



ANTARES et KM3NeT

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

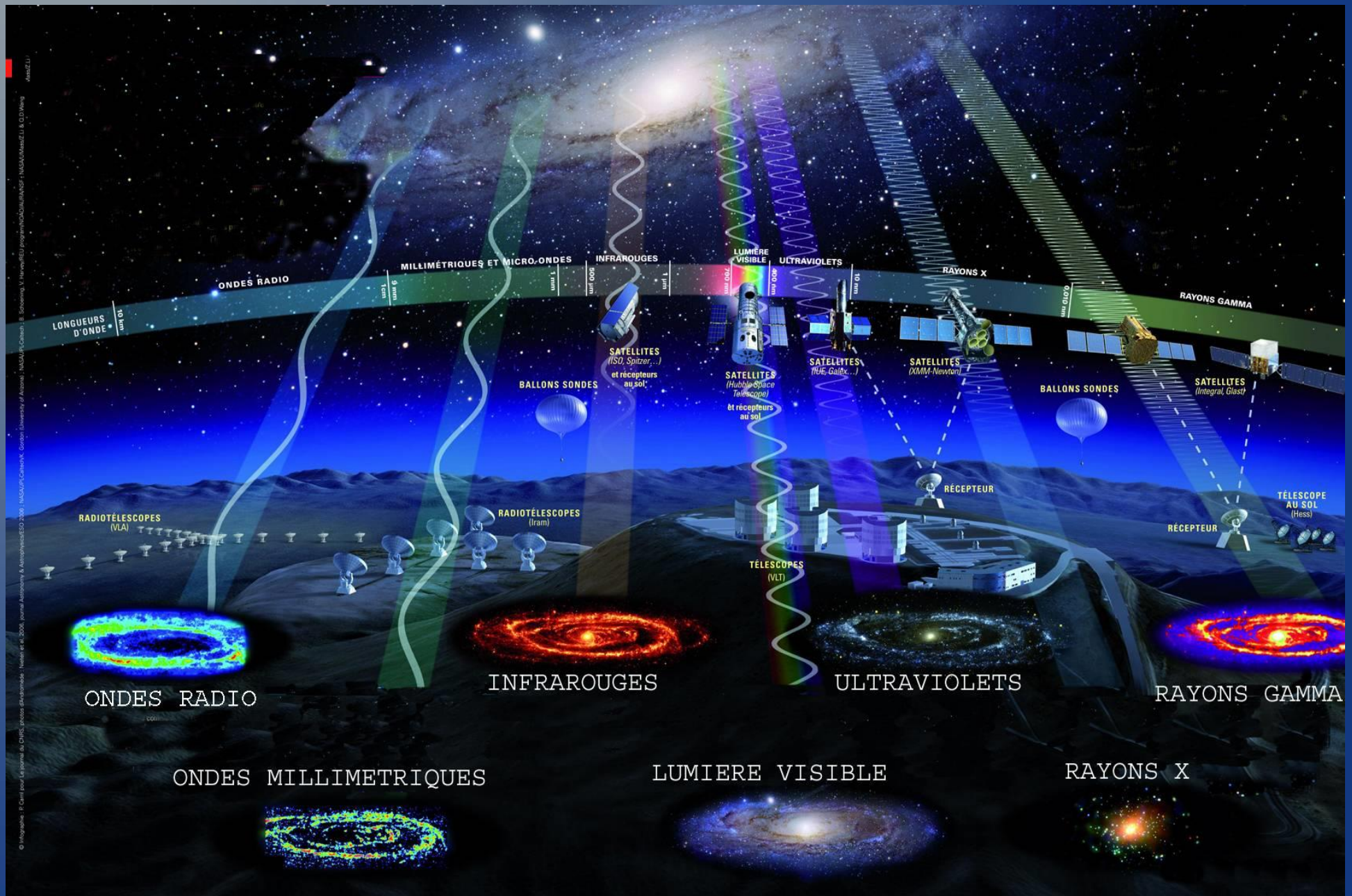
Vincent BERTIN
Centre de Physique des Particules de Marseille



Planet Océan à Montpellier – 6 juin 2024



Astronomie multi-longueurs d'onde

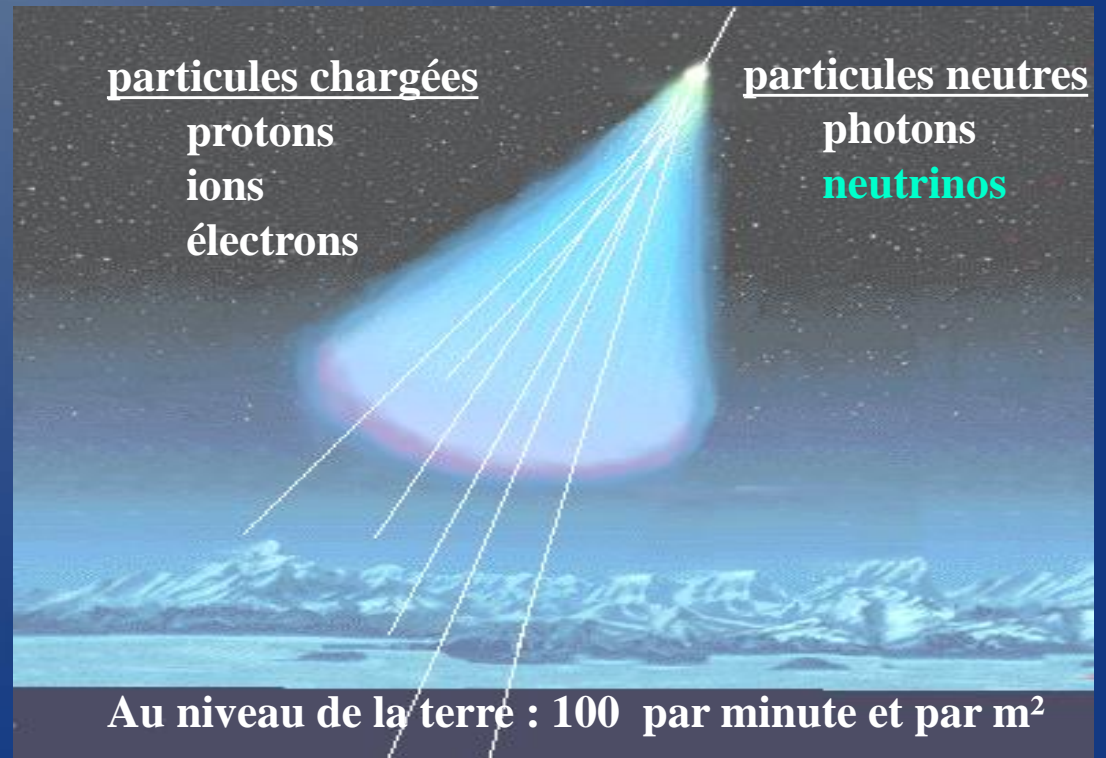


Les rayons cosmiques



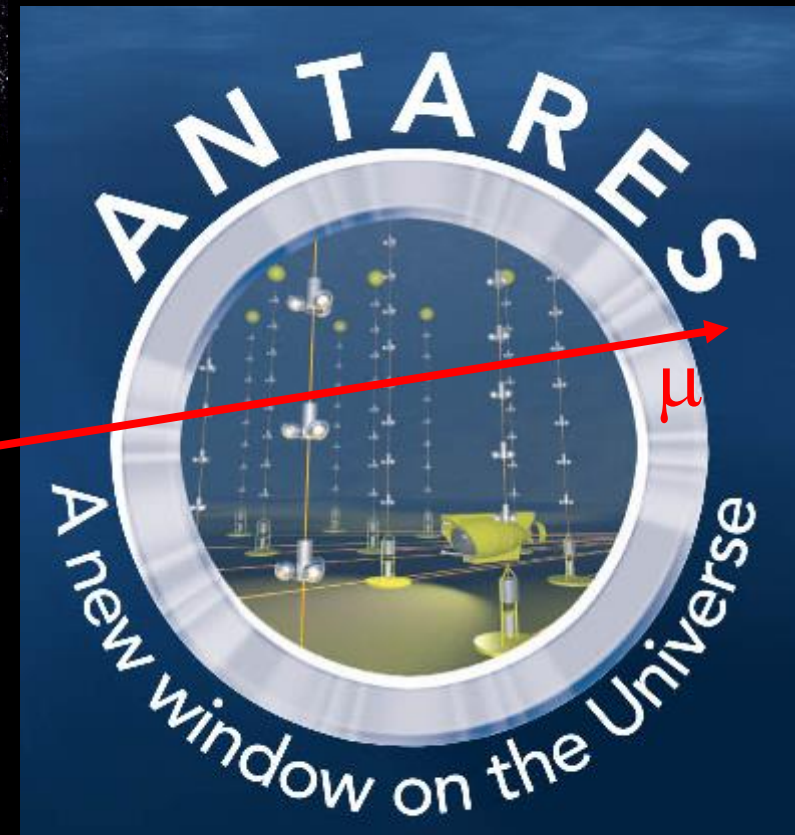
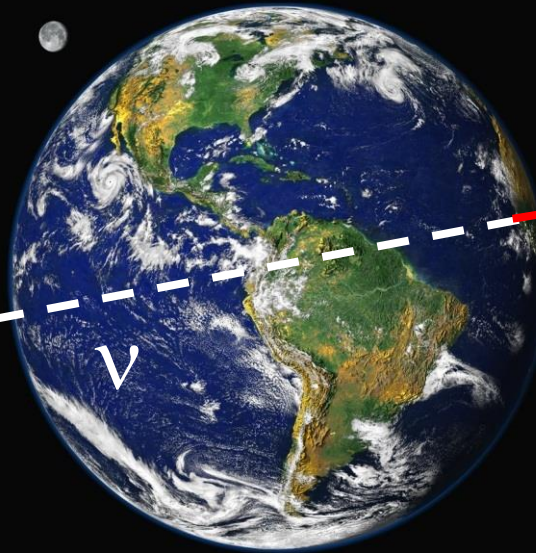
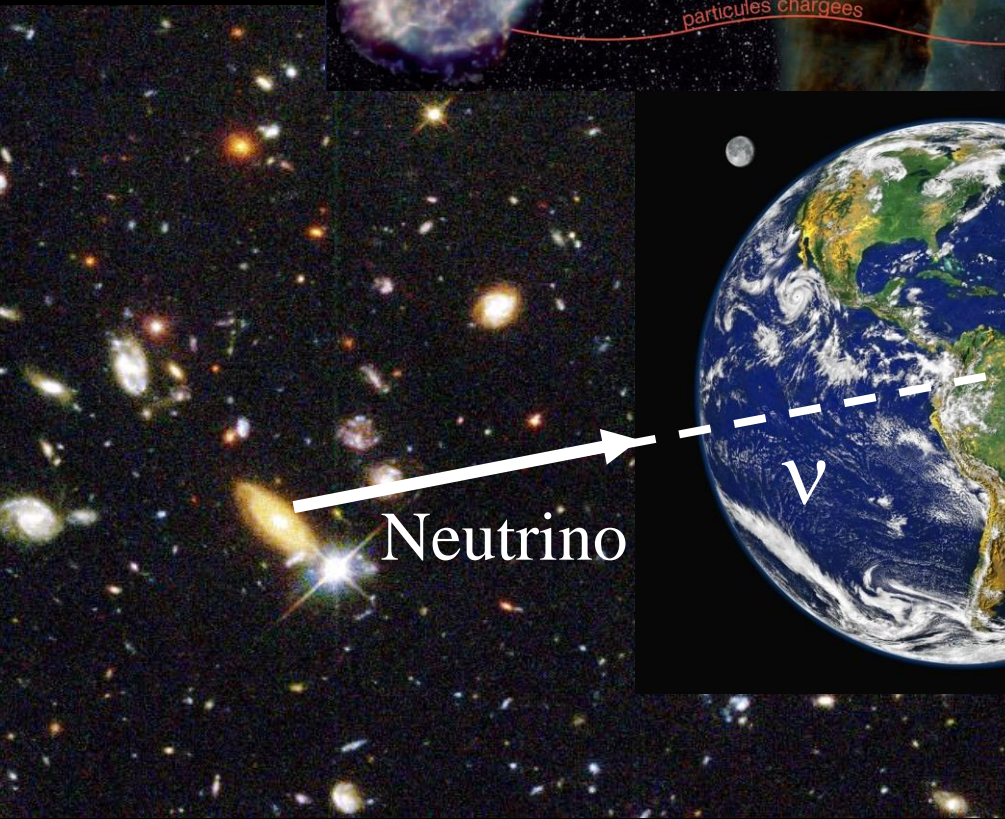
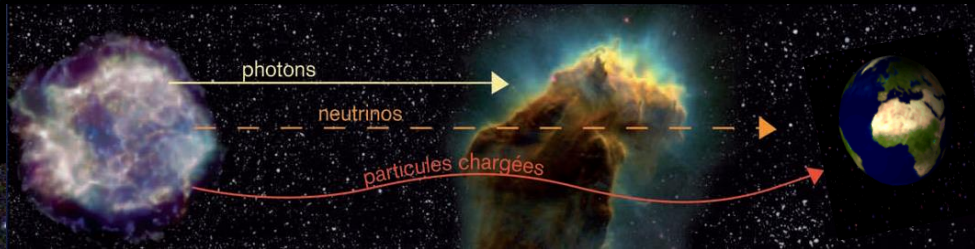
Les rayons cosmiques ont été découverts il y a un siècle par Victor Hess et on ne connaît toujours pas bien leur origine...

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

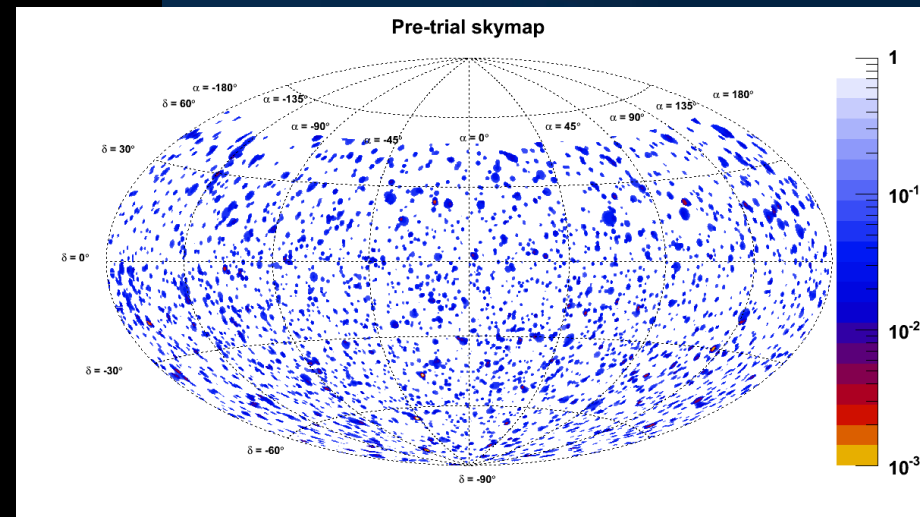




Une nouvelle fenêtre sur l'Univers



Astronomie Neutrino :
Etude des phénomènes les plus violents de l'Univers



Qu'est ce qu'un neutrino ?

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

Le Neutrino : ν



Un passe-muraille

Il interagit si peu avec la matière qu'il peut même traverser la Terre.

Une si faible interaction rend sa **détection** très difficile.



1988



1995



Un super chat de Schrödinger

Il est dans une superposition de **3 états quantiques** (2 pour le chat).



2015

Une des particules les plus abondantes de l'Univers

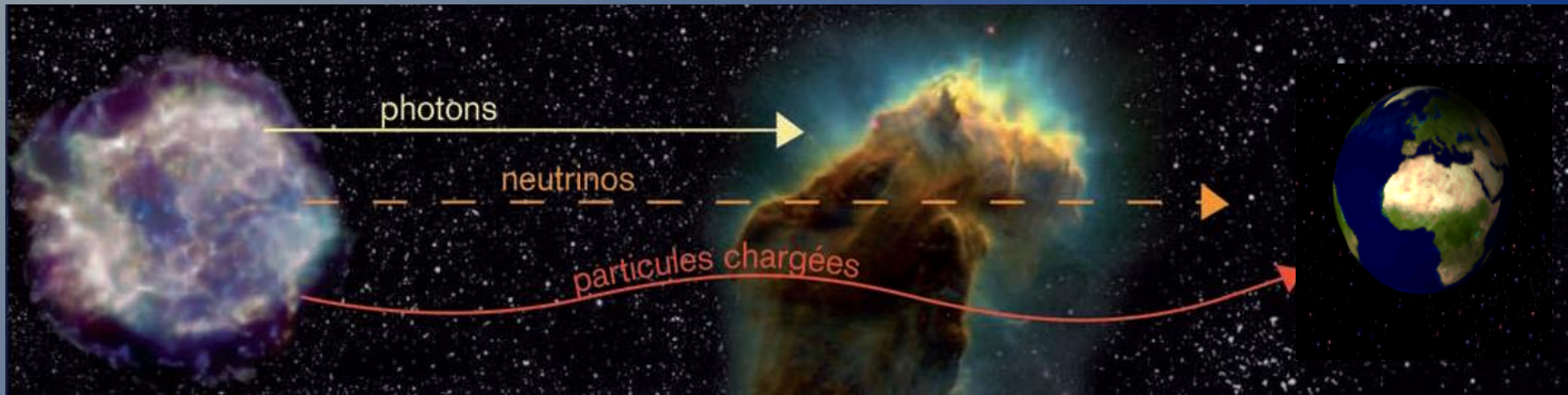
Il est émis par de nombreuses **sources astronomiques**

Chaque seconde, 100 mille milliards de neutrinos, émis par le soleil, traversent votre corps !



2002

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 :

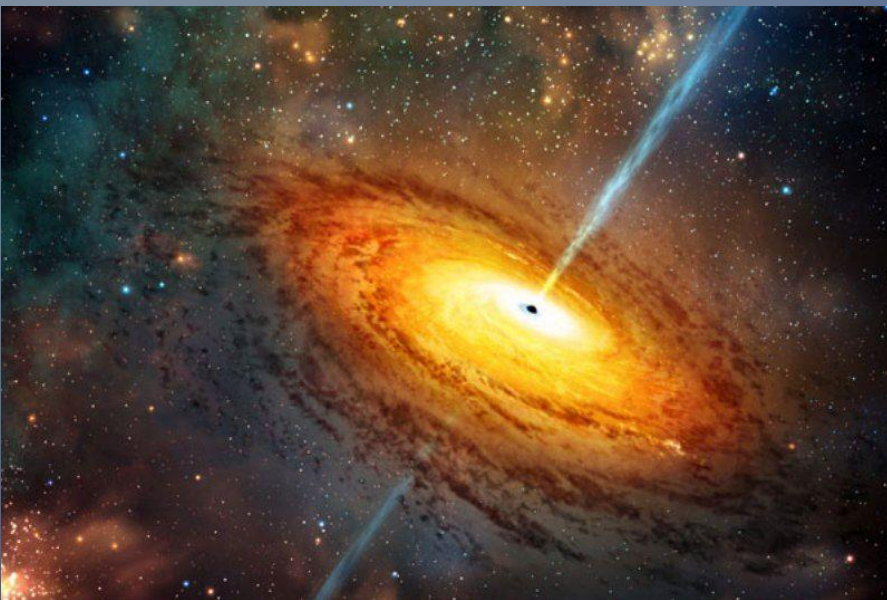
Sur 10 milliards de neutrinos provenant du Soleil et traversant la Terre, seul 1 va interagir !!!

\Rightarrow Nécessité d'un grand volume de détection

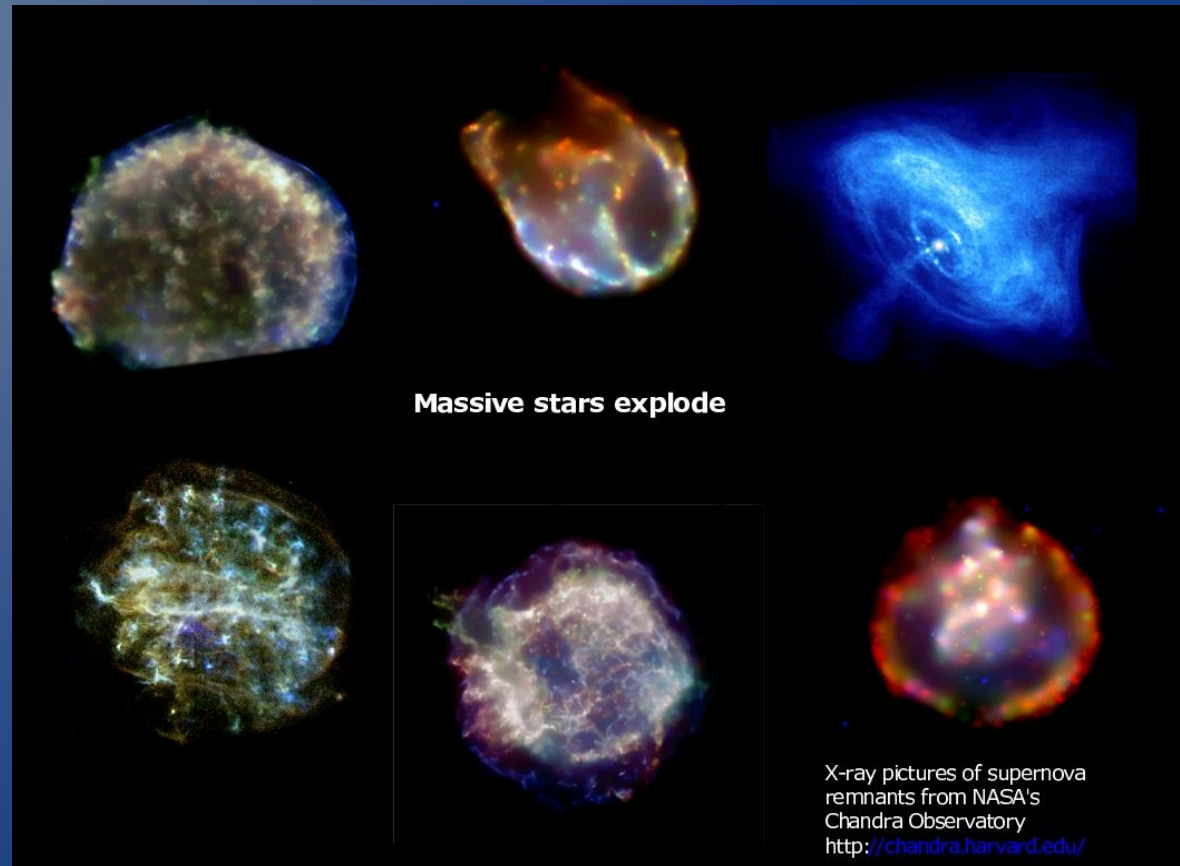
Sources potentielles : Supernovae, trous noirs

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

Explosions d'étoiles (Supernovae)



Trous noirs super-massifs
(Noyaux actifs de galaxies)

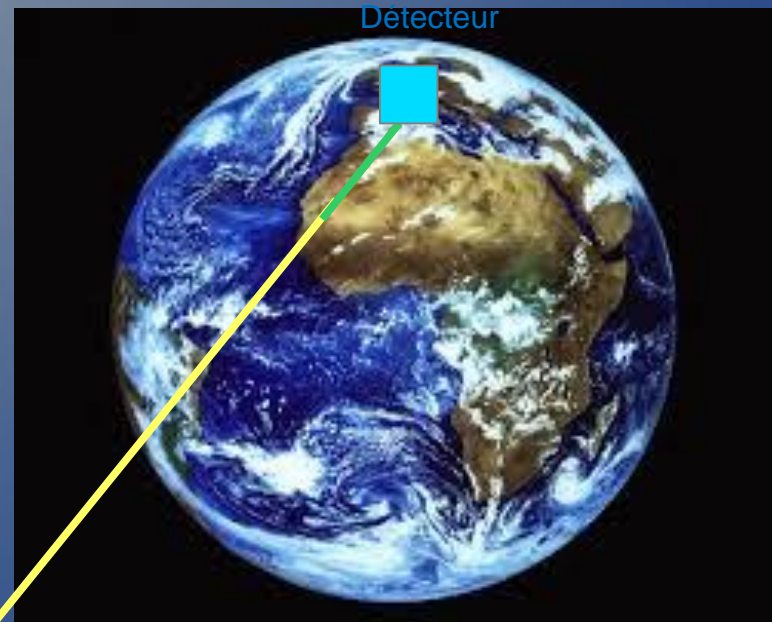


X-ray pictures of supernova
remnants from NASA's
Chandra Observatory
<http://chandra.harvard.edu/>

Pour arrêter les neutrinos...

... La Terre !

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

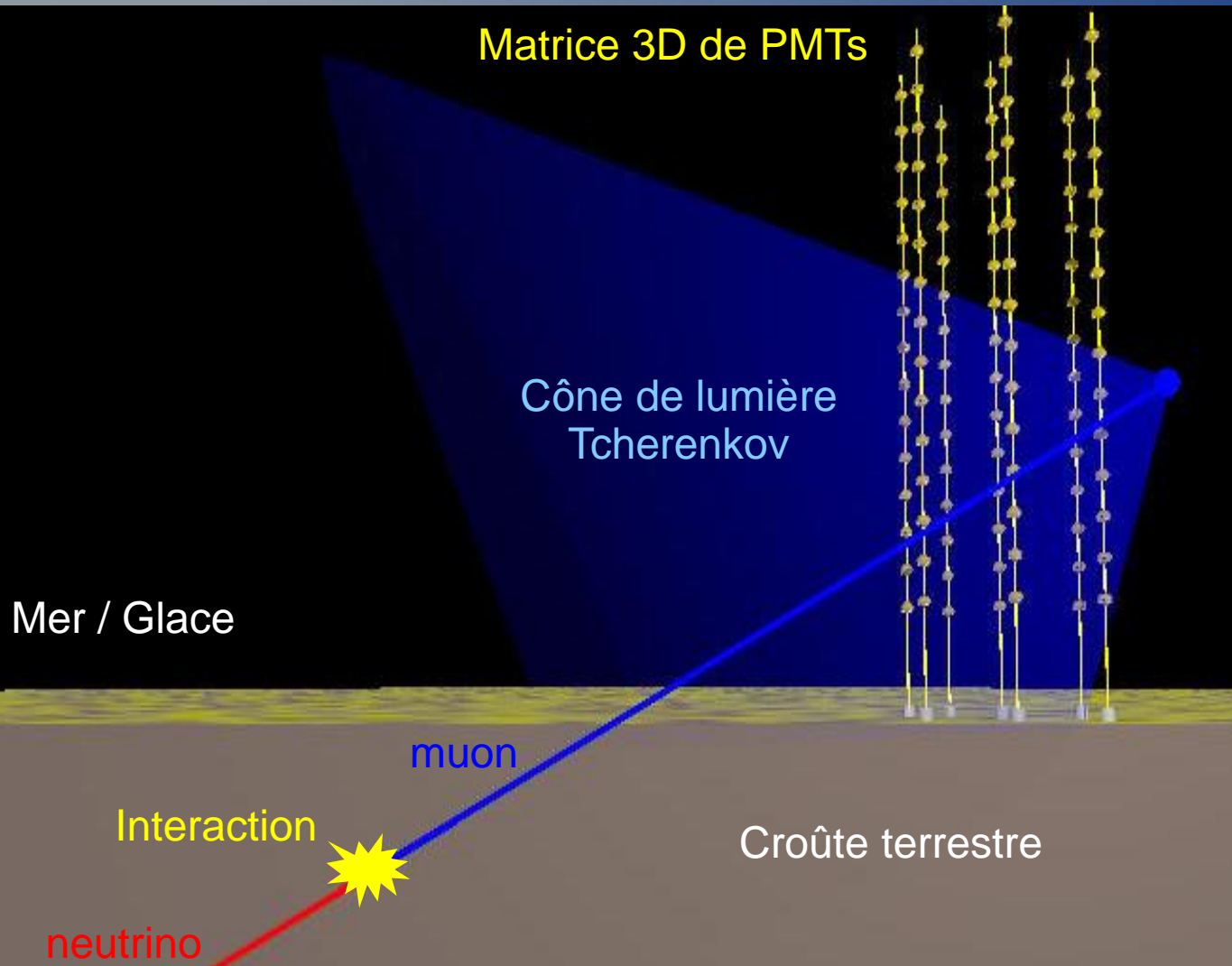


Un **neutrino** entre parfois en collision avec un noyau atomique

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

Les Téléscopes à neutrinos dans le Monde

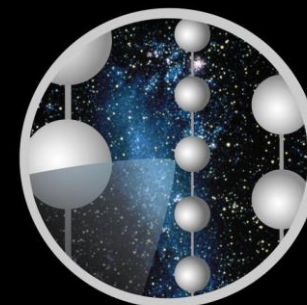
ANTARES & KM3NeT



BAIKAL



↑
IceCube



ICECUBE



Régions du Ciel observables par les Téléscopes à Neutrinos



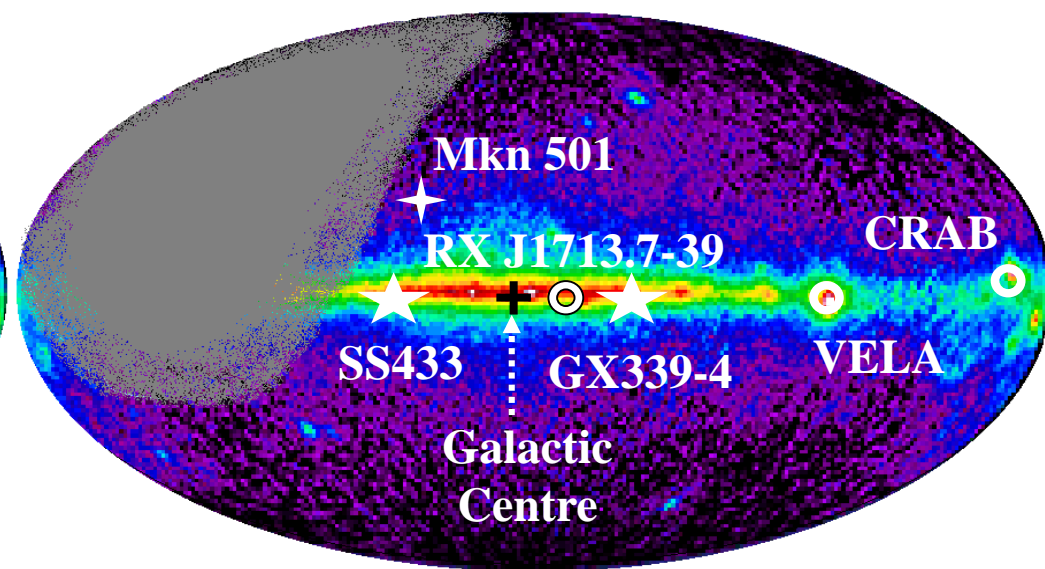
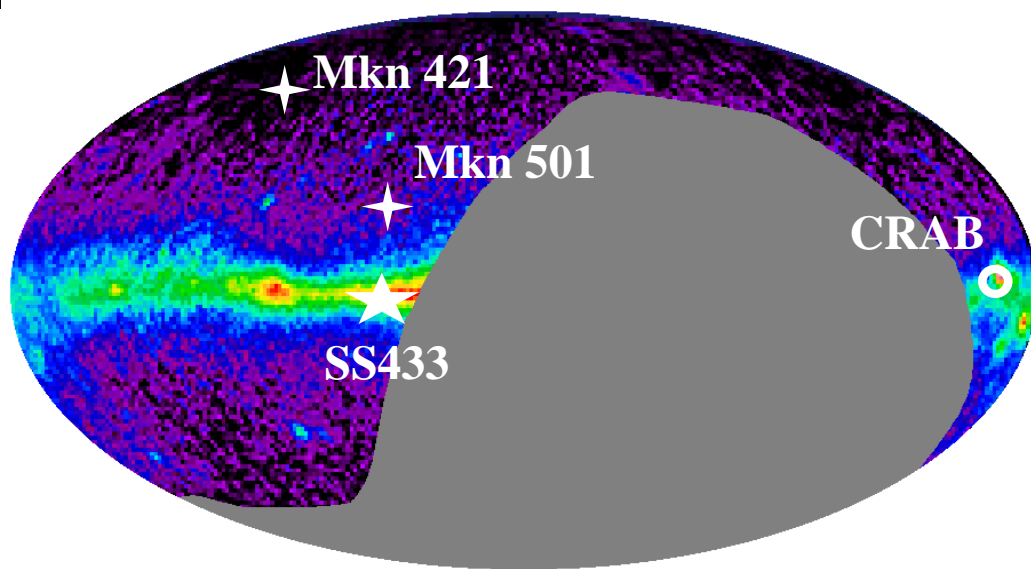
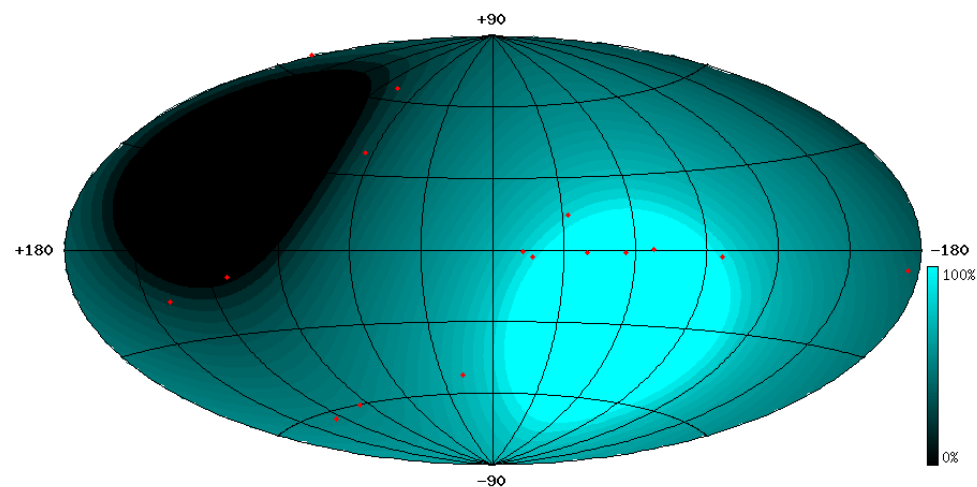
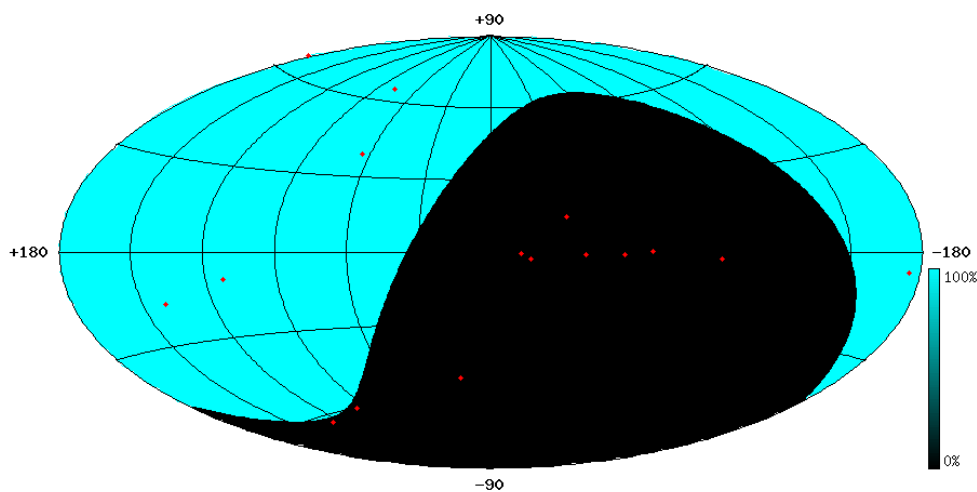
IceCube (Pôle Sud)

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

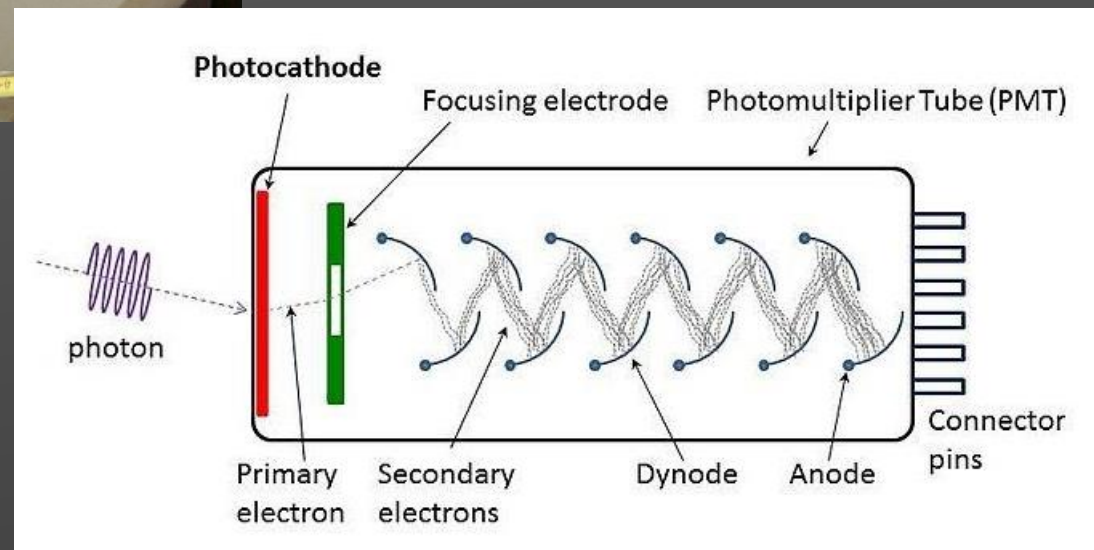
Résolution Angulaire

ANTARES/KM3NeT (43° Nord)

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

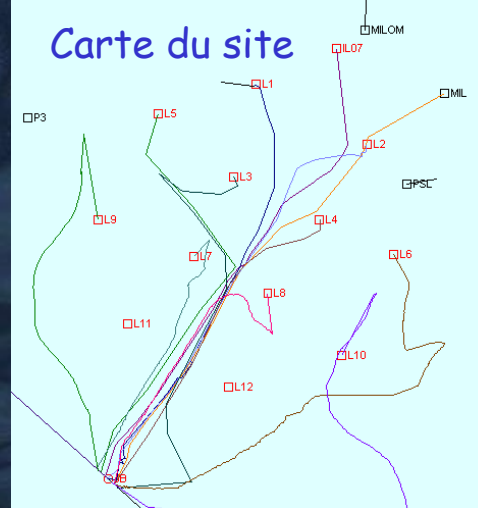


Les yeux d'ANTARES: photomultiplicateurs



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

~60-75 m

Câble Electro-optique

Profondeur : 2480m

Détecteur en opération entre 2006 et 2022

Le site ANTARES

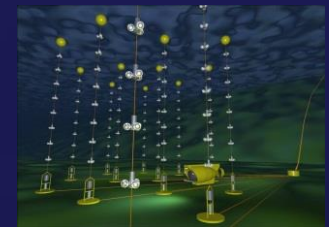


Toulon



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 en 2006-2008



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

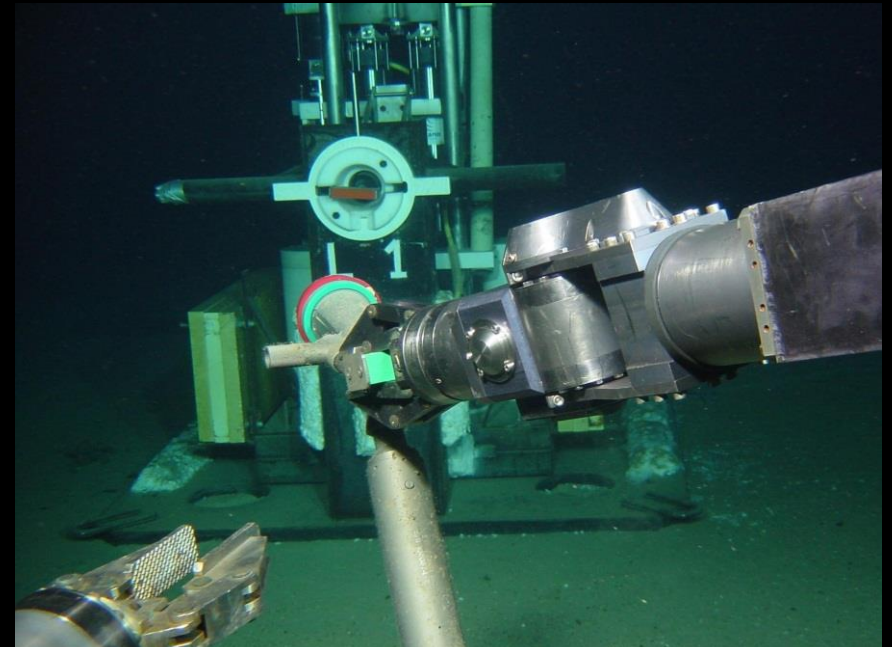
Physiciens ou marins...?



Connexion des lignes avec un robot sous-marin

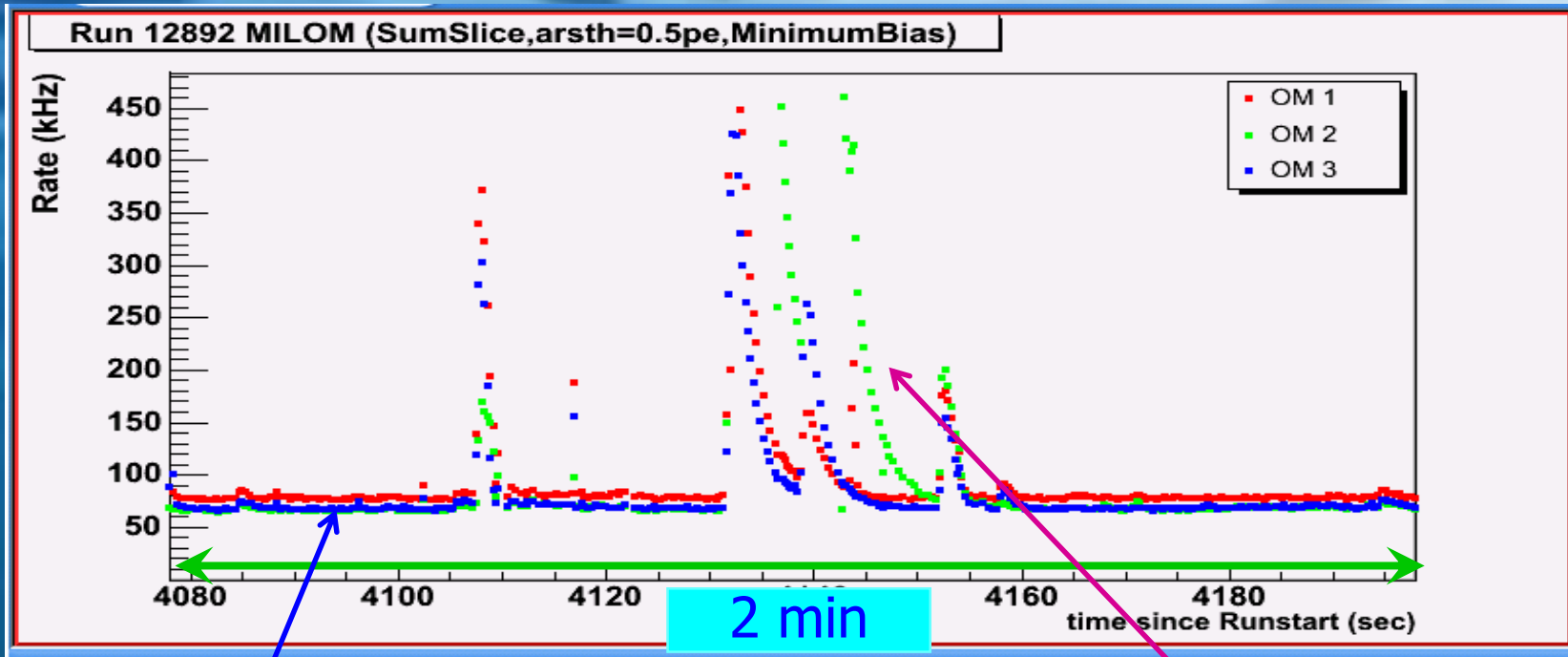


- ROV « VICTOR » de l'IFREMER
- Connecteur ODI : Prise contenant
4 fibres optiques
2 câbles électriques



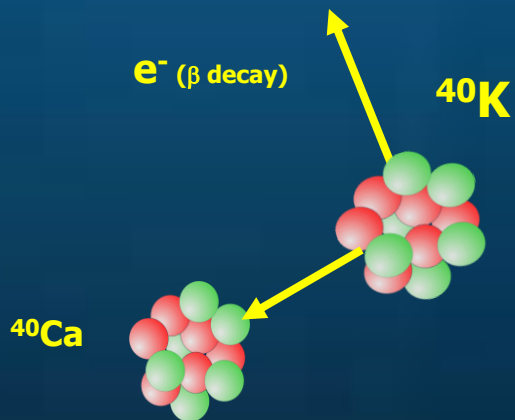


Taux de comptage d'un Module Optique



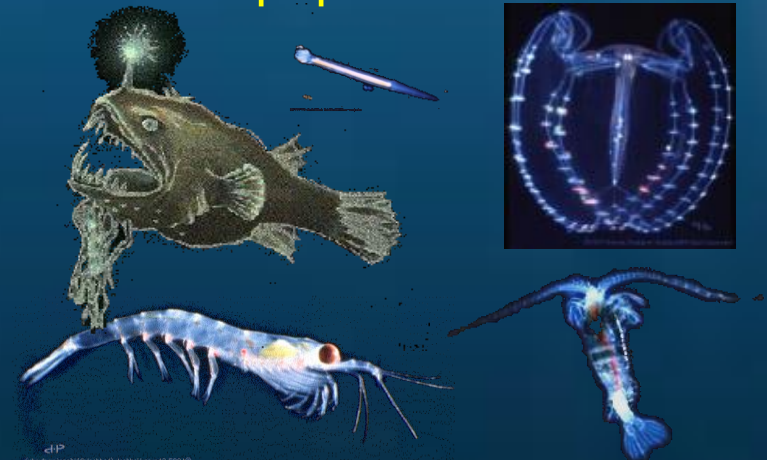
Ligne de base :

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



Bursts:

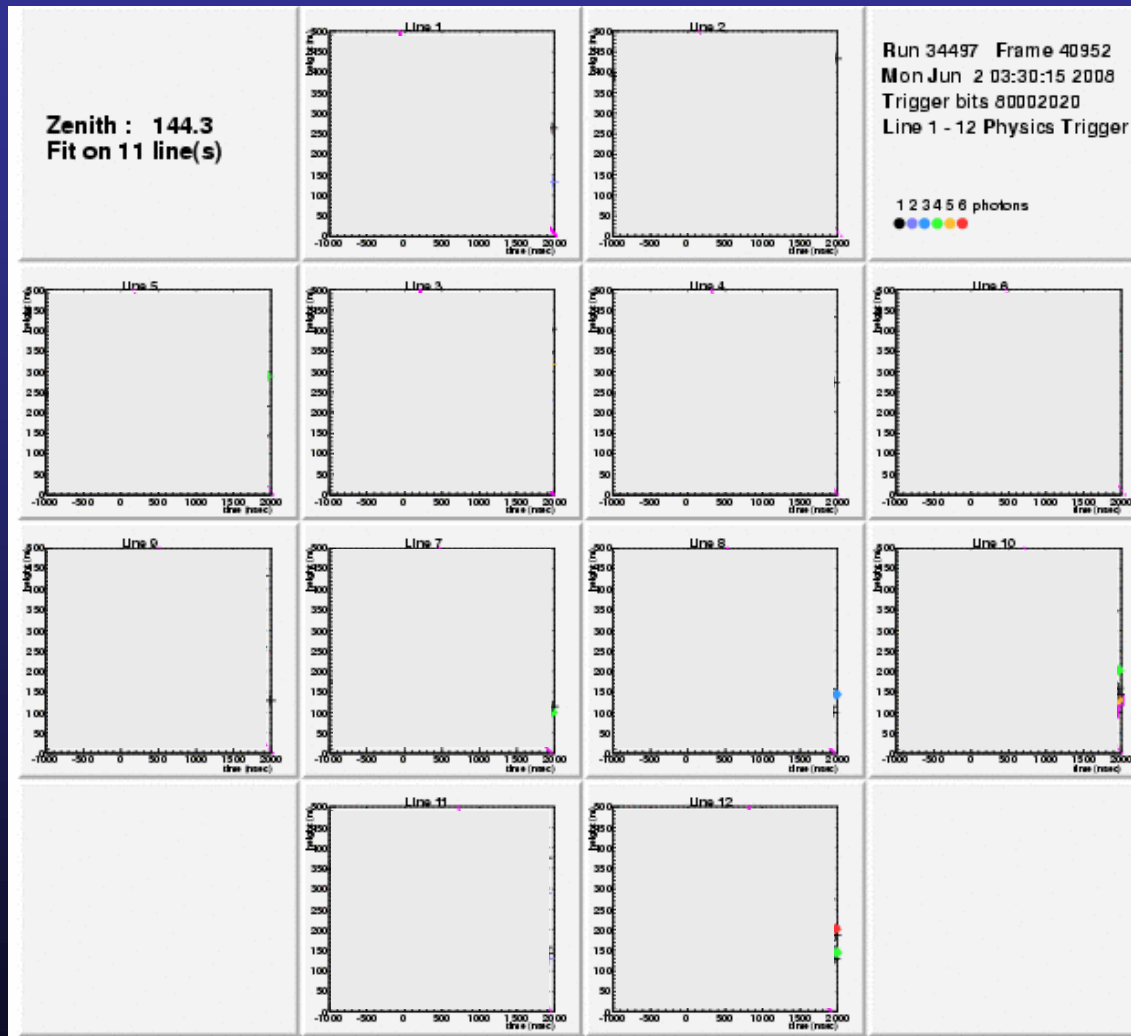
Bioluminescence d'organismes
macroscopiques





Exemple d'un événement « muon »

On en détecte quelques uns par seconde



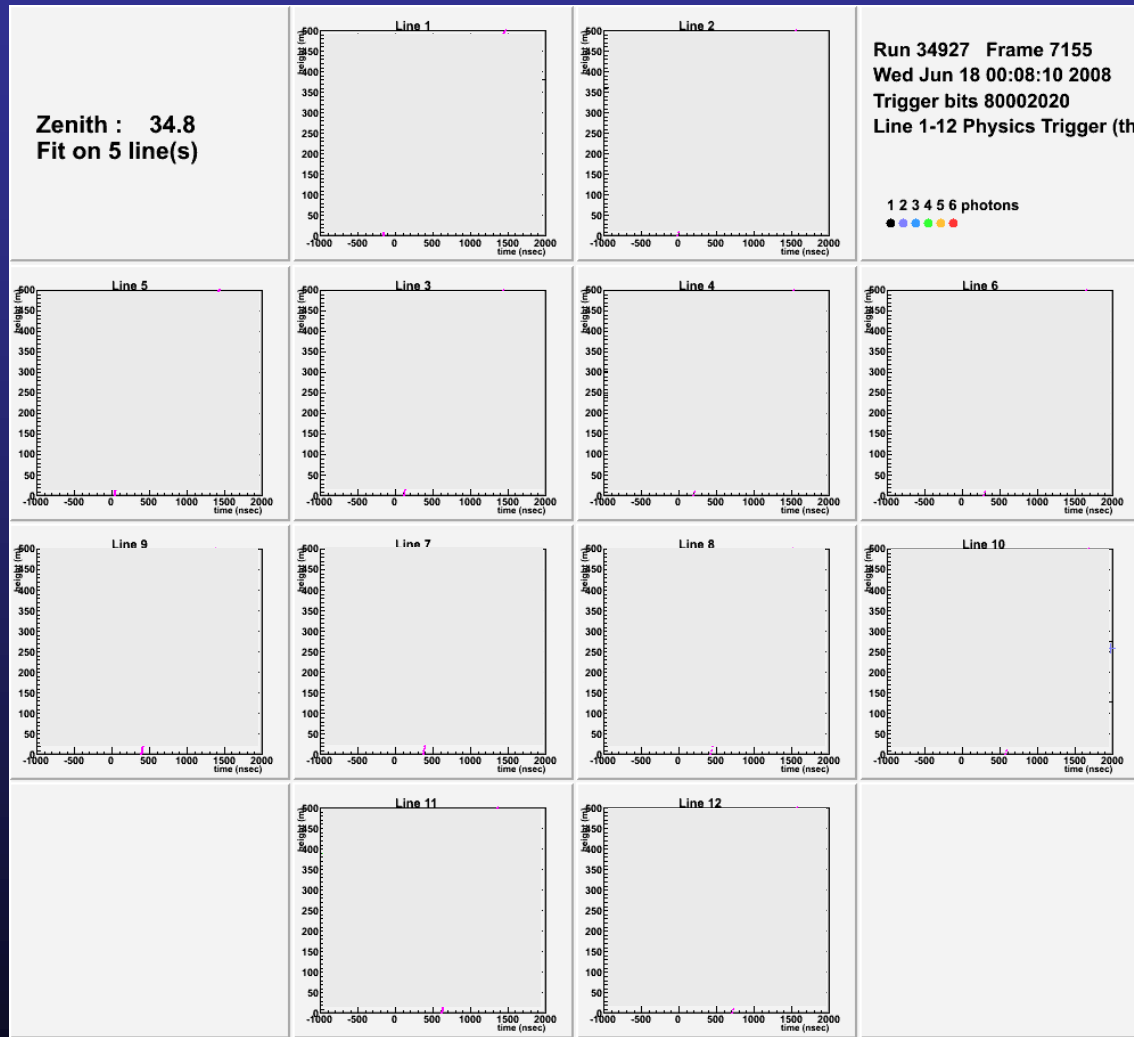
Example of a *down-going muon event*, detected over the 12 detector lines





Exemple d'un événement « neutrino »

On en détecte quelques uns par jour



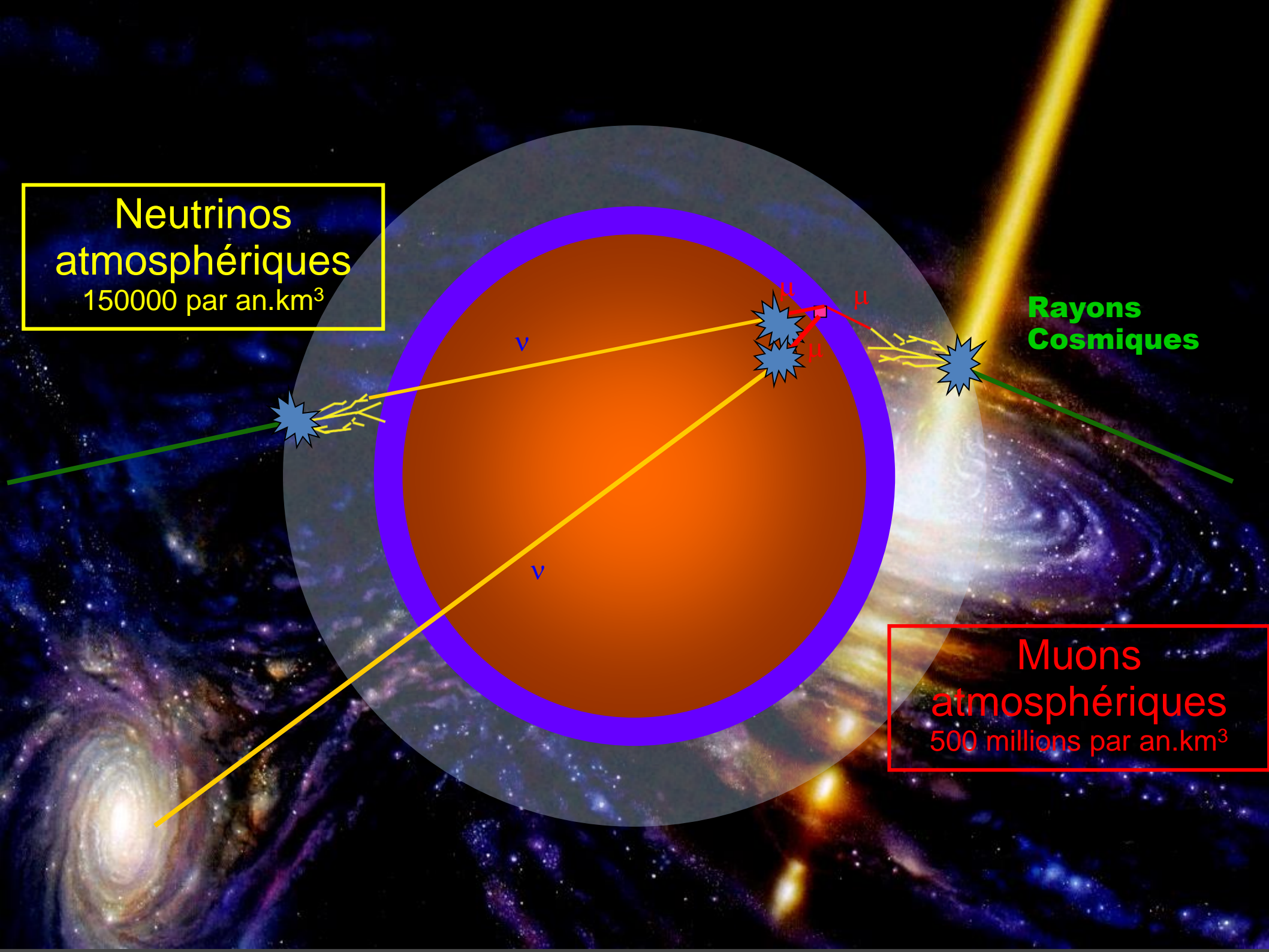
Example of an *up-going muon event* (i.e. a neutrino event) detected by 6/12 detector lines



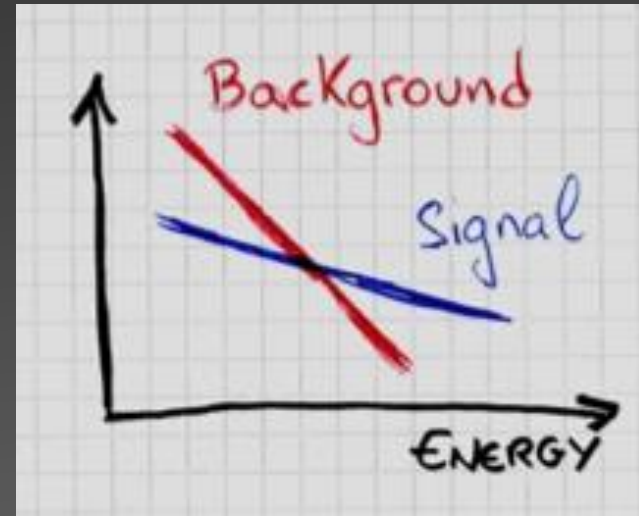
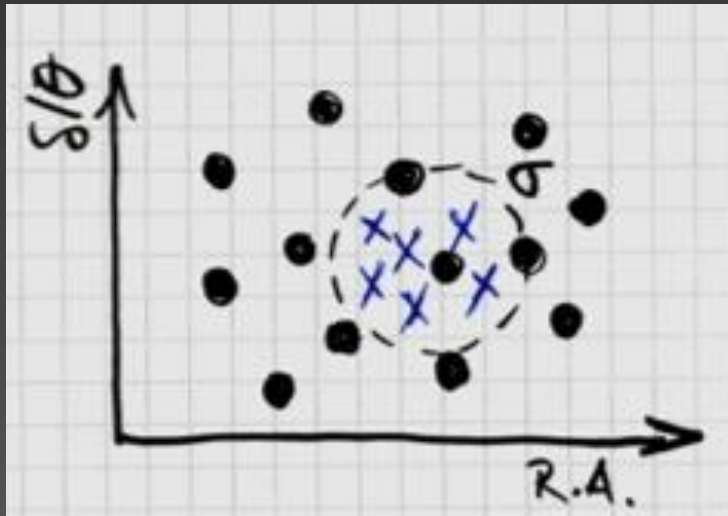
**Neutrinos
atmosphériques**
150000 par an.km³

**Rayons
Cosmiques**

**Muons
atmosphériques**
500 millions par an.km³



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 vu avec ANTARES

Data set:

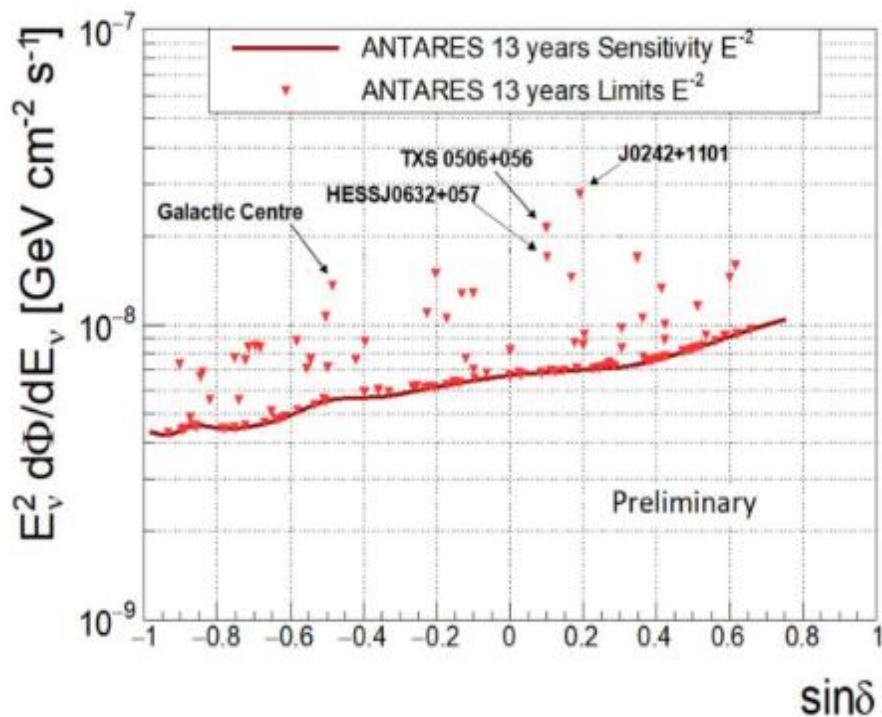
Period: from Jan 2007 to Feb 2020

Livetime: 3845 days

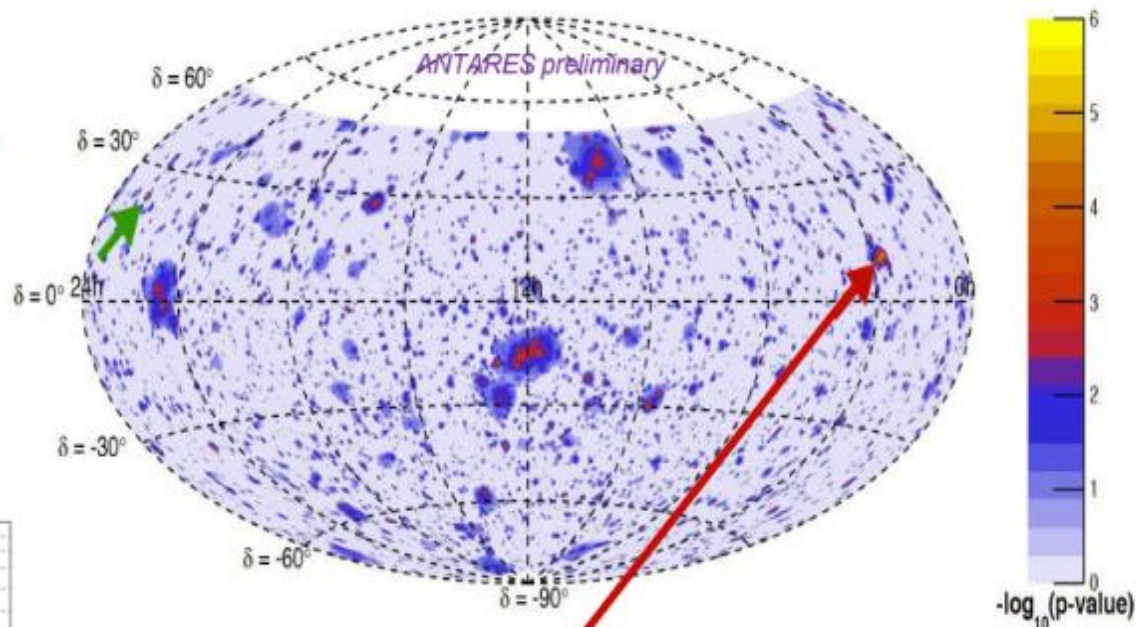
Events: 10162 tracks and 225 showers

Candidate-list search:

121 investigated sources



Full-sky search



Full-sky hotspot $(\alpha, \delta) = (39.6^\circ, 11.1^\circ)$

pre-trial p-value: of 6.8×10^{-6} (4.3σ)

post-trial p-value: of 48%

Within 1 degree from J0242+1101

Most significant source:

J0242+1101

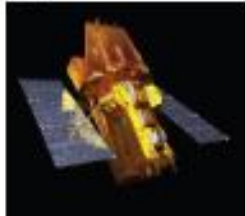
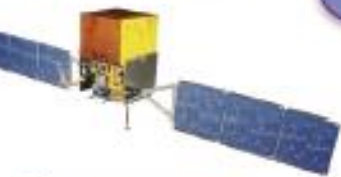
pre-trial significance: 3.8σ

post-trial significance: 2.4σ

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/ γ , des Rayons Cosmiques, des Ondes Gravitationnelles,...

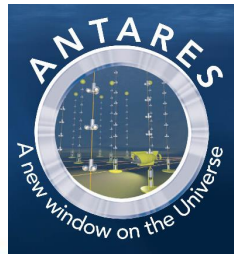


GeV-TeV γ -rays
Fermi / HESS...

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

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

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



HE neutrinos

UHECR
Auger

- APJ 774 (2013) 19

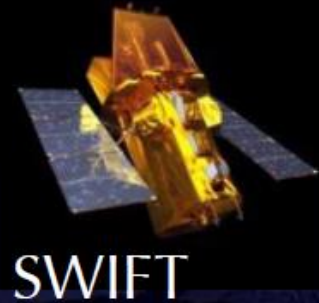
Gravitational
Waves
Virgo / Ligo

- JCAP 06 (2013) 008





ANTARES Multi-Messengers Analyses



SWIFT



Maxi



Fermi



Ligo

Milagro



HAWK



TA

HAWK



Virgo

ANTARES



HESS



Auger



MWA



Parkes

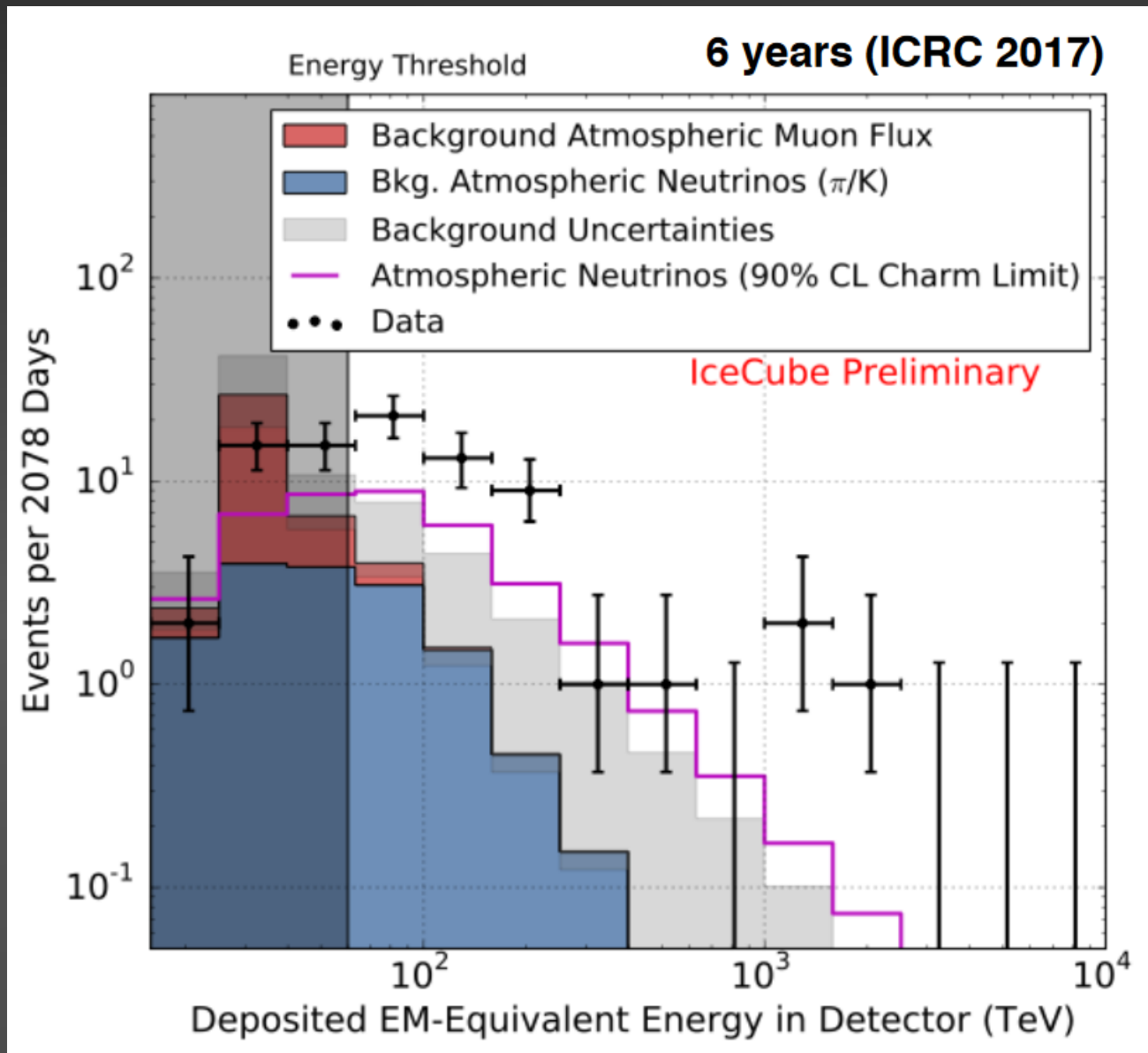


Utmost

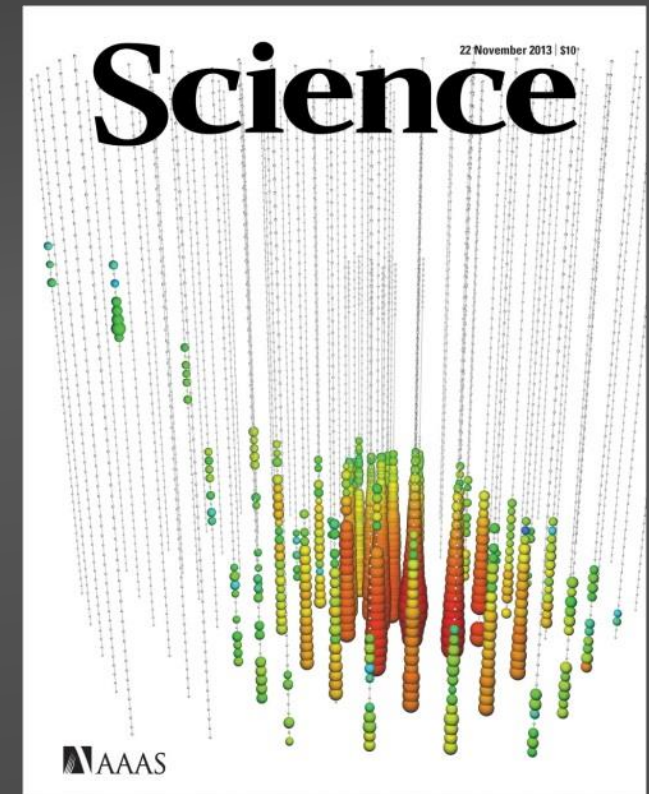


IceCube

IceCube : 1er signal de neutrinos cosmiques !!

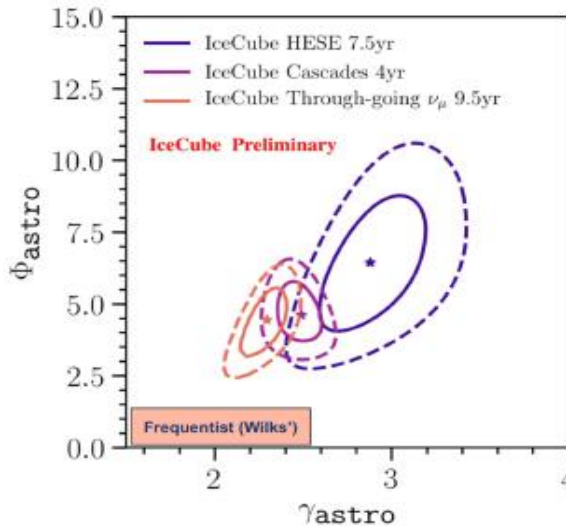
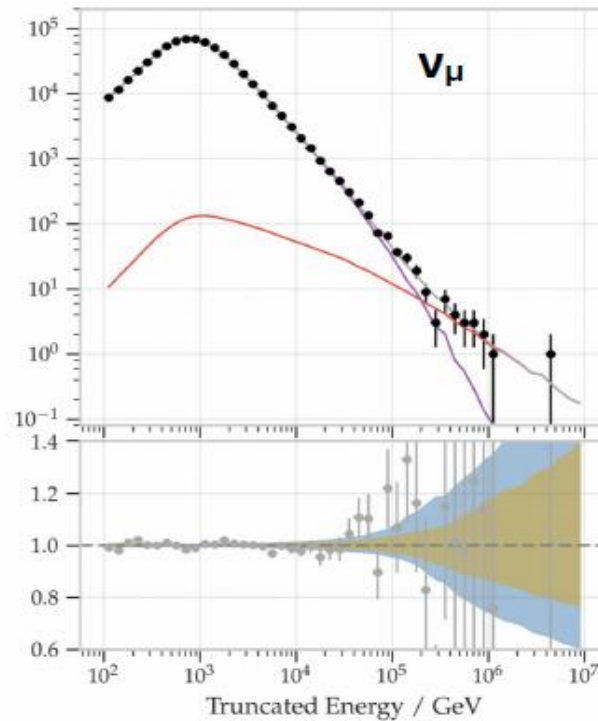
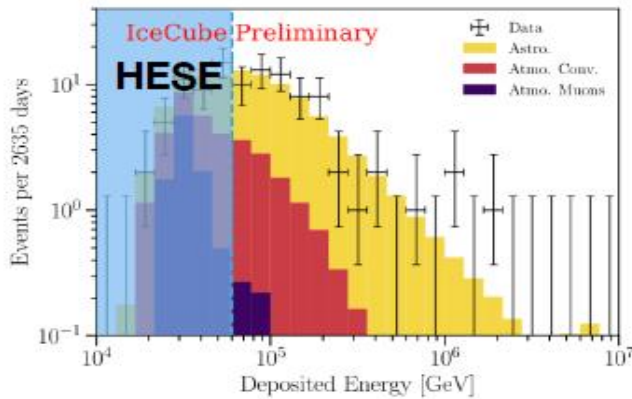


82 événements en 6 ans



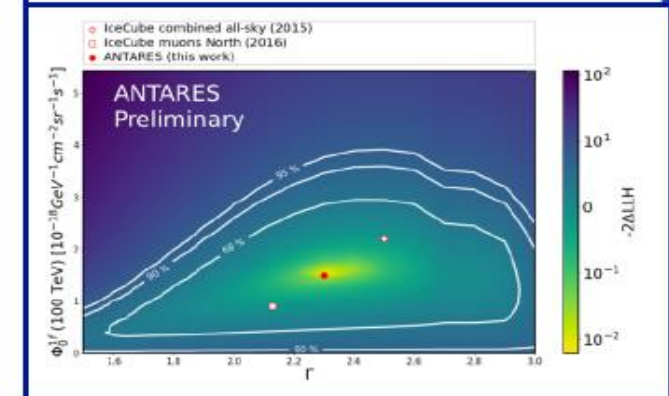
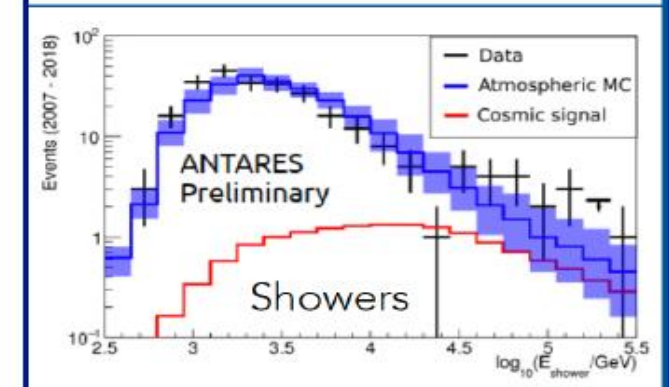
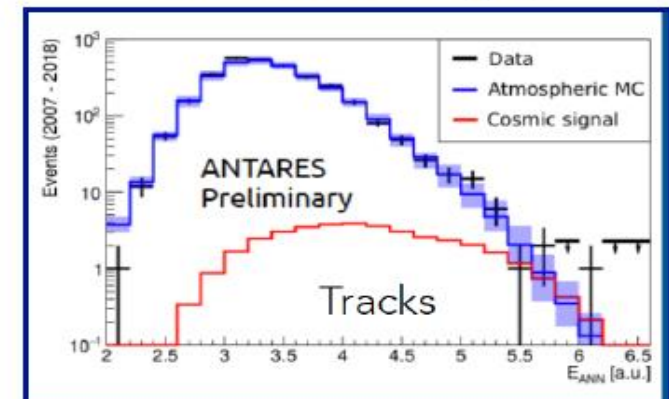
Un flux diffus de neutrinos cosmiques de haute énergie...

IceCube 7-10 yrs



Name	Approx. Neutrino Energy	Direction	Dominant Flavor	Unbroken Spectral Index
HESE	50 TeV - 5 PeV	All-sky	e, μ , τ	2.89
Cascades	5 TeV - 5 PeV	All-sky	e, τ	2.48
NuMu	50 TeV - 10 PeV	Northern sky	μ	2.28

ANTARES 11 yrs

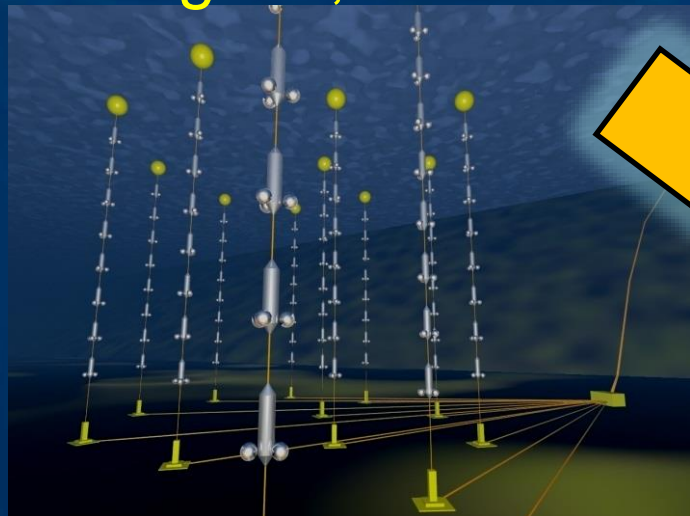


Flux très faible \rightarrow doit être étudié avec un détecteur de taille multi-km³

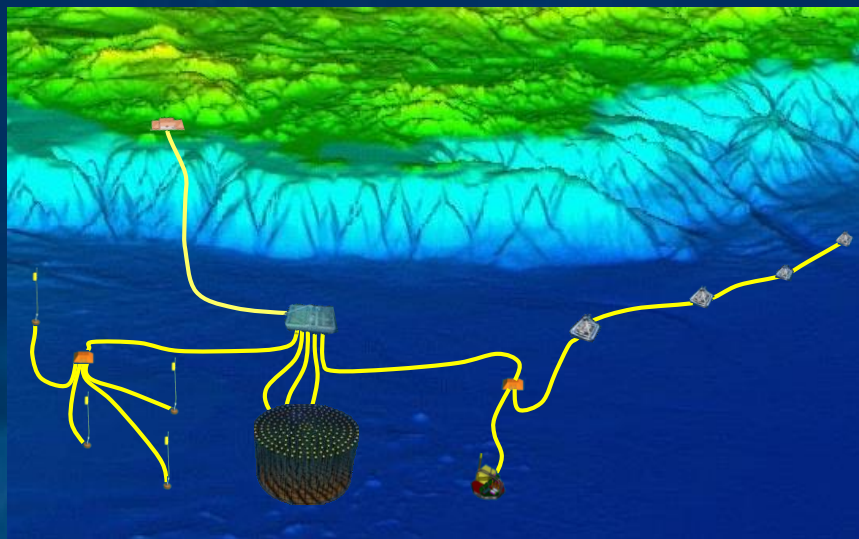
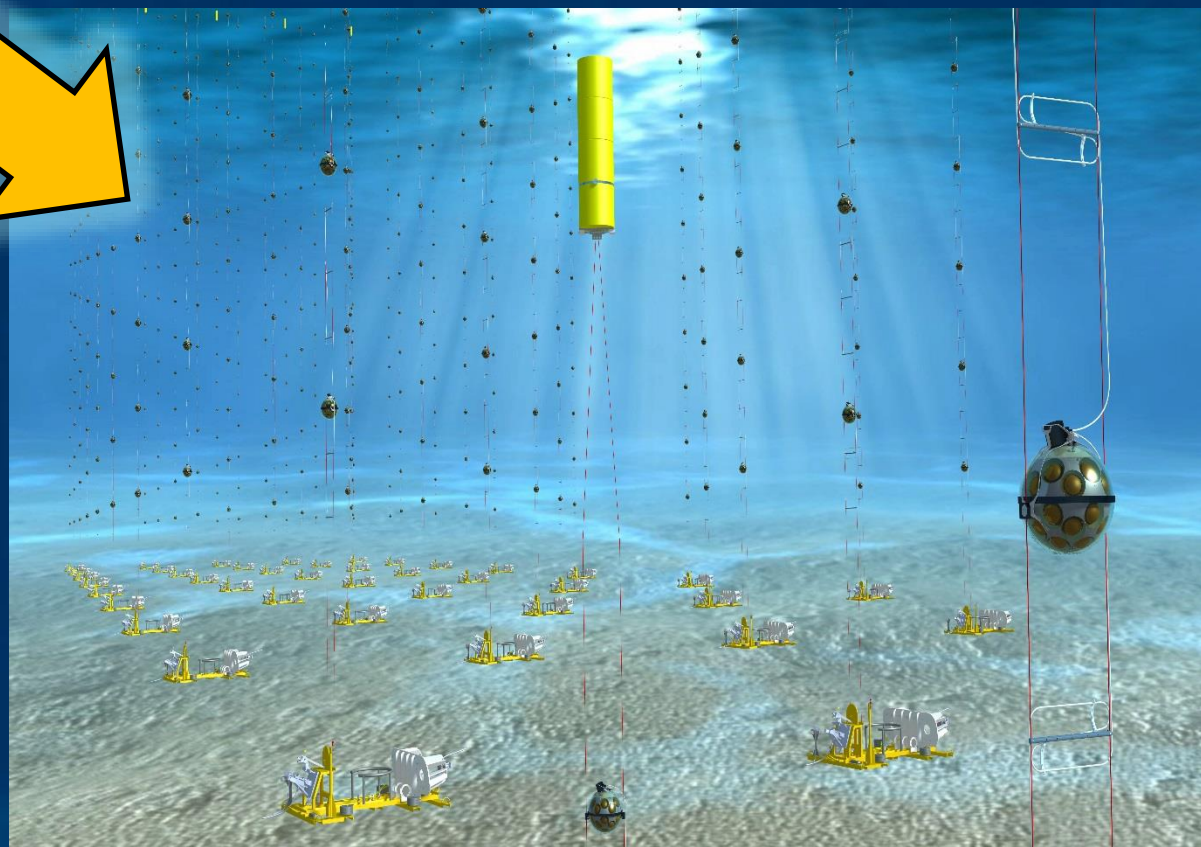


Le Télescope à neutrinos KM3NeT

12 lignes, 900 OMs

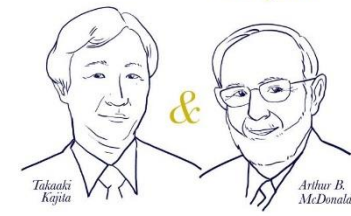


~350 lignes, ~6300 OMs



Détecteur installé sur 2 sites profonds
en Mer Méditerranée au large de
Toulon (France) et Sicile

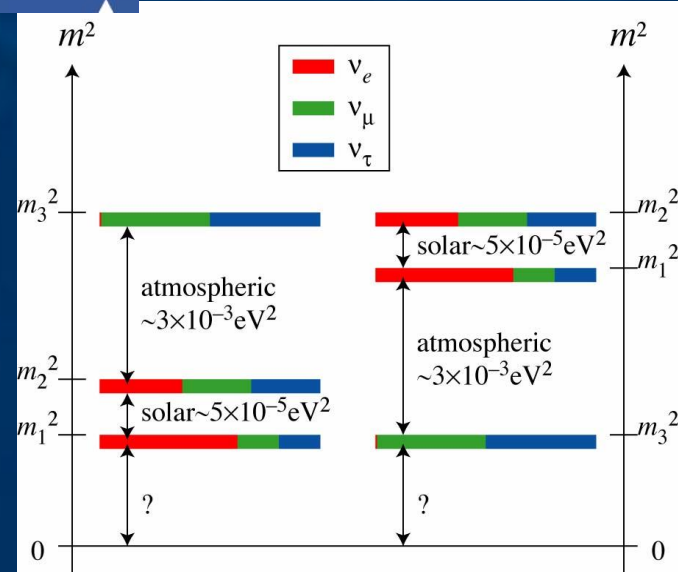
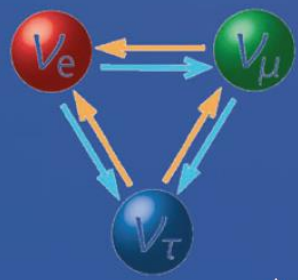
Observatoire multidisciplinaire
permanent en mer profonde



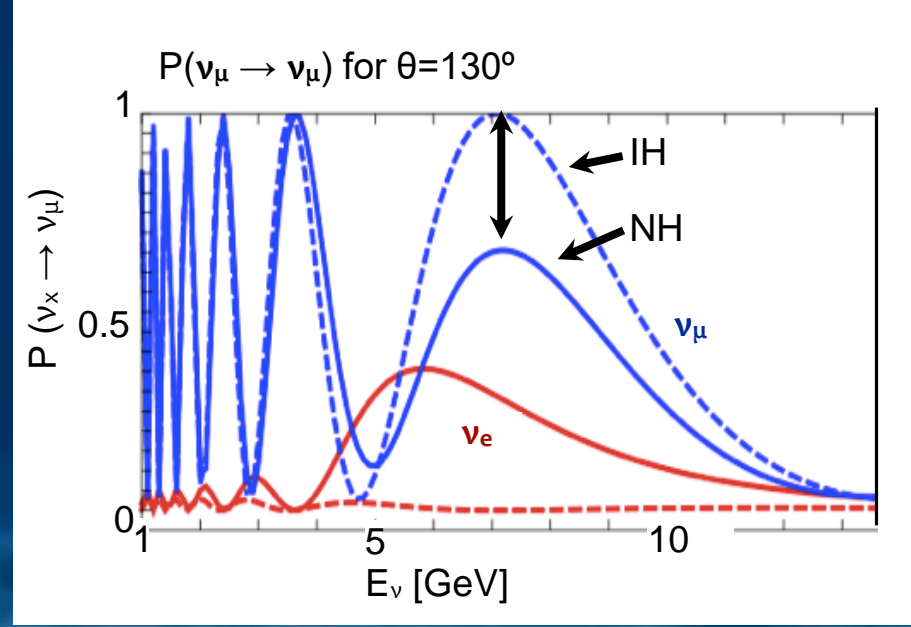
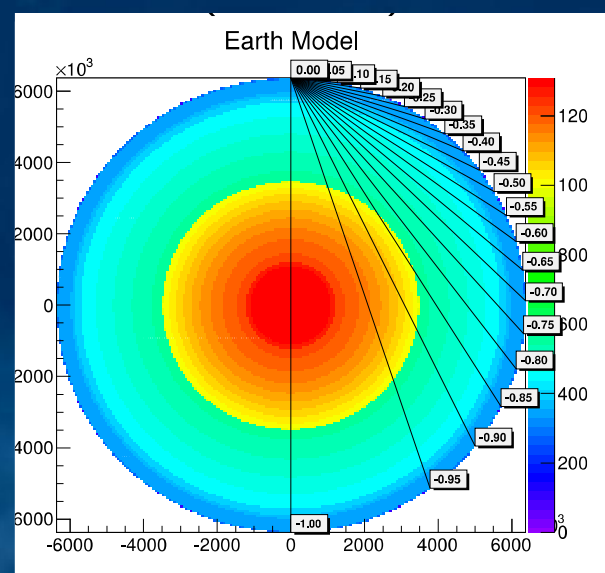
NEUTRINO OSCILLATIONS
The discovery of these oscillations shows that neutrinos have mass.



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

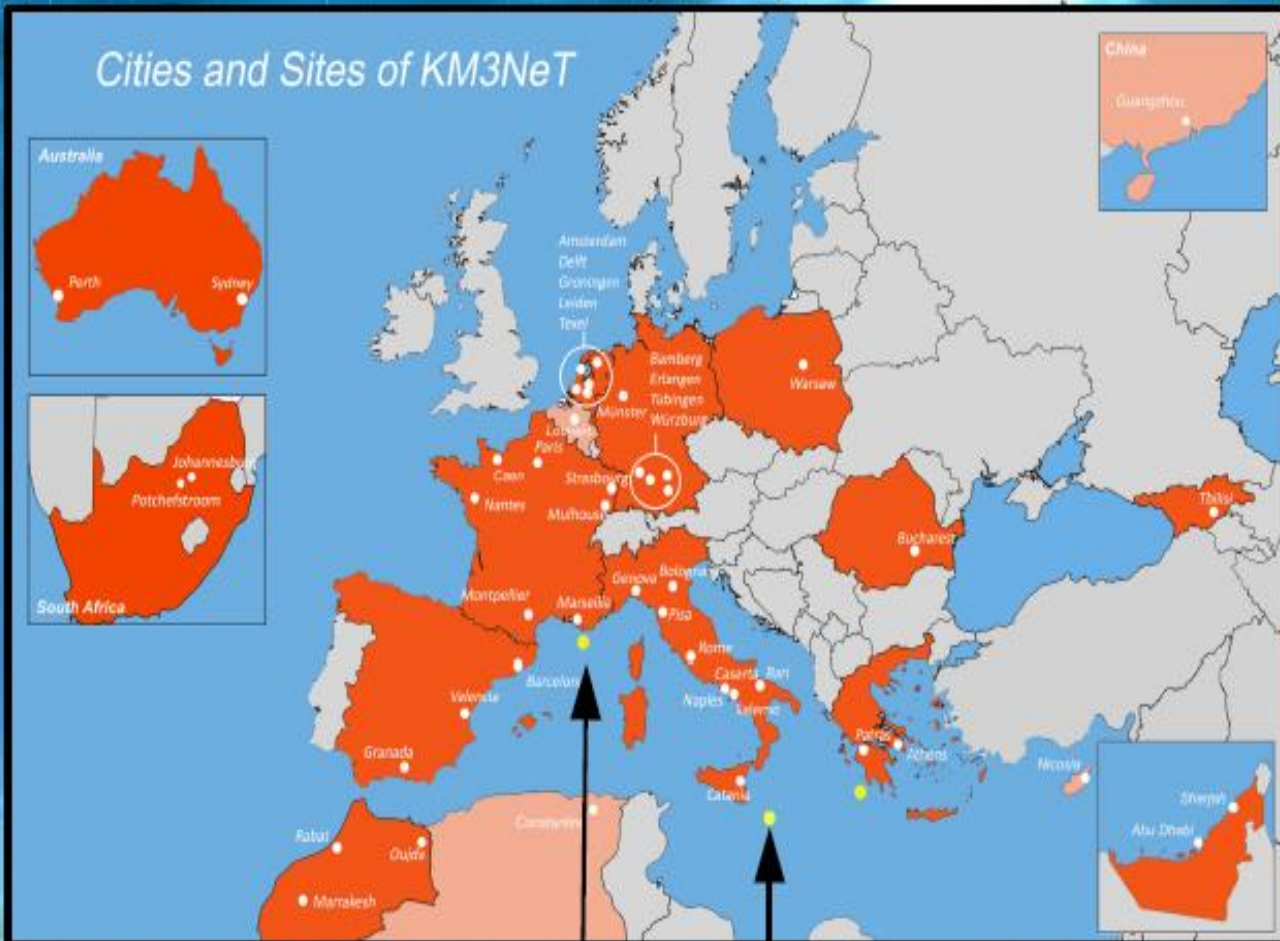


Paramètre fondamental de la nature des neutrinos toujours inconnu !!



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

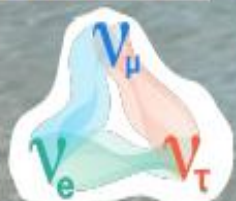
Cities and Sites of KM3NeT



La Collaboration KM3NeT



ORCA, pour l'étude des propriétés quantiques des neutrinos



ARCA, pour l'astronomie neutrino



Une technologie, deux détecteurs

Une collaboration internationale

17 Pays

53 Instituts

250 Scientifiques

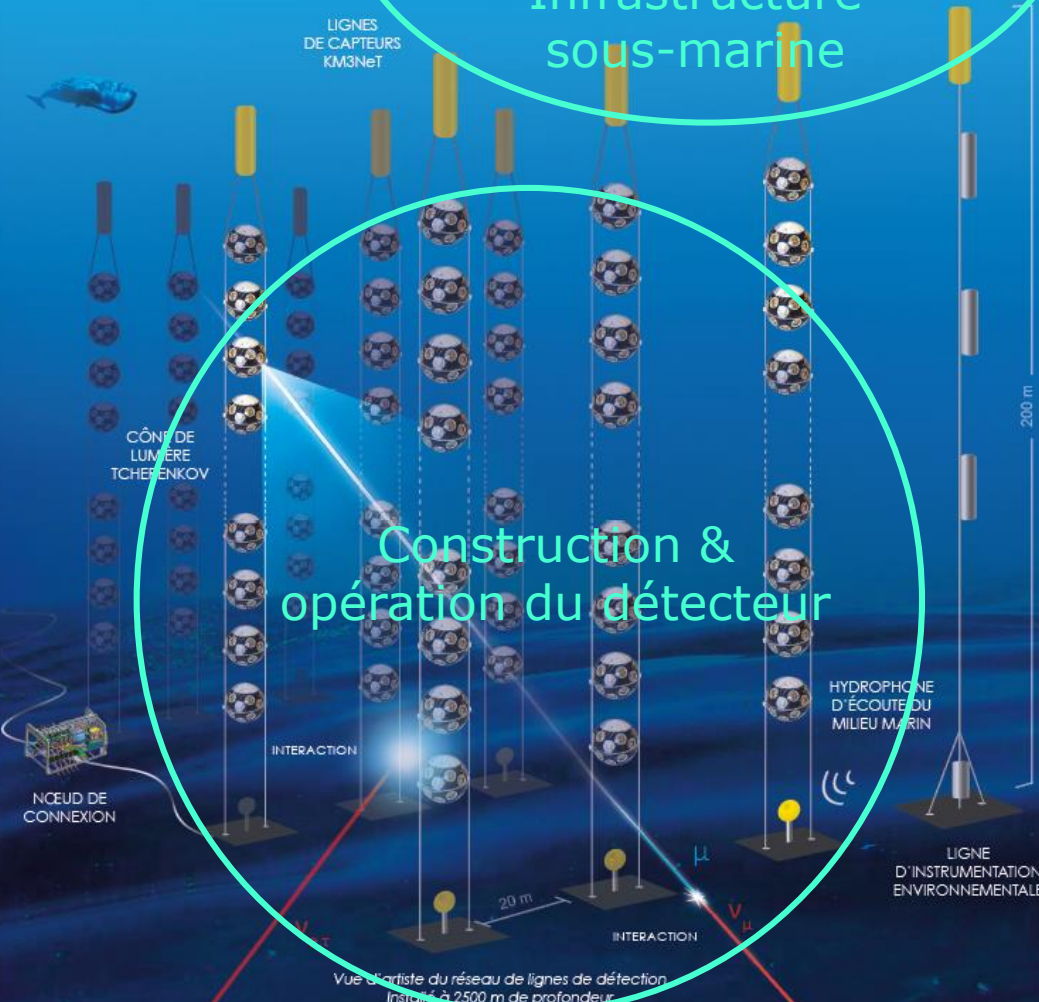


Infrastructure sous-marine



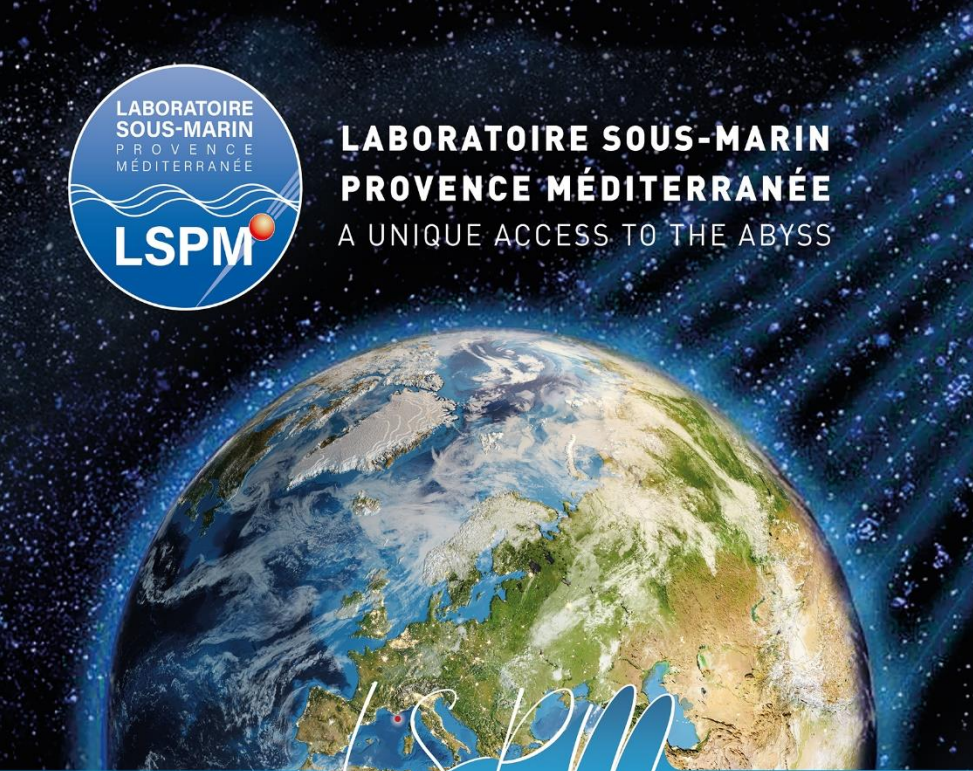
UNE NOUVELLE FAÇON D'OBSERVER LES ABYSSES

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.

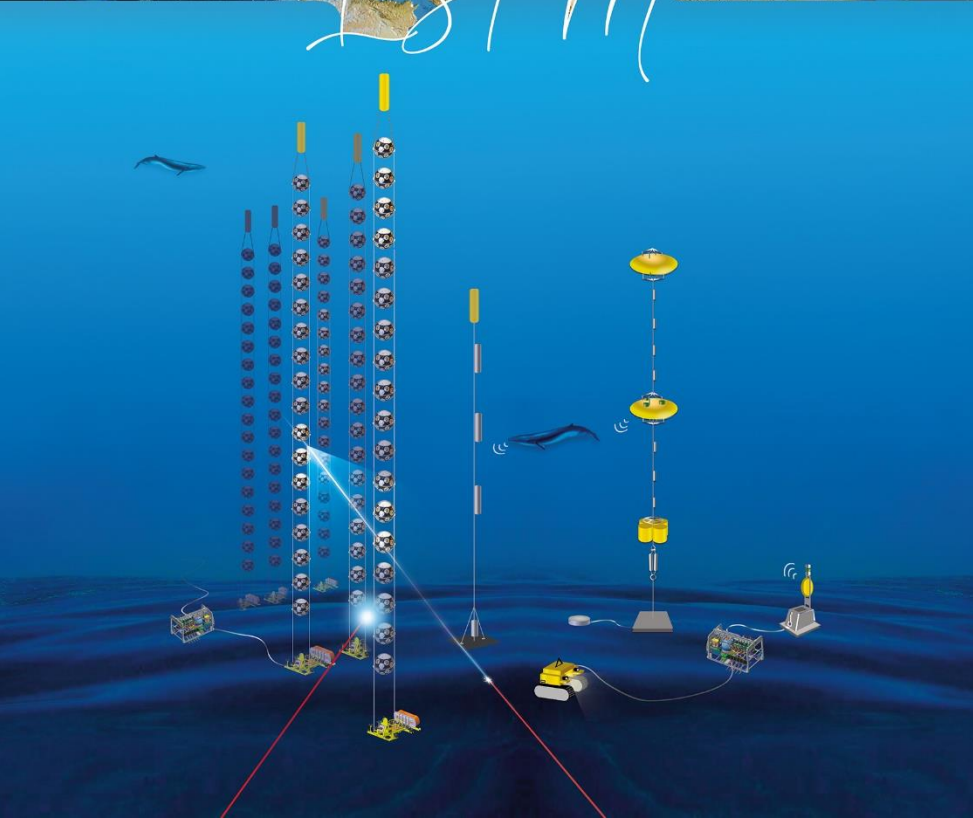




**LABORATOIRE SOUS-MARIN
PROVENCE MÉDITERRANÉE**
A UNIQUE ACCESS TO THE ABYSS



LSPM



Laboratoire Sous-marin Provence Méditerranée

- Observatoire sous-marin multidisciplinaire câblé
- Plateforme nationale du CNRS, copilotée par Aix-Marseille Université et l'Ifremer
- Accès ouvert : utilisateurs scientifiques et industriels

Télescope à neutrino KM3NeT



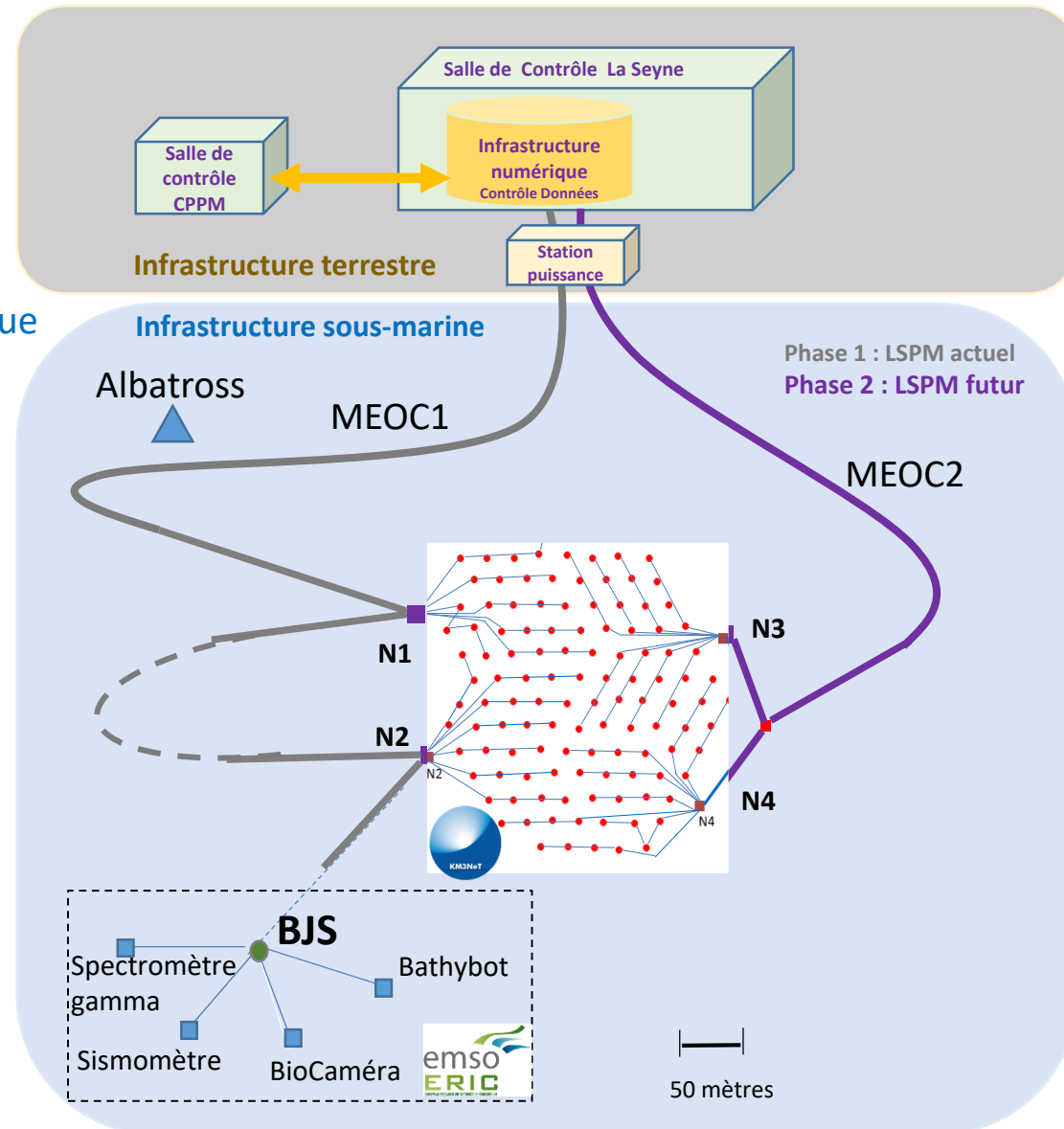
Instrumentation sous-marine EMSO



**inauguré par Antoine Petit,
PDG du CNRS, le 24 février 2023**

Une infrastructure sous-marine unique en mer profonde

- Salle de contrôle à La Seyne-sur-Mer et CPPM
- Deux câbles électro-optiques principaux
40 km de la côte, -2500 m
- 4 nœuds de connexion + Boîte de Jonction Scientifique
32+6 connecteurs
- Puissance électrique élevée : 1.2 kW/connecteur
- Transmission haut débit des données en temps réels
fibres optiques (Gb/s)
- Système de positionnement acoustique
Placement des objets < 1m
- Navires/ROVs souvent sur le site
- Accueil d'instruments autonomes
Vieillessement/dégradation de matériaux, etc



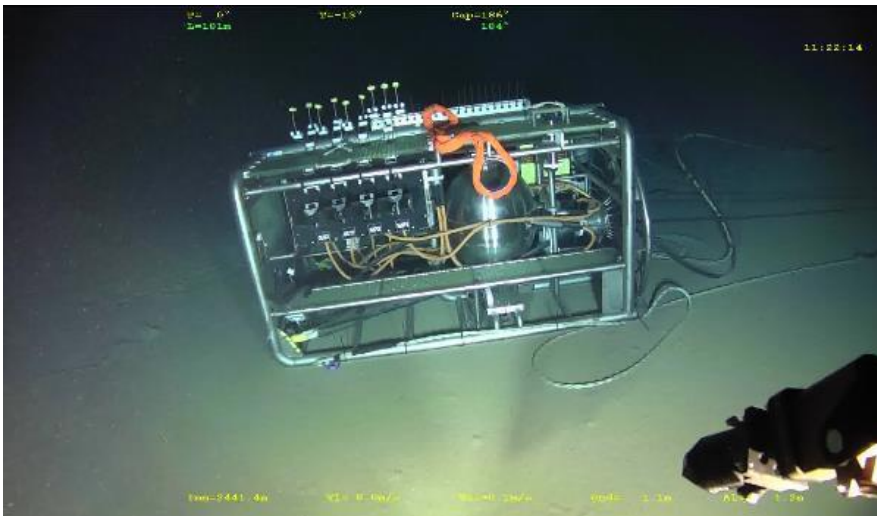
Plage des Sablettes,
La Seyne-sur-Mer



Longeur 40 km,
36 fibres optiques,
1 conducteur (3400 VAC)

Deuxième câble en 2025
(réutilisation du câble ANTARES posé en 2001)

Noeud 1 : déployé 10/2018

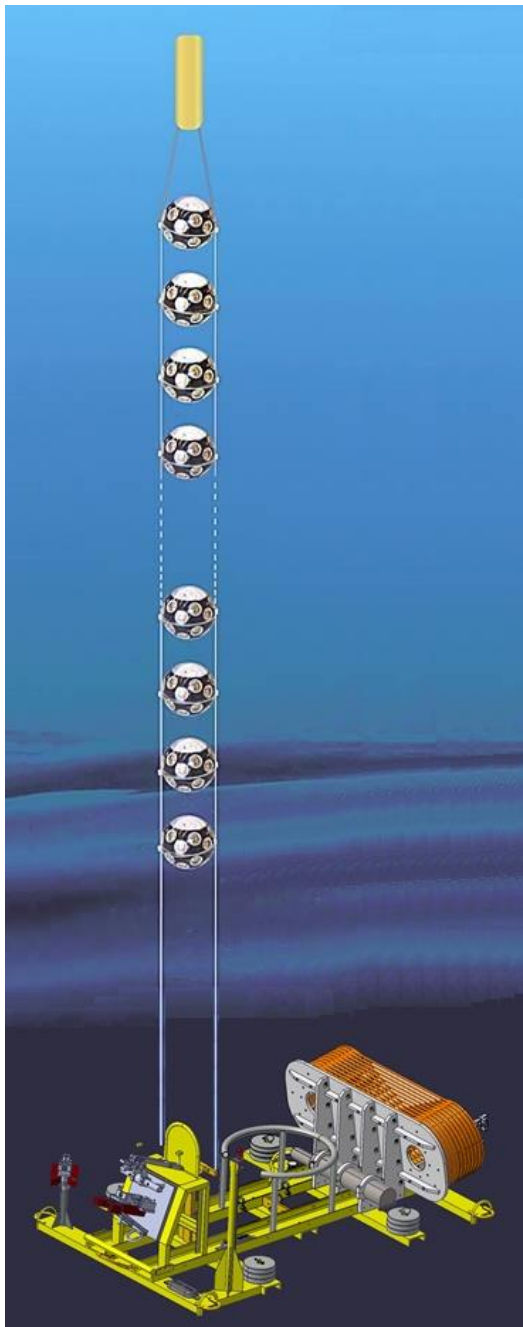


Noeud 2 : déployé 10/2020





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

	ORCA	ARCA
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



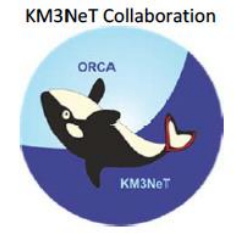
← ~0,4 m →

- 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



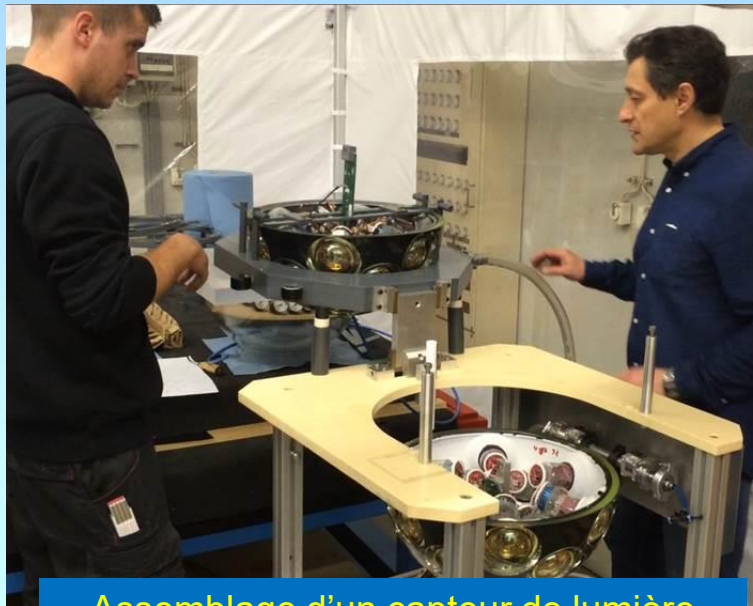
Dépliage autonome



Intégration DU au CPPM pour déploiement



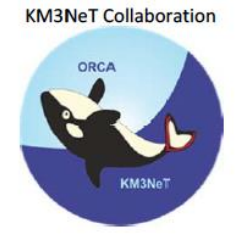
Calibration DU en salle noire au CPPM



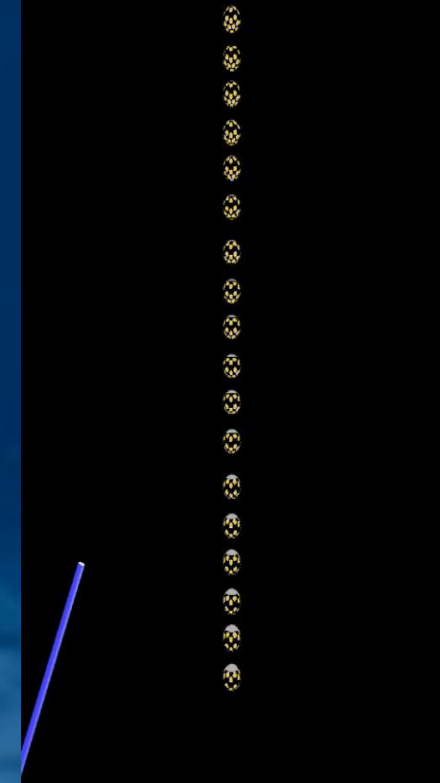
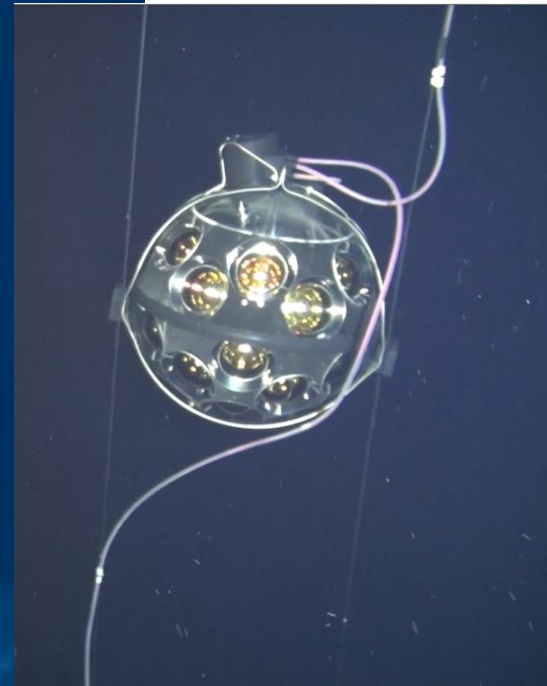
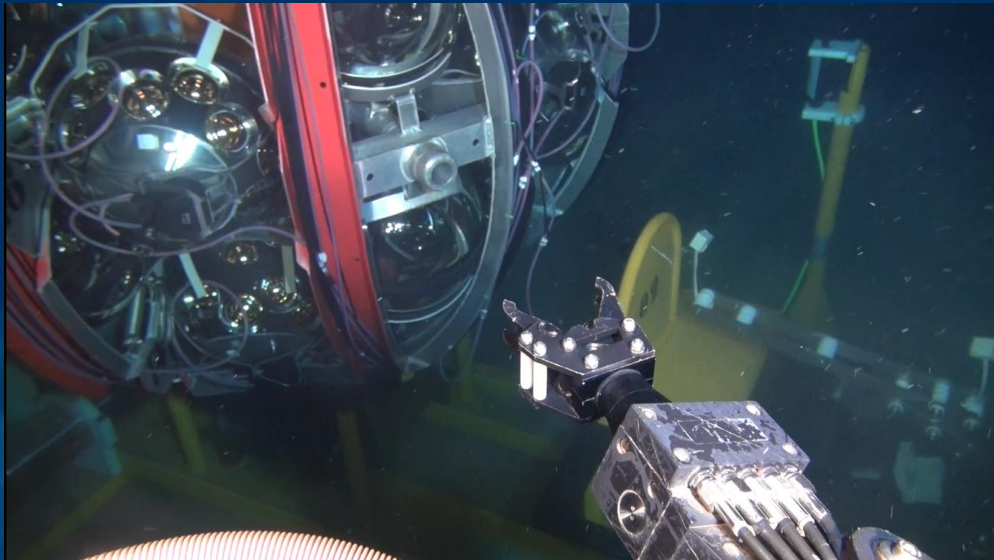
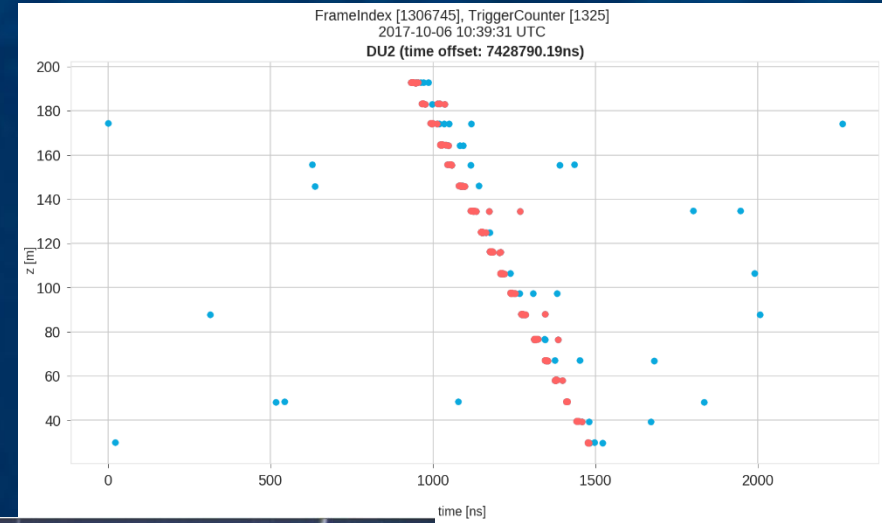
Assemblage d'un capteur de lumière



Tests du capteur de lumière



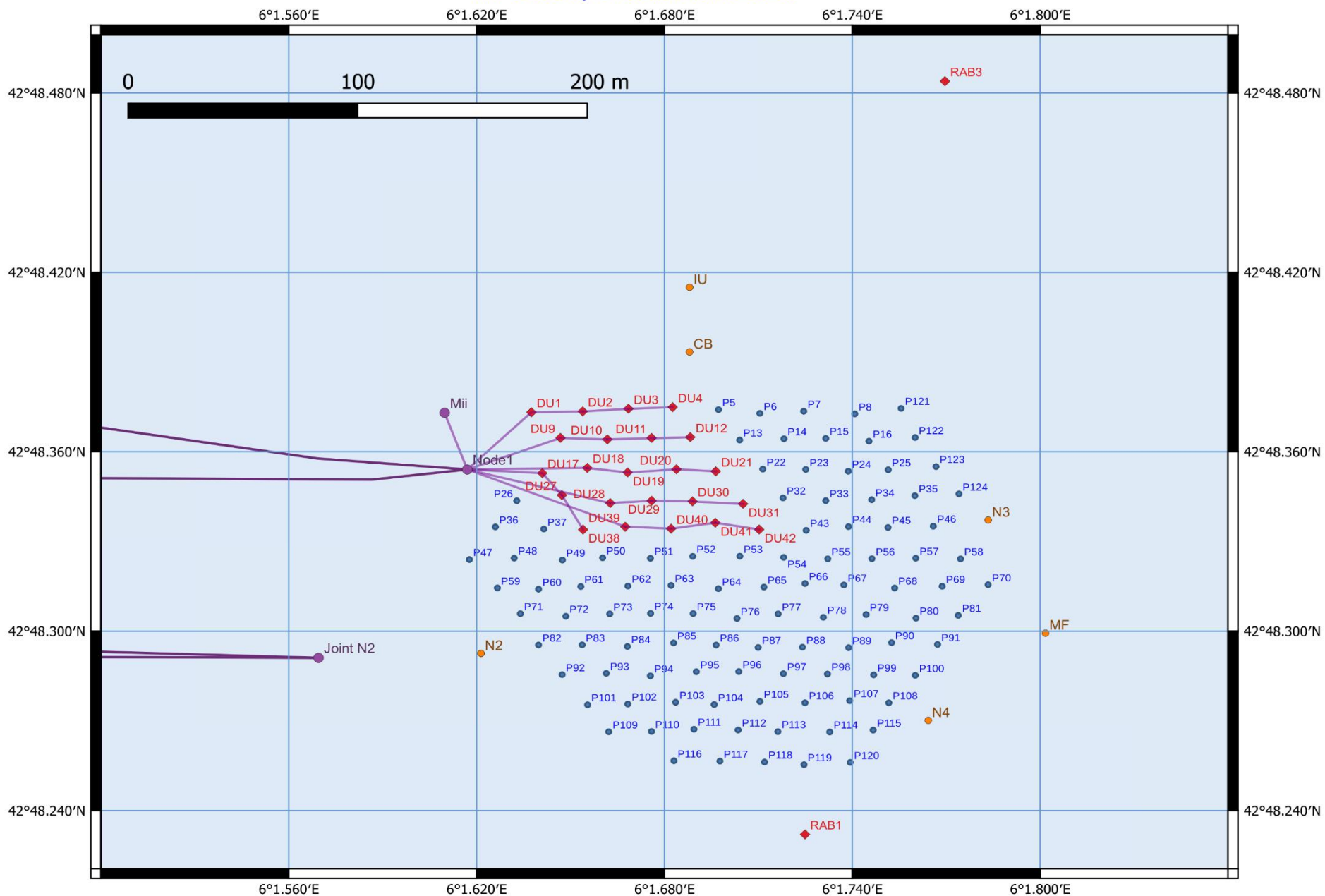
La première ligne KM3NeT-ORCA

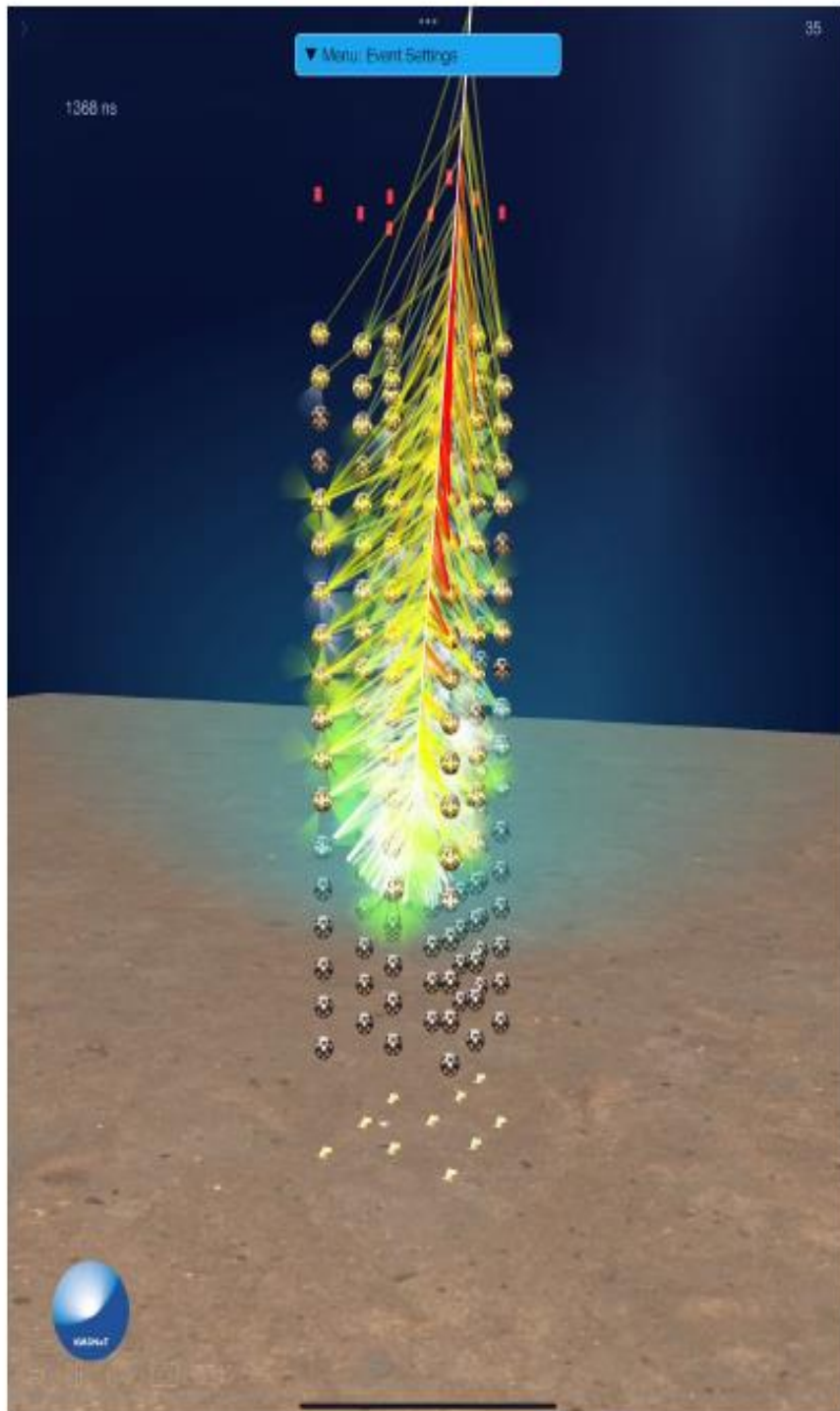


1^{ère} ligne mise en opération en 2017

Status de KM3NeT-ORCA : 23 lignes en opération

KM3NeT/ORCA Juin 2024





Statut et 1^{ers} Résultats

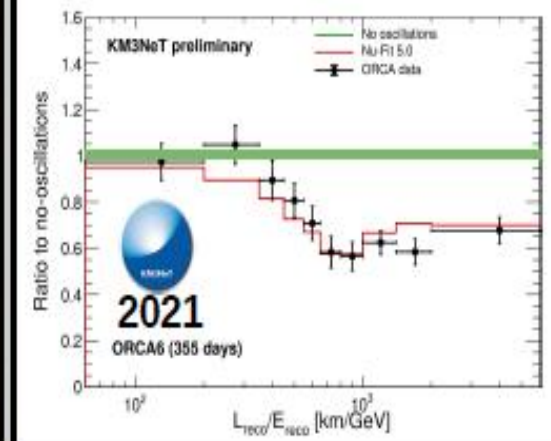
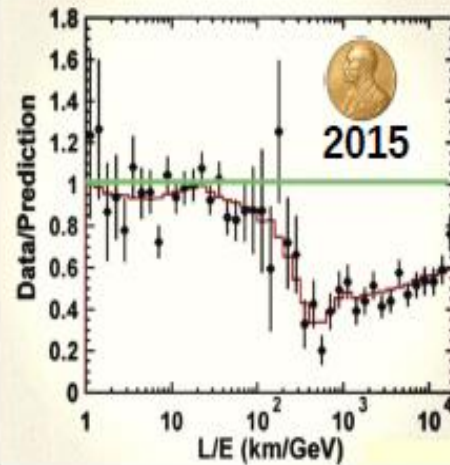
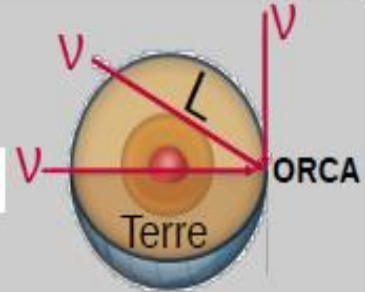
Les détecteurs sont en construction.

ORCA : 19 lignes / 115

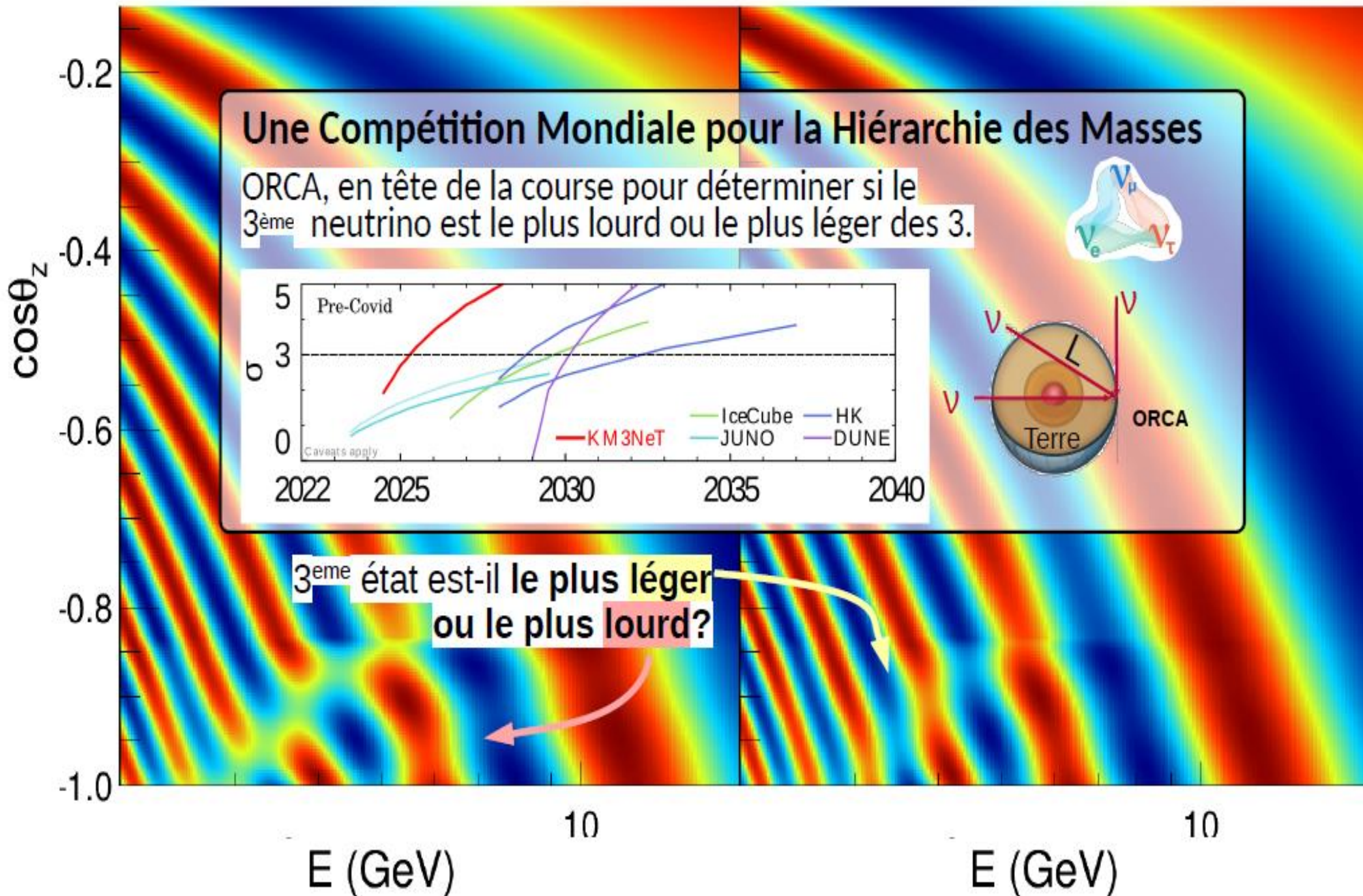
ARCA : 28 lignes / 230

Les lignes déployées sont déjà exploitées, et des neutrinos sont observés tous les jours.

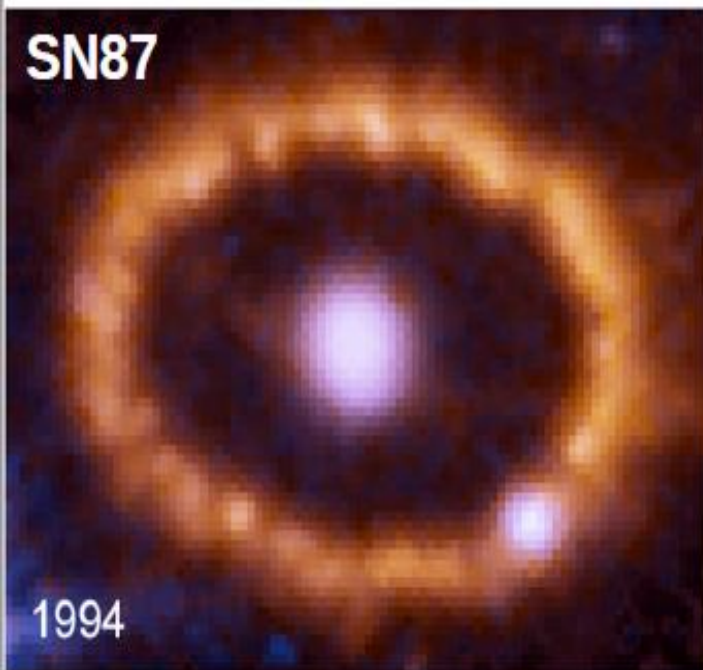
Les 6 premières lignes ORCA ont déjà permis d'observer les propriétés quantiques des neutrinos (Nobel 2015) !



Quelques Perspectives Scientifiques



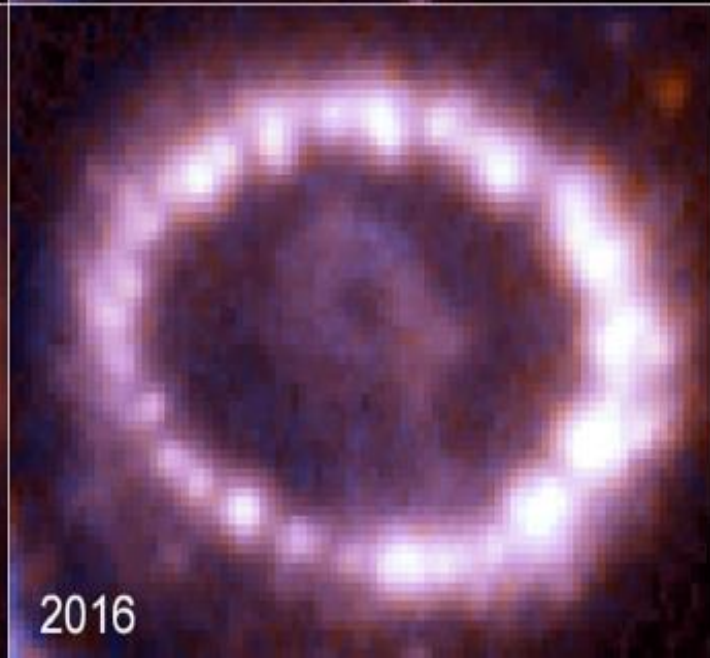
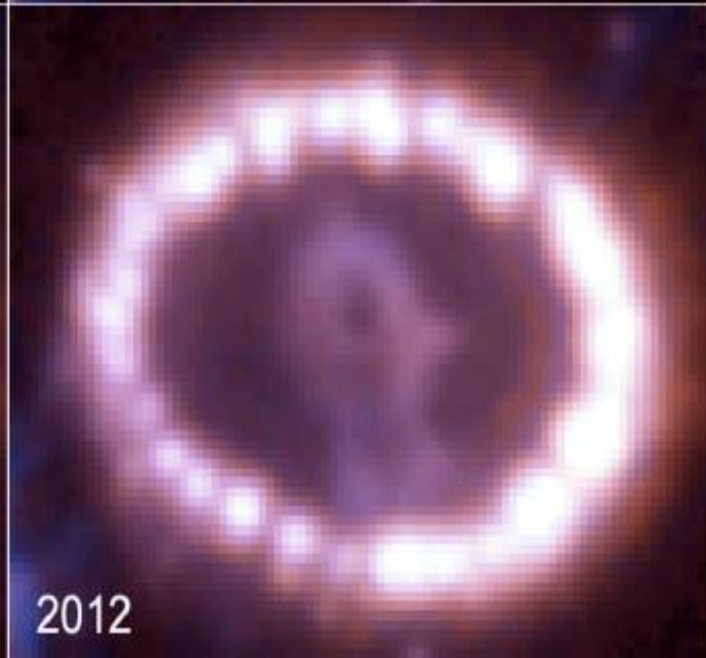
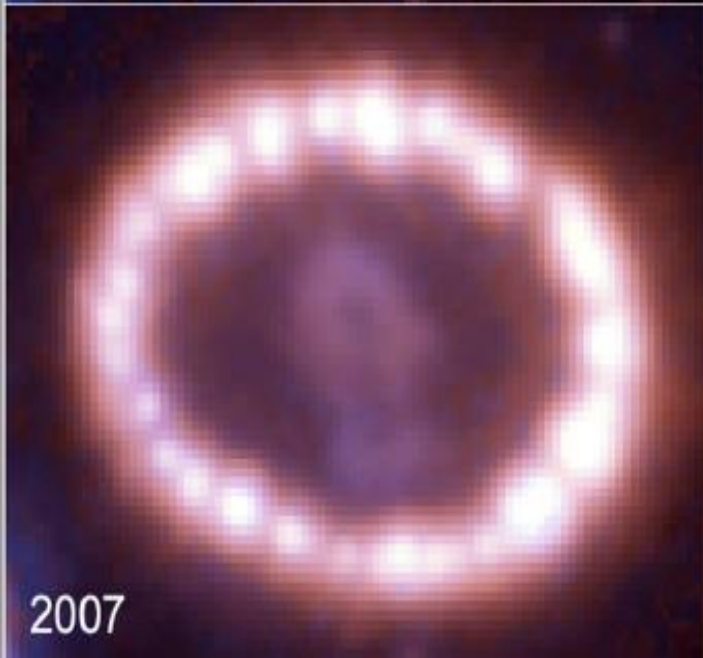
Quelques Perspectives Scientifiques



L'astronomie multi-messagers

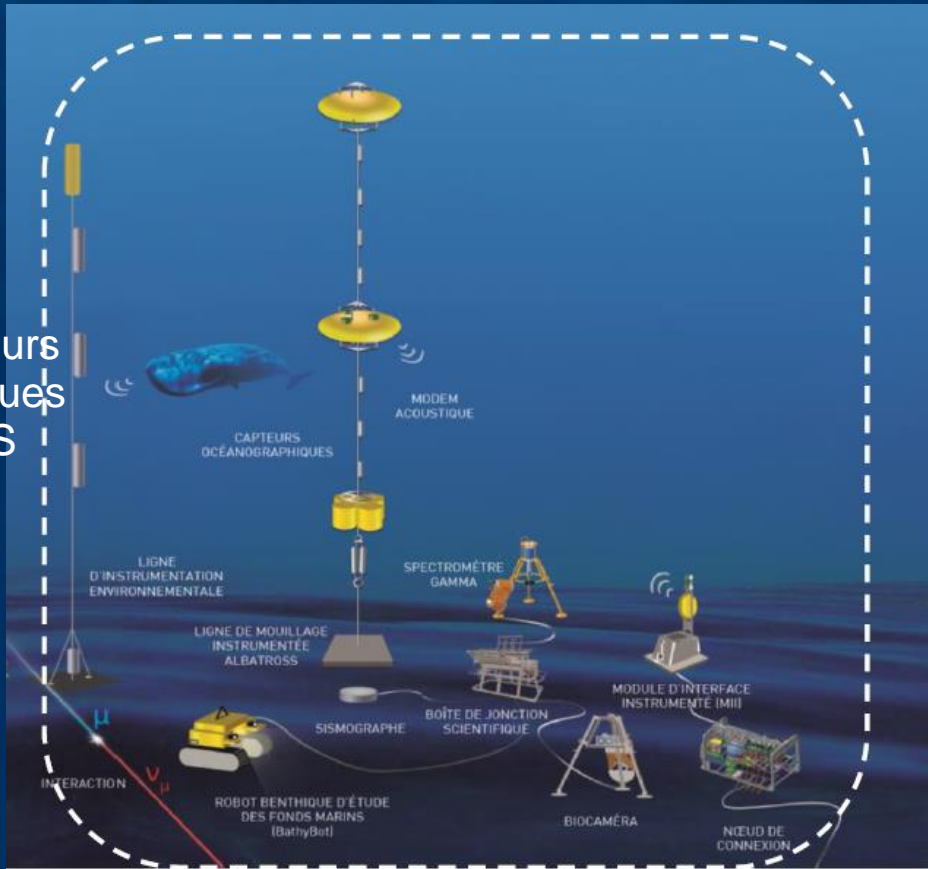
Mettre à disposition, en quelques instants, tous les télescopes du monde pour étudier des événements astronomiques rares.

Exemple : la prochaine supernova galactique émettra 10^{50} neutrinos, détectables par KM3NeT, et sera visible en plein jour pendant plusieurs semaines !



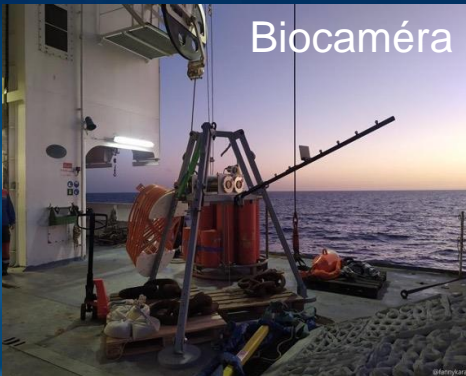
Un Observatoire Pluridisciplinaire en Mer Profonde

Ligne de capteurs
océanographiques
ALBATROSS

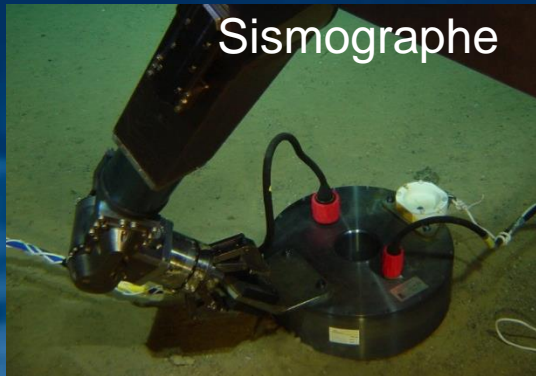


- Astronomie
- Physique des neutrinos
- Océanographie physico-chimique
- Biologie marine
- Bioacoustique
- Bioluminescence
- Microbiologie
- Ecologie, biogéochimie
- Sismologie
- Environnement
- Energies renouvelables
- Acoustique sous-marine
- R&D technologies sous-marines
- ...

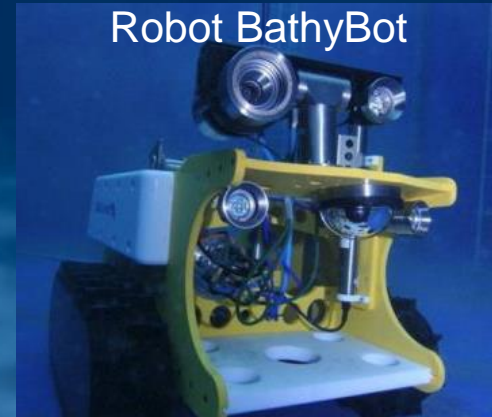
Biocaméra



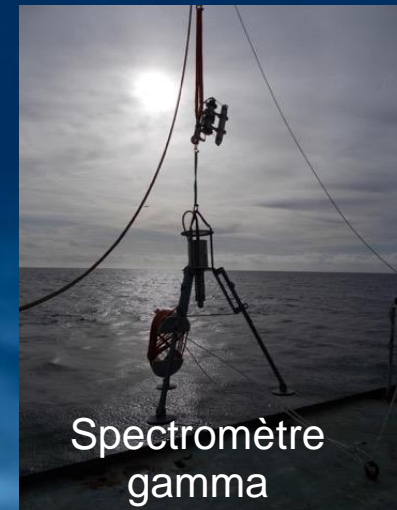
Sismographe



Robot BathyBot

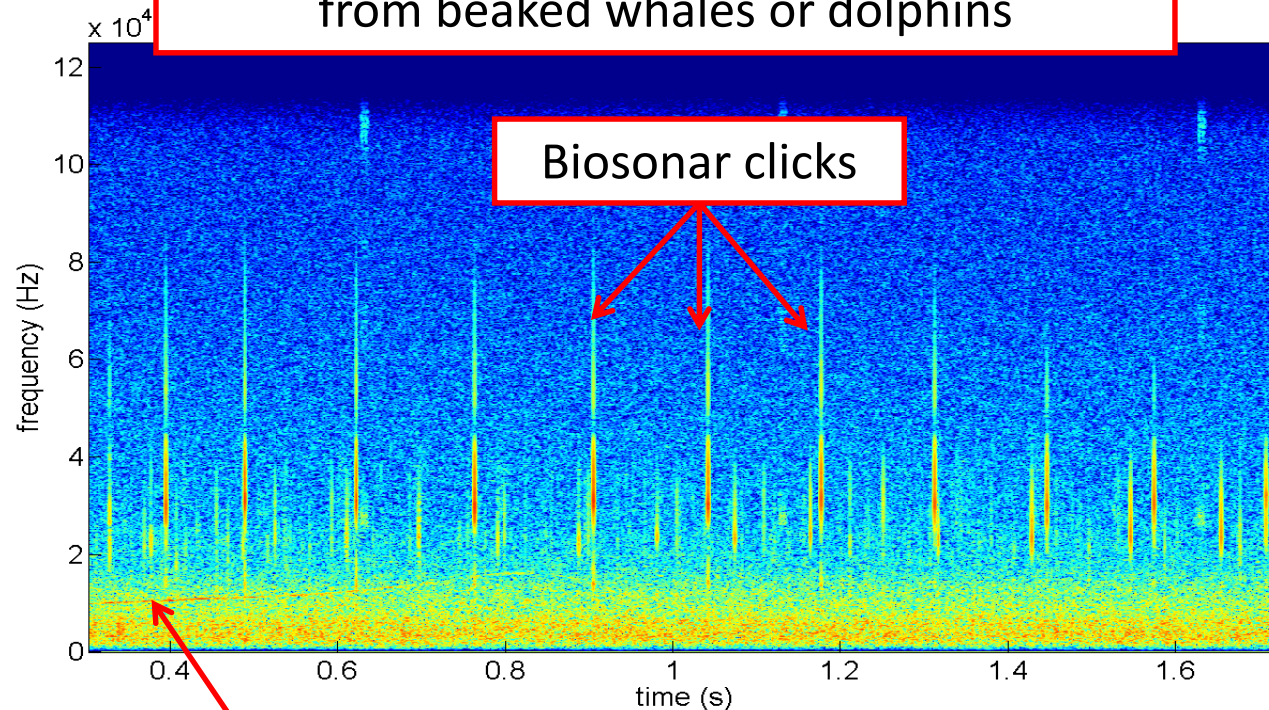


Spectromètre
gamma



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



Démantèlement du détecteur ANTARES en juin 2022





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**
- Durant ~15 ans d'observation en continu, ANTARES a détecté ~15 000 neutrinos qui ont permis d'apporter de nouvelles informations sur les **cataclysmes de l'Univers**, l'origine des **Rayons Cosmiques** de hautes énergies et la nature de **la mystérieuse Matière Noire**
- La construction du télescope à neutrinos de seconde génération KM3NeT, basé sur une technologie améliorée, **est en cours !**
→ 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 LSPM offre un potentiel unique de recherches **pluridisciplinaires** très riches en mer profonde