

CNRS - LABORATOIRE LIS, EQUIPE DYNI
UNIVERSITE DE TOULON



Etude cofinancée par la Fondation Engie

Observations Stéréophoniques sur 4 ans de la Bouée BOMBYX au Sud du Parc
National de Port-Cros :
méga-faune et pollution anthropophonique.
LOT 1 : Le cas du cachalot

H. Glotin, M. Poupard, P. Best, M. Ferrari
Université de Toulon, CNRS, Aix Marseille Univ., LIS, Dyni,
International Center of Bioacoustics, France - glotin@univ-tln.fr

Table des matières

1	Abstract	1
2	Introduction	1
3	Le cachalot <i>Physeter macrocephalus</i>	3
4	Matériel : la bouée stéréophonique BOMBYX	7
5	Principe stéréophonique de BOMBYX1 pour le cachalot	9
6	Résultats	13
6.1	Détection acoustique du cachalot sur le long terme	13
6.2	Influence de l'anthropophonie sur le cachalot	14
7	Conclusion	16
8	Perspectives	17
9	Remerciements	18

Cette étude est divisée en deux rapports : ce premier expose les résultats des analyses sur le cachalot sur la bouée BOMBYX1 en Méditerranée. Le second traite des rorquals et des globicéphales enregistrés sur la même bouée et le bilan en communication du soutien de Fondation Engie à ce projet au travers de plusieurs publications, revues et conférences de rang A+ et A. Ils démontrent l'intérêt de la communauté scientifique internationale pour BOMBYX1 pour l'étude et la conservation de la biodiversité marine et l'importance du soutien de Fondation Engie.

1 Abstract

This report demonstrates results on megafauna survey by BOMBYX1, the Sonobuoy built by DYNI team and placed in 2015 for 4 years in front of Port-Cros, with the help of IUF, Engie fondation, PNPC and PELAGOS. The first part of this report shows that BOMBYX1 was able to segregate and count the Sperm Whales 20 km to 30 km around it. BOMBYX1 also assessed the dB levels and reaction of the Sperm Whales to anthropophony. It seems they avoid the noise of the ferries. The second part of this report (Lot 2), shows results on Fin Whales detection with the same sonobuoy and same period, yielding to another pattern. We finally discuss on the extension of BOMBYX1 to BOMBYX2, based on this strong know-how, into the framework of the European FEDER GIAS project. BOMBYX2 is equipped of 5 hydrophones, and innovative sound card integrating Artificial Intelligence for automatic detection and classification of the sounds. It also estimate localisation of the whales. Then when Sperm Whales or Fin Whales are detected, BOMBYX2 goes up to the surface using its ballast, to emit a report to the CROSSMED or other authorities, and MIRACETI NGO, which finally send information to the marine traffic for whale-ship collision mitigation.

2 Introduction

"Le déploiement de l'énergie pour tous ne peut se faire sans conscience écologique. Pour préserver l'environnement, il est indispensable de sensibiliser les citoyens aux enjeux environnementaux". Cette citation de la Fondation Engie va dans le sens des travaux de l'équipe DYNI au sein du la-

laboratoire LIS de l'université de Toulon.

En effet le LIS Laboratoire d'Informatique et Systèmes est une Unité Mixte de Recherche (UMR) sous tutelle du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) rattachée à l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I), de l'Université d'Aix-Marseille (AMU) et de l'Université de Toulon (UTLN). Étant localisé sur les campus de Saint-Jérôme et de Luminy à Marseille et sur le campus de l'Université de Toulon, le laboratoire LIS porte une grande importance dans la conservation du littoral méditerranéen. C'est pour cela que le laboratoire LIS, met tout en oeuvre pour développer des systèmes et des applications qui ont notamment pour but la sensibilisation des impacts environnementaux. L'équipe DYNI, fondée en 2008 se consacre à l'innovation algorithmique en IA via notamment de nouveaux paradigmes et instrumentations scientifiques haute définition et long termes. L'objectif est de nourrir de nouveaux algorithmes d'intelligence artificielle dédiés à l'observation plus approfondie de la biodiversité. Les applications sont nombreuses, et l'équipe se focalise particulièrement sur la bioacoustique et l'analyse du signal dans tout type de milieux. Elle a notamment participé à différents suivis acoustiques de la faune aviaire et de cétacés. Pour cette dernière tâche, l'équipe DYNI se concentre sur différentes espèces comme les orques de Vancouver et de Norvège, les cachalots de Méditerranée et de l'île Maurice, la mégafaune de Patagonie, ou encore de l'arc Antillais comme les dauphins tachetés pantropicaux de Martinique ou ses baleines à bosse, avec toujours pour but d'approfondir les connaissances sur ces espèces et les impacts anthropiques via l'acoustique passive.

La bioacoustique passive enregistre et traite l'environnement audio, tandis que la bioacoustique active émet des sons et enregistre les échos produits par ce son. Le contrôle de la source (temps d'émission, puissance, signal, ...) augmente la quantité d'informations obtenues permettant de collecter certaines données clés (par exemple la distance à la cible). Cependant la bioacoustique active présente l'inconvénient d'émettre du son. Cela implique une pollution sonore, une perturbation potentielle du comportement animal, et éclipse les émissions animales simultanées, et de fait est contre productive pour de nombreuses études. Enfin parmi les méthodes bioacoustiques passives, on trouve l'utilisation de DTAG, qui sont de petits appareils d'enregistrement avec des ventouses qui sont placées sur les animaux, cependant cette technique peut potentiellement aussi perturber le comportement animal, par le stress engendré à la pose, puis des pathologies si le

DTAG est tenu par petit harpon.

La visibilité sous-marine est limitée à une portée comprise entre 20 m et 60 m, tandis que certaines espèces comme les cachalots, peuvent être entendues à 5 ou 10 km. Dès lors, la bioacoustique passive est idéale pour surveiller de nombreux mammifères marins. Dans le cas des cachalots, qui émettent des clics à la fois lors de l'écholocation et des interactions sociales, la bioacoustique passive permet d'obtenir des informations sur leur comportement de chasse, d'enregistrer la séquence de clics qu'ils émettent pour communiquer et d'estimer leur taille.

L'étude de ce rapport porte sur l'évolution et le déplacement du cachalot face à un des plus grand port français, Toulon, à la porte du sanctuaire Pelagos. Ce sanctuaire est un espace maritime de 87 500 km² faisant l'objet d'un Accord entre l'Italie, Monaco et la France pour la protection des mammifères marins (29). Huit espèces de mammifères marins fréquentent ses eaux, allant du dauphin bleu et blanc (odontocète, baleine à dents) jusqu'au rorqual commun (mysticète, baleine à fanons).

L'ensemble de ces résultats est présenté dans des articles scientifiques acceptés (36) et (7). Des exemples de sons pour les trois espèces étudiées (cachalot, globicephales et rorquals) sont disponibles à l'adresse suivante : http://sabiody.lis-lab.fr/pub/engie_sound/.

3 Le cachalot *Physeter macrocephalus*

Le premier modèle d'étude est le cachalot traversant les eaux toulonnaises à la porte du sanctuaire Pelagos. Ce sanctuaire est un espace maritime de la Méditerranée pour la protection des mammifères marins. C'est avec le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) le plus grand cétacé de Pelagos. La plupart du temps, les cachalots mâles vivent en solitaire pendant que les femelles et les jeunes vivent en groupe (Fig. 2).



FIGURE 1 – *Groupe de cachalots (Physeter macrocephalus) socialisant. Crédit V.F. Sarano.*

Ce dernier est le plus grand des odontocètes (jusqu'à 18m de long) et occupe tous les océans (45).

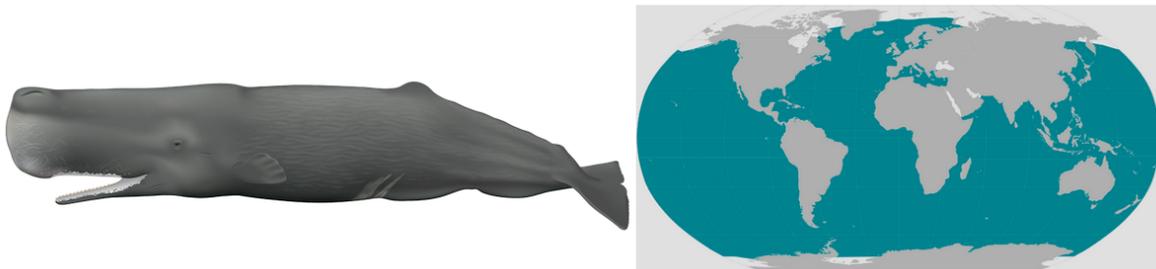


FIGURE 2 – *Représentation du cachalot (Physeter macrocephalus) associée à sa répartition géographique. Source : (27).*

Sa population en Méditerranée dans les bassins Ouest et Est, est en déclin et est estimée entre

250 et 2500 individus, pour un statut IUCN 'Endangered' (34). L'état de la population à l'échelle de la planète n'est pas meilleur, et est une conséquence des pêches intensives qui ont été conduites durant plus d'un siècle.

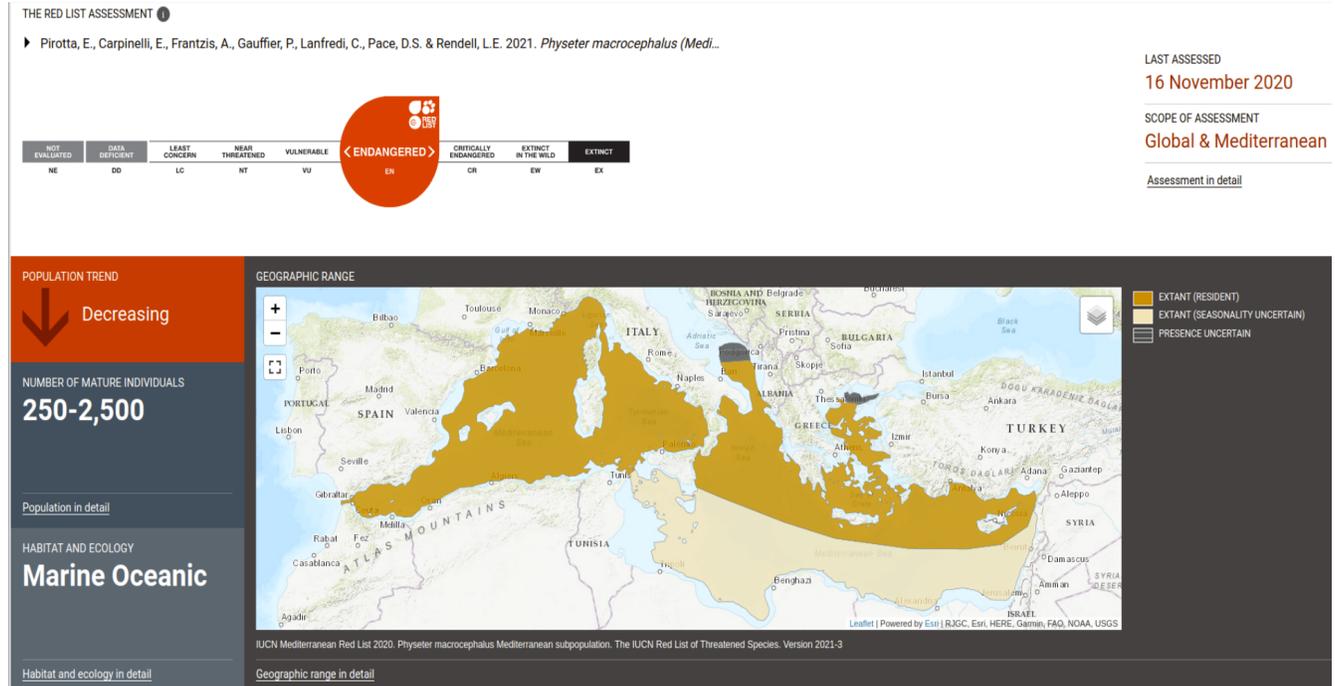


FIGURE 3 – Répartition du cachalot (*Physteter macrocephalus*) en Méditerranée. Source : (34).

Le cachalot est un grand plongeur et peut évoluer autour de 1000 m de profondeur (43) et jusqu'à -3000 m (18), pour chasser principalement des céphalopodes. Il est donc très difficile de les étudier car ils passent près de 90% de leur temps dans les profondeurs. La bioacoustique est donc une méthode adaptée pour étudier cette espèce. Afin de capturer ses proies dans un milieu totalement obscur, le cachalot utilise l'écholocation. Il localise ses proies en émettant un son très directif (clics) et écoute son écho. L'intervalle entre chaque clic est usuellement entre 0.5 et 1 sec. Différents clics peuvent être produits : les clics d'écholocation (chasse) et les clics de socialisation (codas) pour la communication.

Il est classé comme vulnérable par l'UICN à cause de la réduction de la population mondiale

due à la chasse commerciale. Mais dernièrement, d'autres menaces pèsent sur les cachalots comme la pollution chimique, le bruit anthropique ou encore les collisions avec les navires.

Alors qu'ils étaient déjà chassés dans d'autres parties du monde, les baleiniers américains ont capturé leurs premiers cachalots vers 1720 (28). Avec cet événement ont commencé deux grandes périodes de chasse au cachalot (11; 40; 44). La première période s'est terminée dans les années 1870 lorsque l'industrie pétrochimique a commencé à produire des produits qui pourraient remplacer l'huile de spermaceti, et la seconde à partir des années 1950 lorsque les autres grandes populations de baleines à fanons ont décliné. Alors que la période intermédiaire de chasse semblait avoir aidé le cachalot population se rétablissent, (44) a estimé que la population était d'environ 1 110 000 à l'ère pré-chasse, 788 000 en 1880, et seulement 360 000 restants en 1999. La fin de la chasse n'a pas entièrement protégé la population de cachalots de l'activité humaine.

Avec l'arrivée des moteurs, les navires ont commencé à émettre des bruits. Avec l'augmentation des ferries, des bateaux de croisière et d'autres transports de marchandises, le niveau de bruit a suivi. Cette augmentation du niveau sonore a un impact important sur les mammifères marins qui subissent alors une augmentation du stress (38; 12; 17). Le bruit de fond affecte également la plage d'écholocation pour les clics de même énergie, ce qui rend plus difficile la détection des proies. La pollution sonore est également produite par les études sismiques, qui utilisent principalement des canons à air qui émettent des impulsions fortes et à basses fréquences. Alors que l'utilisation de canons à air ne semble pas déranger les cachalots dans un premier temps (23), les cachalots quittent les zones d'études, sans y revenir même des jours après la fin de l'activité (24). A noter que la pollution sonore ne s'arrête pas forcément après le relevé initial, puisque le but des relevés sismiques est de trouver des sites de creusement, dont l'exploitation sous-marine générera une pollution acoustique supplémentaire (5; 25).

Une autre menace est également présente, celle de la pollution marine de divers types qui s'accumule dans l'estomac des cachalots, telle que l'ingestion de plastique, les tuant lentement (30; 41).

Les collisions avec les ferries constituent une autre menace majeure pour les cachalots (10). Comme démontré dans (20), les cachalots pourraient ne pas être en mesure d'effectuer des manœuvres de fuite à temps, ce qui en fait une menace majeure (13; 31). De plus, ces dernières ont

été amplifiées à cause du nombre de bateaux de plus en plus important (21).

4 Matériel : la bouée stéréophonique BOMBYX

La Bouée BOMBYX a été imaginée et définie par l'équipe DYNI à l'université de Toulon CNRS LIS, afin d'observer la mégafaune vivante face à l'un des plus grands ports de France. Elle a été financée majoritairement par la Chaire d'analyse de Scène Acoustique d'H. Glotin à l'Institut Universitaire de France, et Toulon Provence Méditerranée. Elle a été finalisée en collaboration avec A. Molcard et M. Rougier, et a été posée début 2014 avec l'aide logistique du Parc National de Port-Cros. Elle est située 42°56 N, 6°19 E, 25 m sous-surface pour éviter les risques de collision. Son corps mort repose par -275 m au, en haut d'une falaise de 2 000 m de haut. La première session de BOMBYX fut monophone, en juillet 2014 et permit de valider l'infrastructure et valider son bon rayon de détection, d'au moins 10 km pour le cachalot.

Nous avons alors mi 2015 augmenté et finalisé le protocole BOMBYX par un enregistrement stéréo (2 microphones). Cette version fut posée le 30 mai 2015, relevée en octobre 2015. Ce corpus de 666 Go (à échantillonnage de 50 kHz Fe, 24 bits avec la carte son d'OSEAN) a mesuré avec des hydrophones Neptune HN1 sur un programme de 10 minutes d'enregistrement et 20 minutes de pause (33% de recouvrement temporel).

Dans cette première configuration les hydrophones ont été fixés aux extrémités verticales de la bouée, l'un pointant vers la surface, l'autre vers le fond, afin d'observer et caractériser les plongées du cachalot et ses réflexions surface/fond. A cette époque nous avons conjointement travaillé avec les données acoustiques de la bouée ANTARES de 2015. ANTARES est fixé au fond de la fosse à 20 km Ouest de BOMBYX (15). Nous avons travaillé avec quelques semaines d'enregistrements disponibles en 2015 avant le démantèlement d'ANTARES. Cela a permis de conforter la capacité de BOMBYX et ANTARES à détecter les cachalots, et à définir la pose du nouvel observatoire MEUST, que nous avons codéposé au FEDER pour son volet bioacoustique et que nous co-pilotons depuis 2017.

Puis nous avons conduit 6 autres sessions d'enregistrement BOMBYX, toujours en stéréo : en été 2016 (5 minutes d'enregistrement pour 25 de pause, 16% de recouvrement, traitée complètement

dans le rapport PELAGOS (15), de novembre 2016 à mars 2017 (1 minute d'enregistrement pour 5 de pause, 16% de recouvrement), d'août à octobre 2017 (5 minutes d'enregistrement pour 15 de pause, 25% de recouvrement), de fin 2017 à avril 2018 (5 minutes d'enregistrement pour 15 de pause), de juin 2018 à octobre 2018 (5 minutes d'enregistrement pour 15 de pause), et une dernière session à 100% de temps d'enregistrement en décembre 2018. Les différents recouvrement dans ces protocoles sont validés par la comparaison à la session à recouvrement à 100% : nous avons constaté que nous ne perdons pas de passage d'individu de cachalot par écoute à recouvrement partiel même de 16%, les rayons de détection pour le cachalot et pour le Rorqual étant de plus de 20 km. Cette bouée "BOMBYX1" est représentée Fig. 4 et dans les films disponibles à <http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX>, ainsi que dans les reportages télévisuels qui sont présentés à <http://sabiiod.lis-lab.fr/tv> et dans la section diffusion du rapport 2.

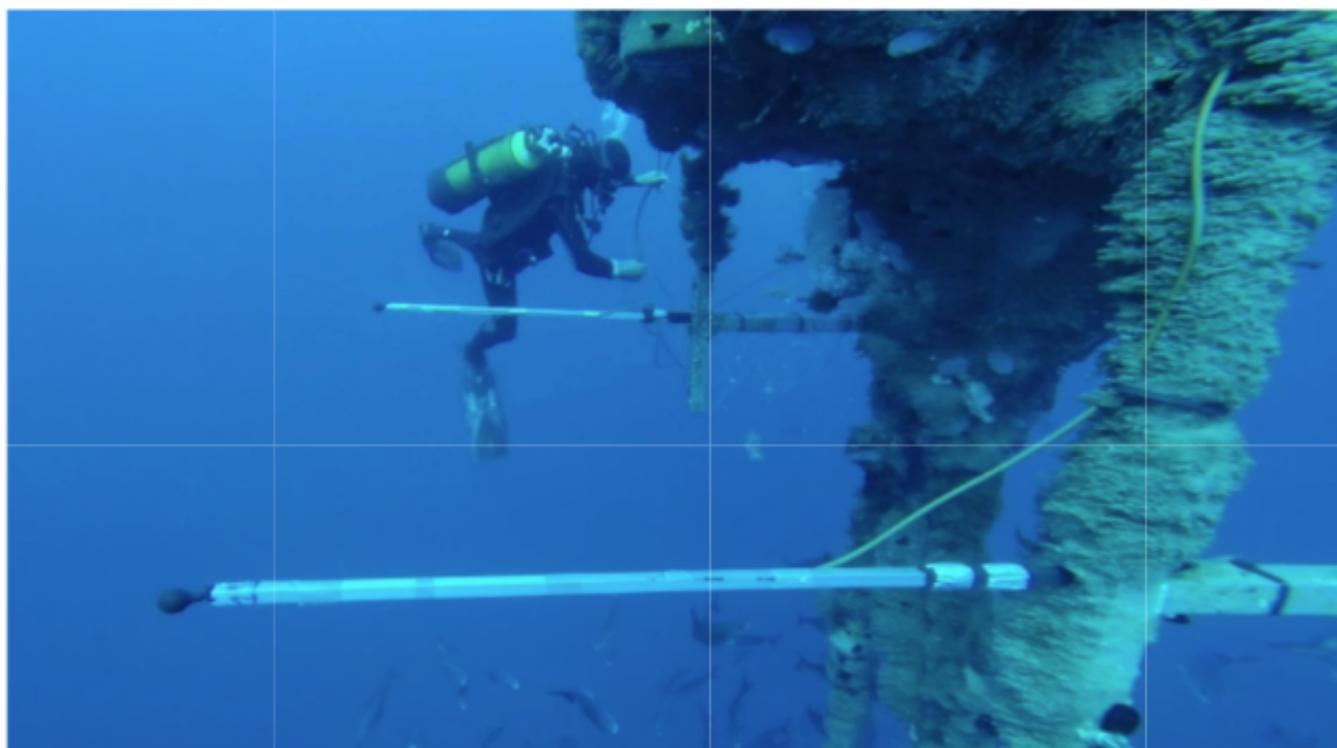


FIGURE 4 – Configuration de la bouée en 2016, composée de deux hydrophones espacés de 1.83m

Au total, 3 532 heures de signaux stéréophoniques ont été enregistrés de mi 2015 à fin décembre

2018, par lot de 5 minutes ou 10 minutes chaque 15 ou 30 minutes. Les données recouvrent finalement 22 mois plein d'observation sur les 38 écoulés, soit une taux de recouvrement important de $22/38 = 57\%$. Ces données représentent 2.5 téraoctets de données.

Leur traitement requiert donc des méthodes automatiques pour la détection d'espèces (dans ce cas précis, le cachalot) et le suivi anthropophonique.

5 Principe stéréophonique de BOMBYX1 pour le cachalot

Un détecteur de clics a été mis en place pour cette étude. Les étapes de ce détecteur sont décrites ci-dessous.

Le suivi sur BOMBYX des cachalots est robuste du fait de la mesure de corrélation des deux hydrophones. Un délai négatif sur BOMBYX 2016 indique une position à l'Est. Le délai nul indique une position dans le plan médian des hydrophones. La méthode est très efficace et permet de dresser les pistes des cachalots dans un espace de délais, et donc de suivre littéralement chaque individu, et donc de les compter. C'est une qualité assez inédite pour des mesures sous-marines bioacoustiques qui sont majoritairement effectuées par des écoutes monophoniques du fait de la forte consommation de systèmes stéréophoniques et le coût de déploiement.

Concernant les traitement informatiques, nous avons corrélé le signal avec une période d'un sinus de 12.5 kHz. Puis nous avons appliqué un filtre Teager-Kaiser (19). Une fois le filtre réalisé, les maximums locaux ont été récupérés dans une fenêtre de 20 ms (double de l'intervalle entre les pulses d'un clic de 10 ms (2)). Enfin, la dernière étape est de filtrer les bruits restants, en récupérant uniquement les maximums au dessus de trois écarts-types (37) de l'énergie logarithmique médiane de toutes les détections. L'ensemble de ces étapes est illustré Figure 5.

Le détecteur décrit ci-dessus ne détectait pas uniquement les clics de cachalots, mais également d'autres clics d'odontocètes et des navires (15; 35). En effet, la plupart des clics détectés ne proviennent pas des cachalots mais du bruit ambiant.

La qualité d'un détecteur est décrite par sa courbe de caractéristique de détection dite courbe ROC décrivant sa sensibilité et spécificité, et son intégrale. Une intégrale unitaire est celle d'un détecteur idéal. Le détecteur validé par cet étude a une intégrale supérieure à 0.8 ce qui est performant.

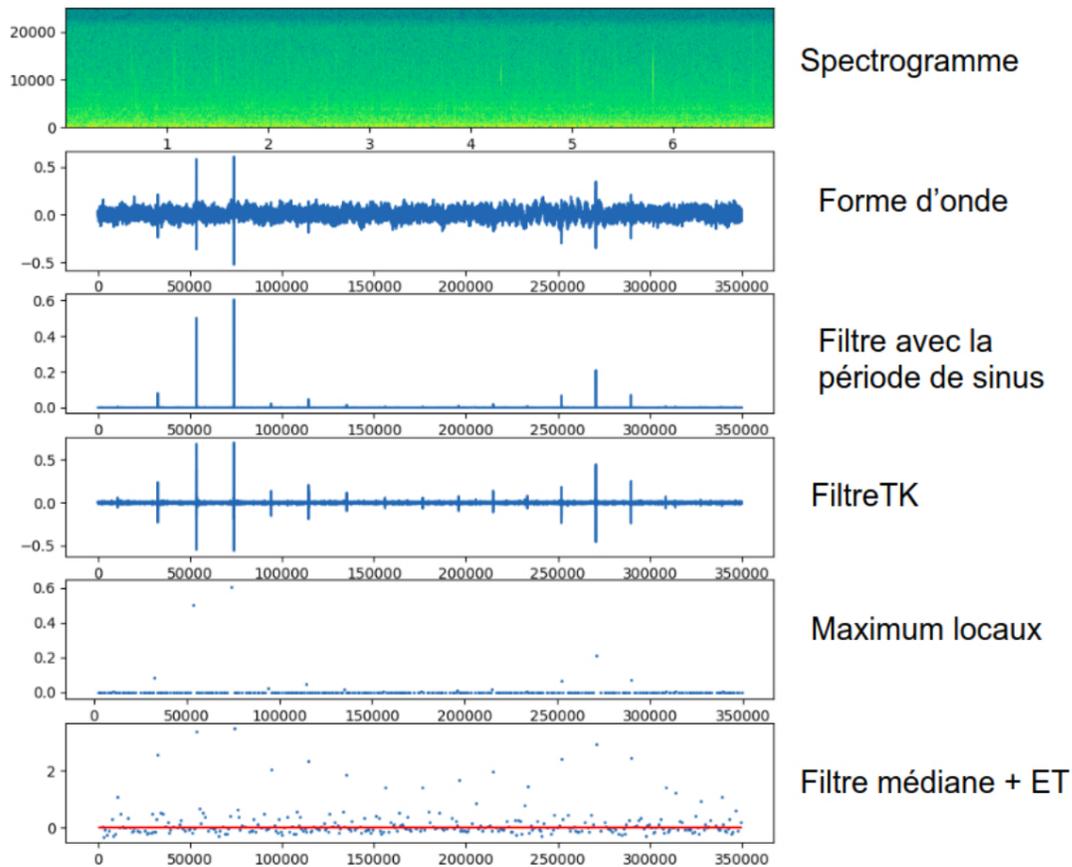


FIGURE 5 – Représentation des différents filtrages réalisés pour détecter les clics de cachalot pour un enregistrement de 7 secondes.

Néanmoins, il va produire une certaine quantité de "vrais positifs" correspondant à de véritables clics de cachalot, mais également une quantité de "faux positifs" qui n'en sont pas (bateau, bruit).

L'objectif de ce détecteur était d'obtenir un taux de rappel très haut et une précision faible, afin d'être sûr de ne pas manquer des détections. Nous avons donc beaucoup de "faux positifs" dans notre ensemble de détections.

Afin de sélectionner uniquement les clics de cachalots, le temps d'arrivée (TDoA) de chaque signal détecté sur les deux hydrophones de la bouée a été calculé. La Figure 6 montre un clic de cachalot visualisé sous Audacity. Le clic arrive d'abord sur la voie 1 (H1), puis sur la voie 2, donc l'animal vient de l'Est. Le cachalot se déplaçant continûment à une vitesse entre 2 et 10 km/h, une piste

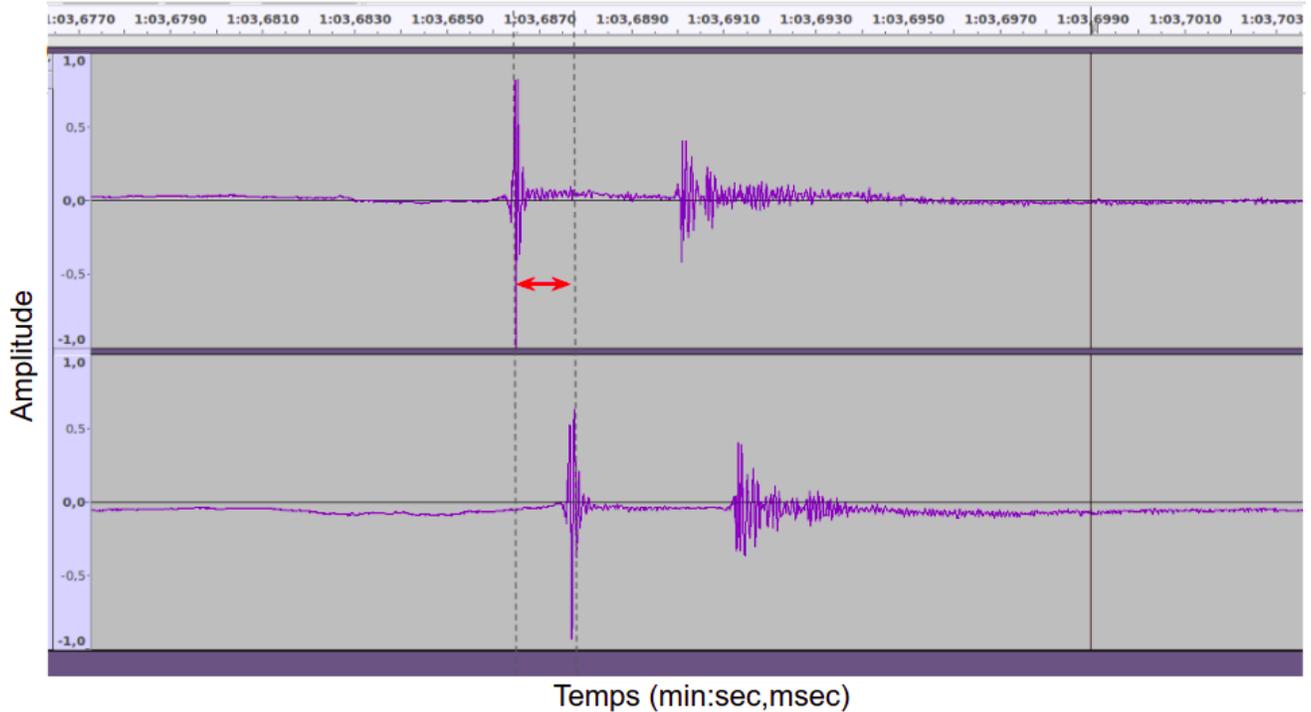


FIGURE 6 – Exemple d'un clic visualisé sous Audacity, sur les deux voies de BOMBYX. La double flèche rouge représente le TDoA entre les deux voies. L'impulsion suivant le clic est son écho issu de la surface située à environ 25 m de chaque hydrophone.

de cachalot dans cet espace des TDoAs va donc décrire une courbe dérivable, qui sera proche le plus souvent d'une forme d'arctangente.

Une interface d'affichage des temps de délais d'arrivée des clics détectés permet alors d'identifier manuellement les trajectoires de cachalots. Cet outil d'annotation amélioré a été mis en place par l'équipe DYNI (Paul Best) afin de faciliter ces analyses sur une masse de données importante. Cet outil affiche l'ensemble des sessions mises bout à bout avec les TDoAs de chacune d'entre elles. Afin de vérifier l'exactitude des pistes, nous avons la possibilité d'écouter les clics à l'intérieur de celles-ci (par sélection manuelle). Un point rouge sur la trajectoire représente un clic qui vient d'être écouté.

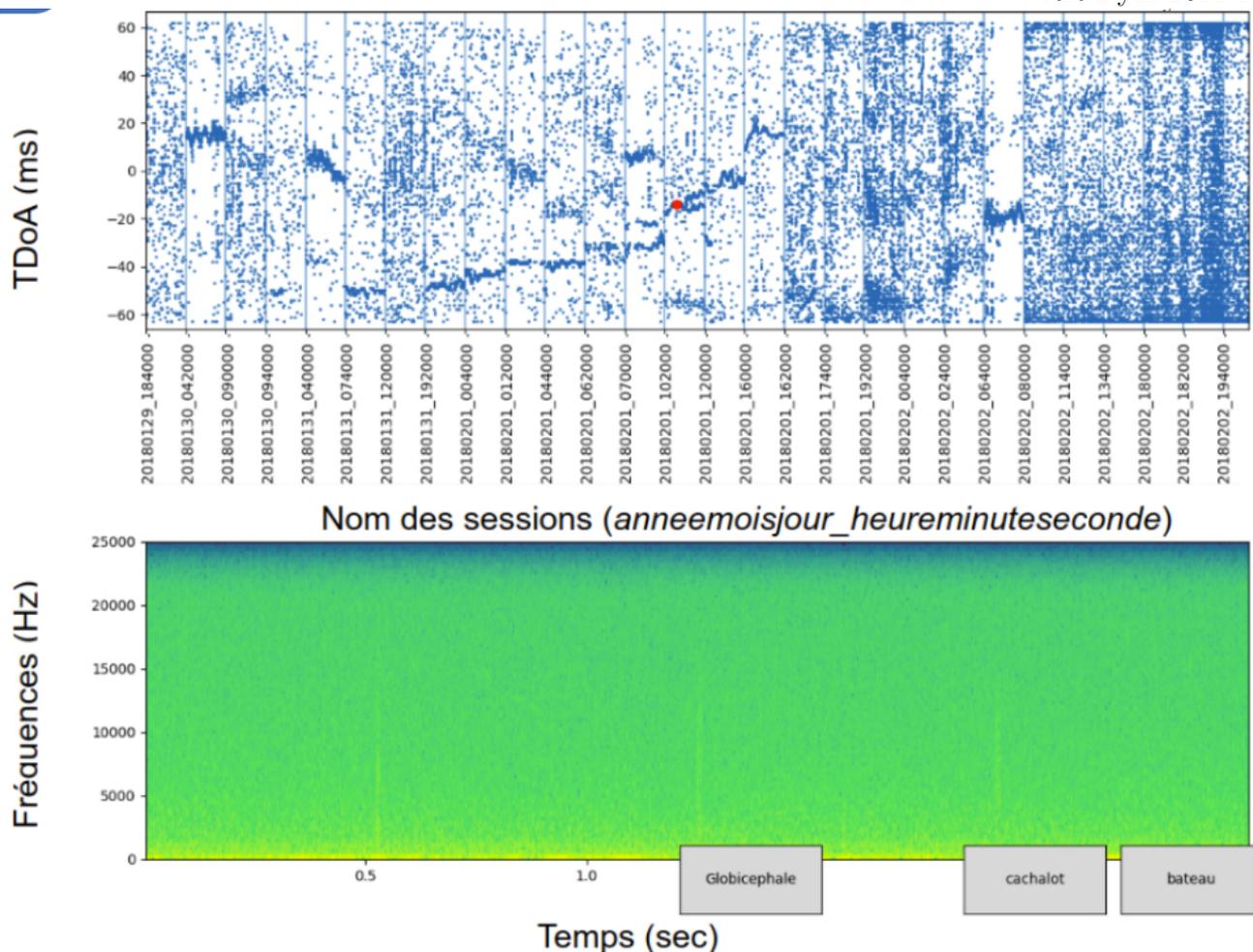


FIGURE 7 – Représentation de l’outil d’annotation réalisé par l’équipe DYNI. Haut : affichage de plusieurs heures de TDoAs. Bas : Affichage en temps-fréquence d’un train de 3 clics de cachalot (barres claires entre 500 Hz et 16 kHz), datés par le point rouge figure du haut.

Après avoir annotées "positives" ou non chaque session à la présence de cachalots, nous avons pu déterminer le sens de passage et le nombre d’animaux présents.

Différentes sessions ont été réalisées avec BOMBYX. Ces dernières étaient enregistrées à différents recouvrements temporels (ex : 1min d’enregistrement, 5 min de pause), de 16% à 100%. Afin d’évaluer la perte de l’information qu’il pourrait y avoir pour la visualisation de la piste TDoAs, nous avons isolé une trajectoire d’un passage de cachalot enregistré en continu que nous avons

volontairement décimé.

En effet, la dernière session enregistrée sur la bouée BOMBYX a été faite du 26 Novembre 2018 au 26 Décembre 2018. Cette dernière session a été définie comme la session “contrôle” puisque les enregistrements ont été réalisés en continu. L’équipe DYNI a décidé de mettre en place un échantillonnage continu afin de pouvoir comparer les pistes complètes avec les pistes obtenues sur les autres sessions. La Figure 8 illustre la trajectoire obtenue d’un individu lors de la session en continu. Il a été possible de confirmer qu’il n’y avait qu’un seul individu grâce à l’écoute des intervalles inter-clics (ICI).

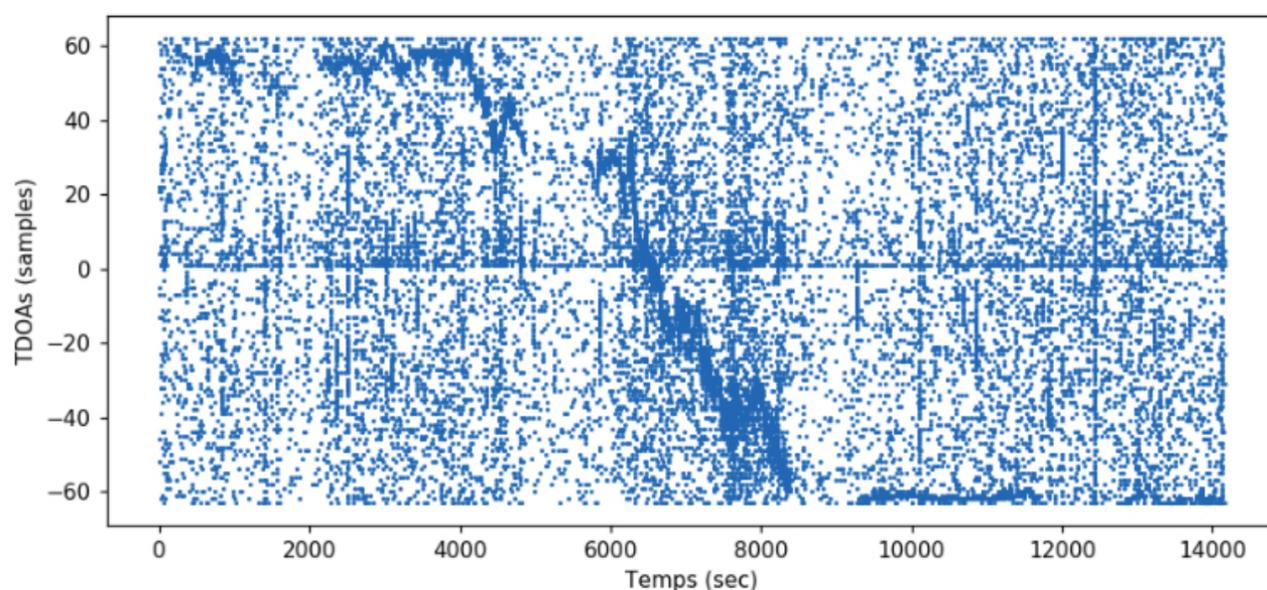


FIGURE 8 – Affichage d’une piste en TDOAs d’un cachalot le 25 Décembre 2018 enregistrée par BOMBYX.

6 Résultats

6.1 Détection acoustique du cachalot sur le long terme

Notre analyse des 3 532 heures d’enregistrement de Bombyx distribuées sur quatre années du 2015-05-30 au 2018-12-26 a révélé les occurrences des cachalots. Au total, 226 passages de cachalots

ont été répertoriés. La Figure 9 présente le nombre d'individus détectés par jour pendant ces 4 années d'enregistrement. Les régions blanches indiquent les temps sans enregistrement (maintenance de Bombyx, perfectionnement). Les cachalots ont été trouvés toute l'année. Leur répartition en temps ne montre pas de cycle saisonnier particulier. Certaines périodes ont été plus visitées que d'autres, par exemple, décembre 2016 et janvier 2017. Le nombre d'animaux par passage variait de 1 à 9 individus.

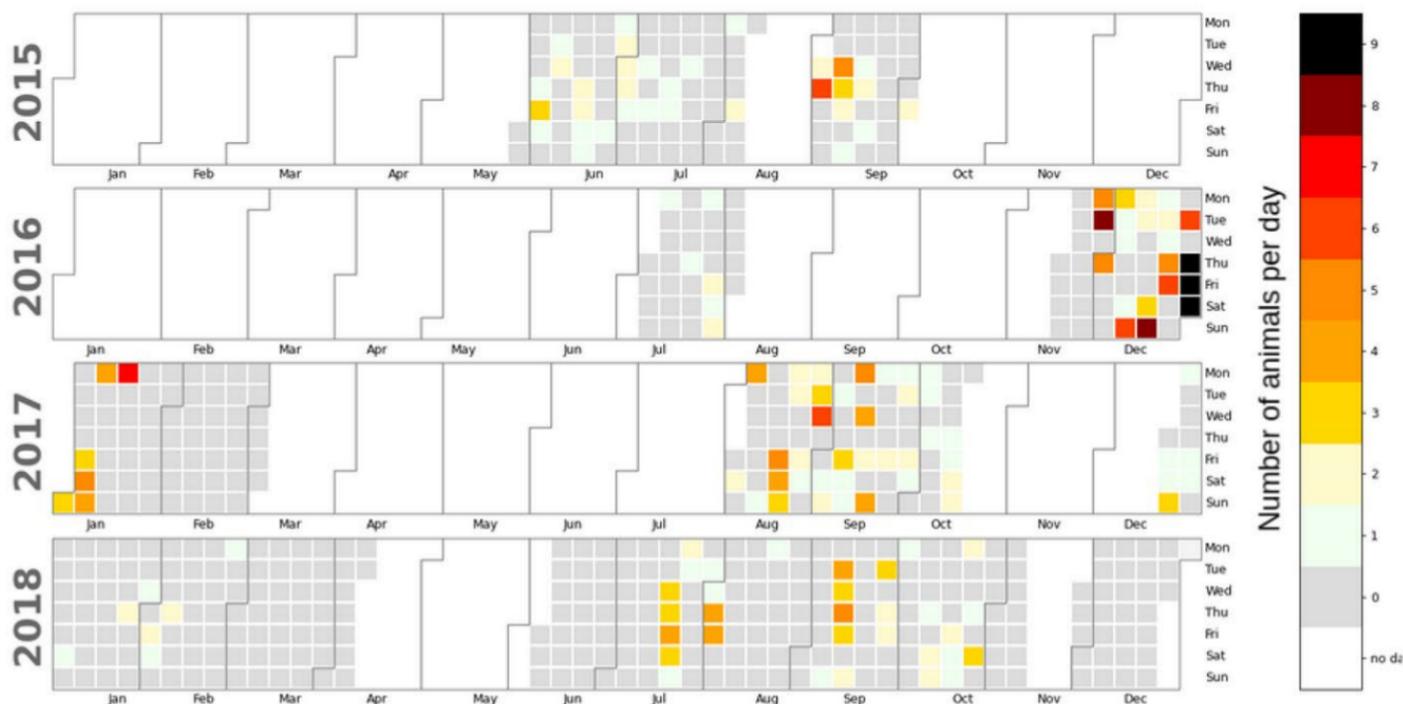


FIGURE 9 – Effort des enregistrements de la bouée BOMBYX (cases blanche) et le nombre de cachalot détectés sur la bouée (de 0=gris à 9=noire), d'après (36).

6.2 Influence de l'anthropophonie sur le cachalot

Les bruits anthropiques (produits par l'humain, l'anthropophonie), influencent négativement les mammifères marins en affectant leur abondance, leur comportement, et de nombreux processus importants pour leur bien-être (orientation, reproduction, communication) (6; 5). Cette influence dépend de plusieurs caractéristiques acoustiques, notamment l'intensité, la bande passante ou la

durée de l'exposition. Dans cette étude, nous avons comparé l'évolution du niveau de pression acoustique en fonction de la présence/absence de cachalots.

Les résultats ont montré une différence significative entre les amplitudes lors de la présence/absence des cachalots (Mann-Whitney test, $p\text{-value}=0.0008 < 0.05$), pour toutes les octaves sauf 6400 Hz et 12800 Hz ($p\text{-value}$ 0,182 et 0,230). La Figure 10 montre la distributions des amplitudes mesurées pour les périodes avec et sans cachalots pour l'octave 12800 Hz (cette fréquence était choisie car elle se situe approximativement au centre des émissions acoustiques du cachalot). Ces résultats montrent que lorsque les cachalots sont présents, le niveau sonore est plus faible. Ou en d'autres termes, les cachalots sont statistiquement moins présents dans les plages horaires plus bruyantes. Cet effet est montré dans la Fig. 10, où, entre les deux pics de bruits (courbe bleu) entre 4 heures et 21 heures, la présence de cachalots est la plus faible (36).

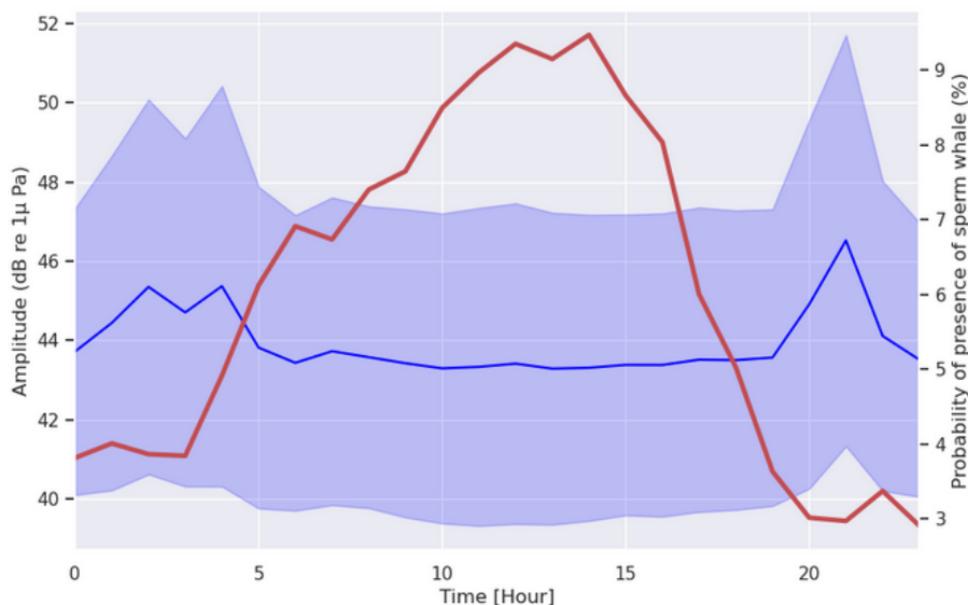


FIGURE 10 – Superposition des moyennes du bruit ambiant pour l'octave 12800Hz et des probabilités de présence des cachalots sur la bouée BOMBYX.

7 Conclusion

Les résultats obtenus sur les 3532 heures d'enregistrements forment la première étude long terme par un seul observatoire de la présence de cachalots sur la côte méditerranéenne française dans le sanctuaire Pelagos. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication dans la Revue Scientific Report (36). La stéréophonie de la bouée nous a permis de calculer les TDoAs (délais d'arrivée du signal), permettant une annotation efficace des données à long terme pour déterminer la présence/absence ainsi que pour l'estimation du nombre d'individus.

La population de cachalots méditerranéens n'avait pas fait l'objet d'étude à très large échelle géographique, tandis que d'autres populations ont été suivies sur une longue période comme (16) (4 mois), (42) (42 jours), (3) (4 mois sur 7 ans), (9) (9 mois), (26) (15 années cumulées d'enregistrements). À notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude sur le cachalot est menée sur une si longue période temporelle en mer Méditerranée.

Le calendrier Figure 9 montre qu'il n'y a pas de cycle saisonnier pour la présence de cachalots dans cette zone. Cette espèce sera présente toute l'année. Les mois de février (2017-2018) sont assez pauvres en termes de présence. (22) avaient déjà analysé sur une base mensuelle, l'abondance relative des cachalots dans la mer Ligure, révélant des occurrences toute l'année, des pics pendant les mois de septembre et octobre, et des groupes sociaux plus importants pendant l'hiver. Dans notre étude, en cohérence avec ce dernier, l'observation la plus dense de cachalots (jusqu'à 9 individus par jour), a eu lieu durant les mois de décembre 2016 à janvier 2017. Les écarts de fréquentation dans les périodes entre décembre 2016, 2017 et 2018 pourraient s'expliquer par la variations du courant Liguro-Provençal. Ce dernier circule du golfe de Gênes aux Baléares, en passant par les Iles d'Hyères jusqu'au Golfe du Lion. Ce courant d'Est augmente en hiver (vitesse supérieure à 0.8 ms⁻¹), et est plus faible en été (inférieure à 0.5 ms⁻¹). Lorsque le courant est fort en hiver, il peut générer des méandres, créant potentiellement des zones de matière organiques et des accumulations.

Le schéma journalier des niveaux sonores mesurés montre une augmentation de 3dB de bruit aux alentours de 3h et 21h, synchrone avec les passages des ferries reliant la Corse au continent. Cela confirme les études précédentes sur le niveau élevé de bruit anthropique en mer Méditerranée (1; 39; 32), en particulier près de la côte (8). La Figure 10 montre un schéma inverse clair entre les

niveaux de bruit et la présence de cachalots, en cohérence avec d'autres études concernant l'impact des ferries sur les espèces de cétacés (14; 33; 4). Nous suggérons que ces animaux pourraient venir chasser volontairement dans cette zone à des moments où aucun ferry n'est à proximité, afin d'éviter le masquage acoustique et d'augmenter leur portée d'écholocation (36).

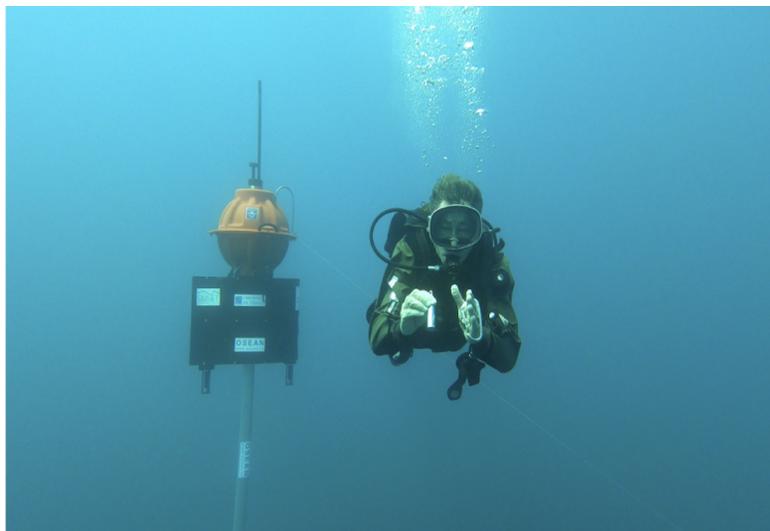
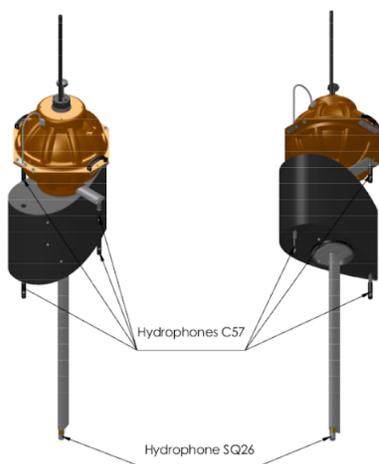
Comprendre l'évolution de cette espèce au fil des années et sa réaction aux bruits anthropiques permettra une nouvelle mesure de gestion à mettre en œuvre sur les côtes. Compte tenu du nombre important de détections tout au long de l'année dans la zone, nous considérons que la population de cachalot est probablement résidente. Des relevés visuels pourraient confirmer cette hypothèse. Avec l'évitement des ferries par les cachalots, des mesures concrètes pourraient être envisagées pour réduire la pression anthropique, comme la réduction des vitesses des bateaux ou le décalage des routes de ferries au large pour éviter les zones de canyons sous-marins qui sont primordiales pour les cachalots.

8 Perspectives

Le projet Bombyx a pu donner lieu à une suite avec le programme Européen FEDER GIAS 2018-2022. L'équipe DYNI a alors conçu une version deux de Bombyx, pour qu'elle soit en mesure de calculer automatiquement les détections des deux espèces de la mégafaune (cachalot et rorqual commun), leur position dans un rayon de 30 km, et d'émettre les alertes à la préfecture pour éviter leurs collisions avec le trafic maritime. Cette bouée est présentée dans (39) et dans les travaux de thèse de Paul Best, et schématisée Fig. 11.

Bombyx2 sera opérationnelle en été 2022 et prendra le relais de la veille acoustique de BOMBYX1.

BOMBYX 2 : pentaphonic with surface real-time alert transmission



GIAS MARITTIMO Glotin et al 2018-2021, coll OSEAN, SMIoT

19

FIGURE 11 – La Bouée BOMBYX2, conçue par l'équipe DYNi, SMIoT et OSEAN, est la suite de BOMBYX1. Elle est équipée de 5 hydrophones qui permettent un suivi 3D des cachalots et des rorquals notamment, et d'un ballast pour sa remontée automatique en surface pour émettre le rapport de ses détections et calculs embarqués d'intelligence artificielle. Cette émission du rapport d'alerte en temps-réel à la préfecture et REPCET est une révolution pour la protection de la biodiversité, et permet, jour et nuit, une meilleure gestion du risque de collision entre la mégafaune (cachalots et rorquals) et le trafic maritime. BOMBYX2 a une autonomie d'environ 9 mois et a été conçue pour être de faible coût, robuste et versatile.

9 Remerciements

Nous remercions La fondation Engie pour son soutien au programme BOMBYX. Ces recherches sont également soutenues par l'Institut Universitaire de France, TPM, CG83, la Région PACA, le PNPC et Pelagos, et les programmes ANR ADSIL (ANR-20-CHIA-0014-01 national Chair in Artificial Intelligence for Bioacoustics) et SMILES ANR-18-CE40-0014.

Références

- [1] Nationail oceanic and atmospheric administration. <https://www.fisheries.noaa.gov/species/sperm-whale>, January 2011. Last checked on Nov 01, 2019.
- [2] ABEILLE, R., DOH, Y., GIRAUDET, P., GLOTIN, H., PREVOT, J.-M., AND RABOUY, C. Estimation robuste par acoustique passive de l'intervalle-inter-pulse des clics de physeter macrocephalus : méthode et application sur le parc national de port-cros. *Journal of the Scientific Reports of Port-Cros National Park* 28 (2014).
- [3] ACKLEH, A. S., IOUP, G. E., IOUP, J. W., MA, B., NEWCOMB, J. J., PAL, N., SIDOROVSKAIA, N. A., AND TIEMANN, C. Assessing the deepwater horizon oil spill impact on marine mammal population through acoustics : endangered sperm whales. *The Journal of the Acoustical Society of America* 131, 3 (2012), 2306–2314.
- [4] ANDRÉ, M., CABALLÉ, A., VAN DER SCHAAR, M., SOLSONA, A., HOUÉGNIGAN, L., ZAUGG, S., SÁNCHEZ, A., CASTELL, J., SOLÉ, M., VILA, F., ET AL. Sperm whale long-range echolocation sounds revealed by ANTARES, a deep-sea neutrino telescope. *Scientific reports* 7, 1 (2017), 1–12.
- [5] BASSILA, R., BERTET, T., SOMAGLINO, L., BOUHIER, M.-E., GLOTIN, H., BEST, P., BARON, V., NOEL, C., CRISTINI, P., FAYET, F., ET AL. Abysound, an end to end system for noise impact measurement of deep sea mining production tools. In *OCEANS 2019-Marseille* (2019), IEEE, pp. 1–9.
- [6] BEST, P., FERRARI, M., GLOTIN, H., AND POUPARD, M. Impact of anthropogenic sounds on marine mammals, monitoring techniques and application to the abysound project. research report université de toulon-lis rr2019, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03211896/document>.
- [7] BEST, P., MARXER, R., PARIS, S., AND GLOTIN, H. Temporal evolution of the mediterranean fin whale song. *[In Review] Scientific reports* (2021).

-
- [8] BUSCAINO, G., CERAULO, M., PIERETTI, N., CORRIAS, V., FARINA, A., FILICIOTTO, F., MACCARRONE, V., GRAMMAUTA, R., CARUSO, F., GIUSEPPE, A., ET AL. Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. *Scientific reports* 6, 1 (2016), 1–13.
- [9] CARUSO, F., SCIACCA, V., BELLIA, G., DE DOMENICO, E., LAROSA, G., PAPALE, E., PELLEGRINO, C., PULVIRENTI, S., RICCOBENE, G., SIMEONE, F., ET AL. Size distribution of sperm whales acoustically identified during long term deep-sea monitoring in the ionian sea. *PLoS One* 10, 12 (2015), e0144503.
- [10] DAVID, L., ALLEAUME, S., AND GUINET, C. Evaluation of the potential of collision between fin whales and maritime traffic in the north-western mediterranean sea in summer, and mitigation solutions. *Journal of Marine Animals and Their Ecology Vol 4*, 1 (2011).
- [11] DUDLEY, P. Ii. an essay upon the natural history of whales, with a particular account of the ambergris found in the sperma ceti whale. in a letter to the publisher, from the honourable paul dudley, esq; fr s. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 33, 387 (1724), 256–269.
- [12] FARCAS, A., THOMPSON, P. M., AND MERCHANT, N. D. Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 57 (2016), 114–122.
- [13] GANNIER, A., AND MARTY, G. Sperm whales ability to avoid approaching vessels is affected by sound reception in stratified waters. *Marine Pollution Bulletin* 95, 1 (2015), 283–288.
- [14] GERVAISE, C., SIMARD, Y., ROY, N., KINDA, B., AND MENARD, N. Shipping noise in whale habitat : Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St. Lawrence Marine Park hub. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132, 1 (2012), 76–89.
- [15] GLOTIN, H., GIRAUDET, P., RICARD, J., MALIGE, F., PATRIS, F., ROGER, V., PRÉVOT, J., POUPARD, M., PHILIPPE, O., AND COSENTINO, P. Vamos - visées aériennes de mammifères marins jointes aux observations acoustiques sous-marines de BOMBYX et ANTARES : nouveaux modèles en suivis du *Physeter macrocephalus* et autres cétacés, 2017.
-

- [16] GORDON, J., MATTHEWS, J., PANIGADA, S., GANNIER, A., BORSANI, J., AND DI SCIARA, G. N. Distribution and relative abundance of striped dolphins, and distribution of sperm whales in the Ligurian sea cetacean sanctuary : results from a collaboration using acoustic monitoring techniques. *Journal of Cetacean Research and Management* 2, 1 (2000), 27–36.
- [17] GORDON, J., AND MOSCROP, A. Underwater noise pollution and its significance for whales and dolphins. *The conservation of whales and dolphins : science and practice. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom* (1996), 281–319.
- [18] JAQUET, N., DAWSON, S., AND SLOOTEN, E. Seasonal distribution and diving behaviour of male sperm whales off kaikoura : foraging implications. *Canadian Journal of Zoology* 78, 3 (2000), 407–419.
- [19] KANDIA, V., AND STYLIANOU, Y. Detection of sperm whale clicks based on the teager–kaiser energy operator. *Applied Acoustics* 67, 11-12 (2006), 1144–1163.
- [20] KRAUS, S. D., BROWN, M. W., CASWELL, H., CLARK, C. W., FUJIWARA, M., HAMILTON, P. K., KENNEY, R. D., KNOWLTON, A. R., LANDRY, S., MAYO, C. A., ET AL. North atlantic right whales in crisis. *Science* 309, 5734 (2005), 561–562.
- [21] LAIST, D. W., KNOWLTON, A. R., MEAD, J. G., COLLET, A. S., AND PODESTA, M. Collisions between ships and whales. *Marine Mammal Science* 17, 1 (2001), 35–75.
- [22] LARAN, S., AND DROUOT-DULAU, V. Seasonal variation of striped dolphins, fin-and sperm whales’ abundance in the Ligurian sea (Mediterranean sea). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 87, 1 (2007), 345–352.
- [23] MADSEN, P., MØHL, B., NIELSEN, B., AND WAHLBERG, M. Male sperm whale behaviour during exposures to distant seismic survey pulses. *Aquatic mammals* 28, 3 (2002), 231–240.
- [24] MATE, B. R., STAFFORD, K. M., AND LJUNGBLAD, D. K. A change in sperm whale (physeter macrocephalus) distribution correlated to seismic surveys in the gulf of mexico. *The Journal of the Acoustical Society of America* 96, 5 (1994), 3268–3269.

- [25] MERCHANT, N. D., FAULKNER, R. C., AND MARTINEZ, R. Marine noise budgets in practice. *Conservation Letters* 11, 3 (2018), e12420.
- [26] MERKENS, K. P., SIMONIS, A. E., AND OLESON, E. M. Geographic and temporal patterns in the acoustic detection of sperm whales *Physeter macrocephalus* in the central and western North Pacific Ocean. *Endangered Species Research* 39 (2019), 115–133.
- [27] NOAA FISHERIES. National oceanic and atmospheric administration. <https://www.fisheries.noaa.gov/species/sperm-whale>, January 2011. Last checked on Nov 01, 2019.
- [28] NORRIS, K. S., AND HARVEY, G. W. A theory for the function of the spermaceti organ of the sperm whale. *Animal orientation and navigation* (1972), 393–417.
- [29] NOTARBARTOLO-DI SCIARA, G., AGARDY, T., HYRENBACH, D., SCOVAZZI, T., AND VAN KLAVEREN, P. The pelagos sanctuary for mediterranean marine mammals. *Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems* 18, 4 (2008), 367–391.
- [30] O’SHEA, T. J. Environmental contaminants and marine mammals. *Biology of marine mammals* (1999), 485–563.
- [31] PANIGADA, S., PESANTE, G., ZANARDELLI, M., CAPOULADE, F., GANNIER, A., AND WEINRICH, M. T. Mediterranean fin whales at risk from fatal ship strikes. *Marine Pollution Bulletin* 52, 10 (2006), 1287–1298.
- [32] PIERETTI, N., MARTIRE, M. L., CORINALDESI, C., MUSCO, L., DELL’ANNO, A., AND DANOVARO, R. Anthropogenic noise and biological sounds in a heavily industrialized coastal area (gulf of naples, Mediterranean sea). *Marine Environmental Research* 159 (2020), 105002.
- [33] PINE, M. K., JEFFS, A. G., WANG, D., AND RADFORD, C. A. The potential for vessel noise to mask biologically important sounds within ecologically significant embayments. *Ocean & Coastal Management* 127 (2016), 63–73.
- [34] PIROTTA, E., CARPINELLI, E., FRANTZIS, A., GAUFFIER, P., LANFREDI, C., AND PACE, D.S.AND RENDELL, L. *Physeter macrocephalus* (mediterranean subpopulation).

-
- the iucn red list of threatened species. *The IUCN Red List, e.T16370739A50285671*. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-3.RLTS.T16370739A50285671.en> (2021).
- [35] POUPARD, M. *Contributions en méthodes bioacoustiques multiéchelles : spécifiques, populationnelles, individuelles et comportementales*. PhD thesis, Toulon, 2020.
- [36] POUPARD, M., FERRARI, M., BEST, P., AND GLOTIN, H. Passive acoustic monitoring of sperm whales and anthropogenic noise using stereophonic recordings in the mediterranean sea, north west pelagos sanctuary. *Scientific reports* 12, 1 (2022), 1–13.
- [37] PUKELSHEIM, F. The three sigma rule. *The American Statistician* 48, 2 (1994), 88–91.
- [38] ROLLAND, R. M., PARKS, S. E., HUNT, K. E., CASTELLOTE, M., CORKERON, P. J., NOWACEK, D. P., WASSER, S. K., AND KRAUS, S. D. Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences* 279, 1737 (2012), 2363–2368.
- [39] SCHNEIDER, F., AND GLOTIN, H. Développement des activités maritimes et protection de la faune marine - Chapitre BOMBYX Nollet et Glotin, year = 2022, url = <https://www.leslibraires.fr/livre/20104877-le-bruit-en-mer-developpement-des-activites-mar-frederic-schneider-herve-glotin-qua>.
- [40] TØNNESEN, J. N., AND JOHNSEN, A. O. *The history of modern whaling*. Univ of California Press, 1982.
- [41] VIALE, D., VERNEAU, N., AND TISON, Y. Stomach obstruction in a sperm whale beached on the lavezzi islands : Macropollution in the mediterranean. *Journal de recherche oceanographique. Paris* 16, 3 (1992), 100–102.
- [42] WARD, J. A., THOMAS, L., JARVIS, S., DIMARZIO, N., MORETTI, D., MARQUES, T. A., DUNN, C., C LARIDGE, D., HARTVIG, E., AND TYACK, P. Passive acoustic density estimation of sperm whales in the tongue of the ocean, Bahamas. *Marine Mammal Science* 28, 4 (2012), E444–E455.

-
- [43] WATWOOD, S. L., MILLER, P. J., JOHNSON, M., MADSEN, P. T., AND TYACK, P. L. Deep-diving foraging behaviour of sperm whales (*physeter macrocephalus*). *Journal of Animal Ecology* 75, 3 (2006), 814–825.
- [44] WHITEHEAD, H. Estimates of the current global population size and historical trajectory for sperm whales. *Marine Ecology Progress Series* 242 (2002), 295–304.
- [45] WHITEHEAD, H. *Sperm whales : social evolution in the ocean*. University of Chicago press, 2003.