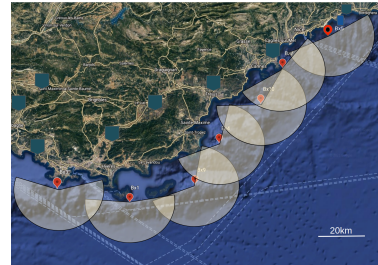
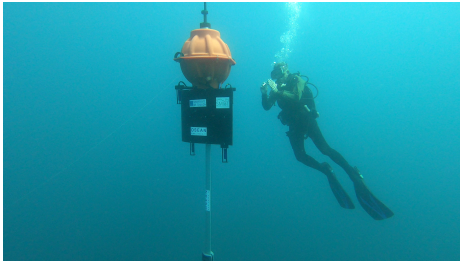


# L' Observatoire BOMBYX

## L'Ethoacoustique ou l'intelligence artificielle pour protéger la faune

H. Glotin, [glotin@univ-tln.fr](mailto:glotin@univ-tln.fr), Chaire IA ADSIL, Bioacousticien, Equipe DYNI,  
Laboratoire Informatique et Systèmes LIS CNRS Université de Toulon, [glotin@univ-tln.fr](mailto:glotin@univ-tln.fr)



<b>1) Résumé étendu</b>	<b>2</b>
<b>2) Introduction</b>	<b>3</b>
<b>3) Matériel &amp; Méthode</b>	<b>4</b>
<b>4) Premiers Résultats</b>	<b>5</b>
<b>5) Perspectives</b>	<b>9</b>
<b>Remerciements</b>	<b>10</b>
<b>Glossaire</b>	<b>10</b>
<b>Références</b>	<b>11</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>12</b>
Annexe technique	12
<b>Système d'enregistrement</b>	<b>16</b>
<b>Placements</b>	<b>16</b>
<b>Agenda</b>	<b>19</b>
Lettres de soutien	19

# 1) Résumé étendu

La biodiversité marine s'effondre et les réserves halieutiques avec. Les fonctions des cétacés qui en sont les super-prédateurs principaux sont majeures. Mais les connaissances sur l'état de leur population sont faibles. Ces sentinelles de la biodiversité marine de la méditerranée sous forte pression anthropique, doivent être mieux observées. Nous proposons alors cet observatoire pour mesurer et comprendre leurs comportements de Marseille à Monaco et l'Italie à termes, et en Corse. Ce projet d'"éthoacoustique" développe l'instrumentation scientifique et les algorithmes IA, notamment dans le cadre de la Chaire IA ADSIL <http://bioacoustics.lis-lab.fr>, pour l'acquisition de masses de données sur la mégafaune et l'anthropophonie du littoral.

Ces analyses participent à prévenir les risques de collisions entre mégafaune et le trafic maritime.

Ce projet s'appuie sur le bilan de Bombyx1, la 1<sup>ère</sup> bouée marine stéréo long terme au monde, placée par UTLN (Pi Glotin) au large du PNPC, qui a suivi la population de cétacés de la Région [Glotin 2017, Poupard PhD 2020] de 2015 à 2019.

Il concentre aussi notre savoir faire des missions Sphyrna soutenue par la Fondation Prince Albert II de Monaco et les Explorations de Monaco [Glotin et al 2020, Ferrari PhD 2020], et les résultats de la thèse de P. Best (Région 2019-22) sur la bouée Bombyx2 (5 hydrophones et communication 4G pour la détection des cétacés en temps-réel).

BOMBYX est joint à l'observatoire KM3ENV astrophysique au large du PNPC (H. Glotin est partenaire officiel), qui remonte nos détections de cétacés par fibre optique sur UTLN. Ainsi le Pôle INPS STIC MER de l'UTLN, avec le LIS, CIBRA et PNPC, aux savoir-faire de renom international en suivi de cétacés, proposent ce premier observatoire bio/acoustique large échelle académique de la Région Sud et de valeur internationale. C'est un levier structurant pour plusieurs recherches et l'attractivité de la Région en technologies avancées et économie de la Mer. Les formations Masters, dont MUNDUS MIR, bénéficieront de cet observatoire, et le feront évoluer, ainsi que d'autres partenaires (Marine Nationale, IFREMER, Naval Group...).

Ce projet a pour objectif l'étude "éthoacoustique", l'identification acoustique des cétacés et de leurs comportements, en présence versus absence de pression anthropophonique (pollution acoustique du trafic maritime et autre). Il en résulte une meilleure connaissance des population de Cachalots, Rorquals, Ziphius, dauphin Rissos, Tursiops et Globicéphales, qui sont les super-prédateurs et donc les sentinelles de la biodiversité marine de la méditerranée, garant de ses réserves halieutique. Ce projet participera à continuer l'effort de modéliser leur comportement et présence sur les grands rails de trafic maritime et donc pourra alerter et prévenir les risques de collision entre eux et le trafic.

Le bilan de Bombyx1 bouée stéréo au large du PNPC 2015 2018, et la construction des algorithmes et embarquement dans la carte QHB SMIoT UTLN durant la thèse de P. Best qui s'achève en 2022, conduit à cet observatoire de population de cétacés, notamment cachalots [21,3]. Afin d'observer plus en détail le comportement de la mégafaune en milieu anthropisé [17], nous proposons cet observatoire et thèses de doctorat et recherches dans le cadre de la Chaire IA ADSIL AID, pour corréliser aux contextes océanographiques, les activités des cétacés sur une zone étendue de Cassis à Cap St Martin, et en Corse, cadrant avec les priorités de Pelagos France.

Cet observatoire se construit avec la bouée Bombyx2 du projet FEDER GIAS MARITTIMO 2019-2022 (PI Glotin), avec 5 hydrophones qui permet d'envoyer en 4G ou IRIDIUM les détections des cétacés, et dans de bonnes conditions leur observation en 3D dans un rayon d'environ 20 km suivant estimations sur Bombyx1 (rapport Pelagos 2017 VAMOS Glotin et al., Poupard PhD 2020, article soumis à Scientific Report Nature 2021).

Le LIS DYNI a un savoir-faire reconnu internationalement en suivi de cétacés et IA (Chaire IA ADSIL co-financée par l'Agence Innovation Défense et l'ANR). Cet Observatoire BOMBYX est le fruit de 10 ans de recherche en IA et en bioacoustique. Projet d'envergure, il est bien évidemment édifié en concertation avec toutes les parties concernées. Il a été présenté à la PREMARE et la Marine Nationale FR lors du colloque du 4 juin 2021 "Le bruit en mer : du développement des activités maritimes à la protection de la faune" ([http://sabiod.univ-tln.fr/pub/ADSIL/LeBruitMer\\_DeveloppementActivitesetProtection\\_20210604\\_Toulon%20\(7\).pdf](http://sabiod.univ-tln.fr/pub/ADSIL/LeBruitMer_DeveloppementActivitesetProtection_20210604_Toulon%20(7).pdf))

Il a été présenté discuté et affiné durant des conseils dédiés :

- Conseil Scientifique de l'Université de Toulon en février 2021, validé, classé 1er pour la Région Sud,
- Commission recherche de la Région Sud (en cours d'instruction),
- Comité de financement du Contrat Pluriannuel Etat Recherche BIOMED (CPER), pour un financement de 300 K€ au printemps 2021,
- Comité Marittimo lors du Living Lab 2021,
- SHOM (M. Kinda) en avril 2021 pour le calcul des bruits sur la côte Française,
- DGA (GALLIANO Sylvain-Pierre <[sylvain.galliano@intradef.gouv.fr](mailto:sylvain.galliano@intradef.gouv.fr)>, WOOLLEY Michael <[michael.woolley@intradef.gouv.fr](mailto:michael.woolley@intradef.gouv.fr)>, FATTACCIOLI Dominique <[dominique.fattaccioli@intradef.gouv.fr](mailto:dominique.fattaccioli@intradef.gouv.fr)>, M. Galliano étant responsable du suivi de la chaire IA ADSIL) en fin avril 2021 (La Chaire IA ADSIL est cofinancée par l'Agence Innovation Défense (Pi Glotin)),
- Service Bioacoustique DGA Toulon (GERARD Odile <[odile.gerard@intradef.gouv.fr](mailto:odile.gerard@intradef.gouv.fr)>) en fin avril 2021,
- Parc national de Port-Cros et son conseil scientifique dans le cadre de la prévention des collisions cétacés-traffic (Me Taupier-Létage (Isabelle.Taupier.Letage@ifremer.fr), Me Peirache, M. Barcelo et M. Oddy) en avril 2021,
- Secrétariat Général Pelagos ([costanzafavilli@pelagos-sanctuary.org](mailto:costanzafavilli@pelagos-sanctuary.org)) début avril 2021,
- Dépôt au Plan d'investissement Amont UTLN PIA4 pour complément financement ([glotin@univ-tln.fr](mailto:glotin@univ-tln.fr)).

## 2) Introduction

Malgré des objectifs ambitieux de réduction de la perte de biodiversité, l'évaluation de ses changements est un défi majeur. Une meilleure surveillance des écosystèmes reste la seule solution. La surveillance acoustique passive (écoute des vocalises, biosonars ou clics des animaux sans interférence avec eux), échantillonne de mieux en mieux différents groupes d'animaux sauvages. Si des systèmes sont maintenant pratiquement opérationnels pour le suivi de taxons, dont oiseaux (cf défis internationaux BirdClef), des questions restent ouvertes pour la numérisation et le traitement de masses de données bioacoustiques. Un des enjeux est d'observer la biodiversité sur de grandes séries temporelles, de larges bandes de fréquence, et de grandes surfaces ou volumes de milieux naturels sauvages, souvent peu accessibles ou échantillonnés. Un des objectifs est de modéliser la population et les comportements d'animaux, notamment sous pressions anthropiques. Nous qualifierons cette approche "éthoacoustique": l'analyse du comportement par l'acoustique. Une méthode consiste à distribuer des antennes de capteurs acoustiques synchrones, et d'optimiser des algorithmes par IA pour reconnaître et analyser les comportements d'animaux qui vocalisent ou cliquent.

Le projet BOMBYX adresse depuis dix ans ce sujet interdisciplinaire, alliant électronique, IA, acoustique et biologie. Il a impulsé l'innovation d'algorithmes d'apprentissage de représentation de signaux bioacoustiques, et le développement d'instrumentations scientifiques dédiées pouvant embarquer ces nouveaux algorithmes IA. Ces innovations se déclinent maintenant sur des projets théoriques et nos observatoires à grande échelle comme la veille sur une décade de l'avifaune sur tout le Québec pour son ministère des forêts, nos bouées sous-marines bioacoustiques (Bombyx) pour prévenir les collisions cétacé-bateau et la pollution anthropophonique, la veille de tous les cétacés des Caraïbes pour l'Office Français de la Biodiversité (CARIMAM)<sup>1</sup>. Les développements IA théoriques sont conduits dans nos projets européens (FEDER GIAS, bouées Bombyx), et ANR (SMILES IA non-supervisée, Chaire IA ADSIL en bioacoustique sous-marine, SylvanIA "SYnchronized Low power Versatile Acoustic Network with Embedded AI"), et nos PIA4 TerraForma et PsiBiom. Nous en résumons ici les enjeux.

Ces recherches ont pour paradigme la surveillance de la biodiversité sur de grandes zones d'étude par un réseau de grappe capteurs intelligents distribués à faible coût, à faible consommation, éventuellement synchronisés. Couplé à des représentations du signal apprises par IA, ce réseau ambitionne la détection, la classification, des taxons, et la localisation ou suivi 2D, 3D, d'animaux qui vocalisent. Ceci participe à en estimer la densité de population et leurs activités sans les perturber. Notamment cela améliore nos connaissances sur les milieux marins et leur faune, falaises, canyons profonds proches des côtes exponentiellement anthropisées et qui nourrissent l'humanité. Des fronts océaniques s'y forment, mouvements verticaux de la colonne d'eau, dynamiques complexes qui alimentent la chaîne trophique du plancton aux super-prédateurs dont les mammifères marins. Ce sont les points de plus grande biodiversité

<sup>1</sup> <https://www.car-spaw-rac.org/The-CARI-MAM-project>

de la planète, éphémères. L'humain prend conscience de son implication dans la dégradation de ces gisements soumis à une pression anthropique de plus en plus forte.

Nous nous centrons avec l'observatoire Bombyx sur la mégafaune de la méditerranéenne (Cachalots, Globicéphales, Rorquals...) espèces fragiles, la plupart menacées, qui sont de bons indicateurs de l'état de santé de cet écosystème, car il ne peut y avoir de grands cétacés en abondance que si l'écosystème peut les nourrir. En revanche, la décroissance de leur population est un indice de la dégradation du milieu et des proies dont les cétacés dépendent. La préservation de ces espèces «*parapluie*» impose la préservation de l'ensemble de l'écosystème qui les supporte. Les fonctions uniques de la mégafaune sont essentielles (Fig. 1).



Figure 1 : Groupe de trois Cachalots socialisant à la surface, mesurant entre 10m et 16m de long, se nourrissant de plusieurs centaines de kilogrammes de calmars par jour.

[http://sabiod.lis-lab.fr/pub/SPHYRNA/PHOTOS/VF\\_S\\_cachalots\\_groupe.png](http://sabiod.lis-lab.fr/pub/SPHYRNA/PHOTOS/VF_S_cachalots_groupe.png) (crédit F. Sarano)

### 3) Matériel & Méthode

Avec le développement d'instrumentations de précision, partie intégrante du projet (Bar20), de l'IoT et IA dédiée embarquable (Bal21, Fer20, Glo20), une question émerge: "où et quand" déployer des capteurs et "pour quelle performance". Pour attaquer ce verrou nous simulons l'entièreté du système: de la génération de trajectoires d'animaux marins, intégrant des contraintes cinématiques et comportementales, à la chaîne "classification détection localisation" par IA, en passant par la modélisation de la propagation acoustique. Ce "*Serious Game*" génère, sur le superordinateur national Jean Zay, des scénarios réalistes et admissibles. Il est une pierre angulaire du développement de nos méthodes et un déploiement optimal de nos observatoires. Il est en effet difficile de constituer des bases de données acoustiques marines réelles en quantité suffisante pour des approches IA. Les algorithmes développés notamment dans la ANR Chaire IA ADSIL sont donc dédiés à l'augmentation de données, l'apprentissage de leur représentation, et l'apprentissage de lois physiques en acoustique sous-marine.

L'apprentissage de représentation Temps-Fréquence (TF) est central dans ces recherches, les signaux bioacoustiques étant de haute résolution. En effet, la majorité des réseaux de neurones n'observent pas directement la série temporelle des données acoustiques, mais plutôt une représentation TF ad hoc, comme des ondelettes ou une analyse de Fourier. Ces deux représentations TF sont des compromis à incertitude en temps ou en fréquence. Pour un meilleur compromis et une optimisation de la représentation TF, nous avons joint le paradigme de Wigner-Ville des années 1940 au "deep learning" de 2010 (Bal21). Notre approche permet de mieux discriminer les différentes sources par leur contenu informationnel TF. Cette approche améliore le débruitage, la localisation et classification des animaux. Nous avons développé le premier modèle de reconnaissance automatique des transitoires bioacoustiques sous-marins à partir de leur forme d'onde (Fer20) qui est étendu actuellement à toutes les espèces de cétacés de l'Arc Antillais pour l'Agence Française de la Biodiversité. Nous considérons aussi les traits d'effets Doppler voire micro-Doppler qui seraient utilisés par les cétacés, pour des applications de surveillance.

## 4) Premiers Résultats

Ces méthodes apportent des connaissances sur d'invisibles titans des océans, comme les cachalots, les plus grands prédateurs. Il y a dix ans H.G. a initié, construit et posé une bouée acoustique (Bombyx1), stéréophonique, au large de Port-Cros, Toulon. Ce protocole de 4 To de données, permet de pister et compter les passages de la mégafaune (Cachalots, Rorqual). DYNI a acquis ainsi une expérience inédite, Bombyx1 étant la première bouée bioacoustique long-terme stéréophonique. Puis nous avons initié et piloté les Missions Sphyrna Odyssée (SO), composées de deux robots navires laboratoires autonomes (ALV Sphyrna, Seaproven SAS), équipés du système acoustique pentaphonique haute fréquence (LIS, SMIoT, UTLN (Bar20)), et d'un 'vaisseau amiral' qui reçoit les signaux en temps-réel par wifi. Le pari pris par H.G. consistait à écouter et localiser en 3D les cétacés à partir de minuscules antennes acoustiques mobiles situées près de la surface sous les coques des drones aux bonnes performances hydrodynamiques (Fig. 2).



Figure 2 : Les drones Sphyrna équipés d'hydrophones et du système JASON ont écouté la faune proche des côtes durant le confinement COVID 2021, ici Grand dauphin, mais aussi des meutes de cachalots au large [http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/SPHYRNA/PHOTOS/Sphyrna2020\\_GroupeTursiops\\_Hyeres\\_MerSilencieuse\\_Covidconfinement.jpg](http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/SPHYRNA/PHOTOS/Sphyrna2020_GroupeTursiops_Hyeres_MerSilencieuse_Covidconfinement.jpg) (crédit Seaproven).

SO a ainsi recueilli 20 To de sons, et autres données chimiques et ADN environnemental. Nous avons démontré (Glo20) l'atténuation de pollution pendant la Covid19 début 2020 des Calanques à Monaco sur 400 kilomètres de côtes: 2 fois moins d'hydrocarbures dissous, l'anthropophonie proche de la côte diminuée de 6 dB RMS (niveau de bruit divisé par 4). Il en résulte des communications de cétacés durant le confinement estimées à 4 fois plus longues en basse fréquence, probablement de meilleures chasses et reproductions. Ces 400 km de côtes parmi les plus dense en trafic maritime, avaient donc retrouvé le calme des temps pré-industriels. Des conditions propices pour les cétacés près des côtes.

SO a surtout pour principal objectif l'écoute et la surveillance sans interaction des populations de cétacés plongeant en eaux profondes, tels que les cachalots. Les individus sont donc étudiés dans leur habitat naturel au cours de leurs chasses en meute, collaborations bioacoustiques complexes abyssales. Le comportement des cétacés en plongée profonde est un indice pour l'évaluation de la biodiversité des abysses.

Les algorithmes bioacoustiques de DYNI permettent de calculer en trois dimensions, les déplacements et les

orientations relatives des mammifères marins jusqu'à 1500 m de profondeur. Une découverte majeure de la SO est la mise en évidence de "Chasses en meute de cachalots" (Glo20) (Fig. 3).

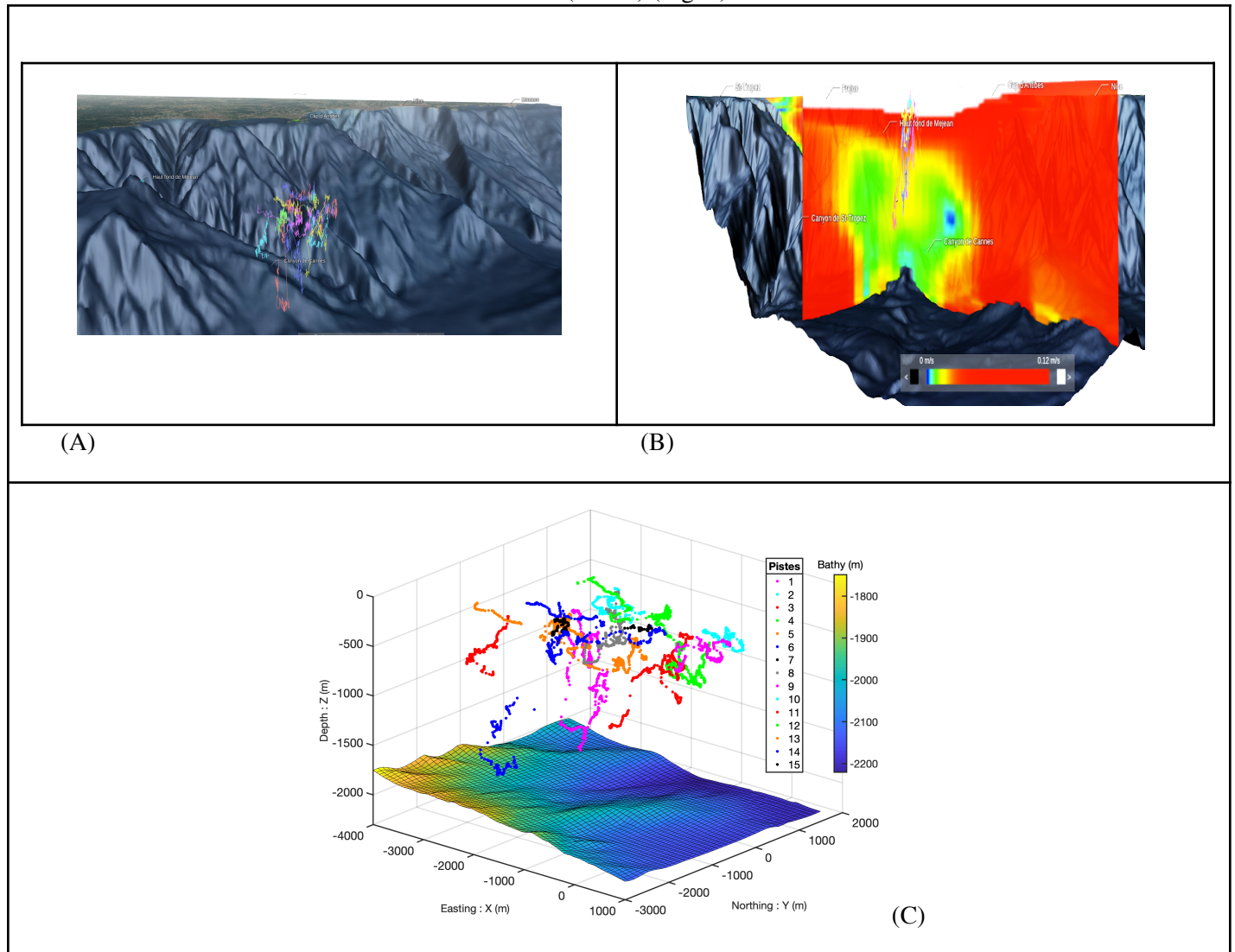


Figure 3 : Sondes 3D calculées par acoustique passive depuis la surface d'une meute de 6 cachalots au large du haut-fond Mejean, vers Monaco, le 2020.01.14 (A). (B) Ces prédateurs restent centrés 3h au centre d'un vortex, front océanique où est brassée une grande biomasse (Glotin et al. 2020). Ces vitesses de courants ont été calculées par Yann Oumières, MIO UTLN. (A,B) : Carte dynamique: [http://sabiody.org/pub/SPHYRNA/3D/current\\_norm/](http://sabiody.org/pub/SPHYRNA/3D/current_norm/) (C) : Vidéo: [http://sabiody.org/pub/SPHYRNA/3D/SO\\_Glotin\\_Thellier\\_etal\\_PhyseterAlliance\\_Monaco\\_20200114\\_3DtracksX\\_Y\\_Z.mp4](http://sabiody.org/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_etal_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_3DtracksX_Y_Z.mp4) (crédit H. Glotin)

Ces résultats montrent que les mesures passives garantissent des observations de qualité et précises dans des volumes de plusieurs km<sup>3</sup> sans perturber l'écosystème. Les émissions sonores sont vitales aux cétacés, non seulement pour communiquer, mais également pour se repérer et pour chasser. Cette extrême dépendance acoustique les rend vulnérables aux pollutions anthropophoniques qui suivent l'explosion du trafic maritime. Les données acoustiques acquises depuis des années par les réseaux de surveillance acoustique forment un référentiel qui permettra de mesurer l'évolution concomitante de l'anthropophonie et des populations de cétacés même cryptiques.

Ces recherches permettent de dépeindre le comportement des cétacés dans les abysses sur la base de leur écholocalisation, clic par clic. Cette haute résolution semble montrer par exemple que les cachalots construisent un maillage d'émetteurs-récepteurs distant d'environ 500 m les uns des autres. Ils useraient d'un principe de bio-multistatisme pour chasser: les informations engendrées par les sonars de chacun seraient partagées par tous... à l'instar des systèmes humains de chasse sous-marine.

Ces cachalots sont restés des heures ce 14 janvier 2020 dans le vortex formé autour d'un mont sous-marin. Les

cachalots semblent plonger de manière synchrone par triplet, orientant leur sonar dans la même direction, pour une apnée de 45 minutes environ.

Les grands sondeurs ont ainsi livré des indices sur une de leur expertise acoustique forgée dans les profondeurs des mers depuis des millions d'années mais aujourd'hui menacée par l'anthropophonie. La structure de leurs clics biosonars contient des informations temporelles et spectrales encore peu étudiées, qui pourraient porter des signaux de communication superposés à leur fonction d'écholocation. Réciproquement, les pulses voisés d'autres espèces pourraient porter en plus des dialectes en constante évolution dans une 'culture animale' (Mal20), des informations d'écholocation et des signatures individuelles (Fig. 4).

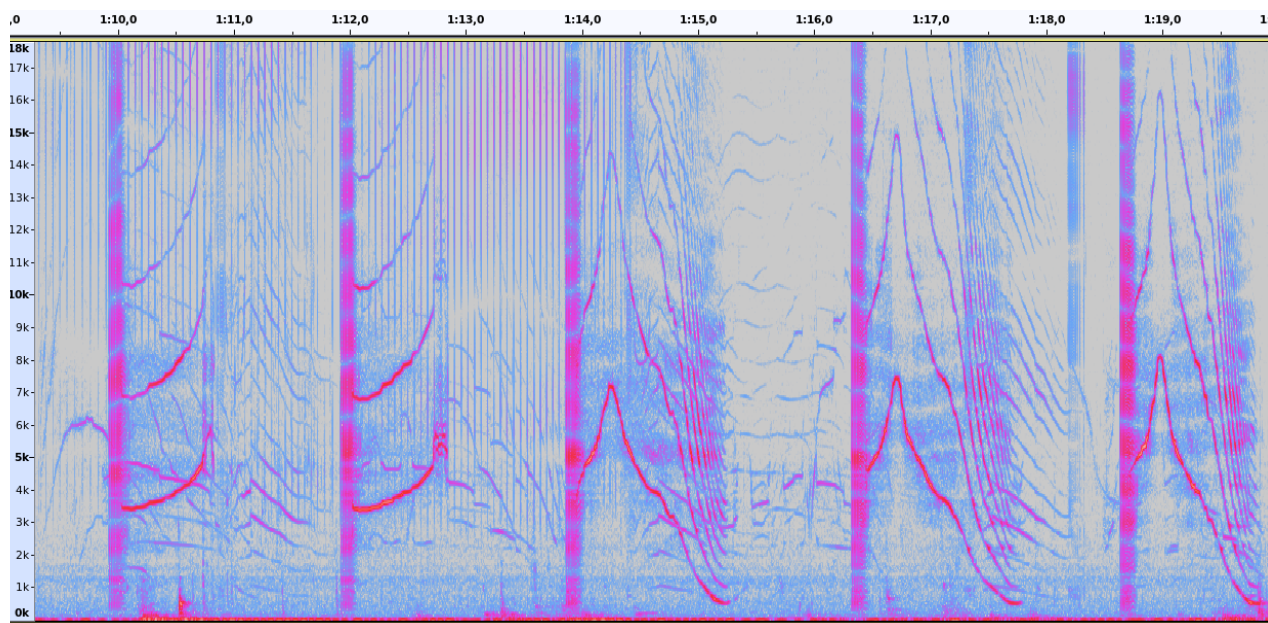
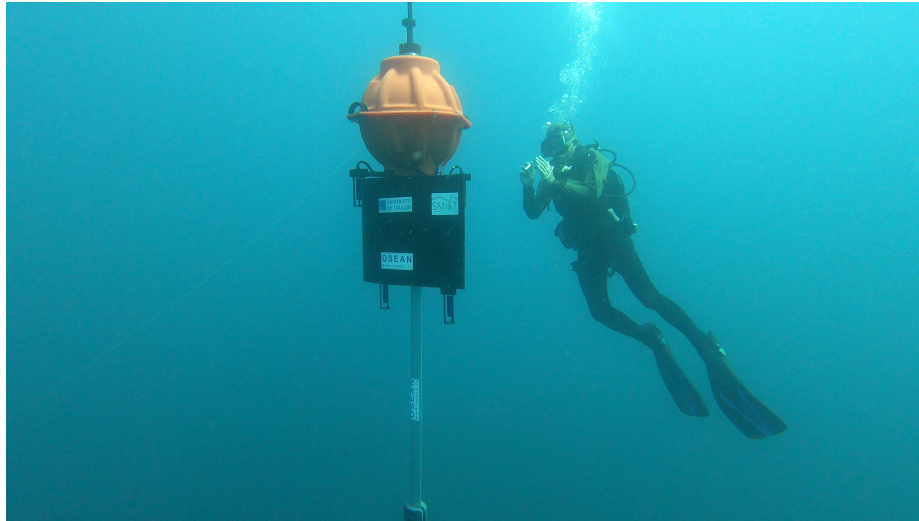


Figure 4 : Exemple de vocalises de Globicéphales non loin de Toulon, 2020 [SO20] sur 20kHz de largeur de bande montrant la complexité de dialectes. Ces formes portent une information clanique, qui pourrait être identifiée par IA pour suivre les déplacements de populations accélérés par le réchauffement climatique.

Ces découvertes suggèrent, à moyen terme, de nouveaux critères pour réguler l'anthropophonie et les systèmes anti-collision cétacés avec le trafic maritime. Ces recherches ont abouti dans DYNI à la bouée Bombyx2 (B2) avec OSEAN SAS. Equipée de 5 hydrophones à l'instar des drones Sphyrna, elle localise les cétacés, estime leur cap et leur comportement (chasse ou déplacement rapide). Immergée par -30 m par son ballast et dispose d'une IA embarquée sur sa carte son. Elle détecte et entend les grands cétacés dans un rayon de 20 km. Elle calcule un bilan de ses détections et remonte automatiquement en surface envoyer un SMS par 4G au serveur SABIOD qui concentre les alertes à la Préfecture Maritime pour prévenir du risque de collision cétacé-traffic. Ces collisions sont dommageables pour l'économie, les compagnies devant mettre un navire en cale sèche pour vérifier son état, et létales pour les cétacés. En été 2022 la Côte d'Azur verra des B2 disposées tous les 40 km. Avec leur rayon de détection (20 km), elles forment le plus long réseau IA temps-réel du monde (250 km) (Fig 5).



*Figure 5: La bouée Bombyx2 (B2). Le plongeur F. Sarano teste les 5 hydrophones. B2 équipée d'un ballast et d'une IA embarquée sur sa carte son, entend les cétacés dans un rayon de 20 km. Elle remonte alors en surface et envoie un SMS par 4G au serveur SABIOD qui concentre les alertes à la Préfecture Maritime pour prévenir du risque de collision cétacé-traffic. Posées tous les 40 km, avec leur rayon de détection (20 km), formant le plus long réseau IA temps-réel d'Europe (250 km). Extrait de la vidéo: <http://sabiodylis-lab.fr/pub/BOMBYX2/videos/GH010484.MP4>  
Carte dynamique 3D: <http://sabiody.org/gias/>*

## 5) Perspectives

Ces travaux IA participent à une nouvelle ère de l'observation des océans, au profit de la prévention de l'anthropophonie et la prévention des risques de collision. Ils s'étendent depuis des années à l'étude des communications des Orques et des dialectes d'animaux, dont la Grande Bleue (Mal20). Ces 'langages' sont des énigmes culturelles des mondes sous-marins, qui subissent ou démontrent les effets du changement climatique et des pressions anthropiques. Ces populations de super prédateurs sont garants de l'équilibre de chaînes trophiques et ressources halieutiques sur lesquelles reposent l'alimentation d'une grande partie de l'humanité.

Ces recherches permettent à terme l'étude de la distribution de la diversité acoustique et des stratégies de mouvement et de phénologie à grande et petite échelle spatio-temporelle pour mieux comprendre comment le changement climatique et les pratiques de gestion peuvent transformer les paysages de la planète.

## Remerciements

Nous remercions les Explorations de Monaco et la Fondation Prince Albert II qui ont soutenu les Missions Sphyrna Odyssey, et l'université de Toulon et son pôle transversal INPS. Nous remercions la direction de la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI) du CNRS, l'Institut Universitaire de France, la Chaire IA ADSIL, le FEDER MARITTIMO GIAS, Pelagos, et le Parc National de Port-Cros et toute l'équipe DYNI, les ONG Longitude 181 (PI François Sarano) et LivingTogether (PI Jean-Charles Vinaj), qui par leurs soutiens au long terme font avancer ces recherches depuis dix ans.



# Glossaire

Anthropophonie: Ensemble des bruits produits par l'homme ou ses technologies (parole, bruit de moteur, sirène, turbine, éolienne. Une source acoustique étant caractérisée par sa durée, sa fréquence et son intensité.

Biosonar (Clic): Signal bref produit le plus souvent par un mammifère, marin ou terrestre, optimisé pour produire un écho sur un volume, une proie, et donner une information sur cette cible à l'animal émetteur.

Ethoacoustique: l'analyse du comportement d'animaux par l'acoustique et l'analyse fine par IA des formes de leurs vocalises ou biosonars.

Intelligence artificielle embarquée (IA): Algorithme de détection ou classification automatique de taxon (espèce) par apprentissage sur une base de référence dans le cas supervisé, ou par regroupement dans le cas non supervisé, optimisé pour un fonctionnement dans un PIC, mini processeur, embarqué dans la bouée. Au travers des méthodes à apprentissage profond (Deep Learning), apprentissage de représentation du signal pour mesurer à haute résolution en temps et en fréquence les formes bioacoustiques par exemple pour une reconnaissance optimisée.

## Références

[Bar20] V. Barchasz, V. Gies, S. Marzetti, H. Glotin, 2020, "A novel low-power high speed accurate and precise DAQ with embedded artificial intelligence for long term biodiversity survey", Forum Acusticum 2020, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03230835/document>

[Fer20] M. Ferrari, H. Glotin, R. Marxer, M. Asch, 2020, "Docc10: Open access dataset of marine mammal transient studies and end-to-end Convolutional Neural Net classification", Int. Joint Conf. on Neural Networks, (IJCNN), <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02866091/document>

[Bal21] R. Balestrierio, H. Glotin, R. Baraniuk, 2021, "Interpretable Super-Resolution via a Learned Time-Series Representation", int. conf. Mathematical & Scientific Machine Learning, <https://arxiv.org/abs/2006.07713>

[Mal20] F. Malige, J. Patris, S. Buchan, K. Stafford, F. Shabangu, K. Findlay, R. Hucke-Gaete, S. Neira, C. Clark, H. Glotin, 2020, "Inter-annual decrease in pulse rate and peak frequency of Southeast Pacific blue whale song types", in Scientific reports, 10(1), 1-11, Nature Publishing Group, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02586669/document>

[Glo20] H. Glotin, N. Thellier, P. Best, M. Poupard, M. Ferrari et al., 2020, "SphyrnaOdyssey, Rapport Scientifique, Découvertes Ethoacoustiques de Chasses Collaboratives de Cachalots & Impacts en Mer du Confinement COVID19", LIS RR, <http://sabiiod.org/SO1.pdf>

### Sites web cités

Site web du projet MITI Bioacoustique depuis 2012: [sabiiod.org](http://sabiiod.org)

Chaire IA ADvanced underSea Intelligent Listening: ADSIL, 2020-24: <http://bioacoustics.lis-lab.fr>

La bioacoustique des cachalots, reportage CNRS: [https://www.youtube.com/watch?v=g3xXM\\_tycCU](https://www.youtube.com/watch?v=g3xXM_tycCU)

# ANNEXES

## Annexe technique

Les bouées sont constituées de 3 parties principales qui sont le corps mort, la bouée Subsurface et le flotteur. Ces trois parties sont reliées grâce à des laisses d'accroches. L'ensemble du système est présenté en figure 2 et plus précisément en annexe de ce document.

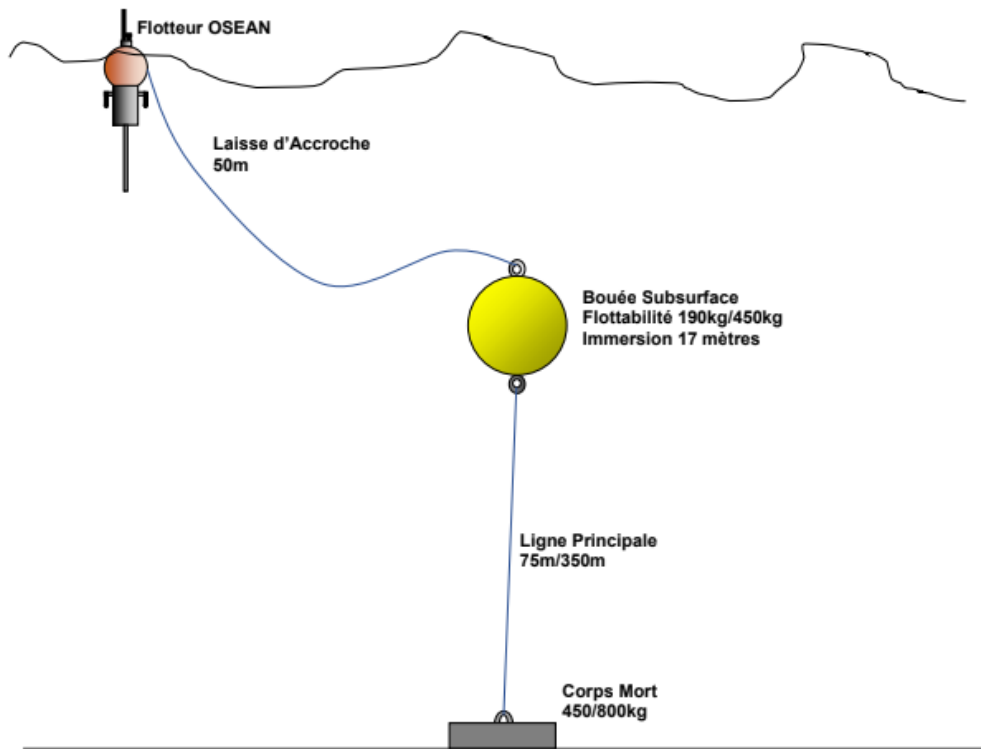


Figure 1: Schéma global de la ligne complète de Bombyx2. Munie d'un ballast, elle remonte en surface pour émettre ses alertes en 2 minutes de surface, puis se replonge à -30m pour plusieurs heures.

### Description de la ligne de mouillage

Bouée sub-surface  
Immersion : 17 mètres  
Diamètre : 1000mm  
Masse : 75kg  
Flottabilité : 450kg

Ligne principale  
Longueur : suivant la profondeur du corps mort  
Diamètre : 6mm  
Type : DYNEESTAR

Laisse  
Longueur : 50 mètres

Diamètre : 3mm  
Type : DYNEESTAR

Corps Mort  
Masse : 800kg  
Dimensions : 1000x1000x680mm (Lxlxh)  
Matière : Acier S235

### Description de la Bouée



Figure 2 : description de la bouée et photo lors du test en printemps 2021

- Dimension totale de chaque antenne sur Bombyx : 4 hydrophones sur sommets d'un tétraèdre pratiquement régulier d'environ 0.5 m de diamètre, plus un 5ième hydrophones excentré de 1.2 m (voir plan Fig 2.). Les hydrophones sont donc distants d'environ 0.4 m pour les plus proches et 1.3 m pour les plus éloignés.

### Les caractéristiques de l'enregistreur

- Fréquence d'échantillonnage à l'acquisition : 64 kHz
- Formation de voie OUI
- Gain d'antenne : environ 3 dB, dépendra des méthodes.
- Bande passante compte tenu des filtres numériques utilisés 10 Hz à 32 kHz

### Les traitements des données enregistrées :

- Traitement audio OUI
- Type de traitement de signal qui sera utilisé : FFT, STFT, spectrogramme, autocorrélation et recherche Intervalle interpulse caractéristique de certaines espèces, deep learning pour reconnaissance forme d'onde et décision d'envoi d'alerte de présence au serveur UTLN AID ADSIL sur UTLN.

### La description du système d'enregistrement et de stockage des données :

- Les données sont-elles traitées en temps différé ? Oui, en plus du temps réel pour simple détection espèces et détection présence de

bateaux. En effet, la bouée écoute avant de décider de remonter en surface. Si le niveau de bruit dans les octaves des bateaux est fort et est croissant, alors la bouée reporte sa décision de remonter de 30 minutes, et refera ce cycle de confirmation, ce afin de ne pas remonter en présence de bateau.

- Les données sont-elles blanchies des références temporelles ? Non
- L'acquisition des données se fait par l'intermédiaire d'un réseau connecté à l'internet ? NON, pas les données : seuls des messages en texte résumant les détections calculées par la carte son de la bouée sont envoyés en 4G. Les WAV brutes ne sont pas transmises par 4G, ou alors que quelques ms par jour pour une validation de l'algorithme.
- L'enregistrement peut-il être stoppé à tout instant sur demande des autorités militaires ? Oui si ordre envoyé 12h avant : les bouées remontent au moins toutes les 12h, et reçoivent alors message depuis notre serveur pour un ordre, qui peut être une mise en veille totale sur N jours (pas d'enregistrement et mise sous -30m).

Le système d'enregistrement est composé d'un hydrophone SQ26

(<https://www.cetaceanresearch.com/hydrophones/sq26-01-hydrophone/index.html>) et de quatre hydrophones C57 (<https://www.cetaceanresearch.com/hydrophones/c57-hydrophone/index.html>)

### a) 1 Hydrophone SQ26

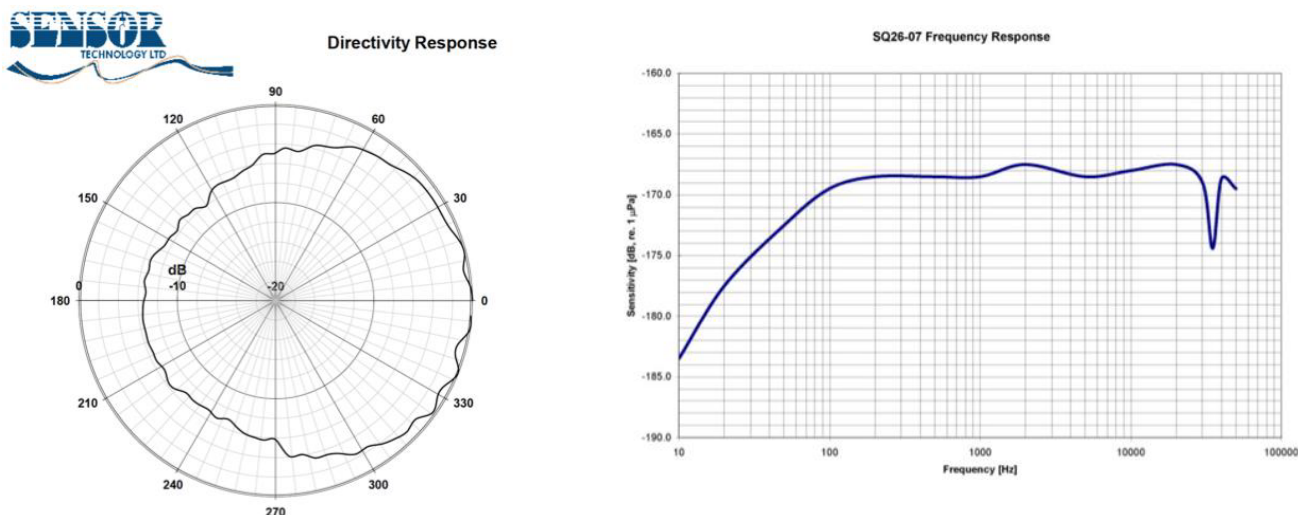


Figure 3 : Réponse de l'hydrophone SQ26

SPL Equiv. Self Noise at 1kHz [dB, re 1 $\mu$ Pa/ $\sqrt$ Hz]

44 dB

44

### b) 4 Hydrophones C57

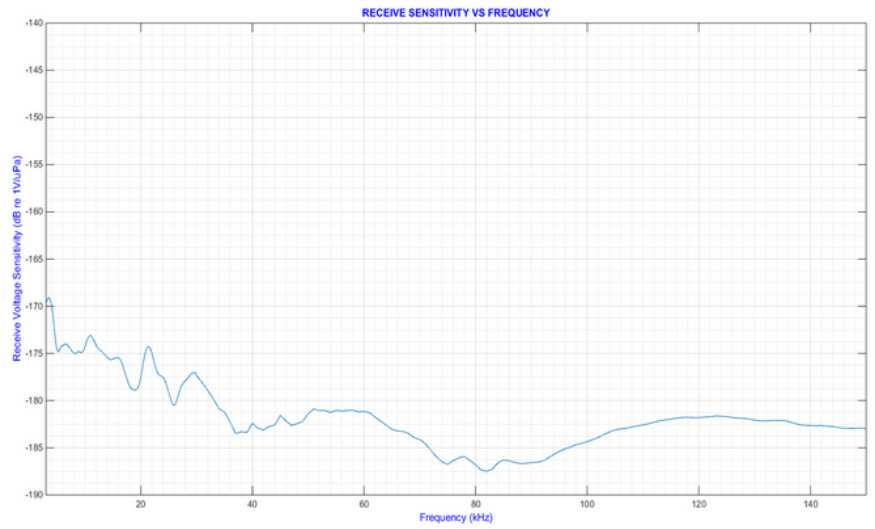
SPL equiv Self Noise at 1 kHz = 46 (Sea State Zero)

## C57 hydrophone specifications

	<b>C57 / C57X</b>
<b>Linear Frequency Range (<math>\pm 3</math>dB) [kHz]</b>	0.015 to 45
<b>Usable Frequency Range (+3/-12dB) [kHz]</b>	0.008 to 100
<b>Transducer Sensitivity* [dB, re 1V/<math>\mu</math>Pa]</b>	-187
<b>Preamplifier Gain [dB]</b>	20 / 33
<b>Effective Sensitivity* [dB, re 1V/<math>\mu</math>Pa]</b>	-167 / -154
<b>SPL Equiv. Self Noise at 1kHz [dB, re 1<math>\mu</math>Pa/Hz]</b>	46 (Sea State Zero)
<b>Power Requirement [Vdc]</b>	5 to 32
<b>RMS Overload Acoustic Pressure [dB, re 1<math>\mu</math>Pa]</b>	171 to 188 / 158 to 175
<b>Maximum Operating Depth [m]</b>	370
<b>Operating Temperature Range [°C]</b>	-40 to 60
<b>Output Impedance [<math>\Omega</math>]</b>	10
<b>Dimensions [mm]</b>	116L x 25dia.
<b>Integral Connector ***</b>	Subconn MCBH3MSS

UNIVERSITY OF WASHINGTON - APPLIED PHYSICS LABORATORY  
 RV HENDERSON ACOUSTIC TEST FACILITY  
 DATE: 5/14/2018  
 TIME: 13:48:57  
 Cetacean Research  
 NOISE  
 CS7-1K-3-39Hz SN806  
 TRANSMIT WINDOW START POSITION: 0.82 mS  
 TRANSMIT WINDOW SIZE: 0.71 mS  
 RECEIVE WINDOW START POSITION: 2.96 mS  
 RECEIVE WINDOW START POSITION: 0.71 mS

DATA FILE NAME: C:\Projects\Cetacean Research\2018-05-14 CS7-1K3 CS7-1K-806CS7-1K-806 3-150kHz.FVS  
 REFERENCE TRANSDUCER: F37 Transducer  
 REFERENCE TRANSDUCER SN: A51  
 REFERENCE TRANSDUCER CAL TEMPERATURE: 20.0 deg C  
 ARBITRARY WAVEFORM VOLTAGE: 1.00 Vrms  
 RECEIVER GAIN: 0.0dB  
 RANGE: 3.17 meters  
 DEPTH: 2.13 meters  
 WATER TEMPERATURE: 17.8 deg C  
 AVERAGE PING COUNT: 3



UNIVERSITY OF WASHINGTON  
 APPLIED PHYSICS LABORATORY  
 RV HENDERSON ACOUSTIC TEST FACILITY  
 DATE: 5/14/2018  
 TIME: 11:46:35  
 REF TRANSDUCER = F37 Transducer  
 REF TRANSDUCER SN = A51  
 REF TRANSDUCER CAL TEMPERATURE = 20.0 deg C  
 WAVEFORM DRIVE VOLTAGE = 1.00 Vrms  
 FREQUENCY = 10.0 kHz  
 PROJ SOURCE LEVEL AT 0 = 160.0 dB re 1 $\mu$ Pa  
 RECEIVER LEVEL AT 0 = 150.0 dB re 1 $\mu$ Pa  
 RANGE = 3.2 meters  
 DEPTH = 2.1 meters  
 PING AVG COUNT = 2  
 WATER TEMPERATURE = 17.8 deg C  
 ANGLE STEP = 3.0 deg  
 SCALE = 0 to -30 dB

RECEIVE BEAM PATTERN  
 Cetacean Research

CS7 10kHz Beam Pattern SN805  
 DATA FILE NAME: 10kHz\_Beam.PAT

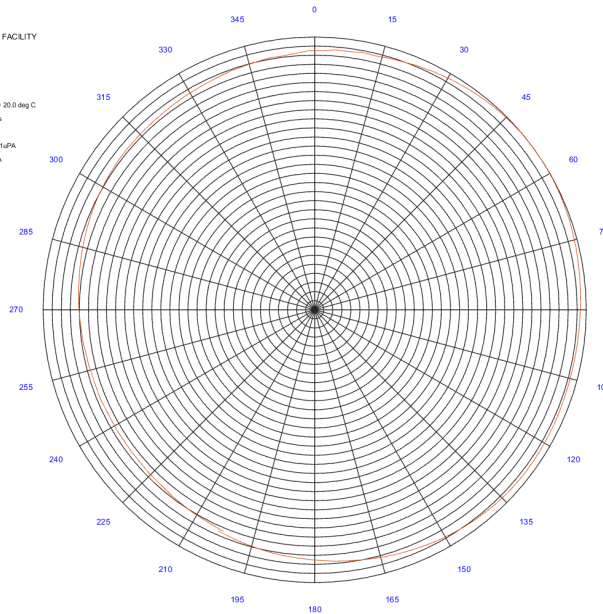


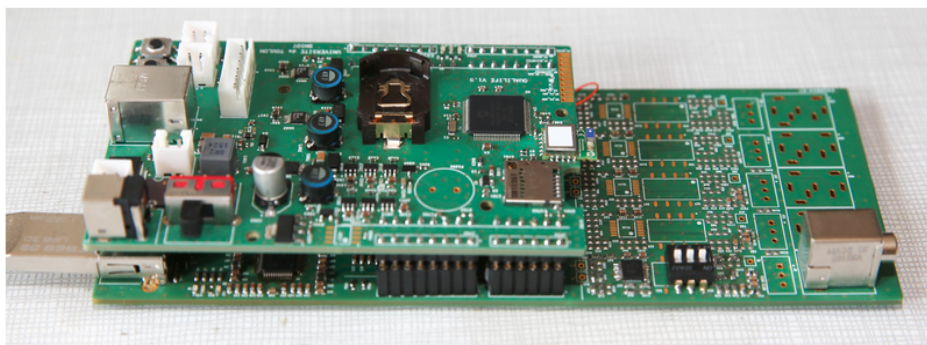
Figure 4 : description du C5

## Système d'enregistrement ( <http://sabiod.org/pub/QHB.pdf> )

### Qualilife

Centrale d'acquisition modulaire SMIoT, Qualilife est un système modulaire permettant :

- L'acquisition de données issues de différents capteurs et en simultané avec synchronisation fine : acoustiques, mouvement, chimiques, lumineux...
- L'enregistrement des données sur clé ou disque USB à des instants précis ou de manière régulière, programmé par l'utilisateur de manière simple.
- De garantir le fonctionnement à très basse consommation d'énergie et donc durant des longues périodes, lorsque les capteurs ne sont pas en cours d'acquisition.
- La communication avec un smartphone via une liaison Bluetooth 4.0 et une application dédiée, permettant par exemple de simplifier la programmation ou le démarrage manuel d'un système étanche.
- Une très grande variété d'applications, en particulier dans les domaines des études et suivis environnementaux, grâce à sa taille réduite pouvant entrer dans la plus part des boîtiers étanches existants.



Centrale d'acquisition Qualilife et sa carte fille Qualilife-Sound en version 1 canal

Figure 5 : description de la carte JASON QHB

### Placements (sur réserve autorisations, ajustements)

Tableau 1: Informations des différentes bouées mises en place, type de transmission, position et profondeur du corps mort, date de pose et financement acquis ou en demande (une bouée pose + 5 ans de maintenance ~ 35K€).

Bouée # (site) (transmission)	Position GPS	Profondeur corps mort	Date de pose estimée	Financement; acquis ou classement si en instruction
Bx1 (Porquerolles) (4G)	42°57'49"N 6°15'20"E	-90m	Octobre 2021	FEDER GIAS; acquis
Bx2 (Cap Corse) (4G)	42°48'15"N 9°31'19"E	-65m	Octobre 2021	FEDER GIAS; acquis
Bx3 (Sicié) (4G)	43°01'11"N 5°49'34"E	-100m	Novembre 2021	APOG Région Sud, en attente de réponse
Bx4 (Pampelonne) (4G)	43°13'16"N 6°47'00"E	-128m	Novembre 2021	APOG Région Sud, en attente de réponse
Bx5 (Monaco) (4G)	43°43'22"N 7°26'52"E	-104m	Mars 2022	CPER BIOMED2021-2025 ou PIA4
Bx6 (Ile Rousse) (4G)	42°41'06"N 8°47'59"E	-190m	Mars 2022	CPER BIOMED2021-2025 ou PIA4
Bx7 (Antibes) (4G)	43°32'29"N 7°09'58"E	-140m	Avril 2022	En attente de réponse : CPER BIOMED2021-2025 ou PIA4



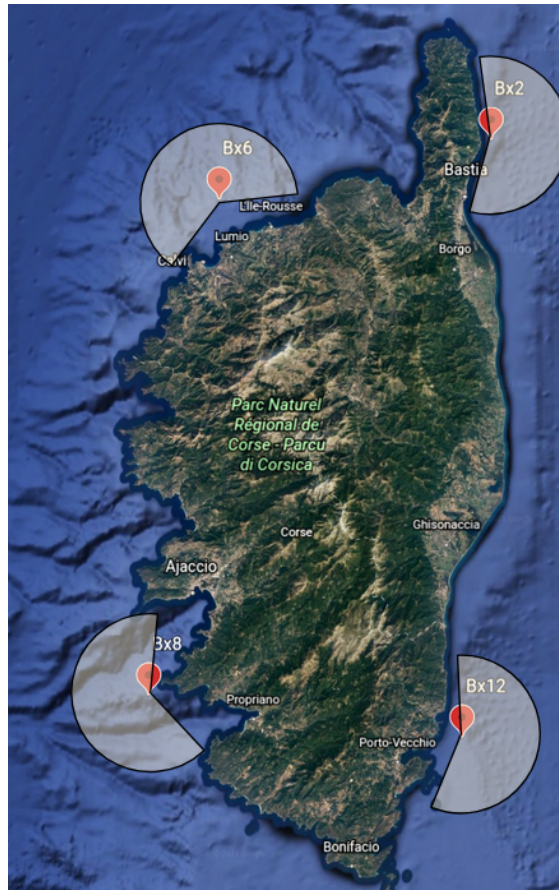


Figure 7: Carte de positionnement des bouées corses Bx2, Bx6, Bx8, Bx12 avec leur rayon d'écoute maximum de 20km



Figure 8: Carte de positionnement de Bx11 (Cassis) avec son rayon d'écoute maximum de 20km

**Description du support de stockage des données (localisation, chiffrement, vulnérabilité au vol... ) :**

Archivage des données sur serveur UTLN LIS CNRS, en salle accès restreint ZRR, bat X SeaTech université de Toulon, sous ALARME et agent de surveillance H24.







INSTITUT MEDITERRANEEN D'OCEANOLOGIE (M.I.O.)  
AMU UMI110, CNRS UMR7294, IRD UMR235

AIX MARSEILLE UNIVERSITÉ  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT  
UNIVERSITÉ DE TOULON  
OBSERVATOIRE DES SCIENCES DE L'UNIVERS (OSU) – INSTITUT PYTHEAS

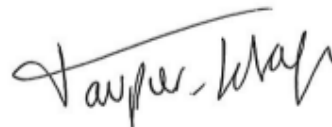
Monsieur le Président,

Le projet du Centre d'excellence en Intelligence Artificielle et Cybernétique pour Observer et explorer les Océans / Intelligence Artificielle, Mathématique & Cybernétique pour Observer & explorer les Océans (CIACOO/IAMCOO) qui m'a été présenté par le Professeur Glotin en Avril 2021 a pour objets d'améliorer nos connaissances sur la mégafaune méditerranéenne (Cachalots, Globicéphales, Rorquals, Dauphins Tursiops, Dauphins de Risso...) qui se concentre à proximité des falaises et canyons sous-marins qui bordent Toulon et s'étendent jusqu'à Monaco, en concentrant les compétences locales en IA et IoT (entre autres) de chercheurs, marins, groupes étatiques ou non, entrepreneurs, autour d'un centre de recherche clairement identifié. Un tel centre, visible par la région, transverse à leurs structures d'appartenance, permettra ainsi d'accroître leur dynamique et d'assurer un rayonnement fort de leurs résultats. Le bénéfice attendu est clairement une réelle amélioration de la connaissance écologique de cette mégafaune encore peu/mal étudiée de la façade française de la Méditerranée nord-occidentale, et donc doit permettre d'en améliorer la conservation.

L'étendue spatiale et sa continuité de Toulon à Monaco en font un dispositif unique et remarquable, et les objectifs décrits par ce projet sont donc en parfaite adéquation avec les objectifs scientifiques encouragés par le Conseil Scientifique du Parc national de Port-Cros.

La Seyne, le 07/06/2021

Isabelle Taupier-Letage  
Chargée de recherche au CNRS  
Responsable du Groupe Mer du Conseil Scientifique du PNPC  
Vice-Présidente du Conseil Scientifique du PNPC



**Objet**

Projet CIACOO/IAMCOO

Monsieur le président  
Université de Toulon  
Avenue de l'Université  
83130 LA GARDE

**Suivi par**

Alain BARCELO  
Tél. 04 94 12 89 17  
alain.barcelo@portcros-parcnational.fr  
Réf. AB/MA/3421

**Date**

Hyères, le 8 juin 2021

Monsieur le président,

Le projet à l'origine de CIACOO/IAMCOO (Centre d'excellence en Intelligence Artificielle et Cybernétique pour Observer et explorer les Océans / Intelligence Artificielle, Mathématique & Cybernétique pour Observer & explorer les Océans) a été présenté par le Professeur Glotin à Isabelle Taupier-Letage, Présidente du Groupe Mer du Conseil scientifique du Parc national de Port-Cros, ainsi qu'à Alain Barcelo, le Chef du Service connaissance pour la gestion de la biodiversité, en avril 2021.

Selon les retours qu'ils m'ont produits, il s'agit d'un projet qui se démarque des autres programmes d'observation de la biodiversité marine (Villefranche, MIO/AMU, LOCEAN, etc.). Il vise en effet à répondre à des questions que les gestionnaires d'AMP se posent sur les cétacés, et repose sur plus de 10 ans d'expertises de collaboration avec le Parc national de Port-Cros et Pelagos, Exploration de Monaco et la Fondation Prince Albert II de Monaco, et la Marine nationale.

Le Parc national de Port-Cros soutient très fortement le montage de cet institut rassemblant les expertises acquises et ses équipes sur la bioacoustique sous-marine, l'intelligence artificielle et le « big data » pour prolonger et renforcer notre collaboration. D'autant plus que des partenariats locaux et internationaux se construisent autour de ces recherches, et que l'intérêt et la réputation des Masters d'UTL ( Mundus MIR, informatique DID, mathématiques, signal ROC, BIOMAR, etc.) et des filières dédiées Sysmer de Seatech sont des attracteurs forts d'étudiants sur l'UTLN. Le CIACOO/IAMCOO, centre d'excellence, sera donc aussi un attracteur pour l'UTLN, et sera assuré d'un vivier de recrutement à haut potentiel.

Les retours du Conseil scientifique étant favorables à ces objectifs scientifiques, le Parc national de Port-Cros, confiant dans l'expertise (nationale et internationale) du Pr Glotin, souhaiterait officialiser son rattachement par convention à ce projet CIACOO/IAMCOO pour adresser nos préoccupations sur l'état des populations de cétacés en Méditerranée, ainsi que nos questionnements scientifiques.

CIACOO/IAMCOO nous apparaît comme un projet phare doublé d'une nécessité, car c'est l'unique projet de cette nature et de cette ampleur : en plus de répondre à la demande sociétale (biodiversité, management, etc.), il permettra d'adresser quasiment l'échelle de la

zone Pelagos. Et même si pour l'instant les opérations sont « limitées » à la zone Toulon-Nice-Corse, le rayonnement est assuré d'être international.

Le directeur,



Marc DUNCOMBE



*Copie : Pr Glotin*



[www.longitude181.org](http://www.longitude181.org)

Valence, le 2 sept 2021

## **Soutien au programme d'écoute passive Bombyx2 pour l'étude des cétacés et la prévention des collisions**

Les grands cétacés, sentinelles privilégiées de l'état de santé de l'écosystème pélagique, sont difficiles à dénombrer et à étudier, nonobstant leur présence régulière en surface pour respirer. Ils sont furtifs, ils se déplacent vite, et utilisent l'ensemble de la masse d'eau qui est inaccessible à l'observateur. De plus, leur dispersion sur l'ensemble du littoral et leurs déplacements incessants augmentent les risques de collision. Or si cachalots, rorquals et globicéphales ne sont plus chassés, ils restent menacés par les activités anthropiques, en particulier par les collisions avec les grands navires (première cause de mortalité en Méditerranée).

### **Une vision unique globale dans l'espace et le temps, enfin indépendante de la météo**

La méthode de capture/recapture par observation visuelle, qui permet une grossière estimation d'abondance, se heurte au manque de moyens à la mer pour dénombrer les cétacés à un instant donné. Plus handicapant encore, les observations sont à la merci de la météo, condamnant les scientifiques à étudier les cétacés là où il fait beau, pendant la période estivale, en excluant la période hivernale !

Le réseau de bouées immergées Bombyx2 permettra de réaliser, enfin et pour la première fois, un vrai point zéro de l'état des populations de grands cétacés grâce à l'enregistrement passif de leurs émissions sonores 24h/24h, 365 jours par an, quelle que soit la météo. Ainsi, les observatoires Bombyx2 qui jalonnent le littoral, de Marseille à l'Italie et en Corse, vont révolutionner l'étude des cétacés en nous donnant des yeux par tous temps et en toutes saisons.

Mieux, le suivi en 3D de chaque individu ouvre la porte à l'étude éthologique fine des comportements de chasse des cétacés, inenvisageable jusqu'alors. Cette révolution technologique intéresse au plus haut point les cétologues car elle permet, pour la première fois au monde, de comprendre la relation cétacés/proies/écosystèmes et donc de jouir pleinement de leur rôle de sentinelle de l'état de santé de l'écosystème pélagique.

### **Un suivi des perturbations anthropophoniques**

Autre volet important, l'acquisition tout au long de l'année des bruits générés par les activités humaines dont on pourra mieux évaluer l'importance. Couplée avec les enregistrements sonores des cétacés, elle permettra de mieux prendre la mesure de la perturbation liée aux bruits anthropiques.

**L'association Longitude 181 agit pour préserver les océans et réconcilier l'homme avec la vie sauvage**

**Siège social : 12, rue La Fontaine - 26000 Valence**



[www.longitude181.org](http://www.longitude181.org)

#### Un réseau d'alerte collision actif 24h/24h

En opérant tout au long de la journée (et non uniquement de jour comme le système Repcet), le réseau Bombyx2 est à même d'apporter une aide considérable à la prévention des collisions. En signalant en temps-réel la présence des cétacés aux navires, il diminuera fortement la mortalité au sein des populations de cétacés, en rémission, mais toujours très fragiles.

Longitude 181 et ses scientifiques apportent tout leur soutien à ce projet qui permettra de mieux préserver nos *meilleurs alliés* dans la protection du milieu Méditerranéen.

#### **François Sarano**

Docteur en Océanologie  
Co-fondateur de Longitude 181  
Directeur du programme cachalots

#### **Véronique Sarano**

Docteur en Océanologie  
Co-fondatrice de Longitude 181  
Coordinatrice du programme cachalots

#### Dernières publications :

**F. Sarano, J. Girardet, V. Sarano, H. Vitry, A. Preud'homme, R. Heuzey, A. M. Garcia-Cegarra, B. Madon, F. Delfour, H. Glotin, O. Adam and J-L. Jung, 2021** : Kin relationships in cultural species of the marine realm: case study of a matrilineal social group of sperm whales off Mauritius island, Indian Ocean. *Royal Society Open Science* 8: 201794. <https://doi.org/10.1098/rsos.201794>

**J. Girardet, F. Sarano, G. Richard, P Tixier, C.Guinet, A. Alexander V. Sarano, H. Vitry, A. Preud'homme, R. Heuzey, A. M. Garcia-Cegarra, O. Adam, B. Madon, & J-L. Jung, 2021**: Long distance runners in the marine realm: New insights into genetic diversity, kin relationships and social fidelity of Indian Ocean male sperm whales. *BioRxiv* <https://doi.org/10.1101/2021.04.23.440733>

**V. Sarano, F.Sarano, J. Girardet, A. Preud'homme, H. Vitry, R. Heuzey, M. Sarano, F.Delfour, H. Glotin, O. Adam, B. Madon, JL Jung**: Underwater photo-identification of marine megafauna: an identity card catalogue of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) off Mauritius Island. *BioRxiv* <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2021.03.08.433909v1>

**F. Sarano, V. Sarano, O. Adam, J. Girardet, H. Vitry, A. Preud'homme, R. Heuzey, H. Glotin, J-L Jung and F. Delfour**: A focal animal 6-points Likert scale to rate intra-unit interactions in sperm whales off Mauritius Island. World Marine Mammal Conference, Barcelona, Book of Abstracts p.112, Dec 2019.

L'association Longitude 181 agit pour préserver les océans et réconcilier l'homme avec la vie sauvage

Siège social : 12, rue La Fontaine - 26000 Valence