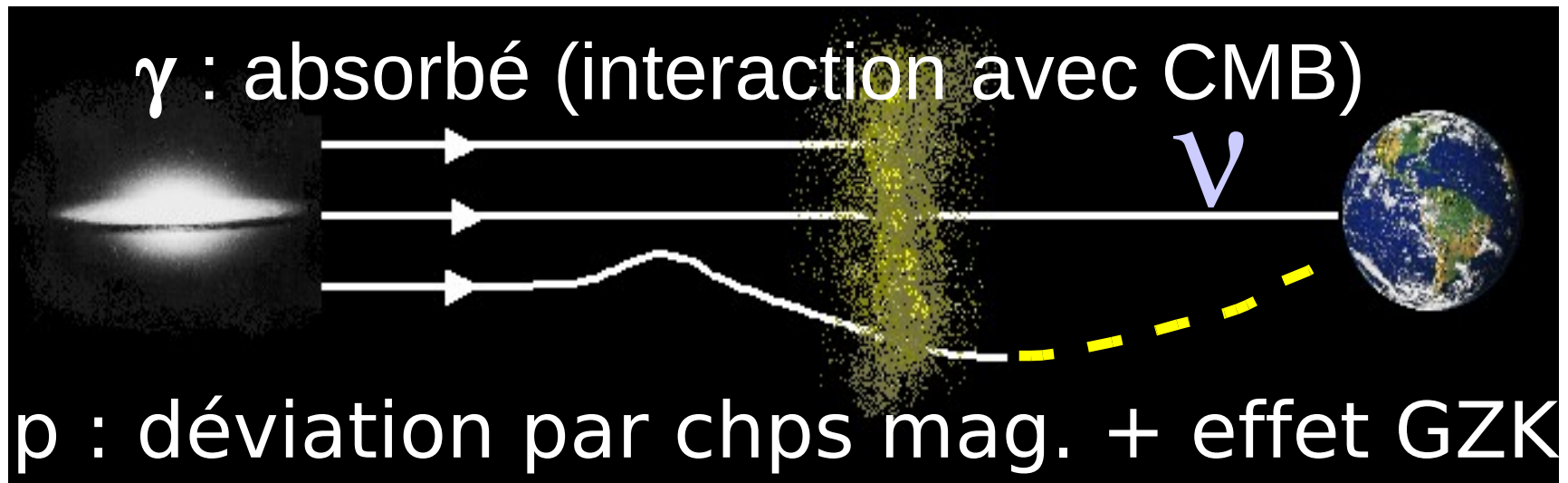


Paris, Samedi 15 mai 2009

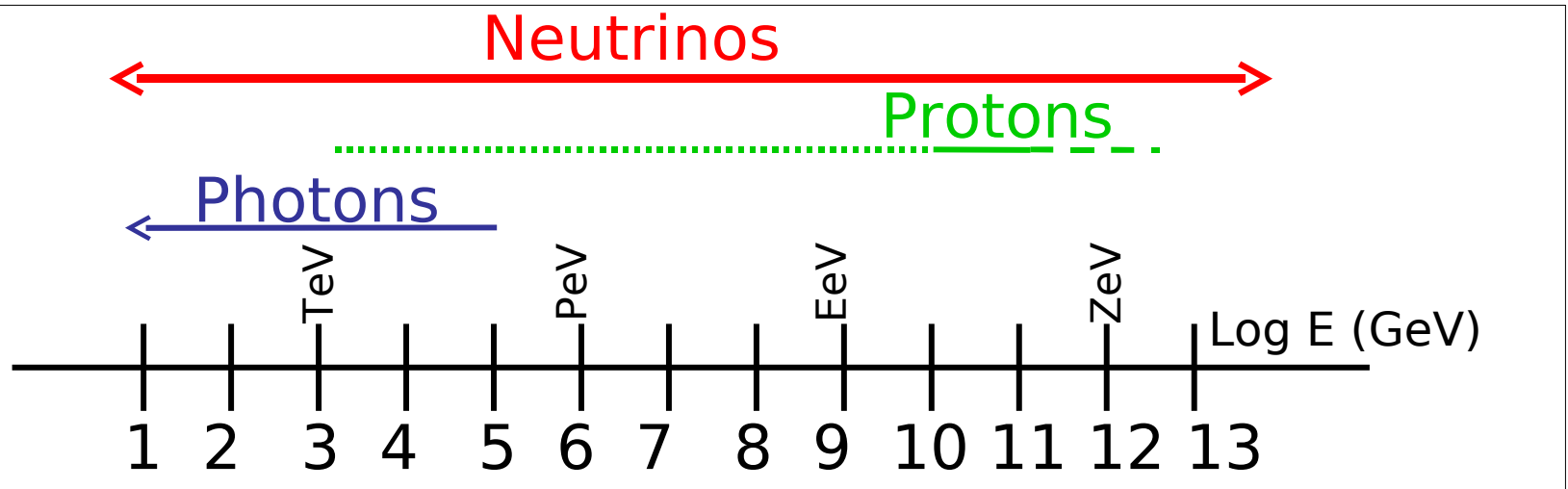
Neutrinos de Haute Energie

Intérêt du neutrino



Neutrino ν :

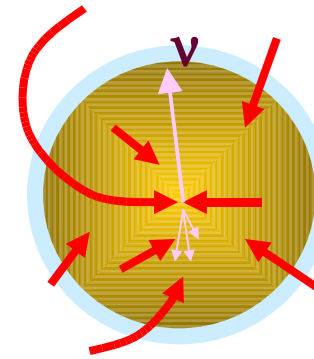
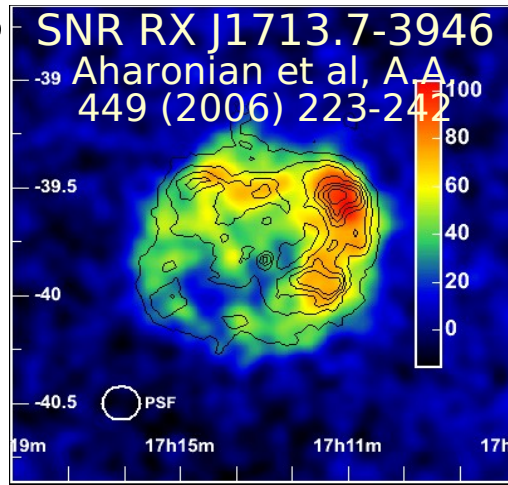
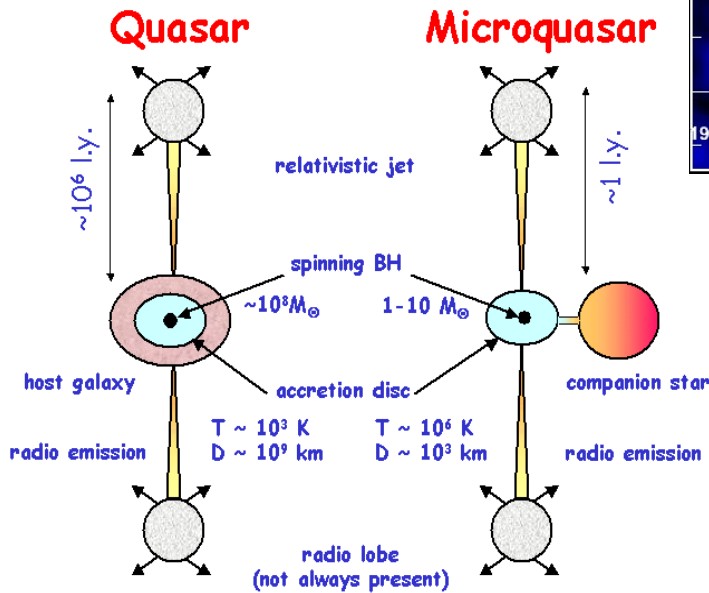
- Intéragit faiblement → accès à des distances cosmologiques
- Accès au coeur des sources
- Intéragit faiblement → nécessite de grands volumes de détection



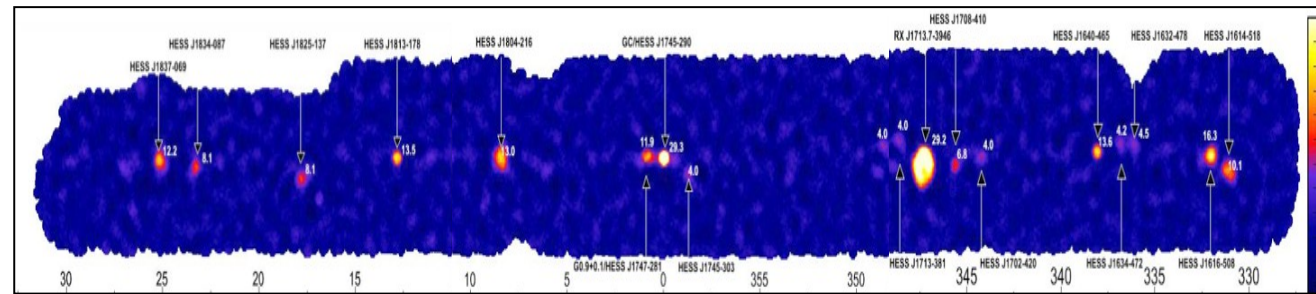
Sources potentielles de neutrinos

SOURCES GALACTIQUES

Supernovae,
Restes de Supernovae,
Micro Quasars:



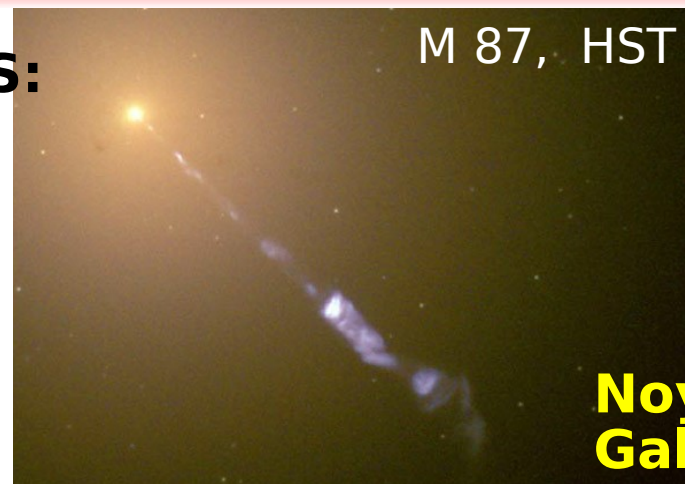
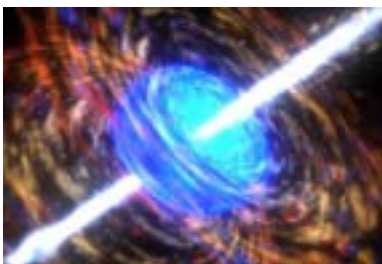
Matière noire :
annihilation de
neutralinos piégés
dans des objets
massifs (Soleil,
Terre, Centre
Galactique)



Centre Galactique

SOURCES EXTRA GALACTIQUES:

Sursauts Gamma



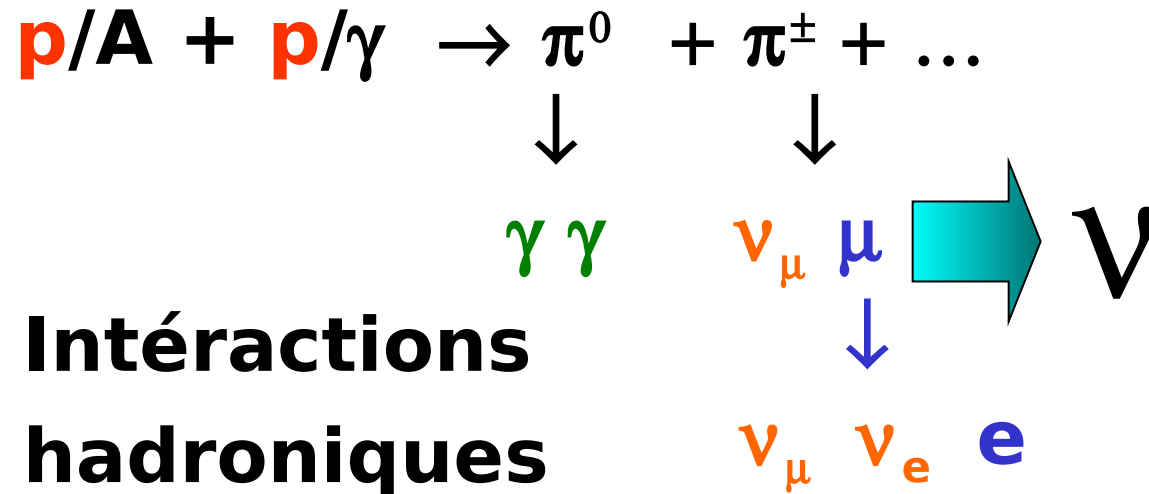
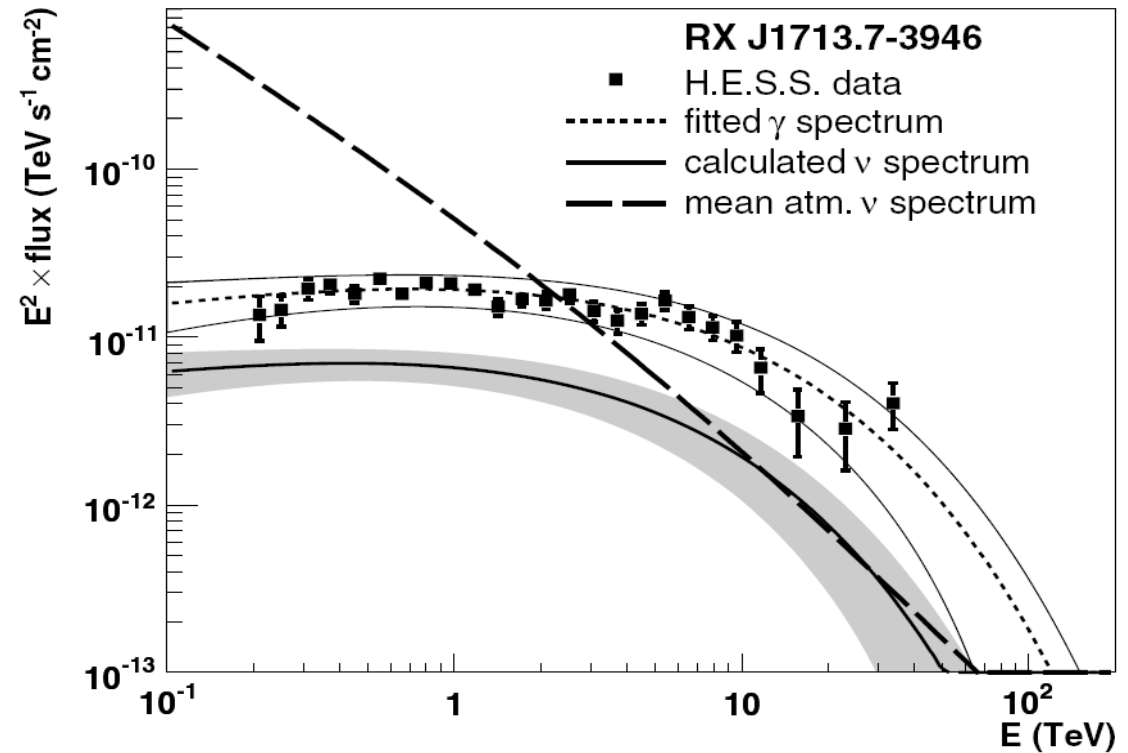
Electromagnétique ou hadronique ?



Reste de supernova RX J1713.7-3946

Scénario

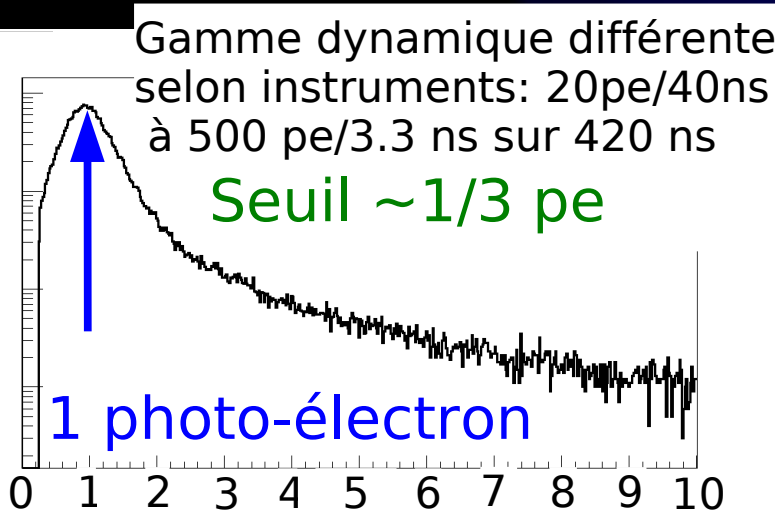
hadronique : **possible**



Calcul du flux de neutrinos à partir du flux de gammas *A Kappes et al, TeV Particle Astrophysics II Workshop*

Intéractions hadroniques

Principe de détection



Matrice 3D

Lumière Cherenkov produite (μ) γ

Sensibilité requise : photo-électron

gerbe

Bonne résolution en énergie ($O(30\%)$),
faible résolution en angle ($O(10^\circ)$)

42°

2500-5000 m

© François Montanet

Intéraction à courant chargé (W)

μ trace:

Bonne résolution angulaire ($O(\text{degré})$ @ $E > 10$ TeV),
faible résolution en énergie (facteur 2-3)

Mesures :

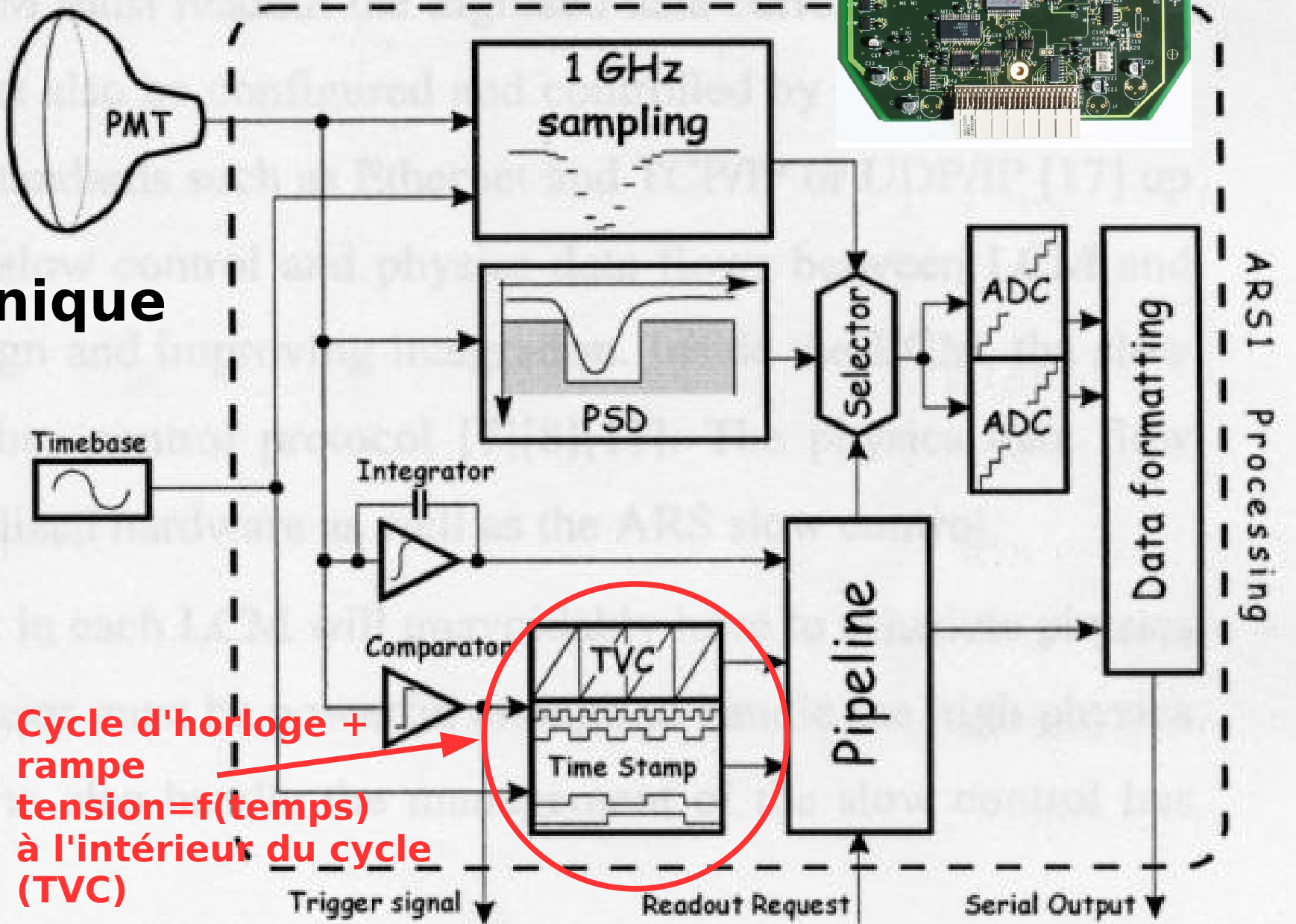
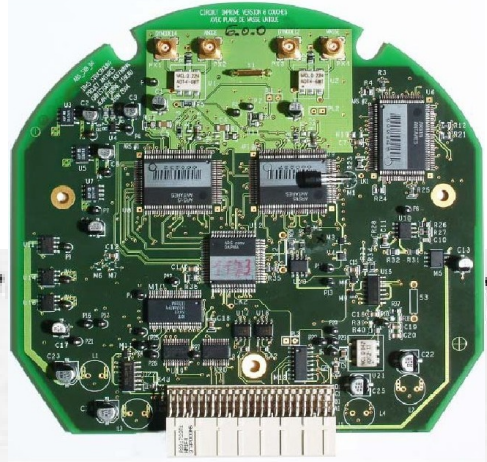
Temps ($O(\text{ns})$), amplitude (30%) & position des hits ($O(10$ cm))



trajectoire des muons ou caractérisation des gerbes

v_μ

Précision sur le temps : exemple de ANTARES



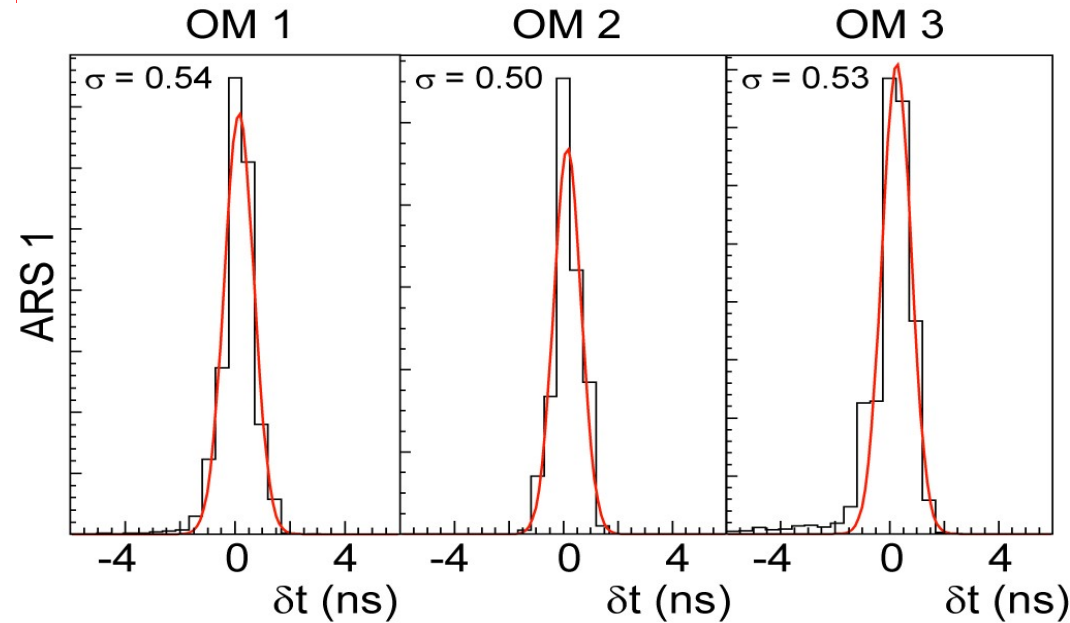
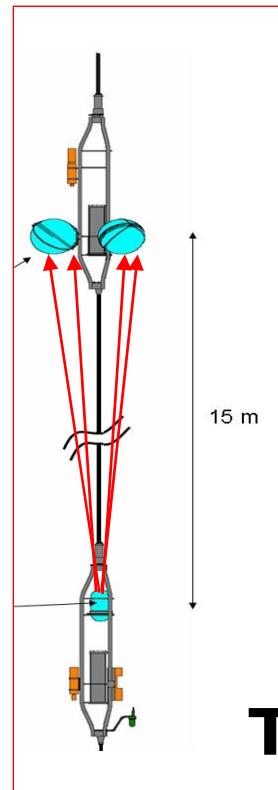
Cycle d'horloge + rampe tension = $f(\text{temps})$ à l'intérieur du cycle (TVC)

Electronique

Précision sur le temps : Contributions à la résolution temporelle

exemple de ANTARES

Electronique :



Tests avec flasheurs (LEDs)

Electronique + calibration : $\sigma < 0.5$ ns

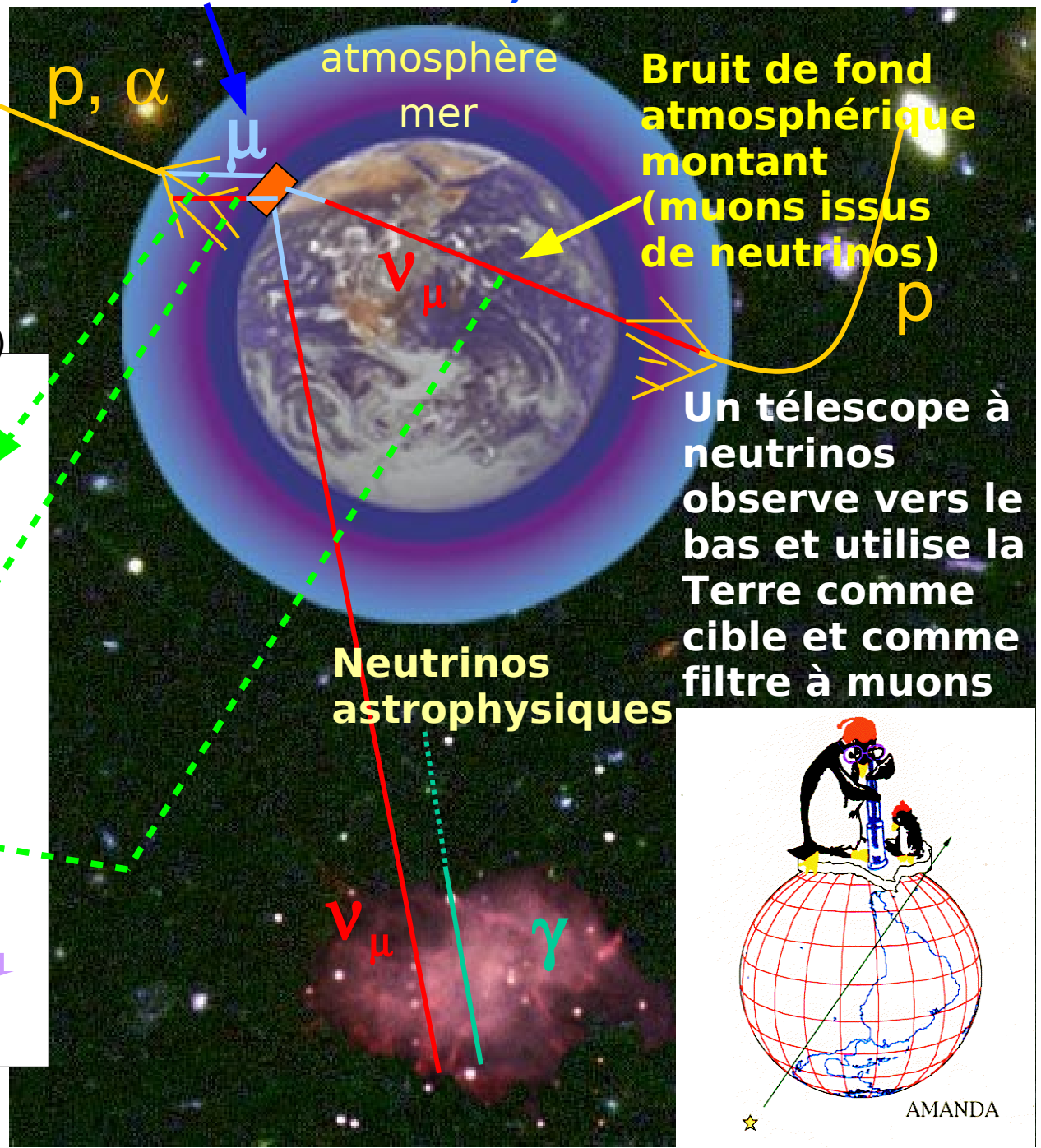
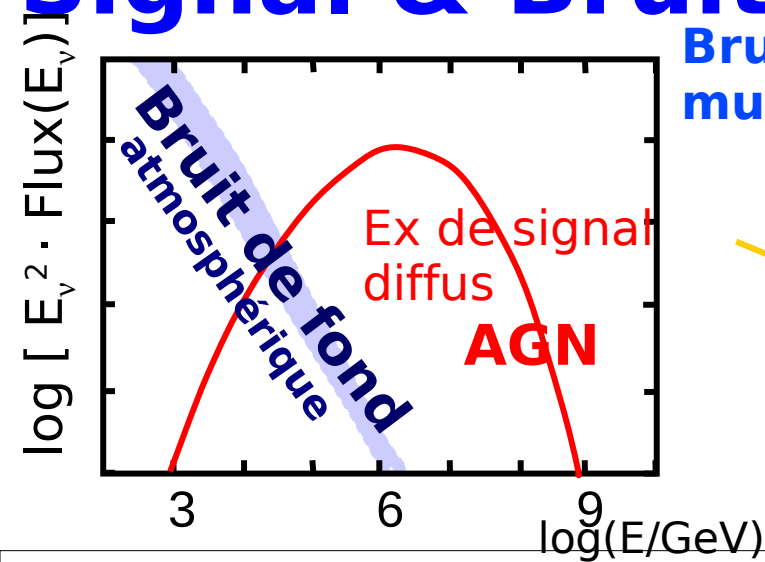
TTS du photomultiplicateur : $\sigma \sim 1.3$ ns

Diffusion des photons et dispersion chromatique : $\sigma \sim 2$ ns (eau)

➔ Limitation de la résolution angulaire pour un télescope de la taille de ANTARES : $0.2^\circ - 0.3^\circ$

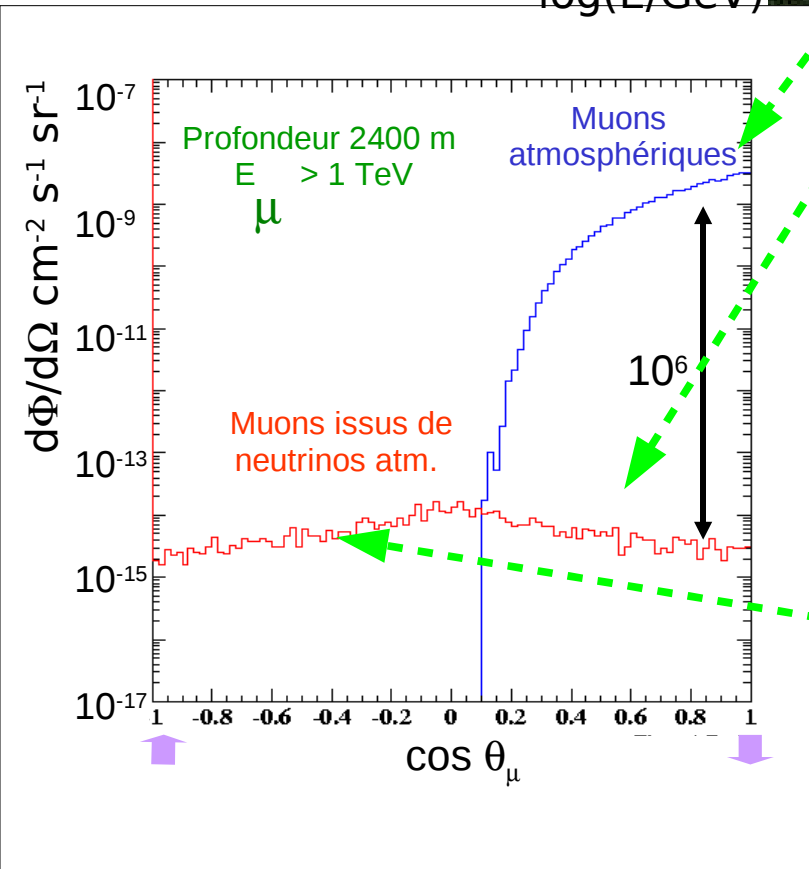
Signal & Bruits de fond

Bruit de fond descendant (muons directs et muons issus de neutrinos)

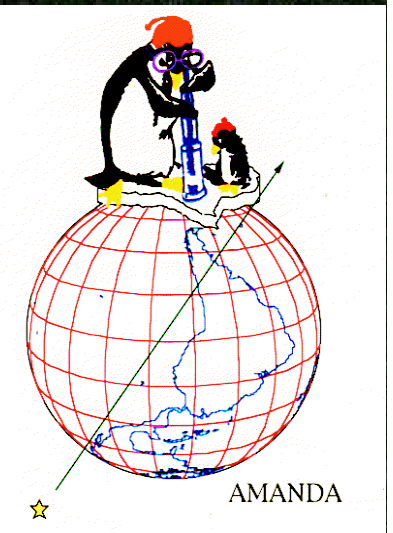


Bruit de fond atmosphérique montant (muons issus de neutrinos)

Un télescope à neutrinos observe vers le bas et utilise la Terre comme cible et comme filtre à muons



Neutrinos astrophysiques



AMANDA

ANTARES
 42°50'N, 6°10'E
 prof. 2475m,
 eau de mer
 3 PMTS/étage
 12 lignes de 25
 étages

NEMO
 36°20'N,16°E
 prof 3500m
 eau de mer
 4 PMTs/étage.
 Actuellement test
 d'une mini tour
 de 4 étages.

NESTOR
 36°36'N,21°30'E
 prof 4000m
 eau de mer
 12 PMTs/étage
 1 étage déployé
 en 2003.

télescopes à neutrinos



BAIKAL
 54°50'N,104°20'E
 prof. 1367m
 eau du lac Baikal
 (1^{ier} prototype NT36:
 1993, 1^{ière} ligne
 résidente : 1984)
 2 PMTs/étage
 8 lignes de 12
 étages (total 192
 PMTs) + 3 lignes
 externes de 6
 étages (+36 OMs)
 En fonctionnement

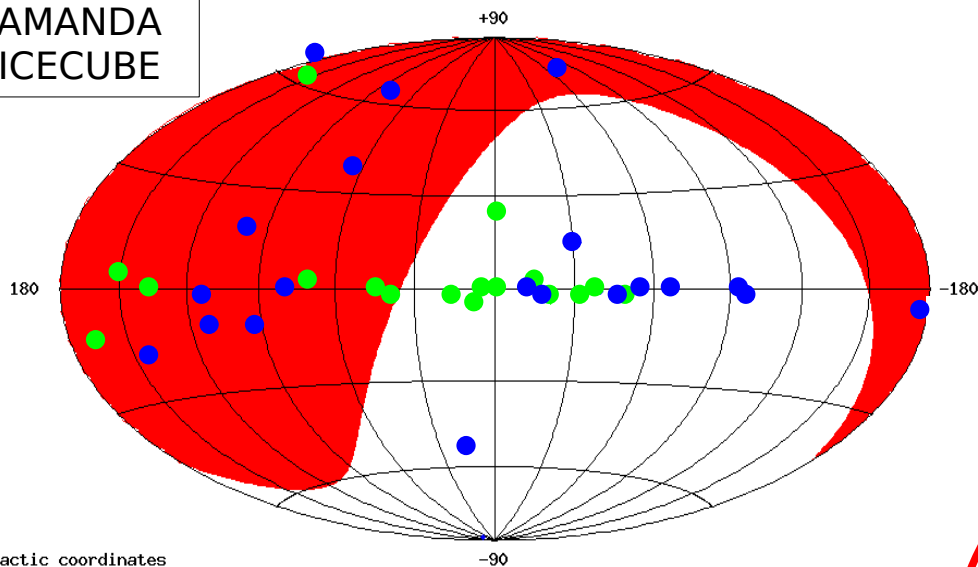


AMANDA: pôle sud, prof 900-2350m, 1 PMT/étage:
 AMANDA-B4 (1996): 4 lignes, 80 PMTs
 AMANDA-B10(1997): 10 lignes, 302 PMTs
 AMANDA-II(2000->aujourd'hui): 19 lignes, 677 PMTs
 ICECUBE (prof. 2450m):
 80 lignes de 60 étages (4800PMTs). 59 lignes déployées

Ciel visible

Coordonnées galactiques

AMANDA
ICECUBE



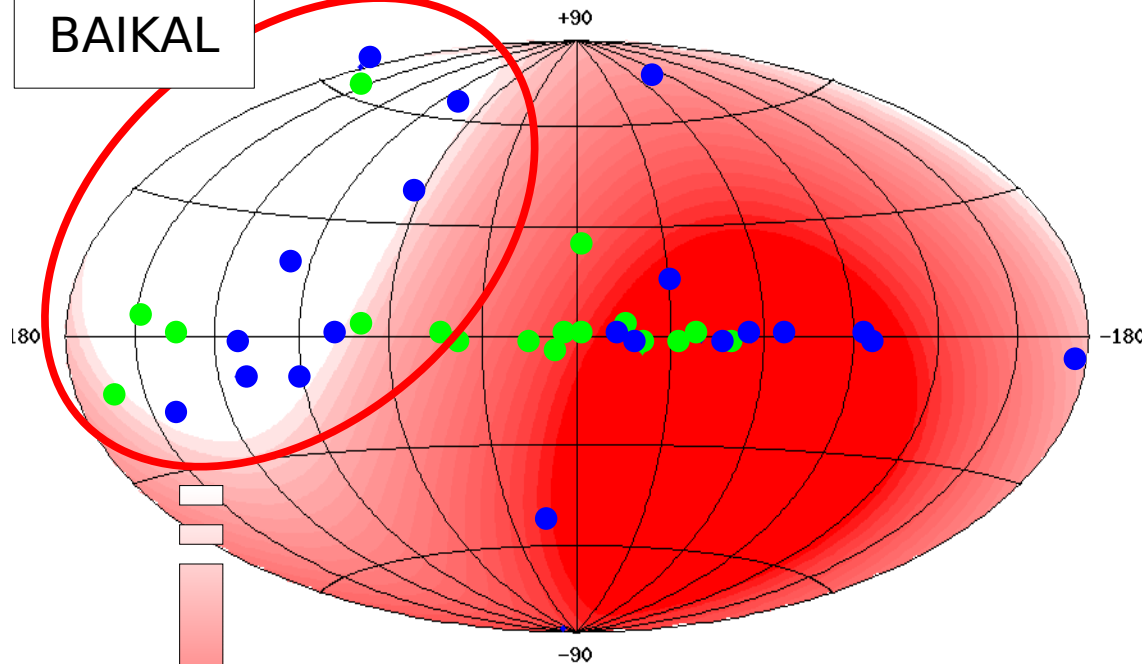
Galactic coordinates

Non visible

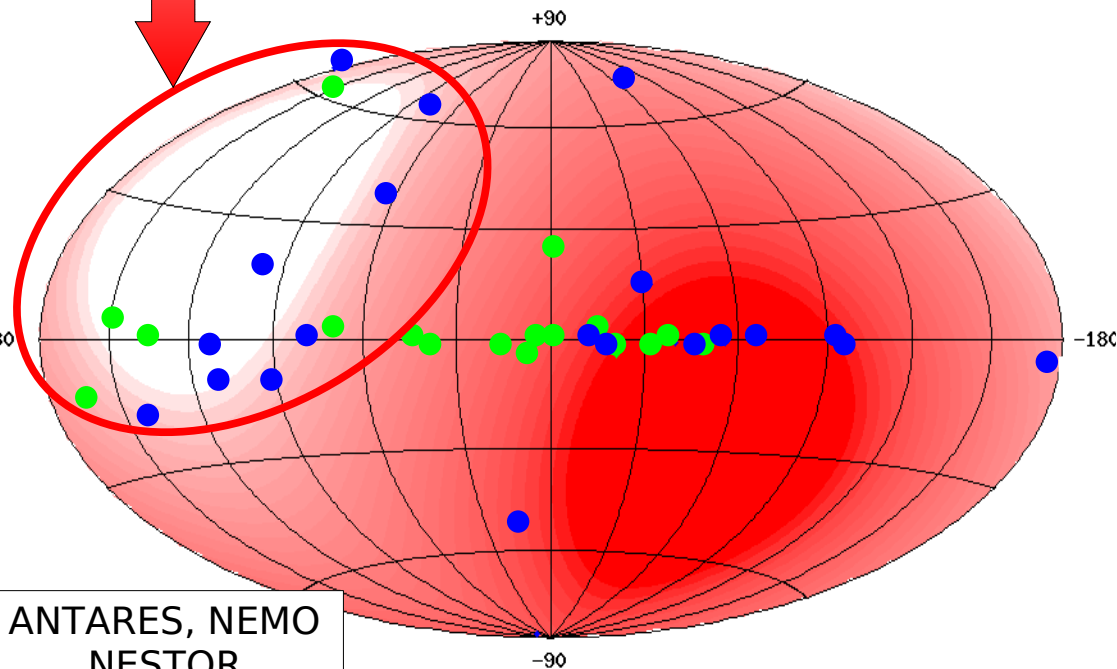
toujours visible

Indications :
microquasars (vert)
sources au TeV (bleu)

BAIKAL



Effet de latitude (rotation de la Terre)



ANTARES, NEMO
NESTOR

Les sites ...



France



Italie



Grèce



BAIKAL



Russie (Sibérie)

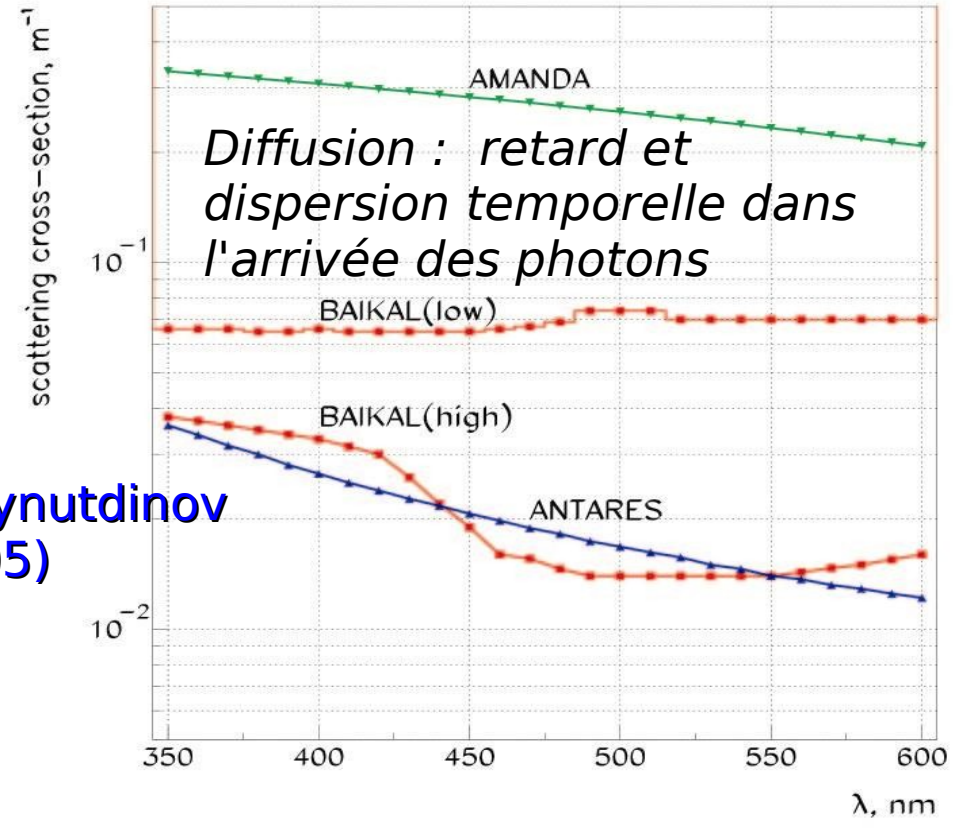
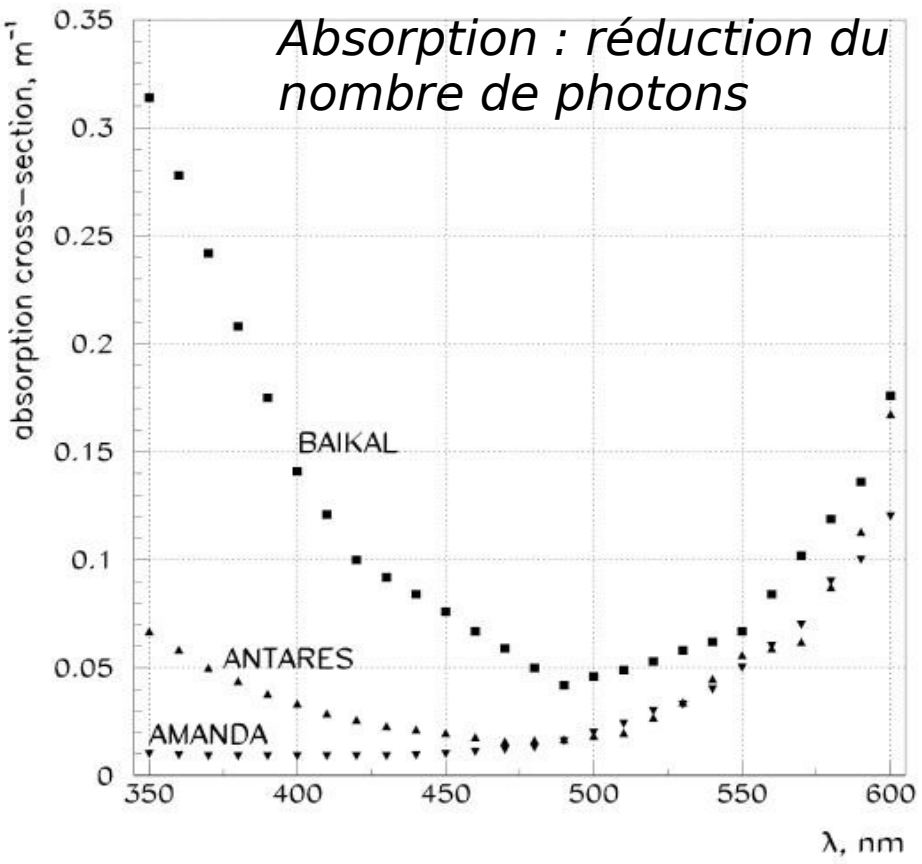
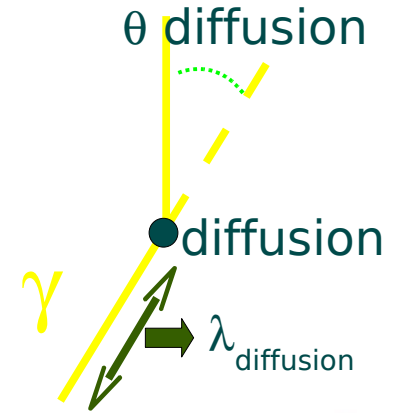


Pôle Sud

Propriétés optiques du milieu (propagation lumière Cherenkov)

BAIKAL	λ abs \sim 20 m & λ diff eff \sim 300 m @ 470 nm
AMANDA	λ abs \sim 70 m & λ diff eff \sim 25 m @ 470 nm
NESTOR	λ att \sim 55 m @ 460 nm: λ att contient abs & diff
NEMO	λ abs \sim 70 m @ 440 nm
ANTARES	λ abs \sim 60 m & λ diff eff \sim 300 m @ 470 nm

$$\lambda_{\text{diffusion effective}} = \lambda_{\text{diff}} / (1 - \langle \cos \theta_{\text{diff}} \rangle)$$

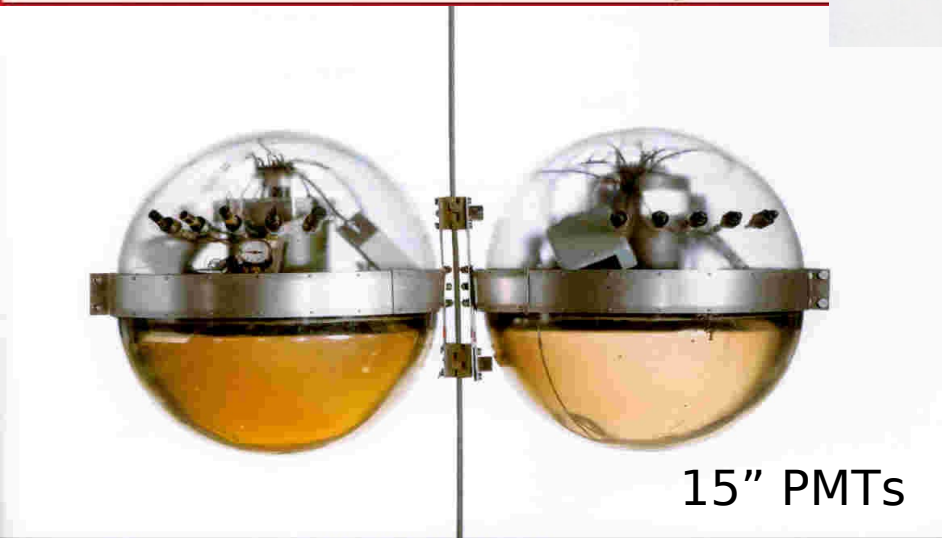
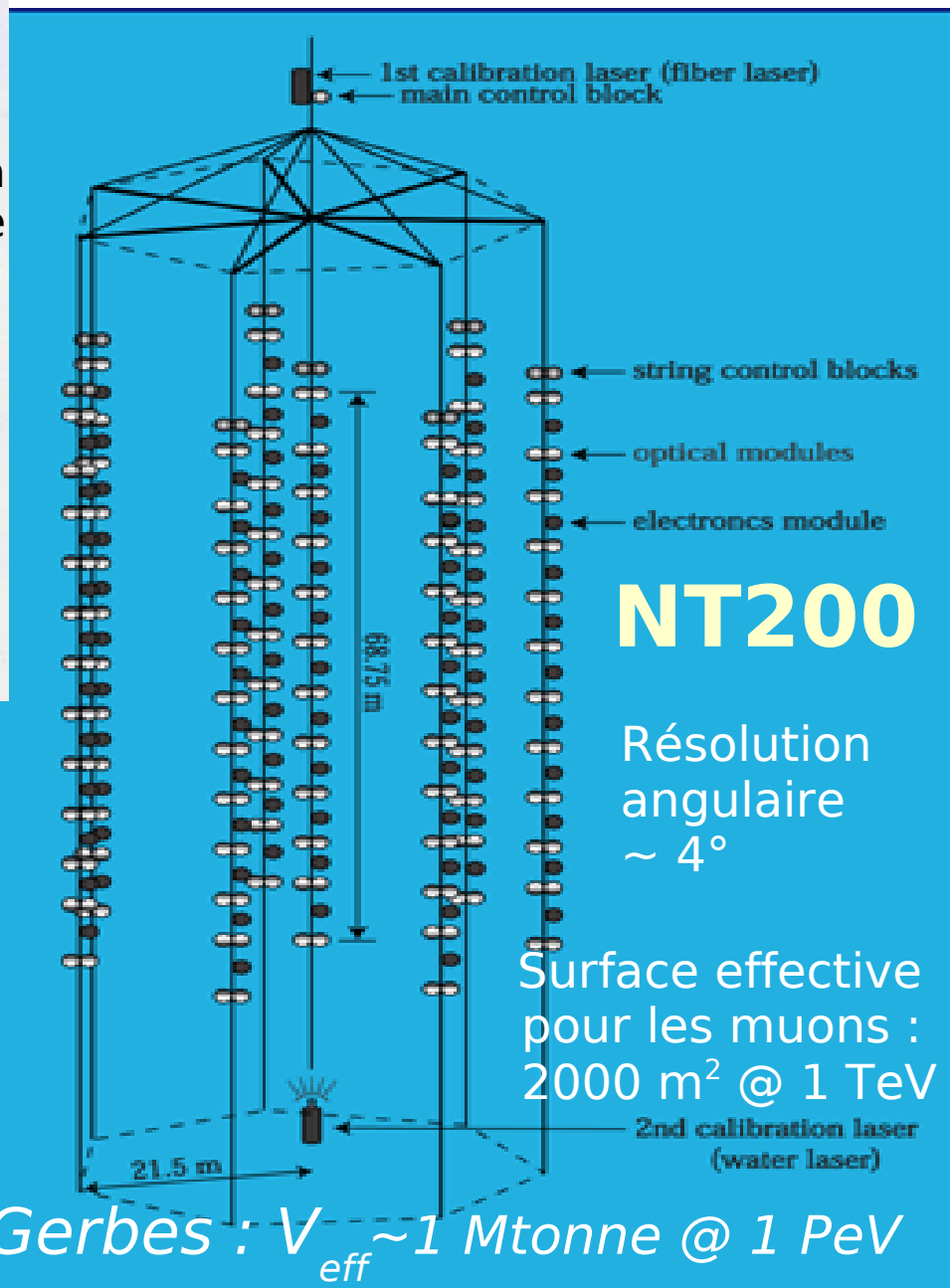
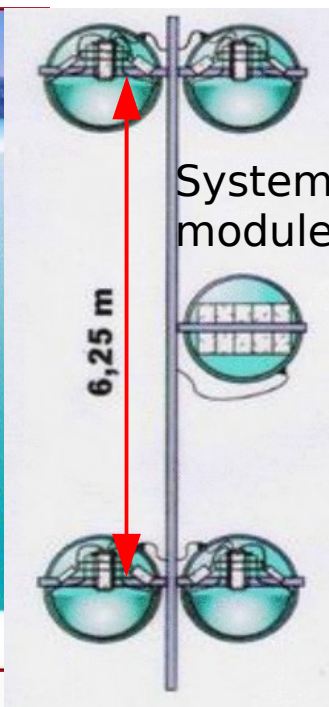
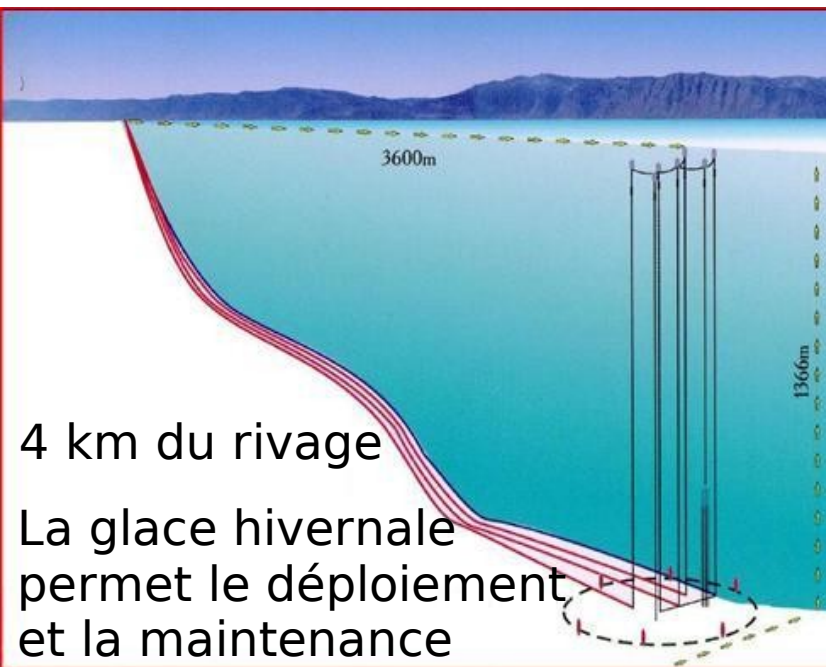


V. Aynutdinov
(2005)

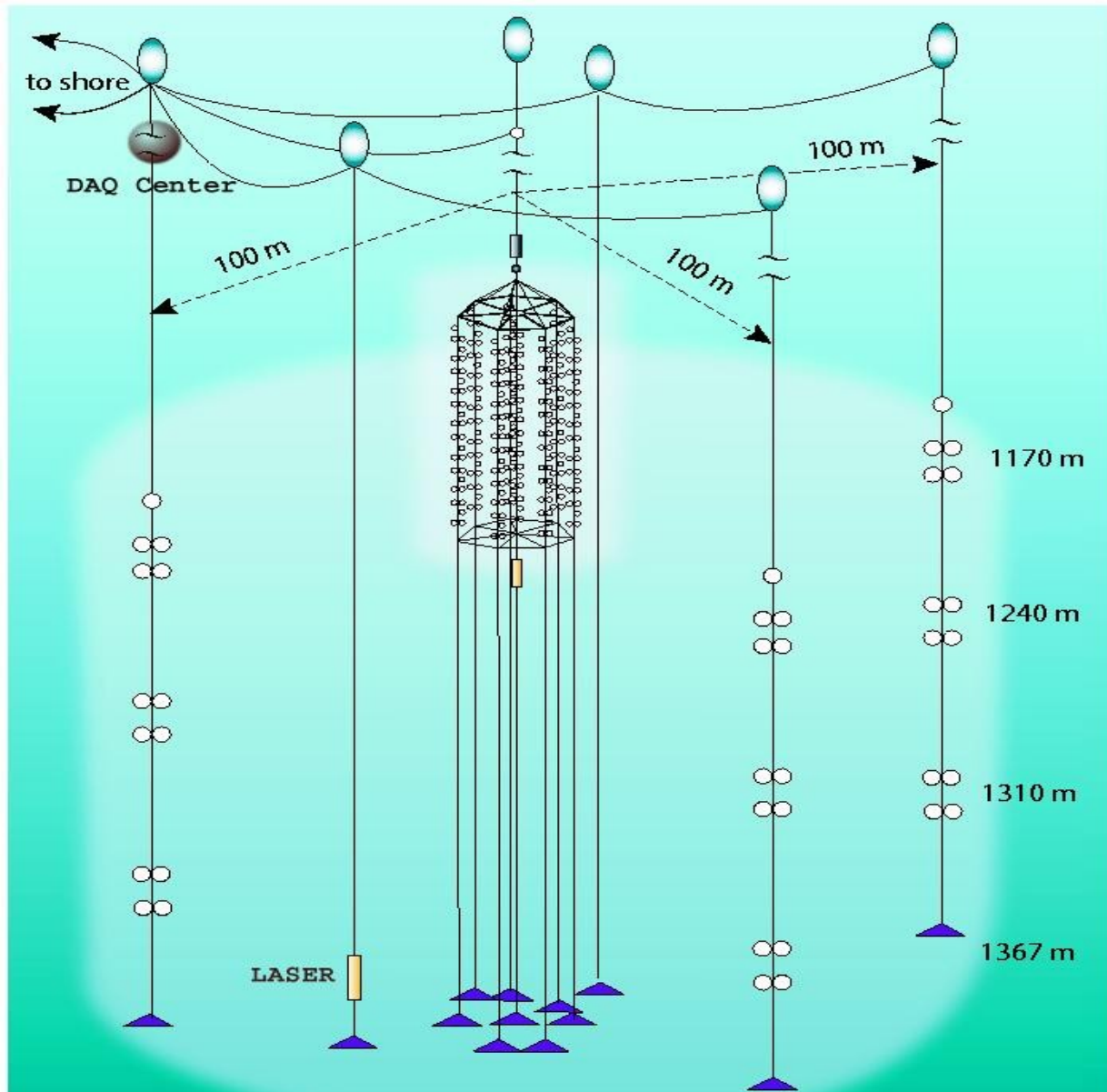
BAIKAL, prof. 1367m

2 PMTs/étage

8 lignes de 12 étages (total 192 PMTs : NT200, depuis 1998)

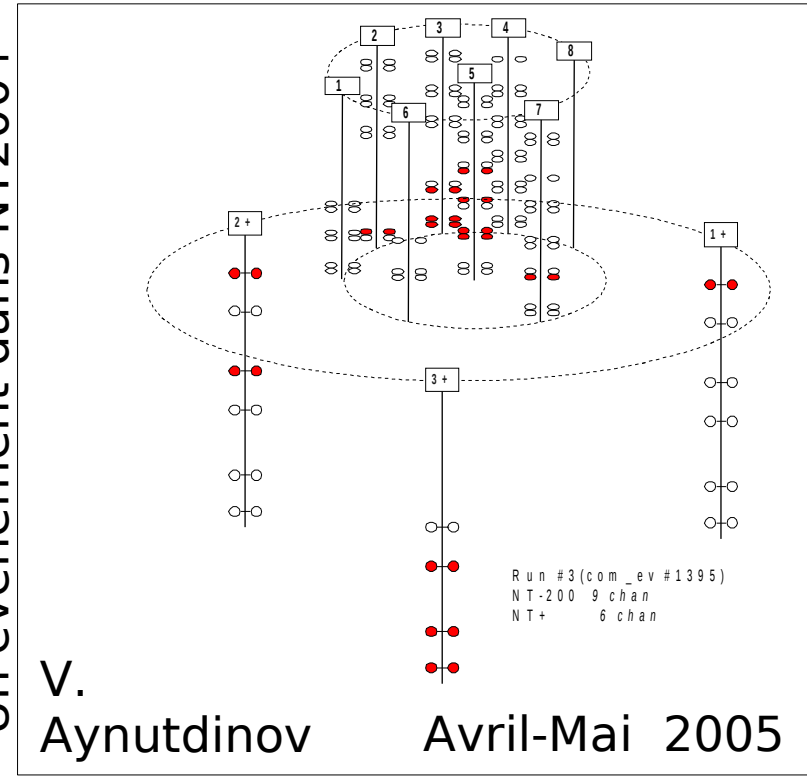


BAIKAL, prof. 1367m
2 PMTs/étage
8 lignes de 12 étages (total 192 PMTs : NT200, depuis 1998)
+ 3 lignes externes de 6 étages (36 PMTs : NT200+, depuis 2005)

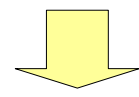


NT200+

Un événement dans NT200+



+20% PMTs



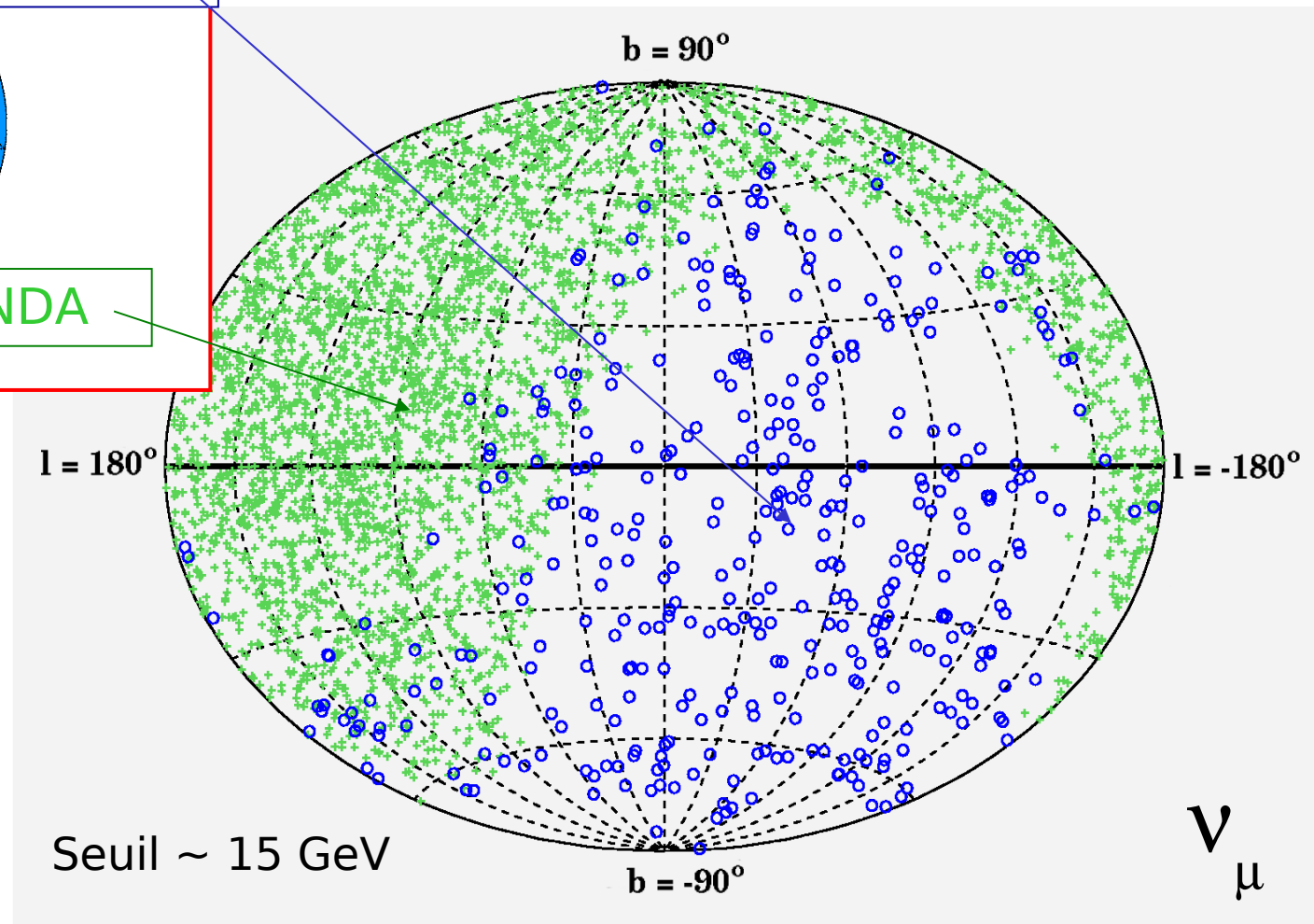
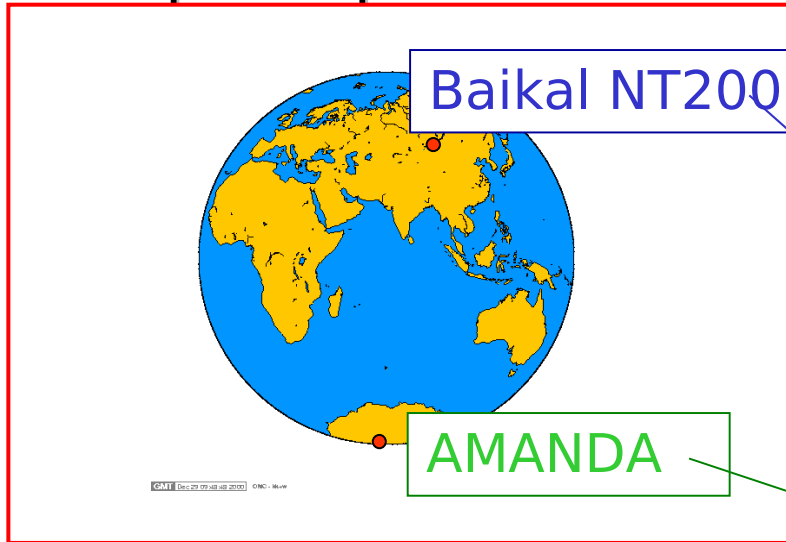
amélioration de la sensibilité
d'un facteur 4,
adapté aux gerbes UHE :

$V_{\text{eff}} \sim 10 \text{ Mtonnes@ } 10 \text{ PeV}$

BAIKAL

Neutrinos atmosphériques

372 Neutrinos en 1038 jours (1998-2003)
385 événements attendus (simulations MC)
(AMANDA : ~ 10 x plus dans une même période)



V. Aynutdinov
VLVNT08

BAIKAL, projet de détecteur de taille kilométrique :

Instrumentation espacée:

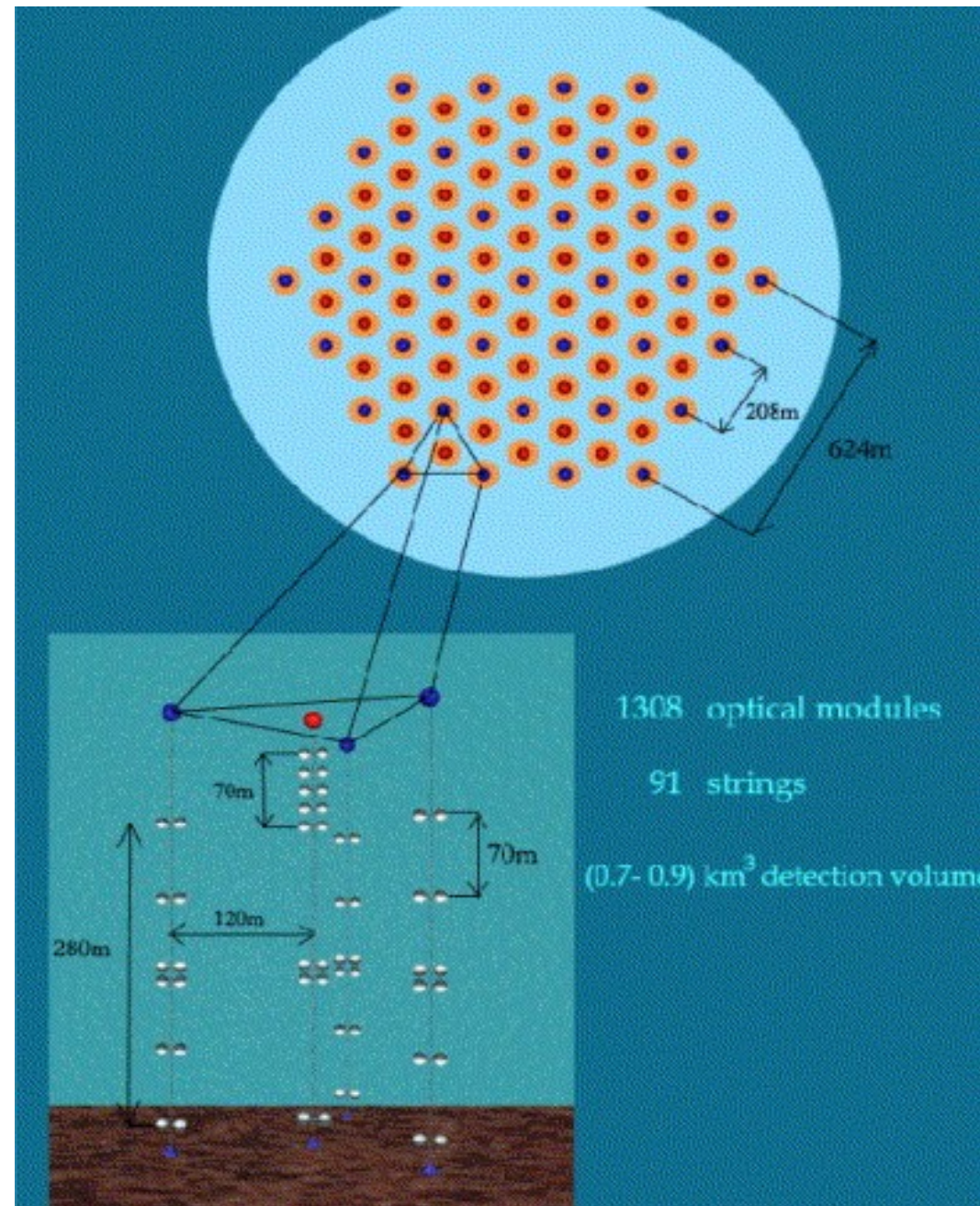
91 lignes portant 12/16 OMs
= 1308 OMs

Volume effectif pour
gerbes de 100 TeV $\sim 0.5 - 1.0 \text{ km}^3$

résolutions:

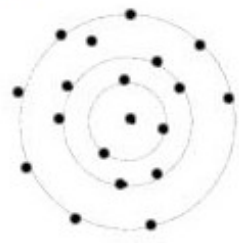
$\delta \log_{10}(E) \sim 0.1$, $\delta \theta_{\text{med}} < 5^\circ$

Seuil entre 10 et 30 TeV

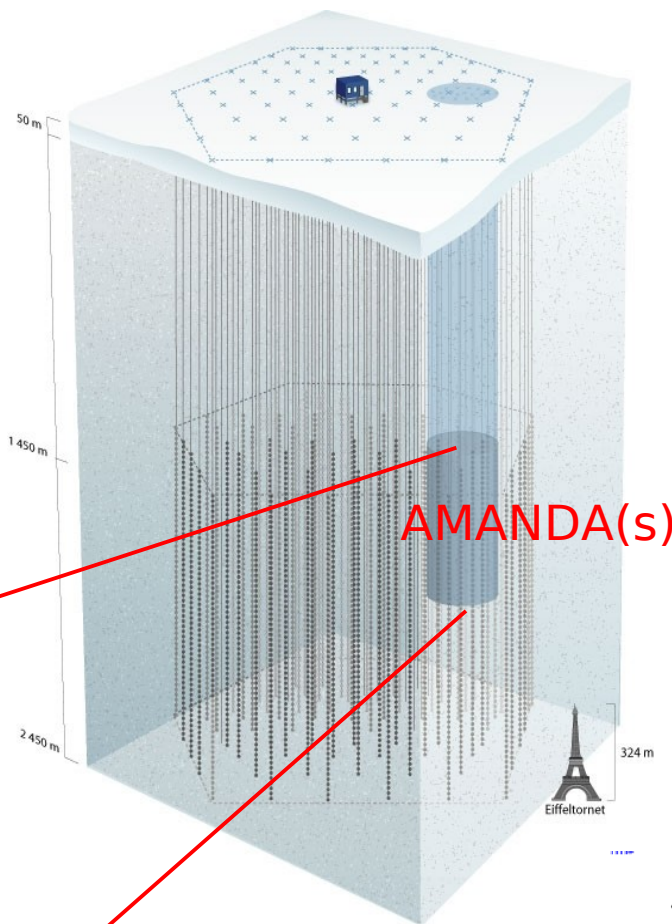


AMANDA-II

Depth



200 m



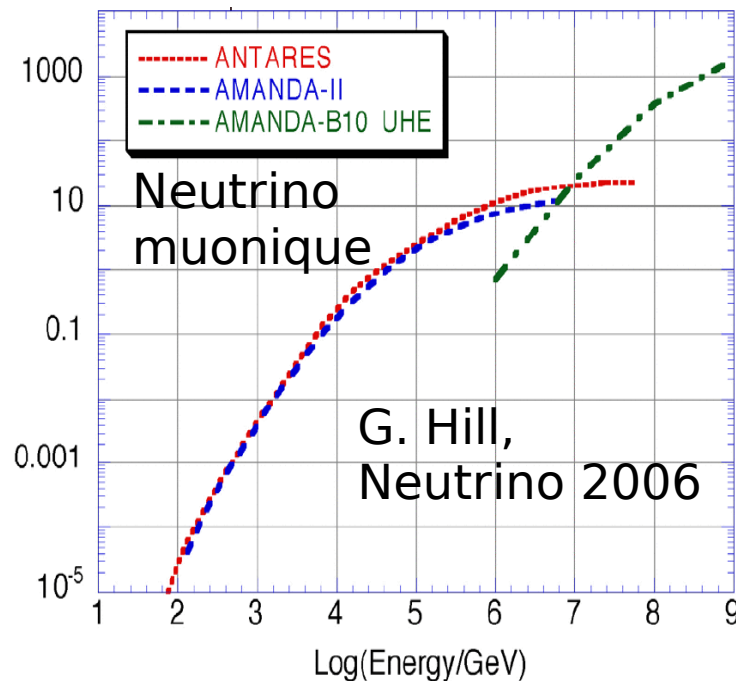
AMANDA-II: 19 lignes, 677 PMTs

15m entre modules
optique d'une ligne

AMANDA exploite ses
19 lignes depuis 2000

Résolution angulaire
 $\sim 2^\circ$

Surface effective pour les
neutrinos :



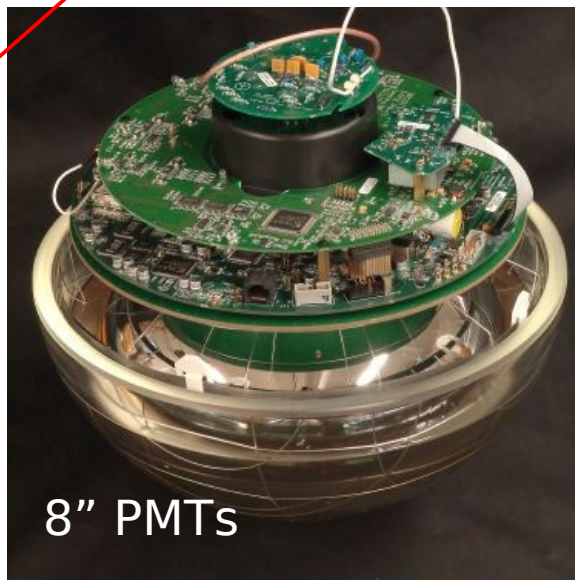
1500 m



2000 m

2500 m

1 PMT / étage

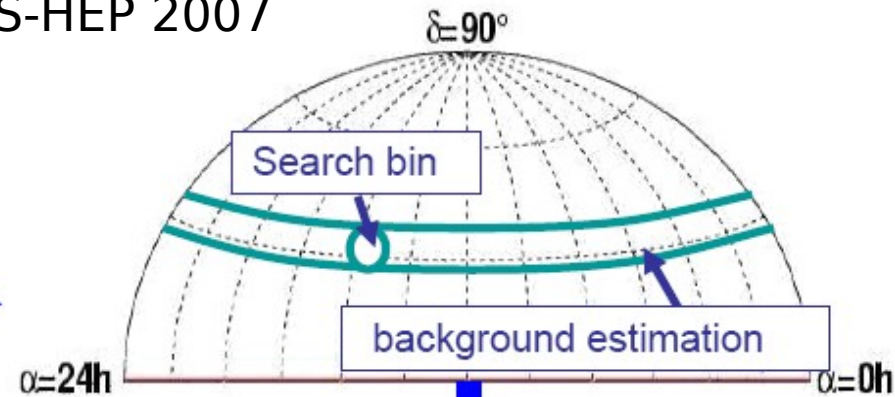
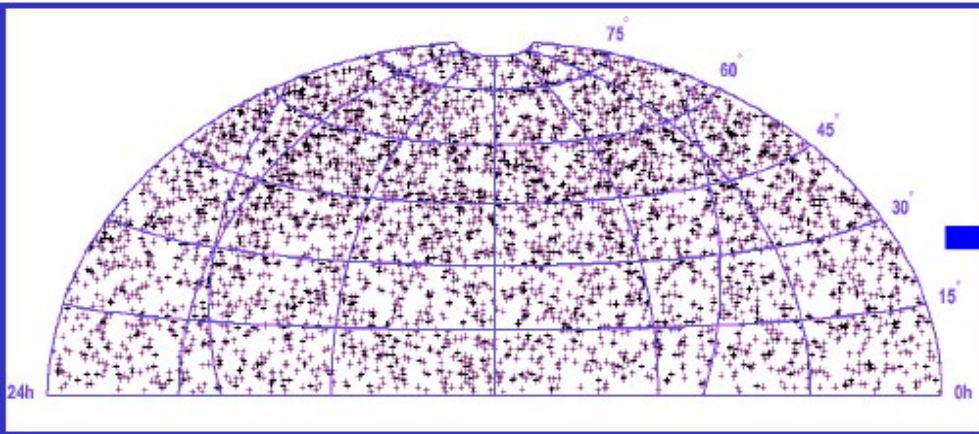


Sources ponctuelles : cartes du ciel AMANDA : pas d'excès significatif

Skymap (2000-2004)

4282 v

B Baret, EPS-HEP 2007

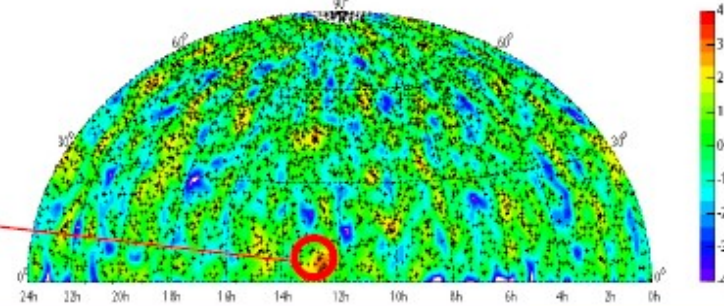


Highest excess= 3.7σ
Statistical probability=69%

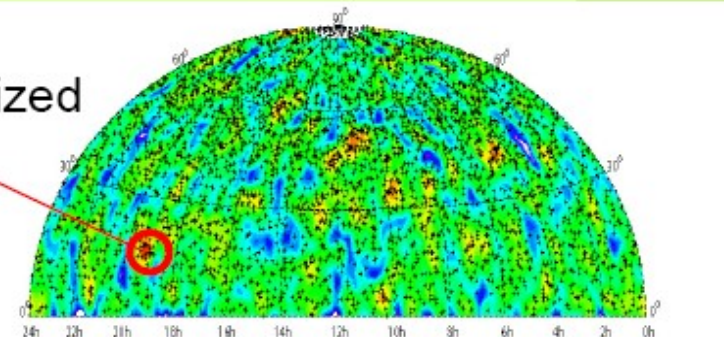
No source

Limits

Real sky

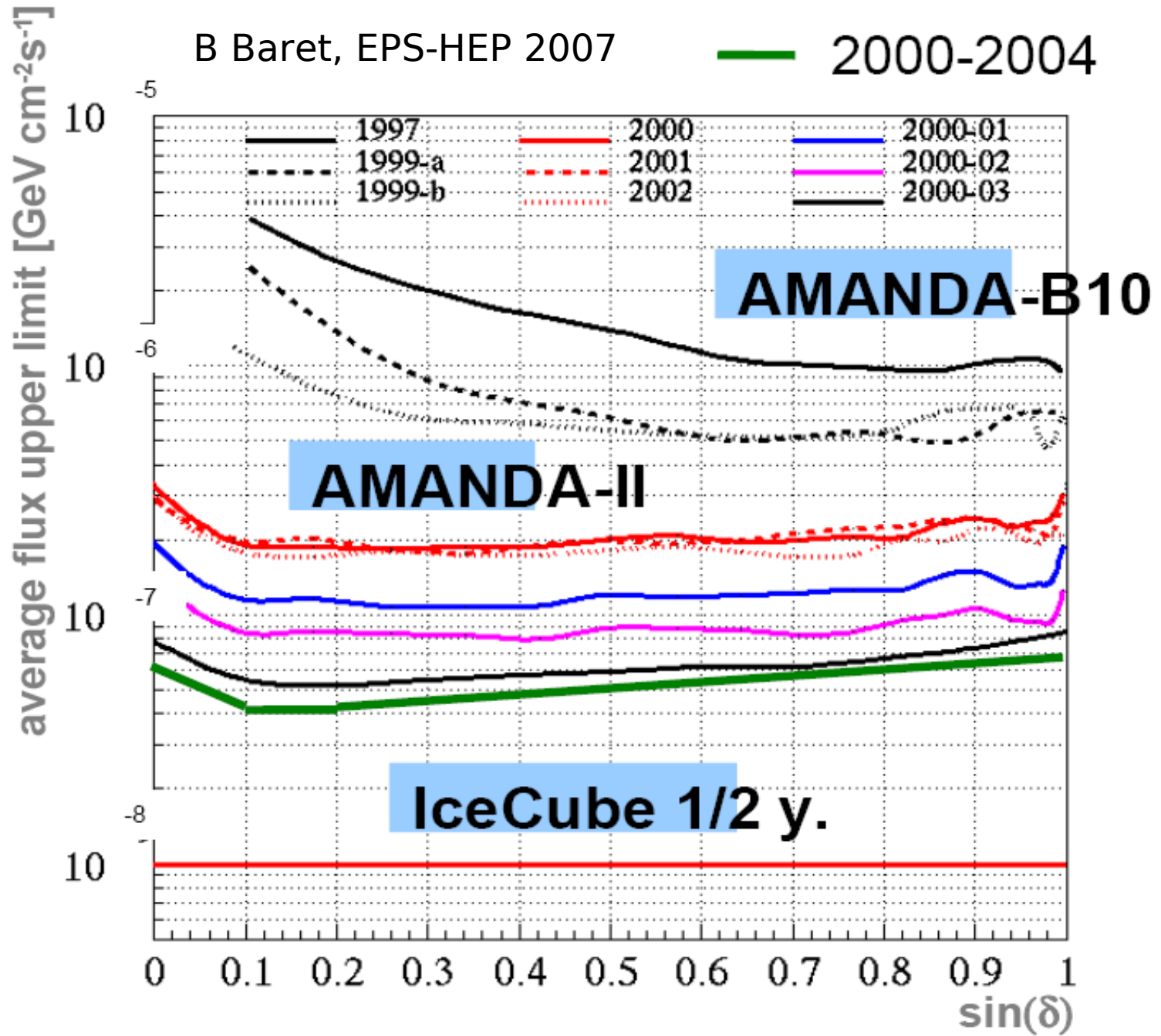


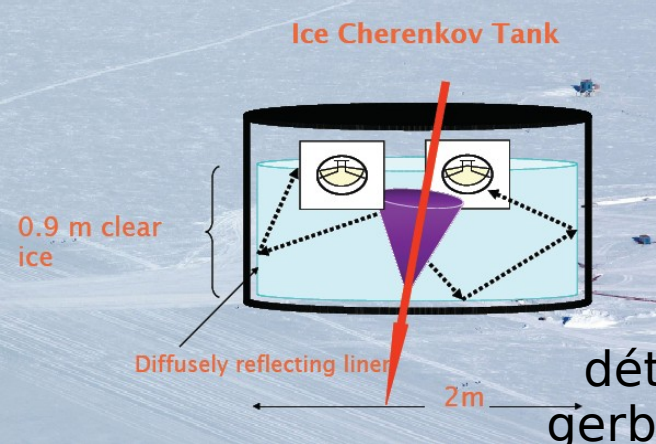
Randomized MC sky



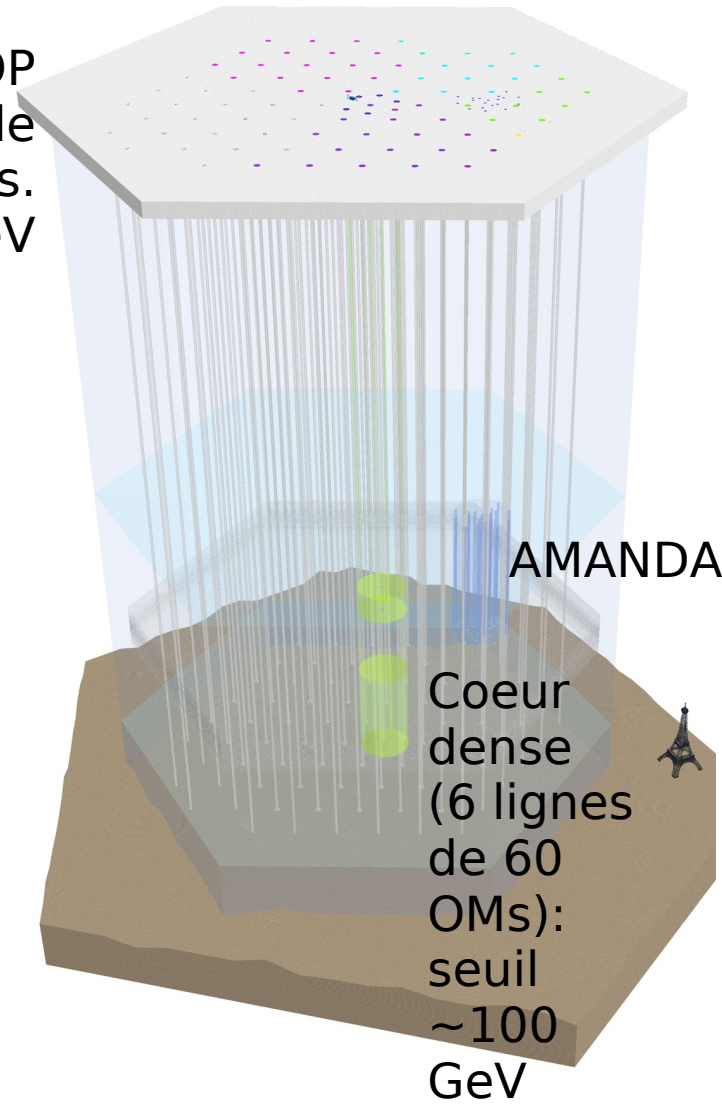
Significance maps

Sources ponctuelles : cartes du ciel AMANDA : pas d'excès significatif





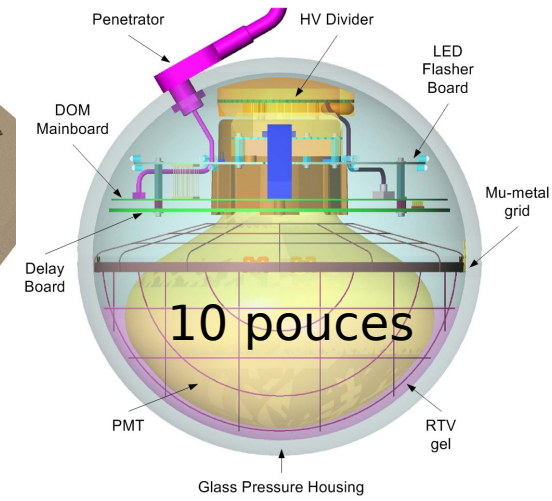
ICETOP
détecteur de
gerbes atmos.
seuil ~ 300 TeV



- 2004-2005:
1 ligne
- 2005-2006:
8 lignes
- 2006-2007:
13 lignes
- 2007-2008:
18 lignes
- 2008-2009:
19 lignes



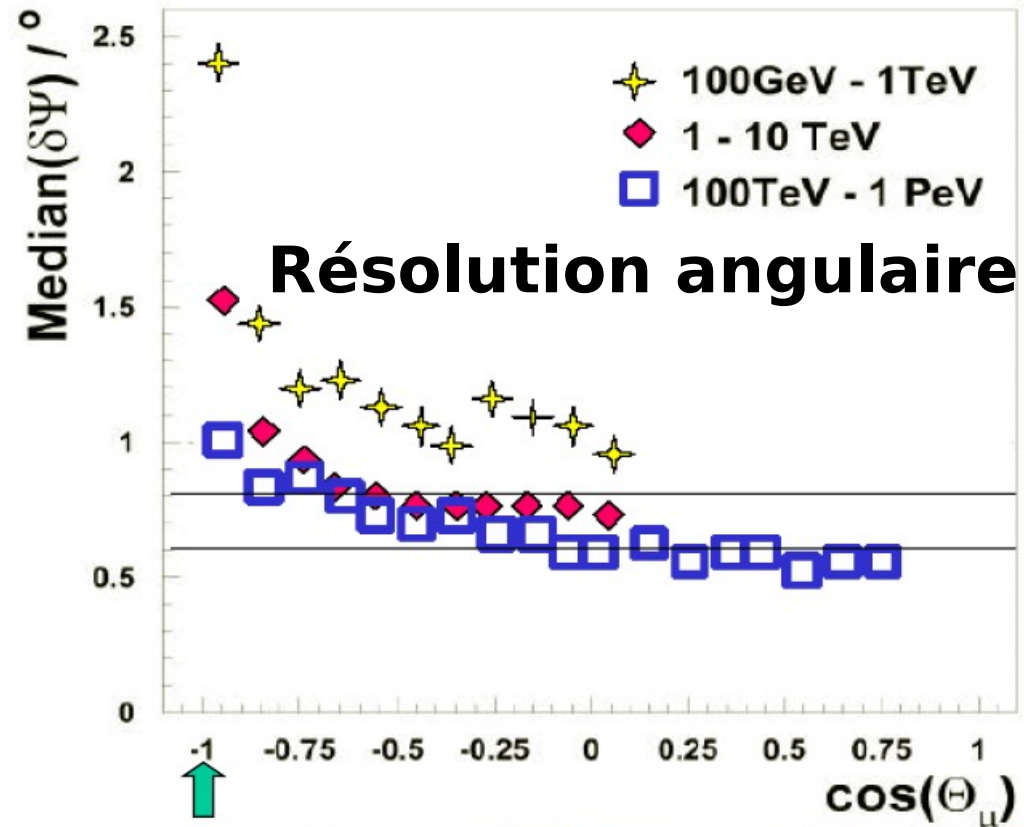
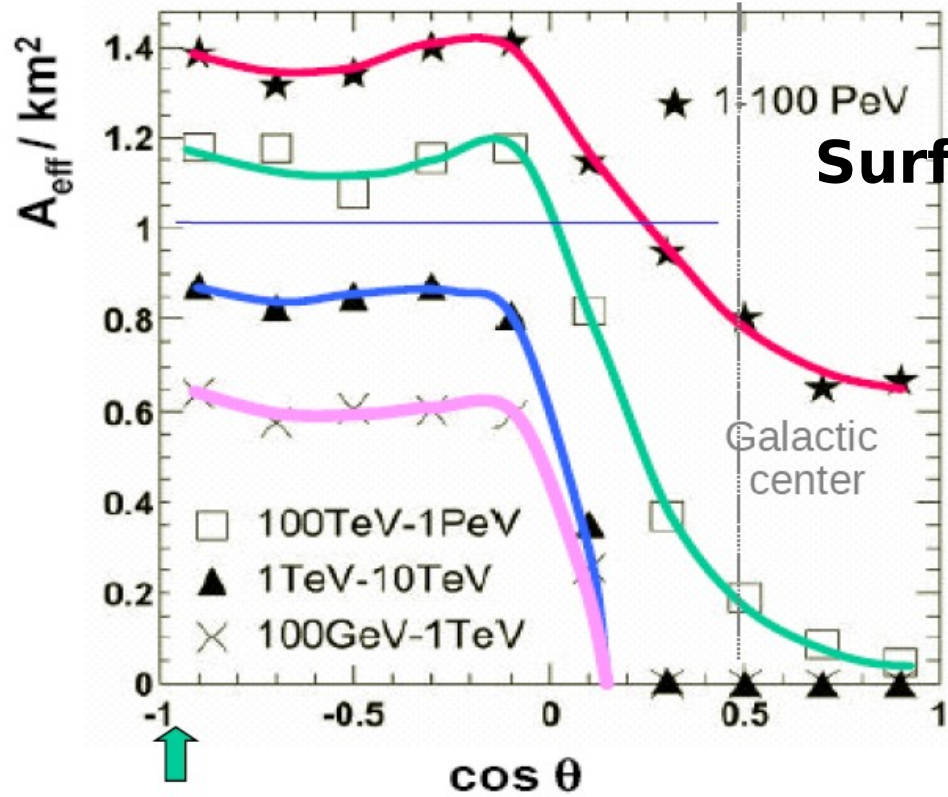
**ICECUBE
(-2450m):
80 lignes de 60
étages =
4800 PMTs.
17m entre
OMs,
125 m entre
lignes**



2009 :
59 lignes connectées

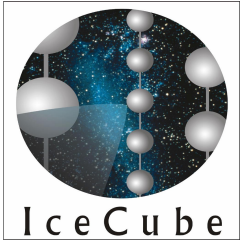
G Kohlen
Moriond 2009

Performances attendues (M Ribordy, Moriond 2008)

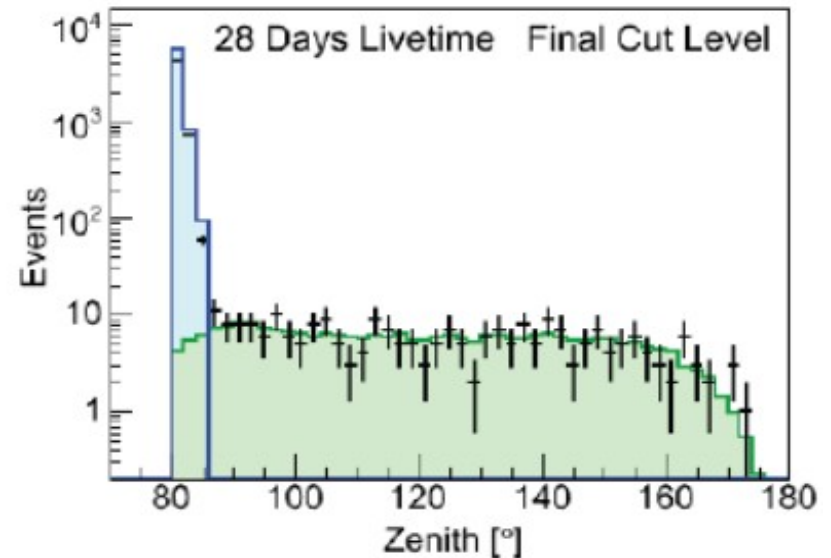
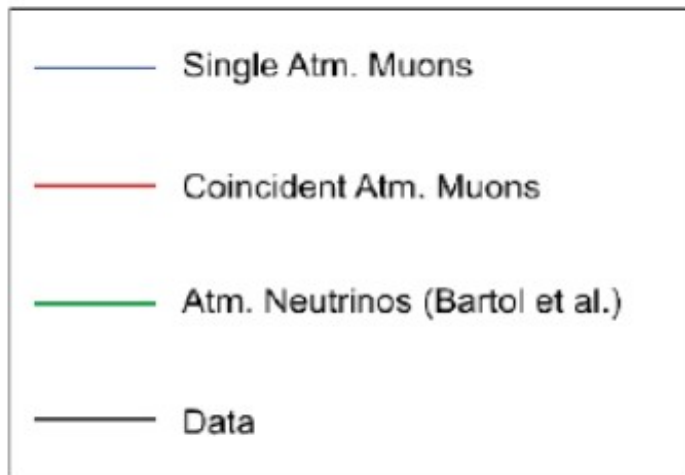
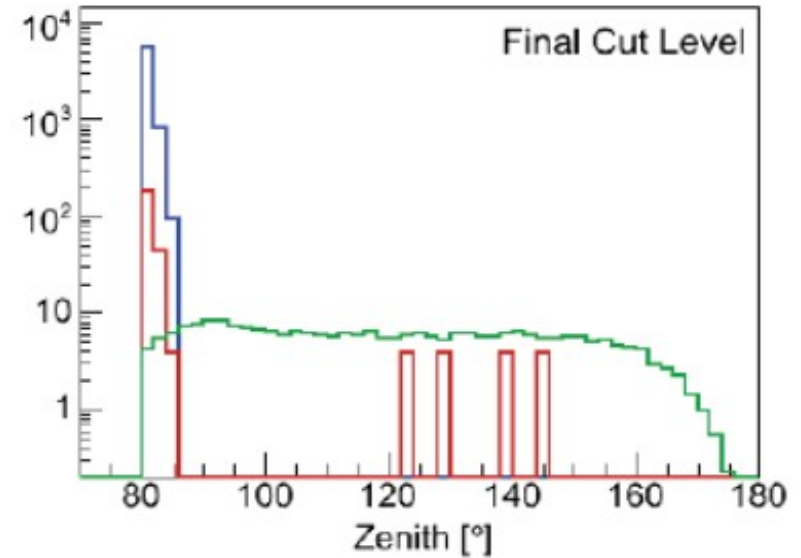
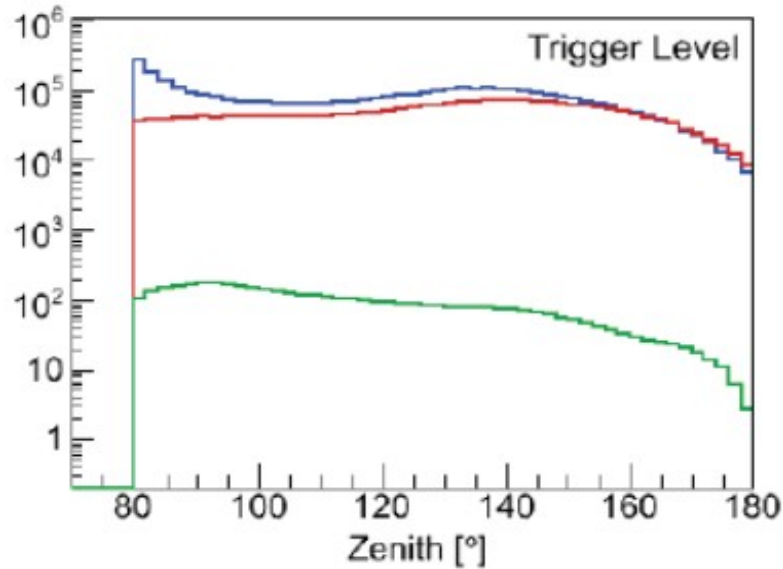


Evenements dans ICECUBE

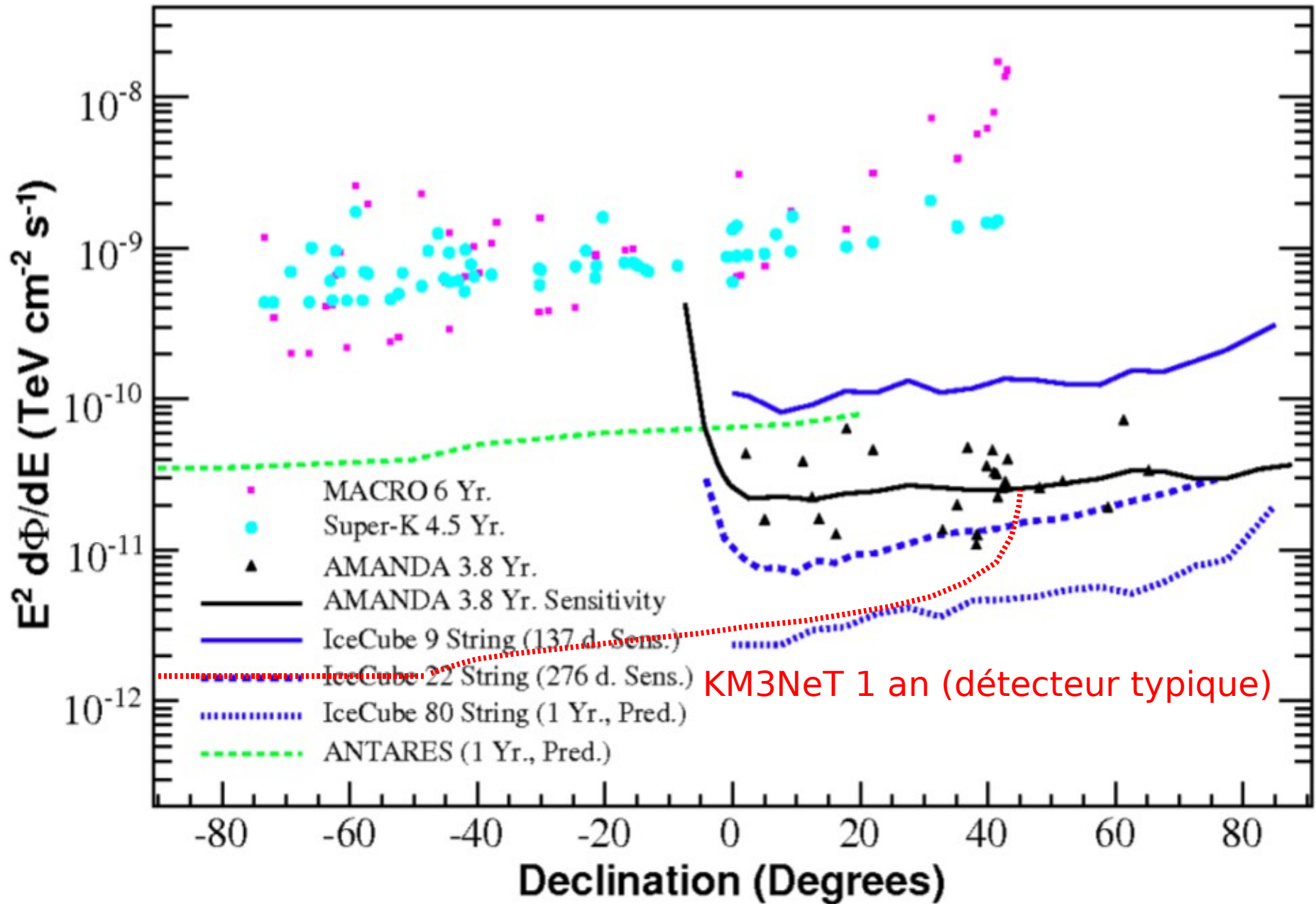
# Strings	Year	CR μ rate	ν rate
1	2005	5 Hz	0.01 / day
9	2006	80 Hz	1.5 / day
22	2007	550 Hz	20 / day
40	2008	1000 Hz	
59	2009		
?	2010		
80	2011	\sim 1650 Hz	\sim 200 / day



Observation de neutrinos montants : reconstruction et sélection :



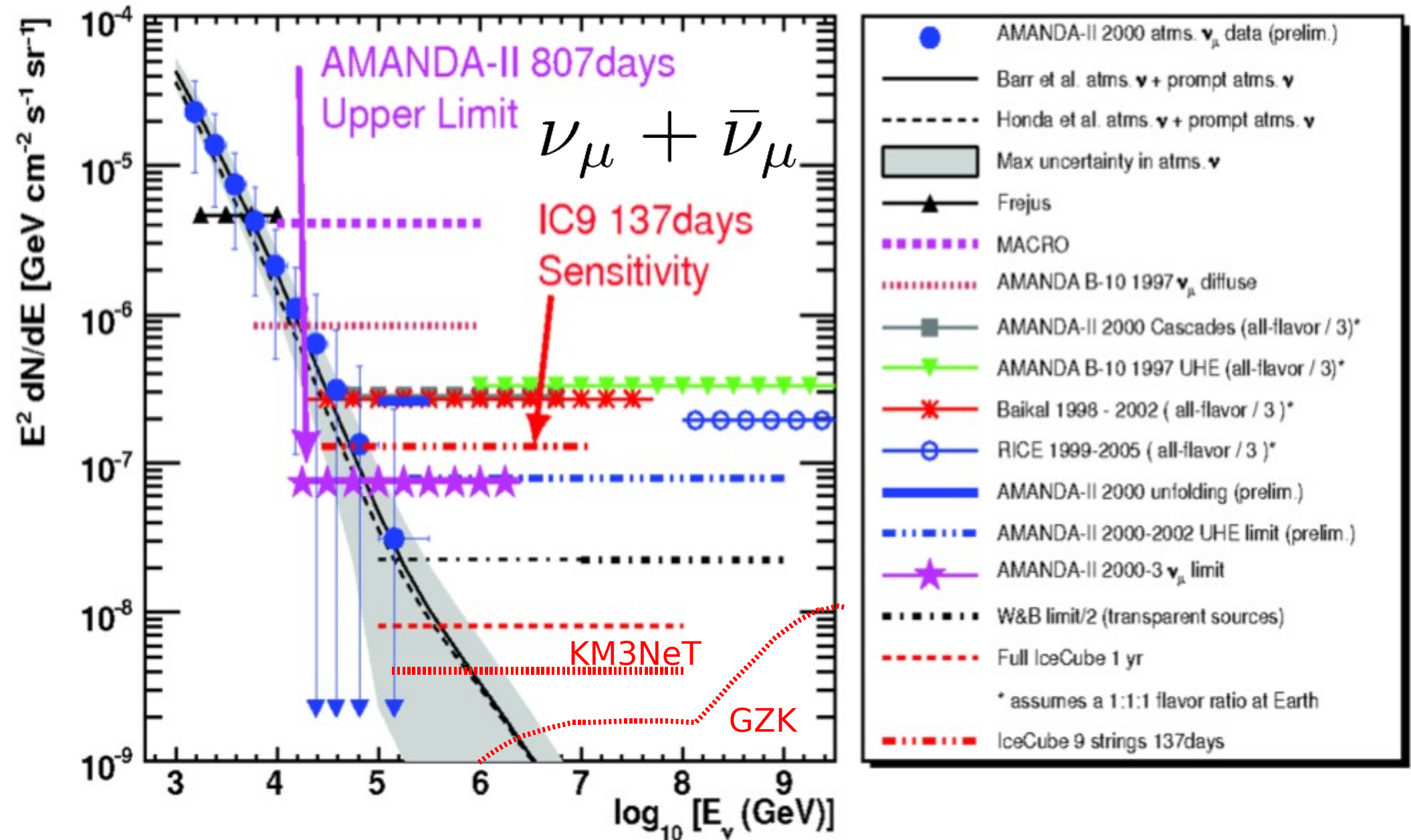
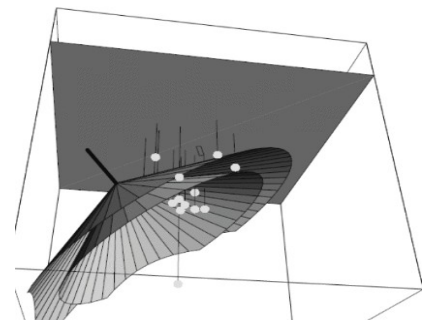
Sources ponctuelles : sensibilité

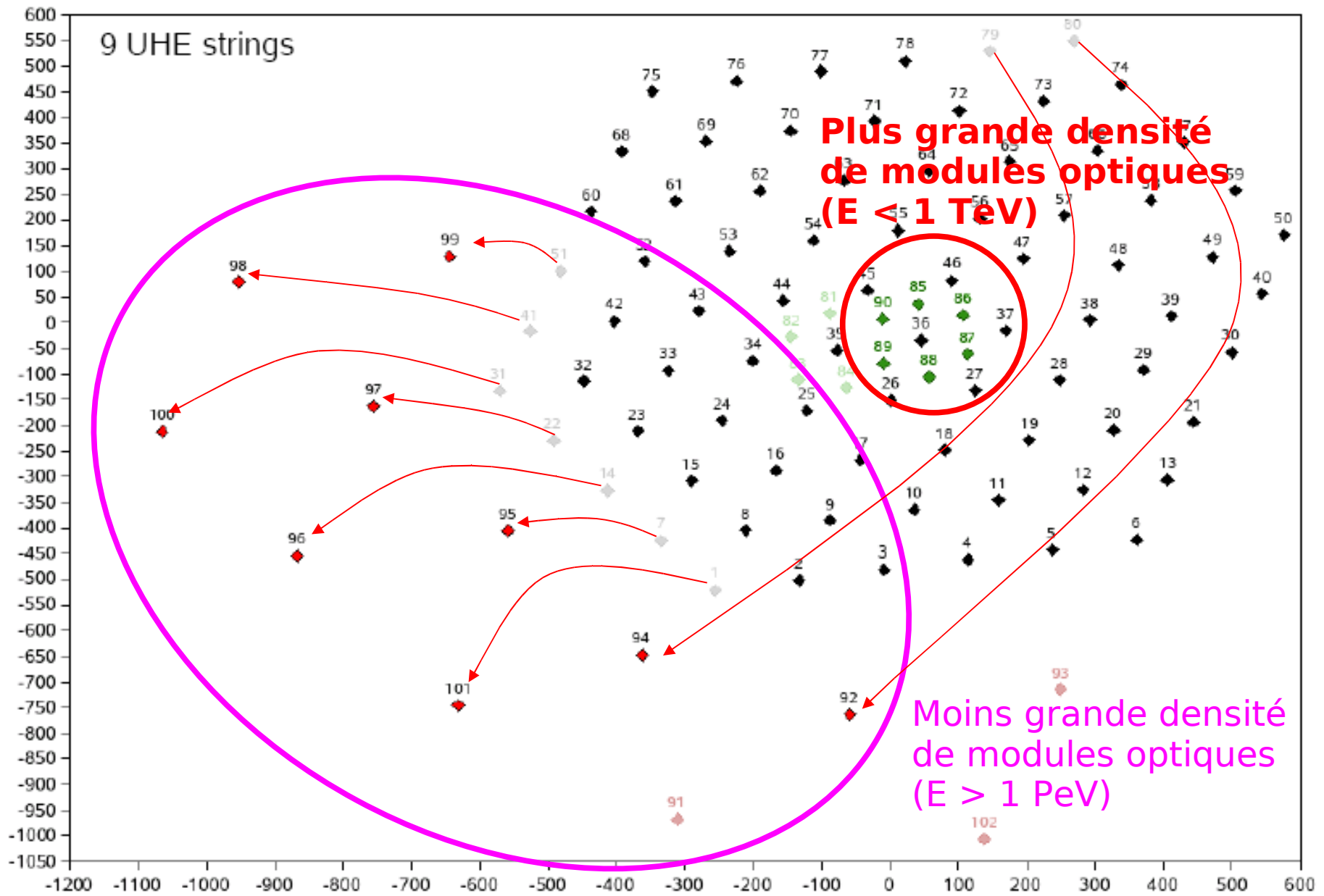


Flux diffus

200m x 200m x 200m, Cherenkov radio
 16 récepteurs [0.2 GHz, 1 GHz] (Kravchenko et al 2003)

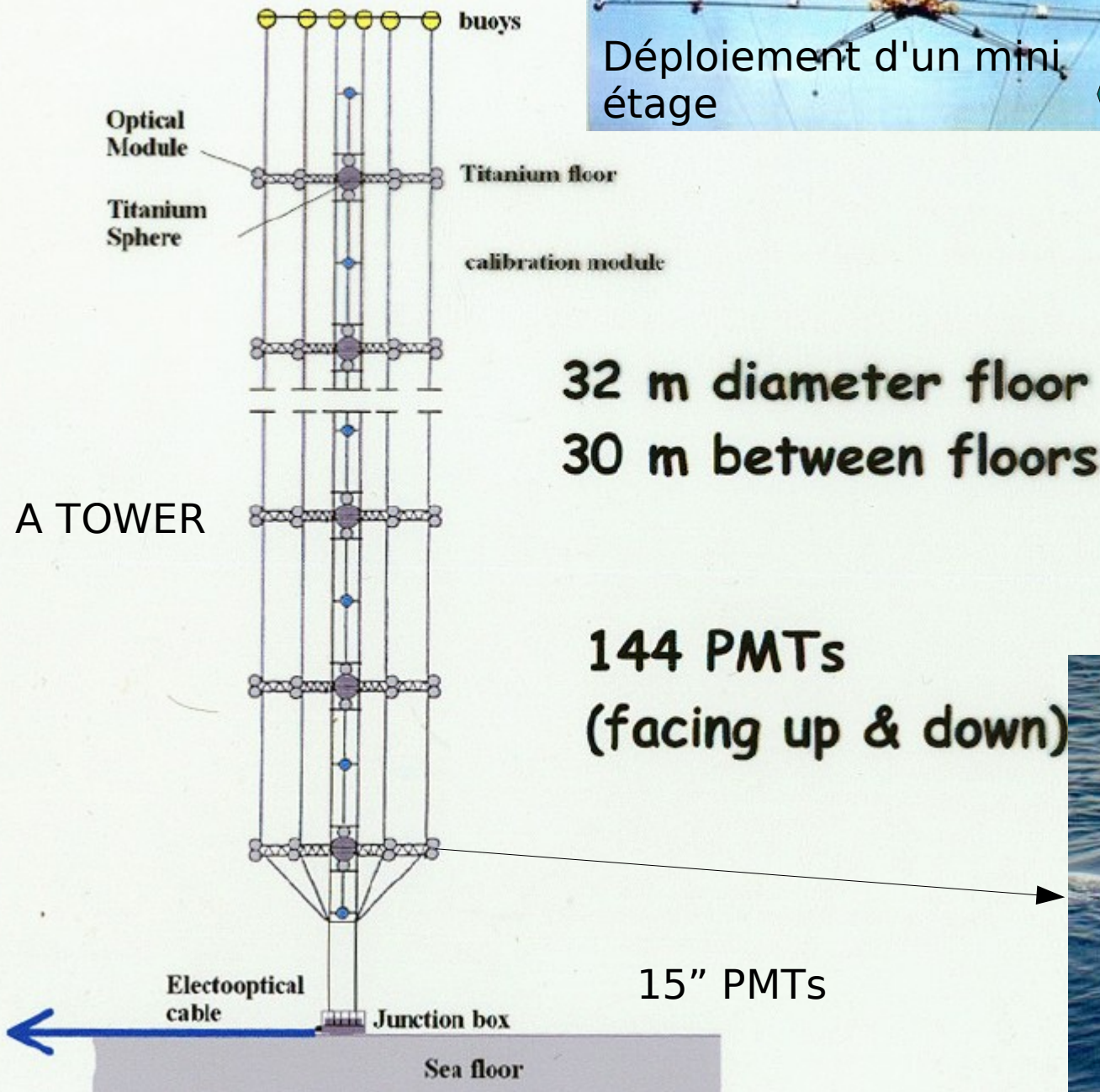
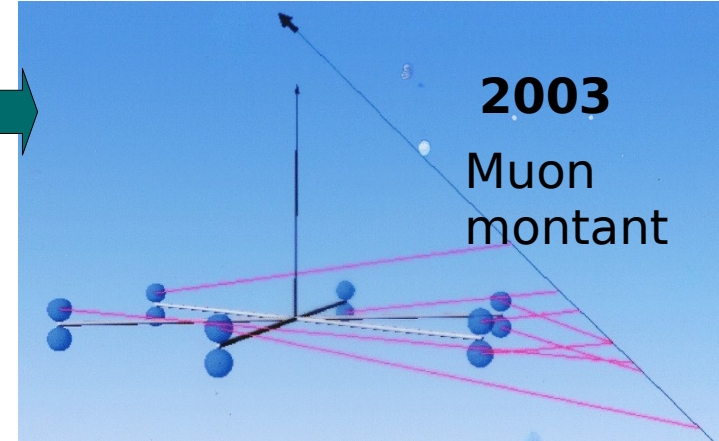
RICE



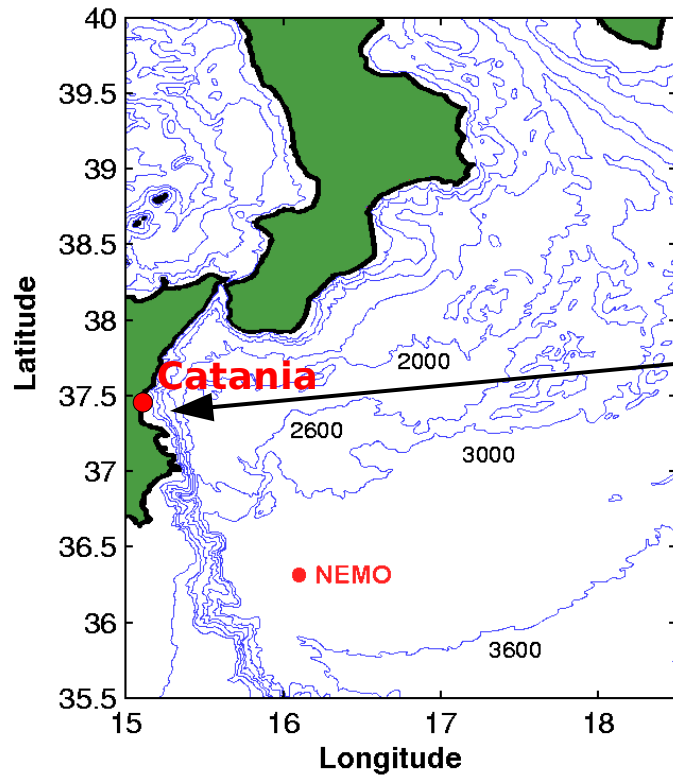


AVENIR de ICECUBE

NESTOR
prof. 4000m
12 PMTs/étage
12 étages/tour



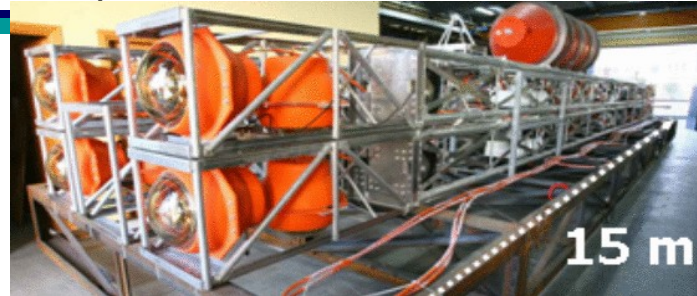
NEMO, prof. 3500m, 4 PMTs/étage



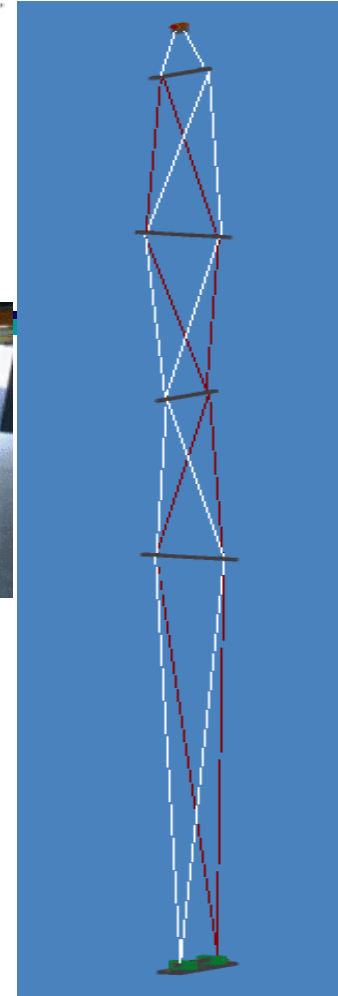
Phase 1 (Déc. 2006) : 1 mini-tour
déployée à 2000 m de profondeur, à
30 km au large de Catane



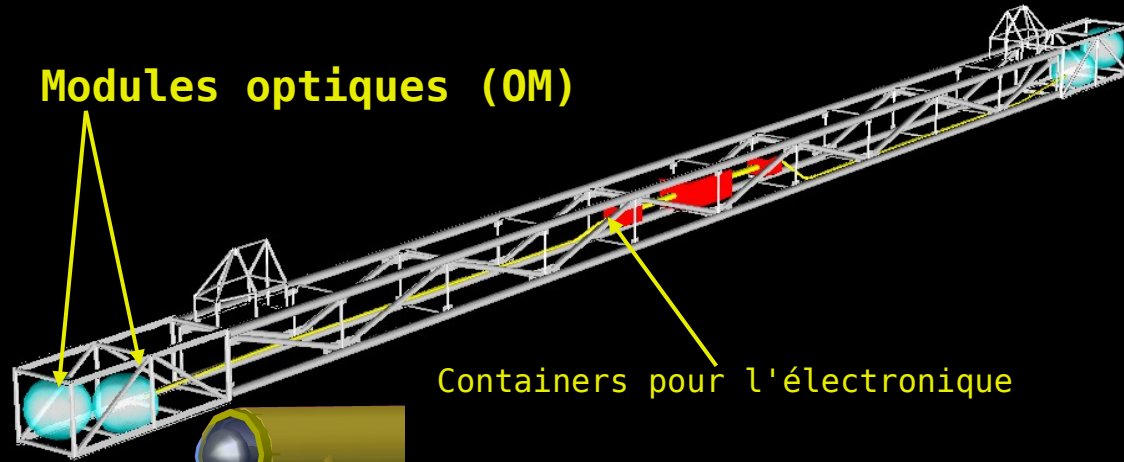
I Amore & A Capone, VLVNT08



Mini tour
NEMO
(4 étages,
16 OMs)

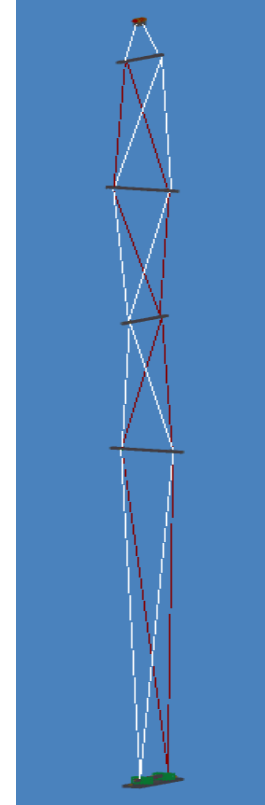


Modules optiques (OM)

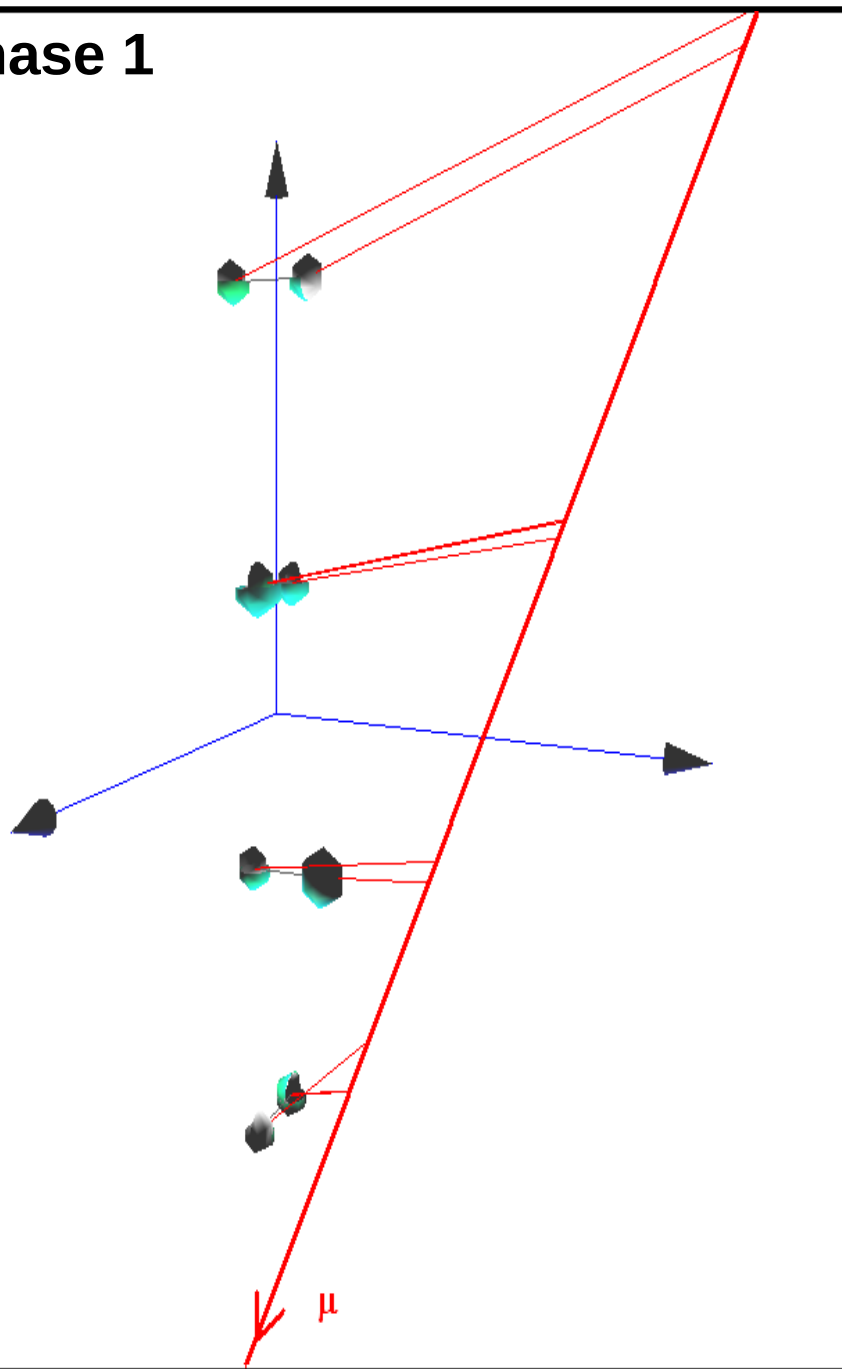


Containers pour l'électronique

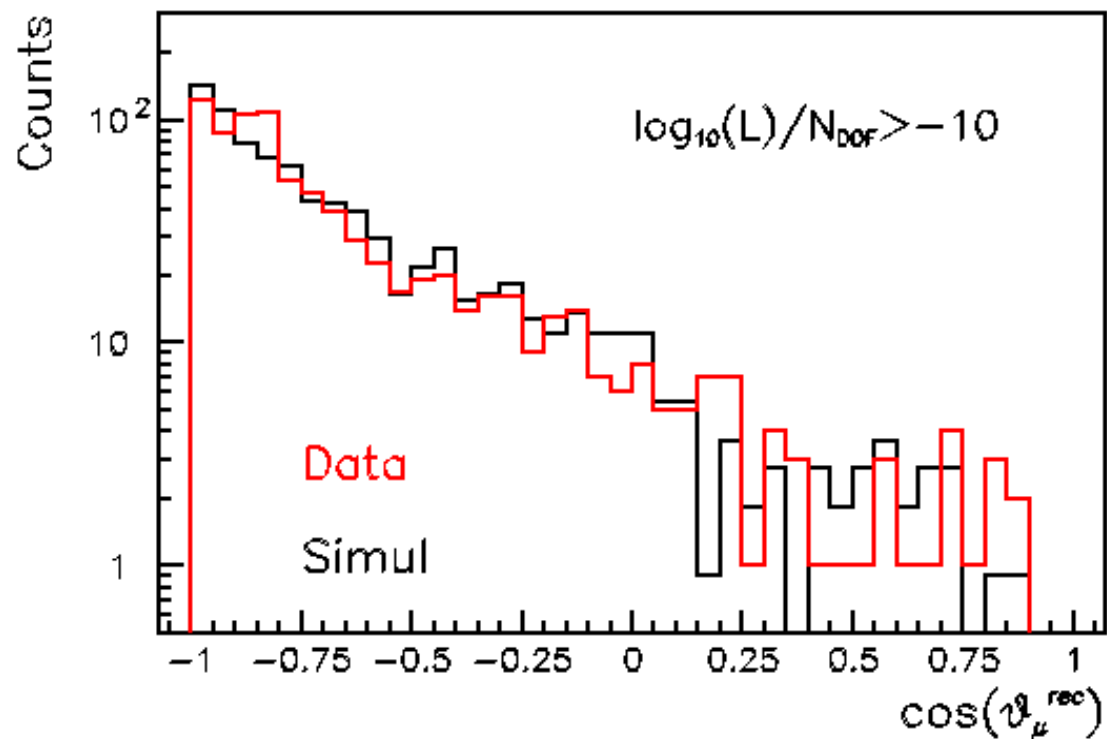
Mini tour NEMO (4 étages, 16 OMs)



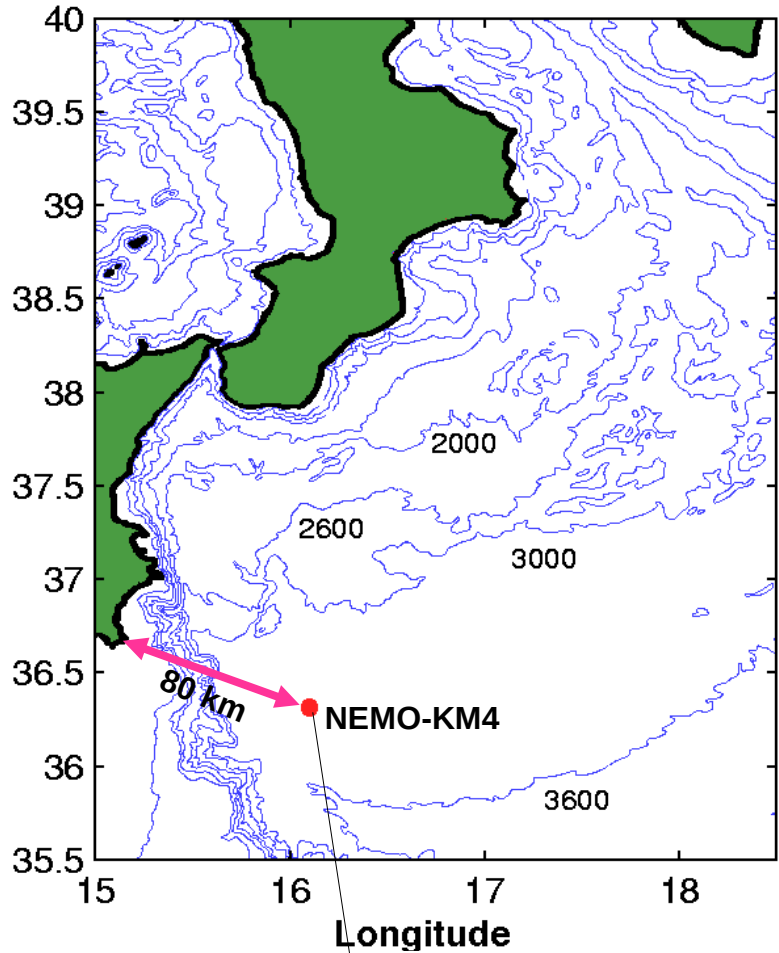
Phase 1



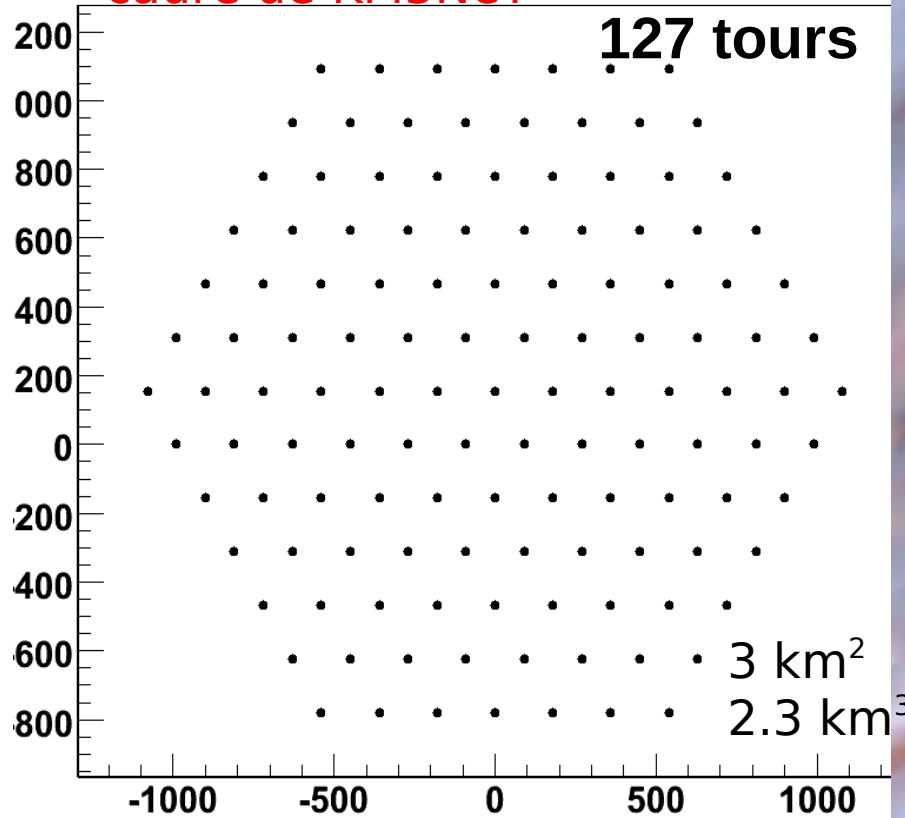
23-24 Jan 2007



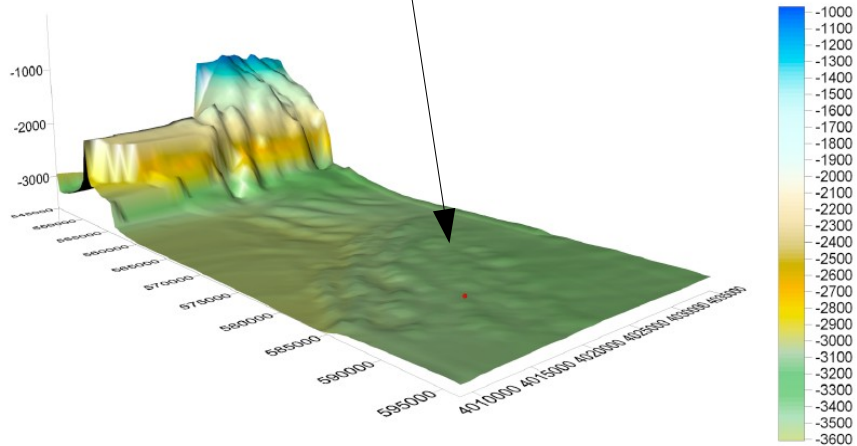
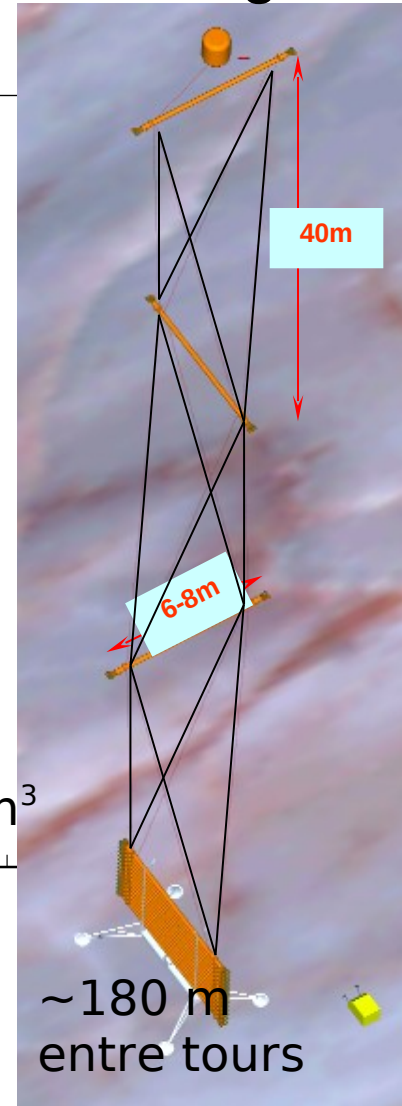
NEMO vs KM3NeT



Etudes en cours dans le cadre de KM3NeT



20 étages



Préliminaire ! Sensibilité pour une source ponctuelle à $\delta = -60^\circ$: $2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV/cm}^2/\text{s}$

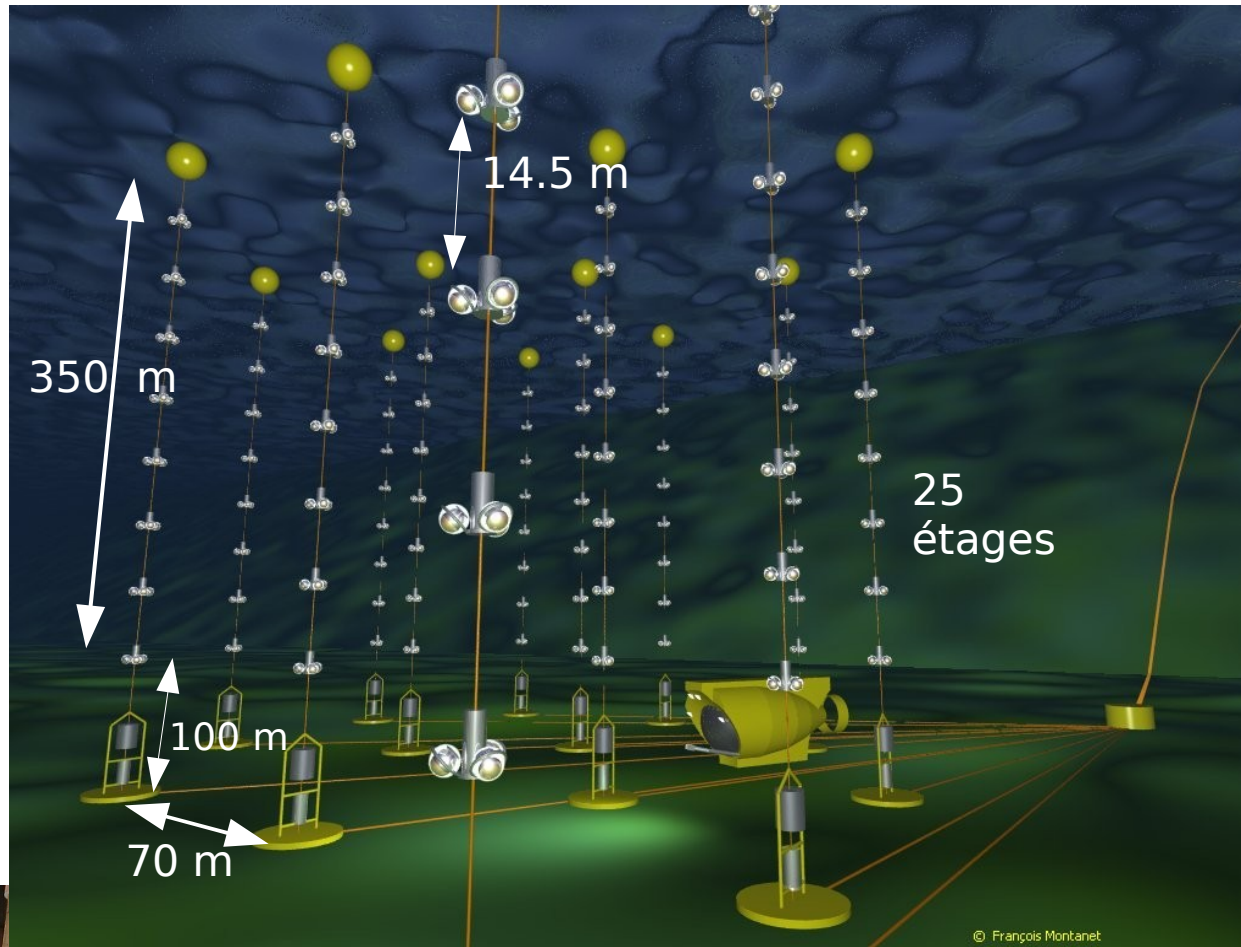
Résolution angulaire
 $\sim 0.2^\circ$ pour $E @ 10 \text{ TeV}$
 $< 0.1^\circ$ pour $E > 100 \text{ TeV}$

6 PMTs de 8 pouces/étage
 35% QE

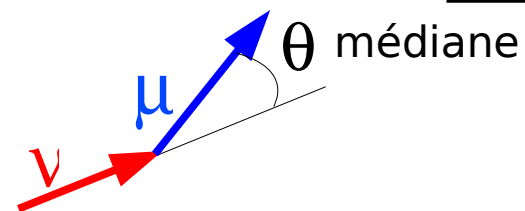
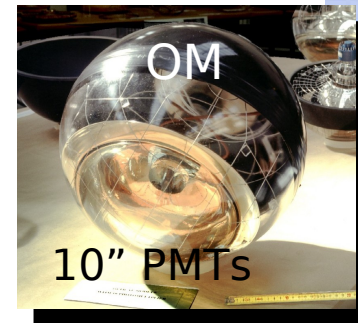
**ANTARES,
2475m,
3 PMTs/étage**

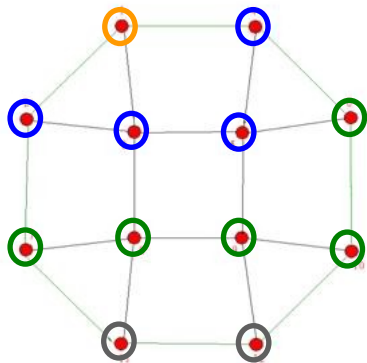
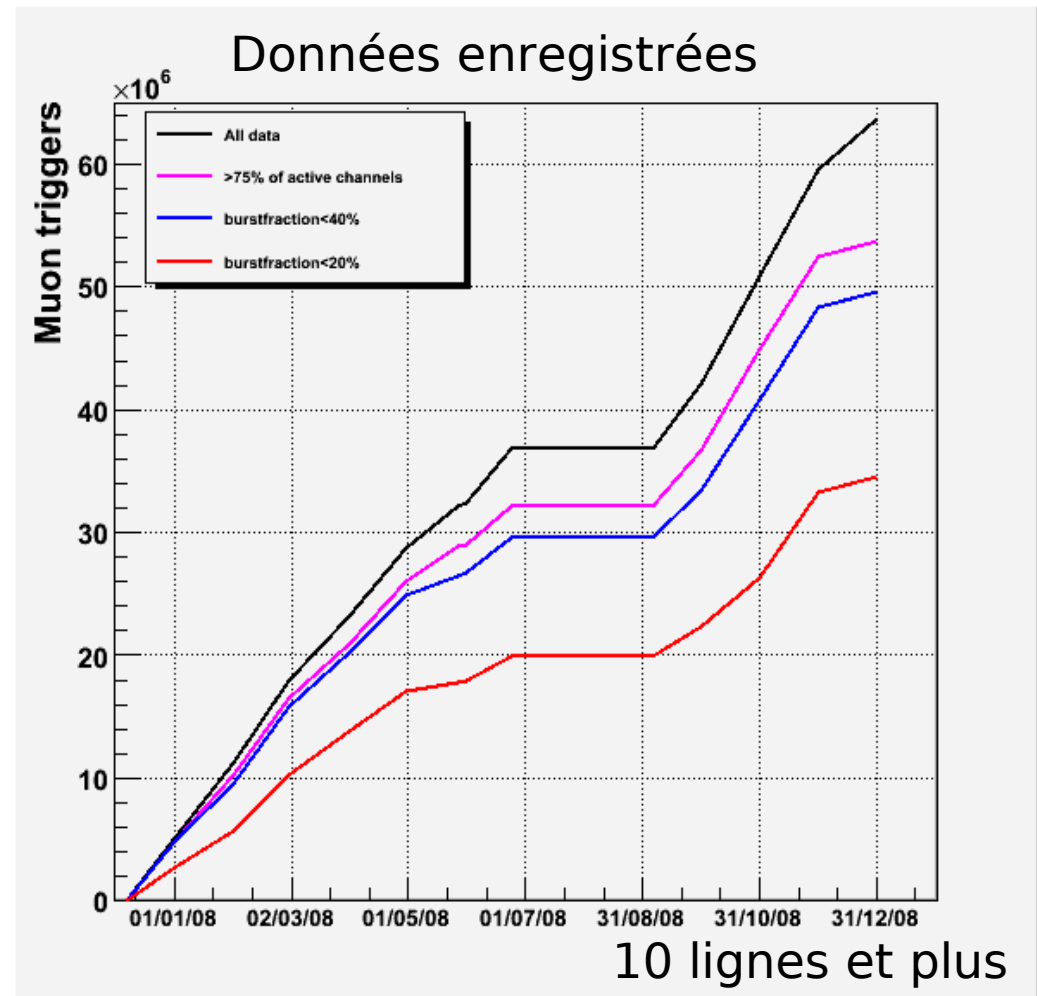
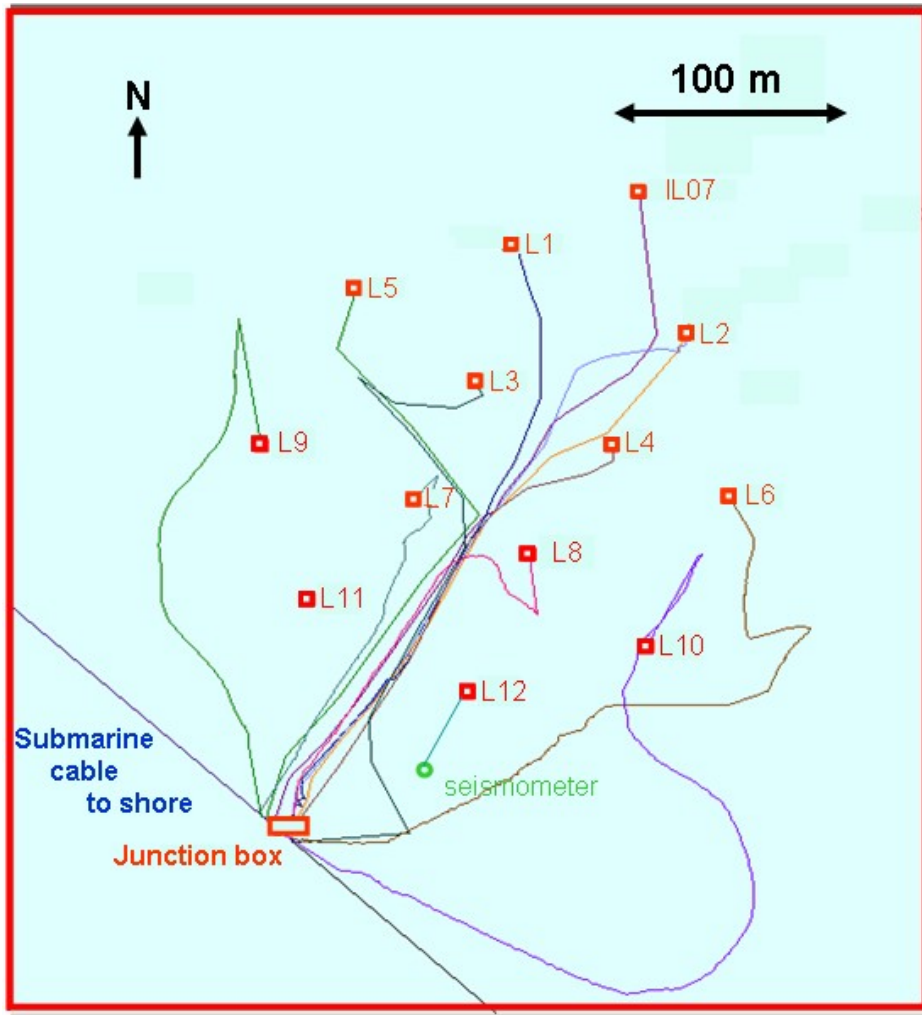
**12 lignes de
25 étages**

=900 PMTs



Résolution
angulaire:
 0.3° (mediane)
au delà de 10 TeV





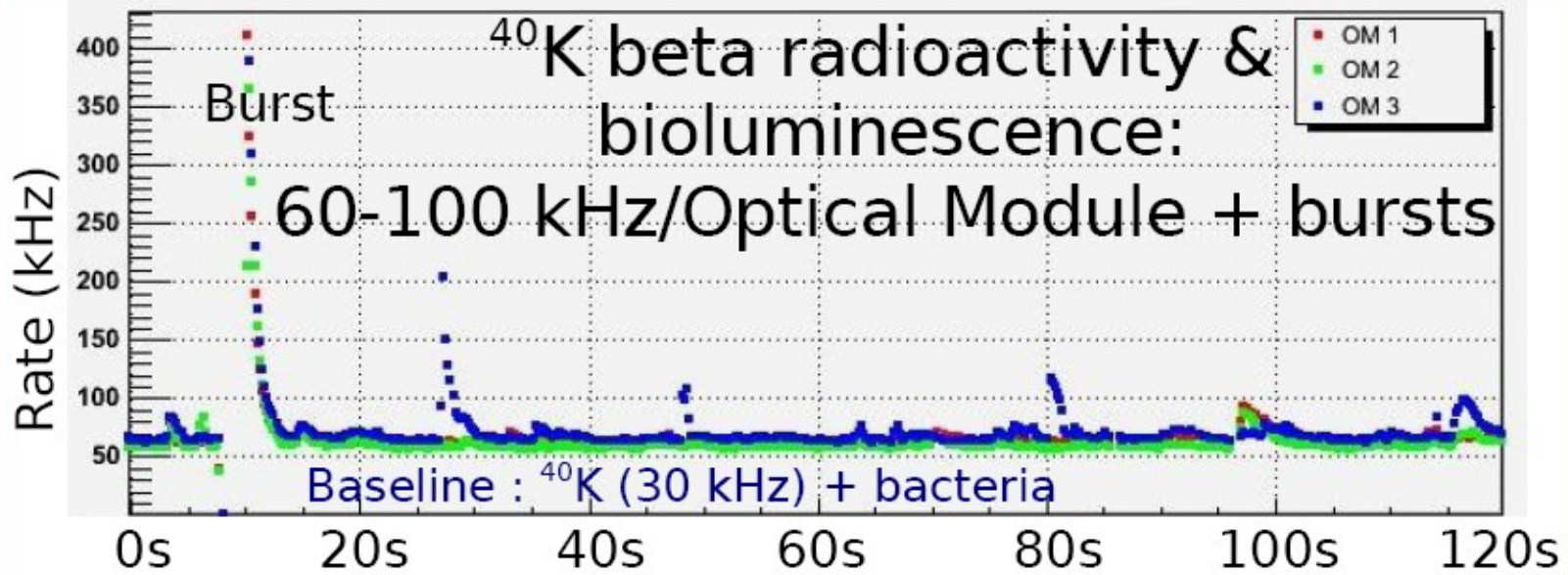
connexions:

Ligne 1: 03 / 2006

Lignes 2, 3, 4, 5: 01 / 2007

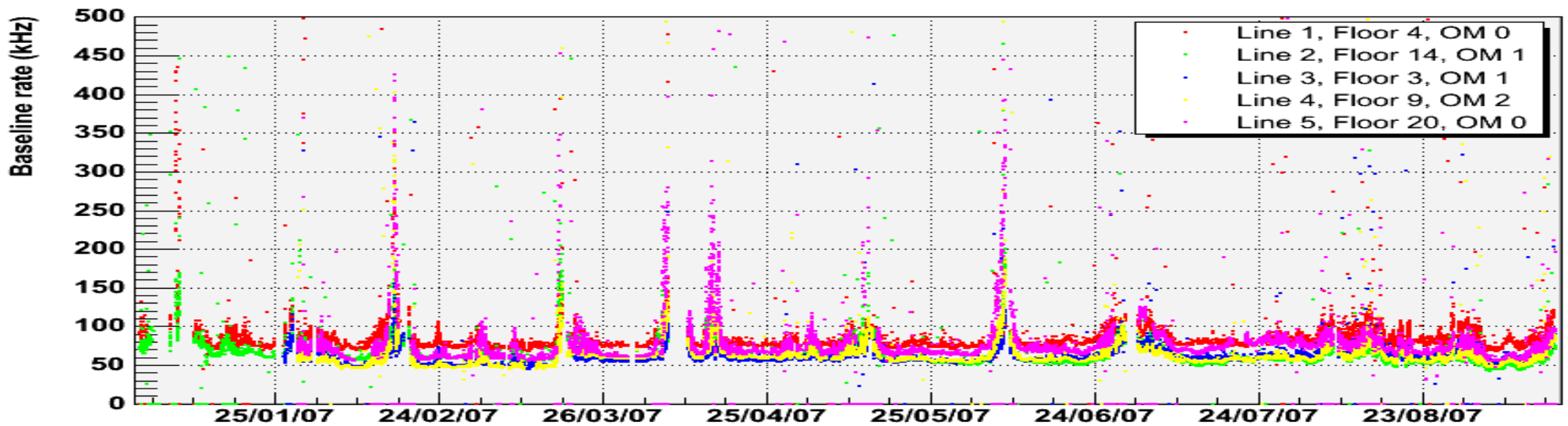
Lignes 6, 7, 8, 9, 10: 12 / 2007

Lignes 11, 12: 05 / 2008

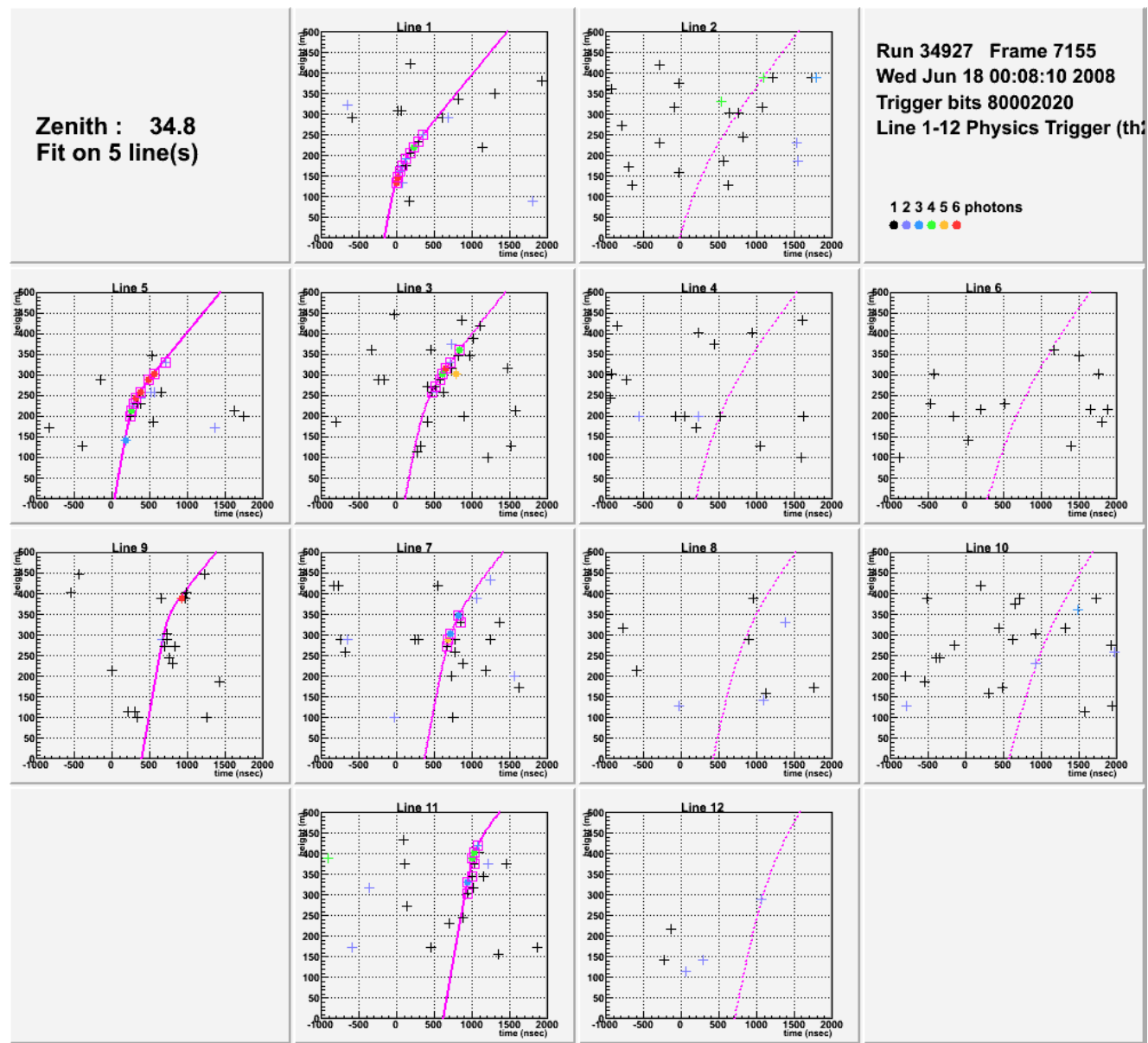


2007

Environmental background noise

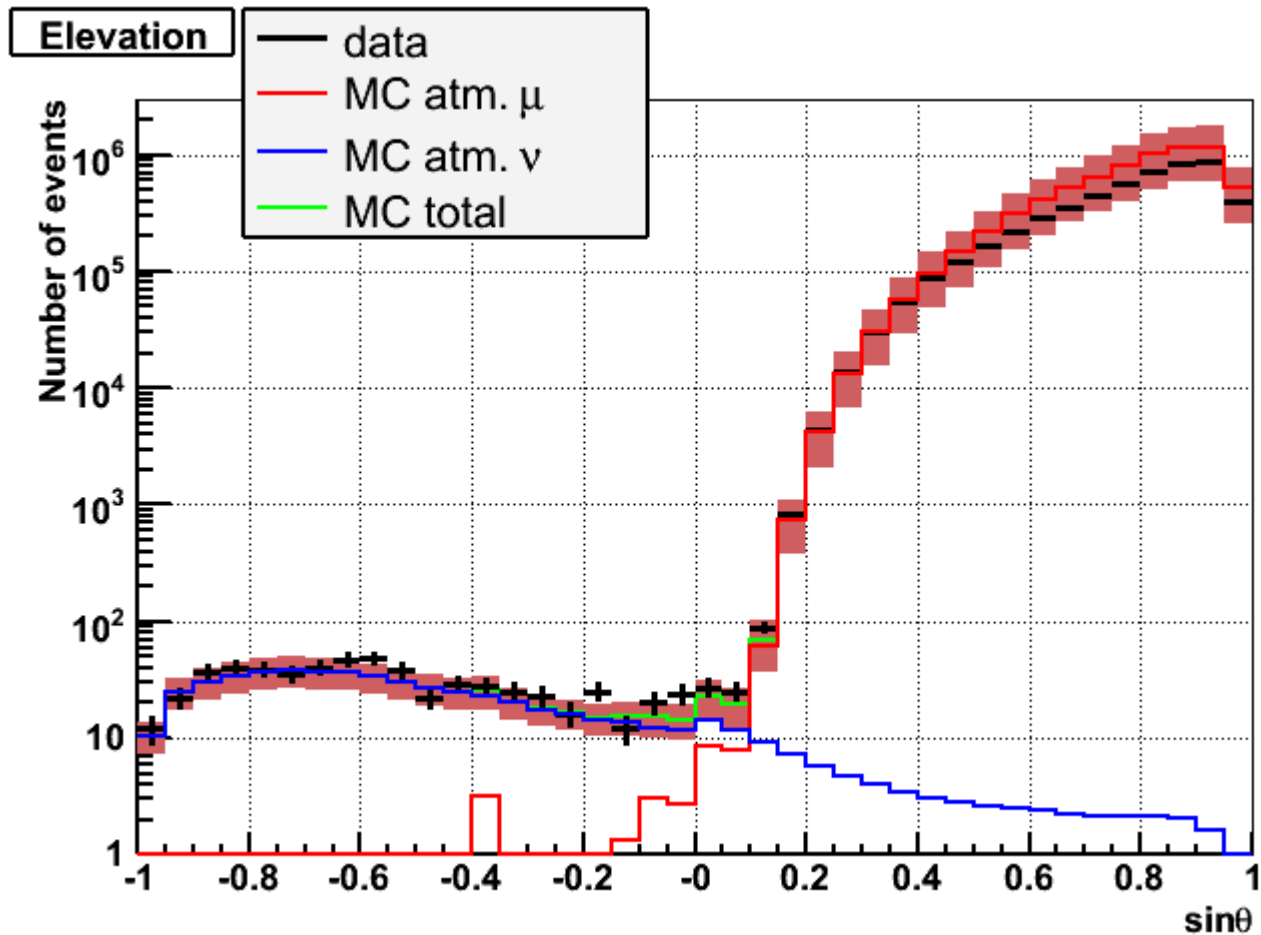


Détection d'un neutrino montant



Neutrinos détectés

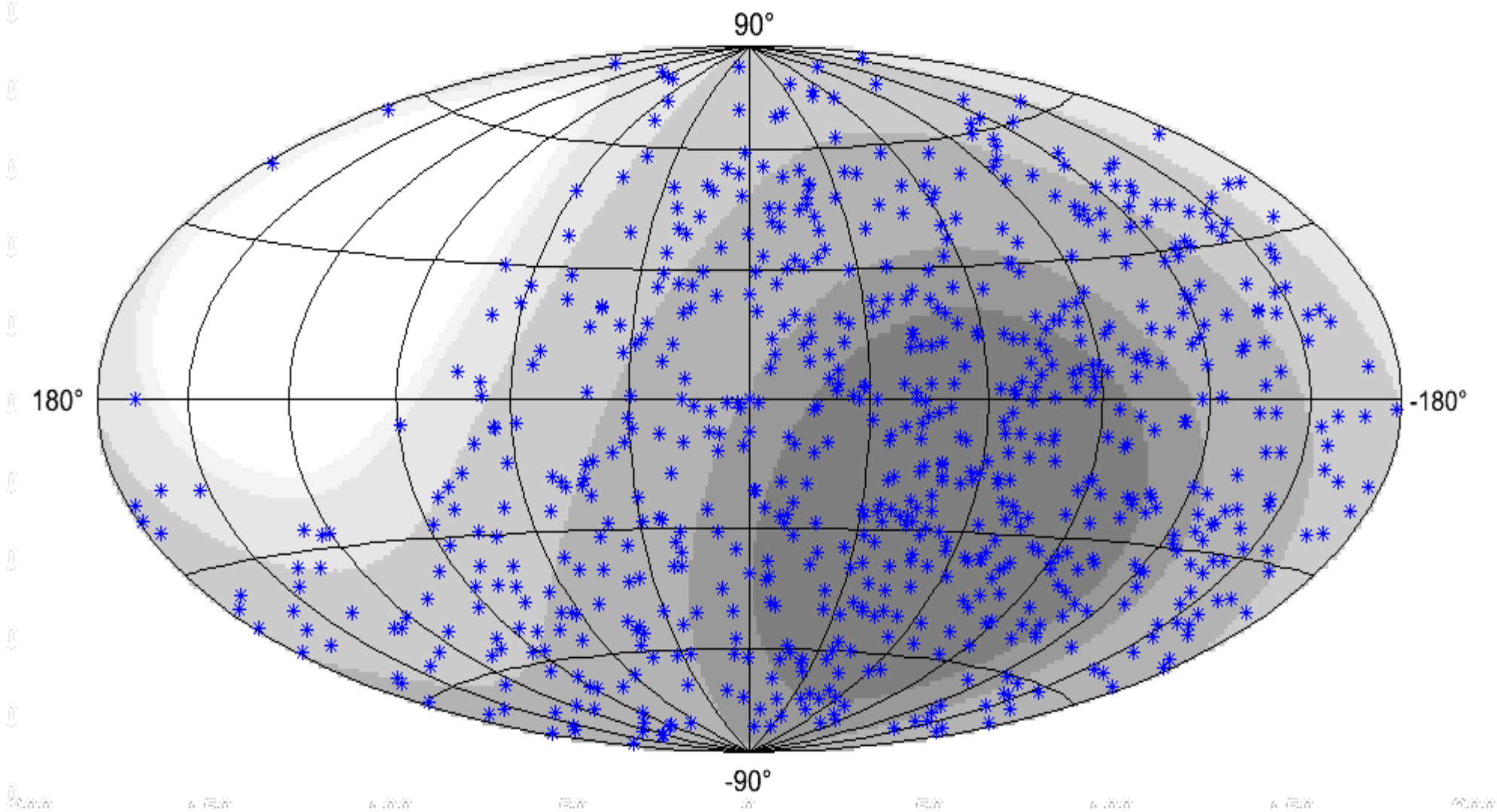
Année 2008 (9,10 lignes puis 12 lignes) 173 jours



582 montants /

494 neutrinos attendus + 13 muons atmosphériques

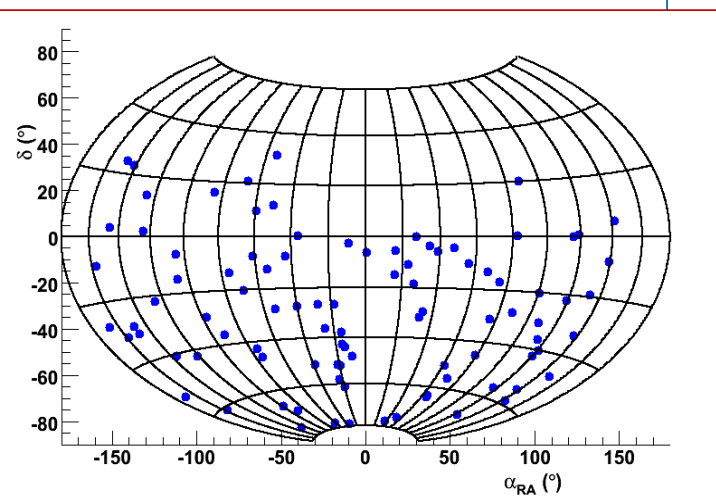
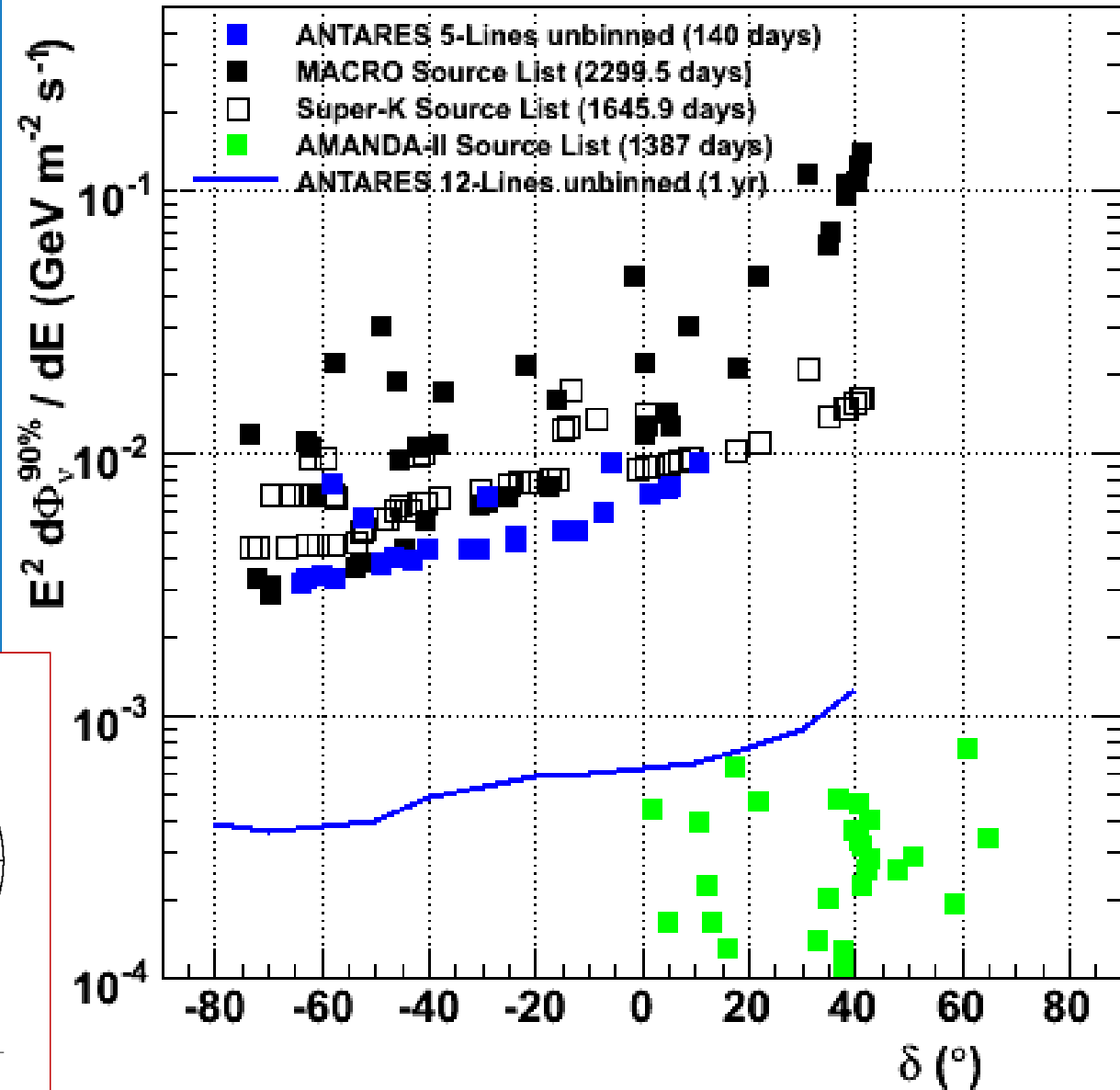
Neutrinos détectés



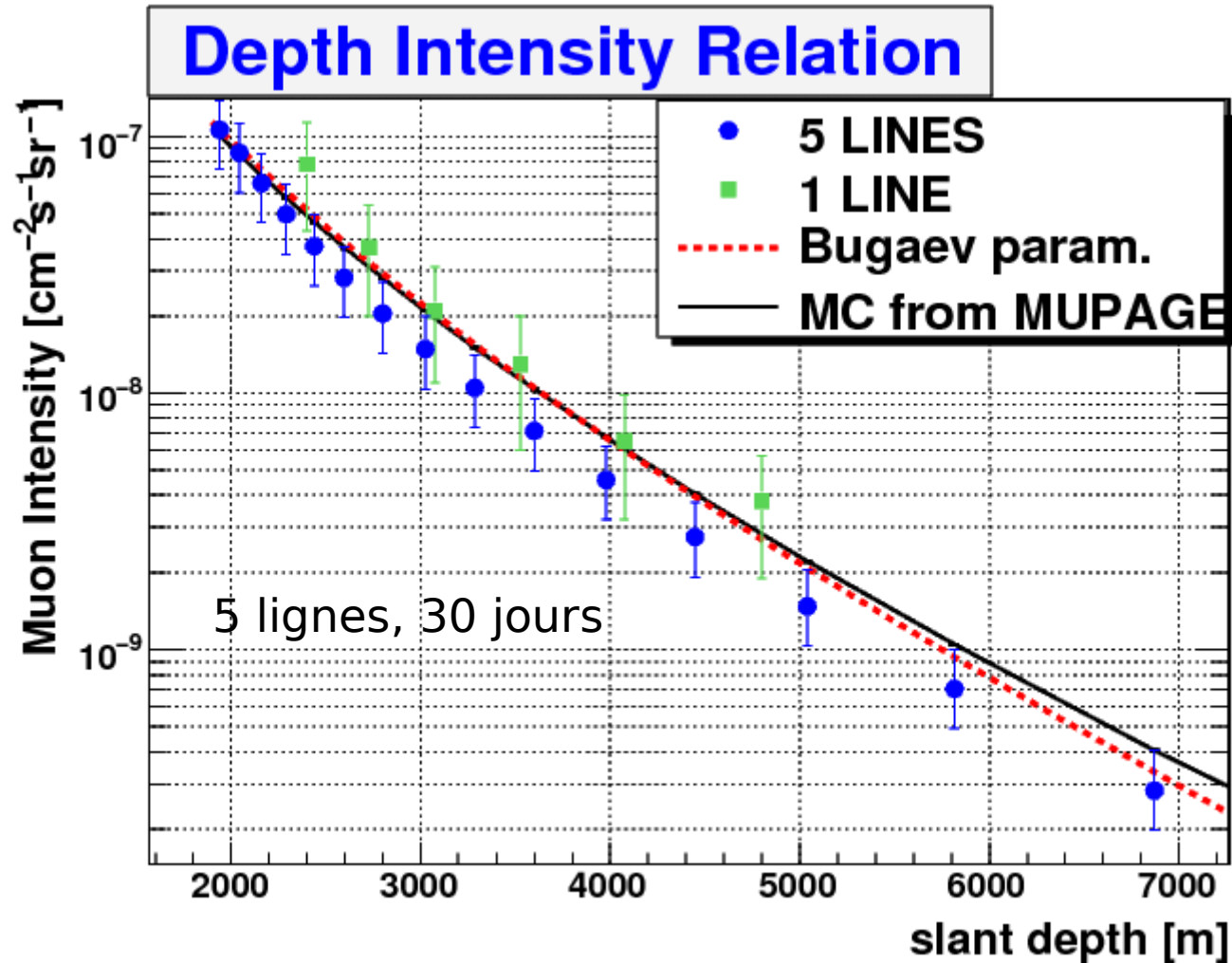
Carte du ciel (avec smearing ie « blindée »)

Résultats 5 lignes (« unblindés »)

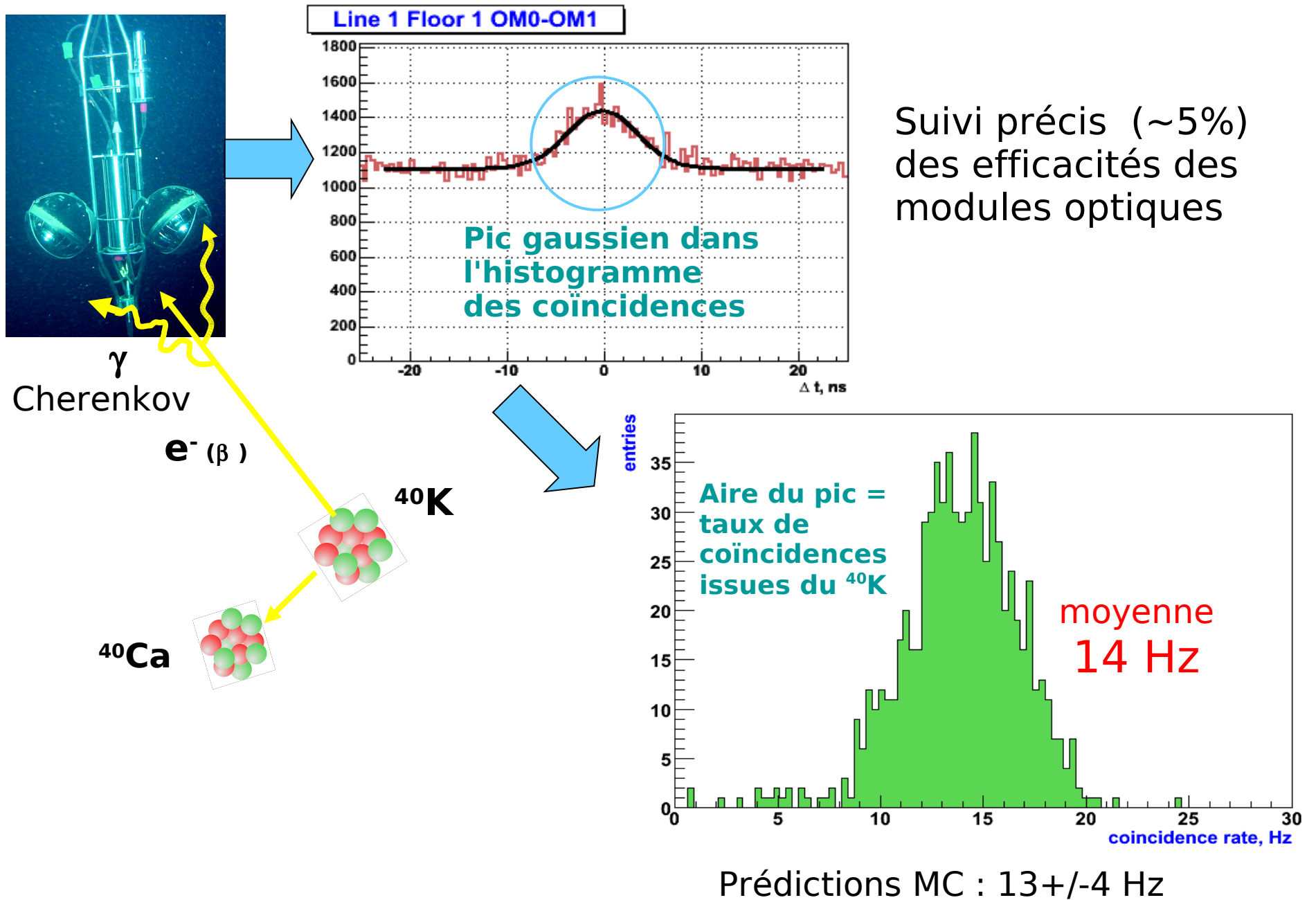
94 neutrinos



Mesure du flux de muons atmosphériques et verticalisation (flux=f(profondeur))

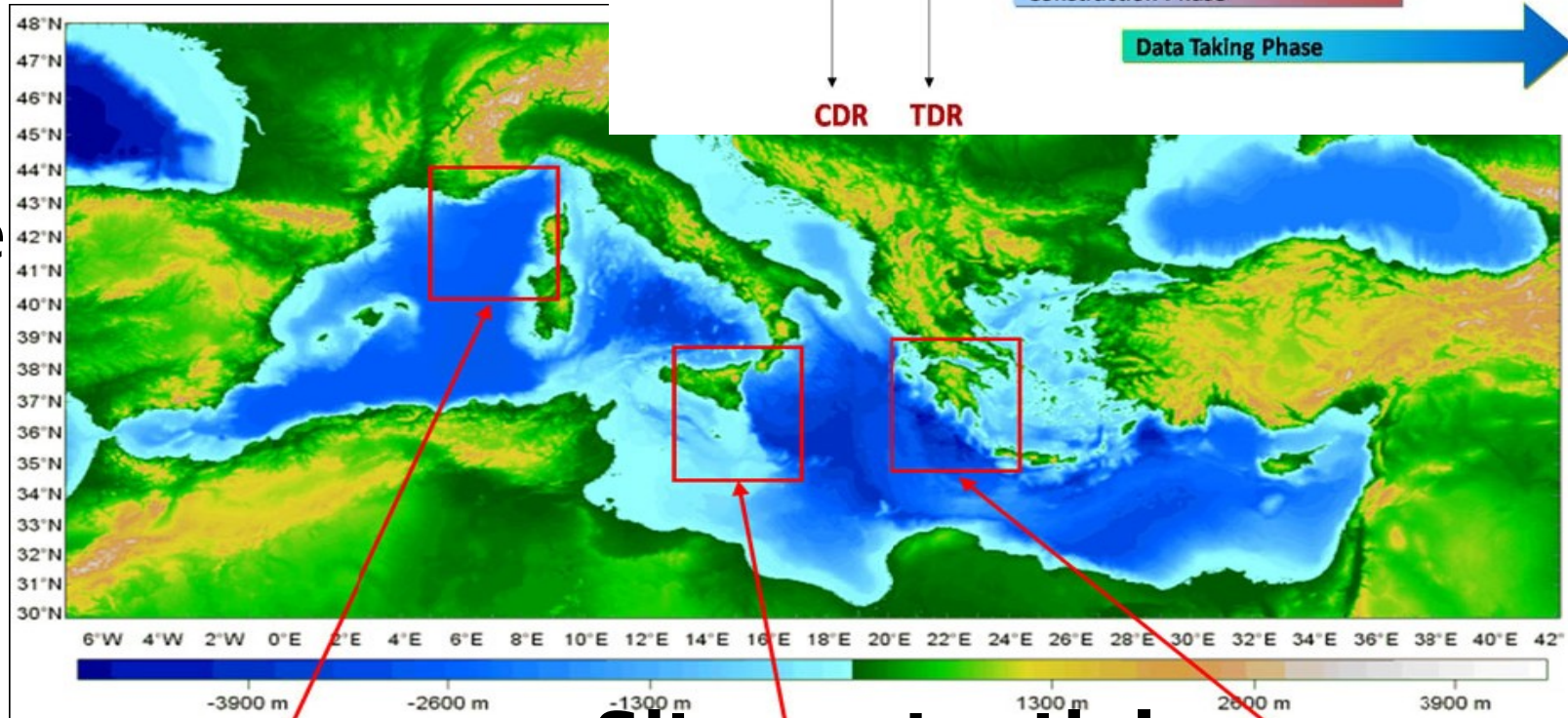
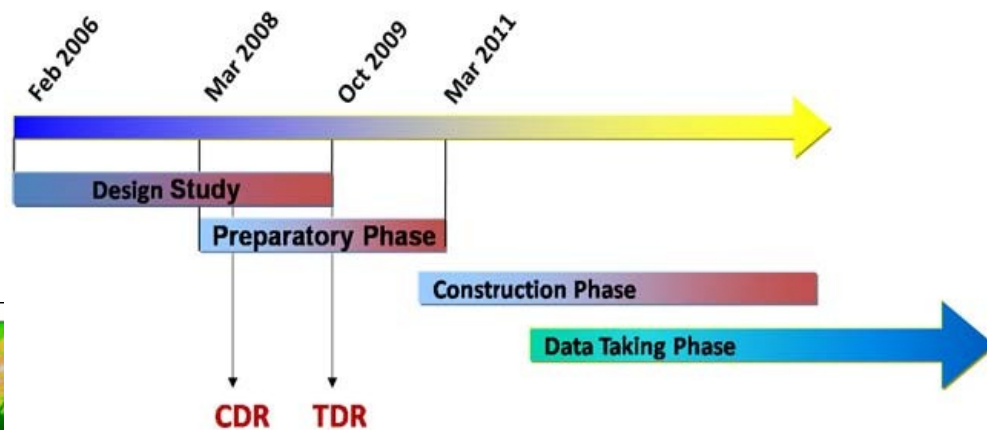


Calibration/monitorage avec le Potassium-40

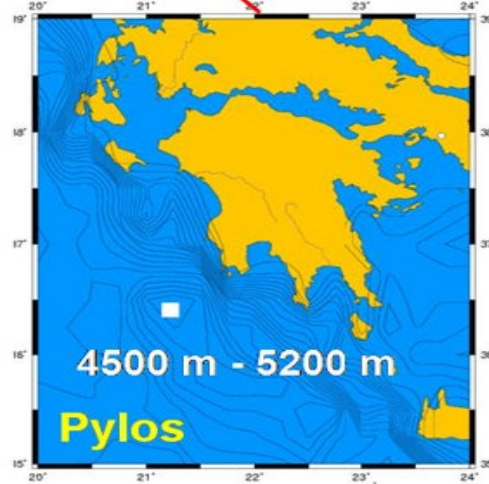


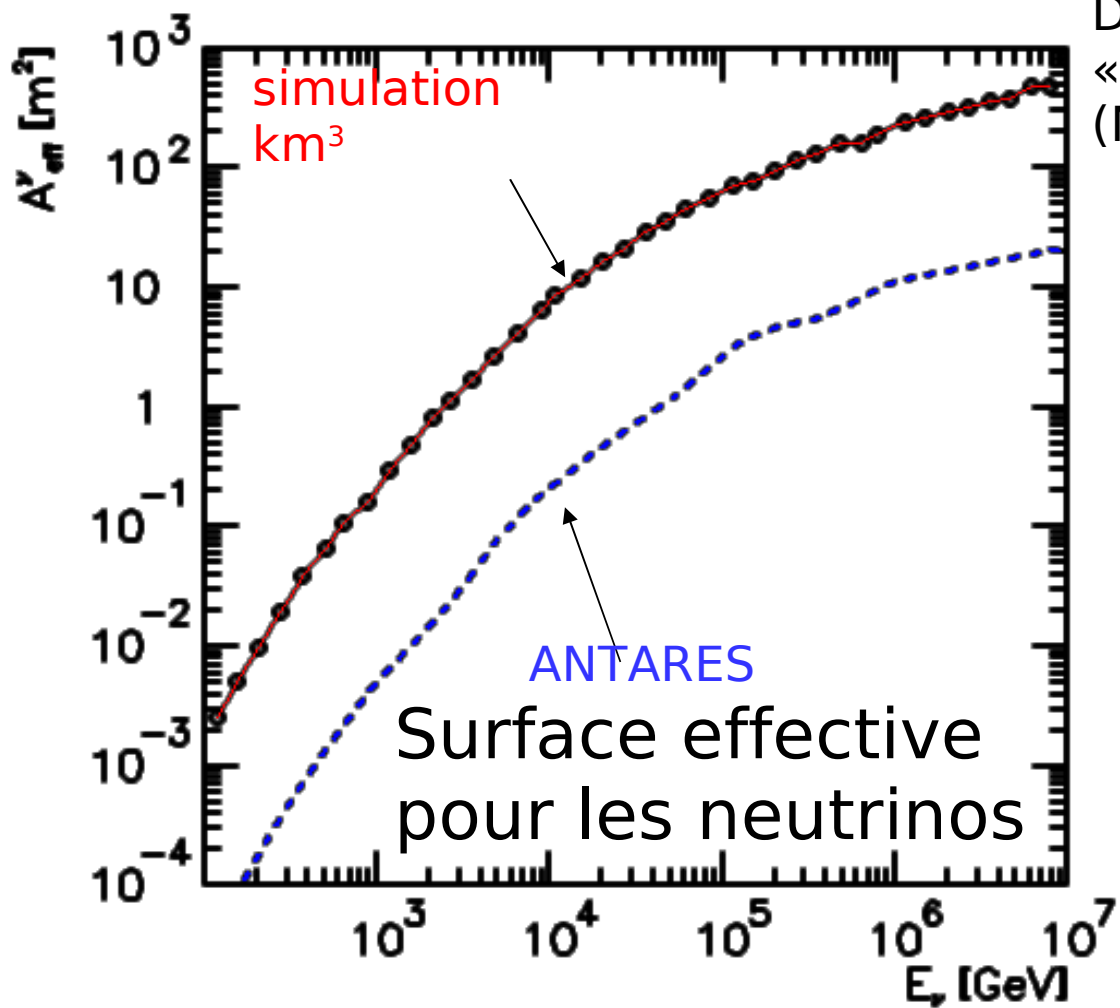
KM3NeT

une union
des
efforts
en
Méditerranée



Sites potentiels

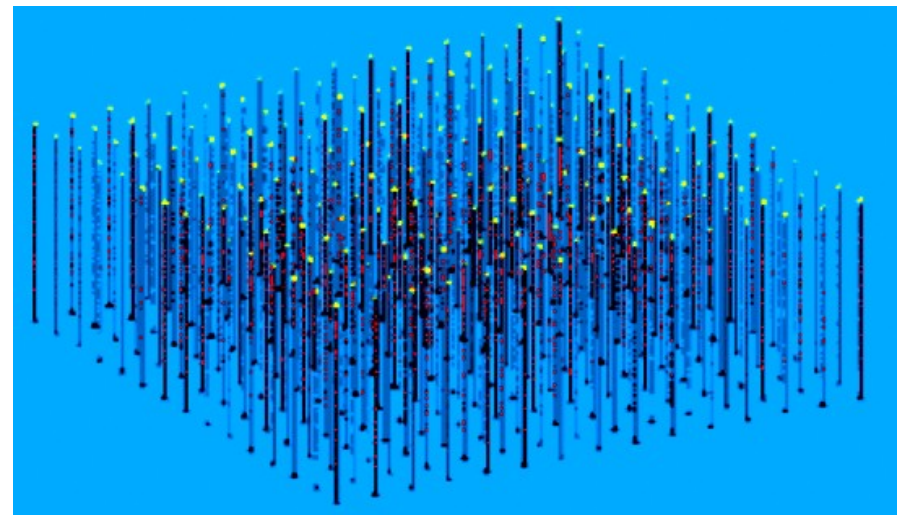




Détecteur dit de «référence» (NON définitif)

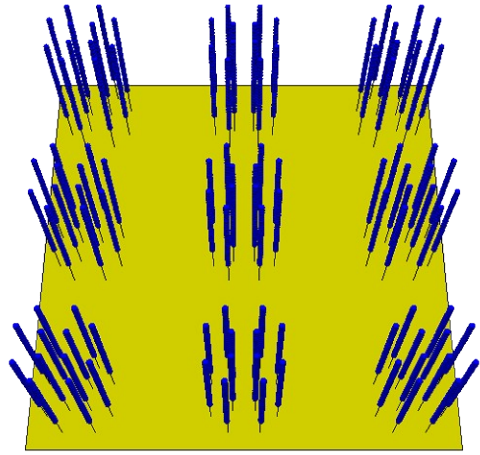


- 15 x 15 lignes ou tours
- distance entre lignes ou tours : 95 m
- 37 OMs/ligne ou tour, distance entre étages 15.5 m
- Un OM (module optique) réunit 21 PMTs de 3''

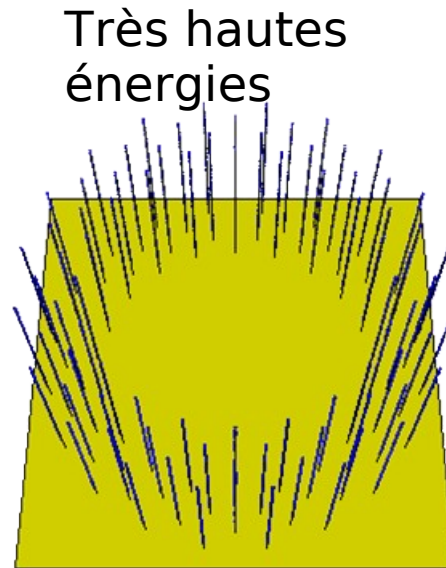


Détecteur dit de «référence» (NON définitif)

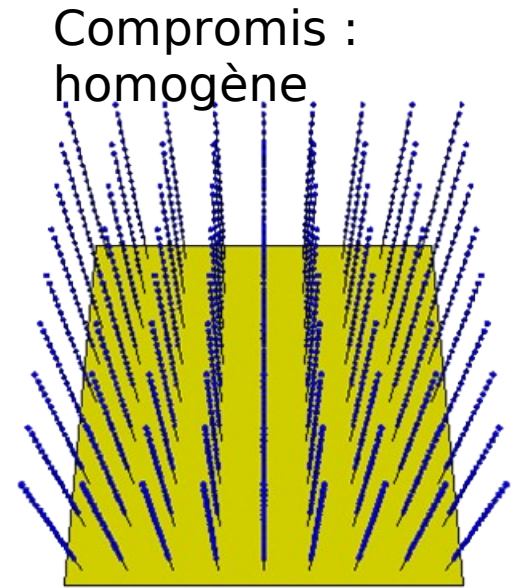
Etudes en cours : optimisation



Basses énergies



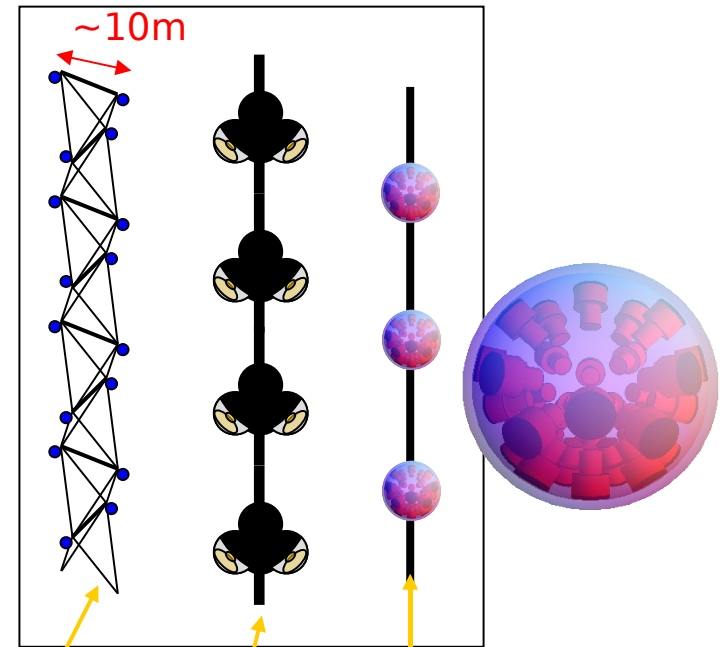
Très hautes énergies



Compromis : homogène

Bon compromis :
détecteur homogène hexagonal

Structure des unités
de détection:

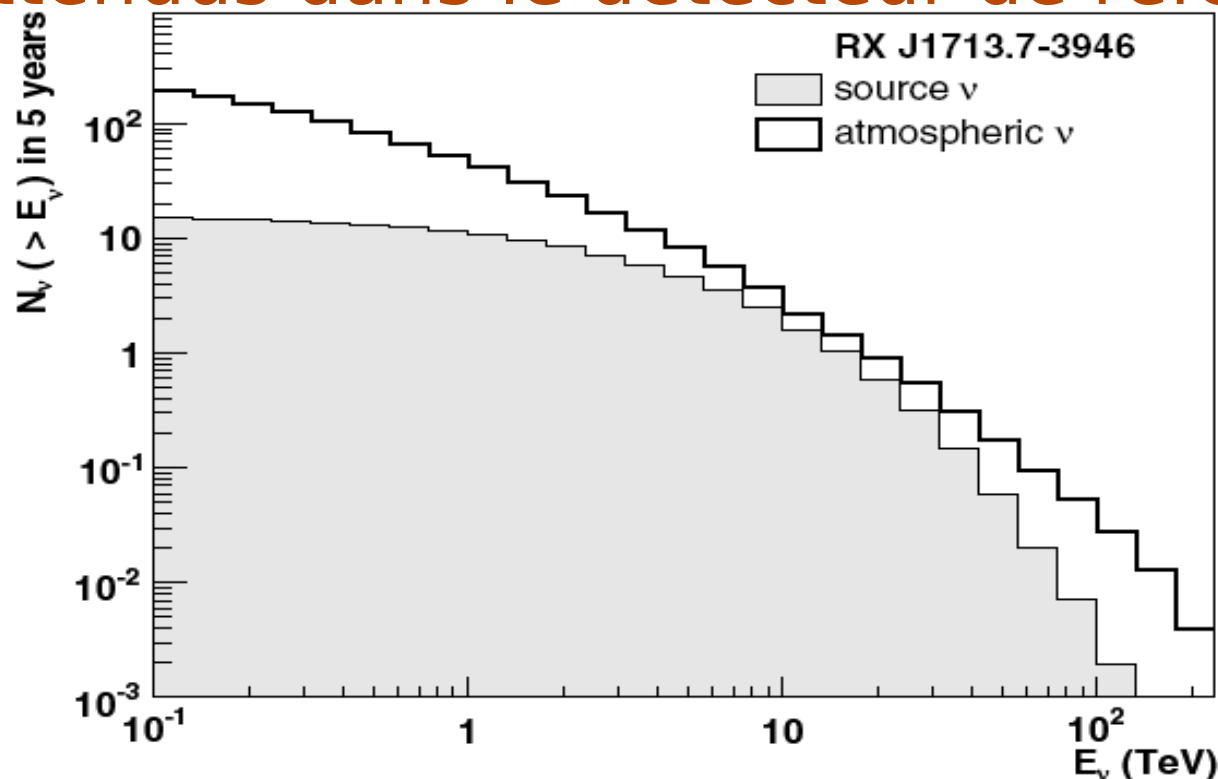


Tours (3D)

Ligne multi-PMT

« à la
ANTARES »

SNR RX J1713.7-3946 : nombre d'événements attendus dans le détecteur de référence en 5 ans



*A Kappes et al,
TeV Particle Astrophysics II Workshop*

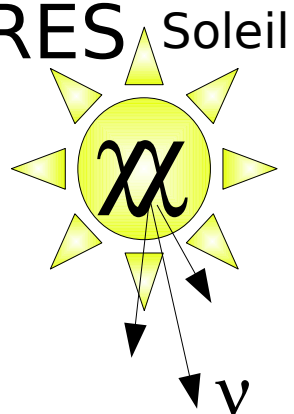
nombre
d'événements
attendus
dans le
détecteur
de référence
en 5 ans

Name	Type	Dia. ($^{\circ}$)	$E_{\nu} > 1 \text{ TeV}$		$E_{\nu} > 5 \text{ TeV}$	
			Source	Bkg	Source	Bkg
Vela X	PWN	0.8	9–23	23	5–15	4.6
RX J0852.0–4622	SNR	2.0	7–15	104	1.9–6.5	21
RX J1713.7–3946	SNR	1.3	7–14	41	2.6–6.7	8.2
HESS J1825–137	PWN	0.5	5–10	9.3	2.2–5.2	1.8
Crab Nebula	PWN	< 0.1	4.0–7.6	2.0	1.1–7.2	1.1
HESS J1303–631	NCP	0.3	0.8–2.3	11	0.1–0.5	2.1
LS 5039 (INFC) †	Binary	0.1	0.3–0.7	2.5	0.1–0.3	0.5

† Assuming no γ -ray absorption within source. INFC specifies the phase of inferior conjunction of the binary system as defined in [9].

KM3NeT & ANTARES

Détection indirecte de la matière noire

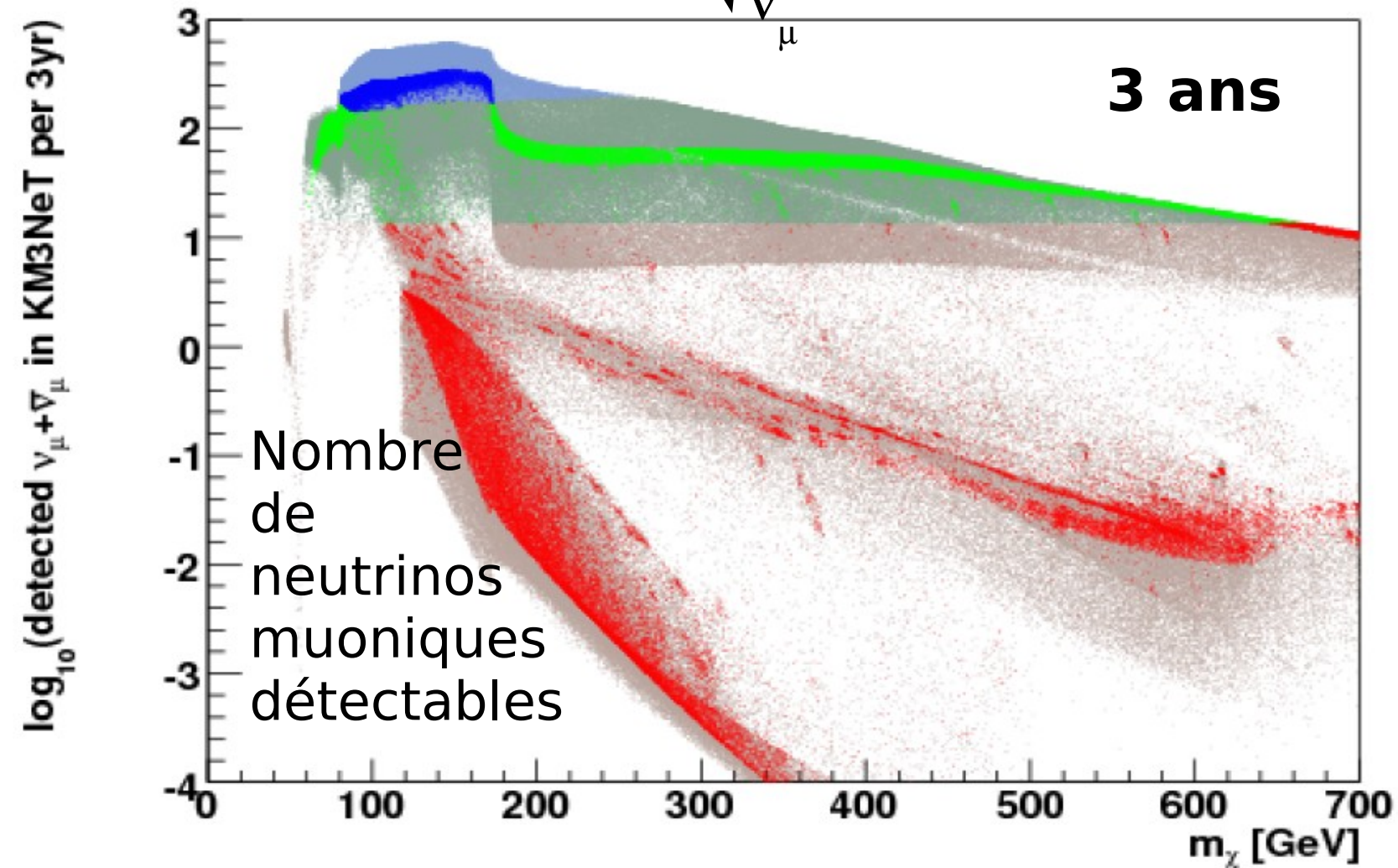


mSugra models favoured by WMAP

- 90% CL excludable by ANTARES
- 90% CL excludable by KM3NeT
- not excludable

mSugra models disfavoured by WMAP

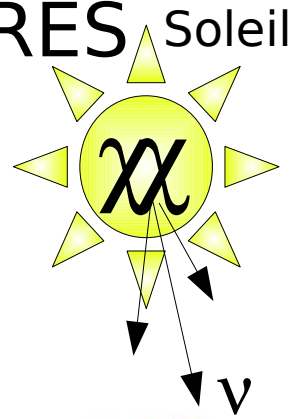
- 90% CL excludable by ANTARES
- 90% CL excludable by KM3NeT
- not excludable



Espace de paramètres mSugra : $m_0, m_{1/2}, A_0, \tan(\beta), \text{sign}(\mu)$

KM3NeT & ANTARES

Détection indirecte de la matière noire

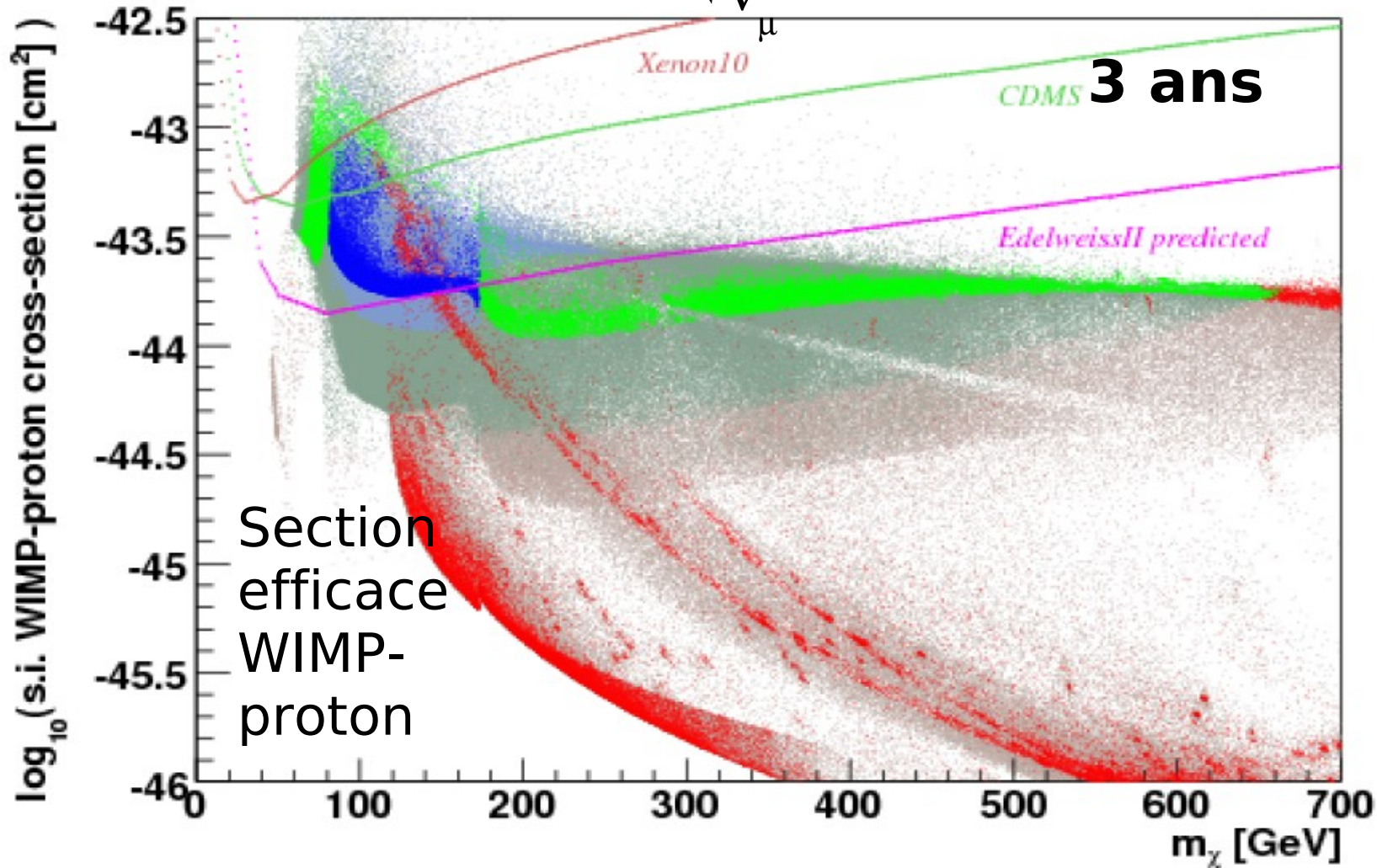


mSugra models favoured by WMAP

- 90% CL excludable by ANTARES
- 90% CL excludable by KM3NeT
- not excludable

mSugra models disfavoured by WMAP

- 90% CL excludable by ANTARES
- 90% CL excludable by KM3NeT
- not excludable

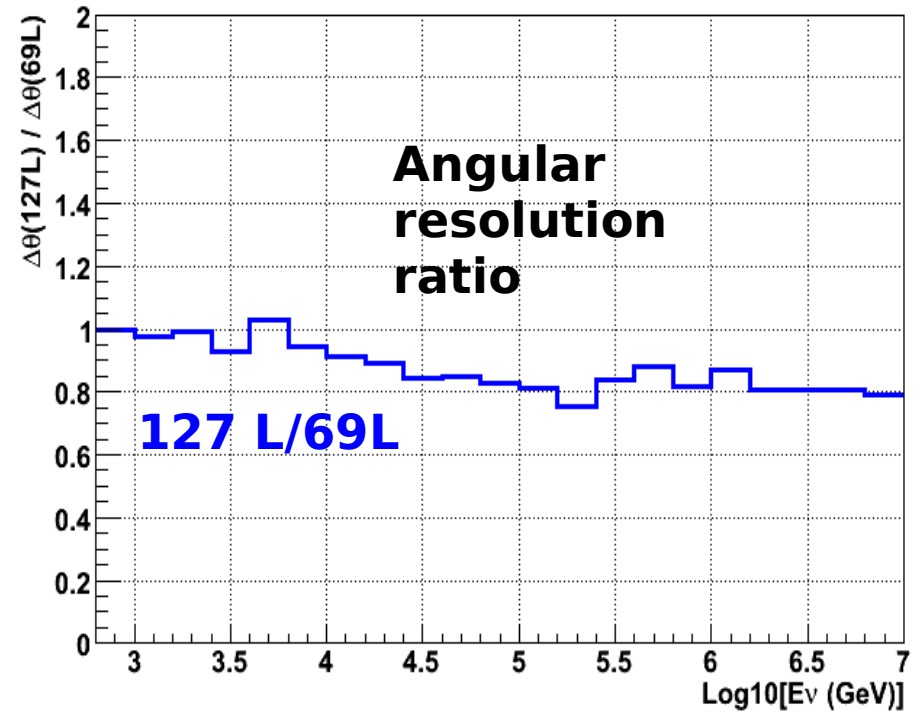
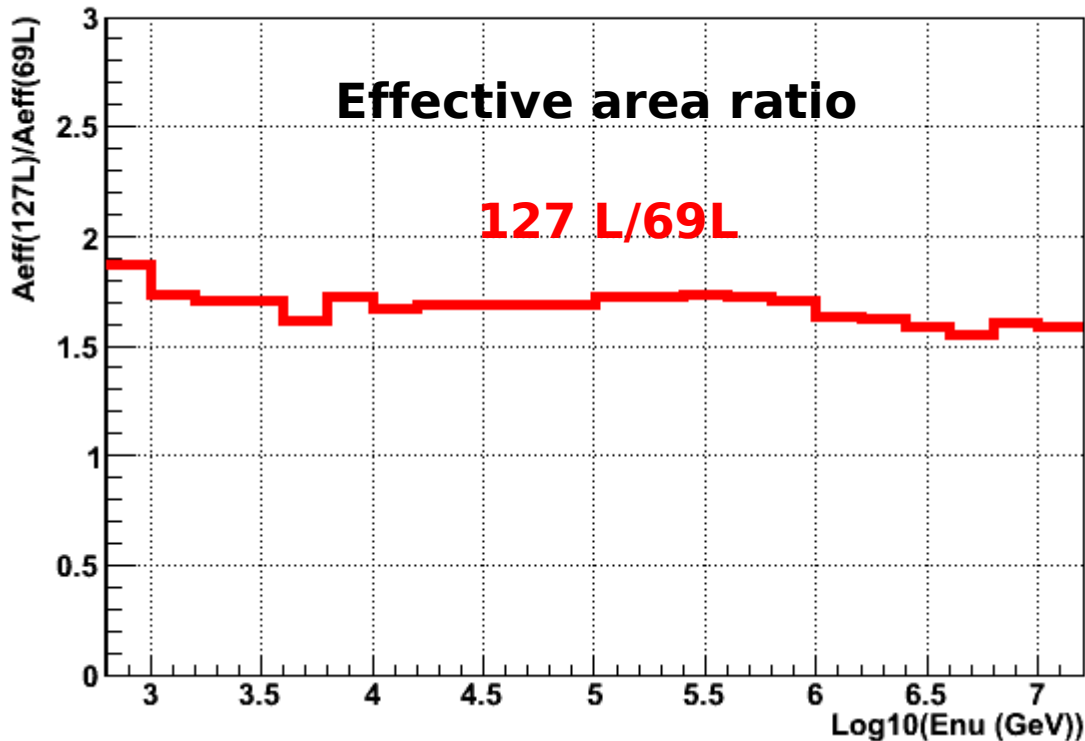


Espace de paramètres mSugra : $m_0, m_{1/2}, A_0, \tan(\beta), \text{sign}(\mu)$

Détecteur Multi-site ?

2 détecteurs moyens comparés à un grand
Exemple (sur un détecteur avec étages type ANTARES):

moyen : 69 lignes, 4140 PMTs (0.4 km^3 , 3.18 km^2)
grand : 127 lignes, 7620 PMTs (0.9 km^3 , 5.84 km^2)
(rapport du nombre de lignes ~ 1.84)



Sensitivity 127L=
 $4.2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV/cm}^2/\text{s}$

Sensitivity 2x69L=
 $3.8 \cdot 10^{-9} \text{ GeV/cm}^2/\text{s}$

(rescaled to "127L" :
 $4.1 \cdot 10^{-9} \text{ GeV/cm}^2/\text{s}$)

CONCLUSION

BAIKAL (eau douce) & AMANDA (glace) ont prouvé la faisabilité des télescopes à neutrinos et fait apparaître leur intérêt : les premiers neutrinos montants ont été observés en 1995 par BAIKAL;

Aujourd'hui AMANDA/ICECUBE, BAIKAL, et ANTARES produisent des résultats en astronomie neutrino (limites).

La première phase de NEMO est en fonctionnement depuis décembre 2006, et sa seconde phase deviendra une contribution à KM3NeT:

ANN (Antares Nemo Nestor) et de nouveaux collaborateurs participent aux consortiums KM3NeT-DS et KM3NeT-PP afin de converger vers un détecteur de taille kilométrique, de performances supérieures à ICECUBE.