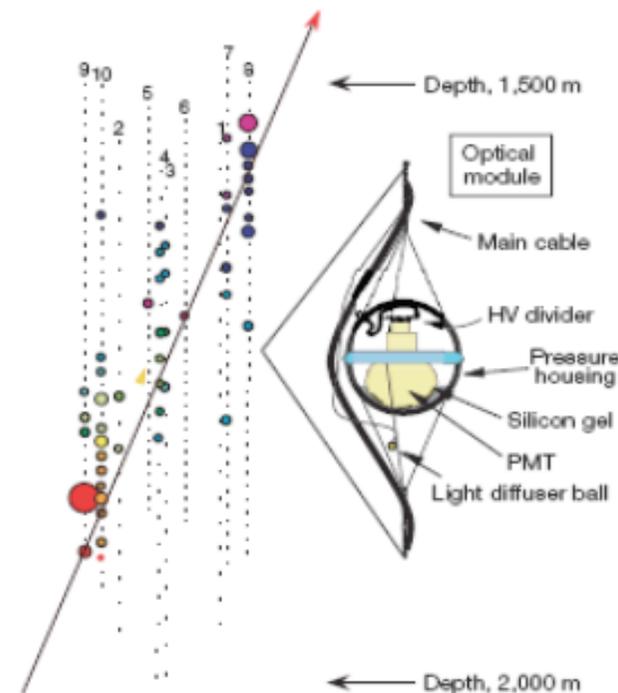


Figure 1 The AMANDA-B10 detector and a schematic diagram of an optical module. Each dot represents an optical module. The modules are separated by 20 m on the inner strings (1 to 4), and by 10 m on the outer strings (5 to 10). The coloured circles show pulses from the photomultipliers for a particular event; the sizes of the circles indicate the amplitudes of the pulses and the colours correspond to the time of a photon's arrival. Earlier times are in red and later ones in blue. The arrow indicates the reconstructed track of the upwardly propagating muon.

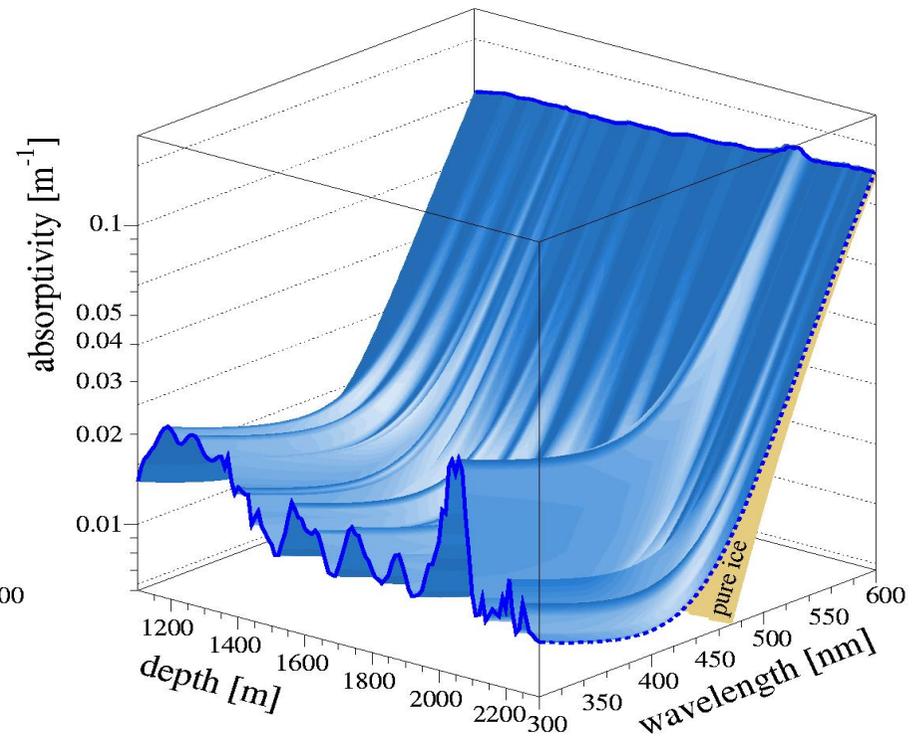
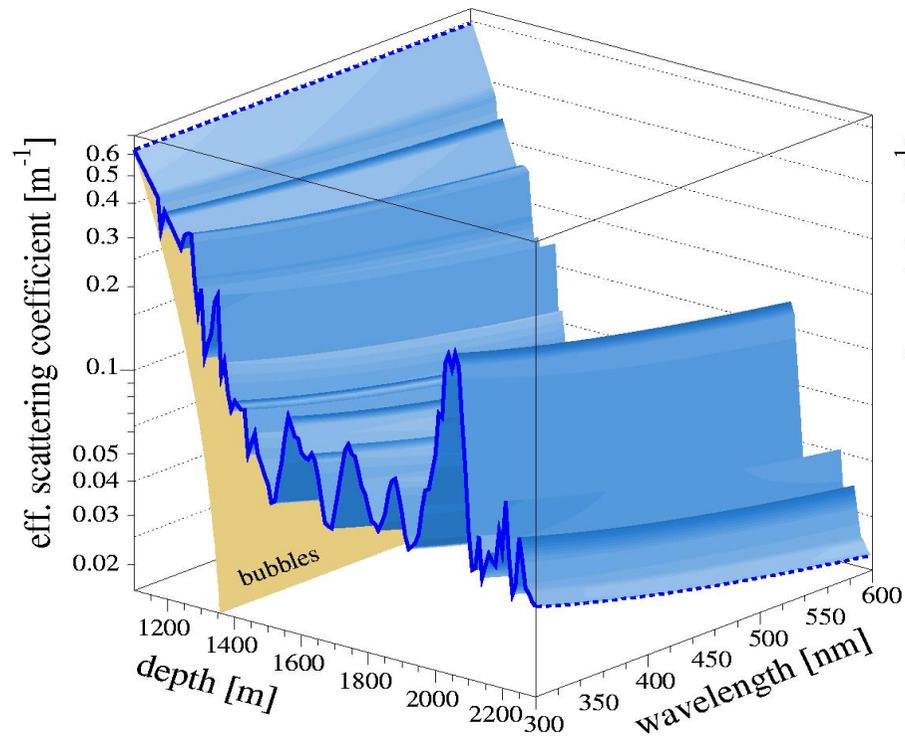
3 défis

1. Le déploiement



3 défis

2. Optique de la glace



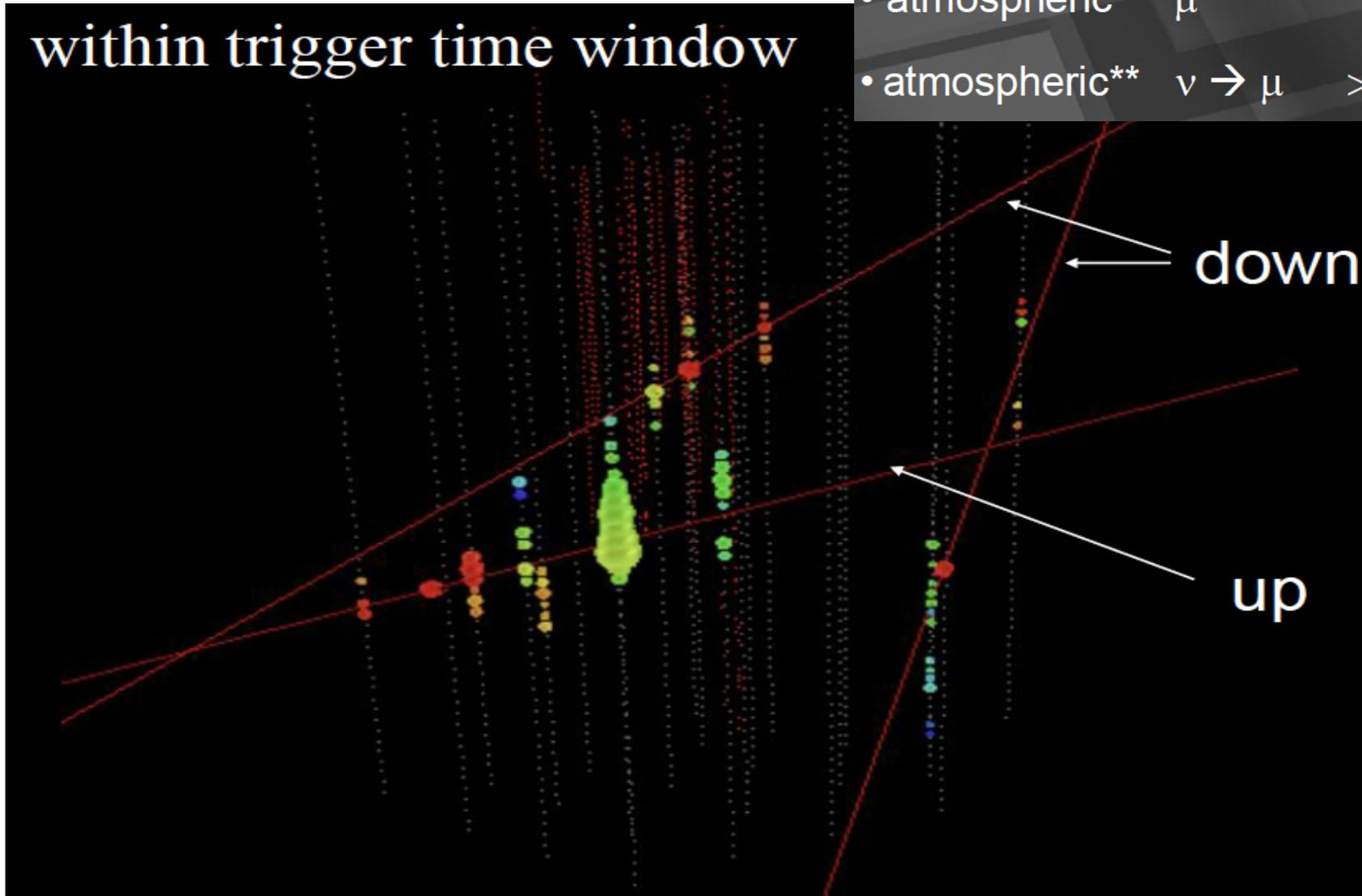
Les 3 défis

3. réjection des muons atmosphériques

within trigger time window

muons detected per year:

- atmospheric* μ 7×10^{10}
- atmospheric** $\nu \rightarrow \mu$ $> 8 \times 10^4$



Les atouts de la Méditerranée

- Complémentarité du champ de vue

Centre galactique

- Peu de diffusion

Bonne précision angulaire

- Sites profonds ~5000m

Réduction du bruit de fond

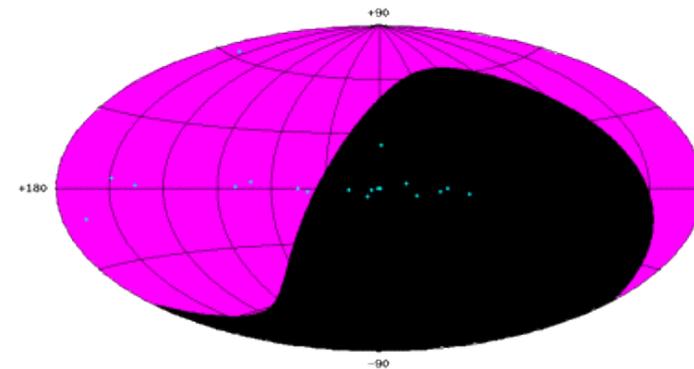
- Logistique accessible

Déploiement et réparation

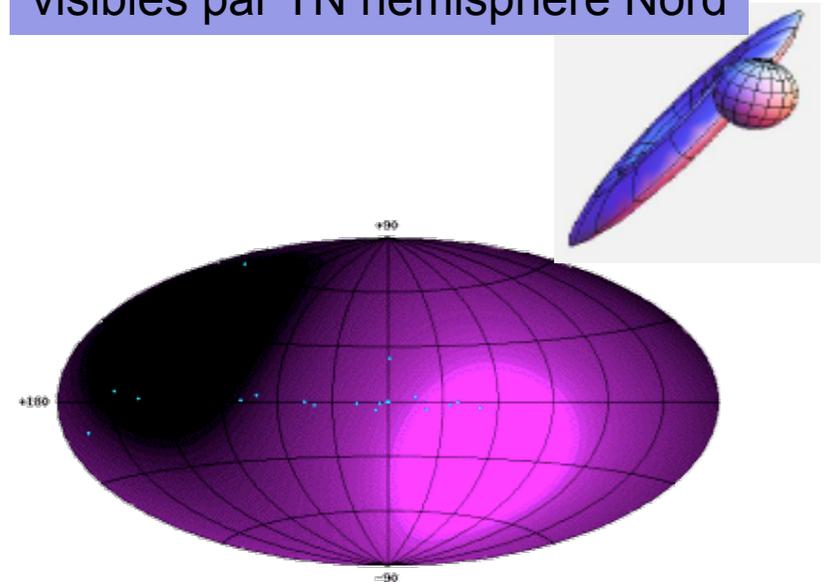
- Inconvénient : activité optique

Filtrage des données

Ciel visible au pôle sud

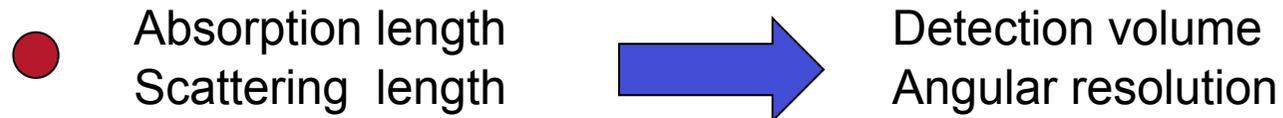


Majorité des sources HESS TeV
visibles par TN hémisphère Nord



Ciel visible en Méditerranée

Critères de sélection des sites



$[\lambda \sim 460 \text{ nm}]$ (blue)	Absorption length (m)	Effective Scattering length (m)	Angular resolution ($^\circ$) ($< 0.1 \text{ km}^2$, $E > 10 \text{ TeV}$)
South Pole	≤ 100	≤ 25	3°
Lake Baikal	≥ 15	> 300	1.5°
Mediterranean	55	> 300	0.3°

- Optical activity
- Living creatures
 - ^{40}K decay

[quiet in ice and fresh water]

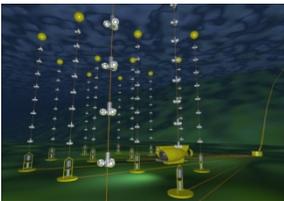
} Require causality filter

Plan de l'exposé



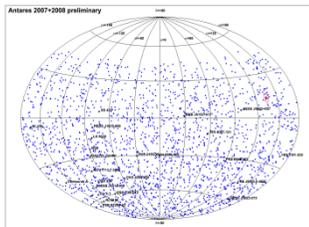
Astronomie neutrino

Rappels historiques
Motivations scientifiques
Sources de neutrinos



Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres
Principes de détection
Les télescopes actuels
Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques études

Etalonnage
Flux diffus
Recherche de sources ponctuelles
Analyses multi-messagers



Le projet KM3NeT

La collaboration Antares



NIKHEF Amsterdam
KVI Groningen
NIOZ Texel



APC Paris
IFREMER, Brest
DAPNIA, Saclay
IReS, Strasbourg Mulhouse
CPPM Marseille
IFREMER, Toulon
COM, Marseille
OCA, Nice



Texel
Groningen
Amsterdam
Brest
Saclay
Paris
Clermont-Ferrand
Mulhouse
Marseille (CPPM, LAM, COM)
Barcelona
Toulon
València
Villefranche-sur-Mer
Genova
Bologna
Pisa
Roma
Bari



Bucharest

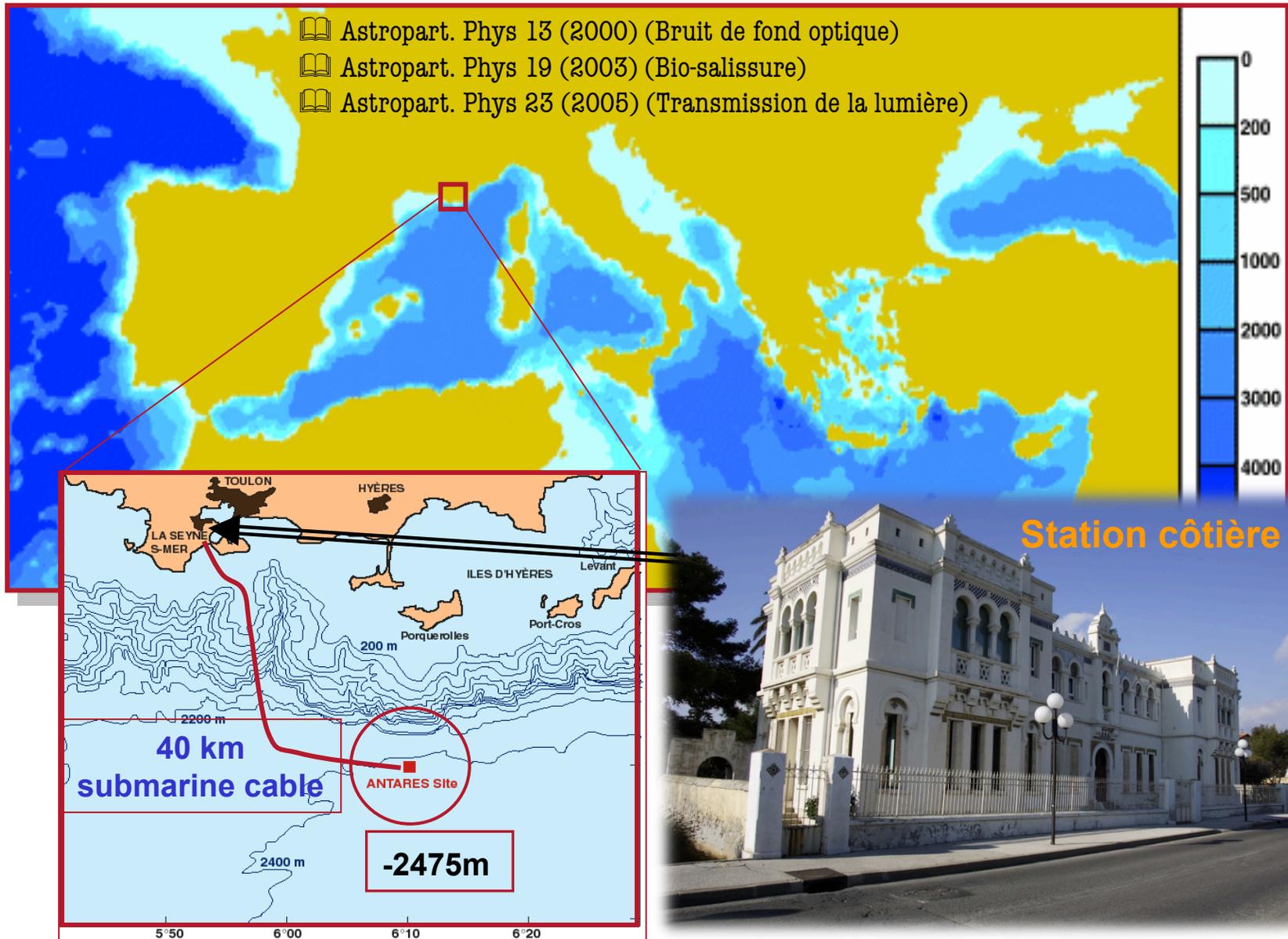


Catania (Univ., LNS)



Oujda

Le site Antares



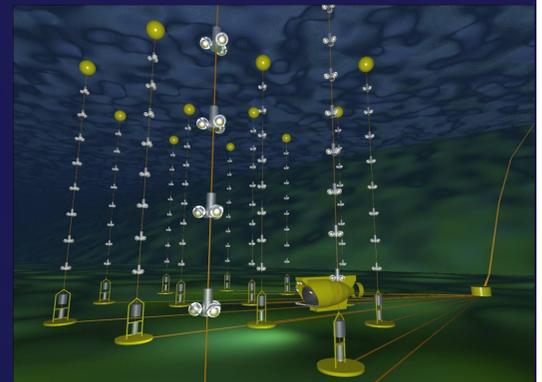
Toulon



M.Pacha

Antares

Electro-optical
Cable of
40 km



42 50'N, 6 10'E

Google™

© 2008 Cnes/Spot Image
Image © 2008 DigitalGlobe
Image NASA



Le télescope Antares

- 25 étages / ligne
- 3 PM / étage
- ~ 900 PM

350 m

Deployé en 2001

14.5 m

40 km vers la côte

100 m

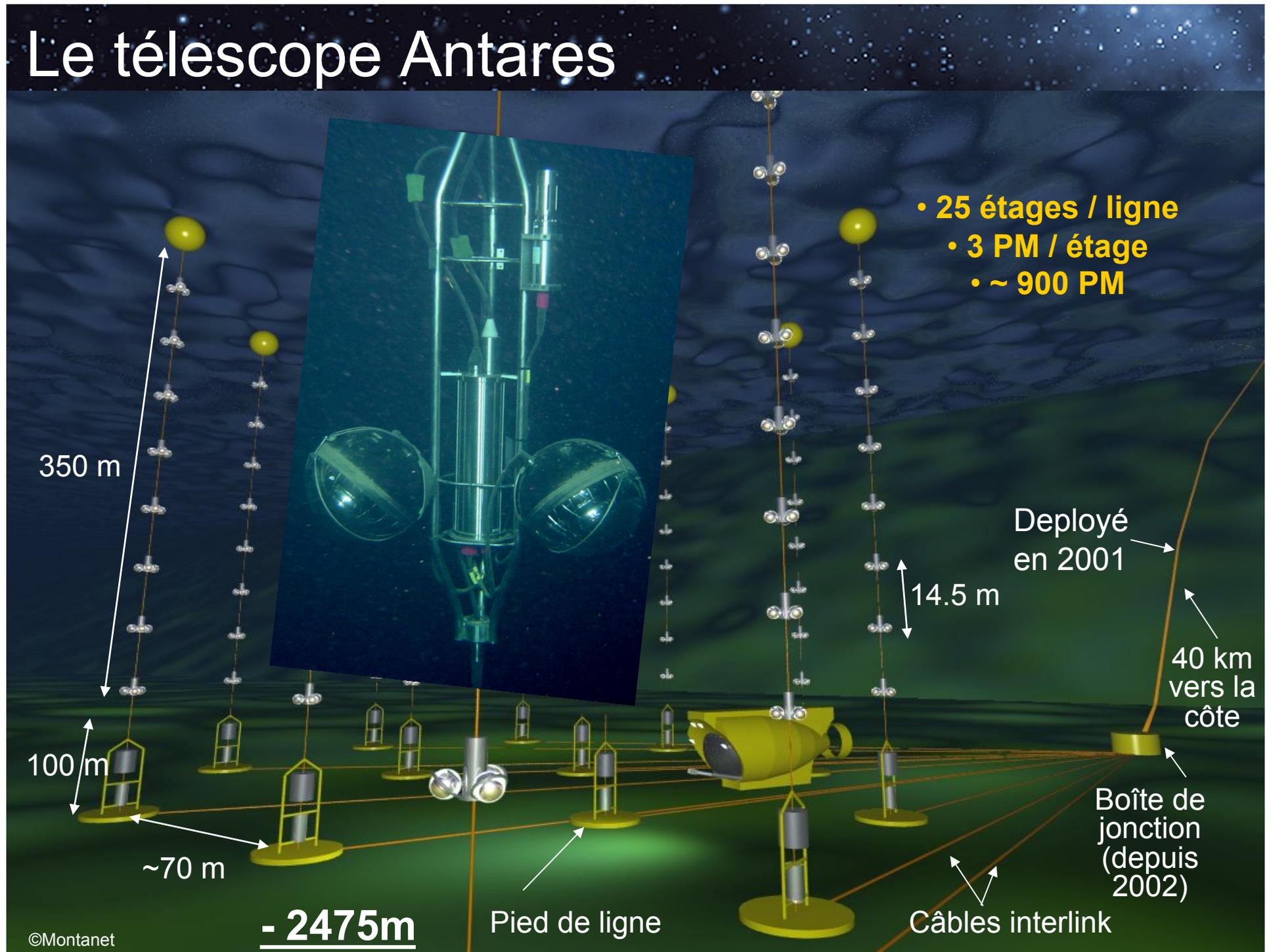
Boîte de jonction (depuis 2002)

~70 m

Câbles interlink

- 2475m

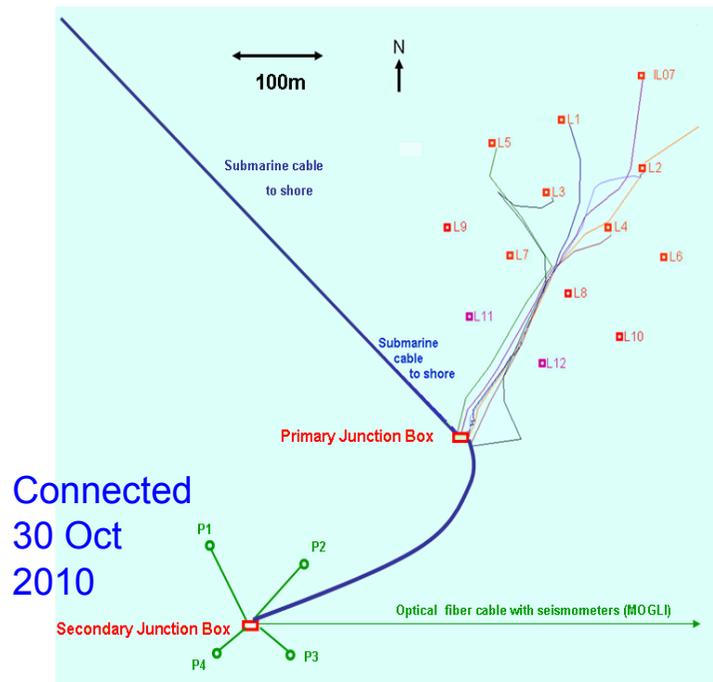
Pied de ligne



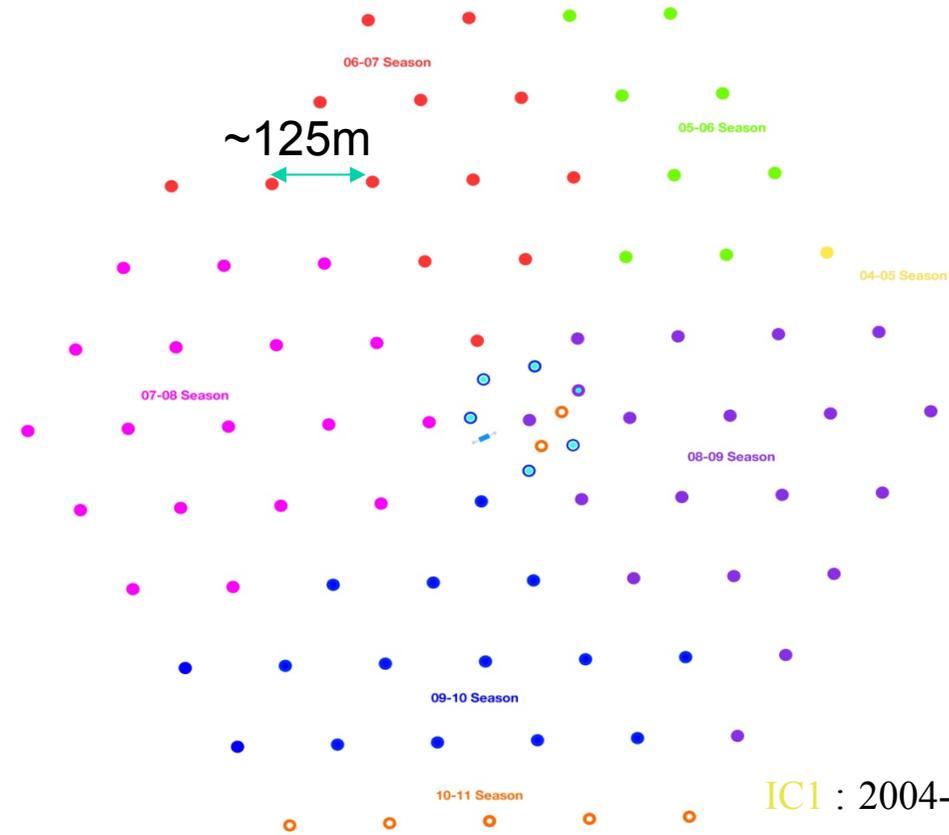
Connexion des lignes



Etapes de construction



Connected
30 Oct
2010



- 2L :2006
- 5L :01/2007
- 10L :12/2007
- 12L :05/2008



Exploitation scientifique
(à ce jour)

- IC1 : 2004-5
- IC9 : 2005-6
- IC22 :2006-7
- IC40:2007-8
- IC59:2008-9
- IC79:2009-10
- IC86:2010-11



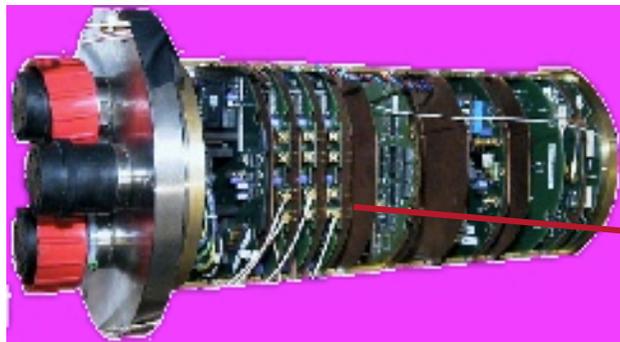
Un étage de détection



Cadre Titane : *support mécanique*
Balise Optique
avec LED bleue:
Etalonnage temporel
📖 NIM A578 (2007) 498



Module optique :
10" Hamamatsu PM dans
sphère verre 17"
📖 NIM A484 (2002) 369
📖 NIM A555 (2005) 132



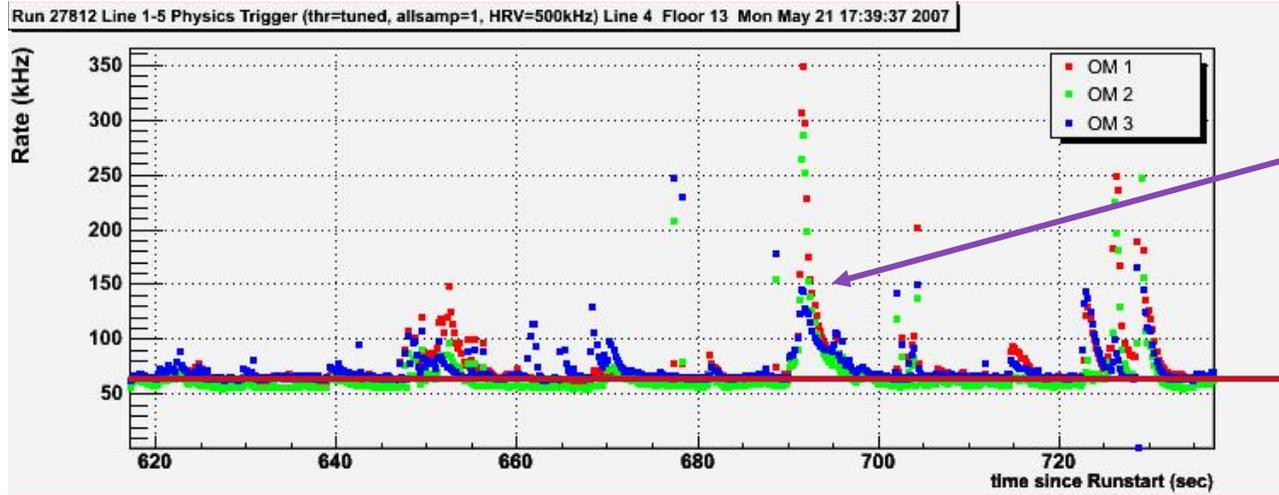
Module contrôle local (Ti):
*Front-end ASIC, DAQ/SC,
DWDM,
Horloge, orientation,
alimentation...*

Toutes les
impulsions sont
envoyées à Terre



Hydrophone:
*Positionnement
acoustique*

Bruit de fond optique [ANTARES]

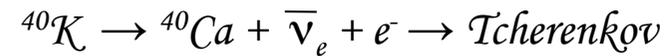


Sursauts
→ MHz

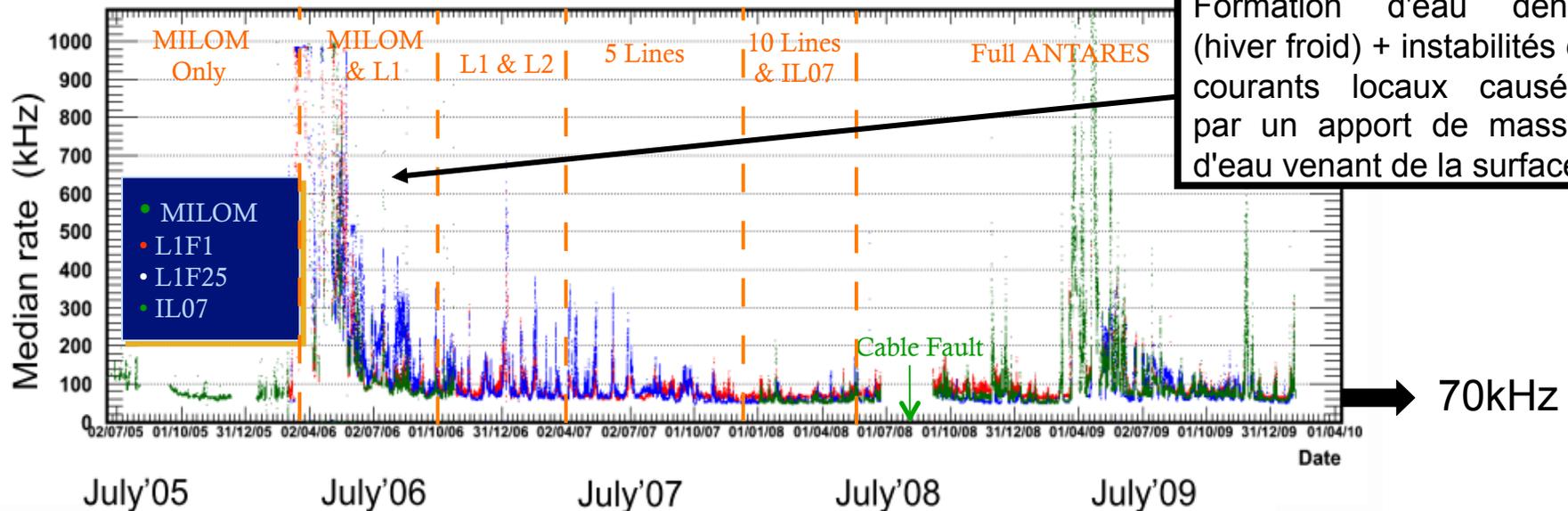
Ligne de base

Ligne de base (~60 – centaines) kHz

$\langle Q \rangle 1$ → Etalonnage



Bioluminescence (bactéries)



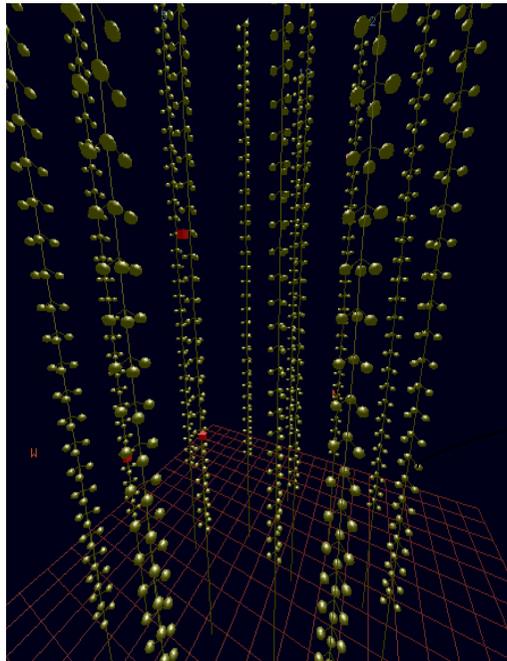
Formation d'eau dense (hiver froid) + instabilités de courants locaux causées par un apport de masses d'eau venant de la surface?

70kHz

« All data to shore »

Tous les coups au dessus
d'un seuil ($\sim 1/3$ pe)
sont transférés
à terre (L0)

~ 100 kHz x 885 OMs



Détecteur ANTARES 12 lignes

40 km

Boîte de jonction



Salle de contrôle
La Seyne sur mer

Filtrage **~ 10 Hz**
(Plusieurs types)

Ecriture sur disques ($4 \mu\text{s}$)

Ex: Filtrage « 3D »: repose sur { **Temps, charge et seuil** }

L1 \equiv 2 L0 (même étage) à ± 20 ns ou 1 impulsion de grande charge (>3 pe)

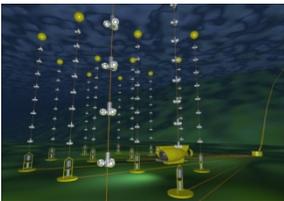
On réclame ensuite 5 L1 pour l'écriture sur disque

Plan de l'exposé



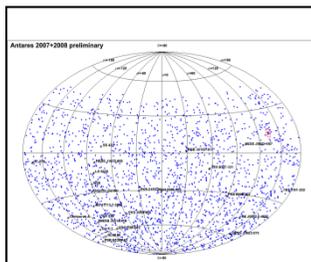
Astronomie neutrino

Rappels historiques
Motivations scientifiques
Sources de neutrinos



Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres
Principes de détection
Les télescopes actuels
Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques études

Etalonnage

Flux diffus

Recherche de sources ponctuelles

Analyses multi-messagers



Le projet KM3NeT

Enjeu des étalonnages

- Position absolue du détecteur ($<0.14^\circ$)
- Atteindre la meilleure résolution angulaire (0.3° pour $E_\nu > 10$ TeV)
Qualité de la reconstruction de la trace des muons
- Position des PM ($\sigma_{PM} \sim 10\text{cm}$, mesures toutes les 2 mn)
- Temps des impulsions de PM ($\sigma_{TTS} \sim 1.3\text{ns}$, $\sigma_\lambda \sim 1.5\text{ns}$, $\sigma_{elec} < 1\text{ns}$)
- Propriétés optiques de l'eau (longueur d'atténuation, indice optique)
- Seuil en charge des impulsions de PM (effet de "walk")
- Maîtriser l'efficacité de détection des muons
- Charge & seuil des impulsions de PM (filtrage)
- Propriétés optiques de l'eau
- Efficacité et acceptance angulaire des PM

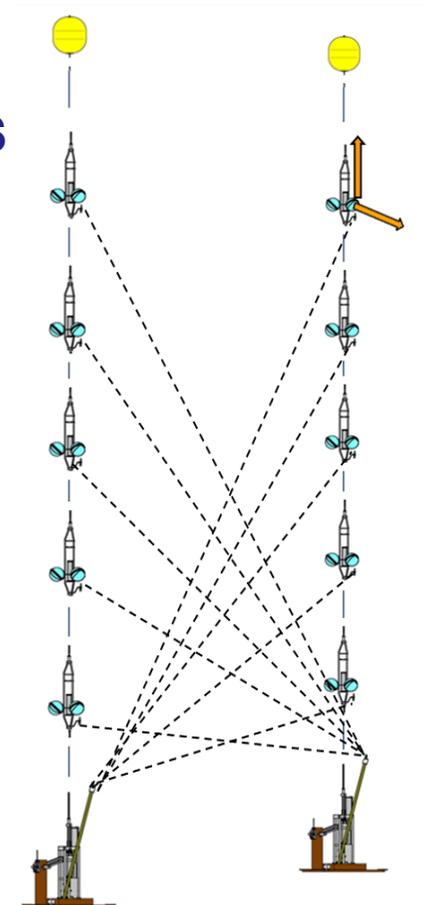
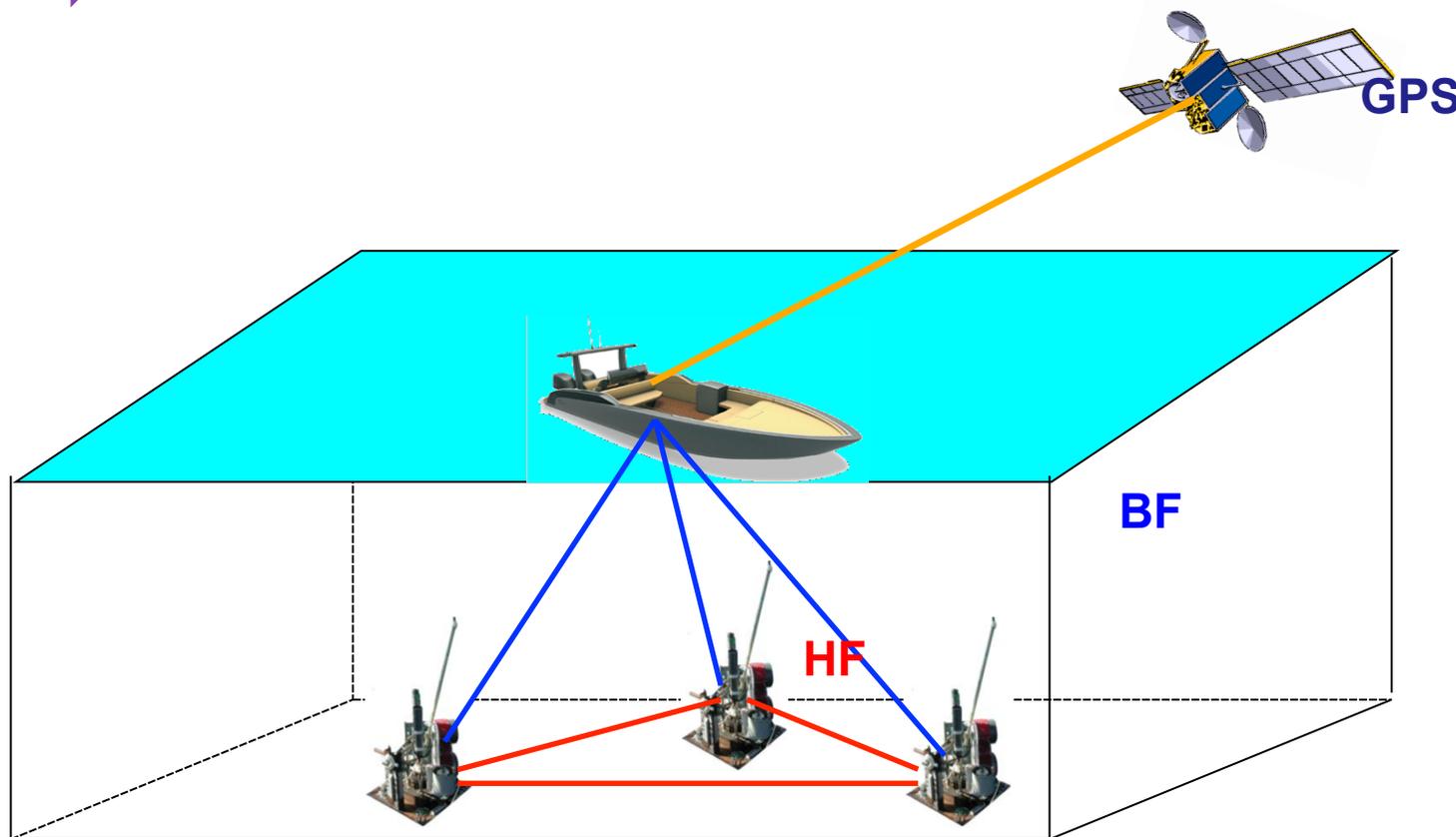


Accord simulation Monte-Carlo / données

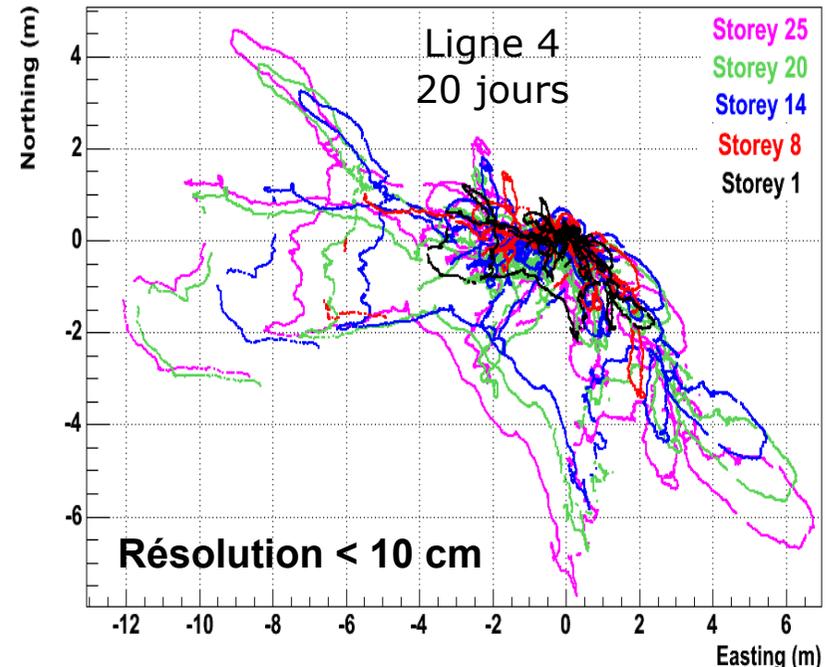
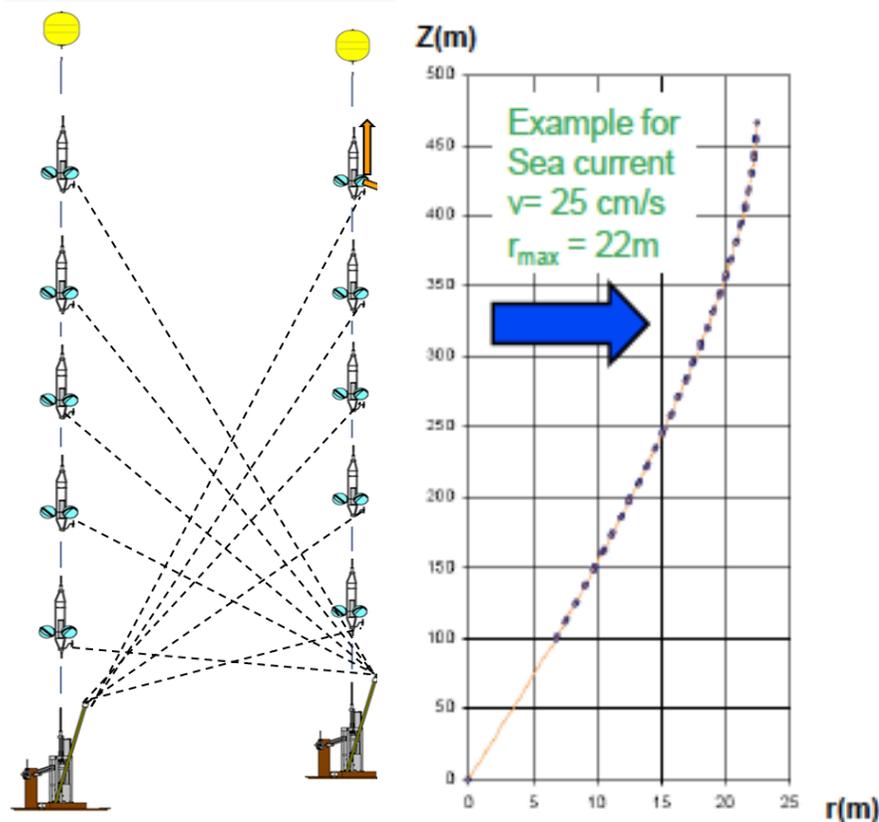
Position absolue des bas de lignes

- Position du bateau : **GPS** ($\sigma_x, \sigma_y \sim 1 \text{ m}$)
- Position des lignes % bateau : acoustique **BF** ($\sigma_x, \sigma_y \sim 1 \text{ m}$)
- Position relative des lignes : acoustique **HF** ($\sigma_d \sim 1 \text{ cm}$)

➡ Orientation absolue du détecteur ($< 0.14^\circ$)



Position/orientation des PM



Orientation des PM

- Tiltmètres & compas à chaque étage

Position des PM

- Hydrophones (5 par ligne)
- 1 transpondeur au pied de chaque ligne
- Mesure de la vitesse du son

Mesure toutes les 2 mn
de la forme de la ligne

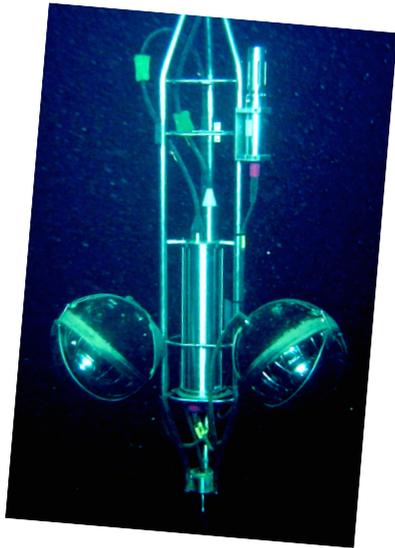
Enjeu des étalonnages

- Position absolue du détecteur ($<0.14^\circ$)
- Atteindre la meilleure résolution angulaire (0.3° pour $E_\nu > 10$ TeV)
Qualité de la reconstruction de la trace des muons
- Position des PM ($\sigma_{PM} \sim 10\text{cm}$, mesures toutes les 2 mn)
- Temps des impulsions de PM ($\sigma_{TTS} \sim 1.3\text{ns}$, $\sigma_\lambda \sim 1.5\text{ns}$, $\sigma_{elec} < 1\text{ns}$)
- Propriétés optiques de l'eau (longueur d'atténuation, indice optique)
- Seuil en charge des impulsions de PM (effet de "walk")
- Maîtriser l'efficacité de détection des muons
- Charge & seuil des impulsions de PM (filtrage)
- Propriétés optiques de l'eau
- Efficacité et acceptance angulaire des PM



Accord simulation Monte-Carlo / données

Etalonnage en temps *in situ*

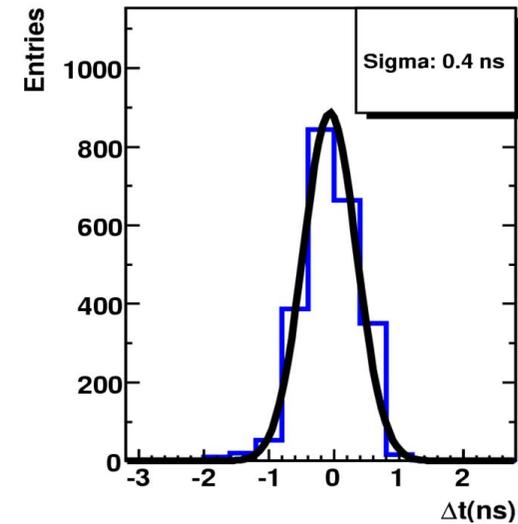


Différence de temps entre la balise optique et les modules optiques

$$T_0 = t_{MO} - t_{LED} - \frac{d(OB, OM)}{c_{eau}}$$



Vérification des T_0 mesurés en laboratoire, résolution en temps



$$\sigma^2 = \frac{\sigma_{TTS}^2}{N_{pe}} + \frac{\sigma_{eau}^2}{N_{\gamma}} + \sigma_{elec}^2$$



Illumination intense & source proche

Conforme au cahier des charges $\sigma_{elec} < 0.5$ ns

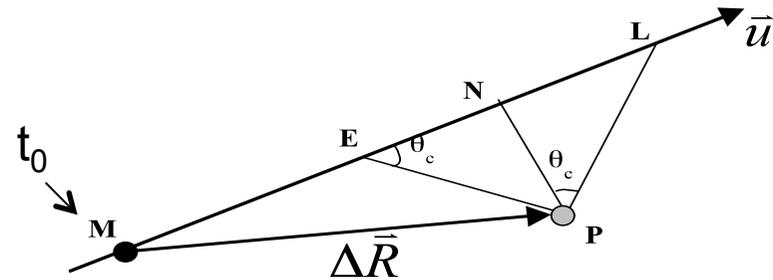
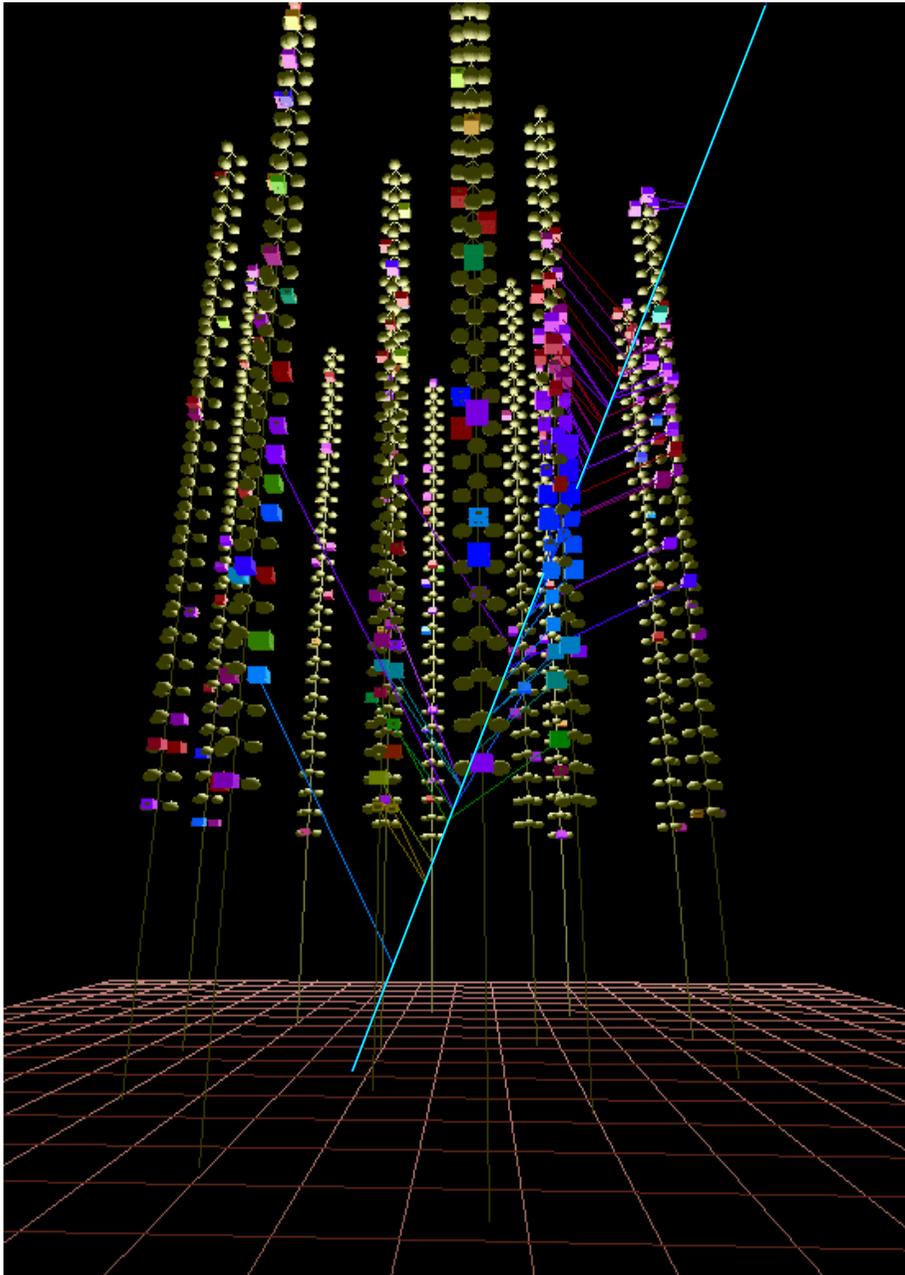
Enjeu des étalonnages

- Position absolue du détecteur ($<0.14^\circ$)
- Atteindre la meilleure résolution angulaire (0.3° pour $E_\nu > 10$ TeV)
Qualité de la reconstruction de la trace des muons
- Position des PM ($\sigma_{PM} \sim 10\text{cm}$, mesures toutes les 2 mn)
- Temps des impulsions de PM ($\sigma_{TTS} \sim 1.3\text{ns}$, $\sigma_\lambda \sim 1.5\text{ns}$, $\sigma_{elec} < 1\text{ns}$)
- Propriétés optiques de l'eau (longueur d'atténuation, indice optique)
- Seuil en charge des impulsions de PM (effet de "walk")
- Maîtriser l'efficacité de détection des muons
- Charge & seuil des impulsions de PM (filtrage)
- Propriétés optiques de l'eau
- Efficacité et acceptance angulaire des PM



Accord simulation Monte-Carlo / données

Reconstruction des trajectoires



$$(t_{theor} - t_0) = \frac{1}{c} ME + \frac{n}{c} EP$$

$$c(t_{theor} - t_0) = \Delta \vec{R} \cdot \vec{u} + \alpha \sqrt{\Delta \vec{R}^2 - (\Delta \vec{R} \cdot \vec{u})^2}$$

$$\alpha = \tan \theta_c$$

Il faut trouver les 5 paramètres de la trace :

M (x_0, y_0, z_0) @ t_0

u (u_x, u_y, u_z) or $(\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$

1. Sélection des événements d'intérêt
fondée sur des critères de causalité

2 Ajustement fondé sur l'étude des résidus
temporels:

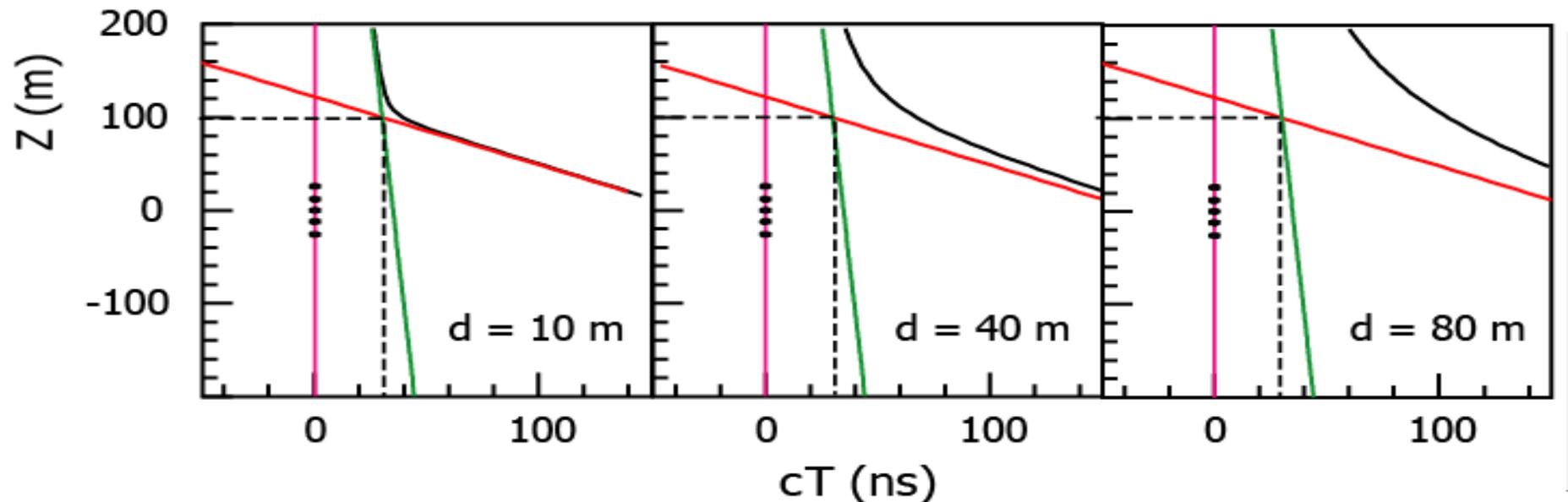
$$\Delta t_i = t_{theor}(\mathbf{M}, \mathbf{u}) - t_i$$

Reconstruction de la trajectoire des muons

Altitude (z) des photons en fonction du temps d'arrivée (t)

⇒ Fonction de l'angle zénithal et de la distance minimale d'approche

Intersection du plan (z,t) et du cône Tcherenkov ⇒ Hyperbole



➤ « Aafit »:

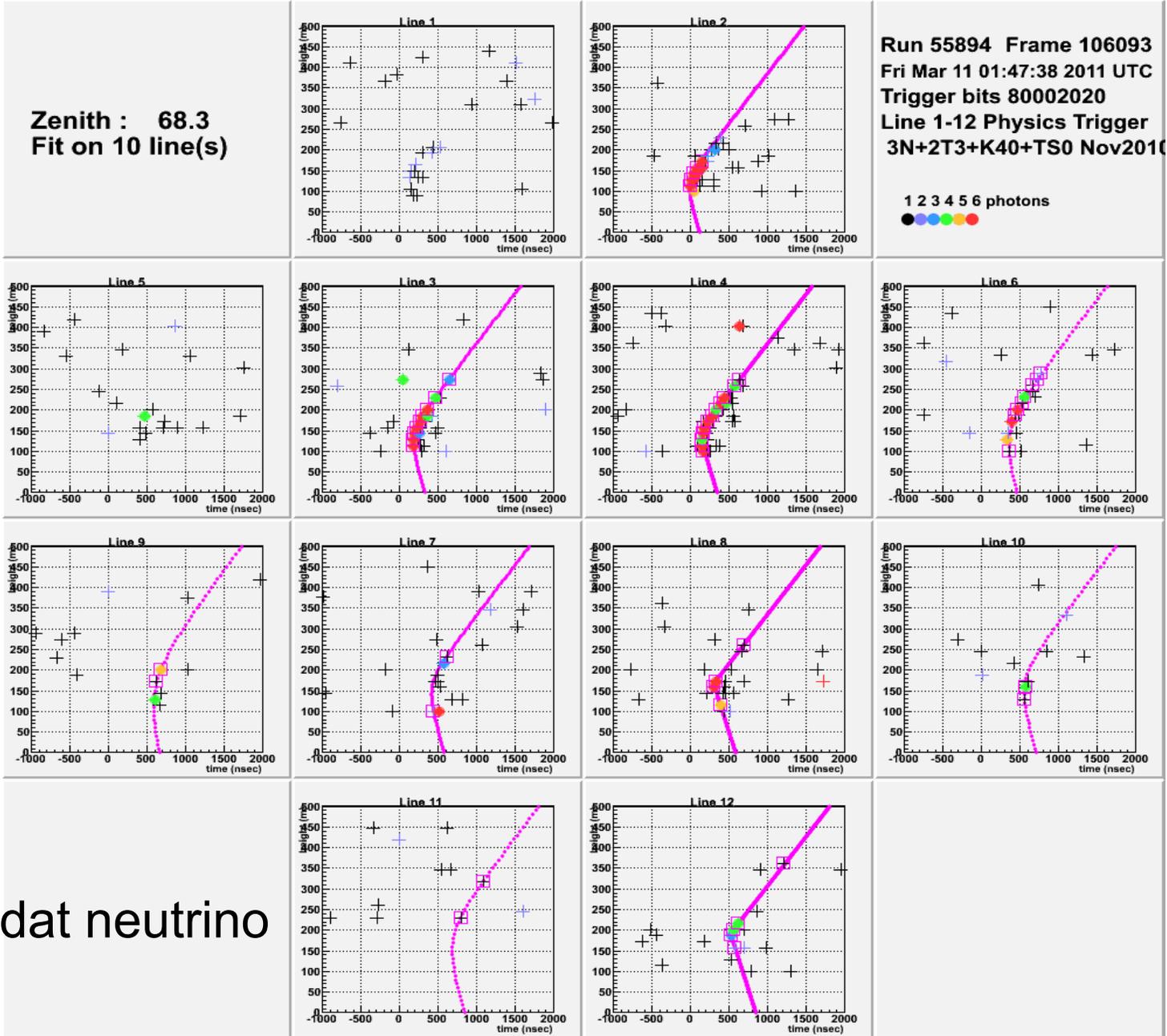
- Maximum de vraisemblance
- Fonction de densité de probabilité
- Algorithme sophistiqué
- Optimisé pour les muons montant (ν)

➤ « BBFit »: [Astropart. Phys. 34 \(2011\) 652-662](#)

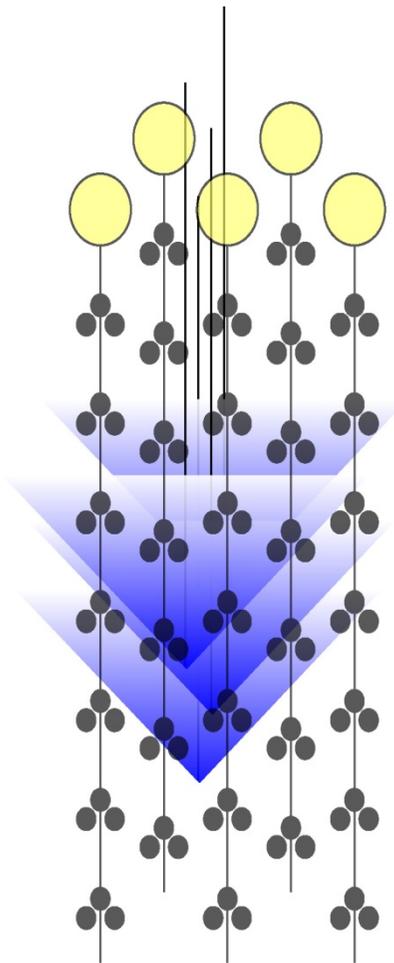
- Minimisation d'un χ^2
- Photons directs
- Utilisée en ligne
- Adaptée aux muons descendant

Hypothèse : *Un seul muon dans le détecteur*

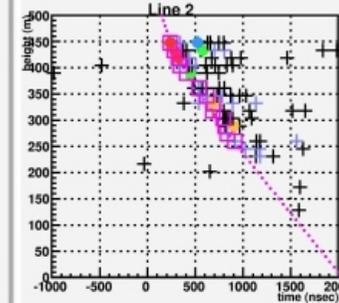
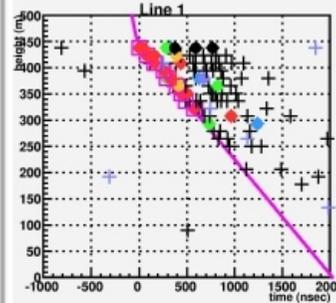
Un muon = $\sum (t_i, q_i, \text{position}_i)$



Une gerbe de muon?

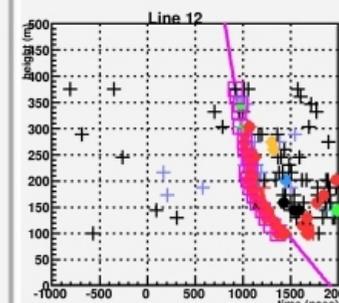
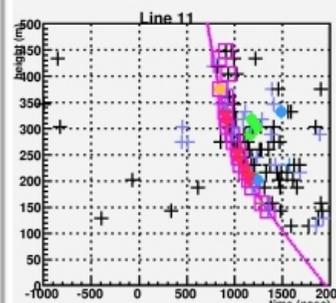
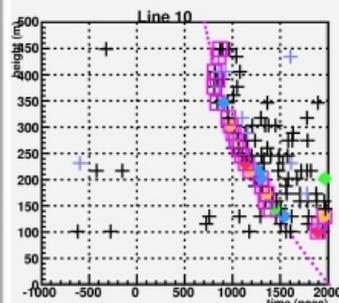
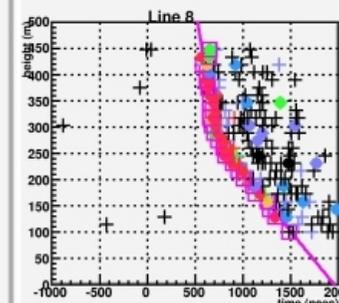
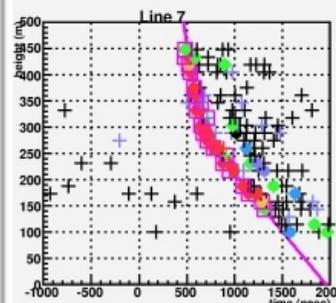
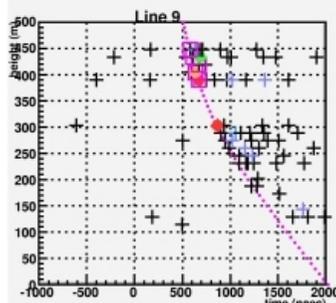
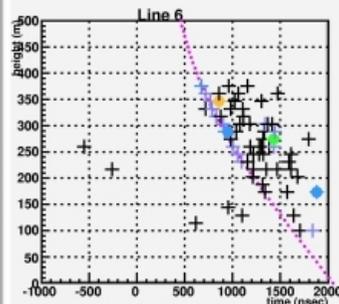
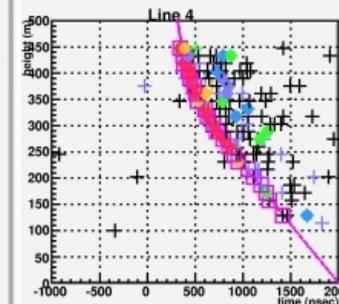
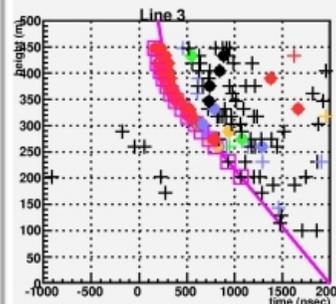
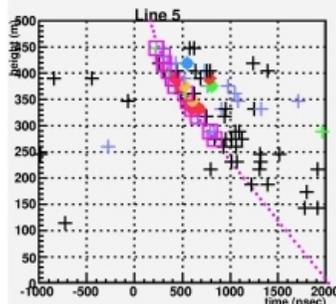


Zenith : 144.3
Fit on 11 line(s)



Run 34497 Frame 40952
Mon Jun 2 03:30:15 2008
Trigger bits 80002020
Line 1 - 12 Physics Trigger (t

1 2 3 4 5 6 photons
● ● ● ● ● ●



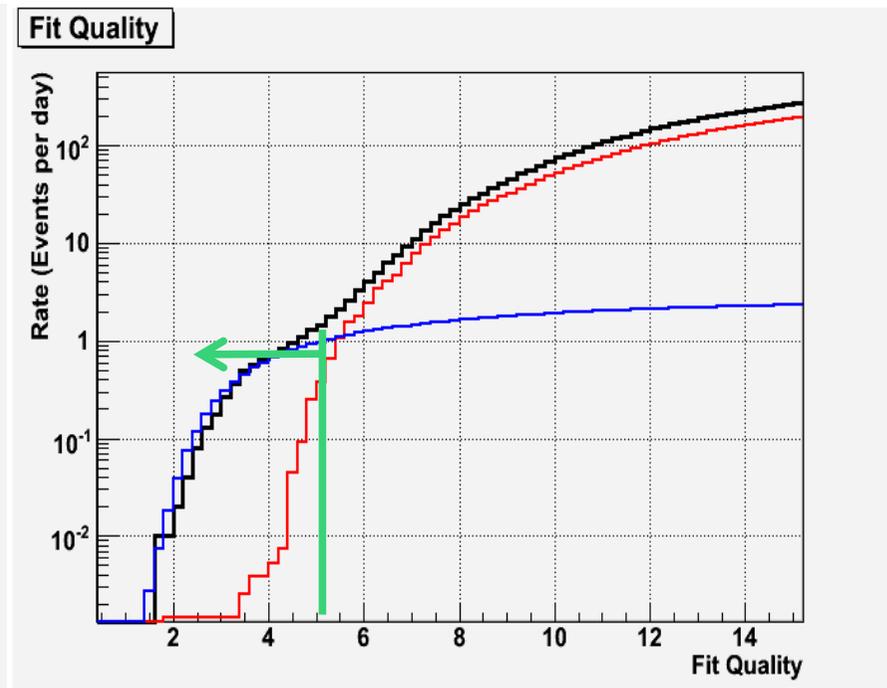
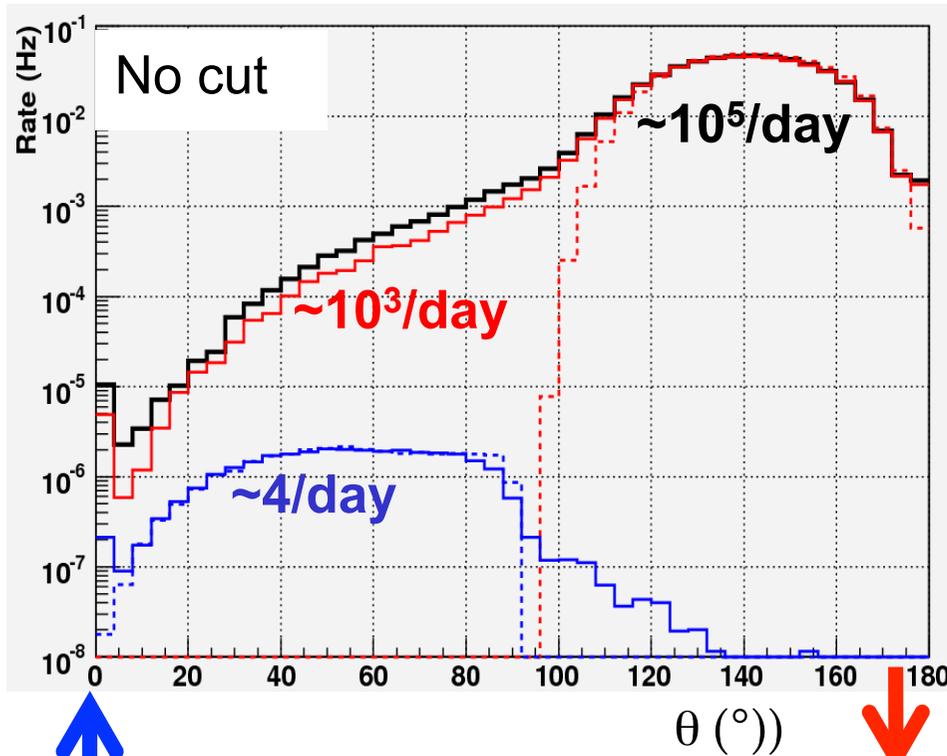
Des efforts en cours pour
estimer la multiplicité

Sélection des événements

—— Reconstruction
- - - - MC truth

Data
MC Muons
MC Neutrinos

Upward tracks:



Typical ANTARES numbers

Quality cut:
⇒ get rid of badly
reconstructed μ
Few % μ contamination

Résolution angulaire attendue

Taille apparente importante:

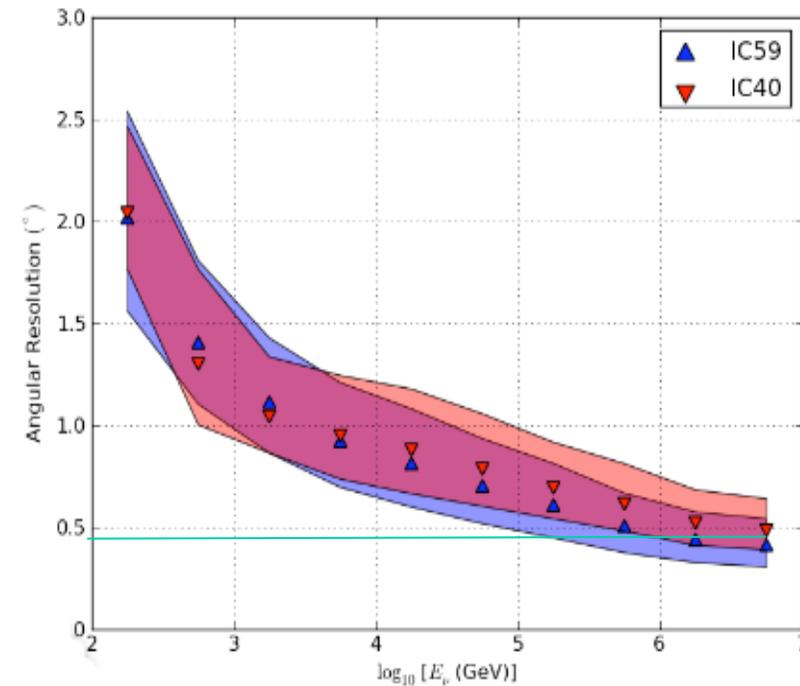
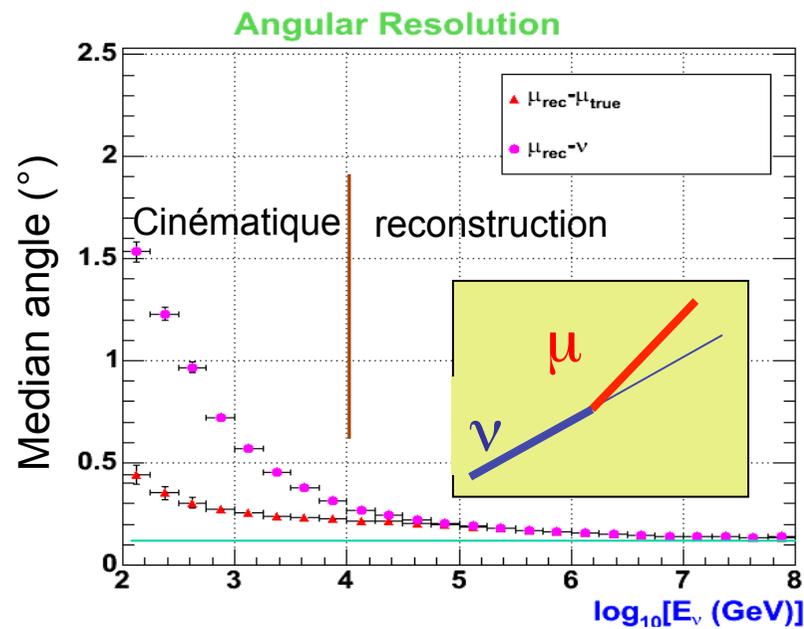
RXJ1713 (SNR): 1°

Moon, Sun : 0.5°

Cen A (AGN) : 0.3°

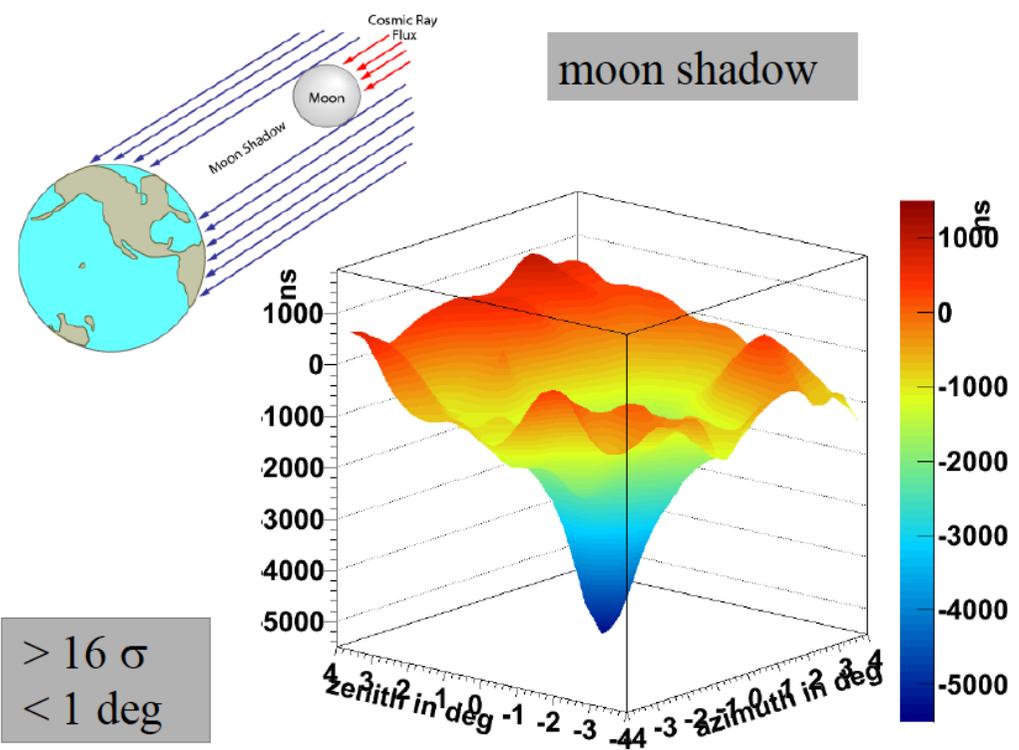
Pour la recherche de source :

Background \propto Res.²

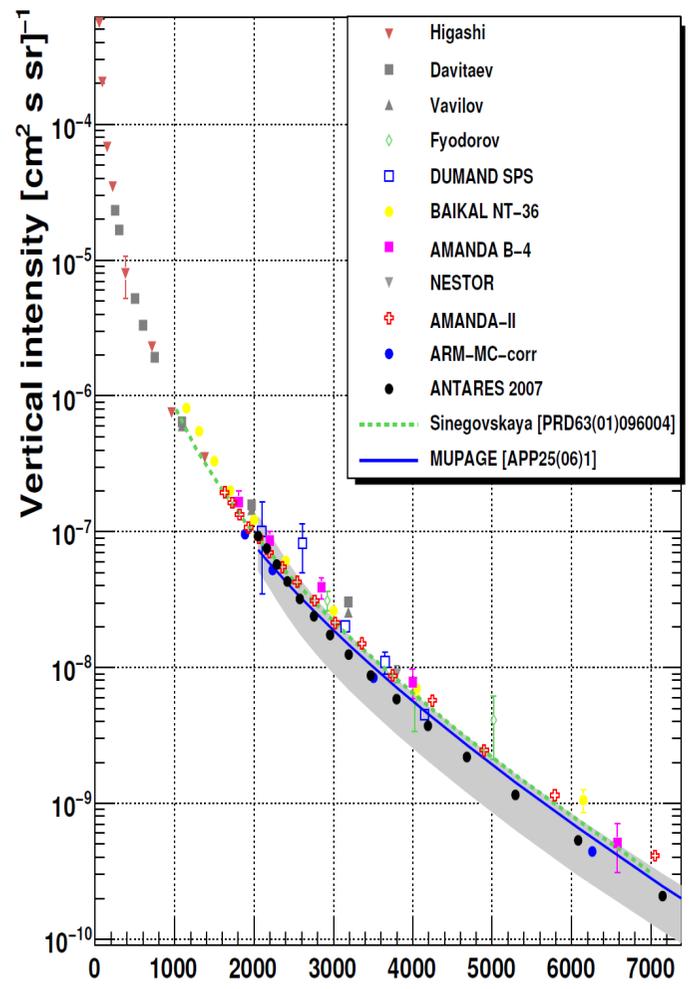


Muons atmosphériques et étalonnage

IceCube voit l'ombre de la lune
=> pointage correct



Flux de muons atmosphériques
Astropart Phys. 34, 179 (2010)

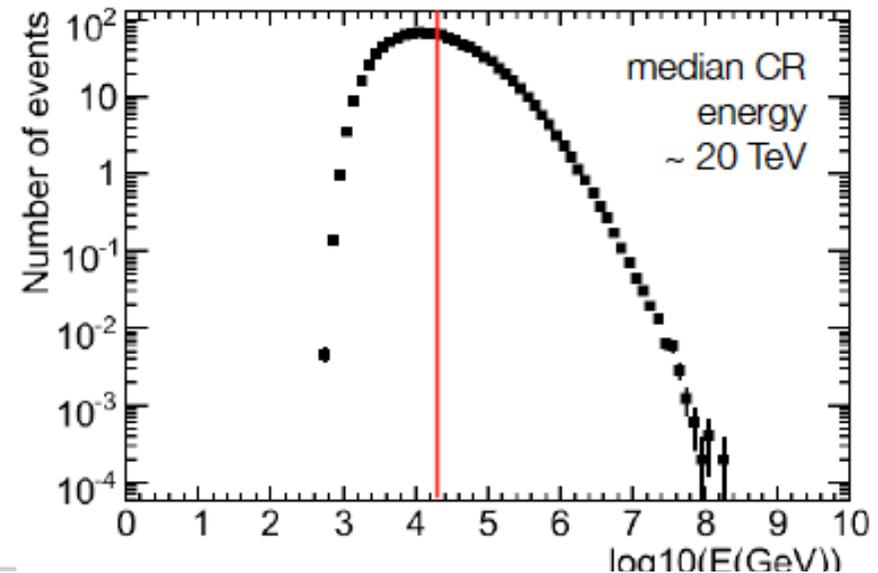
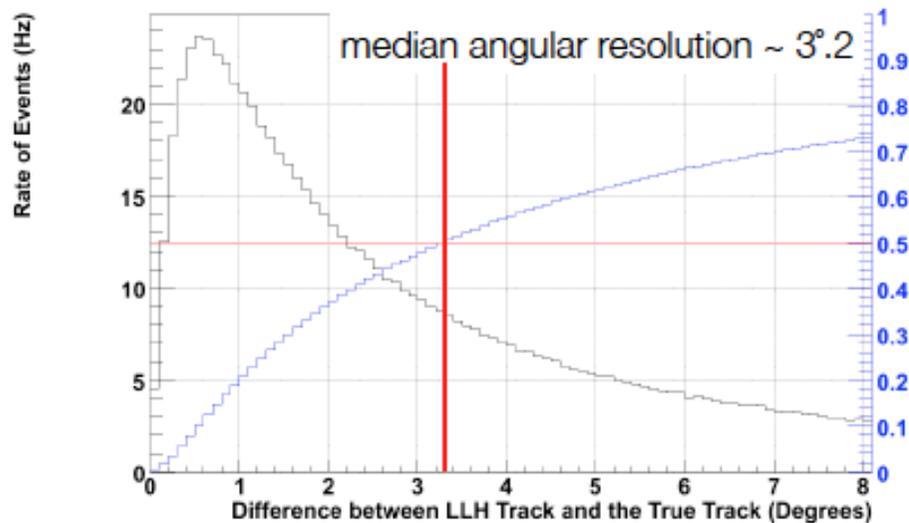


IceCube : étude des rayons cosmiques

IceCube muon (bundles) data

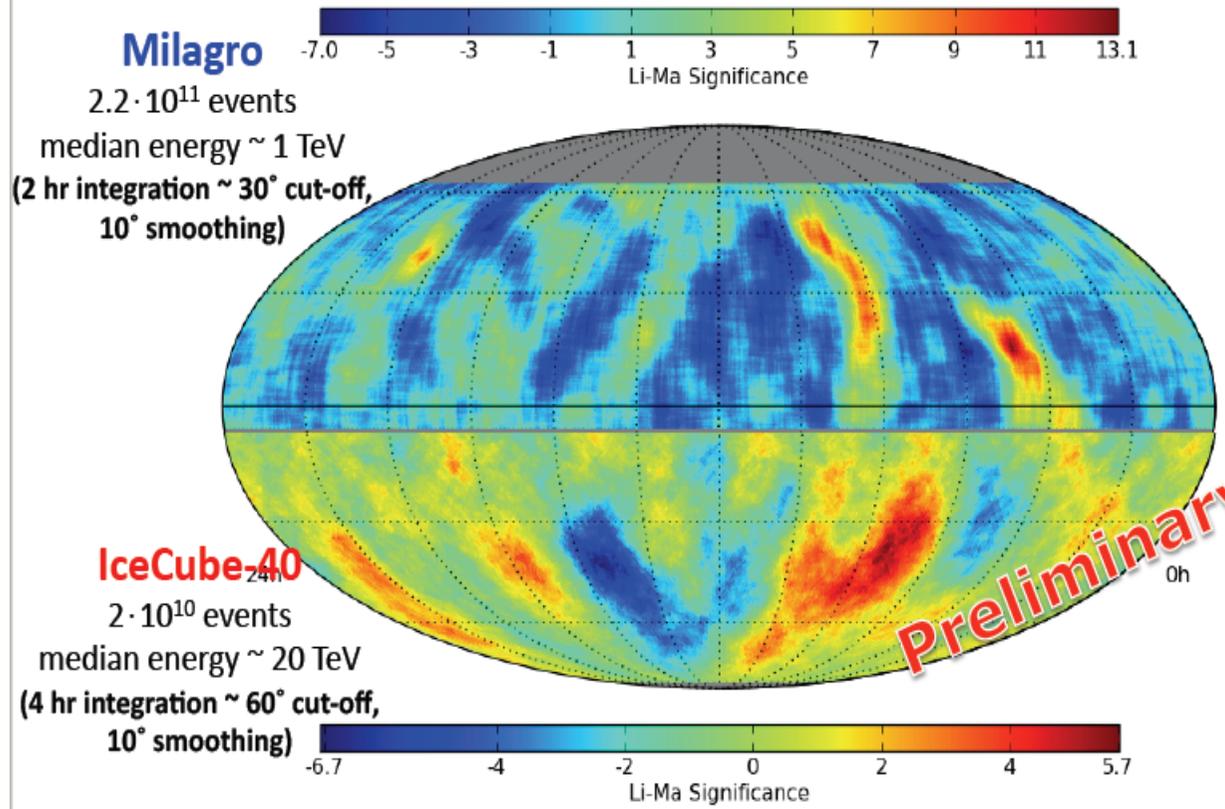
detector	trigger rate (Hz)	actual time (d)	livetime (d)	number of events (*)
IceCube-22	500	300	226	5.4×10^9
IceCube-40	1,100	358	324	19×10^9
IceCube-59	1,700	367	334.5	34×10^9

(*) number of events with LLH reconstruction from online-filter collected by DST



IceCube : étude des rayons cosmiques

📖 arXiv:1105.2326

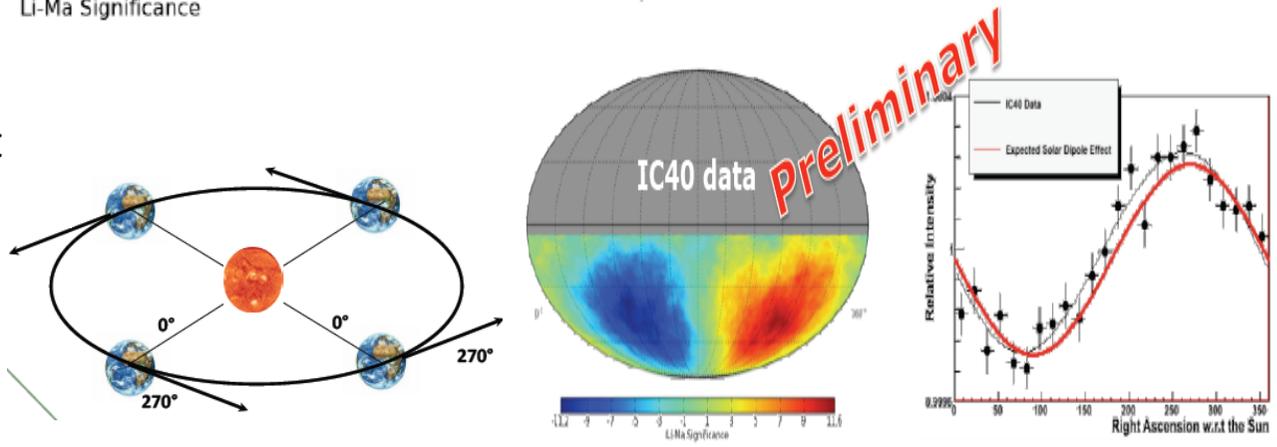


Anisotropie non expliquée...

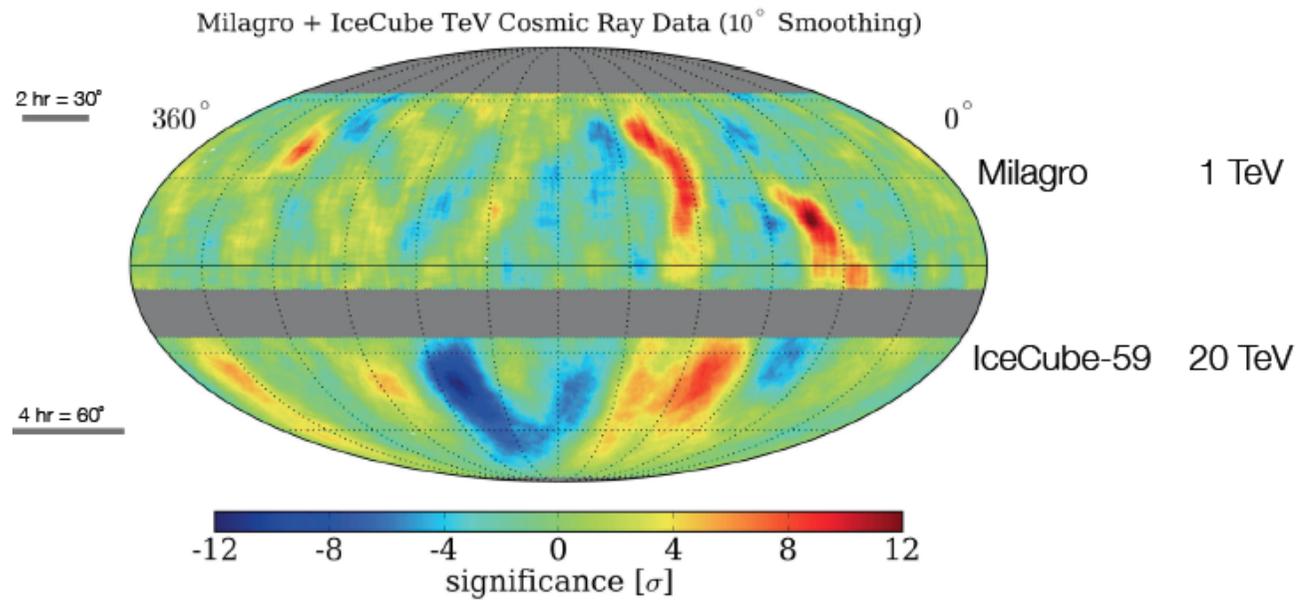
Etudes en cours sur ANTARES

Dipôle induit par mouvement
 autour du soleil
 Compton & Getting effect

📖 Phys Rev 47 (1935) 817

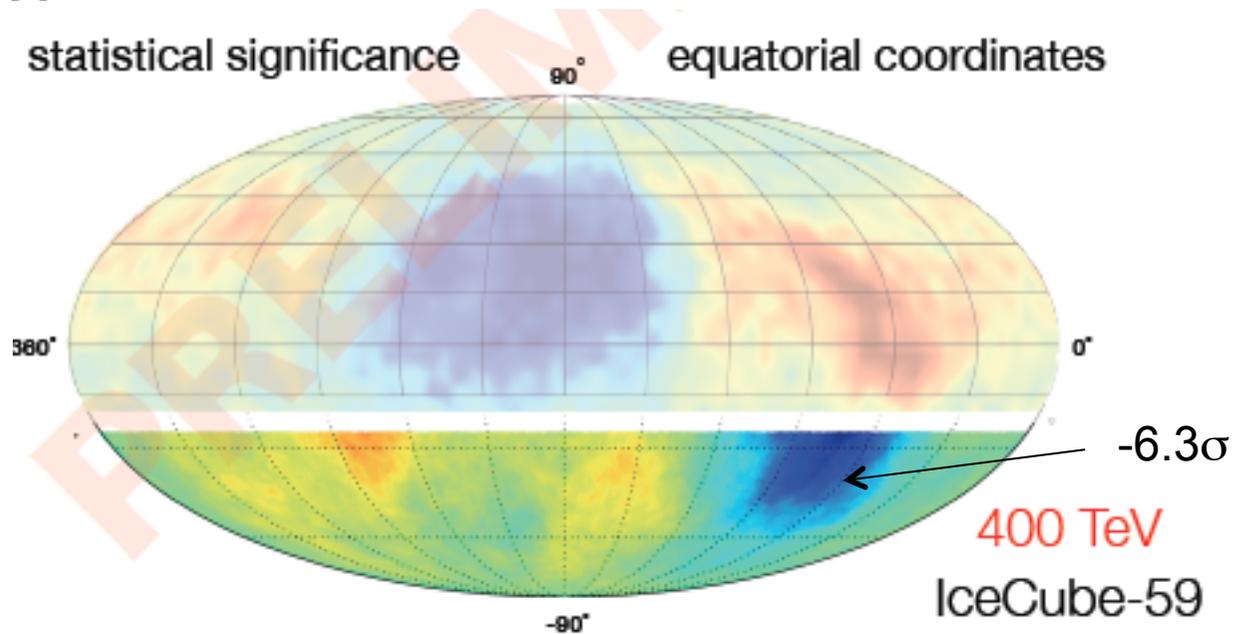


Etudes des rayons cosmiques



Anisotropie confirmée
avec IC59

Evolution avec l'énergie?
A 400 TeV effet différent...

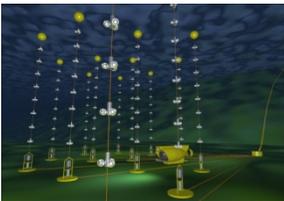


Plan de l'exposé



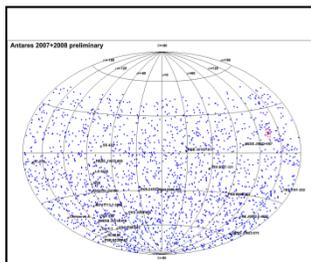
Astronomie neutrino

Rappels historiques
Motivations scientifiques
Sources de neutrinos



Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres
Principes de détection
Les télescopes actuels
Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques études

Etalonnage
Flux diffus
Recherche de sources ponctuelles
Analyses multi-messagers



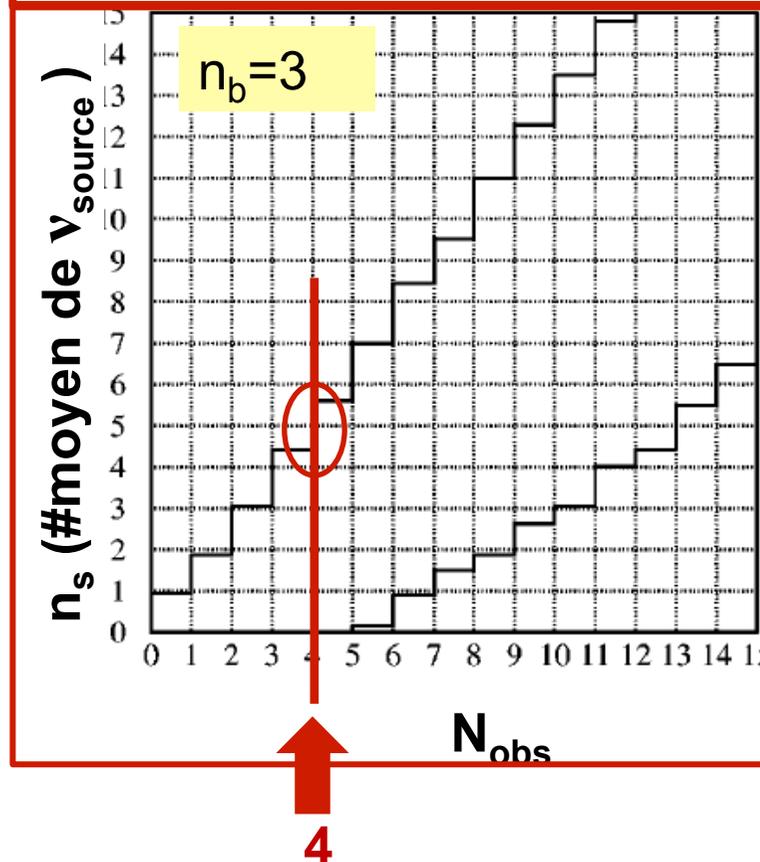
Le projet KM3NeT

Limite supérieure sur un flux de neutrinos

On observe N_{obs} événements.

Donner un intervalle de confiance sur un flux astrophysique moyen compatible à 90 % avec l'observation de N_{obs} événements.

Objectif



$$P(N_{obs}, n_s) = \frac{(n_s + n_b)^{N_{obs}} \exp(-(n_s + n_b))}{N_{obs}!}$$

→ **5** = Limite supérieure = $\mu_{90}(N_{obs}, n_b)$
 \downarrow
 $\Phi_{90\%}$

Toute source ayant un flux moyen $< \Phi_{90\%}$ est compatible avec l'observation à 90% de niveau de confiance

Méthode employée

Hypothèse sur un flux de signal :

- Un flux diffus $E^2\Phi_{\text{test}} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

Observation : un excès de neutrinos

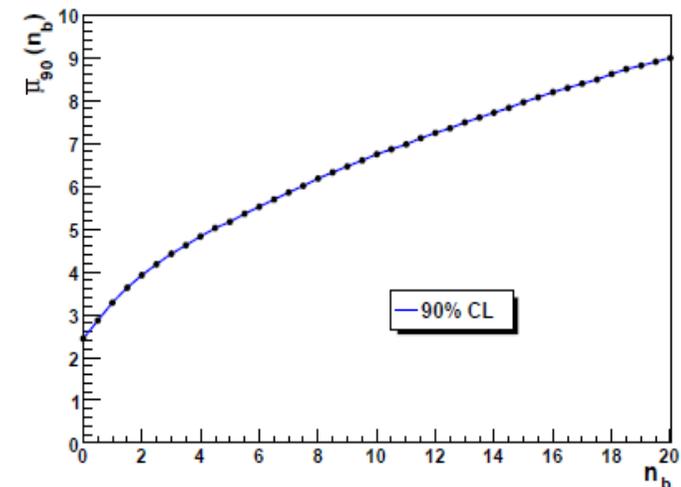
Mettre des coupures sur des variables pour :

- maximiser le potentiel de découverte
- minimiser la sensibilité dans une hypothèse de non-découverte

Analyse en
aveugle

Sensibilité (Monte-carlo): limite supérieure moyenne sur un flux astrophysique obtenue pour des observations qui ne contiendraient que du bruit de fond.

$$\bar{\mu}_{90}(n_b) = \sum_{n_{\text{obs}}=0}^{\infty} \mu_{90}(n_{\text{obs}}, n_b) P(n_{\text{obs}}|n_b)$$

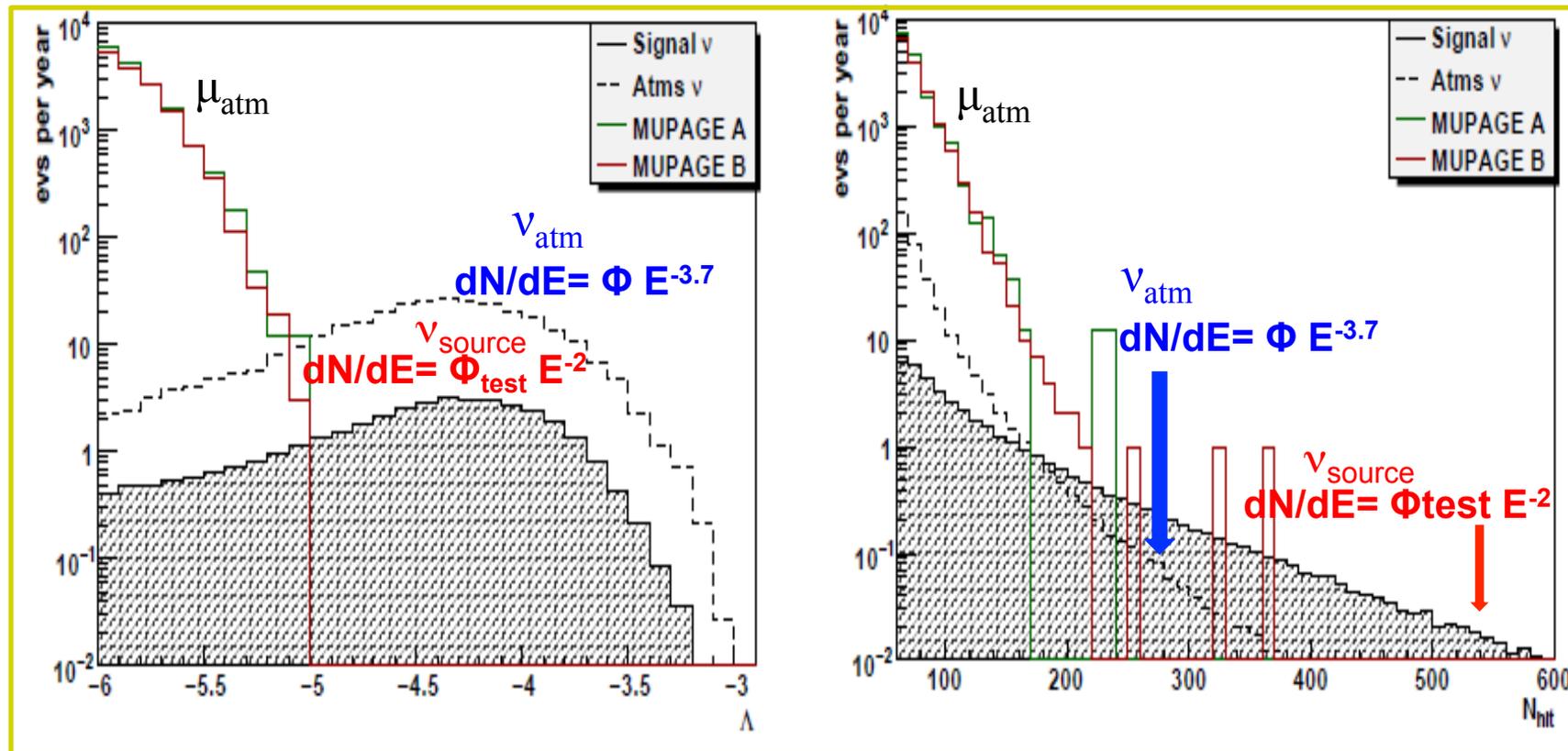


Ex, pour $n_b = 10$, si le signal astrophysique est tel qu'il donne en moyenne 7 neutrinos, ou moins, alors l'observation a 90% de chance d'être compatible avec une fluctuation du bruit de fond.

Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

1. Principes de sélection des données

pré-sélection : muons montants

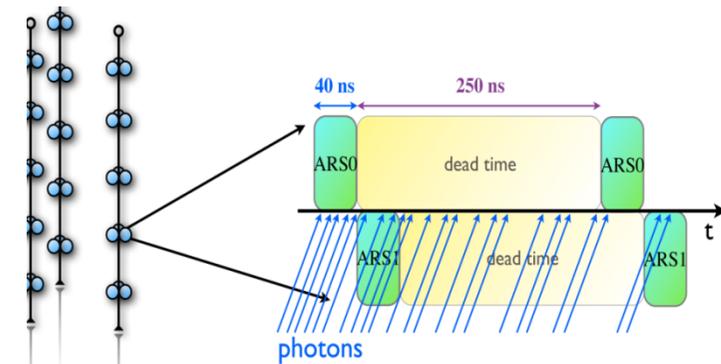


➡ Secondes coupures éliminent les μ_{atm} : Λ ($\sim \log$ Likelihood) et N_{hit}

➡ Estimateur d'énergie

Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

2. Coupure supplémentaire sur l'estimateur d'énergie

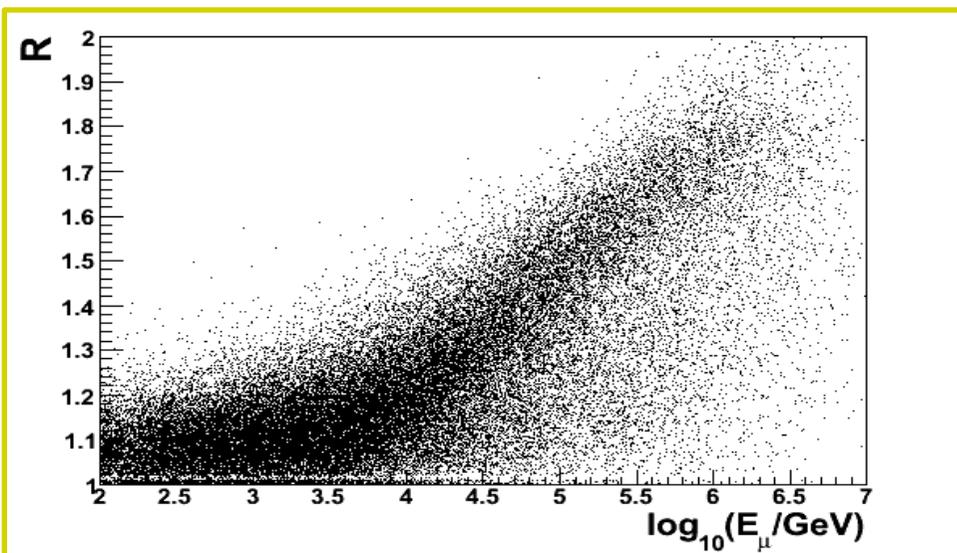
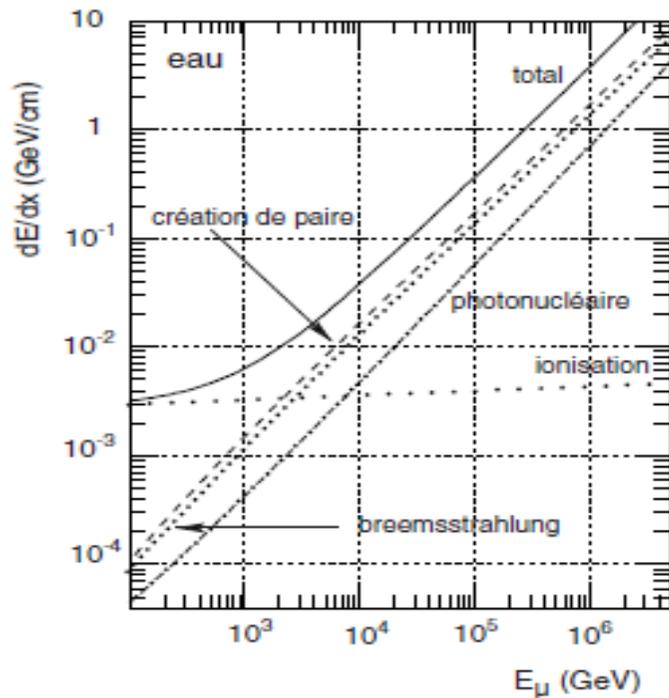


Estimateur d'énergie

$$R = \sum_i \frac{N_i}{N_{PM}}$$

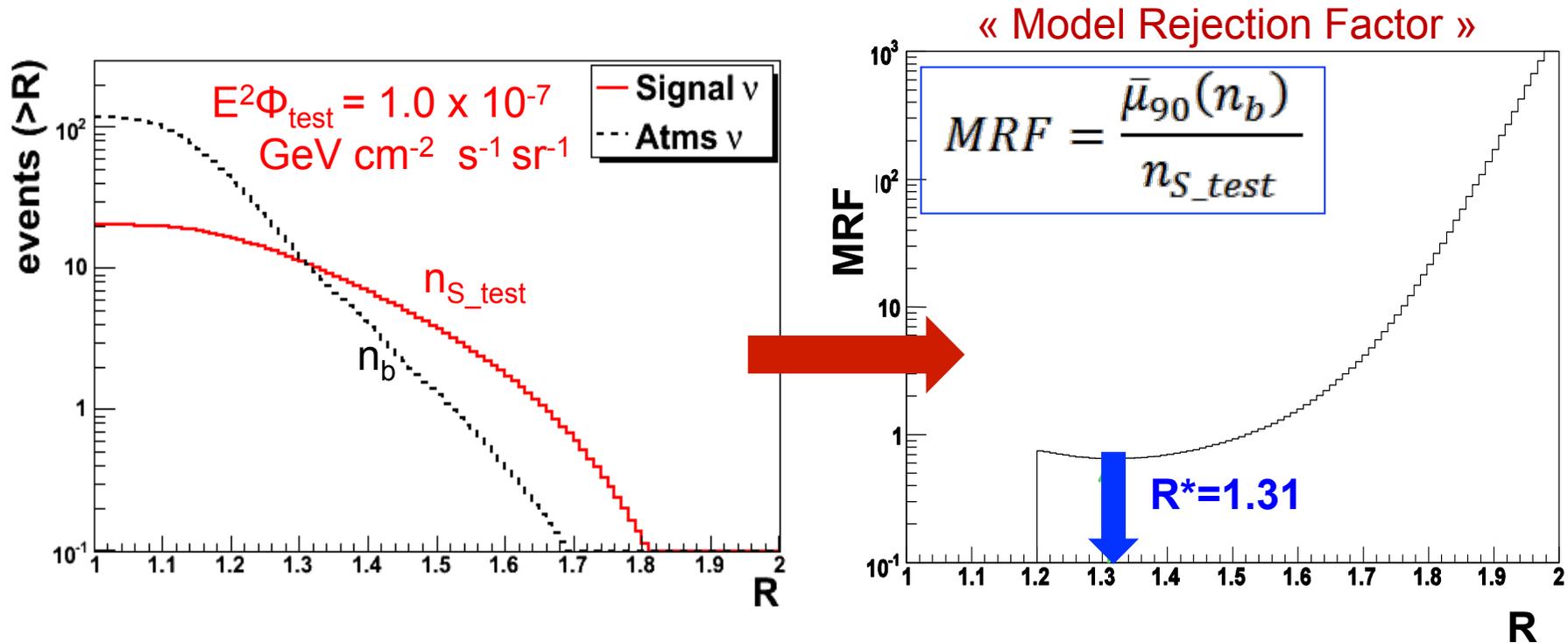
Nb moyen d'impulsions dans le même PM

dE/dx des muons dans l'eau



Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

3. Minimisation de la sensibilité



$$\bar{\Phi}_{90\%} = \frac{\bar{\mu}_{90}(n_b)}{n_{S_test}} \Phi_{test} \text{ min}$$

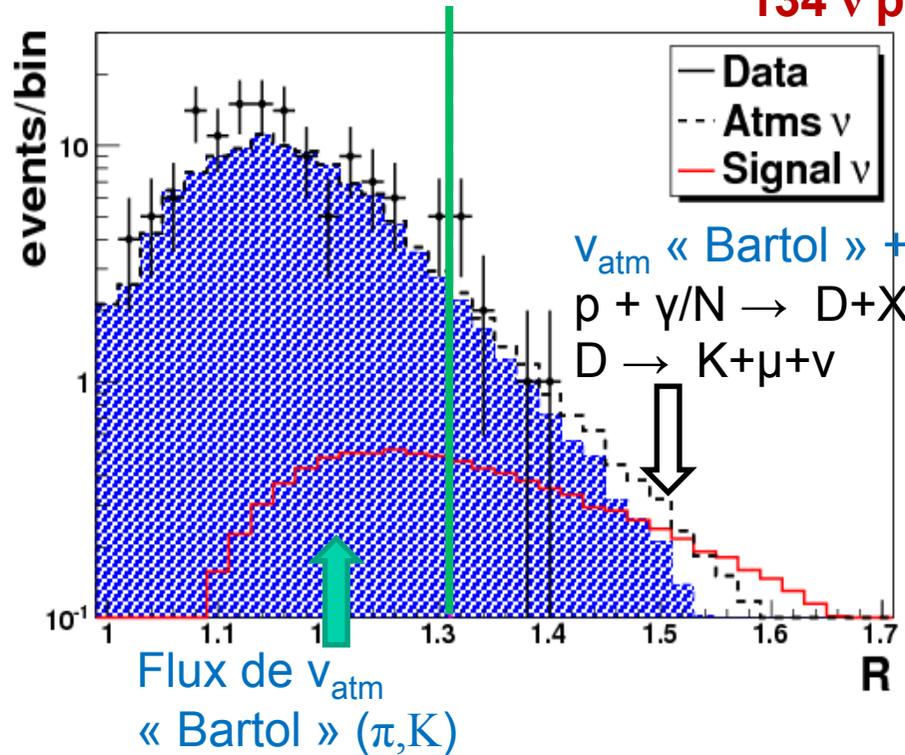
La sensibilité à 90% de niveau de confiance
 $E^2\Phi_{90\%} = 7.0 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

Antares, Dec 2007-Dec 2009 9-12 lignes

Recherche d'un flux diffus de ν_μ cosmiques

DATA : 2008-2009(9,10&12L) : 334 jours effectifs

134 ν passent les 2^{ndes} coupures



$R > 1.31$
 $N_{obs} : 9$
 $n_b : 10.1-12.5 (11.3)$
 $n_s : 10.6$ pour Φ_{test}
 (20TeV-2.5PeV)

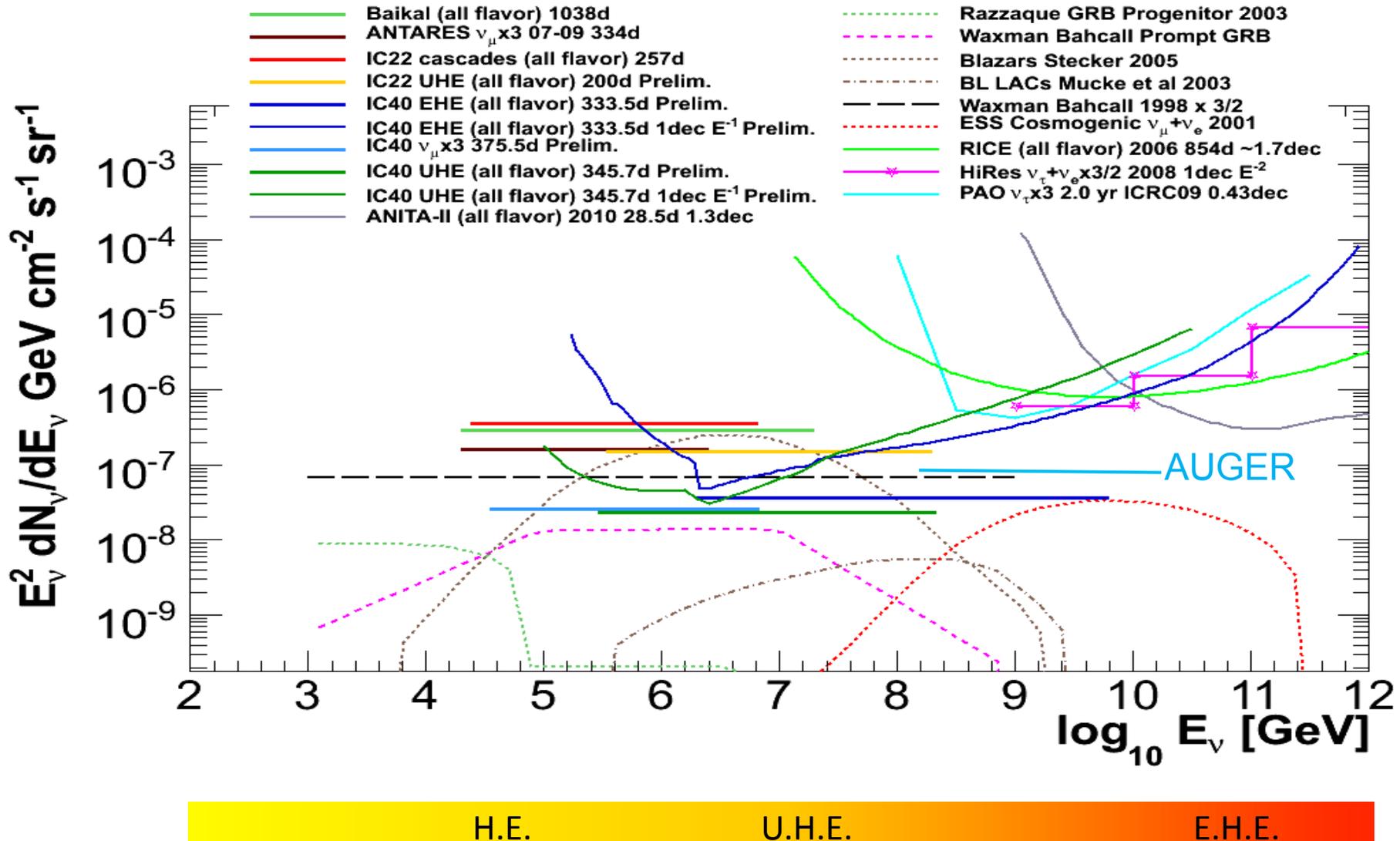
$$\Phi_{90\%} = \frac{\mu_{90}(N_{obs}, n_b)}{n_{S_test}} \Phi_{test}$$

La limite supérieure du flux de ν_{astro} avec un taux de confiance de 90%

$$E^2 \Phi_{90\%} = 5.3 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

HE/UHE/EHE flux limits

All-flavor 90% CL limits and model fluxes

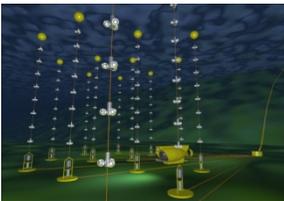


Plan de l'exposé



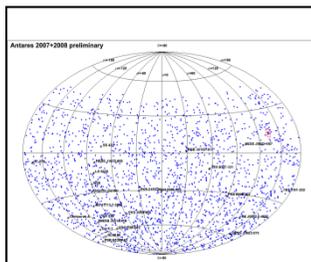
Astronomie neutrino

Rappels historiques
Motivations scientifiques
Sources de neutrinos



Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres
Principes de détection
Les télescopes actuels
Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques études

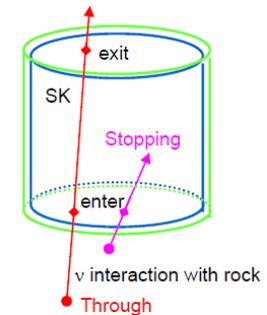
Etalonnage
Flux diffus
Recherche de sources ponctuelles
Analyses multi-messagers



Le projet KM3NeT

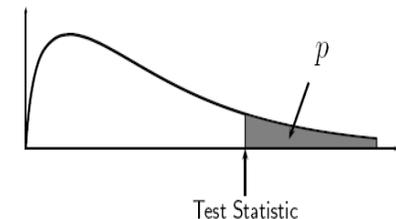
Recherche de sources ponctuelles

- SuperKamiokande (bas seuil en énergie $E > 1.6$ GeV)
 - 3134 “upward through going events” en 2623 jours
- ANTARES: données à 5-10-12 lignes (TeV)
 - 2007-2008 : 2190 événements montants (304 jours)
- ICECUBE (IC40) 375.5 jours



« Analyse en aveugle » : Optimisation avec evts dont l'ascension droite est rendue aléatoire

- Algorithme de recherche d'agrégats
- Mise en place d'un test statistique (e.g. Likelihood ratio)
- Calcul de la p -value (probabilité d'observer une telle valeur par fluctuation du bruit de fond)
- Calcul de la significativité finale (post trial) d'avoir p -value après plusieurs essais



Ces analyses peuvent se faire :

- Sur tout le ciel
- Pour une liste prédéfinie de sources d'intérêt
- Pour une collection de sources du même type (stacking analysis)

Methods

- Neunhoffer and Kopke NIM A 558 (2006) 561
- Hill and Rawlins, Astrop. Phys., 19, 393, (2003)

Recherche de sources ponctuelles

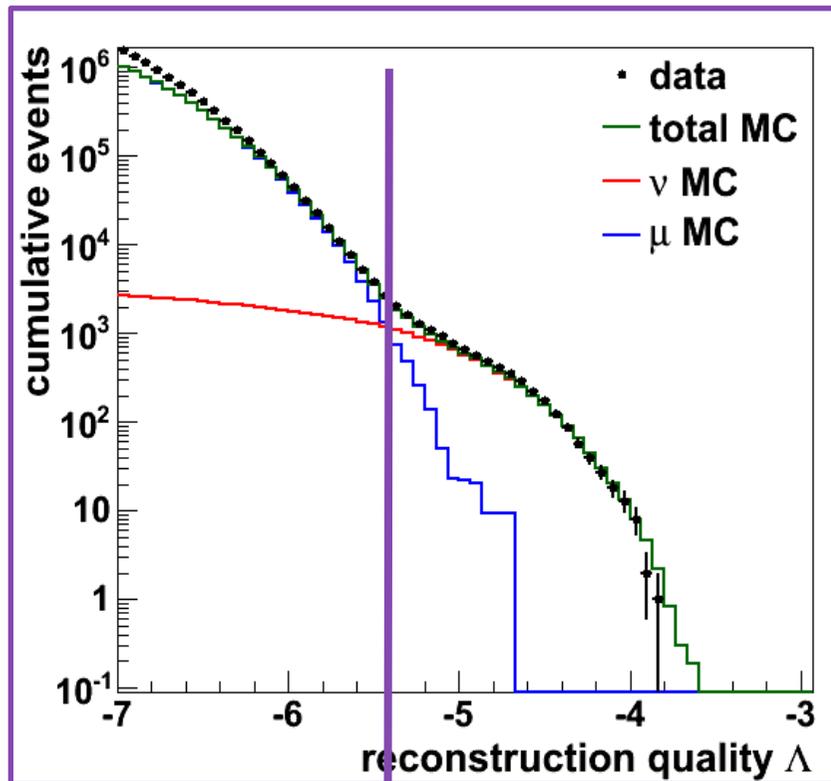
ANTARES

 [arXiv:1108.0292v1](https://arxiv.org/abs/1108.0292v1)

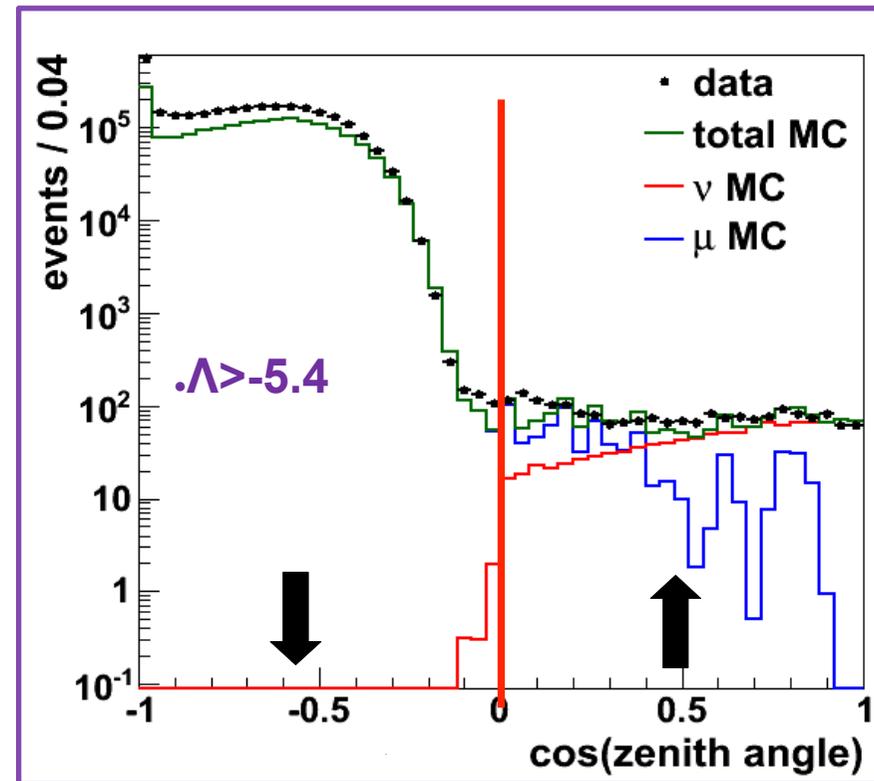
Données : 2007(5L)-2008(10&12L) : 304 jours effectifs

2190 muons montants (ν : 60% , μ : 40%)

Résolution angulaire : $0.5^\circ \pm 0.1^\circ$ pour un spectre en E^{-2}



5.4



Carte du ciel ANTARES

 [arXiv:1108.0292v1](https://arxiv.org/abs/1108.0292v1)

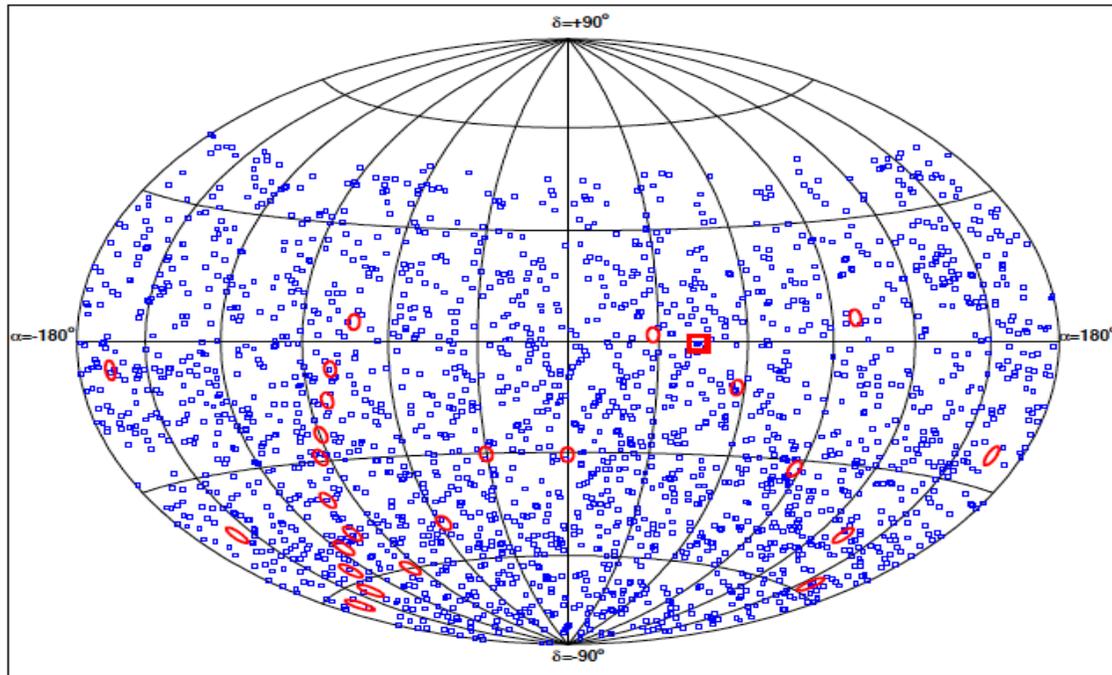
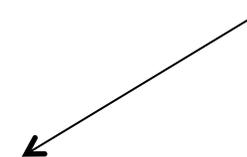


Fig. 3.—: Map in equatorial coordinates of the 2190 selected neutrino candidates. The position of the most significant cluster (see text) is indicated by the square. The circles denote the positions of the 24 sources from the candidate list.

Robustesse de $(\bar{\delta}_i, \alpha_i)$ si on déplace chaque ligne de 20 cm au hasard :



	dans 1 degré	commun aux 2 échantillons
muons reconstruit à tort comme montant	60%	70%
neutrinos avec flux en E^{-2}	92%	97%

Recherche de sources

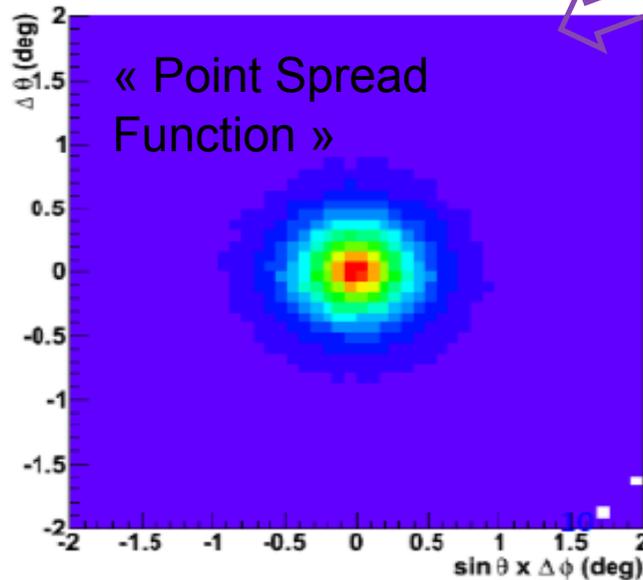
Likelihood

Probabilité d'observer $N_{\text{sig}}(\Phi)$ neutrinos pour un certain flux Φ de source en (δ_S, α_S)

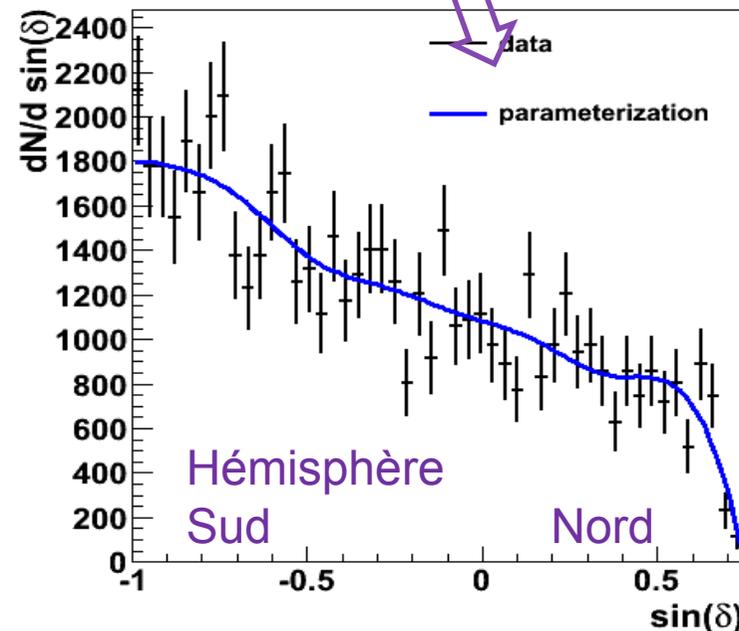
$$\log \mathcal{L}_{s+b} = \sum_i \log [N_{\text{sig}} \times \mathcal{F}(\beta_i(\delta_S, \alpha_S)) + B_i] - N_{\text{tot}}$$

Densité de proba /
d Ω pour l'évt i

$N_{\text{tot}}(\Phi) = N_b$ moyen
d'évts attendus



β_i : écart angulaire entre le muon i (observé en θ_i, ϕ_i, t_i) et le neutrino émis de la source (en δ_S, α_S)



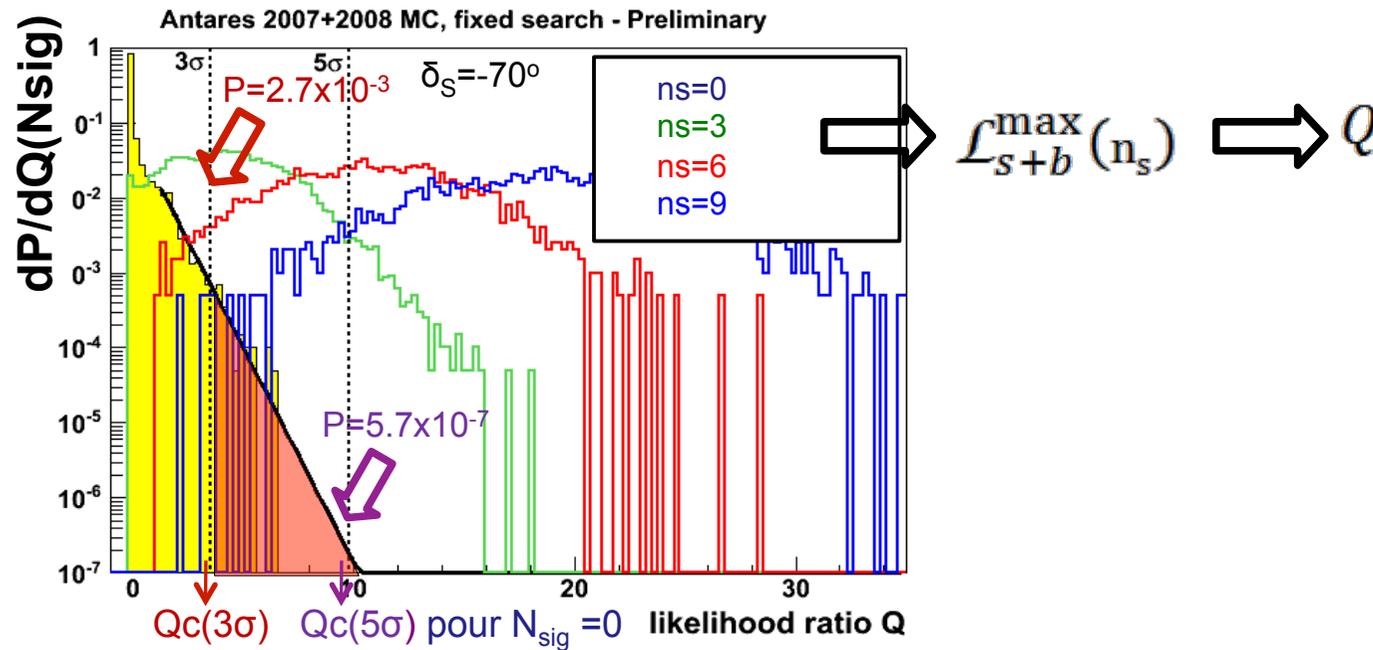
Recherche de sources

test statistique

$$Q = \log \mathcal{L}_{s+b}^{\max} - \log \mathcal{L}_b$$

« likelihood ratio »

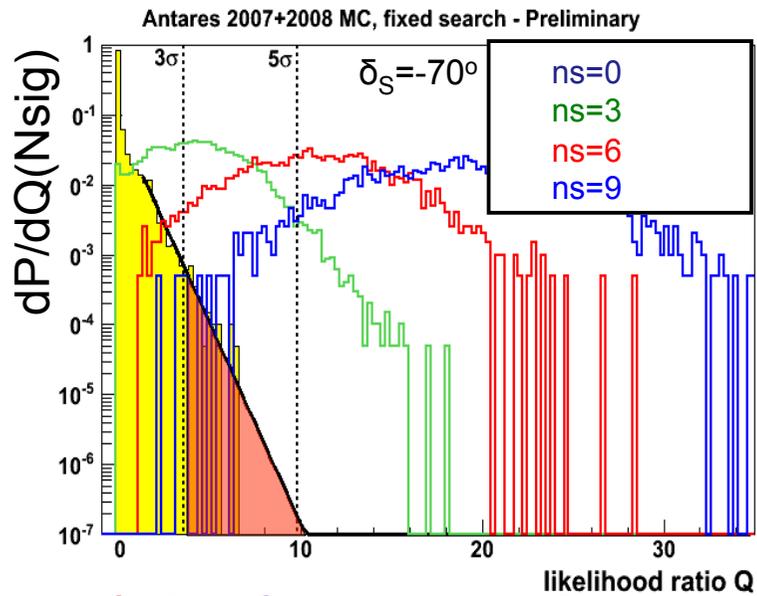
Génération de « pseudo-expériences » avec l'échantillon sélectionné
($N_{\text{tot}} = 2190$ mais azimuth aléatoire)



Echantillon mesuré $\rightarrow Q_{\text{obs}}$
Découverte à 5σ si $P(Q \geq Q_{\text{obs}} | ns=0) < 5.7 \times 10^{-7}$
 $Q_{\text{obs}} > Q_c(5\sigma | ns=0)$

Recherche de sources potentiel de découverte méthode

$$Q = \log \mathcal{L}_{s+b}^{max} - \log \mathcal{L}_b$$



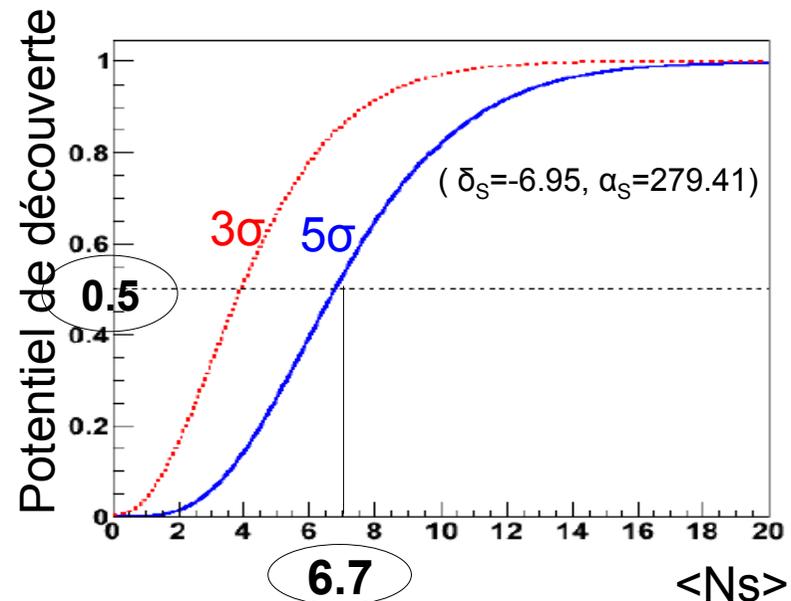
$Q_c(3\sigma)$ $Q_c(5\sigma)$ pour $N_{sig} = 0$

$\langle N_s \rangle$: Nb moyen de ν attendu pour une source ($dN/dE = \Phi E^{-2}$)

: dépend de Φ , PSF, A_ν^{eff}

$$\frac{dP}{dQ}(\langle N_s \rangle) = \sum_{N_{sig}=0}^{\infty} \frac{dP}{dQ}(N_{sig}) P(N_{sig} | \langle N_s \rangle)$$

Potentiel de découverte :
 $P(Q(\langle N_s \rangle) > Q_c(ns=0))$



Si la source a un flux qui produit en moyenne 6.7 ν (au moins), on a une chance sur deux de déclarer une découverte à 5 sigma

Analyse plus récente 2007-2010

📖 ICRC 2011

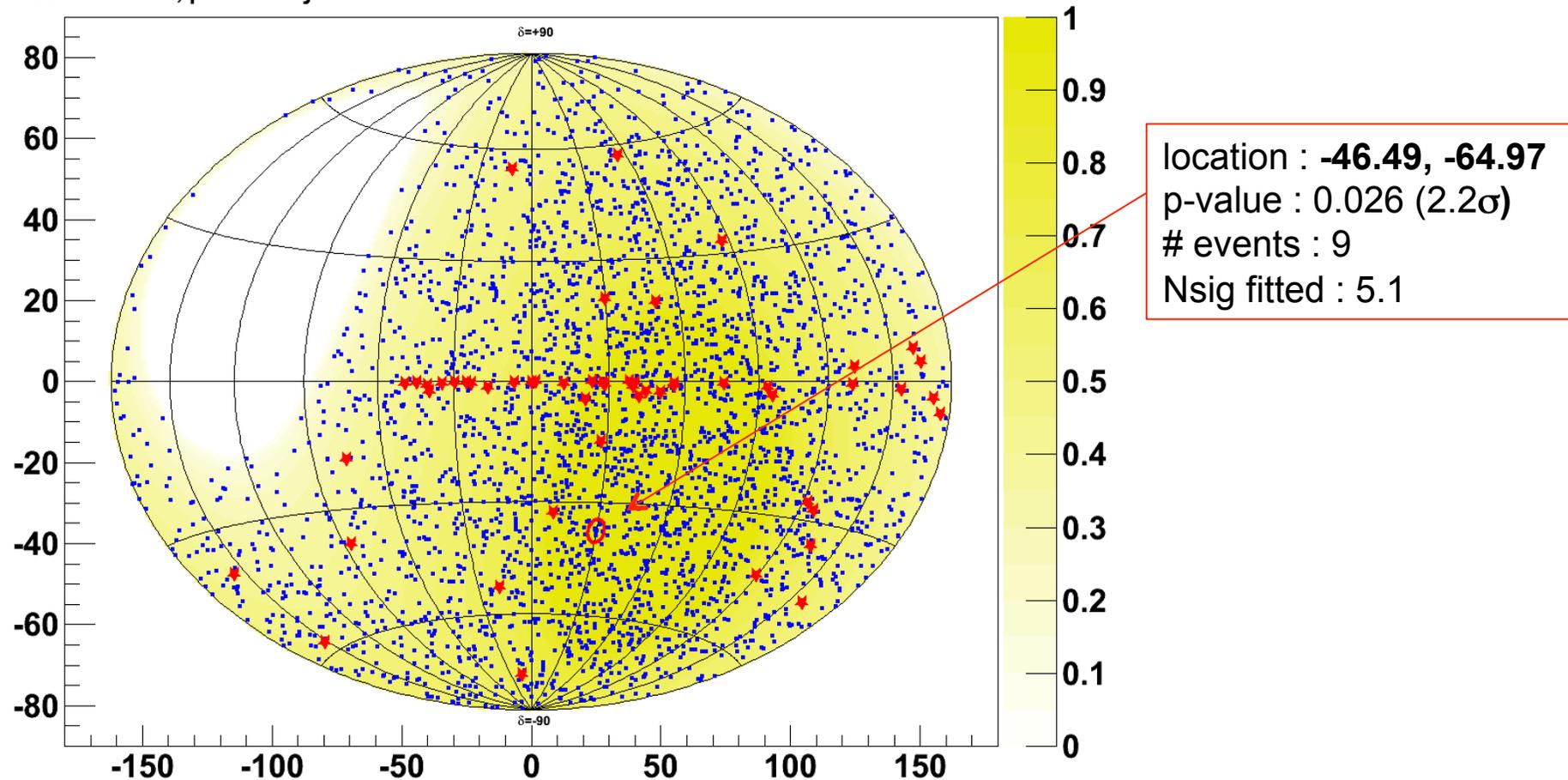
Total livetime : 813 days

Number of neutrino candidates : 3058

Muons in the sample (estimated from MC) : 14%

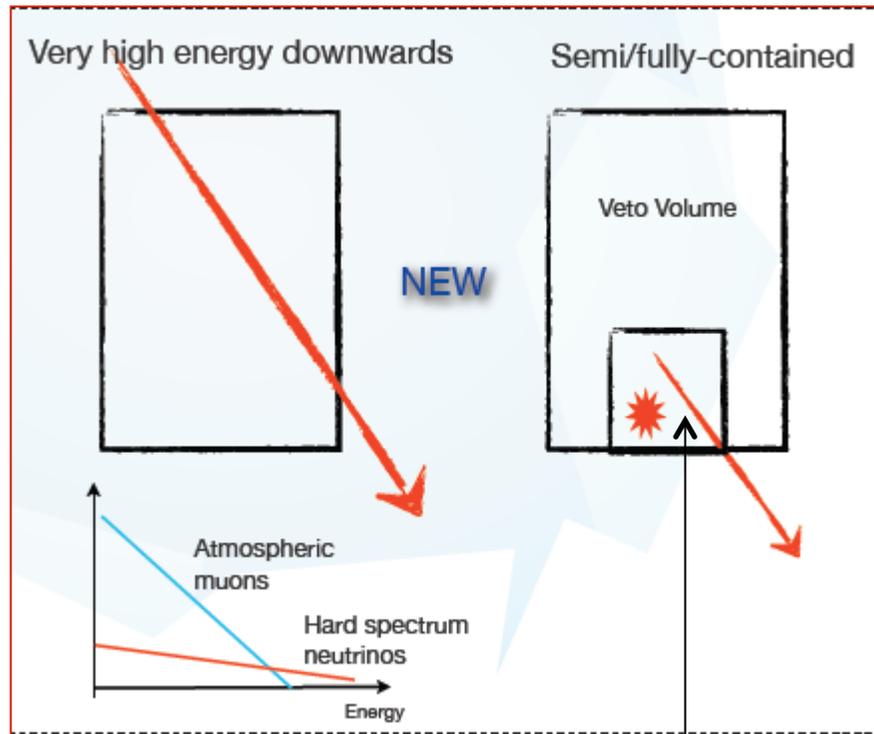
Median angular resolution for E^{-2} neutrinos passing cuts : $0.46 \pm 0.1^\circ$

Antares 2007-2010, preliminary

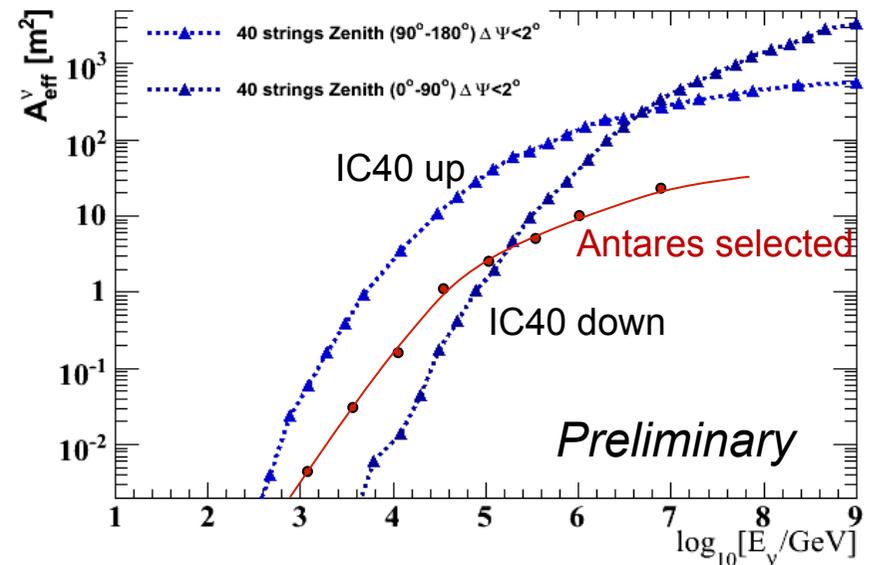


IceCube regarde tout le ciel

La taille d'IceCube permet désormais une recherche sur tout le ciel à très haute énergie



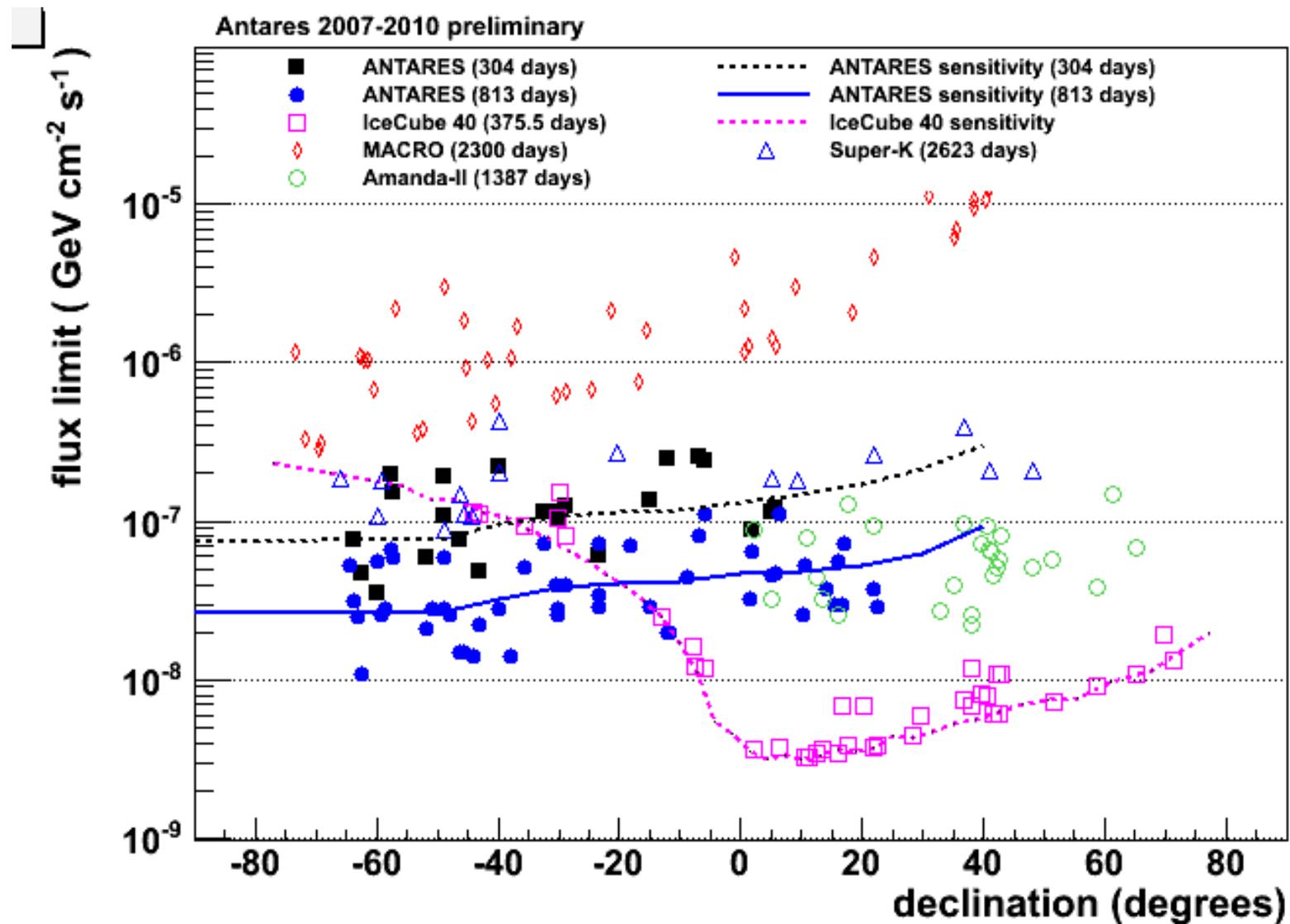
Including DeepCore



Mais la sensibilité est réduite par:

- Les coupures à haute énergie pour réduire le bruit de fond atmosphérique
- L'application d'un veto contre le bruit de fond (interactions contenues)
- Rend difficile l'étude des sources galactiques au TeV

Limites supérieures

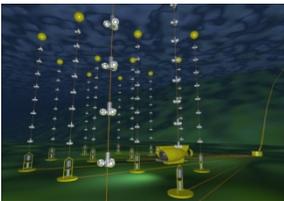


Plan de l'exposé



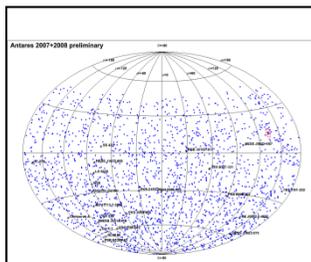
Astronomie neutrino

Rappels historiques
Motivations scientifiques
Sources de neutrinos



Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres
Principes de détection
Les télescopes actuels
Le télescope ANTARES



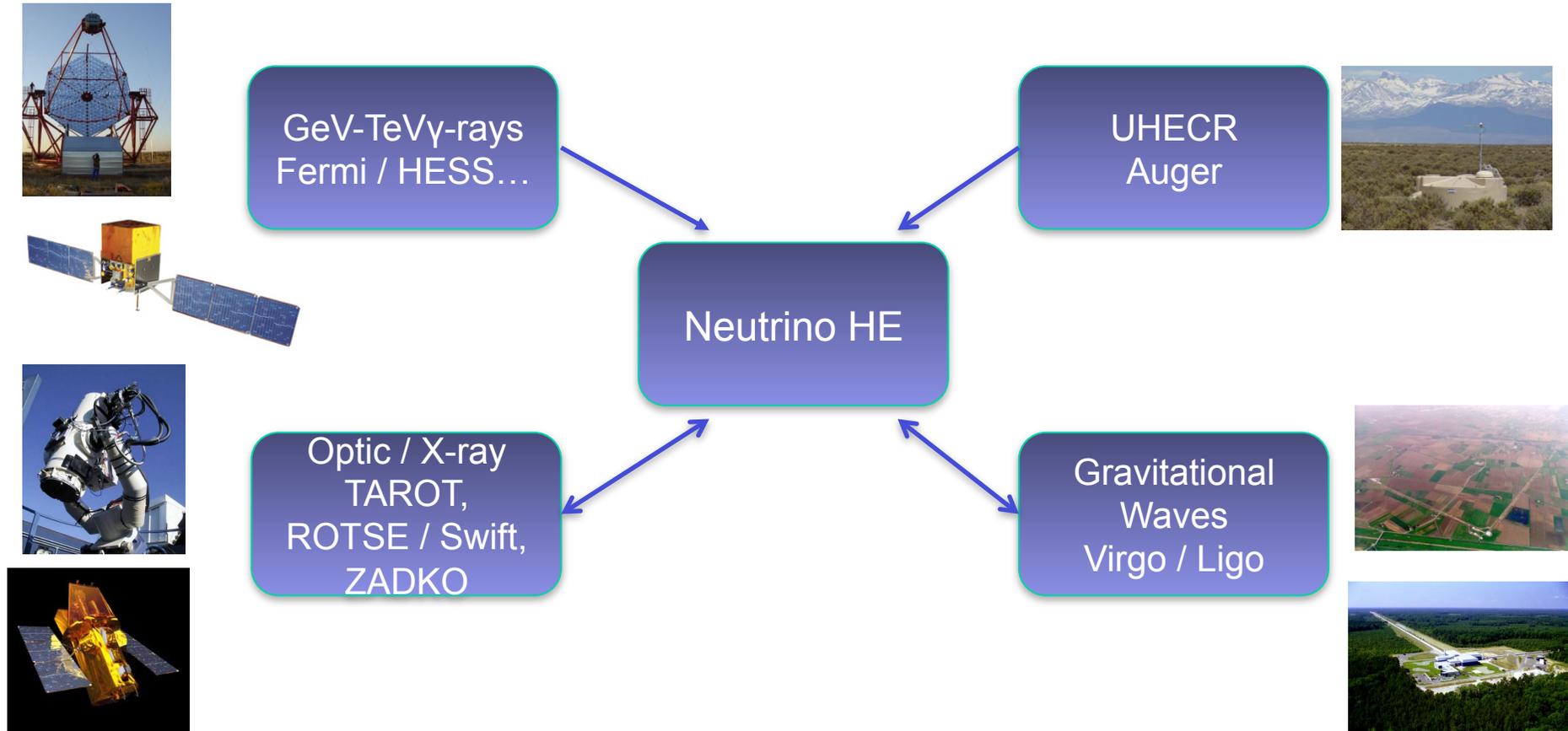
Sélection choisie de quelques études

Etalonnage
Flux diffus
Recherche de sources ponctuelles
Analyses multi-messagers



Le projet KM3NeT

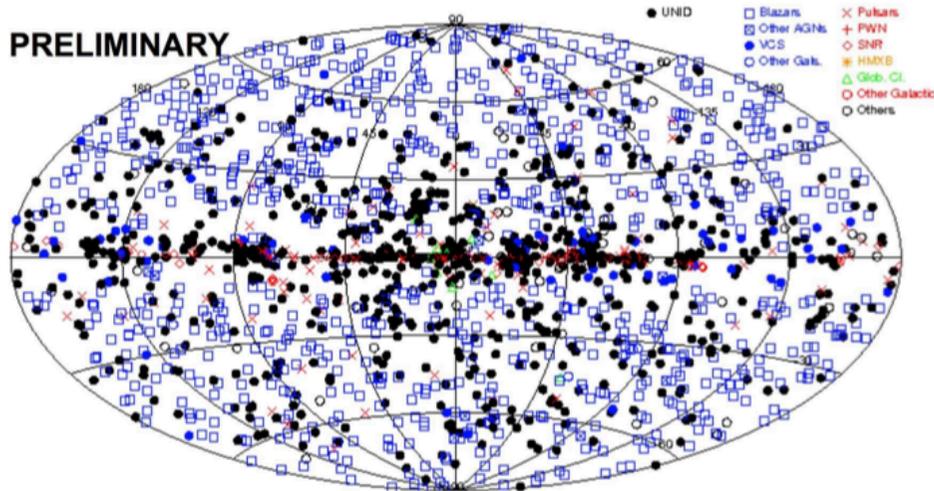
Approche multi-messagers



⇒ Un moyen de mieux comprendre les sources

⇒ Un moyen d'augmenter la sensibilité des détecteurs

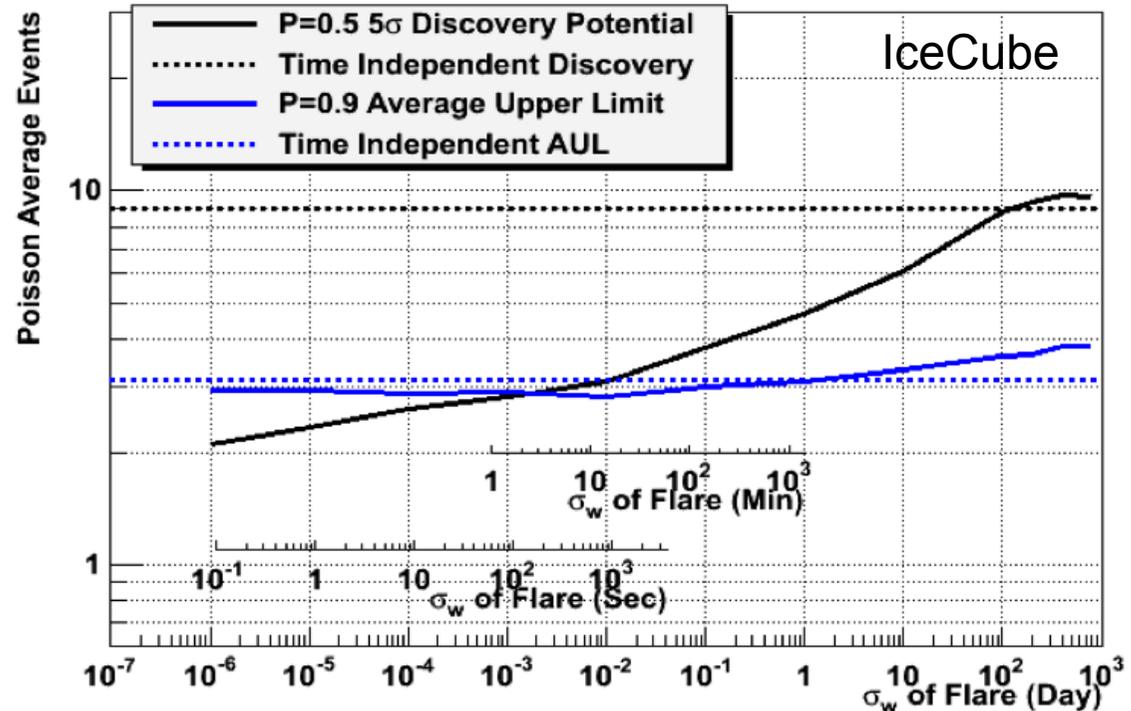
Etude des flares d'AGNs



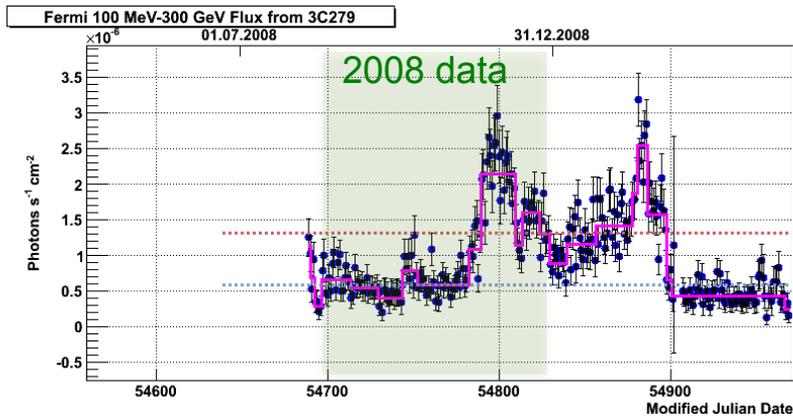
De nombreuses sources de FERMIL, détectées à haute énergie, sont variables...

→ Utilisation de la corrélation temps espace pour réduire le bruit de fond et augmenter le potentiel de découverte.

Gaussian Flares at Declination +16°



Etude des flares d'AGNs



Données Fermi LAT

Identification des périodes actives des AGNs (blazars...)

Durée typique : 1-20 jours

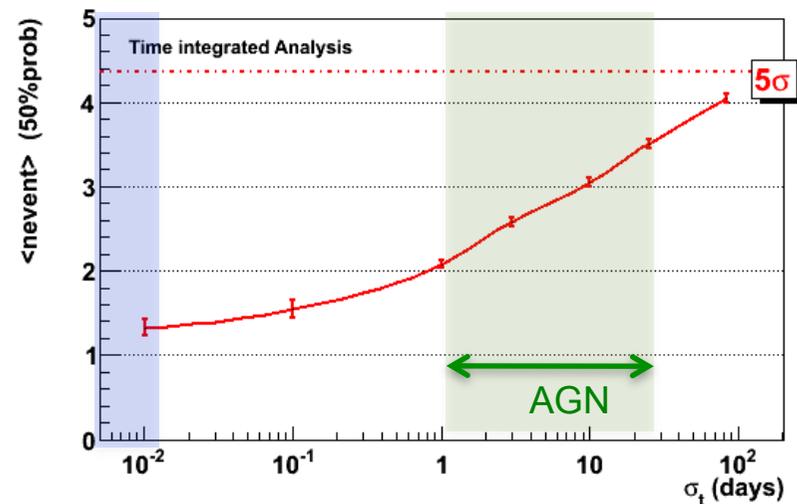
ANTARES:

- Time dependant likelihood method
- Analyse des données 2008 (4 mois)
- Performance: Nombre d'événements nécessaires pour une découverte à 5σ (50 % prob.)

→ Amélioration d'un factor 2-3 par rapport à l'analyse standard

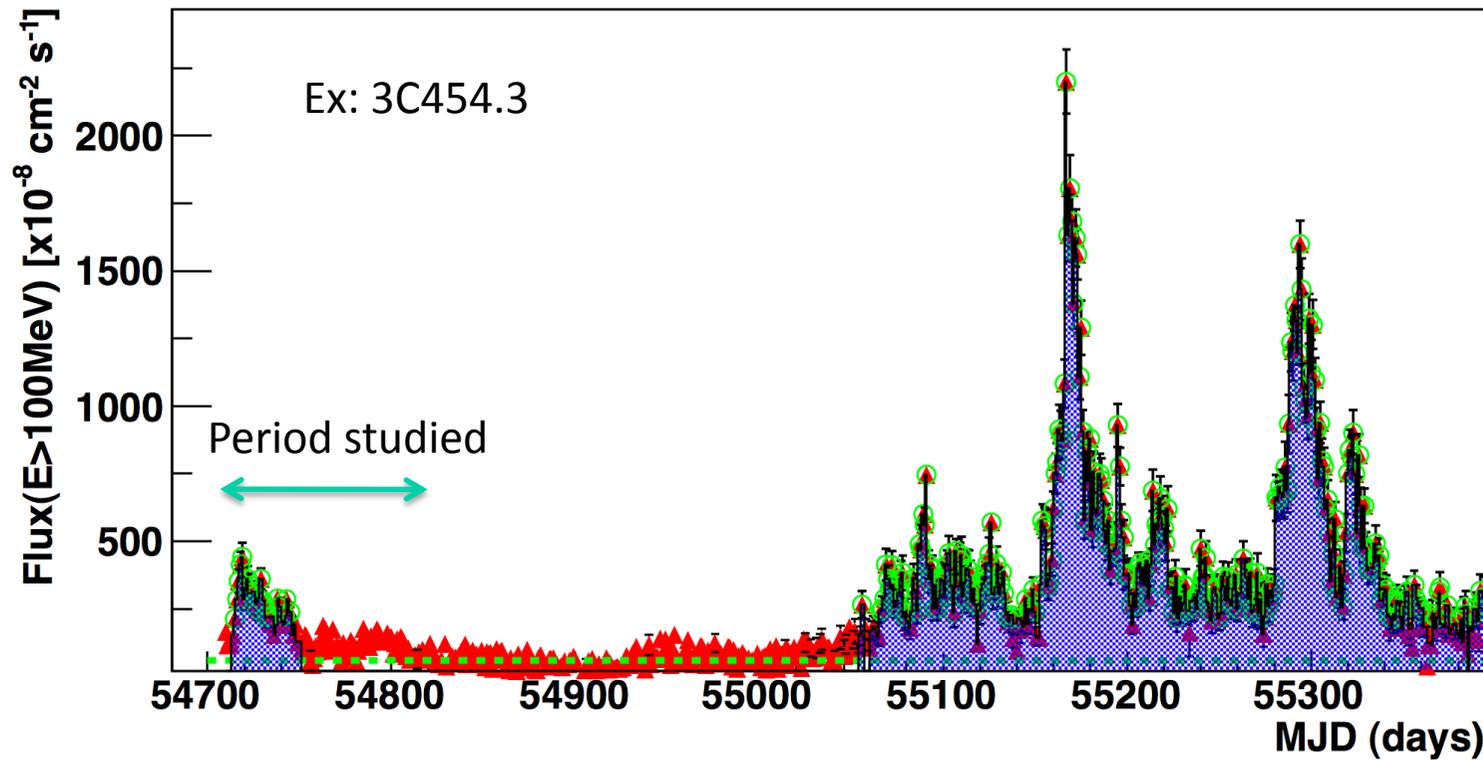
Analyse de 10 sources Fermi :

=> 1 neutrino corrélé à 3C279 (post-trial p-value $\approx 10\%$)



Préliminaire

Et plus encore à venir



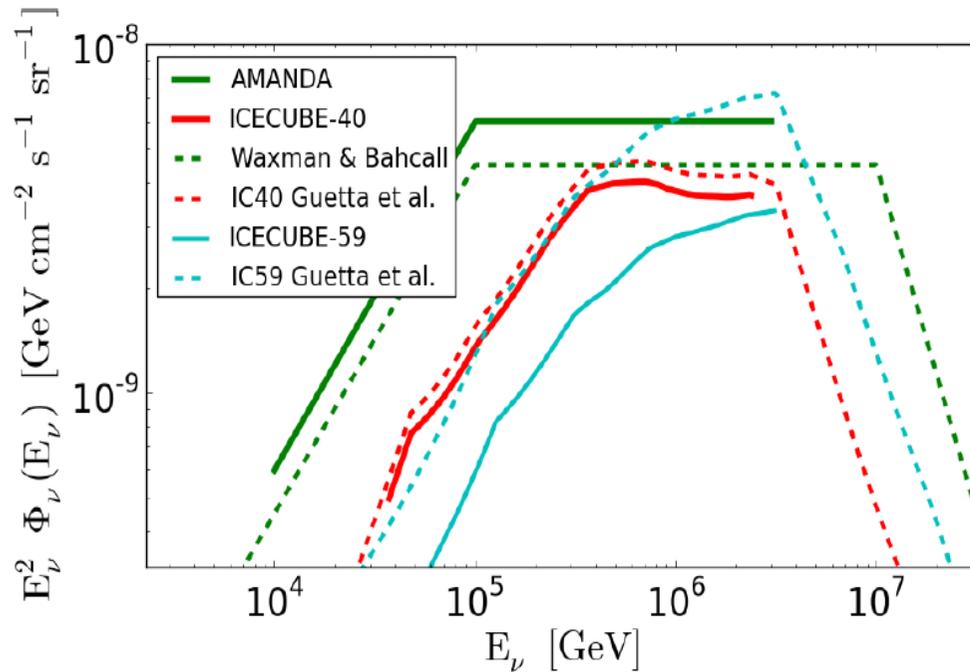
Gamma-ray light curve (red dots) of the blazar 3C454.3 measured by the LAT instrument onboard the Fermi satellite above 100 MeV for almost 2 years of data

Alerte aux sursauts gamma



- Recherche de neutrinos en coïncidence avec les GRB (117)

- Temps et direction connus → réduction du bruit de fond → meilleure sensibilité
- modélisation individuelles des sursauts (fireball model)



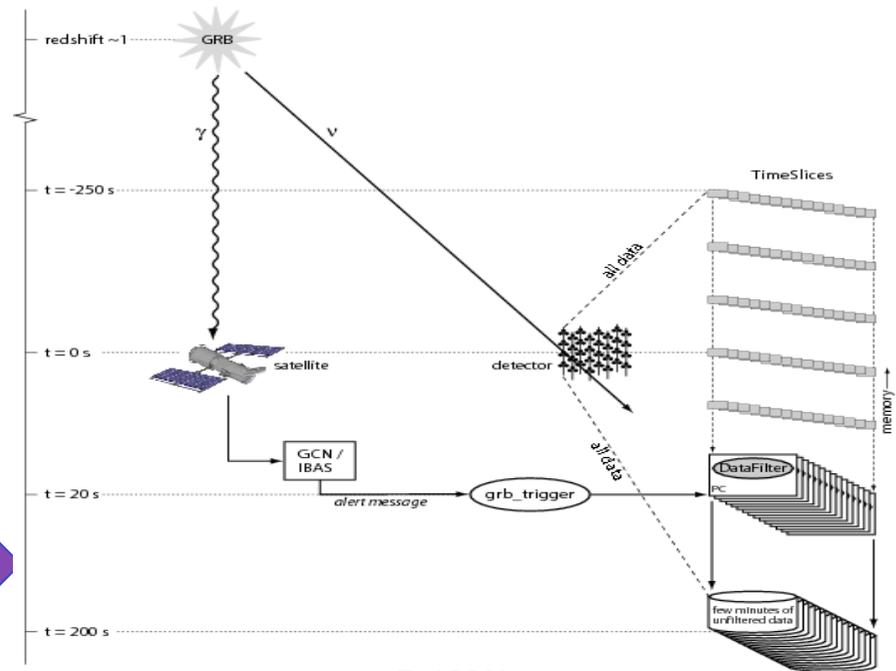
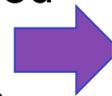
La limite obtenue avec IC40 exclut les prédictions les plus optimistes

Phys.Rev.Lett.106:141101,2011

Encore meilleur avec IC59

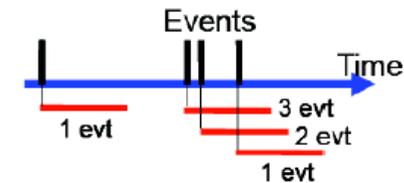
-> exclure les GRB comme source de rayons cosmiques au dessus de la cheville

- ANTARES dumps all buffered unfiltered data when receiving an alert (~1min)
- ANTARES 2007 (5L) 34 GRB
- Enhance sensitivity at lower energies



Alertes neutrino : suivi électromagnétique

- Inversement, IceCube et ANTARES envoient des alertes pour suivi optique
 - Pourrait confirmer une détection
 - Triggers : VHE events ou multiplets (rolling searches)



IceCube

Latency has been reduced to ~ minutes
 Alarm rate ~ 30 /year
 Alerts are sent to ROTSE
 $T_0, T_0 + 1, 2, \dots, 14$ days

Antares

Latency ~ sec
 Alarm rate 1-2 / month
 Alerts are sent to :

- TAROT (La Silla, Chile) since Feb 2009
- ROTSE

 $T_0, T_0 + 1, 3, 9$ and 27 days



“The sun never rises over the ROTSE empire”



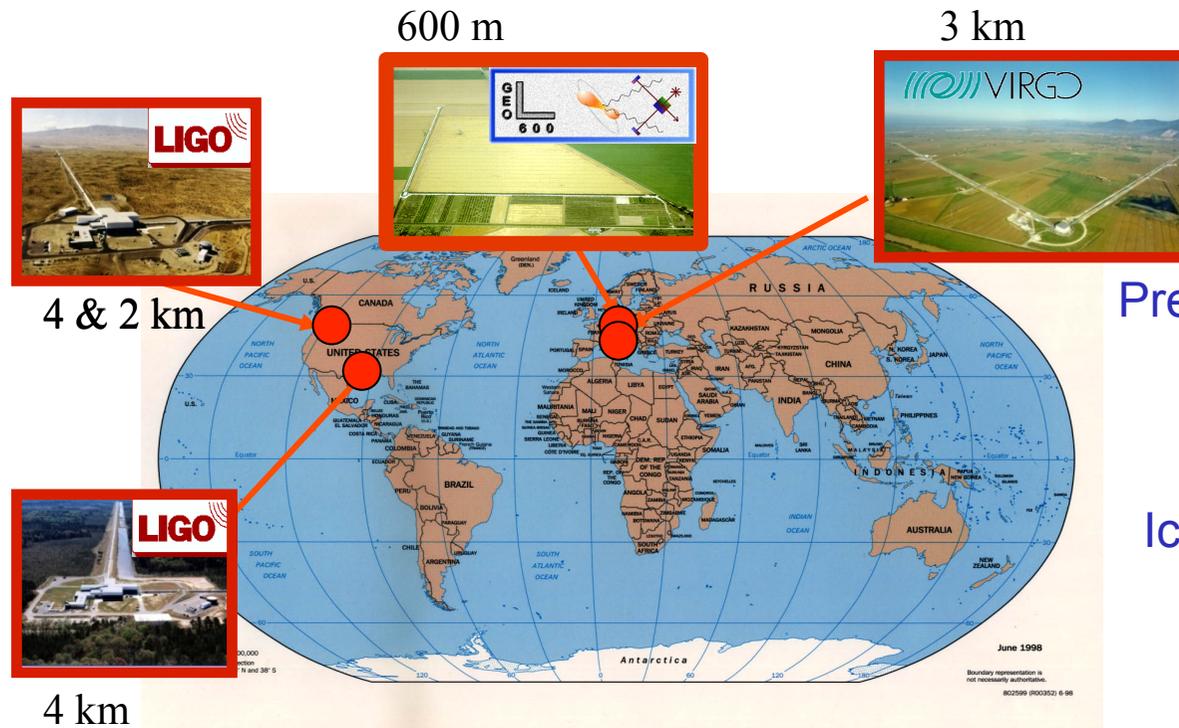
4 x 0.45 m
 FoV: $1.85^\circ \times 1.85^\circ$
 fully automated system



IceCube envoie également des alertes à
 MAGIC (La Palma, $E > 25 \text{ GeV}$)

GW-HEN coïncidences

Les interféromètres gravitationnels:

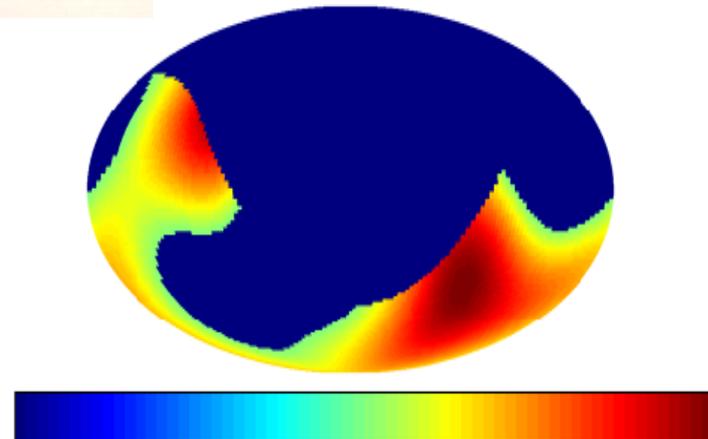


Première collaboration (MoU)
entre LSC et ANTARES
Sept 2009

IceCube a rejoint le groupe
en mars 2010

Couverture céleste commune
VIRGO+LIGO+ANTARES
en coordonnées géocentriques ~ 30%

Workshop GWHEN, APC, mai 2009
<http://www.gwhen-2009.org>



Les données communes

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ANTARES	5L	10L	12L						KM3NeT	
Ice Cube	9s	22s	40s	59s	79s	Ice Cube 86 strings				
LIGO	S5			S6					Advanced LIGO	
VIRGO	VSR1		VSR2	VS R3					Advanced VIRGO	

Memorandum of Understanding (LIGO-M0900278-v1, VIRGO-XXXX)

between the

ANTARES Collaboration

and the

Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) Scientific Collaboration

Approved by all participants
(7 signatures)

and

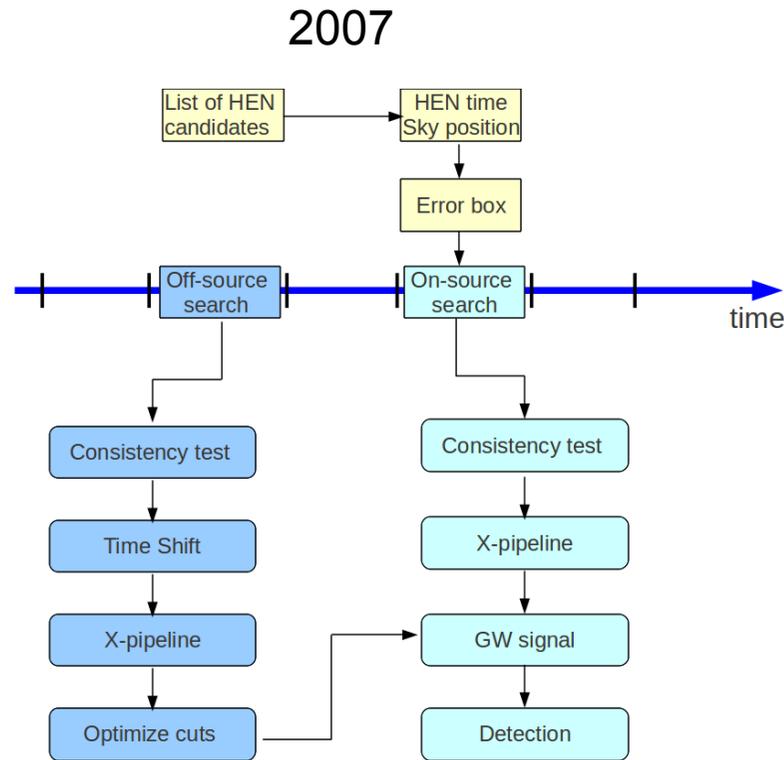
VIRGO

Inclut données jusqu'en 2010

Les analyses en cours

Plusieurs types d'analyse possibles:

Thèse de B. Bouhou (APC)

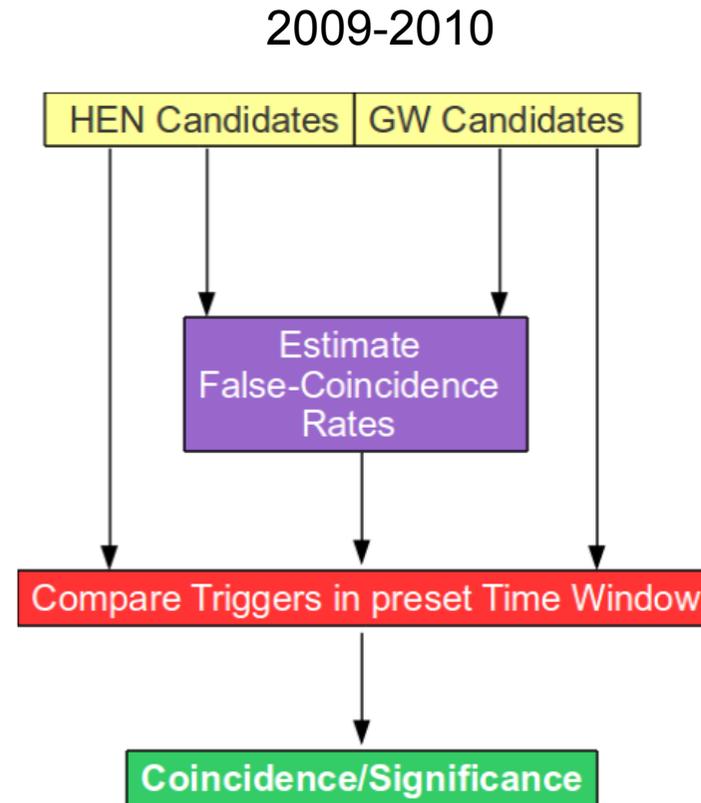


153 candidats neutrino sélectionnés

- Temps
- Direction
- N_{hit} (~énergie)
- Paramétrisation PSF

Boîte ouverte récemment

Pas de découverte → limite en cours

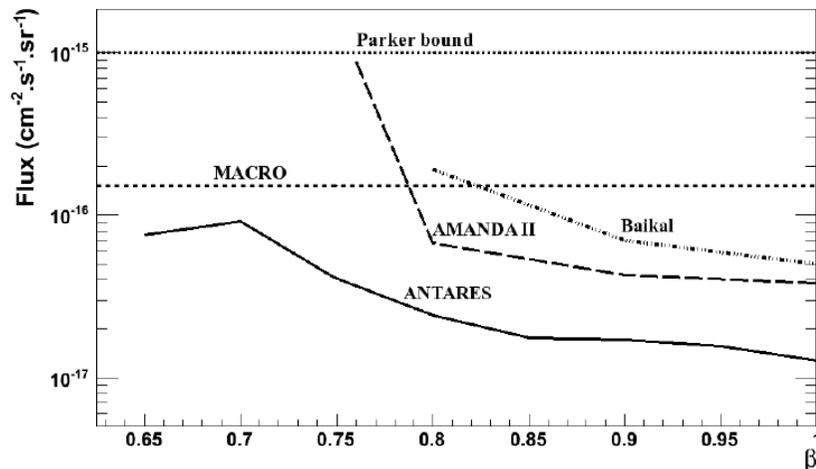


Fenêtre de coïncidence $\pm 500s$

GWHEN group, Astropart. Phys. 35 (2011) 1-7

Autres sujets d'étude (non exhaustif)

- **Monopoles magnétiques**



Most stringent upper limit for upgoing magnetic monopoles in the velocity range $0.625 < \beta < 0.995$ ($\gamma=10$).

- **Nuclearites**

- **Auger correlations**

- **Di-muons (charm component + SUSY direct)**

- **Stacking point sources**

- **Atmospheric neutrino energy spectrum**
Charm component

- **Diffuse flux- shower analysis**

- **Neutrinos from galactic plane**

- **Transient sources. Micro-quasars**

- **CR composition**

- **Supernova detection**

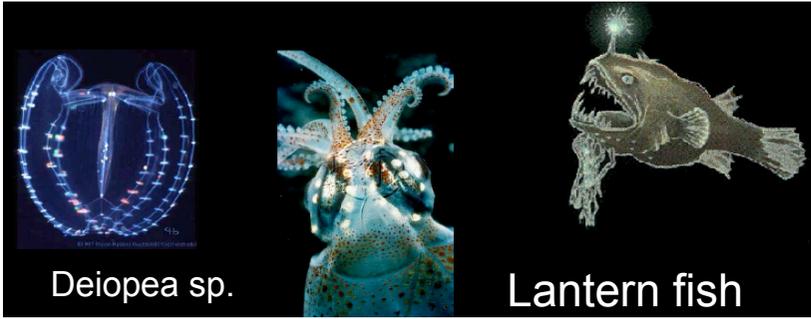
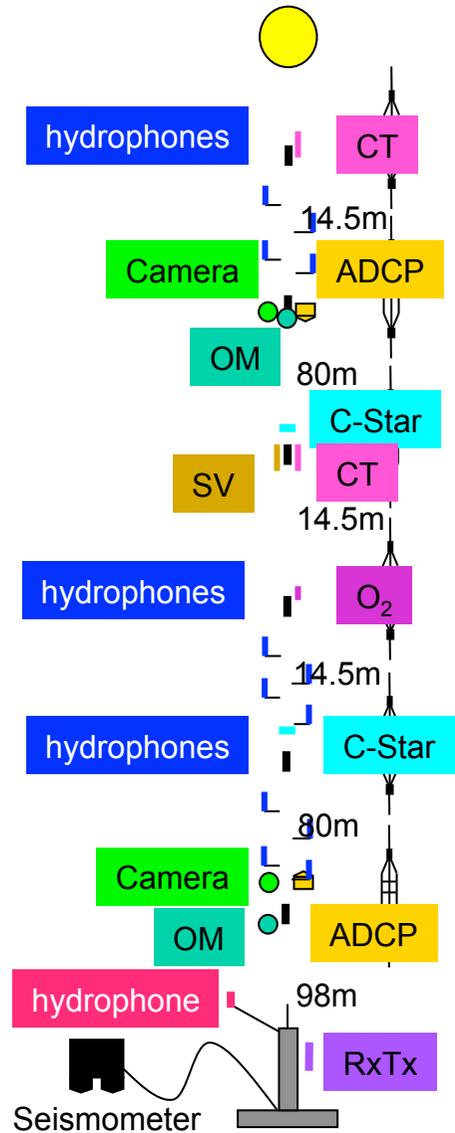
Tough due to bioluminescence. But double and triple coincidence method have sensitivity up to 4-5 kpc provided background rate is low

- **Detection of HE γ -rays**

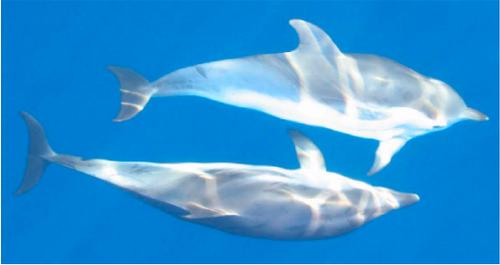
- **Oscillations (atmosphériques)**

Un observatoire multi-disciplinaire

Instrumentation Line



Acoustic noises



seismometer



Video-monitoring

Webcam la plus profonde au monde...

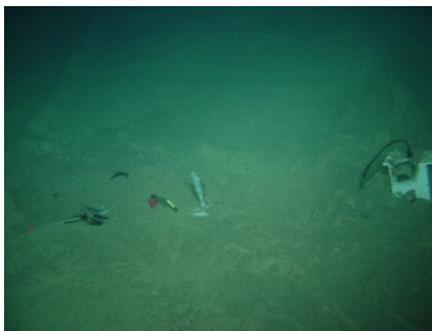
Sismographe



In laboratory

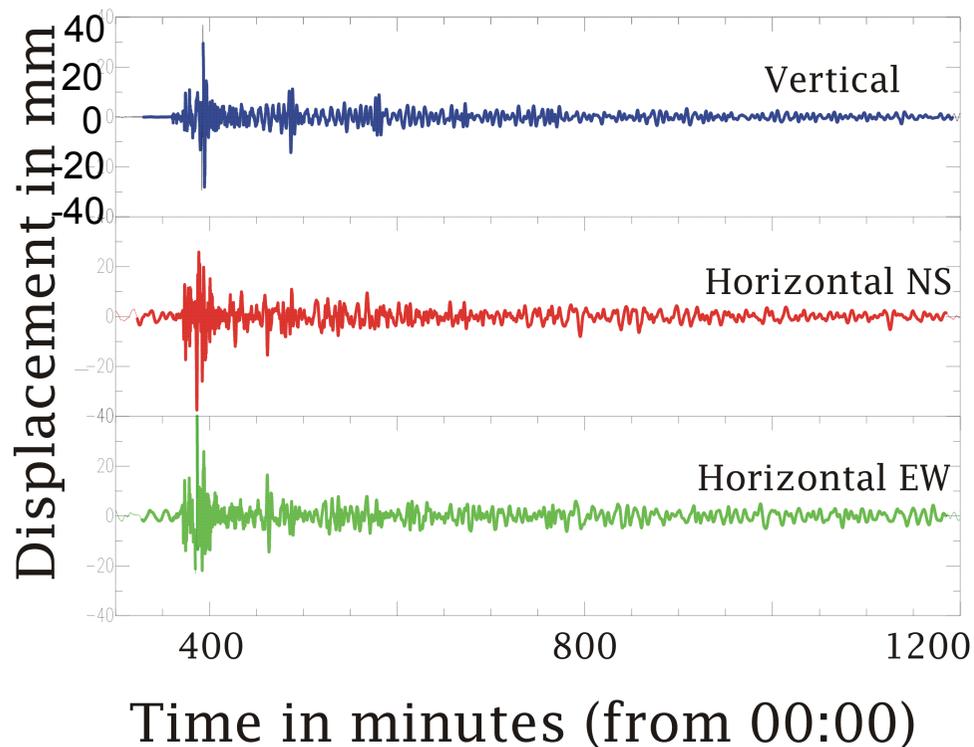


Deployment



Buried at site

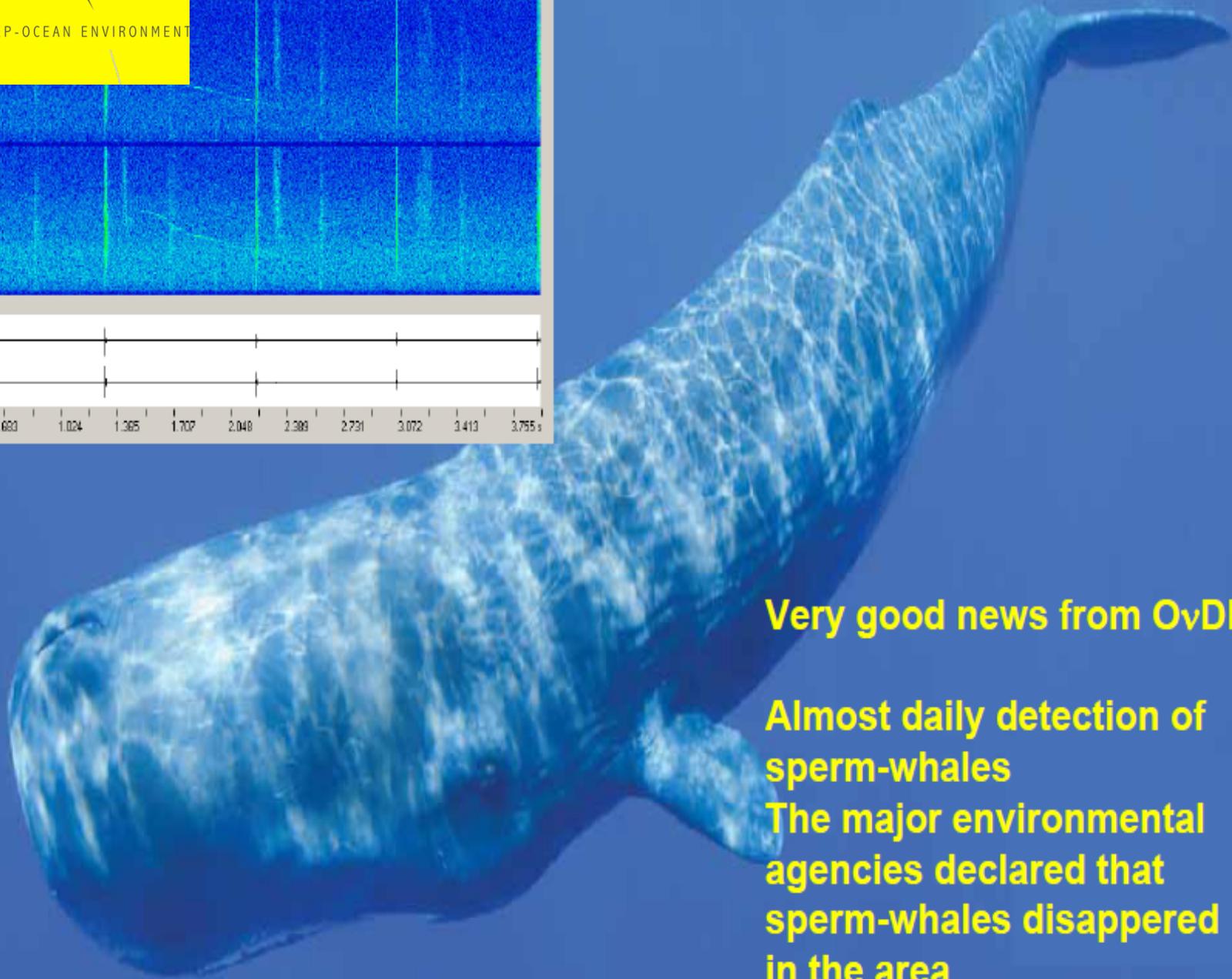
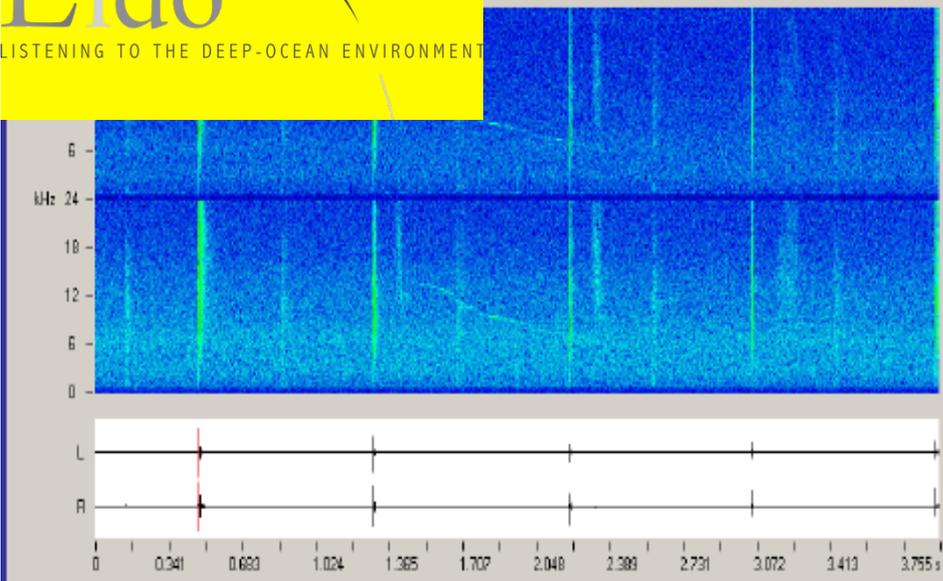
Japan earthquake 2011 March 11
at Antares site



Seismic/Tsunami network to be extended towards Nice



<http://www.listentothedeep.org>



Very good news from OvDE:

Almost daily detection of sperm-whales

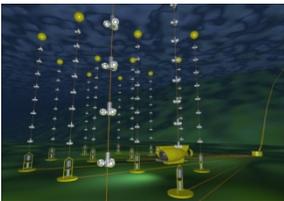
The major environmental agencies declared that sperm-whales disappeared in the area

Plan de l'exposé



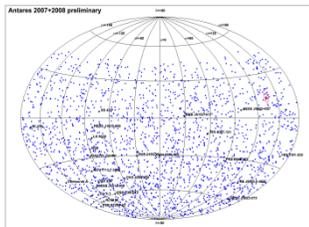
Astronomie neutrino

Rappels historiques
Motivations scientifiques
Sources de neutrinos



Les télescopes à neutrinos

Premiers neutrinos extraterrestres
Principes de détection
Les télescopes actuels
Le télescope ANTARES



Sélection choisie de quelques études

Etalonnage
Flux diffus
Recherche de sources ponctuelles
Analyses multi-messagers



Le projet KM3NeT

Le consortium KM3NeT

FP6 design study

- But : définir le futur détecteur km³
- Démarré le 1^{er} février 2006 pour 3 ans
- Moyens 9 M€
- Etapes
 - CDR, +18 mois
 - TDR, fin de contrat
 - <http://www.km3net.org/>

FP7 preparatory phase

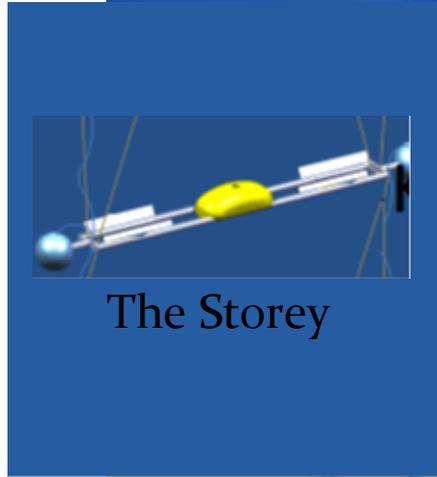
- But : préparer la construction du km³
 - Moyens de productions
 - Accords stratégiques (site, MOU...)
- 2008-2012
- 5 M€ attribués
- Interconnexion EMSO et ESONET

- KM3NeT ➡ 40 instituts dans 10 pays européens
- KM3NeT inscrit dans les feuilles de route ESFRI et ASPERA
- Reste en suspend le choix du site (multi-site?)... Arbitrage non scientifique

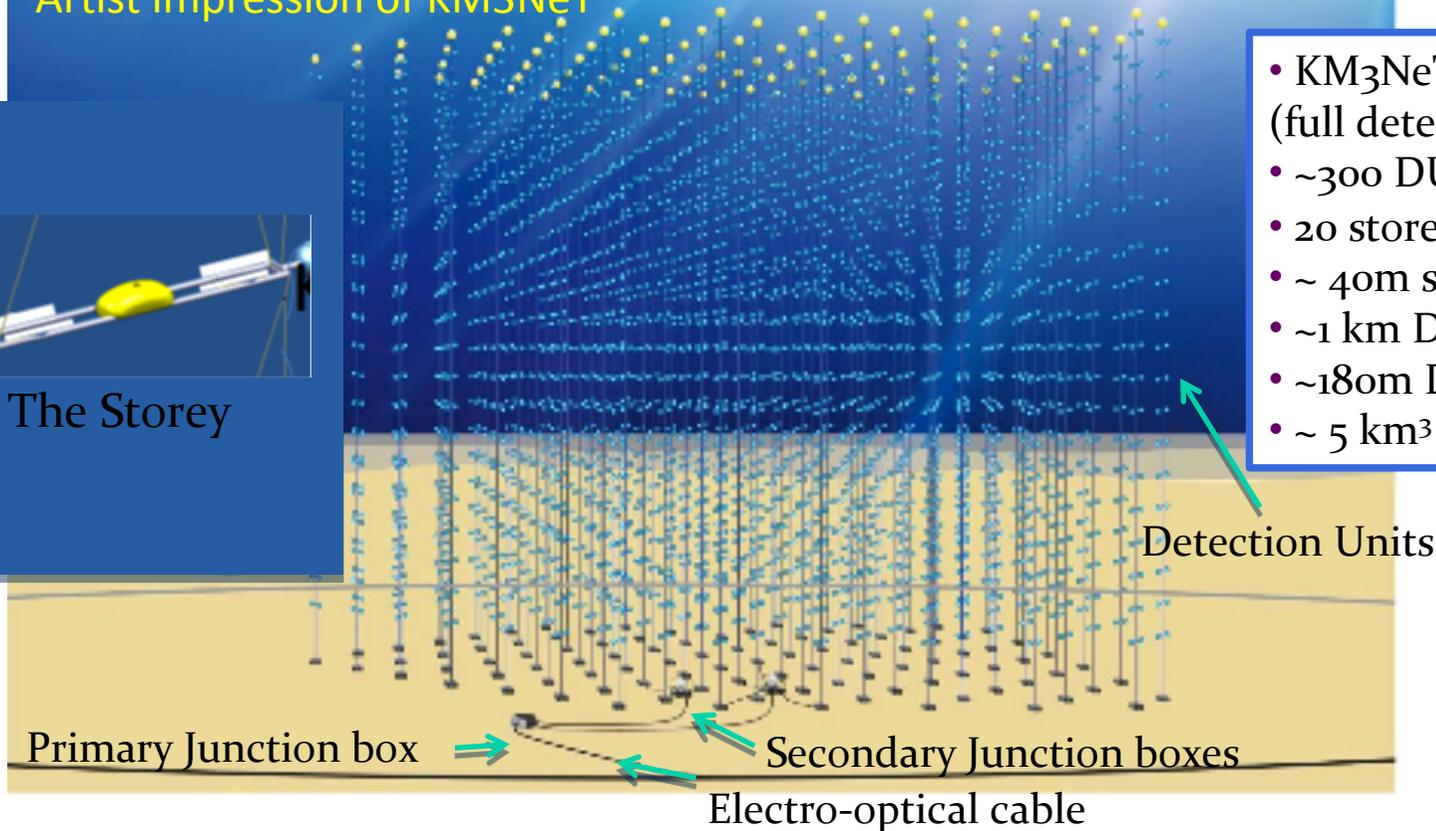


Le futur détecteur

Artist impression of KM3NeT



- KM₃NeT in numbers (full detector)
- ~300 DU
- 20 storey/DU
- ~ 40m storey spacing
- ~1 km DU height
- ~180m DU distance
- ~ 5 km³ volume



Digital Optical Module (DOM) = pressure resistant/tight sphere containing photo-multipliers and associated electronics

Detection Unit (DU) = mechanical structure holding DOMs, environmental sensors

Implementation requirements

Construction time ≤ 5 years

Operation over at least 10 years without “major maintenance”

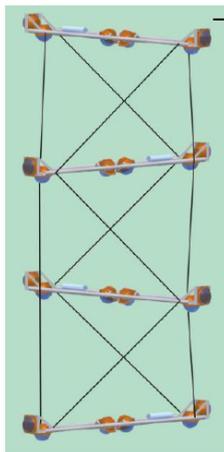
KM3NeT : choix retenus

Module optique : multi-PMT

- 31 PMs (avec leur base) 3" dans une sphère de 17" (total ~140 mW)
- Premiers prototypes sous test
- Plus de surface de détection par OM
- Autorise des coïncidences locales intra-OM (calibration) et séparation de 1 vs plusieurs photo-électron

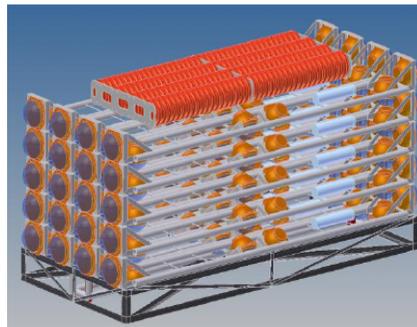


Unités de détection (DU)



→ Tours flexibles avec barres horizontales

☞ Lèvent les ambiguïtés de reconstruction de l'angle azimutal



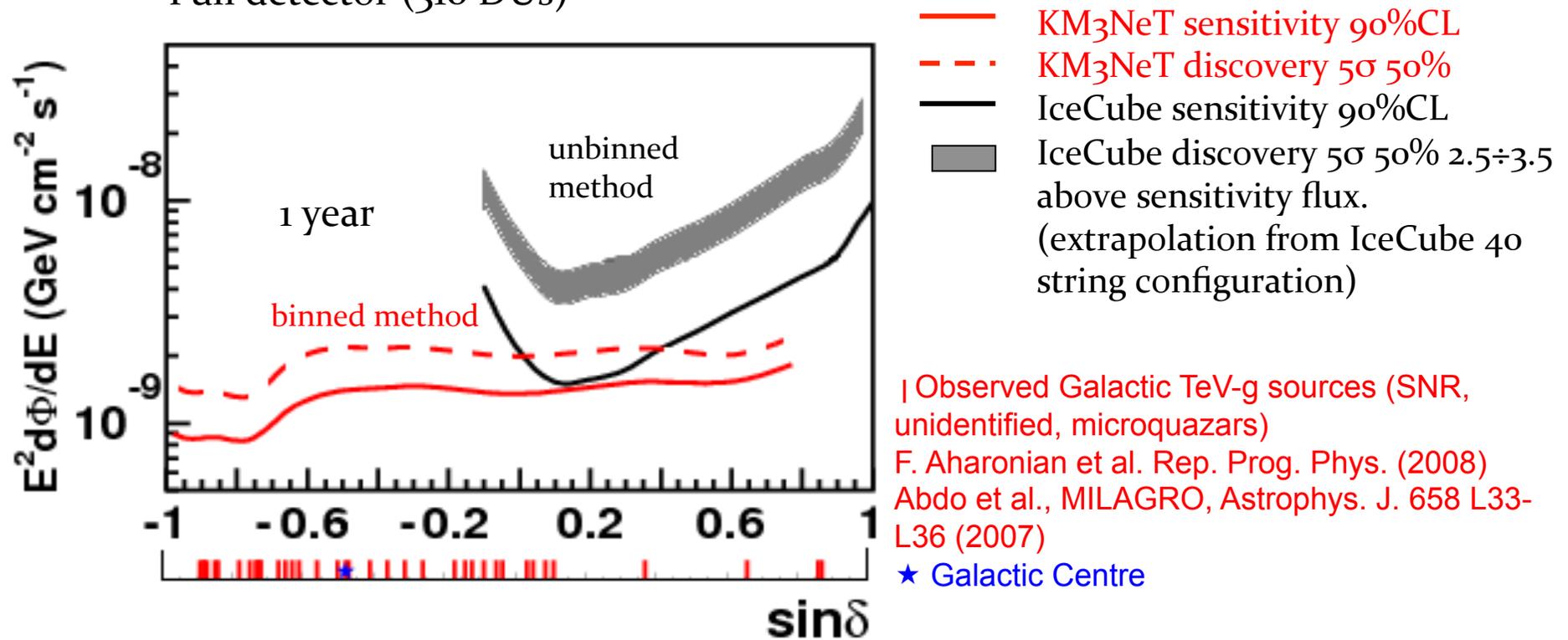
Structure compacte (20 étages)

Procédure de déploiement testée
avec succès en février 2010

Sensibilité escomptée

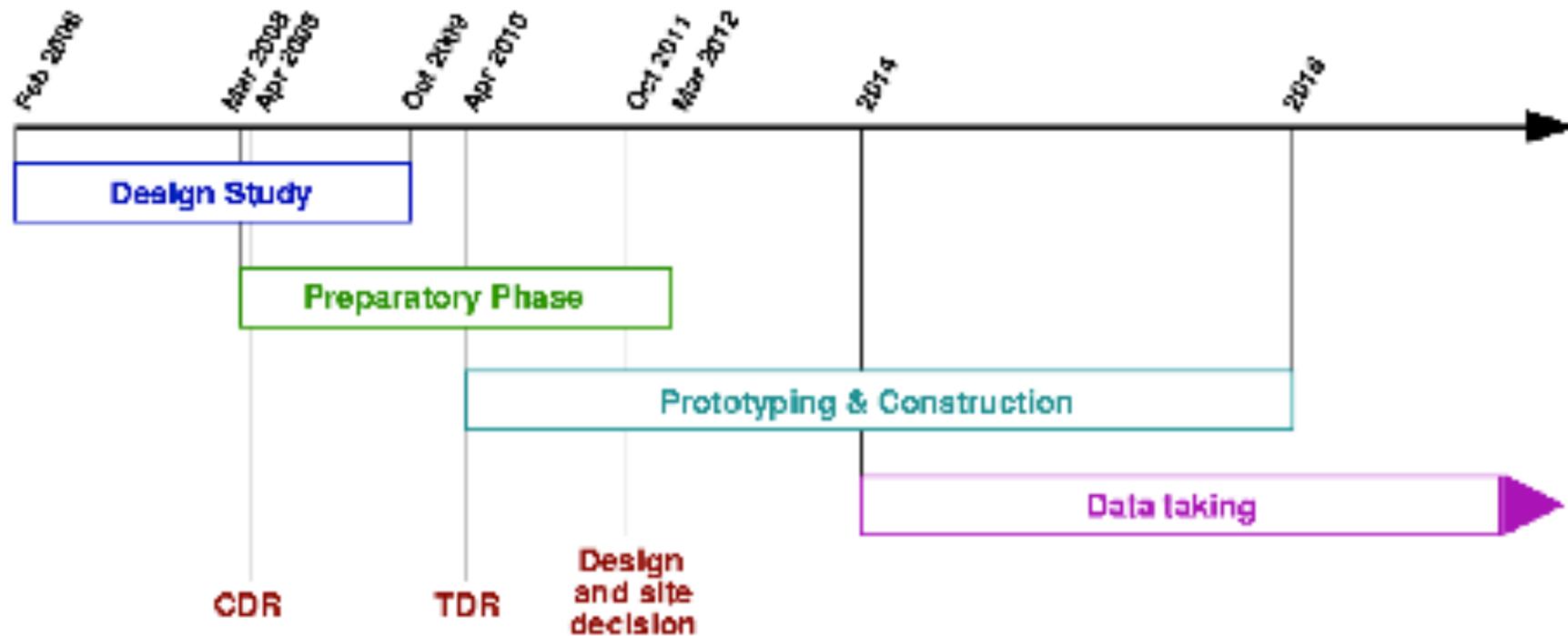
Sensitivity and discovery fluxes for point like sources with E^{-2} spectrum

Full detector (310 DUs)



Sensitivity and discovery will improve with the unbinned analysis

Calendrier prévisionnel



La phase de construction pourrait démarrer l'année prochaine, en fonction du financement obtenu...

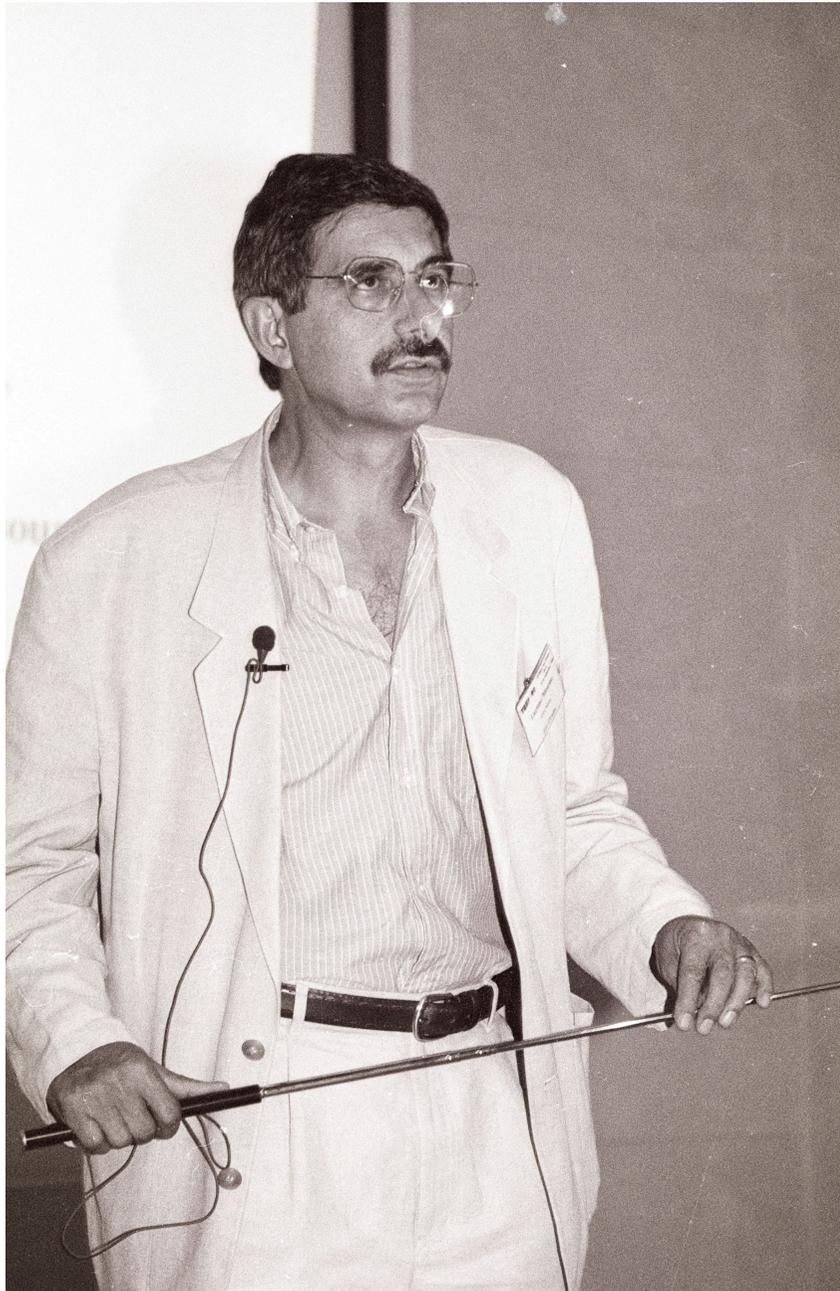
Conclusions

- Astronomie neutrino en marche avec des détecteurs fonctionnant selon le cahier des charges.
- IceCube est complet depuis moins d'un an : sensibilité dans la région d'intérêt physique.
- ANTARES prouve la faisabilité d'un détecteur à ν sous-marin
- ANTARES est le plus grand TN de l'hémisphère nord... Une plateforme pour les sciences associées.

Le meilleur est à venir !

« Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux .» M.Proust

Luciano Moscoso 1940 - 2011



“One of the founders of Neutrino Astronomy and ANTARES in particular”

“Outstanding role in ANTARES and Neutrino Astronomy”

“The ANTARES success is in great part due to Luciano”

“Neutrino Astronomy loses one of his most convinced and convincing supporter.”

“Distinguished colleague”, “a reference”,

“One of the pioneers in our field”

“Extraordinary scientist and a very good man”

“We shared work, dreams and hopes.”

“His Humanism, kindness and superb smile”

“Brilliant physicist with amazing charm”

“A joy to discuss things with him. He really was a true *savant*”.

“A man of principles”

“The spirit of collaboration.”

“High esteem in which we hold him”

“Our community is poorer without Luciano”

“We will miss his enthusiasm, his advise, his warm personality”

“We will sorely miss his guidance, his clear views and statements and his sense of humour”

“His example, his smile, his kind behaviour will be always with us”.