

## Projet S2 SYSMER

**Titre du projet :** " Optimisation de la localisation de sources bio-acoustiques par observations jointes des deux robots bouées pentaphoniques Bombyx "

N° du projet : /

Responsables : Pr Glotin Hervé et Post doc DYNi team CNRS LIS  
email : [glotin@univ-tln.fr](mailto:glotin@univ-tln.fr)

### 1. Contexte :

Le réseau Bombyx2 du CNRS LIS UTLN constitué de bouées acoustiques "intelligentes" du LIS DYNi est une innovation de niveau international. C'est en effet le premier réseau à permettre une écoute bioacoustique et acoustique en général de qualité en subsurface, à l'abri des intempéries et sans gêne du trafic maritime. Chaque bouée du réseau est aussi capable de remonter avec son ballast en surface pour envoyer ses rapports de détections de cibles (cétacés) au serveur UTLN et aux gestionnaires. Ce rapport est calculé en complète autonomie grâce à l'IA embarquée de la bouée. Les bouées entre elles peuvent aussi communiquer par l'intermédiaire de notre serveur UTLN. Ainsi une bouée A qui détecte un événement, peut envoyer dans une version proche un message à notre serveur UTLN LIS, qui alors peut poster des ordres ou indications de vigilance ou paramétrage vis à vis de certaines cibles, à des bouées voisines de A quand elles remonteront en surface. Ce projet a été rendu possible par la Chaire IA bioacoustique sous-marine (PI Glotin UTLN LIS) <http://bioacoustics.lis-lab.fr> et le programme MARITIMO GIAS (PI Glotin) et le soutien APRI de l'UTLN et TPM CG.



**Figure 1.** Groupe de trois cachalots socialisant à la surface, mesurant entre 10 et 16 mètres de long et 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)

Depuis l'été 2022 cet observatoire est en déploiement avec les 2 premières bouées sur Monaco. Il ne fait que débuter, et UTLN est en train de le déployer à l'échelle de l'Europe avec le projet BIODIVERSA EUROPAM. UTLN est en avance sur le sujet de la veille des sondeurs des grands fonds, les cachalots, et sur les grands chanteurs de la Med Sea (les rorquals). C'est aussi une veille efficace

---

de l'anthropophonie qui est une recherche prioritaire pour la commission européenne vis à vis de l'évolution du milieu maritime et de ses ressources halieutiques.

La surveillance acoustique passive (écoute des vocalises, biosonars ou clics des animaux sans interférence avec eux), permet de mieux échantillonner les différents groupes d'animaux sauvages. Il est essentiel de pouvoir 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. Notre approche que nous nommons « éthoacoustique », permet d'analyser le comportement des espèces grâce à l'acoustique, nécessite l'implantation dans les écosystèmes d'antennes de capteurs acoustiques synchrones, et l'optimisation des algorithmes d'intelligence artificielle (IA), pour reconnaître et analyser les comportements d'animaux qui vocalisent ou cliquent.

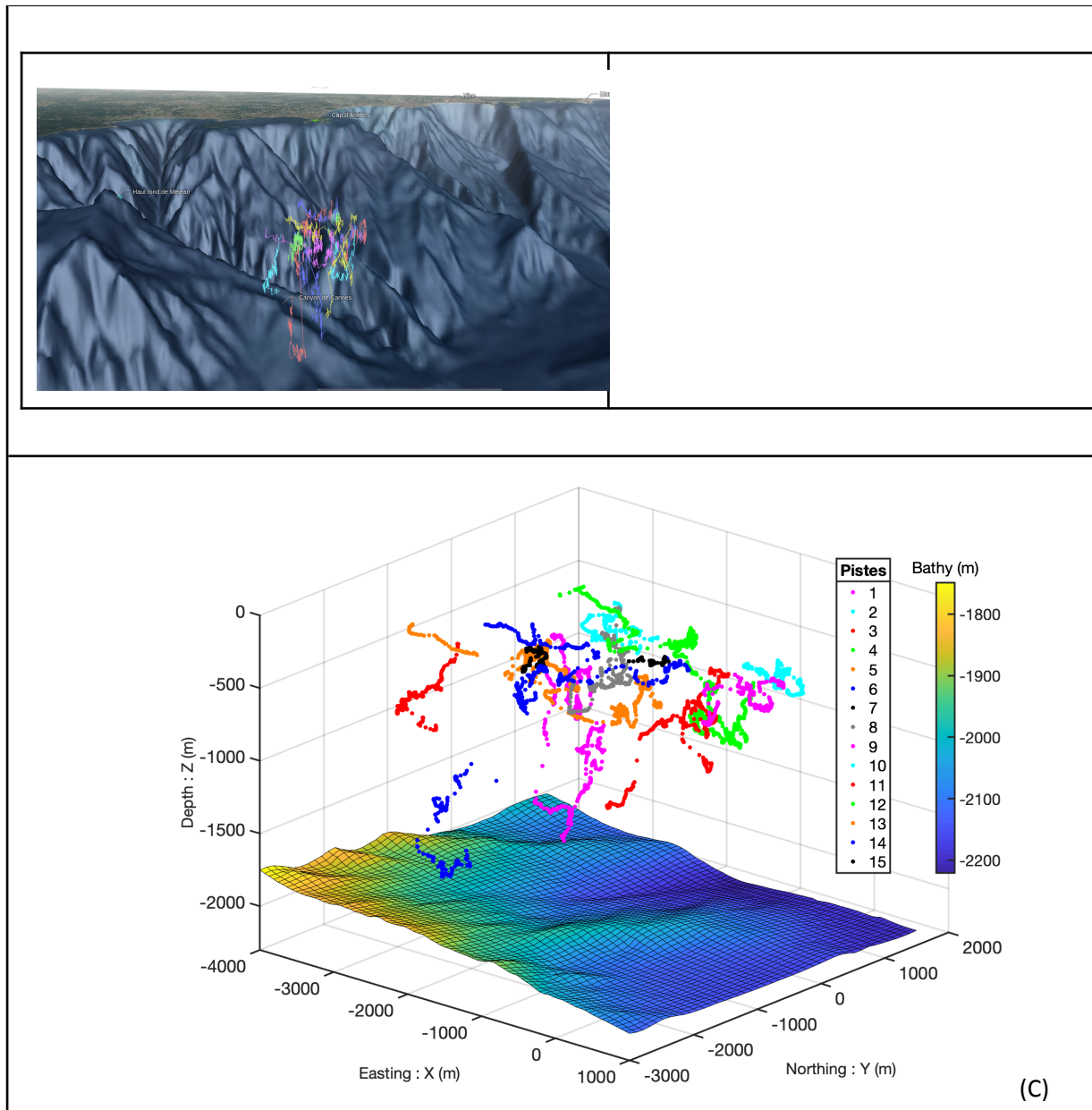
L'équipe de Pr GLOTIN à l'UTLN travaille sur ce sujet depuis 15 ans cette question avec une équipe interdisciplinaire, mêlant l'électronique, l'intelligence artificielle, l'acoustique et la biologie. Ce programme a permis la conception d'algorithmes d'apprentissage de représentation de signaux bioacoustiques et le développement d'instrumentations scientifiques dédiées pouvant embarquer ces nouveaux algorithmes.

En Méditerranée, le système concerne notamment la mégafaune (cachalots, globicéphales, rorquals...). Ces espèces fragiles, souvent menacées, 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 leur apporte suffisamment de nourriture (figure 1). La décroissance de leur population est un indice de la dégradation du milieu et des proies dont ils dépendent. La préservation de ces espèces dites « parapluie » est donc corrélées à celle de leur écosystème.

Nos méthodes apportent des connaissances sur d'invisibles titans des océans, comme les cachalots, les plus grands prédateurs. Il y a dix ans, nous avons posé une bouée acoustique stéréophonique (Bombyx1), au large de Port-Cros, en face de Toulon. Ce protocole a fourni 4 téraoctets de données, et a permis de pister et de compter les passages de la mégafaune (cachalots, rorqual) (Glotin et al, Poupard et al, Best et al.).

Nos systèmes permettent de dépeindre le comportement des cétacés dans les abysses sur la base de leur écholocation, clic par clic. Cette haute résolution semble montrer, par exemple, que les cachalots construisent un maillage d'émetteurs-récepteurs distant d'environ 500 mètres 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. Ainsi nous démontrons que ces cachalots restent pendant des heures dans des vortex formés autour d'un mont sous-marin. Ils plongent 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 leur finesse d'analyse acoustique forgée dans les profondeurs des mers dans une chasse sans répit dans les grands fonds, 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 (cf ci-dessous).

---



**Figure 2.** Position des chasses 3D calculées par acoustique passive depuis la surface d'une meute de 6 cachalots au large du haut-fond Mejean, vers Monaco, le 14 janvier 2020. Ces prédateurs restent centrés pendant trois heures autour d'un vortex, front océanique où est brassée une grande biomasse. (credit H. Glotin)



**Figure 3** : Idem Fig2, mais en animation 3D, avec suivi de chaque individus identifiés par leur signature acoustique induite par la taille de leur organe de production acoustique (crédit Glotin, notre exposition au Musée de Toulon 2023) animation en ligne sur <https://cosphilog.fr/cachalots-musee/>

Chaque cachalot est mesuré par les intervalles inter-pulses de ses clics. Il en résulte 4 individus de très jeunes à adultes, nommés par convenance Fanny, Marius, Norine, Honoré, César. A chaque instant de leur piste, la profondeur est indiquée à côté du nom.

Réciproquement, les pulses voisés (par analogie, proches des voyelles chez l'humain, signal provoqué par vibrations des cordes vocales) d'autres espèces pourraient porter des informations d'écholocation et des signatures individuelles. Ces découvertes permettent d'établir de nouveaux critères pour réguler l'anthropophonie et les systèmes anti-collision.

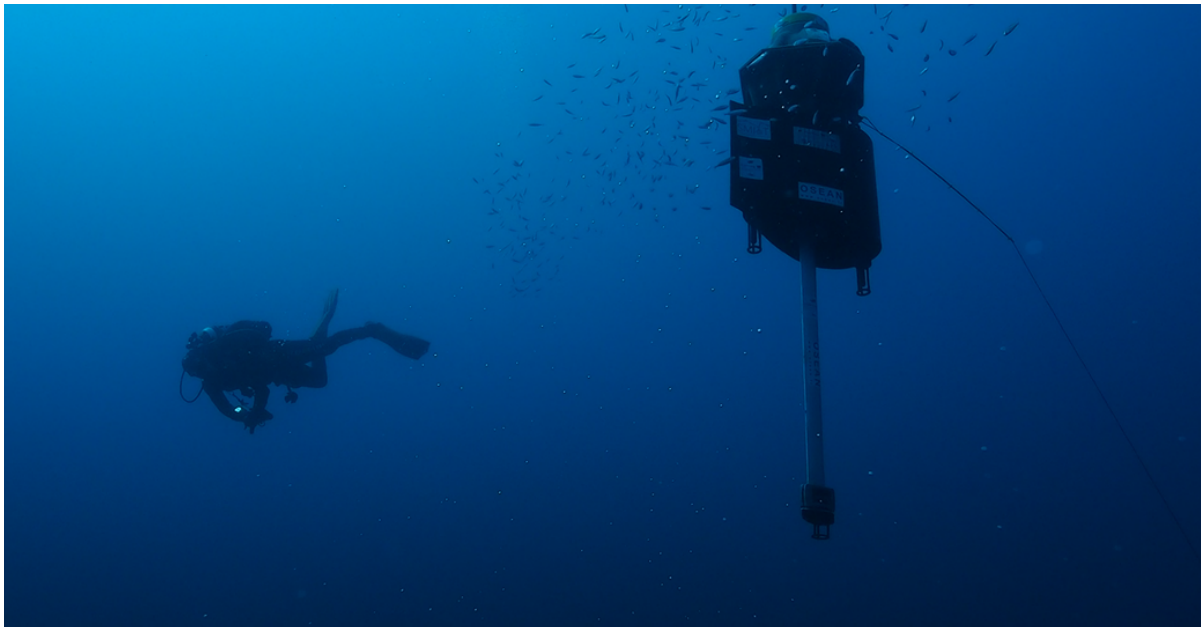
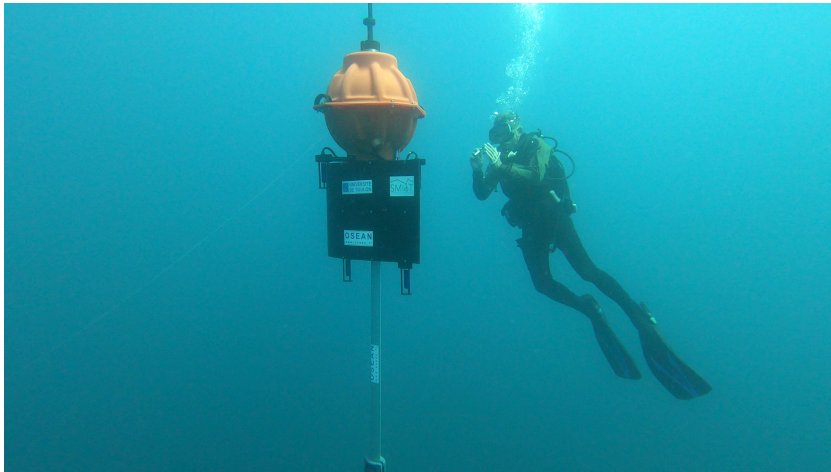
## La bouée BOMBYX2

La bouée Bombyx2 conçue par LIS DYNI UTLN est équipée de cinq hydrophones, qui permettent de localiser les cétacés et d'estimer leur cap et leur comportement (chasse ou déplacement rapide). Immergée à 30 mètres de profondeur grâce à son ballast, elle dispose d'une intelligence artificielle embarquée sur sa carte son. Elle détecte et entend les grands cétacés dans un rayon de 20 kilomètres. Elle calcule un bilan de ses détections et remonte automatiquement en surface pour envoyer un SMS par 4G au serveur terrestre qui envoie les alertes à la Préfecture Maritime pour prévenir du risque de collision cétacé-bateau. Ces collisions sont dommageables pour l'économie, car les compagnies doivent mettre leur navire en cale sèche pour vérifier son état, et elles sont surtout létales pour les cétacés.

Depuis l'été 2022, les bouées Bombyx2 se déploient, avec 2 à Monaco à ce jour. Puis elles seront déployées tous les 40 kilomètres le long de la Côte d'Azur, et formeront ainsi le plus long réseau d'intelligence artificielle temps-réel du monde (250 km) (Fig.4).

Cet observatoire basé sur l'intelligence artificielle participera à une nouvelle ère de l'observation des océans, au profit de la prévention de l'anthropophonie et des risques de collision.

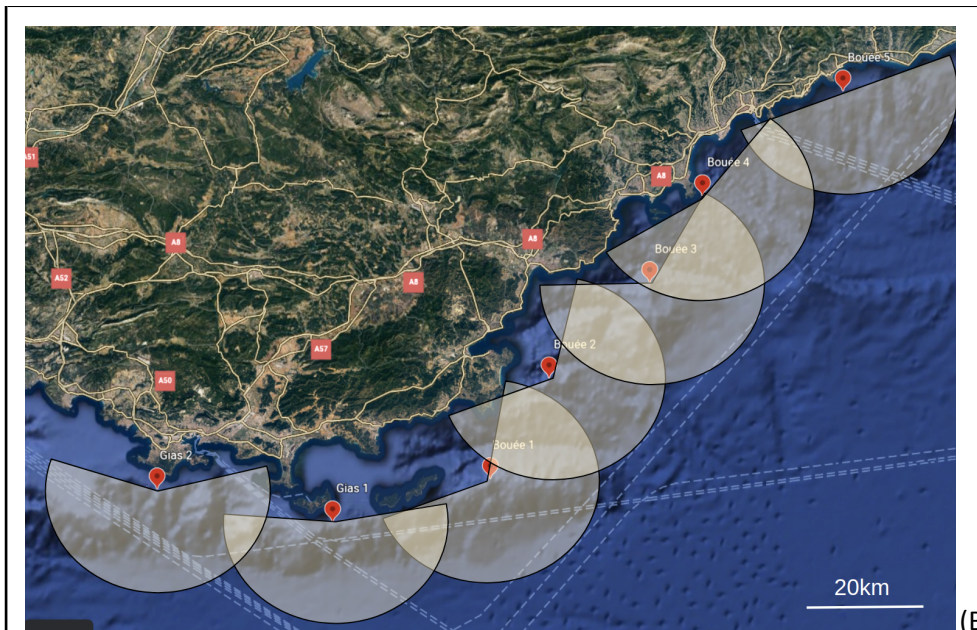
---



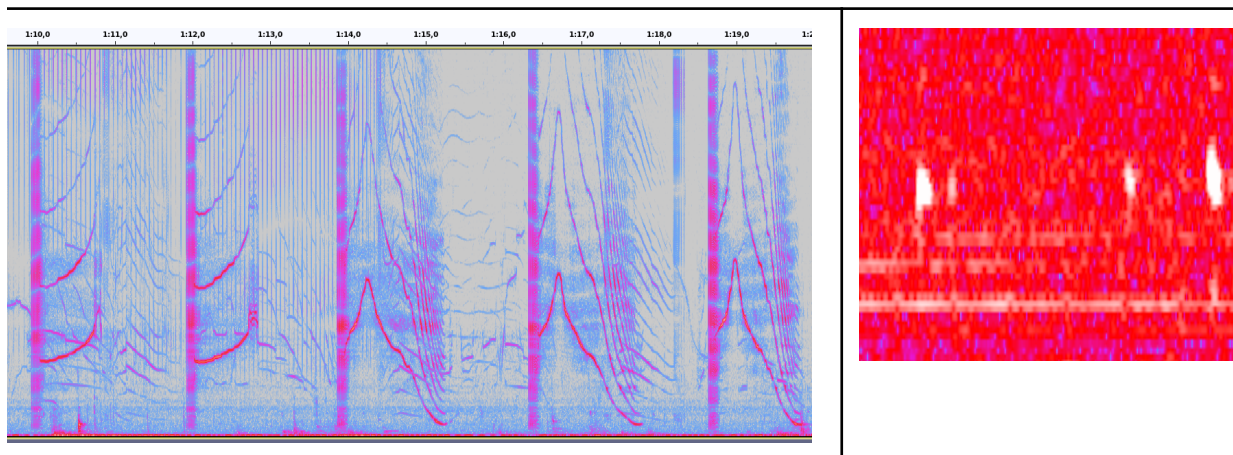
**Figure 4A** La bouée Bombyx2. Le plongeur F. Sarano teste les 5 hydrophones.

Extrait de la vidéo <http://sabiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX2/videos/GH010484.MP4>

---



**Figure 4B** Positions prévues des sept premières bouées le long de la Côte d'Azur, tous les 40 km, et de détection (20 km). Une huitième est requise vers Port Nouvelle à l'Ouest.  
Carte dynamique 3D <http://sabiody.org/gias/>



**Figure 5.** Exemple de vocalises. A gauche : globicéphales non loin de Toulon, en 2020. Le spectre de 20 kHz de largeur montre la complexité de dialectes. A droite : pulses de rorqual enregistrés au pied de Porquerolles, par 2,5 kilomètres de fond en mai 2020 (spectrogrammes 0 à 40 Hz, 20s). Ces formes portent une information clnique qui pourrait être identifiée par IA et liée aux déplacements de populations accélérés par le réchauffement climatique.

## 2. Objectifs :

Ce projet porte sur l'estimation par déphasage ou tdoa et niveau dB, de l'azimut et élévation d'une meme source à partir de chacune des 2 bouées Bombyx. Puis ces bouées étant a 2 km de distance l'une de l'autre, croiser leurs estimations pour raffiner l'estimation de la distance  $r^*$  de la source.  
Enfin apprendre à estimer  $r^*$  indépendamment sur chaque bouée en prenant en compte toutes ses mesures individuelles, dont sa fonction de transfert.

Cette fonction sera implantée en embarque dans le robot et permettra d'ordonner les remontées en surface de la bouée en fonction de ses estimations et du risque de collision entre un cétacé détecté et le trafic maritime. Ce rapport des estimations étant envoyé en temps réel à la préfecture.

### 3. Données :

Les signaux wav avec les en

Signaux, Diapos, Films des bouées dispos a =

<http://sabiod.org/pub/BOMBYX2>

()

### 4. Livrables :

Gith hub avec codes,  
rapport sous Gdoc ou Latex (préférable) co rédigés avec  
l'équipe tout au long du projet.

## 5 Annexe

### Glossaire :

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

**Biosonar (ou 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 des formes de leurs vocalises ou biosonars grâce à l'intelligence artificielle.

**Intelligence artificielle (IA).** Algorithme de détection ou classification automatique de taxon (espèce) optimisé par apprentissage sur une base de référence dans le cas supervisé, ou par regroupement dans le cas non supervisé. Plus récemment, au travers des méthodes d'apprentissage profond (*deep learning*), apprentissage de représentation du signal pour mesurer à haute résolution en temps et en fréquence les formes bioacoustiques, par exemple.

## Bibliographie

R. Balestrieri, 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>

---

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>

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>

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>

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>

Best, P., Marxer R., Paris S. and Glotin H. Temporal evolution of the Mediterranean fin whale song. Scientific reports, Nature Ed., 2022 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15379-0>

Poupard, M., Ferrari M., Best P., Glotin H. (2022), Passive acoustic monitoring of sperm whales and anthropogenic noise using stereophonic recordings in the Mediterranean Sea, North West Pelagos Sanctuary. In Scientific reports, Nature Ed., <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05917-1>

Glotin H., Poupard M., Best P., Ferrari M. (2021). Observations Stéréophoniques sur 4 ans de la Bouée BOMBYX au Sud du Parc National de Port-Cros : Mégaafaune et pollution anthropophonique. LOT 2 : Le cas du rorqual et du globicéphale [http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT\\_ENGIE\\_LOT2\\_rorqual\\_CNRS\\_BOMBYX.pdf](http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT_ENGIE_LOT2_rorqual_CNRS_BOMBYX.pdf)

Glotin H., Poupard M., Best P., Ferrari M. (2021). Observations Stéréophoniques sur 4 ans de la Bouée BOMBYX au Sud du Parc National de Port-Cros : Mégaafaune et pollution anthropophonique. LOT 1 : Le cas du cachalot [http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT\\_ENGIE\\_LOT1\\_cachalot\\_CNRS\\_BOMBYX.pdf](http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT_ENGIE_LOT1_cachalot_CNRS_BOMBYX.pdf)

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)

---