

Potentiel pluridisciplinaire d'ANTARES¹ et MEUST²/KM3NeT³



L'observatoire câblé sous-marin ANTARES et ses extensions prévues associent un télescope à neutrinos à des lignes instrumentées pluridisciplinaires. Cette infrastructure présente un grand potentiel de découvertes dans un large éventail de disciplines. Sa caractéristique essentielle consiste en une connexion permanente établie entre le rivage et les grands fonds, avec une très grande capacité d'acquisition de données en temps réel sur plusieurs années. Cette note présente l'état actuel de l'infrastructure et les extensions programmées, et donne quelques pistes non exhaustives d'exploitation de l'observatoire dans les domaines des Sciences de la Mer et de la Terre, illustrées d'exemples déjà implémentés sur ANTARES.

L'INFRASTRUCTURE

L'existant

La Collaboration européenne ANTARES (<http://antares.in2p3.fr/>) rassemble actuellement 28 instituts de 7 pays. Elle a construit un observatoire pluridisciplinaire sous-marin (figure 1) localisé au large des îles d'Hyères au Sud-Est de Toulon par 42° 48' N, 6° 10' E et 2475m de fond.

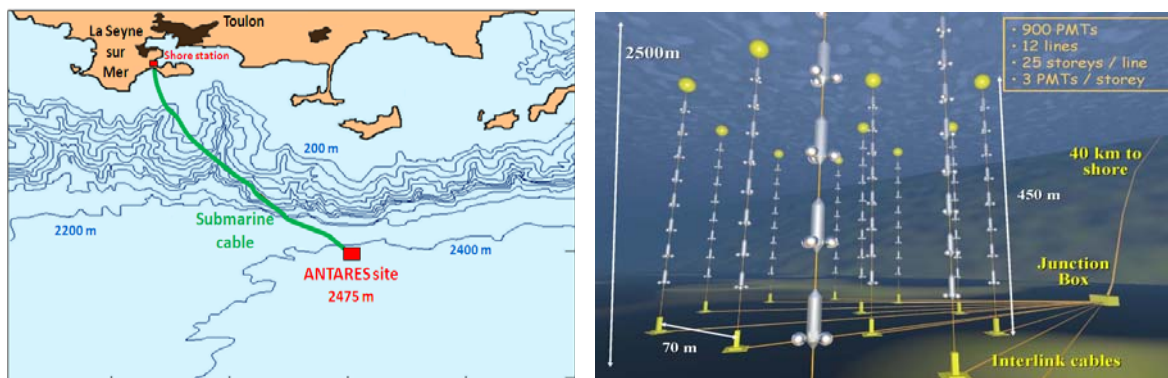


Figure 1: Localisation du site ANTARES (gauche) et vue schématique de l'observatoire (droite)

¹ Contacts : Paschal Coyle (coyle@cppm.in2p3.fr) et Christian Tamburini (christian.tamburini@univmed.fr)

² Contacts : Claude Vallée (vallee@cppm.in2p3.fr) et Etienne Ruellan (etienne.ruellan@cnsr-dir.fr)

³ Contact : Paschal Coyle (coyle@cppm.in2p3.fr)

Un câble électro-optique sous-marin de 45 km relie la plateforme à la station terre de La Seyne sur Mer, qui accueille une ferme d'ordinateurs de filtrage et de traitement des données venant de la mer. Après sélection, les données sont acheminées par le réseau standard de communication vers le Centre de Calcul de l'IN2P3 à Lyon. L'observatoire comprend un télescope à neutrinos, formé de 12 lignes équipées d'un total de 900 détecteurs optiques, dont l'objectif principal est la détection de neutrinos cosmiques de haute énergie, et divers capteurs de données océanographiques disposés sur les lignes neutrinos et sur une 13^{ème} ligne d'instrumentation dédiée baptisée IL07. Le télescope à neutrinos est complètement opérationnel depuis mai 2008. Les capteurs océanographiques délivrent des données en continu depuis 5 ans et sont régulièrement maintenus et complétés. Leurs caractéristiques en font un observatoire sous-marin unique au monde, enregistré comme nœud du réseau d'observation MOOSE⁴ déployé dans la Méditerranée nord-occidentale en soutien du Chantier de la Méditerranée⁵, programme interdisciplinaire du CNRS couvrant la période 2010-2020.

Le futur proche

La Collaboration ANTARES développe actuellement une extension de ses capacités pluridisciplinaires, avec l'objectif de permettre à 4 ou 5 utilisateurs la connexion permanente de nouveaux instruments à l'infrastructure sous-marine existante. Le service comprendra la fourniture d'énergie électrique, le transfert des données en temps réel au rivage et le traitement et stockage de ces données à terre. Il s'appuie sur l'installation d'une Boîte de Jonction Secondaire (BJS), construite par l'IFREMER, connectée par un câble électro-optique d'environ 350 m à la boîte de jonction principale actuelle de l'observatoire (figure 2).

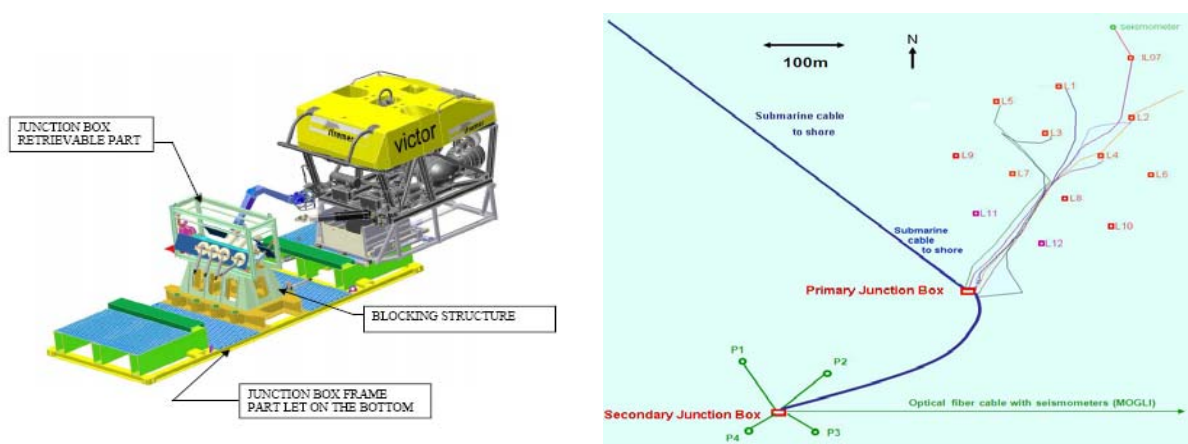


Figure 2: Boîte de jonction secondaire d'ANTARES déployée par le ROV Victor de l'IFREMER (gauche) et sa localisation sur site (droite)

⁴ <http://www.obs-vlfr.fr/moose/>

⁵ <http://www.dt.insu.cnrs.fr/c-med/c-med.php>

Plusieurs projets sont en cours de développement afin d'augmenter les capacités d'observation de l'infrastructure associée à la BJS :

- Un système de transmission acoustique de données vers des lignes autonomes : la BJS sera équipée de l'interface utilisateur standard MII (pour Module Interface Instrumentation), développée par la Division Technique de L'INSU, qui comportera un système de transfert de données par modem acoustique. Cela permettra l'installation à distance de lignes de mouillage instrumentées autonomes bénéficiant d'une connexion temps réel pour la transmission de leurs données par l'intermédiaire de la BJS. Une telle ligne est en cours de conception dans le cadre du réseau d'excellence européen EsoNet.
- Un réseau de connexion à longue distance (projet DEEPSEANET développé par l'IFREMER). Ce système permettra de relier sur le fond des instruments autonomes en énergie, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de la BJS, grâce à une fibre optique économique.

Le déploiement de la BJS sur site est programmée pour fin 2010. Les spécifications et procédures d'appels d'offres pour les utilisateurs potentiels sont en cours de définition, afin entre autres de garantir que les nouveaux instruments ne perturberont pas le fonctionnement du télescope à neutrinos. Le formatage des données multidisciplinaires pour leur stockage sur base de données et leur distribution aux utilisateurs est aussi en cours de définition. Ce formatage s'appuiera sur les standards utilisés par les communautés concernées.

Le moyen et long terme

A plus long terme, le projet KM3NeT⁶ prévoit l'instrumentation d'un volume de plus d'un km³ en mer Méditerranée pour un détecteur neutrino associé à une plateforme multidisciplinaire sous-marine (figure 3). L'observatoire fait partie des grands projets européens prioritaires définis par l'ESFRI. Ses composantes neutrino et océanologique sont soutenues par des programmes européens FP7 (Phases Préparatoires KM3NeT et EMSO⁷/EsoNet). Le rapport de conception technique de KM3NeT sera publié au printemps 2010.

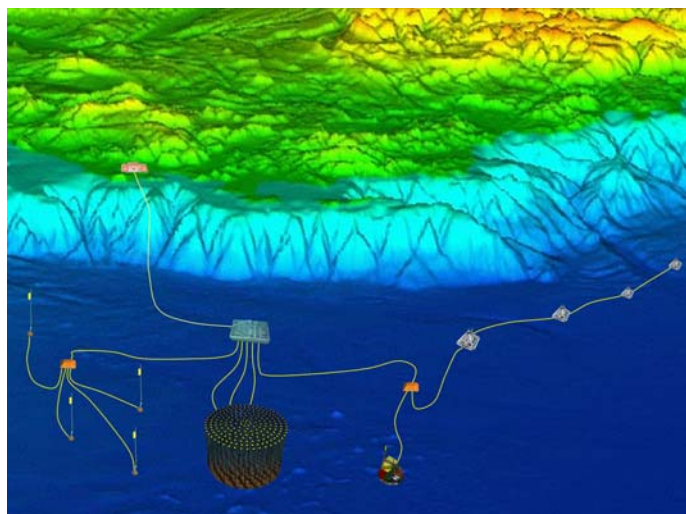


Figure 3 : *Vue d'artiste d'une configuration possible de l'infrastructure MEUST/KM3NeT*

⁶ <http://www.km3net.org/home.php>

⁷ <http://www.esonet-emso.org/>

Le projet MEUST (Mediterranean Eurocentre for Underwater Sciences and Technologies), initié par l'INSU et l'IN2P3 avec un fort soutien de l'Université de la Méditerranée et des collectivités territoriales, constitue une première étape vers cette grande infrastructure. Il consiste en la définition et l'installation, sur un site proche d'ANTARES, d'une infrastructure sous-marine mutualisée incluant un nouveau câble électro-optique vers la côte et des boîtes de jonction primaire et secondaires. Une dizaine de lignes neutrino de deuxième génération et plusieurs lignes instrumentées multidisciplinaires seront déployées. L'ensemble des solutions retenues seront issues de l'expérience acquise avec ANTARES et des études en cours dans le cadre KM3NeT/EMSO, et auront vocation à être mises en œuvre sur le grand observatoire final. Le projet est inscrit au registre des Très Grands Equipements (TGE) et son déploiement s'étalera sur les 4 années à venir.

POTENTIEL PLURIDISCIPLINAIRE

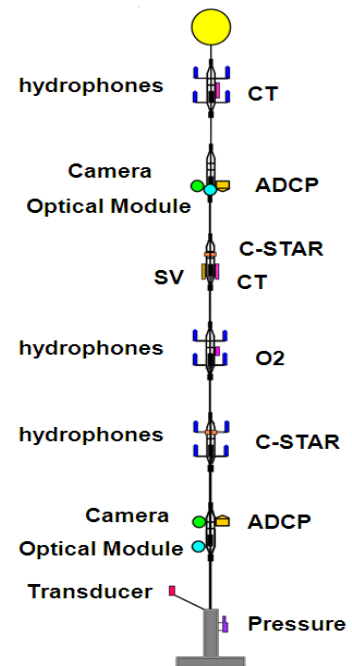
L'implantation d'un observatoire sous-marin pluridisciplinaire permanent dans les grandes profondeurs permet de collecter des informations inédites dans de nombreux domaines incluant l'océanologie, l'écologie et la géologie. Les capteurs qui peuvent être installés sur l'infrastructure d'ANTARES et de MEUST/KM3NeT auront les caractéristiques suivantes :

- Capteurs à forte consommation électrique et/ou haut débit de données, connectés au câble électro-optique par une boîte de jonction comme l'est la ligne instrumentée actuelle d'ANTARES (IL07). Ces capteurs doivent rester stables sur plusieurs années car leur accès est limité après connexion.
- Capteurs à faible consommation électrique et faible débit de données, installés sur des lignes autonomes à transmission acoustique en temps réel. Ces capteurs peuvent être entretenus et calibrés lors de récupérations programmées des lignes, par exemple annuellement.
- Capteurs autonomes à faible consommation électrique, déployés à grande distance du site principal (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres), auquel ils sont connectés par fibre optique pour la transmission de leurs données en temps réel (réseau DEEPSEANET).

Ces capteurs peuvent provenir de catalogues d'instruments disponibles dans le commerce, ou être développés pour l'occasion en vue d'une mesure inédite, éventuellement avec le soutien technique de l'IN2P3 et de la DT-INSU. A titre d'exemple, la figure 4 détaille les instruments installés sur la ligne instrumentée IL07 d'ANTARES.

Figure 4 : La ligne instrumentée d'ANTARES (IL07)

- Deux profileurs de courant acoustique Doppler (ADCP) pour les mesures de la vitesse et de la direction du courant.
- Un célérimètre SV pour enregistrer localement la vitesse du son.
- Deux sondes CT(D) pour mesurer la conductivité, la température et la pression.
- Deux équipements C-Star pour les mesures de la transparence de l'eau.
- Une sonde de mesure du taux d'oxygène.
- Un capteur de pression.
- Deux caméras pour la prise de courtes vidéos de microorganismes bioluminescents.



La disposition des capteurs sur et autour de l'observatoire permettra de collecter les données en temps réel sur de longues périodes et en trois dimensions, sur l'ensemble de la colonne d'eau, la radiale rivage - grand fond et le long de la côte. La possibilité de corrélérer l'évolution d'observables très divers (comme par exemple la vitesse du courant et l'intensité de la bioluminescence) sera une aide précieuse à l'interprétation des observations. Quelques exemples des problématiques scientifiques associées, illustrés de mesures déjà effectuées par ANTARES, sont donnés dans la suite.

Hydrologie et climat

La configuration du bassin méditerranéen le rend particulièrement sensible aux conditions extérieures et en fait un lieu privilégié d'étude des évolutions climatiques en cours, ainsi que des effets d'une forte urbanisation. Le suivi des paramètres physiques de l'eau (courant, température, salinité, taux d'oxygène, etc...) permet d'étudier l'évolution de ce système complexe régi par des processus couplés atmosphère / océan / surfaces continentales. Des mesures permanentes sur de longues périodes permettent aussi de détecter les événements intenses épisodiques, caractéristiques des dynamiques non linéaires, et de comprendre leur lien avec l'évolution globale du système. A titre d'exemple, la figure 5 montre l'évolution des mesures de température et courant effectuées par ANTARES sur plusieurs années. Sur cette longue période, plusieurs événements intenses ont été observés, caractérisés dans certains cas par des transferts rapides d'eau de la surface vers les grands fonds. Ces événements semblent associés à des épisodes climatiques particuliers, comme des hivers froids, et sont corrélés avec l'observation d'une forte bioluminescence.

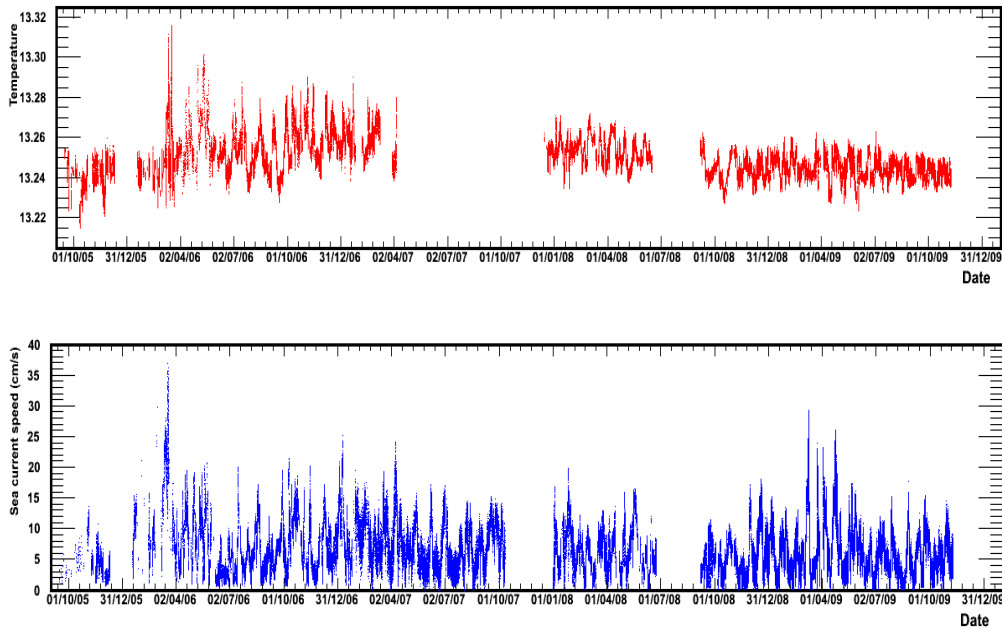


Figure 5: *Mesure in situ à 2400 mètres de profondeur de l'évolution de la température de l'eau (haut) et de la vitesse du courant (bas) depuis 2005.*

Ecosystèmes et biodiversité

L'infrastructure sous-marine permet de suivre l'évolution des écosystèmes et de leur biodiversité à toutes les échelles, des organismes microscopiques aux mammifères marins les plus évolués.

Le cycle des éléments biogènes et des nutriments peut être étudié sur toute la colonne d'eau avec des capteurs sensibles aux phénomènes biogéochimiques correspondants. Par exemple, un analyseur d'oxygène baptisé IODA6000 (« In situ Oxygen Dynamic Autosampler », figure 6), développé par le Centre d'Océanologie de Marseille (COM) et le Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM), a pour but de mesurer in situ la consommation d'oxygène par les micro-organismes marins, liée au cycle du carbone. La dégradation des hydrocarbures en milieu profond a aussi été étudiée.



Figure 6 : *Vue du système IODA6000 avant son déploiement sur une ligne d'ANTARES.*

Les organismes marins des grands fonds peuvent être directement observés, par exemple par les signaux de bioluminescence qu'ils émettent, enregistrés en continu par les photomultiplicateurs du télescope à neutrinos. L'amplitude et la structure temporelle de ces signaux permet d'identifier les signatures propres à chaque espèce (figure 7), les populations microbiennes produisant un fond continu et les organismes plus évolués des flashes plus

intenses. L'analyse statistique de ces signaux peut permettre de suivre l'évolution à court terme (cycles diurnes), à moyen terme (variations saisonnières), et à long terme des populations d'espèces en fonction de la profondeur. L'effet de la pression sur la bioluminescence microbienne a été aussi étudié. Sur les années passées, plusieurs périodes de bioluminescence intense ont été observées, souvent associées à des augmentations des courants marins (figure 8). Une caméra a été installée pour tenter de capturer des images des animaux bioluminescents les plus évolués (figure 9) et un dispositif de vision de nuit sensible au photon unique est en cours de développement avec l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon.

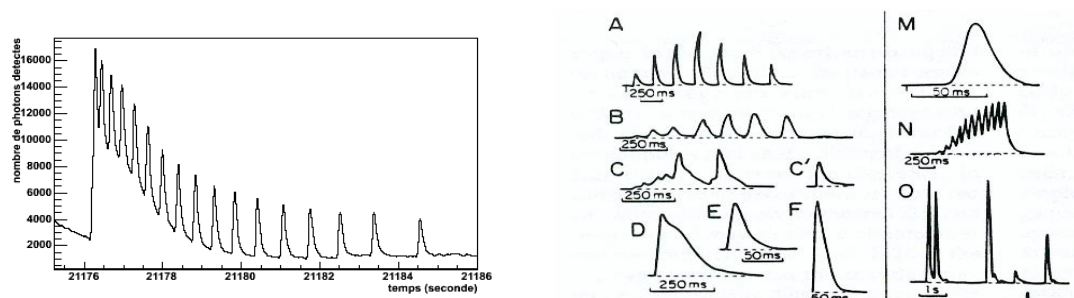


Figure 7 : Une impulsion de bioluminescence enregistrée sur le site ANTARES à 2475 m de profondeur (gauche), comparée aux signaux caractéristiques issus de la littérature de biologie marine (droite).

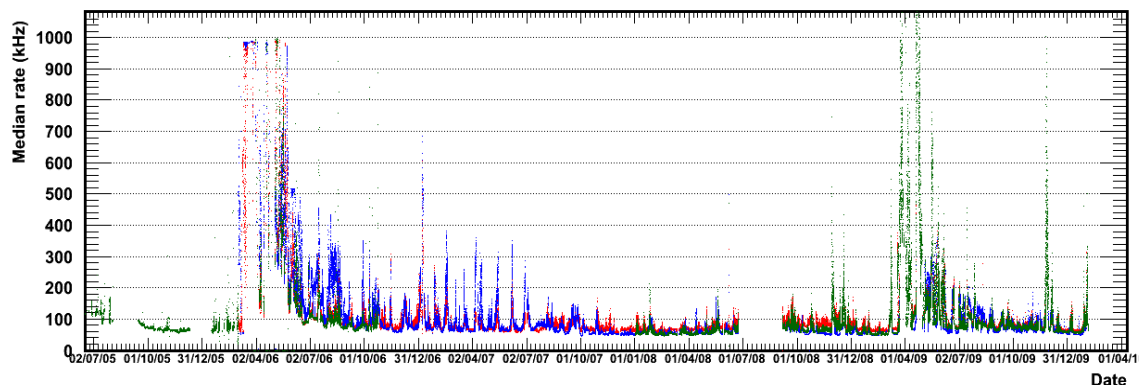
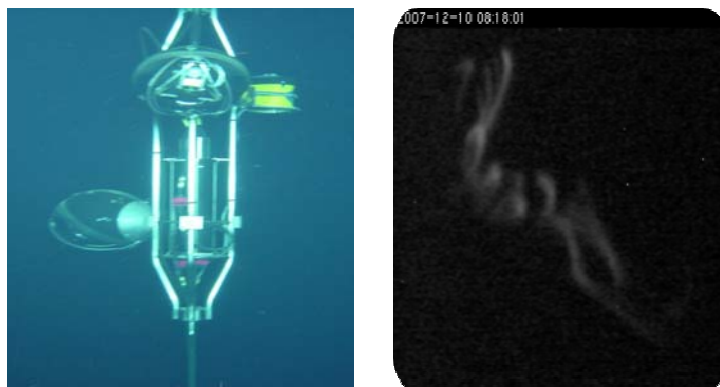


Figure 8 : Taux de comptage moyen enregistré par un photomultiplicateur sur le site ANTARES pendant une durée de 5 ans, de mai 2005 à février 2010.

Figure 9 : Caméra dans sa sphère (gauche) et photographie enregistrée in situ (droite)



Les populations marines les plus évoluées comme celles des mammifères marins peuvent être suivies par les signaux sonores qu'elles émettent, et des observations acoustiques prometteuses au large de la Sicile ont récemment été rapportées. En effet, des grappes d'hydrophones large bande permettent, grâce à l'exploitation des coïncidences locales, de supprimer le bruit aléatoire ambiant et de détecter et mesurer la direction d'un signal acoustique donné. L'analyse statistique d'enregistrements effectués sur le site d'ANTARES, où les mammifères marins sont particulièrement nombreux, combinée à la connaissance des caractéristiques sonores des signaux émis par chaque espèce, devrait permettre de mieux étudier le comportement de ces animaux et de suivre l'évolution de leurs populations sur le long terme. Des hydrophones ont déjà été installés sur ANTARES et l'équipe de l'Université polyvalente de Catalogne à Barcelone a récemment montré qu'ils peuvent effectivement permettre d'écouter les sons émis par les mammifères marins (figure 10).

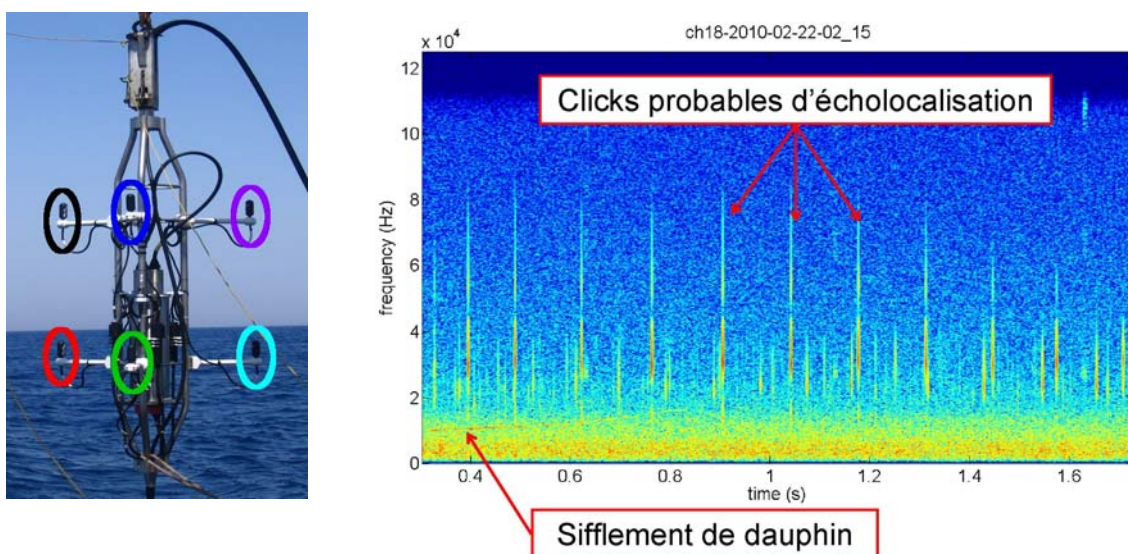


Figure 10 : Hydrophones montés sur un étage d'ANTARES (gauche) et spectrogramme des enregistrements sonores obtenus, dont les signaux d'écholocalisation ("clicks") dans le domaine des ultrasons proviennent certainement de dauphins ou de baleines (droite).

Sciences de la Terre

Certaines régions de la Méditerranée sont très actives géologiquement, et l'extension des moyens de mesure vers les grands fonds permet de mieux comprendre les mécanismes en jeu tout en complétant les réseaux d'alerte pour les risques sismiques et volcaniques. Le site d'ANTARES n'est pas la zone la plus active de la Méditerranée nord-occidentale, mais le réseau DEEPSEANET permettra de déporter des capteurs jusque vers la région plus sensible de Nice. Une équipe du Laboratoire Géosciences-Azur de l'Observatoire de Villefranche-sur-Mer a déjà profité de l'infrastructure d'ANTARES pour installer sur le site un sismographe

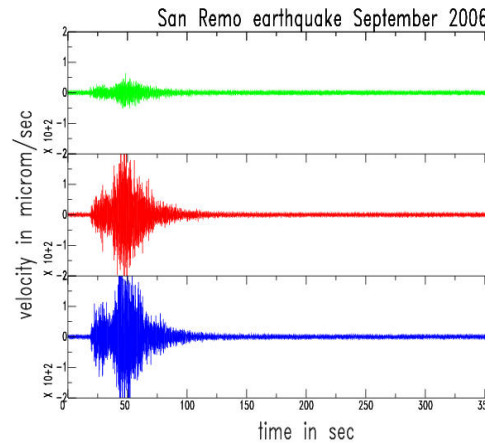
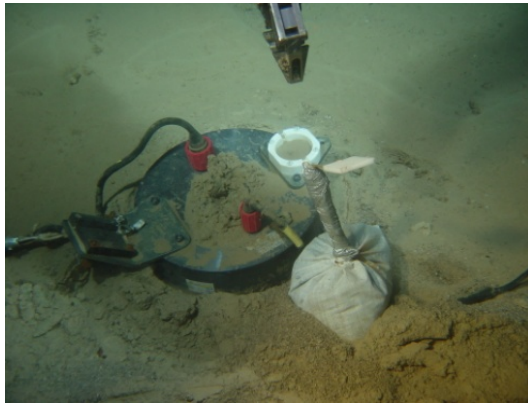


Figure 11 : Déploiement d'un sismographe sur ANTARES (gauche) et enregistrement du tremblement de terre de San Remo survenu en Septembre 2006 (droite).

large bande (figure 11), complété d'un capteur de pression de haute sensibilité pour la détection des tsunamis. Le but recherché est, dans un premier temps, de valider le fonctionnement à long terme d'un tel sismographe en mer profonde et de quantifier les bruits et interférences générés dans son environnement. L'acquisition en temps réel des données sismologiques de ce capteur permet en outre une première extension en mer du réseau de surveillance sismique de la côte provençale ainsi qu'une meilleure triangulation du foyer des séismes enregistrés. Cette expérience constitue une première étape vers la définition d'un large réseau sous-marin permanent de surveillance sismique de la région Provence-Côte d'Azur.