

Programme de recherche triennal Pelagos 2021 - 2024

DYNI LIS CNRS

& Parc national de Port-Cros

au titre de l'animateur de la Partie française du

Sanctuaire Pelagos



**« Bilan d'une décennie d'observations de grands cétacés
en milieu anthropisé Nord Pelagos:
BOMBYX-1&2, Km3Env et antennes mobiles JASON»**



Hervé Glotin, Stéphane Chavin, Justine Girardet, Pascale Giraudet, Paul Best,
Maxence Ferrari, Véronique Sarano, François Sarano, Pierre Mahé,
Julie Patris, Valentin Barchasz, Valentin Gies, Fabien de Varenne, Sébastien Paris

CIAN & DYNI
Laboratoire d'Informatique et Systèmes
LIS – UMR 7020
Domaine Universitaire de Saint-Jérôme
Avenue Escadrille Normandie-Niemen
13397 MARSEILLE CEDEX 20
Tél : 04 94 14 28 24

Parc national de Port-Cros
181 allée du Castel Sainte-Claire
BP 70220
83406 HYÈRES CEDEX
Tél : 04 94 12 82 30
Fax : 04 94 12 82 31
accueil.pnpc@portcros-parcnational.fr

Contrat de partenariat

Service utilisateur :
Parc national de Port-Cros

Contrat n° :10/2021

Imputation budgétaire :
Service Connaissance
pour la gestion de la biodiversité
617 PC
Opération : MIN19PELAGOSETUDES
COP : 2-2
Financement MTE

Date du contrat : 2021

Date de notification : déc. 2023

Titulaire :
Pr H. Glotin & Dyni team
Laboratoire d'Informatique et Systèmes
Domaine Universitaire de Saint-Jérôme
Avenue Escadrille Normandie-Niemen
13397 MARSEILLE CEDEX 20
Tél : 04 94 14 28 24

Titre de l'étude :
“ Bilan d'une décennie d'observations de grands cétacés en milieu anthropisé Nord Pelagos: BOMBYX-1&2, Km3Env et antennes mobiles JASON ”

Couverture : (Gauche) *Les cachalots Farouche et Nada plongeant (et chassant) en phase, le 1er octobre 2023 dans Pelagos Nord non loin du passage des ferries (Fig. 9.7), (Droite) Trace d'hélice sur l'individu 'Survivor' dans Pelagos Nord, 2023 (crédit F. Sarano / Longitude 181).*

Table des matières

Remerciements.....	5
Acronymes / Glossaire.....	7
1.Introduction.....	9
Observatoires de l'étude.....	10
Objectifs.....	10
PARTIE I : MATERIEL et METHODE.....	14
2. Stations filaires.....	14
Stations sur Stochaedes.....	14
Station KM3Env.....	16
3. Suivi par antennes mobiles.....	17
Parabole mobile.....	17
Antenne mobile tétraédrique larguée.....	18
Antenne mobile pentaédrique de surface.....	18
4. Suivi par bouée acoustique.....	19
Bouée stéréo BOMBYX-1.....	19
Bouée pentaphonique BOMBYX-2.....	20
5. IA pour la détection automatique de cétacés.....	22
6. Estimation de positions des sources.....	24
Angles d'arrivée, azimuth et élévation.....	24
Estimation du rayon de détection du cachalot.....	25
Estimation de position du rorqual.....	29
7. Estimation des niveaux dB.....	30
PARTIE II : RÉSULTATS sur les CACHALOTS.....	32
8. Bilan des détections: calendrier de 2015 à 2023.....	32
9. Suivi par antenne mobile des cachalots en zone anthropisée Nord-Est Iles d'Or.....	34
Suivi depuis antenne mobile sur bateau.....	34
Pistage par BOMBYX-2.....	40
10. Séparation des sources et suivi de taille par IPI.....	42
Estimation de l'âge en fonction de l'IPI.....	46
Evolution de la taille des cachalots sur 10 ans.....	47
11. Ethoacoustique des cachalots et rythme nyctéméral.....	49
12. Autres détections d'odontocètes dans Stochaedes.....	55
PARTIE III : RESULTATS sur les RORQUALS.....	61
13. Bilan des détections : calendrier 2009-2023.....	61
14. Défilements de rorquals.....	63
15. Trajectoires 2D de rorquals Sud Iles d'Or.....	64

PARTIE IV : PAYSAGES ACOUSTIQUES.....	66
16. Anthropophonie autour des Iles d’Or.....	66
17. Paysage acoustique dans Stochaedes.....	70
18. Anthropophonie sur BOMBYX-2 Sud Monaco.....	73
PARTIE V : DISCUSSION et CONCLUSION.....	77
19. Bilan des détections de cachalots en zone anthropisée.....	77
Importances des observations mobiles.....	77
20. Bilan des détections de rorquals.....	79
Renforcement par apprentissage IA de la fonction d’alerte anti-collision.....	79
21. Vers le système d’alerte anticollision BOMBYX.....	80
Possibles déploiements du réseau BOMBYX.....	80
Elaboration d’une alerte automatique de risque de collision.....	82
22. Vers un modèle éthoacoustique de la dynamique de nage de la mégafaune en fonction du trafic.....	84
23. Conclusion générale.....	87
BIBLIOGRAPHIE.....	89
Présentations / Communications durant le projet.....	92
ANNEXE.....	94
A1. Sensibilité des hydrophones SQ26 et C57.....	95
A2. Estimation dB absolus.....	96
A3. Suivis compilés des cachalots enregistrés depuis bateau WW-4.....	97
A4. Suivis journaliers des cachalots pendant WW-4.....	98
A5. IPI par les antennes mobiles Tétra et Penta à WW-4 de 2023/09/23 à 2023/10/07.....	107
A6. IPI sur Baguera WW-4 du 2023/09/23 au 2023/10/07.....	113
A7. Données brutes de détection de cachalots sur WhaleWay-4.....	122
A8. Cycle de plongée des individus lors de la mission WhaleWay-4.....	123
A9. Niveau dB Max sur KM3Env.....	124
A10. Effets dB de l’activité récifale sur les stations Stochaedes.....	126
A11. IPI des autres missions 2022 2023.....	127
A12. Exemple de fiche d’identité de cachalot durant mission WhaleWay.....	135
A13. Etude expérimentale des émissions de JetSki.....	137
A14. Autres données en format Géonature.....	137

Remerciements

Nous remercions PELAGOS pour avoir financé cette étude et pour le soutien scientifique de l'équipe de A. Barcelo.

Nous remercions Longitude 181 ainsi que les sponsors Maison Francis Kurkdjian et Explore pour leurs soutiens dans les missions WhaleWay.

Ce programme de recherche est soutenu par la Chaire IA de H. Glotin, ADSIL cofinancée par DGA Innovation et l'ANR, qui finança notamment les postdoctorats de P. Best et M. Ferrari. Nous remercions l'ANR également pour le financement du projet ULPCochlea et du projet SMILES qui ont en partie soutenu cette étude.

Nous remercions TPM et la Région Sud pour le financement de la thèse de P. Best sur le suivi des rorquals et l'anthropophonie. Nous remercions la Fondation Engie pour son soutien sur l'étude de l'impact anthropophonique sur rorqual et cachalot. Nous remercions la PME Biosong qui a cofinancé avec UTLN la thèse de M. Poupard dont certains travaux sont repris dans ce rapport. Nous remercions la DGA qui a cofinancé la thèse de Maxence Ferrari.

Merci à l'Institut Universitaire de France (IUF) pour sa Chaire analyse de scène acoustique Glotin 2011-2016 relative aux mesures et méthodes BOMBYX-1, et l'APRI de l'université de Toulon pour le financement de BOMBYX-1.

Merci à Olivier Philippe et son équipe OSEAN, F. Hieramante et F. Rocca pour leur collaboration sur BOMBYX-2, ainsi que M. Rougier, le MIO et les plongeurs de PMS pour leurs collaborations à BOMBYX-1.

Nous remercions le programme FEDER GIAS MARITIMO pour le financement de BOMBYX-2.

Nous remercions le Département de l'Environnement de Monaco pour sa collaboration à l'installation des BOMBYX-2 à Monaco ainsi que ProDive.

Nous remercions les 'Jardins du Rayol' pour leur accueil de notre station Stochaedes 'Rayol'.

Nous remercions l'équipe du PNPC à Port-Cros pour son aide dans la pose de la station de Rascass.

Nous remercions EdM et FPA2 et ACCOBAMS pour le financement de SphyrnaOdyssey.

Nous remercions V. Bertin et P. Coyle du CPPM pour leur collaboration sur ANTARES et KM3Env et maintenant LSPM.

Ce mémoire est dédié à notre très cher ami Gianni Pavan, Professeur à l'université de Pavia, Italie, compère avec qui nous partageons l'ivresse joyeuse de la bioacoustique depuis vingt ans, et dont le chemin se termina tragiquement cette année.

Acronymes / 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, son intensité et le cas échéant sa directivité.

AOT : Autorisation d'Occupation du Territoire pour un observatoire notamment acoustique, délivré par la préfecture.

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.

Baguera : Antenne mobile de Dyni avec QHB et 5 hydrophones en tétraèdre et un 5ième en bout. Elle est fixée en poupe de bateau.

BOMBYX-1 : Bouée Océanographique Multimodale Bioacoustique, version 1, conçue en 2013 par H. Glotin et M. Rougier, projet Chaire IUF en analyse de scène acoustique. Elle est étai fixe, posée en 2014, en fonction de 2015 à 2018 entre les Îles d'Or, stéréophonique, équipée d'ADCP et d'une caméra. On la notera aussi BOMBYX-1.

BOMBYX-2 : Seconde version de BOMBYX, pentaphonique, avec IA embarquée et ballast, transmission 4G, en activité depuis 2022 à Monaco. On la notera aussi BOMBYX-2.

BOUSSOLE : Bouée dans le gyre du courant Ligure au large de Nice qui a été le support de notre écoute bioacoustique en 2009.

CIAN : Centre Int. d'Intelligence Artificielle pour l'Acoustique Naturelle, structure initiée par l'Université de Toulon en 2020 pour fédérer et rationaliser instrumentations avancées et versatiles, protocoles, méthodes IA d'analyse de la biodiversité par acoustique passive. CIAN regroupe en 2023 près de 100 partenaires sur 4 continents.

dB : Décibel, unité de mesure d'intensité acoustique. +6 dB correspond à un doublement de l'intensité.

Ethoacoustique : Analyse du comportement animal par l'acoustique, l'analyse des formes de leurs vocalises ou biosonars, néologisme de Glotin H. dans Poupard M. et al. 2018.

IPI : Inter Pulse Interval (milliseconde).

JASON / QHB : Carte son SMIoT UTLN LIS, multicanal haute vélocité (5 x 512 kHz x 24 bits, 210 dB de dynamique).

Km3Env : Observatoire interdisciplinaire, incluant bioacoustique lié au laboratoire d'astrophysique de neutrino au large de Toulon, câblé par 40 km de fibre optique depuis la fosse aux laboratoires. En 2024 il est converti en la plateforme LSPM.

OSEAN : PME basée au Pradet, experte en instrumentation sous-marine.

Penta : Tetra avec un 5^{ème} hydrophone dans le tétraèdre.

PMS : Porquerolle Marine Service, société de plongeurs ayant travaillé sur BOMBYX-1.

ProDive : Société de plongeurs intervenant sur BOMBYX-2.

RSB : Rapport Signal à Bruit, SNR en anglais. $RSB = 10 \cdot \log_{10} (E(\text{signal}) / E(\text{bruit}))$ en dB.

SMIoT : Plateforme technologique de l'UTLN, ayant construit la carte son JASON / QHB, programme lancé en 2015 par le pôle INPS de l'UTLN.

SP1, SP2... : Missions de Sciences Participatives organisées par Longitude181 en 2022, 2023, 2024, équipées d'acoustique passive par UTLN DYNI LIS CNRS, CIAN.

TDoA : Time Delay of Arrival (en milliseconde le plus souvent).

Tetra : Antenne mobile de Dyni conçue avec QHB, à 4 hydrophones disposés aux coins d'un tétraèdre d'arête de 1 m environ.

WW : Mission WhaleWay initiée par Longitude181 en collaboration avec UTLN CNRS DYNI LIS et CIAN, débutée en 2022 par WW-1, actuellement 4 missions effectuées.

1.Introduction

Le Sanctuaire Pelagos est un espace maritime de 87500 km² dédié à la protection des mammifères marins (Fig. 1.1). Il héberge un capital biologique de haute valeur patrimoniale, tant en quantité qu'en qualité, de par la présence régulière de 8 espèces de cétacés, notamment en période estivale. Cet espace est également une plateforme de concertation et d'échanges, il doit permettre aux nombreuses activités humaines déjà présentes de s'y maintenir durablement, le plus harmonieusement possible avec le milieu naturel.

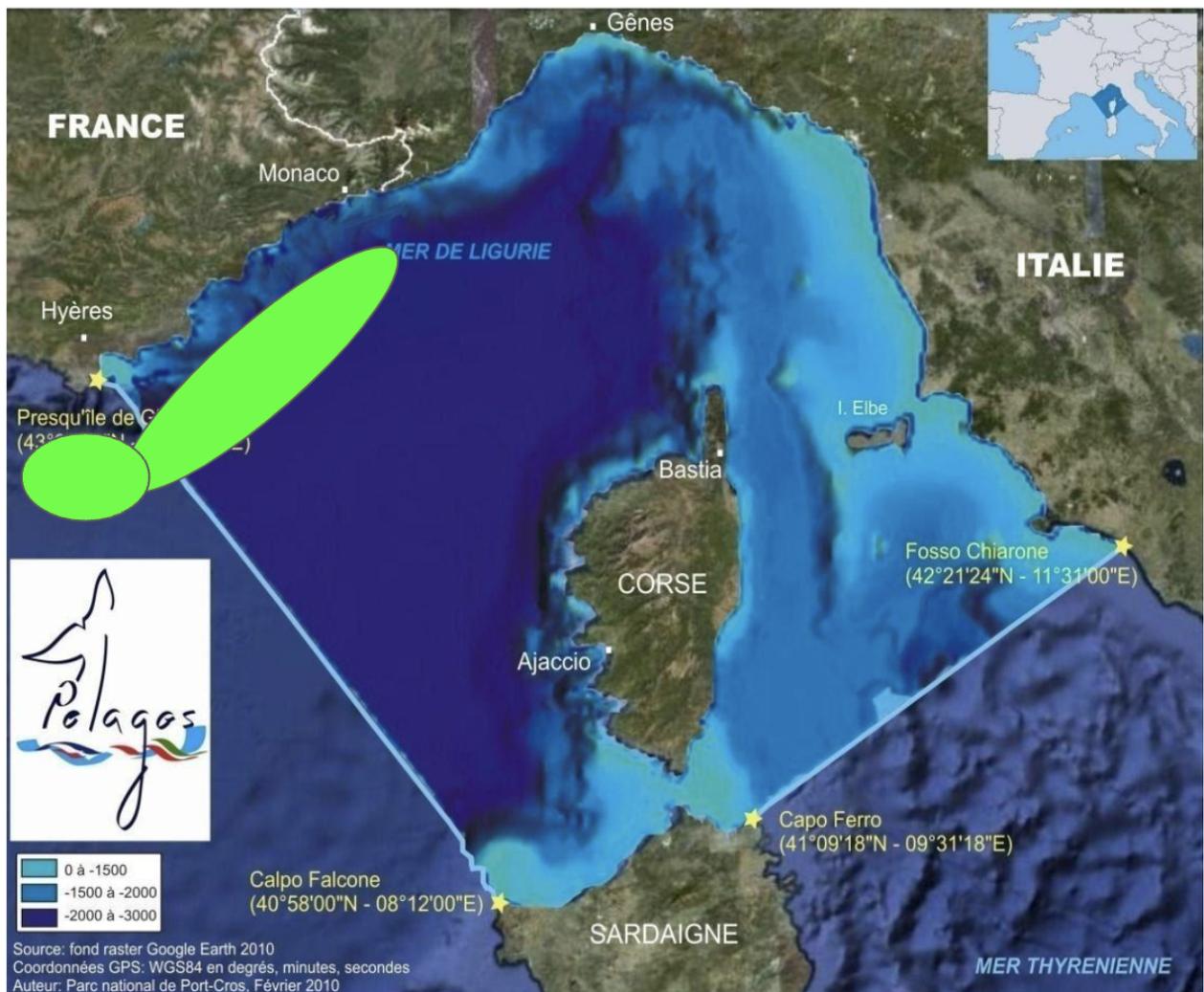


Figure 1.1 : Carte du sanctuaire Pelagos. En vert les zones principales de cette étude.

Le Sanctuaire Pelagos a notamment pour mission de rassembler et de soutenir les différentes équipes de recherche travaillant sur les mammifères marins de Méditerranée. Le suivi scientifique des populations de cétacés, de même que les recherches technologiques pour limiter l'impact des activités humaines, représentent la base nécessaire de la connaissance permettant d'orienter les décisions que prendront les gestionnaires du Sanctuaire.

Dans ce cadre, ce rapport fait la synthèse de l'étude "étho-acoustique", de l'identification acoustique des cétacés et de leurs comportements, notamment en milieu anthropisé, à partir d'un

ensemble d'observatoires positionné autour des îles d'Or et au nord de Pelagos, région PACA/Sud de Toulon à Monaco. Il en résulte une meilleure connaissance des populations de cachalots, rorquals, grands dauphins et globicéphales. Ce projet qui poursuit l'effort de modélisation de leur comportement et de leur présence sur les grands rails de trafic maritime, pourrait permettre de prévenir les risques de collision avec les navires, collisions qui ont également un impact économique mesurable et très conséquent.

Le bilan de la bouée BOMBYX-1 stéréo, au large du PNPC de 2015 à 2018, et la construction des algorithmes embarqués dans la carte QHB SMIoT UTLN durant la thèse de P. Best qui s'est achevée en 2022, a conduit à un observatoire des populations de cétacés. Cet observatoire est une suite logique de notre projet FEDER GIAS MARITTIMO 2019-2021 qui a permis d'élaborer et construire avec OSEAN SA et SMIoT UTLN LIS IM2NP la bouée BOMBYX-2 nouvelle génération, avec 5 hydrophones, permettant l'observation 3D et la transmission 4G des détections des cétacés.

De plus, nous sommes porteurs du projet bioacoustique de l'observatoire KM3EnvENV d'astrophysique qui mesure les signaux sous-marins au large de l'UTLN.

Ce projet repose donc sur 3 observatoires dont nous croiserons les mesures pour une analyse continue et affinée des comportements des cétacés.

Observatoires de l'étude

Les observatoires de ce projet consistent en la station BOMBYX-1 de 2015 à 2018, des drones Sphyrna en 2019 et 2020, de BOMBYX-2 dès 2022 autour de Monaco, de KM3Env en 2020 et 2021, et des antennes mobiles JASON équipant les missions WhaleWay et les missions de sciences participatives réalisées en collaboration avec Longitude 181 en 2022 et 2023.

Les bouées BOMBYX-2 disposent de 5 hydrophones pour le suivi en 3D de la faune, similaires à notre système de drone Sphyrna avec lequel nous avons mis en évidence, pour la première fois, la chasse en meute de cachalots (Glotin et al 2020) et un possible lien de leur présence avec les formes de courants et fronts hydrologiques.

Objectifs

Ce projet répond d'une part aux prérogatives des directives nationales et internationales : mieux connaître l'état du milieu marin et sa fréquentation par la mégafaune. Il apporte également des éléments vis-à-vis de la prérogative de la prévention des collisions entre cétacés et trafic maritime qui impacte une vingtaine de grands cétacés par an, provoque des dégâts coûteux sur les navires, en plus du risque de blessures sévères sur les passagers. Ce projet est aligné avec les objectifs de l'Accord Pelagos, déclinés de nouveau dans son dernier plan de gestion, et le besoin de connaissances sur des pollutions nuisibles à la biodiversité.

L'observatoire et les méthodes développées ciblent des sites de grands risques de collision. L'analyse, temps-réel de KM3Env et embarquée par les bouées BOMBYX-2, leurs synthèses et transmissions en temps-réel sont innovantes. L'approche de l'équipe de recherche du LIS est centrée sur une méthode Intelligence Artificielle qui a pour objectif d'optimiser le système complet sur les espèces en présence dans chaque site. Ce projet se place à l'intersection des communautés Bioacoustique et "Machine Listening / Deep learning", pour le suivi du paysage

acoustique ainsi qu'une meilleure connaissance et protection de la biodiversité. Des retombées dans différents domaines sont visées, notamment :

- théoriques, en posant conjointement la question de la localisation et de la détection acoustique via un observatoire acoustique et des algorithmes embarqués, avec une approche par renforcement/apprentissage, couplée aux conditions marines (trafic maritime, météo marine, courants),
- expérimentales, avec une validation/implémentation concrète du système complet dans le cadre du projet Marittimo GIAS,
- informations apportées aux gestionnaires (PNPC, PELAGOS, CrossMed et in fine REPCET) pour diminuer le risque de collision,
- statistiques de détection et des bruits mesurés sur plusieurs mois qui permettront de compléter, auprès des organismes concernés, les connaissances sur les populations de cétacés, leurs comportements, et de quantifier la pollution acoustique de ces sites,
- diminuer le risque de collision entre cétacés et le trafic maritime et améliorer la sécurité de la navigation par l'installation de systèmes de veille acoustique intelligente et de communication placés en subsurface, à l'instar de notre prototype BOMBYX, aux points stratégiques à fort risque de collision en déterminant des zones de présence privilégiées qui seraient mises en protection forte et dans lesquelles la navigation serait réglementée (diminution de la vitesse en dessous de 10 nœuds).

La zone d'étude commence à la porte NO du sanctuaire, zone de passage obligatoire pour les cétacés du sanctuaire Pélagos, vers Toulon, où ils sont très exposés au risque de collision. Les rorquals et cachalots sont particulièrement sujets aux collisions avec les navires dans le Sanctuaire Pelagos tant le trafic y est intense (Fig. 1.2). Sans que l'on connaisse le nombre précis des cétacés et les zones précises qu'ils fréquentent, de nombreuses études attestent du risque très élevé de collision le long des côtes françaises et italiennes (Ham et al. 2021).

Les alertes envoyées par 4G vers notre serveur LIS sécurisé pourront être déployées à plusieurs fins notamment une application sécurisée sur SIG pour les organismes d'Etat souhaitant l'information et suivant recommandation de PELAGOS. Des formations et la dissémination des résultats du projet dans les clubs nautiques de PACA suivant conseils de PELAGOS, ainsi que des actions de sensibilisation dans les milieux nautiques professionnels pourraient être organisées afin d'alerter et d'accroître la prise de conscience des risques de la navigation auprès d'un public d'utilisateurs qui naviguent à des fins récréatives. L'observatoire et les méthodes développées dans ce projet ciblent le front Toulonnais, de Sicié au canyon des Stoechades, mais aussi des sites de grands risques de collision. Ce projet produira des données utiles à la gestion du risque de collision entre les grands cétacés vulnérables et un trafic maritime en croissance exponentielle.

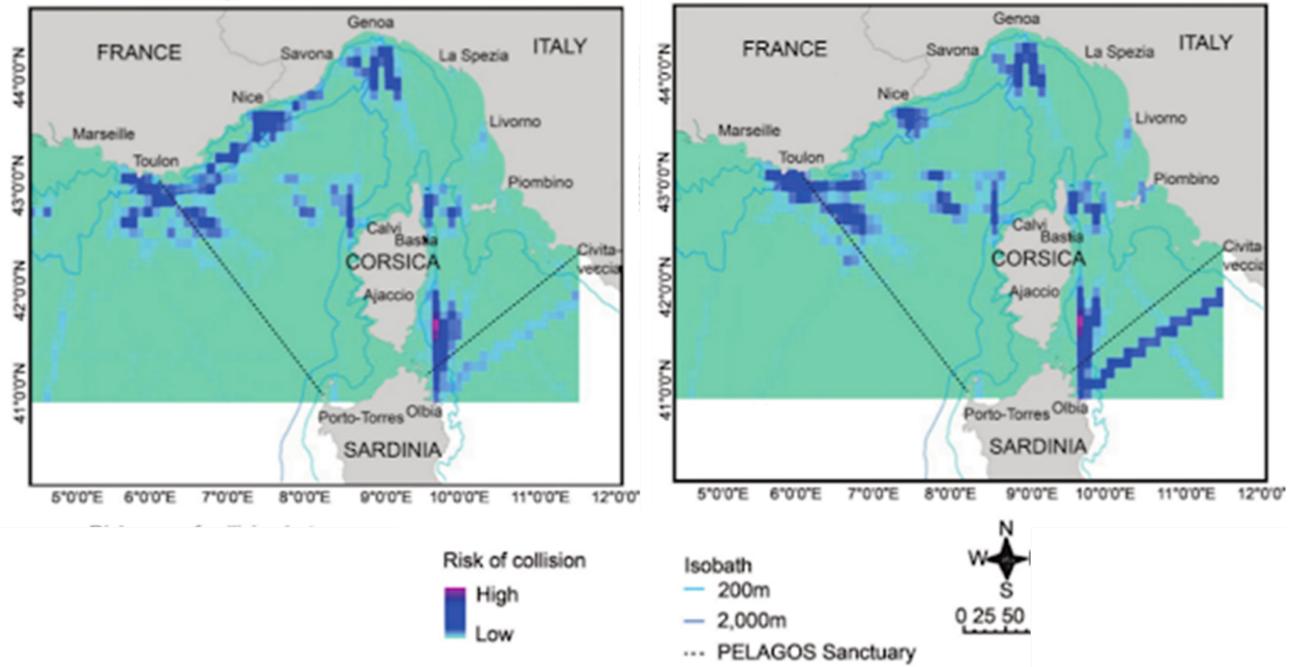


Figure 1.2: Echelle du risque de collision entre trafic maritime et grands cétacés, (Gauche) l'été versus (Droite) l'hiver (Crédit GIS3M).



Figure 1.3 : Exemple de cachalot ayant survécu à une collision, coupe franche par une hélice. Cet individu, nommé Survivor, a été observé et suivi plusieurs jours au cours de WW-4 en automne 2023 (cf Annexe). Sa carte d'identité qui permet son identification et donc sa "recapture" régulière en mer, permet de suivre finement ses déplacements au cours des saisons et des années (crédit F. Sarano / Longitude 181).

Ce rapport présente les stratégies de détection et d'apprentissage en ligne des modèles IA embarquées pour l'estimation des positions des rorquals ou des cachalots, et la décision pour les alertes anti collisions par les bouées BOMBYX-2 et les systèmes embarqués sur les missions WhaleWay notamment. Nous traitons de l'estimation des angles d'arrivée et montrons comment nous estimons la position du cachalot et du rorqual. Une dernière partie concerne les stations filaires. Nous concluons sur les évolutions requises pour affiner les détections, et présentons la carte de suivi des risques de collisions qui inclut l'état de mer et les AIS pour une décision optimale d'alerte.

PARTIE I : MATERIEL et METHODE

2. Stations filaires

Stations sur Stochaedes

Le bilan de BOMBYX-1 bouée stéréo au large du PNPC, de 2015 à fin 2018 est très intéressant en terme de suivi de population de cétacés, notamment cachalots. Afin d'observer plus en détail un milieu très anthropisé (tourisme et pêche), et en présence de plusieurs espèces de cétacés, nous proposons une thèse modélisant les observations des activités de cétacés sur une large zone de la tête du canyon de Stoechades. Nous pourrions y mesurer l'activité des *Tursiops t.*, mais aussi les passages dans Stoechades des cachalots, éventuellement rorquals. Le niveau de pollution anthropophonique, mais aussi simplement la présence et les types de bateaux et leurs parcours, seront corrélés aux déplacements des cétacés sur la zone. Le comportement des cétacés sera modélisé par étho-acoustique, suivant la forme de leurs vocalises et le contexte enregistré, pour caractériser les réponses à la pression anthropique.

Cet observatoire est composé de 2 stations stéréophoniques, une à Rascass, l'autre sur la plage du Rayol et synchronisées pour vues conjointes. Un repérage et des tests ont été réalisés pour déterminer l'emplacement de l'antenne Rayol qui a été installée au fond sur le sable, en dehors de tout herbier de Posidonie (Figs. 2.1-2.3). Les stations ont été posées en juillet 2021 par nageur en PMT avec des rotations régulières, environ 10 sur la durée du projet (autonomie d'un mois). Les AOT sont acquises depuis juillet 2020. Cette installation pourrait localiser les cétacés jusqu'à 4 km de distance, le tombant de la plage du Rayol étant adéquate (continu jusqu'à la tête du canyon).

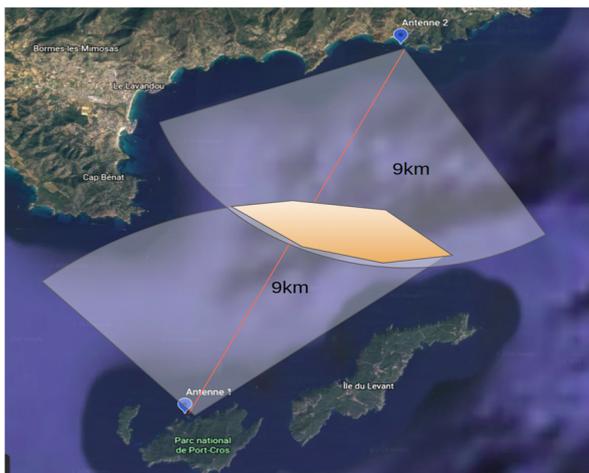


Figure 2.1 : Situation générale du site des deux stations stéréophoniques, de part et d'autre de Stochaedes. (Haut) Rayol, (Bas) Rascass.

Table 2.1: Protocole des stations Stochaedes

	Nbr/types hydro	Date début	Date fin	Freq. échant. (Hz)
Rayol 2021	4=4 SQ26	19/07/2021	11/08/2021	128 000
Rayol 2022	5=1 C75+2 C3+2SQ26	02/03/2022	06/03/2022	128 000
Rascass 2021	4=4 SQ26	19/07/2021	11/08/2021	128 000
Rascass 2022	5=4 SQ26 +1 C75	02/03/2022	06/03/2022	128 000



Figure 2.2 : (Gauche) Antenne posée à Rascass, le 2 mars 2022. (Droite) Pose à Rayol le 4 mars 2022, -4m, orientation $H1H2=206^\circ$.

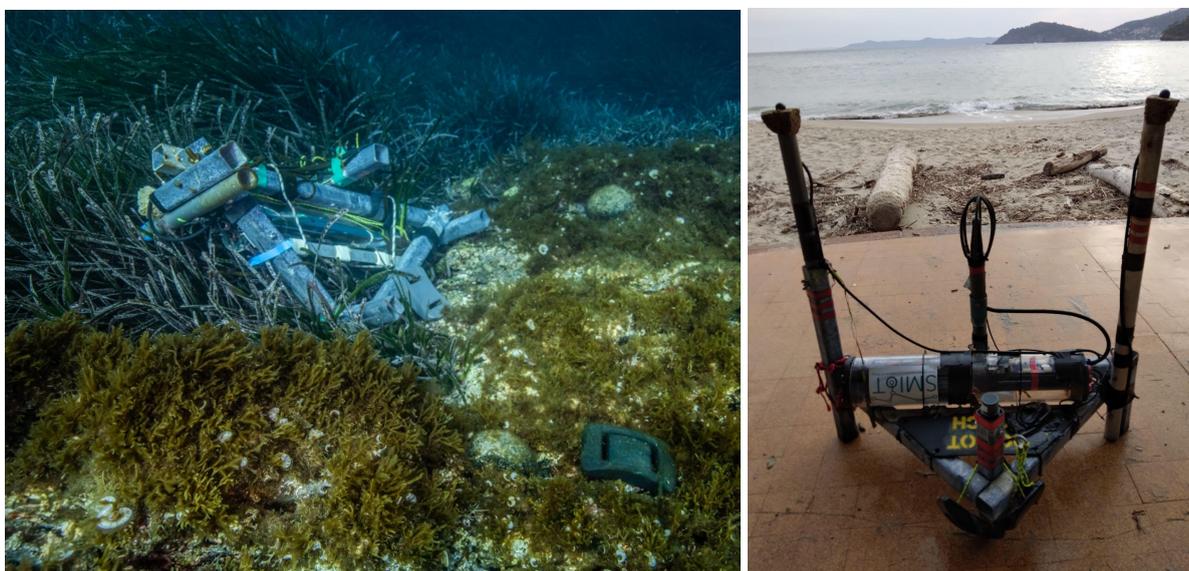


Figure 2.3 : Les antennes de Stochaedes en 2022. Toutes 2 ont été renversées à la dernière pose, suite à un gros temps, ou à une ancre, car nous y avons retrouvé des traces de rouille. (Gauche) Rascass renversée malgré ses 10 kg de masse de plomb. (Droite) Rayol le 26 mars après avoir été renversée.

Station KM3Env

KM3Env était un observatoire interdisciplinaire d'astrophysique et d'environnement, faisant suite à Antares (Glotin et al 2017, rapport VAMOS), dont le laboratoire hôte est le CPPM CNRS AMU. Il est constitué d'une infrastructure sous-marine installée par 2450 m de profondeur, à 40 km au sud de Toulon, avec transmission en temps-réel des données des divers instruments vers les salles de contrôle à terre (La Seyne-sur-Mer). La plateforme KM3Env accueille le détecteur de neutrinos ORCA ainsi que des capteurs environnementaux EMSO. Elle est remplacée en 2024 par la plateforme LSPM.

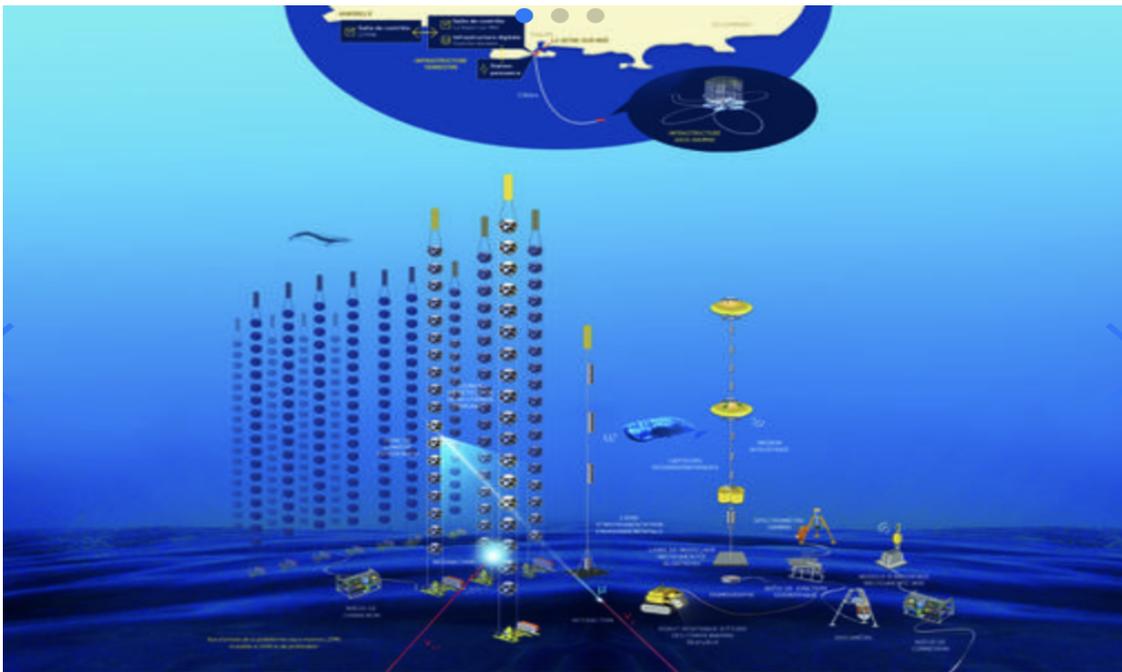


Figure 2.4 : Illustration de KM3Env avec ses colliers de capteurs neutrinos, les hydrophones utilisés dans ce projet étant à leur base. Il est transformé, en 2023, en LSPM (crédit LSPM).

KM3Env a été initié à travers l'infrastructure sous-marine MEUST/NUMerEnv, et accueille le site français de l'expérience internationale KM3EnvNeT. Il représente aussi le site Ligure-Ouest d'EMSO pour des études environnementales menées par la Division Technique de l'Institut National des Sciences de l'Univers DT-INSU du CNRS, l'Ifremer, l'Institut Méditerranéen d'Océanologie MIO, le Laboratoire Informatique et Systèmes LIS (équipe CIAN DYNI UTLN) et Géoazur. Le KM3Env est la deuxième génération d'infrastructure sous-marine, après celle déployée dans le cadre de l'expérience ANTARES.

KM3Env et sa suite LSPM est financé, au travers du projet NEUMED dans le cadre du Contrat de Plan État Région (CPER), par la Délégation Régionale Académique à la Recherche et à l'Innovation (DRARI) Provence Alpes Côte d'Azur, la région Sud, le CNRS au travers de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3), le conseil départemental des Bouches-du-Rhône, la métropole d'Aix-Marseille Provence, la ville de Marseille et TPM.

Les données des hydrophones des lignes KM3Env ont été enregistrées entre mars et mai en 2020 et en 2021. Les données de chaque run sont de 6 heures maximum, à 195 kHz Fe, 16 bits.

Table 2.2 : coordonnées des hydrophones de KM3Env

Ligne	Hydrophone	Latitude	Longitude	Easting	Northing	Profondeur (m)
DU02	808981515	42°48.3735'N	6°01.6539'E	256953	4743584	-2440
DU03	816978571	42°48.3744'N	6°01.6685'E	256974	4743584	idem
DU09	808967761	42°48.3647'N	6°01.6468'E	256941	4743567	idem
DU10	808981528	42°48.3642'N	6°01.6618'E	256965	4743566	idem

3. Suivi par antennes mobiles

Parabole mobile

Une parabole avec un hydrophone centré permet aux missions WhaleWay et LIS de repérer et remonter vers le gisement de sources (Fig. 3.1). Puis c'est en cabine, avec les délais d'arrivée des signaux sur les 5 hydrophones d'une antenne fixée au bateau, que les suivis sont réalisés. Ainsi, le suivi de cachalots a été réalisé en continu pendant plusieurs nuits et jours.



Figure 3.1 : Localisation azimutale par la parabole lors d'une mission WhaleWay par P. Best et R. Jourdain (crédit F. Sarano / Longitude 181).

Antenne mobile tétraédrique larguée

Une antenne tétraédrique composée de 5 hydrophones, avec un tube contenant des batteries et une carte Jason, est immergée à environ 20 m de profondeur et enregistre en continu au moment voulu (Fig. 3.2). Cette immersion permet d'éviter les signaux parasites dus aux réflexions sur la surface, contrairement à l'antenne Baguera qui reste par -2 m environ.



Figure 3.2 : Antenne tétra en immersion par -20 m lors de la mission WhaleWay. Design V. Gies et H. Glotin. Sa version 'penta' intègre un 5ième hydrophone (crédit F. Sarano / Longitude 181).

Antenne mobile pentaédrique de surface

L'enregistreur sous-marin Baguera, spécialement conçu par l'équipe, comporte 5 hydrophones pour une meilleure discrimination en 3D des émissions sonores (Fig. 3.4). Équipée d'une carte Jason, et reliée par câbles à l'ordinateur du bord, elle permet de suivre les enregistrements en direct (Fig. 3.3). Le but étant de suivre les déplacements des cachalots pendant leur chasse dans les profondeurs tout en restant à bonne distance puisque le contact est acoustique durant les sondes à plusieurs centaines de mètres.

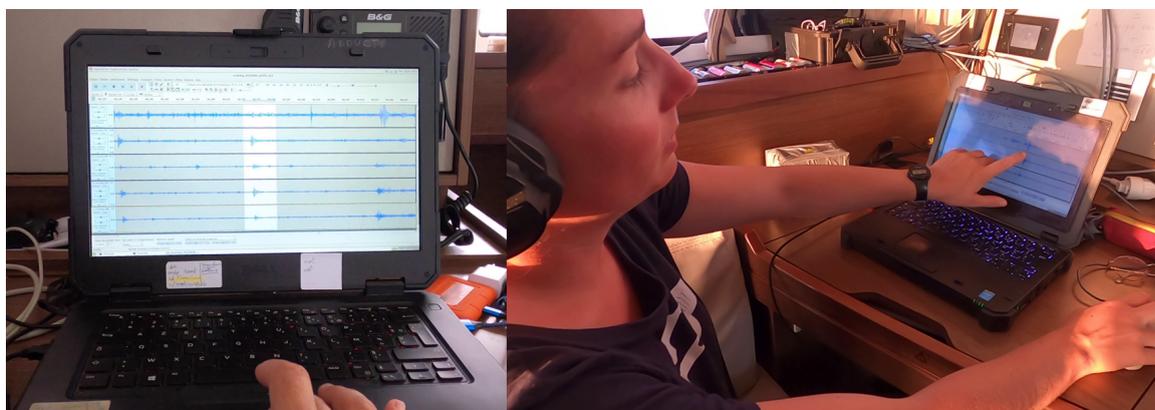


Figure 3.3 : Analyse des enregistrements en temps-réel sur l'ordinateur de bord (crédit F. Sarano / Longitude 181).



Figure 3.4 : (Haut gauche) Installation de l'antenne Baguera. (Haut droit) Mise à l'eau de l'antenne. (Bas) Vues sous-marines de l'antenne en place (crédit F. Sarano / Longitude 181).

4. Suivi par bouée acoustique

Bouée stéréo BOMBYX-1

La première bouée mise en œuvre, BOMBYX-1, a été installée au Sud-Ouest de Port-Cros, en haut d'un tombant de 1500 m afin de maximiser les détections des événements acoustiques au large (Fig. 4.1). La première session d'enregistrement a commencé en mai 2015 et la dernière s'est terminée en décembre 2018. La bouée a été placée à 25 m de profondeur et était équipée de 2 hydrophones, espacés de 1,83 m et enregistrant à 50 kHz (Fig. 4.1). La bouée fait face au Sud. Elle permet de déterminer la direction des individus enregistrés grâce à l'évolution du délai des temps d'arrivée des vocalises. L'orientation de la bouée est relativement stable et son axe prend la direction $230^{\circ}80$. BOMBYX-1 étant totalement immergée à 25 m de profondeur sous la thermocline, l'impact des bruits de surface est réduit. La carte son a été fournie pour ce prototype par OSEAN. L'hydrophone du canal 1 (placé du fait du courant Ligure à l'Est) est un Neptune D140 (jusqu'à 160 kHz) et l'hydrophone du canal 2 (placé à l'Ouest) est un D140, ou un HTI (jusqu'à 80 kHz), selon les sessions, avec respectivement -207 ± 2 versus -206 ± 4 dB re 1V/Pa à 1 m. Le protocole d'enregistrement a changé au cours des années (variant entre l'enregistrement continu et 5 min d'enregistrement suivi de 15 min de pause), et entre l'encodage 24 et 16 bits.

Les sessions d'enregistrement durent jusqu'à 3 mois. Des plongeurs ont été régulièrement envoyés pour changer les batteries et collecter les enregistrements.

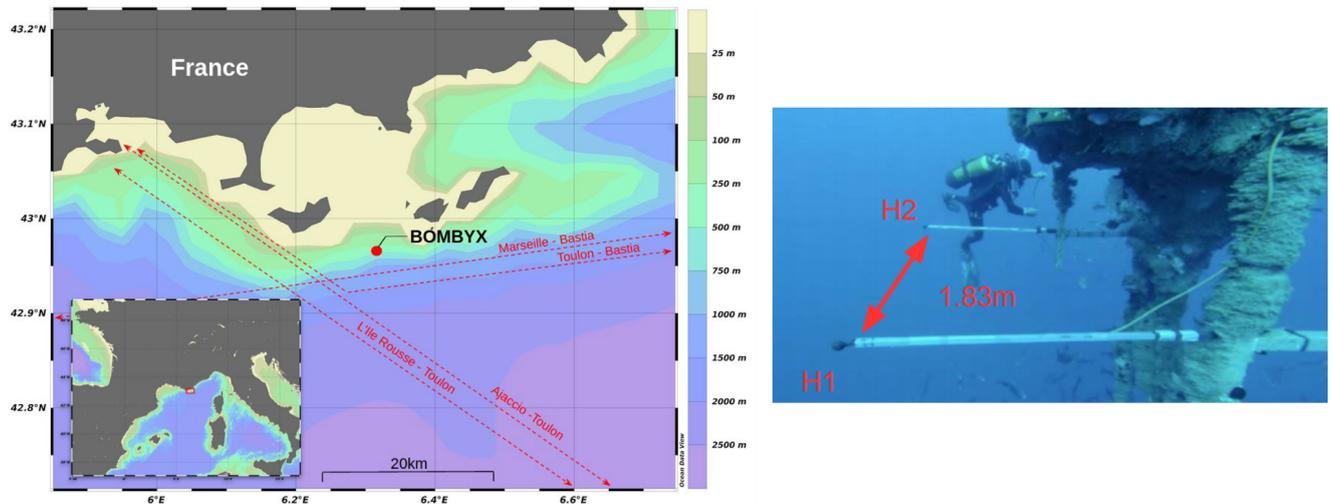


Figure 4.1 : (Gauche) Carte bathymétrique de la région indiquant l'emplacement de la bouée BOMBYX-1 et les trajectoires des ferries (lignes rouges) (crédit Poupard et al. 2021). (Droite) Installation de la bouée BOMBYX-1 par -25 m au Sud de Port-cros (crédit photo PMS).

Les résultats de BOMBYX-1 sont publiés dans Glotin et al. Pelagos Report 2020, Poupard et al. 2021 pour les cachalots, et Best et al. 2022 pour les rorquals. Ils montrent une bonne fréquentation du site par les deux espèces, plus une stratégie d'évitement des bruits maximaux pour les cachalots, et une évolution des chants pour les rorquals.

Bouée pentaphonique BOMBYX-2

La bouée BOMBYX-2, construite dans le projet GIAS par CIAN DYNIS LIS CNRS UTLN, est pentaphonique. Elle est équipée d'un ballast, d'une antenne 4G et d'une carte son avec IA embarquée développée par SMIoT (Fig. 4.2). Elle a été placée à 25 m de profondeur au large de Monaco (Fig. 8.1). Le protocole d'enregistrement consistait en 5 min d'enregistrement toutes les heures. Les algorithmes intégrés sont destinés à la détection des clics de cachalots et des pulses de 20 Hz des rorquals. Son ballast lui permet de remonter en 2 minutes à la surface pour émettre au serveur du LIS les enregistrements et rapports de détection calculés par sa carte IA embarquée. La bouée BOMBYX-2 est une rupture technologique car, à ce jour, les bouées de ce type étaient soit en surface, mais avec problématiques sévères de mouillage et robustesse aux ouragans (de plus en plus fréquents), ou subsurface statique (ex: BOMBYX-1 sans moyen de communication en temps-réel).

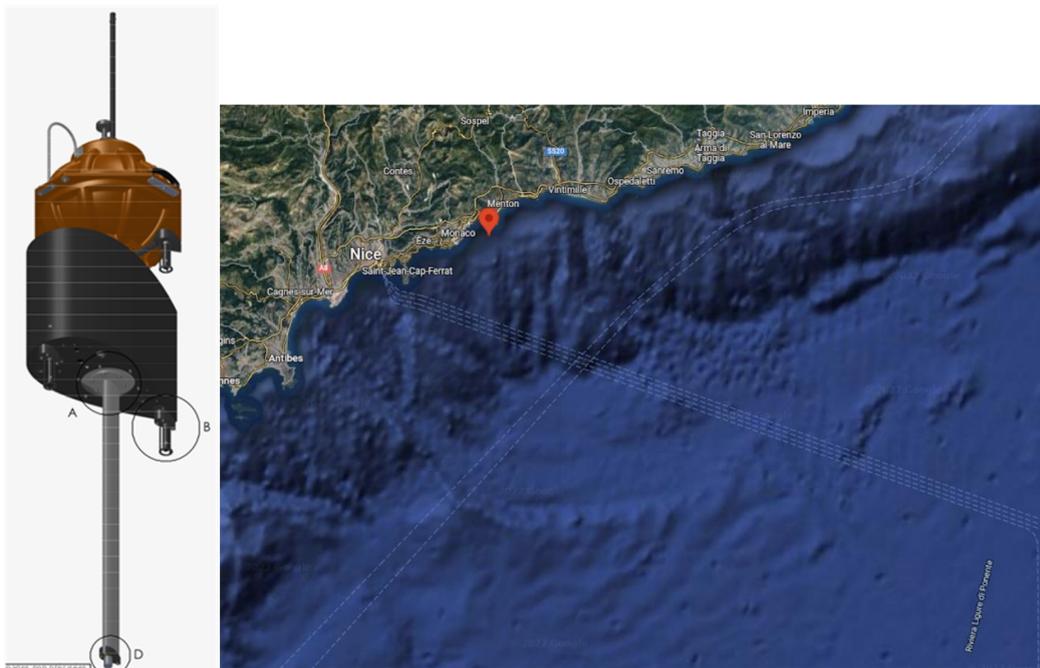


Figure 4.2 : (Gauche) Schéma de la Bouée GIAS BOMBYX-2 à 5 hydrophones et son système de ballast (hauteur totale de 3m). (Droite) Localisation géographique de BOMBYX-2 face aux rails de trafic maritime (en pointillés).

Les statistiques de mesures des angles par la MPU (Motion Process Unit) de la bouée BOMBYX-2 démontrent une très bonne stabilité de la bouée dans le courant du fait de son profil naca (Fig. 4.3). Cela lui donne la capacité de mesures très fiables, notamment pour la localisation des pulses de rorquals en basse fréquence et des clics de cachalots comme le montrent les sections suivantes.

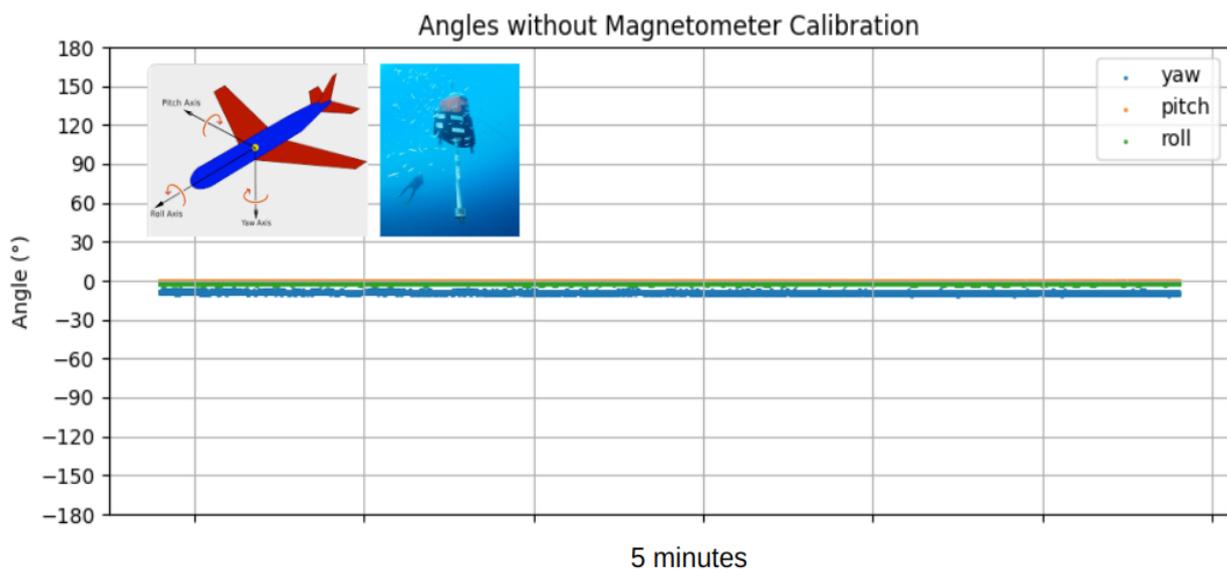


Figure 4.3 : Mesures, par la Motion Process Unit, des trois angles de position de la bouée BOMBYX-2 en juillet 2022. L'assiette est donc très stable.

5. IA pour la détection automatique de cétacés

Une méthode de détection automatique (réseau de neurones ou CNN) des clics de cachalot et des pulses de rorqual a été mise au point pour ce projet sur BOMBYX-2. Les rorquals émettent des vocalisations en basse fréquence, appelées pulses, de deux types (vers 20 Hz ou 130 Hz) qui durent environ 1s (Figs. 5.1, 5.2). Ces pulses sont généralement produits en séquences avec des intervalles inter pulses réguliers (de 10 s à 40 s). Ils forment alors un chant pouvant durer plusieurs heures et qui évolue selon les années et les saisons (Best et al 2022).

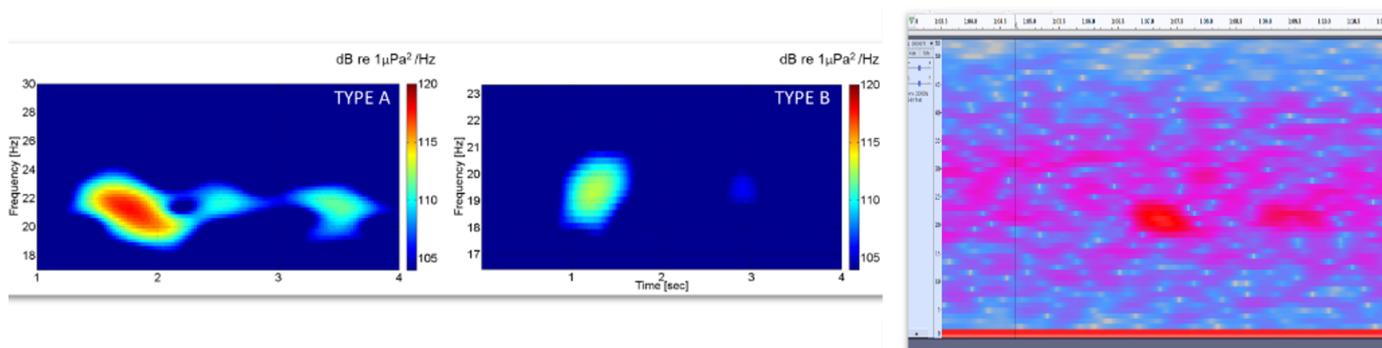


Figure 5.1: Spectrogrammes de trois pulses de rorqual de type 18 Hz à 22 Hz.

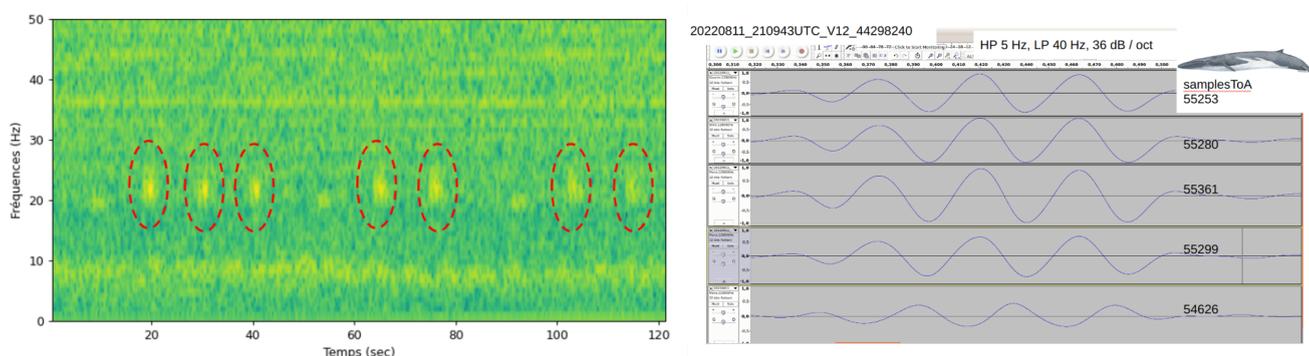


Figure 5.2 : (Gauche) Spectrogramme d'une détection de pulse de rorqual sur BOMBYX-2. (Droite) Forme d'onde sur un pulse de rorqual détecté par BOMBYX-2, le 11 août 2022.

Chez les cachalots, la communication et l'écholocation font appel à l'émission de différents types de sons dont l'unité de base est le clic. Lors des plongées, les cachalots émettent des trains de clics réguliers, tandis que pour la socialisation, ils émettent de petites séries rythmiques de clics (codas). Ces clics sont des sons hautes fréquences (de 0.2 kHz à 25 kHz) et durent quelques millisecondes. Chaque clic se présente comme une séquence d'impulsions également espacées, avec un intervalle régulier pour un même individu (intervalle inter-pulse ou IPI) (Fig. 5.3). Cet intervalle est le résultat de la réflexion du son dans l'organe acoustique. Il est directement lié à la taille de l'individu : plus l'organe est grand, plus l'IPI sera élevé. Il est possible de calculer automatiquement les IPI et donc la taille des individus (Giraudet et al. 2024).

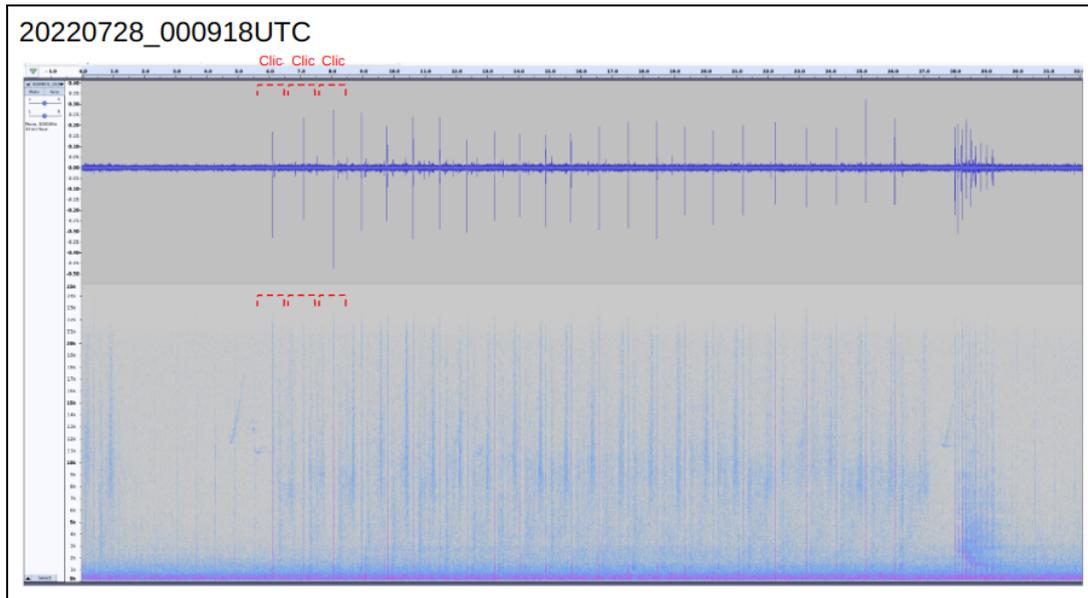


Figure 5.3 : Exemple de détection de cachalot sur BOMBYX-2 le 28 juillet 2022. C'est un train de clics de déplacement, suivi d'une accélération.

Les réseaux de neurones convolutionnel (CNN) peuvent être entraînés pour classer les données avec un degré élevé de précision. Les CNN utilisent plusieurs couches de filtres (ou noyaux) pour convoluer des filtres appris sur les données jusqu'à ce qu'une valeur de confiance suffisante soit acquise. Le modèle est entraîné pour obtenir la meilleure adéquation entre cette valeur de confiance et les étiquettes données pour chaque échantillon acoustique. De cette manière, nous optimisons les filtres pour discriminer les classes d'échantillons (ici, le cachalot ou le rorqual par rapport à tout autre son) en tenant compte de la grande variété de bruits que l'on trouve dans l'ensemble de données.

Un réseau peu complexe (environ 10 000 paramètres) prend le Log MelSpectrum comme entrée et consiste en 3 couches de convolution en profondeur de 128 noyaux de taille 7. Pour développer ce réseau, un modèle a été entraîné de manière supervisée, avec des données labellisées au moyen d'un processus itératif alternant entre l'entraînement, l'inférence sur des données non labellisées et la correction manuelle des prédictions. Ce processus d'annotation, d'entraînement et d'inférence a été répété comme un cycle jusqu'à ce que peu, ou pas, de corrections manuelles soient nécessaires. Ce modèle permet de détecter automatiquement les vocalises de rorqual et calcule une probabilité de détection à chaque milliseconde du signal.

Nous traiterons dans la suite de cette étude la détection des pulses de rorqual par ondelette et l'apprentissage IA par renforcement pour en estimer les niveaux dB (Fig. 5.4).

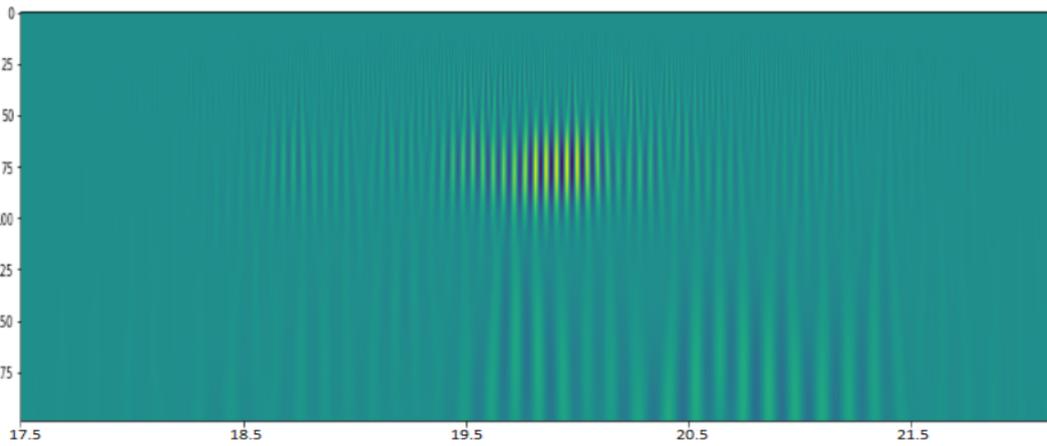


Figure 5.4 : Exemple de décomposition en ondelette de pulse de rorqual, enregistré en été 2022 par BOMBYX-2 (temps, fréquence).

6. Estimation de positions des sources

Angles d'arrivée, azimut et élévation

BOMBYX étant doté de 5 hydrophones, les délais d'arrivée des vocalises par paire d'hydrophones peuvent être mesurés. Avec un système linéaire, le calcul du système des angles azimut et élévation peut être résolu comme dans la méthode de calcul de position des cachalots avec une antenne de même volume durant la mission Sphyrna Odyssey (Glotin et al 2020 <http://sabiiod.org/SO1.pdf>). La figure 6.1 donne un exemple de délai d'arrivée pour le cachalot.

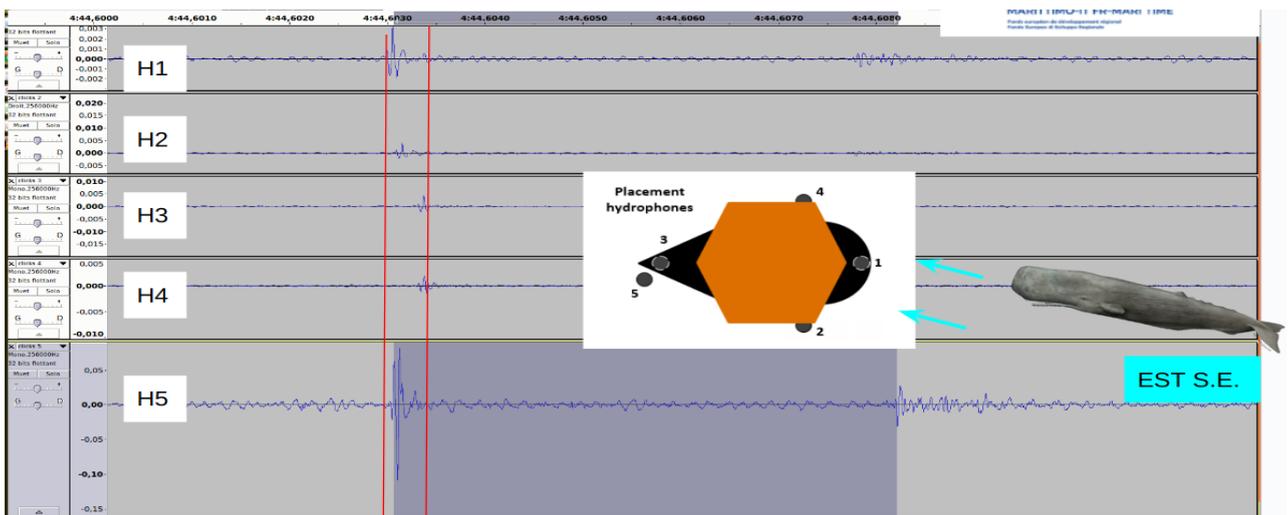


Figure 6.1 : Illustration des mesures de délais d'arrivée des clics d'un cachalot sur BOMBYX-2, sur des hydrophones 1 à 5 rappelés sur le schéma au centre. Ce cachalot est donc placé au SE car la bouée est placée d'Ouest en Est comme figuré, calée dans le courant Ligure, et comme l'indiquent ses mesures de sa Motion Process Unit. On rappelle que H5 est centré, 1.8 m plus bas.

Nous donnons ci-dessous un exemple d'analyse simple des angles d'arrivées de pulses de roorqual par BOMBYX-2. Cette tâche n'est pas aussi simple que pour le cachalot du fait d'interférence avec l'écho surface, la longueur d'onde du pulse de roorqual étant de même ordre de grandeur que la profondeur de BOMBYX-2.

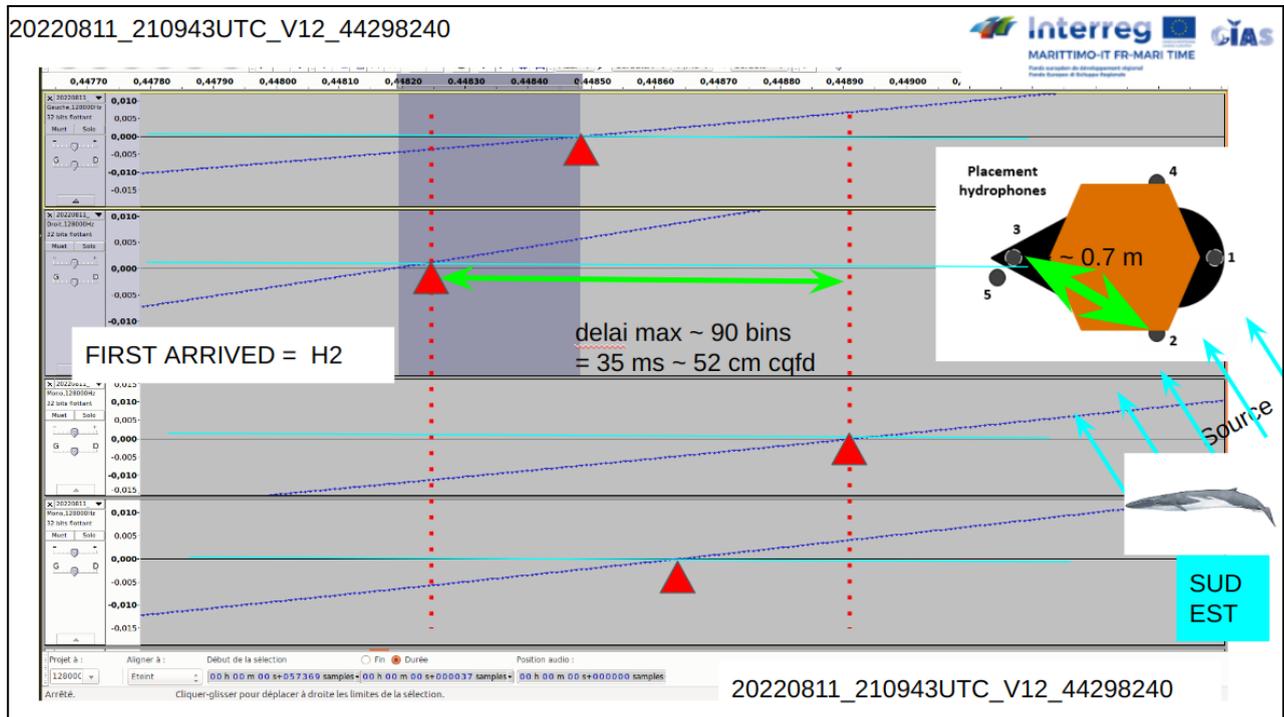


Figure 6.2 : Représentation des arrivées en passage en 0 du pulse de roorqual pour estimer les angles d'arrivée, azimuth et élévation du roorqual. On rappelle que H5 est centré, 1.8 m plus bas.

Estimation du rayon de détection du cachalot

Nous estimons ici le rayon de détection de la BOMBYX-2 pour un signal de cachalot. Cela dépend de la sensibilité de l'hydrophone C57, qui est relativement plate en fréquence jusqu'à 100 kHz (cf annexe A2), mais aussi de l'orientation de l'animal, du gain de la carte son (égal à 1), la sensibilité de l'hydrophones, et d'autres paramètres. In fine il est possible d'estimer le niveau de la source (ASL).

Les spectres de puissance mesurés avant, pendant et après, un clic du 3 août 2022 (ci-dessus) montrent pour 3 kHz et pour 10 kHz des niveaux dB comparés au bruit de fond, de l'ordre de 5 dB. De plus, les abaques des niveaux dB à 1 m du cachalot (Zimmer et al 2005) pour les LF vers 3 kHz et pour P0 vers 10 kHz, donne une moyenne d'environ 188 dB respectivement 192 dB (Fig. 6.5).

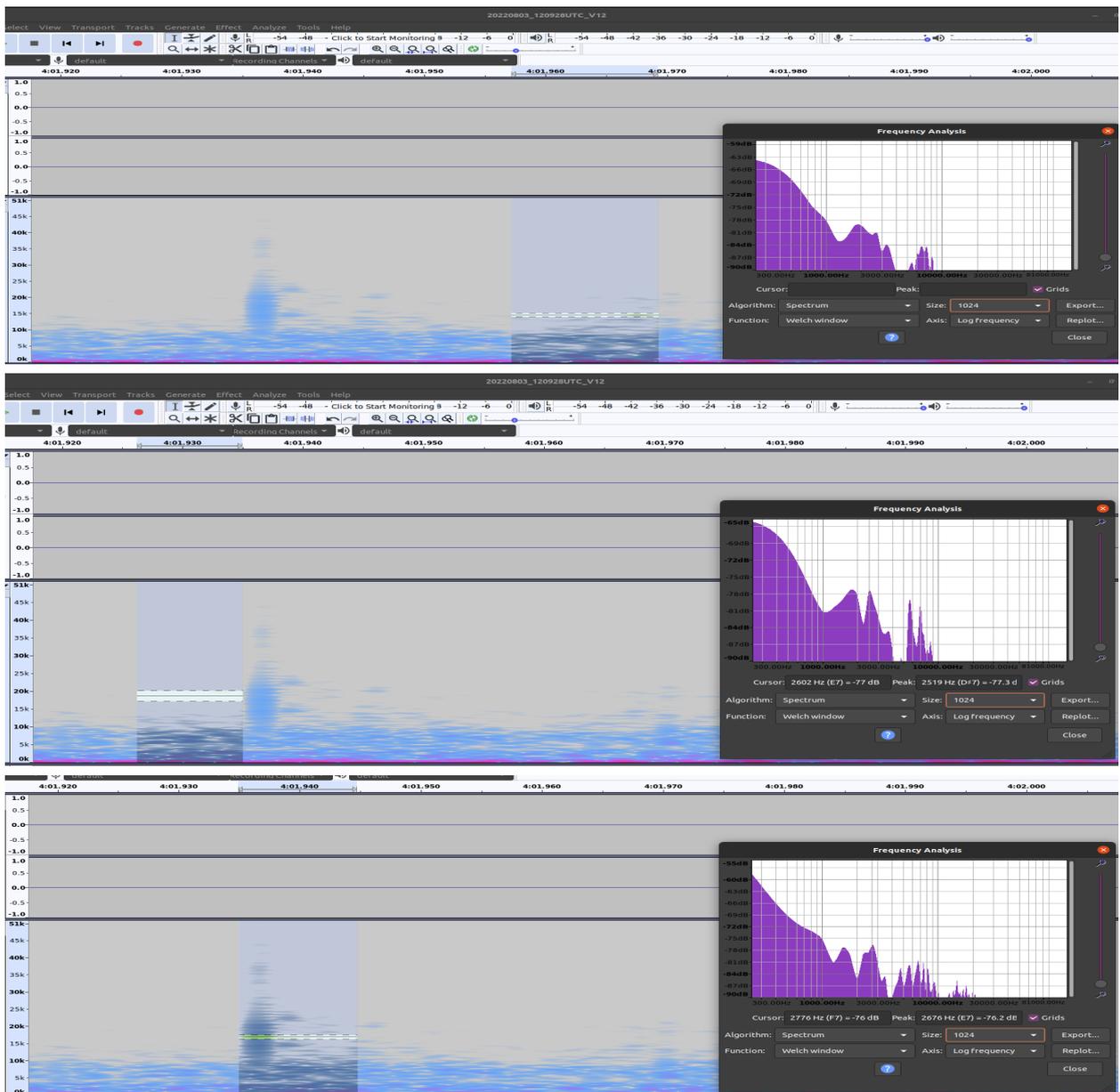


Figure 6.3 : Analyse dB / spectre des pulses d'un clic de cachalot mesuré par BOMBYX-2 le 5 août 2022 (en temps et fréquence, et sa Power Spectral Density (Welch) en dB). (Haut) : mesure du bruit de fond. (Milieu) : P0 composante 10 kHz. (Bas) : pulse P1 (composante 20 kHz). Cela montre la variation dB de ces composantes à prendre en compte pour l'estimation de la distance de la source.

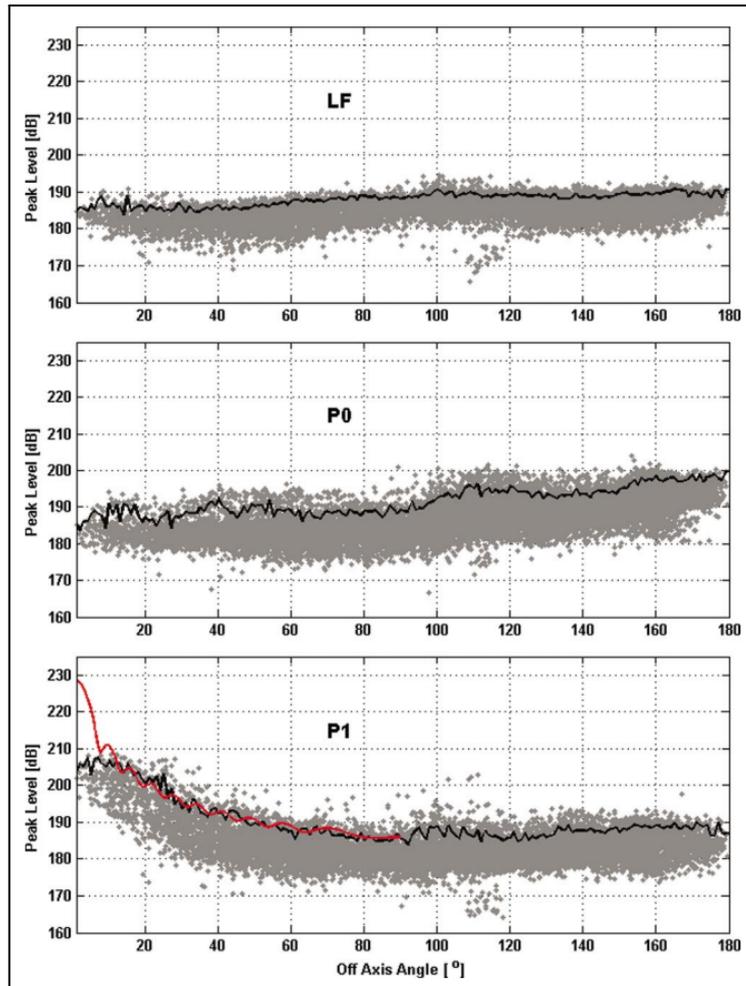


Figure 6.4 : Niveau dB à 1m des clics de cachalot modulo leur orientation (ligne noire percentile 90%) (Zimmer 2005). LF: 500 Hz à 3 kHz, moyenne ~188 dB; P0: 10 kHz, moyenne ~192 dB; P1: 20 kHz.

On en déduit alors que le niveau de perte de propagation de ce signal de cachalot est environ :

$$TS(\text{à } 10 \text{ kHz}) = 12 \text{ dB.}$$

Nous appliquons alors la loi de perte de propagation pour la fréquence de 20 kHz, 10 kHz et 3 kHz via la loi de propagation Thorpe Leroy (cf notamment modèle ISA et ISAT dans les travaux de Doh, Glotin et al 2014):

$$TL(r, f) = 20 \log_{10}(r) + \alpha(f)r \quad , \text{ en dB par km avec}$$

$$\alpha(f) = \frac{f^2}{0.9144} \left(\frac{0.1}{1 + f^2} + \frac{40}{4100 + f^2} \right) \quad , f \text{ en kHz.}$$

La Fig. 6.5 donne la loi d'atténuation dB des clics pour LF et P0, avec en abscisse la distance de la source, en ordonnée l'atténuation en dB.

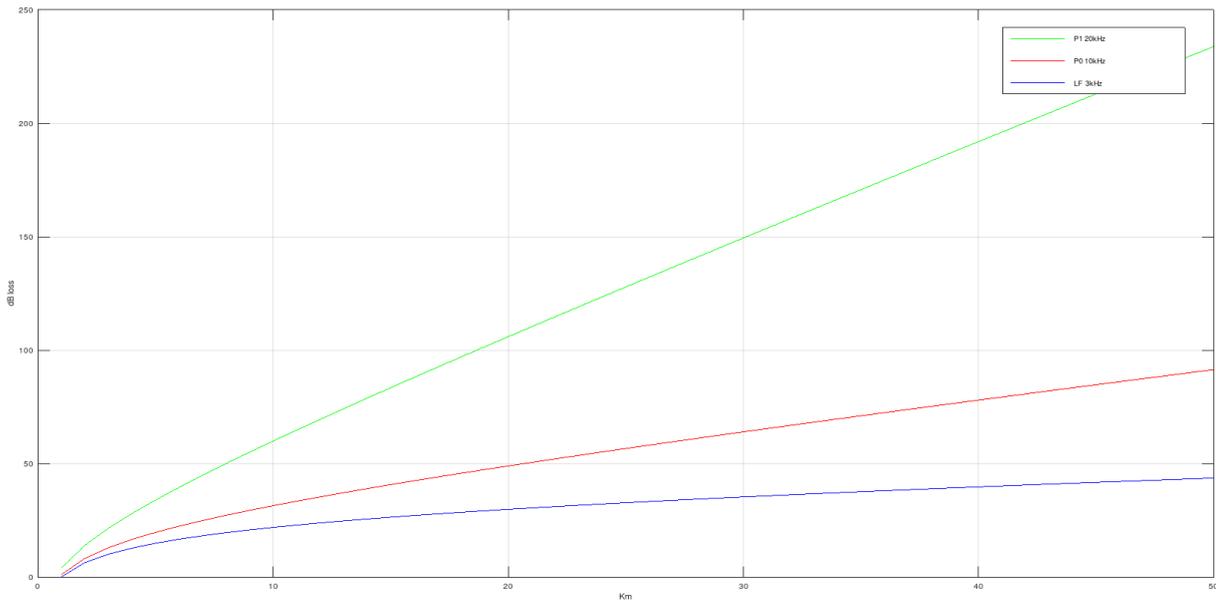


Figure 6.5 : Perte de transmission (dB) des clics 3 kHz (bleu), 10 kHz (rouge) et 20 kHz (vert).

En remplaçant ces pertes et les niveaux espérés des analyses précédentes, on peut estimer que le cachalot est entre 3 et 5 km de distance de BOMBYX. Afin de conforter cette estimation, nous mesurons dans la suite les élévations et rayons de détection par hypothèse de transmission linéaire des clics. Les TDoA sont observés Figs 6.6-7.

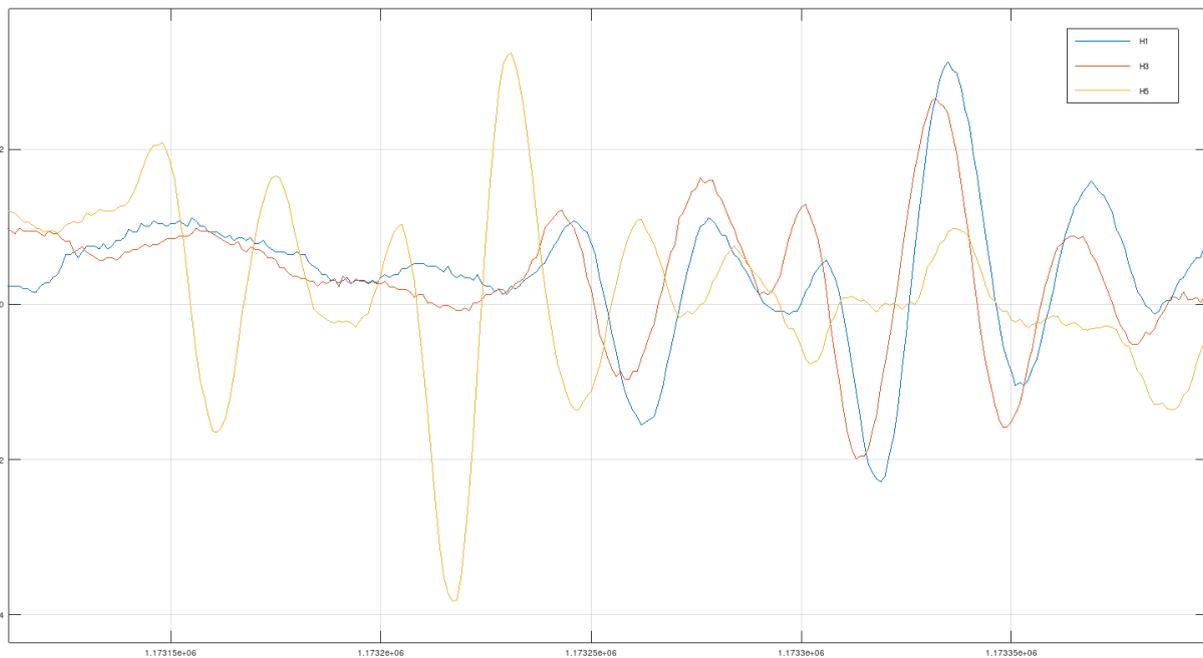


Figure 6.6 : Pulses du cachalot le 3 août 2022 à 12h09, à la seconde 168 sur voies 1, 3 et 5, ayant un retard $TDoA(5,1)=110/256$ ms, $TDOA(3,1)=10/256$ ms.

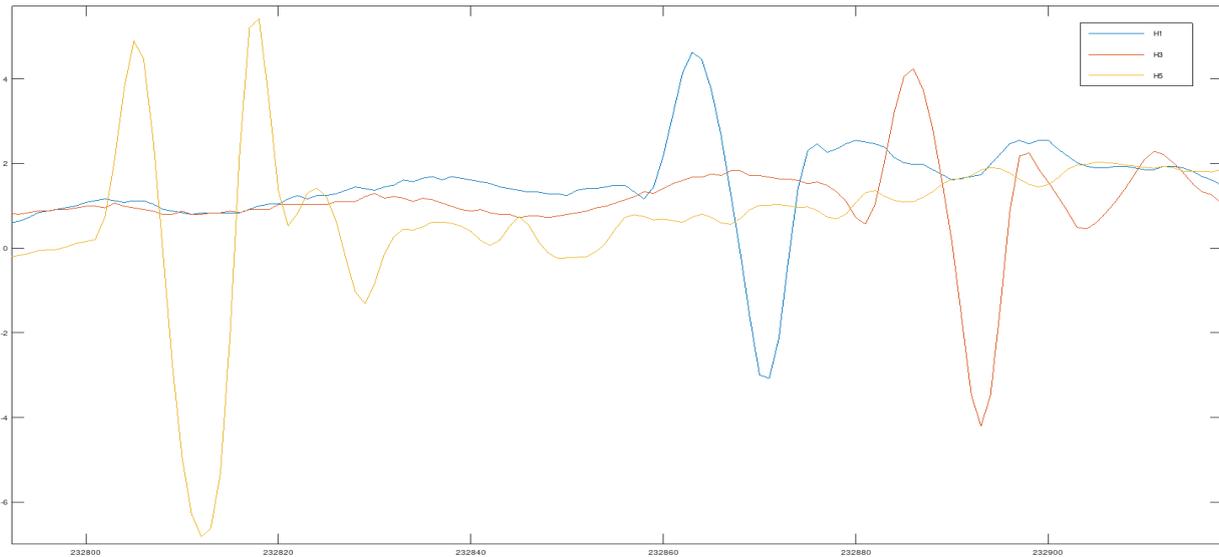


Figure 6.7 : Pulses du cachalot à la seconde 242 sur voies 1, 3 et 5, montrant $TDoA(5,1) = 58/256$ ms et $TDoA(1,3) = 24/256$ ms, le 3 août à 12h09.

L'hydrophone H5 étant à la verticale du point médian, entre H1 et H3, et BOMBYX étant verticale, le temps moyen de retard sur l'antenne verticale est de $105/256$ ms à la seconde 168 et de $70/256$ ms à la seconde 242. On en déduit le système reprenant l'élévation calculée sur les 5 hydrophones, et cet écart moyen sur l'axe vertical de hauteur $H=1212$ cm inter hydrophones. Ce système converge vers une estimation du rayon de détection inférieur à l'estimation précédente, du fait de l'hypothèse de propagation rectiligne qui est trop forte. Un modèle de propagation non linéaire est en cours pour ajuster les deux méthodes.

Estimation de position du rorqual

On estime, par la suite, la distance du rorqual via la loi de propagation Thorpe Leroy et l'estimation de la perte de transmission TL :

$$TL(r, f) = 20 \log_{10}(r) + \alpha(f)r, \text{ en dB par km avec :}$$

$$\alpha(f) = \frac{f^2}{0.9144} \left(\frac{0.1}{1 + f^2} + \frac{40}{4100 + f^2} \right), \text{ avec } f \text{ en kHz (ici } f = 0.02 \text{ kHz).}$$

La loi d'atténuation pour les pulses de rorqual (20 Hz) est donnée Fig. 6.8.

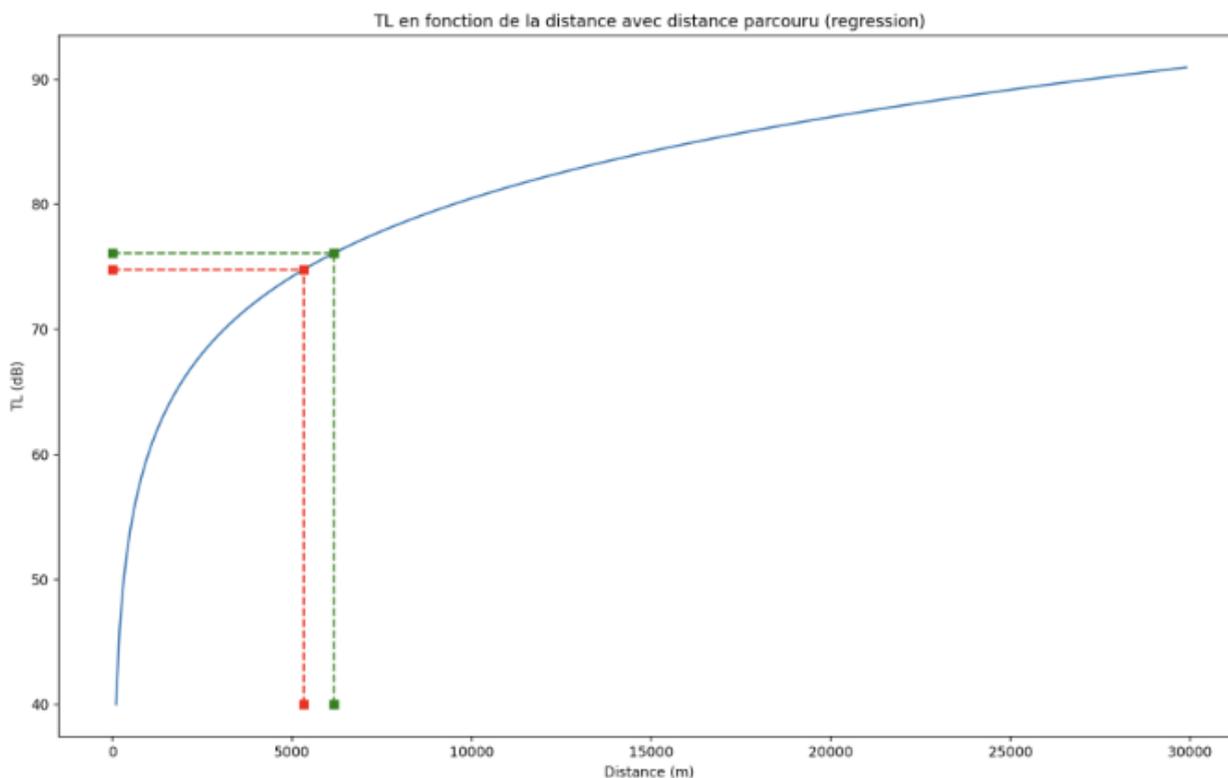


Figure 6.8 : Loi d'atténuation dB des pulses de rorqual (20 Hz), en abscisse la distance de la source, en ordonnée l'atténuation en dB.

Dans l'exemple Fig. 6.8, considérant la vitesse moyenne du rorqual, on estime que la distance correspondant à la dynamique de défilement des détections est compatible avec une distance de l'ordre de 5 km.

7. Estimation des niveaux dB

L'estimation des niveaux dB est, soit faite par DSP (Densité Spectrale de Puissance) (Ferrari et al 2022 étude SHOM), soit mesurée par bande de fréquence. Pour cette dernière, les signaux ont été divisés en bandes d'octaves. Pour rappel, la fréquence d'échantillonnage de BOMBYX-1 est de 50 kHz, et pour BOMBYX-2 de 128 kHz.

Pour chaque fichier, il est alors possible de tracer un calendrier des DSP en dB (niveau min, moyen, max). Les bandes de fréquence utilisées sont les bandes suivantes :

- 10 à 400 Hz, une bande supplémentaire a été estimée de 10 Hz à 800 Hz,
- 400 à 800 Hz,
- 800 à 1600 Hz,
- 1600 à 3200 Hz,
- 3150 à 6300 Hz,
- 6300 à 12500 Hz,
- 12500 à 60000 Hz.

Les niveaux dB absolus de la station KM3Env ont été estimés suivant la méthode empirique suivante. Pour la fréquence considérée, le niveau dB brut est normé par sa moyenne, auquel on ajoute la moyenne de Wentz donnée Fig. 7.1. On en déduit ensuite les dB mean, min et max absolus par :

$$dB_{\text{Meanrelatifbande1}} = \text{mean}(dB_{\text{Relatifbande1}} \text{ sur } 2020 \text{ union } 2021).$$

$$\text{On a alors : } dB_{\text{Meanabsolubande1}} = dB_{\text{Relatifbande1}} - dB_{\text{Meanrelatif}} + 70 \text{ dB.}$$

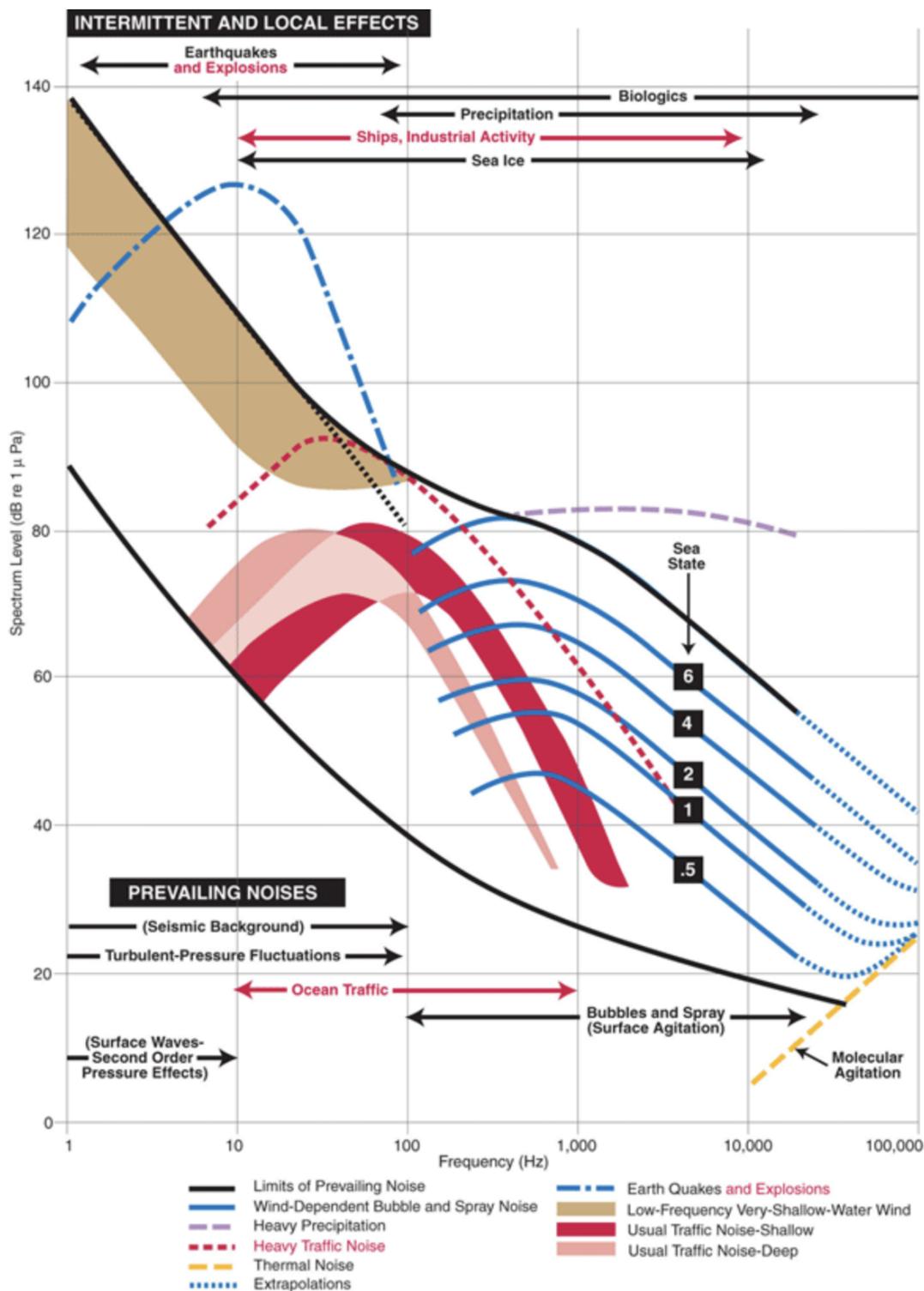


Figure 7.1 : Les niveaux dB de référence (d'après Wenz 1962).

PARTIE II : RÉSULTATS sur les CACHALOTS

8. Bilan des détections: calendrier de 2015 à 2023

Sur la période 2015-2018, une détection automatique de clics de cachalots suivie d'une vérification manuelle de la présence de cachalot (Poupard et al 2022) a permis de déterminer le nombre de passages de cachalot sur BOMBYX-1. Au total, 226 passages de cachalot ont été retrouvés, certains passages étant constitués de 2 ou 3 individus, cela représente un total de 347 individus (avec recapture) (Fig. 8.1 Haut).

La recherche automatique de clics de cachalots a été effectuée par un réseau de neurones de sur les enregistrements des bouées BOMBYX-2 depuis juillet 2022. Ce réseau a permis de générer les détections depuis juillet 2022 et de construire la suite du calendrier des détections (Fig. 8.1 Bas). Des vérifications manuelles ont été effectuées afin de vérifier les détections du réseau, dont quelques exemples validés sont listés Tab. 8.1. Le nombre d'individus pour les enregistrements de 2022-2023 est en cours d'analyse, notamment avec la détermination des IPIs.

Table 8.1 : Exemples de fichier .wav (liens URL) incluant détections de cachalot sur BOMBYX-2 et KM3Env ('RUN*'). Ces fichiers sont disponibles à:

http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/Pelagos2023_LIS_material/geonature/cachalotexempledectionacoustique/

20220729_010919UTC_V12.wav	20220729_120919UTC_V12.wav	20220803_110928UTC_V12.wav
20220803_120928UTC_V12.wav	20220808_220942UTC_V12.wav	20220823_030952UTC_V12.wav
20230306_060011UTC_V12.wav	20230306_080011UTC_V12.wav	20230306_120011UTC_V12.wav
20230312_080011UTC_V12.wav	20230312_090011UTC_V12.wav	RUN7964_20200505_020101.wav
RUN7964_20200505_022901.wav	RUN7964_20200505_023701.wav	RUN10000_20210522_060422.wav

Le même réseau de neurones a été appliqué sur les données d'enregistrements de la station filaire. Cela a révélé les détections positives de cachalots intégrées dans le calendrier Fig. 8.1.

C'est une conclusion conséquente car elle donne corps aux observations fines produites lors des missions WhaleWay sur des périodes très courtes de l'année et qui démontre le caractère indispensable de BX, seul observatoire apporter des infos quelque soit la saison et la météo contrairement aux observateurs en bateaux..

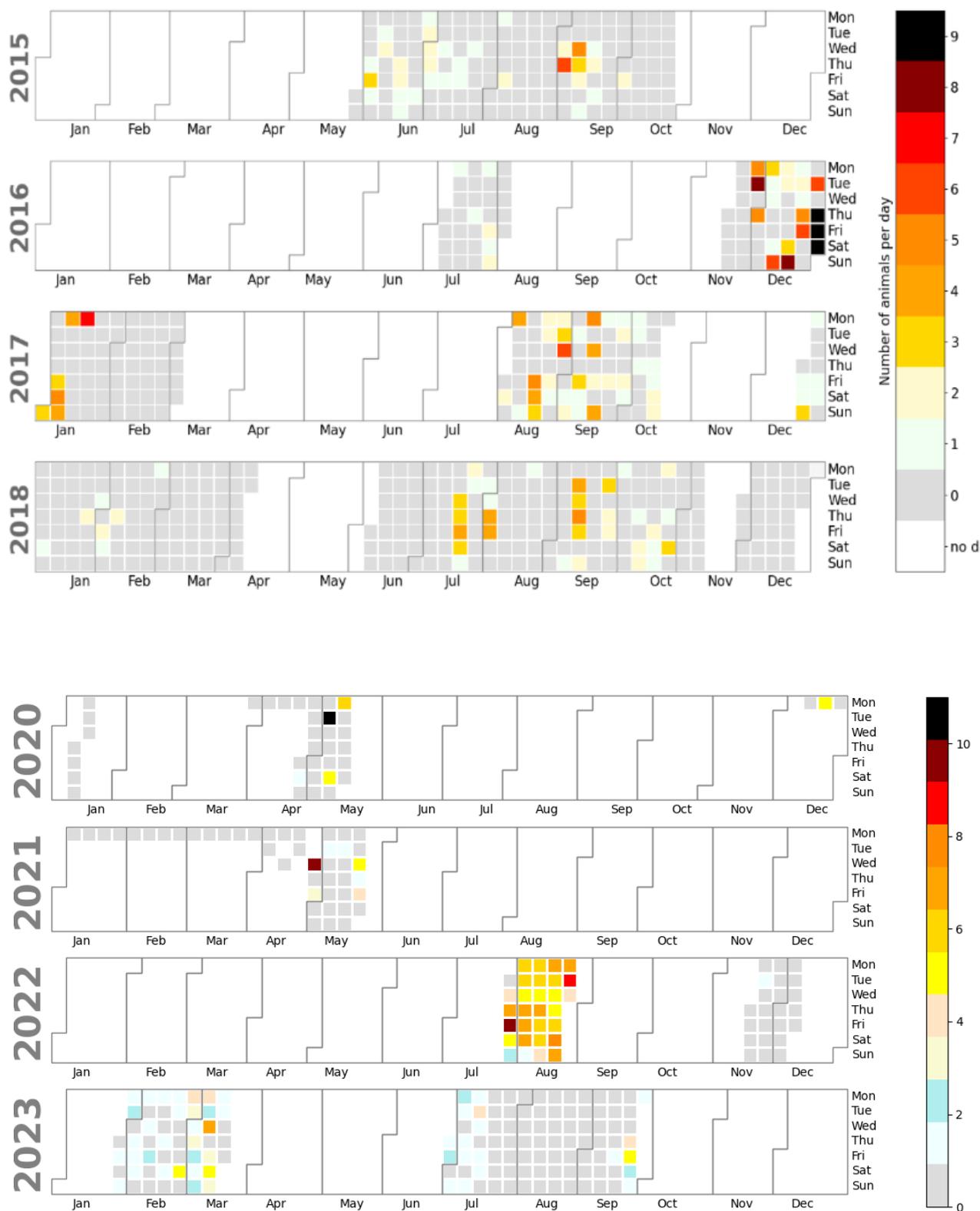


Figure 8.1 : (Haut) Nombre de cachalots détectés par jour sur les 4 années d'enregistrements (zone blanche: pas d'enregistrement) (Poupard et al 2022). (Bas) Calendrier des détections acoustiques : nombre d'enregistrements de 2 min (2020-2021 sur KM3Env) et 5 min (2022-2023 sur BOMBYX-2) ayant au moins trois détections positives de cachalot. Les cases blanches sont les jours sans enregistrement, les grises avec enregistrement mais sans détection. Seuil de détection positive fixé à 0.5, sauf en 2022 fixé à 0.9.

9. Suivi par antenne mobile des cachalots en zone anthropisée Nord-Est Iles d'Or

Suivi depuis antenne mobile sur bateau

La mission WhaleWay-4, réalisée du 23 septembre au 07 octobre 2023 en Méditerranée a permis l'observation et le suivi acoustique de plusieurs cachalots (Fig. 9.1). Pour chaque jour de suivi, une carte résultant de l'effort de WhaleWay-4 et faisant figurer les points d'écoute, les points d'observation et les points de sondes a été réalisée (annexe 3). Ces cartes montrent notamment les zones de chasse privilégiées, les allers-retours effectués par les individus et le temps qu'ils passent dans ces zones. La carte générale du suivi ainsi que quelques exemples sont présentés ci-dessous.

Lors de cette mission, nous avons passé 6 jours au niveau des canyons situés au large de Nice-Monaco, du 27 septembre au 2 octobre, zone qui semble être de grand intérêt pour les cachalots. Pendant cette période, des cachalots ont été suivis tous les jours et sur de longues périodes, dont 14 sur plusieurs cycles. Des suivis acoustiques de nuit ont permis de suivre les individus sur une durée continue de 18h le 29 septembre. Ces suivis montrent que les cachalots font des allers-retours dans cette zone où ils restent plusieurs heures, voire même plusieurs jours. Par exemple, le cachalot nommé Farouche est resté dans la même zone pendant 5 jours (Fig. 9.2). Ce dernier a été suivi acoustiquement sur un total de 98 heures, avec 28 points de sonde relevés au GPS d'une précision de l'ordre de 50 m. Ces observations successives ont permis de suivre l'individu et de l'enregistrer pendant 20 cycles de plongée (descente-chasse-remontée-respiration), de 1h en moyenne. Ce suivi indique que ce cachalot a fait des aller-retours presque quotidiens dans une zone de 40 km seulement (Fig. 9.2).

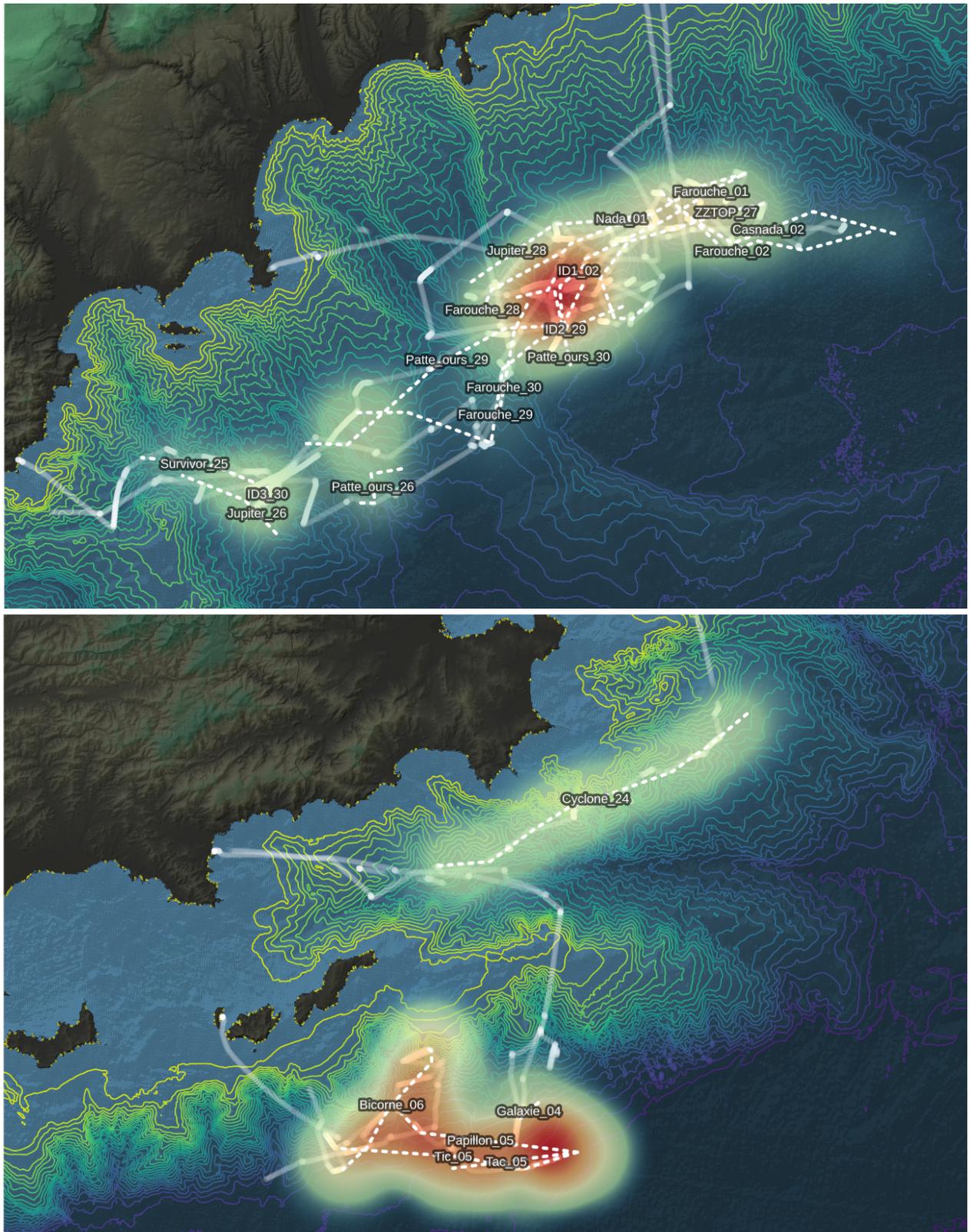


Figure 9.1: Vue générale du suivi des cachalots lors de la mission WhaleWay-4, sept-oct 2023. (Haut) Observations sud Monaco, (Bas) Iles d'Or. Le trajet du bateau est le tracé rectiligne blanc, les trajectoires potentielles des cachalots, en pointillés blancs, relient chaque point de sonde. Les zones rouges ont le plus d'observations de cachalots. Données brutes disponibles en annexe.

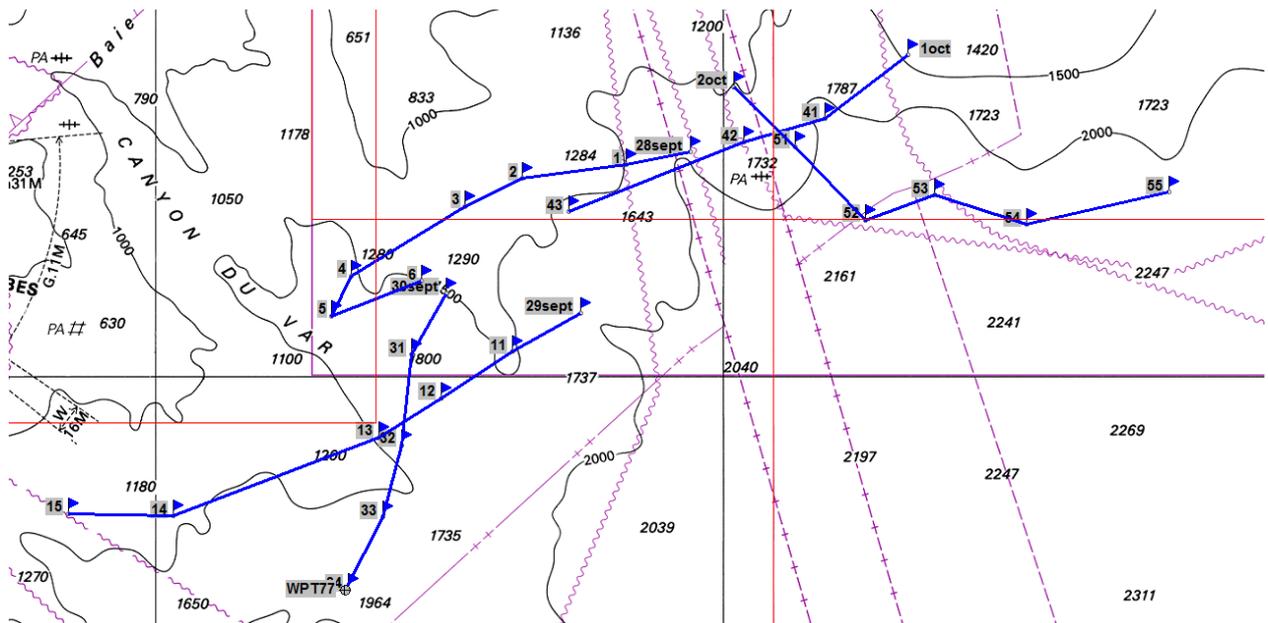


Figure 9.2 : Compilation des trajets d'un unique cachalot, que l'on a nommé "Farouche", suivi en cumulé sur 5 jours, démontrant l'intérêt de l'habitat Canyon du Var pour cet individu.

Pour compléter ces éléments de comportement en zone anthropisée, les TDoAs des enregistrements positifs ont été analysés permettant de déterminer l'élévation et l'azimut des individus enregistrés sur les antennes.

Nous présentons ici le suivi du déplacement des cachalots par TDoA enregistrés lors de la mission WhaleWay-4. Avec un unique individu, le 27 septembre, 2 individus le 29 septembre, et jusqu'à 4 individus le 28 septembre, la méthode d'extraction et la mesure des TDoA depuis nos antennes acoustiques nous permettent de comprendre le déplacement des cachalots dans les profondeurs. Couplée aux mesures du microprocesseur en termes d'inclinaison (yaw, roll et pitch), pour connaître l'orientation des hydrophones par rapport à la source, il est possible de mesurer la direction du cachalot et ainsi prédire sa trajectoire en temps-réel depuis le bateau laboratoire à 1 ou 2 miles de distance. Cette même méthode peut également être appliquée aux antennes fixes comme les bouées BOMBYX.

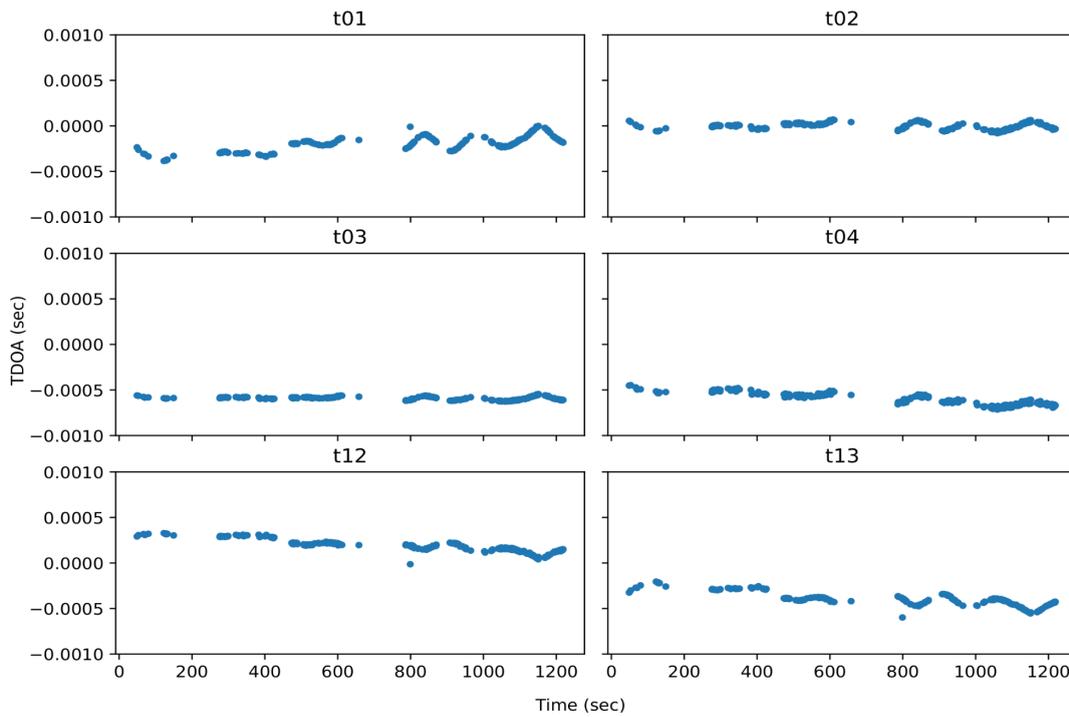


Figure 9.3 : Track TDoA du cachalot ZZ-TOP enregistré, le 27 septembre 2023 lors de la sonde de 14h, par JASON Baguera. Début de l'enregistrement à 14:43 et fin à 15:04. Les 6 affichages représentent 6 couples d'hydrophones différents tel que t01 est le temps d'arrivée entre l'hydrophone 1 et l'hydrophone 2, t02 entre l'hydrophone 1 et l'hydrophone 3 et ainsi de suite.

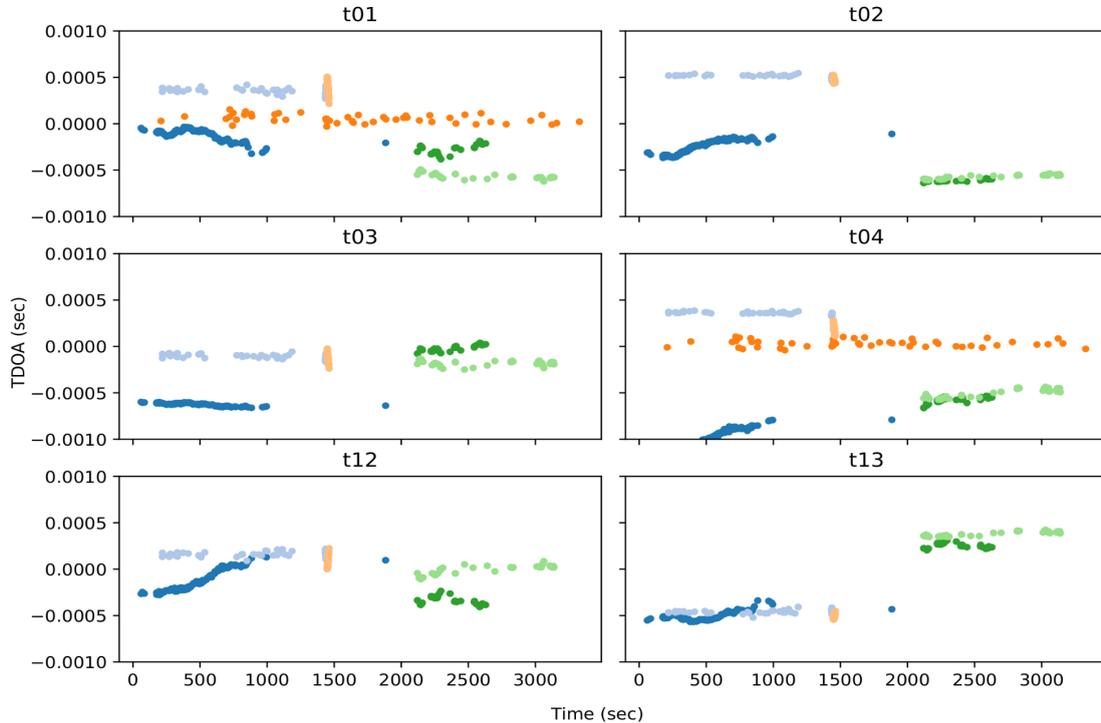


Figure 9.4 : Track TDoA des cachalots Farouche (bleu, rouge et vert foncé) et Patte d'Ours (bleu, rouge et vert clair) enregistrés le 29 septembre 2023 lors de la sonde de 13:13 à 14:22. Ces tracks montrent qu'ils évoluent suivant les mêmes trajectoires.

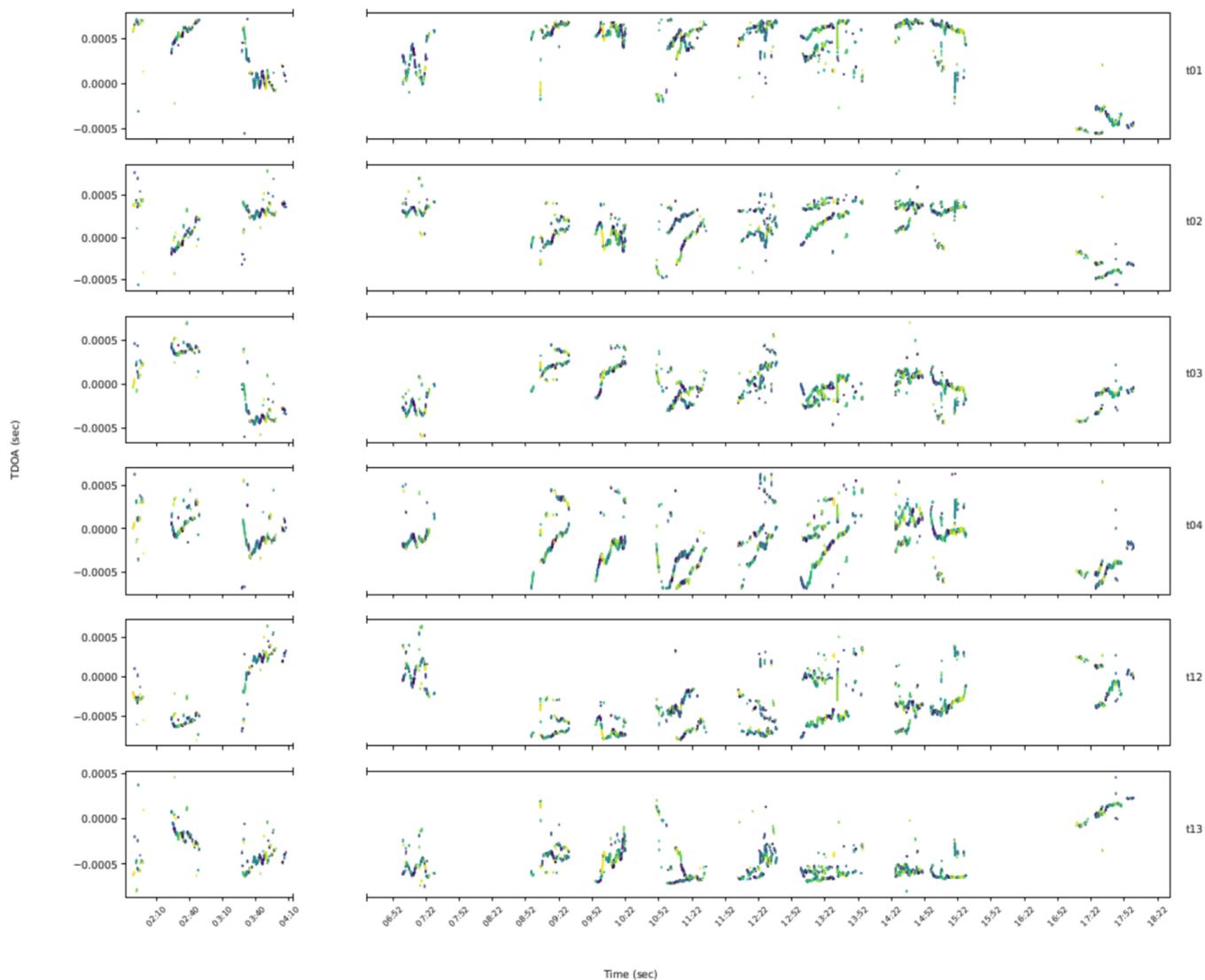


Figure 9.5 : Tracks TDoA de Farouche, Patte d'ours et Casnada durant la journée du 2 octobre 2023, entre 01:48 et 18:01, par JASON Baguera montrant les sondes conjointes.

Ces résultats de pistage en TDoA des individus identifiés permettent à court terme d'en caractériser le rythme nyctéméral, les durées de chaque sonde, sachant qu'une piste qui s'efface est en général liée au silence (plus d'émission de clic) de la remontée finale en surface, puis à la période de respiration en surface et au début de la sonde. Il en découle une analyse plus fine des variations d'activités en milieu anthropisé, comme le développe la section suivante.

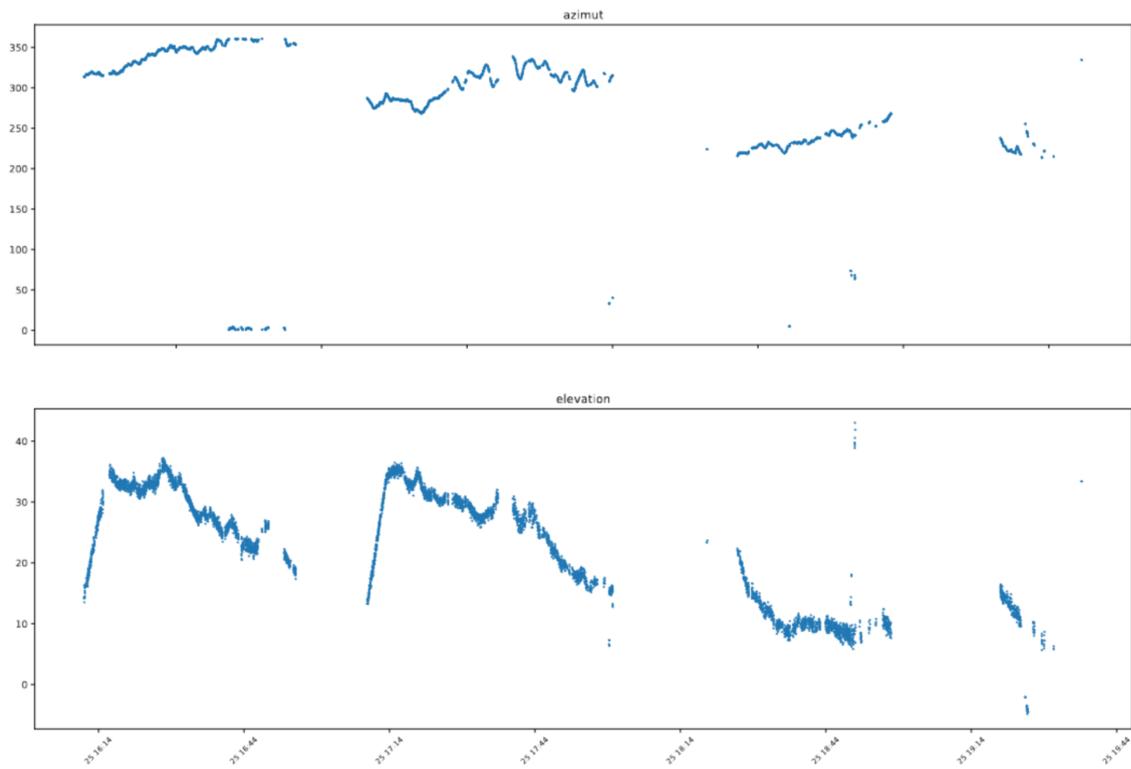


Figure 9.6 : Suivi des mesures d'azimut et d'élévation de l'individu Survivor durant 3 plongées complètes, avec la période de descente et de remontée progressive, le 25 septembre 2023.

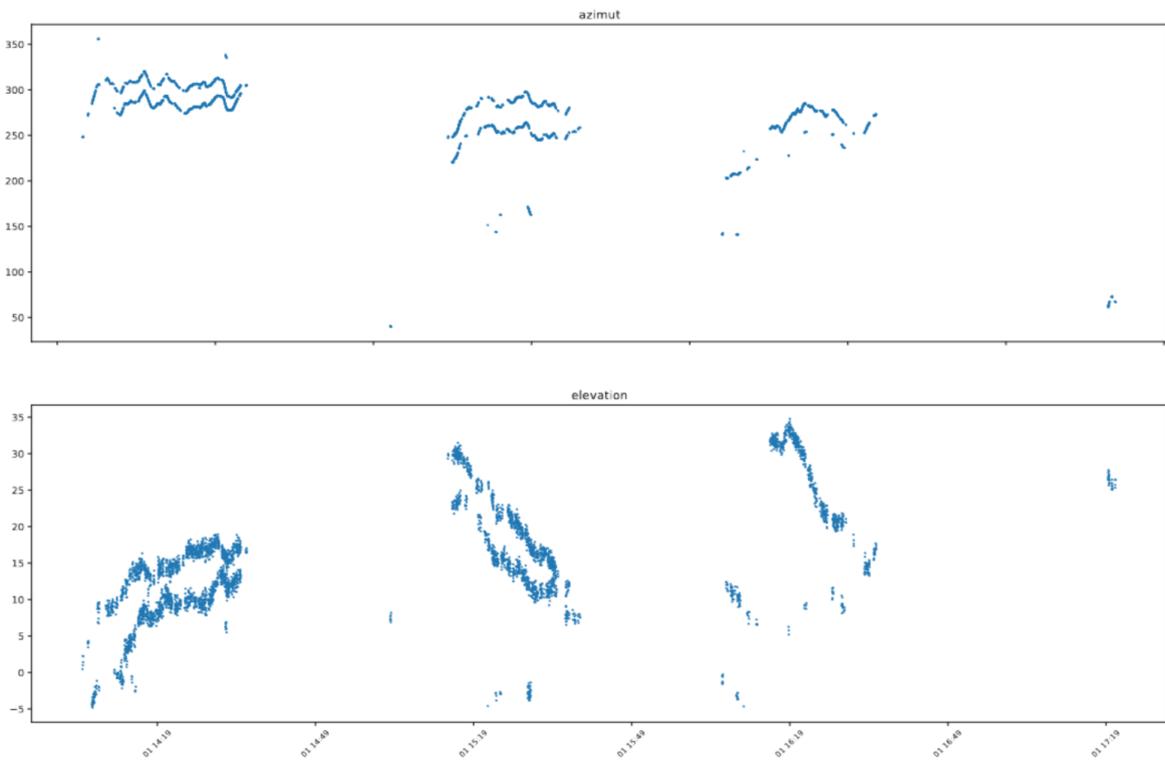


Figure 9.7 : Suivi des mesures d'azimut et d'élévation de Farouche et Nada plongeant ensemble durant 3 plongées, le 1er octobre 2023 (Fig. 9.8). Ces motifs de sondes démontrent leur coordination de sonde, même en milieu anthropisé.



Figure 9.8 : Farouche (Gauche) et Nada (Droite) plongeant en phase, le 1er octobre 2023 (voir aussi Fig. 9.7) (crédit F. Sarano / Longitude 181).

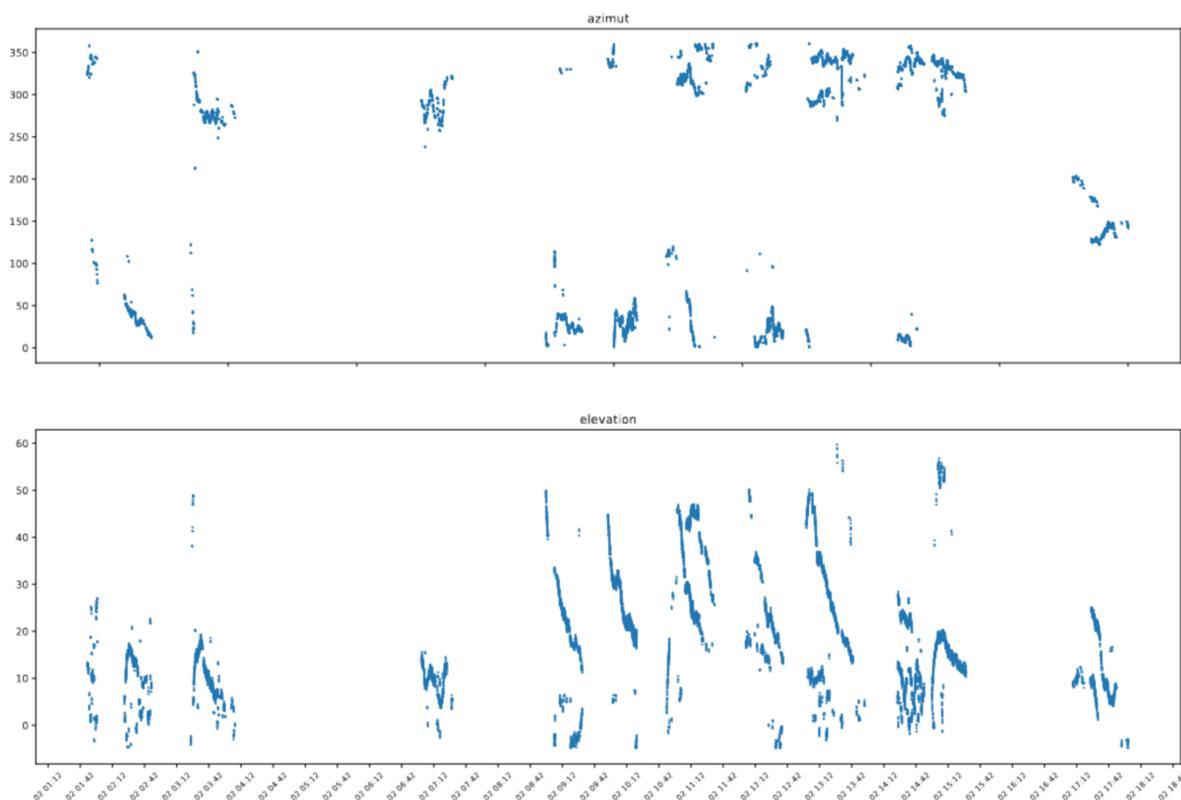


Figure 9.9 : Suivi des mesures d'azimut et d'élévation de trois individus plongeant ensemble : Farouche, Casnada et Inattendu, enregistrés durant la journée du 2 octobre 2023.

Pistage par BOMBYX-2

Cette même méthode a été appliquée aux enregistrements de BOMBYX-2. Les Figs. 9.10 et 9.11 donnent quelques exemples du programme GIAS anticollision cétacés/ferrys par BOMBYX-2, de 2018 à 2022, qui continue dès 2024 dans un nouveau FEDER.

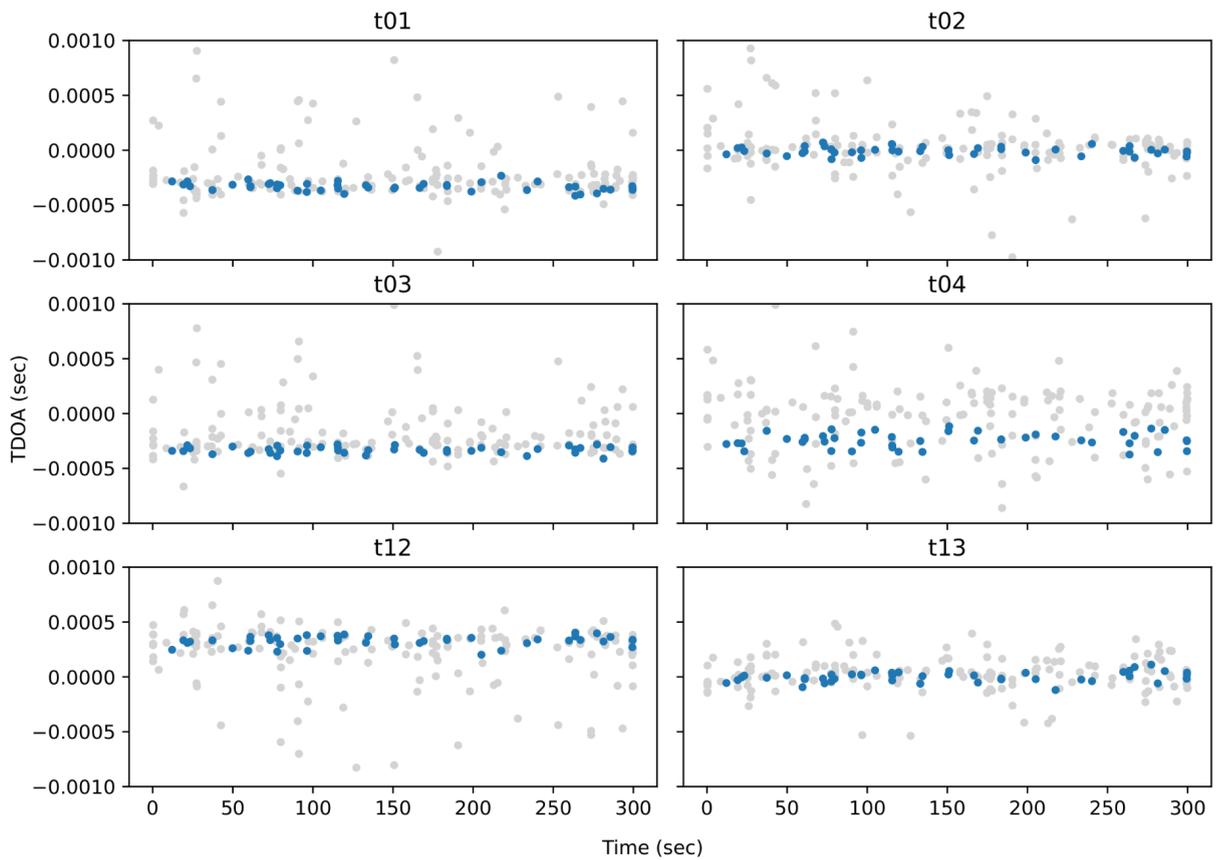


Figure 9.10 : Traces TDoA d'un cachalot enregistré le 29 juillet 2022 à 01:09 par la bouée BOMBYX-2. Les clics de cachalot sont en bleu, les vrais négatifs en gris.

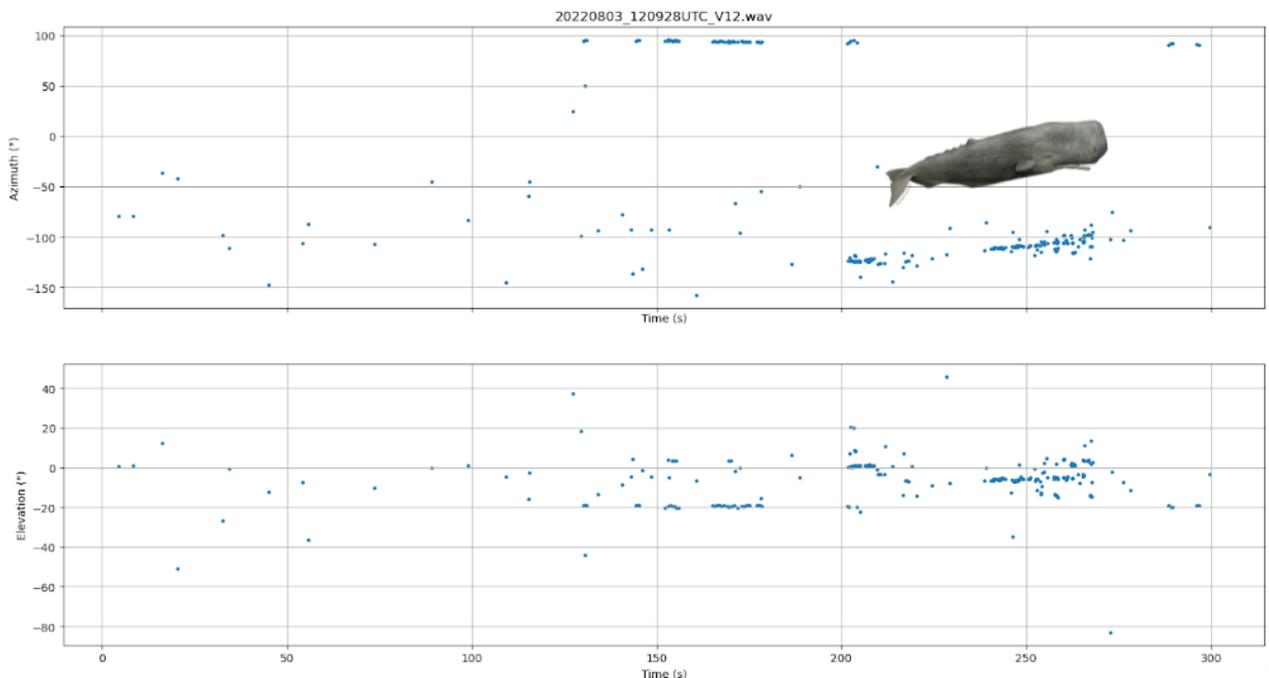


Figure 9.11: (Haut) Détection et estimation en azimuth. (Bas) Idem en élévation, par mesure des délais d'arrivée de chacun des clics de cachalot, le 3 août 2022. La piste d'élévation de -20° à -3° entre 150 et 250 sec montre que l'animal va faire surface : il arrête d'émettre.

10. Séparation des sources et suivi de taille par IPI

Les enregistrements effectués tout au long de la mission avec l'antenne tetra ou penta, mises à l'eau depuis le bateau, ont permis de déterminer les IPI des individus rencontrés.

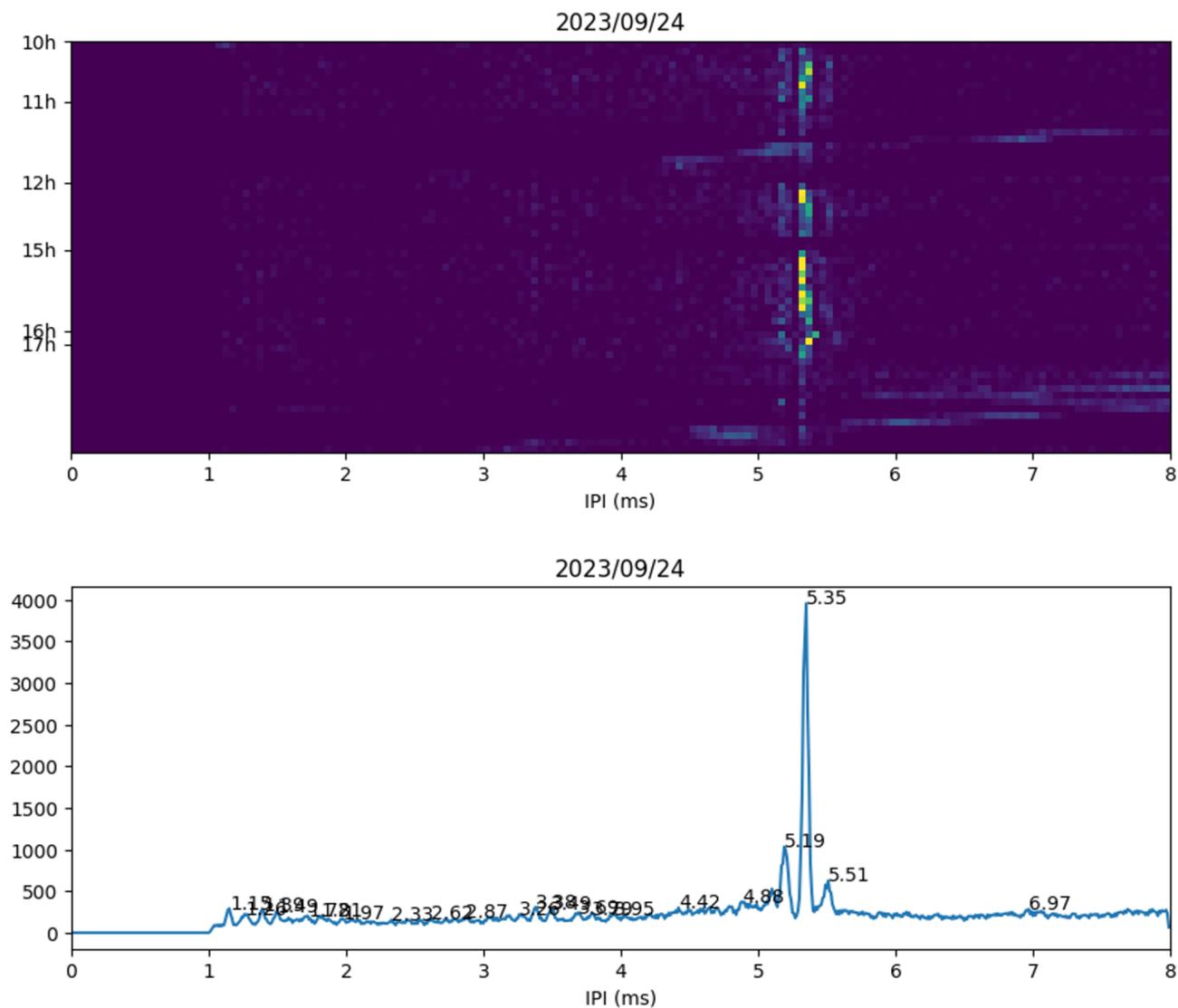


Figure 10.1: (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures. (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leur IPI, ici Cyclone, IPI de 5.35 ms.

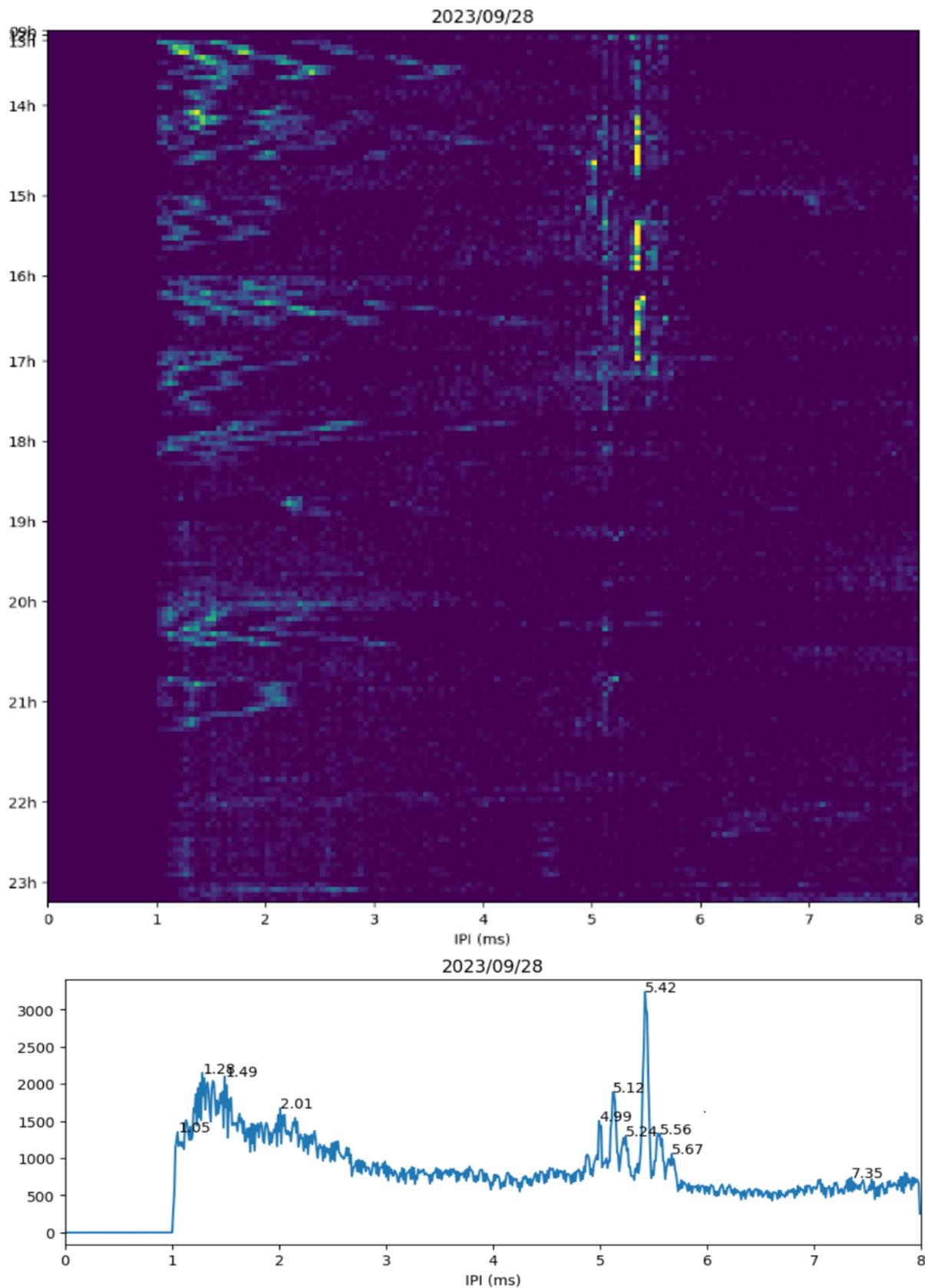


Figure 10.2: (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures. (Bas) Histogramme des intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leurs IPI, ici Jupiter (5,42ms), ZZtop (5,67ms), Plune (5,56ms) et Farouche (5,12ms).

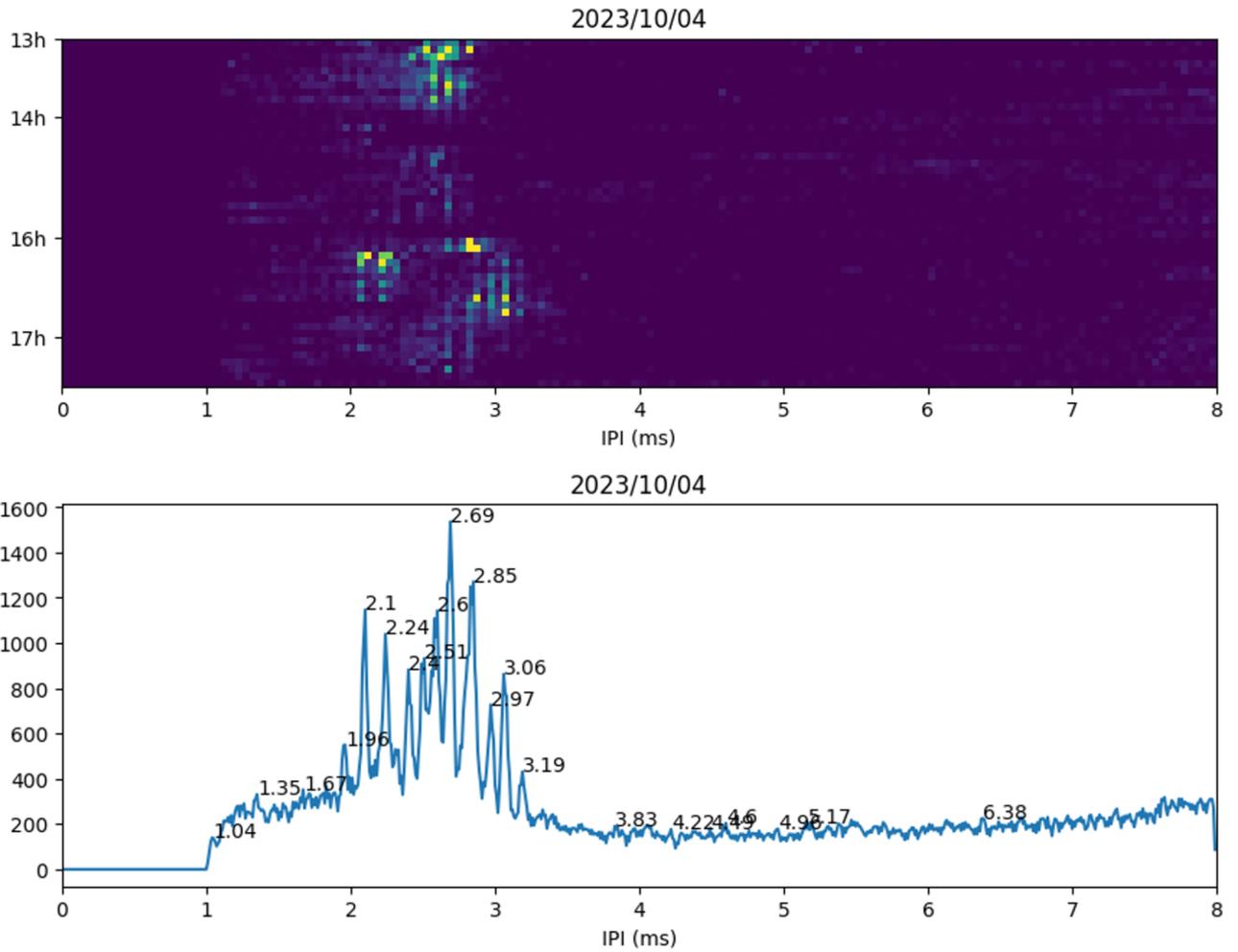


Figure 10.3 : (Haut) Suivi de la piste en IPI (Intervalle inter pulse) entre 13:00 et 17:30, le 4 octobre. (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leurs IPI, ici un groupe de 8 ou 9 individus dont certains sont des immatures (pour les IPI < 2.8 ms).

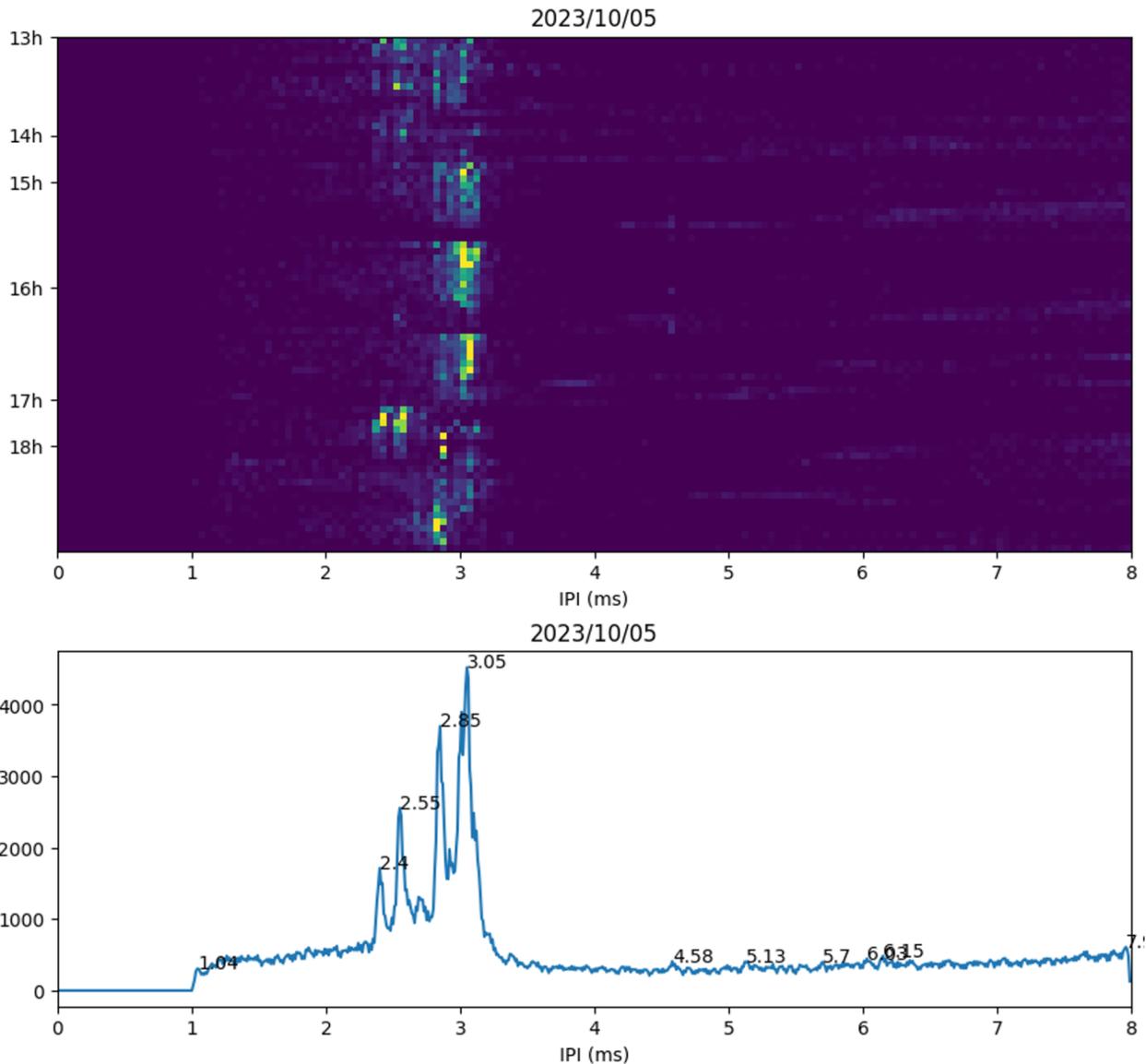


Figure 10.4 : (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures. (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leurs IPI, ici un groupe de 4 individus dont certains sont des immatures (pour les IPI < 2.8 ms).

Couplé aux observations, la détermination des IPI permettent de dresser des cartes d'identité précises des individus rencontrés (cf Annexe). D'autres individus ont également pu être identifiés, uniquement en visuel ou en acoustique, comme c'est le cas pour les immatures.

De plus, les mesures réalisées avec Baguera montrent non seulement les IPI mais aussi leurs réflexions sur la surface de la mer, qui si elles peuvent être vues comme parasites en premier lieu, relatent une trace corrélée avec le déplacement de l'animal. Cette trace est essentiellement corrélée avec l'élévation de l'animal et donc avec sa dynamique verticale, sa vitesse de sonde V_s et de remontée V_r . La Fig. 10.5 montre ces variations d'élévation de l'individu par rapport à la surface. Du fait que les angles de cette trace sur la représentation (IPI, temps) sont constants modulo 180° (on observe trois droites symétriques), et en considérant que l'ascension et la

plongée sont de même inclinaison par rapport à la surface, on peut en déduire que $|V_r|=|V_z|$ sur toute la sonde.

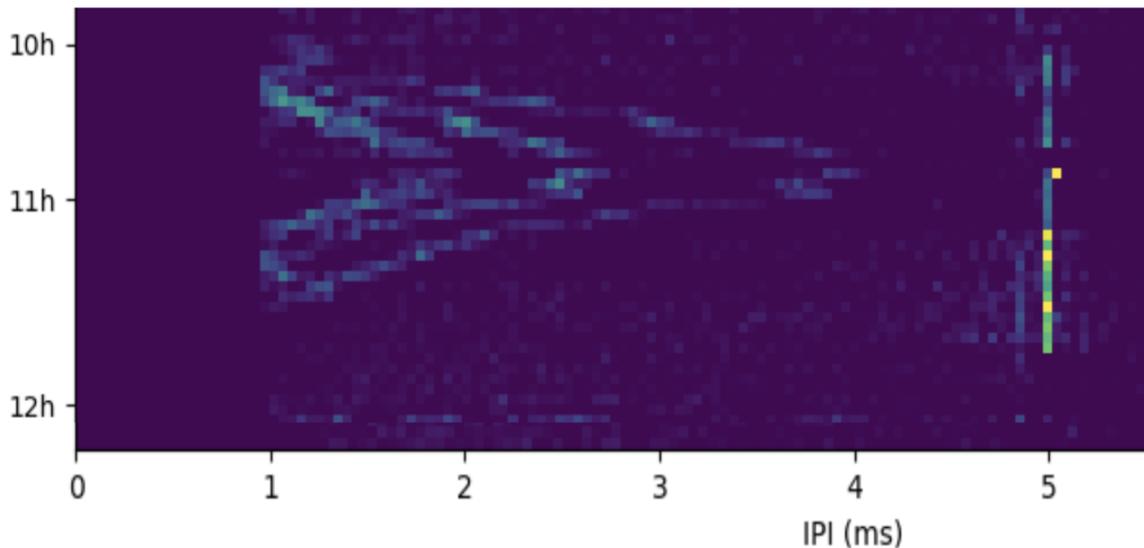


Figure 10.5 : Sondes des cachalots Farouche et Patte d'ours du 29 sept. 2023 mesurée par Baguera, montrant la détection des clics directs (trace vers 5 ms) et leurs réflexions sur la surface (traces à gauche) corrélées aux variations de l'élévation du cachalot. Ces individus ont respectivement fait surface à 11:07 et 12:11 (Farouche), et 10:47 et 12:02 (Patte d'ours).

Estimation de l'âge en fonction de l'IPI

Un clic de cachalot est une impulsion produite à l'avant de la tête, au niveau du museau de singe, qui va ensuite traverser et rebondir dans l'organe acoustique du cachalot et ainsi constituer les différents pulse d'un clic. L'intervalle entre ces pulses est régulier, c'est ce que l'on appelle intervalle inter pulse (IPI). L'IPI est donc dépendant de la taille du cachalot, à son tour dépendante de l'âge de l'animal.

La taille de l'individu peut être calculée grâce à l'équation suivante de Pierantonio et al (2016), calculée à partir de mesures réalisées sur des cachalots de Méditerranée:

$$L = 1.417 \cdot \text{IPI} + 4.632, \text{ avec IPI en ms et L en m.}$$

De plus, basé sur le modèle de croissance de Gambell et al 1972, l'âge peut être estimé. Nous reportons les estimations taille et âge en Tab. 10.1.

Table 10.1 : IPI des cachalots identifiés pendant la mission WhaleWay-4 en 2023, tailles estimées suivant Pierantonio, et âges suivant modèle de croissance de Gambell (1972).

Individu	IPI (ms)	Taille (m)	Âge estimé (an)
Bicorne	4.58	11.12	16
Casnada	4.26	10.67	14
Cyclone	5.35	12.21	21
Farouche	5.14	11.91	19
Inattendu	5.33	12.18	16
Jupiter	5.44	12.34	22
Nada	5.05	11.78	18
Patte d'ours	5.26	12.08	20
Survivor	5.22	12.03	20
ZZtop	5.67	12.67	23

Les estimations de taille sont assez fiables, en revanche si l'estimation de l'âge est fiable grâce à une étude de quinze années à l'Île Maurice et une abaque experte (Ferrari et al. 2024), ce n'est pas encore le cas pour la population de Méditerranée (Tab. 10.1).

En effet, Survivor a été identifié et photographié en 2009 (cf sa fiche d'identité en Annexe) comme adulte. On peut estimer qu'il avait au moins 10 ans en 2009 (version basse). Donc en 2023 il ne peut pas avoir moins de 23 ans, alors que l'estimation par Gambell indique 20 ans. Cela démontre que l'on ne peut pas utiliser le modèle de Gambell pour la population Méditerranéenne.

Evolution de la taille des cachalots sur 10 ans

Les tailles de tous les cachalots rencontrés en 2010-2011 (Glotin et al 2012, rapport PELAGOS DECAV), et lors de différentes missions 2022 et 2023 (Tab. 10.2 et annexe) sont comparées Fig. 10.6.

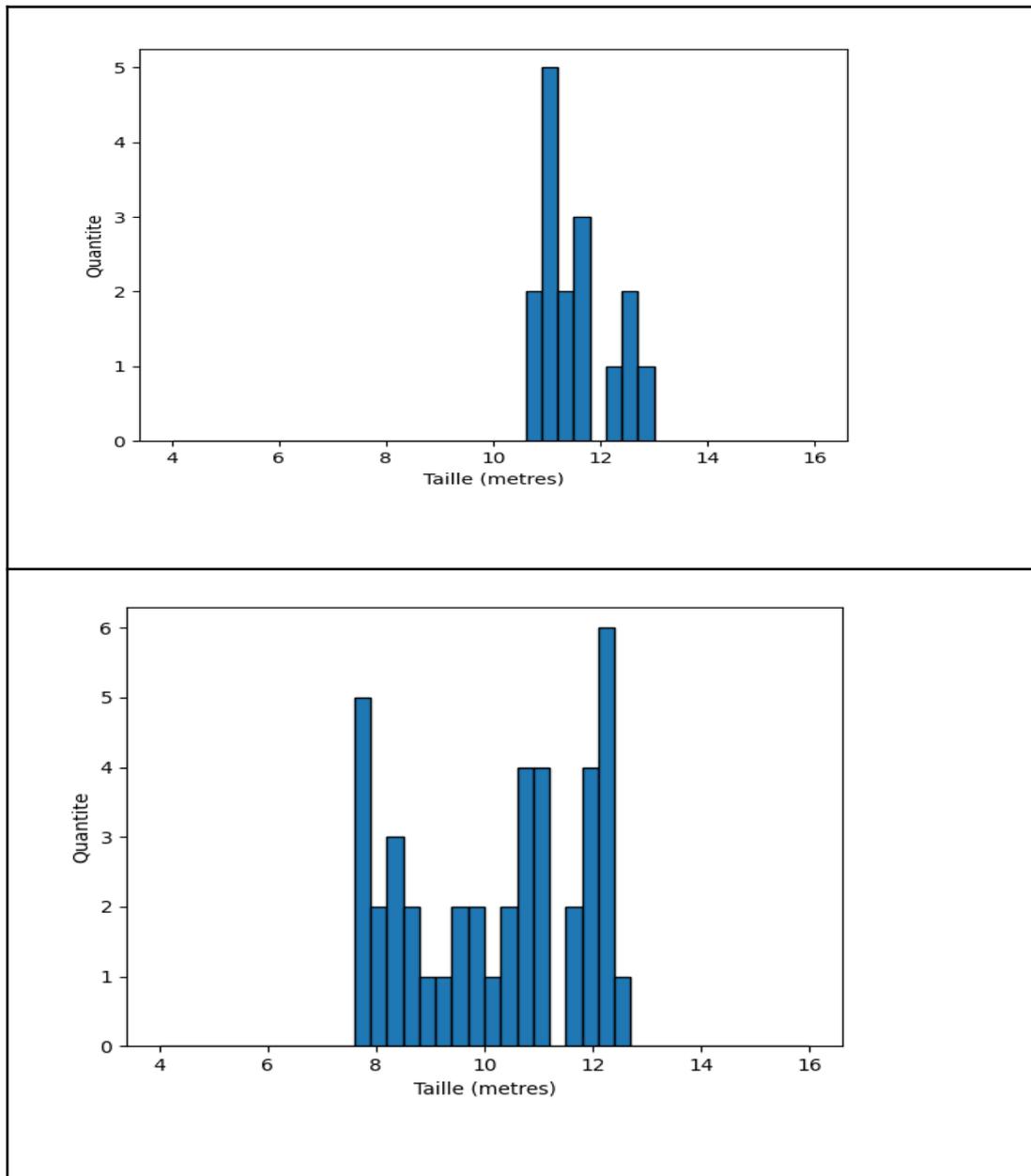


Figure 10.6 : Distribution des tailles des cachalots d'après leur IPI et la loi de Pierantonio et al. 2016. (Haut) Les 16 individus rencontrés autour des Iles d'Or en 2011 et 2012 (Pelagos DECAV Glotin et al 2012). (Bas) Lors des missions 2022 et 2023 sur NE, NW et Sud Pelagos, Corse.

Il en ressort que les observations réalisées au large de Toulon - Cap d'Antibes tendent à une plus grande diversité de taille des individus rencontrés, avec notamment des individus plus petits que ceux rencontrés sur les missions de 2010 et 2011 au large des Iles d'Or.

Cela pourrait être le signe d'une population en développement avec la présence de femelles adultes et de juvéniles (individus inférieurs à 10 m), ou bien indiquer un déplacement des groupes sociaux (femelles adultes et juvéniles) vers les côtes varoises alors qu'ils étaient plutôt retrouvés au Sud-Ouest vers les Baléares par exemple.

Tableau 10.2 : Date et lieux des différents IPI intégrés dans la Figure 10.6. On ne sait pas ici s'il y a eu recapture entre DECAV et autres.

<i>Mission</i>	<i>Date</i>	<i>nombre d'individus = nombre d'IPI différents</i>	<i>Lieu</i>
<i>DECAV</i>	<i>de 2010 à 2011</i>	<i>16</i>	<i>Sud Iles d'Or</i>
<i>SphyrnaOd.</i>	<i>20200114</i>	<i>6</i>	<i>Mejean</i>
<i>WhaleWay 1</i>	<i>2022-06-05 - 2022-06-18</i>	<i>3</i>	<i>Large Corse</i>
<i>WhaleWay 2</i>	<i>2022-09-12 - 2022-09-21</i>	<i>7</i>	<i>Large Corse</i>
<i>WhaleWay 3</i>	<i>2023-04-02 - 2023-04-06</i>	<i>6</i>	<i>Large cap Sicié</i>
<i>WhaleWay 4</i>	<i>2023-09-23 2023-10-07</i>	<i>18</i>	<i>Large Toulon-Cap d'Antibes</i>
<i>SP1</i>	<i>2023-05-27 - 2023-06-03</i>	<i>3</i>	<i>Large Toulon-Cap d'Antibes</i>
<i>SP2</i>	<i>2023-09-09 - 2023-09-15</i>	<i>3</i>	<i>Large Toulon-Cap d'Antibes</i>
<i>SP3</i>	<i>2023-09-16 - 2023-09-22</i>	<i>2</i>	<i>Large Toulon-Cap d'Antibes</i>

11. Ethoacoustique des cachalots et rythme nyctéméral

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 engendrées par l'explosion du trafic maritime. Les données acoustiques acquises depuis des années par les réseaux de surveillance forment un référentiel qui permettra de mesurer l'évolution concomitante de l'anthropophonie et des populations de cétacés même cryptiques. Baguera, ou sa variante sur quille de drone, permet de calculer la dynamique et le comportement des cétacés sur la base de leurs vocalises ou clics.

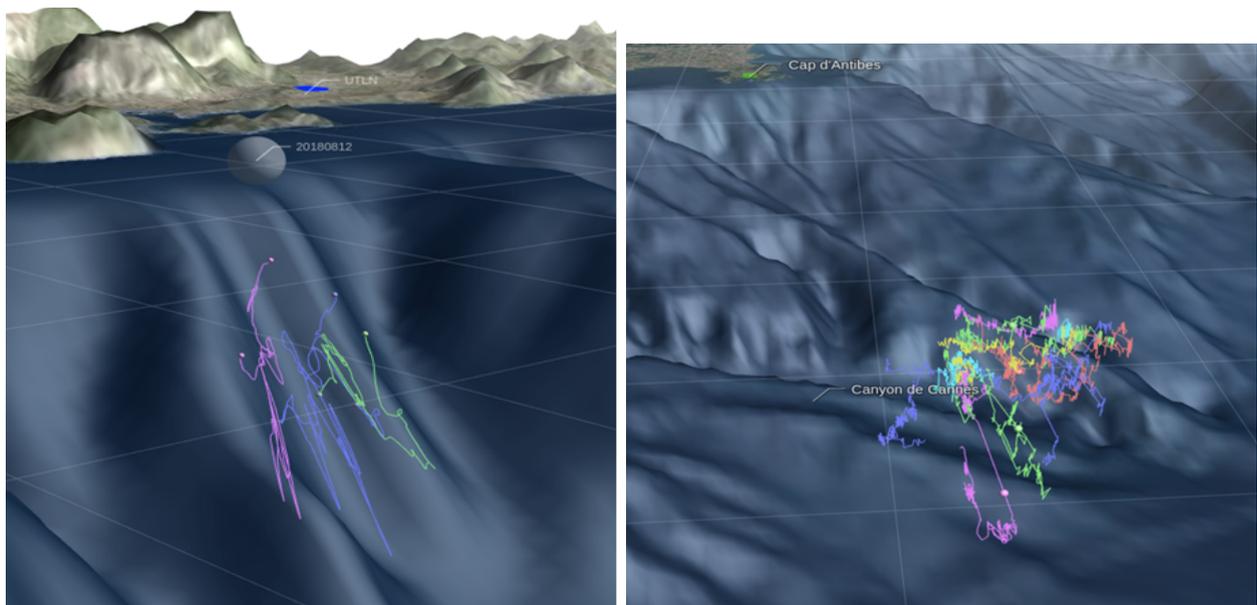


Figure 11.1 : (Gauche) Trois sondes 3D calculées par acoustique passive depuis la surface, d'un même cachalot au cap Sicié en août 2018 (Pouard et al 2019). (Droite) meute de 6 cachalots au large du haut-fond Méjean, vers le cap d'Antibes le 14 janvier 2020 (Glotin et al 2020).

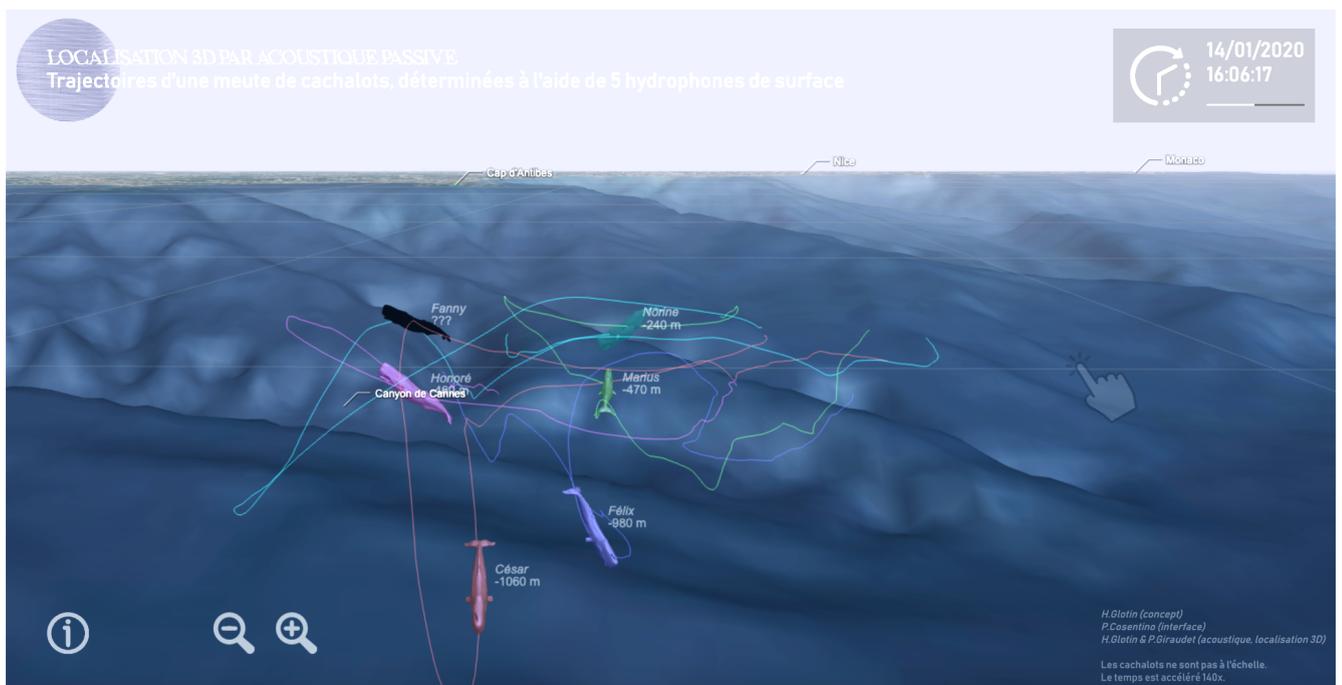


Figure 11.2 : Chasse en meute de cachalots du 14 janvier 2020 durant 3h, calculée d'après les TDoA depuis l'antenne Baguera sur Sphyrna, de 6 cachalots au large du haut-fond Méjean, vers Monaco, restant centrés pendant 3h dans un même vortex, front océanique où se concentrent leurs proies. Ils alternent par trio ou duo des plongées synchrones et des phases surface ensemble (animation complète disponible sur http://sabiody-lis-lab.fr/pub/Pelagos2023_LIS_material/meute20200114.html, présentée à l'exposition du Musée d'Histoire Naturelle du Var d'Avril 2023 à Avril 2024, commissaires Giraudet et Glotin (détails et statistiques dans Glotin et al 2020).

Le déploiement d'antenne Baguera sur Sphyrna a résulté à la détection durant 3h, de 6 individus de très jeunes à adultes, nommés pour l'étude Fanny (IPI=2.0 ms), Marius (IPI=2.2 ms), Felix

(IPI=2.4 ms), Honoré (IPI=2.5 ms), Norine (IPI=2.6 ms), César (IPI=2.9 ms). A chaque instant de leur piste, la profondeur est indiquée à côté du nom (Figs. 11.1 et 11.2).

Les cachalots semblent construire un maillage d'émetteurs-récepteurs distant d'environ 500 m les uns des autres d'après le calcul sur l'équation du sonar (Glotin et al 2020). Ils useraient pour chasser en meute d'un principe de bio-multistatisme connu en recherche sous-marine: les informations engendrées par les sonars de chacun seraient partagées par tous, chacun profitant de l'information des échos des clics émis par les autres.

Ce résultat montre également que ces cachalots restent pendant des heures dans des vortex formés par les courants, augmentant leur temps de présence sur des zones à risque de collision. Il sera donc important de coupler l'estimation des courants marins dans les alertes anti-collision.

Les comportements de chasse ont également pu être suivis durant WW-4 en septembre 2023. Le suivi de ces individus sur plusieurs sondes a permis de déterminer que la distance moyenne parcourue entre deux sondes est de 3 km. De plus, grâce au point précis de sonde, la profondeur de la sonde et la durée de la majorité des sondes présentées sur la carte ont pu être déterminées. A partir de cela, la tortuosité des trajectoires a été calculée et des analyses ont été conduites afin de déterminer s'il existe un lien entre les paramètres des sondes, la taille estimée des individus, l'heure du jour, la profondeur, la proximité à la côte et la proximité au talus continental (Fig. 11.3).

Plusieurs corrélations significatives ressortent entre les observations terrain (on exclut bien sûr les corrélations fortes par construction comme IPI avec taille). Notamment une corrélation positive a été trouvée entre la durée d'une sonde et la distance entre les points surface d'un cycle de sonde (pearson=0.5, p-value=0). Cette corrélation, qui peut paraître évidente, est très intéressante car cela signifie que la durée de la sonde n'est pas influencée par la profondeur et que les trajectoires sous-marines sont relativement rectilignes. Les cachalots pourraient plonger dans une "strate" ou un courant d'eau (ou sur une pycnocline) à profondeur constante indépendamment de la profondeur maximum du lieu. Il pourrait par exemple s'agir de la couche d'eau à la séparation avec le courant de "surface" ligure ou bien la couche d'eau intermédiaire levantine, qui subit actuellement un profond changement (température et salinité) lié à l'augmentation de l'évaporation à cause du réchauffement climatique car elle se forme dans le bassin oriental de la Méditerranée.

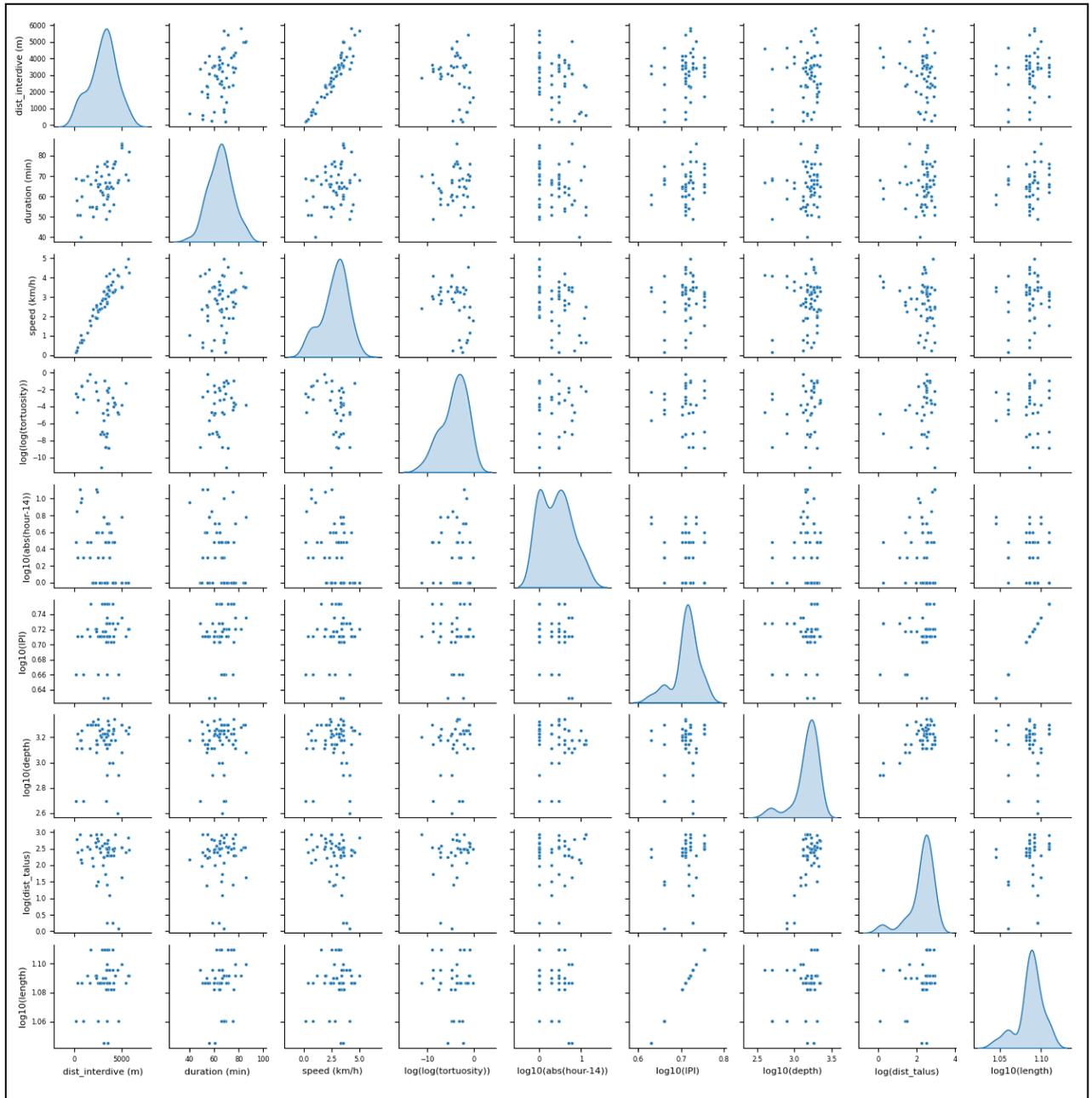


Figure 11.3 : Scatter plot entre les différents paramètres étudiés, et la distribution de probabilité de chacune dans la diagonale estimée par des gaussiennes.

L'heure semble également influencer les cycles des cachalots. Lorsque l'heure s'écarte du midi solaire (fixé à 14:00 heure locale), des corrélations importantes sont trouvées (Fig. 11.4). Les cachalots semblent modifier leur profil de sonde au cours de la journée. Ainsi, plus on s'éloigne du midi solaire, plus les plongées sont courtes en distance et en durée (pearson= -0.2570, p-value=0.049) et le déplacement lent (les individus diminuent leur vitesse) (correlation temps au midi solaire à la vitesse= -0.3668 p-value=0.008).

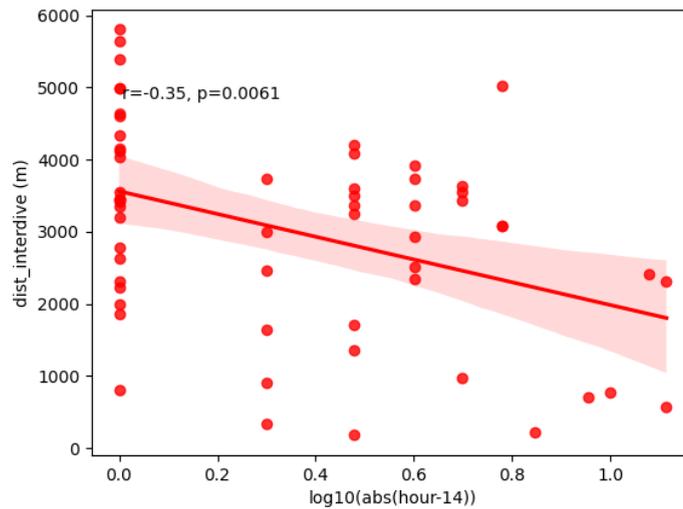


Figure 11.4 : Relation entre l'écart à l'heure solaire et la distance parcourue lors d'une sonde.

Les premières et dernières sondes, les plus éloignées du midi solaire, pourraient ainsi être plus propices pour les collisions. En effet, si les individus effectuent des plongées moins longues en temps, cela signifie que les surfaces vont être plus nombreuses, conduisant à un ratio plus important de temps en surface.

En ce qui concerne les rythmes des plongées, chaque cycle entre deux sondes (Descente-chasse-remontée-respiration en surface) dure en moyenne 68 minutes, (calculés sur 63 cycles de 12 individus, minimum : 49 minutes, maximum : 86 minutes). Sachant que les individus sont en surface pour respirer pendant une dizaine de minutes, qu'ils arrêtent d'émettre des sons environ 5 minutes avant de faire surface et reprennent environ 1 minute après avoir plongés, les cachalots ne sont pas détectables acoustiquement pendant environ 15 à 18 minutes dans chaque cycle (Fig. 11.5).

Les autres paramètres étudiés, notamment la distance à la côte et au talus continental, ne sont pas significativement corrélés aux paramètres des sondes.

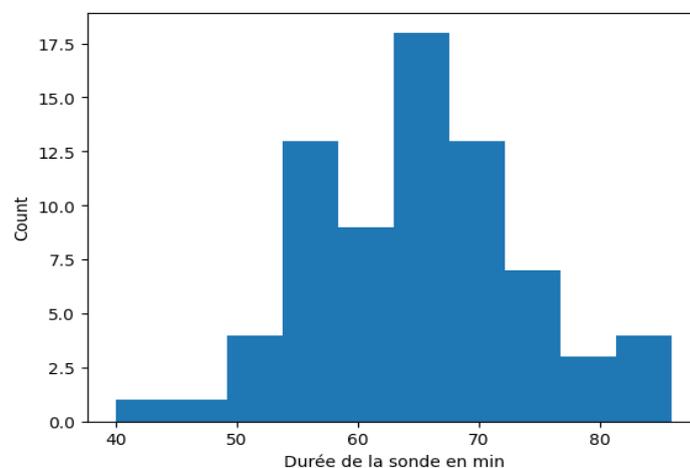


Figure 11.5 : Histogramme de tous les cycles mesurés (63) durant la mission WhaleWay-4, comprenant en moyenne 40 souffles, 12 sec. par souffle, soit 10 minutes de respiration environ.

La tendance des horaires favorables aux détections acoustiques sur BOMBYX-1 a été retrouvée sur BOMBYX-2 en 2023. Sur une base journalière, deux fois plus de cachalots ont été détectés par acoustique entre 7:00 et 18:00, pendant les périodes de jour, que pendant la nuit (Fig. 11.6). C'est une tendance à considérer dans les systèmes anticollision par acoustique.

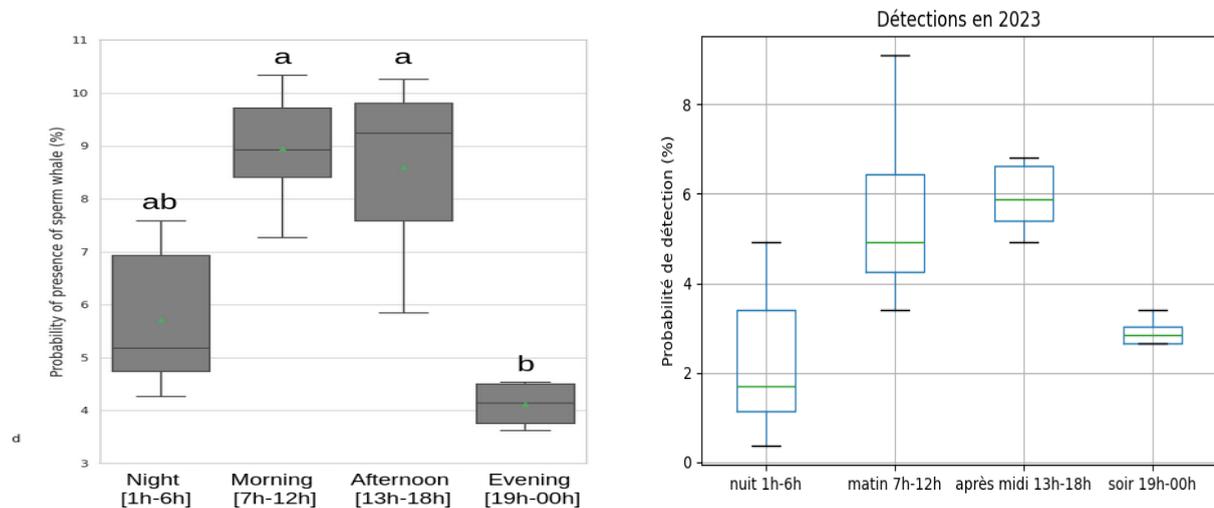


Figure 11.6: (Gauche) tendance par tranche horaire des détections sur BOMBYX-1 de 2015 à 2018. (Droite) Idem sur BOMBYX-2 en 2023.

Une estimation de la présence de cachalots dans une zone similaire a été réalisée et a montré un taux de détection plus élevé pendant les heures de jour (André et al. 2017). Il est possible, comme le présente dans l'étude BOMBYX-1 le pic d'activité acoustique des cachalots centré sur le milieu de journée, au plus loin des pics anthropophoniques (Fig. 16.1), que les cachalots se rapprochent des bords des falaises et canyons (donc dans la zone de détection des bouées BOMBYX) pendant la journée pour se nourrir en évitant ainsi les pics de bruits des ferries de l'aube et de la soirée. Et/ou il est possible que les cachalots suivent le rythme circadien, étant actifs et chassant la journée, et inactifs au repos (silencieux) la nuit.

Pendant cette mission, les cachalots observés se trouvaient principalement dans deux zones très anthropisées : une au Sud de Nice-Monaco d'environ 60 km de long sur 10 km de large situé entre 7 km et 25 km des côtes, et une zone située de 7 km à 20 km au large de Port-cros couvrant 20 km sur 10 km (Fig. 9.1) identique à celle des détections acoustiques de cachalots dans le projet Pelagos DECAV (Glotin et al 2012).

Les canyons au Sud de Nice semblent être une zone particulièrement appréciée par les cachalots qui y passent plusieurs heures, voire jours, pour chasser (Fig. 9.2). Les individus observés dans cette zone seraient des mâles adultes ou subadultes (comme l'indique leur IPI, trop grand pour une femelle). Plusieurs lignes de ferries, au départ quotidien de Nice, traversent cette zone. Plusieurs lignes reliant l'Italie au Maroc et à l'Espagne passent également au sud de cette zone. Bien que les observations n'aient pas été étendues au Sud, notamment car les observations ne

conduisent pas à des détections dans cette direction, ces lignes représentent des bandes difficiles à exploiter pour les cachalots car elles sont exposées aux collisions avec les navires, réduisant leur zone de chasse.

Le recouvrement entre zone de chasse et lignes de ferries peut également être constaté sur la deuxième zone de suivi qui se trouve au sud de Port-cros. Les deux jours d'observation ont conduit au suivi d'un grand nombre d'individus, environ une quinzaine (respectivement 8 ou 9 puis 6). Il s'agit ici de femelles adultes (une confirmée par photo-identification) et/ou de juvéniles comme le suggère l'analyse des IPI (les IPI retrouvés sont relativement petits, il ne peut donc s'agir de mâles adultes). Sachant que les groupes sociaux de cachalots sont constitués de femelles adultes et de leurs jeunes, cela semble correspondre aux individus rencontrés au Sud de Port-cros.

Ces zones, particulièrement importantes pour l'alimentation des cachalots, mais également lieu de vie et potentiellement de reproduction, sont traversées quotidiennement par des ferry reliant la Corse et le continent. Il existe donc dans ces zones un risque de collision important.

12. Autres détections d'odontocètes dans Stochaedes

Les antennes Rascass et Rayol ont été placées à proximité du canyon de Stochaedes et ont permis de détecter différentes espèces de cétacés. Il n'y a pas eu de détection de rorqual mais il y a une détection d'un cachalot sur la station Rayol le 4 mars 2022 (Fig. 12.1). Nous avons aussi sa faible trace sur Rascass. Cela démontre l'intérêt de station fixe à bas coût pour le suivi des passages des cétacés dans Stochaedes et le suivi dB. A court terme les composants étant maintenant disponibles, nous poserons une station fixe sur la plage du Rayol en convention avec le jardin du Rayol et suivant notre autorisation d'écoute.

D'autre part, le détecteur de sifflement de dauphins Ceta-CNN, développé par l'équipe a été passé sur l'ensemble des données de Rascass et Rayol. L'ensemble des détections de Ceta-CNN ont été manuellement vérifiés. Il en résulte plusieurs passages de dauphins (Fig. 12.2 à 12.10). Il n'y a pas de détection sur Rascass sur un total de ~113h d'enregistrement en 2021 et ~20h d'enregistrement en 2022. Sur Rayol, il y a 2 détections de sifflements en 2021 sur un total de ~85h d'enregistrement et 3 détections en 2022 sur ~28h d'enregistrement.

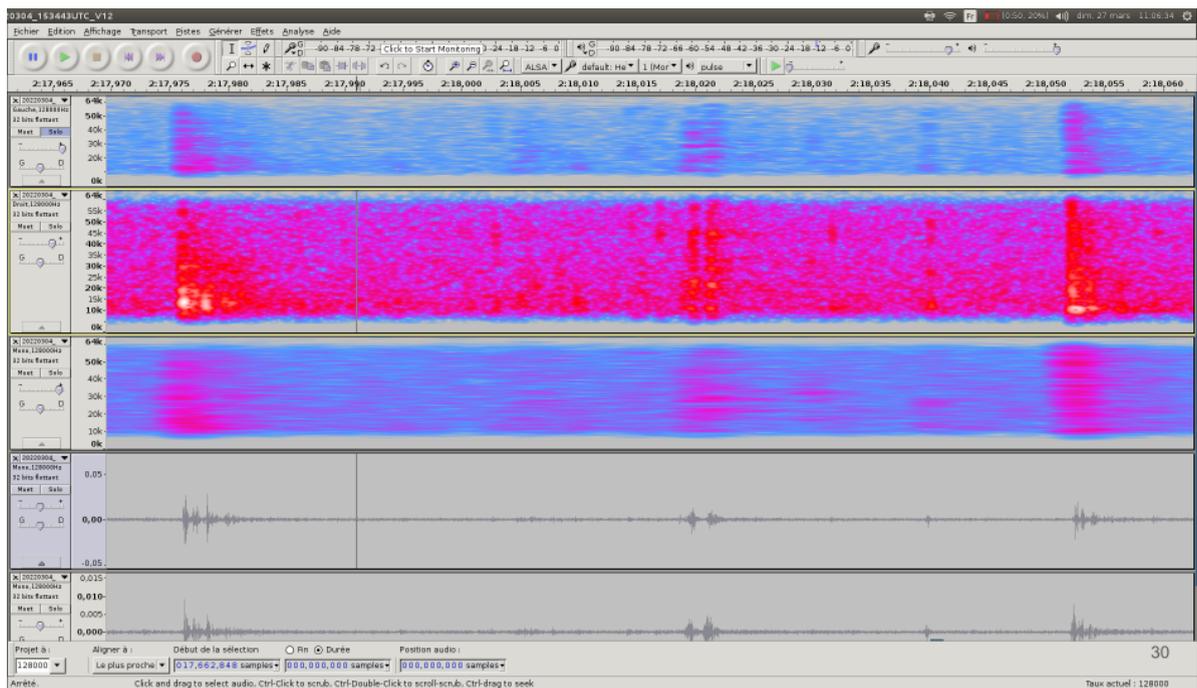
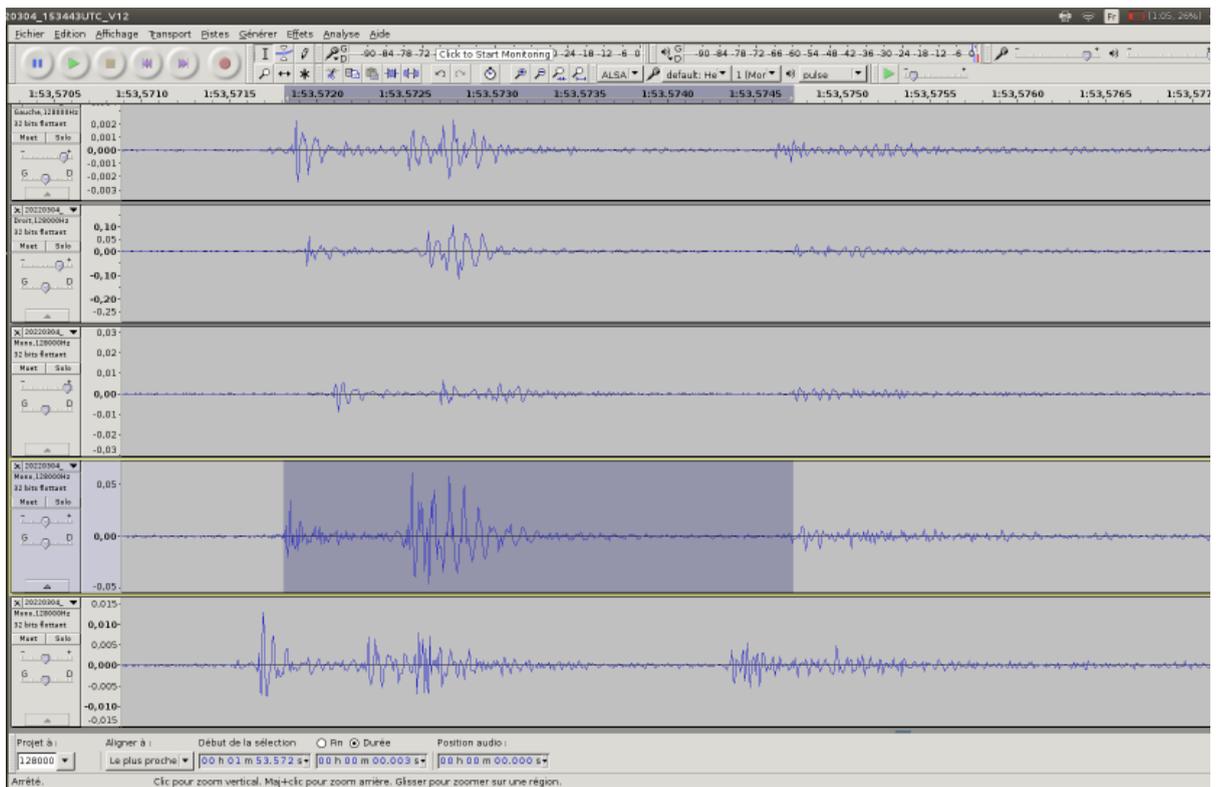


Figure 12.1 : Mesures de l'antenne *Stochoaedes Rayol* le 4 mars 2022 montrant un cachalot détecté vers 15:34, d'IPI environ 2.5 ms. (Haut) En temps sur les 5 hydrophones. (Bas) En temps-fréquence.

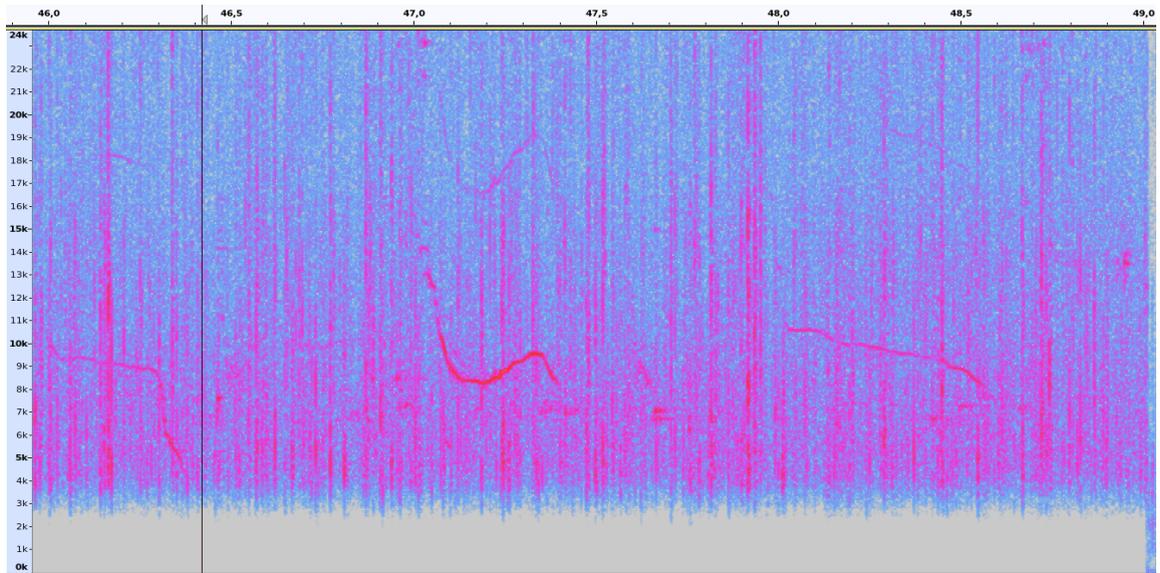


Figure 12.2 : Spectrogramme représentant des sifflements de delphinidés (08/08/2021 à 00:54).

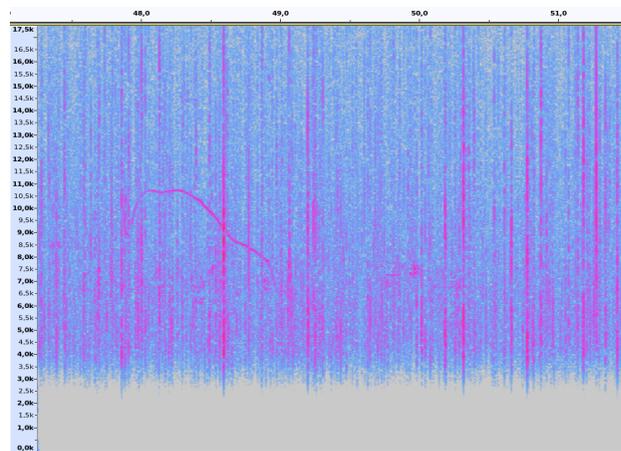


Figure 12.3 : Spectrogramme représentant des sifflements de delphinidés (08/08/2021 à 03:05).

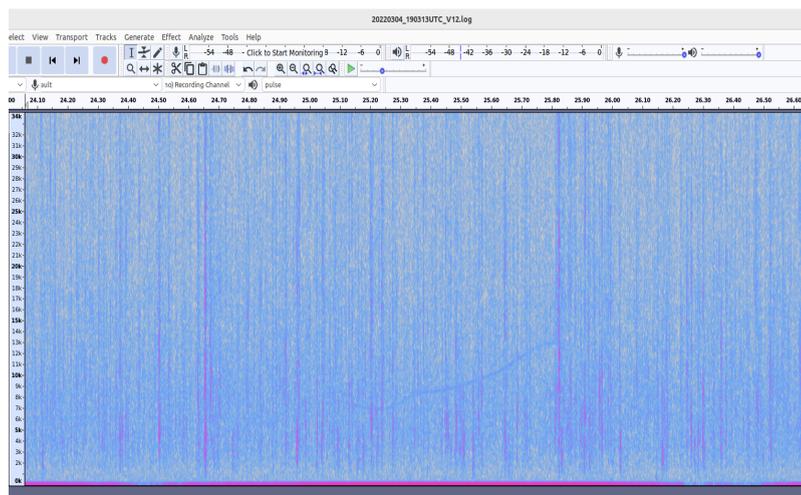


Figure 12.4 : Vocalise d'odontocète sur Rayol, croissant de 6 kHz à 15 kHz, durée de 0.7 seconde le 04 mars 2022 à 19:03.

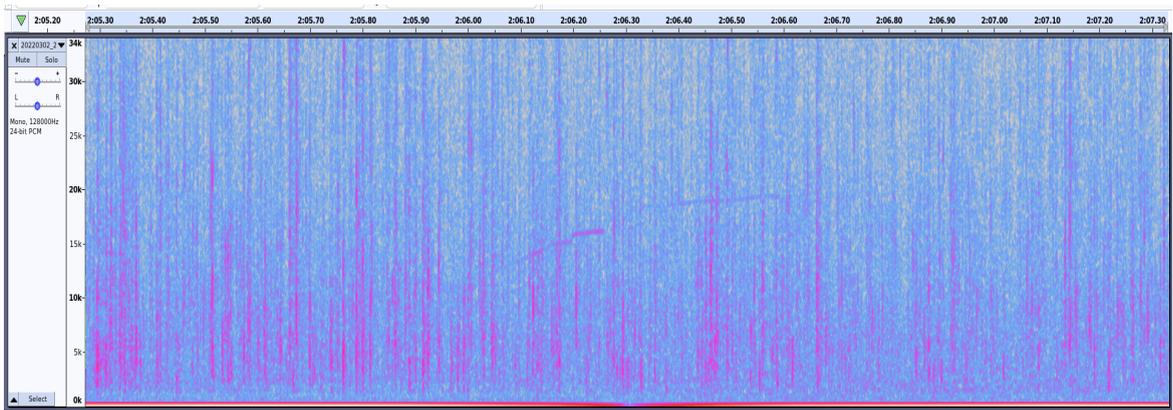


Figure 12.5 : Vocalise d'odontocète sur Rayol, le 02 mars 2022 à 23:09.

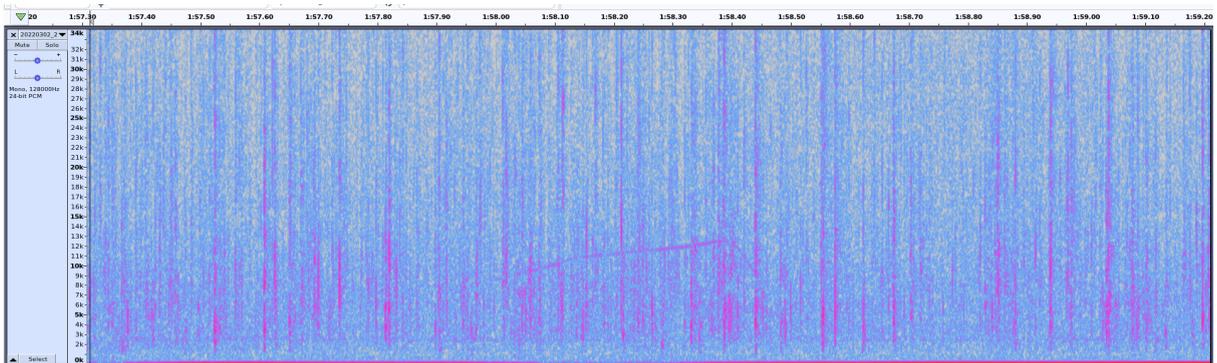


Figure 12.6 : Vocalise d'odontocètes sur Rayol, le 02 mars 2022 à 23:15.

Des trains de clics de delphinidés ont également pu être détectés (ex. Fig. 12.7).

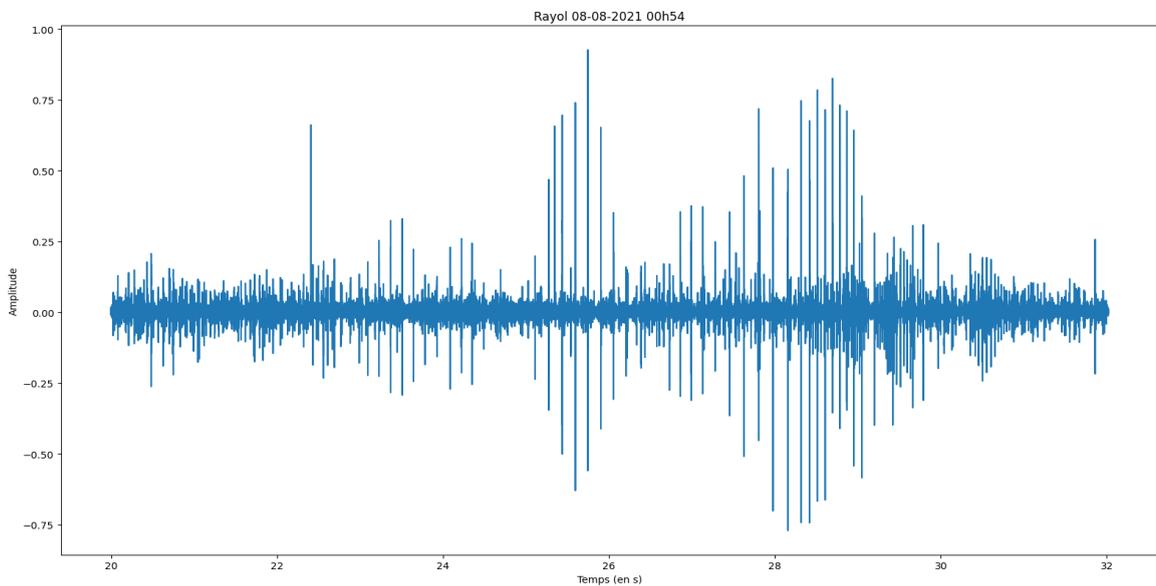


Figure 12.7 : Trains de clics détectés entrelacés de 2 ou 3 dauphins. On mesure un ICI de 0.1 sec environ pour les plus grands ICI.

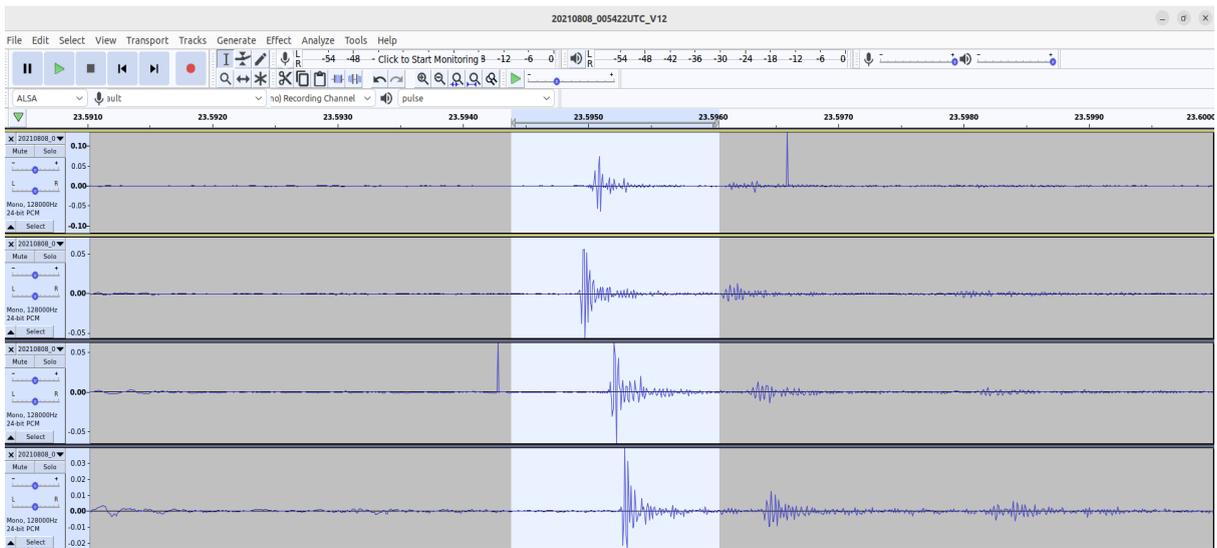


Figure 12.8 : Zoom sur un clic et ses rebonds surface ou fond.

Ces résultats montrent qu'il est possible de détecter mais aussi de dénombrer le passage d'odontocètes par une antenne simple avec 3 ou 4 hydrophones. Une station pérenne est en cours de pose à la suite de cette étude dans Stochades pour mettre en œuvre le savoir faire développé durant ce projet PELAGOS.

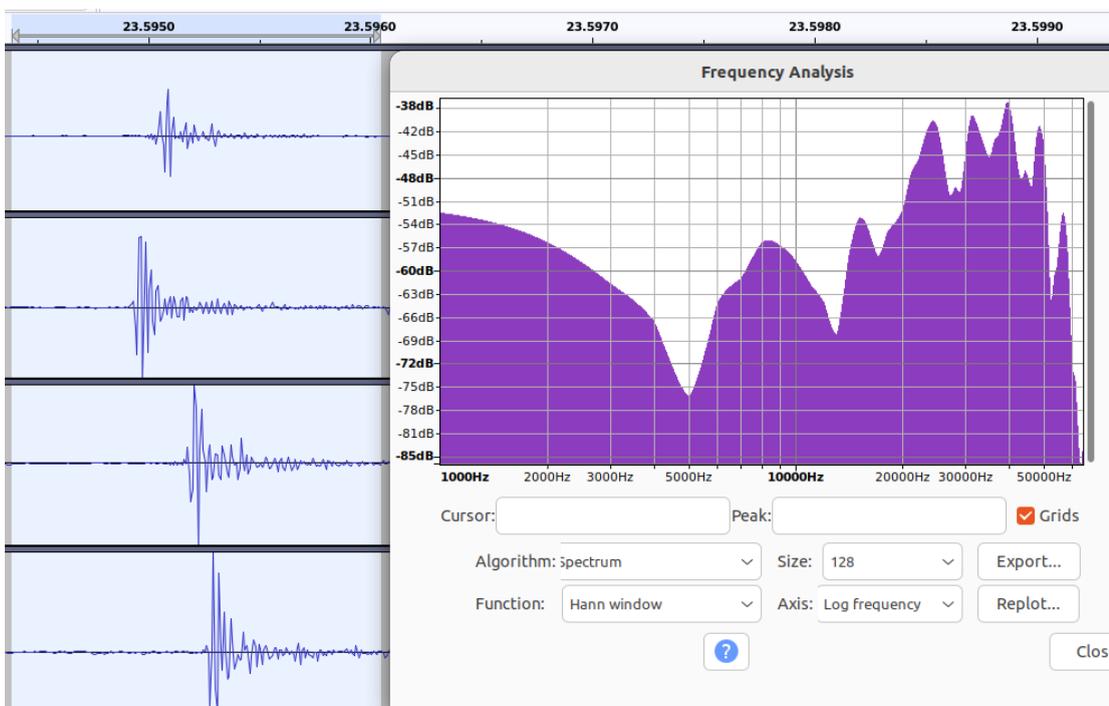


Figure 12.9 : Détection d'un clic d'odontocète, 0.1 ms de long, 3 battements, fréquence centroïde vers 40 kHz mais déjà dans l'antialiasing et perte en dB (signal du 8 août 2021 à 0:54).

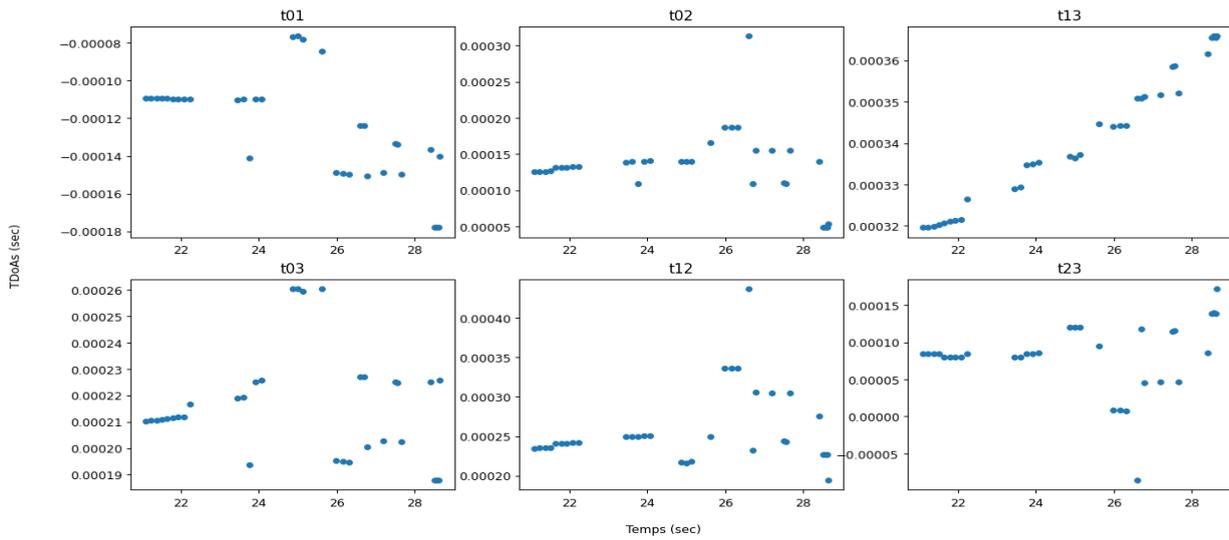


Figure 12.10 : Exemple des 6 TDoAs du train de clics de delphinidés du 08/08/2021 à 00:54. Il y a au moins 2 individus comme le montrent les deux pistes dans le cadran en bas à gauche

PARTIE III : RESULTATS sur les RORQUALS

13. Bilan des détections : calendrier 2009-2023

Les données acquises par KM3Env au niveau d'un fort trafic maritime ont été couplées aux données de BOMBYX-1 et BOMBYX-2 pour la détection des rorquals (Fig. 13.1 et Tab. 13.1).

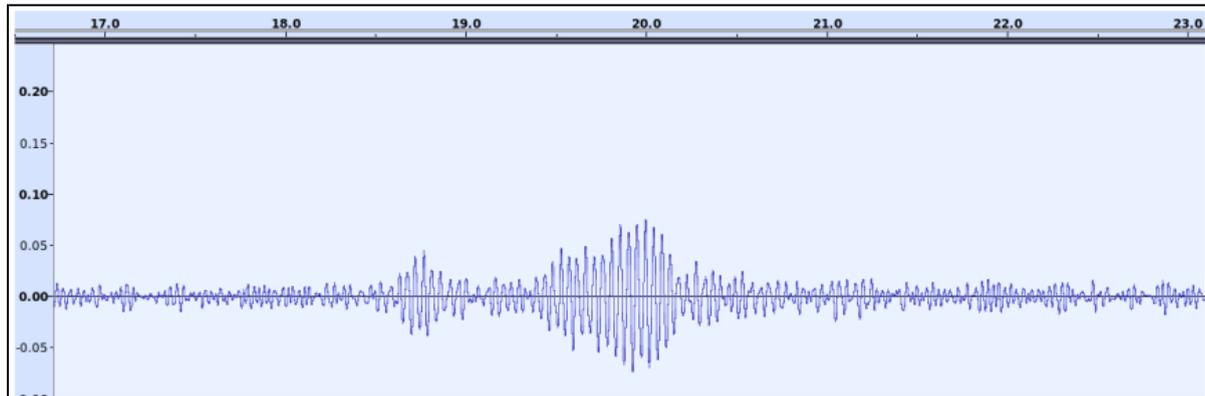


Figure 13.1: Exemple de pulse de rorqual enregistré l'été 2022 par BOMBYX-2 (temps, amplitude).

Table 13.1 : Exemples de fichier avec URL des détections de rorquals disponibles sur http://sabiodylis-lab.fr/pub/Pelagos2023_LIS_material/geonature/rorqualexempledectionacoustique

20220807_060937UTC_V12.wav	20220811_080942UTC_V12.wav
20220812_130944UTC_V12.wav	20220823_050946UTC_V12.wav
20221202_160006UTC_V12.wav	20221205_130006UTC_V12.wav

Sur la période 2015-2018, les détections semblaient montrer une activité de chant accrue en automne pour les pulses à 20 Hz. Pendant la campagne de BOMBYX-2, cette tendance est difficile à confirmer ou infirmer. En effet, aucune détection de rorqual n'a été relevée dans les enregistrements de novembre 2022, mais en 2023 le taux de détection le plus élevé était fin septembre.

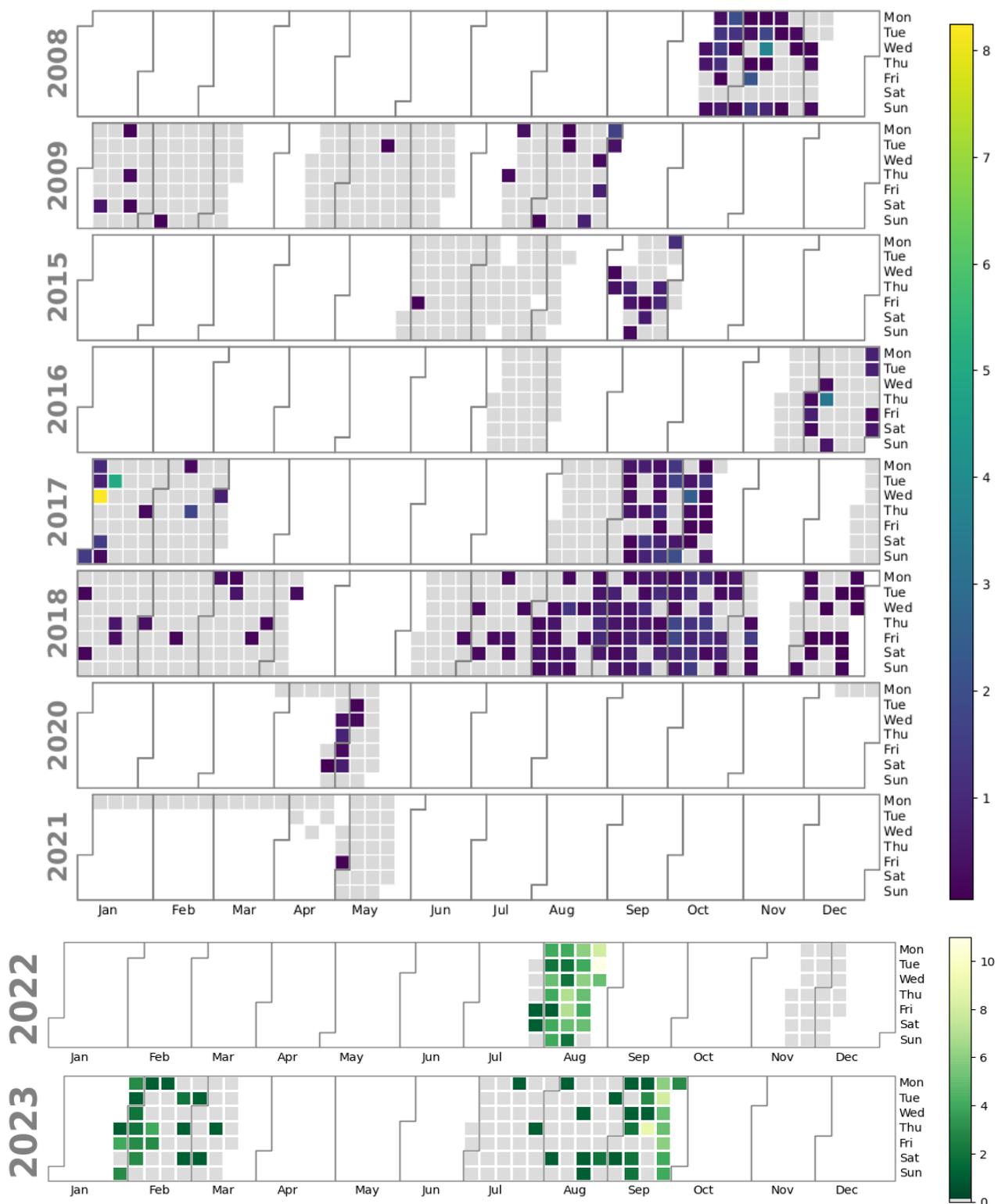


Figure 13.2 : nombre de trains de pulses de roquail détectés normalisé par le nombre d'heure d'écoute sur Boussole en 2008 2009 (Laran et Glotin et al 2011) et BOMBYX-1 de 2015 à 2018 (Best et al 2022) et KM3Env de 2020 à 2021, et BOMBYX-2 de 2022 à 2023. Les cases blanches correspondent aux jours sans enregistrement, les cases grises aux jours sans détection (seuil de détection positive= 0.75 pour 2022, =0.45 pour 2023, échantillons de 5s).

14. Défilements de rorquals

Nous complétons cette analyse par l'estimation et l'observation de perte dB de pulses de rorqual. BOMBYX mesure leur atténuation en dB de l'ordre de 7 dB c'est à dire un niveau acoustique divisé par 2. Il s'agit donc ici d'une trajectoire à grande vitesse radiale, un animal qui se déplace vers le large, donc avec un fort risque de croiser le rail maritime (Fig. 14.1). A l'inverse, BOMBYX mesure leur gain de + 2 dB, c'est-à-dire un niveau acoustique multiplié par racine de 2 environ. Il s'agit donc ici d'une trajectoire à faible vitesse radiale, c'est un dire un animal qui vient vers l'antenne mais en tangente par rapport au disque de détection de BOMBYX-2 (Fig. 14.2). Ce n'est pas un cas à fort risque de collision.

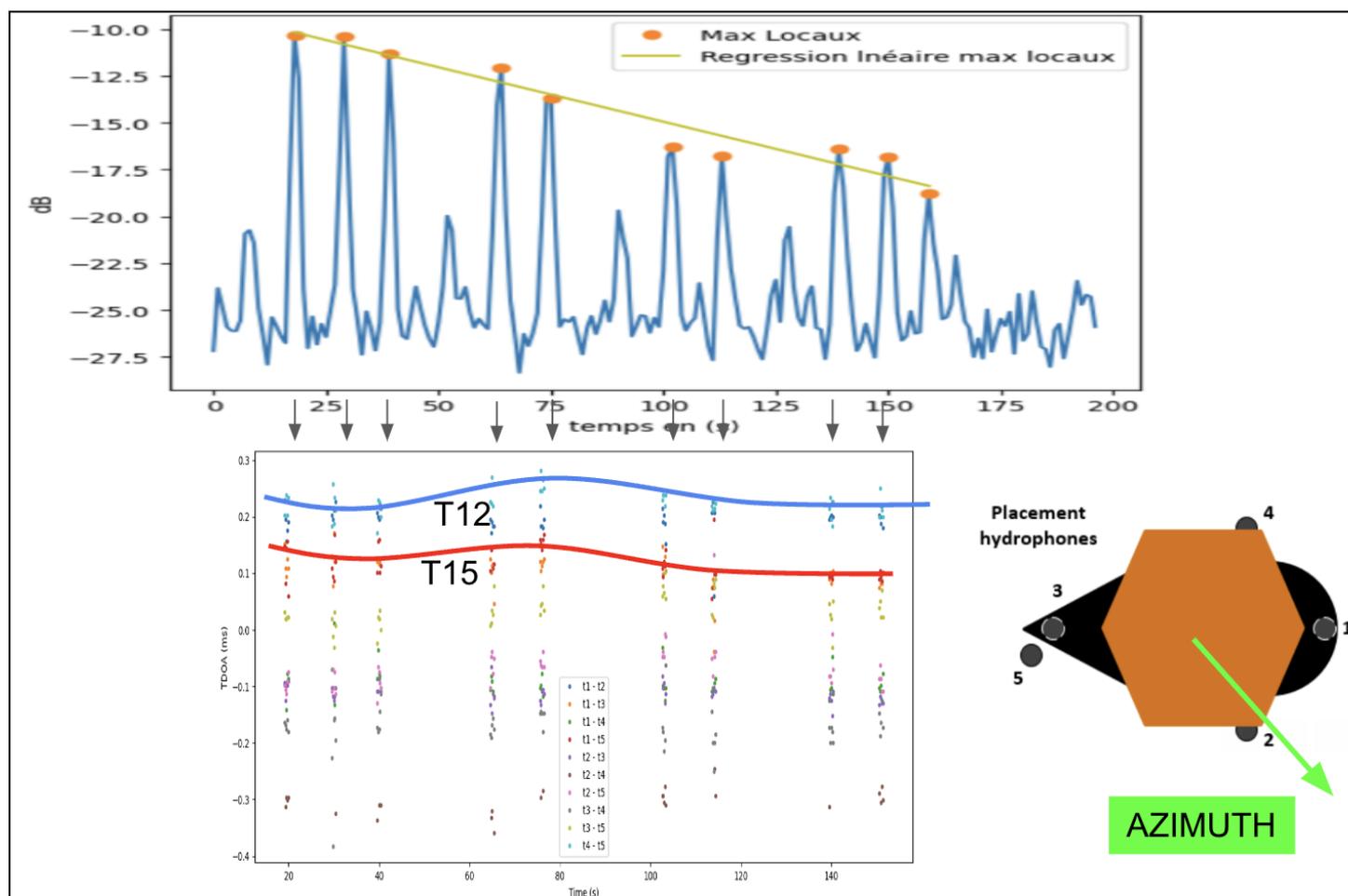


Figure 14.1 : Mesure du déplacement d'un rorqual sur 3 minutes, et 10 pulses de rorqual émis, montrant le défilement de l'animal avec la perte en dB, et la variation faible en TDoA indiquant une trajectoire linéaire (exemple du 29 juillet 2022 BOMBYX-2) (crédit H. Glotin).

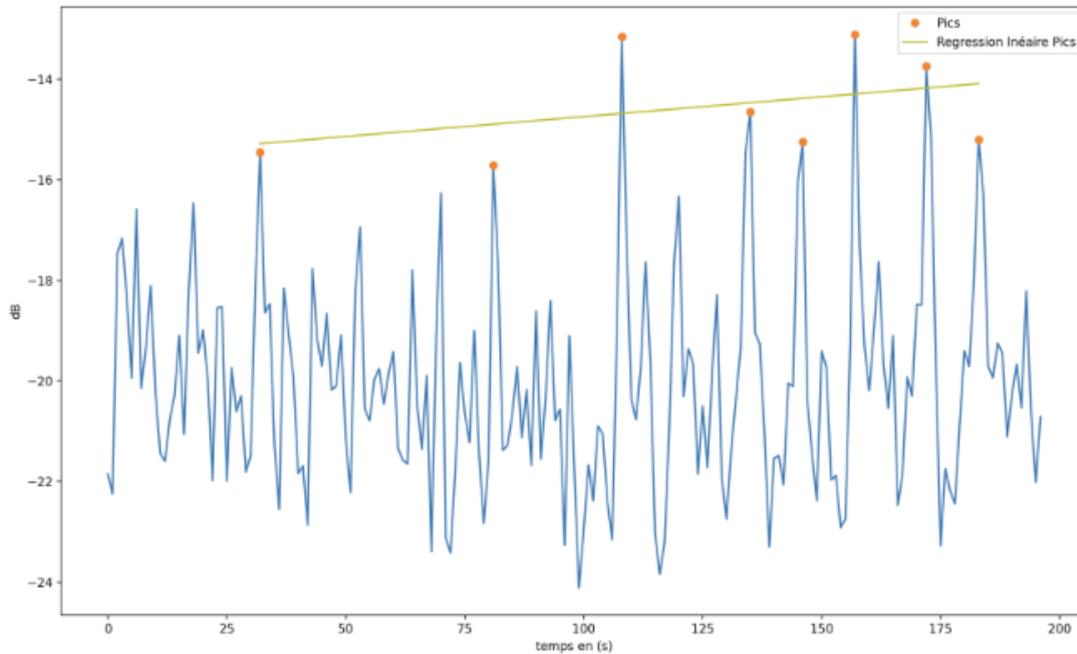


Figure 14.2 : Déplacement non rectiligne d'un rorqual sur 3 minutes, avec ses 8 pulses de rorqual, enregistré le 23 août 2022 sur BOMBYX-2, Monaco (crédit H. Glotin).

15. Trajectoires 2D de rorquals Sud Iles d'Or

Nous avons appliqué nos processus IA de détection de pulse de rorqual puis les corrélations sur nos données du KM3Env enregistrées aux printemps 2020 et 2021 (en 2022 et 2023 les lignes de jonctions furent en panne). Le résultats (Fig.15.1-4) (Best et al 2022) tendent à montrer un déplacement préférentiel des rorquals au dessus de la station KM3Env (point blanc) du SE vers NW. D'autres trajectoires sont en calcul sur 2021. Ces résultats sont la preuve de concept de la qualité des processus sur les données KM3Env que nous intégrons donc dans nos systèmes de prévention anti-collision cétaqué-traffic joints à BOMBYX-2.

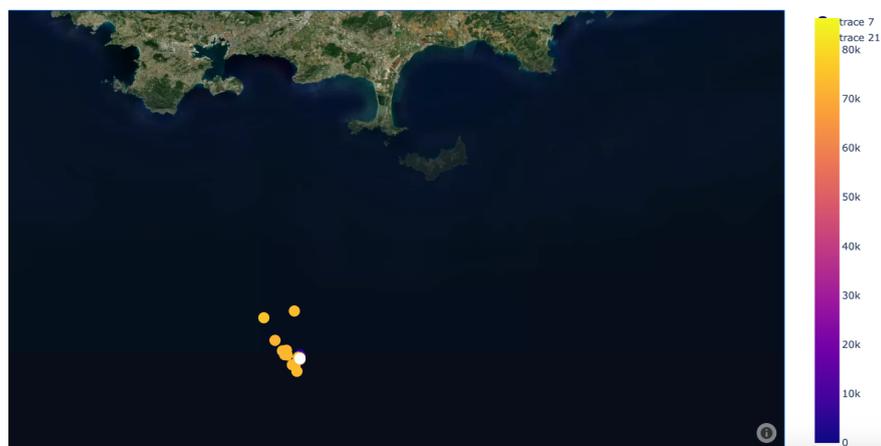


Figure 15.1 : Situation générale de la station KM3Env (point blanc) cablée en fibre optique vers Toulon avec points de trajectoire d'un rorqual le 1er mai 2020, le temps s'écoulant en couleur du bleu 0:00 vers jaune 23:59 (color bar), pour le 1er mai 2020 (crédit P. Best).



Figure 15.2 : Zoom sur des exemples de trajectoires 2D de rorqual calculées sur les trois hydrophones de KM3Env le 29 avril 2020. KM3Env est le point blanc (crédit P. Best).



Figure 15.3 : Zoom sur des exemples de trajectoires 2D de rorqual calculées sur les trois hydrophones de KM3Env le 1 mai 2020. KM3Env est le point blanc (crédit P. Best).



Figure 15.4 : Zoom sur des exemples de trajectoires 2D de rorqual calculées sur les trois hydrophones de KM3Env le 2 mai 2020. KM3Env est le point blanc (crédit P. Best).

PARTIE IV : PAYSAGES ACOUSTIQUES

16. Anthropophonie autour des Iles d'Or

Les bruits anthropiques ont une influence négative sur les mammifères marins. Ils pourraient affecter leur comportement et de nombreux processus importants pour leur bien-être (orientation, communication). Cette influence dépend de nombreuses caractéristiques acoustiques dont l'intensité, la largeur de bande ou la durée de l'exposition. Nous avons comparé l'évolution du niveau de pression acoustique en fonction de la présence/absence de cachalots sur BOMBYX-1. Les résultats ont montré une différence significative entre les amplitudes lors de la présence/absence des cachalots. On montre les distributions des amplitudes mesurées pour les périodes avec et sans cachalot pour l'octave 12.8 kHz (cette fréquence a été choisie car elle se situe approximativement au centre des émissions acoustiques du cachalot). Ces résultats montrent que lorsque le niveau de bruit anthropique (bateau) est plus faible, les cachalots sont présents. En d'autres termes, les cachalots sont statistiquement moins présents dans les environnements plus bruyants. La Fig. 16.1, à droite, en apporte une preuve supplémentaire: à 04:00 et à 21:00 (pics de bruit des ferrys), la présence de cachalots est la plus faible. A noter que l'achat en cours de la base de données des AIS sur cette période affinera l'analyse ferry par ferry.

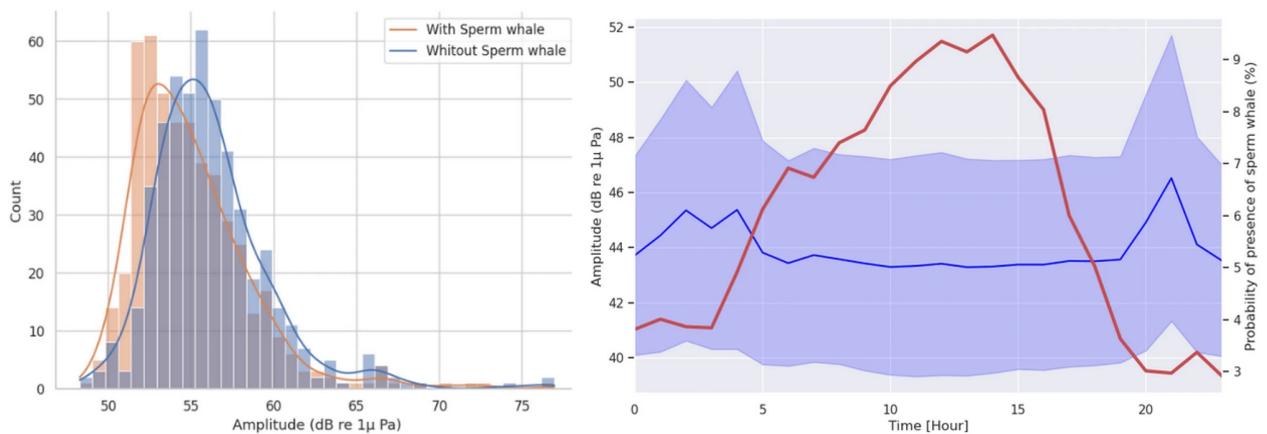


Figure 16.1 : (Gauche) Distribution de l'amplitude de l'octave 12 Hz à 800 Hz en fonction de la présence/absence de cachalots. (Droite) Superposition des amplitudes anthropiques (bleues) pour l'octave 12 Hz à 800 Hz, avec la probabilité de présence des cachalots (rouge) (Poupard et al. 2021).

On donne dans la suite les niveaux dB mesurés dans la plaine abyssale par nos systèmes KM3Env. Ils indiquent la même tendance anthropophoniques de pic à 04:00 et à 20:00. Il est intéressant de noter que nous avons montré dans les chapitres précédents la baisse d'activité des cachalots en émission et en vitesse dans les heures éloignées du midi solaire. Nous pouvons alors penser à une adaptation des cachalots se mettant au repos durant les périodes de plus fortes anthropophonies, versus ayant les vitesses et activité de chasse les plus importantes durant les puits relatifs de silence qui sont centrés sur le midi solaire qui on le mesure est la période la moins impactée par le bruit de navigation. Cela dit, les variations d'amplitude au large (Fig. 16.2 haut) sont 4 fois moindre qu'au niveau du tombant pour BOMBYX-1 (Fig. 16.1), et le niveau

moyen inférieur de 4 dB, du fait de la densité inférieure de passage des navires dans le secteur KM3Env et de la profondeur de la mesure (-2500 m de colonne d'eau entre chaque navire et l'hydrophone) ce qui en atténue le niveau par perte de propagation acoustique.

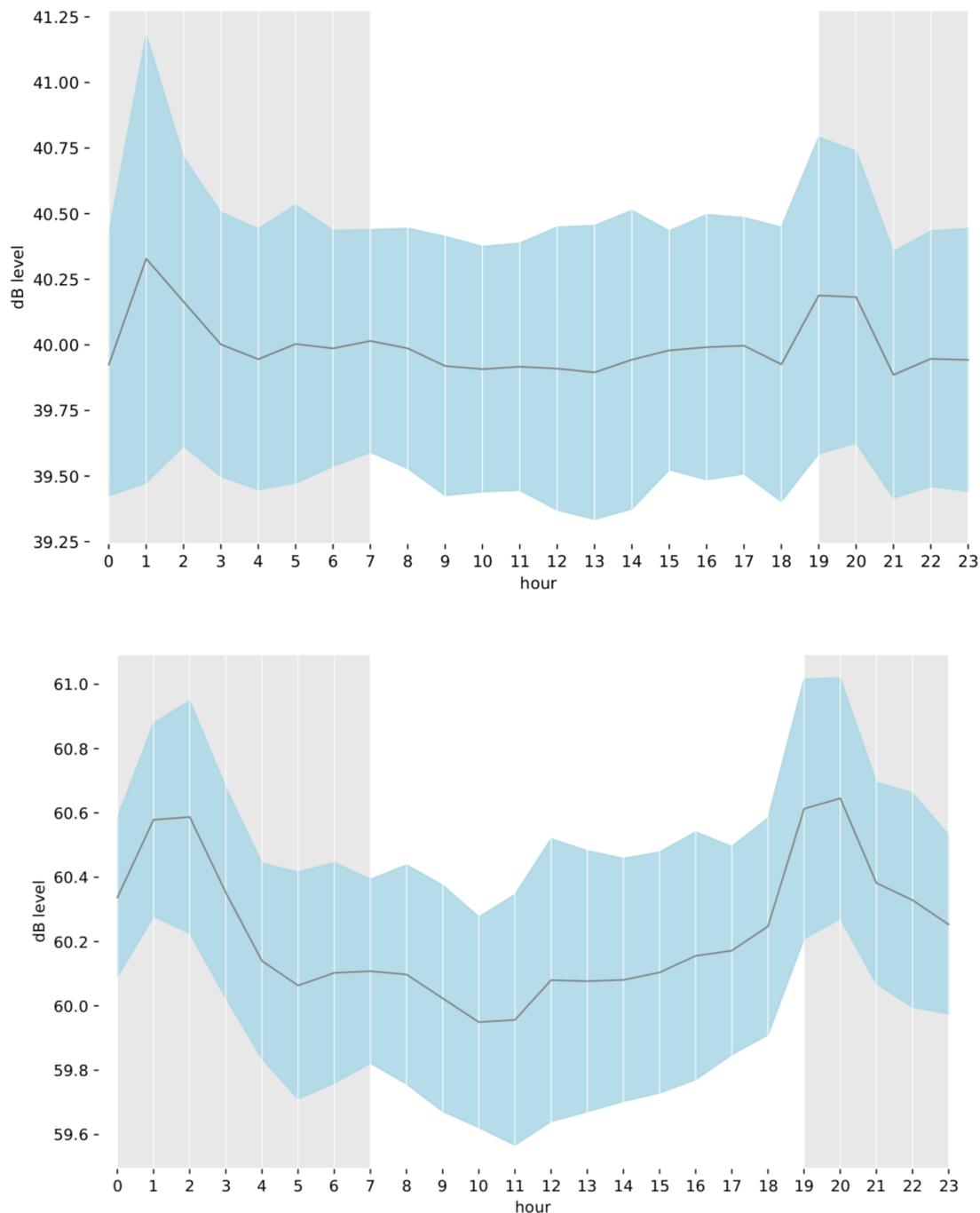


Figure 16.2 : (Haut) Moyenne du niveau dB de la bande 10 Hz, 800 Hz dans la plaine abyssale 20 km Sud des Iles d'Or via KM3Env, au fil des heures UTC (=h locale -2), d'une journée moyenne en mai 2020 et mai 2021, nuit (gris) vs jour (clair), écart-type (bleu). (Bas) Moyenne du niveau dB de la bande 6,3 kHz 12,5 kHz. Cela montre la caractéristique d'un trafic maritime polluant un large spectre fréquentiel et à horaires récurrents.

La Fig. 16.2 montre le même bilan entre BOMBYX-1 et les mesures en plaine abyssale par -2500 m : deux pics anthropophoniques vers 04:00 et 21:00 locale dans la zone Iles d'Or, en basse et moyenne fréquence, alors que ces pics ne sont pas mesurés sur les stations stochades, ni BOMBYX-2 Monaco qui n'est pas sur une zone portuaire de ferry. Ceci conforte le fait que ces pics sur BOMBYX-1 et KM3Env sont induits par le passage de ferries.

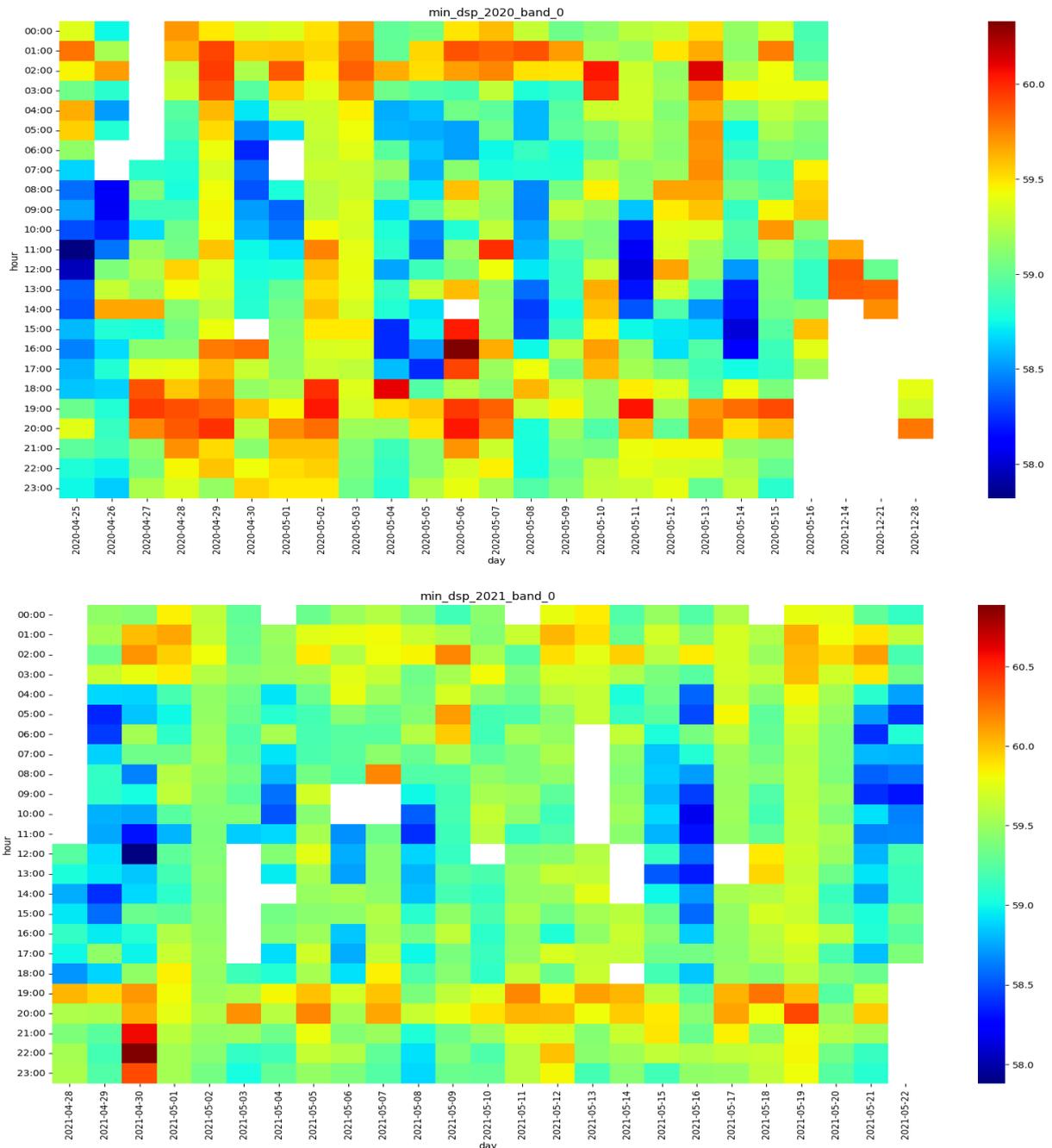


Figure 16.3 : (Haut) Niveau dB minimum par jour (abscisse) et par heure (en ligne, en UTC), entre les fréquences 10 Hz à 800 Hz par KM3Env dans la plaine abyssale 20 km Sud des Iles d'Or en été 2020. (Bas) Idem en été 2021. Dans les deux cas on note deux traces, vers 04:00 et 21:00 locales, large de 3h, avec des pics à 60 dB par -2500 m, ce qui correspond aux pics plus intenses relevés aux mêmes heures par BOMBYX-1 : des perturbations anthropiques de surface,

le passage des ferries rentrant ou sortant du port de Toulon. Cette pression structure à long terme le paysage acoustique et les grands cétacés s'y adaptent probablement avec des horaires de chasse dans la plage temporelle la plus longue entre ces deux traces de bruit, c'est à dire entre 05:00 et 20:00, plage de 15h sans pression anthropophonique continue (Fig. 16.1).

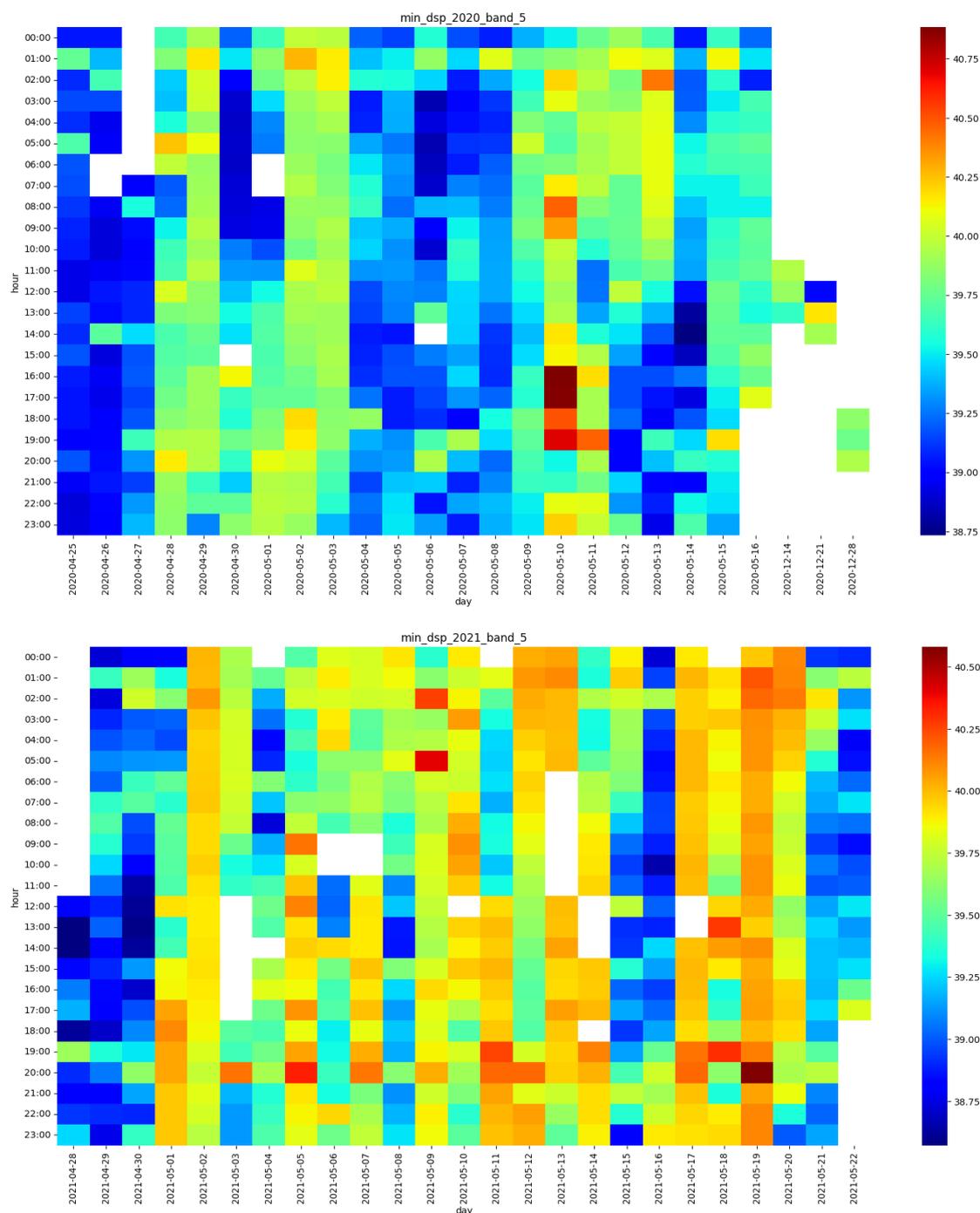


Figure 16.4 : (Haut) Niveau dB minimum par jour sur la bande de fréquence 6300 à 12.5 kHz dans la plaine abyssale 20 km Sud des Iles d'Or (via notre observatoire KM3Env) en 2020. (Bas) Idem pour 2021.

Les Figs. 16.3 et 16.4 démontrent un bruit constant dans les basses et moyennes fréquences auquel s'ajoutent les passages de bateaux vers 04:00 et 21:00 heures locales. On note que les

cachalots fréquentent moins le Sud des Iles d'Or à ces heures (Poupart et al 2022). Les bateaux forment aussi parfois des traces de plusieurs heures. Ces interférences peuvent localement perturber les activités des rorquals et des cachalots, notamment leur coordination de chasse durant lesquelles ils conserveraient un contact acoustique entre eux jusqu'à au moins 500 m (Glotin et al 2020).

17. Paysage acoustique dans Stochaedes

Dans cette section, nous comparons le niveau basse fréquence 10 Hz à 400 Hz entre les stations au Rascass et Rayol, puis en moyenne fréquence de 6.3 kHz à 12.5 kHz.

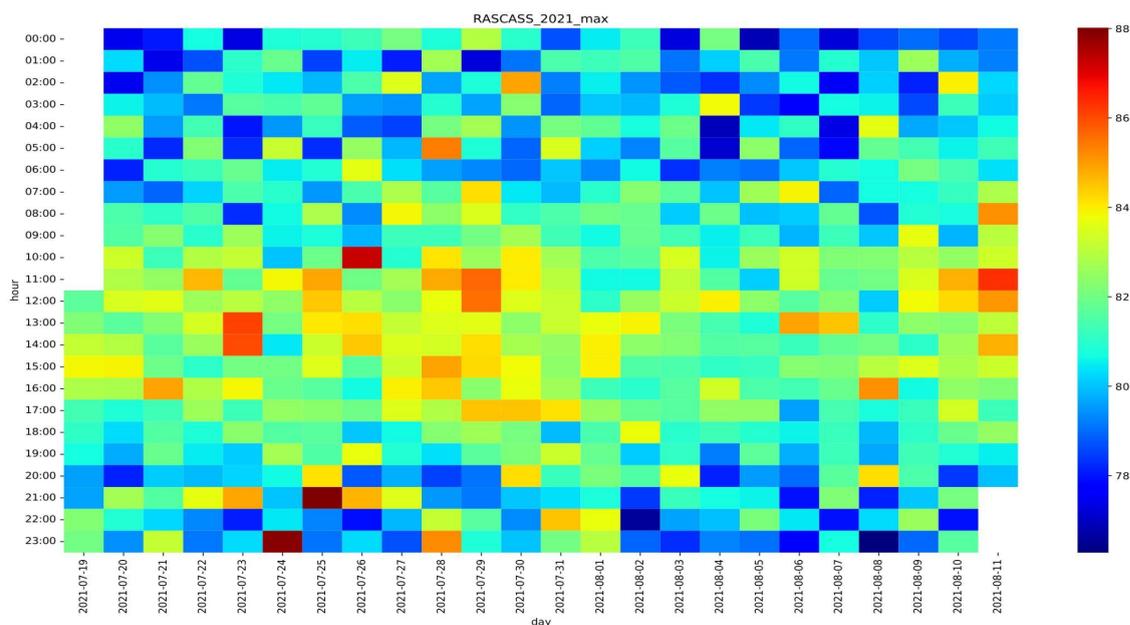


Figure 17.1 : Niveau dB maximum sur la bande 10 Hz à 400 Hz du 19 juillet au 11 août 2021 à Rascass. On constate une augmentation du bruit en journée de 09:00 à 18:00, probablement liée à des nuisances anthropiques (bruit de moteur, passage de bateaux).

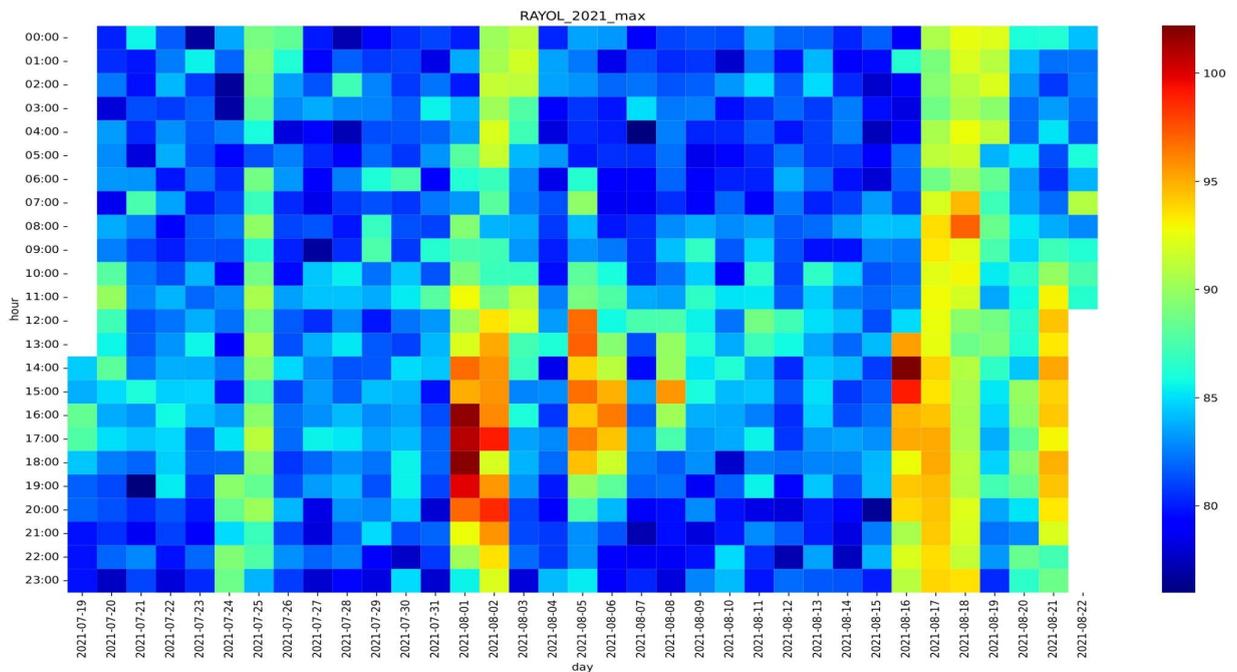


Figure 17.2 : Niveaux dB maximum de la bande 10 Hz à 400 Hz à Rayol du 19 juillet au 22 août 2021. Ils montrent des passages de bateaux plus ponctuels qu'à Rascass, et peu de signaux de récif ce qui est cohérent avec la nature des côtes : Rayol est un banc de sable, Rascass un récif.

L'activité du 01/08/2021 sur la bande 10 Hz à 400 Hz correspond à des bruits de bateau rentrant dans la baie du Rayol et probablement y mouillant et repartant probablement vers 03:00 du matin le surlendemain.

Un autre mouillage est probable du 16 août 14 au 19 août 05:00. Nous montrons que ces stations peuvent contrôler la pression anthropique des mouillages dans une baie. La partie suivante propose la même analyse mais sur les niveaux moyens de 6.3 kHz à 12.5 kHz, comparés entre Rascass et Rayol :

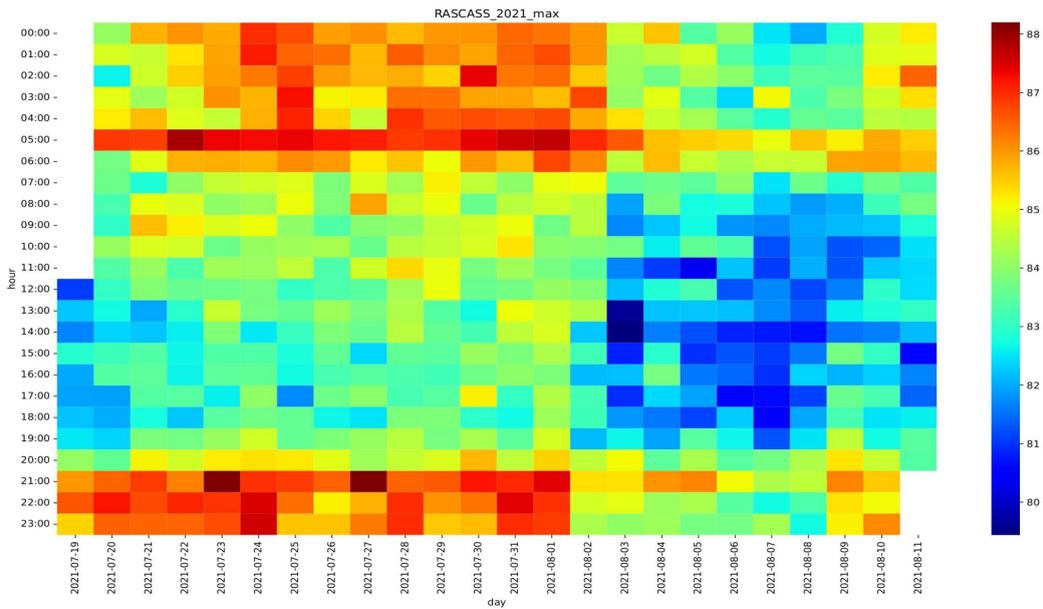


Figure 17.3 : Niveau de bruit sur la bande 6300Hz à 12500Hz, du 19 juillet au 11 août 2021 pour Rascass. On constate un plateau de bruit de 21:00 à 05:00, probablement lié à l'activité du plancton et des récifs plus actifs la nuit.

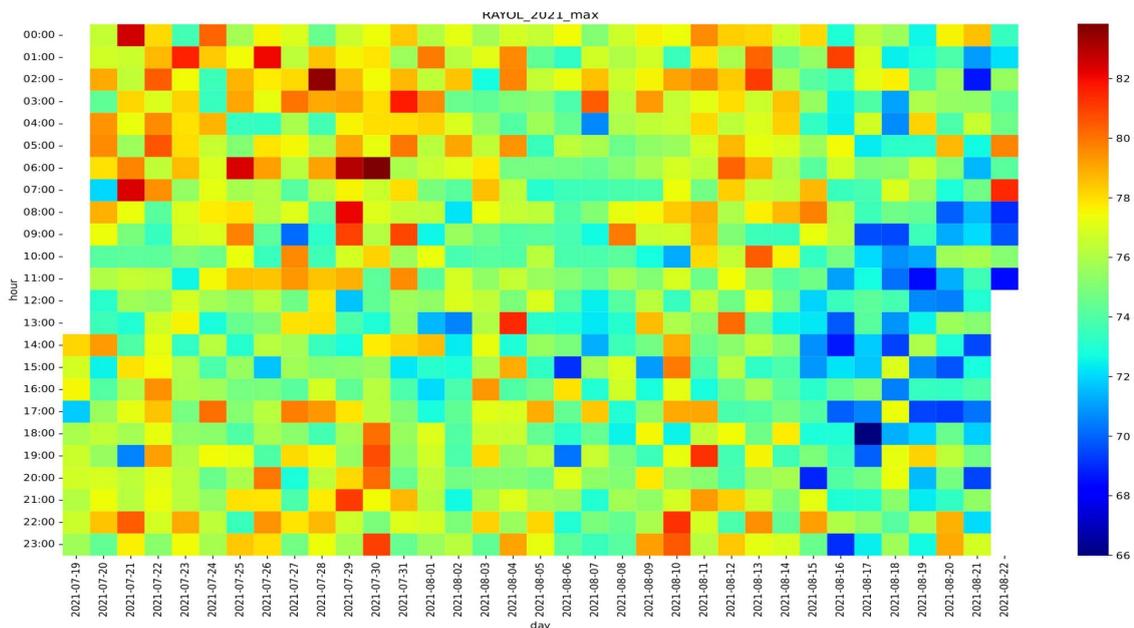


Figure 17.4 : Niveau maximum de bruit sur la bande 6300 Hz à 12500 Hz pour Rayol, du 19 juillet au 22 août 2021, montrant une structure différente que sur Rascass, mais avec une tendance identique à une atténuation de signaux à partir du 14 août 2021, sans doute le même phénomène global thermique sur la zone.

On mesure qu'à partir du 2 août le niveau de bruit sur la bande de fréquence 6.3 kHz à 12.5 kHz sur Rascass diminue de 4 dB en moyenne. En comparant ces résultats avec les données de températures de la station de Port-Cros à cette même période, on observe une chute des

températures en surface. Cette diminution est également observée durant la nuit, cette dernière n'est pas due à une variation de fréquentation anthropique. Ainsi, l'hypothèse la plus probable est que cette chute de la température a eu pour impacte de réduire l'activité de la vie benthique. L'étude des niveaux de bruits permet donc le suivi de l'activité du récif. Cette hypothèse de variation d'activité récifale est appuyée par le fait que pour les enregistrements faits à une autre période de l'année (mars 2022), l'augmentation de l'activité commence plus tôt et termine plus tard (cf annexe).

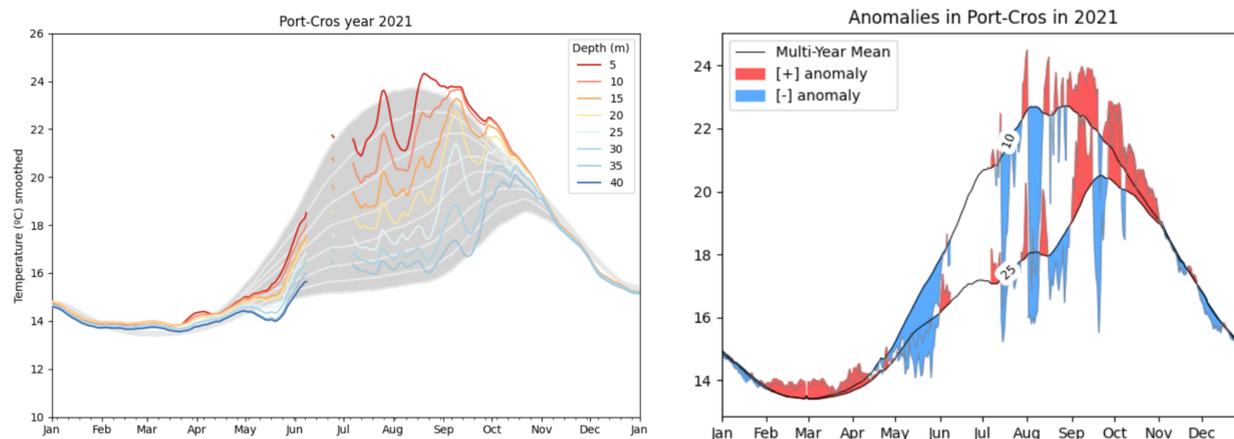


Figure 17.5 : Évolution de la température de l'eau à (Gauche) différentes profondeurs, et (Droite) anomalies de température de l'eau en 2021 à la station Port-Cros (crédit <https://t-mednet.org/visualize-data/temperature>)

18. Anthropophonie sur BOMBYX-2 Sud Monaco

Les niveaux de bruits ont été analysés sur BOMBYX-2 en été 2022 (Figs. 18.1-6), et démontrent des niveaux inférieurs qu'au Sud des Iles d'Or.

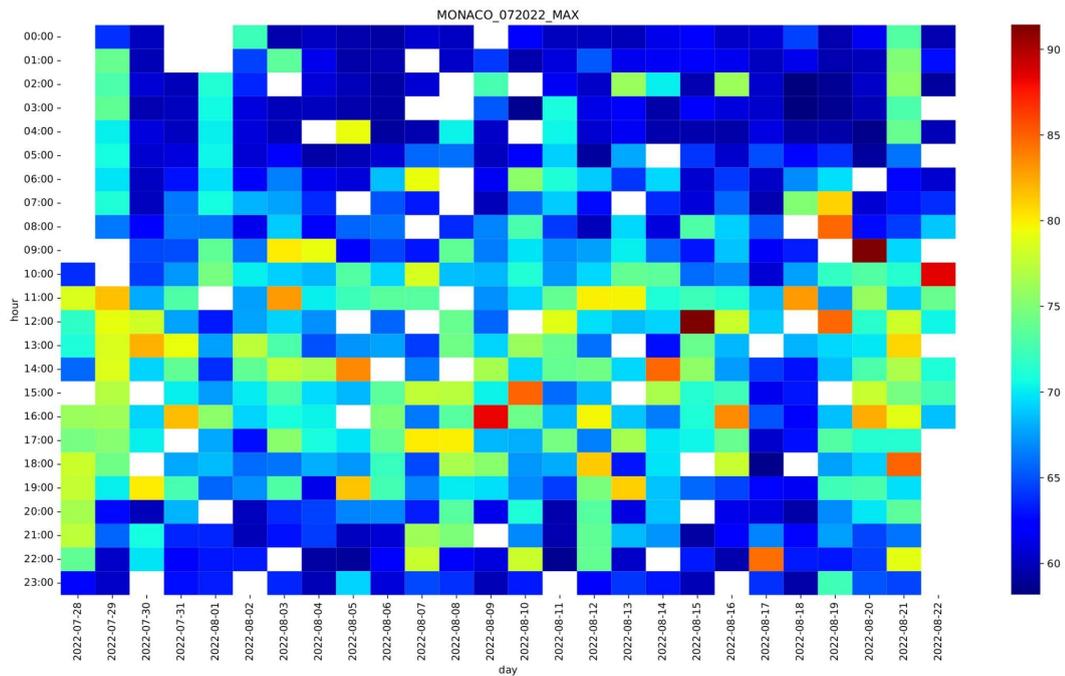


Figure 18.1: Niveau de bruit sur BOMBYX-2 Monaco sur la bande 10 Hz à 400 Hz de l'été 2022 montrant que l'écoute pour rorqual est propice.

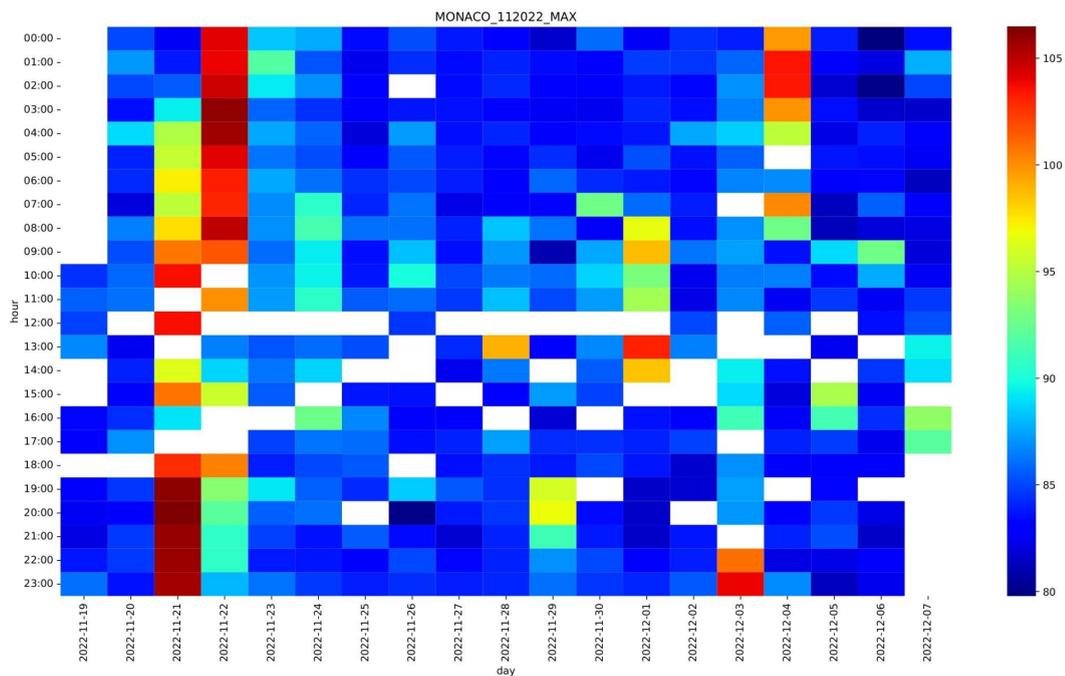


Figure 18.2 : Niveau de bruit sur la bande 10 Hz à 400 Hz de l'hiver 2022 2023 montrant que l'écoute pour rorqual est propice sauf durant des évènements de ragage de ligne de mouillage ou de galets sur le socle (communication du CIRA).

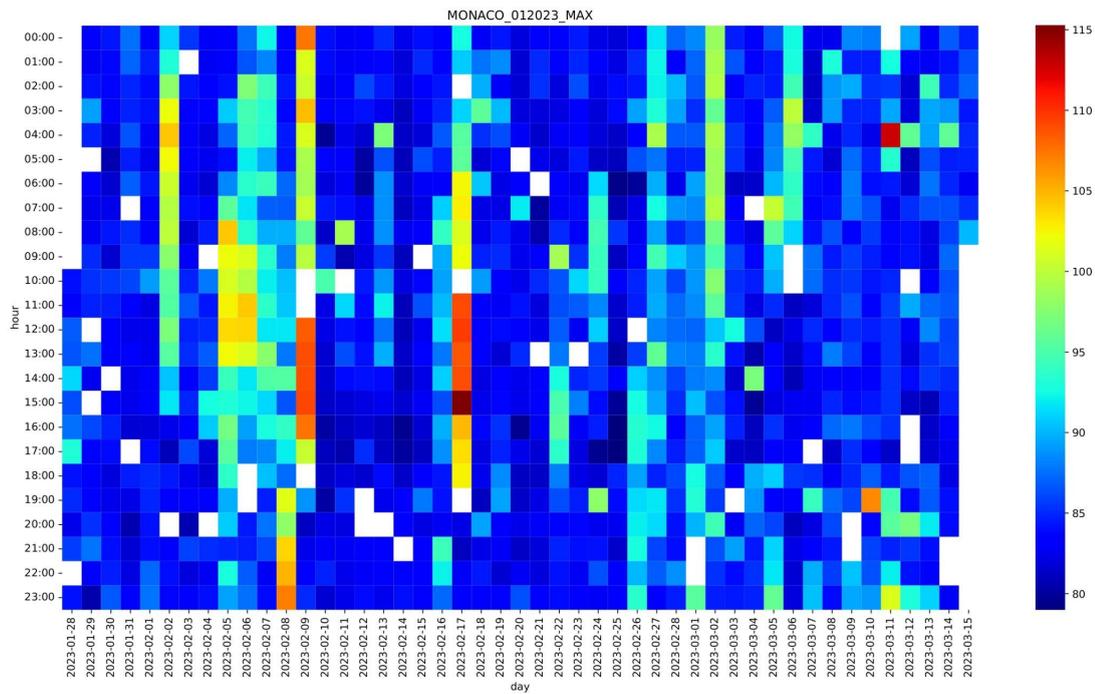


Figure 18.3 : Niveau de bruit sur la bande 10 Hz à 400 Hz du début 2023 montrant que l'écoute pour rorqual est propice sauf durant des évènements de ragage de ligne de mouillage ou de galets sur le socle (communication du CIRA).

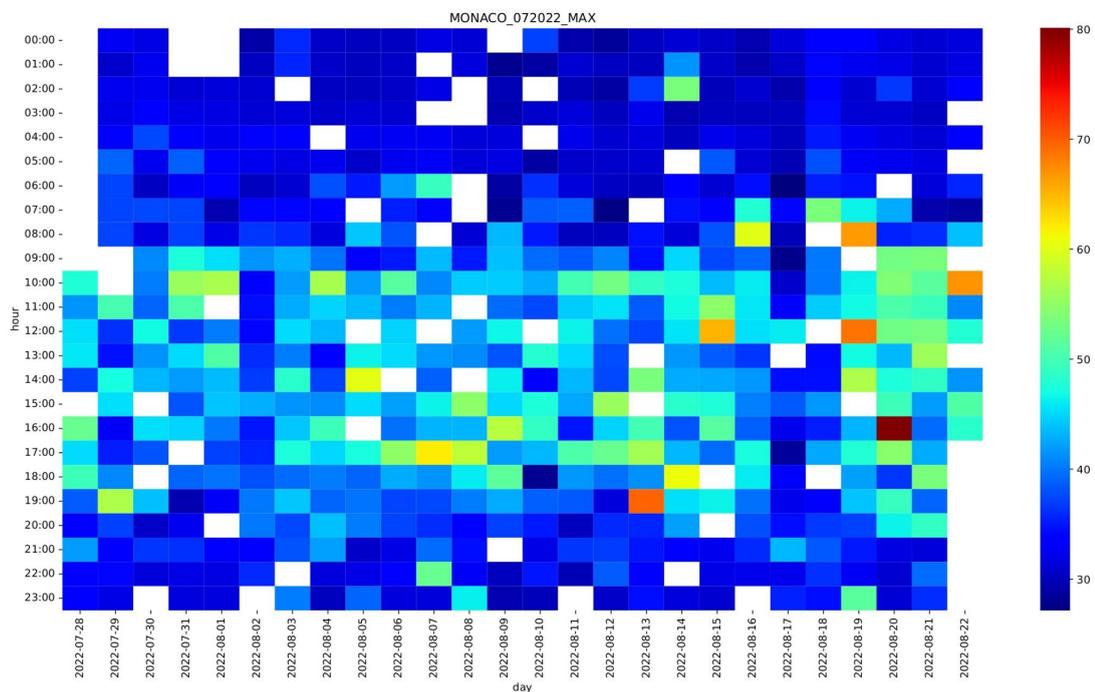


Figure 18.4 : Niveau de bruit maximum horaire sur la bande 6300 Hz à 12500 Hz de l'été 2022 de BOMBYX-2 Monaco, montrant clairement une pollution acoustique de +10 dB environ en moyenne, voire +20 dB pour certains bateaux entre 9h à 19h, par rapport à la nuit relativement silencieuse vers 35 dB en moyenne.

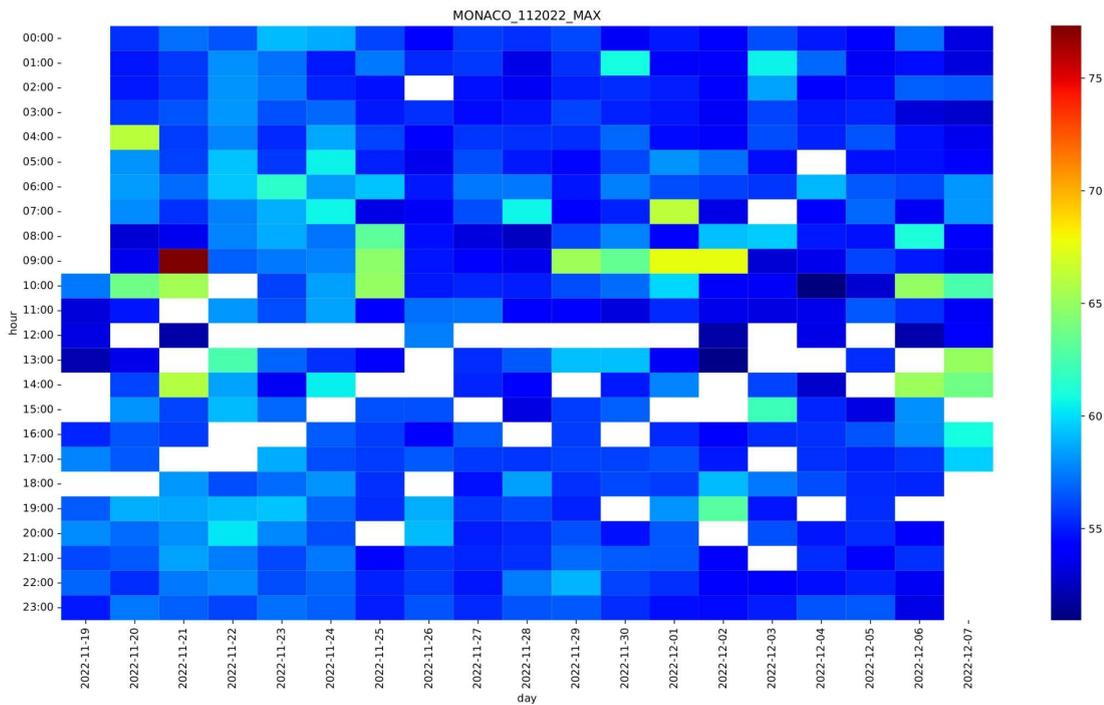


Figure 18.5 : Niveau de bruit sur la bande 6.3 kHz à 12.5 kHz de l'hiver 2022.

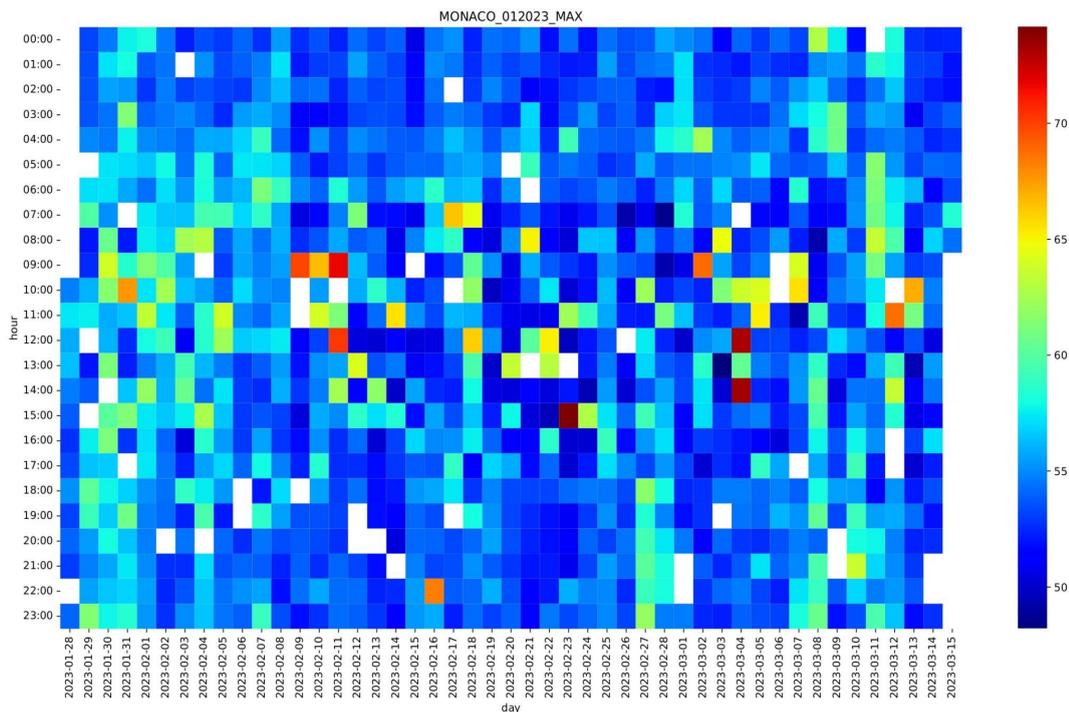


Figure 18.6: Niveau de bruit sur la bande 6.3 kHz à 12.5 kHz de début 2023.

Ces diagrammes dB par heures indiquent que les niveaux de bruits sont propices à la détection du cachalot sur ce site, et montrent des activités anthropiques fortes entre 10:00 et 18:00 en été dans les bandes basse et moyenne fréquence de la mégafaune autour de 200 Hz et 10 kHz. Les niveaux en automne et hiver sont eux moindres, modulo des bruits de ragages en BF qui devraient demander plus d'investigations, pouvant nuire à la détection de cétacés BF (rorqual).

PARTIE V : DISCUSSION et CONCLUSION

19. Bilan des détections de cachalots en zone anthropisée

Ce rapport montre plusieurs méthodes de suivi en antennes filaire ou en dérive, ou en bouée fixe, chacune permettant une estimation de défilement voir de position 2D des cétacés et les niveaux dB, démontrant l'efficacité de méthodes innovantes pour leur suivi en milieu anthropisé et l'apport de connaissance dans des programmes anti-collision.

Importances des observations mobiles

Les observatoires et les missions WhaleWay ont observé à différentes échelles les activités des cachalots. La mission WW-4 réalisée en septembre 2023 a fourni des résultats riches en informations cruciales pour la compréhension de cette espèce emblématique et pour son éventuelle conservation face aux défis de l'augmentation des activités anthropiques, notamment le trafic maritime. À travers l'utilisation de différentes antennes d'enregistrements acoustiques et la méthode de photo-identification, les données ainsi récoltées devraient lever une partie du voile sur un pan de la vie des cachalots dans la nuit des profondeurs, jamais révélé à ce jour.

Cette dernière a été réalisée pendant 15 jours de septembre/octobre 2023, qui encadraient la pleine lune (nuit du 29 septembre). Les cachalots se sont alimentés sur une zone relativement limitée, au large de Nice-Monaco et au sud de Port-cros/Ile du Levant, le long des tombants des canyons au-dessus de fonds d'en moyenne 1600 m. Au total, 20 individus ont pu être identifiés visuellement dont 10 ont été suivis sur plus de 2 cycles de plongée consécutifs et être ainsi caractérisés acoustiquement.

L'IPI (Interval Inter Pulse) est une caractéristique acoustique proportionnelle à la taille du cachalot. Elle permet de distinguer les mâles adultes des femelles adultes grâce à l'importance du dimorphisme sexuel. Ainsi seuls les cachalots mâles sont suffisamment grands pour avoir un IPI supérieur à 4 ms. Les individus que nous avons au cours de l'expédition étaient donc tous des mâles puisque leur IPI respectif était largement au-dessus de 4 ms. En revanche, les 4 et 5 octobre, les groupes observés étaient composés de juvéniles et de femelles adultes dont les IPI étaient tous inférieurs à 3,5 ms. La photo-identification a permis d'identifier un mâle immature ainsi qu'une femelle adulte. La présence de juvéniles et de femelles adultes au même endroit suggère qu'il s'agit de groupes sociaux.

La plupart des observations ont conduit au suivi de plusieurs individus en même temps. Certains individus effectuaient des actions coordonnées, notamment des nages parallèles, des sondes ainsi que des émissions vocales synchrones. Ce type de comportement, relativement fréquent dans les groupes sociaux, est moins documenté chez les mâles. Cette observation inédite suggère des interactions sociales complexes, notamment la possibilité de comportements de chasse coopérative, très peu documentée. En outre, cette coordination démontre une communication efficace, une structuration et une synchronisation dans leur déplacement, et ce, même en milieu fortement anthropisé alors qu'un certain désordre pourrait être attendu au vu des perturbations.

En ce qui concerne le trafic maritime, cette mission a montré que les zones de vie des cachalots sont traversées par les rails de passage de ferry reliant le continent, la Corse et l'Italie.

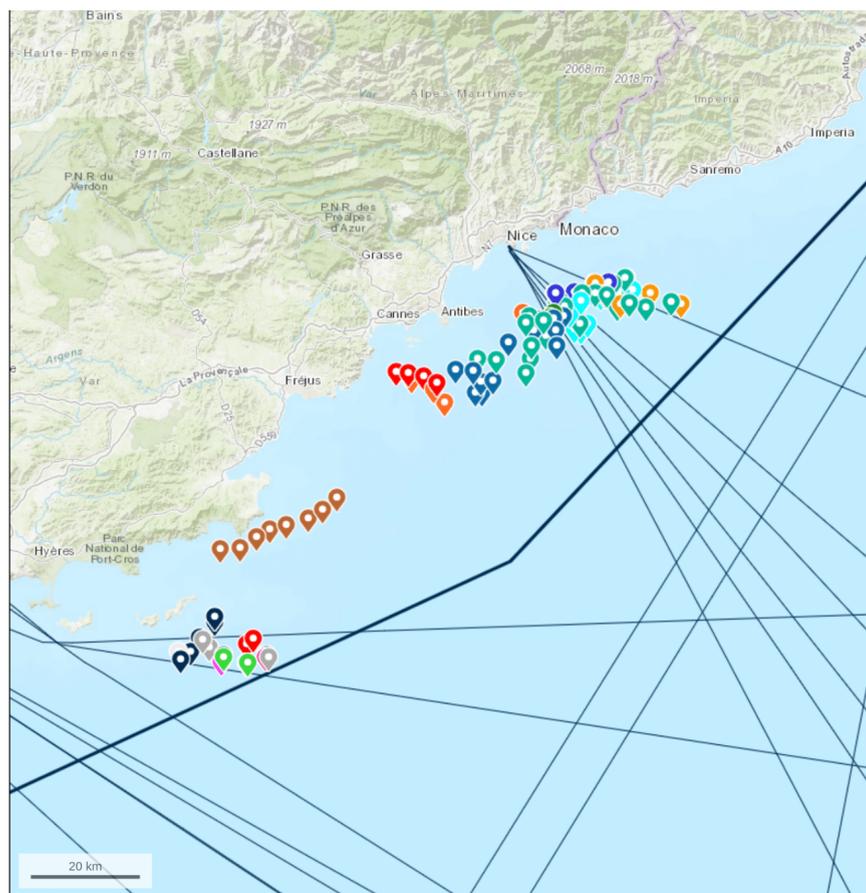


Figure 19.1 : Carte des principaux axes de ferries reliant la Corse et le continent et passant à proximité de la côte et localisation précise des sondes des cachalots observés pendant la mission WhaleWay-4 de deux semaines en automne 2023 (une couleur par individu) (Géoportail).

Les paramètres des sondes (durée et profondeur) ne sont pas influencés par la proximité à la côte, au talus continental ou à Monaco. La chasse reste une activité nécessaire pour la survie des individus et est donc prioritaire même à proximité du trafic maritime. Le risque de collision est donc très élevé dans ces zones.

Les efforts déployés lors de cette mission doivent être poursuivis afin de confirmer les résultats obtenus.

Pour les cachalots, au vu des résultats de détections sur BOMBYX-2 et des observations effectuées sur WhaleWay, il apparaît que le protocole d'enregistrement ne soit pas optimal. Connaissant les caractéristiques des cycles respiration-plongée des cachalots rencontrés pendant WhaleWay, soit un cycle moyen de 68 min (minimum : 49 min, maximum : 86 min) avec 15 à 18 min d'arrêt des émissions sonores, les individus sont détectables entre 30 et 50 min par cycle (annexe A.8). Sachant qu'entre deux sondes, les cachalots se déplacent d'environ 3,3 km et que la majorité des observations ont été faites dans un rayon de 25 km de BOMBYX, des enregistrements plus réguliers seraient pertinents pour augmenter les chances de détection. Ces

observations nous permettent de définir le protocole optimal d'enregistrement sur BOMBYX afin d'augmenter les chances de détection et de recapture pour un suivi des individus.

20. Bilan des détections de rorquals

Les stations BOMBYX-1 et BOMBYX-2 constituent des corpus de référence pour l'étude des passages des rorquals au Sud des Iles d'Or et au Nord Pelagos.

La station acoustique filaire KM3Env implantée à une profondeur de -2450 m au large de Hyères, a joué un rôle essentiel dans l'évaluation des niveaux de bruit en profondeur. Les résultats obtenus révèlent des niveaux de bruit significatifs, particulièrement dans la bande des basses fréquences (10 Hz à 600 Hz). Ces épisodes de bruit, persistant sur une durée de trois heures avec un niveau sonore de 70 dB, correspondent aux traces laissées par le trafic maritime, illustrant ainsi l'influence considérable de ces activités dans la zone d'étude. Grâce à l'application de techniques d'intelligence artificielle pour la détection des pulses émis par les rorquals, nous avons identifié des individus au printemps 2020 et 2021. Nous avons mis en lumière un déplacement préférentiel des rorquals au-dessus de la station, avec une orientation générale du NW vers le SE, comme indiqué dans les travaux de Best et al. (2022).

Des investigations supplémentaires sont en cours pour explorer d'autres trajectoires observées en 2021. Il convient de souligner que les rorquals émettent des pulses autour de 20 Hz, une fréquence qui coïncide avec la bande où un niveau de bruit élevé sur plusieurs heures a été enregistré. Cette pollution sonore ambiante pourrait ainsi compromettre les activités de communication des rorquals, induisant notamment un masquage acoustique. Le masquage acoustique se manifeste lorsque le bruit ambiant recouvre ou masque les signaux acoustiques émis par les animaux dans la même bande de fréquence. Bien que les rorquals utilisent cette plage de fréquence pour leur communication, la présence constante d'une pollution sonore élevée peut entraver la détection de ces signaux, tant par les rorquals que par d'autres espèces marines.

Renforcement par apprentissage IA de la fonction d'alerte anti-collision

Depuis l'été 2022 cet observatoire GIAS est déployé avec les 2 premières bouées sur Monaco. En effet le syndicat des pêches de Cap Martin demanda des contraintes par la suite non compatibles avec le fonctionnement de BOMBYX-2. Aussi la seconde bouée BOMBYX est en rotation avec la première Bouée comme indiqué sur la carte.

Cette configuration de couplage des deux bouées a un intérêt pour le perfectionnement de l'apprentissage IA embarqué de la bouée pour affiner et confirmer l'estimation de la distance de l'animal.

En effet les mesures jointes de deux bouées permettent d'une part un maintien par rotation de maintenance plus rapide pour le changement des batteries et un perfectionnement d'une bouée quand une autre est à l'eau. Le déploiement est ensuite conjoint avec les deux bouées en opération

simultanément. C'est-à-dire que les angles d'arrivée des sources en azimut, estimés par les bouées BX1 et BX2 sont croisés pour estimer la position de la source (Fig. 20.1).

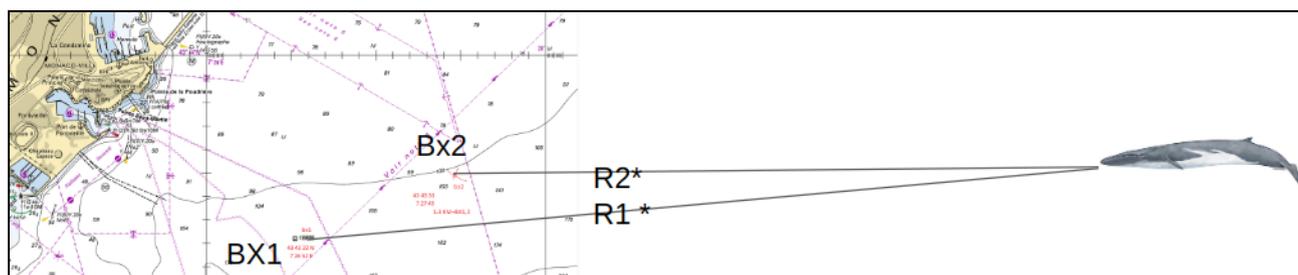


Figure 20.1 : Illustration du croisement de deux azimut estimés, l'un par BOMBYX-21, et l'autre par BOMBYX-22. Ces deux azimuts se croisent, donnant une estimation précise de la position de l'animal et sa distance R2 et R1*.*

Dès lors l'estimateur de distance après plusieurs de ces estimations est entraîné pour estimer R1* avec la bouée BOMBYX-21 seule, et R2* avec BOMBYX-22 seule.

21. Vers le système d'alerte anticollision BOMBYX

Une observation préoccupante résultant de cette mission est la présence des cachalots dans des zones à fort trafic maritime, en particulier les itinéraires empruntés par les ferries France-Corse. Cette proximité expose tous les individus suivis aux risques de collisions potentielles avec les navires, posant ainsi une menace sérieuse pour leur sécurité. Cette situation devient particulièrement critique pour les groupes de cachalots, car elle met en péril la vie des juvéniles qui les accompagnent. Les jeunes cachalots, ne plongeant pas aussi profondément ni aussi longtemps que les adultes, sont plus susceptibles d'être exposés aux dangers des collisions avec les navires.

En conclusion, cette mission a démontré que le suivi détaillé des cachalots en Méditerranée, intégrant diverses méthodes d'observation, offre des perspectives essentielles pour éclairer les stratégies de conservation. Les informations recueillies ne se limitent pas à une simple compréhension des comportements biologiques, mais soulignent également la nécessité de prendre des mesures concrètes pour atténuer les impacts du trafic maritime sur cette espèce emblématique. Il devient impératif d'intégrer ces données dans des initiatives plus vastes de gestion marine, assurant ainsi un avenir durable pour les cachalots dans la Méditerranée.

Possibles déploiements du réseau BOMBYX

Les différentes méthodes déployées et analysées lors de cette étude ont montré que le nord du sanctuaire Pelagos représente une zone particulièrement occupée par la mégafaune marine. Le projet européen Biodiversa EUROPAM a été accepté et financera 3 autres bouées BOMBYX-2 en 2023/2024 en Méditerranée (et 3 entre Açores et Norvège).

Table 21.1: positions idéales des bouées BOMBYX-2

Bouée # (site) (transmission)	Position GPS	Profondeur corps mort
Bx1 (Porquerolles) (4G)	42°57'49"N 6°15'20"E	-90m
Bx2 (Cap Corse) (4G)	42°48'15"N 9°31'19"E	-65m
Bx3 (Sicié) (4G)	43°01'11"N 5°49'34"E	-100m
Bx4 (Pampelonne) (4G)	43°13'16"N 6°47'00"E	-128m
Bx5 (Cap Martin) (4G)	43°43'41"N 7°30'36"E	-170m
Bx6 (Ile Rousse) (4G)	42°41'06"N 8°47'59"E	-190m
Bx7 (Antibes) (4G)	43°32'29"N 7°09'58"E	-140m
Bx8 (Ajaccio) (4G)	41°42'49"N 8°37'38"E	-100m
Bx9 (Banc Bagaud) (Iridium)	43°02'32"N 6°38'23"E	-115m
Bx10 (Mont Méjean) (Iridium)	43°23'55"N 7°08'44"E	-350m
Bx11 (Cassis) (4G)	43°08'47"N 5°30'08"E	-115m
Bx12 (Vieux-Port) (Iridium)	41°38'06"N 9°27'00"E	-90m

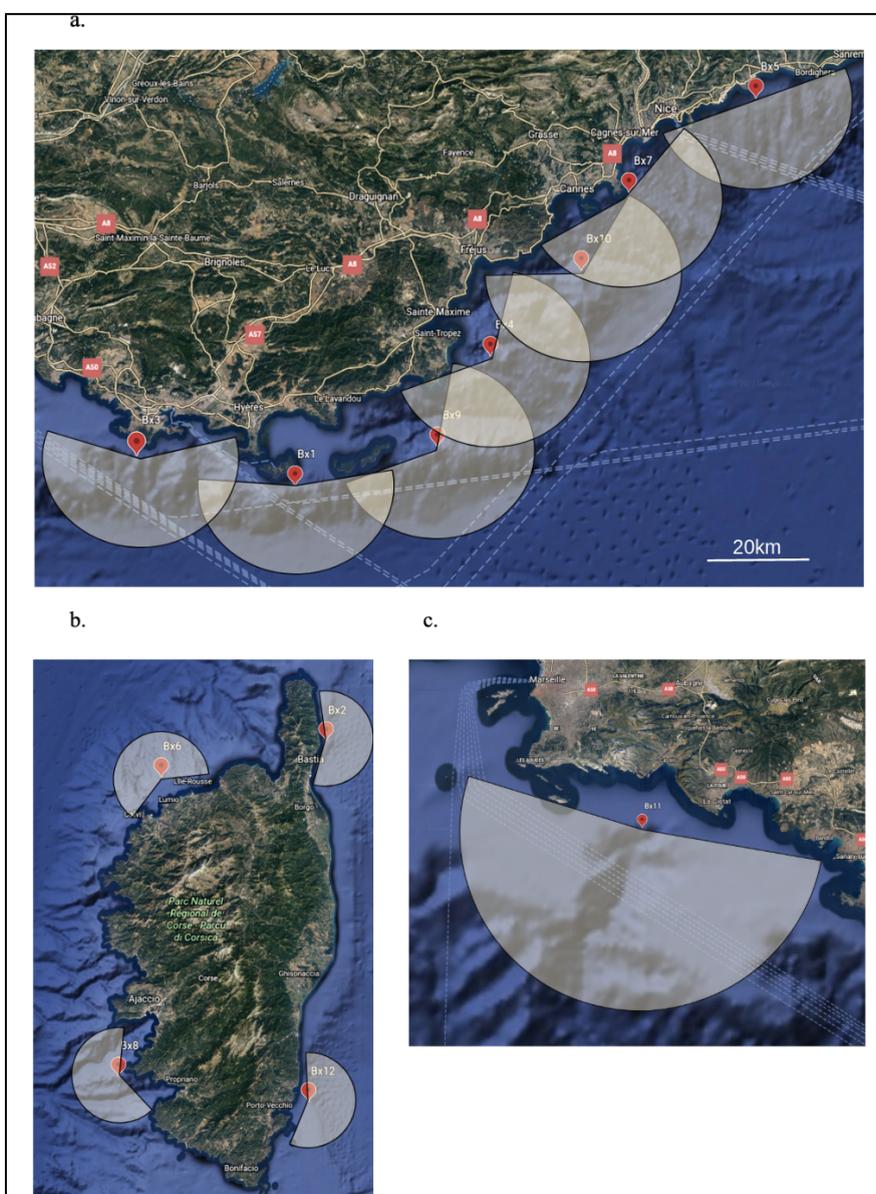


Figure 21.1: Cartes de positionnement idéal des bouées BOMBYX avec leur rayon d'écoute estimé maximum de 20 km.

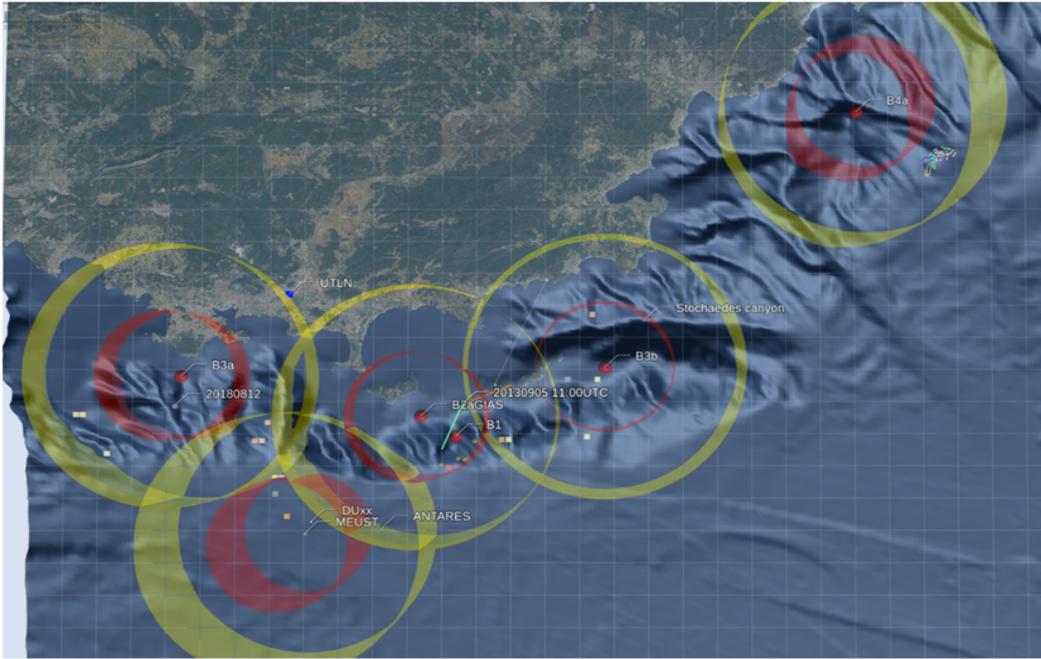


Figure 21.2 : Illustrations en carte dynamique 3D des détections depuis les détections DECAV 2011 (<http://sabiody.lis-lab.fr/gias/>) de l'observatoire idéal du projet. Le rayon de détection à haut RSB est de 10 km et à moyen RSB de 20 km (rouge et jaune).

Elaboration d'une alerte automatique de risque de collision

Les bouées GIAS BOMBYX-2.1 et BOMBYX-2.2 construisent maintenant des corpus bien plus riches car avec 5 hydrophones, elles capturent les informations de défilement en azimuth, élévation et avec apprentissage IA en cours, permettront d'estimer la distance et l'erreur d'estimation de la distance.

Les rapport d'alertes sont produits par la bouée, et reçus au laboratoire depuis les deux bouées BOMBYX-2. Puis les signaux confirmés sont présentés sur une carte en ligne pour les autorités, qui sera affinée, et qui pour la fin du projet est sous la forme présentée dans la section suivante.

Logs each 5 minutes rec, 10 Mo :

Fin/Phy.log
t1 p1	20220728_000918UTC_V12.wav	160 0.3529639
t2 p2	20220728_000918UTC_V12.wav	165 0.017730286
...	20220728_000918UTC_V12.wav	170 0.343511
tn pn	20220728_000918UTC_V12.wav	175 0.03539723
	20220728_000918UTC_V12.wav	180 0.08584233
	20220728_000918UTC_V12.wav	185 0.917102
	20220728_000918UTC_V12.wav	190 0.07624311
	20220728_000918UTC_V12.wav	195 0.9999893
	20220728_000918UTC_V12.wav	200 0.99990165
	20220728_000918UTC_V12.wav	205 0.9406052
	20220728_000918UTC_V12.wav	210 0.9485358
	20220728_000918UTC_V12.wav	215 0.5486088

Figure 21.3: exemple de rapport de décision / alerte généré par la carte QHB automatiquement et envoyé par 4G au laboratoire avec échantillons de son pour calculs plus précis.

Une cartographie a été développée par notre équipe dans GIAS en superposant en temps réel à la fois les AIS des bateaux et l'état de mer qui sont les deux contextes de jugement de l'alerte collision avec la présence des cétacés. En cas de présence de cétacés dans le secteur du disque de rayon 25 km, on estime le cap et la distance de l'animal. En cas de faible détection au-delà de 25 km, on met en vigilance BOMBYX-2 pour une écoute plus longue.

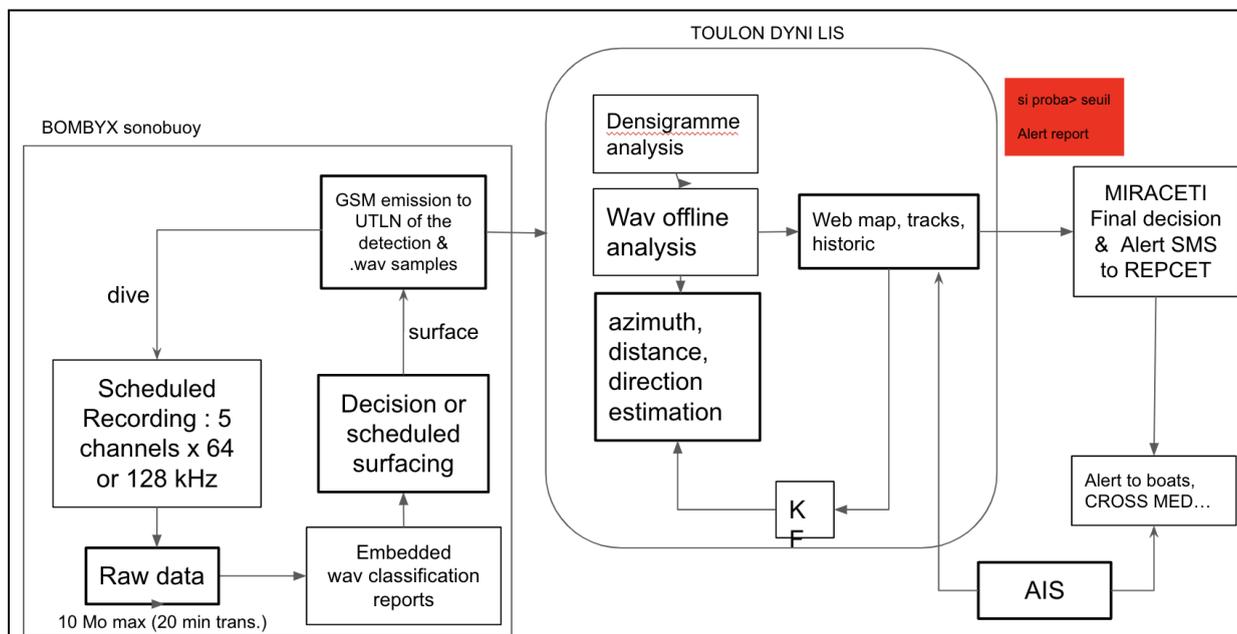


Figure 21.4 : Schéma général du système BOMBYX d'alerte anti-collision.

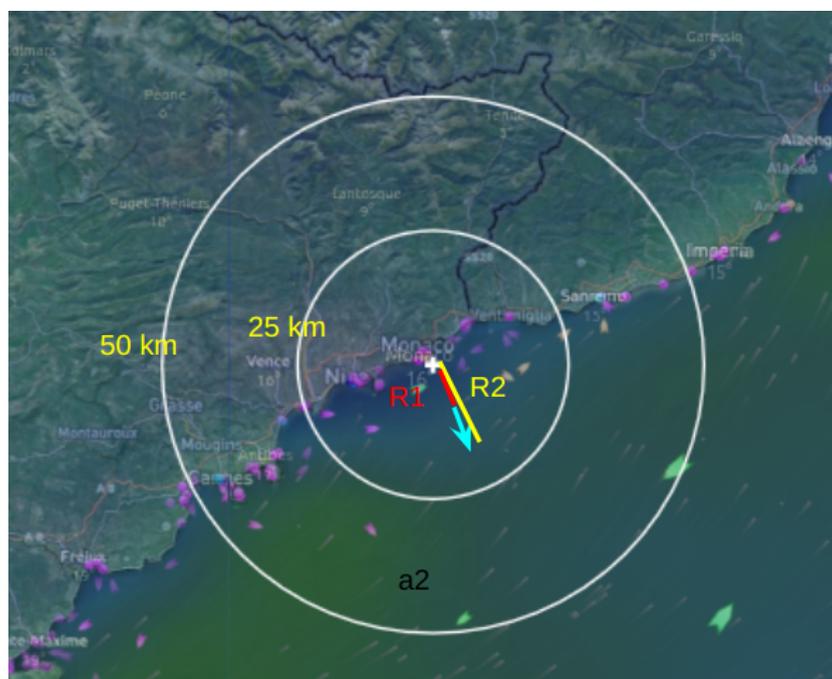


Figure 21.5 : Le site web de l'interface avec <http://sabiodylis-lab.fr/pub/GIASFEDER.html> superposant en temps réel à la fois les AIS des bateaux et l'état de mer qui sont les deux contextes de jugement de l'alerte collision avec la présence des cétacés.

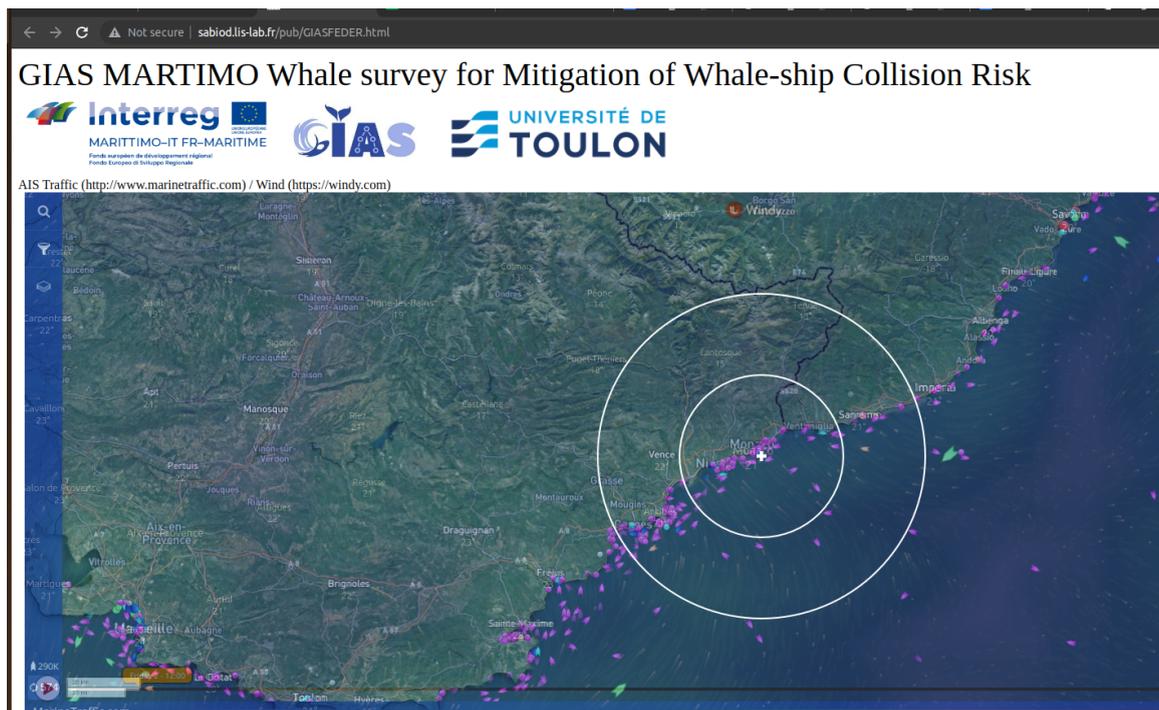


Figure 21.6: Exemple d'estimation de position d'un rorqual le 29 juillet 2022 et son déplacement <http://sabiody.lis-lab.fr/pub/GIASFEDER.html>

Le processus complet (Figs. 21.4-6) conduit à l'interface disponible en ligne <http://sabiody.lis-lab.fr/pub/GIASFEDER.html> qui présente à la fois les AIS des bateaux (type, position, vitesse et direction) et l'état de mer. Plus la mer est forte, plus le risque de collision est grand du fait de la visibilité réduite des bateaux sur les cétacés, et le bruit des bateaux probablement un peu masqué dans le bruit ambiant et probablement moins bien perçu par les cétacés. L'intégration de ces flux d'information est en cours d'intégration en carte locale dynamique de probabilité de risque de collision.

22. Vers un modèle éthoacoustique de la dynamique de nage de la mégafaune en fonction du trafic

La synthèse des observations de la mégafaune en milieu anthropophonique de ce rapport dresse un bilan comparé de la pollution anthropophonique de nature stationnaire et transitoire, ainsi que des importantes variations de son intensité (niveau dB) en fonction du trafic, heures et des sites.

Ce rapport montre d'autre part que les protocoles - BOMBYX-1, 2, antennes mobiles et KM3Env / LSPM - permettent de rendre compte des déplacements des cétacés dans l'espace et le temps, ainsi que de l'évolution des structures sociales.

Il en ressort une certaine fidélité de grands cétacés à des sites de prédilection même soumis à de fortes pressions anthropophoniques. Cette fidélité se traduit notamment par des passages (denses)

de nombreux rorquals qui suivent presque toujours les mêmes trajectoires sur le site de KM3Env, donc relativement prédictibles et dont nous pourrions estimer les raisons et l'influence du trafic maritime sur ces trajectoires.

Quant aux cachalots, ils conservent leur structure sociale, la cohérence de leur chasse en meute, même dans les zones fortement anthropisées. Cependant nous avons montré qu'ils adaptent leur présence en évitant les heures de pression anthropophonique stationnaire maximum. Ce qui montre la capacité d'apprentissage tant des cétacés, que de la possibilité de modéliser des comportements.

Nous proposons alors de croiser l'ensemble de nos observations de comportements de nages dans des milieux soumis à différentes pressions anthropiques pour construire un modèle éthoacoustique de la dynamique de nage des cétacés en fonction du trafic maritime. Ce modèle viendrait compléter les modèles statistiques (Sebe et al), et serait un apport précieux pour la prévention des collisions et la définition des réglementations à venir. En effet, il s'agit ici, par espèce, et par habitat de déterminer les niveaux dB par fréquence et durée d'exposition susceptibles d'interférer avec la forme de nage, la durée, direction relative par rapport au trafic maritime, et forme de remontée des sondes, et suivant ces modèles de nage, la durée d'exposition au trafic des grands cétacés dans ces habitats.

L'approche proposée ici rejoint (Tinbergen, 1963) qui pose les bases en éthologie, sous la forme de quatre questions que nous pouvons maintenant travailler par nos corpus et modèles pour anticiper le comportement des grands cétacés face au trafic maritime :

1. Fonction (ou adaptation) : Pourquoi l'animal exécute-t-il un comportement ? De quelle manière ce comportement augmente-t-il sa survie et sa reproduction ? Cela inclut, entre autres, l'éducation des jeunes pour augmenter leurs chances de survie, la migration vers des habitats plus riches en nourriture, la fuite ou l'évitement de danger anthropique.
2. Evolution (ou phylogénie) : Comment ce comportement a-t-il évolué ? Comment la sélection naturelle a-t-elle modifié le comportement au cours du temps évolutif ? Ce problème est généralement résolu par l'approche comparative, où le comportement en question est comparé entre des espèces étroitement apparentées.
3. Causalité (ou mécanisme) : Qu'est-ce qui cause le comportement ? Quels stimuli suscitent ou quels mécanismes physiologiques provoquent le comportement ?
4. Développement (ou ontogénèse) : Comment le comportement s'est-il développé au cours de la vie de l'individu ? De quelle manière a-t-il été influencé par l'expérience et l'apprentissage ?

Les questions 1 et 2 donneraient des explications ultimes ou évolutives. Ce sont des réponses qui s'inscrivent dans une perspective plus longue et tentent d'expliquer pourquoi le comportement a évolué.

En revanche, les questions 3 et 4 donneraient des explications immédiates. Ce sont des réponses qui s'intéressent aux raisons mécaniques à court termes pour lesquelles un comportement est exprimé.

Nous proposons donc à moyen terme et dans la suite de ce mémoire et de ses données acoustiques et visuelles, depuis Boussole 2009 à BOMBYX-2 2023 sur Monaco, des études DECAV, et WhaleWay de Longitude181 et al., d'étudier ces quatre questions sur les grands cétacés en contexte anthropisé versus non anthropisé. Il faut travailler en effet conjointement ces 4 questions pour obtenir une compréhension complète des coûts, des avantages et des contraintes qui façonnent un comportement donné.

Pour cela, nous travaillerons aussi sur nos corpus de grands cétacés en milieu faiblement anthropisé notamment hors saison de pêche en Arctique. Il s'agit de notre observatoire ValhallaB en Arctique enregistrant en continu depuis 2 ans (novembre 2022) rorquals plus depuis nov. 2023 des cachalots (Glotin et al 2023, Glotin et al 2024, Poupard et al 2024) (déjà constitué de 3 To d'observations de pulses de rorquals et de cachalots).

Et en second lieu, sur nos observations éthoacoustiques des cachalots établies depuis dix ans en zone faiblement anthropisée au Nord Ouest de l'île Maurice (Ferrari et al 2024) bien que les cachalots soient présents dans la zone portuaire. A noter que ce site présente aussi un intérêt de modélisation des comportements en pression anthropique croissante depuis la fin du covid qui est très importante du fait de l'augmentation des whalewatchers 'sauvages'. Donc on doit pour voir noter ici une évolution des comportements des cachalots sous pression croissante du whalewatching, historique difficile à reconstruire en Méditerranée.

Cette perspective consiste donc en une exploitation fine de l'anthropophonie et de la biophonie de la mégafaune et se décompose en ces étapes :

- a) Récolter (achat sur les bases) des AIS historiques sur ces zones d'écoute (Pelagos Nord, ValhallaB, NO Maurice),
- b) Récolter éventuellement des photos satellites dans ces même zones pour compléter les connaissances sur les passages de bateau sans AIS, en collaboration avec l'ESA,
- c) Etablir la trajectoire des bateaux repérés par (a) et (b),
- d) Etablir la trajectoire de ces mêmes bateaux par acoustique (azimuth sur BOMBYX-1 et BOMBYX-2 et autres),
- e) En déduire par (c+d) la signature acoustique de ces bateaux,
- f) Etablir par PAM sur BOMBYX-1,2 Baguera et autre, l'azimuth et si possible élévation et rayon, la dynamique de nage de la mégafaune observée / entendue dans une zone faiblement versus fortement anthropisée,
- g) Corréler (e) avec (f) dans le cas fortement anthropisé pour modéliser les dynamiques de nage de la mégafaune dans la zone de trafic versus celle relativement peu anthropisée.

Plusieurs missions de terrain dans Pelagos sont envisagées durant cette étude, notamment sur les programmes BOMBYX-2, et BOMBYX-3 en pose par le projet GIAS2 FEDER, et le programme WhaleWay, prévus de 2024 à 2026.

23. Conclusion générale

Les émissions sonores sont vitales aux cétacés, non seulement pour communiquer, mais également pour percevoir leur environnement et chasser. Cette extrême dépendance aux conditions acoustiques les rend vulnérables aux pollutions anthropophoniques engendrées par l'explosion du trafic maritime.

On a présenté dans ce rapport des méthodes et des résultats de leur comportement dans des habitats variés, qu'il faudra compléter, comme prévu, avec les missions WW5 et les bouées BOMBYX-1,2, et KM3Env. La surveillance acoustique passive (écoute des vocalises, biosonars ou clics sans interférence avec les cétacés), permet de bien échantillonner les différents groupes d'animaux, individu par individu. Les systèmes de suivi des différents taxons sont maintenant pratiquement opérationnels, seuls la numérisation et le traitement des masses de données bioacoustiques posent encore quelques questions. Pour suivre l'évolution de la biodiversité en milieux ouverts peu accessibles ou peu échantillonnés - ici le vaste volume de l'océan -, les enregistrements sonores sur de larges bandes de fréquence au cours de longues séries temporelles constituent, à ce jour, la meilleure méthode, pour ne pas dire la seule. Les données acoustiques ainsi recueillies permettent de mesurer l'évolution concomitante de l'anthropophonie et des populations de cétacés, même cryptiques.

Notre objectif à moyen termes est d'équiper, à faible coût, les zones à étudier d'un réseau de capteurs "intelligents", connectés, de faible consommation et éventuellement synchronisés. Couplé à des représentations du signal apprises par des algorithmes d'IA, ce réseau a pour ambition de détecter, localiser, quantifier et classer des taxons d'animaux qui vocalisent, sans les perturber. Ce système permet d'améliorer nos connaissances sur les milieux marins, notamment aux abords des falaises ou dans les canyons profonds proches des côtes anthropisées. Des fronts océaniques s'y forment (mouvements verticaux de la colonne d'eau), créant des dynamiques complexes qui alimentent la chaîne trophique, du plancton aux super-prédateurs, dont les mammifères marins.

Notre étude, basée sur plusieurs méthodes de suivi en filaire, en dérive, ou en bouée fixe, démontre son efficacité pour suivre la mégafaune marine. Les différentes stations apportent des estimations de trajectoires, 2D voire 3D des cétacés, qui peuvent être couplées au niveau sonore apportant ainsi des solutions pour le suivi anthropique et les programmes anti collision. Les données collectées peuvent aussi être analysées en termes d'éthoacoustique (comportement inféré par l'acoustique), et de suivi de répertoire vocaux pour l'étude des populations.

Avec le développement d'une instrumentation de précision, des objets connectés (*Internet des objets*) et de l'intelligence artificielle, plusieurs questions se posent. Où et quand déployer les capteurs ? Et pour quelle performance ? Pour y répondre, nous avons choisi de simuler intégralement le système : de la génération des trajectoires d'animaux marins, intégrant des

contraintes cinématiques et comportementales, jusqu'à la chaîne « classification, détection, localisation », en passant par la modélisation de la propagation acoustique. Ce *Jeu sérieux* génère, sur le superordinateur national Jean Zay, des scénarios réalistes et admissibles. Il est une pierre angulaire du développement de nos méthodes et un socle pour le déploiement optimal de nos observatoires. En effet, il est difficile de constituer des bases de données acoustiques marines réelles en quantité suffisante pour des approches IA. Les algorithmes développés sont donc destinés à augmenter la masse de données, à améliorer l'apprentissage de leur représentation, et à perfectionner l'apprentissage de lois physiques en acoustique sous-marine.

De plus, l'apprentissage de représentations Temps-Fréquence (TF) est central dans ces recherches, car les signaux bioacoustiques sont de haute résolution. La majorité des réseaux de neurones n'observent pas directement la série temporelle des données acoustiques, mais plutôt une représentation adaptée. Pour obtenir une meilleure optimisation de la représentation TF, nous avons associé la distribution de Wigner-Ville à l'IA. Notre approche permet de mieux discriminer les différentes sources par leur contenu informationnel en temps et en fréquence. Cette approche permet de débruiter le signal et donc de mieux localiser et classifier les animaux. Elle nous a permis de développer le premier modèle de reconnaissance automatique des sons transitoires bioacoustiques sous-marins, à partir de leur forme d'onde. Ce modèle est utilisé par l'Agence Française de la Biodiversité pour étudier les cétacés de l'Arc Antillais. Nous surveillons également les traces d'effets Doppler, voire micro-Doppler, qui seraient utilisés par les cétacés pour leur prédation.

Dans Poupard M., Best P., Morgan J., Pavan H., Glotin, 2023, nous avons analysé les répertoires vocaliques des Globicéphales de Pelagos Nord versus la zone de Gibraltar. Cette première étude sera étendue sur les signaux que nous avons enregistrés sur les zones anthropisées en 2023 pour déterminer si les clans sont sédentaires sur ces zones ou subissent des pressions impliquant leur déplacement.

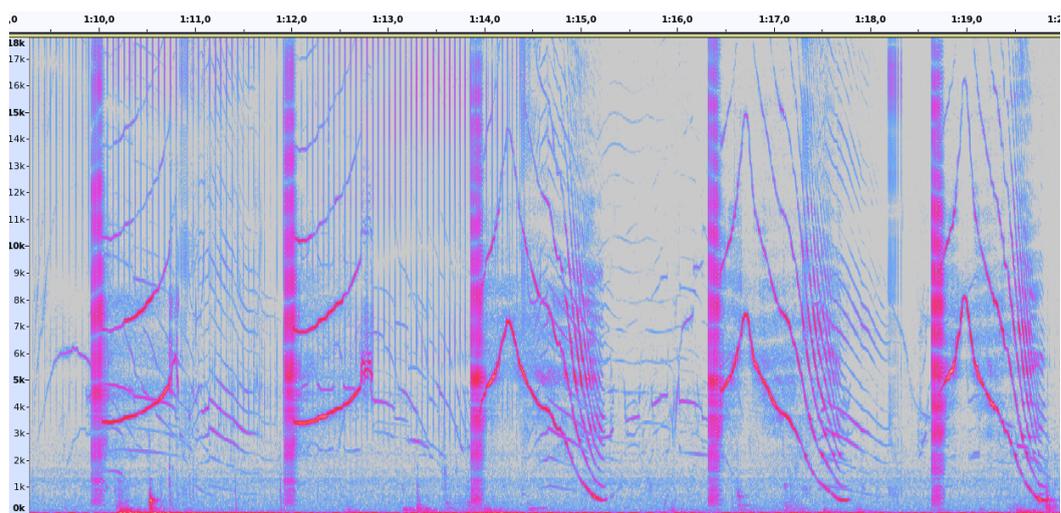


Figure 23.1: Exemple de vocalises de globicéphales vers Marseille en 2020. Le spectre de 20 kHz de largeur est complexe. Ces formes pourraient porter une information clannique qui pourrait être identifiée par IA (cf le premier répertoire de ces formes pour la Méditerranée Poupard et al 2024). Cette approche permettrait de suivre les populations sous pressions anthropiques/ climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

Abeille, Chamroukhi, Doh, Dufour, Giraudet, Halkias, Glotin, Prévot, Rabouy, Razik, 2012, Détection et classification sur transect audio-visuel de populations de cétacés du nord Pelagos - Iles d'Or (DECAV), Pelagos Research Report, LIS DYNI

Abeille, Doh, Giraudet, Glotin, Prévot, Rabouy, 2014, 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, in Journal of the Scientific Reports of Port-Cros national Park, V28

André, ..., Glotin, ..., et al., 2017, Sperm whale long-range echolocation sounds revealed by ANTARES a deep-sea neutrino telescope, In J. Scientific Report, Nature Ed., 7, 1–12

Balestrierio, Cosentino, Glotin, Baraniuk, 2018, Spline filters for end-to-end deep learning, International Conference on Machine Learning, 364-373

Balestrierio, Roger, Glotin, Baraniuk, 2018, Semi-Supervised Learning via New Deep Network Inversion, arXiv preprint arXiv:1711.04313

Balestrierio R., Glotin H., Baraniuk R., 2021, Super-résolution interprétable via une représentation de séries temporelles apprise, int. conf. Apprentissage automatique mathématique et scientifique, <https://arxiv.org/abs/2006.07713>

Barchasz V., Gies V., Marzetti S., Glotin H., 2020, JASON High Blue ultra high velocity recording : a big data Caribbean biodiversity survey, in int. conf. Forum Acusticum, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03230835/document>

Barchasz V., ..., Glotin H., 2020, A novel low-power high speed DAQ for long time biodiversity survey, in int. conf. Forum Acusticum, http://sabiody.univ-tln.fr/pub/QualiHighBlue_DAO_FA2020.pdf

Best, Glotin et al., 2020, Rapport Abyssound, FUI, Modèle d'impacts anthropophoniques sur la mégafaune, Rapport recherche DCNS, IFREMER, LMA, LIS

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

Best P., Marxer R., Paris S., Glotin H., 2023, Probing the Fin Whale Song Evolution, KM3Env inauguration, KM3Env inauguration, CNRS http://sabiody.lis-lab.fr/pub/Fin_Whale_Song_KM3Env_inauguration2023.pdf

David, Di-Meglio, Monestiez, 2019, Sperm whale ship strikes in the Pelagos Sanctuary and

adjacent waters: assessing and mapping collision risks in summer. J of Cetacean Research and Management. 18. 135-147

Ferrari M., Trinh-Hafner M., Sarano F., Sarano V., Heuzet, Prudhomme, Giraudet P., Glotin H., 2024, Age and interpulse interval relation from newborn to adult sperm whale off Mauritius, Scientific Report, Nature Springer Ed.

Ferrari M., Glotin H., 2022, Mesure du bruit ambiant sous-marin par la bouée stéréophonique BOMBYX au Sud du Parc National Port-Cros de 2015 à 2018,
http://sabiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX_CNRS_LIS_RR202210_Mesure_bruit_ambiant_Toulon_2015_2018.pdf

Ferrari, 2020, Biosonar du cachalot, modèle et analyse, Phd Thesis, dir Glotin et Asch

Ferrari M., Glotin H., Marxer, Asch, 2020, Docc10 : Ensemble de données en libre accès d'études transitoires sur les mammifères marins et classification de réseau neuronal convolutif de bout en bout, Int. Conf. sur les réseaux de neurones IJCNN
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02866091/document>

Gambell R., 1972, Sperm whales off Durban. Discov. Reports 35 199–3582

Giraudet, Glotin, 2008, Real-time 3D tracking of whales by echo-robust precise TDOA estimates with a widely-spaced hydrophone array, Applied Acoustics 67 (11-12), 1106-1117

Giraudet, Glotin, 2024, Correlational and stochastic Inter Pulse Interval fine estimation of the click of sperm whale, RR LIS CNRS

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 : Mégafaune et pollution anthropophonique. LOT 1 : Le cas du cachalot,
http://sabiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT_ENGIE_LOT1_cachalot_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 : Mégafaune et pollution anthropophonique. LOT 2 : Le cas du rorqual et du globicéphale
http://sabiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX/RAPPORT_ENGIE_LOT2_rorqual_CNRS_BOMBYX.pdf

Glotin, Enfon, Balestrieri, Mishchenko,Prevot, Razik, Paris, Patris, 2016, Détection et mesure du cachalot et bruits anthropiques sur les signaux monophoniques d'Antares [DECAN], LIS DYNI, Pelagos Research Report

Glotin, Giraudet, Ricard, Malige, Patris, Roger, Prévot, Poupard,..., 2018, VAMOS: Visées Aériennes de Mammifères marins jointes aux Observations acoustiques Sous-marines de BOMBYX et ANTARES : nouveaux modèles en suivis et lois allométriques du *Physeter macrocephalus*, LIS DYNI, Pelagos Research Report,
<https://www.sanctuaire-pelagos.org/fr/tous-les-telechargements/etudes-scientifiques-studi-scientifici-studies/etudes-francaises/78-9-14-037-vamos>

Glotin, Giraudet, Caudal, 2014, Real-time robust method for determining the trajectory of one or more cetaceans by means of passive acoustics, US Patent 8,638,641, EU, CA

Glotin, LeCun, Artieres, Mallat, 2013, Neural information processing scaled for bioacoustics, from neurons to big data, NIPS Workshop

Glotin, H., Thellier, N. Best, P., Poupard, M., Ferrari, M., Viera, S., Giés, V., Oger, M., Giraudet, P., Mercier, M., Donzé, G., Campana, M., Chevallier, J., Malige, F., Patris, J., Prévot, J.M., Cosentino, P., Prévot d'Alvise, N., Ourmières, Y., Barchasz, V., Lehir, A., Marzetti, S., Sarano, F., Benveniste, J., Gaillard, S., de Varenne, F., 2020, Sphyrna-Odyssey 2019-2020, Rapport I: Découvertes Ethoacoustiques de Chasses en Meute de Cachalots en Abysses & Impacts en Mer du Confinement COVID19, <http://sabiiod.org/pub/SO1.pdf>, 197p, EdM, FPA2, CNRS LIS Ed.

Glotin H., Spong P., Symonds H., Roger, Balestrieri, Ferrari, et al., 2018, Deep learning for ethoacoustical mapping: application to a single Cachalot long term recording on joint observatories in Vancouver Island, The Journal of the Acoustical Society of America 144 (3), 1776-1777

Glotin et al, 2023, Rapport MITI CNRS ADAPREDAT : Etude bioacoustique de l'adaptation de cétacés Arctiques http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/ADAPREDAT/ADAPT-VIVANT-20230201_ADAPREDAT.pdf

Glotin et al, 2024, Rapport MITI CNRS ADAPREDAT2, en préparation

Ham G. S., Lahaye E., Rosso M., Moulins A., Hines E. et Tepsich P., 2021, Predicting summer fin whale distribution in the Pelagos Sanctuary (north-western Mediterranean Sea) to identify dynamic whale-vessel collision risk areas, Aquatic conserv: Mar. Freshw. Ecosyst. 1-21.

Joly A., Goëau, Glotin, Spampinato, Bonnet, Vellinga, et al., 2017, Lab overview: multimedia species identification challenges, Int. C. of the Cross-Language Ev. Forum

Nugraha, Liutkus, Vincent, 2016, Multichannel audio source separation with deep neural networks, IEEE/ACM Trans on Audio, Speech, Language Proc 24, 9, 1652–1664

Pace et al., 2008, Behaviour of a social unit of sperm whales (*Physeter macrocephalus*) entangled in a driftnet off Capo Palinuro (Southern Tyrrhenian Sea, Italy), Article in IWC Journal of Cetacean Research and Management

Pavan G., Hayward T.J., Borsani J.F., Priano M., Manghi M., Fossati C. and Gordon J., 2000, Time patterns of sperm whale codas recorded in the Mediterranean Sea 1985-1996. J. Acoust. Soc. Am. 107(6): 3487-95

Pernille, Cláudia, Mark, Teglberg, 2020, The long-range echo scene of the sperm whale, in biosonarBiol. Lett.1620200134 <http://doi.org/10.1098/rsbl.2020.0134>

Poupard M., Best P., Morgan J., Pavan G., Glotin H., 2023, A first vocal repertoire and bioacoustics analyses in *Globicephala melas* (long-finned pilot whale) from Mediterranean Sea, Submitted in Royal Society Biology Proc.

Poupard M., Ferrari, Best, Glotin, 2021, Passive acoustic monitoring of sperm whales and anthropogenic noise using stereophonic recordings in the Mediterranean North West Pelagos Sanctuary, Scientific Report Nature Springer

Poupard M., Ferrari, Schlüter, Marxer, Pavan, Glotin, 2019, Real-time passive acoustic 3D tracking of deep diving cetacean by small non-uniform mobile surface antenna, IEEE ICASSP, Brighton

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 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05917-1>

Poupard et al, 2024, Bioacoustic Interspecific interactions in Arctic Fjord, submitted

Richard, Virtanen, Bello, Ono, Glotin, 2017, Introduction to the special section on sound scene and event analysis, IEEE/ACM Trans on Audio, Speech, and Language Proc 25 (6)

Roch M., Scott Lindeneau, Gurisht Singh Aurora, Kaitlin E. Frasier, John A. Hildebrand, Glotin H., Simone Baumann-Pickering, 2021, Using context to train time-domain echolocation click detectors, The Journal of the Acoustical Society of America 149, 3301-3310
<https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/10.0004992>

Sèbe, Kontovas Christos, Pendleton, 2019, A decision-making framework to reduce the risk of collisions between ships and whales Marine Policy, in Elsevier, 109

Sèbe, Kontovas Christos, Pendleton, 2021, Using choice experiment designs to evaluate mitigation solutions to reduce whale-ship collisions Marine Policy, Elsevier, 124, pp.104368

Silvia, Arcangeli, Mussi, Vivaldi, Ledon, Lagorio, Giacomini, Pavan, Ardizzone, 2018, Habitat suitability modeling in different sperm whale social groups, J of Wildlife Management 82, 5

Tinbergen N., 1963, On aims and methods of ethology, Zeitschrift für Tierpsychologie 20:410-433

Zimmer W. M. X. , Peter L. Tyack, Mark P. Johnson, and Peter T. Madsen, 2005, Three-dimensional beam pattern of regular sperm whale clicks confirms bent-horn hypothesis, The journal of the Acoustical Society of America

Présentations / Communications durant le projet

Les résultats de ce rapport ont été présentés en partie dans les communications suivantes:

Au Workshop du FEDER GIAS 2022:

<https://docs.google.com/presentation/d/1BZ1ltKNC4KEDv-fDKii6ZoiA5U1xQdZoKTCAJswJm34/edit?usp=sharing>

Aux Conseils Nationaux Scientific Pelagos de 2021 (Ajaccio), 2022 (Cavalaire), et 2023 (Ajaccio):

http://sabiod.lis-lab.fr/pub/BOMBYX-2_wkp_et_CNSPELAGOS_Glotin_202211.pdf

A l'inauguration du KM3Env : Best P., Marxer R., Paris S., Glotin H., 2023, "Probing the Fin Whale Song Evolution", KM3Env inauguration, CPPM, Marseille

http://sabiod.lis-lab.fr/pub/Fin_Whale_Song_KM3Env_inauguration2023.pdf

Dans le documentaire "La bioacoustique des cachalots", reportage CNRS 2020 :

https://www.youtube.com/watch?v=g3xXM_tycCU

Dans le reportage JT de France 2 de Juin 2021 :

Extrait de l'émission [13h15, le samedi](#) diffusée sur France2 le 19/06/2021,

<http://sabiod.lis-lab.fr/media/13h15.le.samedi.Fr2.20210619.mp4>

'Plongée sonore avec les cétacés', 2023, Exposition du Musée d'Histoire Naturelle du Var d'Avril 2023 à Avril 2024, Giraudet et Glotin commissaires de l'exposition,

http://sabiod.lis-lab.fr/media/19-20_20230505_480p.mp4

WhaleWay-1 et 2 : Arte 2022, par T Ragobert

WhaleWay-3 avec WeExplore : <https://www.youtube.com/watch?v=81G2CbizzxI>

Film "Silence en Méditerranée", 52 min, par J. Granjeon, 2022,

http://sabiod.lis-lab.fr/media/silence_en_mediterranee_extrait.mp4

France Inter : Plongée aux côtés des cachalots [Audio], La Chronique Environnementale du 10 août 2021, par Camille Crosnier, France Inter

http://sabiod.lis-lab.fr/media/18099-10.08.2021-ITEMA_22743883-2021F29364S0222.mp3

ANNEXE

A1. Sensibilité des hydrophones SQ26 et C57

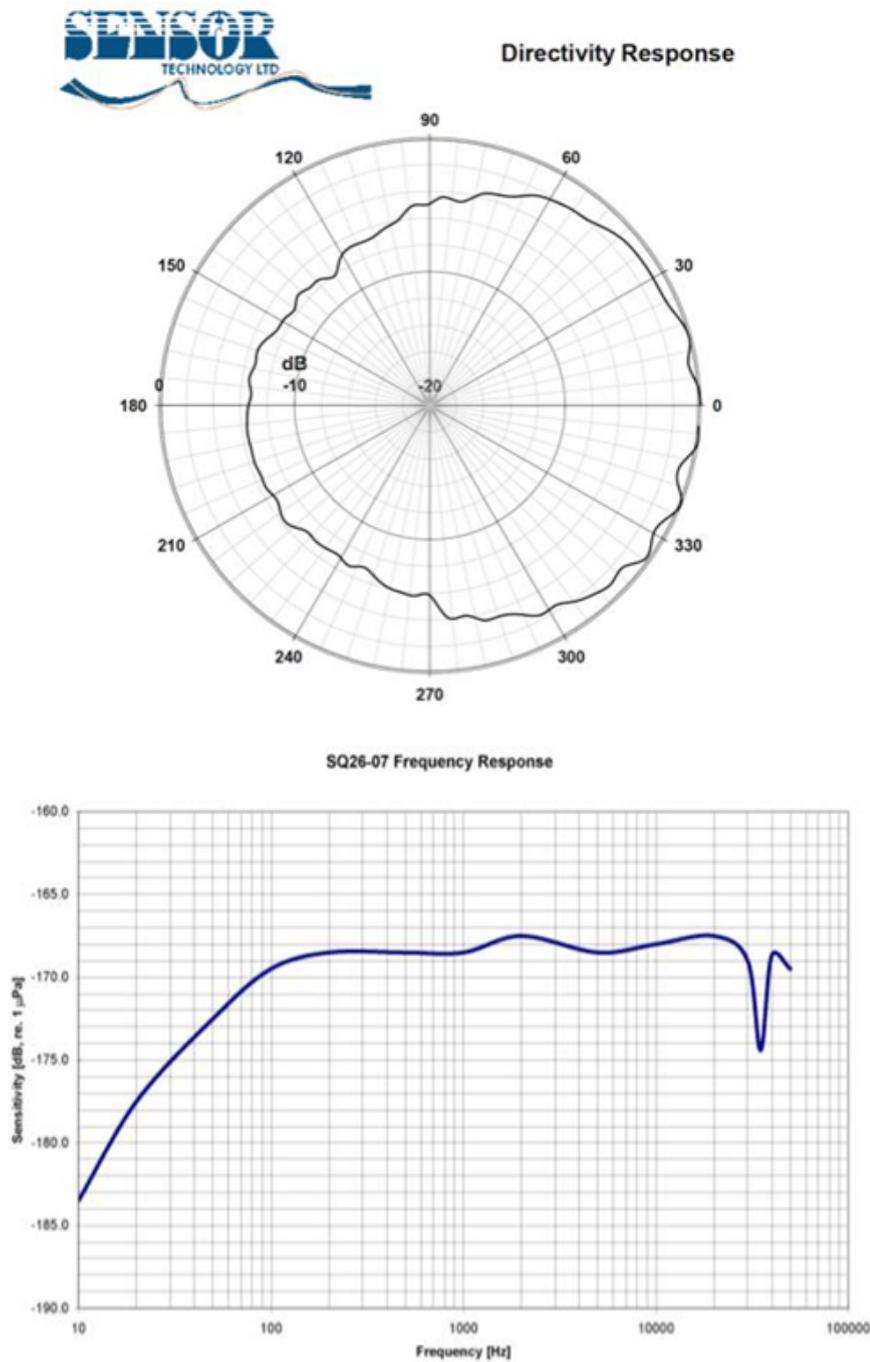


Figure A1.1 : Réponse de l'hydrophone utilisé (SQ26) sur Antenne JASON (4 x SQ26) et en un exemplaire sur BOMBYX-2.

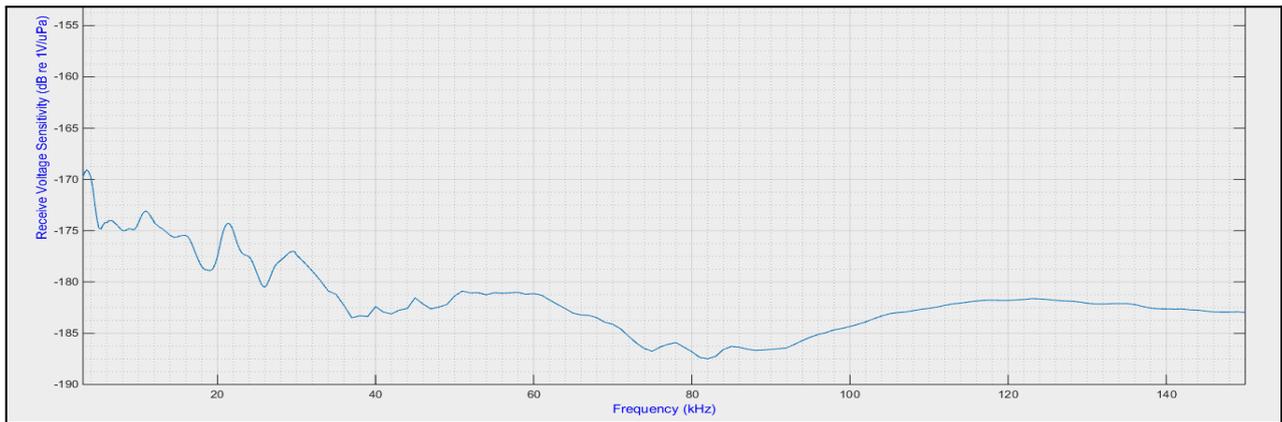


Figure A1.2. : sensibilité de l'hydrophone C57 de Cetacean Research qui équipe BOMBYX-2 et Baguera, haute fréquence C57.

Table A1.1. : Spécifications de l'hydrophone C57

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

A2. Estimation dB absolus

Code de calcul dB

voltage_hydro = 3.3 / 2

gain_hydro = 20*np.log10(1)

#sensibility hydro : SQ26 -> -169, CR3 -> -207, C75 -> -200, C57 -> -187

sensibility_hydro = -169

sig = sig + 20*np.log10(voltage_hydro) - gain_hydro - sensibility_hydro

A3. Suivis compilés des cachalots enregistrés depuis bateau WW-4

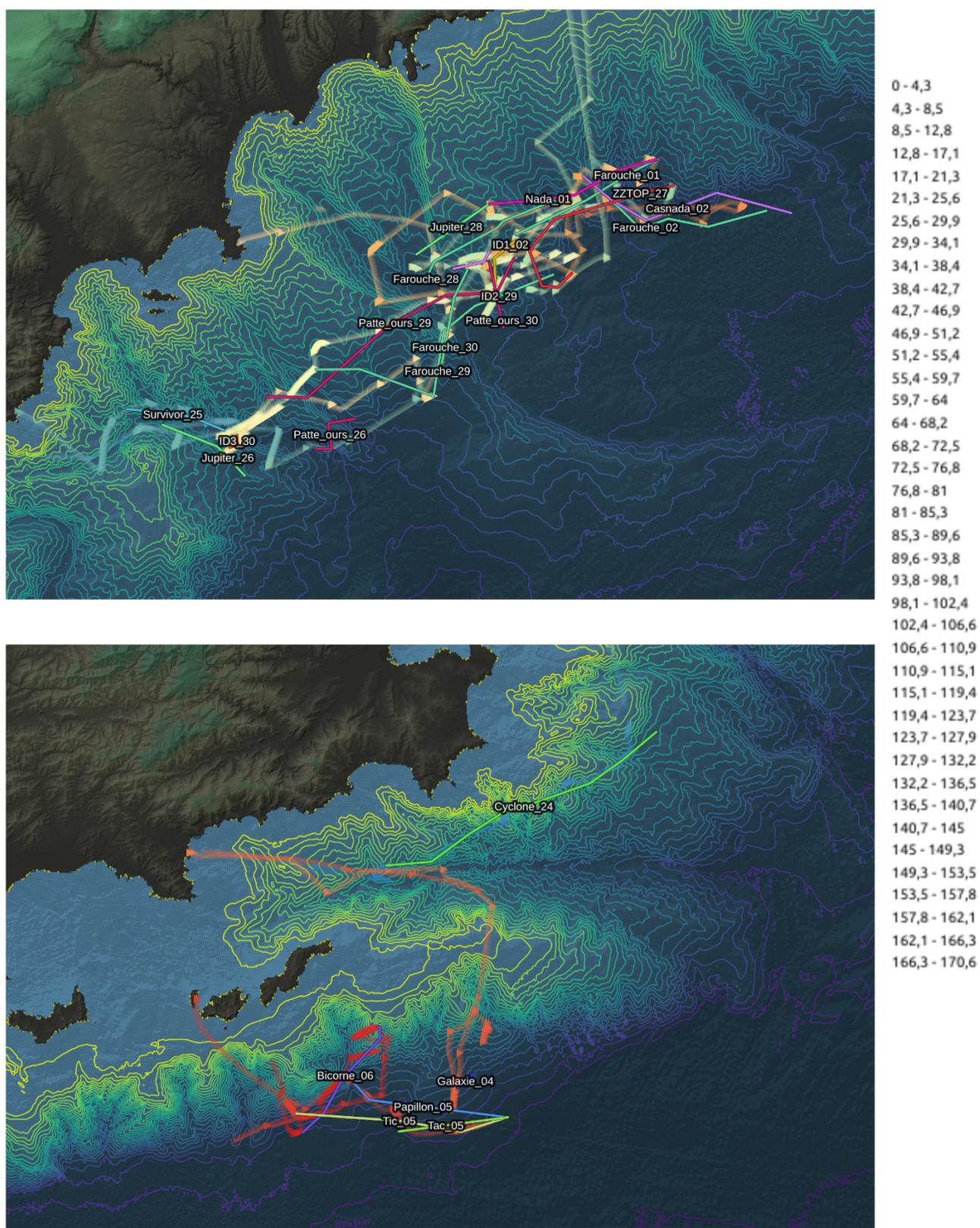


Figure A3.1 : Traces des cachalots lors de la mission WhaleWay-4 septembre 2023.

(Haut) Les observations au bord du Canyon du Var; (Bas) Vers Iles d'Or.

La courbe colorée représente le trajet du bateau de la mission en fonction du temps en heure, avec

bleu=début de mission à 0h, et rouge=fin de mission après 170h. Les segments symbolisent les jambes des pistes des cachalots entre chacune de leurs positions en surface.

A4. Suivis journaliers des cachalots pendant WW-4

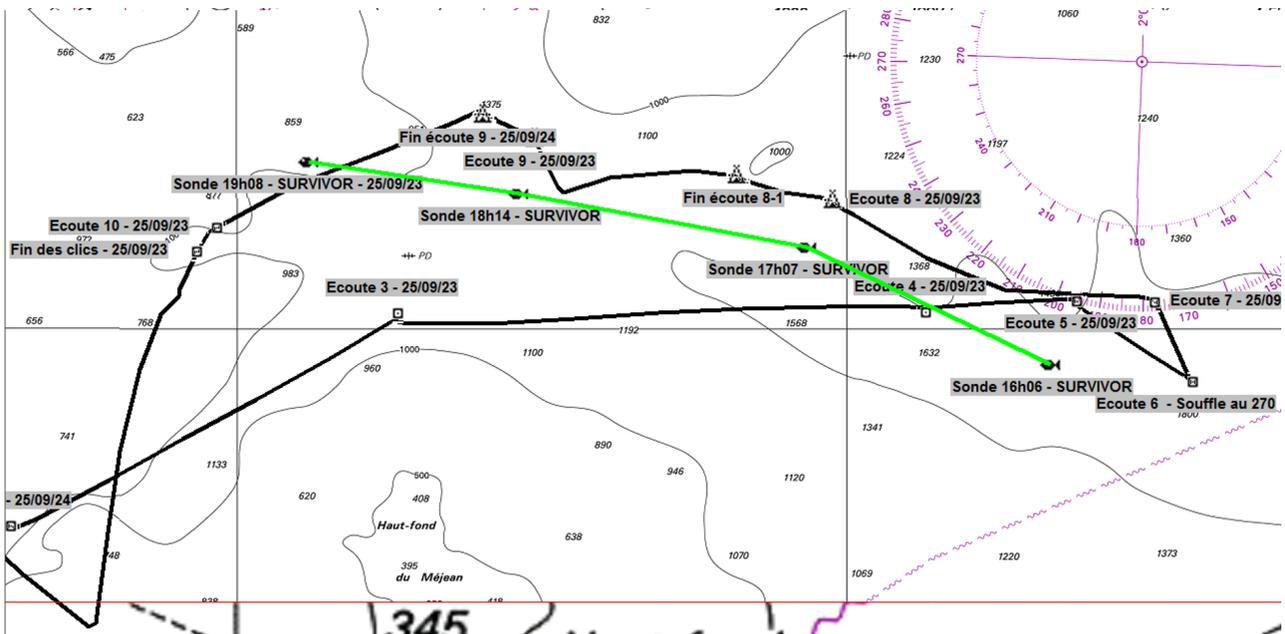
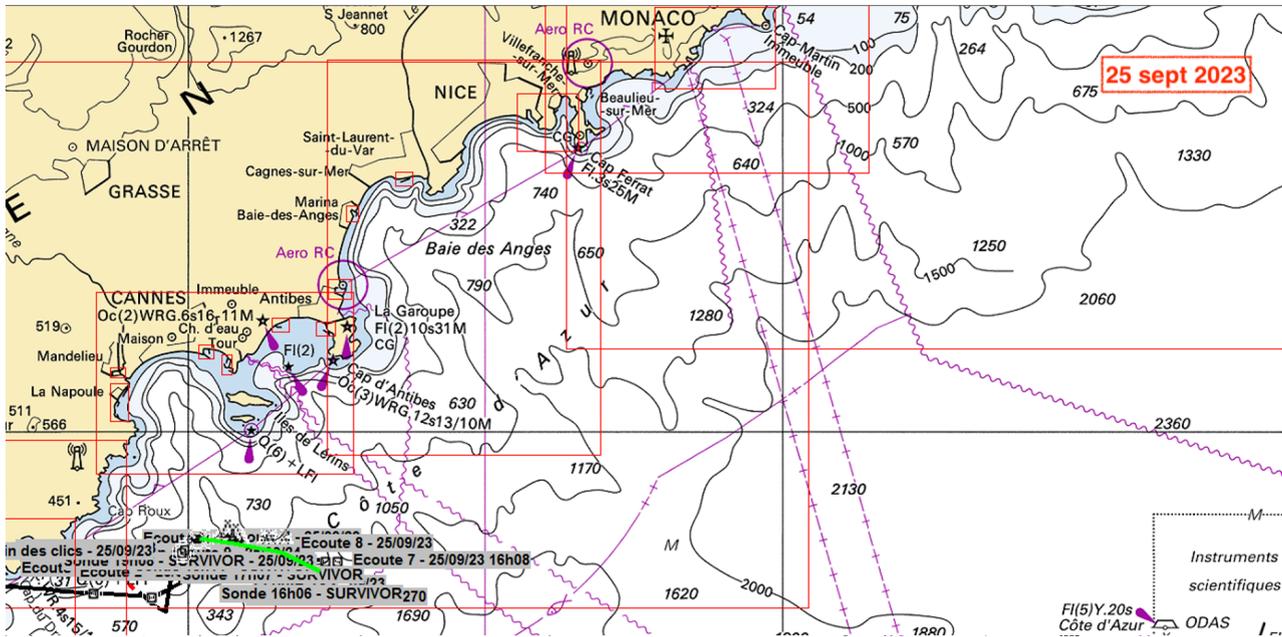


Figure A4.1 : (Haut) Suivi réalisé le 25 septembre 2023 pendant la mission WhaleWay-4. (Bas) Zoom sur le suivi d'un individu, tracé en vert.

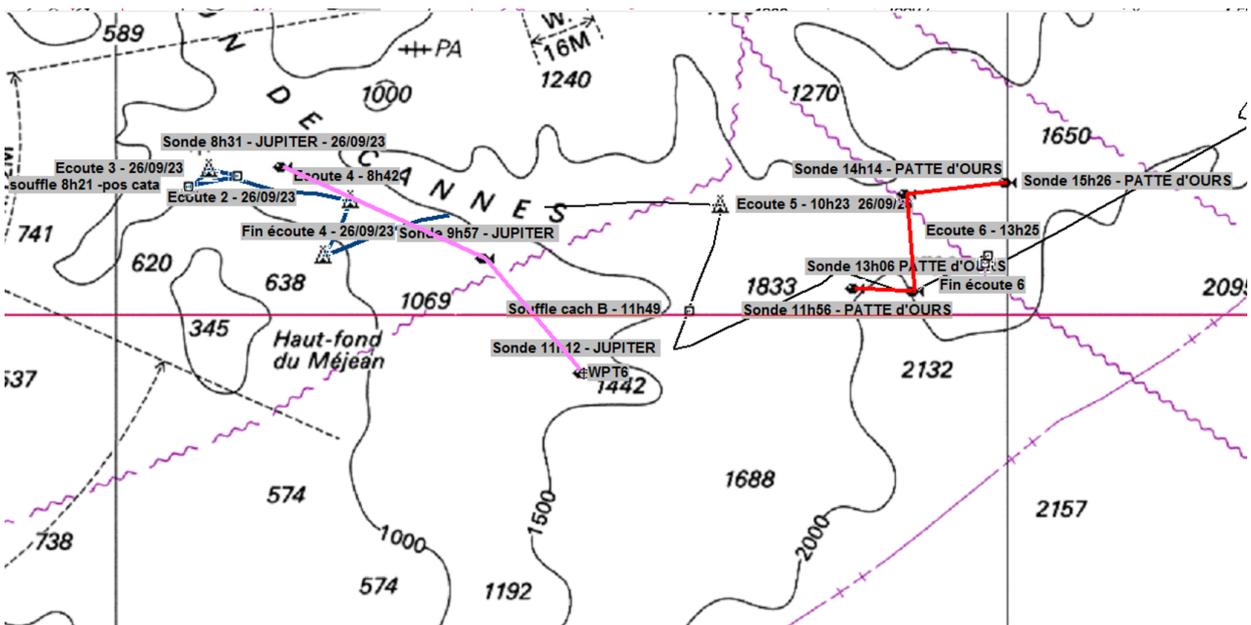
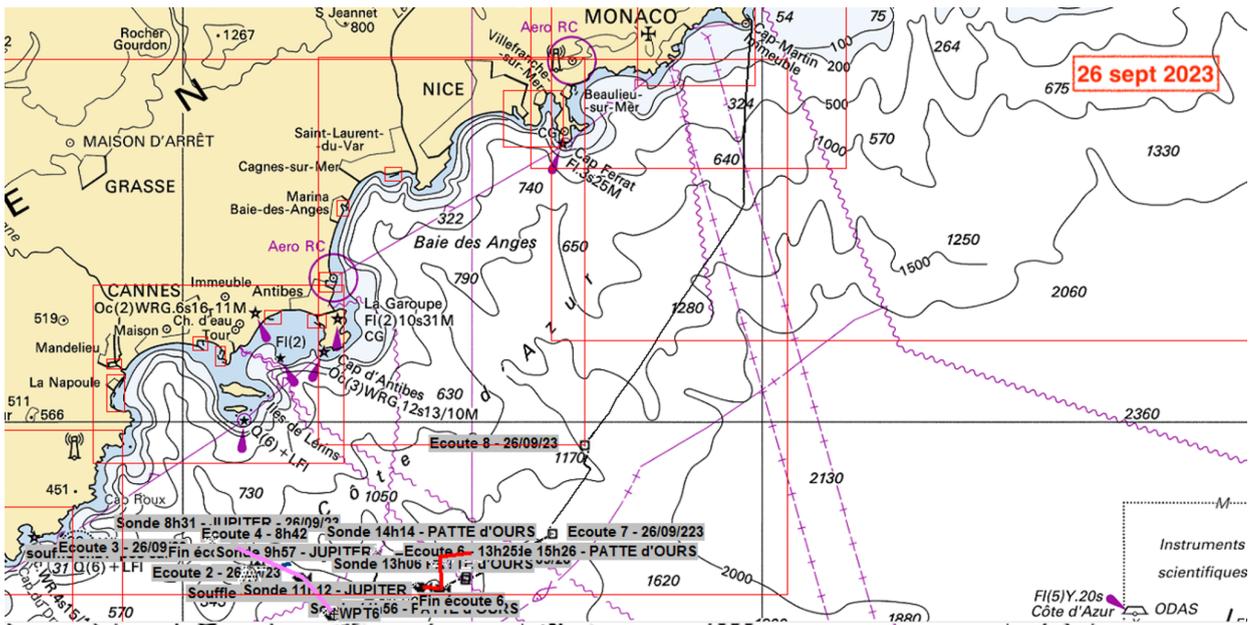


Figure A4.2: (Haut) Suivi réalisé le 26 septembre 2023 pendant la mission WhaleWay-4 (Bas) Zoom sur le suivi de deux individus: Patte d'ours en rouge, et Jupiter en rose.

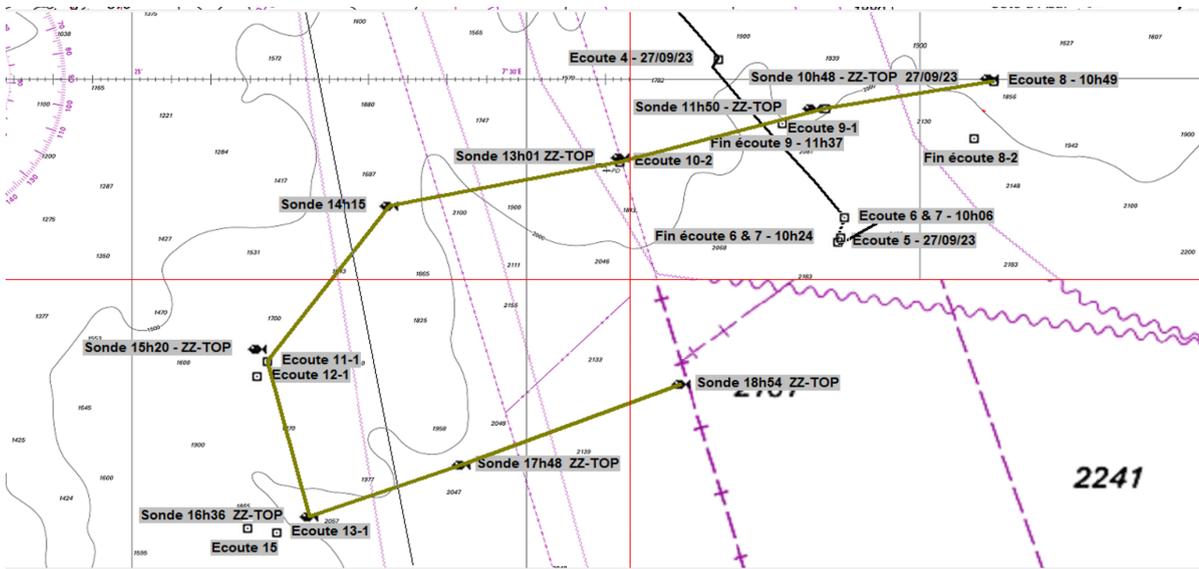
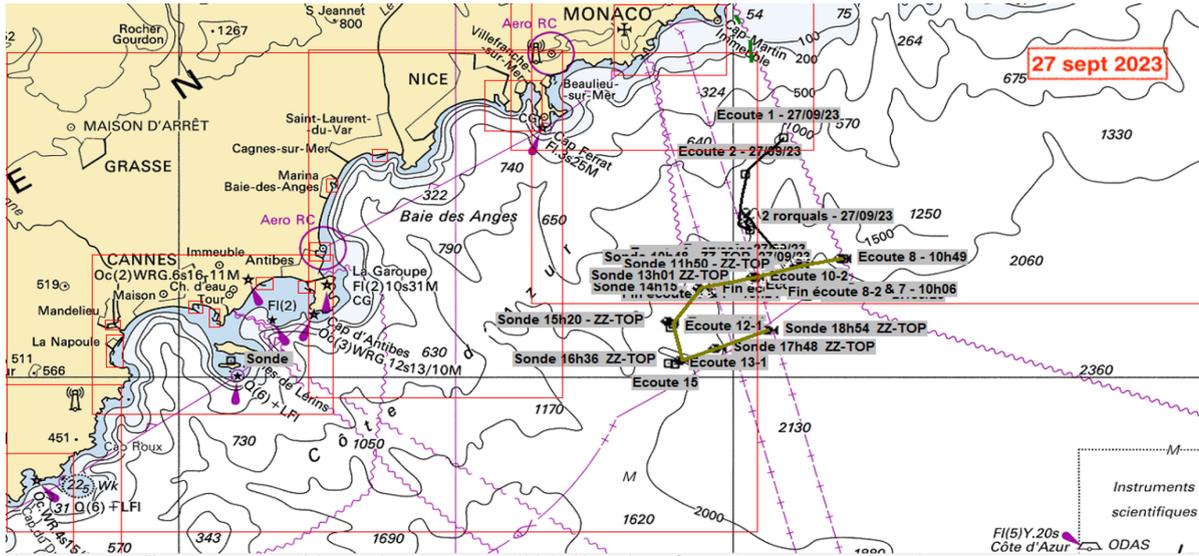


Figure A4.3 : (Haut) Suivi réalisé le 27 septembre 2023 pendant la mission WhaleWay. (Bas) Zoom sur le suivi d'un individu: ZZ-top, en vert.

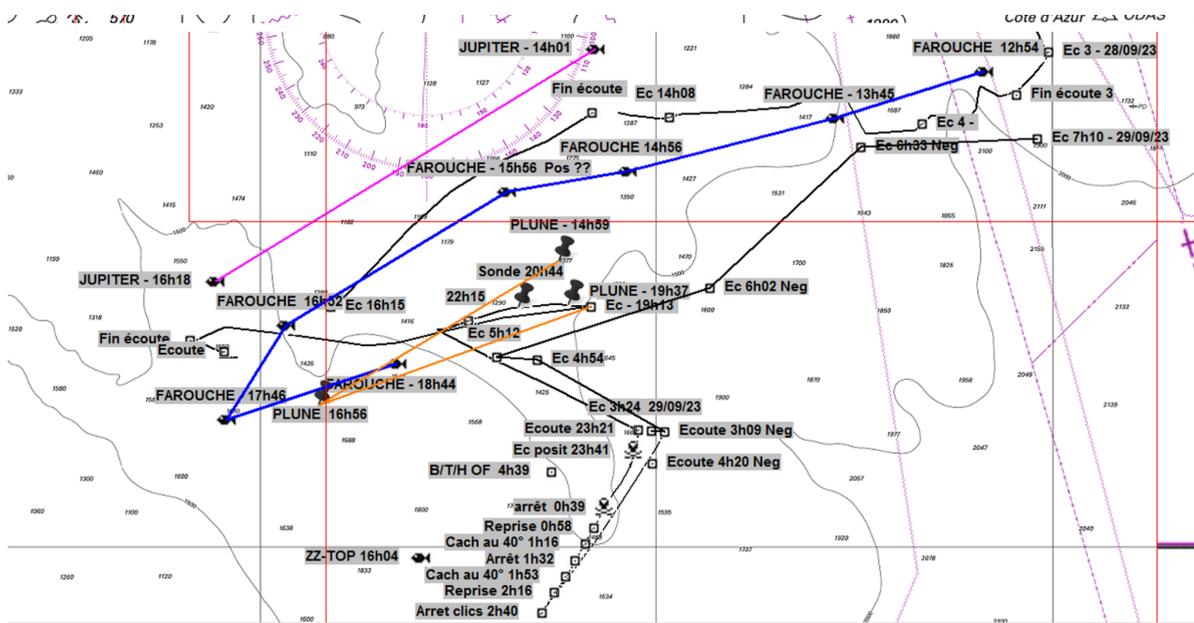
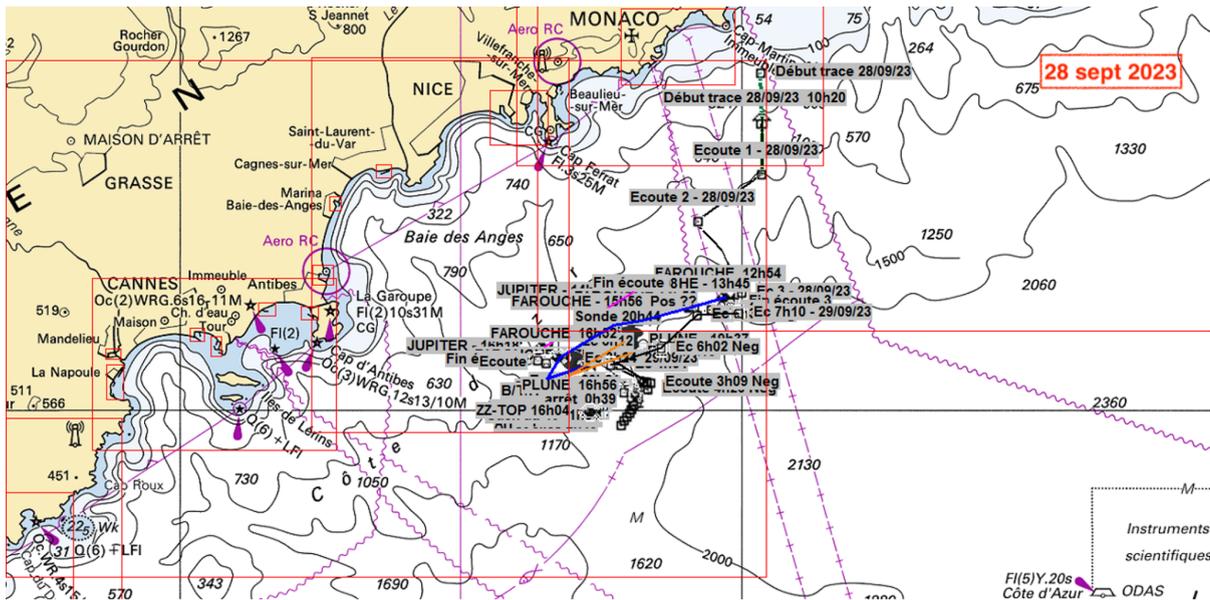


Figure A4.4: (Haut) Suivi réalisé le 28 septembre 2023 pendant la mission WhaleWay. (Bas) Zoom sur le suivi de quatre individus: Jupiter, Farouche, Plune et ZZ-top.

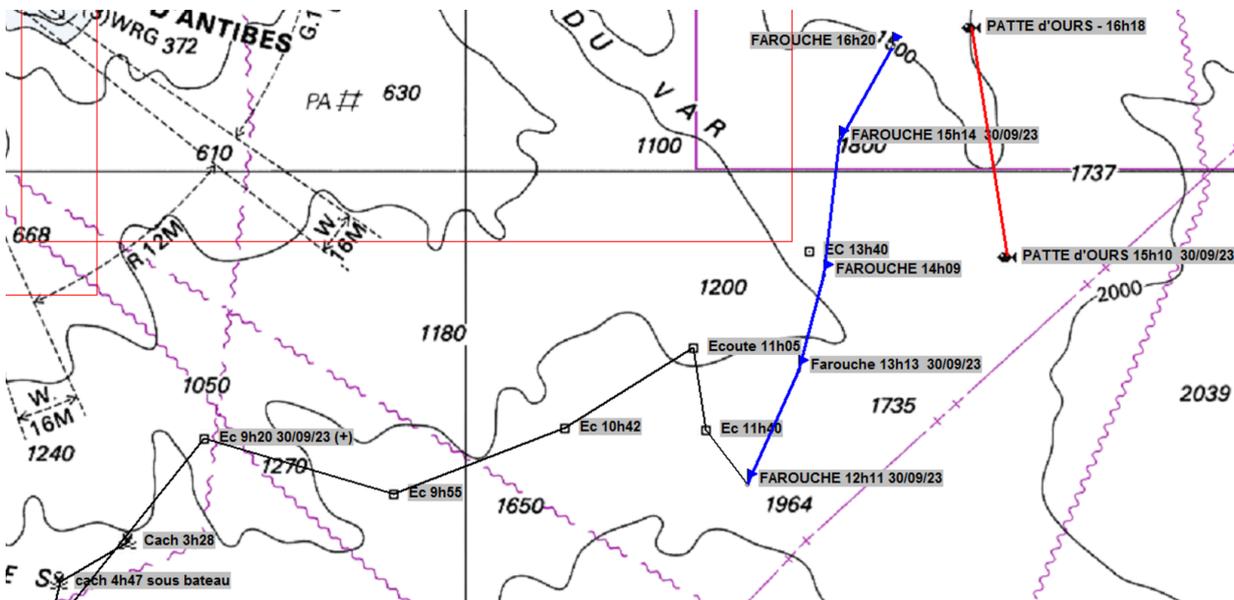
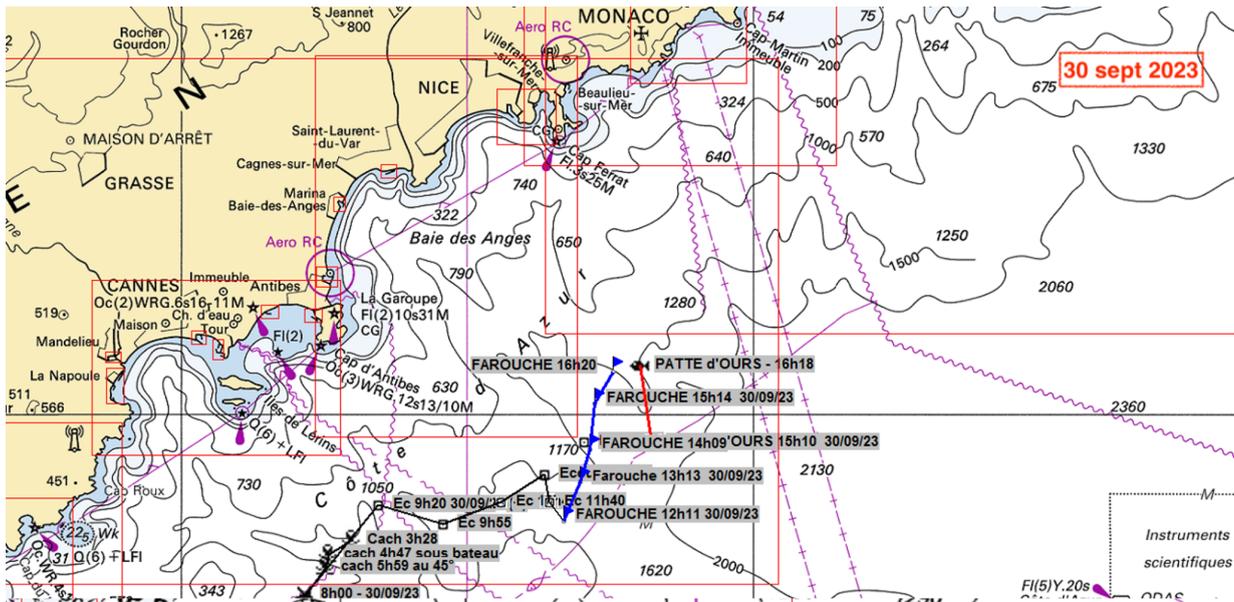


Figure A4.5 : (Haut) Suivi réalisé le 30 septembre 2023 pendant la mission WhaleWay-4. (Bas) Zoom sur le suivi de deux individus: Patte d'Ours et Farouche.

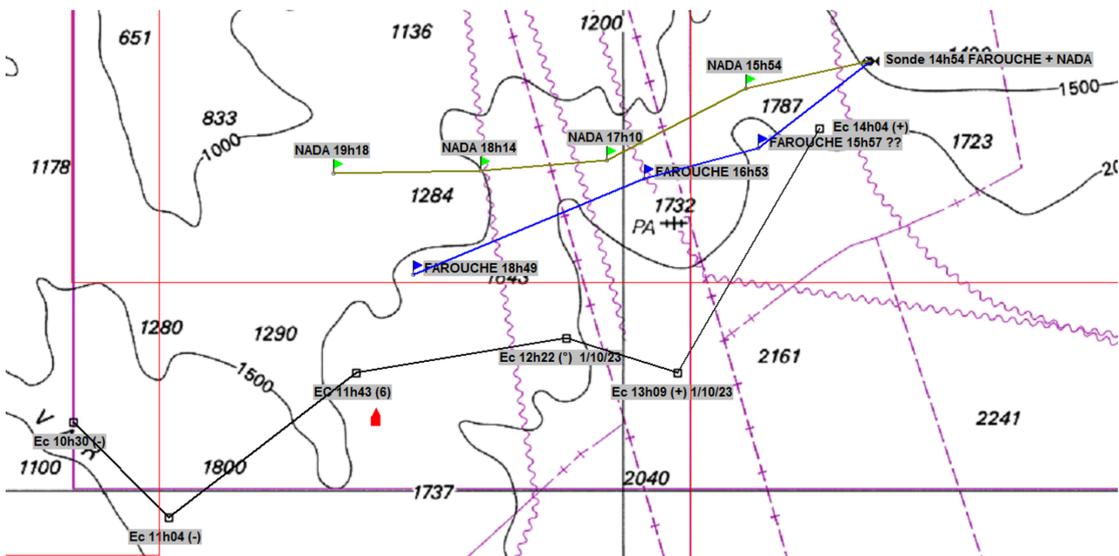
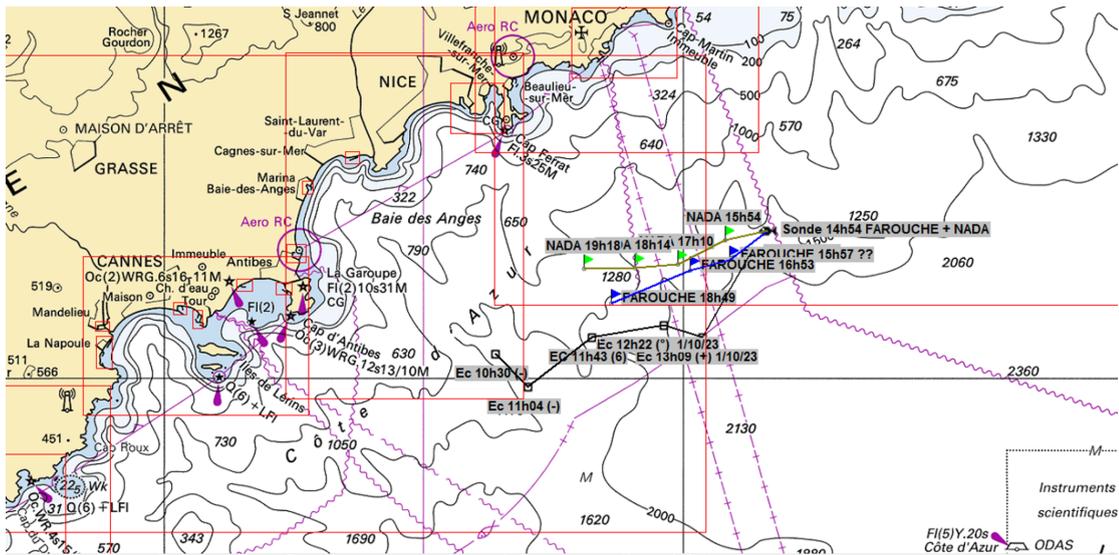


Figure A4.6: (Haut) Suivi réalisé le 01 octobre 2023 pendant la mission WhaleWay (Bas) Zoom sur le suivi de deux individus: Farouche et Nada.

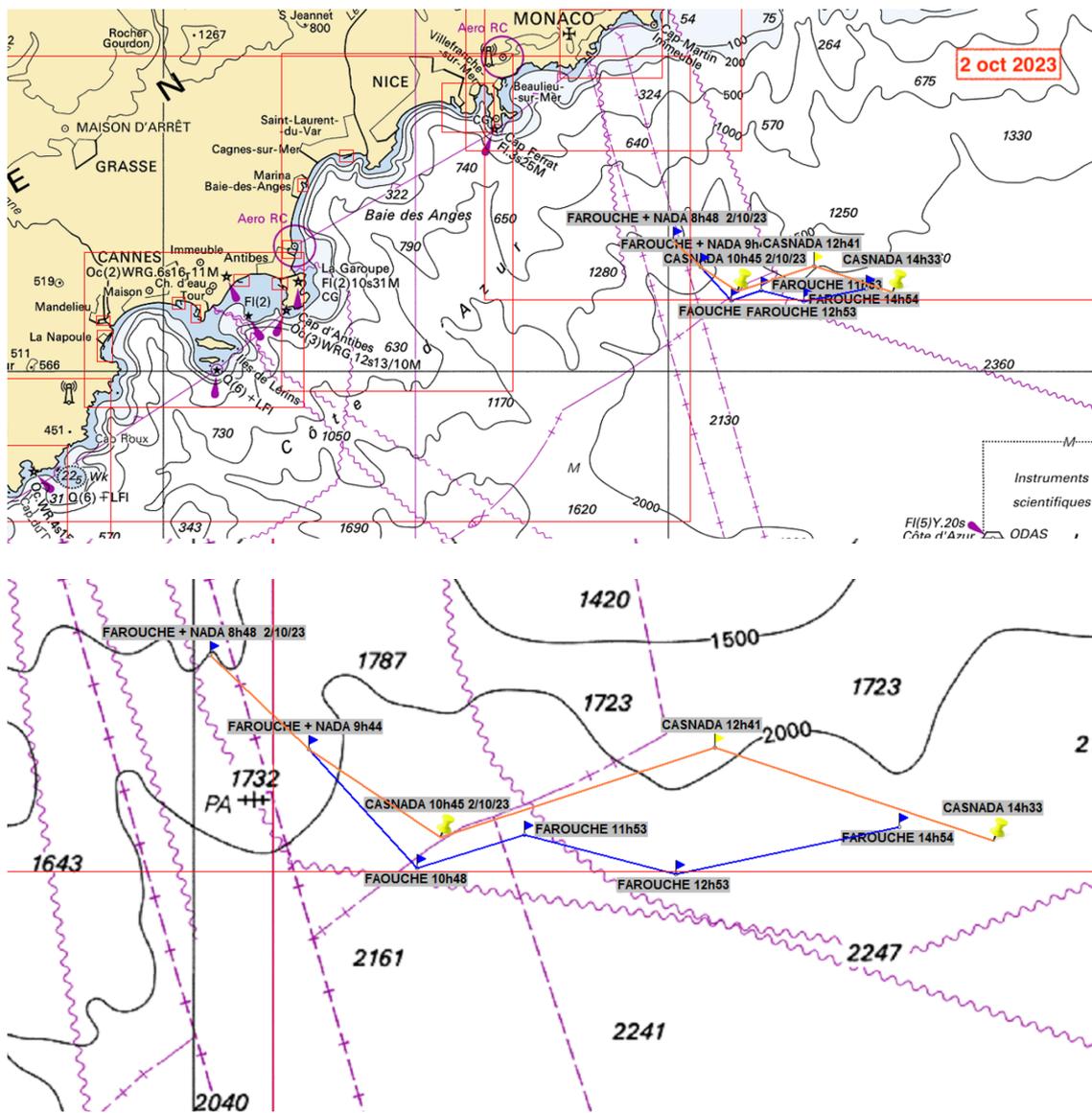


Figure A4.7: (Haut) Suivi réalisé le 02 octobre 2023 pendant la mission WhaleWay. (Bas) Zoom sur le suivi de deux individus.

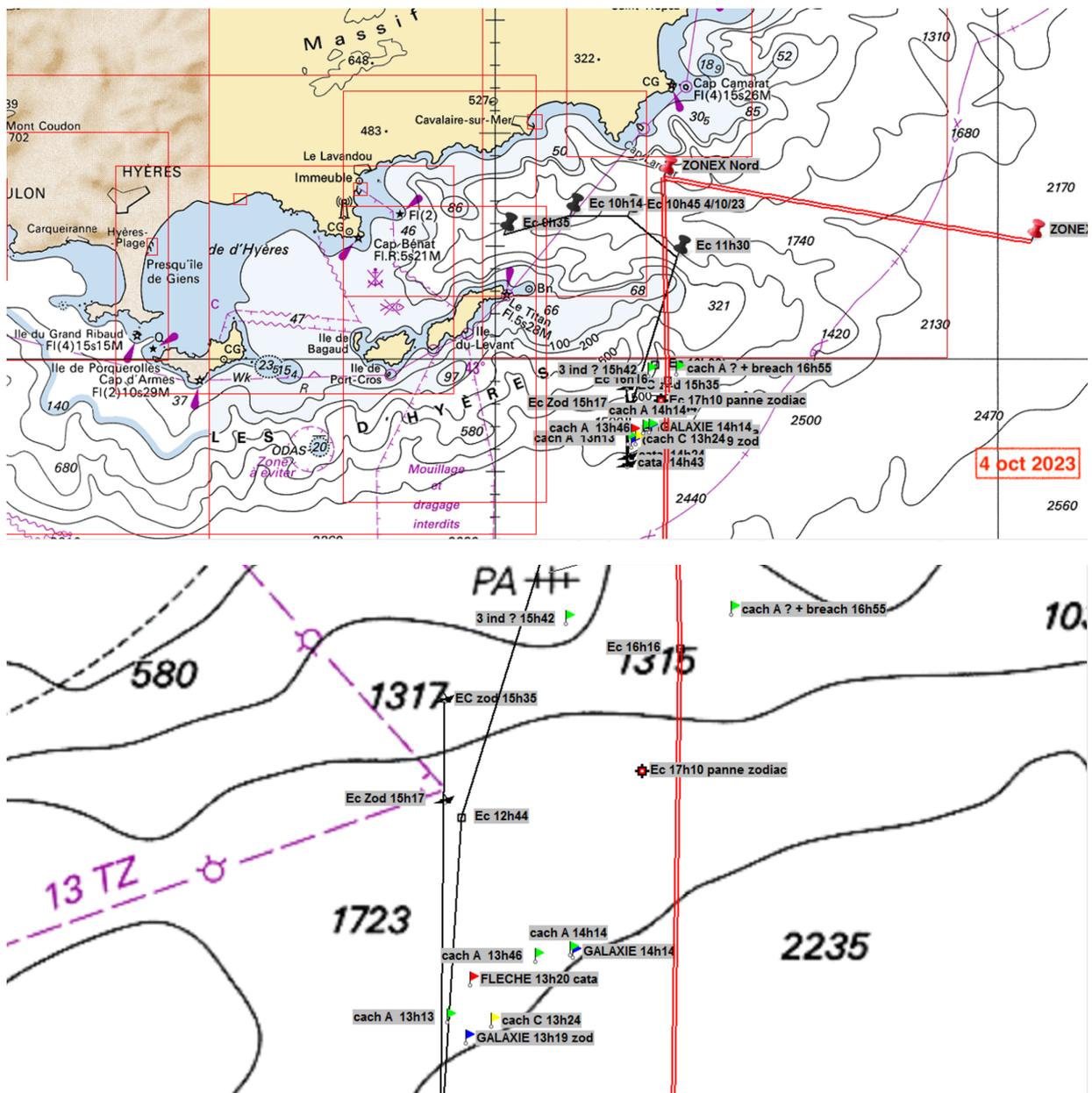


Figure A4.8: (Haut) Suivi réalisé le 04 octobre 2023 pendant la mission WhaleWay-4., (Bas) Zoom sur le suivi de plusieurs individus.

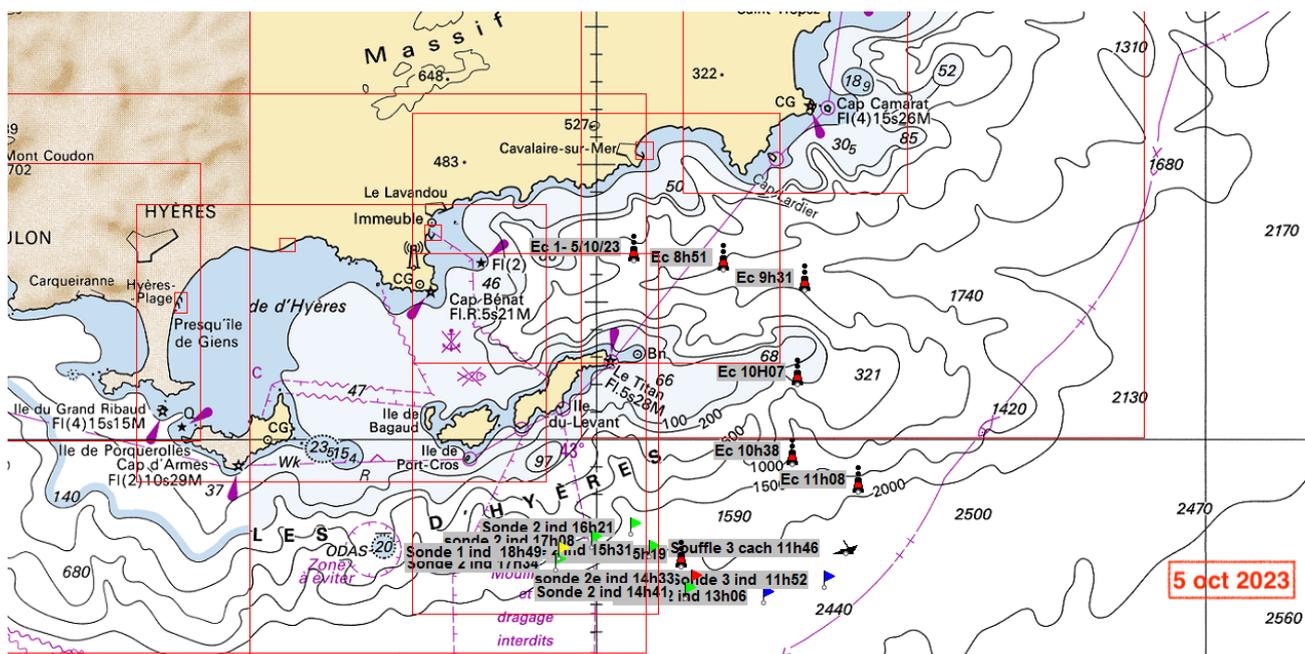


Figure A4.9: Suivi réalisé le 05 octobre 2023 pendant la mission WhaleWay-4.

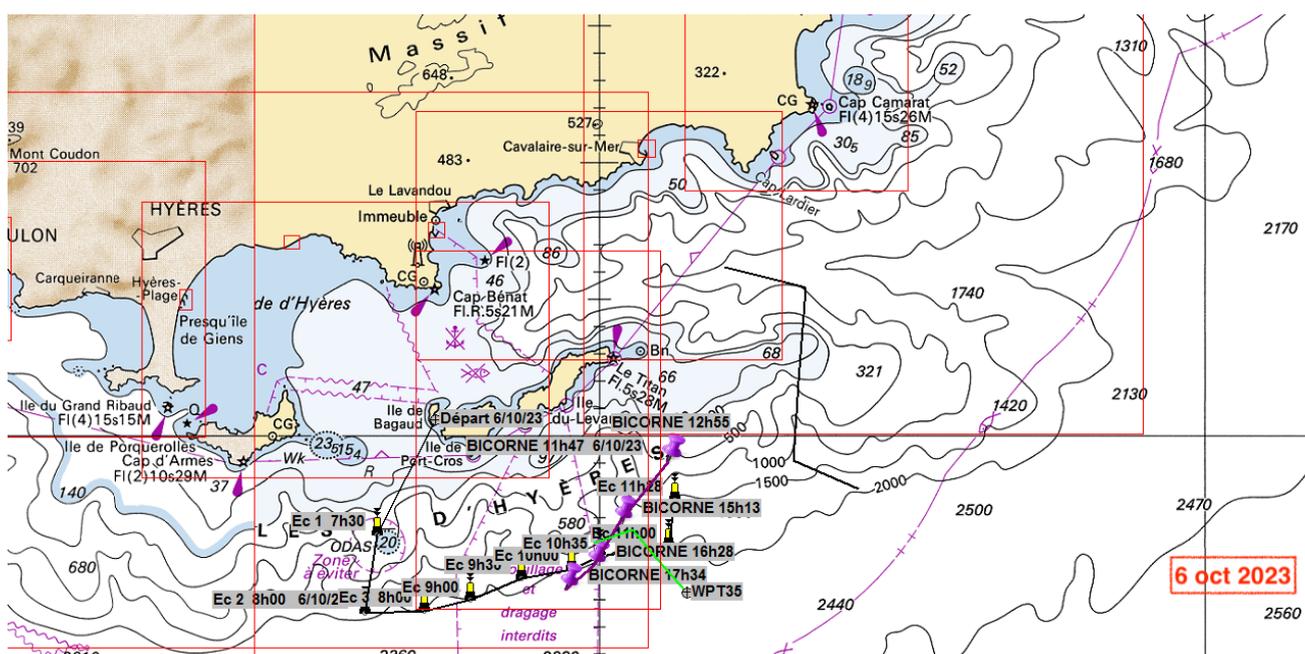


Figure A4.10 : Suivi réalisé le 06 octobre 2023 pendant la mission WhaleWay-4. (Heures locales).

A5. IPI par les antennes mobiles Tétrà et Penta à WW-4 de 2023/09/23 à 2023/10/07

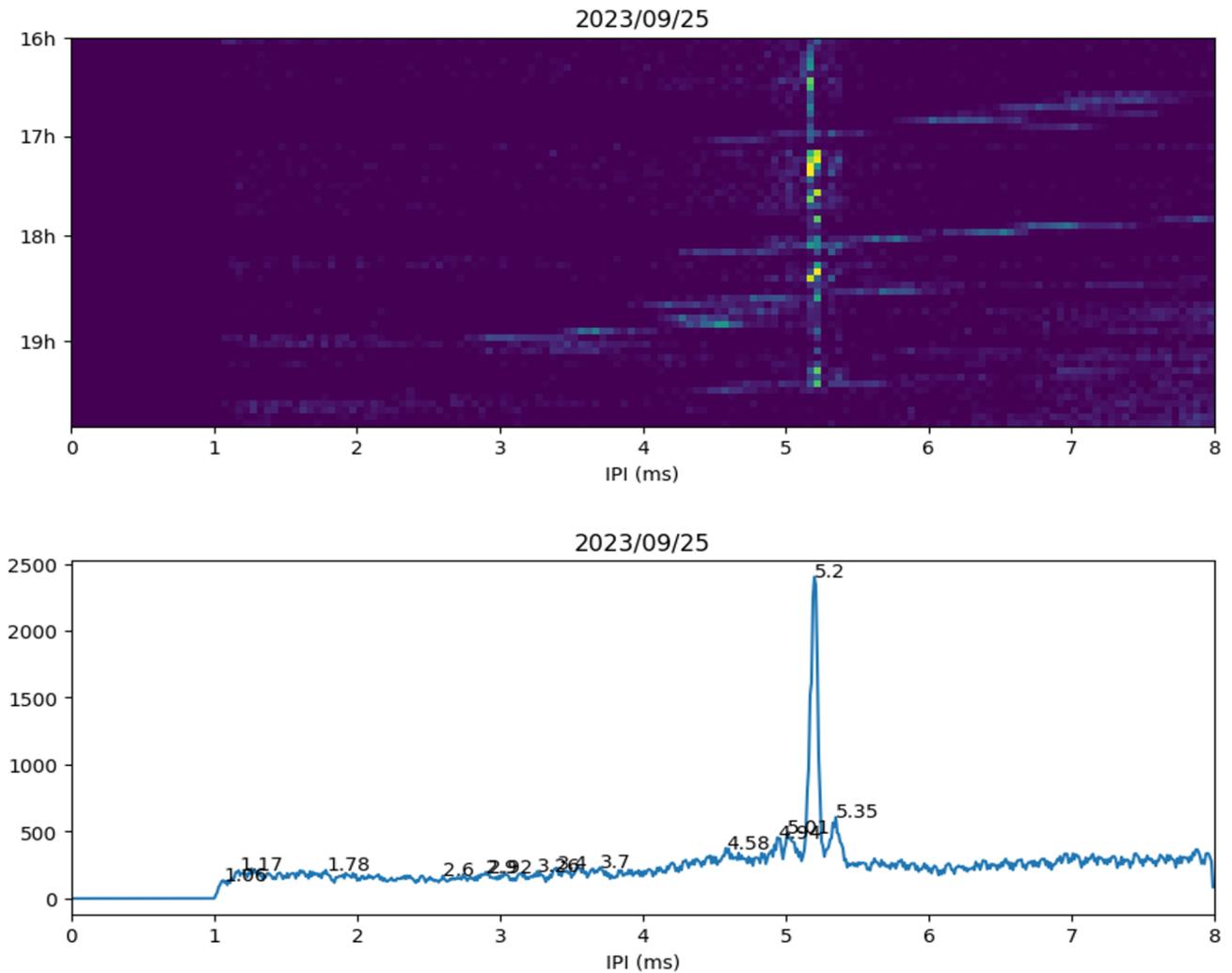


Figure : (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures locales (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leur IPI, ici Survivor.

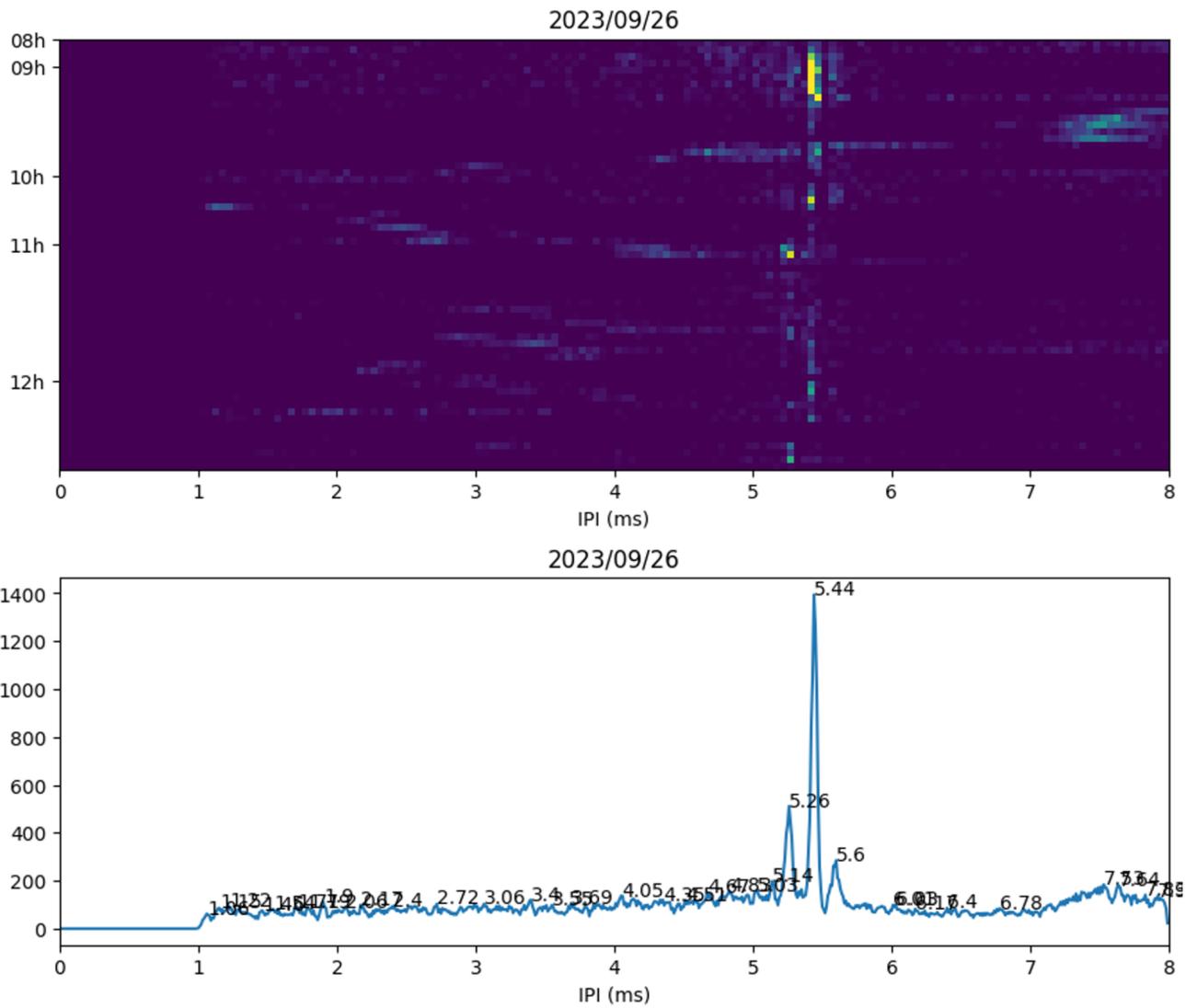


Figure : (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures locales. (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leur IPI, ici Patte d'ours et Jupiter.

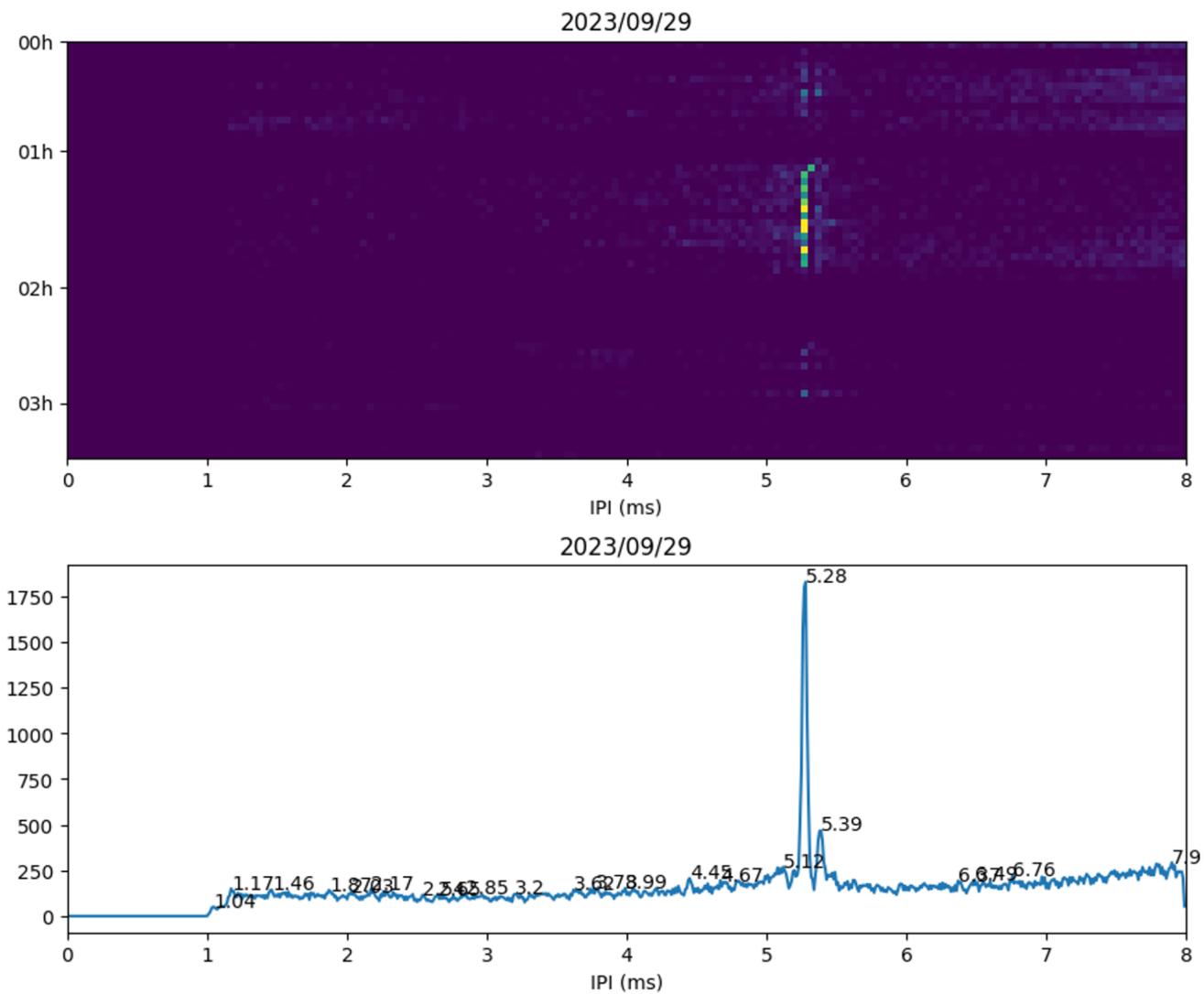


Figure : (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures locales. (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leur IPI, ici Patte d'ours et Farouche et Jupiter.

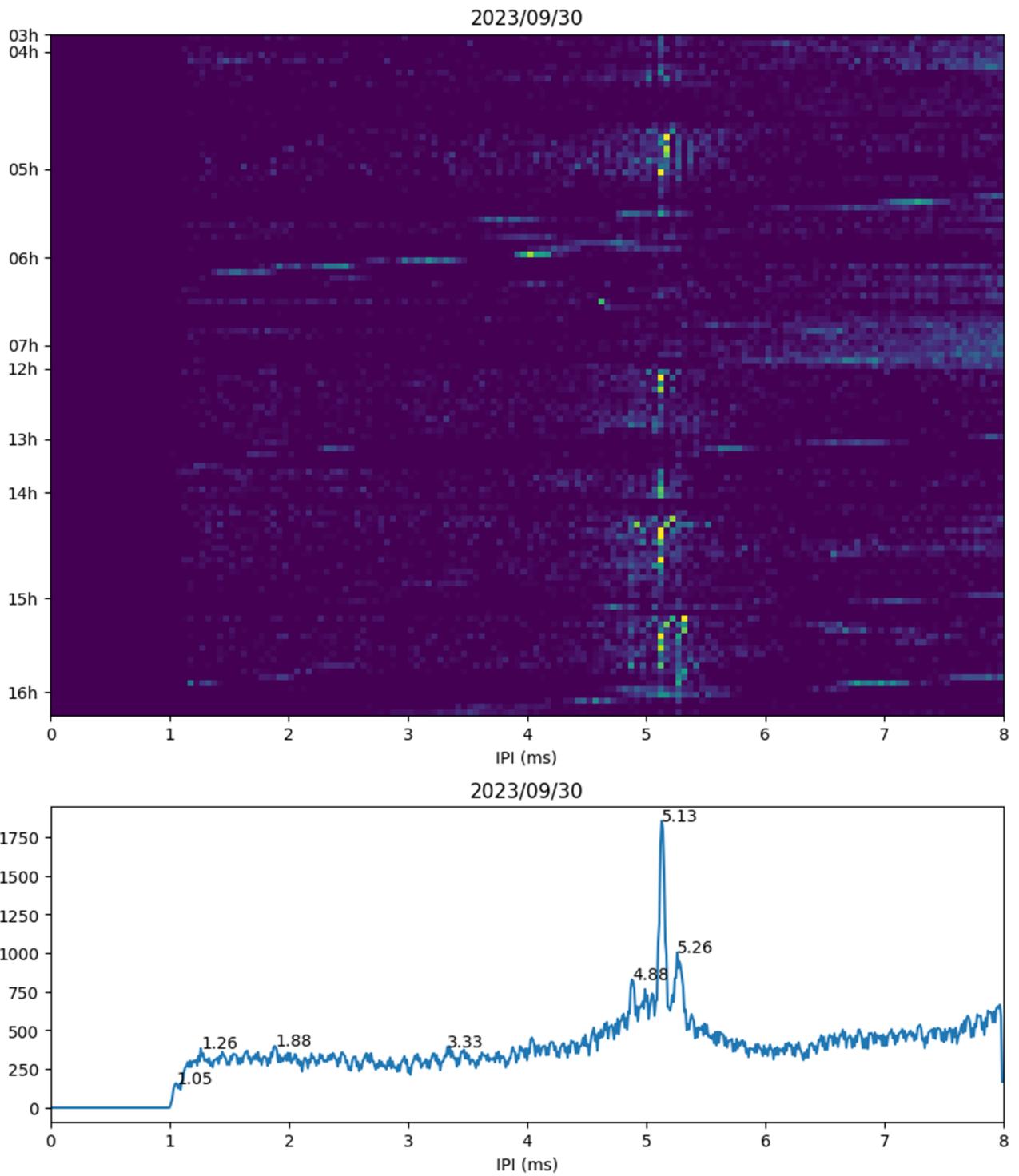


Figure : (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures locales. (Bas) histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leur IPI, ici Patte d'ours et Farouche.

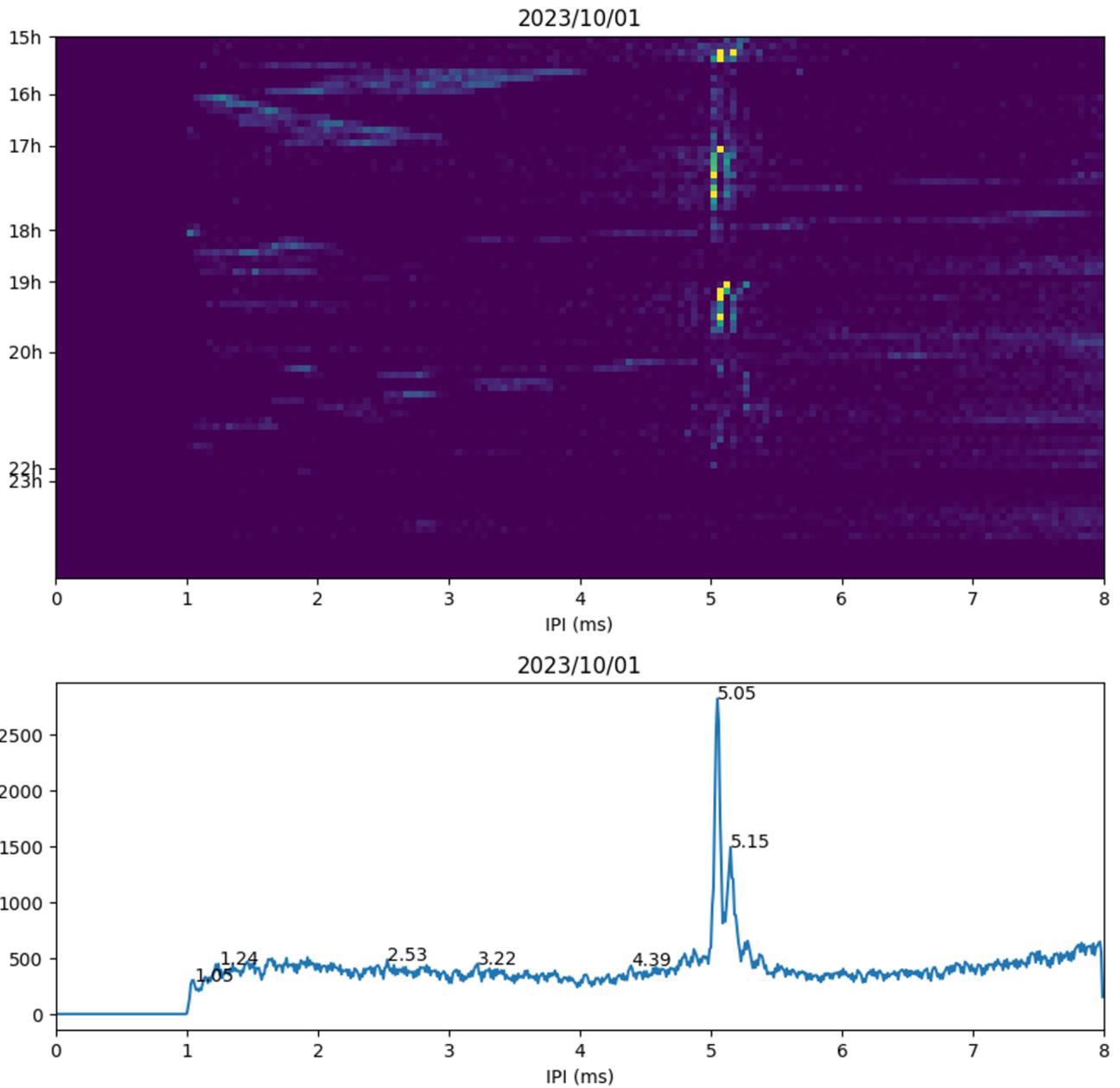


Figure : (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures locales. (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leur IPI, ici Nada et Farouche.

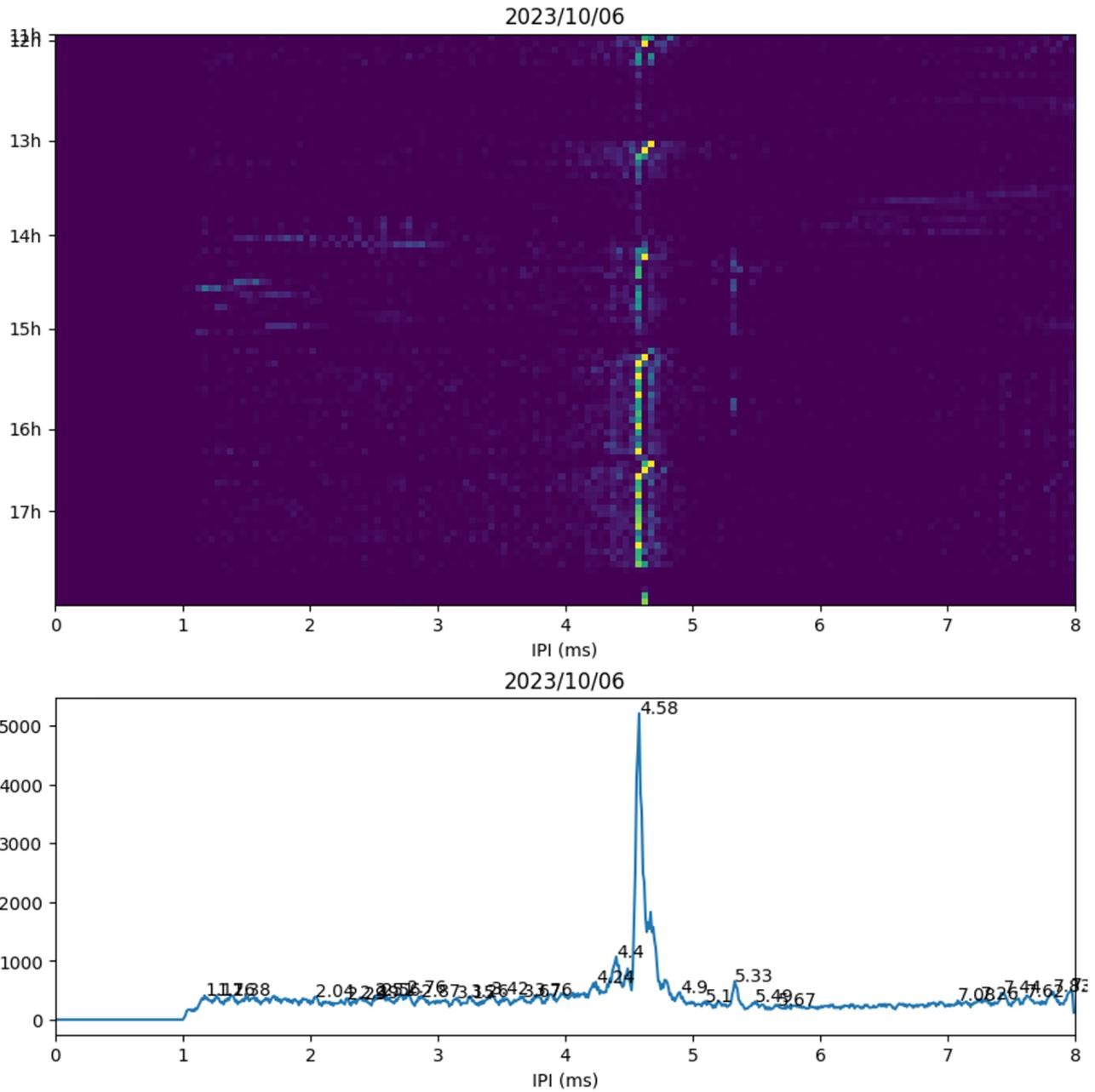


Figure : (Haut) Suivi de la piste en Intervalle inter pulse dans les heures (Bas) Histogramme des Intervalles inter pulse de la piste montrant le nombre d'individus et leur IPI, ici Bicorne.

A6. IPI sur Baguera WW-4 du 2023/09/23 au 2023/10/07

Quelques mesures de Baguera sont données ci-dessous pour comparaison avec les mesures de Penta données dans les sections précédentes. La similitude des traces montre la consistance des ces estimations IPI.

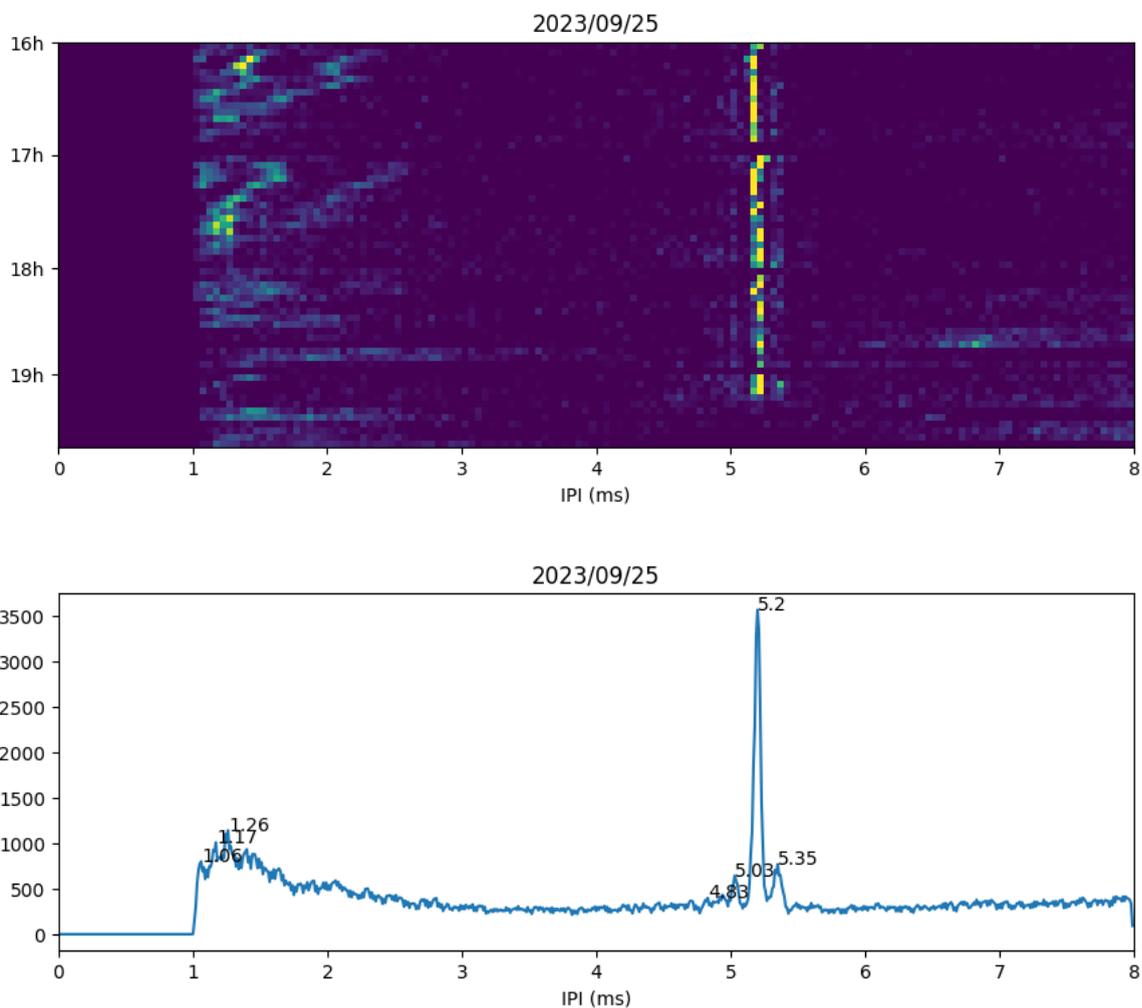


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

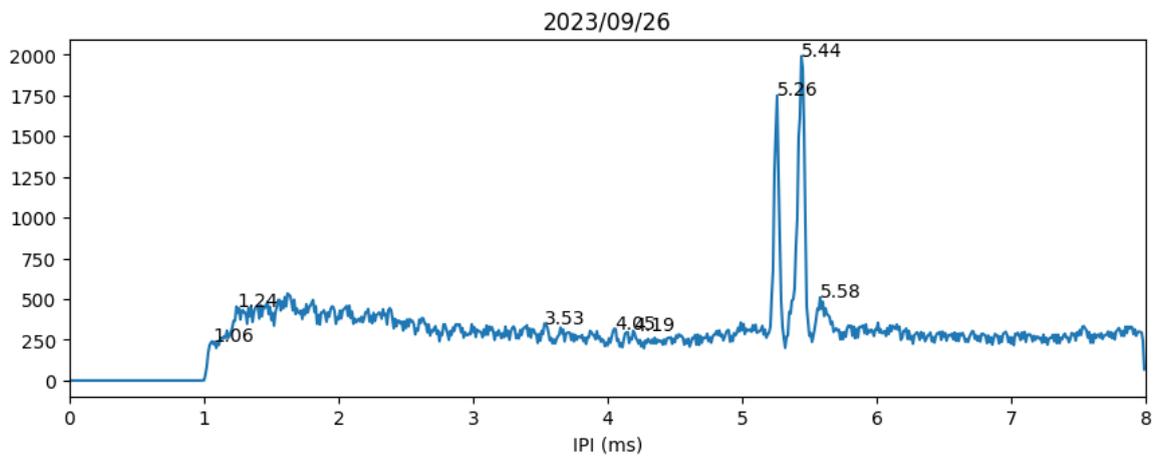
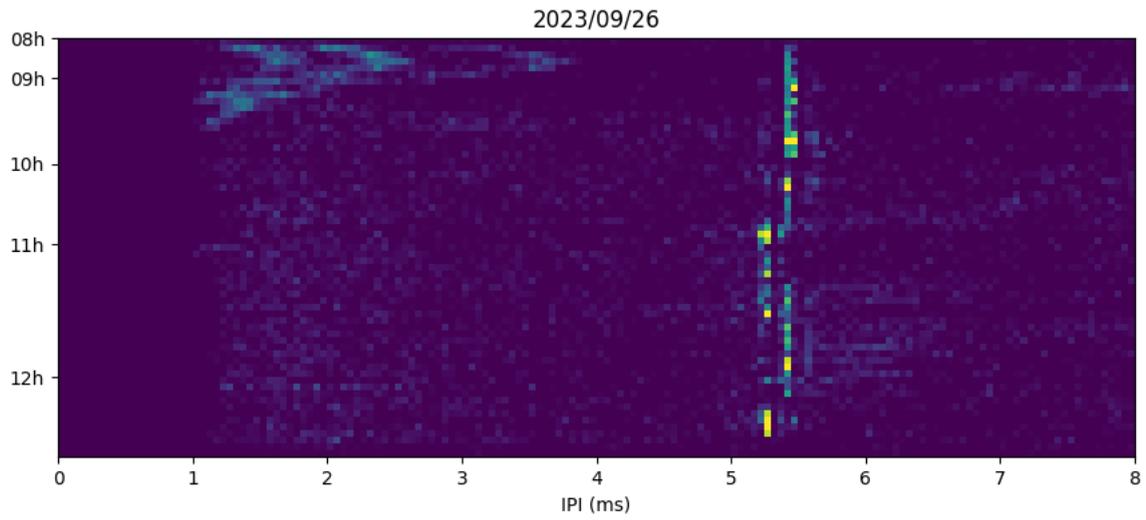


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

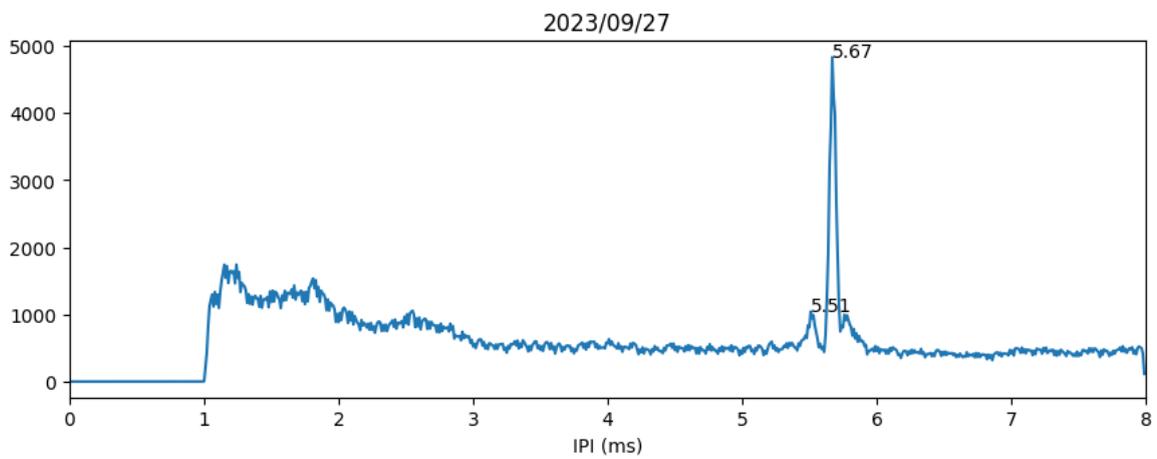
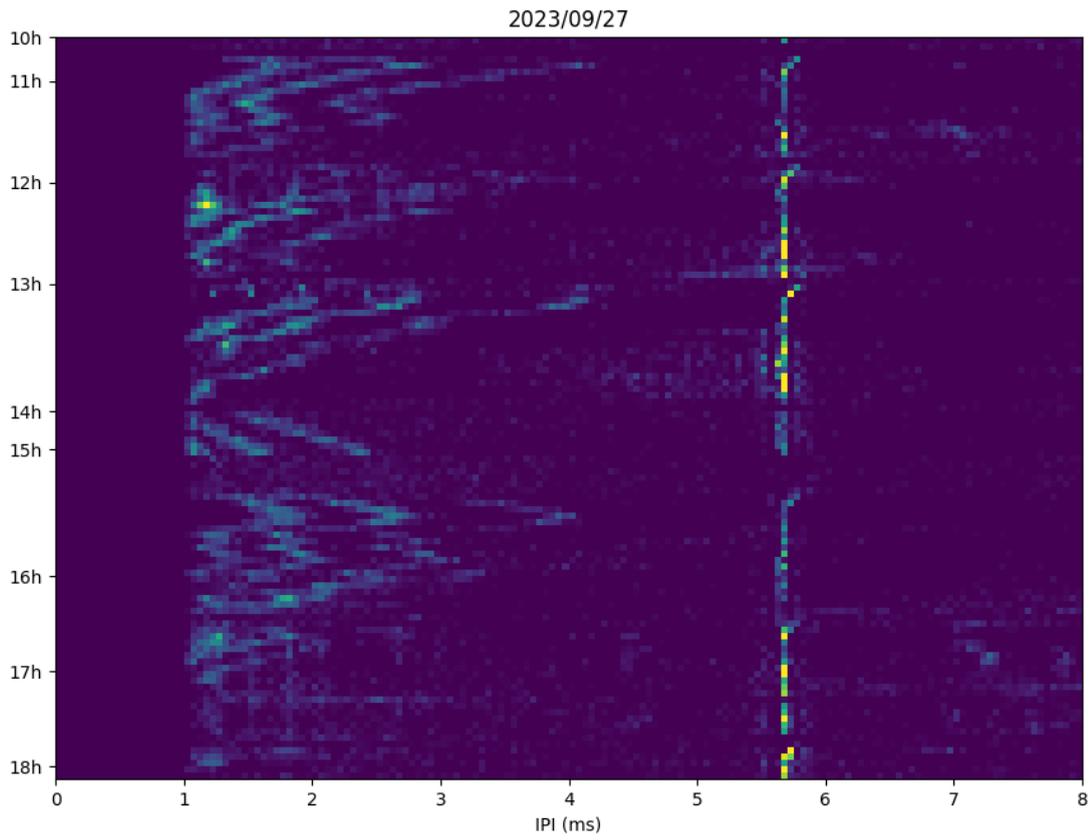


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

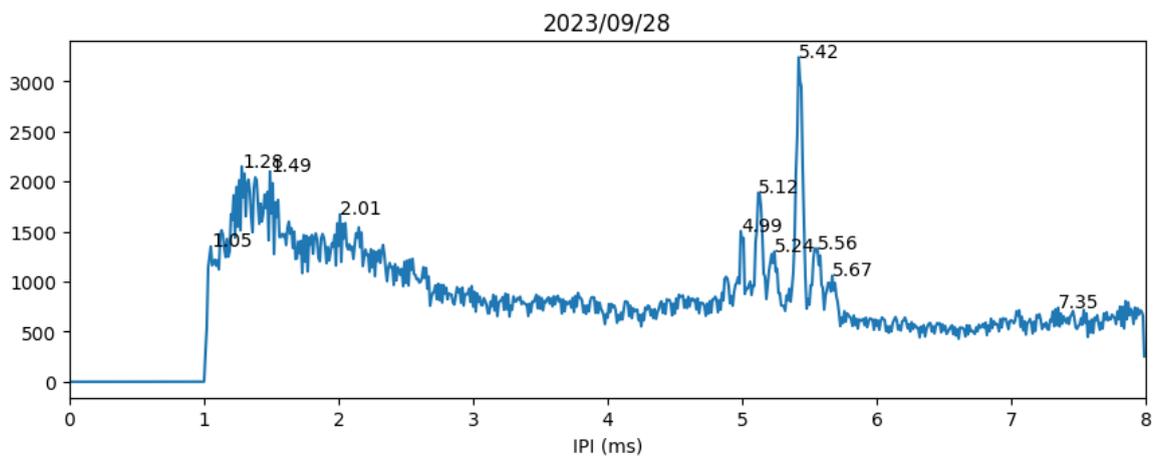
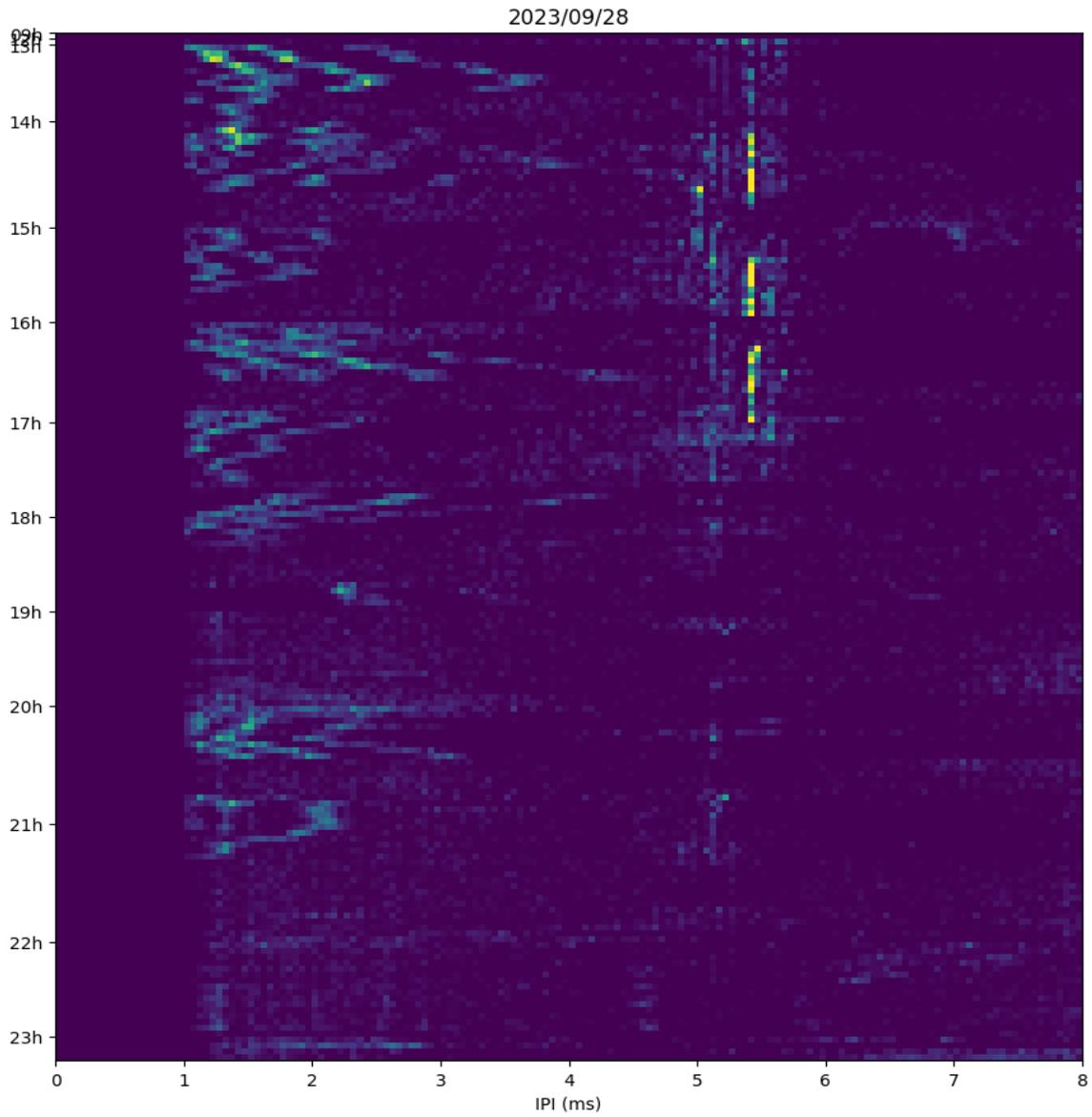


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

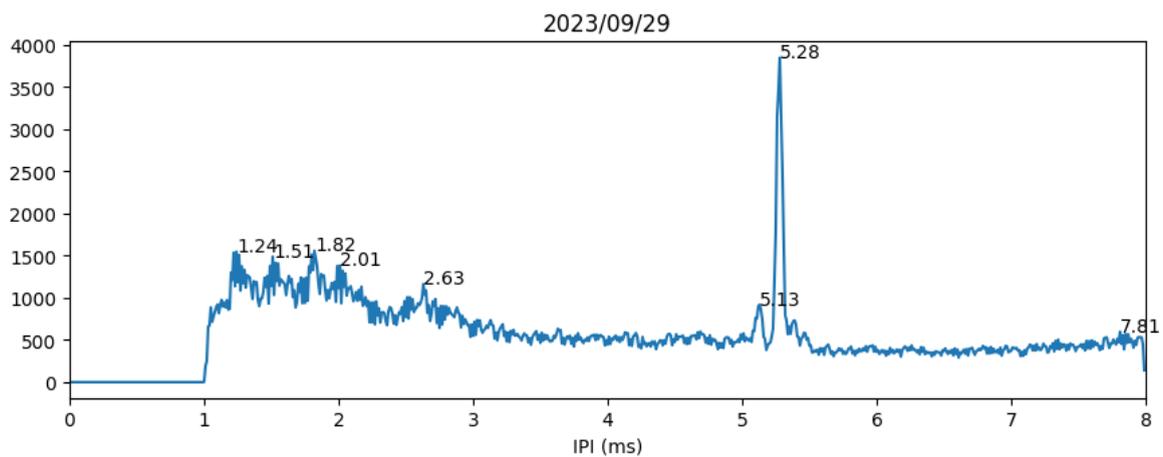
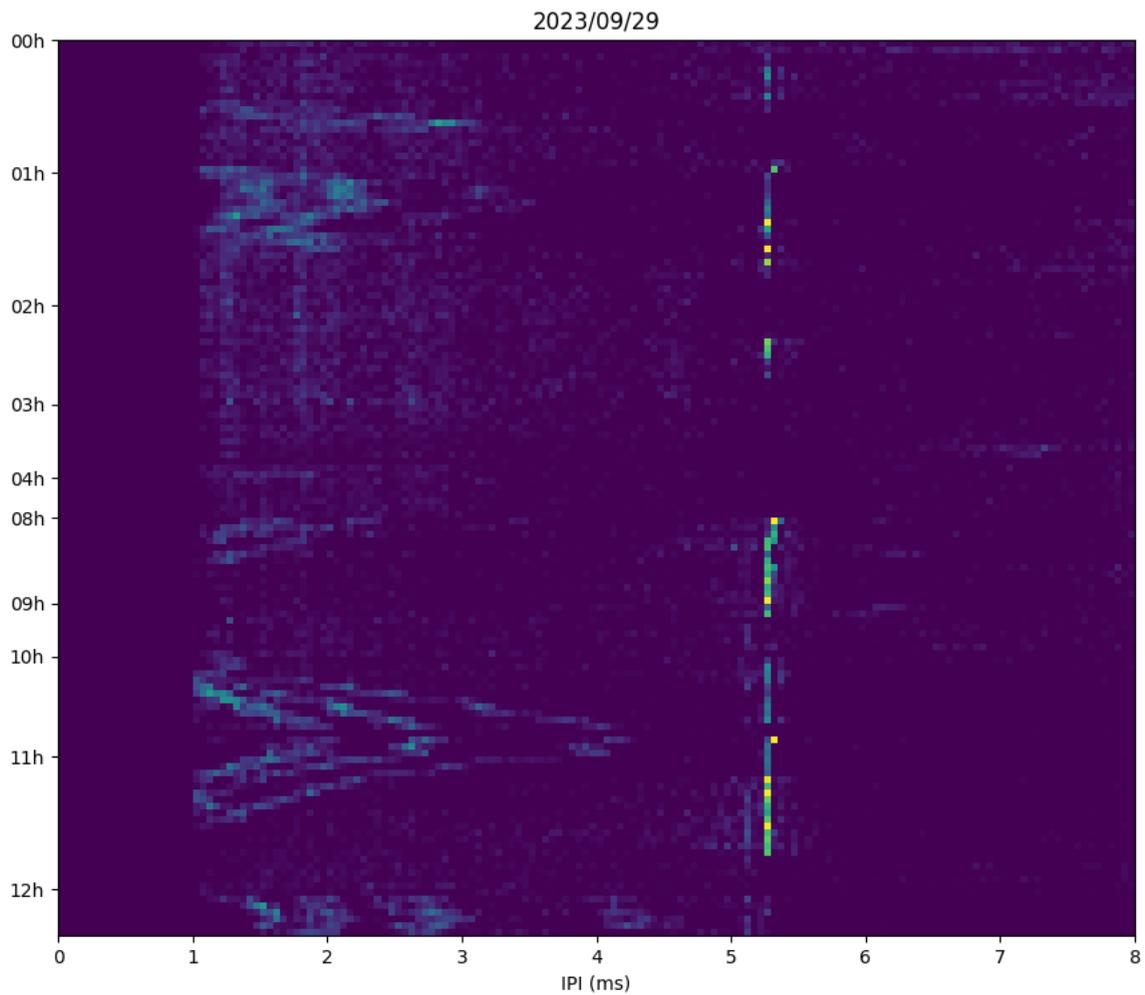


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

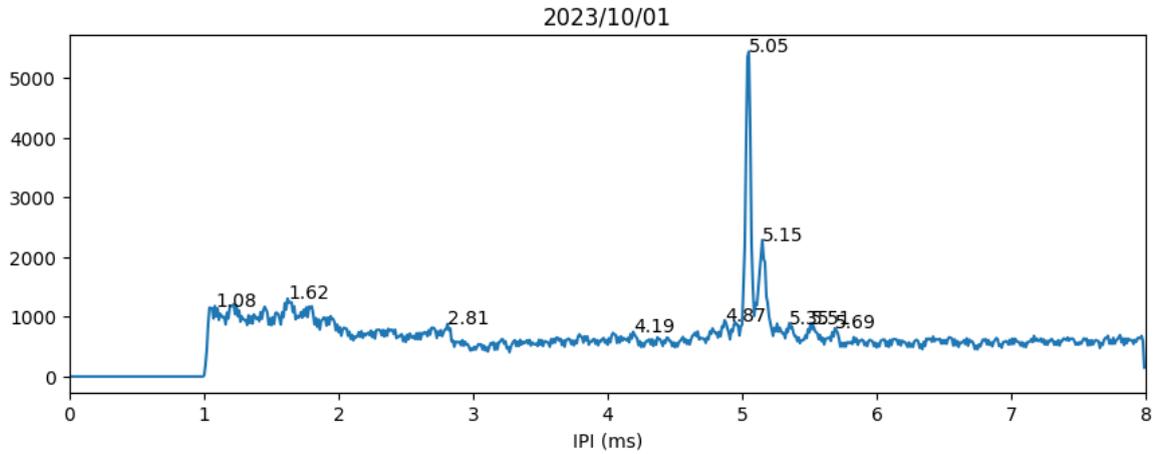
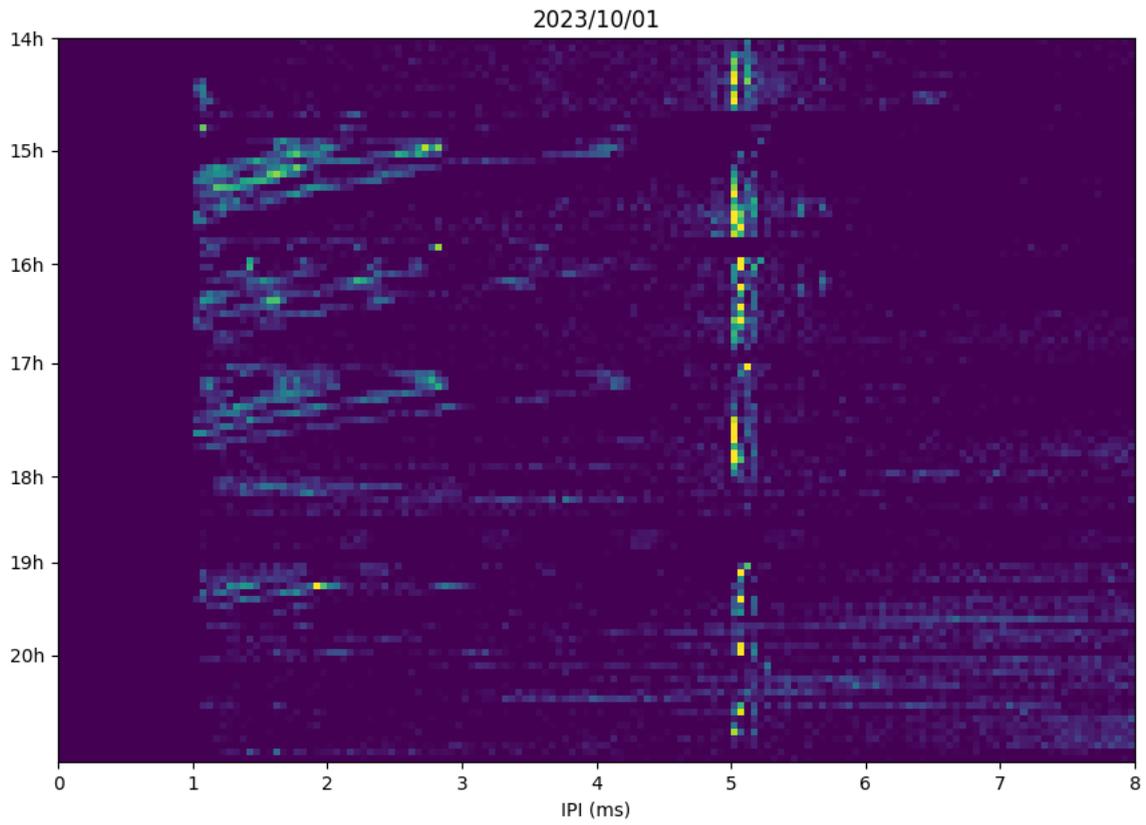


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

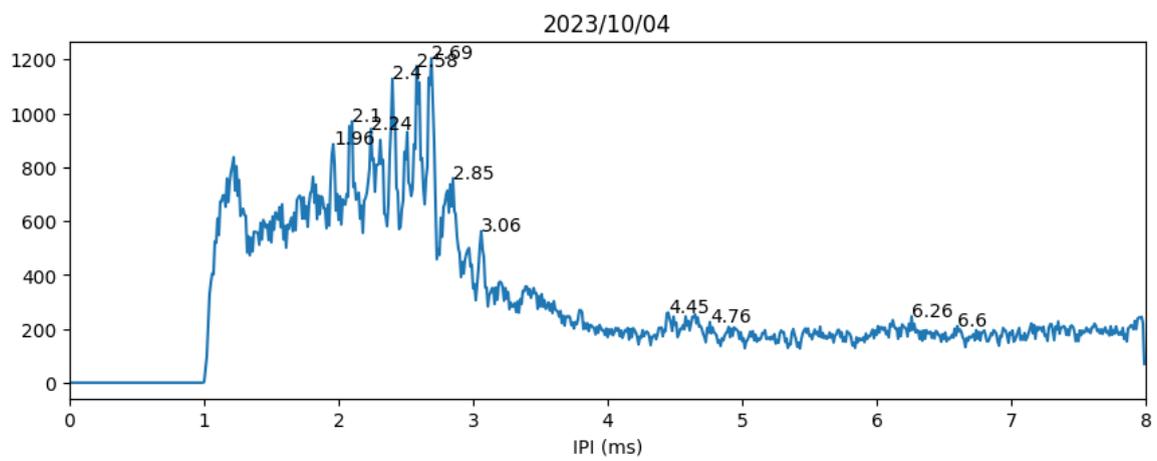
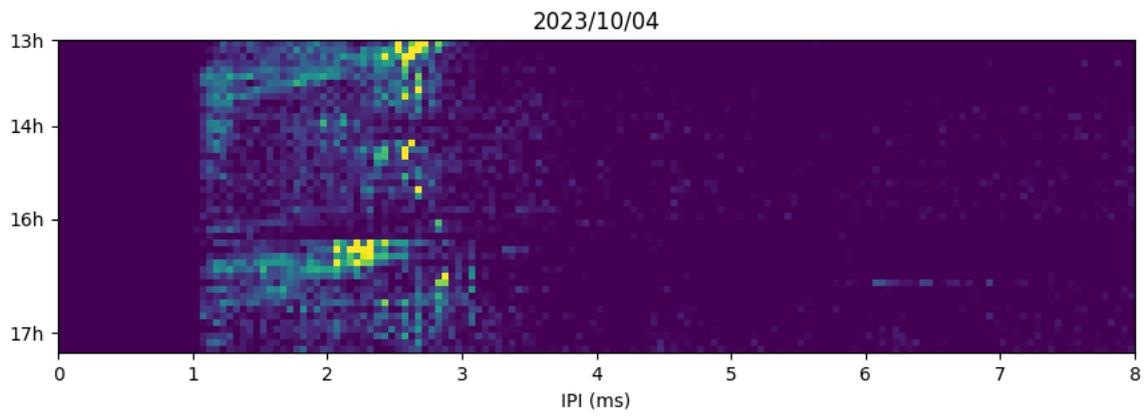


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

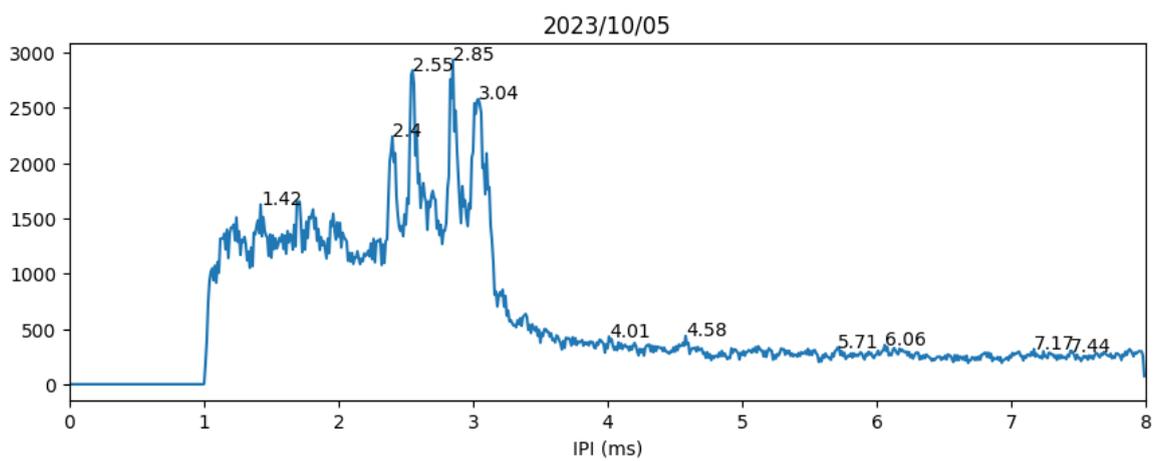
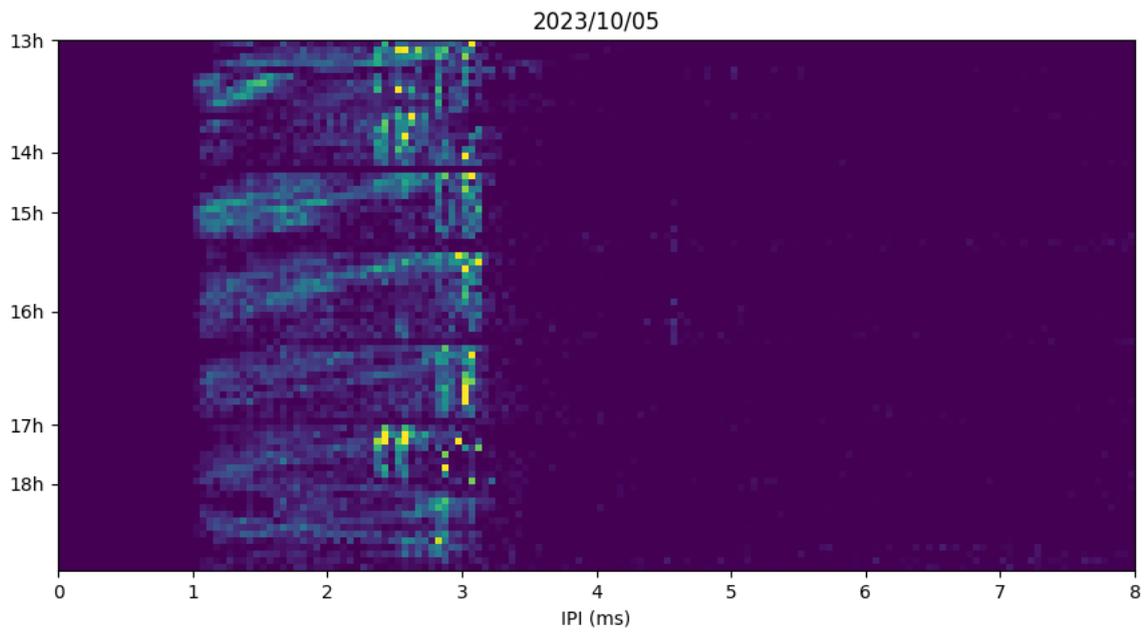


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

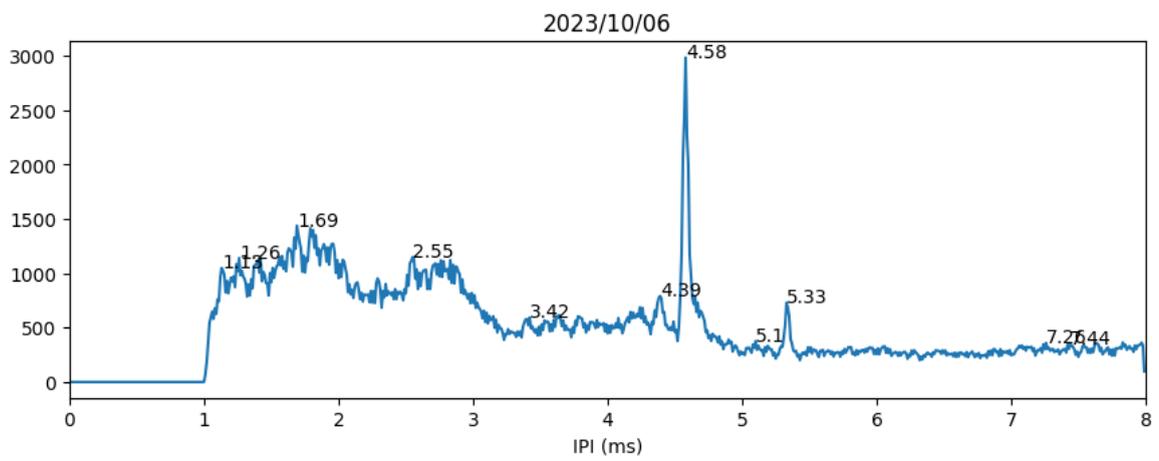
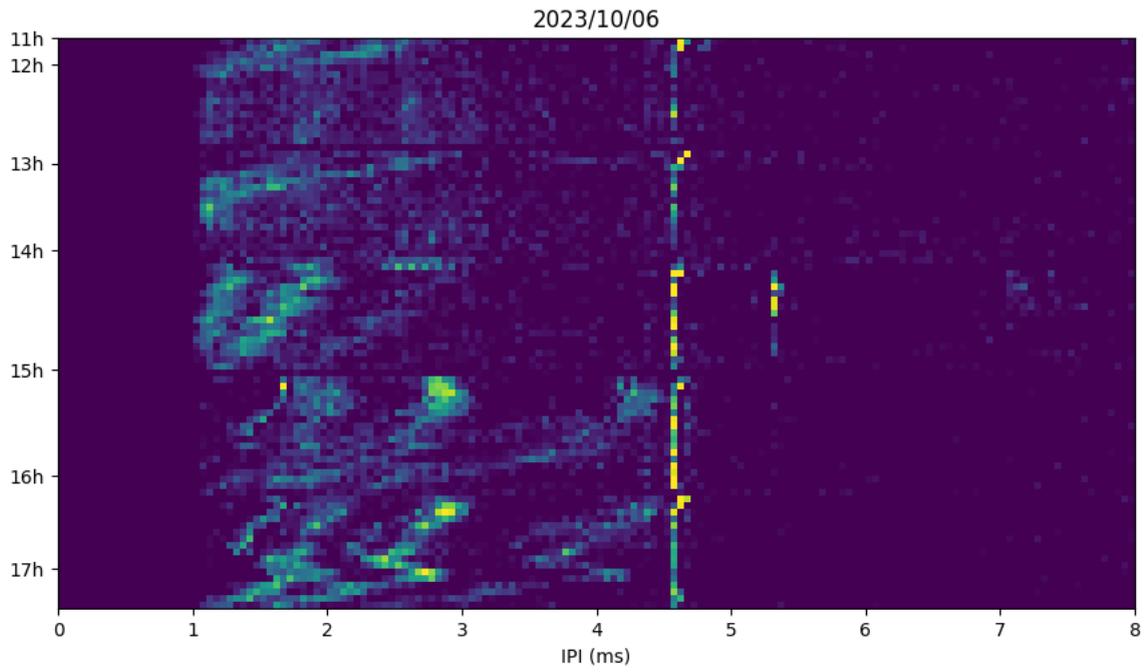


Figure : Suivi de la piste en Intervalle inter pulse (abscisse, ms), par heure locale (ordonnée).

A7. Données brutes de détection de cachalots sur WhaleWay-4

individu	distance_ Intersonde	duration	time	distance_ Monaco	Depth	distance_ Cote	hour	vitesse	tortuosity	IPI
0 Bicorne	179.150191	69	2023-10-06 11:47:00+00:00	109514.25236428475	500.0	7.0	11 0.155782	1.0892163	4.58	
1 Bicorne	913.524554	68	2023-10-06 12:56:20+00:00	109466.9082985512	500.0	7.0	12 0.806051	1.0460452	4.58	
2 Bicorne	4633.43273	68	2023-10-06 14:05:00+00:00	110162.63284842207	800.0	8.0	14 4.08832	1.0080880	4.58	
3 Bicorne	3457.23170	75	2023-10-06 15:13:00+00:00	114768.69705163917	1400.0	8.0	15 2.76578	1.0130645	4.58	
4 Bicorne	2462.25864	66	2023-10-06 16:28:00+00:00	118188.3752735694	2000.0	11.0	16 2.23841	Na	4.58	
5 Casnada	3076.94210	56	2023-10-02 08:48:00+00:00	17249.27918450193	1500.0	16.0	8 3.29672	1.0034648	4.26	
6 Casnada	3551.83154	61	2023-10-02 09:44:00+00:00	20093.370930597106	1800.0	19.0	9 3.49360	1.1043496	4.26	
7 Cyclone	3355.17624	49	2023-09-24 13:49:00+00:00	88567.25287864734	500.0	4.0	13 4.10837	1.0001488	5.35	
8 Cyclone	4609.20441	67	2023-09-24 14:38:00+00:00	85780.79828874969	400.0	7.0	14 4.12764	1.0093044	5.35	
9 Cyclone	3455.21722	59	2023-09-24 15:45:45+00:00	81929.40810804136	800.0	9.0	15 3.51378	1.0007874	5.35	
10 Cyclone	3731.29665	67	2023-09-24 16:45:00+00:00	78659.65846712395	1000.0	12.0	16 3.34145	Na	5.35	
11 Cyclone	4078.55706	64	2023-09-25 11:38:00+00:00	95587.79823881798	1000.0	5.0	11 3.82364	Na	5.35	
12 Farouche	2789.02751	63	2023-10-01 14:54:00+00:00	19645.987249179656	1650.0	18.0	14 2.65621	1.0007178	5.14	
13 Farouche	4125.63543	56	2023-10-01 15:57:00+00:00	19063.60842926946	1800.0	18.0	15 4.42032	Na	5.14	
14 Farouche	3076.94210	56	2023-10-02 08:48:00+00:00	17249.27918450193	1500.0	17.0	8 3.29672	1.0007022	5.14	
15 Farouche	3630.94078	64	2023-10-02 09:44:00+00:00	20093.370930597106	1800.0	19.0	9 3.40400	1.1823458	5.14	
16 Farouche	2514.54298	65	2023-10-02 10:48:00+00:00	23599.05720794912	2200.0	23.0	10 2.32111	1.0398746	5.14	
17 Farouche	3495.24435	60	2023-10-02 11:53:00+00:00	24179.11901686687	2150.0	24.0	11 3.49524	1.0270851	5.14	
18 Farouche	336.709838	51	2023-09-28 12:54:00+00:00	18702.461190368056	1700.0	16.0	12 0.39612	1.0591356	5.14	
19 Farouche	5400.44369	71	2023-09-28 13:45:00+00:00	18372.364223384266	1800.0	16.0	13 4.56375	1.3264868	5.14	
20 Farouche	797.102548	60	2023-09-28 14:56:00+00:00	20069.21909719737	1300.0	14.0	14 0.79710	1.2548058	5.14	
22 Farouche	1649.74561	55	2023-09-28 16:52:00+00:00	23576.85023329334	1300.0	18.0	16 1.79972	Na	5.14	
24 Farouche	3423.39396	65	2023-09-29 14:23:00+00:00	26853.136523993075	1700.0	20.0	14 3.16005	Na	5.14	
25 Farouche	3740.26739	53	2023-09-29 18:30:00+00:00	34274.919970137445	1400.0	14.0	18 4.23426	Na	5.14	
26 Farouche	2628.89644	66	2023-09-30 15:14:00+00:00	26299.92764513042	1800.0	18.0	15 2.38990	Na	5.14	
27 Galaxie	1866.00451	55	2023-10-04 13:19:00+00:00	109963.58747056426	2000.0	16.0	13 2.03564	Na		
28 Jupiter	5028.33286	86	2023-09-26 08:31:00+00:00	46733.273184909835	1200.0	9.0	8 3.50813	1.0234182	5.44	
29 Jupiter	3436.70195	77	2023-09-26 09:57:00+00:00	45616.459835719834	1300.0	12.0	9 2.67794	Na	5.44	
30 Nada	3548.94833	60	2023-10-01 14:54:00+00:00	19645.987249179656	1650.0	18.0	14 3.54894	1.0072621	5.05	
31 Nada	4147.10315	76	2023-10-01 15:54:00+00:00	18277.456813593493	1850.0	18.0	15 3.27402	1.0186779	5.05	
32 Nada	3363.50507	64	2023-10-01 17:10:00+00:00	18470.246023188676	1600.0	17.0	17 3.15328	1.0005142	5.05	
33 Nada	3918.21986	64	2023-10-01 18:14:00+00:00	18015.46036336699	1500.0	15.0	18 3.67333	Na	5.05	
34 Non_ID1	2314.64125	55	2023-10-02 01:58:00+00:00	24985.10028340424	1400.0	19.0	1 2.52506	1.1177030	Na	
35 Non_ID1	2414.90336	75	2023-10-02 02:53:00+00:00	22675.197104646468	1400.0	16.0	2 1.93192	Na	Na	
36 Non_ID2	573.675904	51	2023-09-29 01:50:00+00:00	25673.838108423526	1500.0	20.0	1 0.67491	Na	Na	
37 Non_ID3	771.527240	68	2023-09-30 04:11:00+00:00	43925.07396740915	1800.0	12.0	4 0.68075	1.2147114	Na	
38 Non_ID3	697.719814	40	2023-09-30 05:19:00+00:00	44571.34168722114	1500.0	15.0	5 1.04657	Na	Na	
39 Papillon	1993.85669	50	2023-10-05 15:31:00+00:00	114996.04892516095	2100.0	12.0	15 2.39262	Na	Na	
40 Patte_dours	1351.39688	70	2023-09-26 11:56:00+00:00	42014.728270353604	2000.0	17.0	11 1.15834	1.4702412	5.26	
41 Patte_dours	2229.80944	68	2023-09-26 13:06:00+00:00	41544.94357964708	2000.0	17.0	13 1.96747	1.3954949	5.26	
42 Patte_dours	2306.00326	72	2023-09-26 14:14:00+00:00	39584.73649553824	1500.0	17.0	14 1.92166	Na	5.26	
43 Patte_dours	4330.82583	77	2023-09-29 13:18:00+00:00	25634.53096506542	1500.0	20.0	13 3.37466	1.0241679	5.26	
44 Patte_dours	5804.06273	82	2023-09-29 14:35:00+00:00	26232.412780252802	1900.0	22.0	14 4.24687	Na	5.26	
45 Patte_dours	5650.36574	68	2023-09-30 15:10:00+00:00	28623.91205162246	1700.0	17.0	15 4.98561	Na	5.26	
46 Plune	3363.57165	56	2023-09-28 18:44:00+00:00	23871.738816311696	1500.0	18.0	18 3.60382	1.6416316	Na	
47 Plune	969.125886	64	2023-09-28 19:40:00+00:00	22152.430426201434	1400.0	16.0	19 0.90855	1.0	Na	
48 Plune_potentiel	226.285666	58	2023-09-28 21:24:00+00:00	22270.592421525824	1300.0	16.0	21 0.23408	1.0094929	Na	
49 Sirius	4992.89771	85	2023-10-05 13:08:00+00:00	112975.61536617119	2000.0	18.0	13 3.52439	Na	Na	
50 Survivor	2994.94447	61	2023-09-25 16:06:00+00:00	44125.694744283624	1700.0	29.0	16 2.94584	1.0086980	5.22	
51 Survivor	3243.28312	67	2023-09-25 17:07:00+00:00	44699.81550074217	1400.0	9.0	17 2.90443	1.0001527	5.22	
52 Survivor	2347.31438	54	2023-09-25 18:14:00+00:00	46311.721319463795	1200.0	8.0	18 2.60812	Na	5.22	
53 Tic	4195.86274	76	2023-10-05 11:52:00+00:00	109841.11463480008	2200.0	21.0	11 3.31252	1.0307259	Na	
54 Tic	4992.89771	84	2023-10-05 13:08:00+00:00	112975.61536617119	2000.0	18.0	13 3.56635	Na	Na	
55 ZZtop	2931.23352	62	2023-09-27 10:48:00+00:00	22279.731169314415	1850.0	20.0	10 2.83667	1.0009138	5.67	
56 ZZtop	3596.86373	71	2023-09-27 11:50:00+00:00	20991.267608007976	2000.0	20.0	11 3.03960	1.0001349	5.67	
57 ZZtop	4044.03731	74	2023-09-27 13:01:00+00:00	20196.107193332642	1700.0	19.0	13 3.27894	1.0527020	5.67	
58 ZZtop	3446.12935	65	2023-09-27 14:15:00+00:00	19916.030172349885	1700.0	17.0	14 3.18104	1.1357316	5.67	
59 ZZtop	3196.18153	76	2023-09-27 15:20:00+00:00	22219.4159830175	1700.0	17.0	15 2.52330	1.4628441	5.67	
61 ZZtop	1708.03889	66	2023-09-27 17:48:00+00:00	24804.553585974525	2000.0	21.0	17 1.55276	Na	5.67	

A8. Cycle de plongée des individus lors de la mission WhaleWay-4

	08h00	09h00	10h00	11h00	12h00	13h00	14h00	15h00	16h00	17h00	18h00	19h00
28/09/2023		FAROUCHE		FAROUCHE		FAROUCHE		FAROUCHE		FAROUCHE		FAROUCHE
HeureSonde					12h54	13h45	14h56	15h56	16h52	17h47	18h44	
durée-cycle						51 minutes	71 minutes	60 minutes	56 minutes	55 minutes	57 minutes	
29/09/2023												
HeureSonde				11h07	12h11	13h13	14h23	15h28			18h30	19h23
durée-cycle					64 minutes	62 minutes	70 minutes	65 minutes				53 minutes
30/09/2023												
HeureSonde						13h13	14h09	15h14	16h20			
durée-cycle							56 minutes	65 minutes	66 minutes			
01/10/2023												
HeureSonde							14h54	15h57	16h53		18h49	
durée-cycle								63 minutes	56 minutes			
02/10/2023												
HeureSonde	08h48	09h44	10h48	11h54	12h53	14h54						
durée-cycle		56 minutes	64 minutes	66 minutes	59 minutes							
						FAROUCHE	28 SONDES	20 CYCLES	Min : 51min	max: 78 min	moy: 60 min	
26/09/2023		PATTE OURS		PATTE OURS		PATTE OURS		PATTE OURS		PATTE OURS		PATTE OURS
HeureSonde				11h56	>>>>>>>>	13h06	14h14	15h26				
durée-cycle						70 minutes	68 minutes	72 minutes				
29/09/2023												
HeureSonde	08h20		10h47	>>>>>>>>	12h02	13h17	14h35	15h57			18h08	19h07
durée-cycle					75 minutes	75 minutes	78 minutes	82 minutes				59 minutes
30/09/2023												
HeureSonde								15h10	16h18			
durée-cycle									68 minutes			
						PATTE OURS	14 SONDES	9 CYCLES	Min : 59 min	max: 82 min	moy :72 min	
27/09/2023		ZZTOP		ZZTOP		ZZTOP		ZZTOP		ZZTOP		ZZTOP
HeureSonde			10h48	11h50	>>>>>>>>	13h01	14h15	15h20	16h36	17h48	18h54	
durée-cycle				62 minutes		71 minutes	74 minutes	65 minutes	76 minutes	72 minutes	66 minutes	
						ZZTOP	8 SONDES	7 CYCLES	min: 62 min	max: 76 min	moy : 69,4	
08h00	09h00	10h00	11h00	12h00	13h00	14h00	15h00	16h00	17h00	18h00	19h00	
24/09/2023		CYCLONE		CYCLONE		CYCLONE		CYCLONE		CYCLONE		CYCLONE
HeureSonde			10h28	11h39	12h42	13h49	14h38	15h45	16h45	17h52		
durée-cycle				71minutes	63 minutes	67 minutes	49 minutes	67 minutes	60 minutes	67 minutes		
						CYCLONE	8 SONDES	7 CYCLES	min : 49 min	max: 71 min	moy: 63,4	
25/09/2023		SURVIVOR		SURVIVOR		SURVIVOR		SURVIVOR		SURVIVOR		SURVIVOR
HeureSonde									16h07	17h08	18h14	19h09
durée-cycle										61 minutes	66 minutes	55 minutes
						SURVIVOR	4 SONDES	3 CYCLES	min: 55min	max: 66 min	moy : 60,7	
26/09/2023		JUPITER		JUPITER		JUPITER		JUPITER		JUPITER		JUPITER
HeureSonde	08h31	09h57	>>>>>>>>	11h14								
durée-cycle		86 minutes		77 minutes								
28/09/2023							14h01		16h18			
						JUPITER	5 SONDES	2 CYCLES	min: 77 min	max: 86 min	moy: 81,5	
01/10/2023		NADA		NADA		NADA		NADA		NADA		NADA
HeureSonde							14H54	15H54	>>>>>>>>	17H10	18h14	19H19
durée-cycle								60 minutes		76 minutes	64 minutes	65 minutes
						NADA	5 SONDES	4 CYCLES	min: 60 min	max: 76 min	moy: 66,25	
02/10/2023		CASNADA		CASNADA		CASNADA		CASNADA		CASNADA		CASNADA
HeureSonde	08H48	09H44	10H45		12H41		14H34					
durée-cycle		56 minutes	61 minutes									
						CASNADA	5 SONDES	2 CYCLES	min: 56 min	max: 61 min	moy: 58,5	
06/10/2023		BICORNE		BICORNE		BICORNE		BICORNE		BICORNE		BICORNE
HeureSonde				11H47	12H56	>>>>>>>>	14H05	15H13	16H28	17H34		
durée-cycle					69 minutes		69 minutes	68 minutes	75 minutes	66 minutes		
						BICORNE	6 SONDES	5 CYCLES	min: 66 min	max: 75 min	moy: 69,8	
04/10/2023		GALAXIE		GALAXIE		GALAXIE		GALAXIE		GALAXIE		GALAXIE
HeureSonde						13H19	14H14					
durée-cycle							56 minutes					
						GALAXIE	2 SONDES	1 CYCLE				
05/10/2023		TIC		TIC		TIC		TIC		TIC		TIC
HeureSonde				11H52	>>>>>>>>	13H08	14H32			17H34		
durée-cycle						76 minutes	84 minutes					
						TIC	4 SONDES	2 CYCLES	min: 76 min	max: 84 min	moy: 80	
05/10/2023		PAPILLON		PAPILLON		PAPILLON		PAPILLON		PAPILLON		PAPILLON
HeureSonde				11H52				15H31	16H21			
durée-cycle									50 minutes			
						PAPILLON	3 SONDES	1 CYCLE				
05/10/2023		TAC		TAC		TAC		TAC		TAC		TAC
HeureSonde				11H52			14H41					
durée-cycle						TAC	2 SONDES					
05/10/2023		SIRIUS		SIRIUS		SIRIUS		SIRIUS		SIRIUS		SIRIUS
HeureSonde						13H08	14H33					
durée-cycle						SIRIUS	2 SONDES					

ATTENTION : Les individus qui n'ont été vus qu'une seule fois , ou ceux dont les sondes sont trop éloignés dans le temps, n'ont pas été retenus da PLUNE, FLÈCHE, MARS, CABOTIN, LEPEINTRE, INATTENDU.

A9. Niveau dB Max sur KM3Env

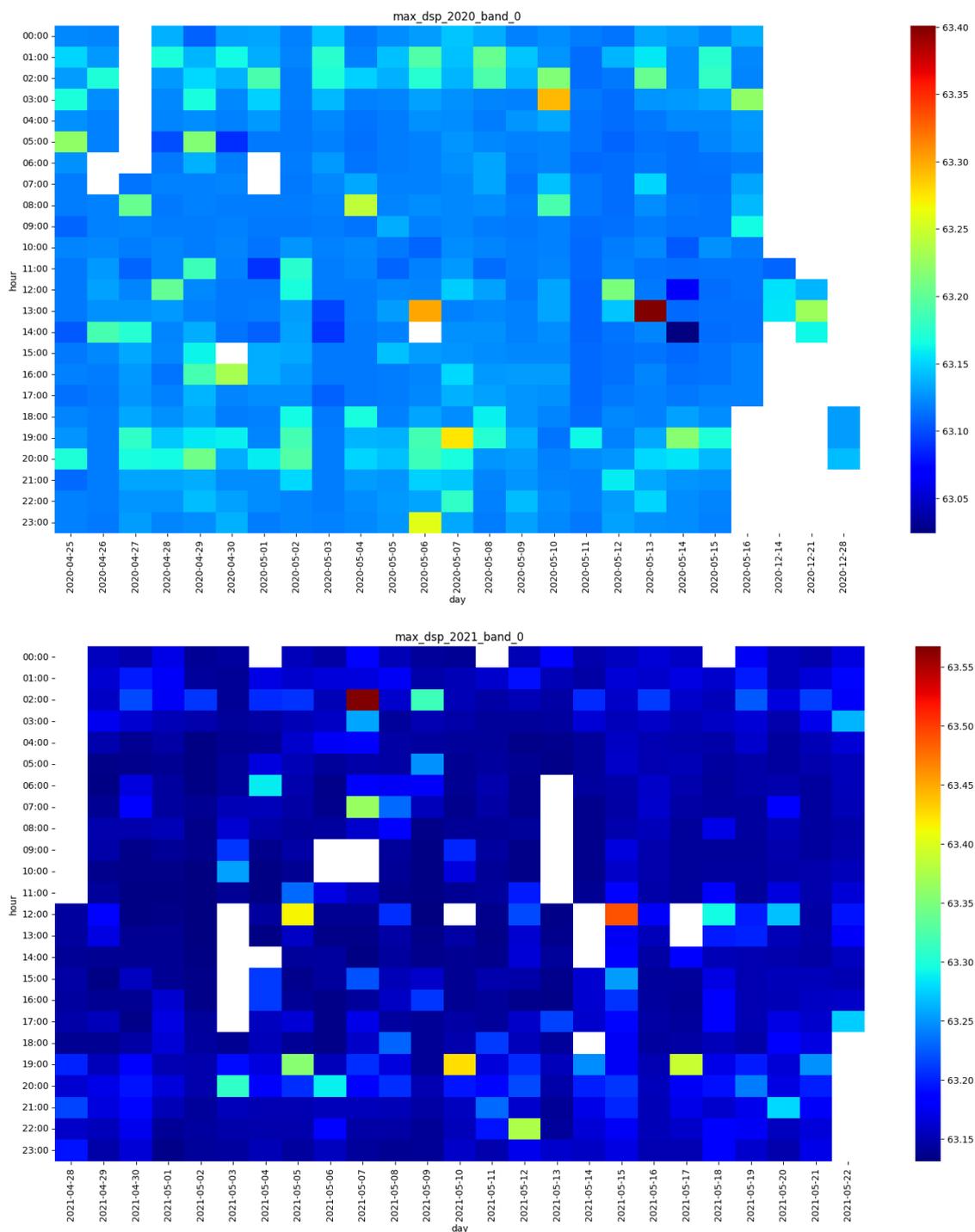


Figure : idem, niveau dB maximum par jour sur la bande de fréquence 10 Hz à 800 Hz sur la station KM3Env en 2020 (Haut) et 2021 (Bas) en UTC. Les niveaux maximums sont centrés comme déjà montrés sur 3h à 4h et 21h à 22h (ferries), plus quelques passages de bateaux (carreaux de haute intensité).

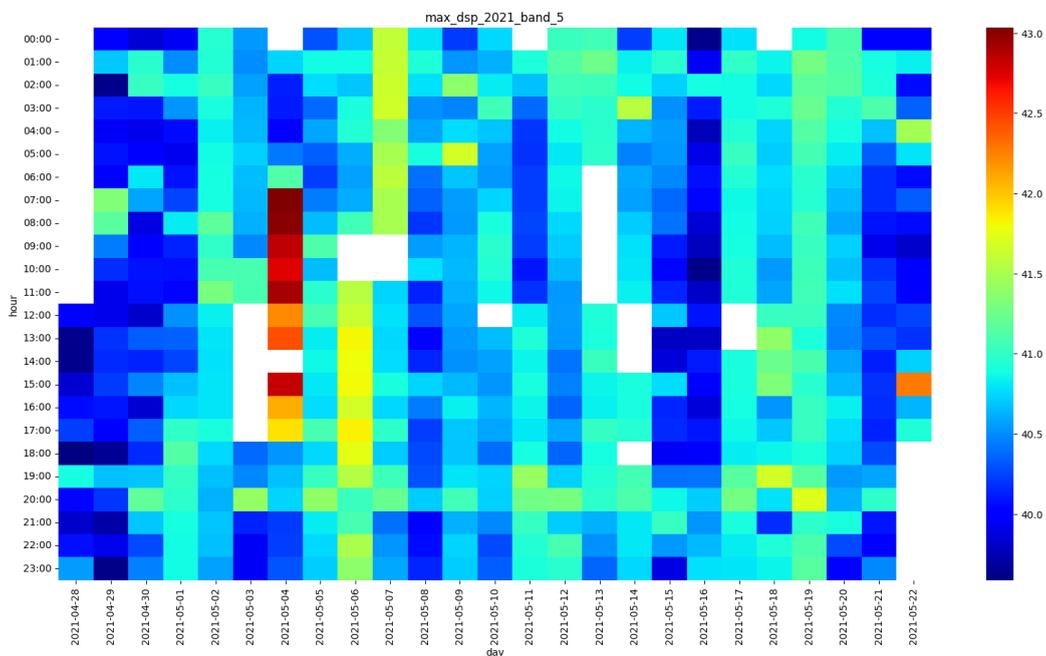
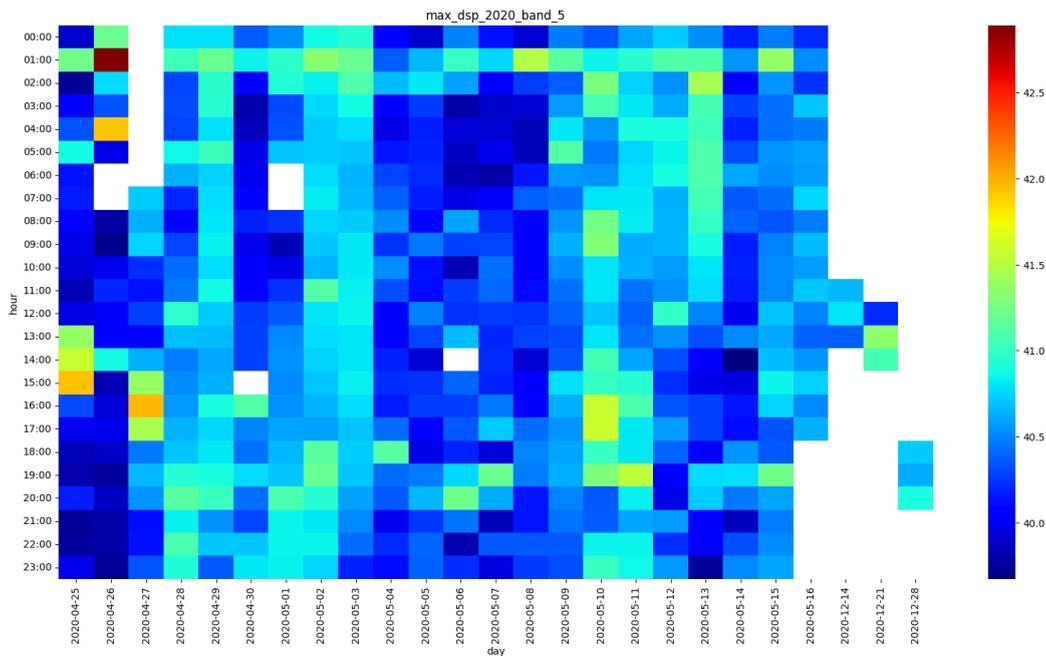


Figure : Niveaux dB maximum par jour et heure UTC sur la bande de fréquence 6300 Hz à 12500 Hz sur la station KM3Env en 2020 (Haut) et 2021 (Bas). On note que les perturbations de dB maximum (bandes de 03:00 à 04:00, et de 21:00 à 22:00 locales) sont moins présentes qu'en figure précédente probablement car ces fréquences sont plus directives que les BF de 10 Hz à 400 Hz et donc correspondent à des passages de ferrys plus localisés au-dessus des hydrophones de KM3Env.

A10. Effets dB de l'activité récifale sur les stations Stochaedes

Sur Rascass elle est appuyée par le fait que pour les enregistrements faits à une autre période de l'année (mars 2022), l'augmentation de l'activité commence plus tôt et se termine plus tard (début 19h, fin 19h).

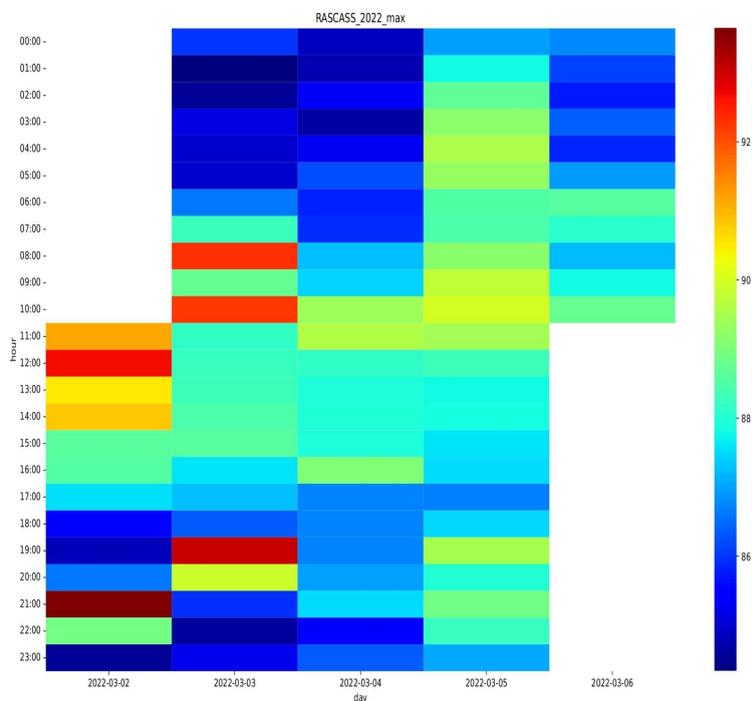


Figure : Niveau de bruit sur la bande 10 Hz à 400 Hz sur la station Rascass en mars 2022.

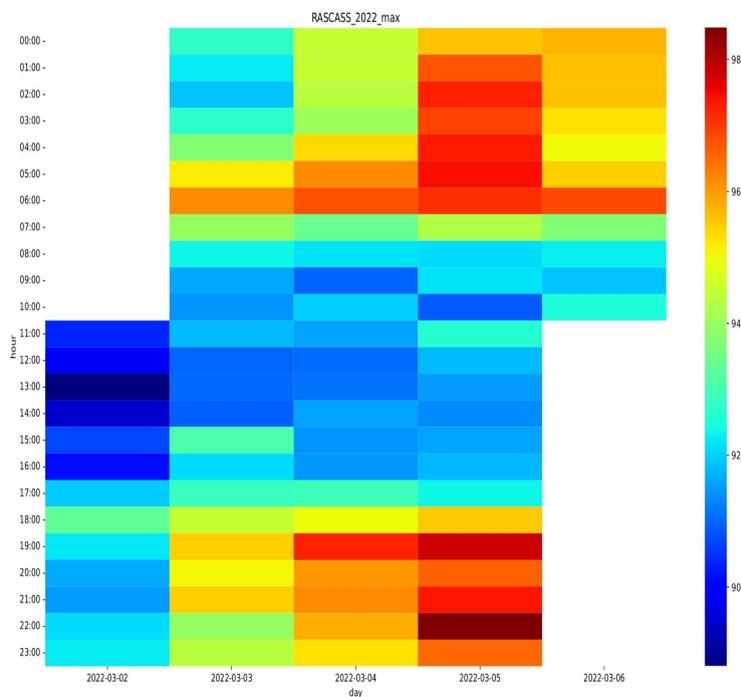
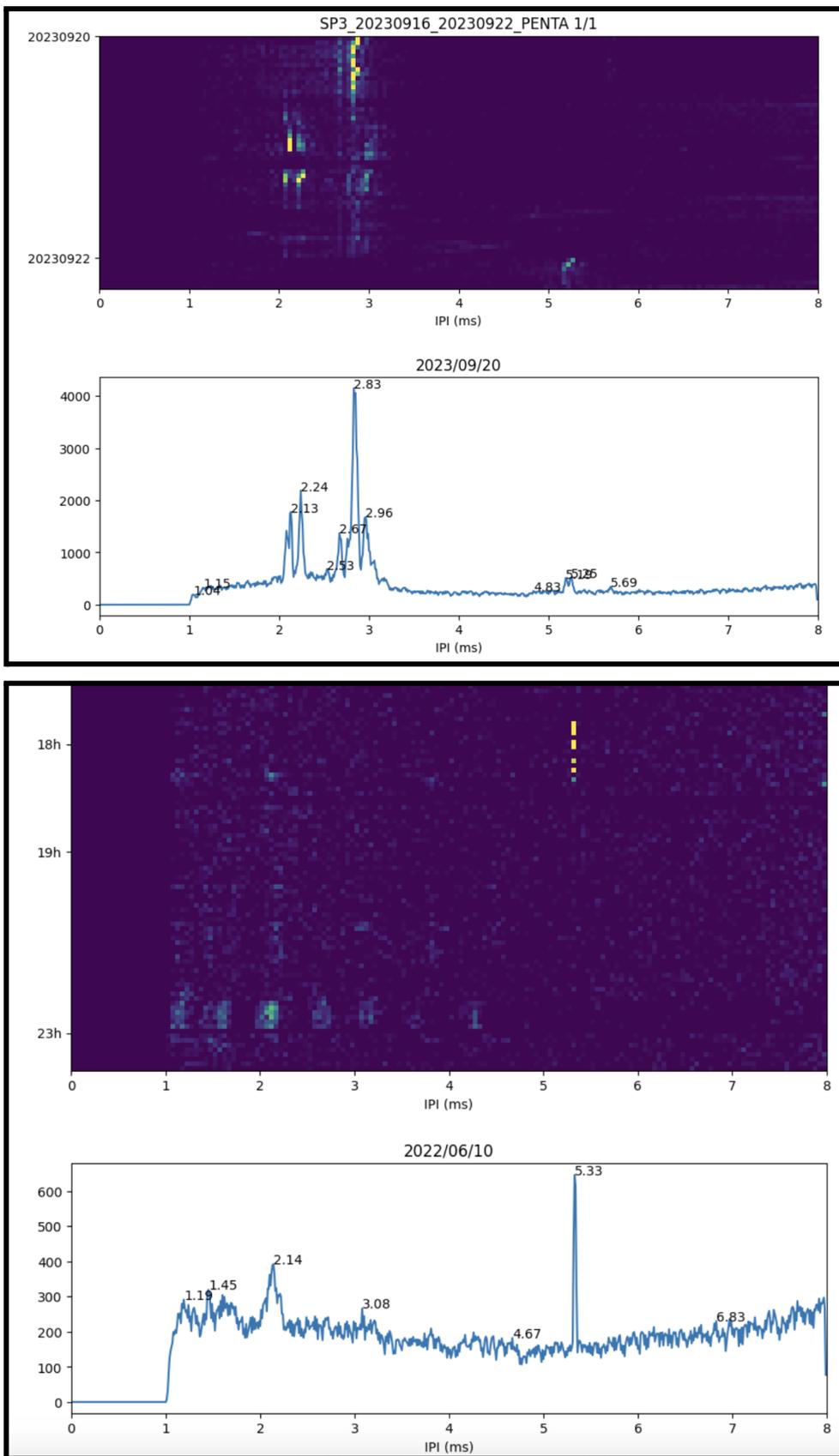
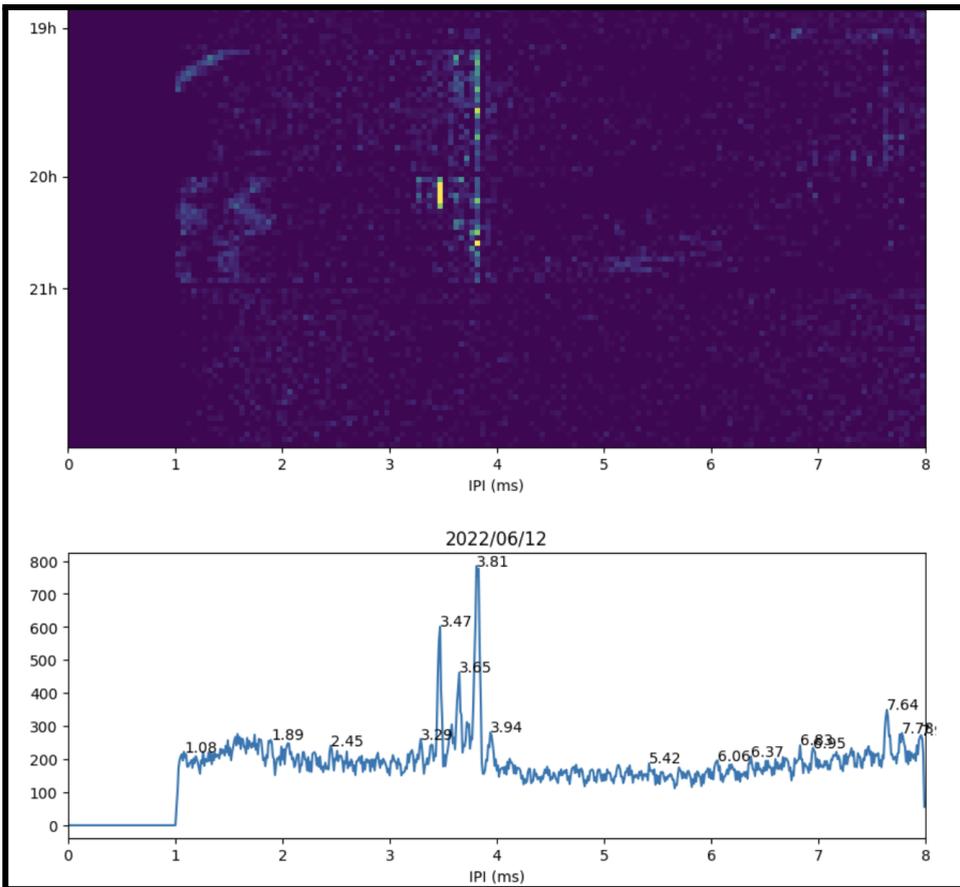
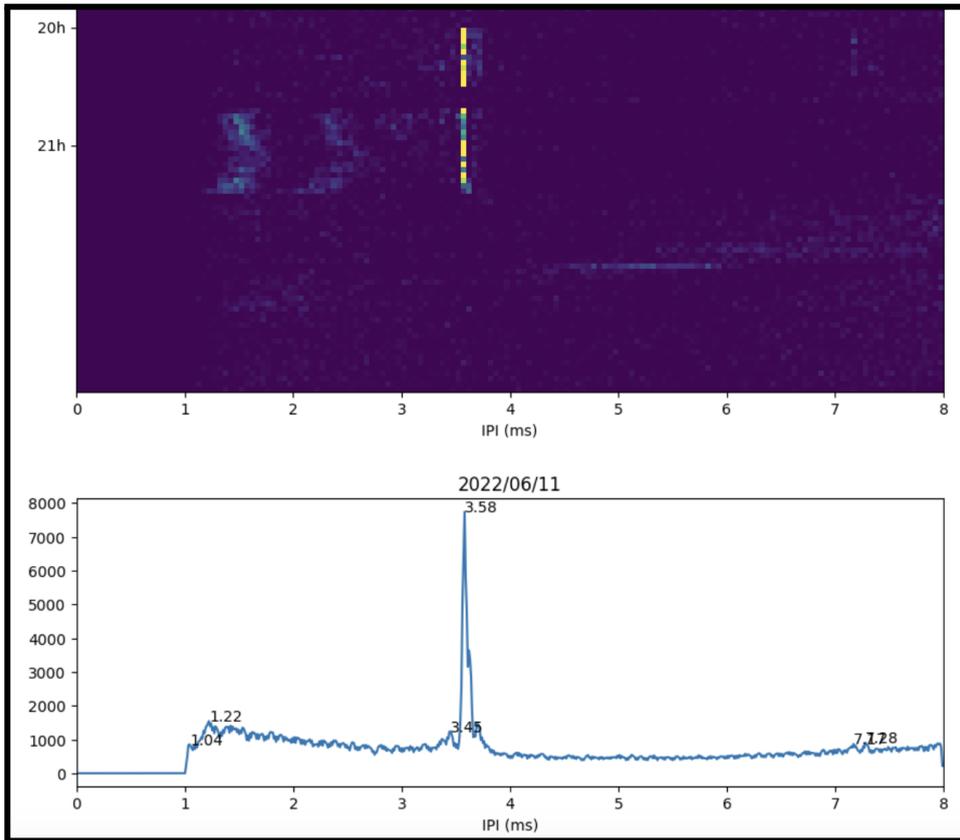
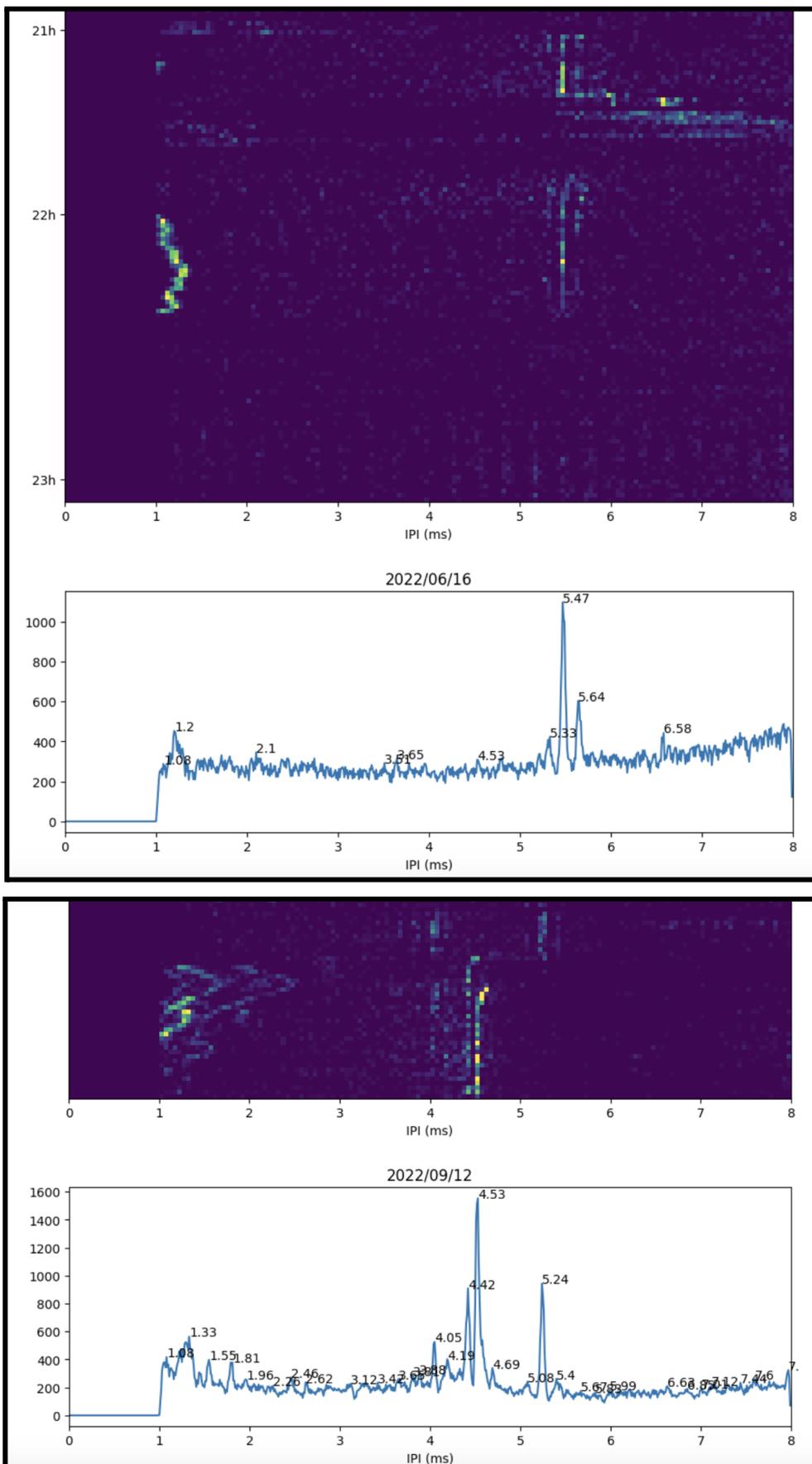


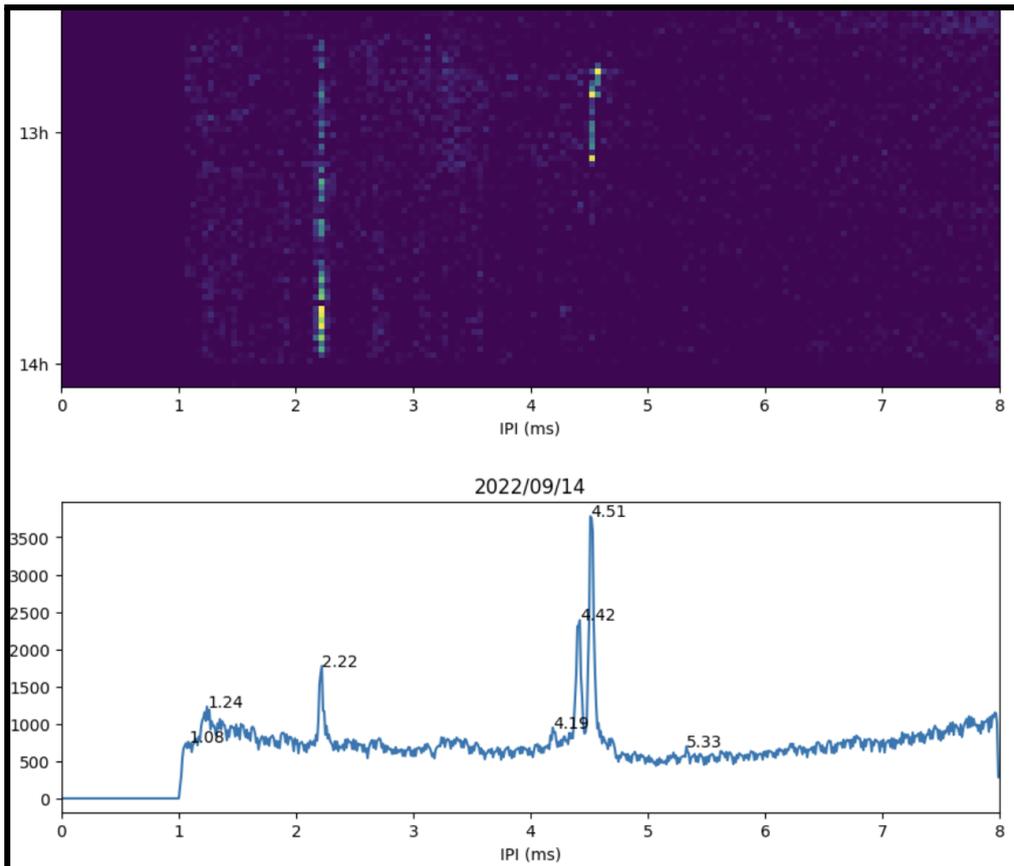
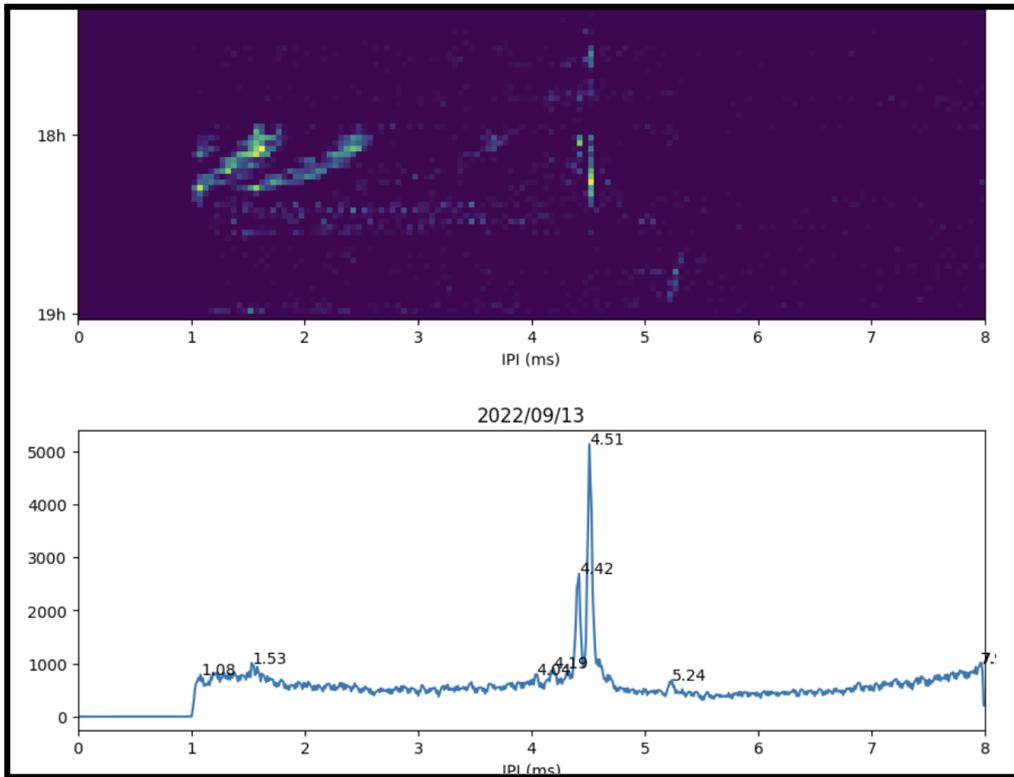
Figure: Niveau de bruit sur la bande 6300 Hz à 12500 Hz.

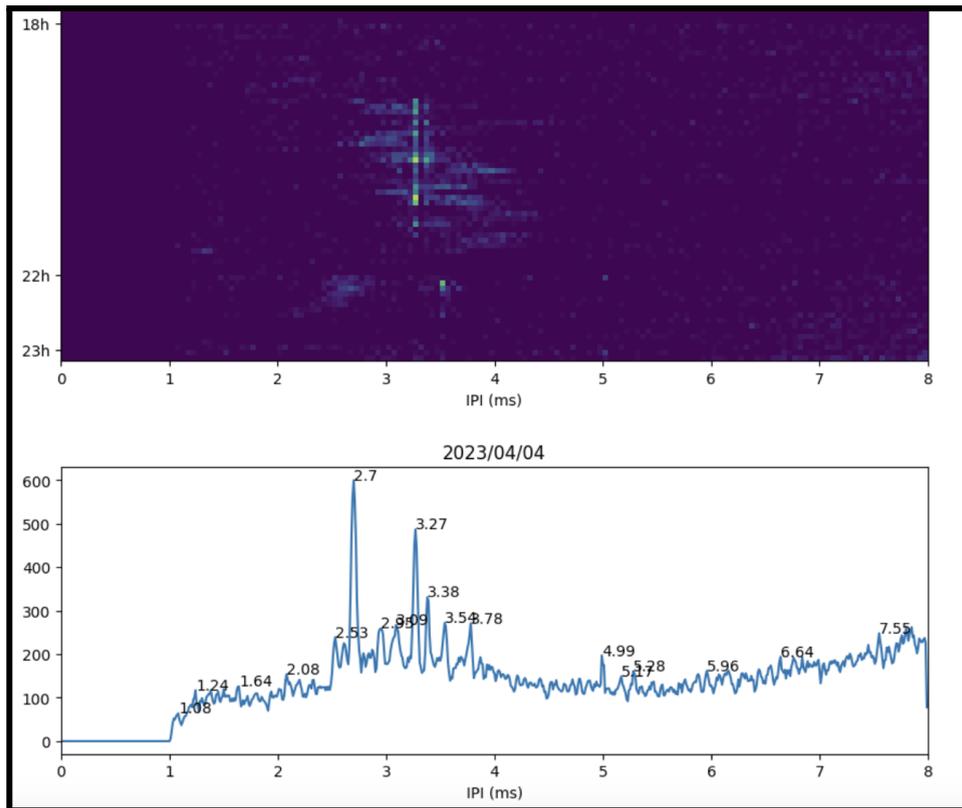
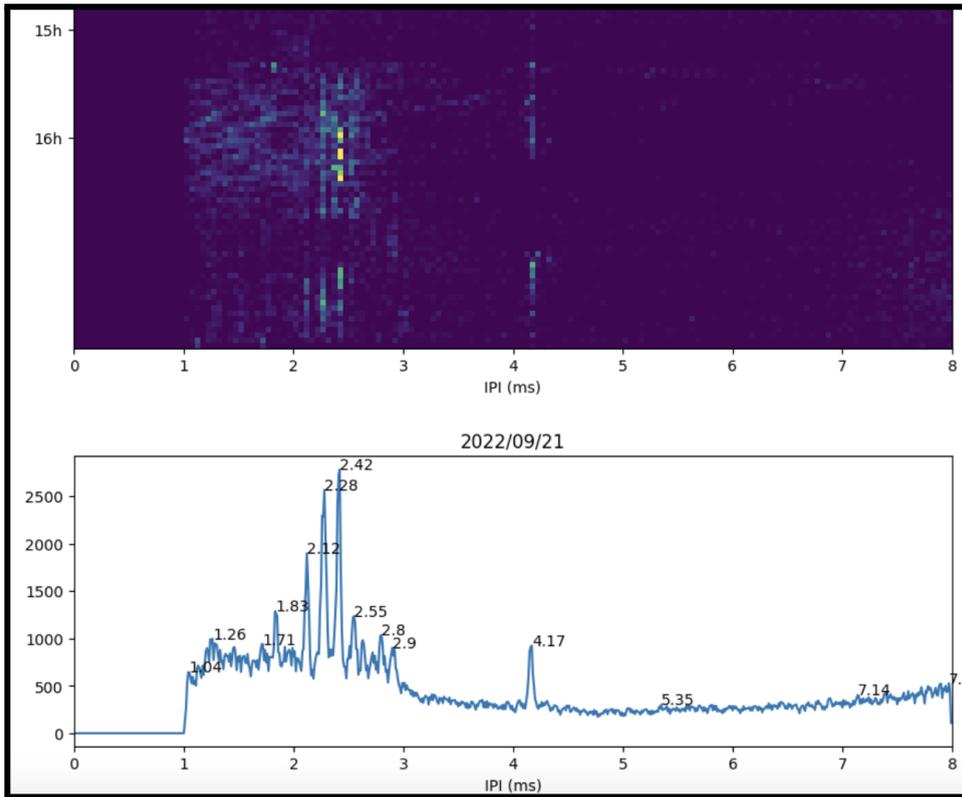
A11. IPI des autres missions 2022 2023

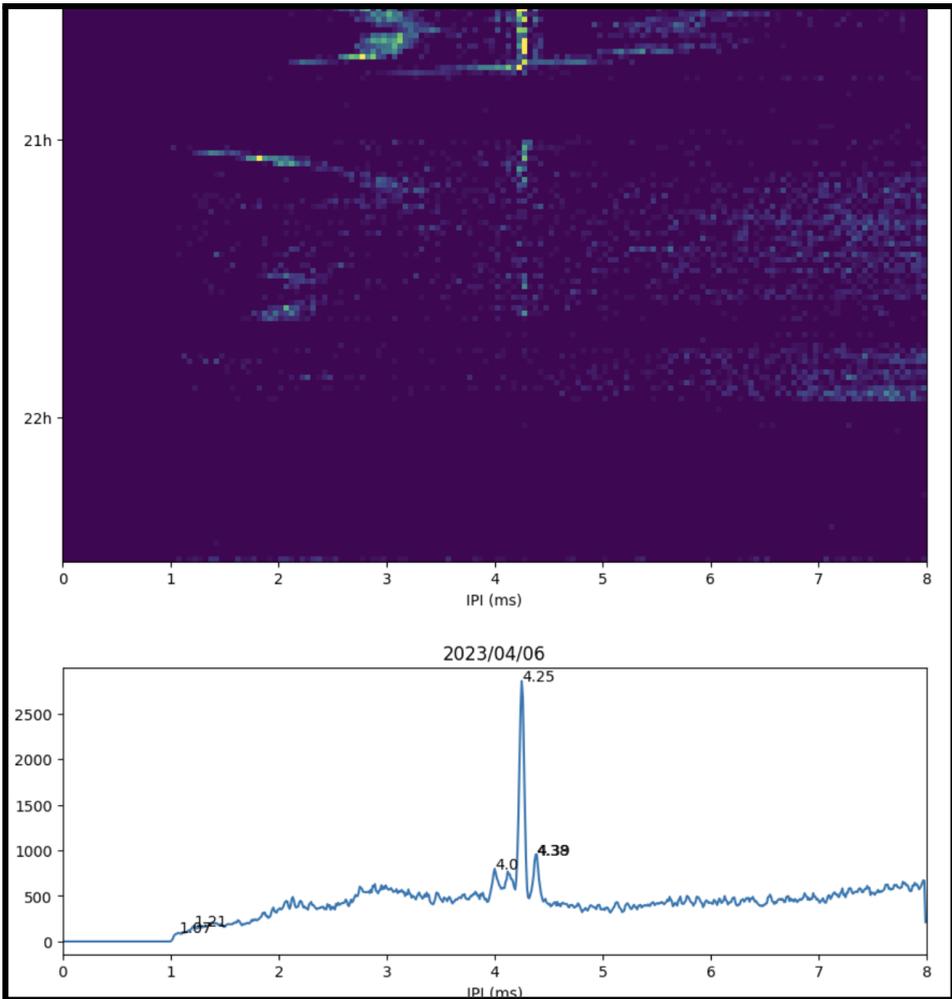
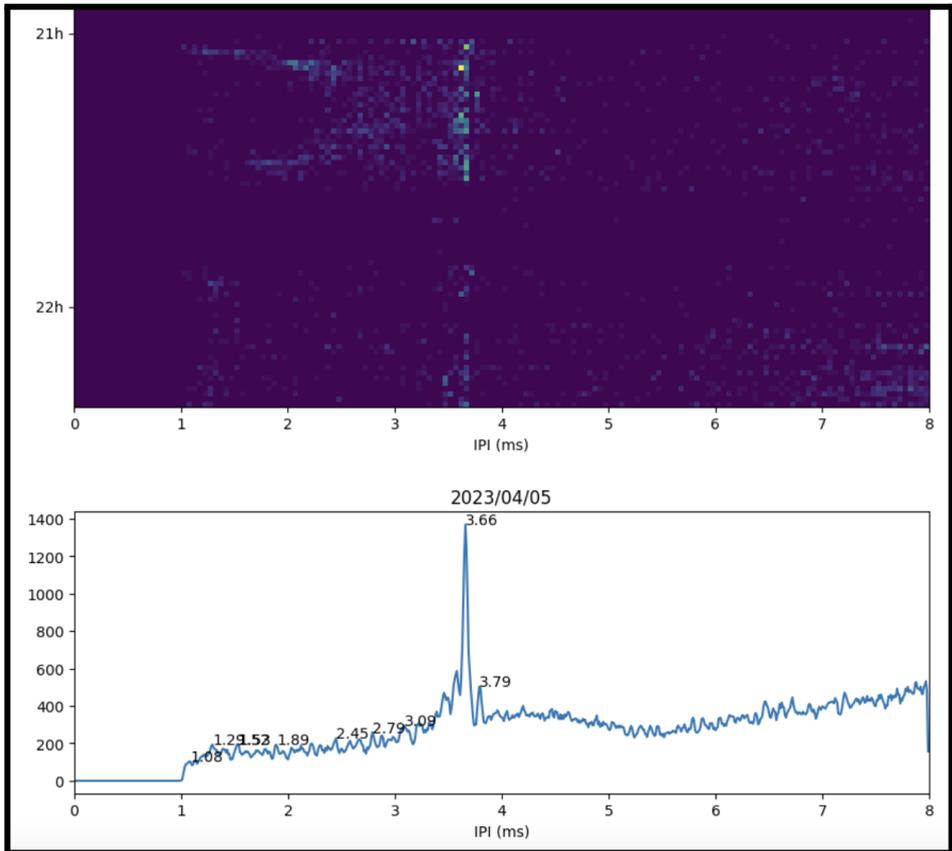


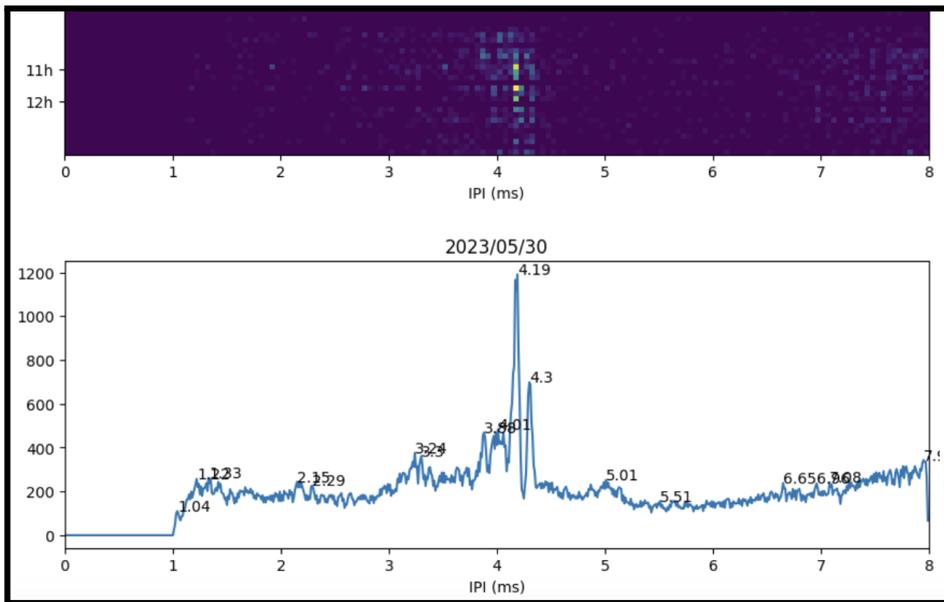
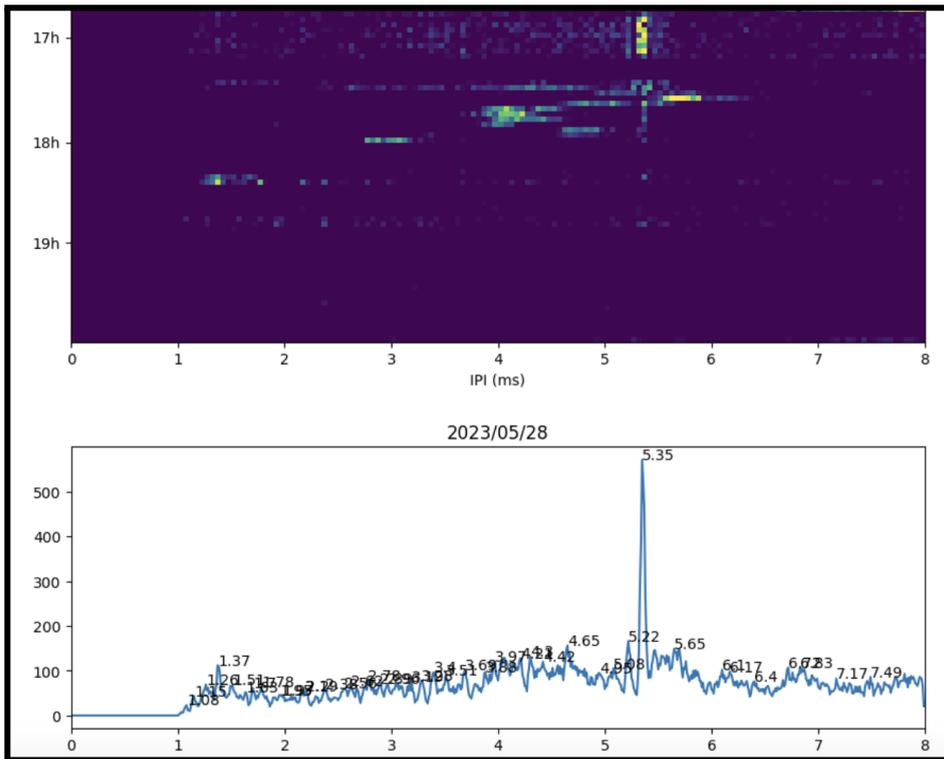


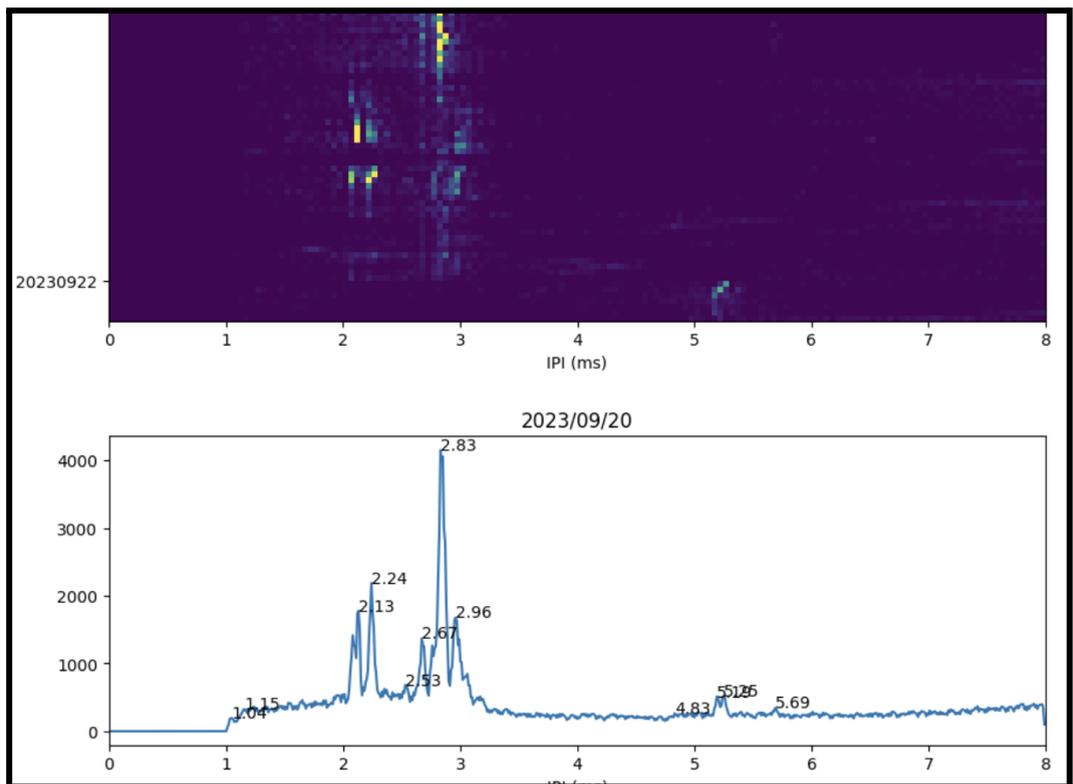
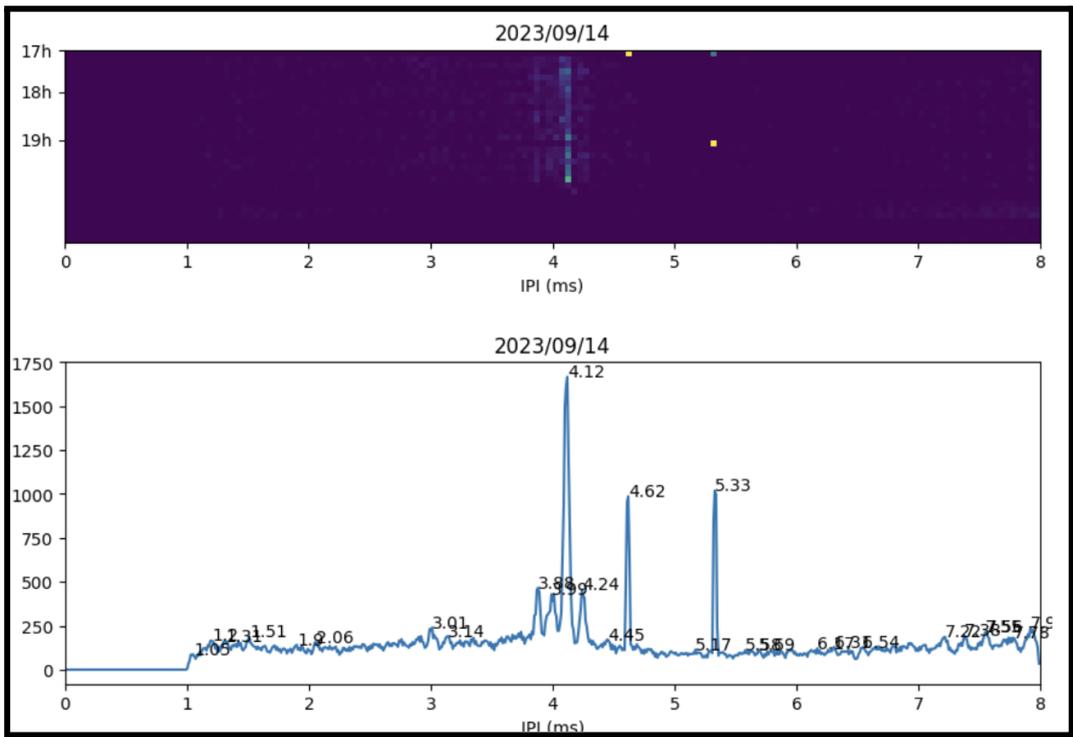


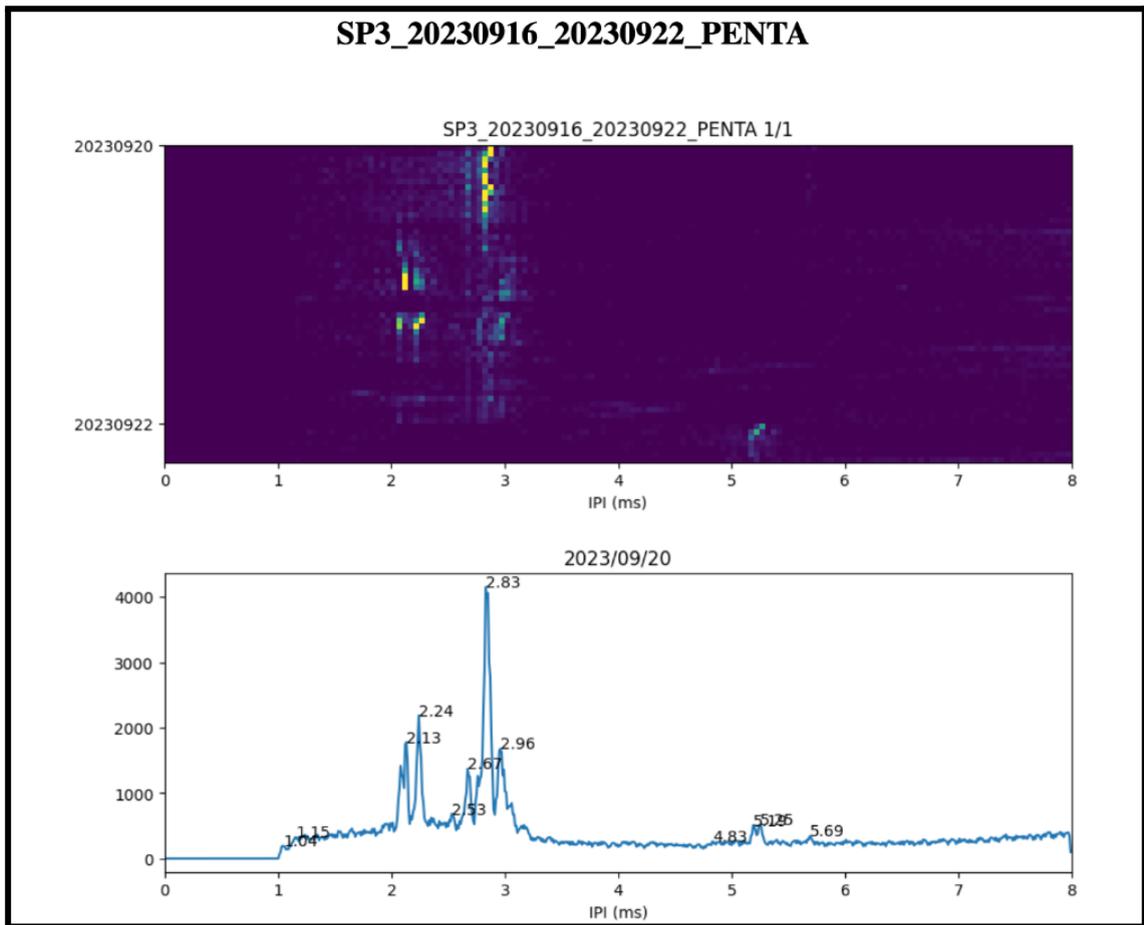












A12. Exemple de fiche d'identité de cachalot durant mission WhaleWay

Exemple de fiche d'identité élaborée par Longitude181 et al. dont le catalogue compte aujourd'hui 36 individus identifiés dans le cadre du programme WhaleWay. Elles combinent pour la première fois pour les cachalots la photoidentification et la stratégie de reconnaissance par la bioacoustique (par 'IPI'), et historique, ce qui conduira à moyen terme à une meilleur compréhension de l'évolution des structures sociales (possibilité de différencier mâle adulte et femelle adulte par l'IPI) et un meilleur suivi des populations, par la modélisation de la fonction de croissance des IPIs qui est nécessaire à l'identification acoustique sans photoidentification.

» SURVIVOR

1^{ER} OBS 2023 - 09 - 25
LG181

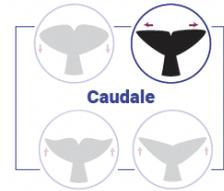
LONGITUDE 181
La Voix de l'Océan

CENTRE INTERNATIONAL
ACOUSTIQUE
NATURELLE

Maison Francis Kurkdjian
Paris

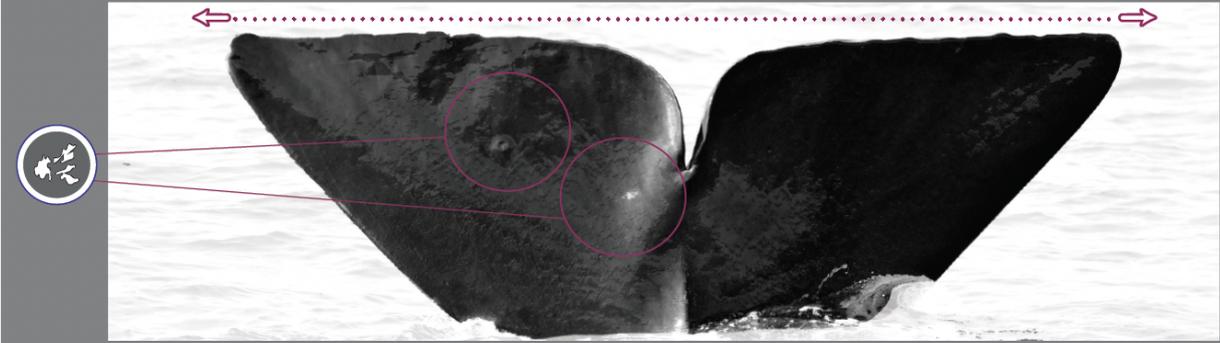
CARTES D'IDENTITÉ // CACHALOTS DE MÉDITERRANÉE

	IPI	DATE - IPI	DATE	RECAPTURE
♂	5,22 ms	2023 - 09 - 25		WWF : PM081
ADULTE			2009	Tethys : PMTRI056-//INTRC_PM_777
ADN : non				EcoOcéan : PME01045
			2009-2010	accident avec bateau : profonde cicatrice sur dorsale



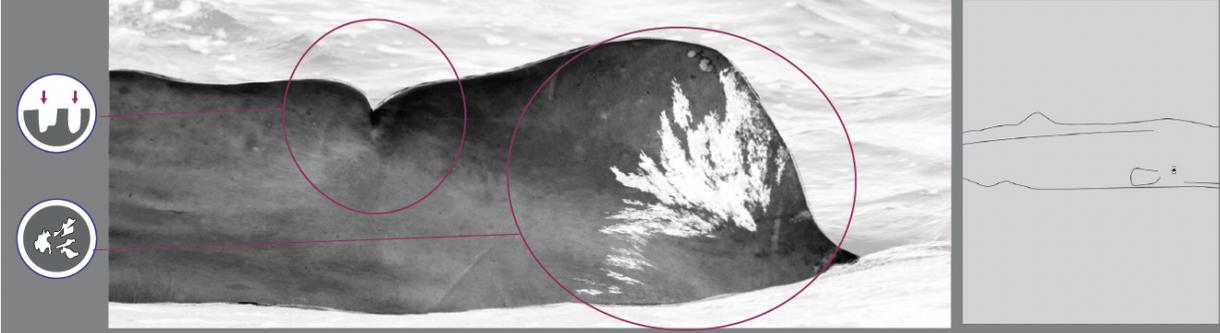
Caudale - Vue Ventrale

2023 - 09 - 25



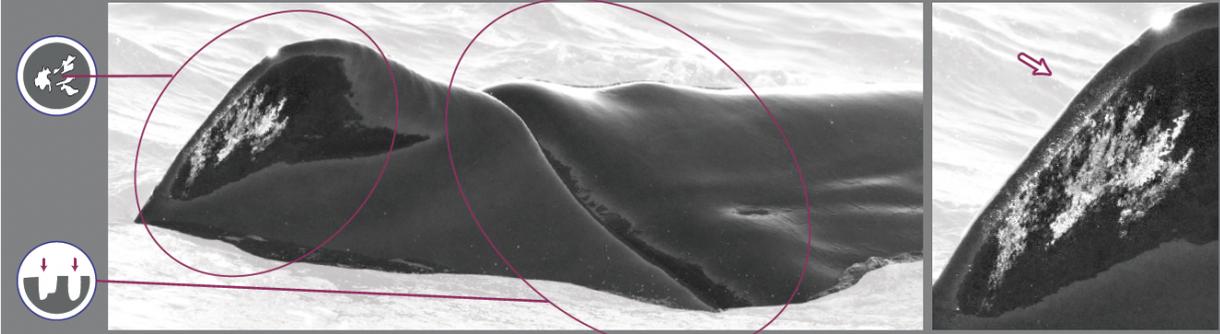
Flanc - Gauche

◀ Avant 2023 - 09 - 25



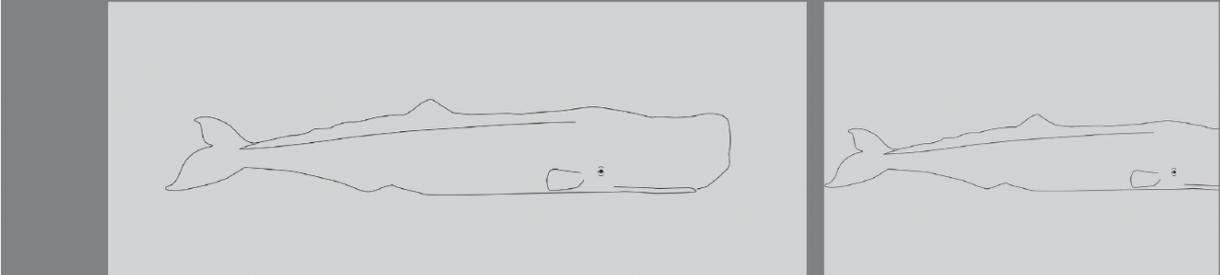
Flanc - Droit

Avant ▶ 2023 - 09 - 25



Sexe - Vue ventrale

◀ Avant Avant ▶



© Longitude 181 - 2023 - Conception : François et Véronique Sarano - Graphisme & illustration : Marion Sarano - © Photos : Stéphane Granzotto, Véronique & François Sarano, Marie Lartière

Figure A12.1 : Exemple de fiche d'identité créée par Longitude181 suite aux missions WhaleWay.

A13. Etude expérimentale des émissions de JetSki

Voir dans matériel supplémentaire le bilan de l'étude sur les émissions anthropophoniques de JetSki dans le Golf de StTropez en mai 2022 :

http://sabiiod.lis-lab.fr/pub/Pelagos2023_LIS_material/Livrable1_Pelagos_UTLN_anthropisation_JetSki_202210.pdf

A14. Autres données en format Géonature

Les tables numériques en format Géonature et des photos de ce rapport sont disponibles à :

http://sabiiod.org/pub/Pelagos2023_LIS_material