

LSPM, une infrastructure de recherche sous-marine de pointe

Bien plus qu'un simple laboratoire, le Laboratoire Sous-Marin Provence-Méditerranée est une infrastructure de recherche nationale et européenne de premier plan à la croisée de la technologie et de la science fondamentale — une véritable sentinelle des profondeurs méditerranéennes.

Un laboratoire immergé en Méditerranée

Inauguré le 24 février 2023 en présence de figures majeures du monde scientifique, dont le président du CNRS, Antoine Petit, le Laboratoire Sous-Marin Provence-Méditerranée (LSPM) est situé à 40 kilomètres au sud de la côte française, au large des côtes provençales. Installé à 2 500 mètres de profondeur, il est relié à la terre par un câble électro-optique de 40 kilomètres.

Le cœur de l'infrastructure repose sur un réseau de nœuds, ou boîtes de jonction, posés sur le fond marin. Ces boîtes agissent comme des multiprises sous-marines, distribuant l'énergie et centralisant les données des instruments qui y sont connectés. Elles sont reliées à l'infrastructure terrestre via le câble électro-optique, qui transmet l'énergie électrique depuis la terre et assure le transfert des données scientifiques via des fibres optiques.

La construction du LSPM a été financée dans le cadre d'un Contrat Plan État-Région (CPER), avec un soutien déterminant de l'Europe, de CNRS Nucléaire & Particules, et de la délégation régionale académique à la recherche et à l'innovation (DRARI).

À la croisée des disciplines

Plateforme nationale du CNRS, co-pilotée par Aix-Marseille Université et Ifremer, le LSPM bénéficie du label de plateforme technologique d'Aix-Marseille Université. L'infrastructure et ses équipes sont hébergées au Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM).

Sa mission principale est d'ouvrir ses portes aux communautés scientifiques et industrielles, en fournissant alimentation électrique, transfert de données et interfaces d'accueil pour une vaste gamme d'instruments de recherche.

Deux grandes infrastructures de recherche utilisent aujourd'hui ses capacités : le **KM3NeT** (Kilometre Cube Neutrino Telescope), un télescope à neutrinos de nouvelle génération conçu pour détecter les particules cosmiques depuis les profondeurs, et l'**EMSO** (European Mediterranean Seafloor Observatory), une infrastructure européenne dédiée à l'observation du milieu marin (sismologie, biologie, océanographie...).

Traquer les particules cosmiques depuis les abysses

Le projet KM3NeT représente l'application scientifique la plus emblématique du laboratoire sous-marin.

Le neutrino est une particule élémentaire de la famille des leptons, au même



Déploiement des lignes KM3NeT © Paschal Coyle

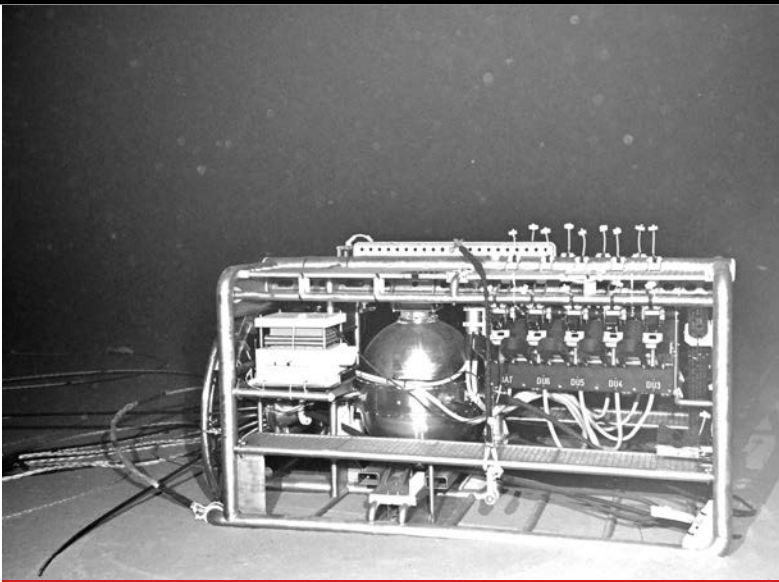
titre que l'électron. Cependant, contrairement à ce dernier, le neutrino est électriquement neutre et possède une masse extrêmement faible, proche de zéro. Sa principale caractéristique réside dans son interaction quasi nulle avec la matière, ce qui lui permet de traverser des milieux très denses, comme la Terre, sans être arrêté. Bien qu'invisibles, les neutrinos sont, après les photons, les particules les plus abondantes de l'univers et jouent un rôle crucial dans de nombreux processus nucléaires.

L'objectif de KM3NeT est de détecter les neutrinos cosmiques de haute énergie, produits lors de phénomènes astrophysiques violents (supernovæ, centres de galaxies actives, etc.). En raison de leur faible taux d'interaction, il est indispensable de disposer d'un détecteur au volume de l'ordre du kilomètre cube pour espérer en observer un nombre significatif. Le télescope KM3NeT a précisément été conçu pour atteindre cet ordre de grandeur.

La détection s'appuie sur un phénomène physique appelé l'effet Tcherenkov. Lorsqu'un neutrino de haute énergie traverse la Terre et interagit avec une molécule d'eau, il génère une particule chargée se déplaçant plus vite que la lumière dans l'eau. Ce dépassement de vitesse locale produit un cône de lumière bleutée, appelé lumière Tcherenkov. Les capteurs optiques de KM3NeT enregistrent ces flashes infimes. Ainsi, en mesurant avec une précision nanoseconde les temps d'arrivée de cette lumière sur l'ensemble des capteurs répartis dans le détecteur du télescope, les scientifiques peuvent reconstruire la trajectoire de la particule émise. Sa direction est quasiment alignée avec celle du neutrino initial, permettant de remonter à sa source cosmique et de dresser une véritable carte du ciel en neutrinos.

Le choix de la Méditerranée pour accueillir ce type de télescope répond à plusieurs exigences scientifiques et techniques :

- 1) **Un volume colossal d'eau disponible** : la mer offre naturellement un espace immense, sans excavation ni contrainte foncière.
- 2) **Une obscurité totale** : la couche d'eau surplombant le détecteur bloque



Nœud 1 de connexion installé par 2450 mètres de profondeur - © Ifremer

presque toute lumière solaire, condition indispensable pour capter la lumière Tcherenkov.

3) **Une grande transparence de l'eau profonde** : cette clarté permet à la lumière Tcherenkov de parcourir de longues distances et d'être détectée avec précision.

Exploration au cœur des fonds marins

Au-delà de la physique des particules, le LSPM reste un observatoire permanent et câblé, qui offre un terrain d'étude exceptionnel à de nombreuses autres disciplines scientifiques.

→ **Océanographie physique** : Des capteurs enregistrent en continu la vitesse et la direction des courants, la température, la pression et la salinité, fournissant des séries longue durée précieuses pour comprendre la dynamique des masses d'eau profondes.

→ **Bioacoustique** : Des hydrophones captent l'environnement sonore sous-marin, permettant d'étudier la pollution sonore en Méditerranée ou encore les vocalisations des mammifères marins. L'analyse de ces signaux aide à estimer la taille des groupes et à reconstituer leurs déplacements en trois dimensions.

→ **Biologie marine et bioluminescence** : Des caméras spécialisées observent les organismes bioluminescents. Le robot sous-marin BathyBot, équipé de caméras et de systèmes d'éclairage, explore le fond marin pour documenter la faune et suivre la colonisation d'un récif artificiel installé à proximité.

→ **Géosciences** : Des sismographes enregistrent l'activité sismique locale et régionale. Une approche innovante exploite également le câble à fibre optique de 40 km comme capteur sismique distribué, capable de détecter les vibrations du fond marin sur toute sa longueur.

→ **Radioactivité** : Un spectromètre gamma mesure en continu les niveaux de radioactivité naturelle et anthropique dans l'eau de mer.

Ces activités de recherche sont le fruit de collaborations étroites avec plusieurs instituts de référence, comme l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) de Marseille, le CPPM, GeoAzur de Nice

et le Laboratoire d'Informatique et Systématique (LIS) de Toulon.

Profondeurs & climat

L'une des contributions majeures de l'observatoire LSPM concerne le suivi en mer profonde des indicateurs du changement climatique.

En partenariat avec le MIO, une ligne de mouillage instrumentée a été déployée à plusieurs kilomètres de la boîte de jonction principale. Ses données sont transmises par liaison acoustique, puis relayées vers la station à terre via la fibre optique. Depuis plusieurs années, cette ligne enregistre en continu la température et la concentration en oxygène.

Ces mesures directes constituent un indicateur essentiel pour évaluer l'impact du réchauffement climatique sur les écosystèmes marins profonds. Les résultats montrent une augmentation préoccupante de la température des eaux profondes augmente de manière préoccupante, tandis que les niveaux d'oxygène dissous diminuent régulièrement.

Deep Blue Sea Expansion

Le LSPM est en phase de croissance dynamique, avec des objectifs d'expansion ambitieux sur les prochaines années à venir.

À ce jour, l'infrastructure représente environ 50% de sa capacité finale. Un premier câble principal relie la côte à deux nœuds sous-marins (nœud 1 et nœud 2), principalement dédiés au projet KM3NeT, tandis qu'un autre nœud accueille les instruments d'EMSO. La seconde moitié du réseau sera déployée avec l'installation de nouveaux nœuds de connexion, sous la maîtrise d'ouvrage du CPPM. Chacun de ces nœuds supplémentaires permettra à la fois d'étendre le volume de détection des neutrinos et d'ouvrir de nouveaux points de connexion pour des instruments dédiés aux sciences marines ou d'équipements industriels afin de favoriser les innovations en lien avec l'exploration des grands fonds marins

Pour en savoir plus :

LSPM
lspm@cppm.in2p3.fr
www.lspm.in2p3.fr/
www.km3net.org/