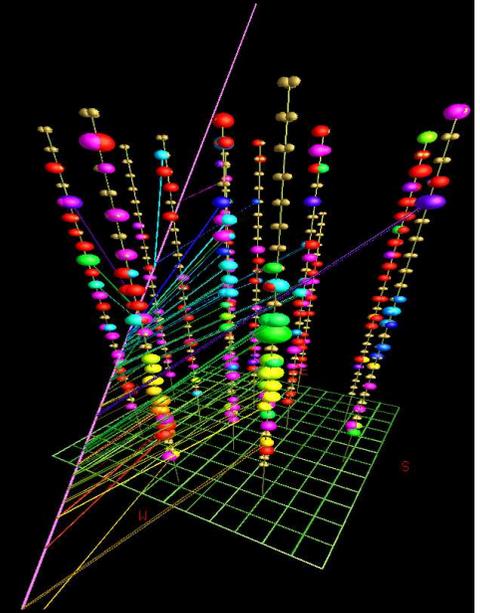


Vincent BERTIN

Centre de Physique des Particules de Marseille



ANTARES : un télescope au fond de la Mer pour étudier l'Univers



Ecole e2phy @ Marseille-Luminy
25 août 2009



La cartographie de notre Univers



Radio Télescope
(Bonn)



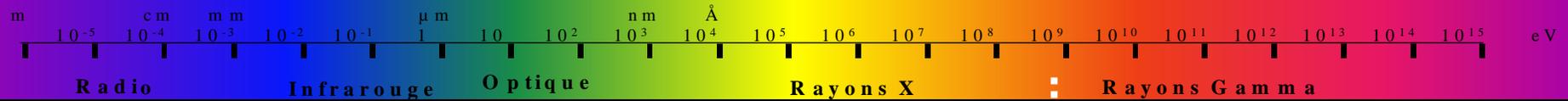
Télescope Optique
(Palomar)



Satellite rayon X
(INTEGRAL/ESA)



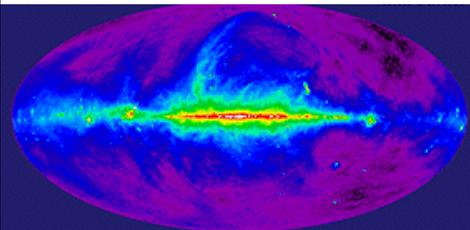
Télescope gamma
(HESS)



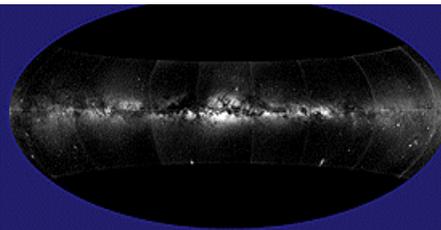
Vue du ciel en coordonnées galactiques dans quatre longueurs d'onde différentes de photon

Rayons cosmiques

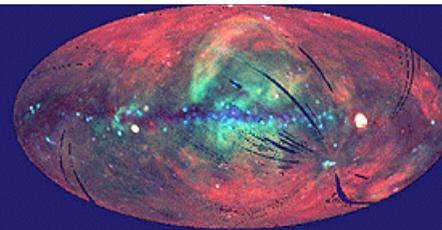
Radio



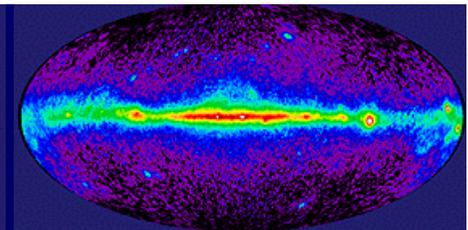
Lumière visible



Rayon X



Rayon gamma



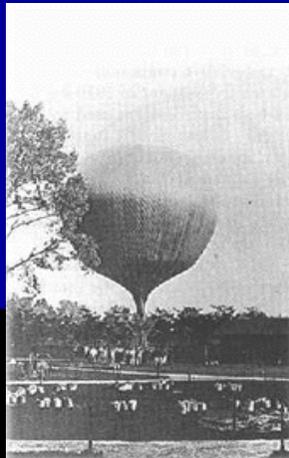
Rayons Cosmiques

Interactions dans la haute atmosphère produisent des gerbes de particules

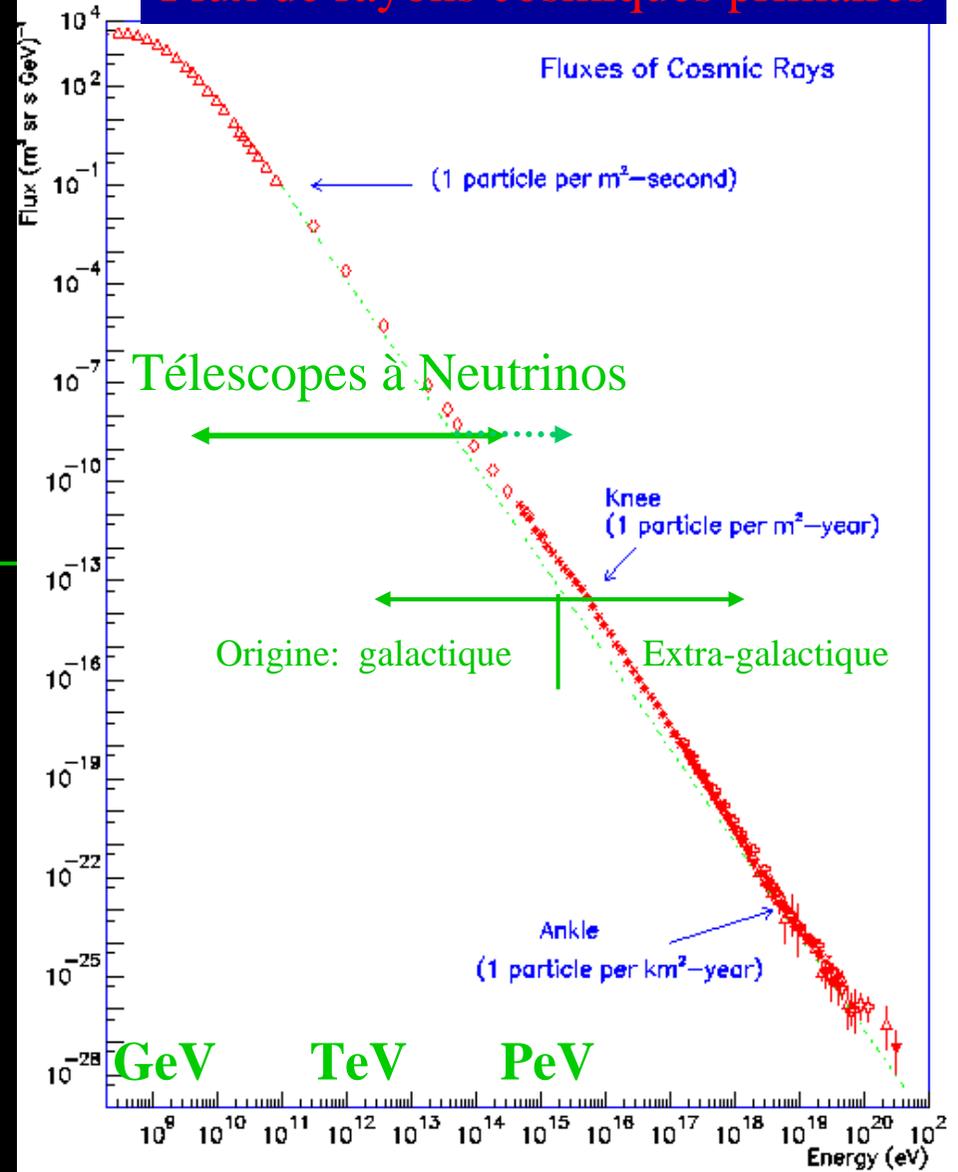
- particules chargées
 - protons
 - ions
 - électrons
- particules neutres
 - photons
 - neutrinos

Au niveau de la terre: 100 par minute et par m²

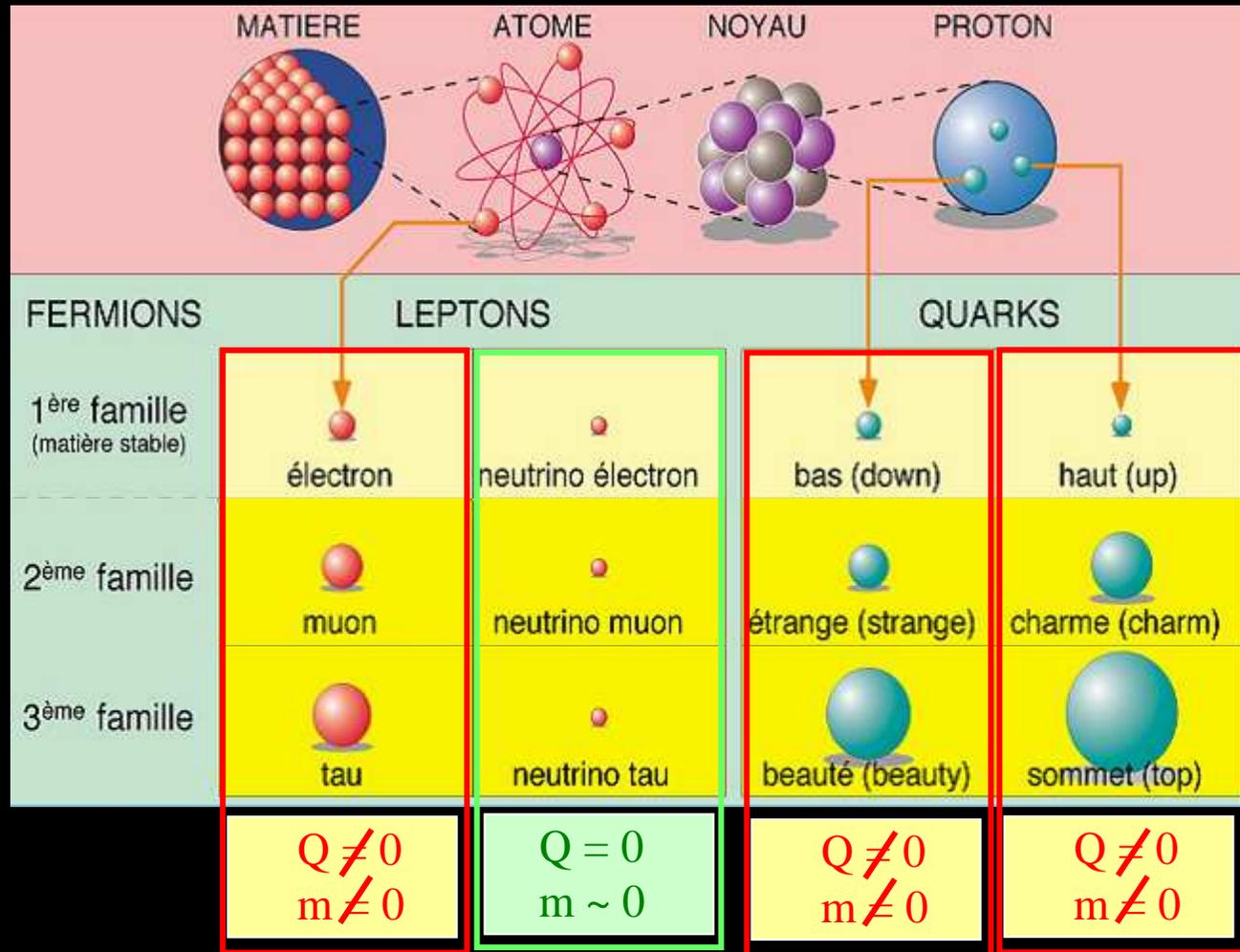
100 ans après la découverte des rayons cosmiques on ne sait pas leurs origines



Flux de rayons cosmiques primaires



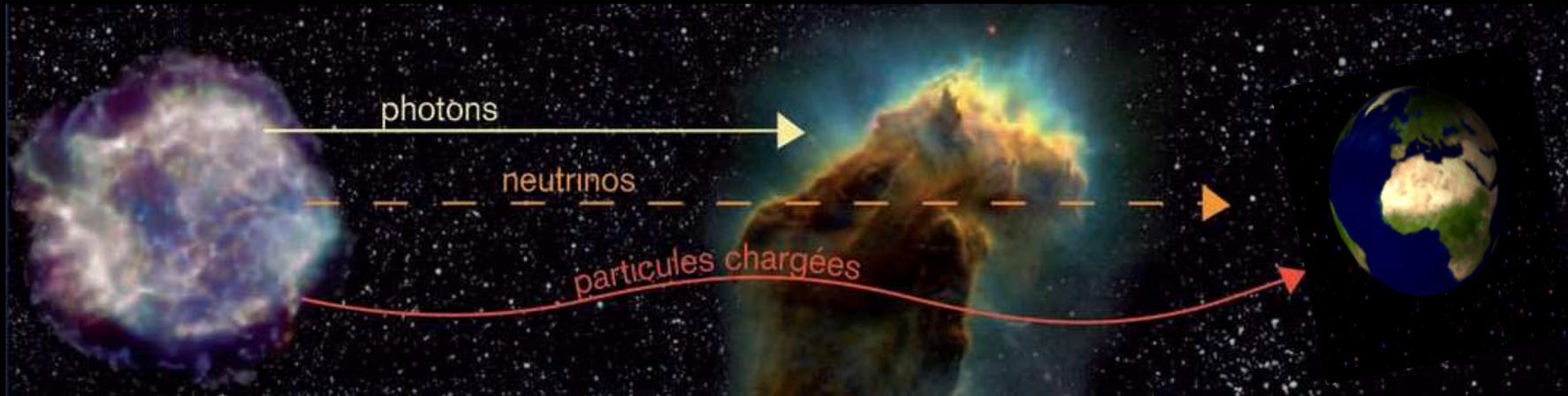
Le neutrino dans le monde des particules



12 particules de matière

3 neutrinos ν_e, ν_μ, ν_τ

Pourquoi le neutrino ?



Avantages du neutrino :

- Electriquement neutre, donc pas dévié par les champs magnétiques → astronomie
- Pas d'absorption → observation sur des distances cosmologiques
- Interagit très faiblement → s'échappe des régions denses de l'Univers

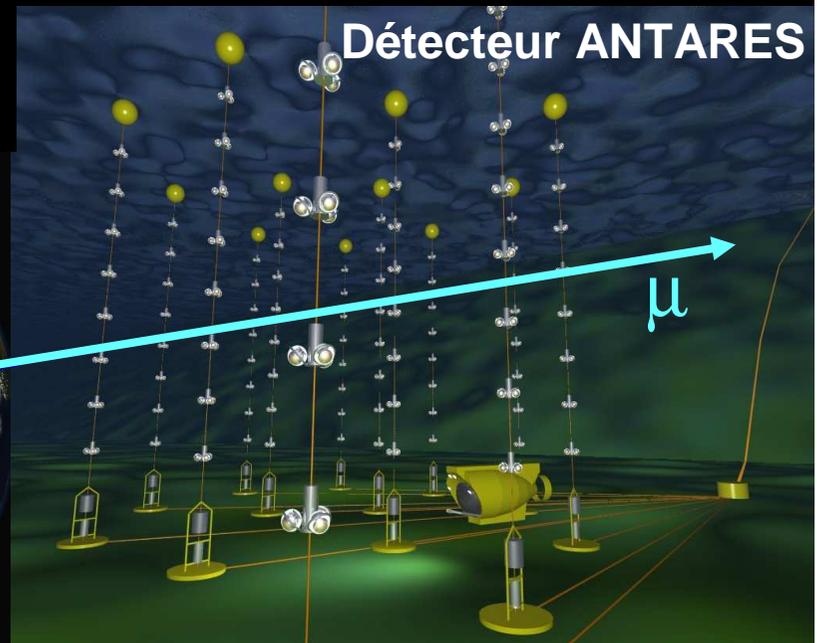
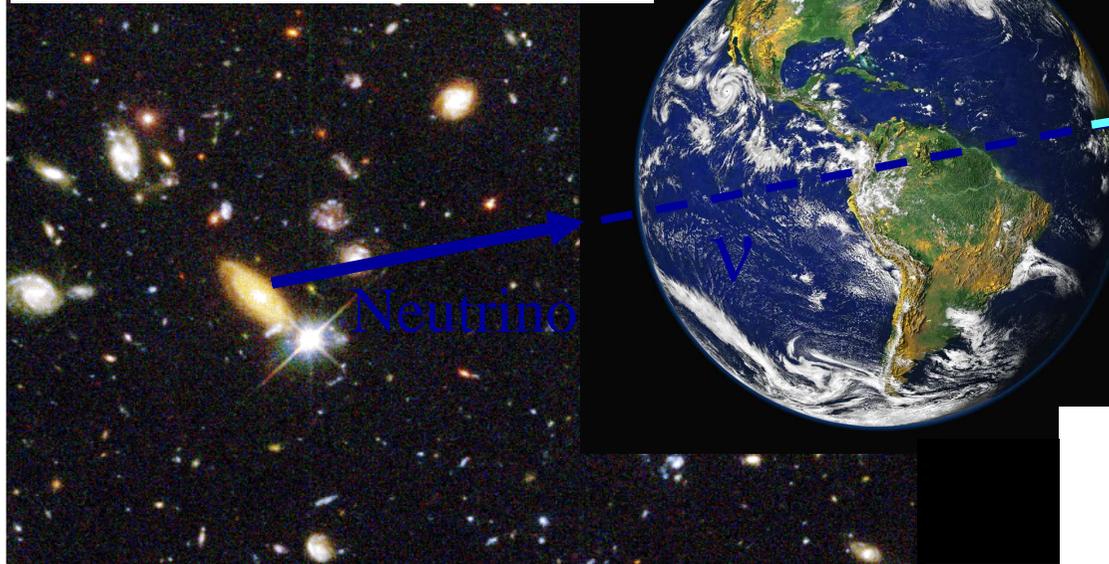
Inconvénient de l'avantage :

Sur 10 milliards de neutrinos provenant du Soleil et traversant la Terre, seul 1 va interagir !!!

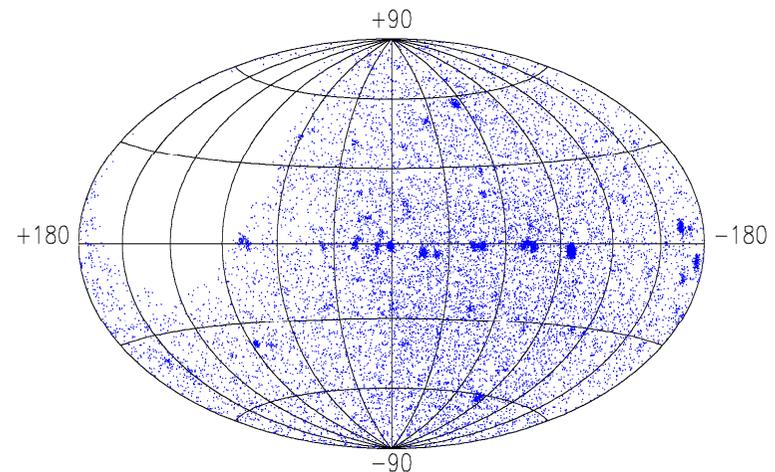
→ nécessité d'un grand volume de détection

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers...

Neutrinos de haute énergie émis par des accélérateurs cosmiques



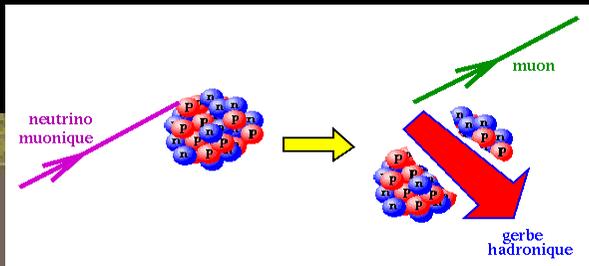
Astronomie neutrino :
carte du ciel des événements les plus catastrophiques de l'Univers



Principe de détection d'ANTARES

Matrice de photomultiplicateurs

Lumière Cherenkov induite par le muon



interaction

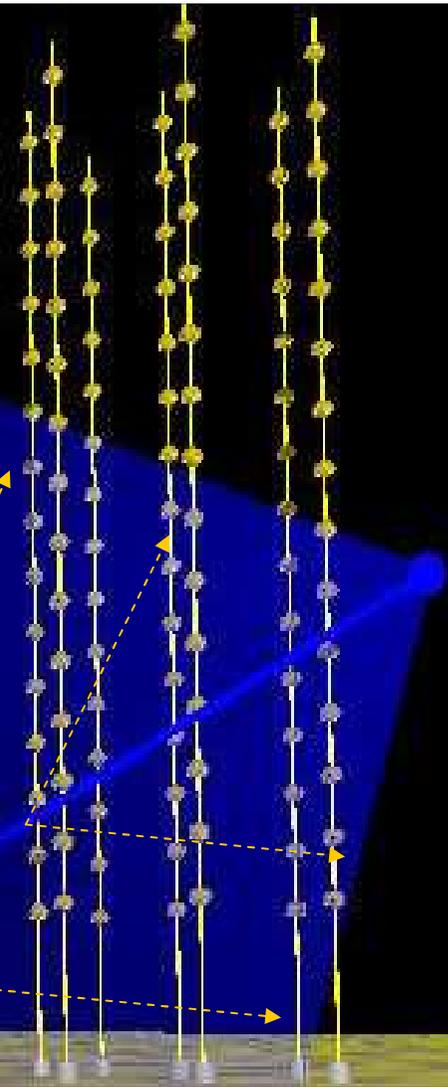
ν_{μ}

μ

Lumière Cherenkov produite par μ issu du ν propagation détectée par matrice de PMTs
Temps & position des photons permet la reconstruction de la trajectoire du μ ($\sim \nu$)

$\gamma_{\check{c}}$

43°



Astronomie multi messagers

Longueur
d'onde
(mètre)

1

10^{-2}

10^{-4}

10^{-6}

10^{-8}

10^{-10} 10^4

10^7

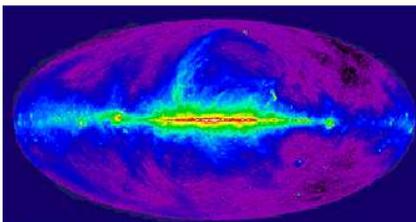
10^{10}

10^{13}

énergie
(électron volt)

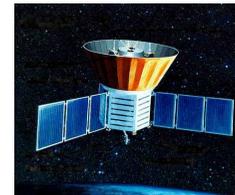


Ondes radio



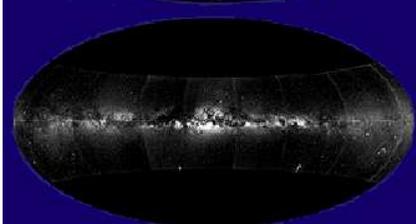
Radio télescope
de Bonn

Infra-rouge



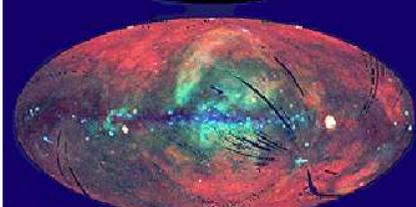
Satellite
COBE

Lumière visible



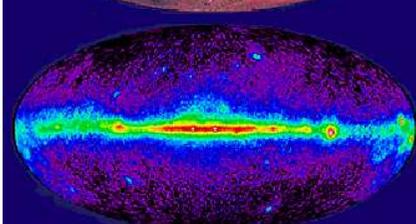
Télescope du
Mont Palomar

Rayons X



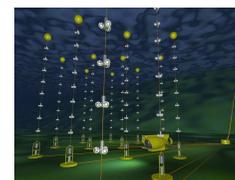
Satellite
INTEGRAL

Rayons gamma



Satellite
CGRO

Neutrinos

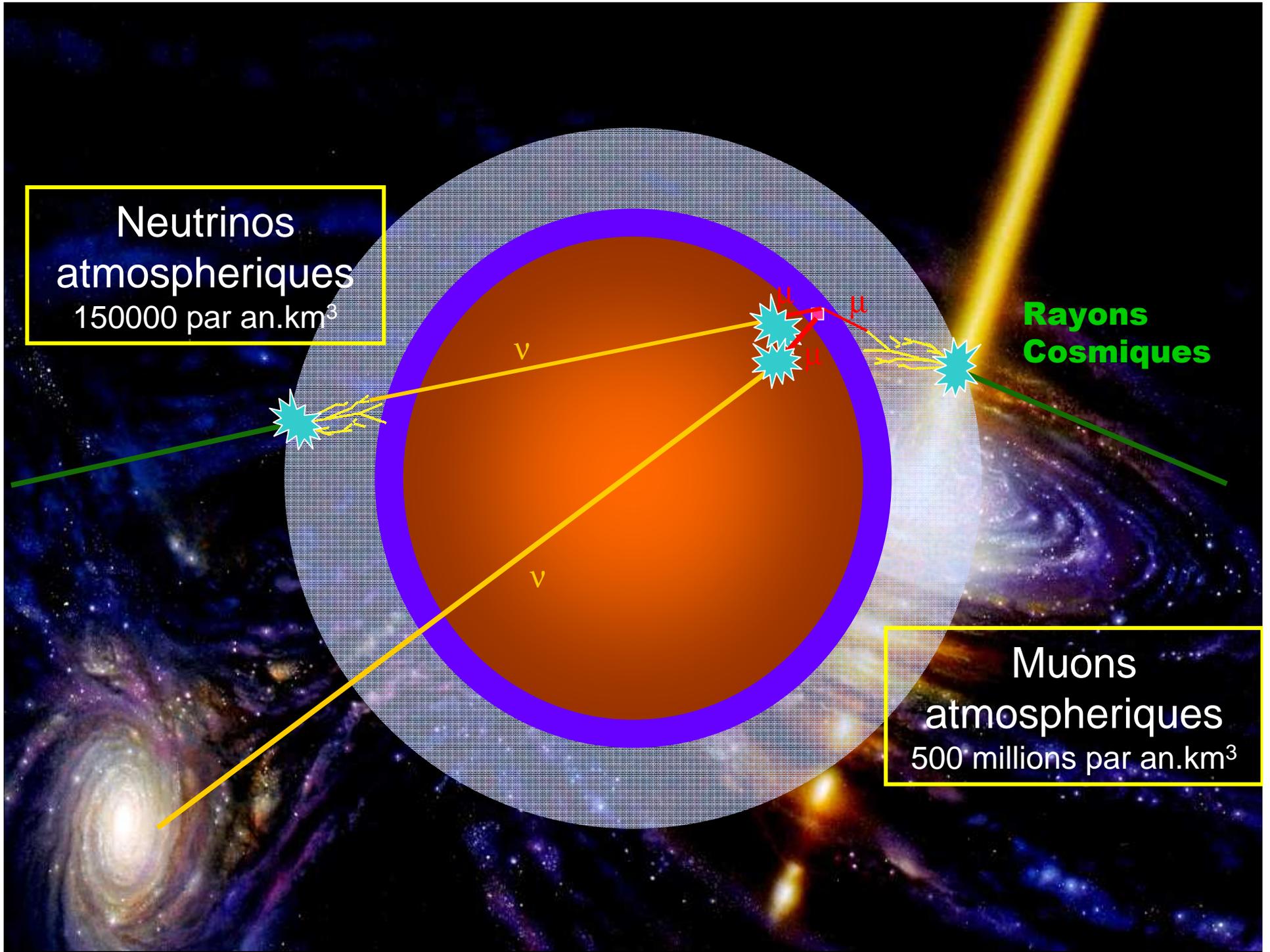


Télescope
à neutrinos
ANTARES

Neutrinos
atmosphériques
150000 par an.km³

Rayons
Cosmiques

Muons
atmosphériques
500 millions par an.km³



Les sources de neutrinos de très haute énergie

Microquasar



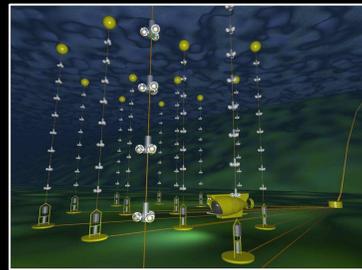
Noyaux Actifs de Galaxie



Reste SN

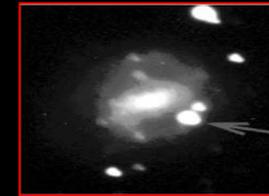


Les sources galactiques



Les sources extra-galactiques

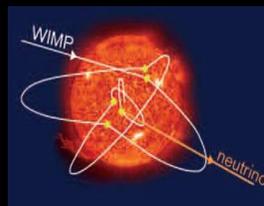
Sursauts gamma



Pulsars



Matière noire



Physique exotique

Monopoles magnétiques

Nuclearites

Les enjeux scientifiques

- Origine des rayons cosmiques
- Signatures hadronique vs. leptonique

Taille du détecteur



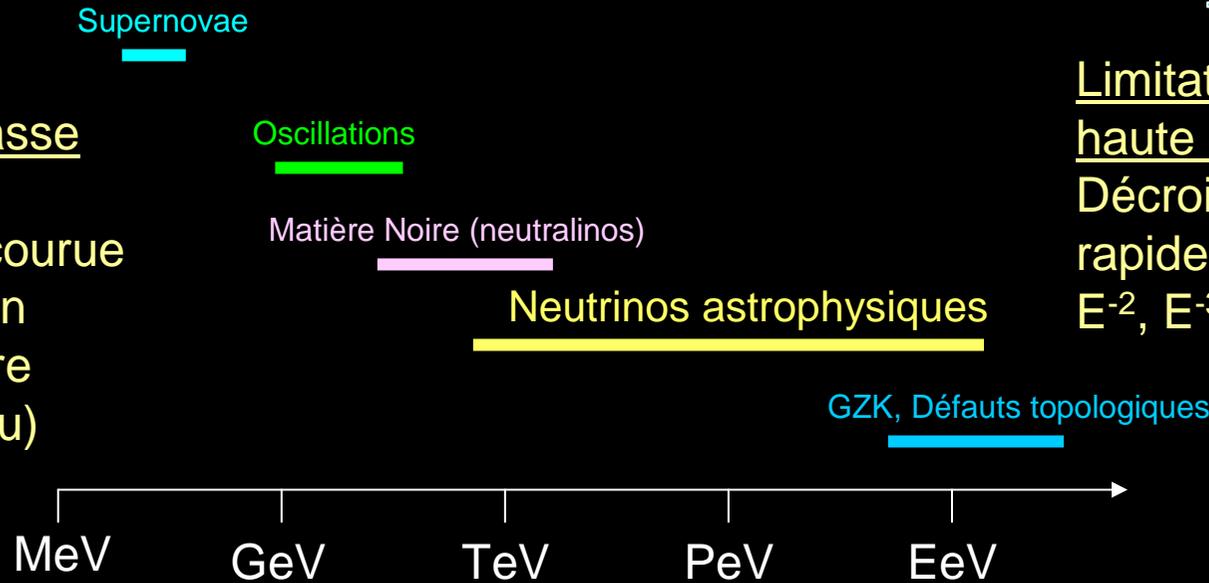
Limitation à haute énergie:
Décroissance rapide des flux
 E^{-2} , E^{-3}

Limitation à basse énergie:

- Distance parcourue courte du muon
- Peu de lumière
- ^{40}K (dans l'eau)



Densité du détecteur



Les télescopes à neutrinos dans le monde

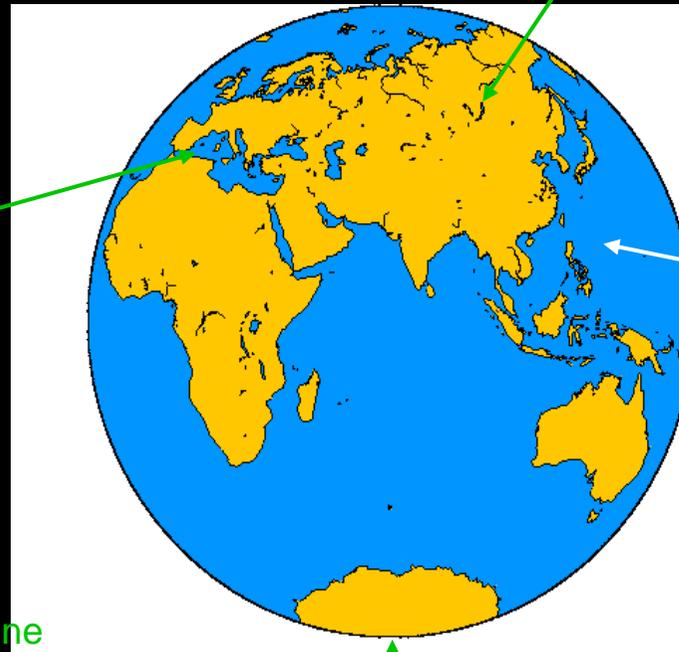
BAIKAL (1989) : Lac Baikal, Sibérie



NESTOR (1991): Grèce
ANTARES (1996): France
NEMO (2000): Italie



KM3Net (2003): Mediterranean Sea
Consortium soutenu par l'Union Européenne



DUMAND : Hawaii
(annulé en 1995)

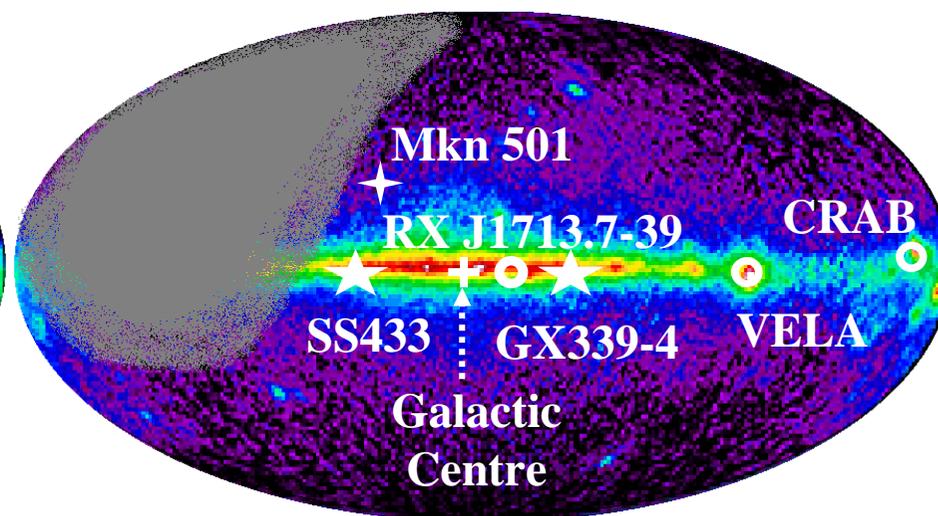
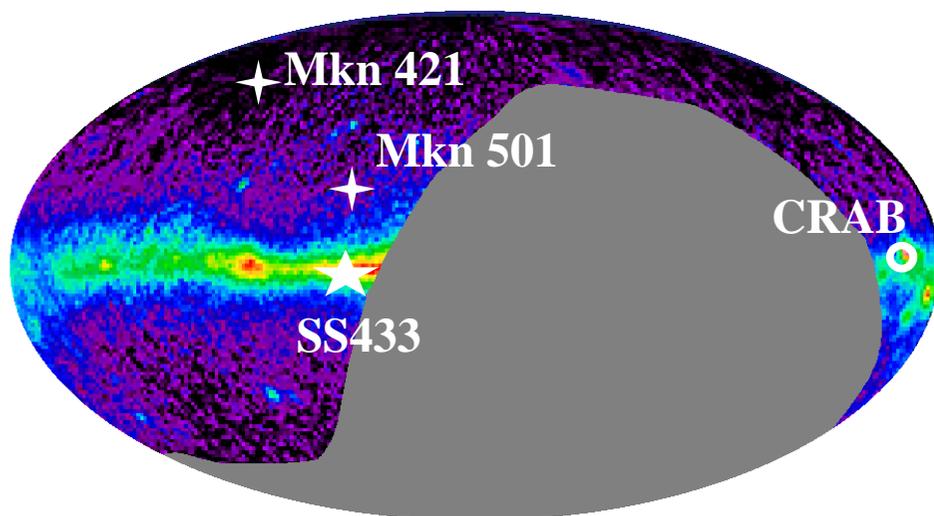
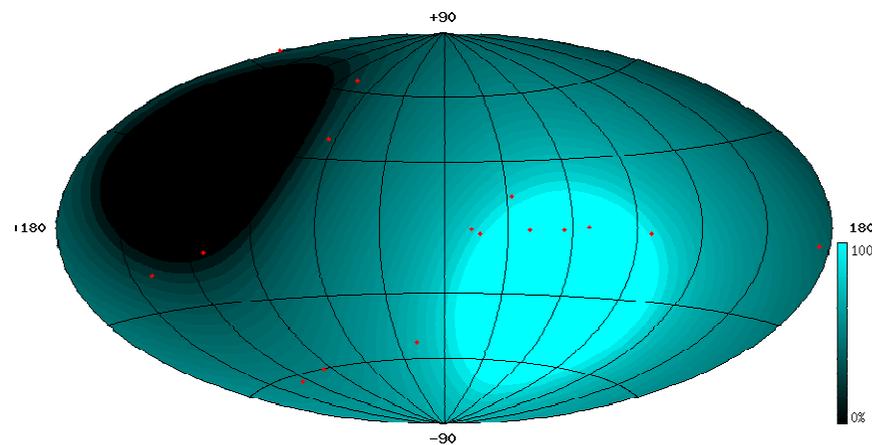
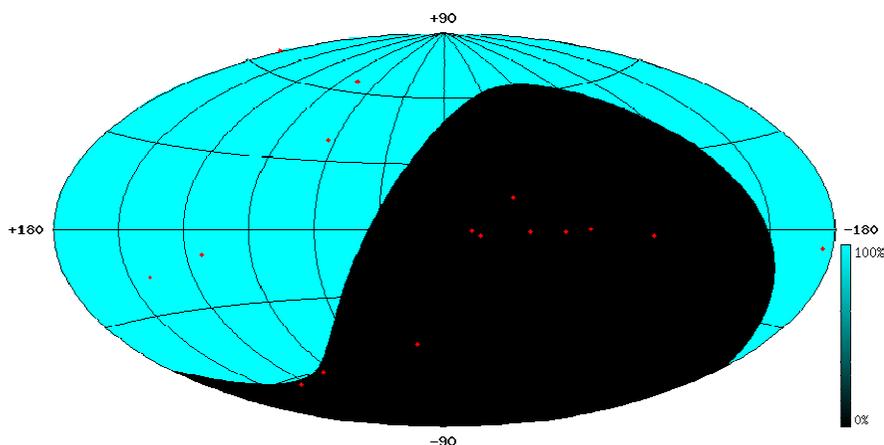
AMANDA: Pôle Sud, Antarctique
ICECUBE



La région observable du ciel

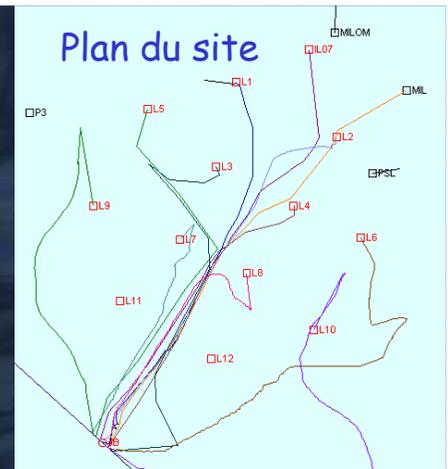
AMANDA/IceCube (Pôle Sud)

ANTARES (43° Nord)



Le Détecteur ANTARES

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



14.5 m

Bouée

350 m

100 m

Boîte de
Jonction

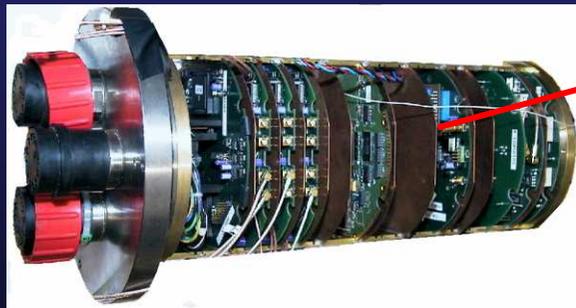
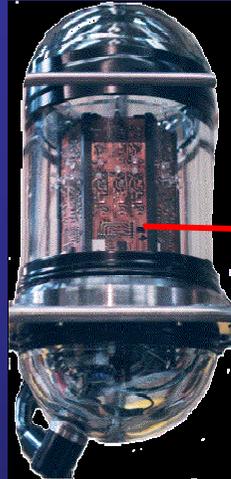
Cable
electro-
optique

~60-75 m

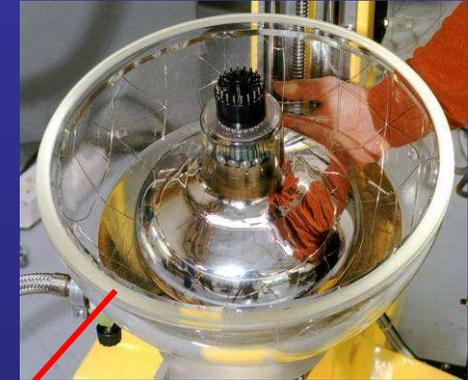
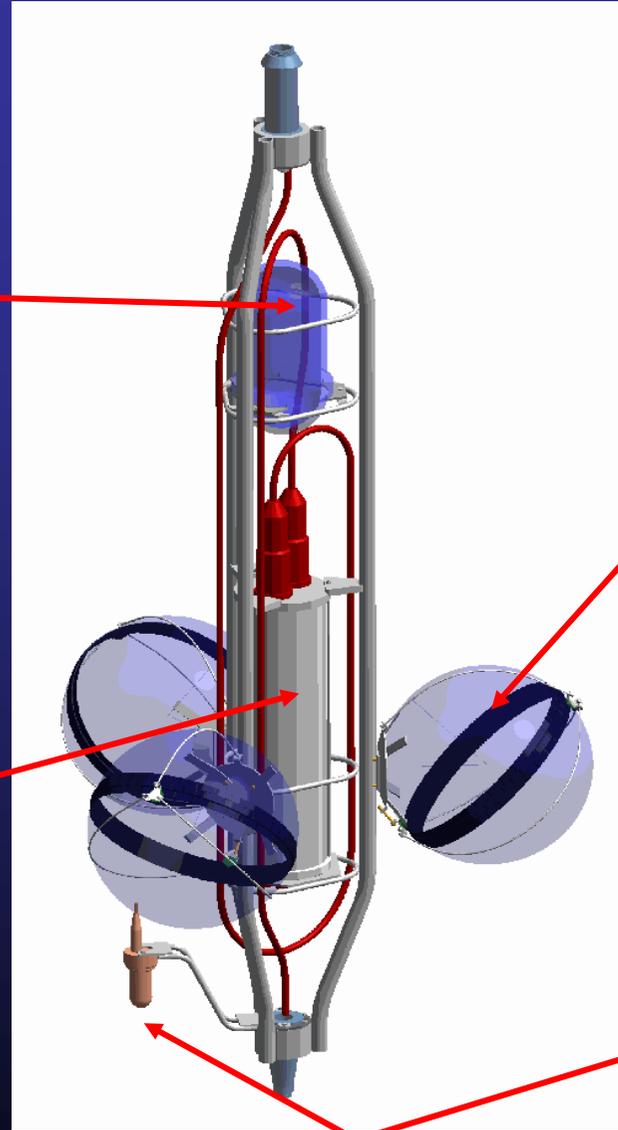
Profondeur : 2500m

Détail d'un étage

Optical Beacon,
utilisée pour la
calibration en
temps du
détecteur



Local Control Module
qui contient toutes les cartes
électroniques



Sphère en verre de 17"
contenant un PM de 10"



Hydrophone, utilisé pour
le positionnement
(acoustique) du détecteur



La Collaboration ANTARES



- ❖ NIKHEF, Amsterdam
- ❖ Utrecht
- ❖ KVI Groningen
- ❖ NIOZ Texel



- ❖ University of Erlangen
- ❖ Bamberg Observatory



- ❖ ITEP, Moscow
- ❖ Moscow State Univ



- ❖ IFIC, Valencia
- ❖ UPV, Valencia
- ❖ UPC, Barcelona



- ❖ CPPM, Marseille
- ❖ DSM/IRFU/CEA, Saclay
- ❖ APC, Paris
- ❖ LPC, Clermont-Ferrand
- ❖ IPHC (IReS), Strasbourg
- ❖ Univ. de H.-A., Mulhouse
- ❖ IFREMER, Toulon/Brest
- ❖ C.O.M. Marseille
- ❖ LAM, Marseille
- ❖ GeoAzur Villefranche



- ❖ University/INFN of Bari
- ❖ University/INFN of Bologna
- ❖ University/INFN of Catania
- ❖ LNS – Catania
- ❖ University/INFN of Pisa
- ❖ University/INFN of Rome
- ❖ University/INFN of Genova



- ❖ ISS, Bucarest



7 pays
29 instituts
~150 physiciens+ingénieurs



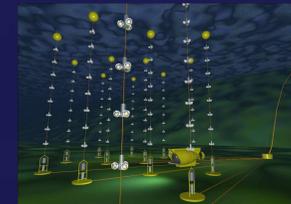
Le site ANTARES

Toulon



Institut Michel Pacha

câble
sous-marin
de 40 km



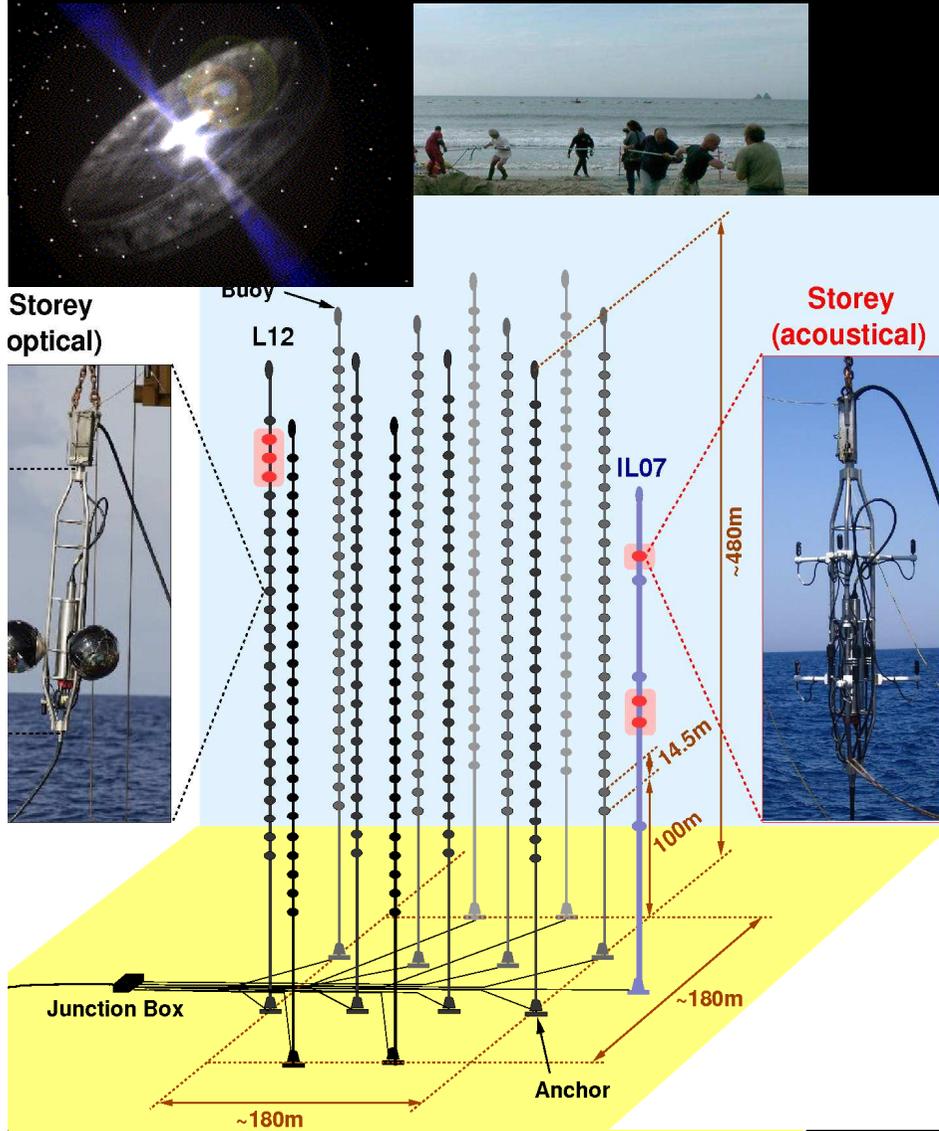
Site ANTARES
42 50'N, 6 10'E

Google™

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



Etapes de la construction d'ANTARES



2001 – 2003:

- Câble électro-optique à terre en 2001
- Boîte de Jonction en 2002
- Prototype Sector Line (PSL) & Mini Instrumentation Line (MIL) en 2003

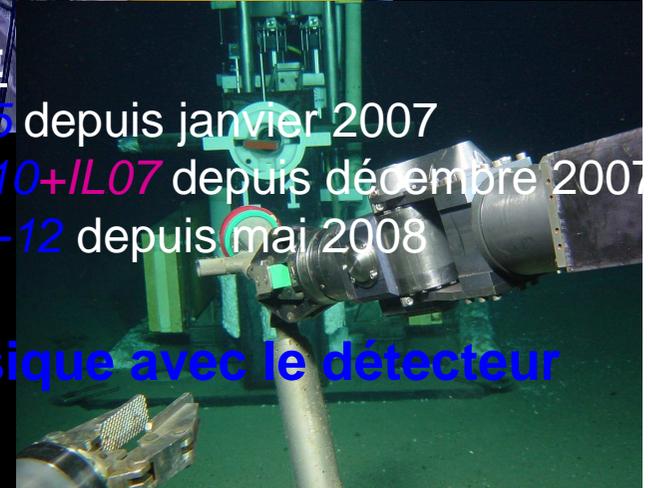
2005 – 2006:

- Mini Instrumentation Line with OMs (MILOM) entre avril 2005 et mars 2007
- Line 1 depuis mars 2006, première ligne du détecteur complète
- Line 2 depuis septembre 2006

2007 – 2008:

- Line 3-5 depuis janvier 2007
- Line 6-10+IL07 depuis décembre 2007
- Line 11-12 depuis mai 2008

2008+: Physique avec le détecteur complet !



Le déploiement des lignes

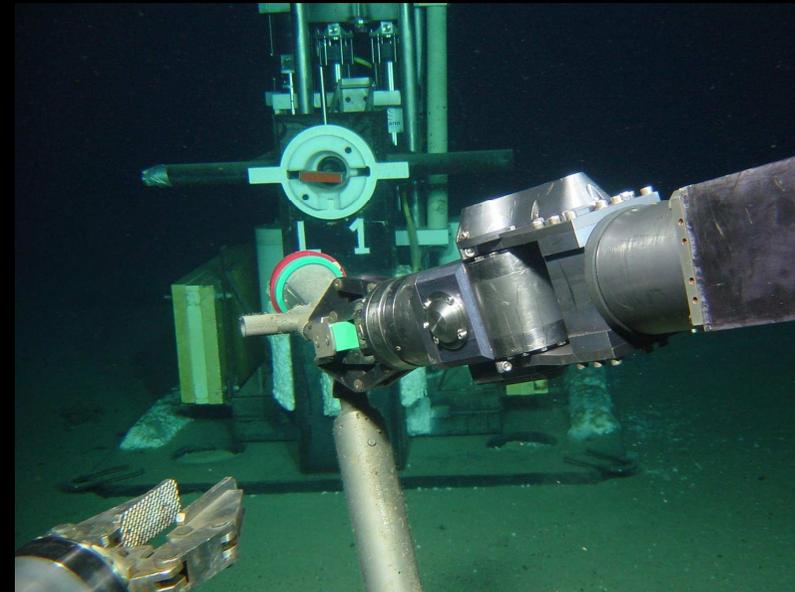


- ❖ Bateau DP « Castor 02 »
- ❖ Précision de 1m sur la position de la ligne au fond de l'eau.
- ❖ 7 heures d'opérations

La connexion des lignes avec le ROV

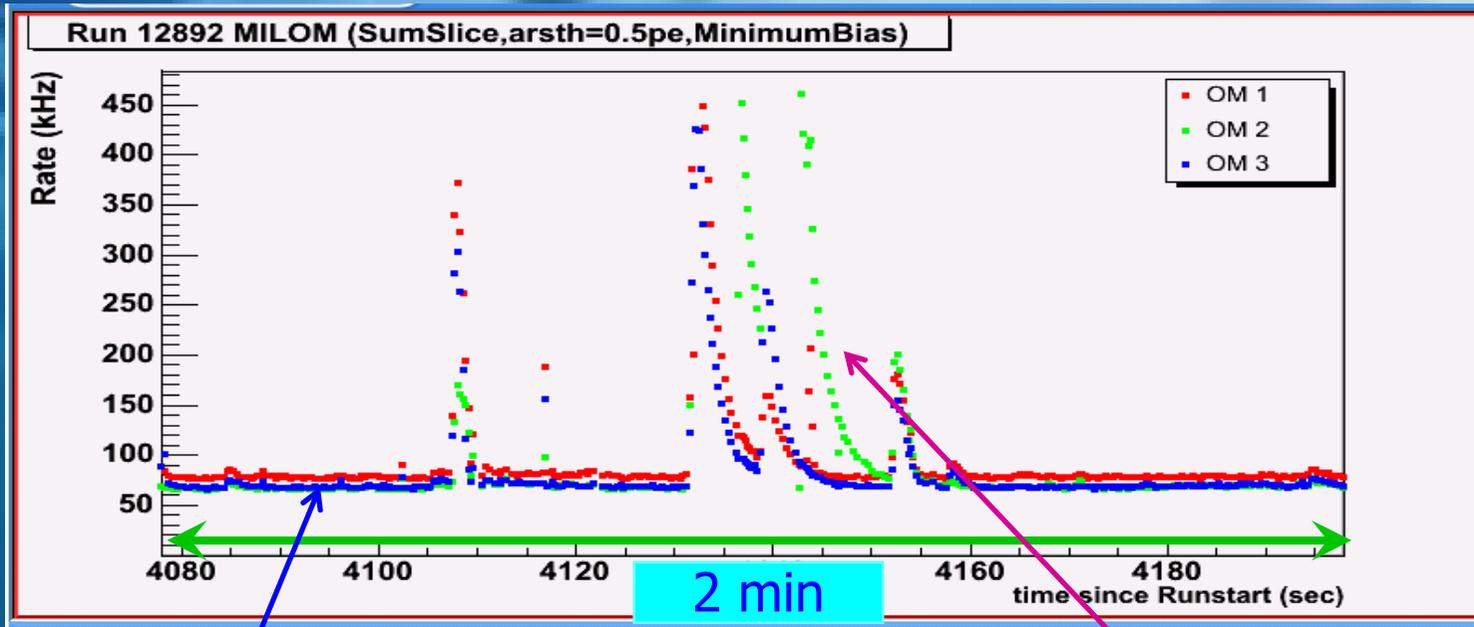


- ROV « VICTOR » ou sous-marin « Nautil » de l'IFREMER
- Connecteur ODI connectable sous pression contenant :
 - 4 fibres optiques
 - 2 câbles électriques

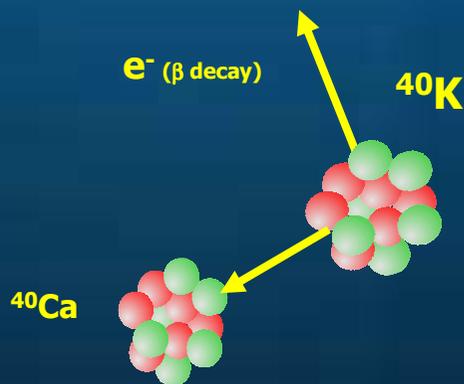




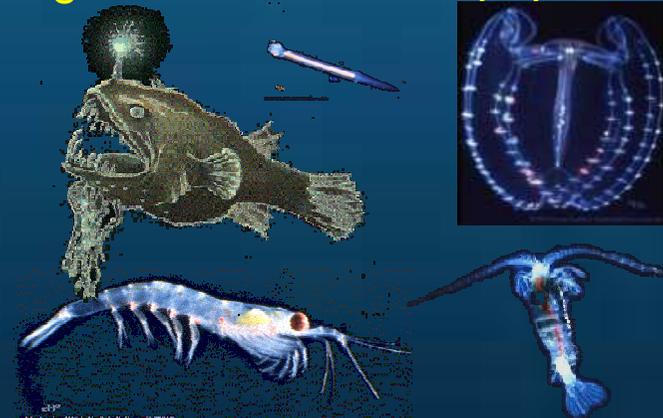
Taux de comptage d'un module optique



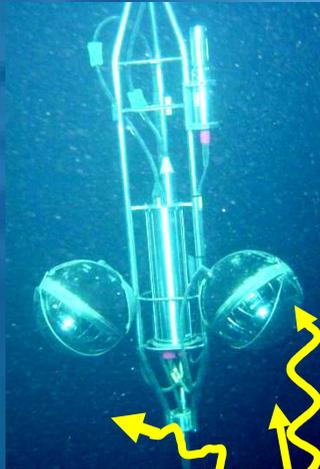
Ligne de base continue :
Radioactivité de la mer (^{40}K)
+ bactéries bioluminescentes



Bursts:
bioluminescence des
organismes macroscopiques



Calibration in-situ avec le ^{40}K

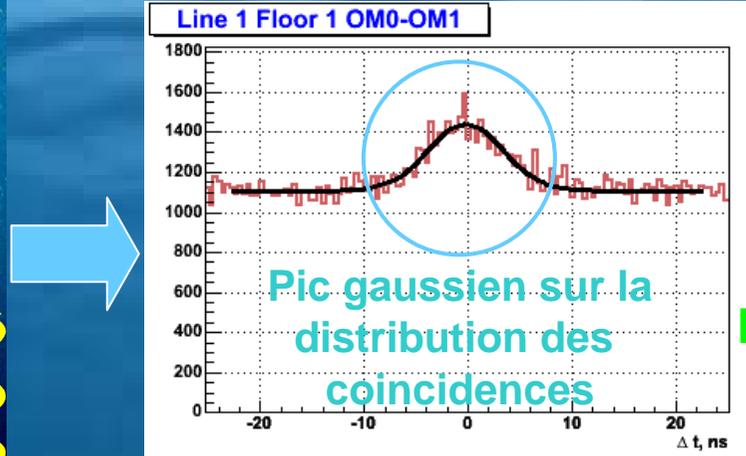


Cherenkov

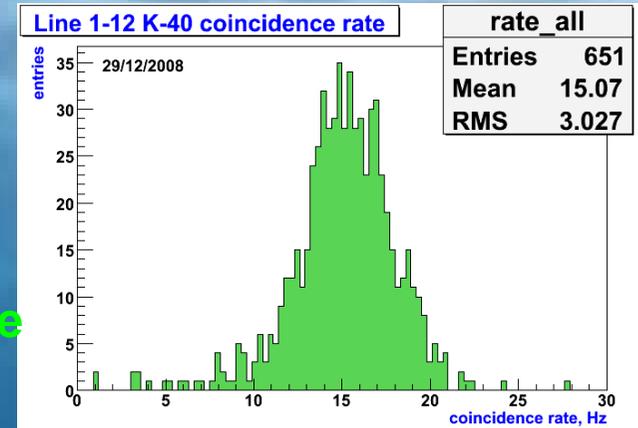
e^- (β decay)

^{40}K

^{40}Ca

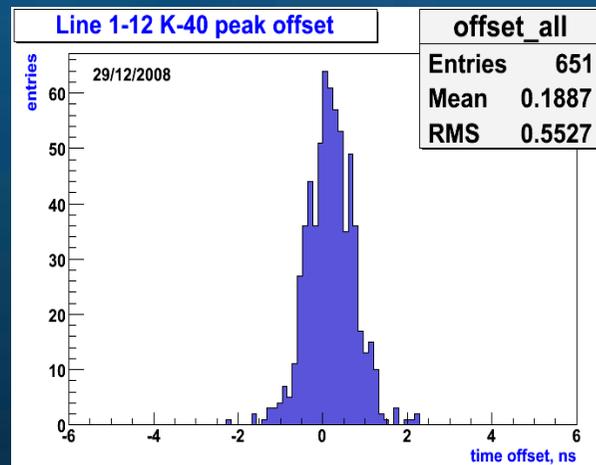


Intégrale du pic



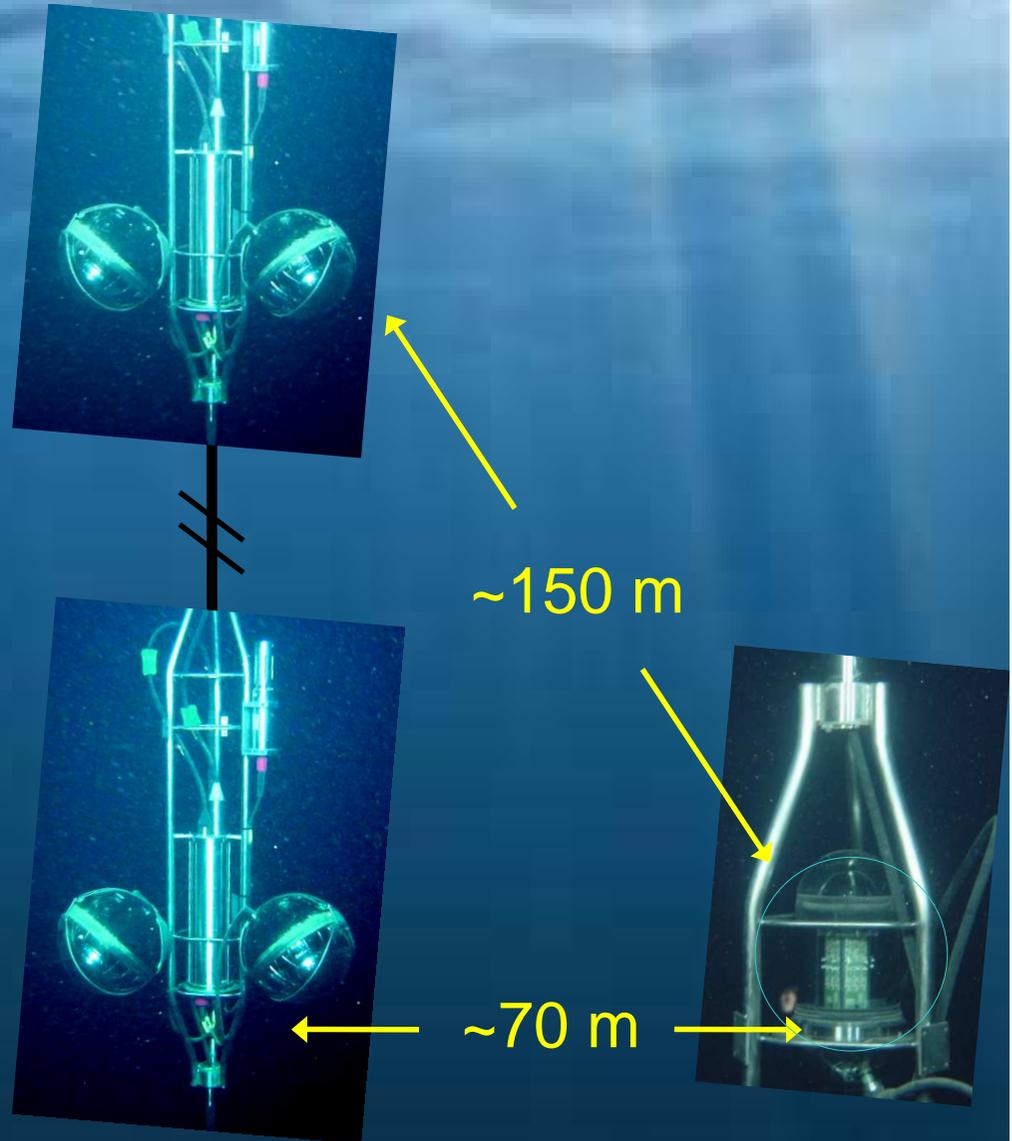
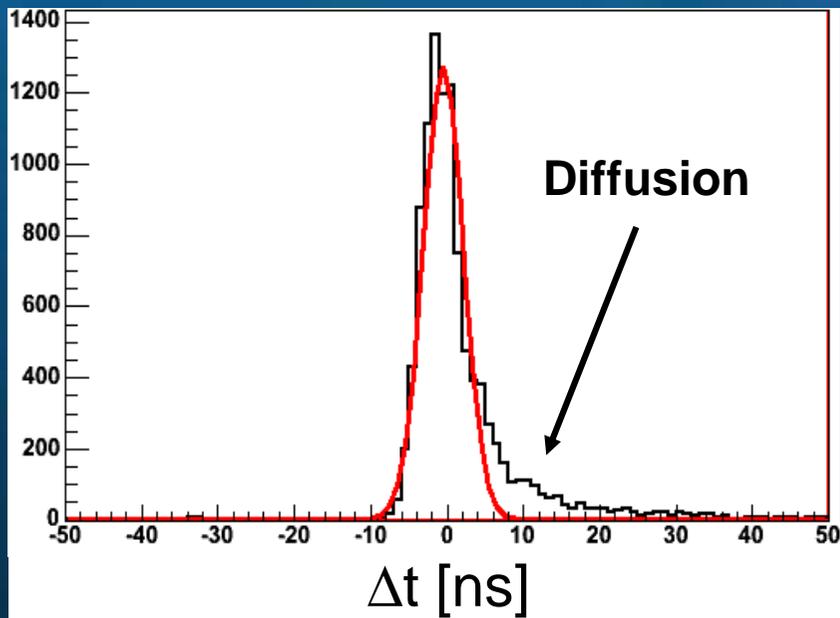
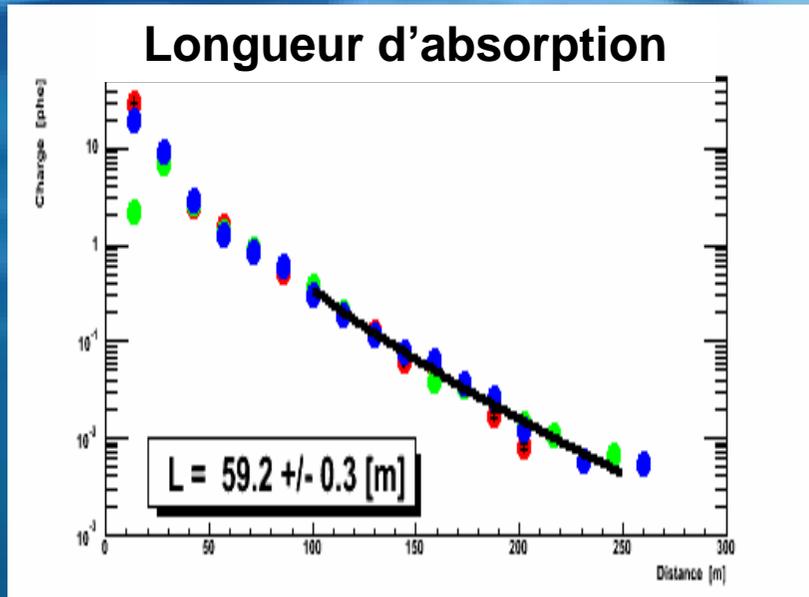
Contrôle précis (~5%) de l'efficacité des OMs

Moyenne du pic

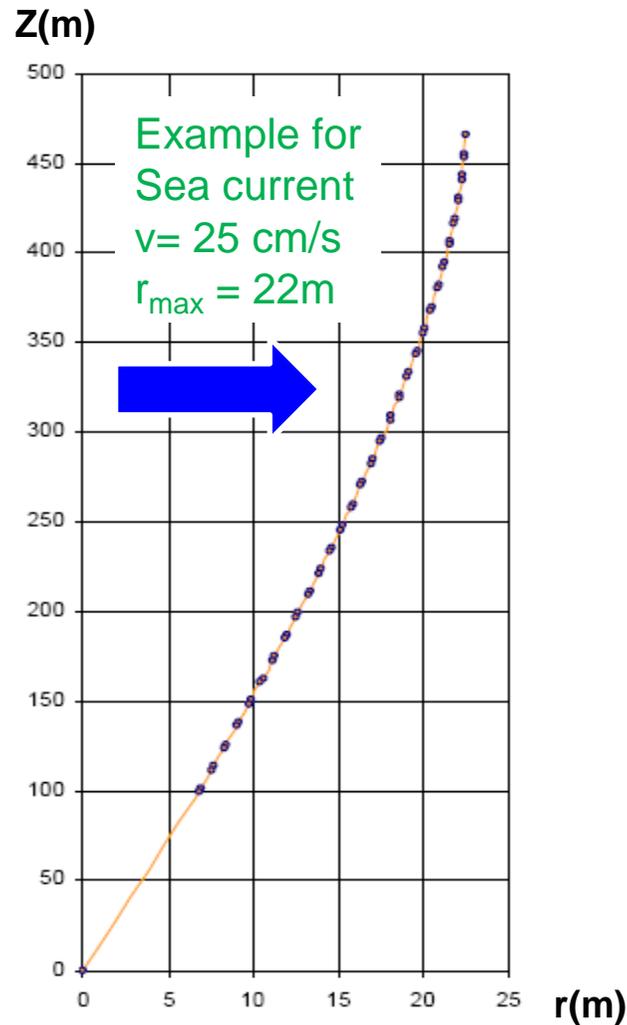


Contrôle de la calibration temporelle

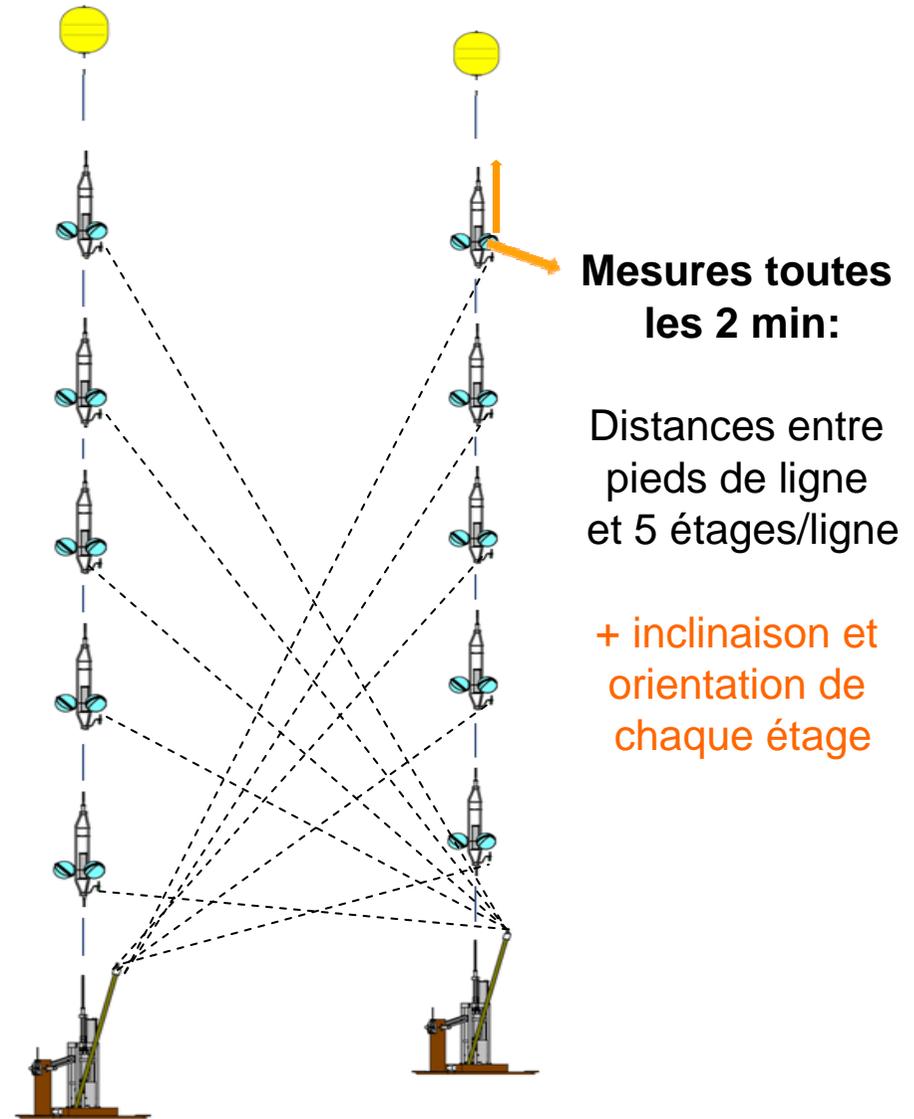
Mesure de l'atténuation de la lumière



Mesure de la déformation des lignes



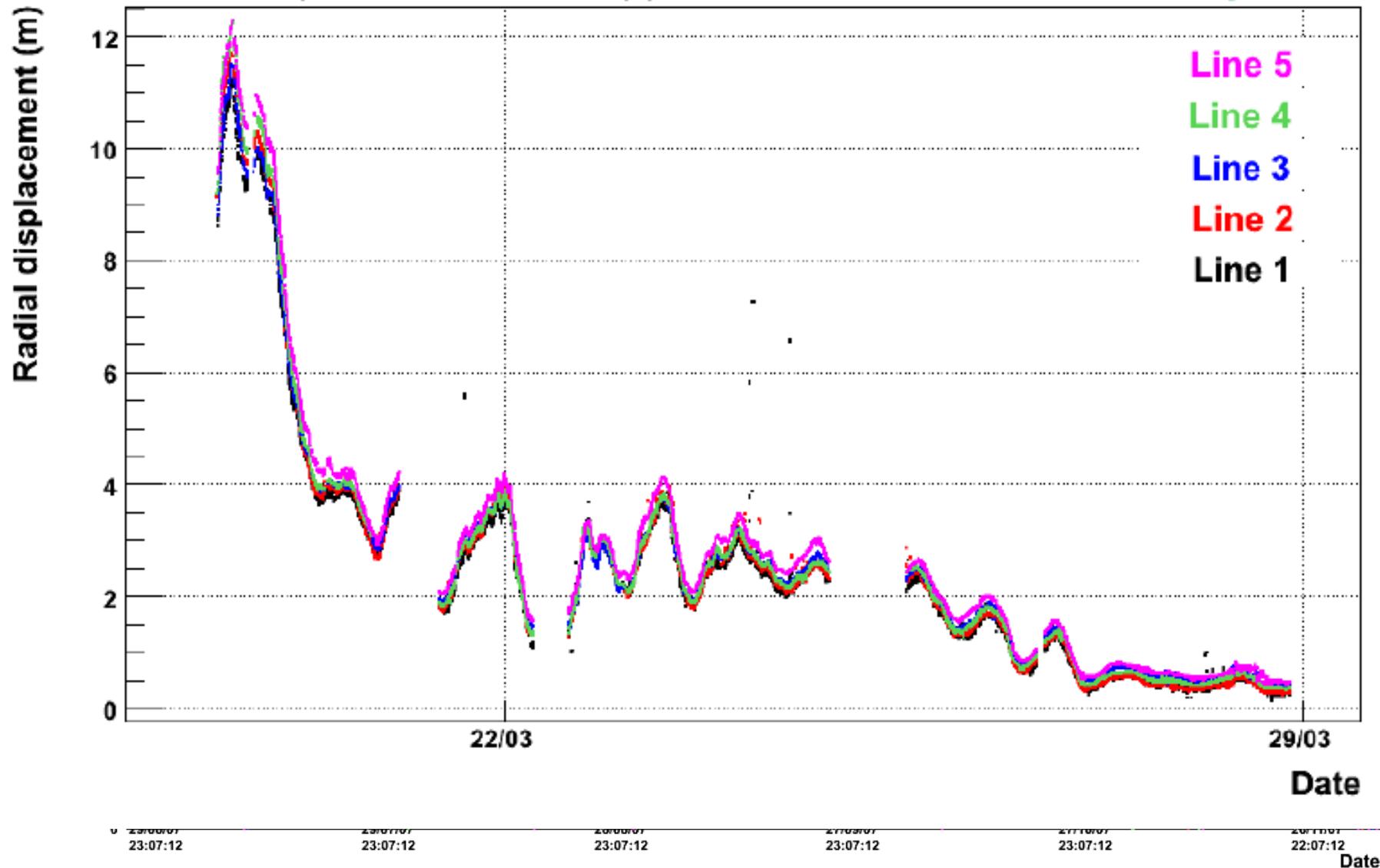
$$r = (a z - b \ln[1-cz]) v^2$$



Positionnement acoustique

X vs Y for Line 4 modules

Etage 1



Reconstruction des muons

Ajustement (minimisation χ^2) des temps des hits des PMs vs. altitudes pour trouver angle zenithal angle des traces de μ

Filtre des données :

- Recherche des **coïncidences locales (trigger hits)** dans 20ns
- Requiert ≥ 5 trigger hits

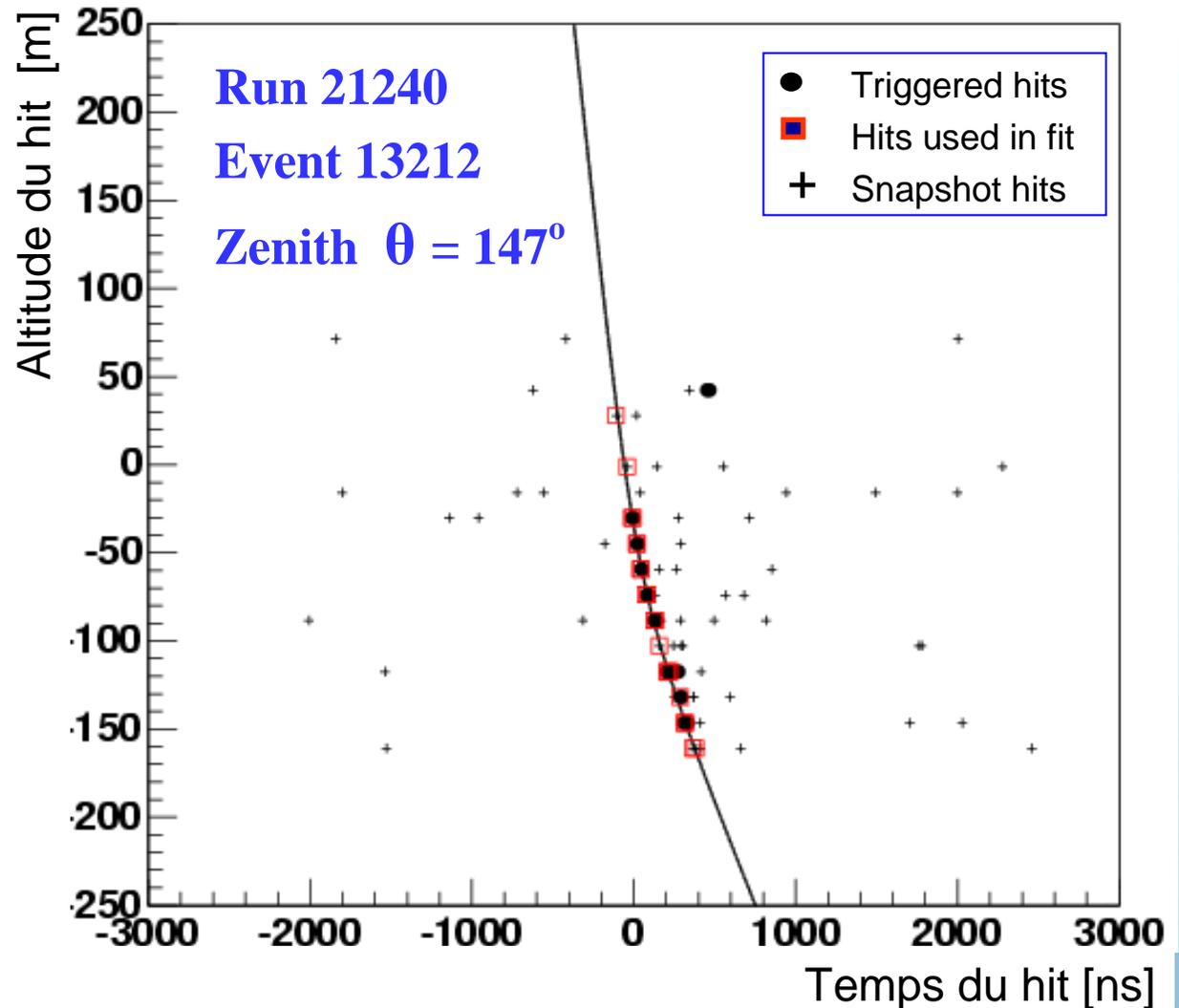
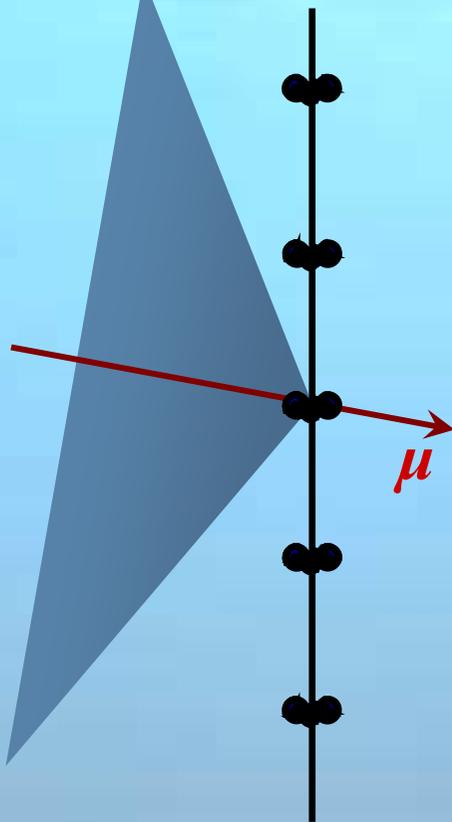
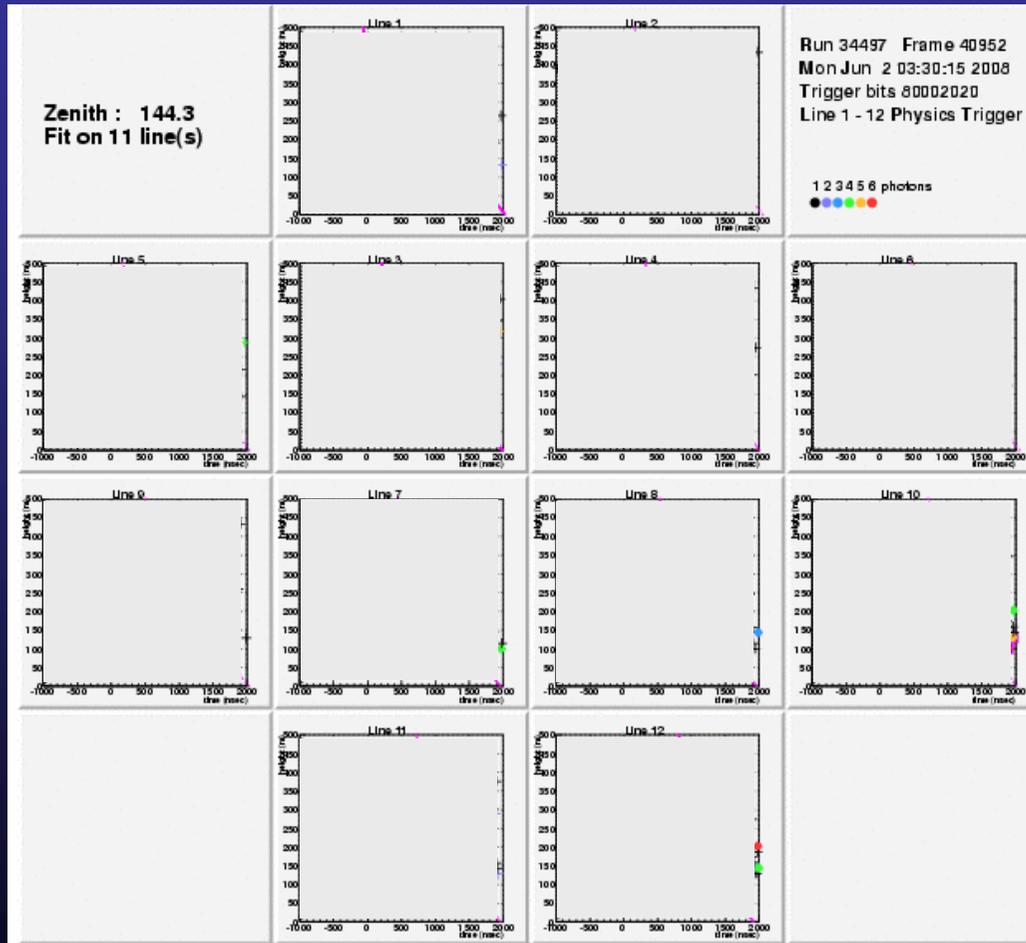


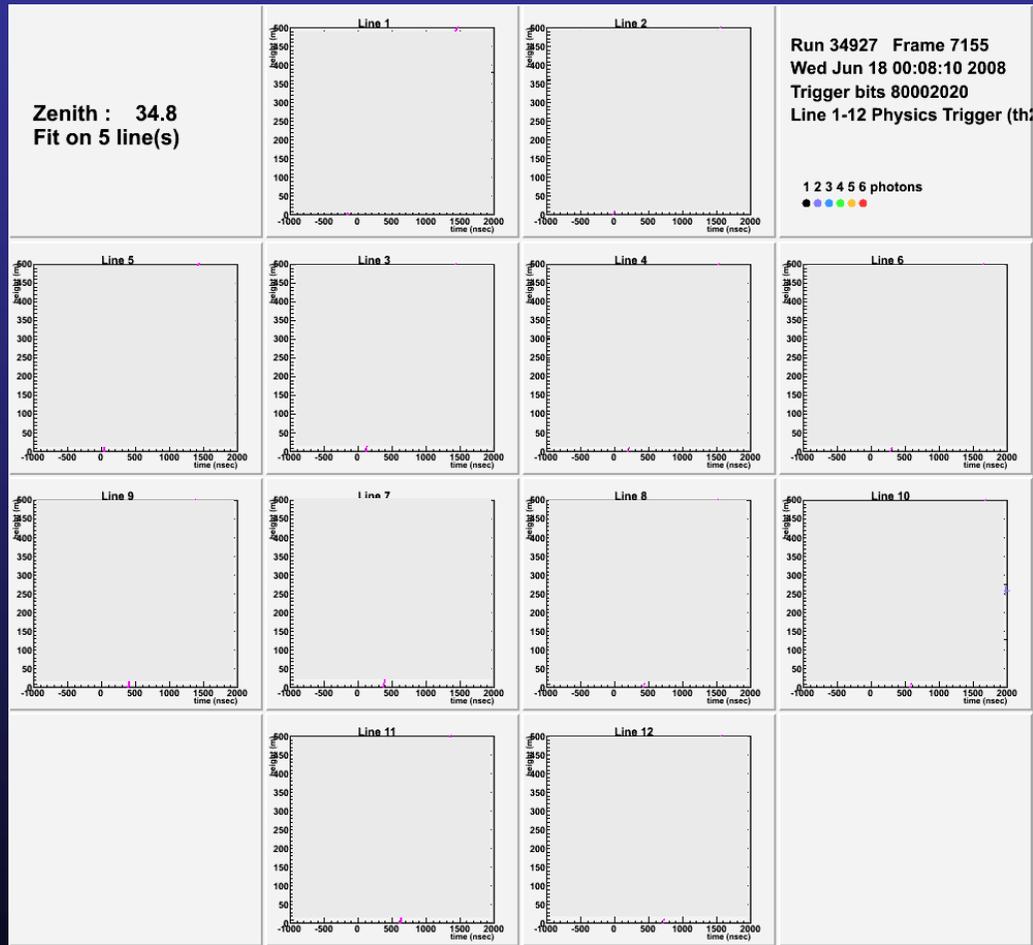
Illustration d'un événement muon



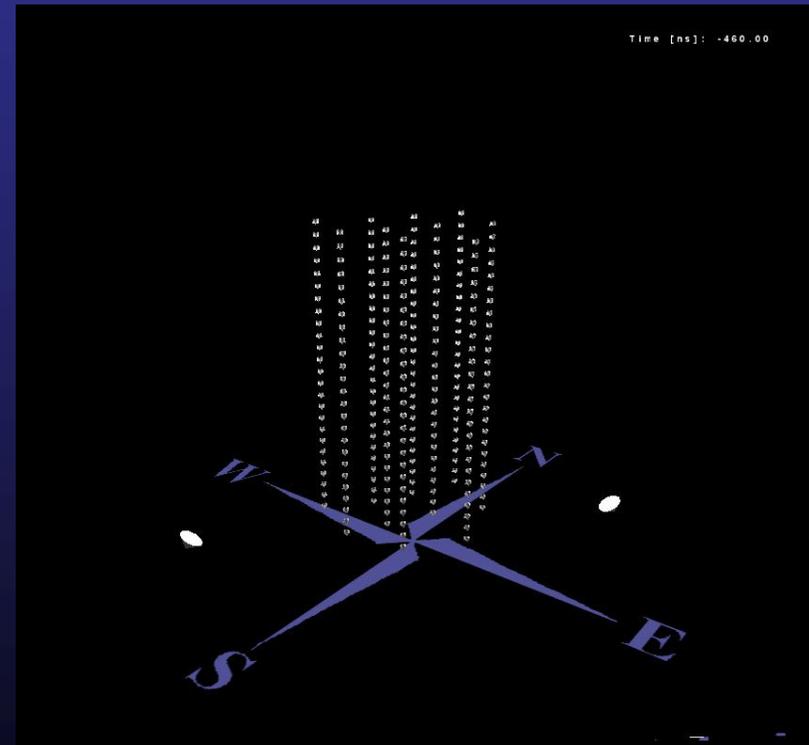
Exemple d'un événement *muon*
reconstruit descendant, détecté sur
les 12 lignes du détecteur:



Illustration d'un candidat neutrino

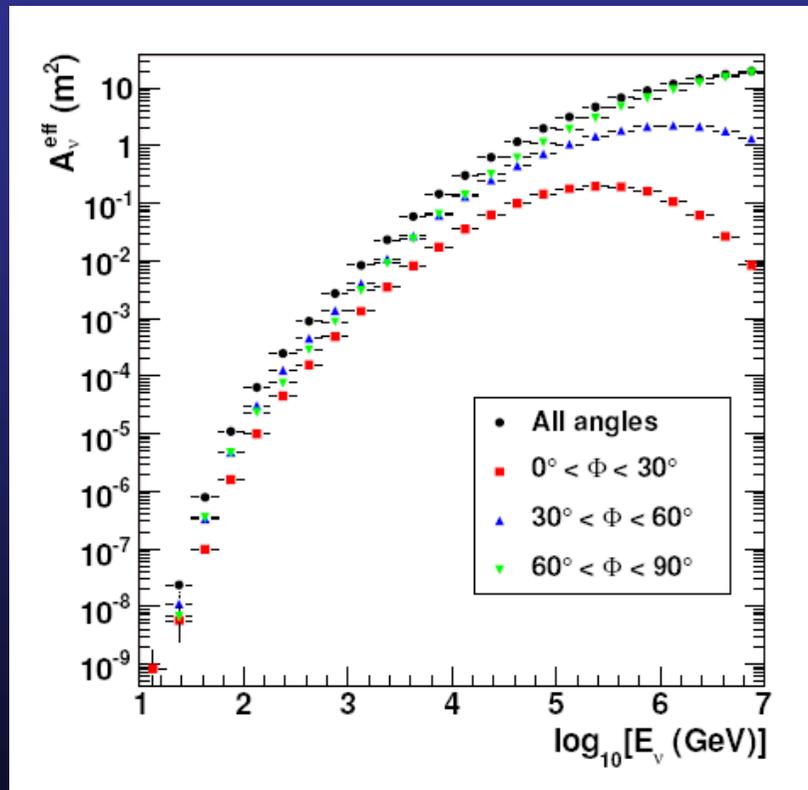


Exemple d'un événement *muon reconstruit montant* (i.e. un candidat neutrino) détecté sur 6/12 lignes du détecteur:

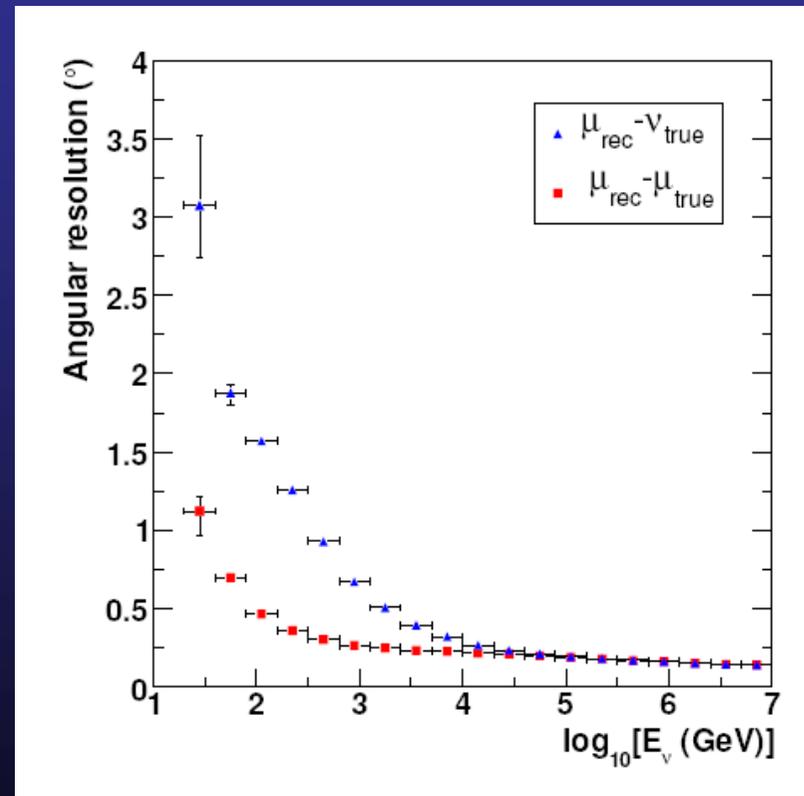


Les performances attendues

Surface effective neutrino



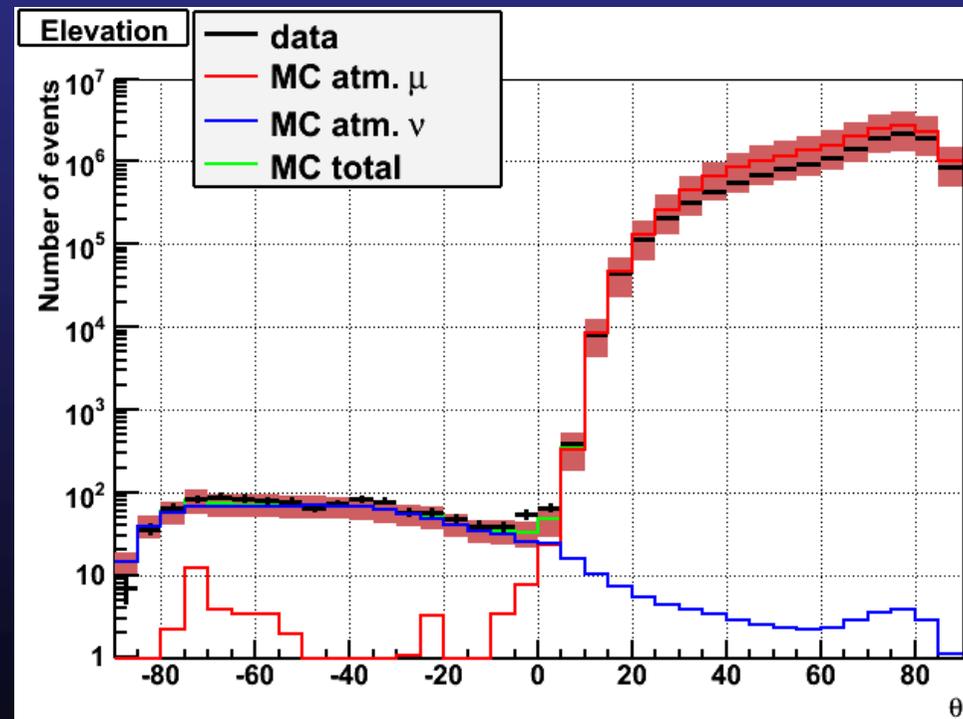
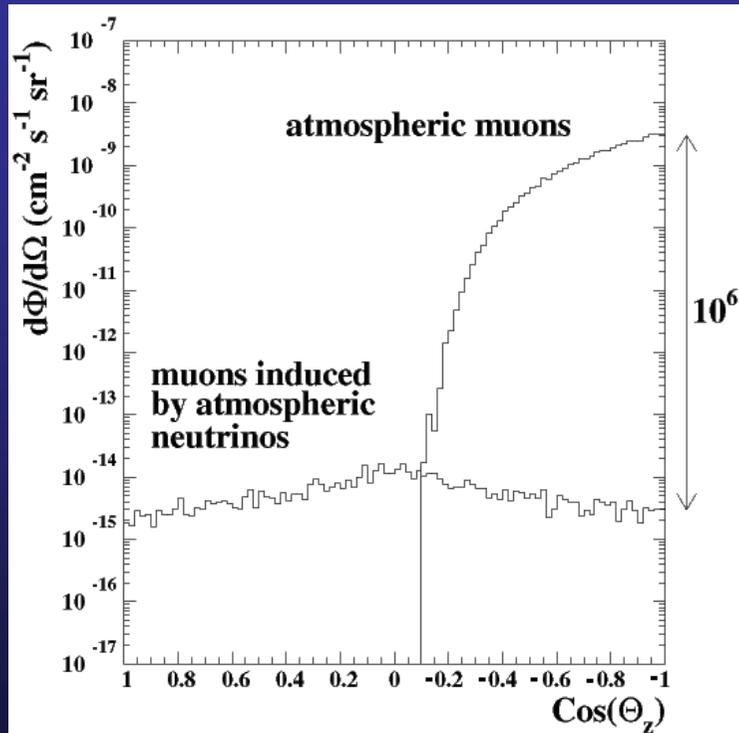
Résolution angulaire



Distribution des événements reconstruits

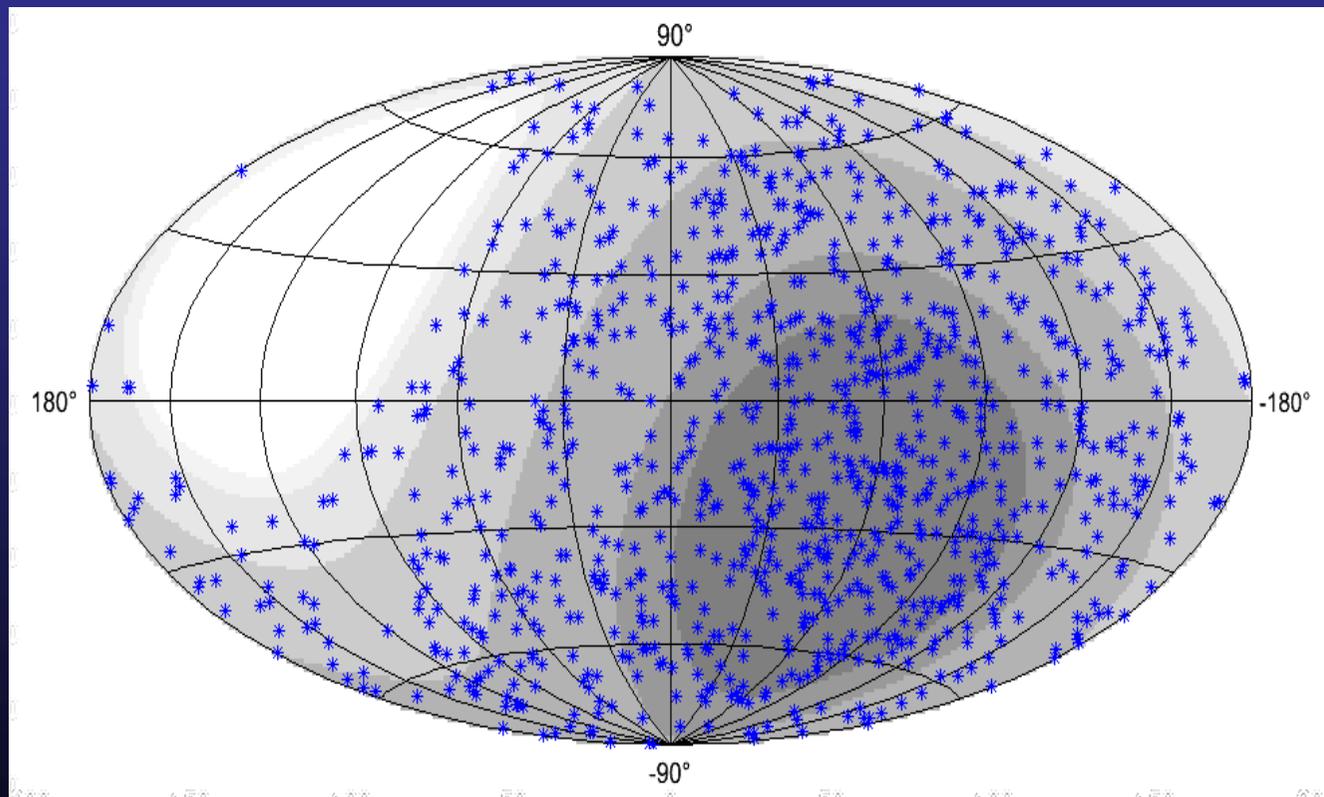
Données ANTARES 2007-2008

~1000 neutrinos

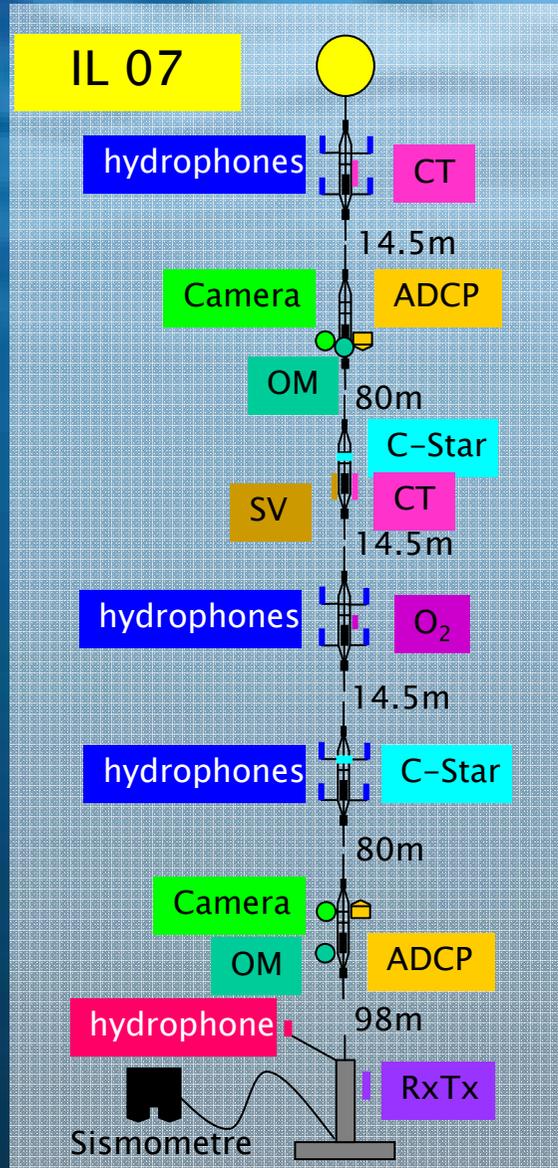


Cartographie du ciel en neutrinos

~1000 neutrinos (données 2007-2008)



Plateforme pluridisciplinaire ANTARES



Biologie

- Modules Optiques
- Caméra
- Hydrophones

Océanographie

- Sonde Température
- Sonde Oxygène
- Courantomètre

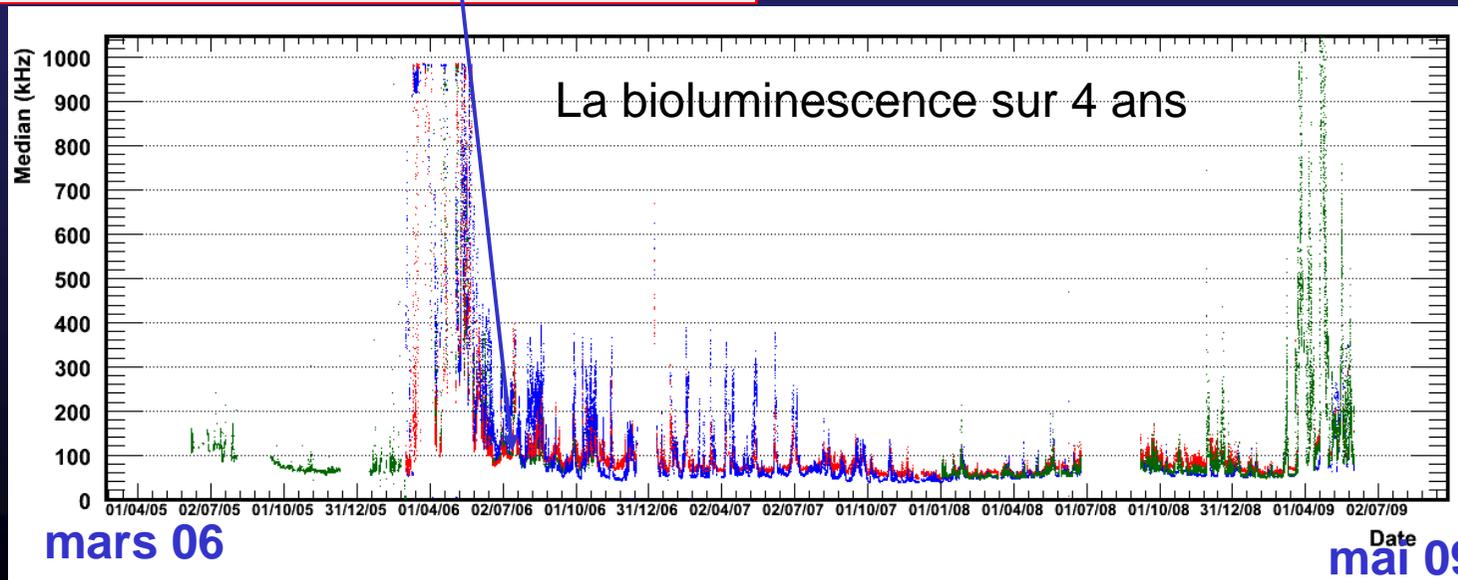
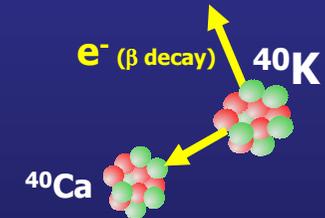
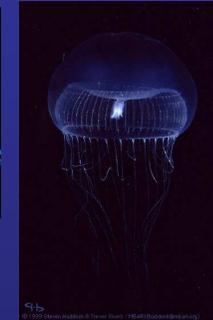
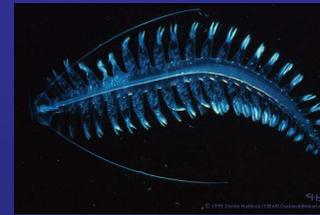
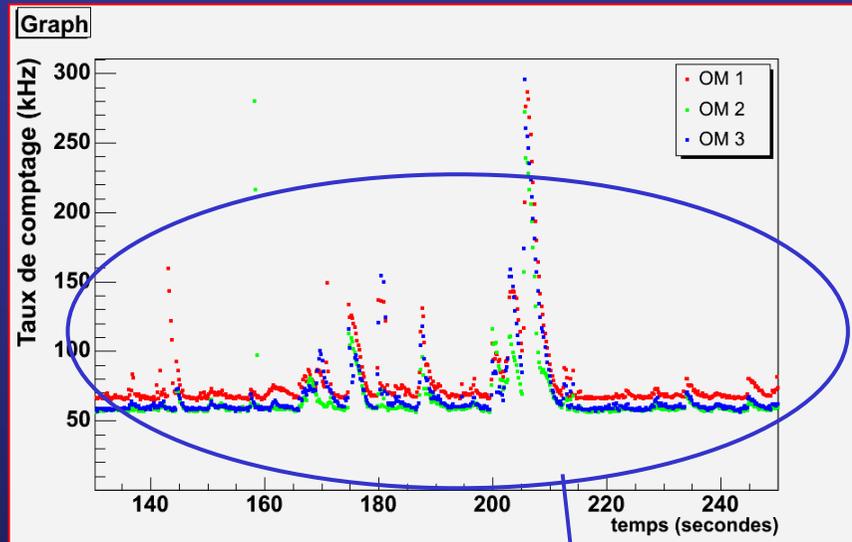
Géophysique

- Sismomètre

→ Données en temps réel, sur du long terme

Etude de la bioluminescence

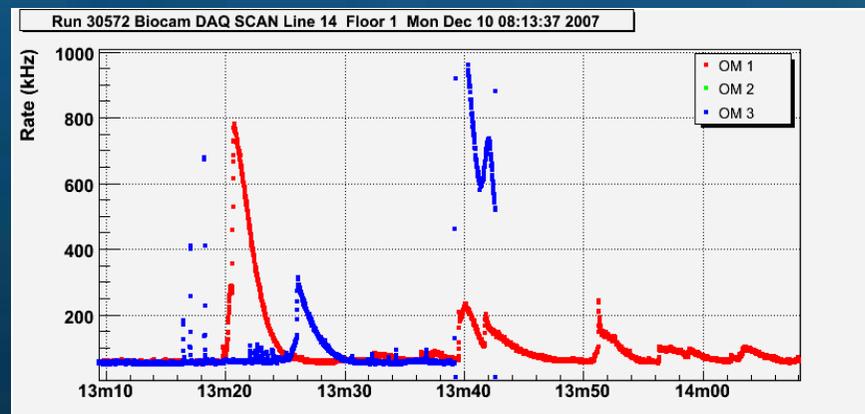
La bioluminescence vue par les Modules Optiques



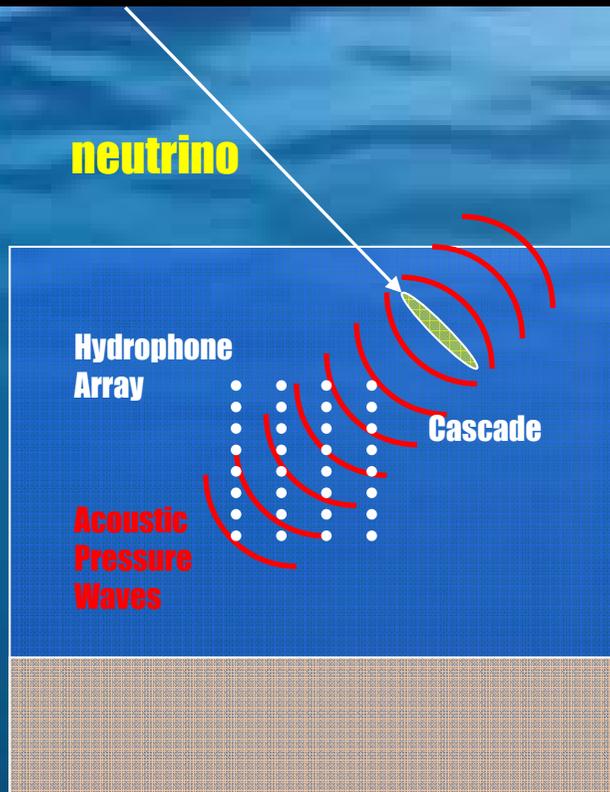
La Webcam la plus profonde du monde !



AXIS221 vidéosurveillance
Sensibilité : 0.1 lux
Champ de vue : up to 90 degrés
Vision nocturne infra rouge



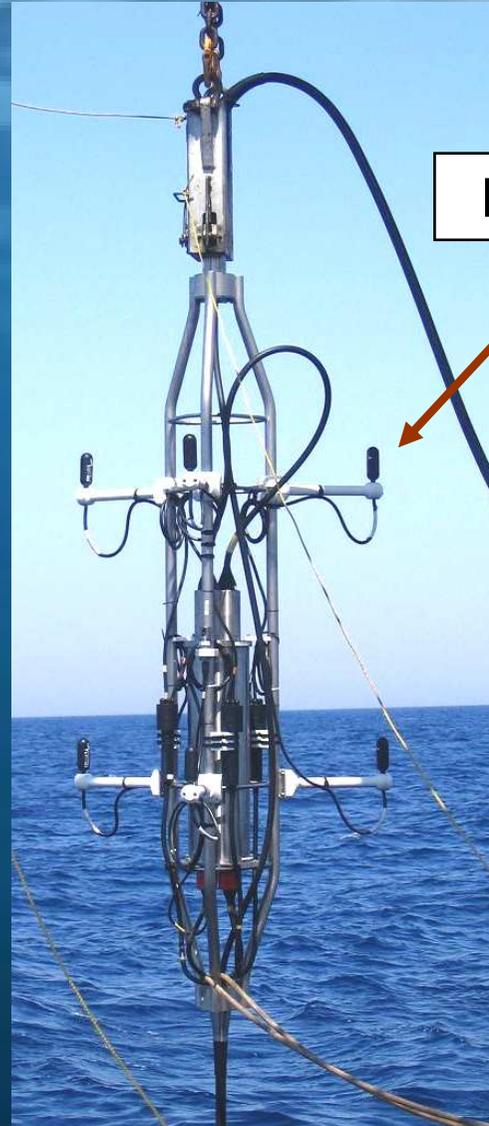
Etudes pour la détection acoustique des neutrinos



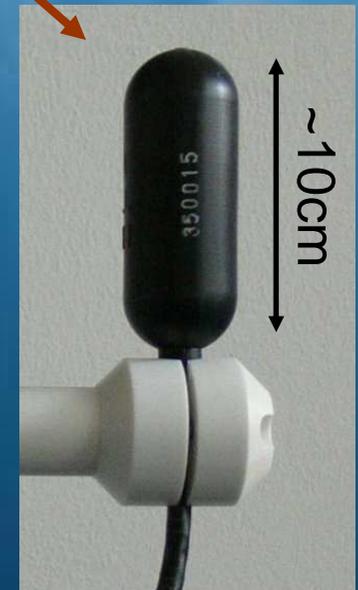
...et études des cétacés !



© Franck Dupraz - GECEM



Hydrophone



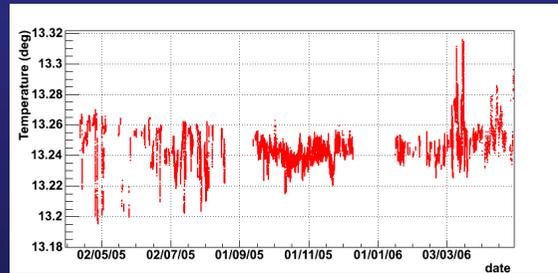
Domaine de l'océanographie

Caractériser les masses d'eaux profondes

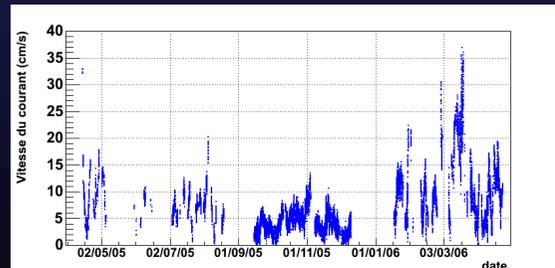
Sonde de Température et de Conductivité

Sonde d'Oxygène

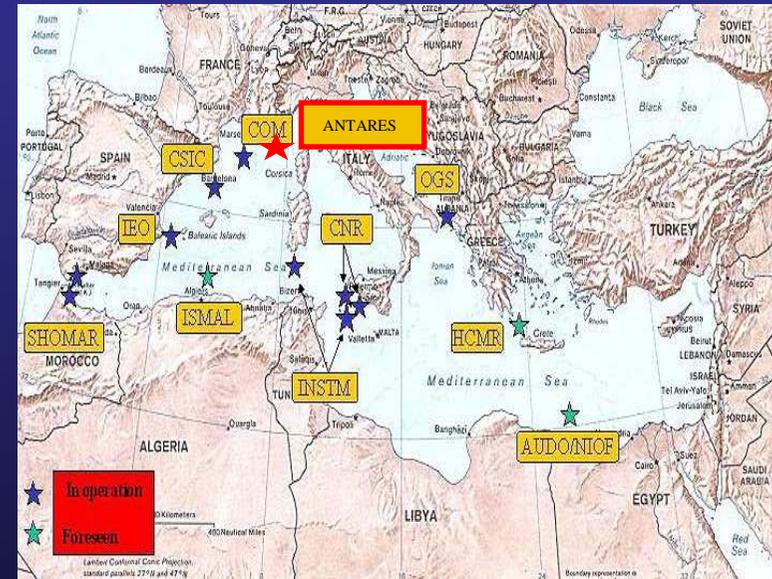
Sonde de Température



Courantomètre
Acoustique Doppler



Études des circulations
océanographiques sur le pourtour
méditerranéen.



Programme international Hydro-Changes
Le but est d'évaluer les changements
climatiques en mer Méditerranée.
Soutenu par le CIESM



Domaine de la sismologie

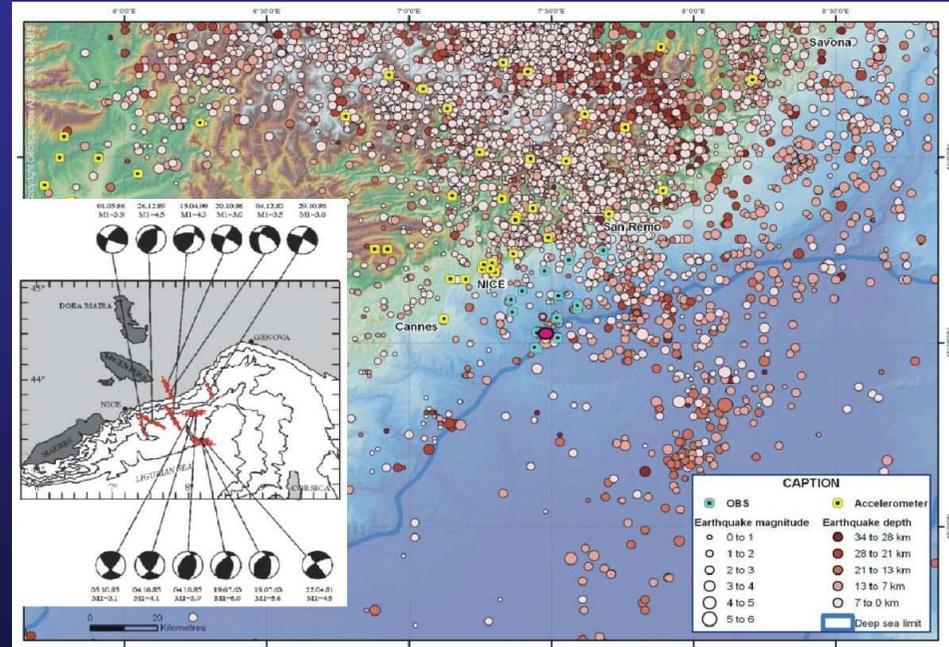
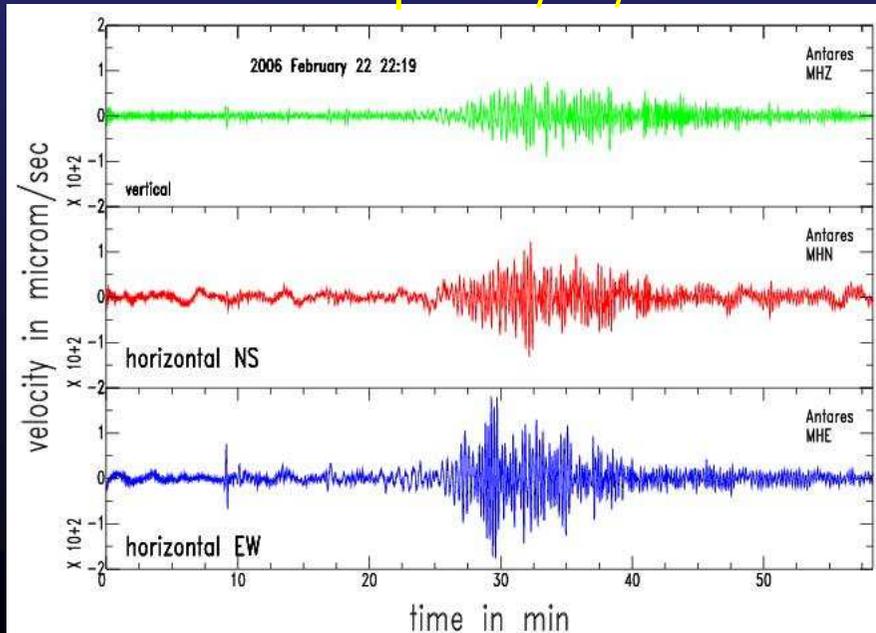
Collaboration avec le Laboratoire Géosciences Azur



Installation sur le site Antares

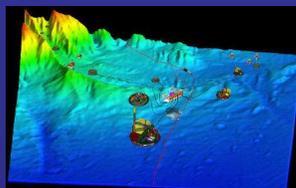
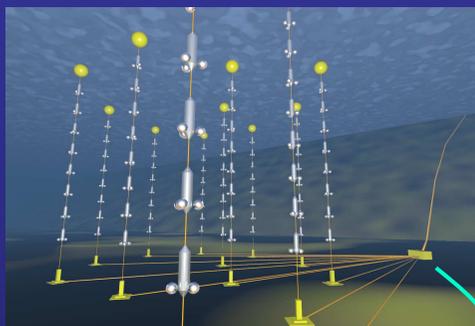


Mozambique 22/02/2006



Le sismomètre d'ANTARES fait partie d'un réseau de surveillance sismique, complémentaire des stations terrestres.

La Boîte de Jonction Secondaire (2009-2010)



Mission de démonstration
dans le cadre du réseau
d'excellence ESONET



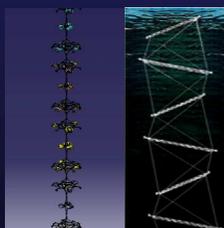
Projet AAMIS
Instrumentation océanographique pour
l'étude de la colonne d'eau, intégrée au
réseau EuroSites



Expérimentations technologiques
(robotique en milieu hostile, ...)

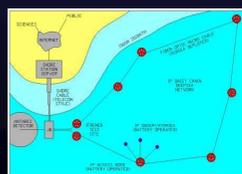


Projet PIMC
Système d'écoute sous-marine, intégrant des
analyses multimodales pour l'étude des cétacés.



Prototypes KM3

Tests de lignes prototypes dans le
cadre de la Phase Préparatoire de
KM3NeT (ESFRI).



MOGLI / DeepSeaNet

Démonstrateur d'un réseau de surveillance sismique
sous-marine, utilisant des liaisons optiques sur
plusieurs centaines de kilomètres.



Etudes pour un détecteur KM^3 en Méditerranée



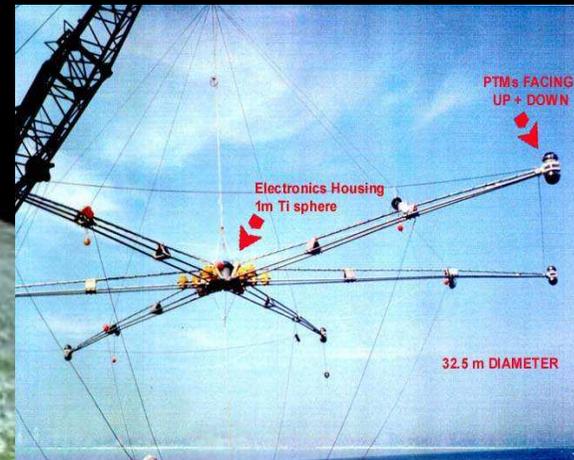
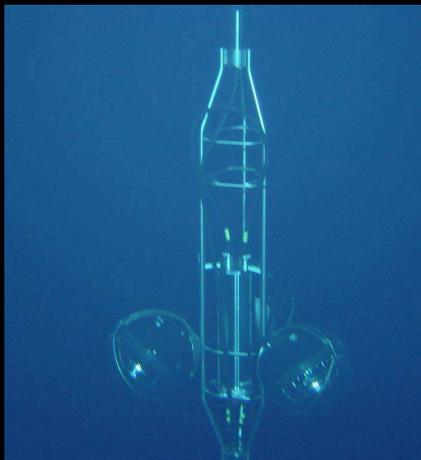
Antares ($1/50 \text{ km}^3$)
Toulon, France
-2500m

Nemo
Capo Passero, Italie
-3350m

Nestor
Pylos, Grèce
-4000m



Etudes pour un détecteur KM³ en Méditerranée



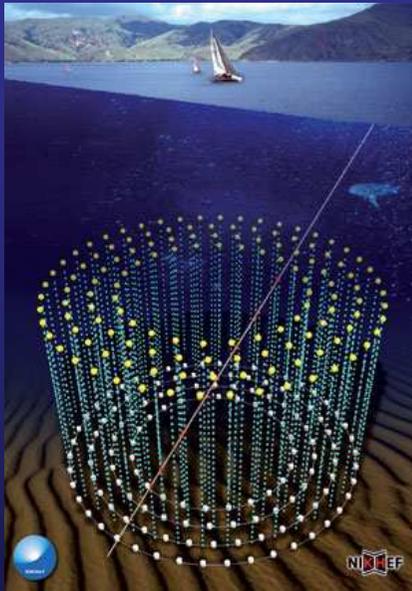
Depuis 1996
Opérationnel
~150 personnes

Depuis 2000
R&D
~30 personnes
Nemo
Capo Passero, Italie
-3350m

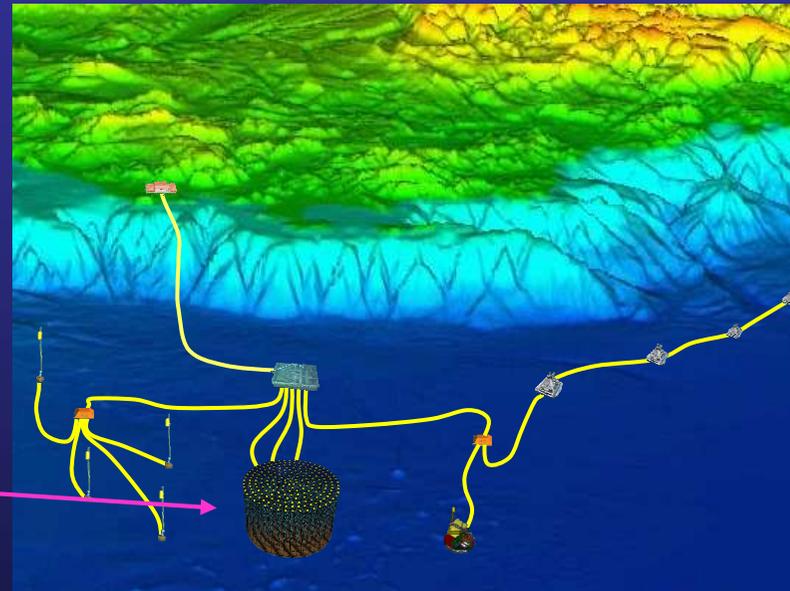
Depuis 1990
R&D
~30 personnes
Nestor
Pylos, Grèce
-4000m

Le projet européen KM3NeT (2012-?)

Un détecteur au moins
50 fois plus grand

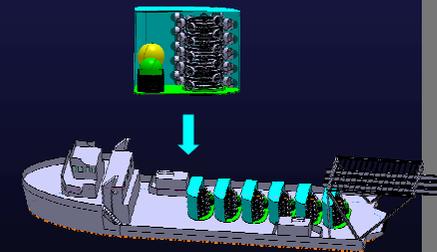


Observatoire sous-marin permanent



Phase R&D :

- Définition des photodétecteurs (PM unique, multi PMs, ...)
- Définition de la géométrie des lignes (espacement, densité, nb,..)
- Optimisation du déploiement
- Optimisation du cout.....
- ...Définition du site d'accueil





Capteurs intelligents sur:
 - systèmes embarqués
 - réseaux de bouées et de mouillages

MEUST

Pour l'Océanologie,
 la Géophysique,
 la Climatologie ...

et l'Astronomie Neutrinos

1^{ère} étape vers un
 télescope de taille à
 l'échelle du Km en Méditerranée

Capitaliser et développer l'existant
 dans une infrastructure mutualisée

Ifremer



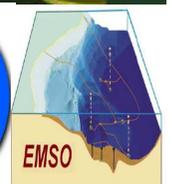
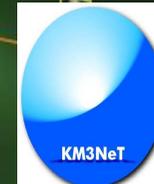
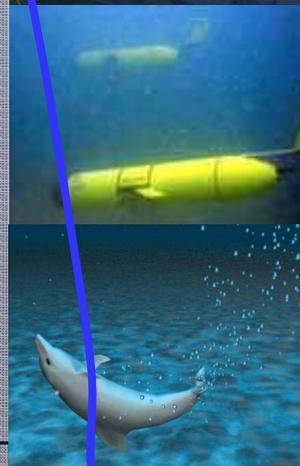
(In2p3 - Insu)

à La Seyne-sur-Mer

=> Plateforme pluridisciplinaire
 scientifique et technique unique,
 à vocation mondiale

S'inscrit naturellement dans:

- Projets européens KM3 et EMSO
- Chantier de la Méditerranée
- Eurocentre Méditerranéen pour les Sciences et Technologies Sous-Marines
- Projet de Technopôle de la Mer



Résumé

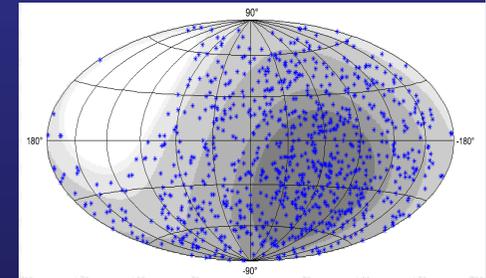


- **ANTARES est aujourd'hui le plus grand détecteur de neutrinos de l'hémisphère nord.**

- Le détecteur est pleinement opérationnel

- Situé dans l'hémisphère nord, ANTARES permet d'observer le Centre Galactique, siège de phénomènes très intenses de l'Univers

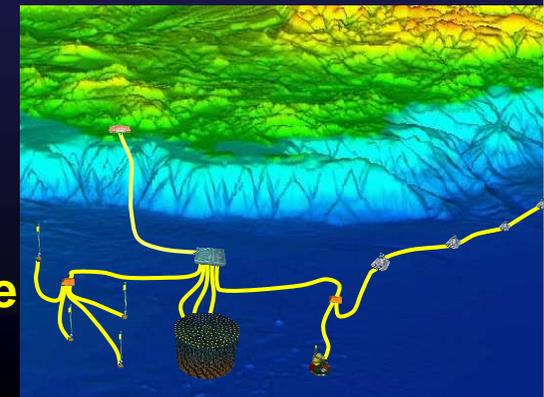
- Premières analyses de physique en publications



- **ANTARES est aussi une plateforme pluridisciplinaire en mer profonde, impliquant de nombreuses communautés scientifiques.**

- Son atout majeur : La récupération en temps réel des données environnementales prises en continu, sur de longues périodes.

- **Avancée majeure vers le développement d'une infrastructure pluri-disciplinaire KM3NeT en Méditerranée**



ANTARES : Pêcheurs d'étoiles...ou de mystères ??

