



# ANTARES et KM3NeT

## Des télescopes au fond de la mer pour étudier l'Univers

Vincent BERTIN  
Centre de Physique des Particules de Marseille



Janvier 2019



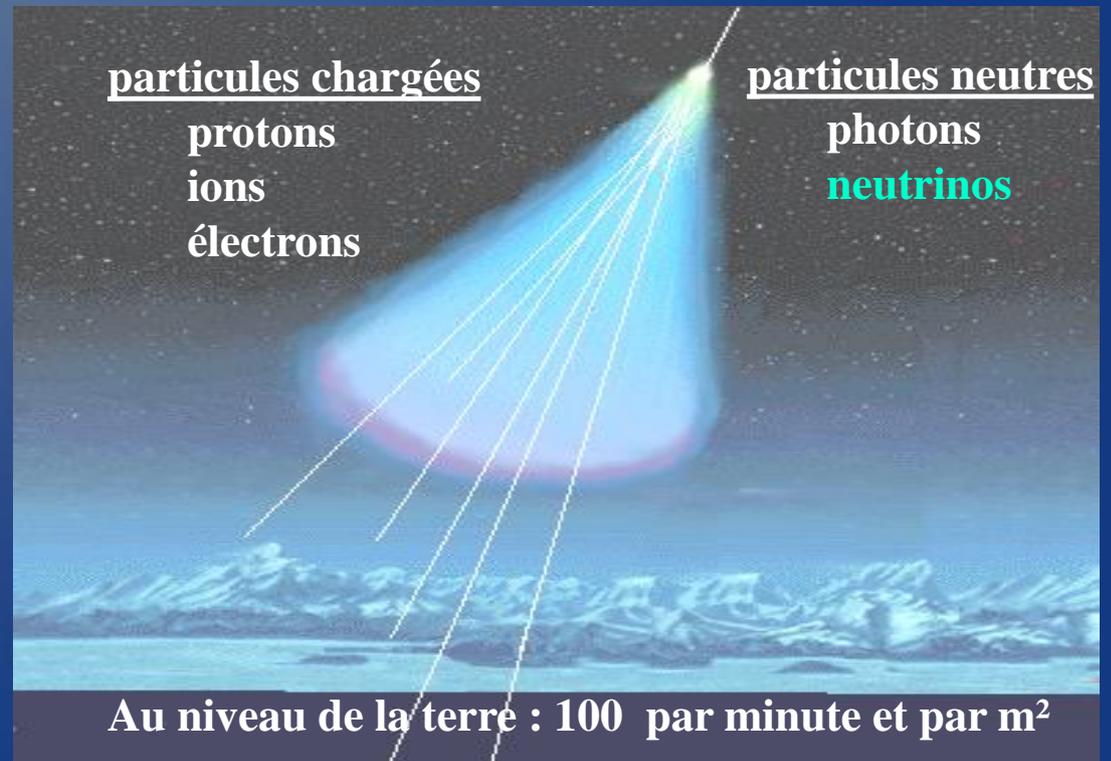


# Les rayons cosmiques



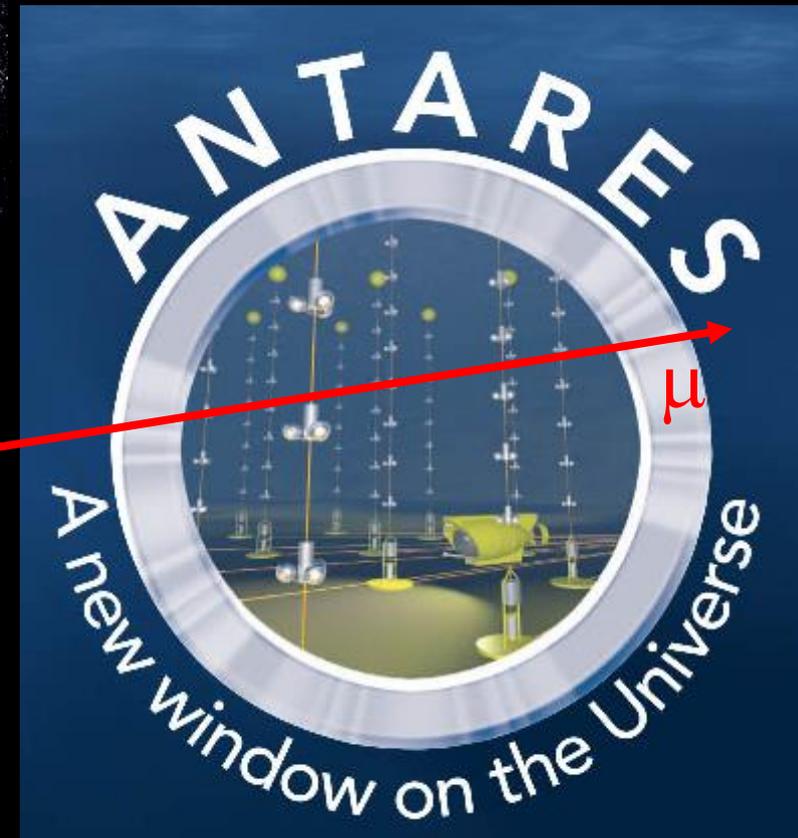
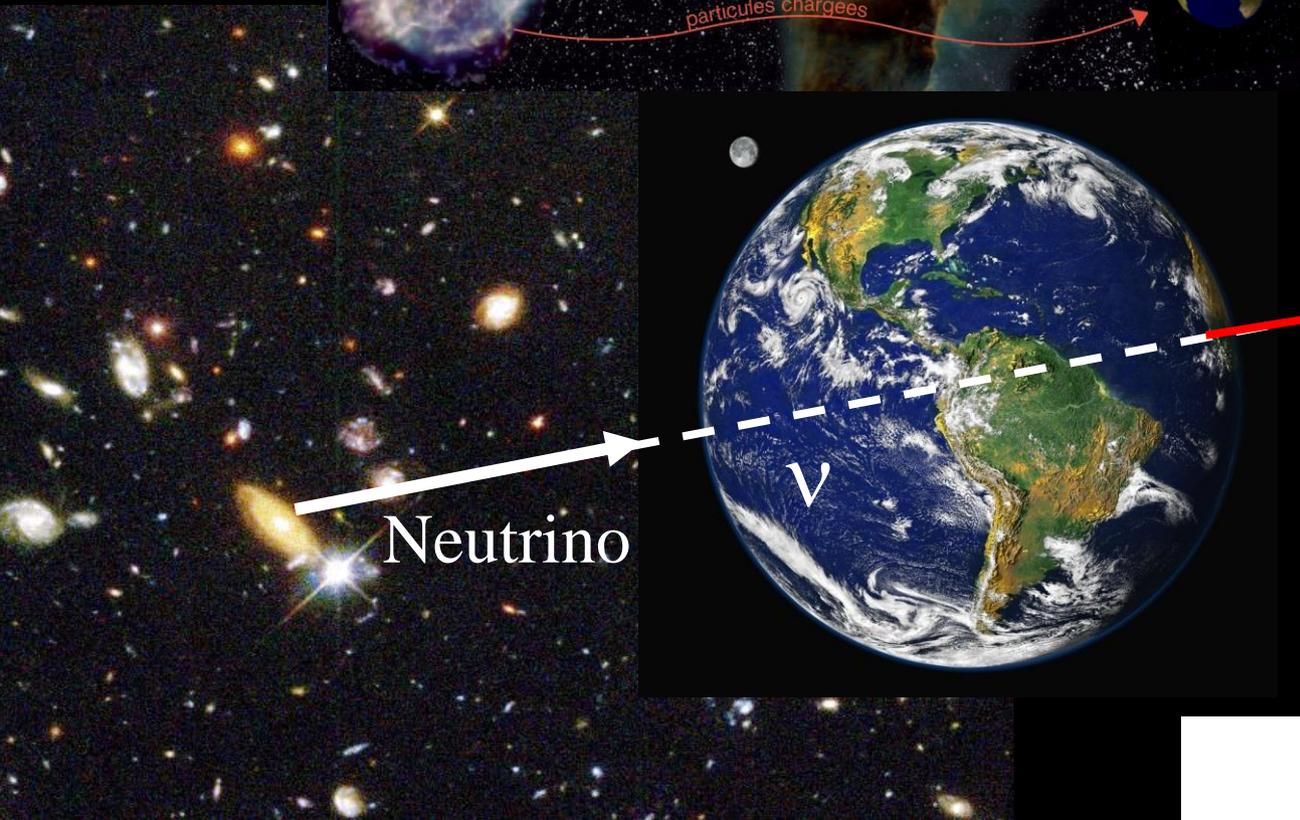
Les rayons cosmiques ont été découverts il y a un siècle par Victor Hess et on ne connaît toujours pas bien leur origine...

Les rayons cosmiques interagissent avec la haute atmosphère et produisent des grandes gerbes de particules...

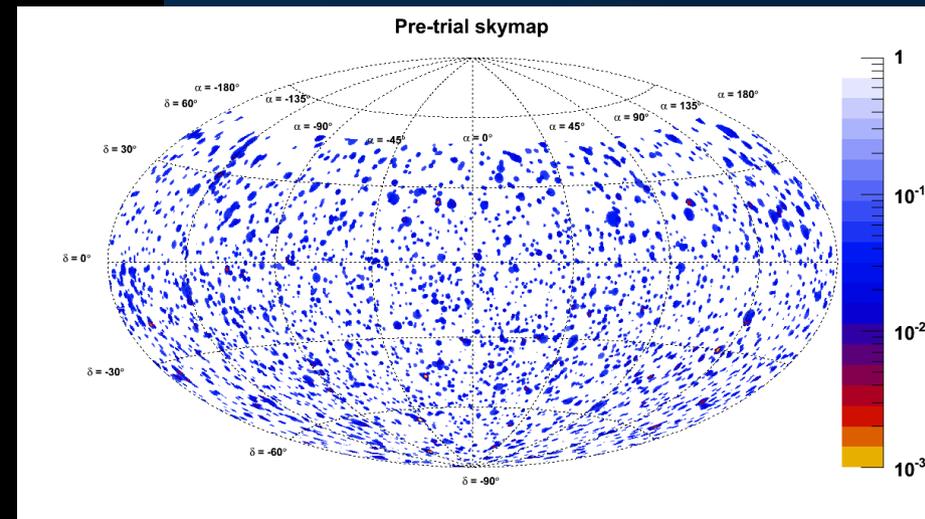




# Une nouvelle fenêtre sur l'Univers



**Astronomie Neutrino :**  
Carte des phénomènes les plus catastrophiques de l'Univers



CHANGEMENTS DE DOMICILE:

*carte de domicile*

Nom: NEUTRINO  
Prénom: Electron / Muon / Tau

Masse: Très très très *petite!*  
Charge: Neutre  
Interaction: Faible

Naissance: Réacteurs nucléaires,  
Etoiles, espace,  
Atmosphère  
Eléments radioactifs...

Profession: **Passe-muraille**

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Mairie de *Strasbourg*

Commissariat de Police

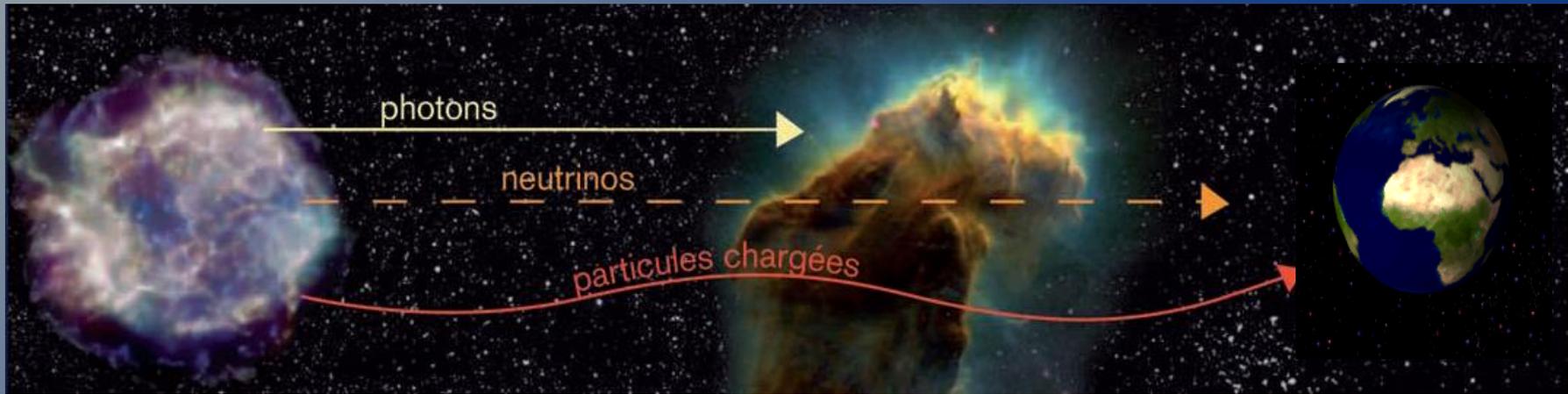
de *Strasbourg*

CARTE D'IDENTITÉ



AD 11 STRASBOURG 15, 8, DES JUIFS

# L'astronomie avec les neutrinos



## Avantages du neutrino :

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

## Inconvénient :

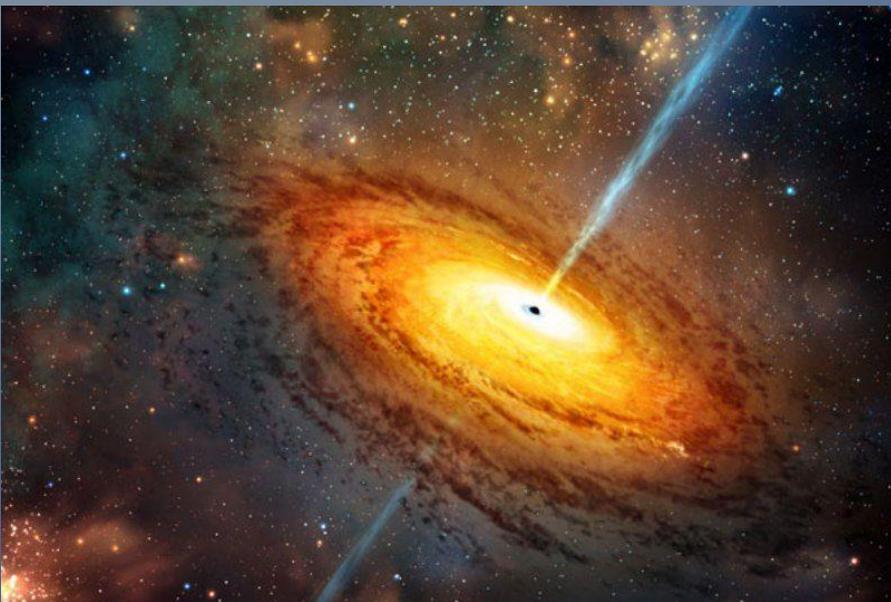
Sur 10 milliards de neutrinos provenant du Soleil et traversant la Terre, seul 1 va interagir !!!

**$\Rightarrow$  Nécessité d'un grand volume de détection**

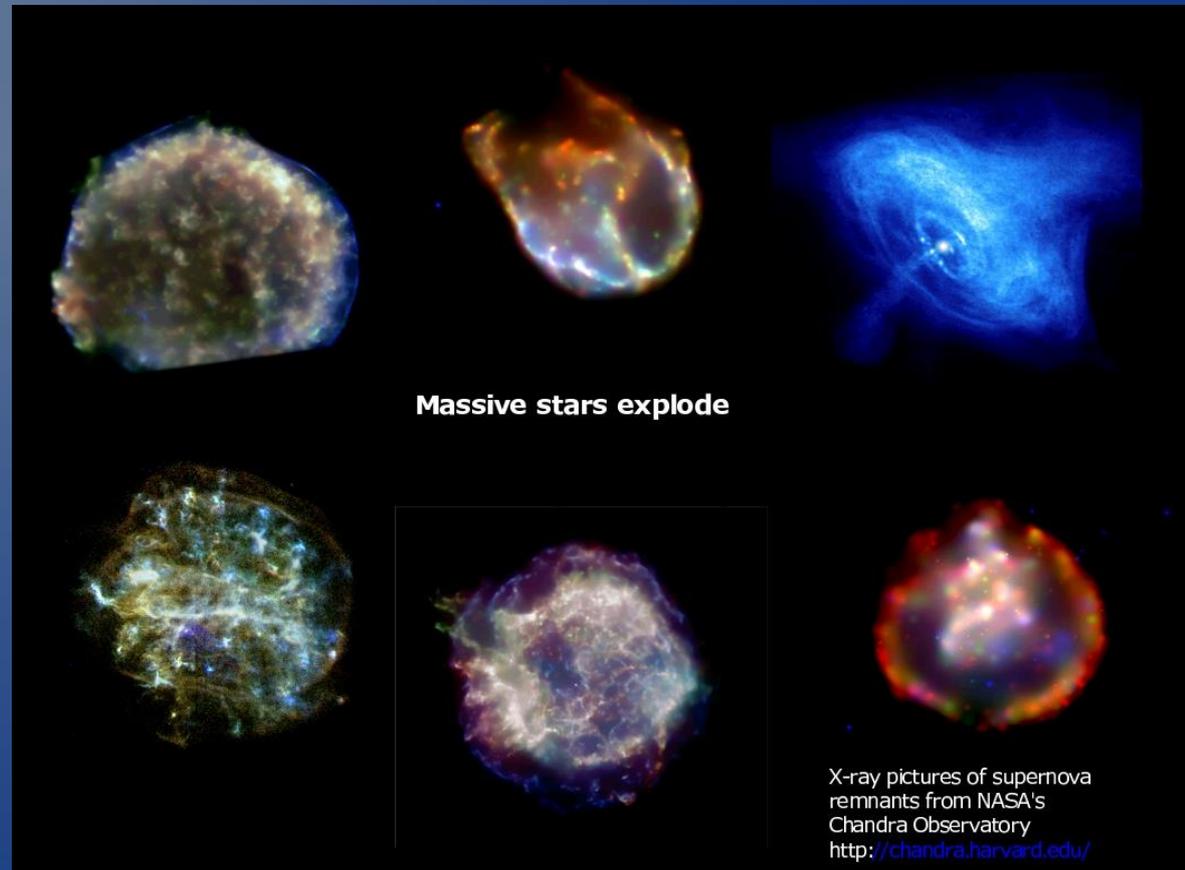
# Sources potentielles : Supernovae, trous noirs

Les rayons cosmiques pourraient provenir des phénomènes violents de l'Univers...

## Explosions d'étoiles (Supernovae)



Trous noirs super-massifs  
(Noyaux actifs de galaxies)

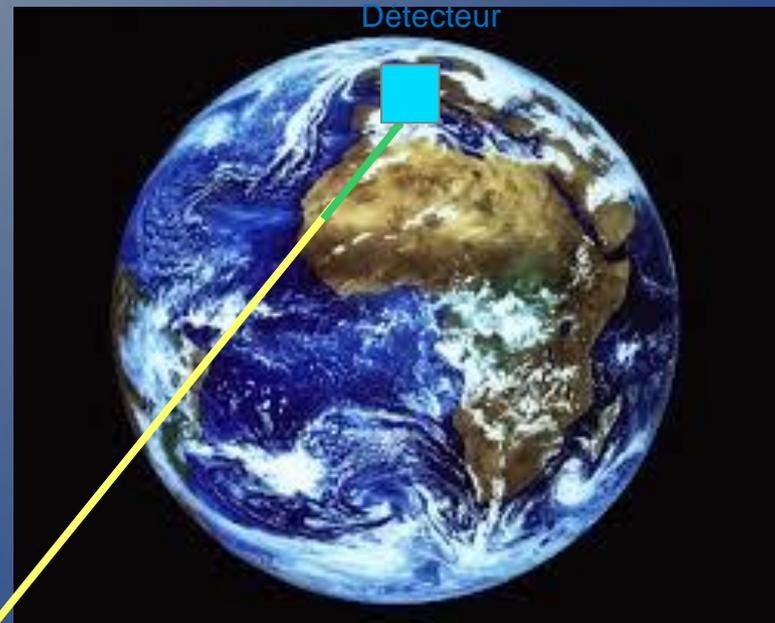


X-ray pictures of supernova  
remnants from NASA's  
Chandra Observatory  
<http://chandra.harvard.edu/>

# Pour arrêter les neutrinos...

... La Terre !

(...de temps en temps...)

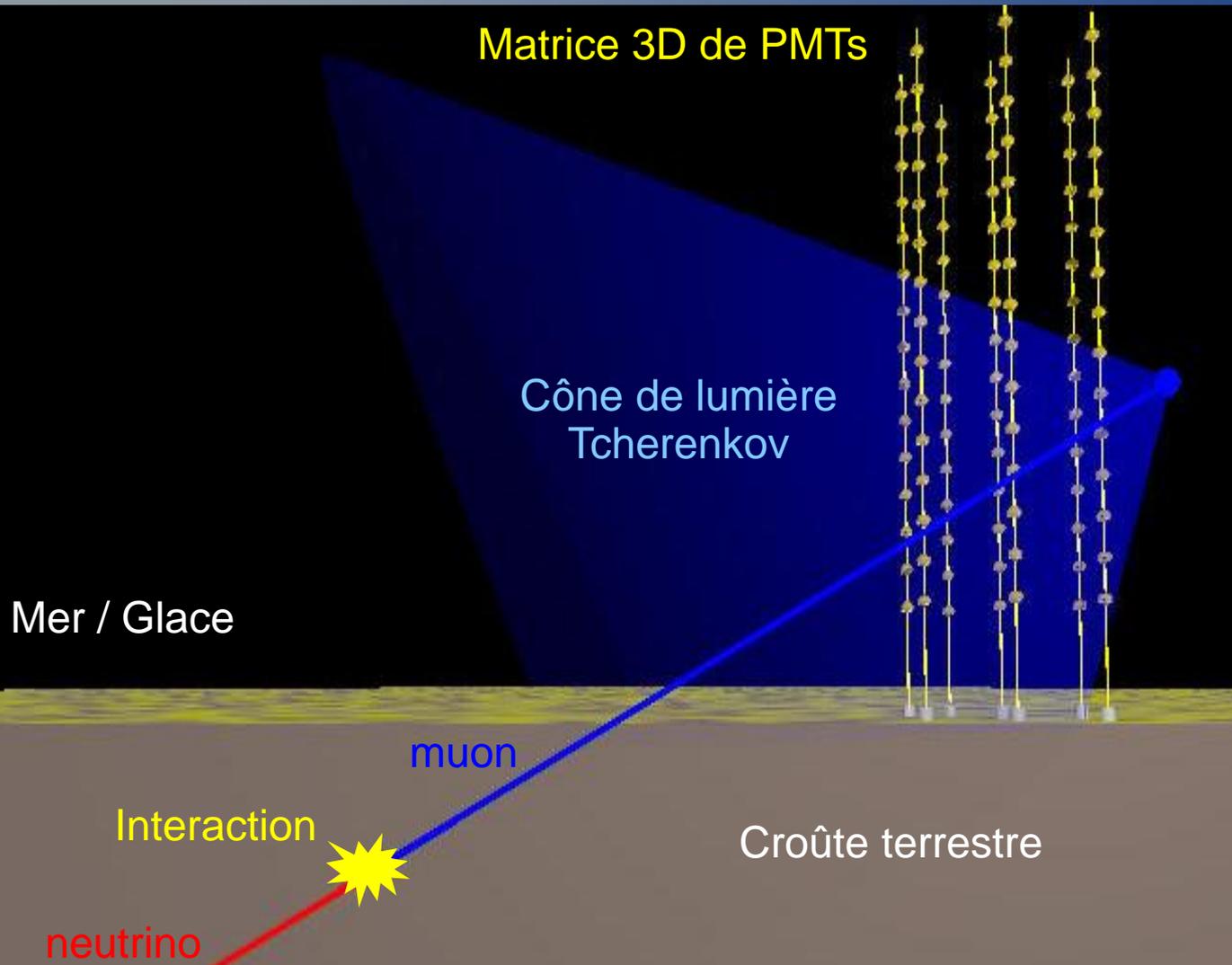


Un **neutrino** entre parfois en collision avec un noyau atomique

Il crée alors une autre particule : un **muon** (ou **electron** ou **tau**) que l'on peut essayer de détecter



# Détection indirecte des neutrinos



En traversant un milieu transparent (eau, glace, verre,...), le muon crée un cône de lumière bleutée (lumière Tcherenkov)

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

# Les Téléscopes à neutrinos dans le Monde

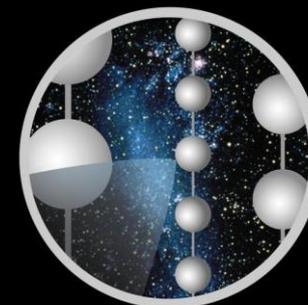
ANTARES & KM3NeT



BAIKAL



↑  
IceCube



ICECUBE



# Régions du Ciel observables par les Téléscopes à Neutrinos



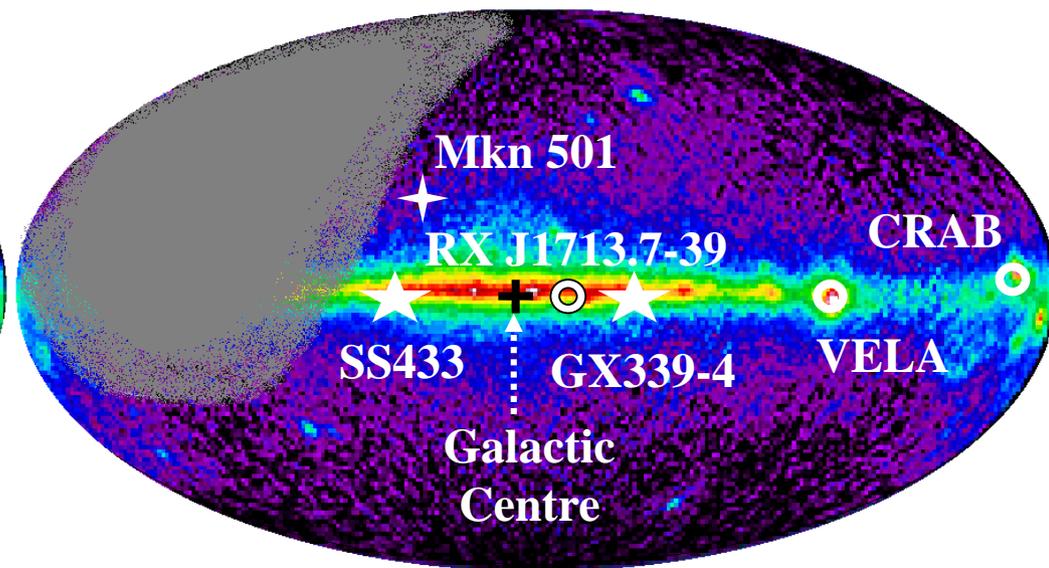
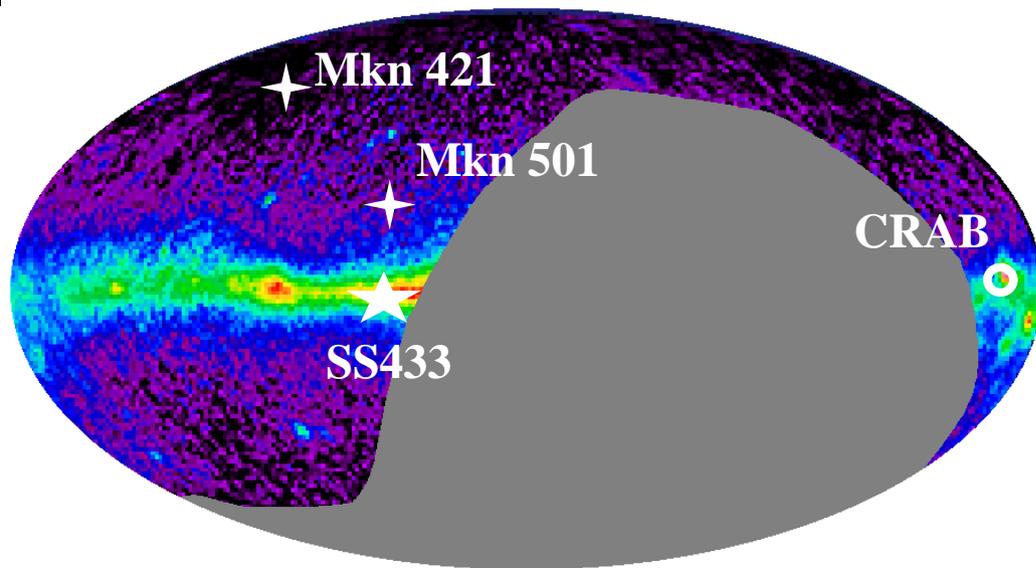
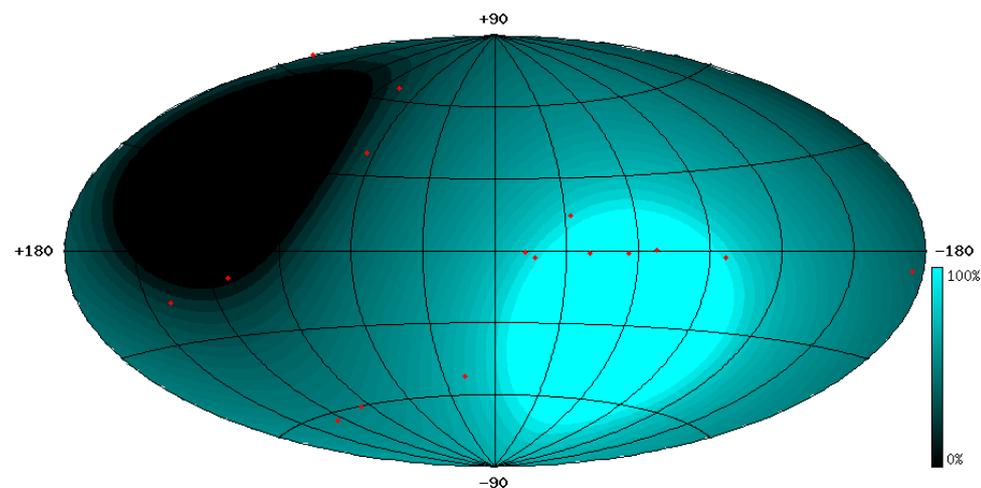
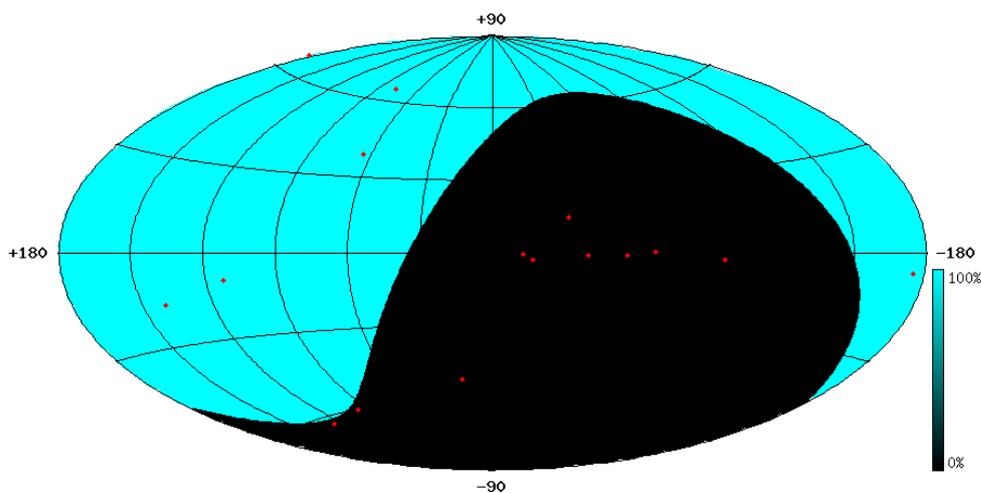
IceCube (Pôle Sud)

(glace :  $\sim 0.6^\circ$ )

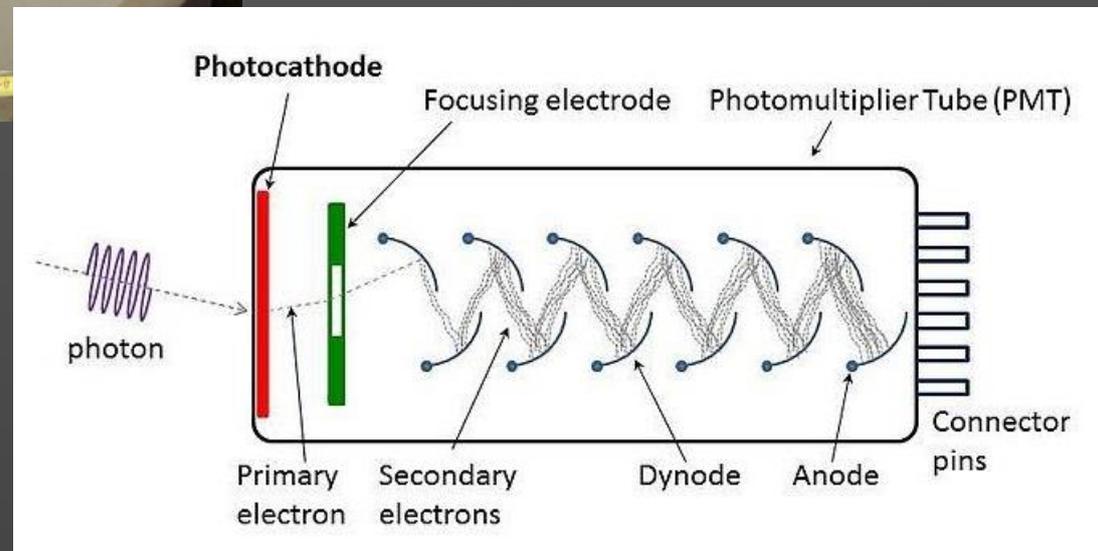
Résolution Angulaire

ANTARES/KM3 ( $43^\circ$  Nord)

(eau :  $\sim 0.2^\circ$ )

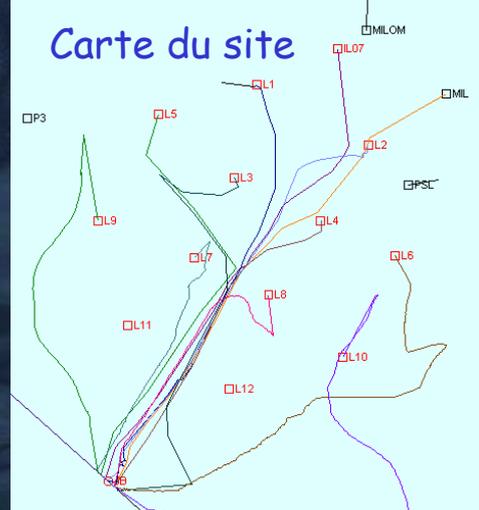


# Les yeux d'ANTARES: photomultiplicateurs



# Le Détecteur ANTARES

- 12 lignes
- 25 étages / line
- 3 PMTs / étage
- 900 PMTs



14.5 m

Bouy

Etage

350 m



Boîte de Jonction

100 m

Câble Electro-optique

~60-75 m

Profondeur : 2500m

Détecteur complet depuis Mai 2008

# Le site ANTARES

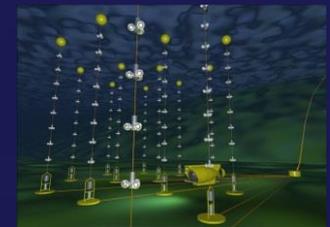


Toulon



Insitut M.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



# Le déploiement des lignes

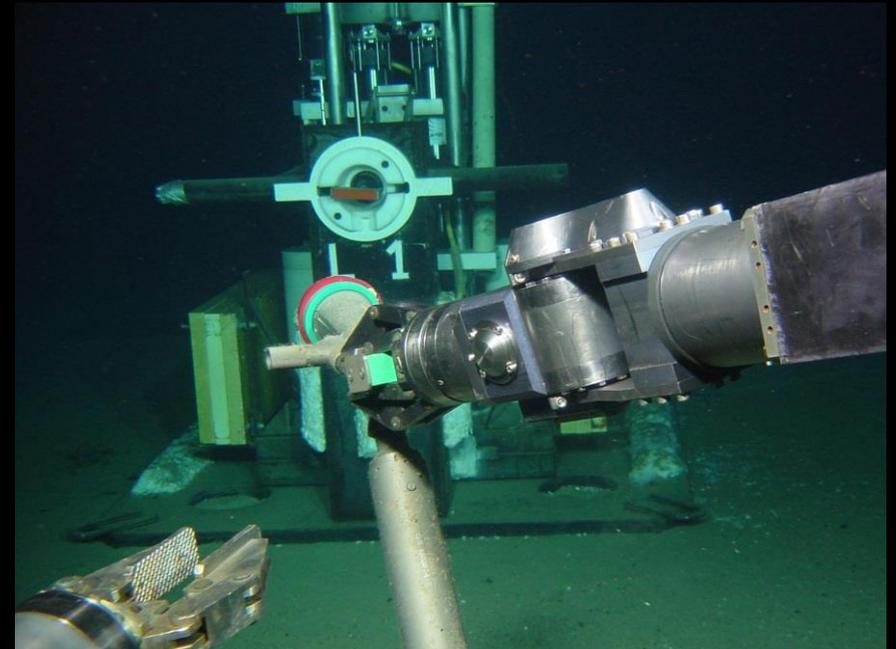


- ❖ Bateau « Castor 02 »
- ❖ Précision de 1m sur la position de la ligne au fond de l'eau.
- ❖ 7 heures d'opérations

# Connexion des lignes avec un robot sous-marin

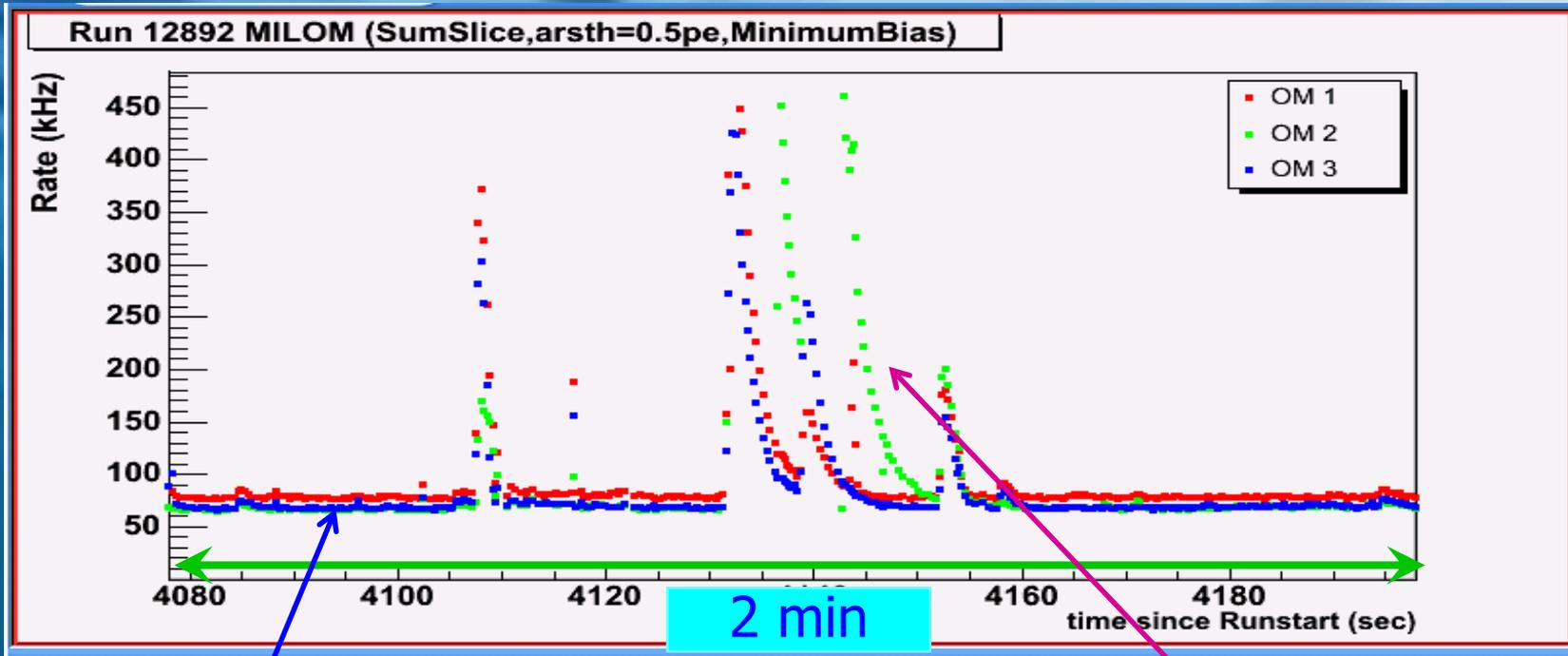


- ROV « VICTOR » de l'IFREMER
- Connecteur ODI : Prise contenant  
4 fibres optiques  
2 câbles électriques



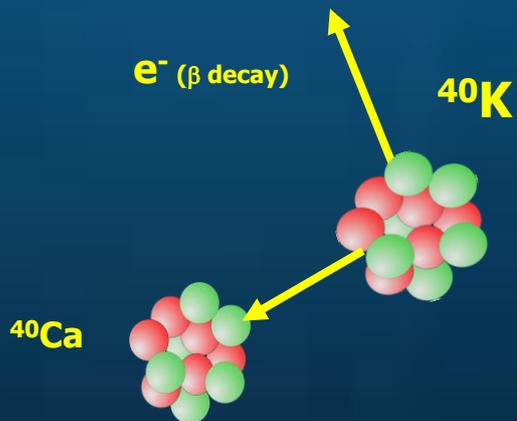


# Taux de comptage d'un Module Optique



## Ligne de base :

Radioactivité du sel marin ( $^{40}\text{K}$ )  
+ bactéries bioluminescentes



## Bursts:

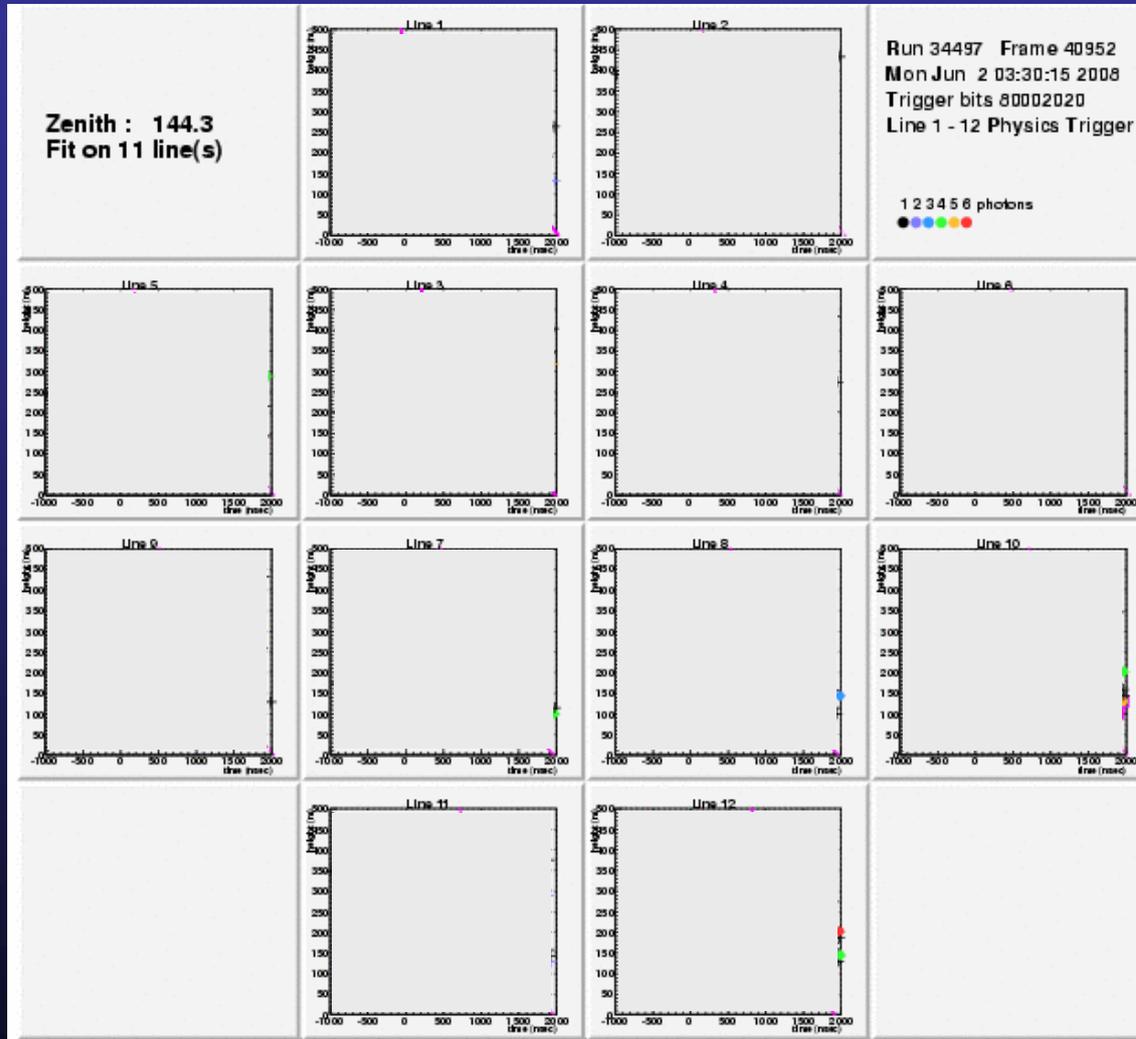
Bioluminescence d'organismes  
macroscopiques





# Exemple d'un événement « muon »

On en détecte quelques uns par seconde



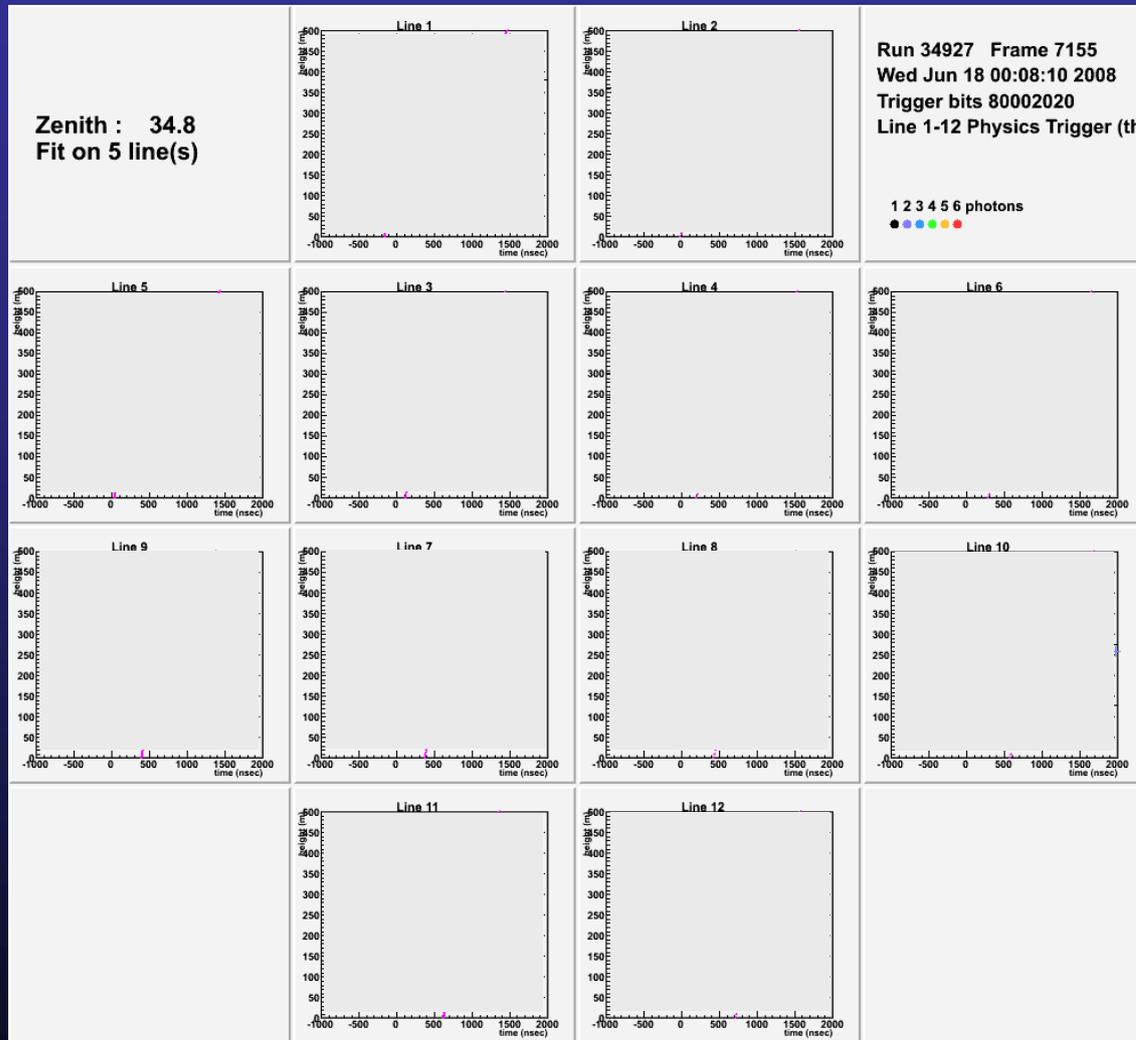
Example of a *down-going muon event*, detected over the 12 detector lines





# Exemple d'un événement « neutrino »

On en détecte quelques uns par jour



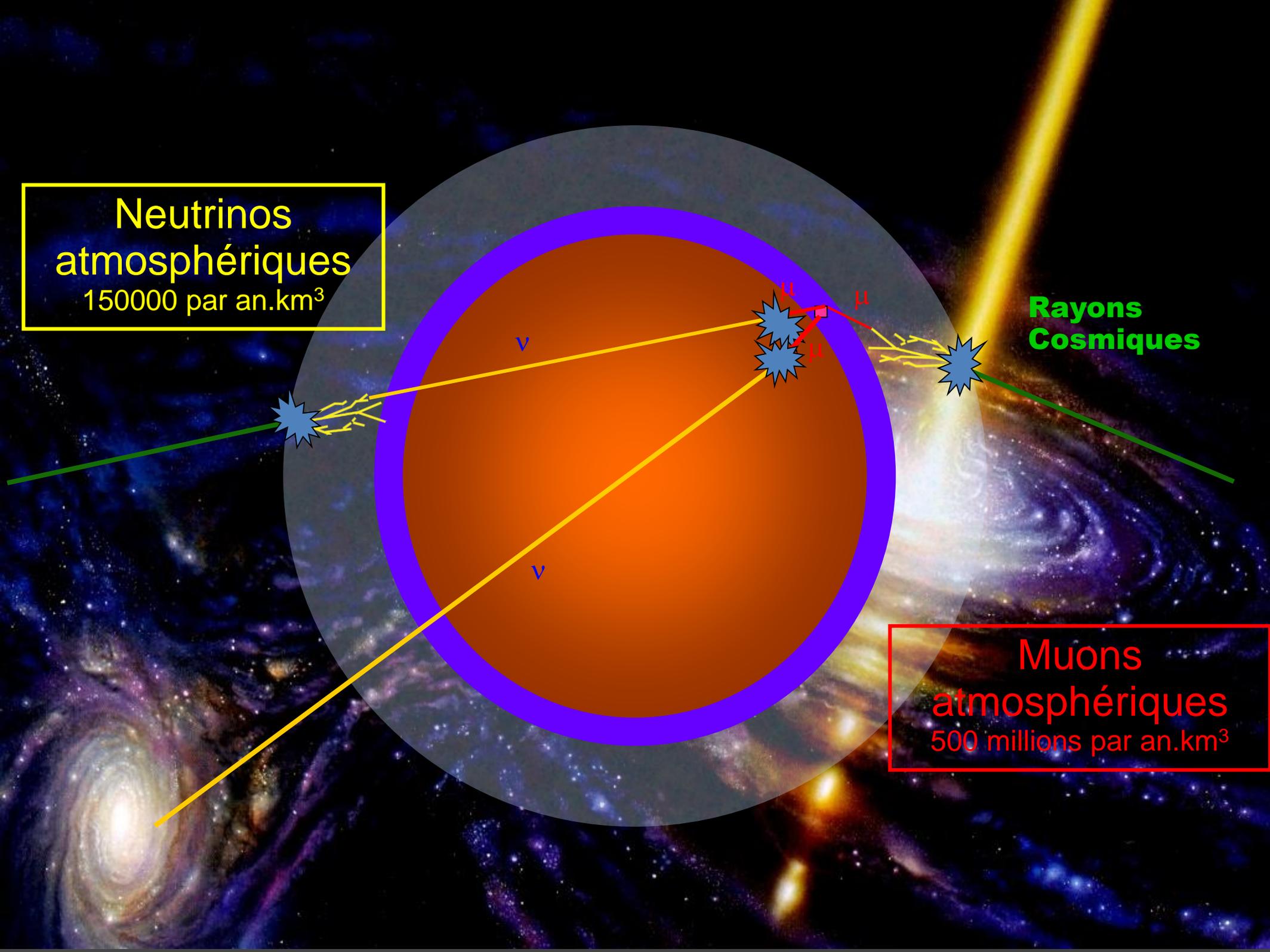
Example of an *up-going muon event* (i.e. a neutrino event) detected by 6/12 detector lines



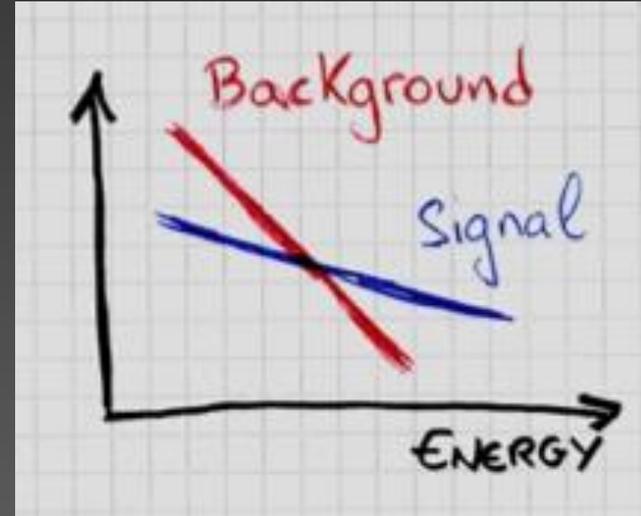
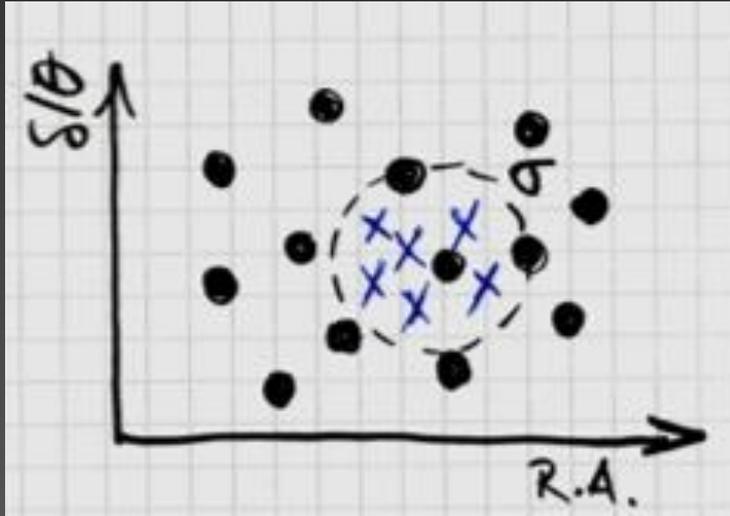
**Neutrinos  
atmosphériques**  
150000 par an.km<sup>3</sup>

**Rayons  
Cosmiques**

**Muons  
atmosphériques**  
500 millions par an.km<sup>3</sup>



# Signal vs Bruit de fond



## Suppression du bruit de fond:

- muon atmosphérique avec la qualité de la reconstruction
- neutrino atmosphérique: isotrope + faible énergie

## Signal:

- distribution piquée pour une source et à plus haute énergie



Source ponctuelle

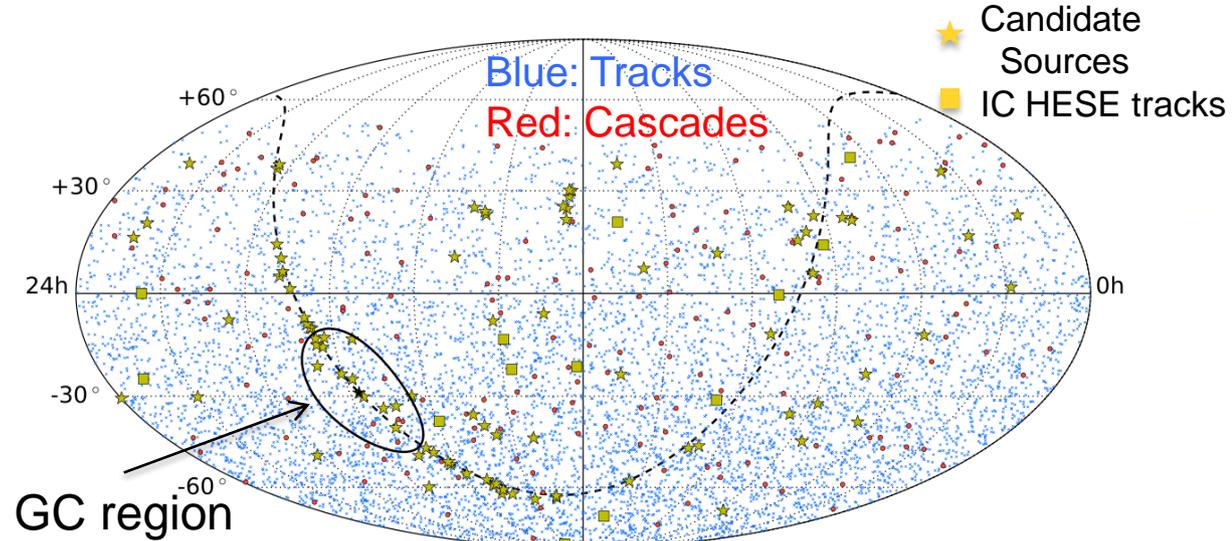


Flux diffus



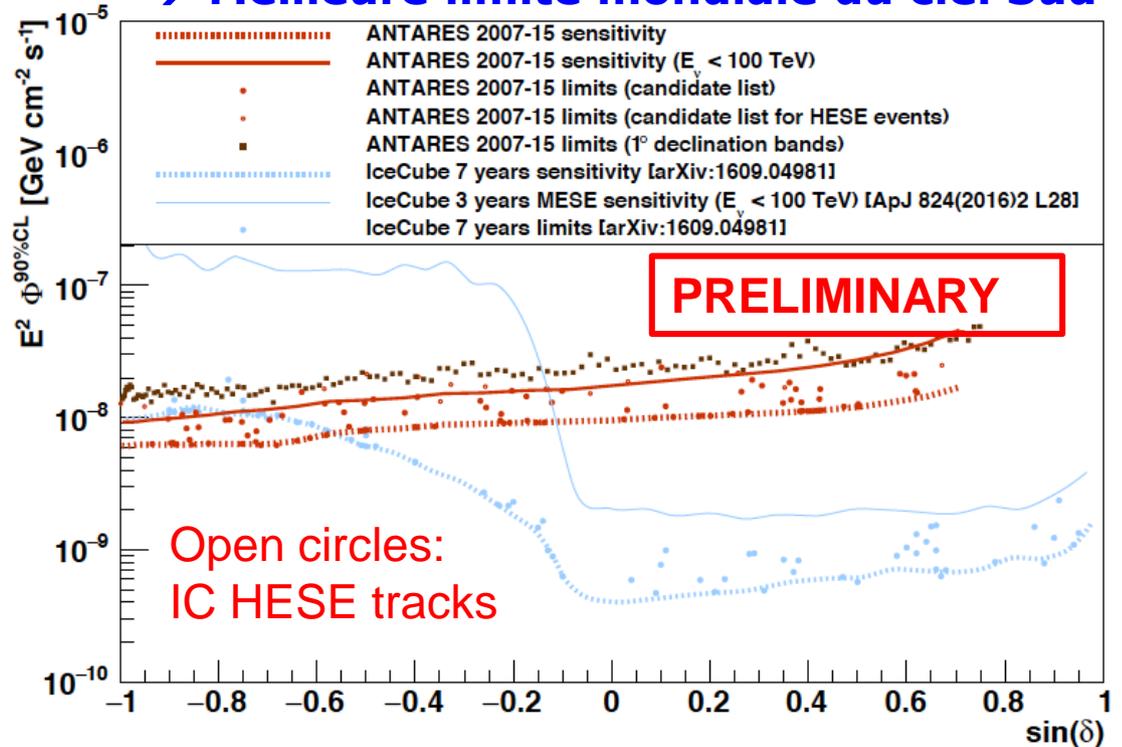
# Le ciel en neutrinos avec ANTARES

- 2007-2015 (2424 days):  
7629 tracks, 180 cascades
- Unbinned all-sky search
- 103 Candidate sources  
including 13 IceCube HESE tracks  
and HAWC sources



Analyse des données 2007-2015  
→ Meilleure limite mondiale du ciel Sud

- No significant excess
- Best limits for part of Southern Hemisphere
- Excellent sensitivity for  $E_\nu < 100$  TeV
- Results to be combined with latest IC search



# Vers une astronomie multi-messagers...



→ Recherche de signaux d'événements transitoires de sources astrophysiques catastrophiques (Sursauts Gamma, SuperNovae, flares de Noyaux Actifs de Galaxie, ...) avec des Neutrinos de Haute Energie, des Photons Radio/Optical/X/ $\gamma$ , des Rayons Cosmiques, des Ondes Gravitationnelles,...



GeV-TeV  $\gamma$ -rays  
Fermi / HESS...

- JCAP 03(2013) 006
- A&A 559 (2013) A9
- JCAP 05 (2014) 001



HE neutrinos

UHECR  
Auger

- APJ 774 (2013) 19

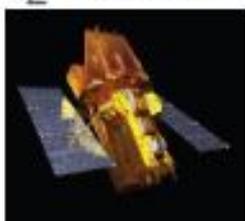


Optic / X-ray  
TAROT,  
ROTSE / Swift,  
ZADKO

- APP 36 (2012) 204
- A&A 559 (2013) A9

Gravitational  
Waves  
Virgo / Ligo

- JCAP 06 (2013) 008





# ANTARES Multi-Messengers Analyses



SWIFT



Maxi



Fermi



Ligo

Milagro



HAWK



TA

HAWK



Virgo

ANTARES



HESS



Auger



MWA



Parkes

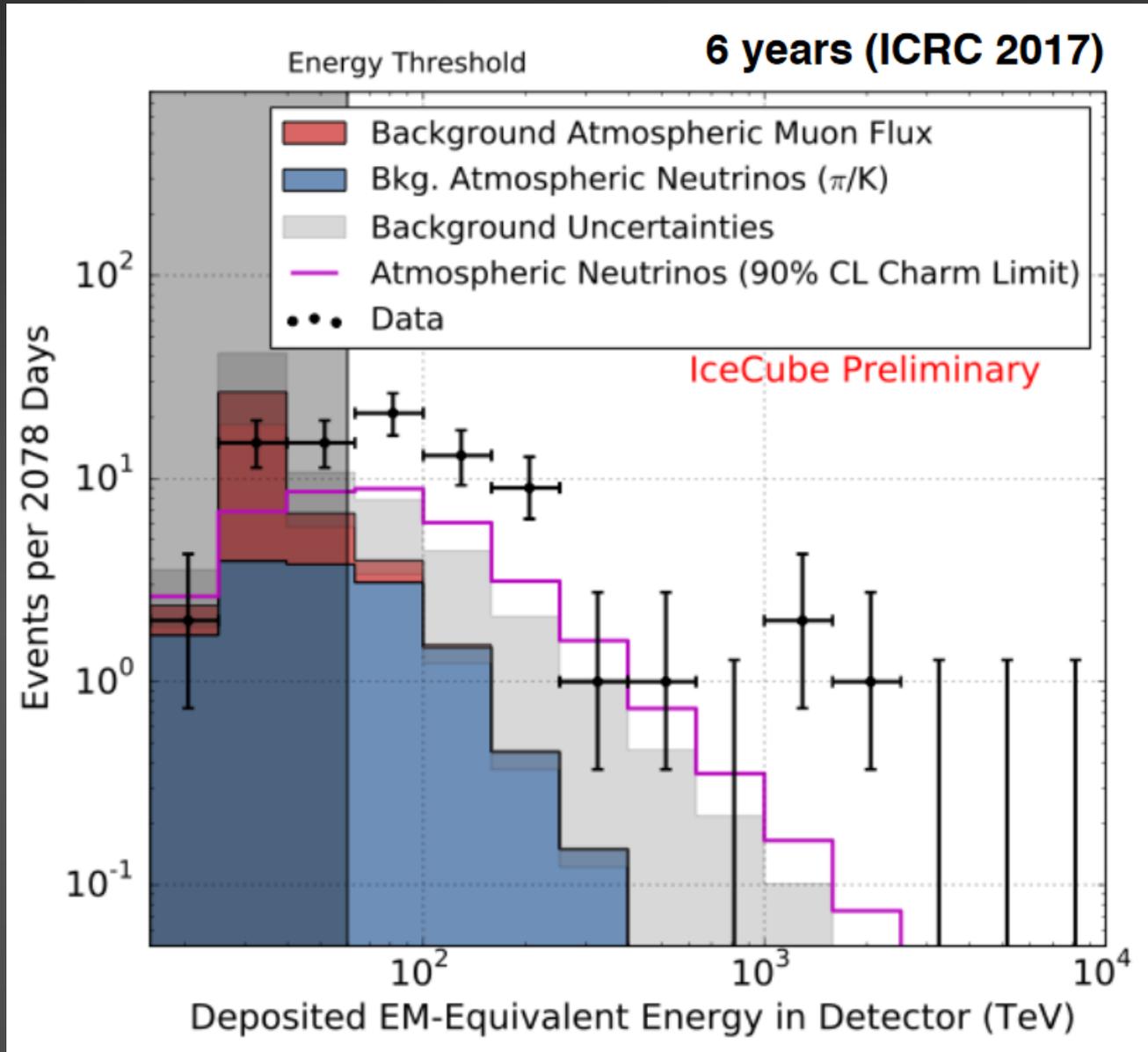


Utmost

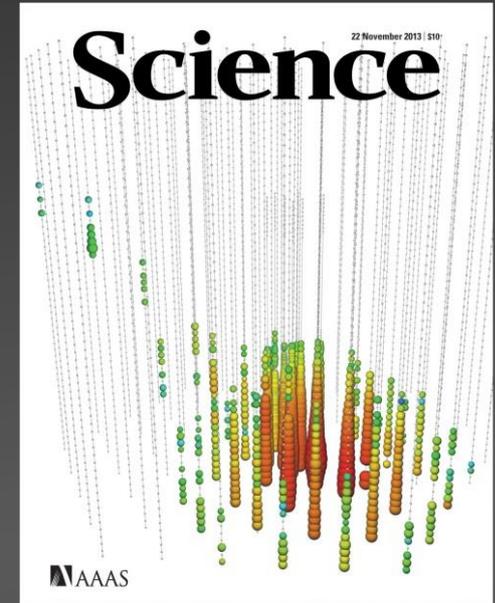


IceCube

# IceCube : 1er signal de neutrinos cosmiques !!



82 événements en 6 ans

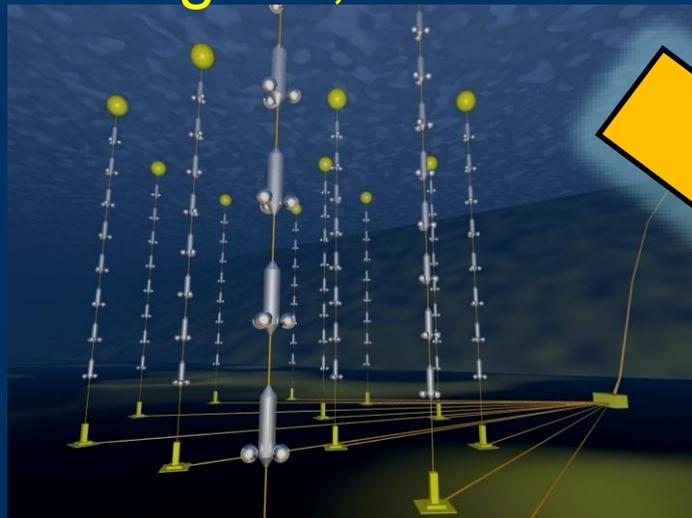


Flux très faible  
→ doit être étudié  
avec un détecteur  
de taille multi-km<sup>3</sup>

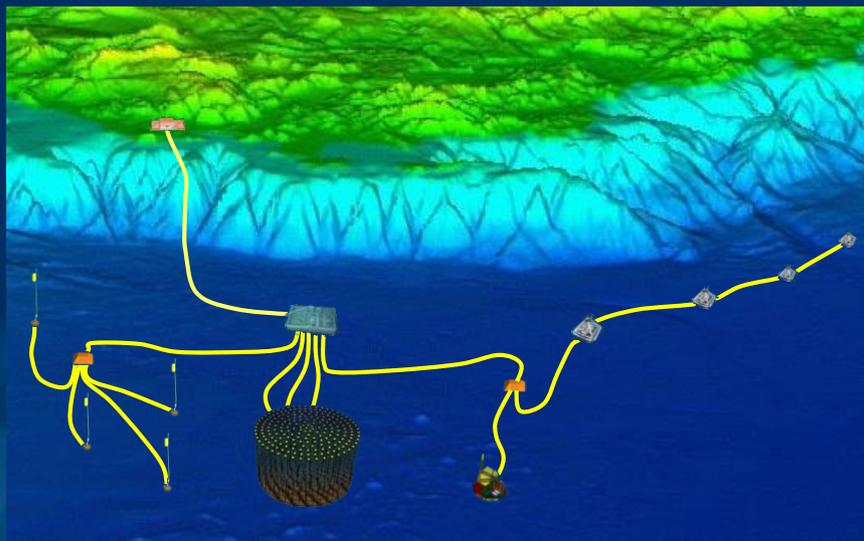
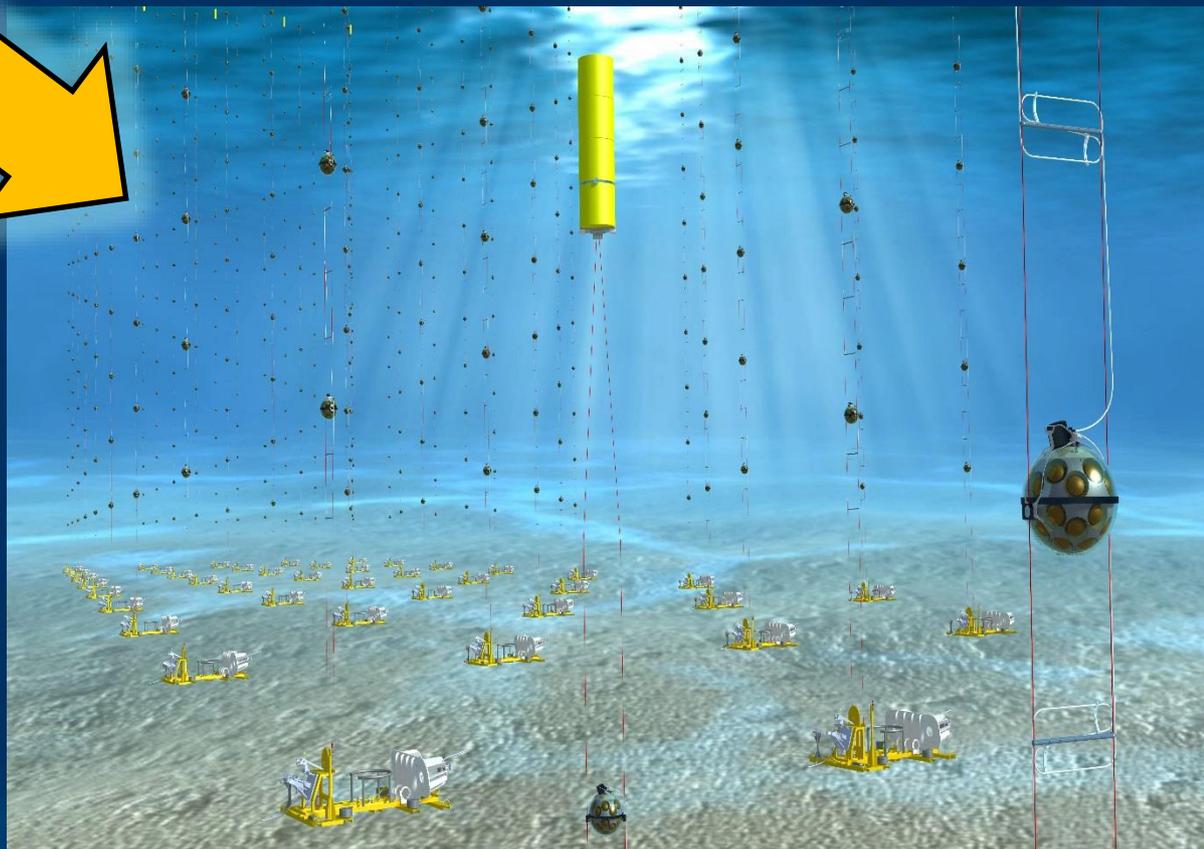


# Le Télescope à neutrinos KM3NeT

12 lignes, 900 OMs

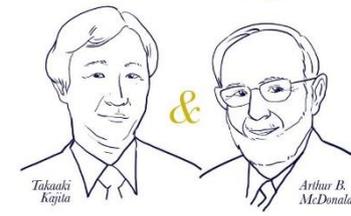


~700 lignes, ~12 000 OMs



Observatoire multidisciplinaire permanent en mer profonde

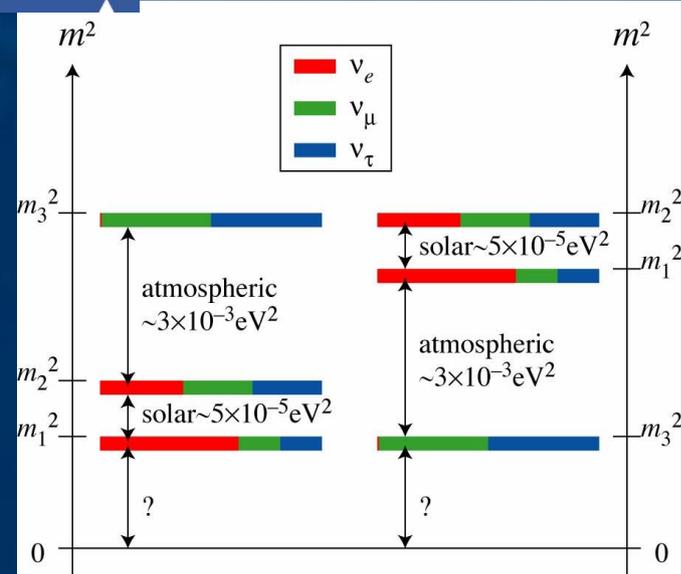
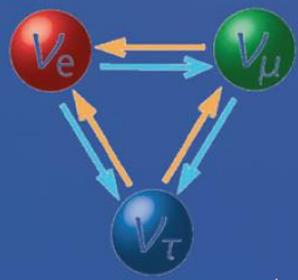
Détecteur installé sur 3 sites profonds en Mer Méditerranée au large de Toulon (France), Sicile et Grèce



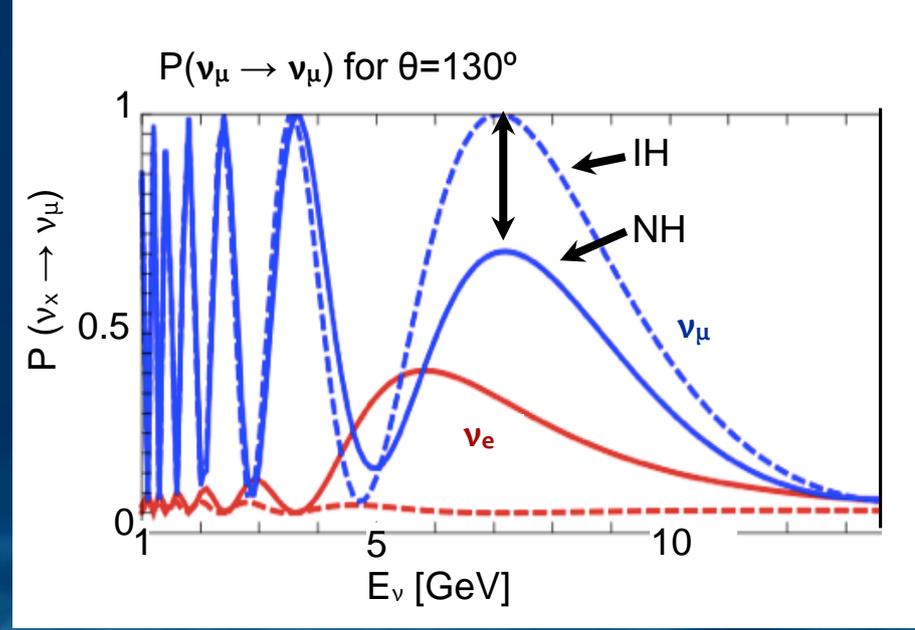
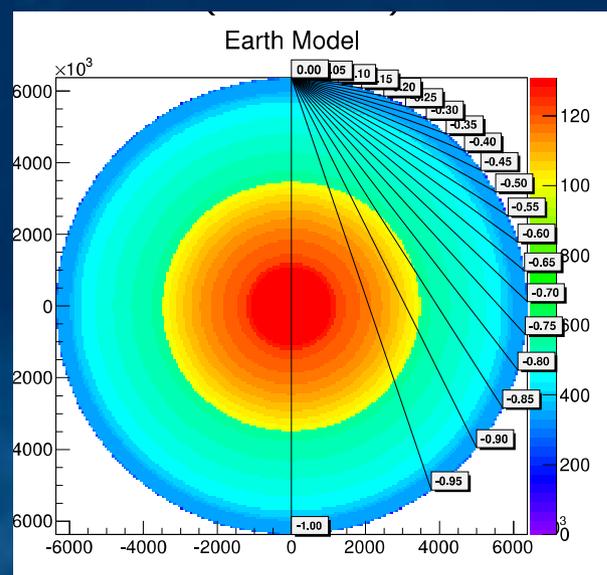
NEUTRINO OSCILLATIONS  
The discovery of these oscillations shows that neutrinos have mass.



# Mesure de la Hiérarchie de Masse des Neutrinos avec les oscillations des neutrinos atmosphériques



Paramètre fondamental de la nature des neutrinos toujours inconnu !!

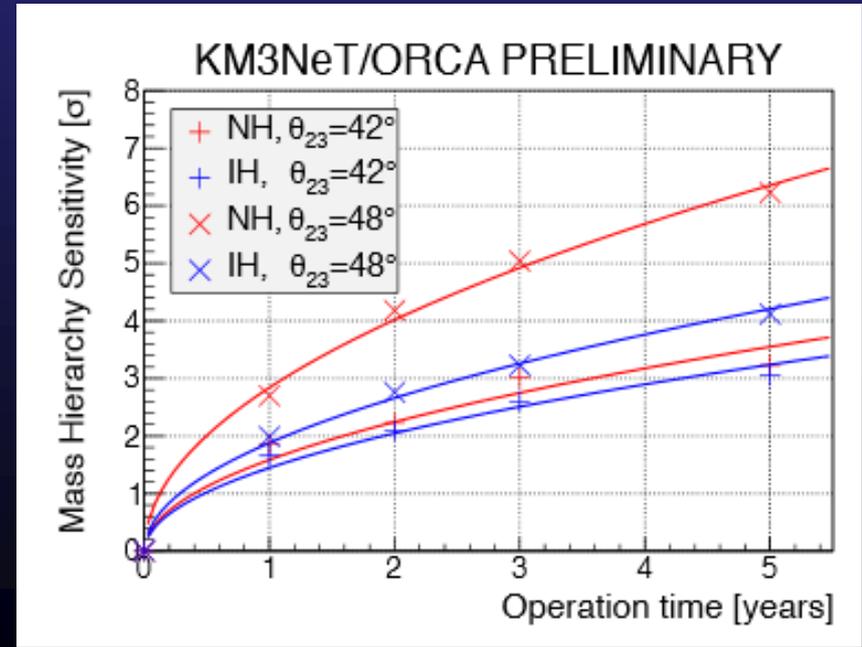
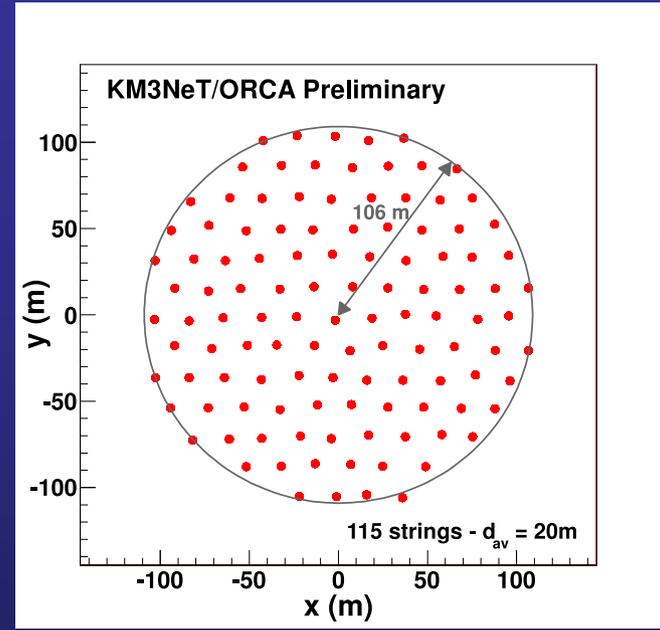
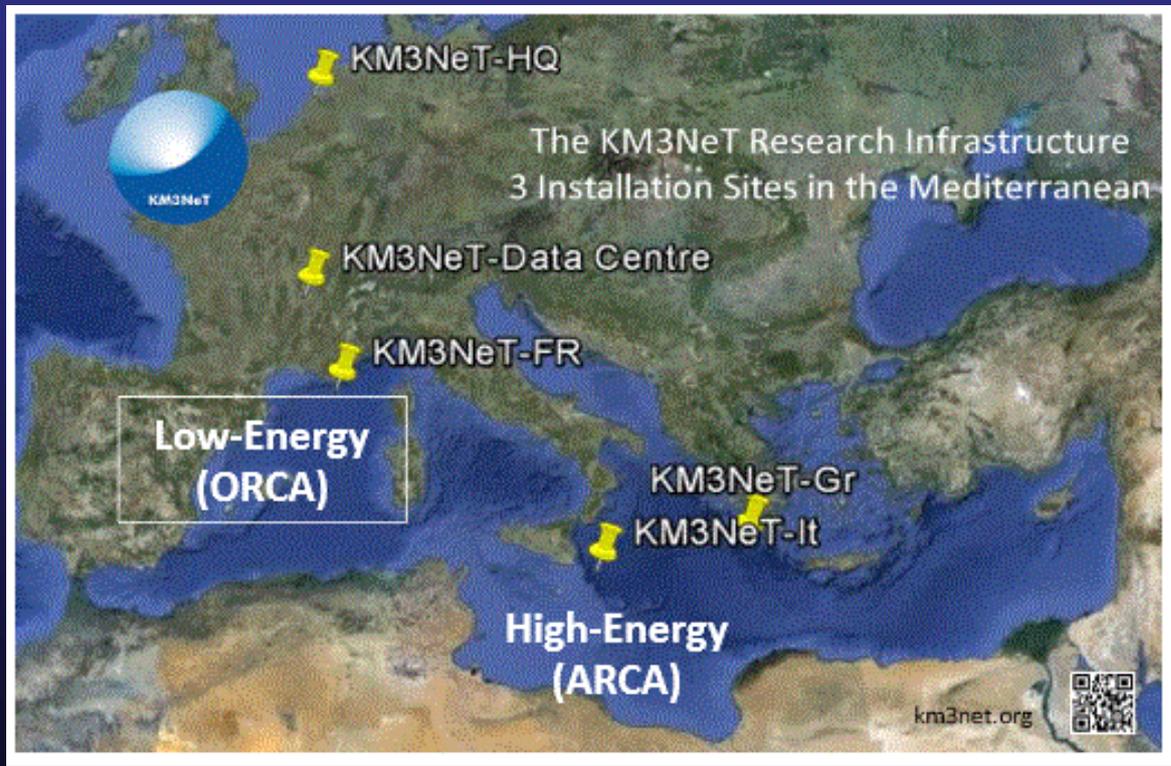


Etudes précise du flux des neutrinos atmosphériques de quelques GeV interagissant dans la Terre



# KM3NeT-ORCA: un détecteur dense pour mesurer la hiérarchie de masse des neutrinos

→ Construction d'un détecteur dense sur le site de Toulon (**ORCA**)  
(distances verticales entre DOMs ~9 m ;  
distances horizontales entre lignes ~20m )



Amélioration de la précision des paramètres de mélange des neutrinos  $\Delta M^2$  and  $\theta_{23}$



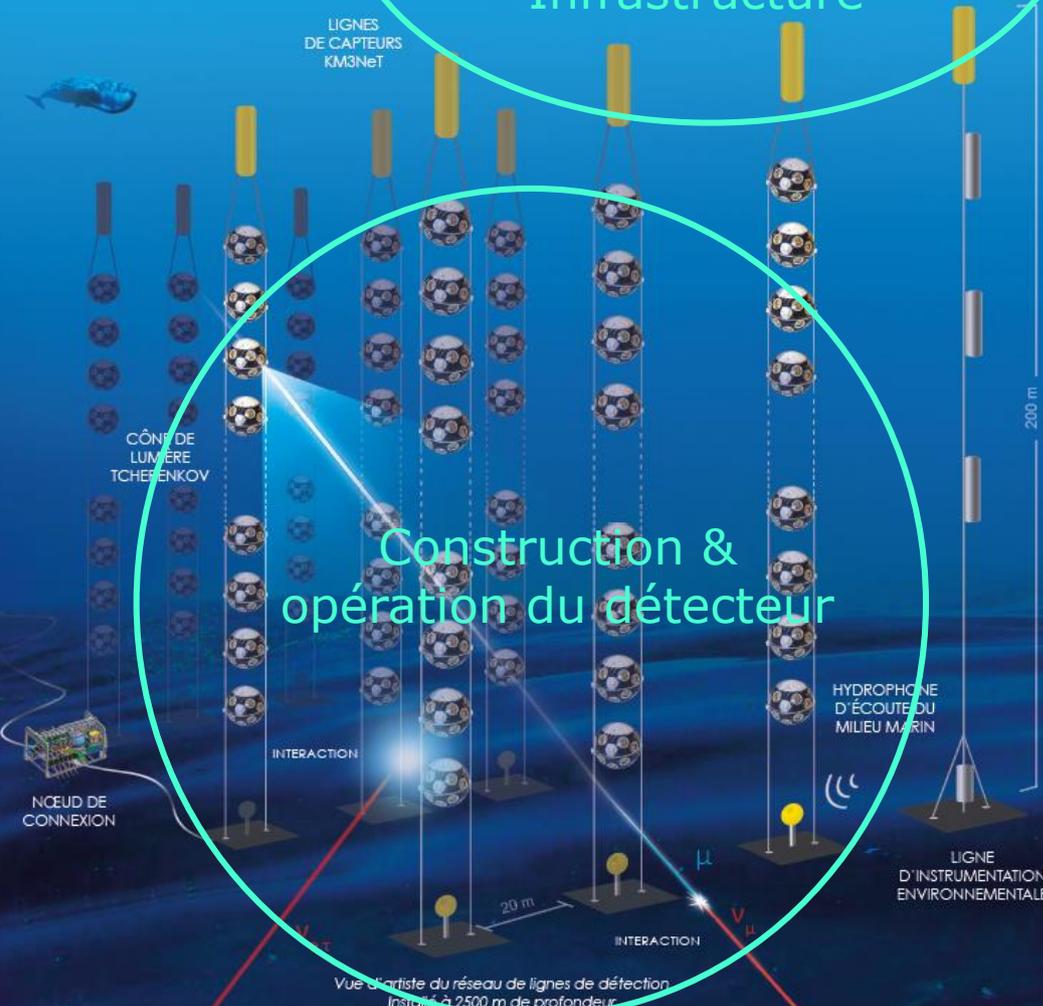
## Infrastructure



## Opérations marines

### UNE NOUVELLE FAÇON D'OBSERVER LES ABYSSES

Les dispositifs installés de manière permanente au fond de la mer permettent d'obtenir des données en continu et en temps réel pour étudier l'environnement sous-marin. Cette possibilité ouvre des opportunités sans précédent aux sciences environnementales pour, par exemple, étudier l'évolution du climat et de la circulation océanique, la faune des abysses en particulier les cétacés, la biodiversité, la géodynamique du bassin Ligurien, les risques sismiques et les tsunamis.



## Construction & opération du détecteur



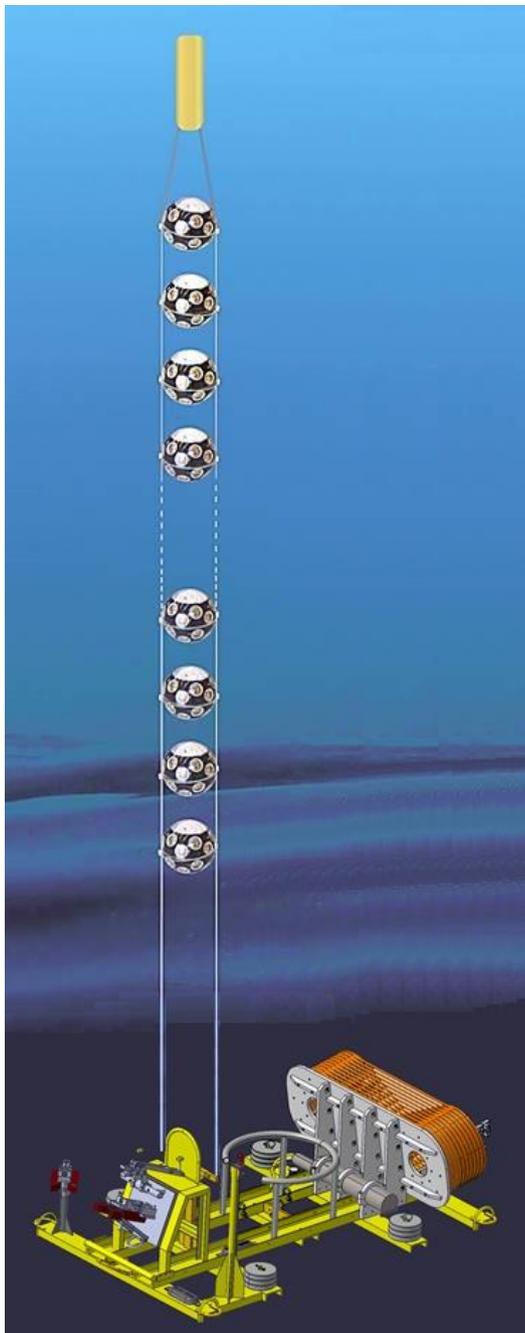
## Instrumentation pluridisciplinaire

Vue d'artiste du réseau de lignes de détection installé à 2500 m de profondeur





# La ligne de détection KM3NeT (DU)



## *Technologie unique pour ORCA et ARCA*

- Bouée de tête
- 2 câbles porteurs en fibres synthétiques  
(diamètre 4 mm, pré tensionnés)
- Câble électro-optique en équpression  
(diamètre 7 mm, 24 fibres, 2 conducteurs)
- 18 étages avec chacun un DOM
- Châssis d'ancrage en pied de ligne

	<b>ORCA</b>	<b>ARCA</b>
Distance vertical entre DOMs:	9 m	36 m
Hauteur de ligne:	200 m	800 m
Distance horizontale entre lignes:	20 m	90 m



# Le capteur de lumière KM3NeT (DOM)



Photomultiplicateurs 3"  
*Hamamatsu*



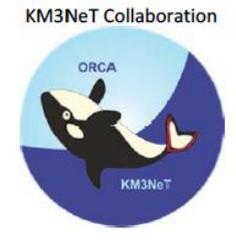
← ~0,4 m →

- Sphère avec 31 PMs de 3 pouces
- Electronique de lecture intégrée
- Grand champ de vision
- Comptage de photons
- Information directionnelle
- Réjection de la bioluminescence
- Réduction de coûts vs ANTARES

Etage ANTARES



Photomultiplicateur 10"  
*Hamamatsu*



# Construction du détecteur KM3NeT ORCA

Detector Unit : ligne verticale équipée de 18 DOMs espacés de 9m



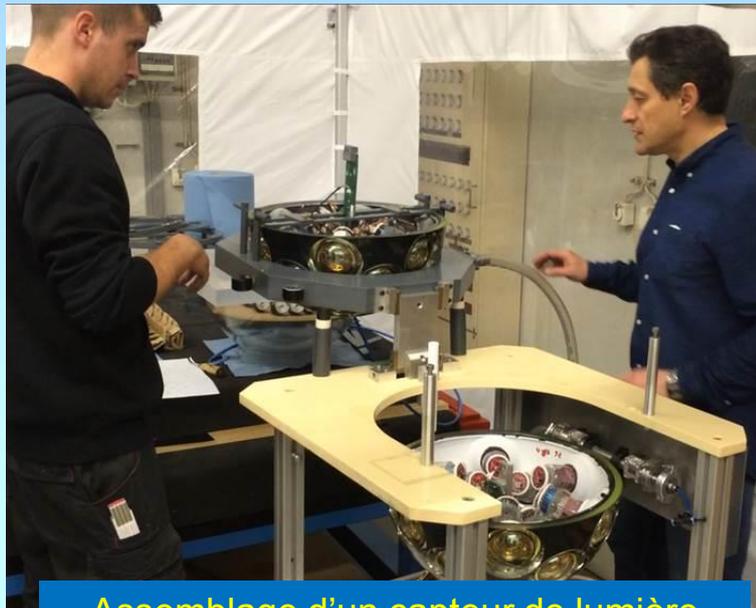
Dépliage autonome



Intégration DU au CPPM pour déploiement



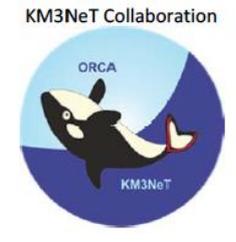
Calibration DU en salle noire au CPPM



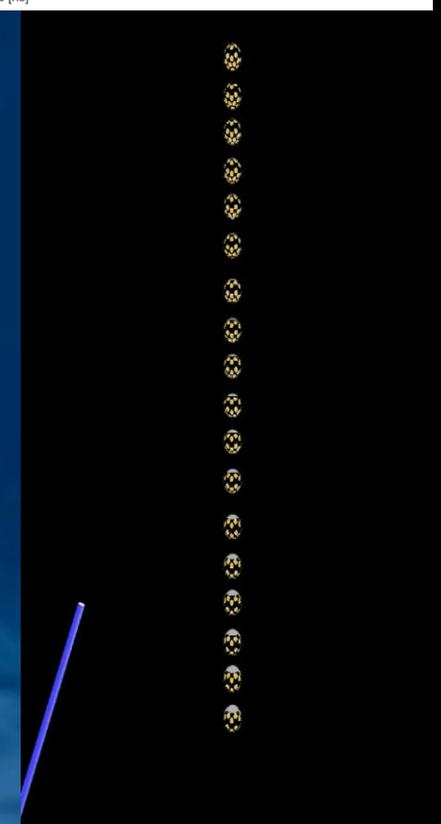
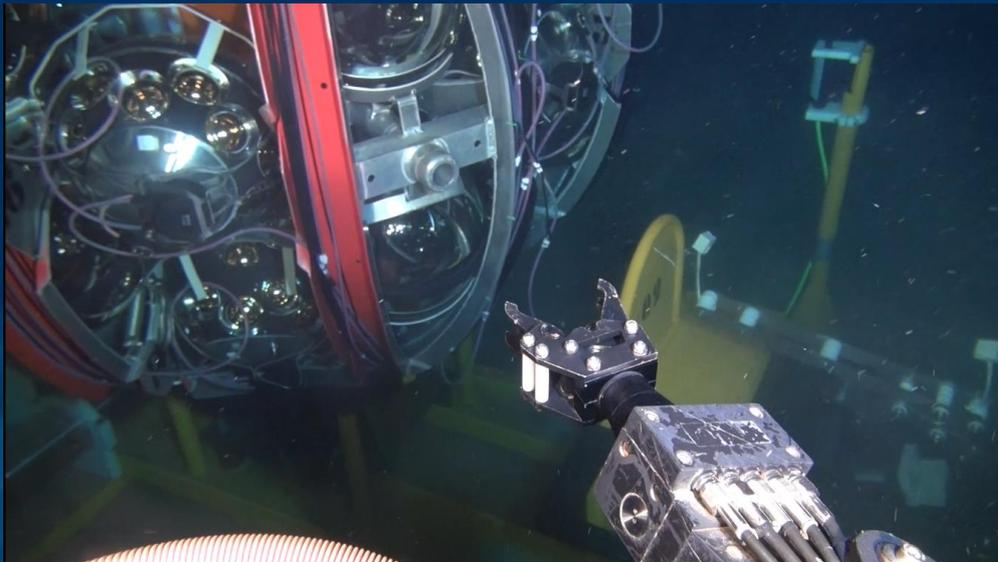
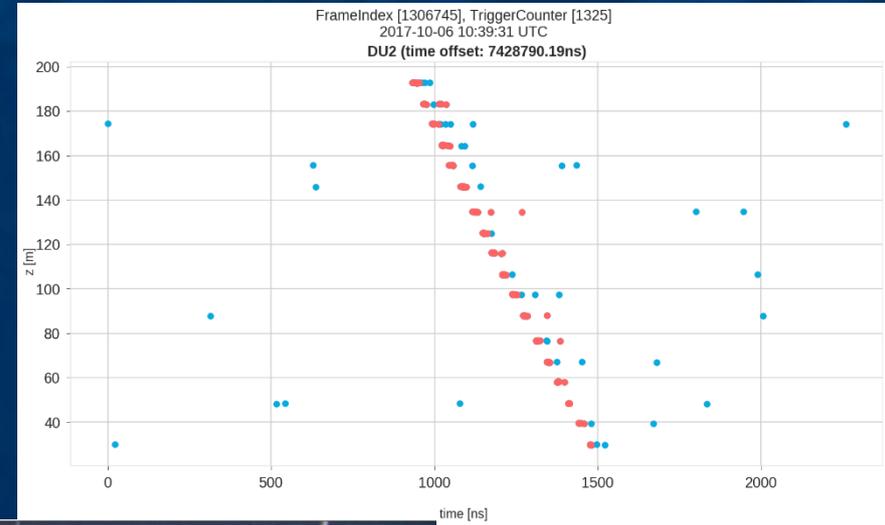
Assemblage d'un capteur de lumière



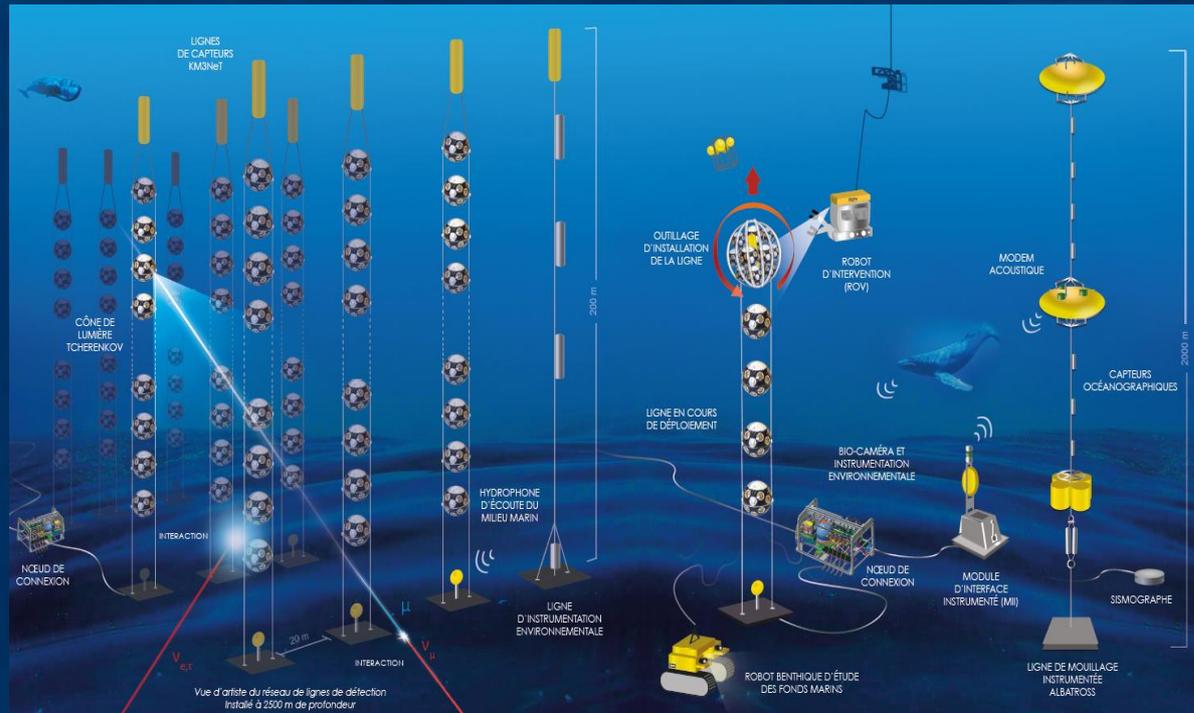
Tests du capteur de lumière



# La première ligne KM3NeT-ORCA

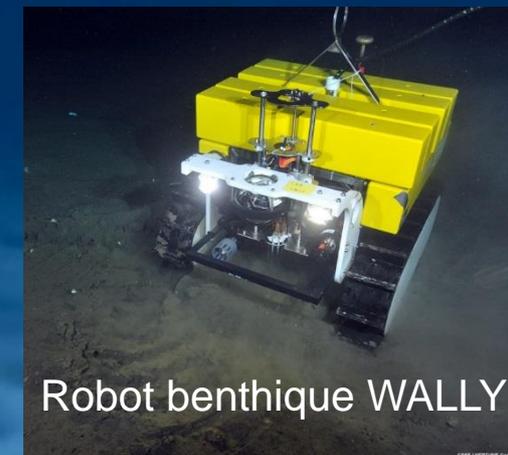


1<sup>ère</sup> ligne en opération entre septembre et décembre 2017



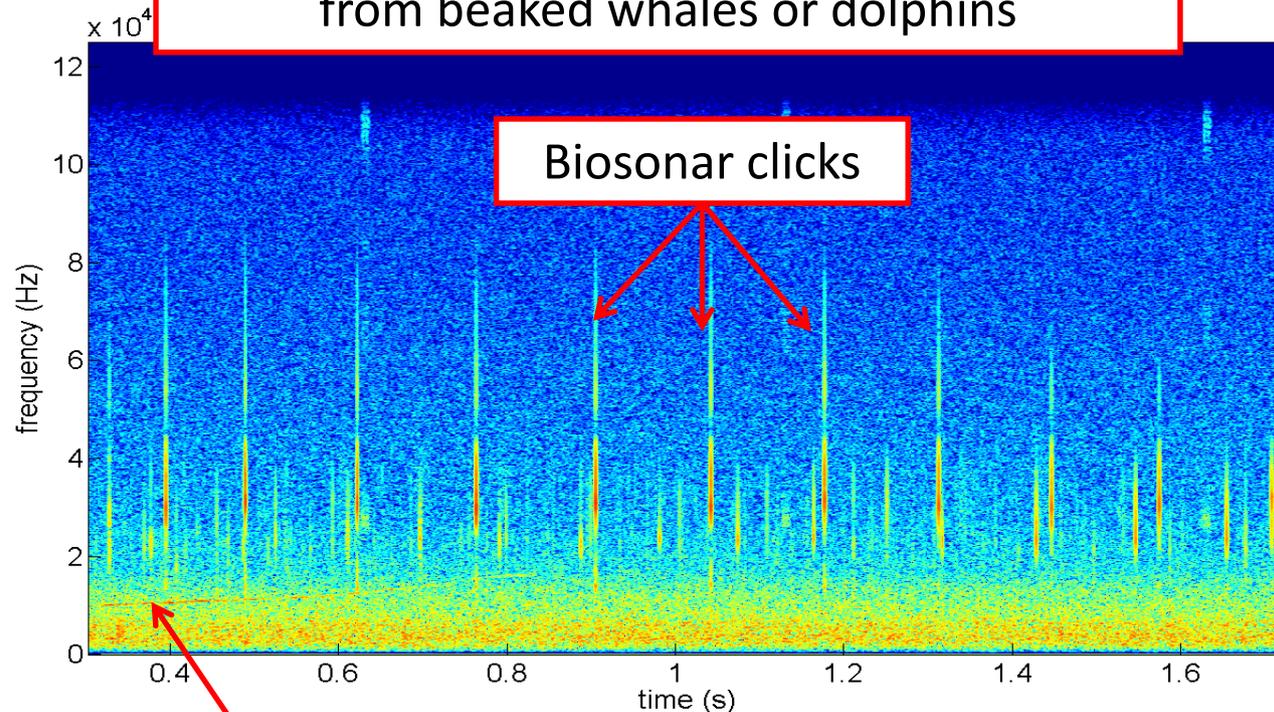
- Astronomie
- Physique des neutrinos
- Océanographie physico-chimique
- Biologie marine
- Bioacoustique
- Bioluminescence
- Microbiologie
- Ecologie, biogéochimie
- Sismologie
- Environnement
- Energies renouvelables
- Acoustique sous-marine
- R&D technologies sous-marines
- ...

## Dauphins (Globicéphales) observés sur le site ANTARES



# Etudes bioacoustiques des cétacés

Dense series of ultrasonic clicks (biosonar)  
from beaked whales or dolphins



Détection et localisation des sources bioacoustiques (cétacés, ...) en utilisant les hydrophones intégrés sur les détecteurs ANTARES et KM3NeT-ORCA

- Algorithmes temps-réels de **classifications des cétacés** (recensement, suivi,...)
- Mesure et suivi temporel de la **pollution acoustique** sous-marine (trafic maritime,...)
- **Impact** de la pollution acoustique sur la **présence des cétacés**
- **Alertes anti-collisions** : information temps réels de la présence de cétacés au CrossMed
- **Communication** grands publics



# Résumé & Perspectives



- Après des décennies de rêve et R&D intensif, l'Astronomie Neutrino est en train d'ouvrir **une nouvelle fenêtre sur l'Univers**
- ANTARES enregistre chaque jour de nouveaux évts neutrinos  
→ ~10000 neutrinos détectés à ce jour !  
→ des analyses sont en progrès pour rechercher **l'origine des Rayons Cosmiques de HE et découvrir la Matière Noire**
- La construction du télescope à neutrinos de seconde génération KM3NeT, basé sur une technologie améliorée, **démarre !**  
→ il devrait fournir des **résultats fondamentaux** dans la prochaine décennie sur :
  - L'Astronomie Neutrino (ARCA)
  - Les propriétés fondamentales des neutrinos (ORCA)
- L'infrastructure sous-marine MEUST/NUMerEnv offre un potentiel unique de recherches **pluridisciplinaires** très riches en mer profonde

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

