



Mission Sphyrna Odyssey

2019-2020 - Rapport Scientifique I

Découvertes Ethoacoustiques de Chasses Collaboratives de Cachalots en Abysses & Impacts en Mer du Confinement COVID19

Hervé Glotin^{a,b,c,g}, Nicolas Thellier^{a,b,c}, Paul Best^{a,b,c,g}, Marion Poupard^{a,b,c,f}, Maxence Ferrari^{a,b,c,g}, Sara Viera^{b,c,d}, Valentin Giés^{a,c,g,h}, Marina Oger^{b,c,d}, Pascale Giraudet^{a,b,c}, Maxence Mercier^e, Garance Donzé^{a,b,c}, Marina Campana^{a,b,c}, Jessica Chevallier^{a,b,c}, Franck Malige^{a,b}, Julie Patris^{a,b}, Jean-Marc Prévot^c, Philippe Cosentino^b, Nathalie Prévot d'Alvise^{a,c,b}, Yann Ourmières^{a,c,i}, Valentin Barchasz^{a,b,c,g}, Alice Lehir^{a,b,c}, Sebastian Marzetti^{a,c,g,b}, François Sarano^d, Jérôme Benveniste^k, Sandrine Gaillard^{a,c,i}, Fabien de Varenne^j

(a) CNRS, (b) Lab. Informatique & Système, (c) Université de Toulon, (d) Longitude 181, (e) Tripinlab, (f) Biosong, (g) SMIoT-INPS, (h) IM2NP, (i) MIO, (j) Seaproven, (k) ESA



Ce rapport peut-être cité comme :

```
@Book{Sphyrna_r1_2020,  
author = {Glotin, H. and Thellier, N. and Best, P. and Poupard, M. and Ferrari, M.  
and Viera, S. and Giés, V. and Oger, M. and Giraudet, P. and Mercier, M.  
and Donzé, G. and Campana, M. and Chevallier, J. and Malige, F. and Patris, J.  
and Prévot, J.M. and Cosentino, P. and Prévot d'Alvise, N. and Ourmières, Y.  
and Barchasz, V. and Lehir, A. and Marzetti, S. and Sarano, F. and Benveniste, J.  
and Gaillard, S. and de Varenne, F.},  
title = {Sphyrna-Odyssey 2019-2020, Rapport I:  
Découvertes Ethoacoustiques de Chasses Collaboratives de Cachalots en Abysses  
& Impacts en Mer du Confinement COVID19},  
url={http://sabiiod.org/pub/S01.pdf},  
publisher = {197p, CNRS LIS, Université de Toulon},  
year = {2020},  
edition = {2}}
```

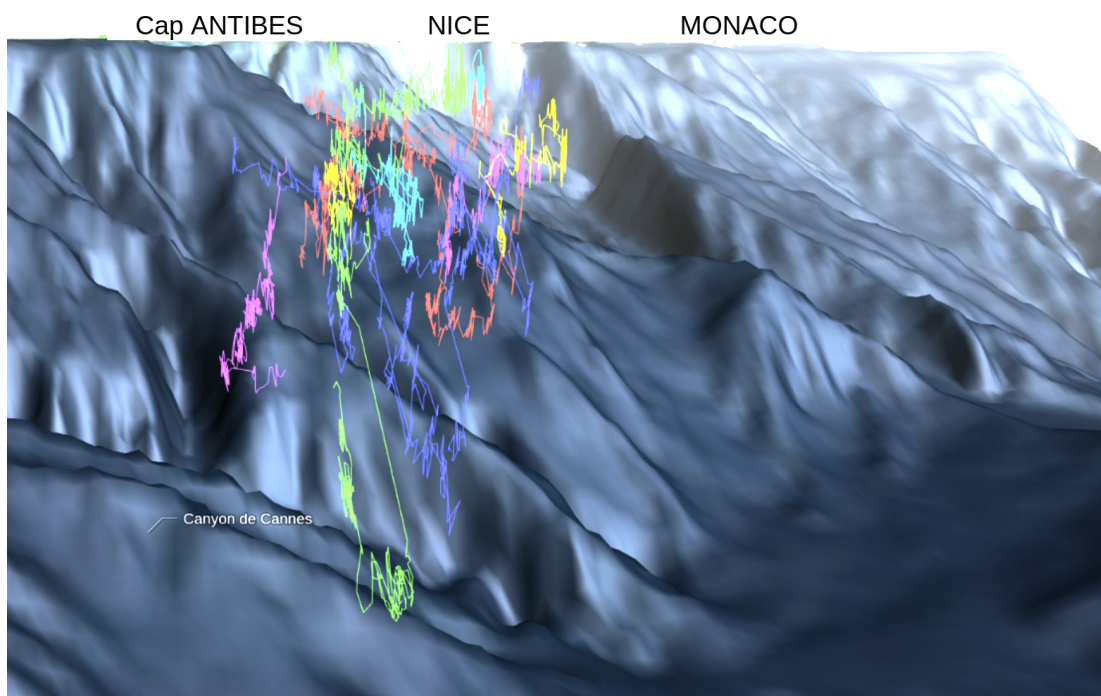



Figure 1: Première observation au monde d'un essaim de cachalots en chasse dans les abysses, au Sud de Monaco, le 14 janvier 2020 par Sphyrna Odyssey. Carte interactive disponible sur <http://philippe.cosentino.free.fr/vamos/sphyrna-odyssey>

Table des Matières

1	PRÉAMBULE ET REMERCIEMENTS	13
2	ABSTRACT & RÉSUMÉ	17
3	INTRODUCTION ET TRANSECTS	22
3.1	Partenariat scientifique	23
3.1.1	L'équipe DYNI, CNRS LIS et Université de Toulon	23
3.1.2	Sea Proven	24
3.1.3	La Fondation Prince Albert II de Monaco	25
3.1.4	La Société des Explorations de Monaco	25
3.1.5	ACCOBAMS	26
3.1.6	Lemer Pax	27
3.1.7	CNES	27
3.1.8	ESA	28
3.1.9	CLS	28
3.1.10	TripinLab	28
3.1.11	SMIoT	29
3.1.12	Longitude 181	29
3.2	Les Navires Laboratoires Autonomes Sphyrna	30
3.3	Transects réalisés	34
3.4	Organisation du rapport	37
4	MESURES CHIMIQUES ET PHYSIQUES MARINES ET EFFETS DU CONFINEMENT COVID	39
4.1	Température	41
4.1.1	Variations avec la bathymétrie	43
4.2	Salinité	43
4.2.1	Variations avec la bathymétrie et distance à la côte	43
4.3	pH	44

4.3.1	Variations avec la bathymétrie et distance aux ports	45
4.4	Oxygène dissous	47
4.4.1	Variations avec la bathymétrie et distance aux ports	47
4.5	Chlorophylle	48
4.5.1	Variations avec la bathymétrie et distance aux ports	49
4.5.2	Variation de la chlorophylle dans les baies/rades et falaises/canyons .	50
4.6	Matière organique dissoute	52
4.6.1	Variations avec la bathymétrie et distance aux ports	52
4.7	Électro-conductivité	53
4.7.1	Variations avec la bathymétrie et distance aux ports	53
4.8	Potentiel d'oxydoréduction	55
4.8.1	Variations avec la bathymétrie et distance aux ports	56
4.9	Algues bleu-vert	58
4.9.1	Variation avec la bathymétrie et la distance aux ports	59
4.10	Densité spécifique	59
4.10.1	Variation avec la bathymétrie et la distance aux ports	60
4.11	Hydrocarbures	61
4.11.1	Variations avec la bathymétrie et la distance aux ports	62
4.12	Mesures de radio-éléments	62
4.13	Conclusion	62
5	MESURES ACOUSTIQUES ET EFFETS DU CONFINEMENT COVID	64
5.1	Instrumentation acoustique	65
5.2	Mesures du niveau dB RMS par tier d'octave	69
5.3	Effet du confinement par rapport à la distance aux ports et à la côte	73
5.4	Conclusion	77
6	DÉTECTIONS ACOUSTIQUES OU VISUELLES DE CÉTACÉS, ETAT DE L'ART ET COMPARAISONS	79
6.1	Le cachalot : <i>Physeter macrocephalus</i>	80
6.2	Le Globicéphale noir : <i>Globicephala mela</i>	81
6.3	Grand dauphin : <i>Tursiops truncatus</i>	82
6.4	Ziphius : <i>Ziphius cavirostris</i>	83
6.5	Dauphin bleu et blanc : <i>Stenella coeruleoalba</i>	84
6.6	Dauphin de Risso : <i>Grampus griseus</i>	85
6.7	Dauphin commun : <i>Delphinus delphis</i>	86
6.8	Rorqual commun : <i>Balaenoptera physalus</i>	87
6.9	Rorqual à museau pointu : <i>Balaenoptera acutorostrata</i>	87

6.10	Phoque moine : <i>Monachus monachus</i>	88
6.11	Espèces attendues dans le Sud de Majorque	88
6.12	Conclusion : comparaison aux détections de SOM	89
7	ADN ENVIRONNEMENTAL	93
7.1	Principe du protocole ADN environnemental	94
7.2	Échantillonnage	95
7.3	Extraction de l'ADNe	96
7.4	Détection des espèces cibles par PCR	97
7.5	Séquençage	97
7.6	Espèces identifiées via l'ADNe	99
7.7	Répartition des espèces détectées par ADNe	100
7.8	Conclusion et perspective : Acoustique et ADNe joints	101
8	DÉVELOPPEMENTS EN INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DÉTECTION ACOUSTIQUE DE CÉTACÉS SUR LES MASSES DE DONNÉES DE SOM	102
8.1	Introduction	103
8.2	Construction de l'ensemble de données de référence	104
8.3	Labellisation experte de biosonars sur une masse de données acoustique	105
8.4	Intégration de données de la Mission Sphyrna Odyssey	106
8.5	Un hackathon IA international	107
8.6	La base de référence DOCC10	107
8.7	Deep learning pour la reconnaissance automatique de biosonars	109
8.8	Topologie du réseau de neurones	111
8.9	Résultats	112
8.10	Ciblage d'espèces sur DOCC7	115
8.11	Conclusion : vers une application sur les masses de données SOM	116
9	TRAJECTOGRAPHIE 3D D'UN ESSAIM DE CACHALOTS	119
9.1	Temps de Delais d'Arrivée du Signal (TDoA)	123
9.2	Solveur linéaire	124
9.3	Pistage	125
9.4	Estimation des positions 3D des sources	126
9.5	Stabilisation numérique par l'assiette MPU	129
9.6	Conclusion	131
10	ÉTHOACOUSTIQUE DE CHASSE EN GROUPE DE CACHALOTS	135
10.1	Vitesses	137
10.2	Tortuosité	138

10.3	Statistique des distances inter-individus	140
10.4	Croisement des observations	144
10.5	Codirection	145
10.6	Principe d'Alliance de teutophages dans les abysses	147
10.7	Une Alliance en abysse pour une observation distribuée centrifuge	148
10.8	L'alliance des abysses pour une observation distribuée multifaisceaux	150
10.9	Conclusion	154
11	ÉTHOACOUSTIQUE ET FORMES DE QUINZE SONDES DE CACHALOTS	157
11.1	Représentation temps-fréquence de clics par piste	158
11.2	Analyse de la vitesse avec l'intervalle inter clic	160
11.3	Vitesse et Intervalle Inter-Clics (ICI)	161
11.4	Analyse de la vitesse ascensionnelle	163
11.5	Variation de la vitesse planaire en fonction de la profondeur	164
11.6	Conclusion	167
12	DISCUSSION ET CONCLUSION	169
12.1	Résultat majeur: Alliance de teutophages et corrélations au milieu	170
12.2	Modèle et influence de front océanique sur les cachalots	171
12.3	Analyse fine des paramètres du milieu et de l'activité des cachalots	174
12.3.1	Effet du courant sur l'activité des cachalots	174
12.3.2	Effet de la température et salinité sur l'activité des cachalots	178
12.4	Hypothèses sur le comportement des cachalots dans le front océanique	183
12.5	Autre résultat majeur: Effet en mer du confinement COVID19	184
12.6	Perspectives	185
12.6.1	Perspective en analyse dialectale de globicéphales	186
12.6.2	Perspective des mesures Sphyrna couplées à la fibre optique MEUST	187
13	ANNEXES	189
13.1	Visualisations interactives des chasses en 3D	190
13.2	Données environnementales et détections	190
13.3	Cartes 3D interactives de courant, salinité et température	191
	REFERENCES	192

Liste des Figures

1	Découverte d'un essaim de cachalots en chasse dans les abysses	4
3.1	Les deux drones Sphyrna	31
3.2	Un Sphyrna vu du ciel	32
3.3	Sphyrna	32
3.4	Antenne acoustique	33
3.5	Transect total	35
3.6	Transect Nord, détails	38
3.7	Transect Sud, détails	38
4.1	La sonde Aquaread AP-7000	40
4.2	Températures de surface	42
4.3	Température de l'eau	43
4.4	Salinité de l'eau	44
4.5	pH de l'eau	45
4.6	pH de l'eau en fonction de la bathymétrie (en et hors confinement)	46
4.7	pH de l'eau en fonction de la distance aux ports (en et hors confinement)	46
4.8	Oxygène dissous dans l'eau	47
4.9	Taux de chlorophylle dans l'eau	49
4.10	Taux de chlorophylle dans l'eau en fonction de la bathymétrie	50
4.11	Comparaison des taux de chlorophylle dans l'eau	51
4.12	Taux de matière organique dissoute colorée (en et hors confinement)	53
4.13	Taux d'électroconductivité EC (en et hors confinement)	55
4.14	Taux de potentiel d'oxydoréduction en fonction de la bathymétrie	57
4.15	Taux de potentiel d'oxydoréduction en fonction de la distance au port	58
4.16	Taux d'algues bleu-vert en fonction de la distance au port	59
4.17	Taux de densité spécifique en fonction de la bathymétrie	60
4.18	Taux de densité spécifique en fonction de la distance au port	61
4.19	Taux de densité spécifique de l'eau	61

5.1	Carte d'acquisition JASON	65
5.2	Niveau de bruit de la carte JASON	66
5.3	Carte des relevés et niveaux dB pour l'octave 20 Hz avant le confinement. . .	70
5.4	Carte des relevés et niveaux dB pour l'octave 20 Hz pendant le confinement. .	70
5.5	Comparaison des Distributions des niveaux dB (en et hors confinement) . .	71
5.6	Distributions cumulées des niveaux dB avant et pendant le confinement . .	72
5.7	Niveaux dB médians avant et pendant le confinement	73
5.8	Niveaux dB fonction de la distance par rapport à la côte	74
5.9	Superposition des niveaux médians minimums sur les niveaux usuels	75
5.10	Sensibilité du système d'audition de différents groupes d'espèces	76
6.1	Etat de l'art sur le cachalot	81
6.2	Etat de l'art sur le globicéphale noir	82
6.3	Etat de l'art sur la baleine à bec de Cuvier	84
6.4	Etat de l'art sur le dauphin de Risso	86
6.5	Rencontre nocturne avec les Globicéphales	90
6.6	Les Sphyrnas avec Tursiops	90
6.7	Répartition des cachalots	91
6.8	Répartition des globicéphales noirs	91
6.9	Répartition des grands dauphins	91
6.10	Répartition des rorquals communs	92
6.11	Répartition des clics d'odontocètes en cours de classification	92
7.1	Échantillonnages réalisés lors de la première campagne <i>Sphyrna-Odyssey</i> . . .	95
7.2	Échantillonnages réalisés durant le confinement	96
7.3	Séquences nucléotidiques exploitables par BLASTn	98
7.4	Carte de détection d'espèces cibles par ADNe	100
8.1	Exemples de clics de 9 classes (issus du défi DCLDE2018)	108
8.2	Zoom sur les exemples de clics des 9 classes (DCLDE2018)	109
8.3	Exemples de DCLDE, données de test, 4096 bins.	111
8.4	Matrice de confusion du modèle de référence, sur le test set.	113
8.5	Matrice de Confusion sur l'ensemble de test pour DOCC10	115
8.6	Matrice de Confusion sur l'ensemble de test pour DOCC7	117
9.1	<i>Physeter macrocephalus</i> : le cachalot	120
9.2	Zone d'observation - Enregistrement du 14 janvier 2020.	122
9.3	Spectrogramme d'un clic de cachalot	123
9.4	Principe du TDOA pour une antenne de 2 hydrophones.	124

9.5	AZ(t) & EL(t) qui sont le gisement de la source du clic.	125
9.6	Groupements DBSCAN sur la trace AZ(t).	126
9.7	Azimut et Élévation, après pistage.	127
9.8	Positions 3D des pistes estimées par le solveur non linéaire	128
9.9	Correction d'artefacts (data MPU - Compas).	129
9.10	Angle de Lacet (Yaw).	130
9.11	Angle de Tangage (Pitch).	130
9.12	Angle de Roulis (Roll).	131
9.13	Coordonnées 3D des pistes en fonction du temps (repère absolu).	132
9.14	Traces 3D des 15 pistes (enregistrement entier).	133
9.15	Visualisation dynamique des trajectoires des pistes via Interface web	134
10.1	Animation multi-vues montrant les trajectoires des pistes	136
10.2	Vitesse moyenne des pistes.	137
10.3	Tortuosité des 15 pistes sur tout l'enregistrement.	139
10.4	Moyenne des distances entre les pistes.	140
10.5	Distance entre les pistes (minimales et maximales)	141
10.6	Histogramme des distances minimales entre les pistes.	141
10.7	Evolution des distances inter-pistes et de la profondeur moyenne des pistes	142
10.8	Histogramme des distances maximales entre les pistes.	143
10.9	Tortuosité minimale en fonction des distances inter-pistes minimales	145
10.10	Codirection des pistes (en 3D et dans le plan XY).	146
10.11	Emissions centrifuges de 5 individus	148
10.12	Synchronisation de 4 biosonars pointant vers la surface. Chaque cône est tangent à la trajectoire calculée.	149
10.13	Synchronisation de 4 biosonars pointant vers le fond. Chaque cône est tan- gent à la trajectoire calculée.	149
10.14	Histogramme des angles entre les pistes	150
10.15	Cinq cachalots émettant dans la même direction	151
10.16	Évolution des pistes 3 et 4 avec aperçu de leur cône d'émission sonore	152
10.17	Évolution des pistes 3 et 4 avec aperçu de leur cône d'émission (suite)	153
10.18	Illustration du principe du sonar (mono et multistatique)	155
11.1	Exemple de série de clics d'un seul animal	158
11.2	Spectrogrammes de 10 clics pour chacune des 15 pistes	159
11.3	Vitesse instantanée en fonction de l'intervalle inter-clic	161
11.4	Vz(ici)	163
11.5	Vxmoy(Prof)	164
11.6	Vymoy(Prof)	165

12.1	Illustration du modèle GLAZUR	172
12.2	Résumé du courant, température et zone de chasse du 14 janvier	173
12.3	Illustration générique de l'instabilité du courant Ligure	174
12.4	Représentation de la norme du courant le 14 janvier 2020	176
12.5	Représentation de la norme du courant en coupes verticales le 14 janvier 2020	177
12.6	Gradient 3D de la température le 14 janvier	179
12.7	Gradient de la salinité en 3D le 14 janvier	181
12.8	Densité de présence des cachalots dans les abysses vs Température et Salinité	182
12.9	Contre mesure de fibre optique	187

1

Préambule et Remerciements

Ces neuf mois de mission nous ont appris la patience, l'écoute. Nous avons dérivé jour et nuit, de mer calme en tempête, de Monaco à Majorque en passant par le Golfe du Lion, dans un sens et l'autre, à l'allure d'un piéton. Chacun de nos pas était silencieux, pour écouter les sons les plus lointains, les plus profonds, les plus discrets. Surplombant des vallées, des falaises ou des monts sous-marins, nous avons, je pense, dévoilé quelques-uns des mystères de leur faune abyssale.

Voici une première transcription de notre carnet de bord, et analyses de masse de données. Nous dédions ce rapport à toute son Equipe Scientifique rédactrice de ce rapport, et aussi embarquée par rotation de 2 ou 3 membres sur plusieurs jours. Un grand merci à notre capitaine Fabien de Varenne qui sur toute la Mission nous mena en sécurité, et bien sûr aussi à nos chaleureux coéquipiers qui ont fait l'impossible : Pierrick Rouf, Jean-Baptiste Hanrion, Jérôme de Varenne, Antoine Thibault, nos sleepers Maxence Valdelièvre et Stéphane Della, et nos cinéastes de bord : Pauline Cottaz épaulée de Rémi Demarthon.

Nous remercions en premier lieu nos trois principaux soutiens institutionnels et financiers de cette mission :

- La Fondation Prince Albert II de Monaco, qui a aussi soutenu l'extension de la mission durant le confinement COVID,
- La Société des Explorations de Monaco,
- ACCOBAMS.

Ces recherches sont cofinancées par le projet SMILES (ANR-18-CE40-0014 SMILES)

en Intelligence Artificielle non supervisée des masses de données bioacoustiques. Elles bénéficient du soutien de la Chaire en Intelligence Artificielle en Bioacoustique avancée de H. Glotin (ADSIL ANR-20-CHIA-0014). Nous remercions l'Institut Universitaire de France pour la Chaire d'H. Glotin (2011-2016) durant laquelle ont été définis certains algorithmes efficaces d'analyse de scènes sous-marines utiles à cette recherche.

Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul de l'IDRIS au travers de l'allocation de ressources 20XX-AD011011742 attribuée par GENCI, que nous remercions. Le supercalculateur français 'Jean Zay' dispose d'une puissance de calcul de 28 PFlop/s et permet de réduire considérablement les temps de calcul nécessaires aux algorithmes d'intelligence artificielle notamment.

Nous remercions Lemerpax et la revue Marine & Océan, co-initiateurs avec DYNI et Seaproven de cette mission. Nous remercions le Pôle Information Numérique Prévention et Santé de l'UTLN (INPS) pour son soutien, et la plateforme technologique SMIoT qui a inventé des instruments scientifiques innovants mis en oeuvre dans cette mission et aboutissant à ces résultats inédits. Merci à Kai Poutrain et ses collègues du LIS pour l'appui en infrastructure pour la manipulation des dizaines de To de données. Nous remercions V-Yacht pour son implication et son catamaran One-Cat transformé en plateforme scientifique.

L'ONG Longitude 181 a soutenu cette mission, ainsi que le Pr. Gianni Pavan du CIBRA univ. Pavia, Italie, aux travers de leurs conseils. Nous remercions Dave et Jerry pour leurs discussions.

Merci à la Préfecture Maritime pour sa confiance et ses autorisations exceptionnelles, ainsi qu'au Parc National de Port-Cros pour son aide logistique, et au Sanctuaire Pelagos pour son intérêt à la mission.

Nous remercions la Région Haut-de-France et l'Agence Innovation Défense pour le cofinancement de la thèse de Maxence Ferrari. Nous remercions le programme Interreg Italia-Francia Marittimo 2014-2020 pour notre projet GIAS de bouée écoutante cofinçant avec la Région Sud Provence Alpes-Côte-d'Azur la thèse de Paul Best. Nous remercions l'Université de Toulon et Biosong pour le cofinancement de thèse de Marion Poupard.

Hervé Glotin,

Directeur scientifique des missions Sphyrna Odyssey.



2

Abstract & Résumé

”Evidences of Sperm Whales collaborative forage & COVID19 Effects Revealed by the Autonomous Laboratory Vessels Sphyrna”

The Sphyrna Odyssey Mission (SOM) 2019-2020 is the continuation of scientific research into the acoustic behavior of cetaceans and the nature of the environment they inhabit. Our techniques allow scientists to visualize, in three dimensions, the orientation of wild toothed whales. They have been pioneered by our team. These field studies have driven the development of the SOM system that is adding significantly to our understanding of how these animals interact with their environment.

This oceanographic mission took place from the end of September 2019 until the COVID19 crisis in May 2020. It visited the cetacean sanctuary Pelagos, in the western Mediterranean Sea, and Majorca via 'Golfe du Lion'.

SOM used two Autonomous Laboratory Vessels (ALV Sphyrna from Seaproven), each having a small five hydrophone acoustic array recorded at sampling rate of 384 kHz using a SMIoT UTLN JASON card. A base ship, hosting the scientific team, received the acoustic waves in real time from each ALV.

This missions collected a large amount of data from various sensors. SOM observed anthropophony, and physical and chemical, environmental DNA data before and during COVID19. It demonstrated that human activities curtailed by COVID19 not only reduced in-water noise but also hydrocarbon and other pollutants.

SOM had the main objectives of the listening to and monitoring populations of deep diving cetaceans, such as Sperm Whales (*Physeter macrocephalus*). It doesn't aim to actively approach cetaceans but, on the contrary, to listen to them without any interaction. We therefore study them in the wild in their natural habitat during their complex bioacoustic collabora-

tions in their abyssal wonderings.

Diving behavior of deep diving cetaceans is a cue for biodiversity assessment in the abyss. Detection and localization of cetaceans provides insight into their diving behavior and the abyssal biodiversity in their vicinity. For this purpose, our strategy is to listen to cetaceans from tiny mobile acoustic antennas near the surface.

Our research resulted in many hours of high definition 3D tracks of a plurality of Sperm Whales, sometimes at 3 km range from the hydrophone arrays. These multiple 3D tracks depict the behavior of the cetaceans in the abyss on their echolocation click by click millisecond basis. This high resolution allows us to discover, for the first time in the world, their strategy of collaborative foraging. The whales appear to build transient multistatic collaborative sonar arrays, phasing their sonars at approximately 500 m distances between each other.

We are continuing to analyze this data in order to extract features unique to these groups of foraging animals. Most of the fine structure of the clicks contains temporal and spectral patterns that may carry communication signals on top of the echolocation function. We are constructing 3D models of the whale's activities as they forage. These models show how animals interact in forming multistatic acoustic arrays. With this cause and effect information we are building a learning database to facilitate deep learning applications. Because we have cause and effect observations along with the Physeter acoustic signatures we may have a Physeter Rosetta Stone that will lead to understanding how they communicate and what the content of the communications is. At this time we are continuing to refine our model and develop appropriate Deep Learning algorithms to extend our findings. These discoveries suggest that new criteria towards noise pollution and anti-collision systems are warranted.

” Chasses Abyssales de Cachalots en Alliance & Effets en Mer du Confinement COVID19
démontrés par les Laboratoires Autonomes Sphyrna ”

La mission Sphyrna Odyssey (SOM) 2019-2020 mène une recherche scientifique sur le comportement acoustique des cétacés et la nature de l'environnement sous-marin qu'ils habitent. Nos techniques permettent de visualiser, en trois dimensions, le déplacement et l'orientation relative des mammifères marins. Ces études sur le terrain ont conduit au développement d'un système complet qui contribue de manière significative à notre compréhension de la manière dont ces animaux interagissent avec leur environnement.

Cette mission océanographique s'est déroulée de la fin septembre 2019 jusqu'au confinement du COVID19 en mai 2020. Elle a visité le sanctuaire de cétacés Pelagos, en Méditerranée occidentale, et Majorque et le Golfe du Lion.

SOM a utilisé deux navires laboratoires autonomes (ALV Sphyrna, Seaproven), chacun équipé d'une antenne composée de cinq hydrophones enregistrés à la fréquence d'échantillonnage de 384 kHz à l'aide de la carte SMIoT UTLN JASON. Un vaisseau-base, qui accueille l'équipe scientifique, recevait les ondes acoustiques envoyées en temps réel par chaque ALV.

SOM a recueilli une grande quantité de données provenant de divers capteurs pour observer l'anthropophonie, les données physiques et chimiques et l'ADN environnemental avant et pendant le COVID19. On démontre que les activités humaines réduites par COVID19 ne diminuaient pas seulement le bruit dans l'eau, mais aussi les hydrocarbures et autres polluants.

SOM a pour principaux objectifs l'écoute et la surveillance des populations de cétacés plongeant en eaux profondes, tels que les cachalots (*Physeter macrocephalus*). Elle ne

viser pas à approcher activement les cétacés mais, au contraire, à les écouter sans aucune interaction. Nous les étudions donc à l'état sauvage dans leur habitat naturel au cours de leurs collaborations bioacoustiques complexes abyssales.

Le comportement des cétacés en plongée profonde est un indice pour l'évaluation de la biodiversité des abysses. À cette fin, notre stratégie consiste à écouter les cétacés à partir de minuscules antennes acoustiques mobiles situées près de la surface.

Nos recherches ont permis d'obtenir de nombreuses heures de pistes 3D d'une pluralité de cachalots, parfois à 3 km de distance des ALV. Ces multiples pistes 3D dépeignent le comportement des cétacés dans les abysses sur la base de leur écholocalisation, clic par clic, milliseconde par milliseconde. Cette haute résolution nous permet de découvrir, pour la première fois au monde, leur stratégie de prospection collaborative de nourriture. Ces sondeurs semblent construire des réseaux de sonars collaboratifs multistatiques, mettant en phase leurs sonars à une distance d'environ 500 m les uns des autres.

Ces découvertes sont riches en perspectives. La plupart de la structure fine des clics contient des informations temporels et spectrales qui peuvent porter des signaux de communication superposés à leur fonction d'écholocalisation. Nos modèles 3D des activités de ces essaims montrent comment les animaux interagissent et forment des réseaux acoustiques multistatiques. Avec ces liens de cause à effet, nous construisons une base de données d'apprentissage automatique des signatures acoustiques, sorte de Pierre de Rosette, qui permet d'étudier leur communication via des algorithmes Deep Learning. Ces découvertes suggèrent à moyen terme de nouveaux critères concernant la pollution sonore et les systèmes anti-collision des sondeurs avec le trafic maritime.

3

Introduction et Transects

Pendant plus de 8 mois, nous avons étudié une vaste zone maritime et les abysses de la mer Méditerranée : au large de Toulon, Antibes et Monaco, mais aussi au large des Baléares et dans le Golfe du Lion. Notre objectif principal était de suivre et d'écouter cinq espèces de cétacés grands plongeurs : le Cachalot, le Globicéphale, le Grand Dauphin, le Dauphin de Risso et le Ziphius. Durant cette mission, nous avons :

- Réalisé des enregistrements multicanaux et très large bande fréquentielle, y compris en plein hiver, et durant le confinement COVID₁₉, ce qui est inédit,
- Calculé les déplacements en 3D de teutophages dans les abysses,
- Analysé finement leurs comportements de chasse collaborative abyssale,
- Défini les effets en mer du confinement COVID₁₉.

Cette mission et recherche est le fruit d'une collaboration efficace entre plusieurs entités financières et scientifiques, que nous décrivons sommairement ci-dessous.

3.1 PARTENARIAT SCIENTIFIQUE

Cette mission scientifique est le fruit d'une collaboration inter-disciplinaire, dont voici les partenaires principaux.

3.1.1 L'ÉQUIPE DYNI, CNRS LIS ET UNIVERSITÉ DE TOULON

L'équipe DYNI du CNRS LIS (Laboratoire d'Informatique & Systèmes) est basée sur le campus de l'université de Toulon. Le LIS est une Unité Mixte de Recherche (UMR) sous tutelle du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) rattachée à l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS₂I), sous tutelle notamment de

l'Université de Toulon (UTLN) et de l'Ecole Centrale de Marseille. Il fédère plus de 375 membres dont 190 permanents enseignants chercheurs. L'équipe DYNI du LIS est au coeur des missions Sphyrna, mène des recherches fondamentales et appliquées dans les domaines de l'informatique, l'apprentissage automatique / IA et la bio-acoustique. Hervé Glotin, qui y est professeur, est co-initiateur des missions Sphyrna-Odyssey, concepteur de leur protocole, et en a dirigé les éditions 2018, 2019 et 2020. Il en propose une suite sur les trois années suivantes.

3.1.2 SEA PROVEN

Le bureau R&D d'études navales Sea Proven, dirigé par Fabien de Varenne, est co-initiateur des missions Sphyrna Odyssey. Il est spécialiste de la conception et de la fabrication de drones navals innovants depuis 2014. Expert en robotique marine, il imagine les bateaux du futur et se positionne comme un acteur incontournable sur le marché des drones marins de surface. Basé à Laval en Mayenne, il conçoit et développe des drones de secours et d'intervention de petite taille et son navire phare, le Sphyrna, à ce jour le plus grand drone de surface, civil, au monde. Appelés à naviguer en constellation, les drones Sphyrna - autrement appelés Navires Laboratoires Autonomes©, sont dédiés à la surveillance et à une meilleure connaissance des espaces maritimes, et notamment des Zones économiques exclusives (ZEE) des Etats littoraux. Ils sont, ici, mis au service des scientifiques dans le cadre des campagnes Sphyrna Odyssey.

3.1.3 LA FONDATION PRINCE ALBERT II DE MONACO

Créée en 2006 par le Prince Albert II de Monaco, elle œuvre pour la protection de l'environnement et la promotion du développement durable. Active au niveau international, elle mobilise les citoyens, les responsables politiques, les pouvoirs publics, les scientifiques et les acteurs économiques, pour la défense de la nature considérée comme un patrimoine commun de l'humanité. Depuis sa création il y a 13 ans, la Fondation a accordé son soutien à 477 projets à travers le monde pour un montant de 55 millions d'euros soit une moyenne de 4 millions d'euros par an. Elle établit des partenariats pour mener à bien des projets et entreprendre des actions concrètes dans ses champs d'actions prioritaires. Elle promeut et encourage également des initiatives et des solutions innovantes notamment par l'attribution de prix et de bourses. La FPA2 concentre ses missions dans trois principales zones géographiques - le bassin méditerranéen, les régions polaires, et les pays les moins avancés (selon la liste des Nations unies) - toutes fortement impactées par les effets des changements climatiques, la perte de la biodiversité et les menaces sur les ressources en eau.

3.1.4 LA SOCIÉTÉ DES EXPLORATIONS DE MONACO

Avec l'ambition de réconcilier l'Humanité avec la mer, le Prince Albert II de Monaco a lancé, en avril 2017, les Explorations de Monaco, renouvelant ainsi, à quelques 120 ans de distance, la démarche d'exploration scientifique maritime de son trisaïeul, le Prince Albert Ier. Associant, sous l'égide du gouvernement de la Principauté de Monaco, la Fondation Prince Albert II de Monaco, le Centre Scientifique de Monaco, l'Institut Océanographique et le Yacht Club de Monaco, les Explorations de Monaco ont mené une première série de douze expéditions dans le monde, entre 2017 et 2018. Une nouvelle phase a été engagée fin 2018 en érigeant les

Explorations de Monaco en société. Plateforme au service de l'engagement du Prince Albert II de Monaco en matière de connaissance, de gestion durable et de protection de l'océan, la Société des Explorations de Monaco vient en appui à l'action des institutions monégasques, en organisant ou en soutenant des missions collectives menées à l'international qui articulent recherche scientifique, médiation auprès des publics et coopération gouvernementale. Son programme d'activités pour la période 2019-2022 est notamment centré sur la protection de la mégafaune et les nouvelles techniques d'exploration.

3.1.5 ACCOBAMS

L'Accord sur la Conservation des Cétacés de la Mer Noire, de la Méditerranée et de la zone Atlantique adjacente (ACCOBAMS), conclu sous les auspices de la Convention de Bonn (PNUE/CMS), a été signé le 24 novembre 1996 à Monaco. L'ACCOBAMS est un outil juridique de conservation de la biodiversité basé sur la coopération. Son objectif est de réduire les menaces qui pèsent sur les cétacés notamment en améliorant l'état des connaissances sur ces animaux. Cet Accord intergouvernemental compte actuellement 24 Pays Parties et concrétise leur volonté de préserver toutes les espèces de cétacés et leurs habitats dans l'aire géographique de l'Accord, en imposant des mesures plus restrictives que celles définies dans les textes précédemment adoptés. Ainsi, dans le cadre de l'ACCOBAMS, les Pays Parties s'engagent à adopter et à mettre en œuvre des mesures de gestion et de conservation concrètes afin d'atteindre et de maintenir un état de conservation favorable pour les espèces de cétacés. Le financement de l'ACCOBAMS sur la Mission Sphyrna Odyssey 2019 est apporté par le ministère de l'environnement italien.

3.1.6 LEMER PAX

Lemer Pax est le leader mondial de l'innovation dans le domaine de la radioprotection, et intervient dans de nombreux domaines : médecine nucléaire ; cardiologie, neurologie et radiologie interventionnelles ; équipements amagnétiques (IRM) ; radioprotection des locaux ; nucléaire et recherche ; industrie et matériaux. Forte de près de 50 ans d'expérience, elle est présente dans 72 pays. Lemer Pax met en œuvre sur SOM un capteur-prototype destiné à la mesure précise d'isotopes radioactifs par concentration d'un grand volume d'eau de mer dans un très petit volume de résine minérale de nouvelle génération échangeuse d'ions.

3.1.7 CNES

Partenaire technique, le Centre National d'Études Spatiales (CNES) fournit l'expertise globale en terme de géolocalisation et de géo-positionnement tant pour les systèmes de navigation que pour la caractérisation des données scientifiques collectées. Le CNES va par ailleurs tester le nouveau système MEOSAR qui vient compléter le système Cospas-Sarsat relayant les signaux émis par les balises de détresse, et qui est capable de localiser instantanément et avec une précision accrue une balise n'importe où sur Terre. Le partenariat entre la Mission Sphyrna Odyssey et CNES/MEOSAR doit permettre à ce dernier d'affiner ses algorithmes via un programme mobile. Avec sa plateforme CESARS, le CNES a testé l'usage de nouvelles technologies de télécommunication par satellite via la constellation Iridium Next. La mission Sphyrna Odyssee 2019 bénéficie d'une solution de communication par satellite (Satcom) pour valider l'opérabilité des drones depuis la terre, pour la prise en charge du trafic (téléométrie / télécommande) et la transmission de données de téléométrie, ou encore pour l'échange de données de missions critiques en temps réel.

3.1.8 ESA

Partenaire scientifique de SOM, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) fournit des jeux de données satellites : images, données altimétriques diverses caractérisant, sur le plan physique et biologique, les masses d'eau traversées par la Mission. Dr. Jérôme Benveniste (ESA-ESRIN) et son équipe ont notamment préparé et numérisé les données chlorophylle A et température.

3.1.9 CLS

Avec CLS/KINEIS, il s'est agi de tester les nouveaux protocoles de communication avec tous les satellites Kineis-Argos permettant de fournir une connectivité et une localisation par satellite aux appareils IoT (Internet des objets). L'utilisation des signaux et protocoles ARGOS RF garantit une très faible consommation d'énergie lors de l'envoi de données partout dans le monde.

3.1.10 TRIPINLAB

Cette société, fondée en 2017 par le compositeur et artiste numérique Maxence Mercier, rassemble une communauté d'un millier d'utilisateurs : artistes, ingénieurs et techniciens pour le cinéma, la musique, le théâtre et la réalité virtuelle. Tripinlab produit des instruments et des contenus de création sonores et visuels, elle a conçu un logiciel 'Sound Trajectory' dédié à la spatialisation sonore. D'autres outils et productions réalisés par Tripinlab sont les fruits de collaborations pluridisciplinaires où l'art de la science et la science de l'art fusionnent pour découvrir les espaces inconnus de la biosphère et les multiples dimensions de leurs expressions. Dans SOM, TripinLab a notamment transcrit en animations 3D les chasses abyssales observées par acoustique passive par SOM. Elles sont présentées dans ce rapport

en plusieurs formats en ligne, en 2D ou 3D, à partir des données brutes de nos calculs, sans retouche. TripinLab a aussi sonifié plusieurs enregistrements de la mission, disponibles ici : <https://www.tripinlab.com/underwater-hidden-sound-life/>.

3.1.11 SMIoT

SMIoT est la plateforme de technologie scientifique de l'Université de Toulon, adossée à deux UMRs CNRS et au pôle transversal Information Numérique Prévention Santé (INPS) de l'UTLN. L'activité de SMIoT est la recherche en électronique et capteurs, processeurs et systèmes de communication divers.

Axée vers la création d'objets connectés pour la perception multimodale dans les études environnementales et dans le domaine du sport-santé, l'activité de la plateforme SMIoT s'étend aux domaines de la robotique, de la domotique et de la défense. SMIoT est composée d'une équipe de quatre experts dans les domaines de l'acoustique, bioacoustique, signal, microélectronique et capteurs. SMIoT intervient sur l'intégralité de la chaîne de conception d'un système embarqué, et a conçu la chaîne acoustique de SOM.

3.1.12 LONGITUDE 181

Longitude 181, association loi 1901, est fondée en 2002 par François et Véronique Sarano. Son président d'honneur, Albert Falco, ancien plongeur et capitaine de la Calypso, lui apportera son soutien inconditionnel jusqu'à ses dernières plongées. François Sarano, est Dr. océanographe, et a été 13 ans aux côtés du Cdt Cousteau comme conseiller scientifique et chef de mission. Il est co-auteur du film OCEANS de J. Perrin et J. Cluzaud, conférencier, auteur d'ouvrages, Chevalier de l'ordre de la légion d'honneur au titre de l'environnement

pour la création et les actions de LI81. Il se forge dès 1990 une idée des menaces qui pèsent sur le monde marin, lors de plongées aux quatre coins de la planète. Véronique Sarano est Dr. océanographe, conseillère scientifique et auteure de nombreux ouvrages.

Dès 2020 LI81 a rassemblé dans sa Charte Internationale du Plongeur Responsable le code d'une plongée respectueuse. Elle est traduite en 26 langues. Plusieurs champions d'apnée en sont signataires (Morgan Bouch'is, Guillaume Néry, Stéphane Tourreau, Andy Cabrera, Pierre Frolla et Alice Modolo...). L'océan, dernier territoire sauvage doit être partagé maintenant et avec les générations futures pour l'émotion d'une rencontre, la richesse d'un milieu indompté, l'émerveillement. En relation avec sa charte, LI81 mène des programmes de sensibilisation, dont un important volet destiné à la jeunesse, des campagnes de recherche (Cachalots) et de préservation (Requins). Avec son programme "Ici commence l'Océan", Longitude 181 veut entraîner chacun à agir pour l'océan dans ses gestes quotidiens.

3.2 LES NAVIRES LABORATOIRES AUTONOMES SPHYRNA

La mission Sphyrna Odyssey repose principalement sur l'association des drones Sphyrna de Seaproven avec l'expertise scientifique en acoustique passive de l'équipe de H. Glotin qui en a proposé l'usage en 2017 du fait de leurs qualités intrinsèques. En effet, le Sphyrna, aussi nommé 'Autonomous Laboratory Vessel' (ALV), est inspiré de la pirogue traditionnelle polynésienne, aux performances hydrodynamiques remarquables. Sa stabilité est exceptionnelle de part ses deux coques asymétriques, le tangage et le roulis du navire sont donc fortement diminués. Cela réduit les perturbations sonores et autres sur les instrumentations embarquées. L'ALV a une grande autonomie océanique, propulsé par un moteur électrique alimenté par une production d'énergie hybride : solaire, éolienne et hydrolienne. De plus, la

carène est optimisée pour réduire la traînée et donc la consommation énergétique. Tous ces éléments nous ont permis d'opérer cette mission en pleine mer à une vitesse de cinq nœuds, ou en dérive à faibles perturbations.



Figure 3.1: Un Sphyrna.

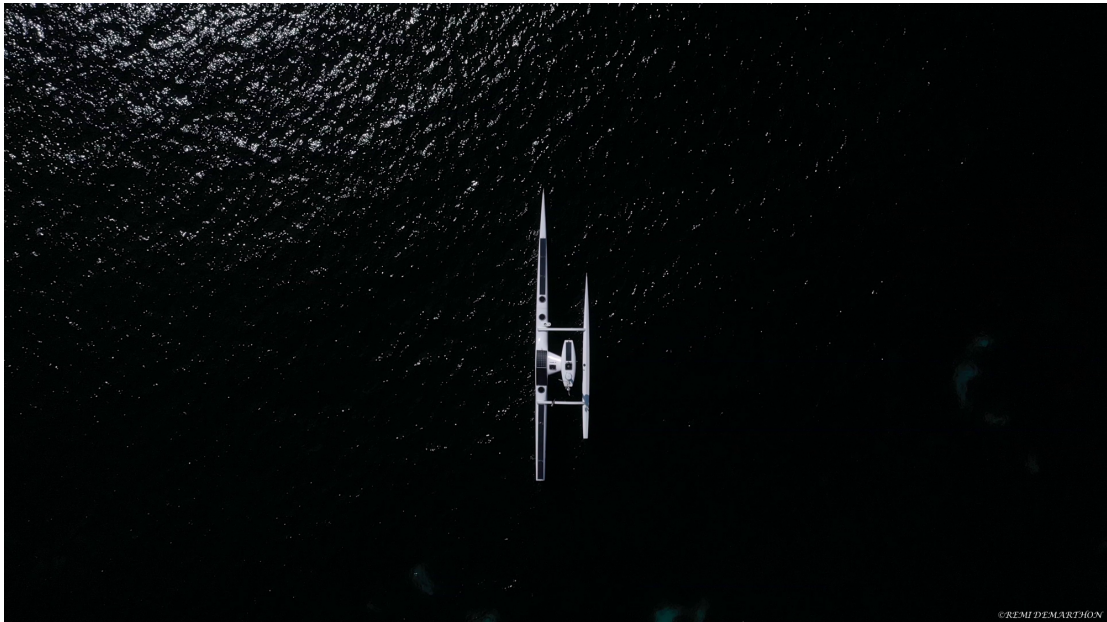


Figure 3.2: Un Sphyrna vu du ciel



Figure 3.3: Les deux Sphyrnas côte à côte. L'un est de 17 m, l'autre 20 m.

SOM a parfaitement illustré l'adaptabilité des ALV à des missions très exigeantes. La robustesse des ALV est prouvée en conditions hivernales qui sont très difficiles en mer Méditerranée (Beaufort 7 et 8 vécus en mer). Les ALV sont conçus pour avoir une capacité opérationnelle deux fois plus rapide que les moyens de surveillance offshore classiques. Ils ont une grande capacité d'emport de matériel : 1 tonne de charge utile. Ainsi, ils peuvent être équipés de nombreux capteurs et instruments de mesures destinés à la collecte d'un champ varié de données scientifiques ou de surveillance maritime.

Durant SOM tous les équipements intégrés ont fonctionné et nous avons la possibilité d'y ajouter de nouveaux instruments de mesure dans nos prochaines recherches océanographiques.

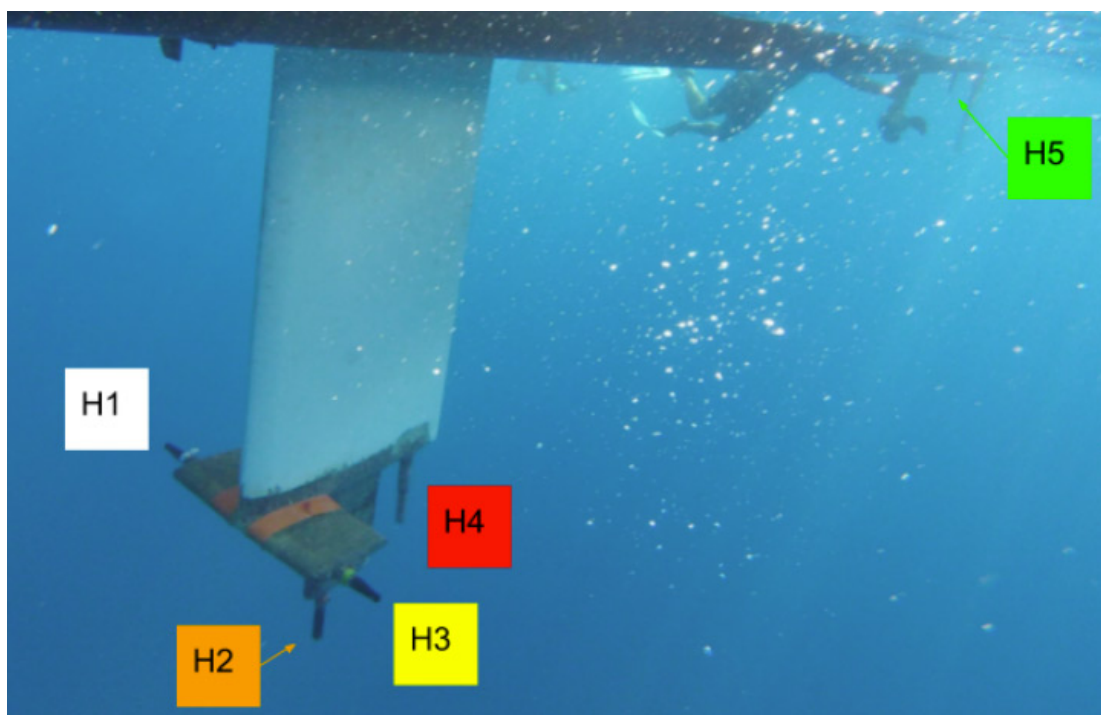


Figure 3.4: L'antenne acoustique.

Les données acoustiques ont été acquises grâce à 5 hydrophones fixés sur chaque ALV. Quatre d'entre eux sont intégrés sous la quille, à -2 m, avec un espacement inter-hydrophone de 35 à 70 cm. Le cinquième hydrophone est placé sous la poupe, à -0.2 m et à 7 m de la quille.

Les enregistrements de SOM ont été effectués à l'aide des enregistreurs *Qualilife JASON V4* développés et produits pour des mesures environnementales avancées par la plate-forme technologique SMIoT (Fig. 5.1).

3.3 TRANSECTS RÉALISÉS

SOM a été lancée le 25 septembre 2019 à St Tropez, à l'occasion des Rencontres Internationales de la Mobilité Durable, avec pour objectifs et réalisations principales décrits dans ce rapport :

- L'écoute et le suivi des populations de cétacés grands plongeurs en Méditerranée occidentale incluant notamment le Sanctuaire Pelagos,
- La réalisation des protocoles ADN environnemental, et chimique,
- La réalisation des mesures de radioactivité.

L'effort d'observation de la mission s'est déroulé de septembre 2019 à mai 2020.

Toutes les sessions d'enregistrement sont consignées dans les graphes ci-dessous, avec leurs dates principales. Les relevés chimiques et ADN sont associés aux relevés acoustiques, analysés dans les chapitres suivants.

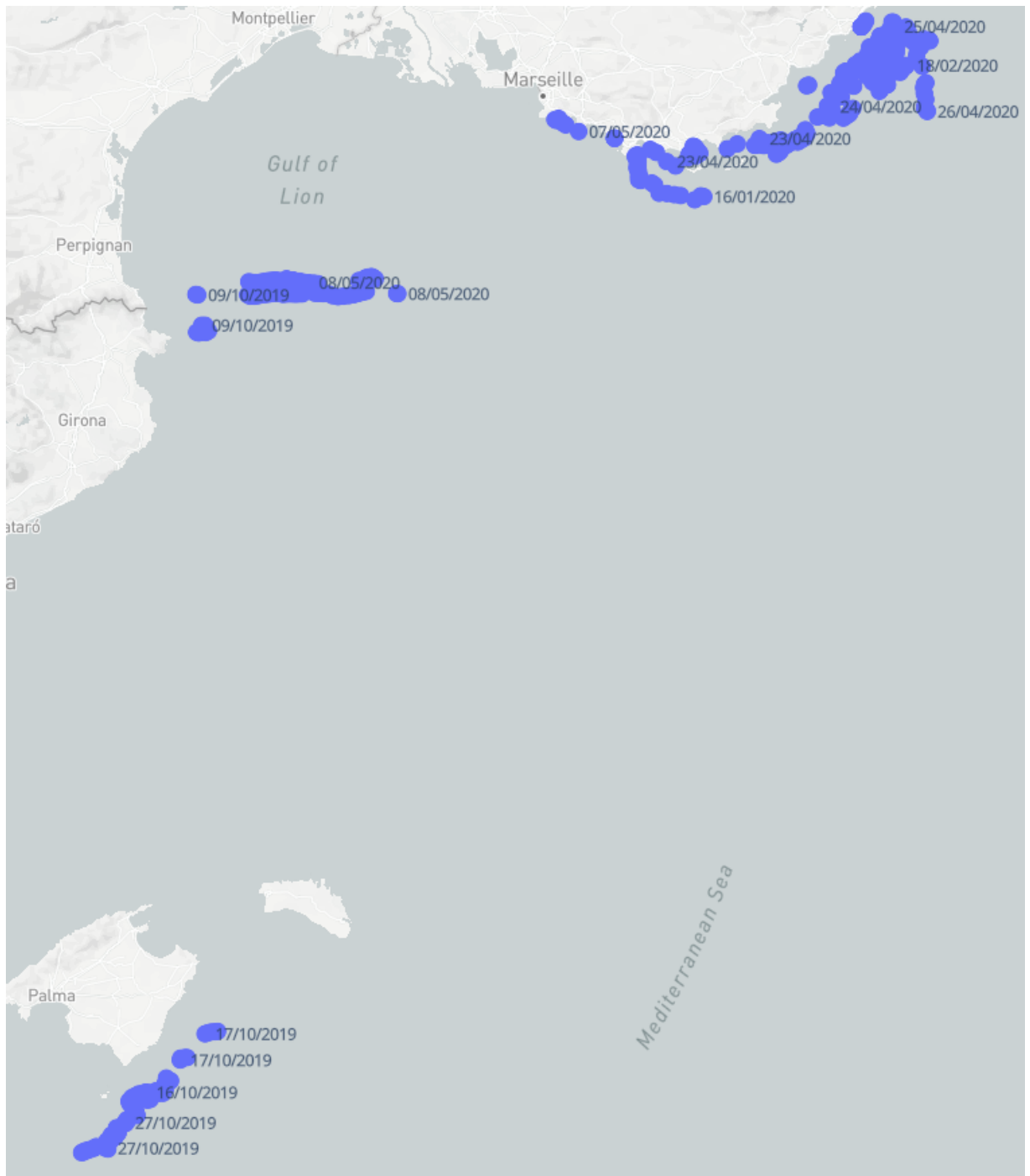


Figure 3.5: Transect total de la mission.

Comme prévu nous avons favorisé les enregistrements sur les falaises et canyons pour et les fronts de courant si possible pour le suivi des teutophages. Nous n'avons pas pu, pour cause de confinement COVID, rejoindre la Corse, qui était prévue en mars 2020. Le transect s'est déroulé ainsi :

- Du 25 septembre au 3 octobre 2019 : canyon de St-Tropez, Ile du Levant, canyon de Toulon,
- Du 3 octobre au 10 octobre : Banyuls-sur-Mer, Cap de Creus à l'extrémité orientale de la péninsule ibérique, dérive et enregistrement dans canyon du secteur,
- Du 11 octobre au 31 octobre : Baléares, Sud-Baléares, Porto Petro, enregistrements en dérive. Tempête force 8, légère avarie à un safran,
- Du 1er novembre au 25 novembre : « arrêt au stand » sur Canet-en-Roussillon,
- Du 25 novembre au 10 décembre : Canet-en-Roussillon, dérive en Golfe du Lion, Toulon,
- Du 10 décembre au 20 décembre : dérive Sud-Toulon,
- Du 20 décembre au 6 janvier : mission en pause (fêtes de Noël),
- Du 8 janvier au 16 février : exploration en dérive au large de Port-Cros, Porquerolles, Ile du Levant,
- Du 16 février au 8 mars : dérive dans les canyons des Stoechades, Saint-Tropez et Cannes, Sud Monaco,
- Du 9 mars au 15 mars : réalisation de la session de travail prévue pour l'équipe de Marine Conservation Research Ltd (MCR), en partenariat avec l'ACCOBAMS au large de Toulon,
- Le 16 mars : fin officielle de la mission 1 à Toulon par décret de confinement COVID19,
- Du 20 mars 18 avril : demande d'autorisation de mission scientifique durant le confinement

COVID19 et recherche de financement pour supplément de mission, obtenus le 20 avril,
- Du 23 avril au 10 mai : reprise de la mission, dérives Sud Monaco et Antibes, Baies de Cannes, Iles d'Or, de Bandol, Calanques de Marseille, traversée et dérive dans le Golfe du Lion, - Le 10 mai : arrivée finale à Canet-en-Roussillon.

3.4 ORGANISATION DU RAPPORT

Nous avons travaillé du 23 avril au 10 mai sur le plateau continental et en baie afin de graver l'écrin de silence des côtes, d'habitude perturbées par les activités humaines. Nous avons également pu parcourir à nouveau des zones hauturières et des falaises, ainsi que le Golfe du Lion, pour comparer plusieurs facteurs avec exactement les mêmes protocoles et instruments, offrant alors des analyses de l'effet du confinement COVID19.

Il en ressort des statistiques très intéressantes sur les effets du confinement en termes chimiques et anthroponiques, présentés en début de ce rapport.

La seconde partie de ce rapport mets en évidence sur plusieurs heures des comportements inédits abyssaux de teutophages : un groupe de Cachalots. Cette partie donne des résultats qui constituent une première mondiale.

4

Mesures Chimiques et Physiques Marines et Effets du Confinement COVID

Les variations de température, d'acidité et d'autres paramètres dans les écosystèmes marins engendrent un changement rapide de leur composition chimique, physique, et biologique. La mission Sphyrna Odyssey a collecté, à l'aide d'une sonde multicapteurs, des données physiques et chimiques durant 3 mois, du 7 février au 9 mai 2020.



Figure 4.1: La sonde avancée de qualité de l'eau, Aquaread AP-7000, équipée de ses capteurs.

La sonde chimique, *Aquaread AP-7000*, a été déployée depuis la surface jusqu'à 44 mètres de profondeur. Les capteurs ont permis de mesurer les variables suivantes : température (°C), profondeur, salinité, pH, oxygène dissous (par mesure optique), électro-conductivité (EC), potentiel d'oxydo-réduction (ORP), chlorophylle, algues bleu-vert (BGA-PE), matière organique dissoute colorée (CDOM), total des solides dissous (TDS), densité spécifique (SSG), huiles raffinées.

Ces caractéristiques physiques, chimiques et biologiques sont importantes à prendre en considération car elles déterminent la distribution des organismes vivants dans les océans. Cette approche permet de comprendre les liens entre les organismes vivants et les paramètres environnementaux.

4.1 TEMPÉRATURE

La température est un paramètre fondamental pour l'évaluation des caractéristiques des masses d'eaux car elle joue un rôle important dans les cycles biologiques ainsi que dans la variabilité de la célérité du son. De janvier à mai, la température présente une tendance générale à l'augmentation globale avec une plus forte hausse dans les couches de surface comparée aux couches profondes. Durant la mission, nous mesurons que, durant les mois de février à mai, la température de l'eau varie entre un minimum de 11,2 °C au Cap d'Antibes et un maximum de 19,8 °C dans la couche de surface des Calanques de Cassis. Une différence de plus de 4 °C a été observée entre 5 m (19,80 °C) et 42 m (15,10 °C) de profondeur dans les Calanques de Cassis en début mai, annonçant le début de la formation de la thermocline. Au printemps la température de surface augmente de plusieurs degrés, créant ainsi une couche de surface plus chaude (sur environ 20 m), moins dense, qui isolera efficacement les couches d'eau profondes jusqu'à l'automne. Cette thermocline saisonnière correspond également à une barrière biologique. Sur les marges continentales et la plaine abyssale, les variations de température et de salinité reflètent davantage les différentes masses d'eau. Ainsi, nos mesures montrent une diminution de la température avec la profondeur et une augmentation de la salinité. Il est à noter que la masse volumique augmente avec la salinité de façon plus importante qu'avec la température.

Les mesures de température en surface sont fournies avec celles mesurées par satellite par notre partenaire ESA (modified Copernicus Sentinel data, processed by ESA, CC BY-SA 3.0 IGO) sur http://sabiiod.org/pub/SPHYRNA/data/S020192020_TempSurf.mp4 et Fig. 4.2.

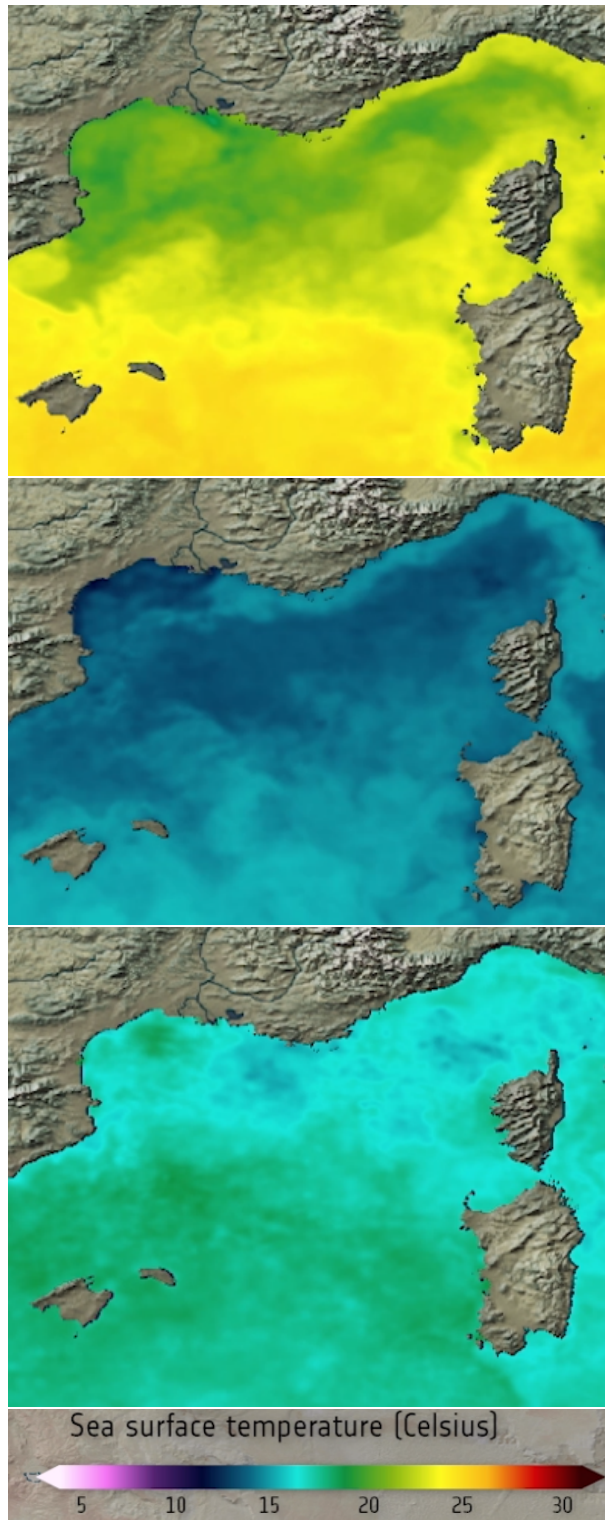


Figure 4.2: Variation de la température surface sur toute la zone de SOM, de bas en haut : 7 oct.2019, 15 janvier 2020 et 7 mai 2020. On voit que le gradient thermique au large de Monaco (cf discussion sur les fronts océanique en dernier chapitre) disparaît au printemps. Les données sur toute la durée, de septembre 2019 à mai 2020, au jour le jour, sont disponibles sur: http://sabiiod.org/pub/SPHYRNA/data/SO20192020_TempSurf.mp4. Crédit: modified Copernicus Sentinel data, processed by ESA, CC BY-SA 3.0 IGO.

4.1.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE

Nos mesures montrent que la température de l'eau varie en fonction de la bathymétrie, avec par ordre décroissant : falaises/canyons, haut fond/côtier, baies de février à mars et falaises/canyons, haut fond/côtier et plaine abyssale d'avril à mai. Nous observons que les températures au niveau des baies sont en moyenne 1,5°C inférieures par rapport aux falaises/canyons, et les plaines abyssales sont 0,5°C inférieures par rapport aux falaises/canyons. Les valeurs de température augmentent à partir du mois de mai, liées à la saisonnalité.

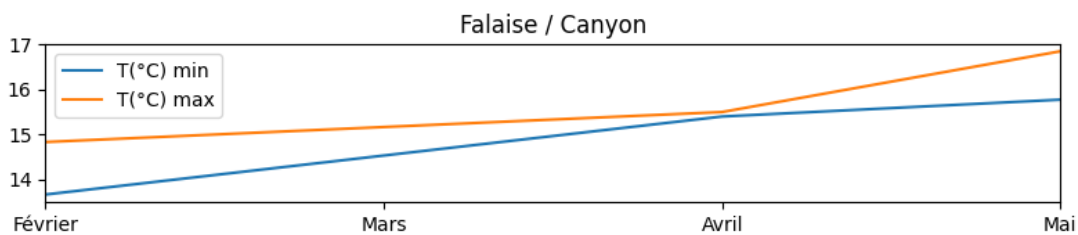


Figure 4.3: Variation de la température dans les falaises/canyons de février à mai

4.2 SALINITÉ

La salinité a varié de 33,4 à 37,3 psu durant les mois de février à mai avec un maximum dans la Rade d'Hyères et au Cap Ferrat (37,2 psu à environ -5 m de profondeur), et un minimum au Cap d'Antibes et au Port de la Seyne/Mer (34,2 psu à environ -5 m).

4.2.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET DISTANCE À LA CÔTE

Le taux de salinité varie en fonction des types de fonds sous-marins, par ordre décroissant : haut fond/côtier, falaises/canyon et baies. Ces mêmes tendances décroissantes ont été obtenues en période de pré-confinement et plus tard, de confinement, pour les hauts fonds

et les falaises. La salinité a diminué pendant le confinement, avec un maximum et minimum de 36,7 et 35,4 psu en période de pré-confinement, et un maximum et minimum de 35,4 et 34,5 psu durant le confinement. Cette diminution est liée à la saisonnalité et à la température de l'eau. Par ailleurs, plus la distance à la côte est grande, plus le taux de salinité diminue. À plus de 25 km du port en période de pré-confinement, un taux maximum de 35,4 contre 36,6 psu à 5 km de la côte a été obtenu. Pendant le confinement en avril-mai, nous avons un maximum de 35,5 psu à 5 km contre 35,2 psu à plus de 25 km.

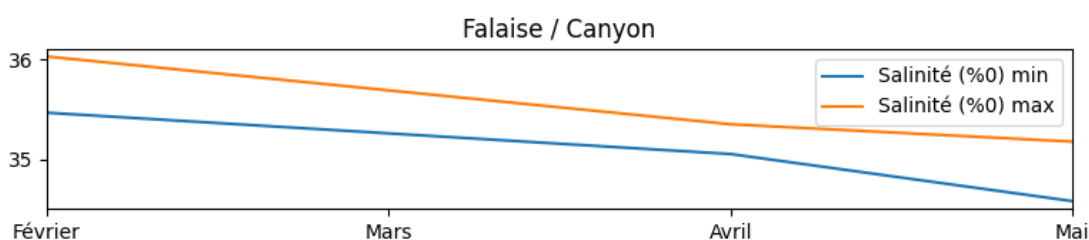


Figure 4.4: Variation de la salinité dans les falaises/canyons de février à mai

4.3 pH

Le pH le plus élevé (8,3) a été mesuré dans la Baie de la Salis et dans le Canyon du Var, et les valeurs les plus basses (6,1) dans le Golfe du Lion. Le pH de l'eau varie en fonction de plusieurs facteurs : solubilisation des gaz, température, salinité, pression (acidité accrue avec la pression), pluie.

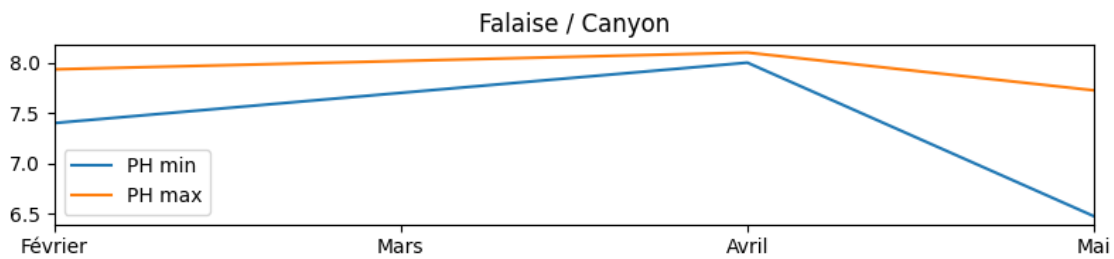


Figure 4.5: Variation du pH dans les falaises/canyons de février à mai

4.3.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET DISTANCE AUX PORTS

Le pH varie en fonction de la bathymétrie, de la profondeur et en fonction de la saison (donc pré-confinement versus confinement). Nous avons un pH maximum de 7,9 au niveau des falaises en période de pré-confinement et un pH maximum de 8,2 au niveau des hauts fonds lors du confinement. Le pH augmente à partir des mois d'avril et de mai, principalement suivant la saisonnalité (le pH augmentant avec l'évaporation), avec un maximum de 8,2 au niveau des hauts fonds. Les valeurs de pH varient en fonction de la distance au port et s'inversent en fonction des périodes de pré-confinement et de confinement. Ainsi pendant la période de pré-confinement, plus la distance à la côte est grande (> 25 km) plus le pH augmente (jusqu'à 7,5). A l'inverse, en période de confinement le pH sera de 6,2. Ces variations de pH pourraient également être dues à une chute du CO₂ atmosphérique.

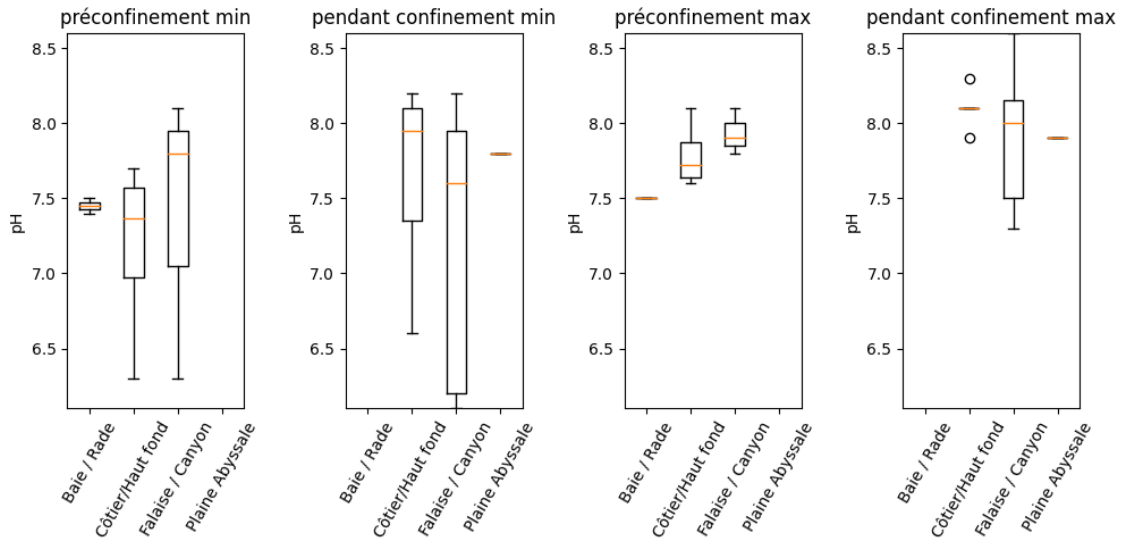


Figure 4.6: Variations du pH de l'eau en fonction de la bathymétrie pendant les périodes de préconfinement et de confinement.

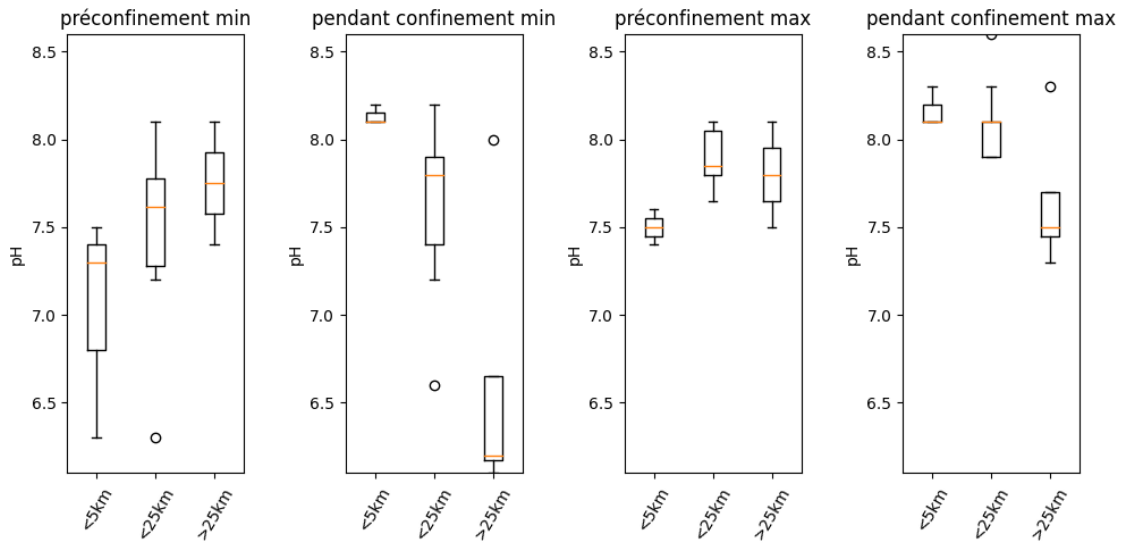


Figure 4.7: Variations du pH de l'eau en fonction de la distance au port pendant les périodes de préconfinement et de confinement.

4.4 OXYGÈNE DISSOUS

L'oxygène dissous a fluctué entre un minimum de 99,5 %Sat à la surface dans le Golfe de Juan et un maximum de 18,5 %Sat, en surface au Cap d'Antibes. Les couches de surface de la Mer Méditerranée ont un pourcentage d'oxygène dissous supérieur à celui relevé en profondeur. Par exemple, 118,5 % d'oxygène dissous en surface contre 100,5 % à 30m de profondeur, mesurés au Cap d'Antibes.

4.4.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET DISTANCE AUX PORTS

Le pourcentage d'oxygène dissous varie en fonction des types de fonds sous-marins. Un taux maximum d'oxygène dissous se trouve dans les plaines abyssales (113 %Sat) en mars. Les valeurs d'oxygène dissous restent relativement stables de février à mai, avec un maximum et minimum de 113 et 104 %Sat en février, et un maximum et minimum de 112 et 111 %Sat en mai. Le pourcentage d'oxygène dissous augmente avec l'éloignement à la côte, soit 110 %Sat à 5 km et 113 %Sat à 25 km.

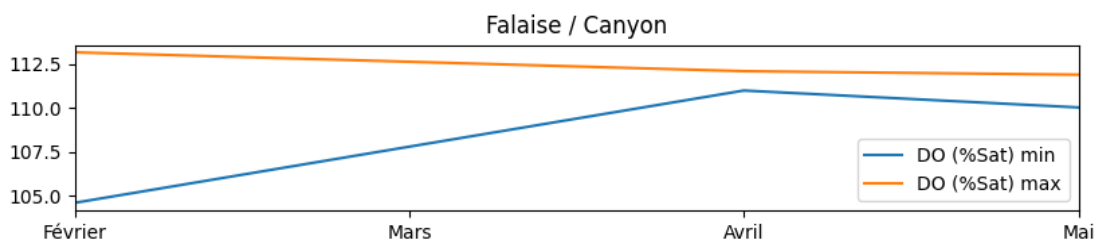


Figure 4.8: Variation d'O2 dans les falaises/canyons de février à mai.

4.5 CHLOROPHYLLE

La chlorophylle est le pigment indispensable à la photosynthèse des algues. Son dosage sert à estimer la biomasse phytoplanctonique du milieu marin où ses teneurs varient de 0 à quelques dizaines de $\mu\text{g/L}$. Les concentrations en chlorophylle dans les eaux superficielles présentent une variabilité saisonnière : le développement phytoplanctonique est, en effet, tributaire de l'énergie lumineuse, de la concentration en sels nutritifs, de la stabilité des masses d'eaux et de l'intensité de la consommation par le zooplancton. Le taux de chlorophylle le plus élevé a été mesuré dans le canyon du Var, tandis que le taux le plus bas a été observé au Cap Ferrat. Le bloom planctonique, processus de concentration rapide des cellules phyto-planctoniques dans une masse d'eau, a pu être mesuré à partir du 7 février au niveau du canyon du Var, le 17 février à Antibes et le 20 février à Villefranche/Mer. Ce phénomène est provoqué par de forts apports en nutriments. Les courants côtiers froids qui longent les continents font remonter à la surface (upwelling) des eaux chargées de nutriments entraînant ainsi le développement d'une biomasse marine importante. Ce phénomène se produisant de manière saisonnière, nous avons eu la conjonction de conditions favorables nécessaires : eau riche en nutriments, bien oxygénée (avec 118,5 %) et suffisamment de lumière pour que la photosynthèse se produise. Il est à noter que, suite au dysfonctionnement du capteur à chlorophylle de la sonde chimique, une partie seulement des valeurs du mois de février ont été obtenues dont une mesure au niveau des falaises/canyons, trois mesures au niveau côtiers/hauts fonds et une mesure dans les baies/rades.

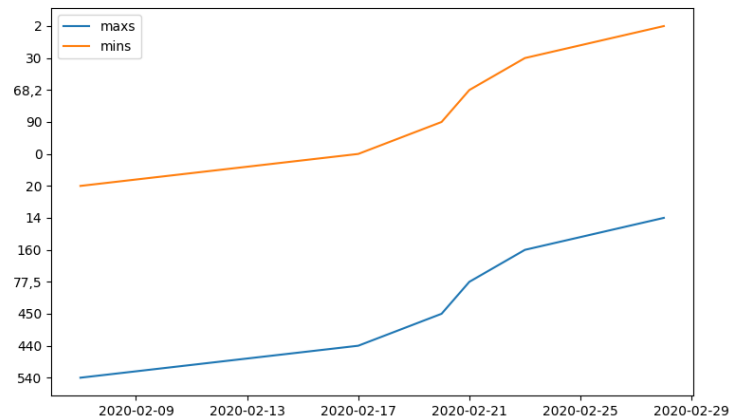


Figure 4.9: Variations du taux de chlorophylle en fonction du temps.

4.5.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET DISTANCE AUX PORTS

La production phytoplanctonique a commencé tôt (début février) au niveau du canyon du Var et dans les eaux peu profondes (côtier/haut fond). La chlorophylle varie en fonction de la bathymétrie : elle atteint son maximum (445 µg/L) au niveau des falaises/canyons et son minimum (15 µg/L) dans les baies/rades. L'état trophique de la mer Méditerranée (particulièrement pauvre en éléments nutritifs) est conditionné par la zone côtière très peuplée et par l'apport fluvial d'une zone de drainage. Les eaux situées au large des côtes méditerranéennes ont été caractérisées comme étant extrêmement oligotrophes avec une tendance croissante en allant vers l'est. Le gradient croissant d'oligotrophie serait dû à une carence en phosphore par rapport à l'azote augmentant vers l'est⁷³. Ainsi, les principales zones océaniques de bloom phytoplanctonique sont dans les zones d'upwelling au niveau des falaises suivi des zones côtières. La remontée des eaux froides est une source d'apport de nutriments.

4.5.2 VARIATION DE LA CHLOROPHYLLE DANS LES BAIES/RADES ET FALAISES/-CANYONS

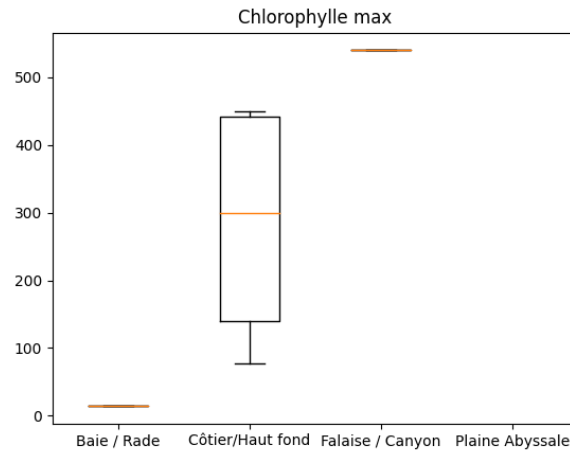


Figure 4.10: Variations du taux de chlorophylle en fonction de la bathymétrie.

Par ailleurs, les images satellites obtenues par l'ESA (Agence Spatiale Européenne) montrent l'évolution de la concentration de chlorophylle A au fil des semaines, de septembre 2019 à mai 2020, disponible sur le site Sphyrna http://sabiiod.org/pub/SPHYRNA/data/S020192020_ChloroA.mp4. Elles montrent un mini bloom côtier vers décembre, et un grand début avril au sud de Monaco. Il est intéressant de noter l'absence de cachalots fin avril sur le Sud Monaco, peut-être en lien avec cette fin du bloom planctonique.

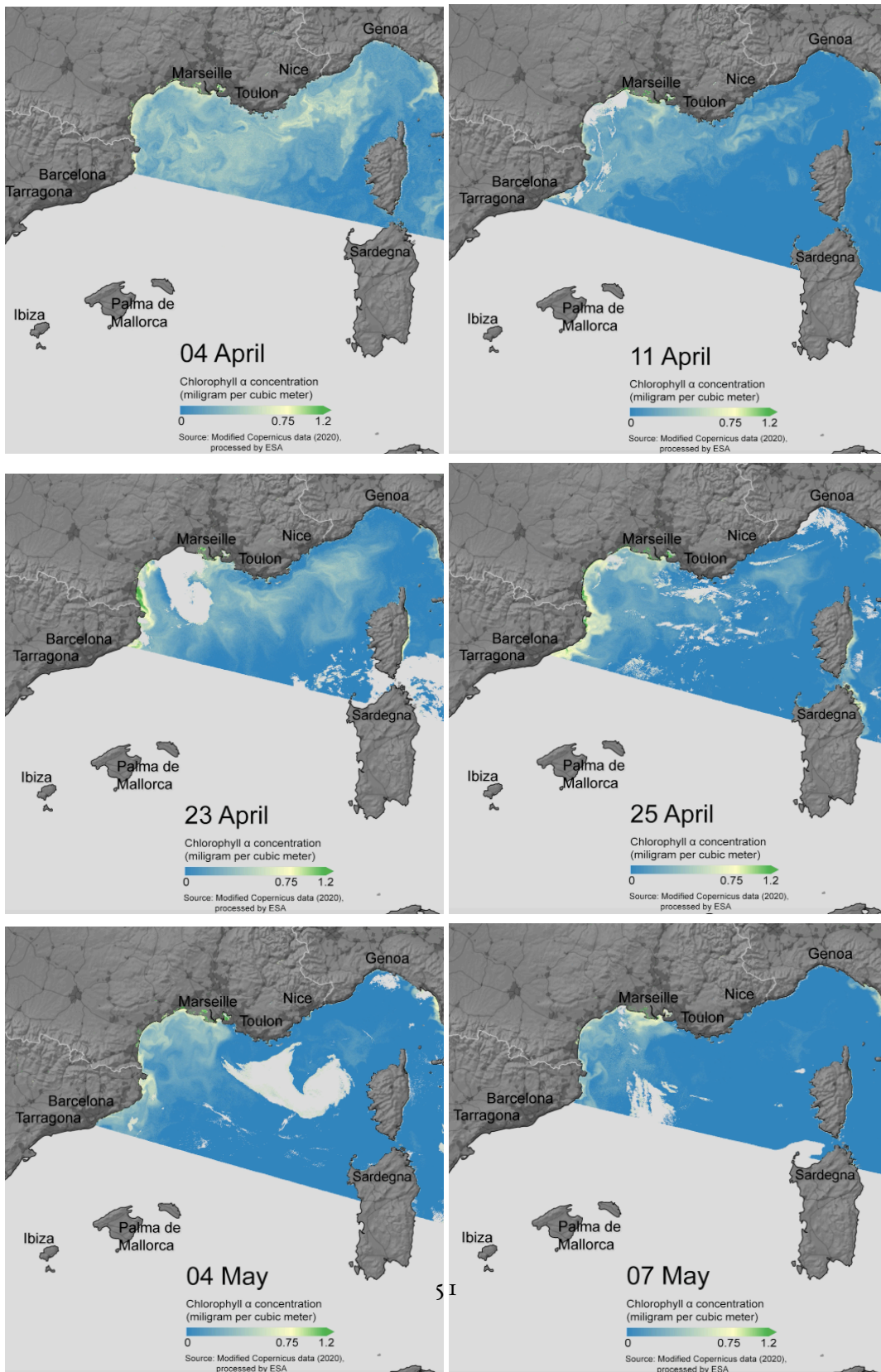


Figure 4.11: Concentration de chlorophylle A (mg/m^3) les 4, 11, 23, 25 Avril et 4 et 7 mai, montrant le bloom planctonique début avril, et sa disparition fin avril au Sud de Monaco. Un film complet de cette mesure de chlorophylle sur toute la mission SOM est disponible sur http://sabiod.org/pub/SPHYRNA/data/S020192020_ChloroA.mp4. Crédit photo ESA, partenaire SOM: modified Copernicus Sentinel data, processed by ESA, CC BY-SA 3.0 IGO.

4.6 MATIÈRE ORGANIQUE DISSOUE

La mesure de la matière organique dissoute colorée (CDOM) est utile pour déterminer l'atténuation de la lumière, celle-ci étant couramment utilisée pour déterminer les objectifs de restauration des zones côtières. Une augmentation du CDOM peut être due à un débit élevé de matière organique d'origine terrestre apportée par les rivières. Parmi nos mesures, nous observons un taux minimal de CDOM au Canyon Bourcart et un taux maximal de CDOM au large du Canyon de Sète avec des valeurs de 1,25 µg/L et 550 µg/L respectivement. Il est probable que l'activité humaine impacte fortement les zones du Canyon de Sète, à la vue du taux élevé de CDOM.

4.6.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET DISTANCE AUX PORTS

Un dysfonctionnement au niveau du capteur de la sonde à CDOM n'a pas permis d'obtenir des longues séries de données pour le taux de CDOM en fonction de la bathymétrie. Néanmoins, nous observons que le taux de CDOM varie avec la distance au port : ainsi le taux de CDOM est de 180 µg/L à une distance >25 km versus 320 µg/L à 5 km du port durant le pré-confinement. Les valeurs de CDOM sont plus élevées durant la période de confinement par rapport au pré-confinement avec un taux maximum au niveau du Canyon du Sète (550 µg/L), de la Rade de Hyères (460 µg/L) et le Sud du Canyon du Var (320 µg/L).

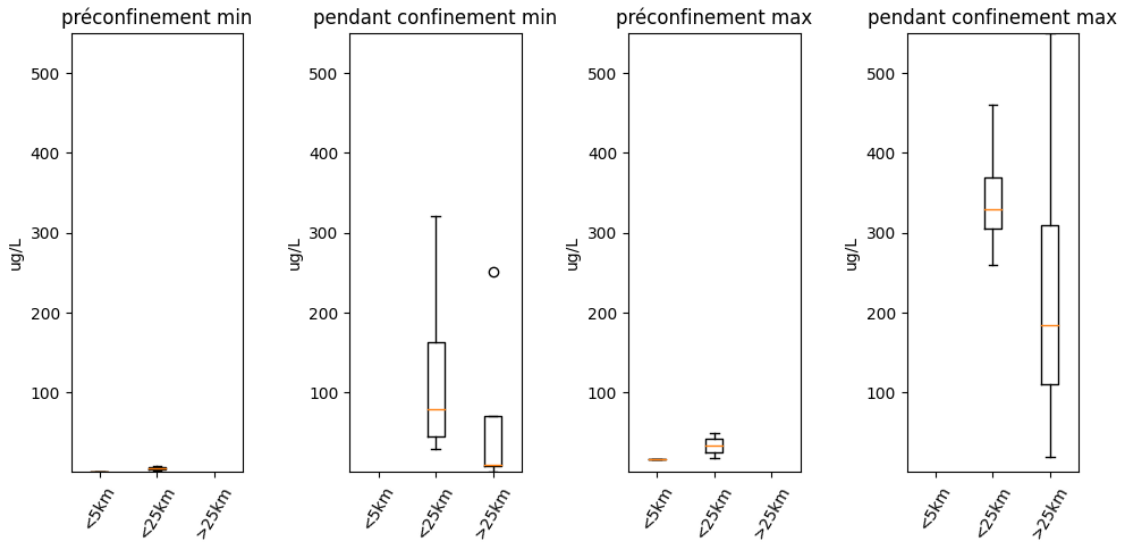


Figure 4.12: Variations du taux de CDOM dans l'eau de mer en fonction de la distance au port pendant les périodes de pré-confinement et de confinement.

4.7 ÉLECTRO-CONDUCTIVITÉ

Plus la matière dissoute dans un échantillon d'eau est élevée, plus l'électro-conductivité (EC) y est élevée. La mesure EC est utilisée pour indiquer la pureté d'un échantillon d'eau. Une modification importante de la conductivité pourrait être un indicateur d'un polluant entrant dans l'eau. Les mesures prises dans le Golfe Juan nous donnent une valeur minimale de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et maximale de 56000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour cette région.

4.7.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET DISTANCE AUX PORTS

Au niveau falaise/canyon les données suivent une distribution asymétrique. Pendant le confinement, la distribution des valeurs de l'électro-conductivité minimale est désaxée vers la gauche ; la moyenne des mesures EC est donc inférieure à la médiane. De plus, la médi-

ane des valeurs EC pré-confinement est plus élevée que pendant le confinement. Les valeurs EC ont tendance à augmenter en baie/rade par rapport à falaise/canyon. L'écart-type est plus faible pendant le confinement. Les valeurs minimales EC pré-confinement sont relativement plus élevées que les valeurs minimales EC pendant le confinement. De plus, les valeurs minimales EC pré-confinement varient plus par rapport aux valeurs minimales pendant le confinement. Dans le cas d'une distance au port < 5 km, la distribution est désaxée vers la droite, ce qui implique que la moyenne des valeurs est au dessous de la médiane, tandis que pour les distances au port < 25 km et > 25 km les distributions sont symétriques. La même distribution est retrouvée pour chacune des 3 distances au port pendant le pré-confinement et confinement. Les valeurs maximales d'EC diminuent fortement entre le pré-confinement et le confinement quelles que soient les distances à la côte. L'écart-type est plus faible pendant le confinement. Ainsi, le confinement COVID19 semble expliquer une baisse de la conductivité en avril-mai, l'eau semble donc purifiée sous l'effet du confinement.

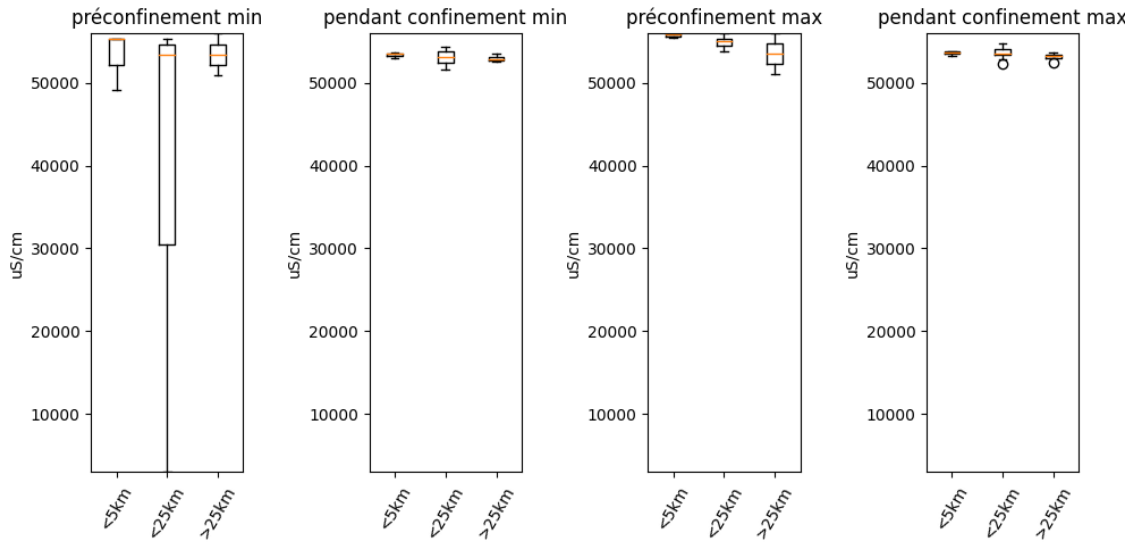


Figure 4.13: Variations du taux de conductivité électrique (EC) dans l'eau en fonction de la distance au port pendant les périodes de pré confinement et de confinement.

4.8 POTENTIEL D'OXYDORÉDUCTION

La mesure du potentiel d'oxydoréduction (ORP) indique la disponibilité d'électrons dans un système. Des taux élevés d'ORP sont corrélés à des taux élevés d'oxygène dans le milieu ce qui permet aux bactéries de décomposer les molécules dites "polluantes" et les matières organiques. La mesure d'ORP s'ajoute à celle de l'oxygène dissous pour indiquer le niveau de pollution dans le milieu. Le niveau d'ORP a tendance à diminuer en fonction de la profondeur et nous avons pu l'observer dans les échantillons prélevés à Antibes, dans le Golfe Juan, au sud du Canyon du Var et Villefranche. La valeur minimale d'ORP est de -24 mV à Antibes, tandis que la valeur maximale est de 380 mV dans la région des Calanques de Cassis.

4.8.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET DISTANCE AUX PORTS

Durant le pré-confinement, la distribution des valeurs minimales d'ORP est désaxée vers la gauche ce qui implique que la moyenne des valeurs est en dessous de la médiane. Les valeurs minimales sont asymétriques pendant le confinement. Pour la bathymétrie falaise/canyon, avant le confinement, les valeurs d'ORP minimales se situent entre 0-80 mV et passent à 50-140 mV pendant le confinement. Les valeurs maximales d'ORP pour la bathymétrie falaise/canyon se situent entre 20-80 mV hors confinement puis entre 60-210 mV pendant le confinement. Les valeurs d'ORP ont tendance à augmenter pendant le confinement pour la bathymétrie falaise/canyon. Ce taux élevé est corrélé à un taux élevé d'oxygène présent dans le milieu. La pollution des zones océaniques par les nutriments engendre une croissance excessive des algues, provoquant une perte d'oxygène.

Nous constatons que le confinement a engendré une diminution de la pollution des zones côtières par les nutriments, sans doute liée à la diminution des activités humaines. Ceci expliquerait les valeurs d'ORP relativement élevées pendant le confinement en comparaison à la période pré-confinement.

Une baisse du taux de pollution pendant le confinement empêche un épuisement de l'oxygène, le rendant également disponible à de plus grandes profondeurs. Les valeurs minimales et maximales d'ORP varient peu avec la bathymétrie baie/rade par rapport à la bathymétrie falaise/canyon pendant la période du pré-confinement. Les valeurs médianes d'ORP pour la bathymétrie falaise/canyon sont plus élevées pendant le confinement par rapport à la période du pré-confinement. La médiane minimale d'ORP augmente

considérablement pendant le confinement par rapport à la période de pré-confinement pour les distances au port <25km et >25km. De même, la médiane est plus élevée pendant le confinement par rapport à la période de pré-confinement pour ces mêmes distances au port : <25km et >25km. Pendant le confinement, les valeurs d'ORP ont tendance à augmenter à des distances >25 km.

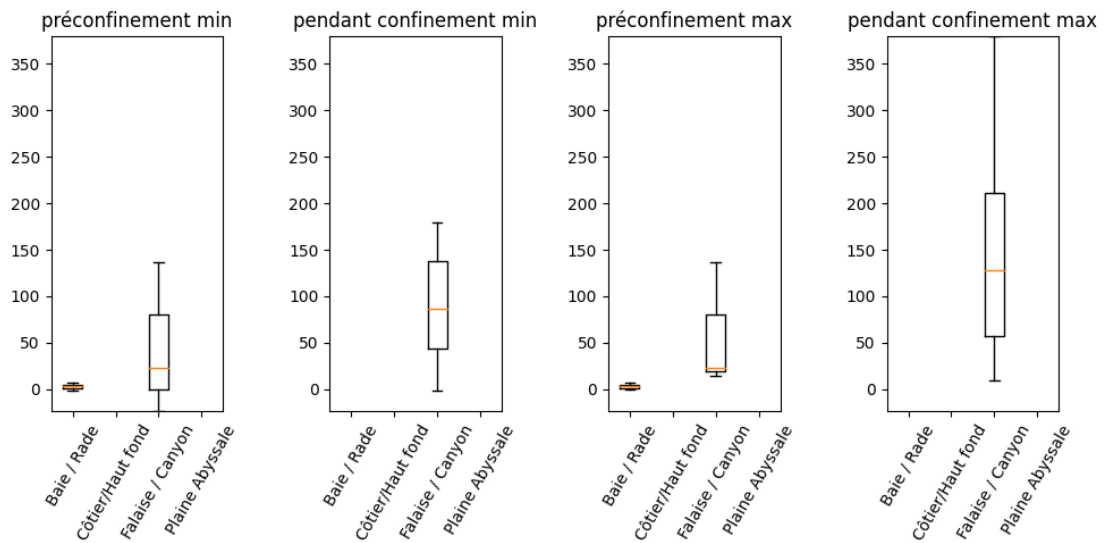


Figure 4.14: Variations du taux de potentiel d'oxydoréduction (ORP) dans l'eau en fonction de la bathymétrie pendant les périodes de pré-confinement et de confinement

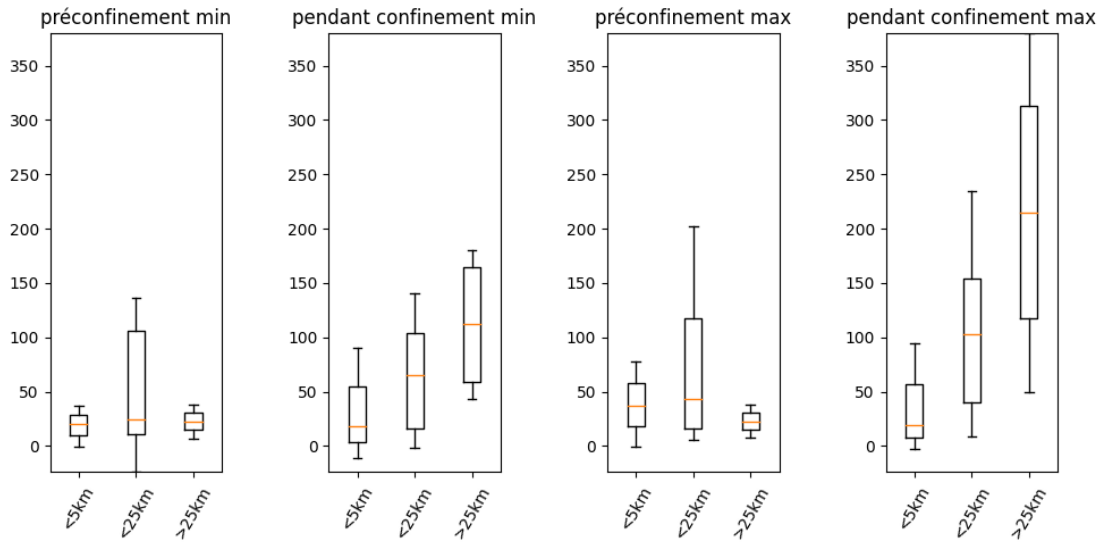


Figure 4.15: Variations du taux de potentiel d'oxydoréduction (ORP) dans l'eau en fonction de la distance au port pendant les périodes de pré-confinement et de confinement

4.9 ALGUES BLEU-VERT

La surveillance des algues bleu-vert est de plus en plus importante car certaines espèces peuvent engendrer des problèmes majeurs dans l'écosystème marin. En effet, une prolifération accrue engendre la production de toxines créant, de fait, des blooms. La combinaison de certains facteurs comme l'augmentation des nutriments et l'augmentation des températures peuvent contribuer au développement de ces blooms. Le taux de BGA-PE max était le plus élevé dans le Golfe Juan avec une valeur de 290 kC/mL. Il était le moins élevé dans plusieurs régions dont Antibes, le sud du Canyon du Var et les Calanques de Cassis, où sa valeur plafonnait à 10 kC/mL.

4.9.1 VARIATION AVEC LA BATHYMÉTRIE ET LA DISTANCE AUX PORTS

Les valeurs minimales de BGA-PE diminuent à une distance au port < 25 km pendant le confinement par rapport au pré-confinement. Durant la période du confinement, les valeurs maximales de BGA-PE sont plus variables pour une distance < 25 km.

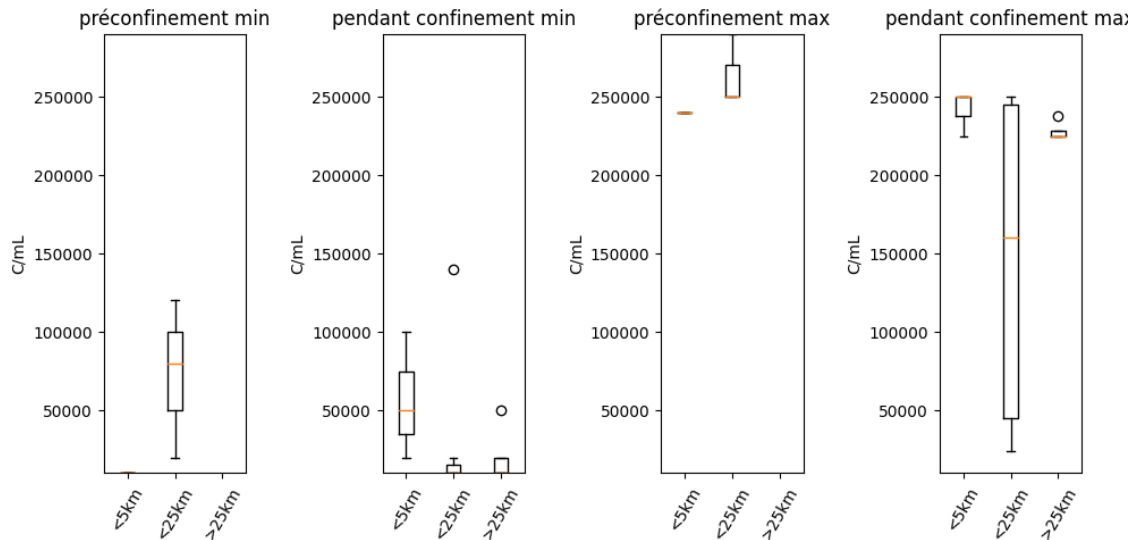


Figure 4.16: Variations du taux d'algues bleu-vert dans l'eau en fonction de la distance au port pendant les périodes de pré-confinement et de confinement.

4.10 DENSITÉ SPÉCIFIQUE

Les mesures de SSG (seawater specific gravity (ct)) sont relativement similaires à travers les zones entre 23 et 27 ct, à part pour Villefranche où la valeur minimale est de moitié avec 12 ct. Les valeurs de SSG s'élèvent à environ 27 ct pour le Golfe Juan, le sud du Canyon du Var, et la Baie de Cannes.

4.10.1 VARIATION AVEC LA BATHYMÉTRIE ET LA DISTANCE AUX PORTS

Les variations de SSG pour la zone bathymétrique baie/rade sont moins importantes que celles du côtier/haut fond. La SSG varie en fonction des température et des concentrations en sels dissous. Au niveau des zones côtières, les concentrations en sels dissous sont plus variables qu'en haut mer. Par conséquent, ces concentrations en sels impactent la SSG des zones côtières, tandis que la température impacte principalement la SSG en haute mer car les changements de concentration en sels dissous y sont relativement faibles. D'après Connolly et al.¹², quand des flux terrestres d'eau relativement saline passent à travers les canyons, ceci peut augmenter la salinité au début de la saison de la remontée des eaux (upwelling). Cette saison commence vers le printemps et pourrait expliquer pourquoi, durant le confinement, nous avons observé des valeurs relativement élevées et homogènes (entre 25-30 ct) au niveau de la bathymétrie falaise/canyon ; Le confinement ayant effectivement débuté au printemps.

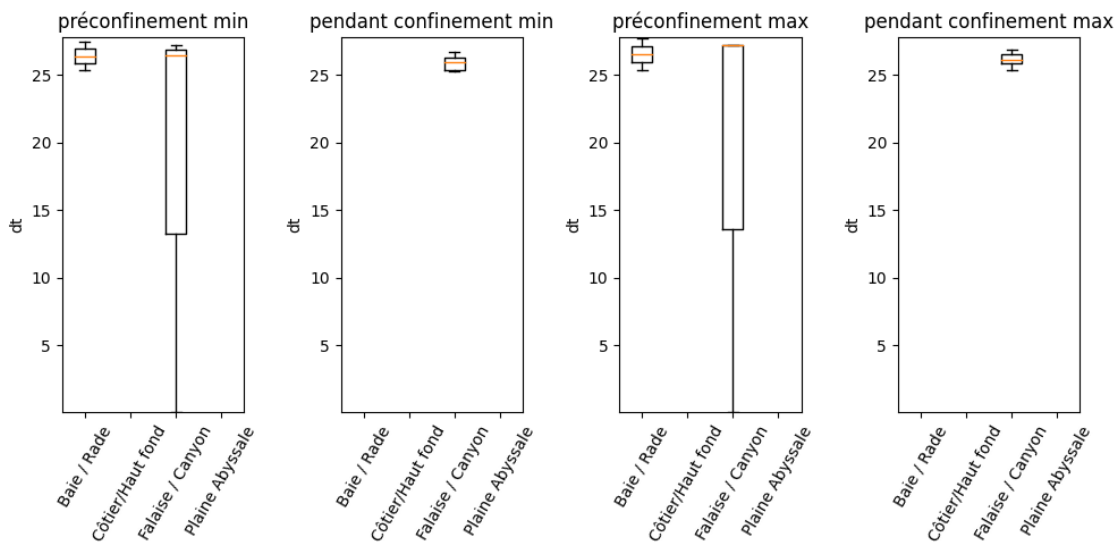


Figure 4.17: Variations du taux de densité spécifique (SSG) dans l'eau en fonction de la bathymétrie pendant les périodes de pré-confinement et de confinement.

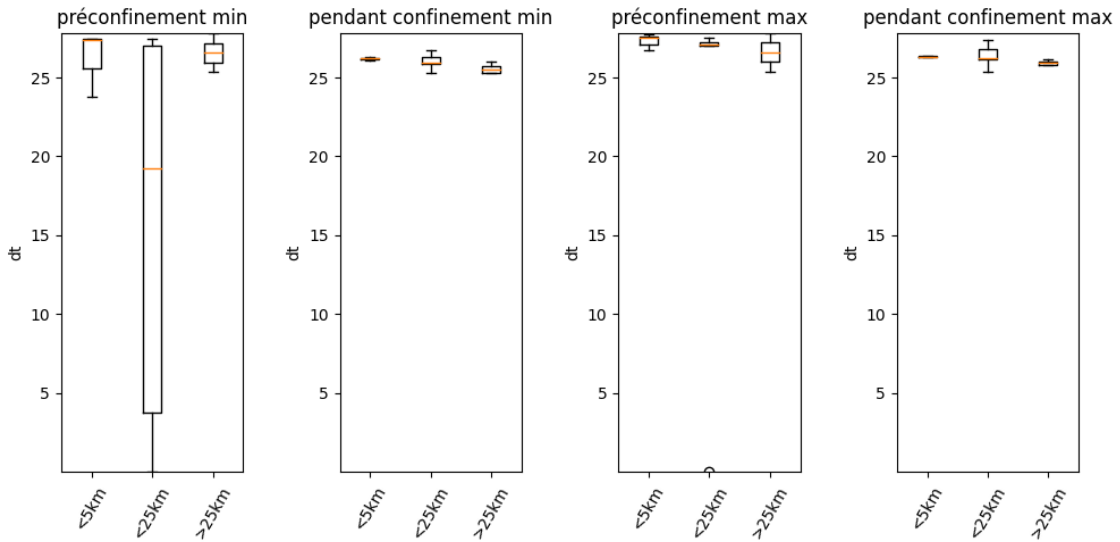


Figure 4.18: Variations du taux de densité spécifique (SSG) dans l'eau en fonction de la distance au port pendant les périodes de pré-confinement et de confinement.

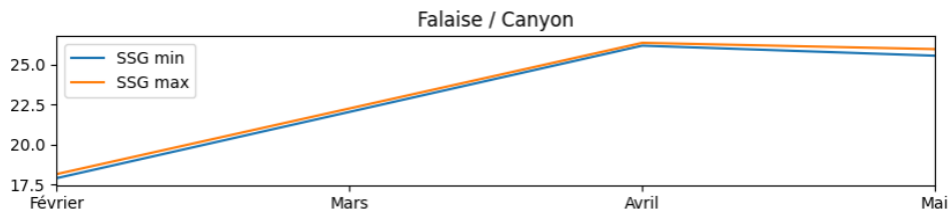


Figure 4.19: Variation de la SSG dans les falaises/canyons de février à mai

4.1.1 HYDROCARBURES

Le taux d'hydrocarbures dans l'eau est un indicateur de sa qualité. Il existe des sources naturelles d'hydrocarbures : ces derniers sont issus de la conversion de molécules organiques par des processus biogéochimiques. Cependant, il existe des sources anthropiques d'hydrocarbures tels que les HAPs (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Le ruissellement urbain contribue aussi à la pollution des zones côtières car il transporte des

hydrocarbures non-naturels. Nous retrouvons des valeurs maximales d'hydrocarbures dans le Canyon du Var et le Golfe Juan avec des valeurs de 1600 µg/L et 1875 µg/L. Tandis qu'une valeur minimale de 15 µg/L a été mesurée à la Napoule et à la Rade de Hyères qui sont connus étant moins industrialisés.

D'après nos résultats, il y a donc une diminution globale du taux d'hydrocarbures entre la période pré-confinement et pendant le confinement. Le taux d'hydrocarbures est presque divisé par deux, passant de 182,35 µg/L à 102,3 µg/L, soit une réduction de 44%.

4.11.1 VARIATIONS AVEC LA BATHYMÉTRIE ET LA DISTANCE AUX PORTS

Le taux d'hydrocarbures varie en fonction de sa distance au port, il est plus élevé au niveau des côtes avec un pic de 1875 µg/L.

4.12 MESURES DE RADIO-ÉLÉMENTS

Une originalité durant la mission a été le relevé, sur transects de Monaco à Toulon, de radio-éléments dans le milieu marin. Les prélèvements sont actuellement en traitement chez notre partenaire LemerPax.

4.13 CONCLUSION

D'après nos mesures l'effet chimique majeur dû au confinement est une réduction de près de 50 % des hydrocarbures solubles en seulement 6 semaines d'arrêt de l'activité industrielle et du trafic de passagers. Les autres variables montrent également des tendances à un environnement marin plus sain, notamment l'eau était moins polluée cf. conductivité,

matière organique, durant le confinement.

Les variations de température et de salinité, le taux de matière organique dissoute colorée, d'oxygène dissous, et d'algues bleu-vert ainsi que la chlorophylle et la densité sont des paramètres qui varient en fonction des saisons. Cependant, il est probable que les taux élevés du potentiel d'oxydoréduction soient dus à une baisse de l'activité humaine durant cette période de confinement.

Il est intéressant de remarquer qu'une augmentation du potentiel d'oxydoréduction et une baisse d'hydrocarbures, expliqueraient la baisse de la conductivité en avril et mai pendant la période du confinement. De plus, le pH près des côtes pourrait avoir été impacté par la qualité de l'air améliorée durant le confinement. Des analyses plus poussées pourront prendre en compte les précipitations.

5

Mesures Acoustiques et Effets du Confinement COVID

5.1 INSTRUMENTATION ACOUSTIQUE

Les données ont été acquises grâce à 5 hydrophones montés sur l'ASV "Sphyrna". Quatre d'entre eux ont été montés sous la quille, à une profondeur de deux mètres sous surface, et un espacement inter-hydrophone de 35 à 70 cm. Le dernier hydrophone a été placé sous la poupe, à une profondeur de 0,2m et à une distance de 7m de la quille environ (cela dépend du drone).

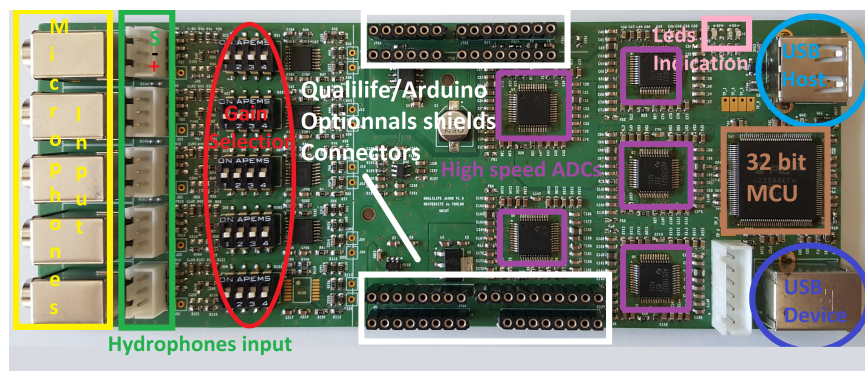


Figure 5.1: Carte d'acquisition Qualilife JASON V4.

Les enregistrements acoustiques de la mission SPHYRNA ont été effectués à l'aide des enregistreurs *Qualilife JASON V4* développés et produits pour des mesures environnementales avancées, par la plateforme technologique SMIO T de l'Université de Toulon en concertation avec les UMR CNRS IM₂NP et LIS (Fig. 5.1). Dans le protocole de cette mission, la résolution de ces enregistreurs est de 16bits par canal à une fréquence d'échantillonnage de 384kHz sur chacun des 5 canaux. Le niveau de bruit de ces enregistreurs est faible, de l'ordre de -105dB , malgré leur fréquence d'acquisition élevée. L'aliasing est parfaitement éliminé des mesures comme indiqué à la figure 5.2, qui représente le spectre mesuré d'un signal sinusoïdal de fréquence croissante au cours du temps, de 0.1Hz à 500kHz .

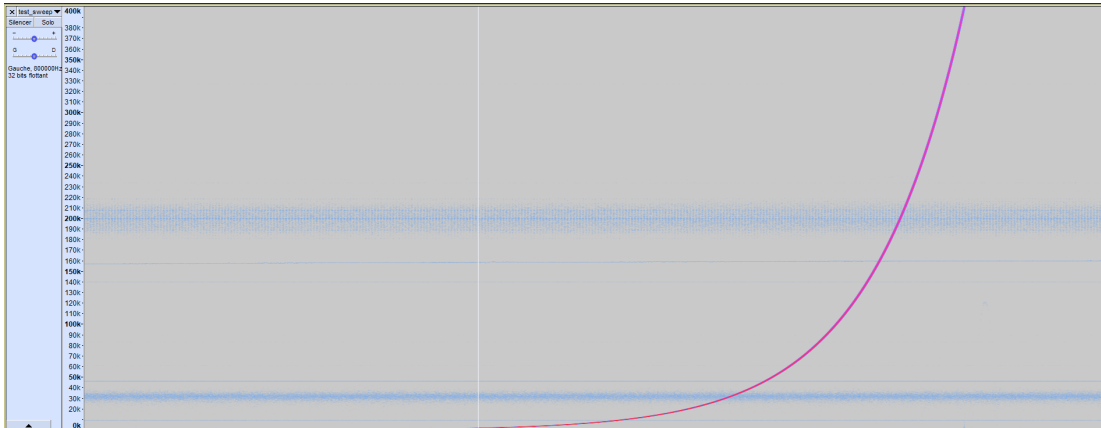


Figure 5.2: Niveau de bruit intrinsèque de la carte d'acquisition Qualilife JASON. L'entrée correspond à un balayage en fréquence de 0.1 à 500kHz.

Ces enregistreurs permettent une synchronisation des mesures effectuées à l'échantillon près, soit une résolution temporelle $T_{ech} \simeq 2,5\mu s$ correspondant à une distance de propagation du son dans l'eau de $\simeq 2,5mm$. L'erreur de mesure due à un éventuel jitter électronique temporel est donc extrêmement faible, ce qui est un facteur essentiel pour obtenir des résultats précis et fiables pour la reconstruction ultérieure de trajectoires. De plus, ces enregistreurs disposent d'une entrée de synchronisation externe, sur laquelle vient se brancher la pin PPS (Pulse Per Second) d'un récepteur GPS. Ce signal, d'une précision de l'ordre de $50ns$ et donc inférieur à la résolution temporelle des enregistreurs, permet une synchronisation extrêmement précise de plusieurs enregistreurs fonctionnant en simultanément et placés en différents lieux.

Cette synchronisation ouvre des perspectives importantes pour la construction d'antennes acoustiques de grande taille permettant un suivi d'individus ou de groupes sur de très longues distances (plusieurs dizaines de kilomètres si les lieux parcourus sont équipés). Cette instru-

mentation scientifique originale et très performante a été validée au cours de SOM.

En outre, ces enregistreurs JASON sont les premiers à ouvrir la voie des *wake-up always-on ultra-low power*^{26,24,25}, permettant une analyse en temps réel et en permanence du signal reçu, moyennant une consommation énergétique extrêmement faible de l'ordre de quelques μA . Même s'ils n'ont pas été utilisés dans cette mission, les données enregistrées permettront de caler les modèles de détection *always on* pour les prochaines missions.

L'intérêt de ces dispositifs est de permettre en permanence une écoute de l'environnement, couplée à une analyse sommaire permettant de réveiller le système de capture et de post-processing dès qu'un signal pouvant être utile est détecté. Cette notion d'utilité repose sur les algorithmes d'intelligence artificielle *ultra-low power* implantés dans le système embarqué.

Pour faire évoluer ces algorithmes nécessitant du hardware dédié et ne pouvant donc pas ou peu être modifiés à la volée au cours d'une mission, il est fondamental de disposer de data acquises par le système de mesure utilisé de manière à définir les profils à détecter et à leur associer des primitives analogiques ou mixtes analogiques numériques fonctionnant en *ultra-low power*.

SOM est donc un pas important pour l'avenir de ces *wake-up always-on ultra-low power* qui permettront des écoutes sélectives durant des durées très longues de plusieurs mois.

5.2 MESURES DU NIVEAU DB RMS PAR TIER D'OCTAVE

Les amplitudes acoustiques ont été mesurées lors des périodes d'écoute (moteurs éteints). Nous avons calculé les niveaux dB RMS suivant le code donné en annexe. Pour une mesure plus juste par heure d'écoute, le minimum d'amplitude est relevé, pour chaque tier d'octave. Cela permet d'éviter des artefacts et d'estimer le niveau de bruit de fond, plutôt que le niveau d'évènements acoustiques ponctuels. Les tiers d'octave choisis sont centrés sur les fréquences suivantes (en Hz): 20, 63, 127, 255, 511, 2045, 16363, 41233, qui sont des fréquences du trafic maritime ou d'émissions de cétacés, et les fréquences d'intérêt pour ACCOBAMS et d'autres gestionnaires. D'autres octaves sont en traitement car nos enregistrements sont sensibles jusqu'à 150 kHz, bandes intéressantes pour le suivi de l'approche d'odontocètes tels que le grand dauphin.

Les mesures présentées dans cette section sont sélectionnées sur les enregistrements acquis durant la dérive des drones. Elles ont toutes été traitées.

Nous avons également des mesures en mode tracté (le OneCat tractant les drones), ou en mode propulsé à faible vitesse (les drones émettent alors peu de bruit parasite). Dans les deux cas nous avons toujours des détections de cétacés. Ces mesures en mode tracté seront comparées à celles en mode dérive.

Nous présentons ci-dessous un résumé des données dB médiane horaire, qui sont présentées en cartes dynamiques à: http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/SO_LIS_dBmedhor_preconf2020.html. Un onglet permet de choisir l'octave, et l'on peut agrandir la

carte en tout point.

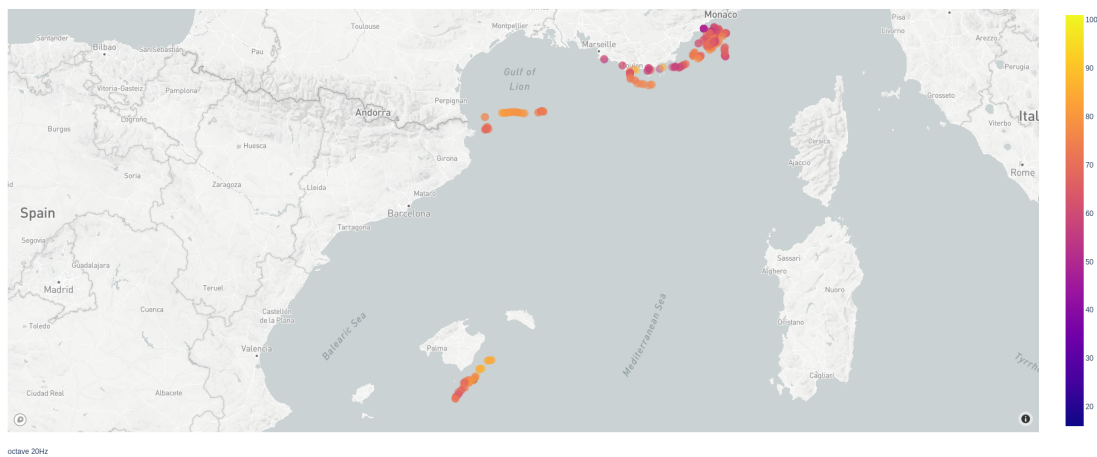


Figure 5.3: Carte des relevés et niveaux dB pour l'octave 20 Hz avant le confinement.

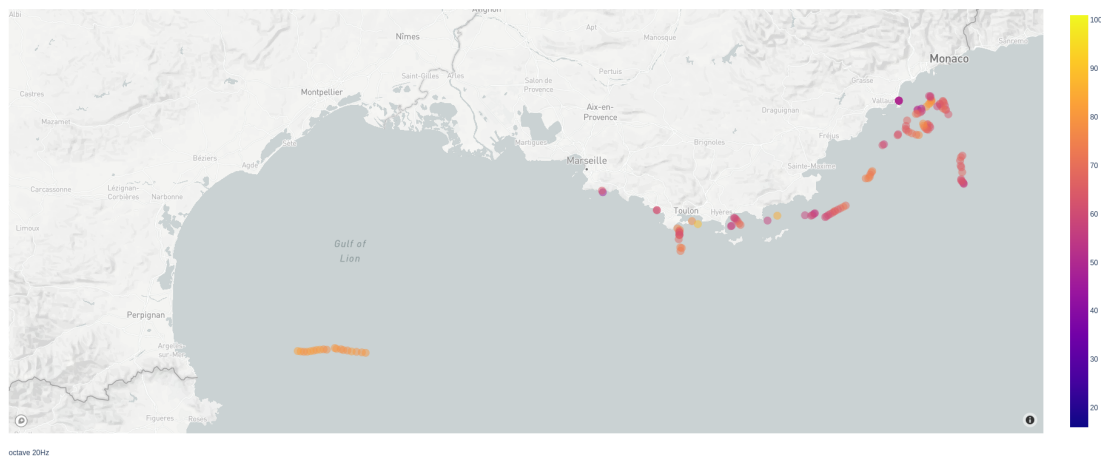


Figure 5.4: Carte des relevés et niveaux dB pour l'octave 20 Hz pendant le confinement.

Une tendance est déjà très claire, avec une énergie en basse fréquence 10 dB inférieure pour 20 Hz en période de confinement par rapport à la période pré-confinement.

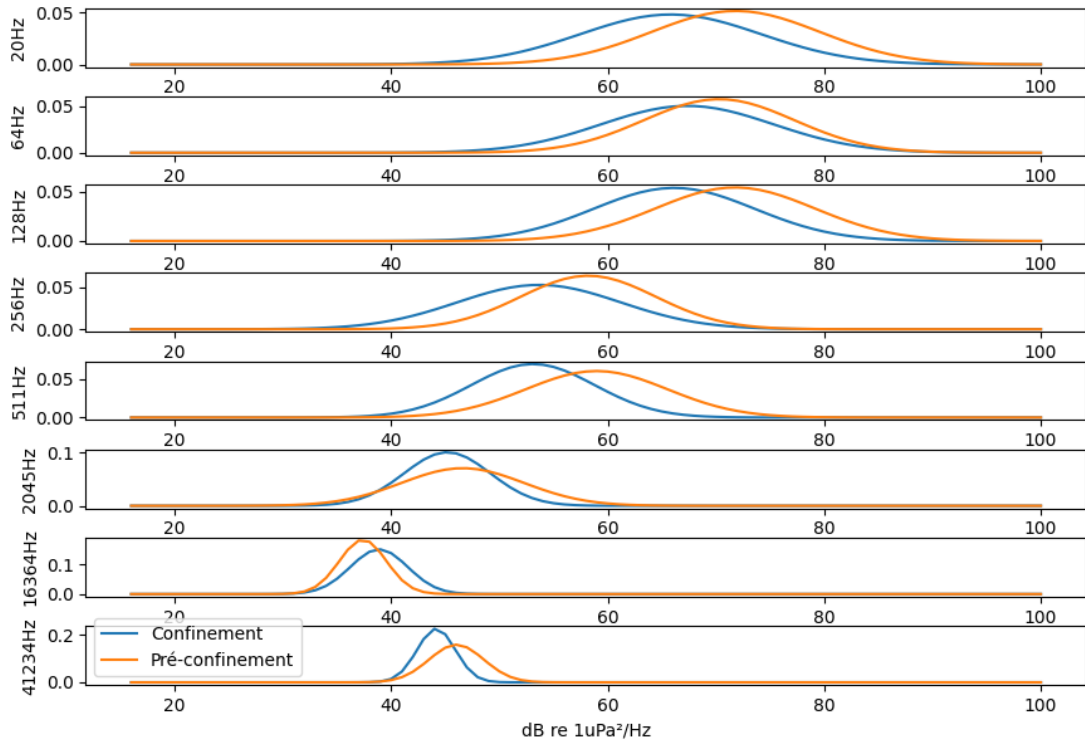


Figure 5.5: Comparaison des distributions des niveaux dB relevés pour chaque octave, avant et pendant le confinement.

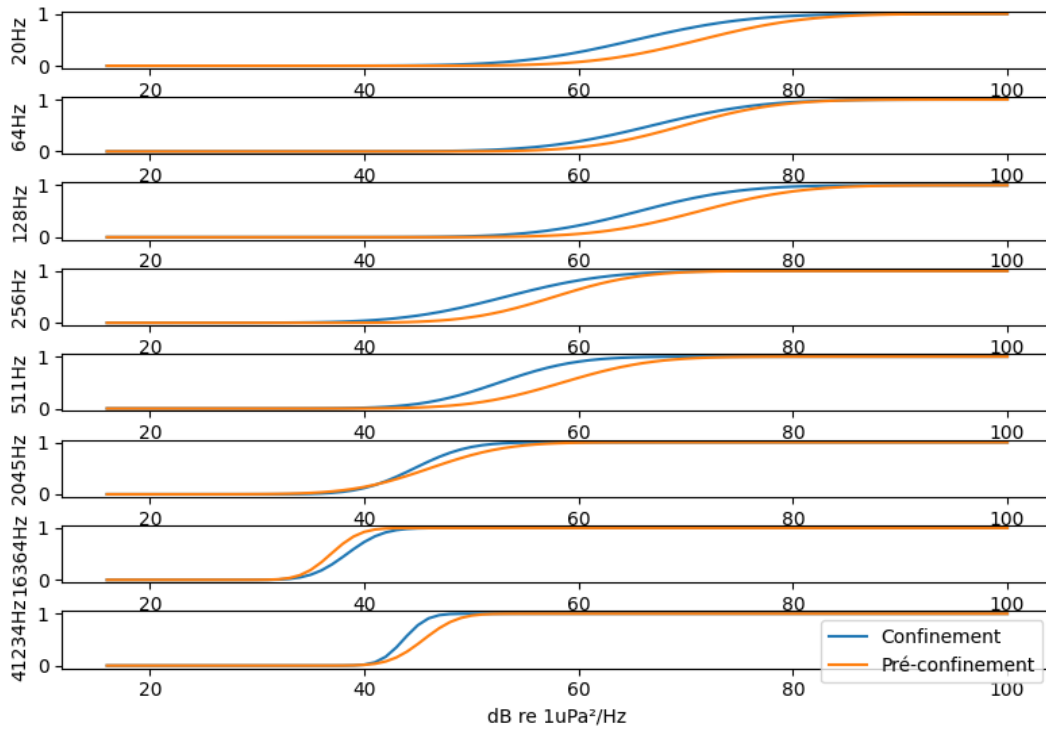


Figure 5.6: Distributions cumulées des niveaux dB pour chaque octave, avant et pendant le confinement.

La figure 5.7 montre la répartition des niveaux dB médians par octave avant et pendant le confinement. Comme montré par les distributions par octave (fig. 5.5), en basses et moyennes fréquences (domaine d'émission du trafic maritime), le bruit était plus important avant le confinement : environ 6 dB de plus à 20 Hz et 500 Hz. Les niveaux de bruits moyens dans le diagramme de Wenz sont cohérents avec ceux mesurés.

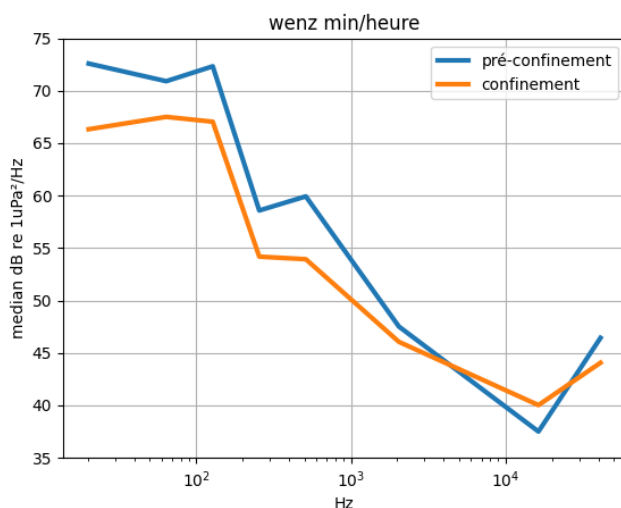


Figure 5.7: Niveaux dB médians des minimums horaires pour chaque octave avant et pendant le confinement (Bleu = hors confinement, Orange = durant confinement).

5.3 EFFET DU CONFINEMENT PAR RAPPORT À LA DISTANCE AUX PORTS ET À LA CÔTE

Un moyen de confirmer que le trafic maritime contribue à la pollution acoustique sous-marine est de comparer les mesures de bruits aux distances aux ports. Un rayon seuil de 20 km a été défini, pour capturer les nombreuses entrées et sorties des ports. Chaque échantillon acoustique a donc été classifié comme étant à plus ou à moins de 20 km d'un port. La liste des ports utilisée pour cette étude est la suivante : St Raphael, St Tropez, Nice, Propriano, Calvi, Ajaccio, Bonifacio, Issambres, Marseille, Toulon, Ile rousse, Villefrance, Provence, Hyères, Cannes, Antibes. Les niveaux médians proches et éloignés des ports, avant et pendant le confinement, sont reportés Fig. 5.8. Chaque courbe est estimée à partir d'au moins 10h de mesures à différentes positions et dates. La courbe pré-confinement proche des ports montre une nette supériorité (environ 5 dB en moyennes fréquences), tandis que la courbe pré-confinement éloignée des ports montre elle aussi une augmentation significative de quelques

décibels.

La corrélation entre la distance au port et le niveau de bruit relevé, complètement estompée pendant le confinement (le trafic était alors très réduit voir nul au bord des côtes) démontre la responsabilité du trafic maritime côtier dans le niveau de bruit sous-marin ambiant à proximité des côtes, particulièrement gênant pour les *Tursiops truncatus*. Ces derniers représentent sûrement l'espèce qui a le plus profité de l'apaisement de la pollution acoustique.

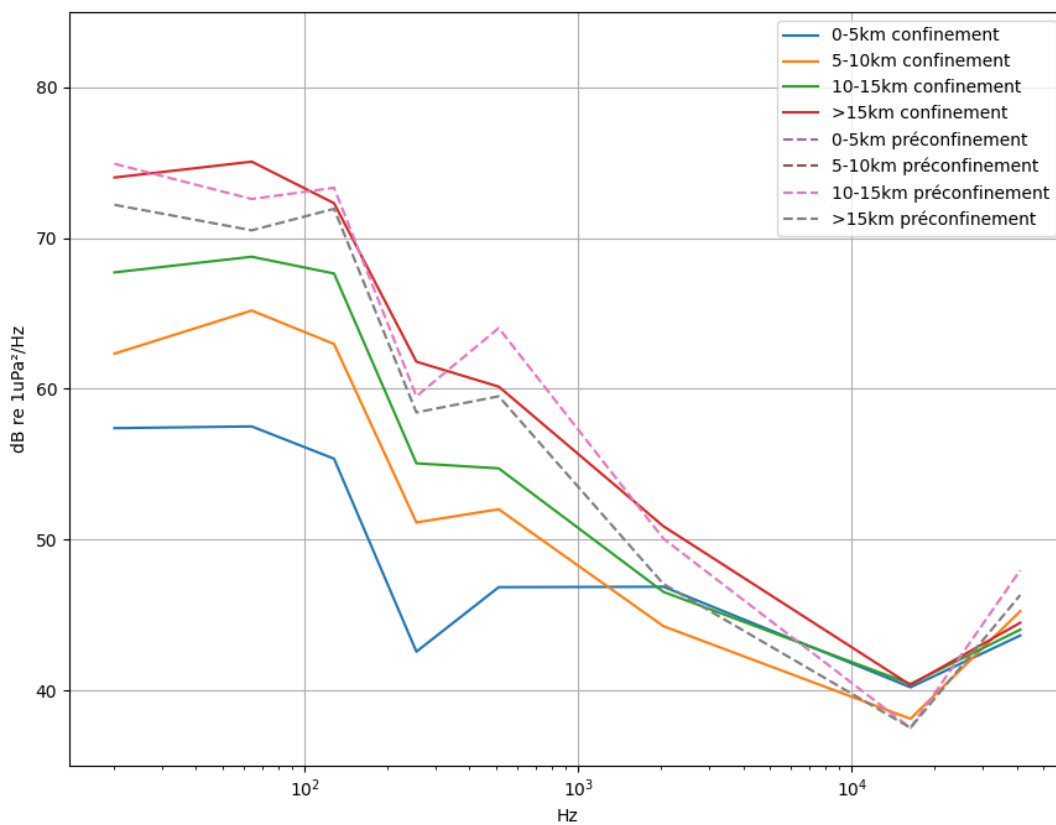


Figure 5.8: Niveaux dB médians minimums par heure relevés avant et pendant le confinement, à différentes distances de la côte. Les mesures proches des côtes avant confinement sont trop rares pour une statistique complète. Des mesures avec nos systèmes Bombyx³⁷ et Sphyrna 2018 sont en cours d'analyse pour compléter cette courbe pour les petites distances à la côte.

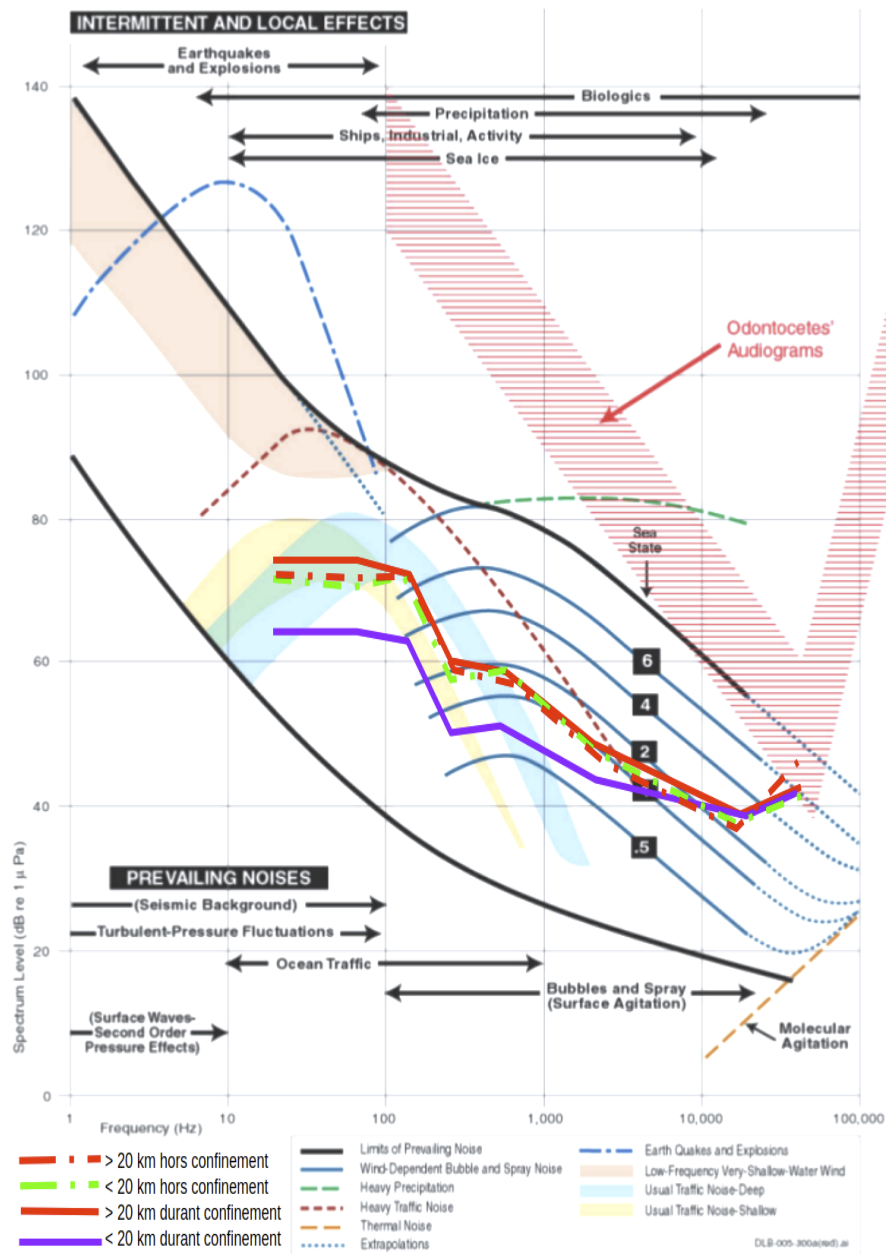


Figure 5.9: Projection des médianes des dB minimums à plus ou moins 20 km de la côte, relevés par SOM sur les niveaux de référence (diagramme de Wenz d'après NOAA repris dans⁹). La courbe moyenne dB durant le confinement à moins de 20 km des côtes (violet), montre la chute dB en basse fréquence du trafic maritime comparée à la référence (pointillé vert), qui se confond avec les niveaux de pollution hauturière durant ou hors confinement (rouge).

Nous superposons (Fig. 5.9) les dB de la mission sur les niveaux usuels donnés par le diagramme de Wenz⁹. La courbe dB durant le confinement démontre la chute dB en basse fréquence dans la zone des bruits du trafic maritime côtier, mais une activité inchangée en trafic hauturier. On note que la pollution acoustique varie peu hors confinement avec la distance à la côte. Le confinement a causé un fort gradient de silence à partir de la côte entre Monaco et Toulon, mais la pollution hauturière est restée similaire aux conditions hors confinement.

La même approche est utilisée pour calculer les niveaux de bruit par rapport à la distance de la côte. La relation entre cette distance et le niveau de bruit (Fig. 5.8,5.9) est aussi porteuse d'informations sur le lien entre l'activité anthropique et les niveaux acoustiques ambiants.

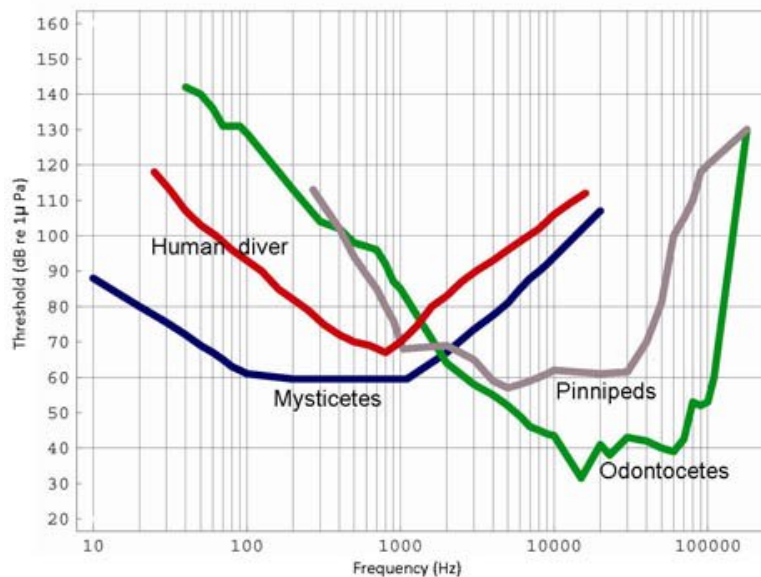


Figure 5.10: Sensibilité du système d'audition de différents groupes d'espèces en fonction des fréquences. La pollution acoustique entre 100 Hz et 1 kHz est particulièrement nuisible pour les mysticètes (rorqual en Méditerranée). Elle est aussi nuisible à ces fréquences pour les odontocètes qui recupèrent un peu d'information basse fréquence jusqu'à 500 Hz, même si c'est surtout dès 1 kHz qu'ils élaborent leur analyse de scène acoustique. (crédit Geoexpo, d'après Office of Naval Research: Final Environmental Impact Statement for the North Pacific Acoustic Laboratory, May 2001.

Durant le confinement on observe un fort gradient de dB, lequel est très faible en basses fréquences dans les hauts fonds près des côtes (courbe bleue). Une étude plus poussée est en cours pour comparer avec les niveaux dB enregistrés lors des protocoles Bombyx³⁷ et Sphyrna 2018.

5.4 CONCLUSION

Les perturbations anthropiques sur la faune marine méditerranéenne sont nombreuses. L'une d'entre elles est la perturbation acoustique. Le trafic maritime dense génère en effet un bruit de fond constant, non sans conséquence pour les mammifères marins qui se reposent sur leur sens acoustique pour se déplacer, chasser, et sociabiliser.

Nos études de l'impact de la pollution anthropophonique⁹ montrent que les perturbations acoustiques dues au trafic maritime sont principalement en basses et moyennes fréquences, ce qui impacte donc surtout les mysticètes (en Méditerranée : rorqual commun), et plus marginalement les odontocètes comme le démontre le diagramme de sensibilité auditive des différents groupes de mammifères fig.5.10. Il en ressort donc que la baisse dB, globalement d'au moins 12 dB sur la côte durant le confinement jusqu'à 500 Hz, a profité aux odontocètes, notamment *Tursiops truncatus*. D'autre part, la baisse d'environ 6 dB entre 10 et 15 km pour les basses fréquences a pu profiter aux rorquals et aux cachalots.

Selon un modèle basique de diffusion cylindrique, la perte de propagation est $\Delta(dB) = 10\log_{10}(r/r_0)$. Donc pour 9 dB de gain en rapport signal à bruit, on a un facteur, $r/r_0 = 8$ pour un modèle cylindrique. Les signaux bioacoustiques de plusieurs

espèces ont pu être propagés à des distances 6 à 8 fois plus grandes durant la période du confinement.

Des statistiques sont en cours pour intégrer plusieurs critères :

(1) des AIS et des conditions météorologiques pour affiner les mesures existantes,
(2) d'une dizaine de mesures de cargos ou ferries durant une demi-heure au moins chacun, avec un ou deux drones, ce qui permettra d'en modéliser le rayonnement acoustique en fonction de l'angle de mesure. Nous travaillons notamment sur les hautes fréquences relatives aux effets éventuels de cavitation de l'hélice, très nocives pour la perception des odontocètes.

La mission a enfin participé, en tant que vigie acoustique, au "pétardage" de deux mines historiques au large de Porquerolles, le 5 mars 2020. La capacité opérationnelle des Sphyrnas, lors de telles opérations de soutien visant à la protection des cétacés, a ainsi été démontrée. Des dauphins présents sur la zone ont été repérés et annoncés au commando de pétardage. Nos mesures dB permettront d'améliorer la définition du périmètre de sécurité et de proposer des améliorations à ce protocole de déminage.

6

Détections Acoustiques ou Visuelles de Cétacés, Etat de l'Art et Comparaisons

Ce chapitre présente les détections acoustiques ou visuelles de cétacés durant la mission en les comparant avec l'état de l'art. Nous nous concentrons sur les espèces cibles de cette étude.

6.1 LE CACHALOT : *PHYSETER MACROCEPHALUS*

Le cachalot, *Physeter macrocephalus* (Pm), est l'espèce parmi celles des cétacés teutophages la moins sélective en terme de profondeur et de distance à l'isobathe 200m. En 2014, la population des cachalots a été estimée entre 200 et 1000 individus par photo-identification⁷². Une autre étude conduite par Gannier en 2018 a permis de les observer 157 fois dont 98 dans de bonnes conditions³⁰. Cette étude a mis en avant (1) la présence de groupes avec une taille moyenne estimée à 1,9 individus; (2) une abondance relative de cachalots plus élevée dans le Golfe du Lion et le long du littoral Provençal par rapport à celle observée au nord Tyrrhénien et dans la région Sud-Ouest Ligure avec des valeurs de 2,36, 4,86, 0,84, 0,59 individus/100km respectivement; (3) une abondance relative du cachalot en Ouest Corse et quasiment nulle en Nord-Est Ligure (Fig. 6.1). Cette étude a ainsi révélé l'existence d'un gradient Est-Ouest pour l'abondance relative du cachalot en Méditerranée. En terme d'affinité bathymétrique, le cachalot a une préférence pour le talus profond (prof. 1000 à 2000 m), où nous retrouvons le Taux d'Observations d'Individus (TOI) le plus élevé avec 1,87 individus/100km en comparaison au talus supérieur (prof. 200-1000m) et à la zone océanique (prof. > 200m)³⁰. Ces résultats sont confirmés dans nos détections effectuées durant le projet PELAGOS DECAV de 2009 à 2012¹.

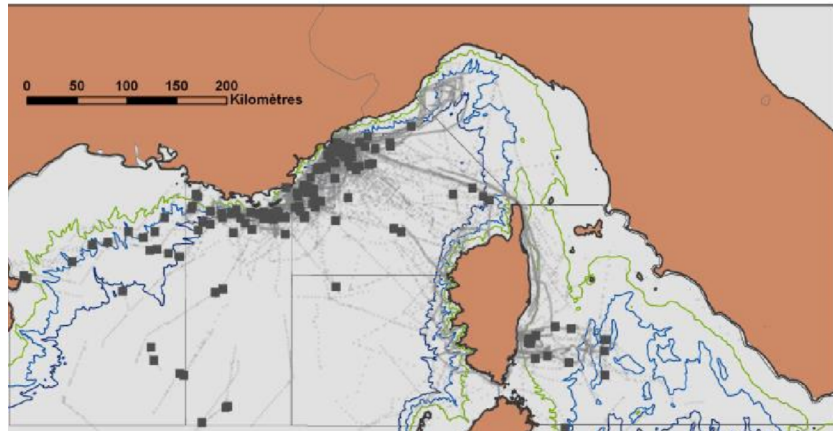


Figure 6.1: Etat de l'art sur le cachalot. Les traits gris indiquent l'échantillonnage entre 1988 et 2012³⁰.

6.2 LE GLOBICÉPHALE NOIR : *GLOBICEPHALA MELA*

Le Globicéphale noir, *Globicephala melo* (Gm), est une espèce de cétacés teutophages qui fréquente le bassin Nord-Occidental de la Méditerranée en été, mais habituellement pas la mer Tyrrhénienne³⁰. L'abondance estivale du globicéphale noir est estimée à 650 individus. L'étude menée par Gannier sur l'analyse des données de prospection obtenues entre 1988 et 2012 (Fig. 6.2) démontre une observation de 49 globicéphales noirs, dont 39 faites dans de bonnes conditions mais aucune observation en mer Tyrrhénienne. La taille moyenne d'un groupe est estimée à 24 individus. Le TOI relatif au globicéphale noir est de 9,67 individus/100km dans la zone "Provence", cependant il diminue aux alentours de 3 individus/100km pour le Golfe du Lion et la région Sud-Ouest Ligure. Le globicéphale noir n'a pas été observé dans les régions Nord-Est Ligure et Ouest-Corse. En terme d'affinité bathymétrique, ce cétacé se retrouve principalement dans la zone océanique (prof. > 2000m) avec une fréquence de 4 individus/100km³⁰.

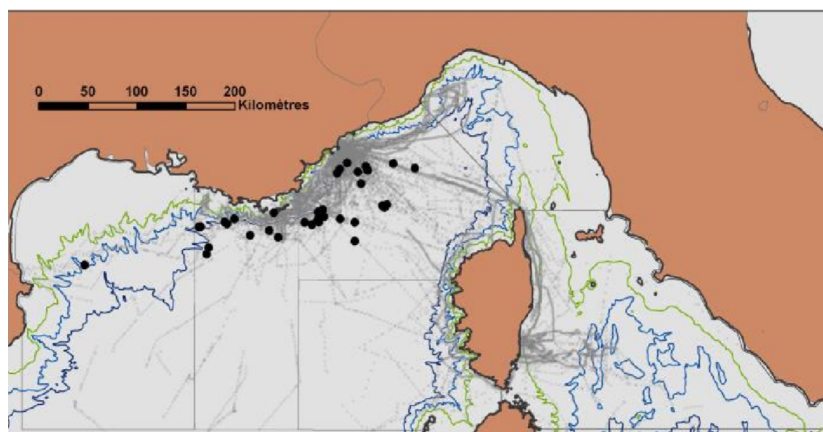


Figure 6.2: Etat de l'art sur le globicéphale noir. Les traits gris indiquent l'échantillonnage entre 1988 et 2012³⁰.

6.3 GRAND DAUPHIN : *TURSIOPS TRUNCATUS*

La présence du grand dauphin, *Tursiops truncatus* (Tt), dans le sanctuaire de Pelagos a été signalée le long de la côte Ouest de la France, de la zone Ligure, au nord de la Toscane, de l'archipel toscan, des côtes Ouest et Sud de la Corse et de la côte Nord de la Sardaigne. Des observations occasionnelles ont également été signalées sur la côte Ouest de la Ligure⁴⁴. Plusieurs scientifiques estiment qu'il y a une abondance élevée de grands dauphins à l'Est du sanctuaire de Pelagos et le long de la côte Corse⁴⁴. Dans l'étude menée par Gnone, le plateau continental (<200m), le long du sanctuaire, a été divisé en huit zones de tailles similaires et le TOI a été calculé pour chaque zone. Il existe une augmentation du TOI du grand dauphin de l'Ouest à l'Est, avec un TOI élevé à l'Est du sanctuaire Pelagos et le long de la côte Corse, conformément aux études précédentes. Une faible présence dans le Nord et le Nord-Ouest peut être due à la restriction de l'habitat du grand dauphin et/ou à cause de l'activité humaine, ce qui empêche la formation de sous-populations locales par rapport à la zone Est du sanctuaire où l'espèce peut contourner les perturbations dues aux activités humaines⁴⁴.

Une étude publiée en 2004²³ fait allusion au fait que la population de grands dauphins dans les îles Baléares est en réalité une sous-population dont l'abondance varie en fonction des saisons et des années. En mars 2002 par exemple, le nombre d'observations confirmées n'était que de 6, la moitié de celui obtenu par la suite en septembre 2002 (13 individus). De plus, les individus constituant ces sous-populations sembleraient effectuer des "échanges" avec une population plus importante dans la mer des Baléares au Nord-Ouest de la Méditerranée²³. La taille moyenne des groupes de grands dauphins observés dans cette étude était de 7 individus, mais il est possible que le nombre de grands dauphins varie entre 1 et 10 individus au sein d'un même groupe. Plus précisément, la taille d'un groupe dans les eaux au large ou aux côtes des Baléares est estimée à 6,5 individus environ²³, avec une abondance estimée à 0,60 individu au printemps et 1,10 individus en automne.

6.4 ZIPHIUS : *ZIPHIUS CAVIROSTRIS*

La baleine à bec de Cuvier, *Ziphius cavirostris* (Zc), est la seule espèce actuelle du genre *Ziphius*. Le *Ziphius* est principalement présent dans la mer Ligure et la mer Tyrrhénienne³⁰ et se trouve rarement en zone provençale. Ainsi, 39 observations de *Ziphius*, dont 18 observations de bonne qualité, ont été référencées dans l'étude de Gannier sur l'analyse des données de prospection obtenues entre 1988 et 2012, avec une taille moyenne d'un groupe estimée à 4 individus³⁰. La particularité du *Ziphius* réside dans une localisation plus fine que celle observée pour les autres cétacés teutophages. En effet, il est retrouvé principalement dans le Nord Tyrrhénien avec un TOI = 2, et plus faiblement dans la région Nord-Est Ligure. L'abondance relative du *Ziphius* est nulle dans les régions du Golfe du Lion, au Sud-Ouest Ligure, dans la zone "Provence", et négligeable en Ouest-Corse (Fig. 6.3). Les

indices d'affinité bathymétrique montrent que le *Ziphius* a une préférence pour le talus profond (prof. 1000-2000m) avec un TOI estimé à 1³⁰.

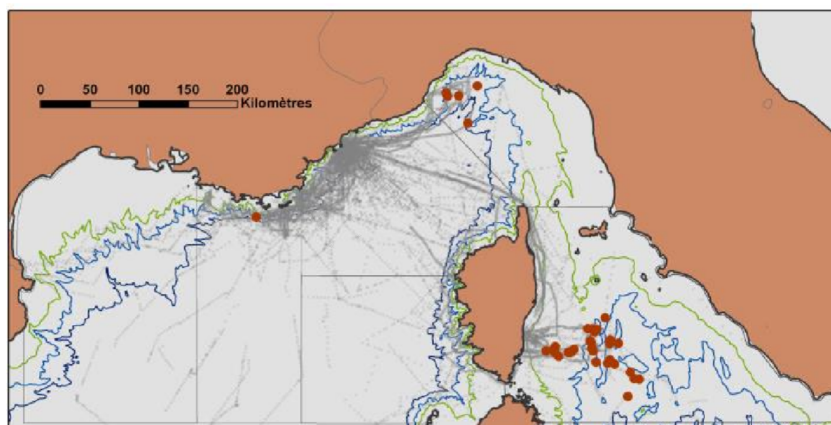


Figure 6.3: Etat de l'art sur la baleine à bec de Cuvier. Les traits gris indiquent l'échantillonnage entre 1988 et 2012³⁰.

6.5 DAUPHIN BLEU ET BLANC : *STENELLA COERULEOALBA*

Le dauphin bleu et blanc, *Stenella coeruleoalba* (Sc), est reconnu comme étant l'espèce la plus abondante en Méditerranée Nord-Occidentale²⁹. Dans une étude menée par Gannier, sur les 2601 observations de delphinidés, 2300 concernent le dauphin bleu et blanc soit environ 88%²⁹. Principalement localisé en mer Ligure, le dauphin bleu et blanc a également été observé dans des proportions plus faibles (TOI entre 60 et 200) dans le Golfe du Lion, la zone "Provence", l'Ouest-Corse, le Nord et le Sud de la mer Tyrrhénienne, et les Baléares. C'est dans l'ouest de la Sardaigne et Alboran que le TOI de dauphins bleus et blancs est le plus faible (TOI d'environ 15). Ainsi le TOI moyen de ce cétacé est estimé à 20 dans les zones précédemment citées. Dans les régions les plus septentrionales, la fréquence du dauphin bleu et blanc s'élève à 90%²⁹. L'abondance relative du cétacé est la plus élevée en mer d'Alboran (TOI = 94) et au Nord du bassin occidental. En été, la mer d'Alboran et les trois régions les

plus septentrionales (le Golfe du Lion, la Provence, et la mer Ligure) montrent²⁹. une forte abondance relative de dauphins bleus et blancs avec un TOI d'environ 115.

6.6 DAUPHIN DE RISSO : *GRAMPUS GRISEUS*

En été, le dauphin de Risso, *Grampus griseus* (Gg), est présent dans le bassin Nord-Occidental de la Méditerranée³⁰. Dans une étude de 2017 sur des prospections aériennes, l'abondance estivale du dauphin de Risso a été estimée à 1412 individus⁵⁹. Si l'on considère l'étude de Gannier sur les données de prospections obtenues entre 1988 et 2012 (Fig. 6.4), 47 observations ont été réalisées dans de bonnes conditions et ont permis d'estimer la taille moyenne d'un groupe à 11 individus³⁰. Remarquablement, le dauphin de Risso est la seule espèce présente à travers toutes les zones d'études : le Golfe du Lion, la zone Provence, la région Sud-Ouest et Nord-Est Ligure, la région Ouest-Corse et la région Nord Tyrrhénienne. Les TOI sont estimés à environ 2 individus/100km pour toutes les régions étudiées, à l'exception du Sud-Ouest Ligure et de l'Ouest Corse, dans lesquelles le dauphin de Risso est moins rencontré. De plus, le dauphin de Risso semble préférer le talus supérieur (prof. 200-1000m)³⁰ puisque le TOI=4,1 alors qu'il est de 1,8 dans le talus inférieur, et 0,1 dans la zone océanique. Cette étude met ainsi en évidence un lien direct entre le TOI du dauphin de Risso et la bathymétrie avec laquelle il décroît.

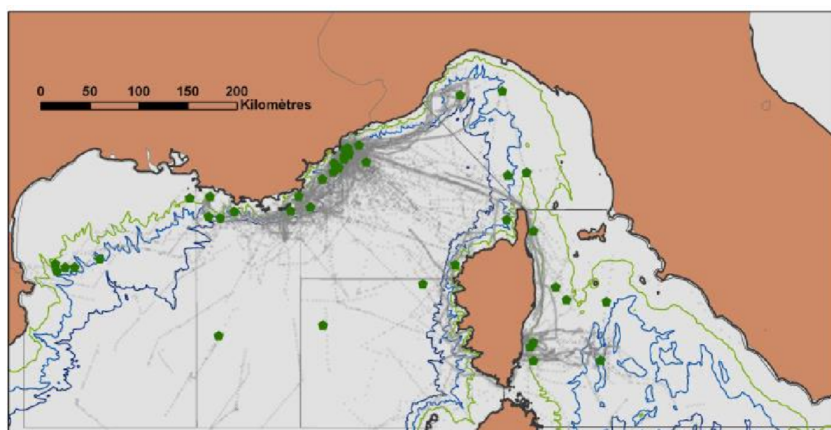


Figure 6.4: Etat de l'art sur le dauphin de Risso. Les traits gris indiquent l'échantillonnage entre 1988 et 2012³⁰.

6.7 DAUPHIN COMMUN : *DELPHINUS DELPHIS*

Pendant la période de 1988-2012, 46 dauphins communs, *Delphinus delphis* (Dd), ont été observés sur un total de 2601 observations de delphinidés, soit moins de 1%²⁹. Dans les eaux françaises, la proportion de dauphins communs était inférieure à celle du bassin occidental, à l'exception de la mer Tyrrhénienne et de la Corse occidentale où les observations étaient de 3,9%. Enfin, 28% des dauphins communs ont été observés dans la région des Baléares, le Sud de la mer Tyrrhénienne et l'Ouest de la Sardaigne. Malgré de nombreuses observations de delphinidés en Ligurie, dans le Golfe du Lion et la zone "Provence", leur abondance relative est presque nulle dans ces régions. Dans les eaux françaises, ils ont été retrouvés au large des côtes Est et Ouest de la Corse, et leur abondance relative atteint un TOI de 14,7 et 3,1 respectivement dans le Sud-Ouest de la Sardaigne et dans les mers Baléares²⁹. Leur présence est ainsi plus probable dans les régions plus au Sud du bassin méditerranéen occidental par rapport aux eaux continentales françaises. L'étude confirme que l'abondance relative des dauphins communs est plus élevée dans les zones néritiques. Il est également admis que l'abondance

relative est fortement influencée par le taux de chlorophylle et par la température en surface²⁹.

6.8 RORQUAL COMMUN : *BALAENOPTERA PHYSALUS*

L'étude de Gannier qui porte sur une série de prospections estivales entre 1991-2000, menée dans le sanctuaire de Pelagos, relate 274 observations de rorquals communs, *Balaenoptera physalus*, (Bp)²⁸. Ce cétacé a une préférence pour les eaux inférieures à 2000m et situées entre 30 et 60 km de la côte. Néanmoins, des eaux moins profondes (1000-1500m) comme celles de la mer Tyrrhénienne et du Golfe du Lion sont également fréquentées par le rorqual commun. Le TOI est en moyenne de 3 tandis que la taille moyenne des groupes est estimée à 1,5 individus mais elle varie entre 1,8 et 2,2 individus selon les années. Cette variabilité pourrait s'expliquer par la disponibilité des proies. Le rorqual commun est donc principalement présent dans la partie centrale de la mer Ligure mais on peut également le retrouver au Nord de la mer Tyrrhénienne, à 70 km à l'Est des bouches de Bonifacio, où le TOI peut atteindre 3 à 6.²⁸.

6.9 RORQUAL À MUSEAU POINTU : *BALAENOPTERA ACUTOROSTRATA*

Le rorqual à museau pointu ou baleine de Minke, *Balaenoptera acutorostrata* (Ba), est peu fréquent en Méditerranée puisqu'on l'observe en moyenne une fois par an. Les observations passées des rorquals à museau pointu étaient en mer Tyrrhénienne et Ligure ainsi que dans le Golfe du Lion⁷⁶. Gannier et al. (1994) ont signalé la présence d'un membre de cette espèce pour la période de 1990-1993 en Méditerranée française³¹. Par conséquent, peu d'études ont été réalisées sur cette espèce et il existe un manque d'informations sur leur comportement, leurs mode et lieux de vie.

6.10 PHOQUE MOINE : *MONACHUS MONACHUS*

La distribution historique du phoque moine, *Monachus monachus* (Mm), incluait la Méditerranée au large avec des populations localisées dans les zones côtières de la France, de l'Espagne, à l'Ouest de l'Italie, ainsi que le Maroc et l'Algérie¹¹. Cette espèce était également présente en Mer Noire et en Atlantique dans les régions telles que les îles Canaries. Aujourd'hui, la population de phoques moines se cantonne aux mers Ionienne et Égée ainsi qu'au Bassin Levantin avec des observations sporadiques sur les côtes Ouest de l'Italie. La population du phoque moine a diminué drastiquement suite à sa chasse délibérée et à la dégradation de son habitat. Aujourd'hui, la population de l'espèce est estimée à un peu plus de 350 individus¹¹.

6.11 ESPÈCES ATTENDUES DANS LE SUD DE MAJORQUE

Les espèces attendues dans le Sud de Majorque sont le rorqual commun, le dauphin de Risso, le cachalot, le grand dauphin et plus rarement le dauphin commun⁷¹. Nous retrouvons le rorqual commun dans le Sud de Majorque, mais cette espèce passe également son temps dans d'autres parties de la Méditerranée durant l'année. Les rorquals communs se rassemblent fin février et début mars dans les eaux côtières de l'île Italienne de Lampedusa et le Canal de Sicile. Nous retrouvons également cette espèce dans des parties hautement productives des mers Corse, Ligurie et Tyrrhénienne. Concernant le dauphin de Risso, il fréquente régulièrement cette région mais se retrouve la plupart de l'année majoritairement dans l'Est de la mer d'Alborán entre Seco de los Olivos et le Golfe de Vera⁷¹. Le cachalot fréquente régulièrement le Sud de Majorque, avec la présence de groupes sociaux incluant des mâles et des veaux

toute l'année. Les grands dauphins fréquentent aussi régulièrement la région Sud de Majorque, mais il y a peu de données relatives à leur abondance et leur répartition saisonnière. Ce manque de données est également valable pour le dauphin commun. Des études montrent que leur population a drastiquement diminué dans les mers Adriatique, Baléares et Ligure ainsi que dans le Bassin Provençal⁷¹.

6.12 CONCLUSION : COMPARAISON AUX DÉTECTIONS DE SOM

Les relevés acoustiques réalisés lors de SOM sont visualisés ci-dessous. Quatre espèces, le Ziphius, les dauphins communs et de Risso, la baleine de Minke et le phoque moine, ne sont pas représentées ici car aucun relevé acoustique n'a été dressé à ce jour. Précision en cours, nous avons une suspicion de contact acoustique avec Ziphius c. vers l'Île du Levant, que nous analysons actuellement. Nous avons aussi des détections ADNe de Ziphius c. dans cette zone (voir Chap.7 dédié à l'ADNe). Nous avons plusieurs détections ADNe de rorqual Sud Monaco, mais pas de détection acoustique. Nous listons ici les contacts établis au cours de la mission :

- Rorquals dans le Golfe du Lion,
- Globicéphales en Ligure et dans le Golfe du Lion, écoute possible en ligne des vocalises enregistrées en décembre 2019 : <https://www.tripinlab.com/underwater-hidden-sound-life/> et dans le film 'La nuit des globicéphales', cf Fig. 6.5.



Figure 6.5: Rencontre nocturne avec les Globicéphales, film disponible sur <https://www.youtube.com/watch?v=WVrj45h8wLA>. L'équipe travaillait en temps-réel avec les données revenant des ALV par Wifi sur le bateau amiral OneCat. Les efforts humains étaient H24 jour et nuit. Cette rencontre a eu lieu la nuit du 7 décembre.

- Cachalots à l'Est du Levant et au Sud de Monaco, dont nous détaillons une journée dans les chapitres suivants,

- Grands Dauphins dans la baie de Hyères (Fig. 6.6) et Callanque de Sormiou,



Figure 6.6: Rencontre d'une quinzaine de Tursiops t. dans la baie de Hyères le 23 Avril (Film complet disponible à <https://www.youtube.com/watch?v=Amn20xFMpTo>).

- Dauphins Bleu Blancs assez fréquents qui nous accompagnaient au large de Toulon ou de Marseille.

Tous ces contacts sont cohérents avec les zones renseignées dans l'état de l'art. La classification automatique des clics (voir Chap.8 dédié aux méthodes d'IA) permettra de séparer leur présence de celle d'autres odontocètes dans la masse de clics à traiter (Fig. 6.11) incluant les détections d'odontocètes à l'Est de Majorque qui ne sont pas encore classées.

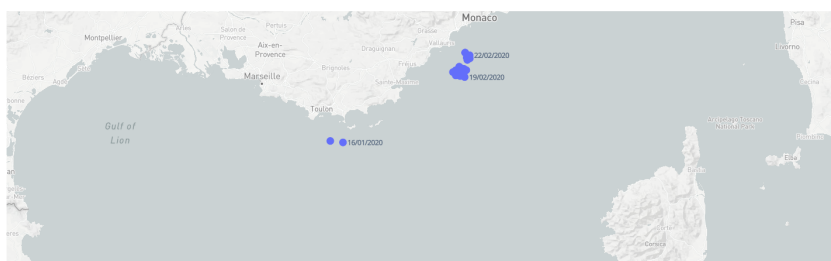


Figure 6.7: Répartition des cachalots, *Physeter macrocephalus*, suite aux relevés acoustiques et visuels

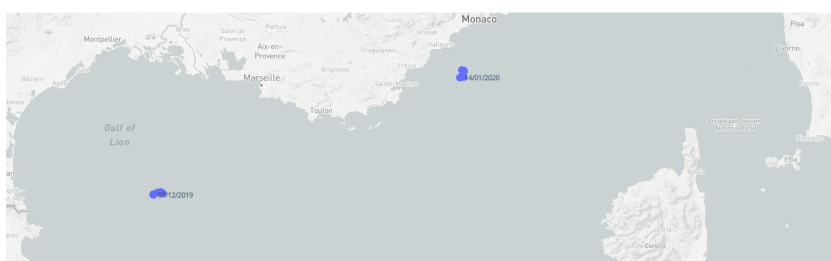


Figure 6.8: Répartition des globicéphales noirs, *Globicephala melas*, suite aux relevés acoustiques et visuels

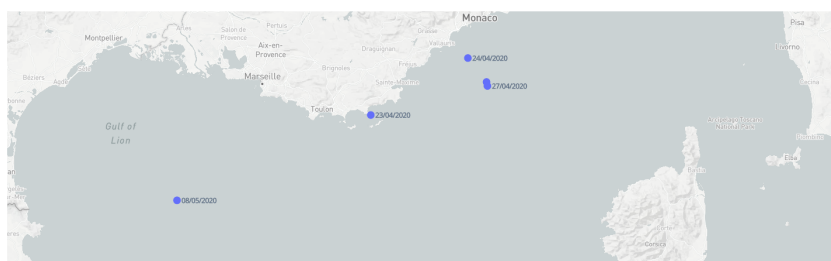


Figure 6.9: Répartition des grands dauphins, *Tursiops truncatus*, suite aux relevés acoustiques et visuels

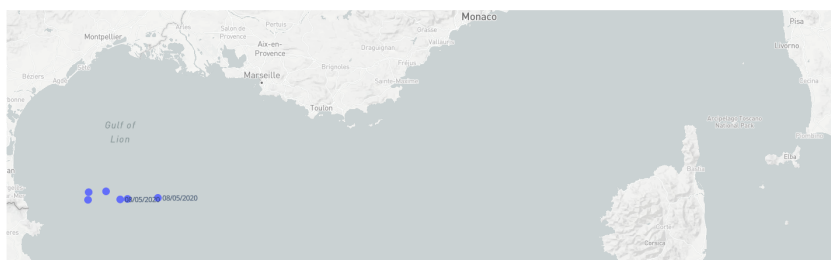


Figure 6.10: Répartition des rorquals communs, *Balaenoptera physalus*, suite aux relevés visuels

Enfin nous donnons les détections de dauphins en cours de différenciation par Deep learning (voir Chap.8 dédié aux méthodes d'IA). La rencontre avec les Grands Dauphins dans la Baie de Hyères est filmée, voir Fig. 6.6, et montre des animaux tout à fait calmes en ce début de confinement, leur habitat est clarifié, ayant perdu plus de 12 dB anthropophoniques !

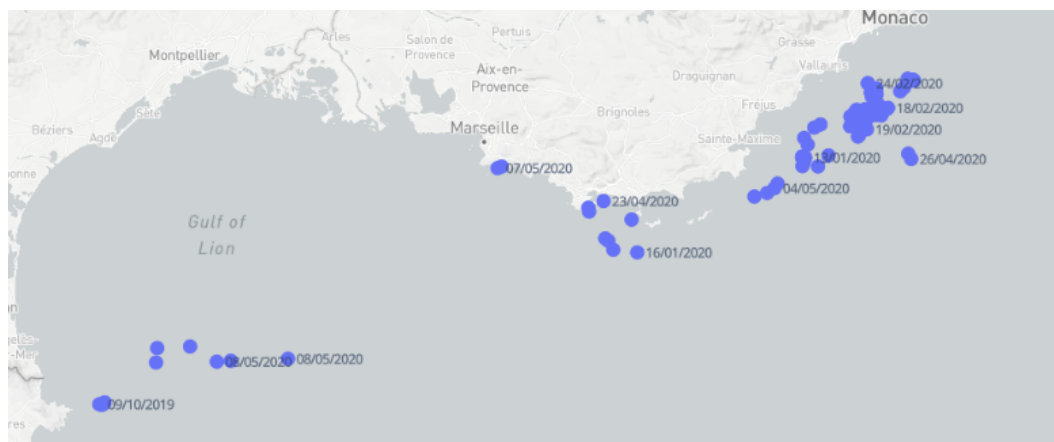


Figure 6.11: Répartition de dauphins en cours d'identification par classification automatique. Cette masse correspondant globalement à la densité de l'effort d'observation auquel il faut rajouter les zones d'écoutes Est Marjorque qui comportent aussi des détections. Une majorité de ces détections sont des dauphins Bleu Blancs.

7

ADN Environnemental

7.1 PRINCIPE DU PROTOCOLE ADN ENVIRONNEMENTAL

L'ADN environnemental (ADNe) se définit comme étant de l'ADN pouvant être extrait d'échantillons environnementaux tels que les sédiments, l'air ou l'eau. Tout organisme vivant possède des cellules qui contiennent de l'ADN. Or il y a une interaction permanente entre l'organisme vivant et son environnement. Si l'on s'intéresse aux organismes marins, à tout moment, ces individus vont relarguer dans l'environnement aquatique des cellules ou une partie d'un tissu par l'intermédiaire des fèces, des urines, des gamètes, de la salive, de la peau... Cet ADNe se caractérisera donc par un mélange complexe d'ADN provenant de différents organismes, qu'ils soient vivants ou en décomposition. La qualité de cet ADNe (et donc *in fine* la disponibilité dans le temps) dépendra étroitement de facteurs abiotiques tels que la température de l'eau, les UV, l'acidité...¹⁵

L'ADNe s'avère être un outil innovant et prometteur pour le suivi de la biodiversité marine passée et présente. A travers ce projet, nous avons souhaité utiliser l'outil ADNe pour identifier et répertorier des espèces endémiques, ou nouvelles, en mer Méditerranée. Notre attention s'est portée sur 9 d'entre elles : Rorqual commun *Balaenoptera physalus* (Bp), Cachalot *Physeter macrocephalus* (Pm), Ziphius *Ziphius cavirostris* (Zc), Globicéphale noir *Globicephala mela* (Gm), Dauphin de Risso *Grampus griseus* (Gg), Grand dauphin *Tursiops truncatus* (Tt), Dauphin commun *Delphinus delphis* (Dd), Dauphin bleu et blanc *Stenella coeruleoalba* (Sc), et le Phoque moine *Monachus monachus* (Mm).

7.2 ÉCHANTILLONNAGE

Des échantillons d'eau de mer (Tab. 7.1) (et donc potentiellement d'ADNe) ont été prélevés avant, durant et après des observations visuelles et/ou acoustiques des espèces cibles de ce projet, ou bien hors de toute observation afin d'éprouver la pertinence de l'outil "ADNe".

N échantillons	Date yyyy/mm/dd	hh:mm	LAT N °	LONG E °	nbre litre	nbre filtres
1	2020/01/09	17:27	42° 54	6° 17	10	1
2	2020/01/12	7:00	43° 19.675	7° 11.562	8	3
3	2020/01/12	10:00	43° 19.675	7° 11.562	11	3
4	2020/01/14	11:00	43°22	7°16	20	3
5	2020/01/27	11:15	43° 32	7° 19	10	2
6	2020/01/30	18:00	43° 27	7° 25	7.7	1
7	2020/01/31	10:00	43°39.379	7°34.885	9.5	2
8	2020/02/02	12:30	43° 23.82	7° 20.70	10	2
9	2020/02/06	13:15	43° 21	7° 11.60	10	2
10	2020/02/19	8:02	43° 23.28	7° 16.15	8	2
11	2020/02/21	19:35	43° 34.40	7° 20.904	10	2
12	2020/02/22	9:37	43° 24.757	7° 03.953	10	2
13	2020/02/25	3:30	43° 31.312	7° 23.172	10	2
14	2020/03/06	10:45	42° 57.185	6° 13.055	10	2
15	2020/04/23	16:45	43° 02.998	6° 14.950	10	2
16	2020/04/23	18:44	43° 04.962	6° 23.338	10	1
17	2020/04/25	6:25	43° 33.547	7° 16.186	10	2
18	2020/04/26	7:48	43° 30.707	6° 56.802	10	2
19	2020/04/26	22:00	43° 14.545	7° 30.565	10	2
20	2020/04/27	12:53	43° 32.464	7°22.981	10	1
21	2020/04/27	21:30	43° 35.693	7° 16.493	11	2
22	2020/04/28	15:00	43° 34.539	7° 07.797	10	4
23	2020/05/03	8:00	43° 34.552	7° 07.908	10	3
24	2020/05/04	10:40	43° 14.078	6° 55.050	10	3
25	2020/05/04	23:05	43°11.636	6°63.093	10	2
26	2020/05/05	14:50	43° 04.551	6° 12.275	10	2
27	2020/05/06	17:15	42° 58.780	5° 54.042	10	2
28	2020/05/07	13:00	43° 11.737	5° 27.340	10	2
29	2020/05/08	7:53	42° 31.785	4° 28.317	10	5
30	2020/05/08	17:05	42° 30.046	4° 12.109	10	5
31	2020/05/08	17:32	42° 30.04	4° 12.067	10	7
32	2020/05/08	18:03	42° 29.968	4° 10.768	10	6
33	2020/05/09	11:30	42°30.607	3°47.839	10	3

Figure 7.1: Échantillonnages réalisés lors de la première campagne *Sphyrna-Odyssey*.

Une seconde campagne d'échantillonnages a également été réalisée lors de la mission *Quiet-Sea* qui est en cours d'analyse (Tab. 7.2).

N échantillons	Date yyyy/mm/dd	hh:mm	LAT N °	LONG E °	nbre litre	nbre filtres	Traitement	Espèce(s) détectée(s)	Vraisemblables (séquence similaire)
1	2020/01/09	17:27	42° 54	6° 17	10	1	✓	Bp, Zc	
2	2020/01/12	7:00	43° 19.675	7° 11.562	8	3	✓	Zc	
3	2020/01/12	10:00	43° 19.675	7° 11.562	11	3	✓	Bp, Tl	
4	2020/01/14	11:00	43° 22	7° 16	20	3	✓	Tl, Dd	Dd similaire avec Dc
5	2020/01/27	11:15	43° 32	7° 19	10	2	✓	Tl, Zc, Mm	
6	2020/01/30	18:00	43° 27	7° 25	7.7	1	✓	Tl, Bp	Bp similaire avec Bb
7	2020/01/31	10:00	43° 39.379	7° 34.885	9.5	2	✓	Bp	
8	2020/02/02	12:30	43° 23.82	7° 20.70	10	2	✓	Bp, Sc	Sc similaire avec Ta, St, et Tt
9	2020/02/06	13:15	43° 21	7° 11.60	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
10	2020/02/19	8:02	43° 23.28	7° 16.15	8	2	✓	Zc	
11	2020/02/21	19:35	43° 34.40	7° 20.904	10	2	✓	Bp	
12	2020/02/22	9:37	43° 24.757	7° 03.953	10	2	✓	Zc, Bp	Bp similaire avec Bb
13	2020/02/25	3:30	43° 31.312	7° 23.172	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
14	2020/03/06	10:45	42° 57.185	6° 13.055	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
15	2020/04/23	16:45	43° 02.998	6° 14.950	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
16	2020/04/23	18:44	43° 04.962	6° 23.338	10	1	PAS ENCORE TRAITE	-	-
17	2020/04/25	6:25	43° 33.547	7° 16.186	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
18	2020/04/26	7:48	43° 30.707	6° 56.802	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
19	2020/04/26	22:00	43° 14.545	7° 30.565	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
20	2020/04/27	12:53	43° 32.464	7° 22.981	10	1	PAS ENCORE TRAITE	-	-
21	2020/04/27	21:30	43° 35.693	7° 16.493	11	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
22	2020/04/28	15:00	43° 34.539	7° 07.797	10	4	PAS ENCORE TRAITE	-	-
23	2020/05/03	8:00	43° 34.552	7° 07.908	10	3	PAS ENCORE TRAITE	-	-
24	2020/05/04	10:40	43° 14.078	6° 55.050	10	3	PAS ENCORE TRAITE	-	-
25	2020/05/04	23:05	43° 11.636	6° 63.093	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
26	2020/05/05	14:50	43° 04.551	6° 12.275	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
27	2020/05/06	17:15	42° 58.780	5° 54.042	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
28	2020/05/07	13:00	43° 11.737	5° 27.340	10	2	PAS ENCORE TRAITE	-	-
29	2020/05/08	7:53	42° 31.785	4° 28.317	10	5	PAS ENCORE TRAITE	-	-
30	2020/05/08	17:05	42° 30.046	4° 12.109	10	5	PAS ENCORE TRAITE	-	-
31	2020/05/08	17:32	42° 30.04	4° 12.067	10	7	PAS ENCORE TRAITE	-	-
32	2020/05/08	18:03	42° 29.968	4° 10.768	10	6	PAS ENCORE TRAITE	-	-
33	2020/05/09	11:30	42° 30.607	3° 47.839	10	3	PAS ENCORE TRAITE	-	-

Figure 7.2: Échantillonnages réalisés lors de la seconde campagne durant le confinement (Quiet-Sea).

7.3 EXTRACTION DE L'ADNE

L'ADNe a été obtenu en filtrant un volume variant de 7,7 à 10 litres d'eau de mer sur un ou plusieurs filtres d'une porosité de 0,45 µm. Ces filtres ont ensuite été conservés dans du tampon ATL® de chez Qiagen à -80°C jusqu'à leur analyse. L'extraction de l'ADNe a été faite à partir du kit NucleoSpin Tissue® (Macherey-Nagel) selon les recommandations du fournisseur, néanmoins ce protocole a été légèrement modifié pour prendre en compte les filtres. Un contrôle interne a également été ajouté à chaque échantillon afin de vérifier l'efficacité de l'extraction. A l'issue de l'étape d'extraction, les échantillons ont été récupérés dans 70 µl de tampon (5mM Tris/HCl, pH 8,5) et conservés à -80 °C jusqu'à ce que la PCR soit effectuée.

7.4 DÉTECTION DES ESPÈCES CIBLES PAR PCR

Pour détecter la présence d'ADN spécifique à l'espèce cible, une approche PCR « imbriquée » adaptée du protocole GoFish a été utilisée⁷⁴. La PCR imbriquée utilise deux couples d'amorces (amorces "forward" et "reverse") dirigés vers le même métabarcode (la cible) et deux cycles distincts de PCR. Ici c'est le gène codant pour l'ARN ribosomique 12S mitochondrial qui a été retenu pour réaliser l'amplification. Lors du premier cycle de PCR, l'ADNe de l'échantillon est amplifié à l'aide d'amorces "ARN ribosomique 12S mitochondrial" non-spécifiques. Cette première PCR permet aussi d'amplifier le contrôle interne ajouté lors de l'étape d'extraction. Le contrôle garantit qu'il n'y a aucun inhibiteur présent, lequel réduirait l'efficacité de la PCR. Suite à cette première PCR, les produits amplifiés sont purifiés à l'aide du kit QIAquick PCR purification® (Qiagen) pour éliminer les amorces et les réactifs résiduels. Lors de la seconde PCR, c'est un couple d'amorces "ARN ribosomique 12S mitochondrial" spécifiques à l'espèce recherchée qui a été utilisé pour réamplifier le premier produit d'amplification. Chaque couple d'amorces spécifiques à une espèce a également été modifié en ajoutant une séquence nucléotidique particulière (*m13 tail universal primer*) afin de simplifier ultérieurement le séquençage.

7.5 SÉQUENÇAGE

Les produits d'amplification obtenus ont été préalablement détectés par électrophorèse sur gel d'agarose. Cette étape a permis de vérifier la qualité des amplifiats avant qu'ils ne soient envoyés à séquencer (*Genewiz*, Allemagne). A l'issue de ce séquençage, un BLASTn a été effectué sur les séquences nucléotidiques générées afin d'identifier les espèces cibles présentes

dans chaque échantillon (Fig. 7.3).

échantillon	Date de prélèvements	Séquence « forward »	Séquence « reverse »	Séquence amplifiée spécifique à	Vérification BLAST (forward)	% alignement (forward)	Vérification BLAST (reverse)	% d'Alignement (reverse)
1	2020/01/09	-	✓	Bp.	-	-	✓	45% sur 93.10% d'identité
		-	✓	Zc.	-	-	✓	35% sur 100% d'identité
2	2020/01/12	-	✓	Zc.	-	-	X	20% sur 100% d'identité
3	2020/01/12	✓	✓	Bp.	X	35% sur 100% d'identité	✓	44% sur 100% d'identité
		-	✓	Tt.	-	-	✓	29% sur 100% d'identité
4	2020/01/14	-	✓	Tt.	-	-	✓	25% sur 100% d'identité
		✓	-	Dd.	X	27% sur 100% d'identité	-	-
5	2020/01/27	-	✓	Tt.	-	-	✓	44% sur 100% d'identité
		✓	✓	Zc.	✓	20% sur 100% d'identité	✓	16% sur 100% d'identité
		✓	-	Mm	✓	33% sur 100% d'identité	-	-
6	2020/01/30	-	✓	Tt.	-	-	✓	26% sur 100% d'identité
		✓	-	Bp.	X	25% sur 100% d'identité	-	-
7	2020/01/31	-	✓	Bp.	-	-	✓	45% sur 100% d'identité
8	2020/02/02	-	✓	Bp.	-	-	✓	40% sur 100% d'identité
		✓	✓	Sc.	X	36% sur 100% d'identité	✓	22% sur 100% d'identité
10	2020/02/19	✓	✓	Zc.	✓	28% sur 100% d'identité	✓	22% sur 100% d'identité
11	2020/02/21	-	✓	Bp.	-	-	✓	31% sur 100% d'identité
12	2020/02/22	✓	✓	Bp.	X	46% sur 100% d'identité	✓	43% sur 100% d'identité
		✓	-	Zc.	✓	41% sur 96.55% d'identité	-	-

Figure 7.3: Séquences nucléotidiques exploitables par BLASTn. Les cellules en vert indiquent des séquences appartenant à d'autres espèces que l'espèce cible, mais une différenciation est possible. Les cellules en bleu indiquent que la séquence obtenue s'aligne parmi d'autres séquences de la banque de données avec la même valeur pour les paramètres Query cover, Percent identity, et E-value (plus la valeur est faible, plus l'alignement est pertinent).

7.6 ESPÈCES IDENTIFIÉES VIA L'ADNe

Sur les 9 espèces cibles recherchées avec l'outil *ADNe* lors de cette première mission, 6 ont été confirmées alors que le cachalot, le globicéphale noir et le dauphin de Risso n'ont pas été identifiés dans les échantillons disponibles.

Pour les échantillons 2, 3, 4, 6, 8 et 12, il demeure une incertitude soit sur l'espèce soit sur le genre. Ainsi pour l'échantillon 4, il n'a pas été possible de distinguer l'espèce *delphis* et *capensis* pour *Delphinus*. Il en est de même pour les échantillons 3, 6 et 12, avec *Balaenoptera physalus* et *Balaenoptera borealis*.

L'échantillon 2 pour lequel la séquence amplifiée a été réalisée avec les amorces spécifiques à *Ziphius cavirostris* a également "matché" avec *Mesoplodon bidens* et *Mesoplodon ginkgodens*.

Enfin, l'échantillon 8 pour lequel la séquence amplifiée a été réalisée avec les amorces spécifiques à *Stenella coeruleoalba* a également "matché" avec *Tursiops aduncus* *Sousa teuszii*, *Tursiops truncatus*. L'incertitude pour ces 6 échantillons peut néanmoins être corrigée si l'on prend en considération la fréquentation géographique de certaines espèces. En effet *Delphinus capensis*, *Balaenoptera borealis*, *Tursiops aduncus* *Sousa teuszii*, *Mesoplodon bidens*, *Mesoplodon ginkgodens* ne fréquentant pas l'aire méditerranéenne, il apparaît donc raisonnable de considérer que les échantillons 2, 4, (3,6,12) et 8 d'ADNe correspondent respectivement au Ziphius *Ziphius cavirostris*, *Delphinus delphis*, au rorqual commun, *Balaenoptera physalus*, au dauphin bleu et blanc, *Stenella coeruleoalba*, et *Tursiops truncatus*.

7.7 RÉPARTITION DES ESPÈCES DÉTECTÉES PAR ADN

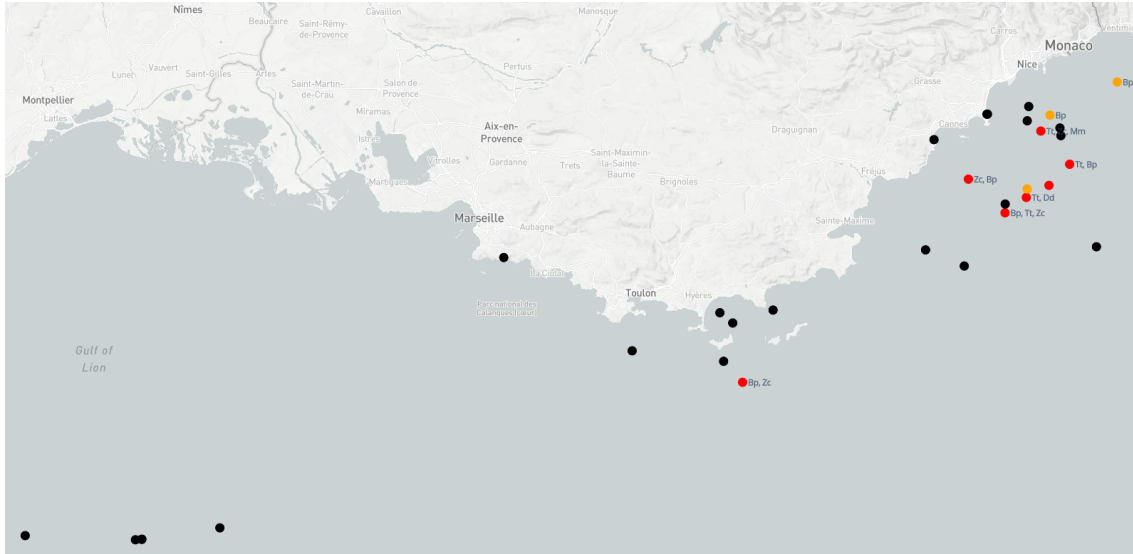


Figure 7.4: Carte de détection d'espèces cibles par ADNe. Les points en orange indiquent une seule espèce identifiée, en rouge plusieurs espèces, et en noir celles en cours d'analyse.

Sur les 11 prélèvements réalisés, c'est majoritairement de l'ADNe de rorqual commun (7 fois), de Ziphius (5 fois) ou encore de grand dauphin (4 fois) qui a été identifié. Il faut également noter que l'analyse de l'échantillon d'ADNe réalisée peu de temps après une observation acoustique de cachalots, n'a pas généré de détection ADNe. Nous pensons que les courants marins jouent un rôle central dans cette approche ADNe. En effet, une autre particularité de cette campagne, l'échantillon 5 (prélèvement effectué entre Cannes et Monaco) a révélé la présence d'ADN de phoque moine, lequel est aujourd'hui principalement observé dans les îles grecques, voire au Sud de l'Italie. Il peut s'agir non pas d'un individu présent sur zone, mais d'effets de courant et de tissus morts dérivant sur de longues distances dans le courant.

SOM a permis d'identifier la présence du rorqual commun dans les hauts fonds entre Cannes et Monaco, ainsi qu'une présence plus faible aux alentours de Hyères. La présence de Ziphius, de grands dauphins, de dauphins communs et de dauphins bleu et blanc est également confirmée entre Cannes et Monaco.

7.8 CONCLUSION ET PERSPECTIVE : ACOUSTIQUE ET ADNe JOINTS

L'acoustique et l'ADNe sont donc deux approches complémentaires pour la surveillance passive ou longue distance des écosystèmes marins. La surveillance longue distance est favorable dans un tel habitat car il est particulièrement difficile et parfois quasiment impossible d'étudier les organismes en proximité. Il n'existe pas de manière exacte pour surveiller l'abondance⁴⁹ et la répartition des espèces. Cependant une combinaison des outils ADNe et acoustique semble prometteuse.

L'ADNe permet d'identifier la présence ou l'absence d'espèces⁷⁷, mais il est très dépendant des courants forts, comme on le devine dans ses premiers résultats. Les détections peuvent être liées à des passages à plusieurs dizaines de miles plusieurs jours avant la mesure. En revanche, l'acoustique passive donne une mesure instantanée dans un rayon de quelques km ou dizaines de km pour les basses fréquences. Par ce protocole inédit bioacoustique joint à l'ADNe pour l'étude de la mégafaune, Sphyrna Odyssey est une référence internationale.

8

Développements en Intelligence Artificielle pour la Détection Acoustique de Cétacés sur les Masses de Données de SOM

8.1 INTRODUCTION

La surveillance acoustique passive est aujourd'hui une approche courante pour la surveillance de la biodiversité. Son efficacité repose sur un large ensemble de données, et donc une détection automatique fiable des espèces.

Les vocalises des cétacés ont été traitées et classées depuis quelques années en profitant des méthodes de traitement automatique de la parole, et de l'essor de l'apprentissage automatique. Un exemple de nos résultats en reconnaissance de rorqual et autres mysticètes par réseaux de neurones entre autres est dans JASA⁴⁷. Nous avons développé plusieurs algorithmes qui participent à l'état de l'art en détection et reconnaissance automatique de signaux bioacoustiques de cétacés, notamment^{8,40,5,68,67,41,67,39,36} en data mining ou classification de vocalises.

En revanche, les transitoires des odontocètes, leurs clics, qui sont des impulsions à large bande de fréquence et de très courte durée, sont délicats à classer^{36,39}. Nous proposons alors ici pour SOM un modèle de classification de ces signaux pour répondre aux besoins de l'indexation de la masse de données enregistrées (environ 20 To). Nous avons alors, notamment via la base de signaux de Sphyrna Odyssey, constitué une base de référence. Nous décrivons dans ce chapitre cette approche pour la classification des clics basée sur un modèle Deep Learning.

L'ensemble de données constitué pour la construction de ce modèle contient 10 espèces.

Nous avons donc collecté des données provenant de différentes sources: i) le défi DLCDE 2018 avec le LIS Toulon et le Scripps Institute USA³⁸ *, et ii) les clics de cachalots de

*<http://sabiiod.univ-tln.fr/DCLDE/challenge.html>

l'expédition Sphyrna Odyssey 2018²¹. Ces ensembles contiennent de longues séquences audio avec des annotations grossières des régions temporelles avec des clics. Notre objectif est de produire un ensemble avec des clics individuels associés à une espèce particulière. Dans ce travail, nous présentons notre méthodologie pour extraire les clics et les étiqueter par espèce.

Le bruit d'étiquette est classique d'un scénario réel, des références sont alors erronées, augmentant ainsi la validité écologique de ce challenge. Il permet d'explorer l'utilisation de techniques traitant spécifiquement de ces questions, telles que l'apprentissage négatif^{55,22}. Nous avons donc décidé d'augmenter le nombre d'échantillons, au prix d'une éventuelle augmentation des erreurs d'étiquetage.

8.2 CONSTRUCTION DE L'ENSEMBLE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE

Les données du défi DCLDE 2018 sont des clics d'écholocation d'espèces permettant de poser un vrai défi de classification de biosonar. Elles sont diverses, couramment trouvées outre atlantique et certaines en Méditerranée, enregistrés entre 2011 et 2015), voir liste ci-dessous.

- *Mesoplodon europaeus* - Gervais' beaked whale
- *Ziphius cavirostris* - Cuvier's beaked whale
- *Mesoplodon bidens* - Sowerby's beaked whale
- *Lagenorhynchus acutus* - Atlantic white-sided dolphin
- *Grampus griseus* - Risso's dolphin

- *Globicephala macrorhynchus* - Short-finned pilot whale
- *Stenella* sp. - Stenellid dolphins (groupe)
- Delphinid type A (groupe)
- Delphinid type B (groupe)

Des analystes du Scripps Institute USA ont examiné les données à la recherche de clics d'écholocation et ont approximé les heures de début et de fin des rencontres acoustiques. Toute période qui était séparée d'une autre d'au moins cinq minutes était marquée comme une autre rencontre.

8.3 LABELLISATION EXPERTE DE BIOSONARS SUR UNE MASSE DE DONNÉES ACOUSTIQUES

Pour chacun des échantillons, les étiquettes sont des laps de temps indiquant la présence de l'espèce correspondante. L'intervalle le plus long entre deux clics dans un segment peut durer jusqu'à 5 minutes. Nous considérons ces étiquettes comme faibles, en ce sens qu'elles ne reflètent pas précisément l'horodatage de chaque clic. Nous sommes intéressés par la détection et la classification des clics individuels, donc des annotations à une échelle temporelle beaucoup plus fine sont nécessaires. Ce sont des étiquettes que nous appellerons fortes et que nous avons produit pour cette recherche d'annotation précise.

Afin d'extraire les étiquettes fortes, nous ne conservons d'abord que les composants énergétiques dans les plages de fréquence des clics en appliquant un filtre passe-bande. Puis nous utilisons un filtre Teager-Kaiser (TK)^{53,35} combiné à un extracteur maximum local ayant une

demi-fenêtre de $0,02\text{ s}$ pour obtenir la position de tous ces clics. Étant donné que la plupart des maxima ne seront pas des clics réels mais du bruit de fond, un filtre médian est utilisé sur les logarithmes de ces maxima pour évaluer le niveau de bruit de fond. Tout maximum au-dessus du niveau de bruit plus $0,5\text{ dB}$ est conservé. Des fenêtres de 8192 échantillons sont ensuite extraites autour de ces clics.

Nous procédons ensuite à l'étiquetage de ces maxima avec les étiquettes du défi DCLDE. Si un clic est dans l'intervalle de deux étiquettes faibles ou plus, nous lui attribuons toutes les étiquettes correspondantes. Nous avons utilisé le centroïde spectral comme caractéristique pour effectuer le filtrage final, car c'est la caractéristique avec laquelle les valeurs aberrantes (bruit) se distinguent mieux des clics réels. Le centroïde spectral est la moyenne pondérée de la fréquence, en utilisant l'amplitude de la transformée de Fourier comme poids. Il ne peut à lui seul classer les espèces.

8.4 INTÉGRATION DE DONNÉES DE LA MISSION SPHYRNA ODYSSEY

Nous considérons le mélange des données de différentes expériences d'enregistrement dans le corpus final. Nous y ajoutons des données obtenues lors de SOM. Cet ensemble contient des clics de cachalots, *Physeter Macrocephalus*. Ces clics ont été enregistrés à 384 kHz par un hydrophone Cetacean Research C57 et une carte son JASON. Les clics de cachalots ont été détectés à l'aide d'un processus de détection similaire à celui utilisé pour créer des étiquettes fortes, cf supra. Nous avons corrélé le signal avec une période d'une onde sinusoïdale de $12,5\text{ kHz}$ qui agit comme un filtre passe-bande (la bande passante des clics d'écholocation est de 10 à 15 kHz ⁶²). Nous appliquons ensuite le filtre TK pour extraire les maxima locaux dans des fenêtres de 20 ms (deux fois le plus grand intervalle inter-impulsions de 10 ms^2).

Pour chaque fichier audio d'une minute, nous calculons la moyenne et l'écart type des valeurs maximales (dB), et nous ne conservons des échantillons que trois fois plus que l'écart type⁷⁰. Pour les intégrer dans DOCCIO, nous avons sous-échantillonné le signal à 200 *kHz* afin que cela corresponde à la fréquence d'échantillonnage du jeu de données DCLDE.

8.5 UN HACKATHON IA INTERNATIONAL

Nous avons publié cet ensemble de données comme référence pour la communauté internationale pour la classification des clics dans le défi DOCCIO (Dyini Odonocete Click Classification), dans le cadre de l'Ecole Normale Supérieure de Paris / Data Challenge et du Collège de France (CdF) , durant la conférence invitée de H. Glotin en décembre 2019 au CdF : <http://www.college-de-france.fr/video/stephane-mallat/2020/01-sem-mallat-challenge-toulon-20200129-01.mp4>. Ce défi international est ouvert à tout participant, académique ou non, à cette page : <https://challengedata.ens.fr/participants/challenges/32/>.

8.6 LA BASE DE RÉFÉRENCE DOCCIO

Notre nouveau jeu de données DOCCIO se compose donc de clics centrés dans une fenêtre de 8192 échantillons afin d'analyser les clics dans une fenêtre de 4096 échantillons. La combinaison de DCLDE et SOM a produit ce nouveau jeu de données à un total de 134080, que nous avons divisé en un ensemble de 113120 clics pour l'apprentissage, et un ensemble de test de 20960 clics. L'ensemble de test est équilibré avec 2096 clics par classe. Pour le défi, l'ensemble de test a été divisé en un ensemble de test privé (90%) et un ensemble de test public (10%). Cette répartition a été effectuée au hasard. Les noms de classes sont Tab. 8.1. Les

Label	Scientific name	Common name
Gg	Grampus griseus	Risso's dolphin
Gma	Globicephala macrorhynchus	Short-finned pilot whale
La	Lagenorhynchus acutus	Atlantic white-sided dolphin
Mb	Mesoplodon bidens	Sowerby's beaked whale
Me	Mesoplodon europaeus	Gervais' beaked whale
Pm	Physeter macrocephalus	Sperm whale
Ssp	Stenella sp.	Stenellid dolphins
UDA		Delphinid type A
UDB		Delphinid type B
Zc	Ziphius cavirostris	Cuvier's beaked whale

Table 8.1: Class labels

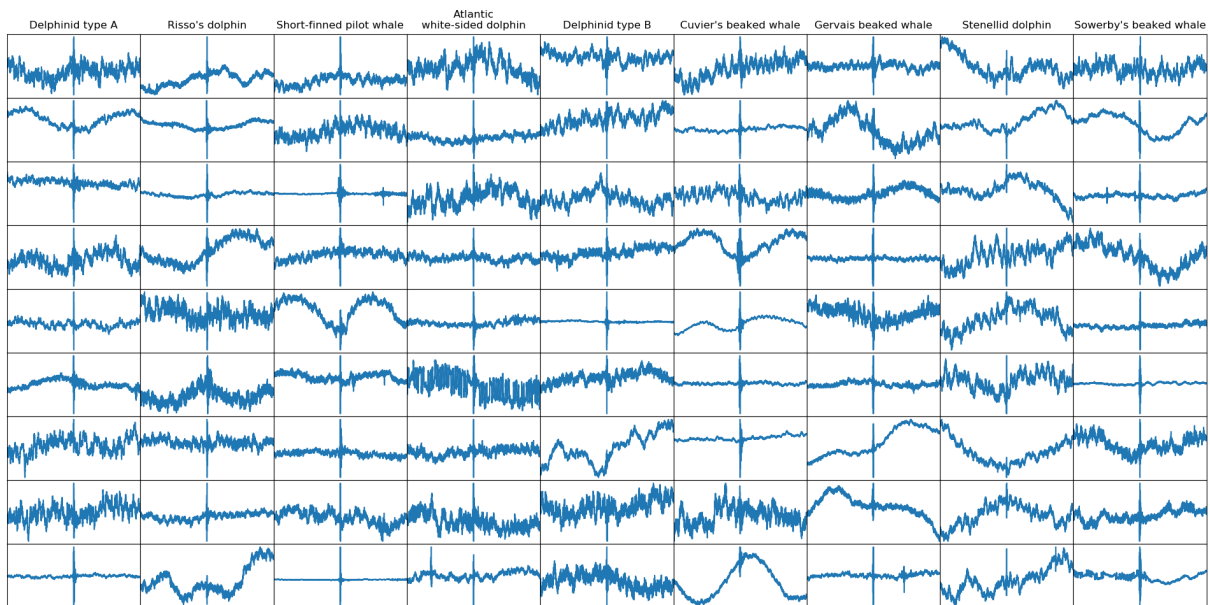


Figure 8.1: Exemples (en ligne) de 9 classes (en colonnes) issus du défi DCLDE2018³⁸ (4096 bins par exemple). Le clic est au centre de la fenêtre.

Fig. 8.1 et 8.2 montrent des exemples de clics de DOCC₁₀ pour presque toutes les classes du corpus.

Ce challenge est distribué par DYNILIS UTLN : (<http://sabiod.univ-tln.fr/pub/>)

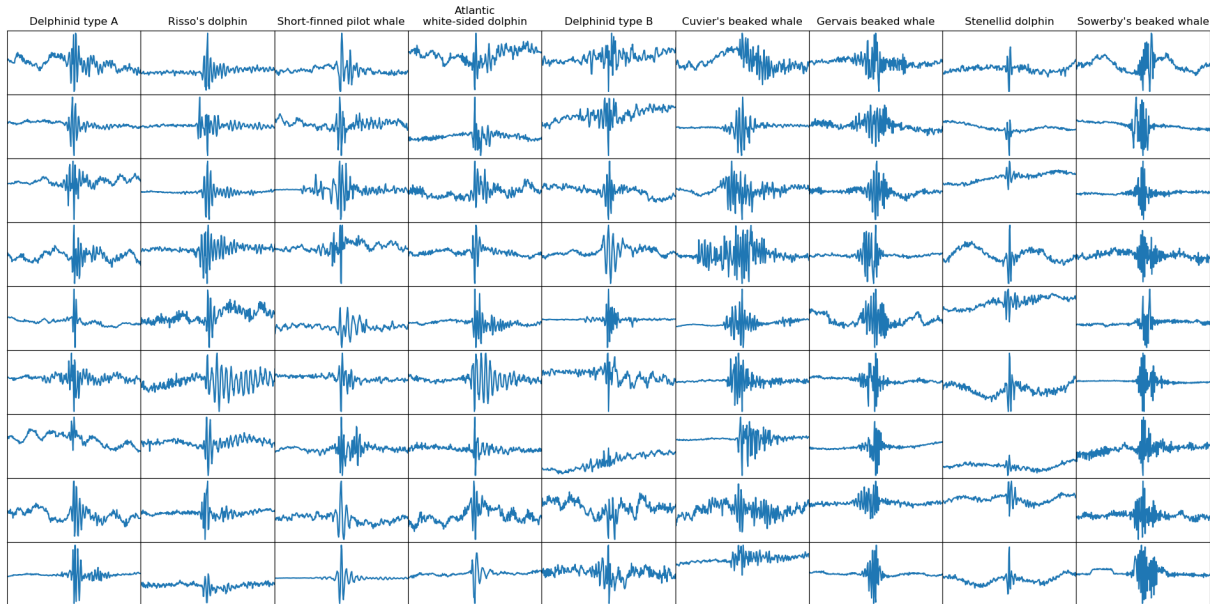


Figure 8.2: Zoom sur des exemples de 9 classes issus de DCLDE2018³⁸, test set (256 bins de long). Le biosonar est au centre, on distingue des différence de forme d'onde par classe.

challenges/D0CC10/), et par le challenge DATA d'ENS CdF (<https://challengeedata.ens.fr/challenges/32>), ainsi que dans notre publication internationale²⁰.

8.7 DEEP LEARNING POUR LA RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DE BIOSONARS

Une grande partie de la recherche sur l'apprentissage automatique est effectuée sur la classification d'images^{61,16,58,47}. Lorsque l'on travaille sur des sons, l'utilisation de spectrogrammes ou de coefficients cepstraux à fréquence Mel (MFCC) permet de convertir ces signaux 1D en images et d'utiliser les techniques de pointe telles que ResNet⁵⁹. Cette approche a l'inconvénient du choix à priori de la représentation (ici Fourier), et d'avoir un certain nombre de paramètres qui doivent être réglés au préalable, tels que la taille de la fenêtre pour la FFT, ce qui affecte la résolution temps-fréquence. Le choix de la bonne représentation

pour chaque espèce n'est pas trivial et peut diminuer les performances.

En bioacoustique, *bulbul* et *sparrow*⁴⁵, sont deux architectures utilisant les spectrogrammes de magnitude STFT qui ont été conçues pour le défi de détection audio Bird[†] et sont de nos jours utilisées comme état de l'art depuis que *bulbul* a remporté le défi^{19,67}.

Le premier test que nous avons réalisé avec cette architecture sur DOCCIO n'a pas fonctionné. Au lieu d'utiliser des spectrogrammes 2D, qui sont meilleurs pour l'analyse des gazouillis ou des signaux stationnaires, nous avons décidé d'apprendre directement du signal brut, en commençant par des couches de convolution similaires à ce qui est fait dans l'étude des signaux physiologiques pulsés (ECG)^{27,57}. L'avantage d'une couche de convolution par rapport à une couche dense est qu'elle forcera le filtre appris à être invariant à une traduction du signal⁶⁰. Les multiples filtres d'une couche de convolution produiront plusieurs dimensions entités par pas de temps. La convolution bidimensionnelle peut ainsi être utilisée sur ce signal 2D, réduisant la quantité de paramètres par couche parmi les autres avantages des convolutions⁵². Cela peut être fait après la première couche ou après plusieurs couches de convolution 1D^{51,4}. L'opération peut ensuite être répétée pour effectuer une convolution 3D. Pour plus de commodité, nous appelons cette augmentation de dimension suivie d'une convolution 'UpDim'. Notre opération peut-être répétée pour augmenter le nombre de dimensions à 4D et plus. Cependant, les bibliothèques d'apprentissage profond habituelles telles que Tensorflow ou PyTorch ne prennent pas en charge la convolution sur des tenseurs de plus de 3 dimensions.

[†]<http://machine-listening.eecs.qmul.ac.uk/bird-audio-detection-challenge>

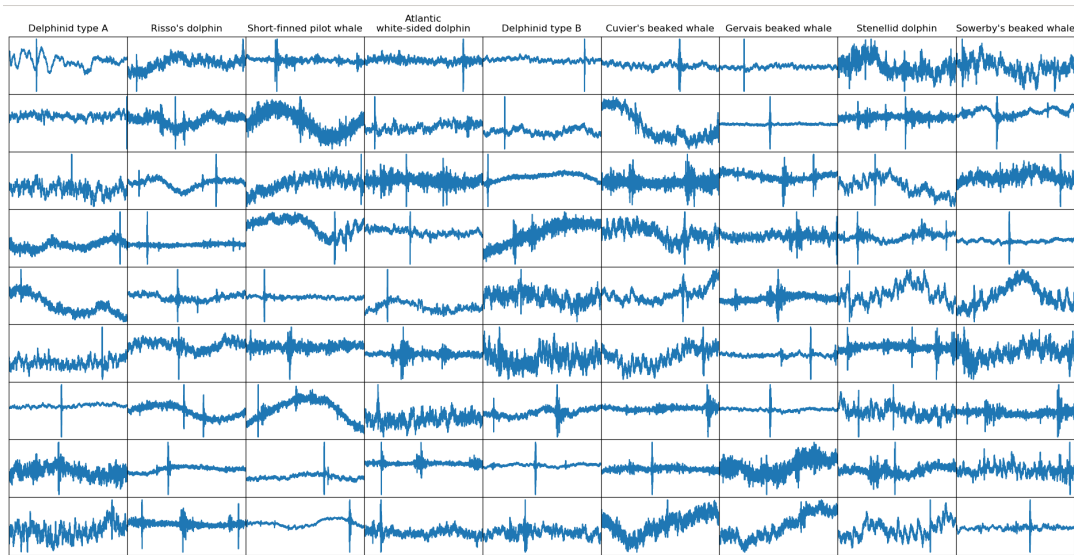


Figure 8.3: Exemples de DCLDE, données de test, 4096 bins.

8.8 TOPOLOGIE DU RÉSEAU DE NEURONES

Nous appliquons notre nouvel opérateur UpDim dans un CNN de 12 couches en utilisant l'audio brut comme entrée. Des fenêtres de 4096 bins sont extraites au hasard des échantillons de 8192, et des bruits roses, blancs et transitoires aléatoires y sont ajoutés, chacun ayant une distribution d'amplitude indépendante qui est log-uniforme (pour être uniforme à l'échelle dB). Le résultat est ensuite normalisé et donné en entrée à la première couche du CNN (cf. Fig. 8.3) La topologie du modèle est en Tab. 8.2.

Le modèle croît en dimension par suite d'étage de convolution et de notre opérateur UpDim. L'activation entre chaque couche est une fonction ReLu ($\alpha = 0,01$). La fonction de coût est l'entropie croisée avec softmax. Une perte L2 sur les poids est ajoutée en régularisation, avec un facteur de 0,0005. Le modèle a été appris via le process Adam⁵⁶ avec un taux d'apprentissage de 0,0005, pendant 16 époques, avec des mini-lots de 32 échantillons.

Layer name	Input size	Kernel	Strides	In features	Out features
Conv-1D	$N * 4096$	5	2	1	16
Conv-2D	$N * 2048 * 16$	$5 * 3$	$2 * 1$	1	16
Conv-3D	$N * 512 * 16 * 16$	$5 * 3 * 3$	$4 * 1 * 1$	1	16
Conv-3D	$N * 128 * 16 * 16 * 16$	$5 * 3 * 3$	$2 * 1 * 1$	16	32
Conv-3D	$N * 64 * 16 * 16 * 32$	$5 * 3 * 3$	$2 * 2 * 2$	32	64
MaxPool	$N * 32 * 8 * 8 * 64$	$5 * 3 * 3$	$4 * 2 * 2$	64	64
Conv-3D	$N * 8 * 4 * 4 * 64$	$5 * 3 * 3$	$2 * 2 * 2$	64	64
Conv-3D	$N * 4 * 2 * 2 * 64$	$5 * 3 * 3$	$2 * 2 * 2$	64	64
Reshape	$N * 2 * 1 * 1 * 64$				
OneByOne Max	$N * 2 * 1 * 64$	$1 * 1$	$1 * 1$	64	64
OneByOne	$N * 1 * 1 * 64$	$1 * 1$	$1 * 1$	64	64
OneByOne	$N * 1 * 1 * 64$	$1 * 1$	$1 * 1$	64	11
Flatten	$N * 1 * 1 * 11$				

Table 8.2: Topologie du modèle

Notons que la classe 11 a été entraînée pour détecter le bruit, et a été retirée pour le modèle DOCC10 qui prédit 10 classes.

8.9 RÉSULTATS

Pour l'évaluation de l'ensemble de test DOCC10, la classe de bruit a été supprimée. La matrice de confusion est donnée Fig. 8.4. La matrice de confusion sur un ensemble de test qui comprend un échantillon de bruit est assez similaire. Ce modèle obtient une MAP (précision moyenne) de 77,12% et un score de bonne classification de 71,13% sur l'ensemble de test complet. Sur la partie publique de l'ensemble de test du défi, la MAP est de 77,68%, et

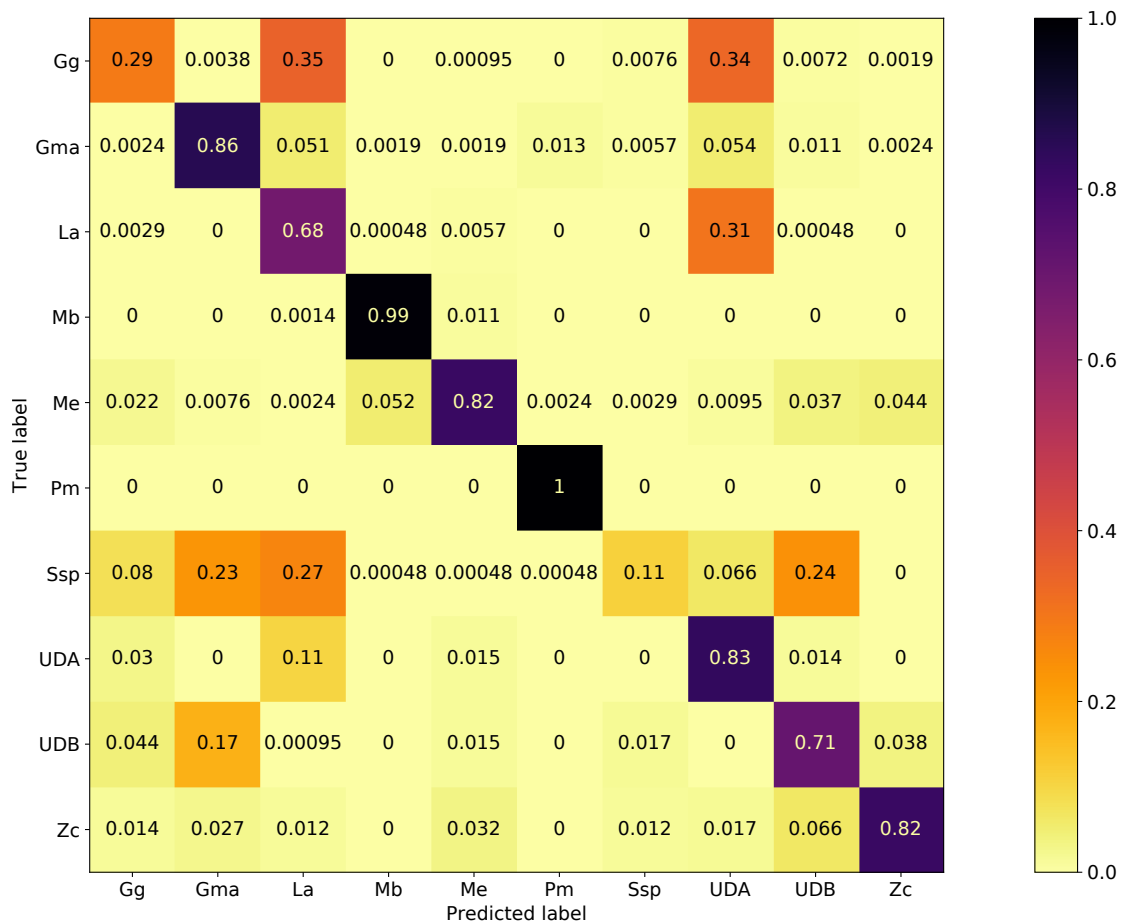


Figure 8.4: Matrice de confusion du modèle de référence, sur le test set.

le score de bonne classification est de 70,52%.

A la lumière de ces résultats, nous avons étudié une version modifiée d'un resnet qui utilise le principe UpDim comme indiqué Tab. 8.3. Les fonctions d'activation utilisées sont des ReLu (avec un alpha de 0,001). Le Batchnorm a été utilisé après chaque couche de convolution à l'exception de celles des connexions de saut. La perte est l'entropie croisée avec softmax. Une perte L2 sur les poids est ajoutée en régularisation, avec un facteur de 0,05. Le modèle a également été appris par l'algorithme adam à $\beta = (0,8; 0,999)$ et $\epsilon = 0,0001$, taux

Couche	Input size	Kernel	Strides	Out repres.
Conv-1D	$N * 4096 * 1$	3	1	32
Conv-1D	$N * 4096 * 32$	3	2	32
Skip	$N * 4096 * 1$	1	2	32
Conv-1D	$N * 2048 * 32$	3	2	64
Conv-1D	$N * 1024 * 64$	3	2	128
Skip	$N * 2048 * 32$	1	4	128
Conv-2D	$N * 1024 * 128 * 1$	$3 * 3$	$1 * 1$	32
Conv-2D	$N * 1024 * 128 * 32$	$3 * 3$	$2 * 2$	32
Skip	$N * 1024 * 128 * 1$	$1 * 1$	$2 * 2$	32
Conv-2D	$N * 512 * 64 * 32$	$3 * 3$	$2 * 2$	64
Conv-2D	$N * 256 * 32 * 64$	$3 * 3$	$2 * 2$	128
Skip	$N * 512 * 64 * 32$	$1 * 1$	$4 * 4$	128
Conv-3D	$N * 128 * 16 * 128 * 1$	$3 * 3 * 3$	$1 * 2 * 1$	32
Conv-3D	$N * 128 * 8 * 128 * 32$	$3 * 3 * 3$	$2 * 2 * 2$	64
Skip	$N * 128 * 8 * 128 * 1$	$1 * 1 * 1$	$2 * 4 * 2$	64
Conv-3D	$N * 64 * 4 * 64 * 64$	$3 * 3 * 3$	$2 * 2 * 2$	128
Conv-3D	$N * 32 * 2 * 32 * 128$	$3 * 3 * 3$	$2 * 2 * 2$	256
Skip	$N * 64 * 8 * 64 * 64$	$1 * 1 * 1$	$4 * 4 * 4$	256
Softmax	$N * 16 * 1 * 16 * 256$	$16 * 1 * 1$		
MaxPool	$N * 16 * 1 * 16 * 256$	$16 * 1 * 1$		
Flatten	$N * 1 * 1 * 16 * 256$			
Dense	$N * 4096$			1024
Dense	$N * 1024$			512
Dense	$N * 512$			10

Table 8.3: Topologie du modèle UpDimV2

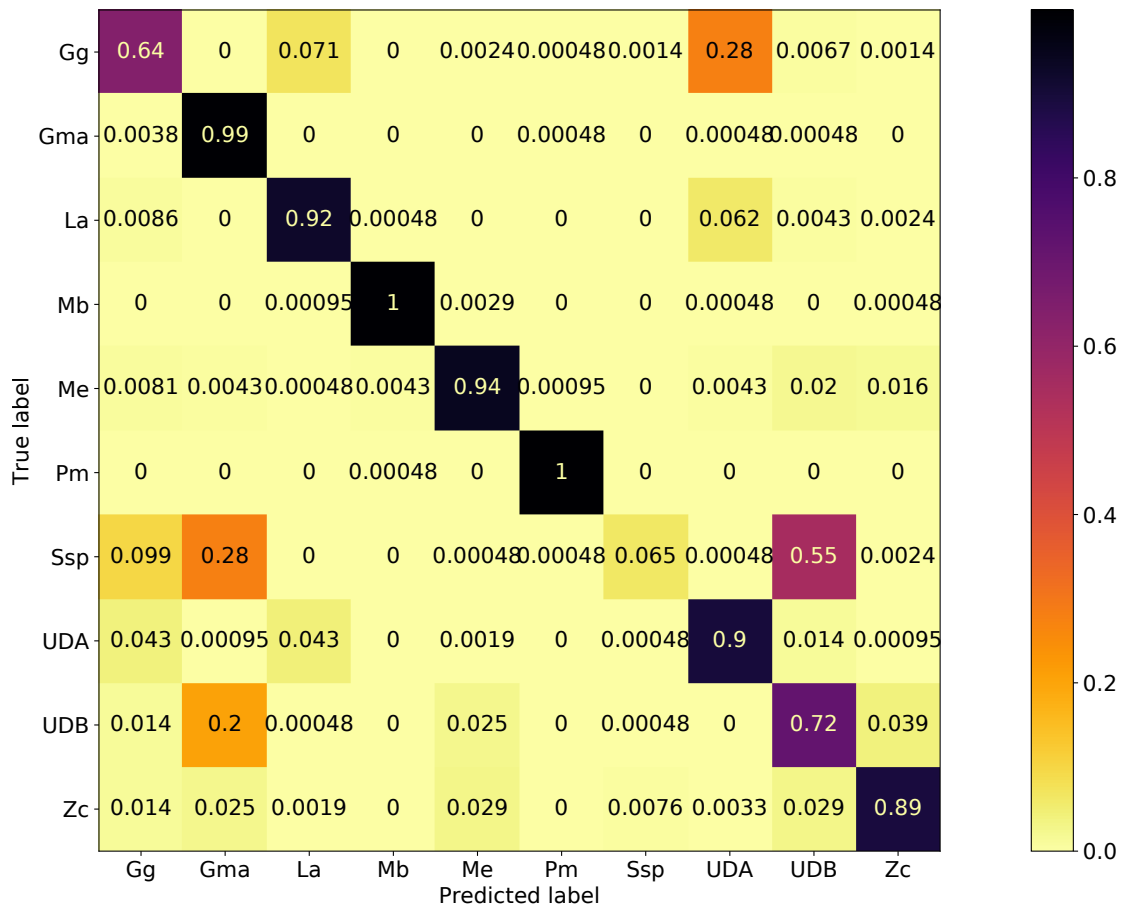


Figure 8.5: Matrice de Confusion sur l'ensemble de test pour DOCC10

d'apprentissage de 0,0002. Une augmentation des données de mixage⁷⁵ utilisant un alpha de 0,2 a été utilisée. La matrice de confusion de ce modèle est Fig. 8.5 et montre un score de bonne classification de 80,62%.

8.10 CIBLAGE D'ESPÈCES SUR DOCC7

Nous avons ensuite traité une version alternative de l'ensemble de données DOCC10, appelée DOCC7 sur les mêmes échantillons, mais limités à seulement 7 espèces, qui sont Gg, Gm,

La, Mb, Me, Pm et Zc. On omet ainsi les classes UDA et UDB et SSP. En effet l'ensemble de données DCLDE a été créé en 2018 par regroupement pour détecter les différentes espèces. Ces deux labels ont ensuite été attribués à des espèces de dauphins non identifiables. Nous avons décidé de les laisser dans le challenge DOCC10 car ils représentent toujours des clics appartenant à des groupes de dauphins, même s'ils ne représentent qu'une seule espèce, contrairement aux autres labels. Mais ils ne correspondent pas à une tâche de reconnaissance d'espèce. De plus SSP a également été supprimé car *Stenella* est un genre et non une espèce. Notre modèle RESNET 8.3 modifié a été entraîné et testé sur DOCC7. Il obtient un score de bonne classification de 95,09% ce qui est donc un modèle utilisable à des cas réels comme SOM.

8.11 CONCLUSION : VERS UNE APPLICATION SUR LES MASSES DE DONNÉES SOM

Nous avons créé en incluant des données du Sphyrna un corpus de référence pour la reconnaissance de plusieurs espèces d'odontocètes. Il totalise 134 080 clics pour 10 espèces. À l'exception d'une partie du test réservée à la notation du défi DOCC10 ouverte avec cet ensemble de données, l'ensemble de données est accessible au public.

Nous avons alors pu construire un nouveau modèle de réseau neuronal pour classer ces transitoires de mammifères marins.

Nous montrons que sur un sous-ensemble de labels forts de 7 espèces précises, nommé DOCC7, nous obtenons un score de bonne classification de 95,09%, ce qui est un score permettant l'usage de ce système de reconnaissance automatique à des fins de suivi de population à l'échelle de toute la base de données acoustiques de SOM.

Avec les enregistrements de la mission Sphyrna Odyssey 2019-2020, contenant d'autres

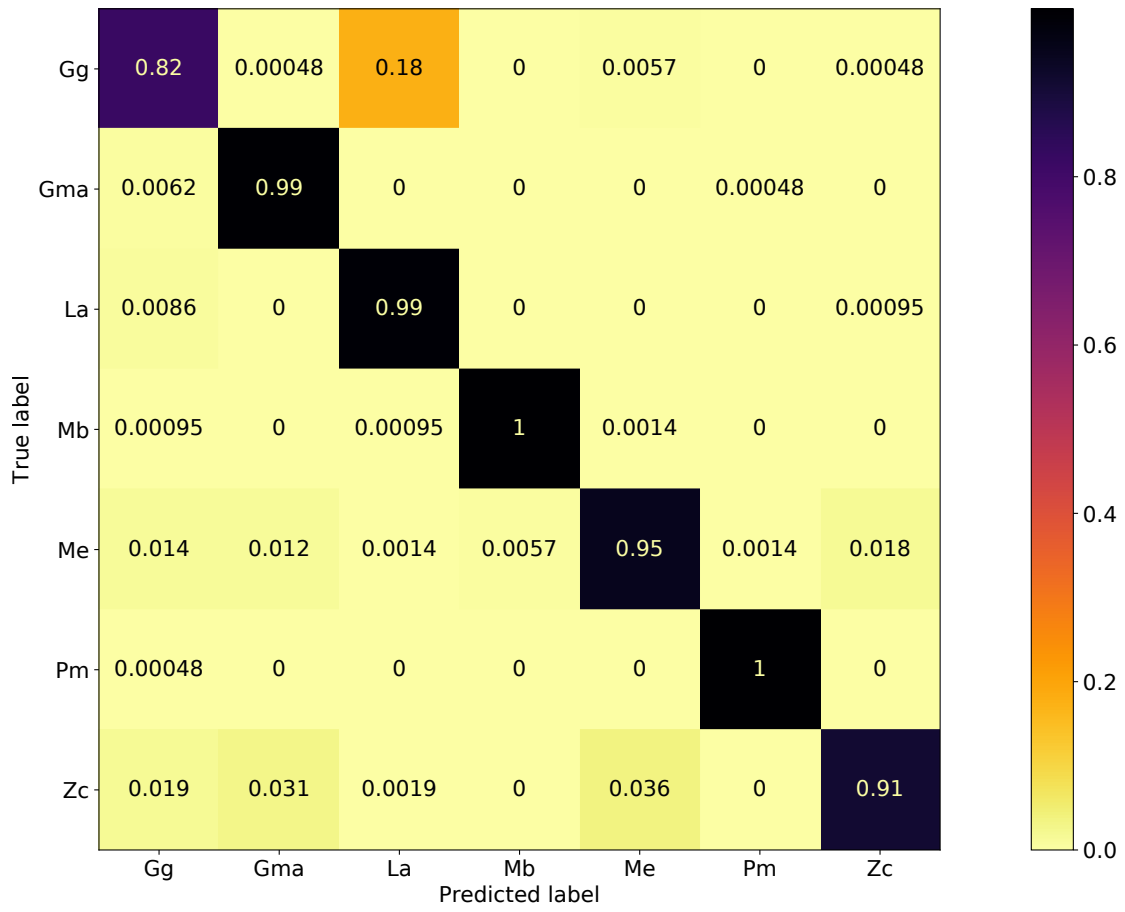


Figure 8.6: Matrice de Confusion sur l'ensemble de test pour DOCC7 démontrant une bonne classification de 95%.

espèces comme le dauphin Bleu-Blanc, nous construisons actuellement un nouveau modèle centré sur les 7 espèces d'intérêt de SO 2019, c'est à dire les 4 déjà apprises : Risso, Ziphius c., Globicéphale et Cachalot, plus trois nouvelles : Bleu-Blanc, Tursiops t. et Globicéphale m. Ce modèle sera alors exécuté sur la masse des données de SOM pour préciser les détections acoustiques à l'échelle de plusieurs To et de toutes les espèces.

9

Trajectographie 3D d'un Essaim de Cachalots

Le grand cachalot, *Physeter macrocephalus*, *Pm* est un Odontocete de la famille des physétéridés. Sa répartition est cosmopolite, dans la mesure où l'on en retrouve dans tous les océans et presque toutes les mers du globe, dont en Méditerranée. Il se nourrit principalement de calmars, de pieuvres ainsi que de divers poissons démersaux, comme les raies, qu'il chasse en plongeant à des profondeurs pouvant atteindre plus d'un kilomètre. Il *Pm* se repère et chasse donc par écho-localisation : il émet des signaux sonores, les clics, qui vont être réfléchis par l'environnement et les proies, et analysés par son cortex auditif (son cerveau est le plus lourd de tous).



Figure 9.1: *Physeter macrocephalus* : le cachalot (crédit photo Sarano, extrait du film CNRS sur nos recherches en biosonar du cachalot https://youtu.be/g3xXM_tycCU).

Ce super-prédateur, le plus grand de la planète derrière les rorquals, est une espèce menacée par l'activité de l'Homme : la chasse à la baleine, la pêche, la pollution sonore et

chimique sous marine, les collisions avec des bâtiments ainsi que le réchauffement climatique ont provoqué une diminution importante des populations. C'est dans ce contexte que la surveillance en continu et en temps réel des *Pm* est de mise.

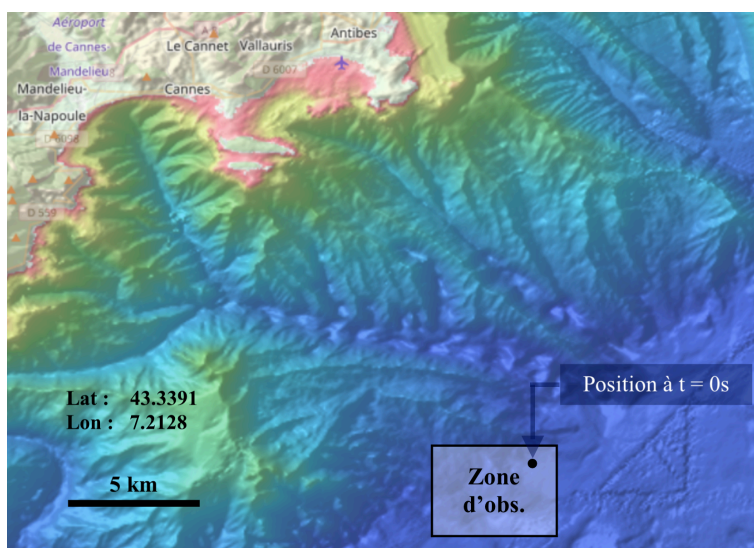
H. Glotin et son équipe développent leurs recherches depuis 2000 sur la localisation et le pistage 3D des sources et l'analyse de scène acoustique, appliquées depuis 2005 sur le cachalot^{34,33,6,42}. Ces algorithmes ont été consolidés avec nos expériences Sphyrna Odyssée 2018⁶⁹. La mission 2019 hérite de toutes ces recherches et permet d'investir de nouveaux paradigmes avec l'usage de plusieurs antennes simultanément déployées.

Ce système se base sur l'écoute des clics émis par les cachalots par plusieurs hydrophones. Ces enregistrements, après calcul, se traduisent en coordonnées 3D des positions au cours du temps des *Pm* animaux émetteurs. Grâce à ces coordonnées, on calculera dans les sections suivantes différents paramètres (vitesses, tortuosité ...) des différents individus, en vue d'une analyse comportementale et / ou biométrique.

Comme indiqué plus haut, les enregistrements ont été effectués avec nos enregistreurs Qualilife JASON de la plateforme technologique SMIoT UTLN. La résolution choisie est de 16 bits avec une fréquence d'échantillonnage de 384 kHz par canal. Ces enregistreurs disposent d'une entrée de synchronisation externe pour l'ajout du PPS (Pulse per Second) d'un récepteur GPS. Ce signal, d'une précision de l'ordre de 50ns, permet donc une synchronisation extrêmement précise des différents canaux d'enregistrement sur des heures d'enregistrements, mais aussi entre les différentes antennes éloignées de plusieurs km. Cette synchronisation ouvre des perspectives importantes pour la construction de super antennes

acoustiques de grande taille constituées par l'ensemble des antennes des drones, permettant un suivi d'individus ou de groupes sur des très longues distances (plusieurs dizaines de kilomètres) et avec croisements de vues. Nous décrivons ici les analyses complètes issues d'une des antennes de la mission, qui sera complétée par une contre analyse par une seconde antenne simultanément active sur site.

Les données traitées dans la suite ont été acquises le 14 janvier 2020, à 12 miles nautiques au Sud d'Antibes et de Monaco. Bien que la période de contact avec le groupe d'individus soit de plus de 3h, la partie exploitable en terme 3D avoisine les 2h. La position exacte de la zone d'observation est visible sur la carte Fig. 9.2. Cette séquence est accompagnée de notes précises de terrain prises par l'équipe depuis le OneCat, avec des observations d'environ 3 individus présents à tour de rôle en surface.



9.1 TEMPS DE DELAIS D'ARRIVÉE DU SIGNAL (TDOA)

L'antenne considérée ici est de 4 hydrophones qui permettent la mesure, pour chaque détection acoustique, des écarts de temps d'arrivée du signal sur chacun des canaux. Ces intervalles sont appelés TDOAs pour "Time Difference Of Arrival" et sont la base du pistage 3D.

La figure 9.3 illustre le spectrogramme d'un clic de cachalot, enregistré par ces 4 hydrophones. On note les décalages temporels entre les signaux de chacune des voies.

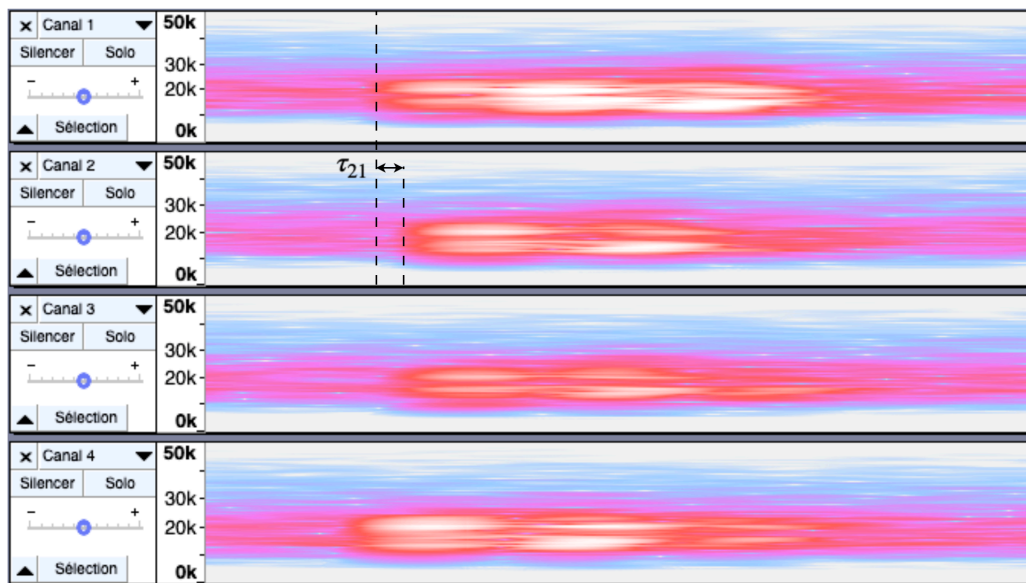


Figure 9.3: Visualisation du spectrogramme d'un clic détecté par les 4 hydrophones le 14 janvier 2020. Durée de la fenêtre 12 ms.

Plus particulièrement, le $TDOA_{21} = \tau_{21} = t_1 - t_2$

Nous rappelons ci-dessous le principe de base associé au TDOA dans le cas d'une antenne composée de 2 hydrophones, et son utilisation pour les calculs dans l'espace (2D ou 3D).

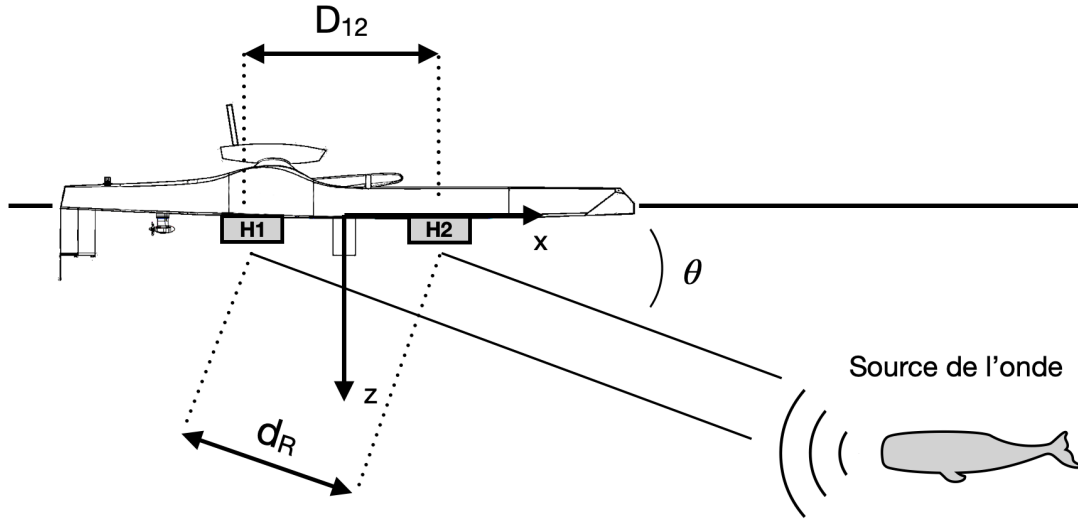


Figure 9.4: Principe du TDOA pour une antenne de 2 hydrophones.

Nous calculons l'angle de la source par :

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{d_R}{D_{12}} \right)$$

avec :

- D_{12} : distance entre les hydrophones 1 et 2,
- t_1, t_2 : dates de réception du clic pour les hydrophones 1 et 2,
- $d_R = v \cdot \tau_{12}$: distance due au retard de réception de l'onde par H1 par rapport à H2.

9.2 SOLVEUR LINÉAIRE

Nous considérons le système d'équations paramétrées par la célérité d'une onde acoustique dans l'eau, la fréquence d'échantillonnage de nos enregistrements, et les positions précises des quatre hydrophones. Ce système résout linéairement la direction vers la source du son

enregistré (gisement), c'est à dire les 2 angles Azimut (le cap), et Elevation (0° correspond à peu près à la surface de l'eau), cf Fig. 9.5.

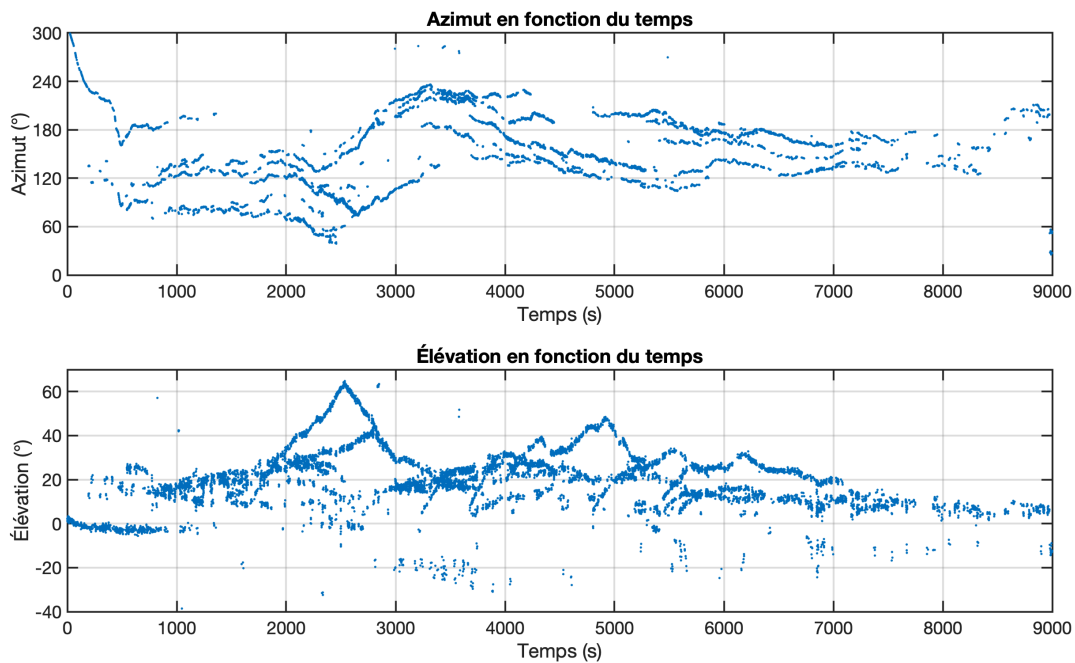


Figure 9.5: AZ(t) & EL(t) qui sont le gisement de la source du clic.

9.3 PISTAGE

La figure 9.5 nous montre des estimations précises des directions vers les sources. Il faut cependant garder à l'esprit que tous les animaux (les pistes) enregistrés sont représentés ici en une seule piste. Pour avancer dans notre processus, il est nécessaire de procéder à une séparation de ces pistes, afin de regrouper les détections par animal. Nous nous basons

alors sur le groupement (clustering) DBSCAN²¹ pré-établi sur les TDOAs. Ce clustering effectue automatiquement un premier groupement (en moyenne quelques dizaines de clics par groupe). La probabilité pour que les clics de chacun de ces petits groupes proviennent d'un même animal est très élevée.

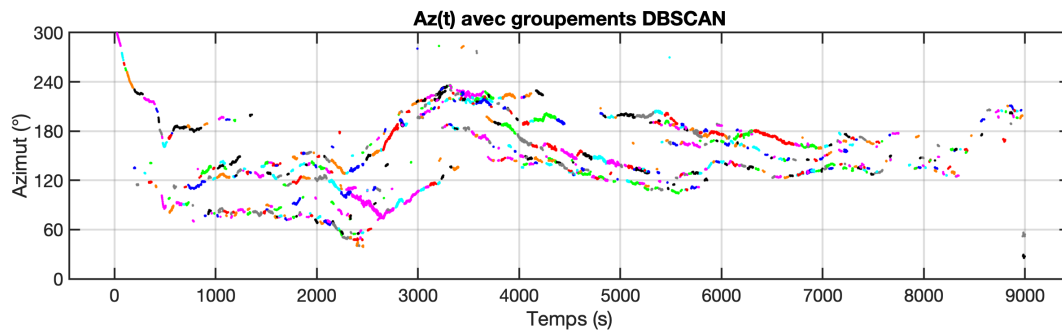


Figure 9.6: Groupements DBSCAN sur la trace AZ(t).

Nous avons ensuite pisté manuellement plusieurs centaines de clics de cachalots en regroupant plusieurs de ces petits groupes de clics consécutifs. Puis nous avons mis au point un algorithme de pistage automatique (cf. Fig. 9.7).

On voit que les pistes sont non seulement séparées mais aussi filtrées. En effet, il y a une piste "poubelle" qui regroupe tous les petits groupes de clics qui n'ont pas pu être associés aux pistes réelles. Cette piste 0 n'est pas affichée, et nous écarterons aussi par la suite la piste 1 que l'on associe à un "mirage" sur la coque du bateau.

9.4 ESTIMATION DES POSITIONS 3D DES SOURCES

Nous avons vu qu'il est possible de calculer précisément la direction vers la source des émissions sonores. Cependant, une direction à elle seule ne suffit pas lorsque l'on veut localiser

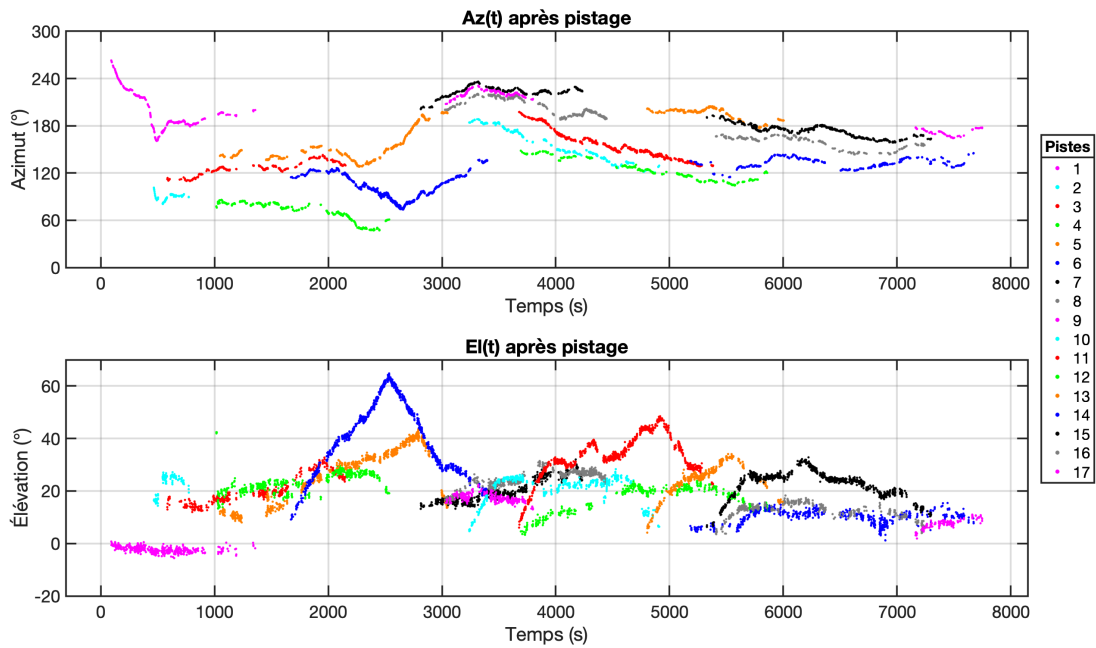


Figure 9.7: Azimut et Élévation, après pistage.

cette source. Nous devons en effet associer la direction à une distance pour déterminer sa position, et c'est l'objet de cette section.

En parallèle à la résolution du système d'équations linéaire, nous avons un deuxième solveur qui nous permet d'estimer la position 3D de la source (dans le repère de l'antenne). Ce solveur est basé sur la méthode des moindres carré, il est ainsi dit "non linéaire". Il consiste à minimiser une fonction de coût pour approximer la solution recherchée. Nous devons cependant garder à l'esprit la forte non linéarité, et le fait que ce solveur peut être biaisé en tombant dans des minimums locaux.

On initialise le solveur avec 4 positions (P_1, P_2, P_3, P_4) et on limite les résultats à un cube de 5000m de côté. Le solveur converge vers une solution pour chacune de ces 4 positions initiales et un résidu est calculé après chaque résultat, ce qui permet de juger de la "pertinence"

des solutions^{42,6}. La figure 9.8 ci-dessous donne un aperçu des positions 3D estimées par le solveur non linéaire, pour l'enregistrement entier, et la position initiale P_1 uniquement (on a ces traces pour chaque position initiale).

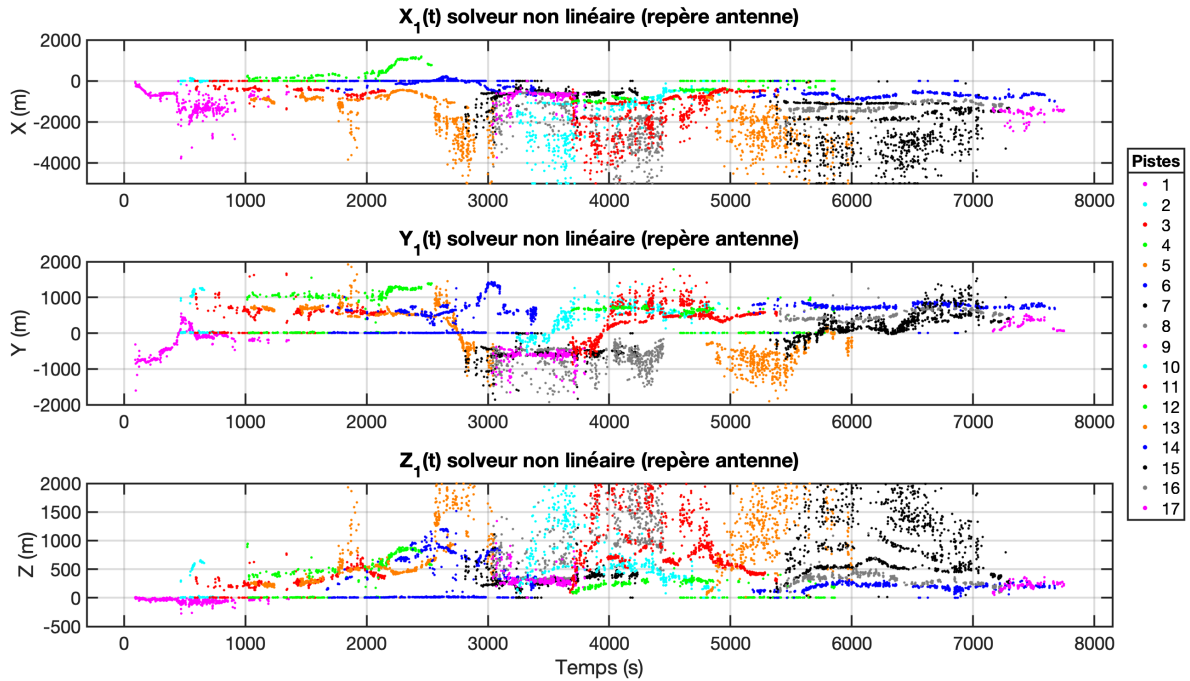


Figure 9.8: Coordonnées 3D des pistes estimées par le solveur non linéaire (initialisé à P_1).

Bien qu'il permette une estimation 3D des positions des sources, le solveur non linéaire peut tomber dans un minimum local. Nous avons alors travaillé à recouper les informations données par le solveur linéaire et les positions estimées par le solveur linéaire. Il nous est alors possible d'obtenir les positions 3D des sources exprimées dans le repère de l'antenne, avec un minimum de bruit.

9.5 STABILISATION NUMÉRIQUE PAR L'ASSIETTE MPU

La centrale inertielle (MPU) est un instrument indispensable dans notre processus. En effet, le bateau, le drone, et donc les antennes, sont soumis aux effets de la houle, du vent. En conséquence, les angles de Roulis, Tangage, et Lacet varient au cours du temps. Les positions brutes sont dans le repère de l'antenne. Nous devons donc transposer ces coordonnées dans le repère absolu, formé par un plan (X,Y) parfaitement horizontal.

Ce changement de repère s'effectue en 2 étapes distinctes : (i) prise en compte des données issues de la centrale inertielle, (ii) intégration des données GPS, ce qui nous permet de recentrer le repère du point de vue terrestre et selon la convention Y : Northing, X : Easting.

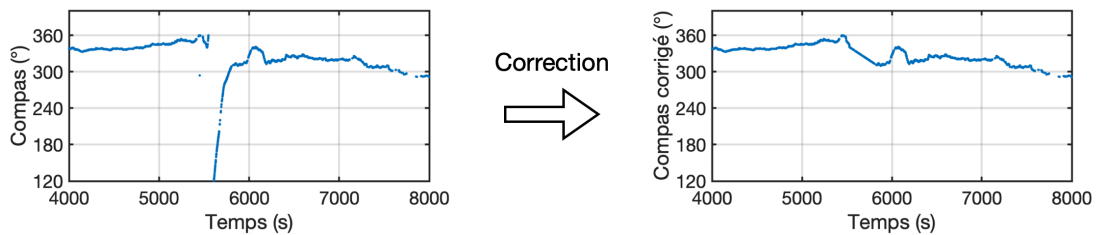


Figure 9.9: Correction d'artefacts (data MPU - Compas).

Soient les coordonnées (X,Y,Z) dans le repère intermédiaire formé par les axes X:Nord, Y:Est, Z vers le centre de la Terre et son origine centrée sur l'antenne. On a :

$$(X, Y, Z)_{MPU} = R.(X, Y, Z)_{ANT}$$

avec :

$$R = R_z(\alpha).R_y(\beta).R_x(\gamma)$$

R est la matrice de rotation globale formée par les 3 matrices de rotation élémentaires liées aux angles de lacet (yaw), tangage (pitch), et roulis (roll), respectant la convention Tait-Bryan et mesurés par notre MPU (Yocto-Puce 3D) :

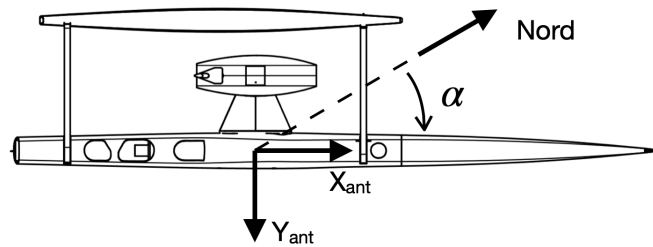


Figure 9.10: Angle de Lacet (Yaw).

La matrice de rotation associée à l'angle de Lacet est :

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

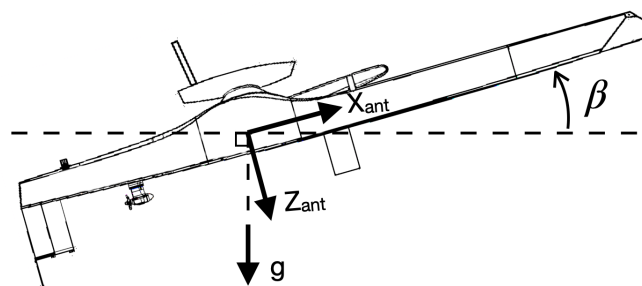


Figure 9.11: Angle de Tangage (Pitch).

La matrice de rotation associée à l'angle de Tangage est :

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

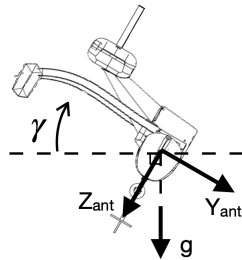


Figure 9.12: Angle de Roulis (Roll).

La matrice de rotation associée à l'angle de Roulis est :

$$R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

Enfin, on prend en compte le fait que l'antenne se déplace au cours du temps, car son support est en dérive. Ceci est réalisé via l'intégration des données GPS.

9.6 CONCLUSION

L'ensemble des traitements de l'antenne mobile était un défi. Nous obtenons les pistes dans chaque coordonnée au cours du temps (Fig. 9.13).

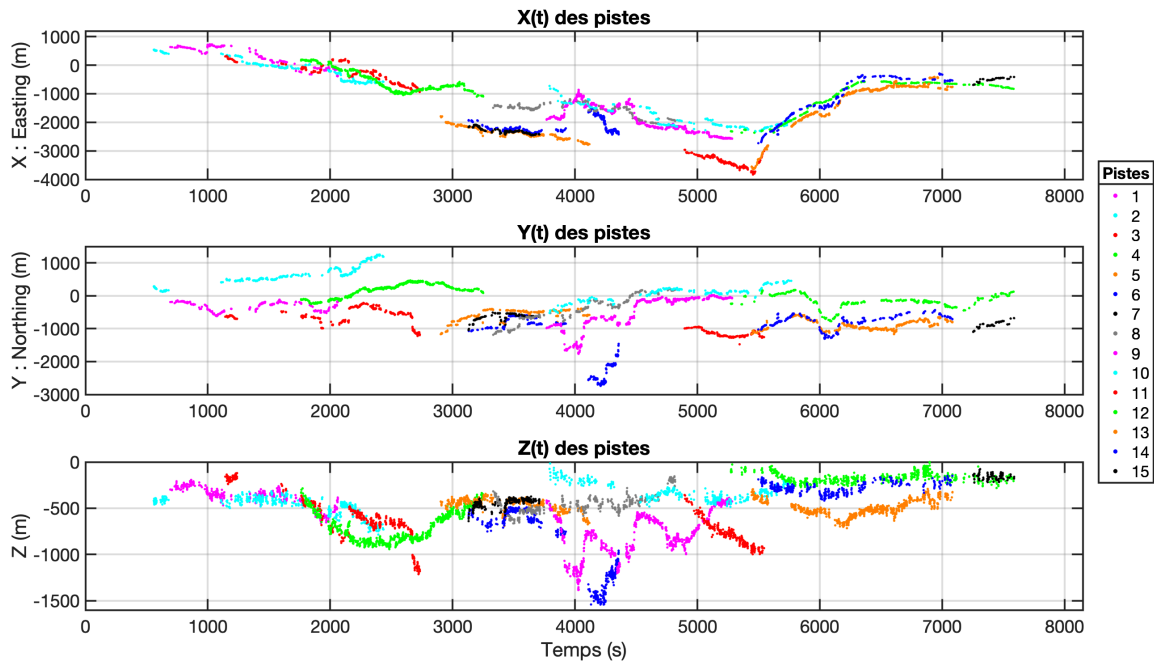


Figure 9.13: Coordonnées 3D des pistes en fonction du temps (repère absolu).

L'état de l'art n'avait pas de tels résultats, comme le démontre la session sur les drones de DCLDE2018³⁸, la plus récente conférence experte du domaine.

Nous représentons dans la suite en 3D ces pistes (Fig. 9.14). Nous avons également conçu une page web interactive* afin de visualiser des trajectoires de ce groupe d'individus sous n'importe quel angle de vue (Fig. 9.15).

Dans les chapitres suivants, nous analysons les déplacements abyssaux de cet essaim de cachalots en pleine activité, et en montrons la richesse et la précision en terme de coordination de leur biosonar.

Ces résultats constituent une première mondiale.

*<http://philippe.cosentino.free.fr/vamos/sphyrna-odyssey>

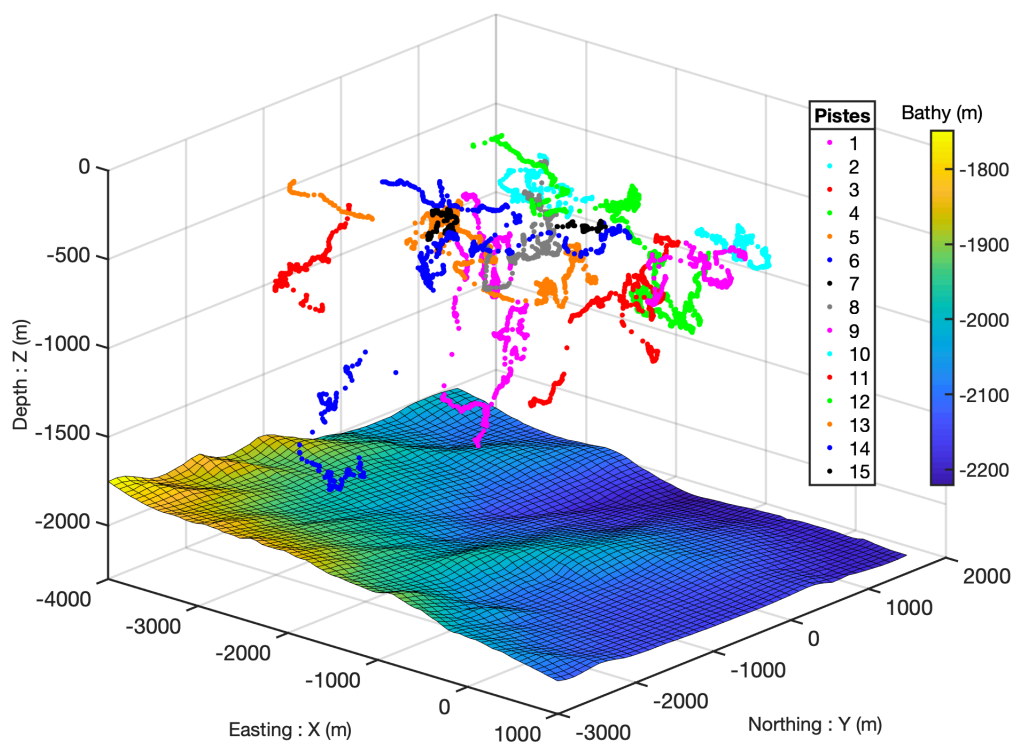


Figure 9.14: Traces 3D des 15 pistes (enregistrement entier).

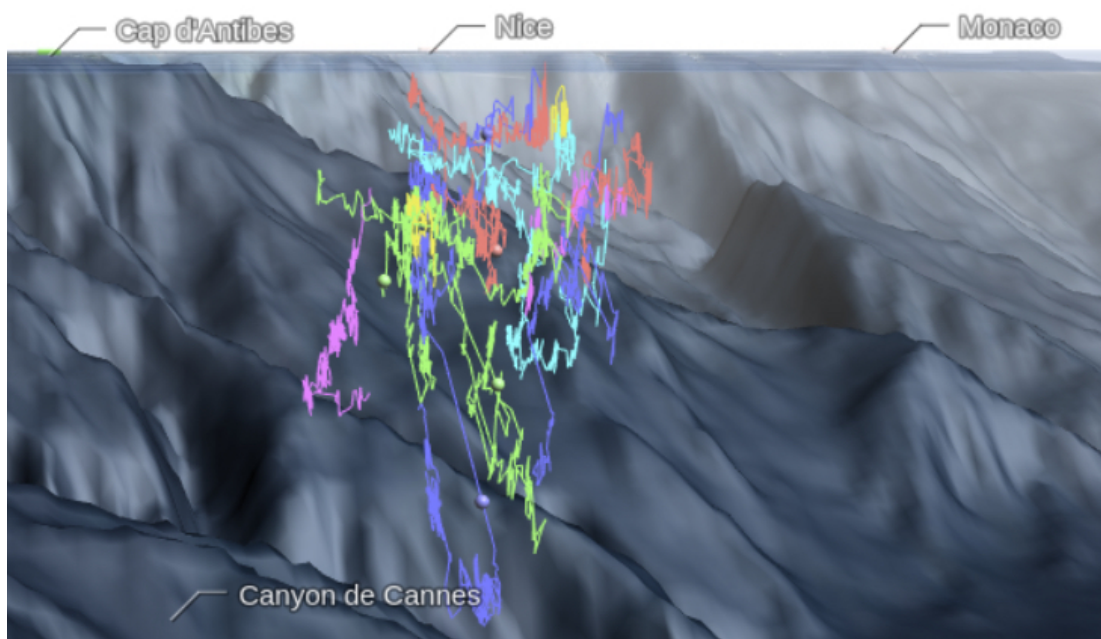


Figure 9.15: Trajectoires 3D des pistes, visualisables de façon dynamique (crédit interface : Philippe Cosentino).
Consultable en ligne sur : <http://philippe.cosentino.free.fr/vamos/sphyrna-odyssey>.

10

Éthoacoustique de chasse en groupe de
cachalots

Ce chapitre analyse finement les représentations des trajectoires 3D du chapitre précédent. Nous avons conçu des animations multi-vues afin de pouvoir observer en détail et analyser ces majestueux balet. La première animation est formée de quatre vues en différentes perspectives et synchrones et permettent de suivre les pistes (animaux) avec leur index de 1 à 15 10.1. A noter que ce groupe est a priori composé de sept cachalots, plongeant au moins 2 fois chacun.

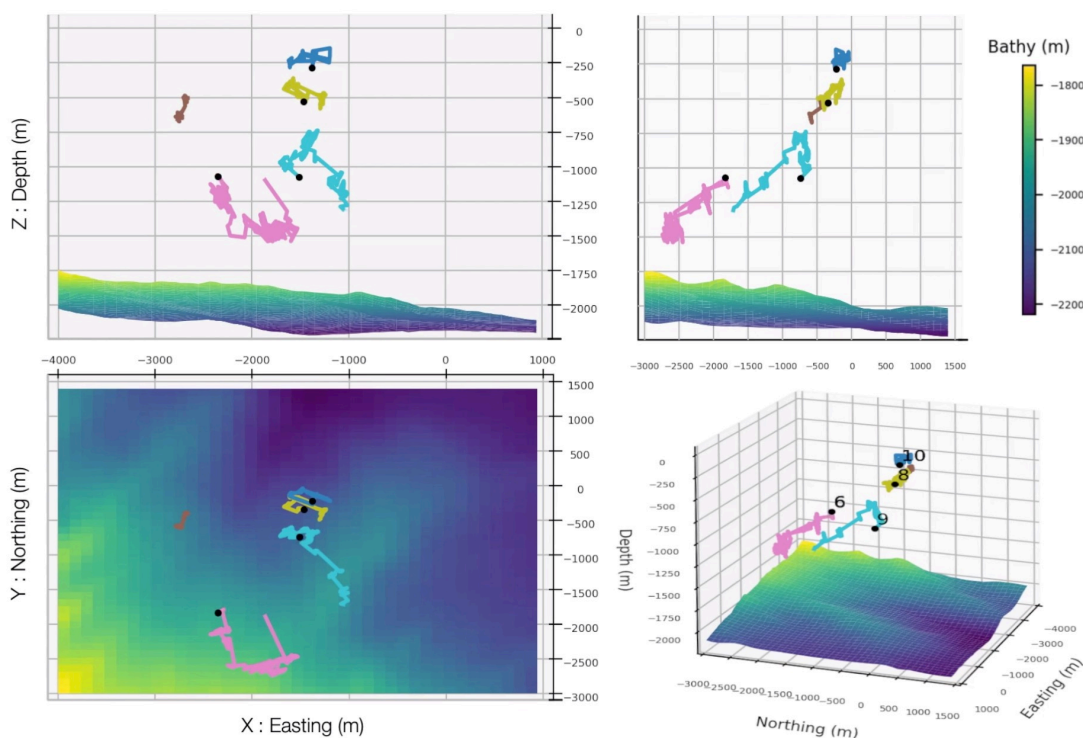


Figure 10.1: Animation multi-vues du 14 janvier 2020 montrant les trajectoires des pistes. Animation complète disponible sur http://sabiiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_etal_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_3DtracksX_Y_Z.mp4

Afin d'étudier ces trajectoires, ainsi que le comportement de ces teutophages, nous travaillons sur des descripteurs classiques dans les sections suivantes.

10.1 VITESSES

La vitesse ascensionnelle est la vitesse à laquelle les pistes se déplacent selon l'axe vertical. Elle est positive en phase d'ascension, et négative en phase de plongée. Elle a été calculée comme suit : $V_z = (z_{i+1} - z_i) / (t_{i+1} - t_i)$ avec z_i la profondeur (en m) au temps t_i (en s). La vitesse instantanée a été calculée à partir des positions 3D lissées par médiane glissante (fenêtre de 10 valeurs). Elle a été calculée de la même façon que la vitesse ascensionnelle mais en prenant en compte cette fois les trois coordonnées x, y et z.

La vitesse moyenne a été calculée pour chaque piste, à chaque instant. Il s'agit de la moyenne des vitesses instantanées dans une fenêtre centrale glissante de 10 clics autour de l'instant t , cf Fig. 10.2.

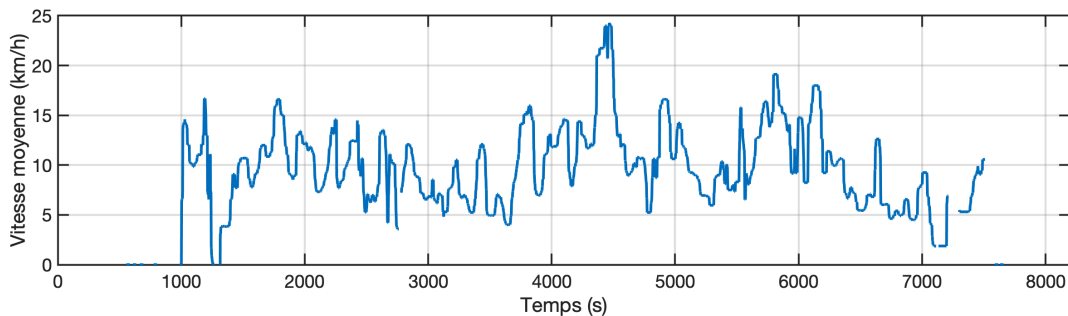


Figure 10.2: Vitesse moyenne des pistes.

Les calculs donnent un ordre de grandeur des vitesses compatible avec l'état de l'art (entre 5 et 20km/h), ainsi qu'un aperçu des 2 dynamiques. A l'échelle de l'enregistrement, on discerne des phases de chasse et de déplacement, mais aussi à une plus petite échelle des variations et étendues des vitesses au cours d'une même phase (accélération puis repos, d'une durée de 4 min environ et d'une bonne régularité).

10.2 TORTUOSITÉ

La tortuosité est une grandeur utilisée en écologie comportementale et visant à estimer l'importance du caractère sinueux du parcours d'un prédateur ou d'une proie. Il existe un grand nombre d'indicateurs de la tortuosité^{7,3,18}, qui diffèrent en fonction du type de mouvement, et donc de chemin, réalisé par l'animal, ou de l'expérience.

Ces différents indices peuvent ainsi refléter l'efficacité d'orientation de l'animal lors d'une recherche orientée, ou sa capacité à couvrir une aire de recherche importante lors d'une recherche de nourriture. Certains indices donnent directement une indication de la tortuosité tandis que d'autres y sont négativement corrélés.

Nous utilisons les valeurs de tortuosité comme indicateur des périodes de chasse, la proie fuyant a priori par des accélérations chaotiques. Notre calcul de la tortuosité dans l'espace se base sur la formule de l'indice de droiture (Straightness) D/L , présenté notamment par^{7, 3}, et adapté à une traque en 3D, avec D et L tel que :

$$St = \frac{D}{L} = \frac{|(x_n - x_0; y_n - y_0)|}{\sum_{j=1}^n l_j}, \quad (10.1)$$

avec l_j les longueurs des différents pas (ici constants), $(x_0; y_0)$ la position de départ et $(x_n; y_n)$ la position d'arrivée. De plus on a $0 < \frac{D}{L} < 1$, avec 0 correspondant à une marche aléatoire avec retour à l'origine et 1 à une ligne droite.

Cet indice est facile à calculer, et c'est de plus un estimateur non biaisé de l'efficacité de l'orientation dans un chemin orienté avec but à une distance finie.

Puisque l'indice de droiture (Straightness) est inversement corrélé à la tortuosité, nous posons :

$$Tort = \frac{L}{D}. \quad (10.2)$$

Dans la suite, nous utilisons $\log(Tort)$, plus pertinent du fait de l'étendue des valeurs de tortuosité. La figure 10.3 illustre la tortuosité des pistes sur la totalité de l'enregistrement. Une fenêtre centrale de 16 clics a été choisie pour ce calcul.

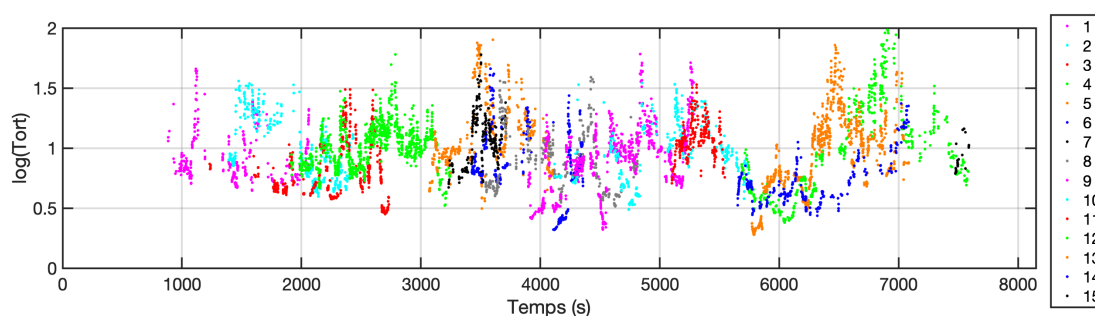


Figure 10.3: Tortuosité des 15 pistes sur tout l'enregistrement.

Il apparaît clairement 10.3 que les pistes alternent entre des phases de déplacements peu tortueux, sûrement phases d'observation par Biosonar comme on le verra dans la suite, et des phases tortueuses, sans doute de poursuite et de prédation*. Chaque pic de tortuosité pourrait signifier une capture de proie réussie, indice à corrélérer donc avec l'Intervalle Inter Clic connu pour sa corrélation à l'approche des proies^{6,35,69}.

*La fenêtre de calcul de la tortuosité est réduite à 16 clics pour l'étude individualisée, par piste pour refléter le changement d'échelle temporelle.

10.3 STATISTIQUE DES DISTANCES INTER-INDIVIDUS

La distance entre chaque paire d'individus est un bon indice pour mesurer leur coordination. Les détections étant asynchrones, nous couplons les pistes qui sont détectées dans chaque fenêtre de 60 secondes, glissante d'un pas d'une seconde.

Le calcul est fait pour au moins deux pistes détectées au sein d'une même fenêtre temporelle. Enfin nous calculons la moyenne de ces distances à chaque instant, cf. Fig. 10.4.

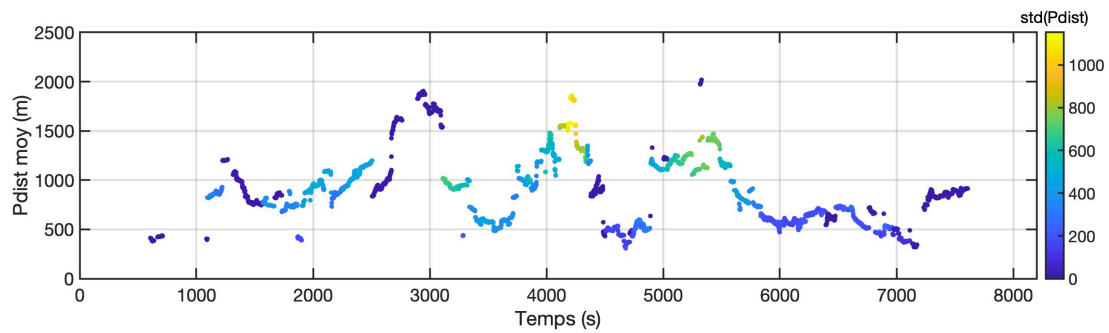


Figure 10.4: Moyenne des distances entre les pistes.

En moyenne les distances entre les pistes peuvent doubler au moment des plongées, notamment autour des temps 3000 s, 4000 s et 5000 s (cf. Fig. 9.13).

Nous nous intéressons maintenant aux distances minimales et maximales, afin d'avoir une vue globale de l'enveloppe des distances entre les couples d'individus, de la proximité qu'ils entretiennent entre eux, et des périodes où celle-ci est rompue (Fig. 10.5).

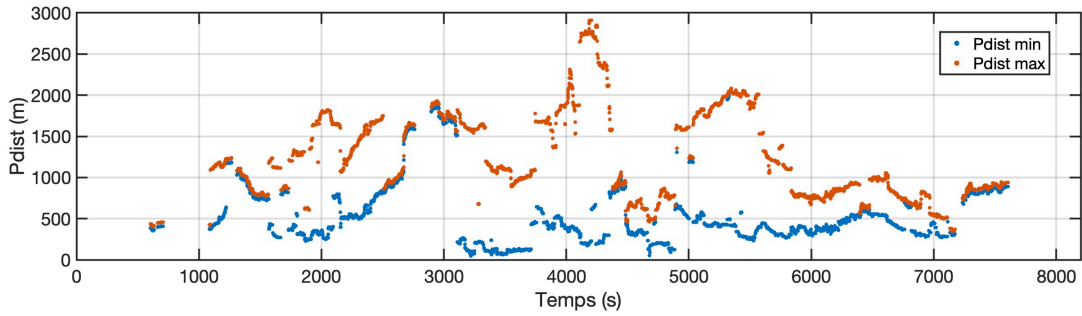


Figure 10.5: Distance entre les pistes (minimales et maximales)

Globalement, la distance minimale entre les individus, considérés alors ”à proximité”, se situe entre 300 et 500m. L’histogramme 10.6 le confirme avec un pic à 400m.

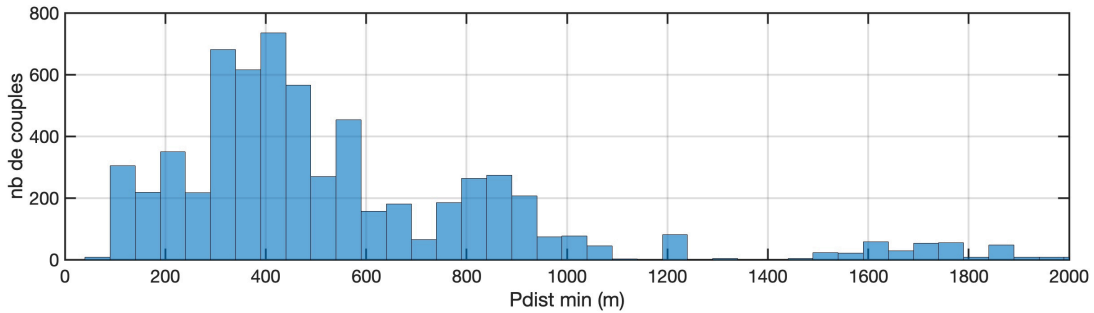


Figure 10.6: Histogramme des distances minimales entre les pistes.

Pour une source de clic à 180 dB, la théorie (voir calcul plus bas équation 10.3) nous annonce que la distance de parcours aller et retour du clic est de 430m. On peut donc penser que chaque cachalot à 430 m l’un l’autre restent en contact, la perception du sonar du voisin indiquerait son cap et assurerait leur coordination.

Nous montrons dans la suite cette coordination au travers des distances inter-pistes en fonction de la profondeur (Fig. 10.7).

Entre les secondes 1000 et 2000, on constate une première plongée de -300 m jusqu’à -700 m, pendant laquelle les individus restent groupés. Puis, une première grosse plongée

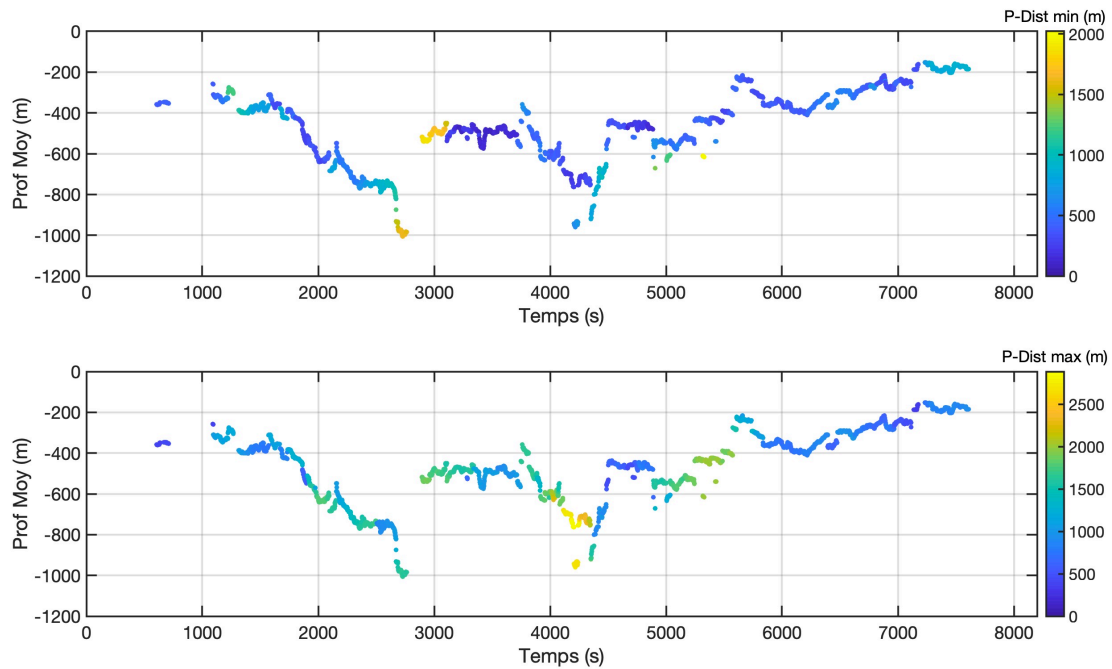


Figure 10.7: Évolution jointe des distances entre pistes ainsi que de leur profondeur moyenne.

commence. Les cachalots se séparent alors et ne sont plus que deux individus à cliquer, les autres restant alors silencieux (pdist min et max identiques entre 2000 et 3000 s). Après être remontés, les individus entament une deuxième grosse plongée à 4000 s, cette fois ci à quatre et parfois avec un cinquième individu, de -500 m à -1000 m. À partir de 5500 s jusqu'à la fin de l'enregistrement, les cachalots restent groupés majoritairement à faible profondeur (entre -200 et -400 m).

En sous-groupes, les cachalots sont distants d'environ 430m (Fig. 10.6). Cela correspond à peu près à la distance théorique de $R=470\text{m}$ parcourue par les clics, calculée grâce à la formule de l'énergie de l'écho (voir 10.3) pour une source de 180dB⁶⁵, une cible de diamètre $d=1\text{m}$, et une absorption $\alpha=1,3\text{ dB/m}$ (celle-ci dépend de la fréquence centrale $f=12,5\text{kHz}$ mais aussi

de la salinité, l'acidité, la température, et la profondeur) :

$$EE = S - 40 \log(R) - 2\alpha(f)R + 20 \log\left(\frac{d}{2}\right). \quad (10.3)$$

Les cachalots émettant leurs clics à différents niveaux d'énergie, cette distance peut varier du simple au double. Ces résultats laissent à penser que les cachalots se servent des sonars de leur voisins en plus du leur. Cela aurait pour conséquence de les rendre plus efficaces dans leur prospection de l'environnement et de proies.

La distribution des distances maximales (Fig. 10.8) dans une fenêtre de temps de 60s est de 800m (environ le double de la distance minimale). Ceci pourrait donc correspondre à la limite de contact de deux animaux avec des émissions plus directives et plus puissantes, de l'ordre de 210 dB. Enfin, un dernier mode de distance à 1600m, le double de la distance maximale la plus probable, est présente dans cette alliance de chasse, peut-être avec un contact conservé mais très faible entre les animaux à une telle distance.

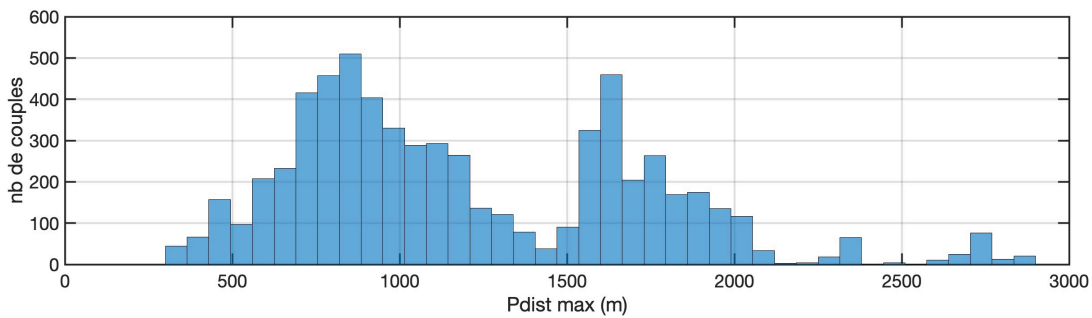


Figure 10.8: Histogramme des distances maximales entre les pistes.

Dans tous les cas, nous pouvons raisonner en terme de réseau et de propagation par noeuds (animaux) d'une information permettant de maintenir la cohésion de l'Alliance. D'autres statistiques sont en cours en fonction de l'Intervalle Inter Clic de la distance entre

les individus notamment, et des formes d'ondes des clics. Les calculs par IA avancée sont effectués pour mesurer la corrélation entre la dispersion de l'essaim (plus ou moins dispersé) avec les formes d'ondes des clics de chaque individu.

10.4 CROISEMENT DES OBSERVATIONS

Nous allons dans la suite étudier de plus près ces mouvements groupés de chasses.

Nos calculs sur ces 700 minutes cumulées de pistes de chasse démontrent un comportement de cohésion et d'intelligence collective. Ils montrent que les individus utilisent une technique de relais maîtrisée afin d'optimiser une rotation sonde / surface, et maintenir un effort constant d'observation des abysses, ne jamais perdre contact avec le gisement de proies. Ce groupe travaille par apnées de 50 minutes, et il y a toujours, durant ces 2 heures, 2 ou 4 individus regroupés vers -500 m et 2 ou 4 regroupés en surface. Nous pensons que ce groupe est composé de 7 individus, 3 femelles adultes et 4 juvéniles, cela est en cours de précision par nos calculs des Intervalles Inter Pulses (IPI) corrélés à la taille des individus.

La majorité des animaux commence à cliquer à environ -400 m comme nous l'avions déjà constaté sur la trajectoire calculée en août 2018 depuis le Sphyrna⁶⁹. Il est intéressant de noter qu'ils se regroupent à cette même profondeur. Puis on observe que les prédateurs entrent dans un mode de recherche collaborative, comme nous allons le décrire. Enfin, certains plongent jusqu'à une profondeur de 1500m, tandis que d'autres restent groupés. Nous identifions également des schémas relatifs à la profondeur, aux positions 3D ainsi qu'à la tortuosité. Certaines de ces observations sont fascinantes.

Nos analyses n'ont pas montré de relation entre la distance inter-piste (min ou max) et la

tortuosité. Cependant, nous avons pu observer une tendance avec la tortuosité minimale qui atteint un minimum vers les 500m de distance inter individus (Fig. 10.9) de façon récurrente au cours de l'enregistrement. Ceci est cohérent avec le fait que c'est la distance moyenne de cohésion et l'avancée colinéaire, à priori à faible tortuosité, ce qui leur permet de garder le même cap.

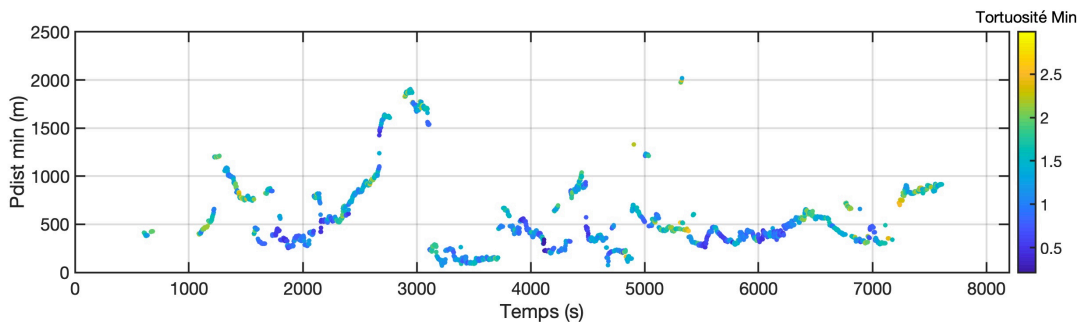


Figure 10.9: Evolution de la tortuosité minimale en fonction des distances inter-pistes minimales

10.5 CODIRECTION

Nous allons plus loin dans l'analyse des cohérences, en mesurant maintenant la codirection des pistes. En effet, lorsqu'on parle de déplacement d'une piste, on le modélise sous la forme d'un vecteur. Ce vecteur peut-être plus ou moins colinéaire avec le vecteur déplacement d'une autre piste, indiquant donc si les pistes se déplacent de concert ou non. Nous calculons la codirection par le produit scalaire $\langle \cdot, \cdot \rangle$

$$Codir(t) = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n \langle D_p(t), D_m(t) \rangle$$

avec :

n : nombre de pistes observées à l'instant t ,

D_m : le vecteur déplacement moyen des pistes,

D_p : le vecteur déplacement de chaque piste.

Nous calculons deux indices de codirection. Un premier indice, en 3D, indique à quel point les pistes vont dans la même direction dans l'espace. Un second indice de codirection, cette fois en 2D et noté CodirXY indique à quel point les pistes se déplacent de concert dans le plan horizontal. Ceci nous permet de faire abstraction des plongées et remontées des cachalots, et de comparer la synchronisation des déplacements des individus non seulement dans l'espace, mais aussi dans le plan. Nous représentons Codir et Codir XY Fig. 10.10.

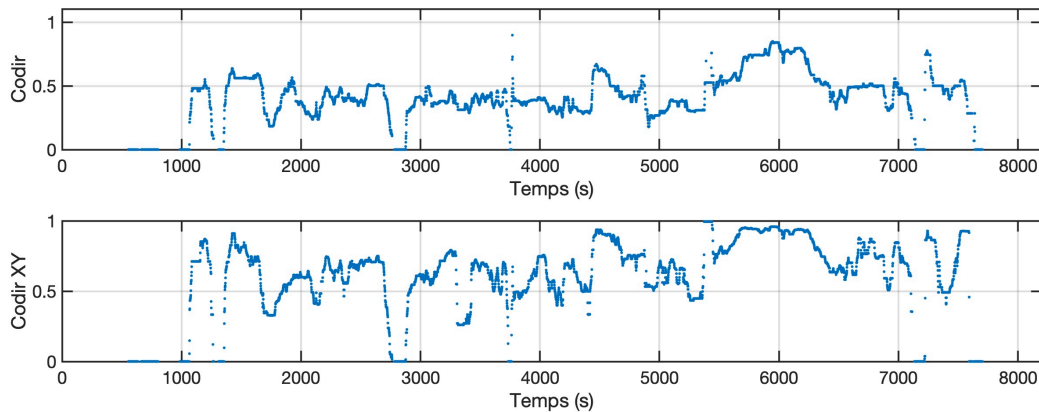


Figure 10.10: Codirection des pistes (en 3D et dans le plan XY).

Ces graphiques de codirection nous permettent de comprendre à quel point les pistes étudiées forment un groupe cohérent, intelligent et organisé. En effet, CodirXY est supérieur à 0.5 quasiment sur toute la durée de l'enregistrement, ce qui montre un écart maximal de 45° signifiant que la majorité des pistes suivent en finalité le même cap.

Le fait que Codir (en 3D, Fig.10.10) soit majoritairement inférieur à 0.5, tandis que Codir XY est souvent proche de 1, nous montre que les cachalots sont la plupart du temps en opposition de phase de plongée / surface. C'est cette alternance de croisements que l'on démontre avec ces différences entre Codir faible et Codir XY élevé (cf Fig.9.13 des positions 3D). Ces résultats confirment en tous points ce que l'équipage présent ce jour-là sur le bateau a observé de ce groupe d'individus.

Toutes ces observations suggèrent que les cachalots coordonnent leur chasse et emploient très probablement des stratégies pour détecter, observer, choisir et rabattre leurs proies et les capturer. Nous allons même jusqu'à penser qu'ils pourraient communiquer via des coda de clics pour se coordonner entre eux. Nous détaillons quelques cas représentatifs dans la suite.

10.6 PRINCIPE D'ALLIANCE DE TEUTOPHAGES DANS LES ABYSSES

Les résultats que nous obtenons nous conduisent à proposer le principe d'Alliance de teutophages dans les abysses. Une Alliance en cétologie est définie⁶³ comme le lien coopératif qui persiste au cours du temps entre les alliés. C'est un mode connu chez les grands prédateurs (lions, loups...). Les cas les plus étudiés d'Alliance chez les cétacés sont les paires ou triplets de grands dauphins *Tursiops truncatus* qui coopèrent pour différentes tâches. Une Alliance est souvent établie entre individus d'une même famille.

Dans les sections suivantes, nous allons (i) tester l'hypothèse que nous mettons en évidence d'une alliance de teutophages (cachalots) en chasse, (ii) tenter de tirer des constantes ou stratégies globales de ce type d'Alliance.

Toutes les représentations graphiques et animées audiovisuelles que nous présentons dans

la suite sont les reconstructions fidèles des calculs précédents. Les cônes des sonars, du fait du faible degré de liberté des cervicales du cachalot, sont simplement orientés suivant la tangente de la direction du cachalot au moment de l'émission du clic.

10.7 UNE ALLIANCE EN ABYSSE POUR UNE OBSERVATION DISTRIBUÉE CENTRIFUGE

Le groupe de 5 individus que nous mesurons et représentons dans Fig. 10.11 montre une possible stratégie de détection omnidirectionnelle produite par le groupe entier. Chaque cône sonar offre une vue à l'extérieur du groupe. La synthèse des vues pourrait donner une information globale sur un gisement de proie(s) à suivre plus précisément par la suite. Nous illustrons également la synchronisation espace-temps des biosonars à 4 individus avec ces deux extraits de nos vidéos de nos calculs bruts (il n'y pas de retouche).

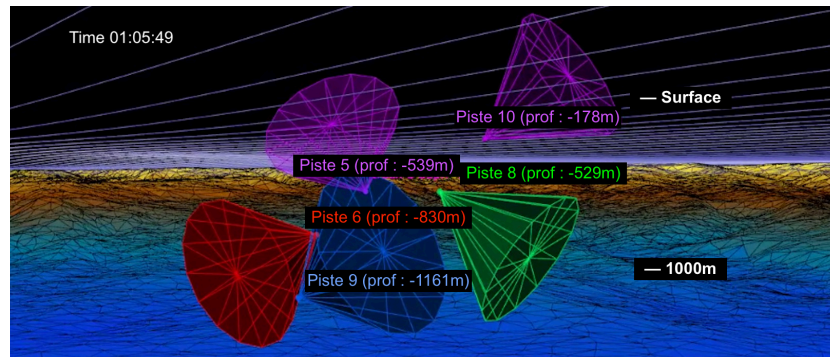


Figure 10.11: Vue des 5 individus émettant de façon centrifuge, avec aperçu de leur cône d'émission sonore tangent à la trajectoire calculée. Démonstration disponible sur http://sabiiod.org/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_etal_Mercier_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_accelx2.mp4

On voit Fig. 10.12 une configuration des sonars pointant vers la surface (lien vers les animaux du groupe en repos surface, balise pour donner leur position et être rejoint ?). La figure 10.13 montre une autre configuration, pointant vers le fond (d'une possible observation précise, en multifaisceau, multistatique).

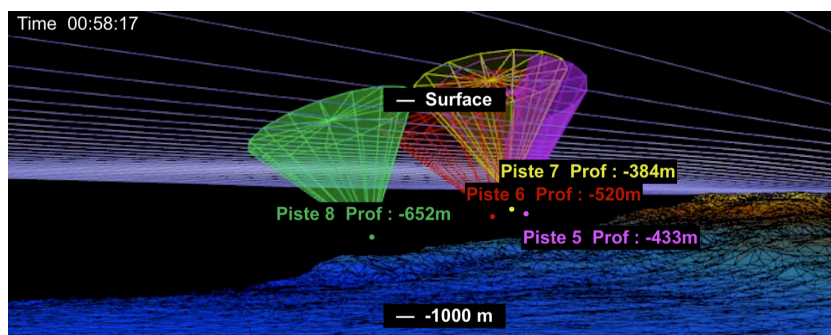


Figure 10.12: Synchronisation de 4 biosonars pointant vers la surface. Chaque cône est tangent à la trajectoire calculée.

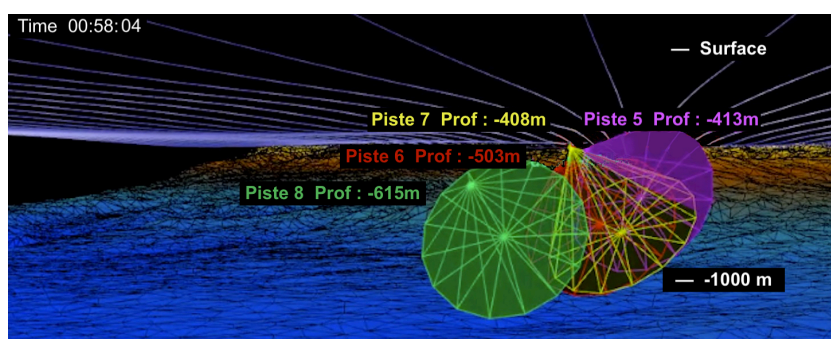


Figure 10.13: Synchronisation de 4 biosonars pointant vers le fond. Chaque cône est tangent à la trajectoire calculée.

La probabilité d'une synchronisation aléatoire de 4 biosonars à 20 degrés près est inférieure à 10 chances sur un milliard $(1/36)^{2(4-1)}$. La fréquence élevée de ces événements dans nos résultats bruts démontre que nous avons ici la mise en évidence d'un phénomène consistant dans la stratégie d'observation distribuée du cachalot.

Notre indice de codirection dans le plan (calculé à la section 10.5) nous permet d'analyser la répartition des écarts angulaires entre les directions des émissions biosonars, représentés par les cônes dans nos animations et illustrations.

Nos inspections sur les traces en 3D démontrent que pratiquement jamais les animaux ne

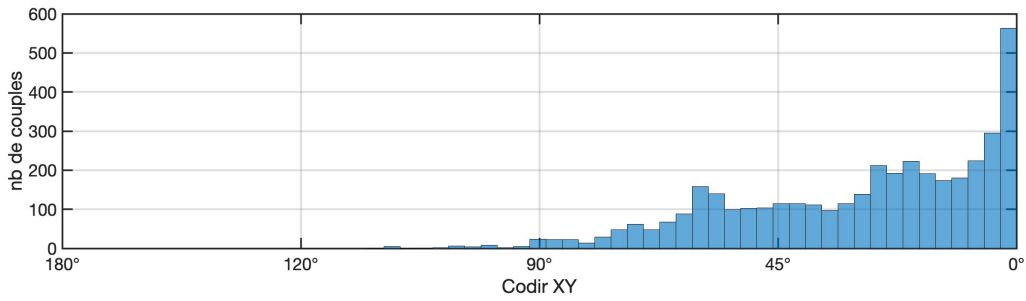


Figure 10.14: Histogramme des angles entre les pistes

mettent face à face leur biosonar. Ils sont majoritairement colinéaires (fig. 10.14) ou centrifuges. Nous avons donc un phénomène consistant et précis, car des calculs incertains auraient générés des directions synchrones de cônes aléatoires. Ce résultat confirme donc d’une part la qualité de nos estimations de trajectoires, et nous donne d’autre part une connaissance inédite de la stratégie de perception biosonar distribuée chez le cachalot, qui pourrait être similaire pour d’autres teutophages.

Nous pouvons encore illustrer ce phénomène avec 5 cachalots émettant simultanément leurs clics dans la même direction, visible dans notre maquette en 2 dimension voir Fig. 10.15 et vidéo en ligne, leur permettant de démultiplier cette capacité de "vision" collective abyssale.

10.8 L'ALLIANCE DES ABYSSES POUR UNE OBSERVATION DISTRIBUÉE MULTIFAISCEAUX

Nous avons montré par nos calculs que les cachalots se déplacent avec cohérence, synchronie. Visuellement, l’animation des positions 3D ou 2D nous donne une vue unique d’une chasse collaborative d’un essaim de cachalots.

Nous allons plus loin, en analysant ici les cônes et la co-direction dans laquelle les cachalots

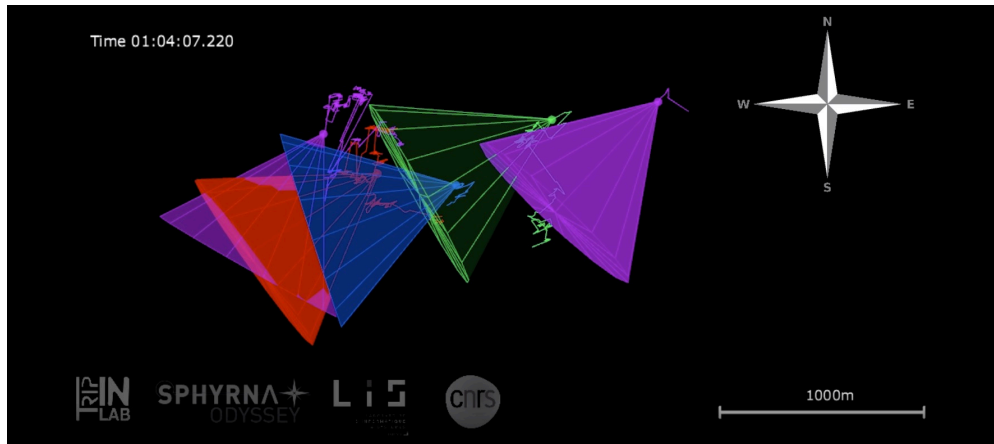


Figure 10.15: Cinq cachalots émettant dans la même direction. Chaque cône d'émission est placé suivant la tangente à la trajectoire calculée. Démonstration en vidéo disponible sur http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_eta_Mercier_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_accelx2_skyview.mp4

émettent leur sonar.

La synchronisation démontrées par ces représentations brutes sans retouche, est surprenante. *L'Alliance*, collaboration de ces animaux prend ici tout son sens. Les cônes (qui représentent la diffusion des clics) sont ouverts de 45° environ⁶⁵, et longs de 500 m à 1 km (d'après notre estimation de perte de l'énergie de l'écho pour une émission entre 180 et 210 dB à la source voir Chap. 10).

Les animaux restent à une distance de 500 m environ les uns des autres. Leurs cônes, on le voit, sont parfois chevauchant, idéalement placés pour former une vue stéréo par échos conjoints des deux cônes décalés sur une même cible (Fig.10.16, 10.17).

Notre interprétation est qu'à l'instar de jumelles, les cachalots émettent conjointement pour voir au mieux leur proie en relief, à grande distance (1 km probablement). Ainsi ils



Figure 10.16: Évolution jointe des pistes 3 et 4 avec aperçu de leur cône d'émission sonore, placé sur la tangente à la trajectoire calculée. http://sabiiod.org/pub/SPHYRNA/3D/S0_Glotin_Thellier_et_al_Mercier_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_accelx2.mp4

décideraient de poursuivre une proie choisie après sa fine analyse, éventuellement partagée entre plusieurs individus dans le cas de chasse collaborative.

Ces 2 cachalots scannent le volume d'eau avec une vue multi-faisceau, recouvrante à 80% environ, en restant à une distance moyenne constante de 500 m. Les deux animaux cliquent légèrement l'un après l'autre (à environ 1/4 de seconde d'intervalle, ce qui correspond environ au temps de propagation d'un clic entre les deux individus (statistiques en cours).

Notre hypothèse est qu'ainsi la perception de la scène par chacun de ces individus est *stéréo* dans le cas de 2 individus, construite par le double écho de leur clic et de celui de leur voisin. Ceci leur permettrait une meilleure estimation du volume de la proie et de son déplacement. Ce principes s'étend à plusieurs individus.

Prenons l'analogie des jumelles où chaque animal A et B émet un clic, respectivement $C_A(t)$

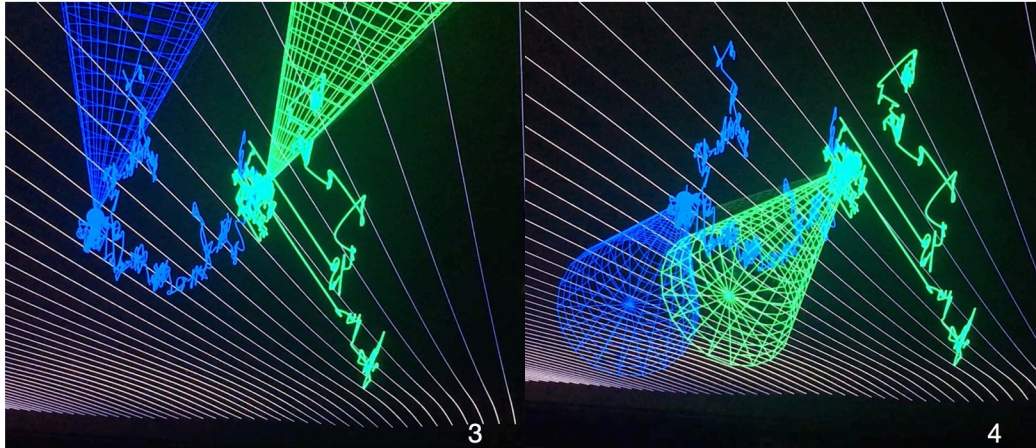


Figure 10.17: Évolution jointe des pistes 3 et 4 avec aperçu de leur cône d'émission placé sur la tangente de leur trajectoire (suite). Démonstration disponible à : http://sabiiod.org/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_etal_Mercier_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_accelx2.mp4

et $C_B(t')$, au temps t et $t' = t + 1/4$ sec. C_A et C_B voyagent dans leur cône respectif, centrés sur la même proie. C_A et C_B percutent avec un léger décalage cette même proie et sous deux angles légèrement différents (du fait du décalage de l'émission de C_A et C_B dans le temps mais surtout l'espace). L'écho de A remonte dans les deux cônes, en supposant que le cône d'émission et de réflexion du clic sont similaires. Idem pour C_B . C'est ainsi que A reçoit consécutivement l'écho de C_A (EC_A) et l'écho de C_B (EC_B). Idem pour B.

Les informations portées par EC_A et EC_B sont complémentaires, car issues de la même cible, mais sous deux angles de vue différents. On peut supposer que A et B connaissent leurs positions relatives. Dès lors ils pourraient comparer EC_A et EC_B en connaissance de leurs positions, et construire une représentation 3D de leur proie.

Nous pourrions aussi imaginer que les individus A et B partagent leur vision de la proie en se la communiquant par acoustique, dans le but de l'affiner.

10.9 CONCLUSION

Jamais une Alliance en chasse n'avait été observée chez une espèce teutophage. En effet, les tags infligent un stress aux animaux; même si un seul individu d'un groupe est tagué, les mesures qui suivent sont dénaturées, plus relatives à une fuite qu'à une action complexe d'observation distribuée collaborative qui requiert l'attention maximale de chaque individu.

Cette scène, une première mondiale, montre non seulement l'intelligence de ces animaux, mais aussi leur vulnérabilité au bruit. Seule une zone suffisamment calme permet des coordinations et mesures aussi fines partagées à plus de 500 m de distance les uns des autres. En effet, il semble que la distance inter-individus soit cruciale pour la construction de jumelles acoustiques efficaces, et donc une prospection d'un volume d'eau conséquent, garant d'une meilleure probabilité de détection de proie.

Même si ces cachalots sont distants de 500m les uns des autres, leurs actions sont concertées et leurs déplacements synchrones, ce qui suggère un moyen de communication et de planification même à court terme. Nous recherchons les traces de ces communications dans les formes d'ondes des clics. Un individu qui sonde recueille des informations sur le fond et les proies par écholocation. Ces mêmes signaux pourraient être entendus par les voisins de son *Alliance*, qui écoutent dans la même direction. Ces derniers émettent aussi un son, qui donne de l'information complémentaire à celle obtenue par le premier individu. C'est un échange en direct. Il est aussi imaginable qu'ils se transmettent les uns aux autres des signaux décrivant ce qu'ils perçoivent. Ils pourraient en tirer un bénéfice, en qualité de perception de leur environnement : la perception collaborative des membres de l'Alliance dépasserait

chaque perception individuelle.

On voit sur l'animation 10.1 que durant cette Alliance, certains cachalots suivent des trajectoires plus profondes vers -1700 m. Ils balayent alors un grand volume d'eau, et capturent probablement plusieurs calmars en profitant de l'éclairage de juvéniles restant 1200 m plus haut.

Cette observation unique est actuellement analysée dans notre équipe pour ses propriétés bioacoustiques inédites. Nous la travaillons suivant une stratégie sonar en réseau et en multistatique, qui est l'état de l'art de la chasse sous-marine^{54,14} et dont on représente le principe Fig. 10.18.

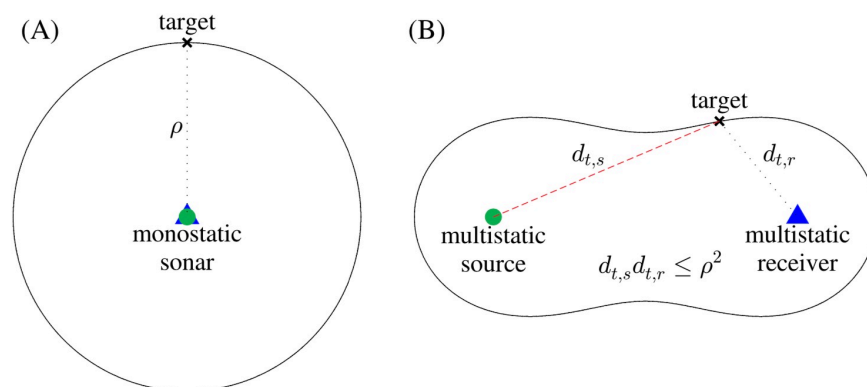


Figure 10.18: Illustration du principe du sonar, (A): par un seul émetteur récepteur, (B): par bistatisme avec un récepteur et émetteur décallés. Ce principe peut-être démultiplié sur N récepteurs émetteurs pour un sonar multistatique (crédit¹⁴).

Il en ressort une description de l'intelligence perceptive collective du cachalot, dépassant l'état de l'art. Certains cétacés sont réputés pour chasser en alliance comme le Tursiops trun-

catus⁴⁸, le Dauphin bleu blanc, ou l'Orque⁶³ qui sont en bonne partie observables en surface. En revanche, les stratégies de chasse des teutophages tels que les cachalots restent à découvrir car elles sont effectives dans les abysses. Notre mission est la première au monde à en découvrir plusieurs détails.

La zone où s'est déroulée une telle Alliance à plusieurs reprises durant SOM, 12 miles nautiques de Monaco et Antibes, est certainement d'un intérêt particulier pour ces teutophages. Les drones ALV y dérivent plus lentement. Cela suggère que le courant surface est plus faible dans cette zone que dans les alentours. C'est peut-être une raison pour laquelle les cachalots seraient plus actifs en chasse en Alliance dans cette zone. En effet, ils pourraient conserver plus facilement leur cohésion de groupe, à moindre effort sur de longues périodes, car dans un courant plus faible. De plus leurs proies y auraient une vitesse moindre, favorisant leur détection, identification et leur capture. Ainsi nous proposons de corréler a priori les zones de chasse en groupe avec les zones à faible courant. Ce sont a priori nous pensons des zones dangereuses en terme de risque de collision avec le trafic maritime, car les animaux pourraient y consacrer une grande partie de leur attention auditive pour assurer leurs contacts inter-individus, et le rythme de leurs rotations surface / abysse. Cette stratégie de groupe est certainement un bénéfice pour le groupe, mais peut être une contrainte rajoutée à l'évitement éventuel du trafic maritime, ce qui pourrait augmenter le risque de collision.

11

Éthoacoustique et formes de quinze sondes
de cachalots

Les dynamiques de groupe et de chasse des *Pm* sont à ce jour très mal connues. Les données obtenues par la mission Sphyrna, grâce à leur grande précision et à leurs conditions exceptionnelles d'enregistrement nous apportent de nouvelles informations sur ces comportements. Elles nous permettent de nous interroger sur le nombre de proies capturées par plongée, sur l'efficacité de l'orientation des *Pm* par écholocation, sur leur mode d'attaque (abordent-ils préférentiellement leurs proies par dessus ou par dessous ?).

11.1 REPRÉSENTATION TEMPS-FRÉQUENCE DE CLICS PAR PISTE

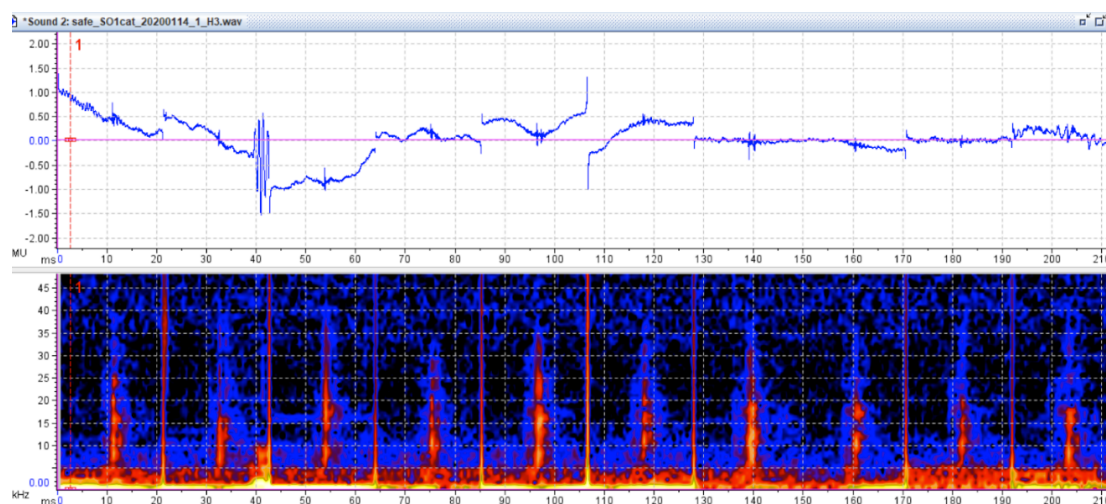


Figure 11.1: Exemple de série de clics d'un seul animal, celui de la piste 1, montrant différentes formes spectrales. Attention, les clics sont centrés dans chaque fenêtre de 20 milli-secondes, et des artefacts avec une composante pleine bande peuvent apparaître entre ces fenêtres, ne pas les confondre avec les clics qui sont aux temps (ms): 11, 32, 53, 75, 95, 117, 138, 159, 181, 203.

On montre Fig. 11.1 les formes d'ondes et spectrogrammes de dix clics extraits de la piste 1, par morceaux coupés de 20 milli-secondes chacun et cumulés dans une même piste son. Ces formes sont en cours d'analyse par deep learning (cf.méthodes Chap. 8) en fonction de l'angle d'émission à l'hydrophone, et de la distance entre les animaux, pour élucider la présence ou

non de communication inter-individus.

Nous répétons ce processus pour les 15 pistes suivies au cours de l'enregistrement, 10 clics par piste, représentés sous la forme de spectrogrammes (temps en abscisse, fréquence en ordonnée) Fig. 11.2.

Nous pouvons y voir des similarités intra-pistes, et des différences inter-pistes, du fait de l'orientation de l'animal, sa distance à l'antenne, mais également sa taille qui signe par l'Intervalle inter pulse sa taille. Des analyses plus fines permettront d'associer les pistes, car nous pensons qu'il y a entre 5 et 7 individus en tout qui plongent 2 ou 3 fois chacun.

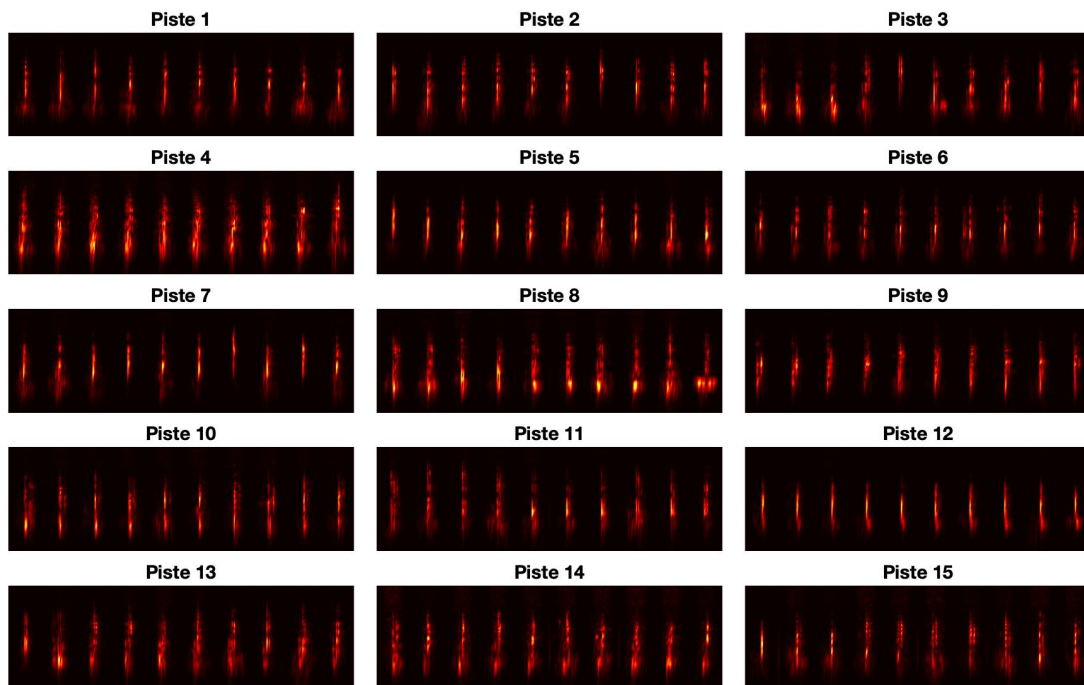


Figure 11.2: Spectrogrammes de 10 clics pour chacune des 15 pistes.

11.2 ANALYSE DE LA VITESSE AVEC L'INTERVALLE INTER CLIC

Afin d'étudier les trajectoires, ainsi que le comportement des teutophages, nous avons étudié le lien entre la vitesse moyenne des Pm , leur profondeur de nage, les intervalles inter-clic (ICI), ainsi que leur vitesse ascensionnelle. Nous avons également analysé le temps passé à chaque profondeur, afin de mettre en évidence les profondeurs de chasse privilégiées. Ces mesures nous ont permis d'individualiser les différentes phases de chasse au cours de la plongée, et d'étudier les corrélations entre l'intervalle inter-clic, la profondeur, les vitesses (normales et ascensionnelles) et la tortuosité.

Les différentes vitesses étudiées ici ainsi que la tortuosité ont été calculées suivant les méthodes présentées sections 10.1 et 10.2. L'intervalle inter-clic, lui, correspond à l'intervalle de temps entre deux clics consécutifs. Il est déterminé très simplement en calculant la différence entre les temps associés à 2 détections consécutives d'un même individu.

Notons que pour des raisons de représentation, lorsque nous parlons de tortuosité et d'intervalle interclic dans l'étude, il s'agit de $\log(\text{Tortuosité})$ et $\log(\text{ICI})$.

11.3 VITESSE ET INTERVALLE INTER-CLICS (ICI)

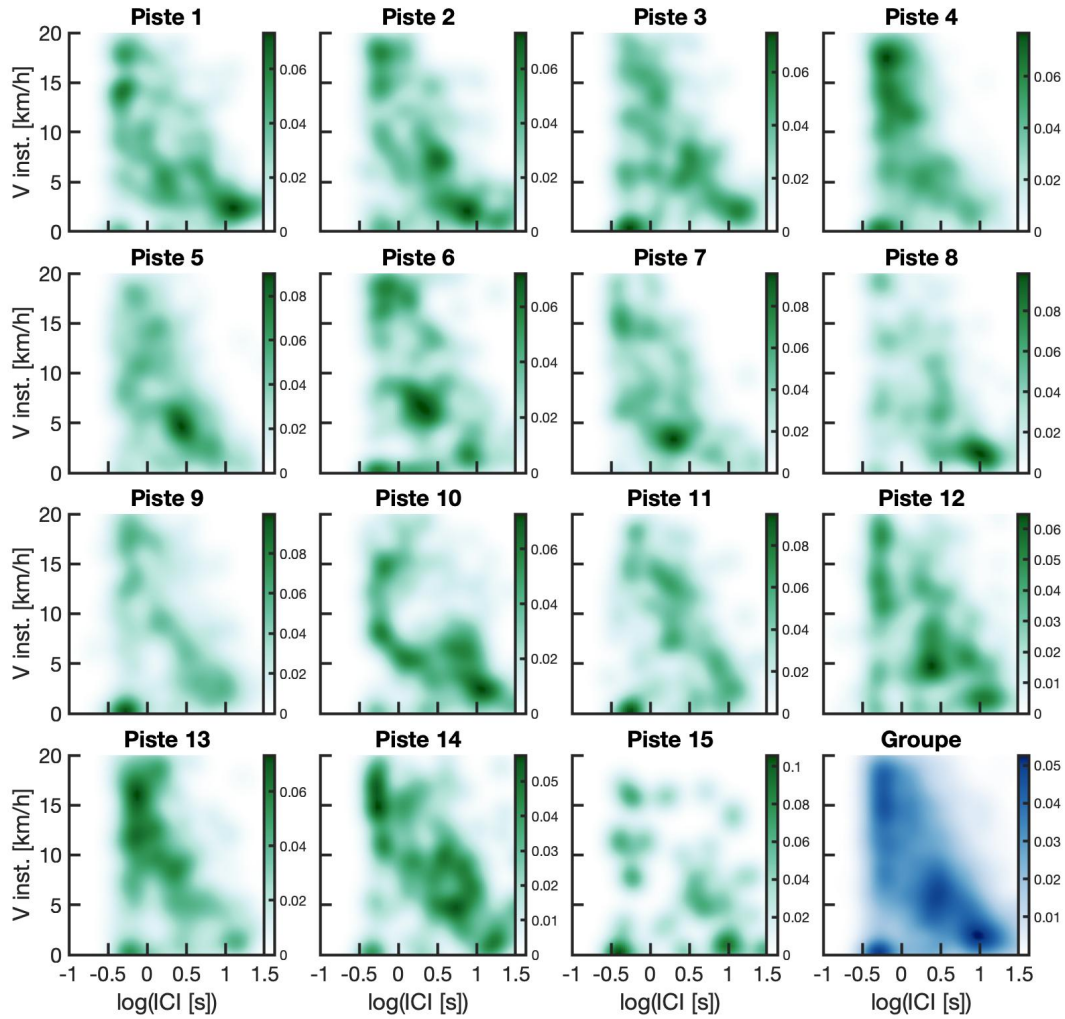


Figure 11.3: Représentation pour chaque piste de la vitesse instantanée du cachalot (V_{inst}) en fonction de l'intervalle inter-clic (ICI).

A l'exception de la trajectoire 15, peu représentative à cause de sa trop courte durée d'enregistrement, nous observons une corrélation inverse entre la vitesse instantanée du cachalot et l'ICI. Pour les vitesses instantanées les plus élevées (entre 10 et 20 km/h), l'ICI est

faible. En revanche, lorsque les vitesses diminuent (en dessous de 10 km/h), l'ICI augmente. La tendance (kernels des pistes et de groupe) est visible figure 11.3.

Cette anti-corrélation est logique et cohérente avec les informations dont nous disposons sur les émissions des cachalots. En effet les vitesses élevées de déplacement, sans doute caractéristiques des comportements de chasse, nécessitent une bonne précision temporelle dans la perception de l'environnement, d'où un ICI faible.

Lorsque les cachalots se déplacent plus lentement, la granularité temporelle de leur perception n'a plus besoin d'être aussi fine, d'où l'augmentation de l'ICI.

11.4 ANALYSE DE LA VITESSE ASCENSIONNELLE

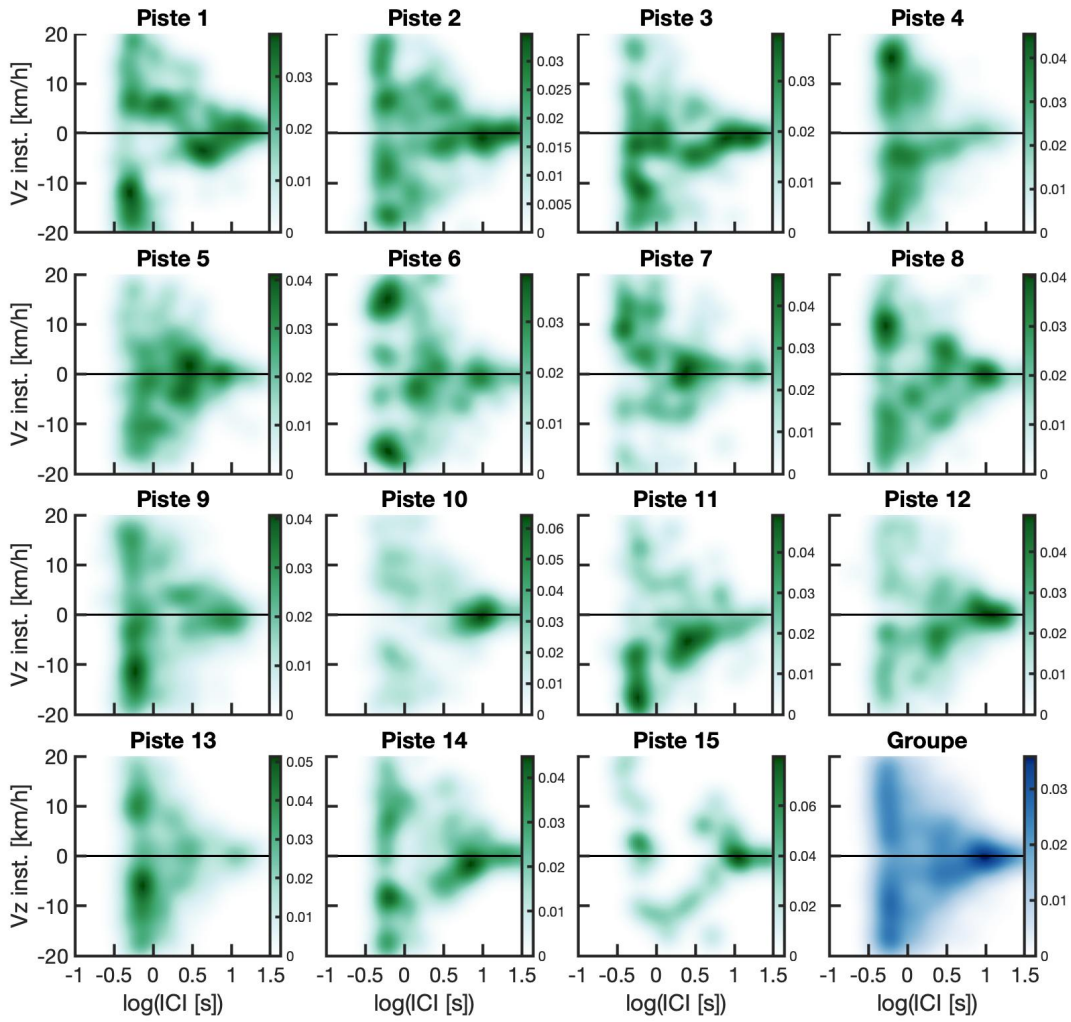


Figure 11.4: $V_z(i_c)$

Nous notons une symétrie générale sur les kernels représentant la vitesse ascensionnelle en fonction de l'ICI (Fig. 11.4, ce qui suggère des captures autant en montées qu'en descentes). Le kernel de groupe (en bleu) montre en effet des déplacements symétriques sur l'axe vertical,

à ICI faibles et donc lors de chasses potentielles.

11.5 VARIATION DE LA VITESSE PLANAIRE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

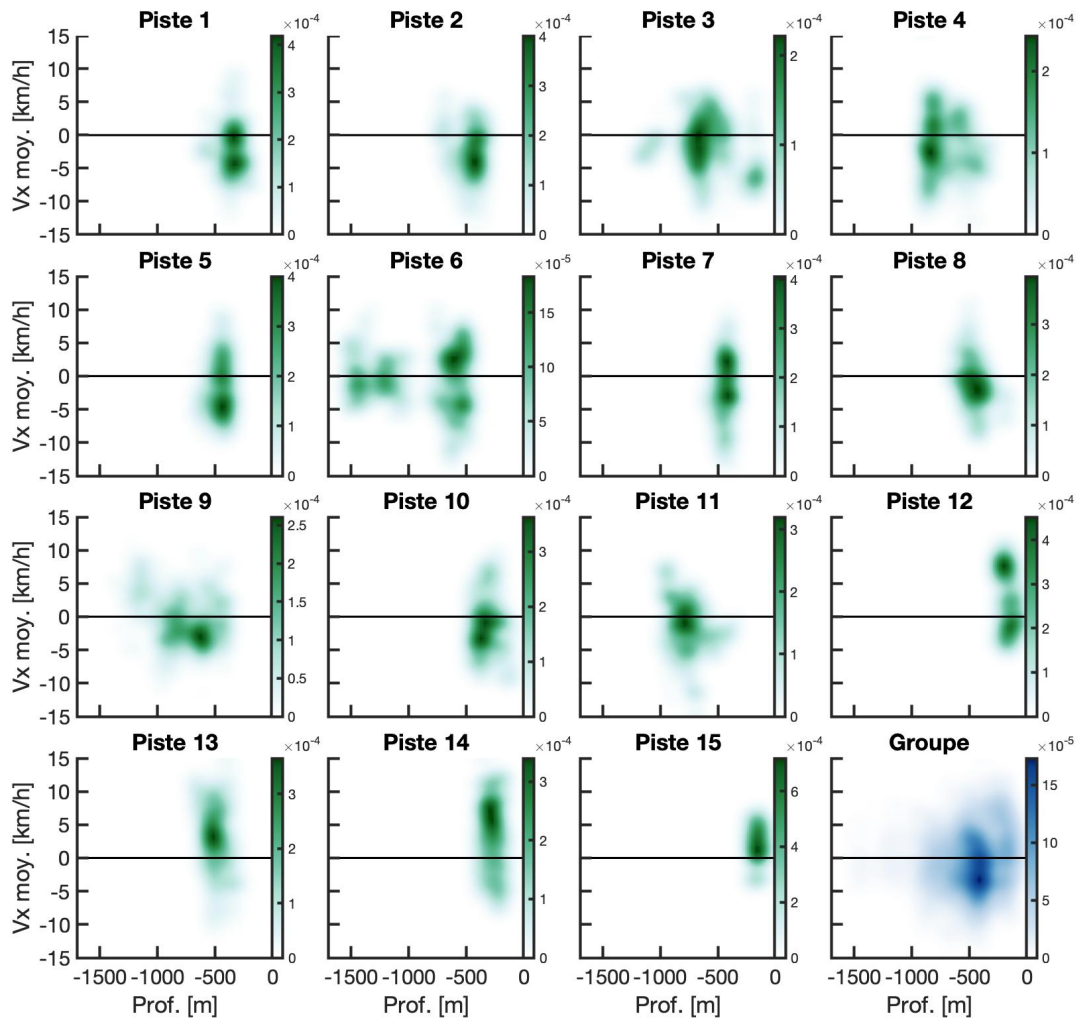


Figure 11.5: Vxmoy(Prof)

En ce qui concerne la vitesse instantanée dans le plan V_x (Easting) et V_y (Northing), on observe une densité de probabilité maximale pour des vitesses allant de 2,5 à 20 km/h associées

à des profondeurs en moyenne autour de -600m. On a cependant une certaine variabilité entre les différentes pistes, avec certaines pistes présentant des densités de probabilité à deux maxima, le deuxième se trouvant autour de -200m mais aussi parfois de -800m.

Le patron est globalement le même à l'échelle du groupe.

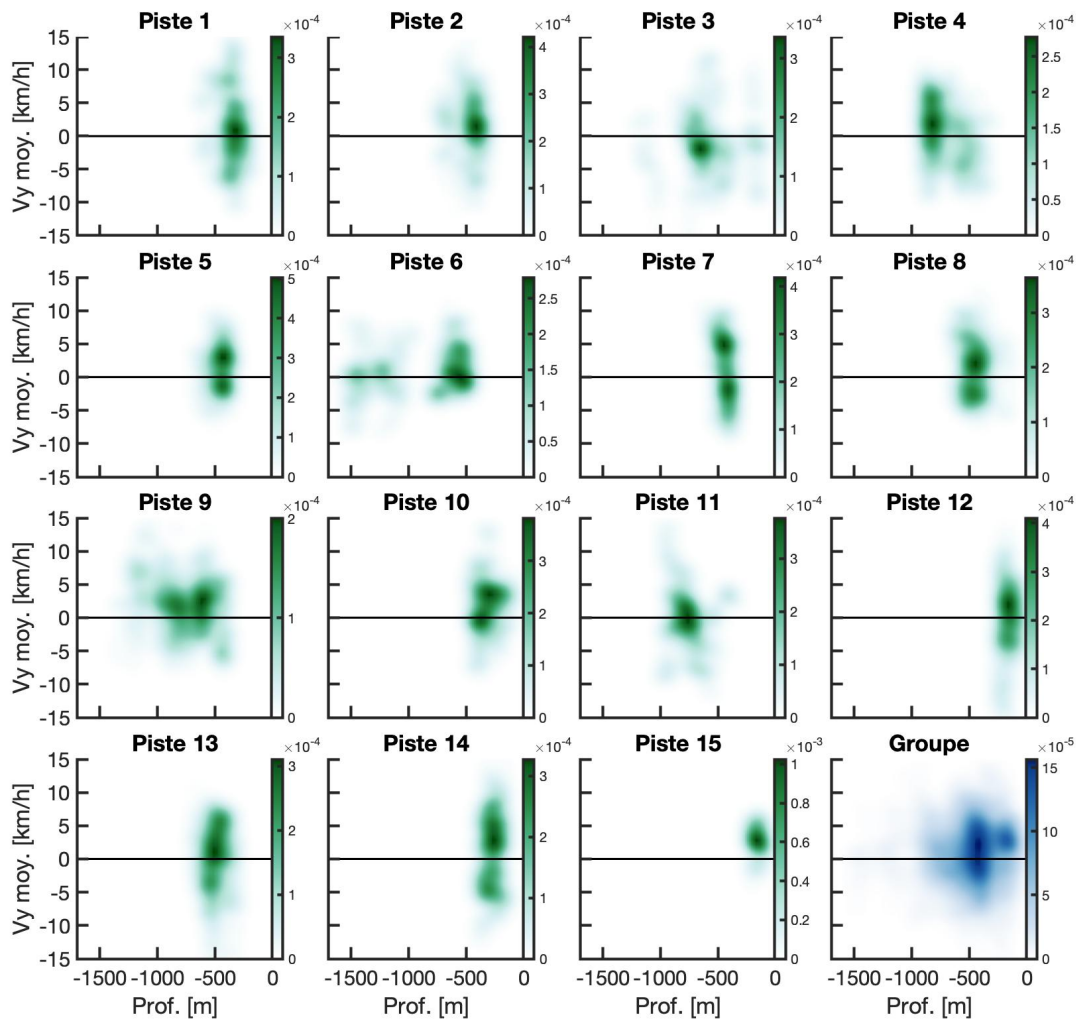


Figure 11.6: Vymoy(Prof)

Les vitesses moyennes sont majoritairement entre 2.5 et 15 km/h. Les densités de probabilité sont homogènes, mais il semble se dégager 2 maxima correspondant à 5 et 10 km/h. Ces vitesses correspondent à des profondeurs très peu dispersées. Celles-ci, en fonction des pistes, varient entre -1400 m et -200 m, mais sont majoritairement regroupées entre -700 et -200 m. Pour la profondeur, ce patron ressemble à celui de la vitesse instantanée.

Pour le groupe, la distribution est trimodale, avec un maximum de densité de probabilité autour de -500 m et deux autres : un plus faible à -800 m et un beaucoup plus faible à -200 m.

Pour ce qui est de la vitesse ascensionnelle instantanée, on a dans une majorité des pistes, une vitesse densité de probabilité très resserrée autour d'une vitesse ascensionnelle nulle, et pour des profondeurs entre -600 m et -400 m. Dans quelques cas, la densité de probabilité est plus étalée le long des vitesses, et peut aussi présenter deux autres maxima à des profondeurs autour de -800 m et -200 m.

A l'échelle du groupe, on retrouve le même patron qu'à l'échelle individuelle pour la vitesse ascensionnelle instantanée, à ceci près que trois (voir quatre) maxima de densité de probabilité sont visibles, pour des valeurs de vitesse centrées sur 0 et des profondeurs respectivement à -800, (-600), -500 et -200 m.

La vitesse ascensionnelle moyenne a une densité de probabilité globalement plus étalée au niveau des vitesses dans les différentes pistes, bien que toujours centrée sur une vitesse nulle. On trouve aussi plus de pistes présentant deux voir trois maxima, à des profondeurs allant cette fois de -800 m à -400 m.

La densité de probabilité au niveau du groupe pour la vitesse ascensionnelle moyenne montre le même patron que pour la vitesse ascensionnelle instantanée.

11.6 CONCLUSION

Pour ce qui est de la vitesse ascensionnelle instantanée, on a dans une majorité des pistes, une densité de probabilité très resserrée autour d'une vitesse ascensionnelle nulle, et pour des profondeurs entre -600 m et -400 m. Dans quelques cas, la densité de probabilité est plus étalée le long des vitesses, et peut aussi présenter deux autres maxima à des profondeurs autour de -800 m et -200 m.

A l'échelle du groupe, on retrouve le même patron qu'à l'échelle individuelle pour la vitesse ascensionnelle instantanée, à ceci près que trois (voir quatre) maxima de densité de probabilité sont visibles, pour des valeurs de vitesse centrées sur 0 et des profondeurs respectivement à -800, (-600), -500 et -200 m.

La vitesse ascensionnelle moyenne a une densité de probabilité globalement plus étalée au niveau des vitesses dans les différentes pistes, bien que toujours centrée sur une vitesse nulle. On trouve aussi plus de pistes présentant deux voir trois maxima, à des profondeurs allant cette fois de -800 m à -400 m.

La densité de probabilité au niveau du groupe pour la vitesse ascensionnelle moyenne montre le même patron que pour la vitesse ascensionnelle instantanée.

On observe des densités de probabilité maximales pour des vitesses de 5 et -5 km/h dans le plan (X,Y), et à des profondeurs autour de -500 et -700 m. Pour certaines pistes, plusieurs maxima de densité sont visibles, vers -800 m et -400 m respectivement. L'étalement de

la densité de probabilité selon la vitesse le long de l'axe X montre une répartition plutôt symétrique. Il n'y aurait donc pas de préférence dans l'approche à une proie.

La profondeur privilégiée par les *Pm* se situe entre -500 et -250 m. Cependant quelques pistes sont entre -750 et -500 m voir -1000 et -750 m. Le temps passé à chaque profondeur est cohérent avec les estimations de densité du log(ICI) en fonction de la profondeur (*i.e.* les profondeurs à fortes densités sont bien celles où les *Pm* passent le plus de temps).

A l'échelle du groupe, les *Pm* passent la majorité de leur temps entre -250 m et -500 m, ce qui est également cohérent avec les densités de probabilité estimées relatives à la profondeur.

12

Discussion et Conclusion

12.1 RÉSULTAT MAJEUR: ALLIANCE DE TEUTOPHAGES ET CORRÉLATIONS AU MILIEU

Le résultat majeur de la Mission Sphyrna-Odyssey change l'état de l'art sur le plus grand des teutophage, le cachalot. Pour la première fois au monde, nous mesurons les comportements naturels, coordonnés, synchrones, de plusieurs individus dans plus de 1 km de colonne d'eau. Cette observation au large de Monaco démontre un nouveau pan de l'intelligence collaborative de cette espèce. L'originalité de nos résultats a été confirmée par plusieurs experts, dont Pr. G. Pavan du CIBRA à l'université de Pavia, expert bioacoustique sous-marine pour ACCOBAMS et l'OTAN.

Plusieurs maquettes et vidéos représentent nos calculs, et sont disponibles en ligne sur nos sites de recherche Sphyrna telles que listées en ANNEXES. Ce sont des cartes interactives ou des vues 3D et 2D ou mixtes, avec figuration des cônes d'émission des biosonar.

Ce matériel inédit sera proposé à des muséums au niveau international pour une bonne diffusion. Il est mis à jour suivant les avancées de nos calculs.

Dans chacune de ces animations, une piste est un cachalot qui se déplace. Chaque piste disparaît après 30 minutes environ car l'animal remonte sans cliquer à la surface respirer 10 à 15min toutes les 40 à 50min. Ces pistes montrent que les animaux se déplacent en ALLIANCE. Ils chassent proches les uns des autres, en imitant, coordonnant leurs trajectoires, comme on peut l'observer en surface pour d'autres odontocètes. Quelques-uns plongent parfois très profondément, pour une capture après détection d'une proie à -1700m. Ce sont des plongées plus rares dans cette session (2), sans doute accessibles aux plus gros individus du groupe du fait des contraintes thermiques et de la durée de plongée. Par ces

mesures inédites, nous étudions l'intelligence du plus grand prédateur de la planète, comme aucune caméra ou Tag ne peut l'observer.

12.2 MODÈLE ET INFLUENCE DE FRONT OCÉANIQUE SUR LES CACHALOTS

Des travaux récents^{13,10} montrent que les tourbillons océaniques et les structures associées (fronts, filaments) ont une forte influence sur les activités de prédation des grands prédateurs du fait de l'amélioration de la productivité marine, en zooplancton et communautés de poissons, calmars.

Nous synthétisons dans cette partie les résultats des déplacements des cachalots des chapitres précédents, avec un modèle 3D de température et de courant établi pour cette mission par Y. Ourmières chercheur du domaine au MIO CNRS Univ. Toulon. Ce savoir faire en modèle de courant est issu du couplage entre les RADAR HF du MIO UTLN, placés entre Sycié et l'est du Levant, avec un modèle numérique haute définition de courant en 3D^{17,46,66}. Nous illustrons ce couplage Fig.12.1: le dispositif des radars HF permet aux modèles d'être affinés et validés.

Ce modèle a été exécuté dans la zone de détection des cachalots avec les paramètres connus du 14 janvier 2020. Il en ressort une densité importante de relevés pour ce 14 janvier 2020, résumés en Fig.12.2, avec les mesures de température de l'ESA, et étudiés plus finement dans la suite de la section.

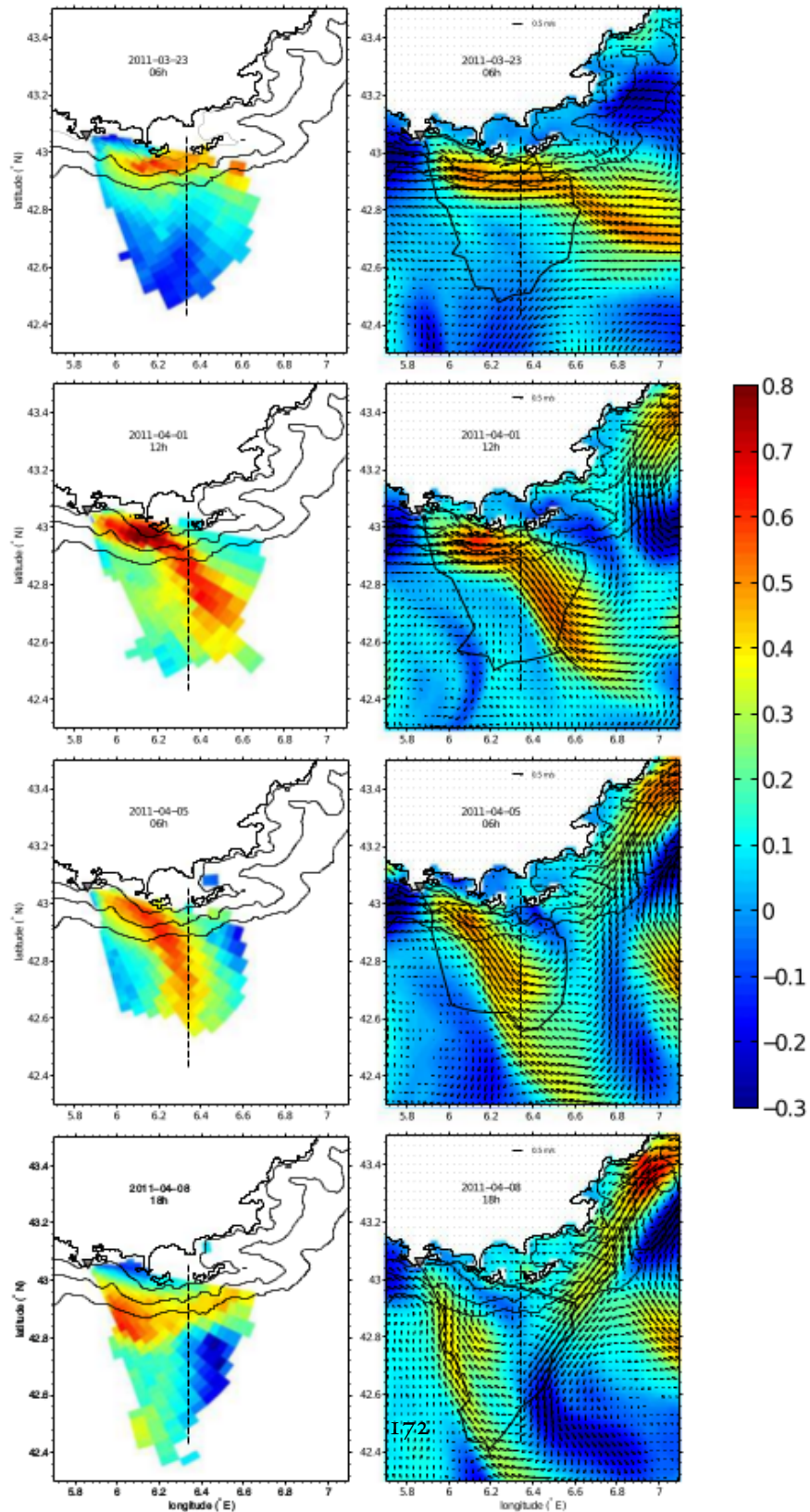


Figure 12.1: Illustration de l'apport des mesures radar HF du courant surface (vitesse radiale m/s) (Gauche) dans la construction, validation du modèle générique de courant GLAZUR (Droite, synchrone avec le radar à Gauche) (d'après ⁴⁶).

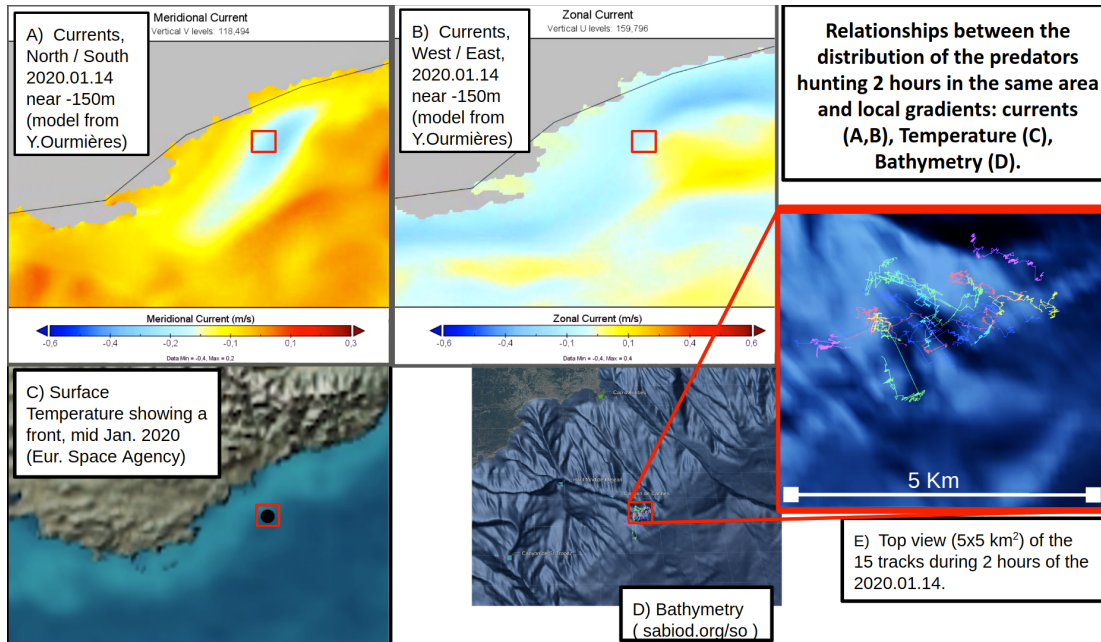


Figure 12.2: Résumé des résultats mettant en évidence de la fibration du courant dans la zone de chasse ce 14 janvier 2020 (A,B), et gradient de température mesuré par l'ESA (C), et la position des cachalots (D,E).

L'instabilité du courant forme des zones frontales⁶⁴. Ce phénomène est représenté Fig.12.3. L'instabilité déclenche des circulations secondaires dans un plan presque vertical. Cette instabilité est déclenchée par l'effet d'un vent, même modéré, qui déstabilise la couche de surface au niveau du front. L'effet visible sur la température, la salinité et toutes les variables est que la zone frontale est soumise à une forte convergence vers le bas (plusieurs mètres par jour) compensée par des remontées d'eau dans la partie légère du flux, et souvent par une autre remontée d'eau au bord dense du front.

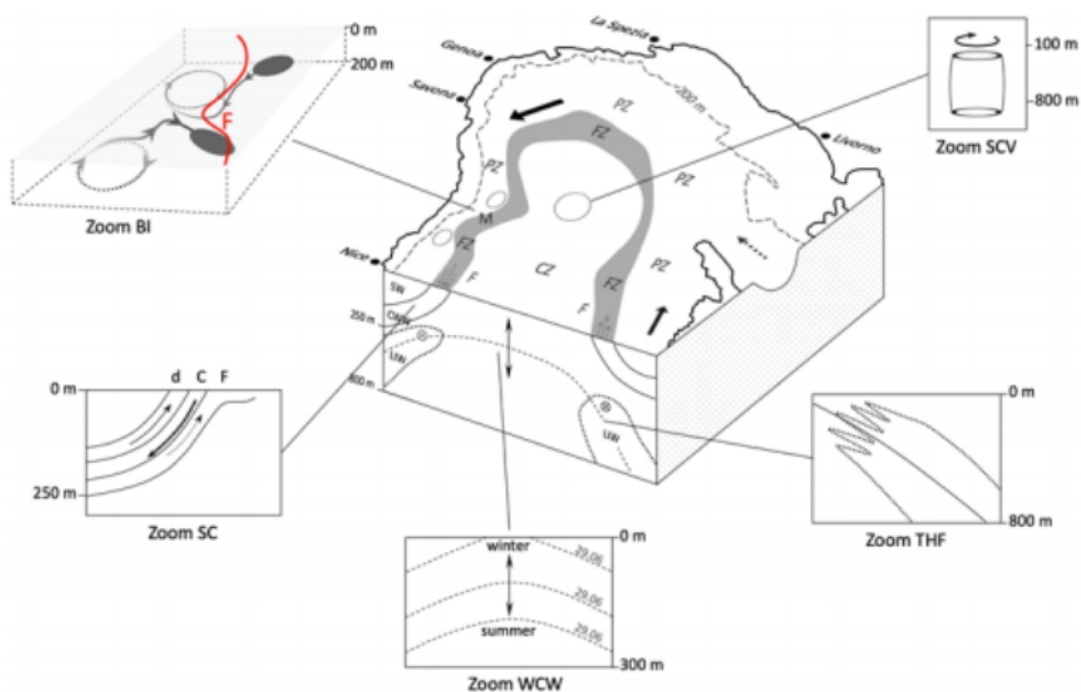


Figure 12.3: Illustration générique de l'instabilité du courant Ligure déclenchée par l'effet d'un vent, même modéré, qui déstabilise la couche de surface au niveau du front (zone SC en Bas à Gauche). L'effet visible sur la température, la salinité et toutes les variables est que la zone frontale est soumise à une forte convergence vers le bas (plusieurs mètres par jour) compensée par des remontées d'eau dans la partie légère du flux, et souvent par une autre remontée d'eau au bord dense du front (zone SC) (d'après ⁶⁴).

12.3 ANALYSE FINE DES PARAMÈTRES DU MILIEU ET DE L'ACTIVITÉ DES CACHALOTS

12.3.1 EFFET DU COURANT SUR L'ACTIVITÉ DES CACHALOTS

La mer de Ligure est notamment connue pour ses différentes zones d'instabilité qui peuvent entraîner la formation de tourbillons (upwellings). Le courant Ligure devient plus fort et plus proche de la côte en hiver, se rétrécit (environ 25 km de large), et s'approfondit (environ 450 m de profondeur). Tandis qu'en été, il s'affaiblit, s'étend plus au large en augmentant sa largeur d'environ 40 km, et s'amincit (environ 250 m de profondeur).

Concernant le courant, nous avons calculés plusieurs cartes, suivant l'axe Ouest-Est (current WE), et l'axe Sud-Nord (current NS). La vitesse verticale est très faible et ne sera pas représentée ici. La norme totale du courant est donnée dans la carte 'current norm'. Ces cartes sont accessibles en ligne à:

http://sabiody.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/current_WE

http://sabiody.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/current_NS

http://sabiody.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/current_norm

Les curseurs des cartes permettent de voir le courant sur toute la colonne d'eau selon la longitude et la latitude ou alors selon la profondeur. Nous en donnons Fig.12.4 et 12.5 des représentations sous différents angles. On observe qu'en surface le courant est maximal à 0,65m/s. Plus on descend dans la colonne d'eau, plus la norme de la vitesse du courant diminue jusqu'à s'annuler. La vitesse du courant chute très rapidement là où se trouvent les cétaqués. A partir d'environ 200m de profondeur, la norme du courant passe à 0,2m/s et à 600m de profondeur est nulle.

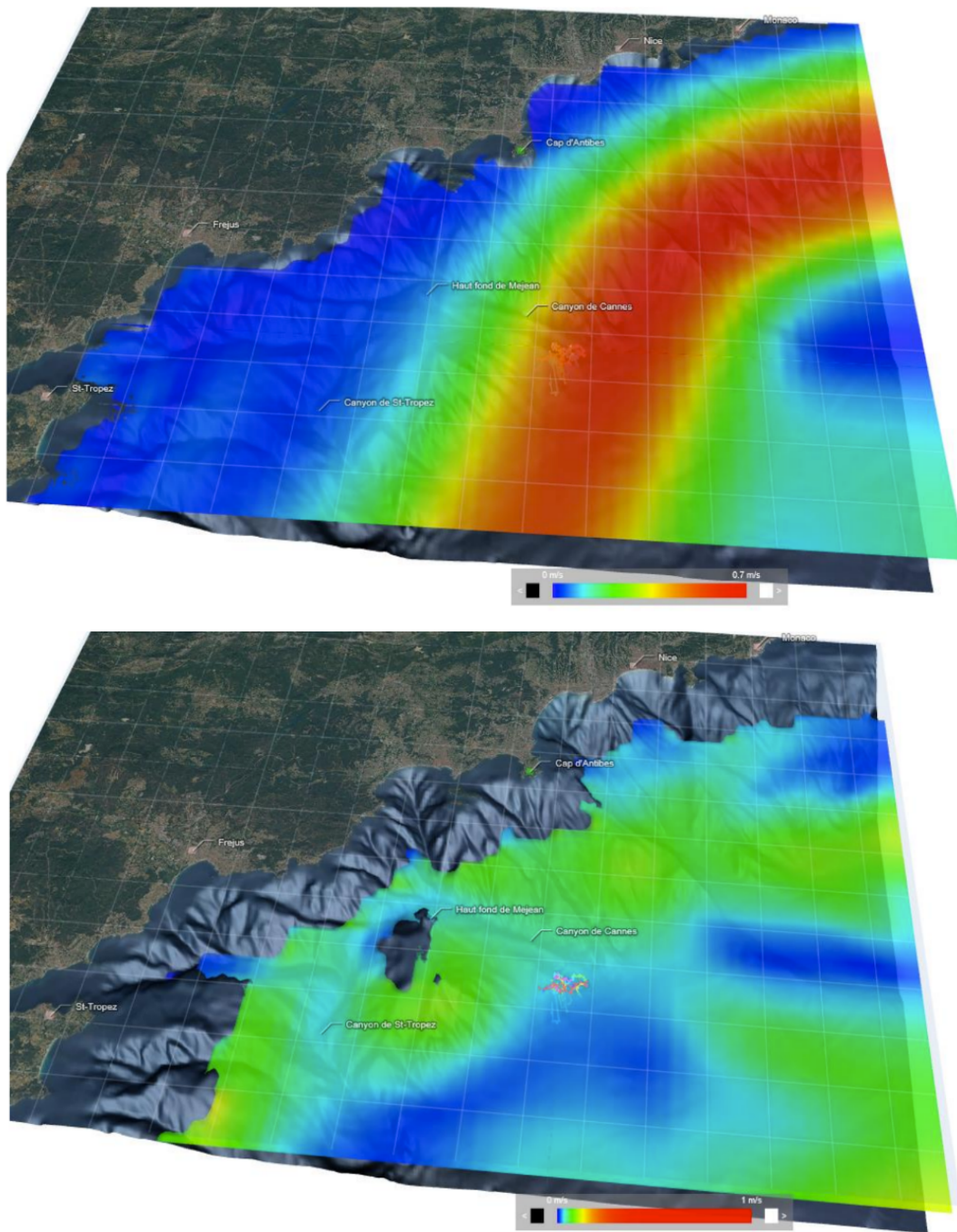


Figure 12.4: Représentation de la norme du courant le 14 janvier 2020 vu de surface (Haut), et à -400m (Bas). En surface la norme de la vitesse est maximale à 0,65m/s. On voit que les cachalots plongent dans ce front océanique entre les eaux à faible versus fort courant.

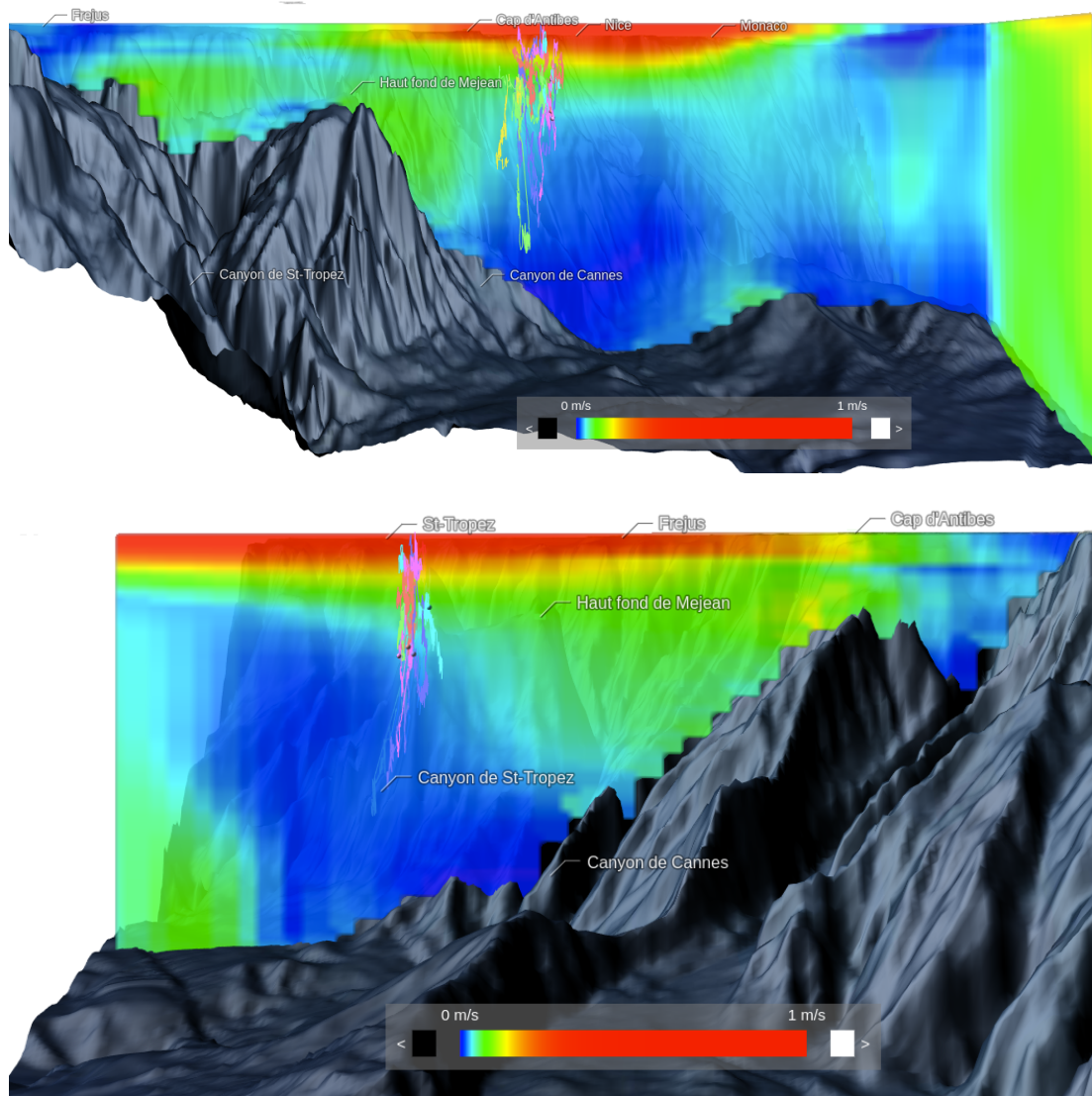


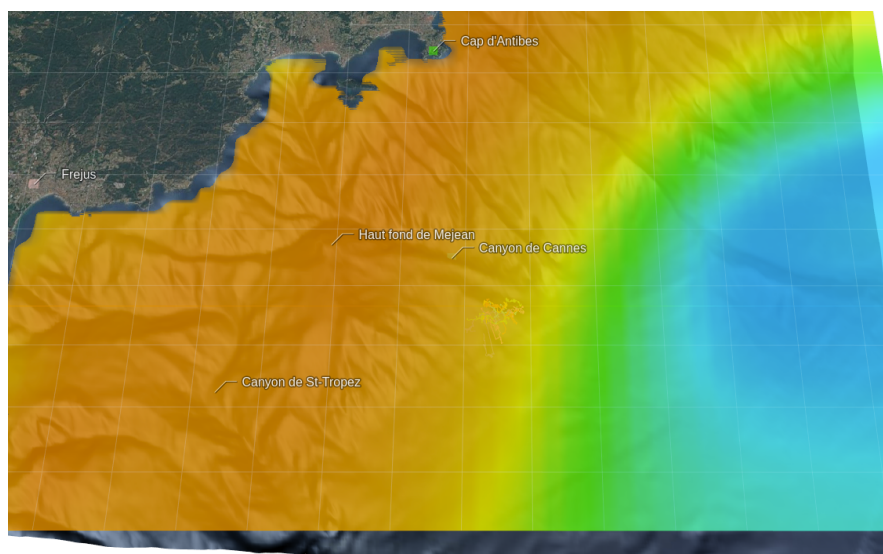
Figure 12.5: Représentation de la norme du courant sous deux coupes verticales le 14 janvier 2020. On voit que les cachalots plongent dans ce front océanique entre les eaux de faible versus fort courant, interface propice à la remontée des proies du fait du brassage des nutriments.

12.3.2 EFFET DE LA TEMPÉRATURE ET SALINITÉ SUR L'ACTIVITÉ DES CACHALOTS

Nos calculs génèrent conjointement au courant les estimations de température et salinité en 3D. Le même type de cartes a donc été produit pour ce rapport et sont accessibles en ligne à:

<http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/temp>

Ce modèle indique qu'en surface, conformément au relevé de l'ESA, la température de l'eau est de 15,3°C. Elle diminue progressivement pour atteindre 13,8°C à environ 300m de profondeur. Entre 300 et 500m de profondeur, la température de l'eau remonte est stable à 13,9°C. Puis elle diminue jusqu'à 12,9°C au niveau du fond. La Fig. 12.6 montre ce gradient de température.



S

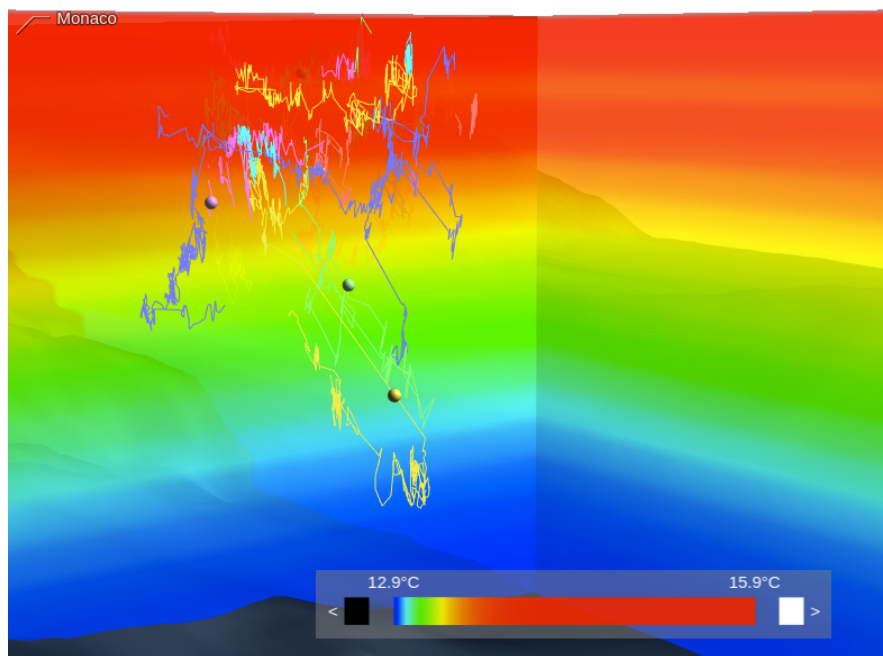


Figure 12.6: Gradient 3D de la température le 14 janvier 2020, calculé par notre modèle, en surface (Haut), et en coupe verticale dans la zone de chasse des cachalots (Bas).

La densité des pistes des cachalots est plus forte dans cet intervalle de 300m à 500m comme le présente la Fig. 12.8.

La carte de salinité issue de notre modèle est disponible ici:

<http://sabiody.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/salt>

Elle indique que la salinité évolue entre 38,0 et 38,7PSU sur toute la colonne d'eau. En surface, la salinité est de 38PSU puis diminue jusqu'à atteindre 38,5PSU à environ 300m de profondeur. Elle se stabilise entre 300 et 500m de profondeur à 38,7PSU, son maximum. Pour finir la salinité diminue à nouveau et atteint 38,5PSU au fond, cf Fig. 12.7.

A noter que nos mesures sur le terrain confirment le profil de salinité: l'eau est plus salée au large qu'à la côte. A partir de 800m de profondeur, la salinité est stable sur toute la zone.

Au final, le pic de salinité et le plateau de température sont corrélés avec le pic de densité d'activité de chasse des cachalots, cf Fig. 12.8.

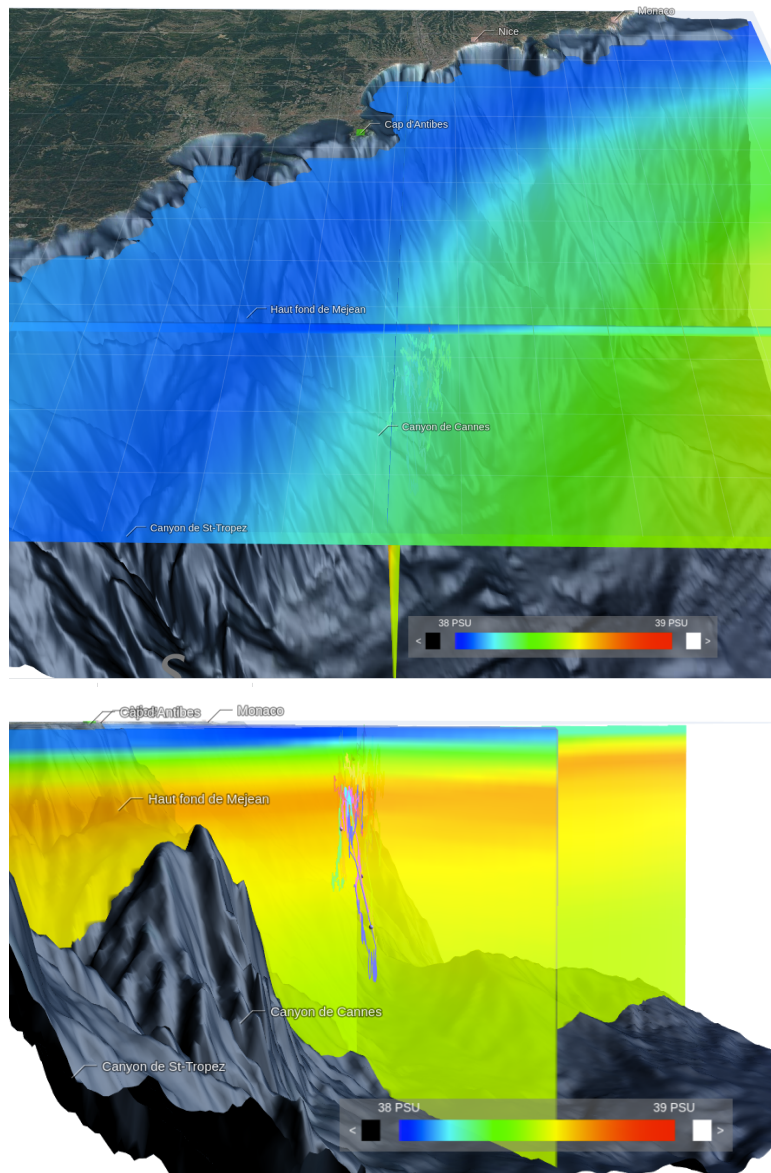


Figure 12.7: La salinité calculée par notre modèle le 14 janvier 2020, est plus forte au large (haut), et maximale entre -300m et -500m à 38,7PSU (bas).

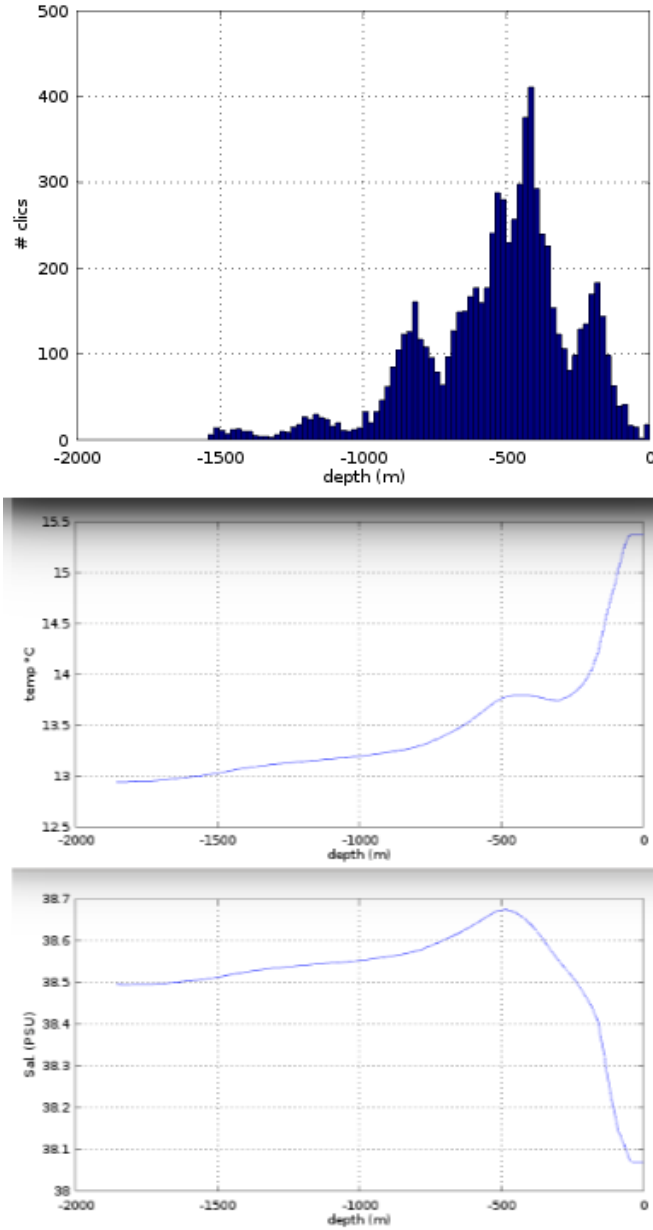


Figure 12.8: Croisement entre: (Haut) la répartition dans la colonne d'eau des clics des cachalots (=nombre de clics suivant la profondeur), (Milieu) le profil de température (suivant le modèle), et (Bas) la salinité (suivant le modèle). Le pic d'activité bioacoustique des cachalots est à -400m, au centre du plateau de température à 13.9°C qui est entre -300m et -500m. Un second pic de présence des cachalots est à -500m et le pic de salinité est aussi à -500m.

12.4 HYPOTHÈSES SUR LE COMPORTEMENT DES CACHALOTS DANS LE FRONT OCÉANIQUE

Les proies principales des cachalots, les céphalopodes présents dans les profondeurs en mer Méditerranée³², expliquent conjointement au courant et profil de température ces comportements enregistrés durant des heures dans ce volume au sud de Monaco. Les cachalots se trouvent dans une zone où la bathymétrie semble avoir un impact sur les différents paramètres physico-chimiques et sur le courant de cette période. La présence de Canyons et hauts fonds influence les masses d'eau et les modifie.

Cette zone comportait le 14 janvier 2020 un front océanique, elle devait donc être riche en nutriments, et donc en proies, ce qui facilitait leur chasse. On observe une bulle de courant où la vitesse est pratiquement nulle au fond et augmente jusqu'à -600m de profondeur à l'endroit où plongent la majorité des cachalots. Cette zone présente un courant relativement faible, ce qui est propice à des déplacements coordonnés peu énergivores.

D'autre part, ils sondent dans une eau brassée au dessus d'une bulle de courant plus faible et plus froide. Leurs proies peuvent se retrouver à cette interface à -500m du fait des upwellings et downwellings aux abords du courant qui provoque la remontée d'eau froide profonde riche en nutriments.

Les cachalots en chasse collaborative ce 14 janvier 2020 évoluent dans une petite largeur d'eau chargée en proies et à faible courant en profondeur. Ainsi 75% de leurs activités acoustiques durant les 2h de notre suivi 3D sont concentrées dans un parallélépipède rectangle de 4km de côté d'Est en Ouest, 2,5km dans l'axe Nord Sud, et 400m de hauteur (de-250m à -650m) (soit un volume de 7.2km³.) Nous pouvons penser que leurs déplacements et obser-

vations sont facilités dans ce volume, comme semblent le montrer les densités de probabilité des vitesses dans le plan horizontal (cf chapitre précédent). Ils pourraient sans trop d'effort orienter conjointement leur sonar vers leurs cibles.

On propose alors cette analogie: tels des rapaces, ces cachalots sont en 'vol' statique, observent, détectent leurs proies, depuis leur position d'observation bien contrôlée, sans gêne d'un effet Doppler qui serait produit par leur propre déplacement trop véloce. Le mouvement de la proie génèrerait un effet Doppler plus significatif, riche d'information sur sa vitesse propre et en partie sur sa direction. Les cachalots peuvent aussi dans cette zone calme maintenir leur position relativement à leurs collaborateurs de chasse, et donc construire une perception collaborative multistatique, une sorte de 'super-sonar'. Ensuite chacun capture la proie la plus proche de lui.

Notre étude est la première sur la manière dont les cachalots exploitent en 3D un front océanique. Ils en utiliseraient les structures physiques pour optimiser leurs approches aux proies. Des approfondissements sont en cours pour l'analyse de ces déplacements notamment en essayant de mesurer leurs effets Doppler comme le propose notre brevet⁴³. Ces recherches sont essentielles pour mieux comprendre leur répartition en mer, et les prédire en fonction des courants et bathymétrie donc, et alors prévenir les risques de collision avec le trafic maritime.

12.5 AUTRE RÉSULTAT MAJEUR: EFFET EN MER DU CONFINEMENT COVID19

Un autre résultat majeur de la Mission Sphyrna-Odyssey est la comparaison des niveaux acoustiques sous-marins usuels et durant le confinement dû au COVID19, entre Monaco et Canet-en-Roussillon. C'est une photographie d'un paysage acoustique d'un autre âge,

d'au moins une génération en arrière, qu'il était impossible d'enregistrer. Ce corpus acquis face à 600 km de côte figée, vierge de toute activité portuaire et de plaisance, sous ce ciel sans avion, est exceptionnel. Ce paysage durant le confinement comptait 9 dB de moins en basse fréquence (premiers octaves relatifs au trafic maritime) comparé à la période pré-confinement. Ceci correspond à 10 fois moins de puissance acoustique ! Il en ressort des communications plus lointaines entre les animaux : 2 à 6 fois plus longues pour les rorquals suivant une propagation sphérique ou cylindrique de ces sons. Cela augmente considérablement la probabilité de contact acoustique des cétacés. D'autre part cela génère certainement un plus grand taux de réussite de chasse par biosonar pour les odontocètes. Ce paysage est aussi moins pollué chimiquement : il contient 50% d'hydrocarbures dissous en moins.

Plus globalement, l'analyse des trajets des cétacés va nous renseigner sur leurs trajectoires en surface, et permettra de donner des statistiques aux autorités utiles à la gestion des risques de collision des cétacés avec le trafic maritime.

Nous avons réalisé dans cette mission des premières mondiales. Nous les devons tant à l'audace et courage de notre équipe interdisciplinaire, qu'à nos financeurs. Beaucoup d'autres calculs sont en cours sur la masse de données enregistrées durant cette mission, notamment sur d'autres groupes de cachalots rencontrés, et aussi des Tursiops et des Globicéphales.

12.6 PERSPECTIVES

Outre d'autres mises en évidence de chasses de cachalots qui sont en calcul, et des détections probables de Ziphus, et couplage avec ADNe, les deux perspectives ci-dessous seront dévelop-

pées dans le rapport suivant.

12.6.1 PERSPECTIVE EN ANALYSE DIALECTALE DE GLOBICÉPHALES

Le globicéphale, *Globicephala melas* est social, sa capacité à entretenir des liens sociaux avec son groupe repose essentiellement sur ses signaux sonores. Les fonctions de ses clics et ses vocalisations sont multiples et l'existence d'une signature acoustique, permettant d'identifier un individu ses sons permettrait de faciliter les communications au sein d'un groupe d'une dizaine d'individus. Une recherche est en cours sur les enregistrements Sphyrna au LIS pour établir si une telle signature acoustique existe chez le globicéphale. Cette recherche nécessite la définition numérique de haute qualité ainsi que la spatialisation des enregistrements afin de ne pas perdre des informations acoustiques mais aussi de localiser les individus, qualité qu'offre les enregistrements de SOM. Un enregistrement de plusieurs individus de cette espèce a été effectué la nuit du 7 décembre 2019 dans le Golfe du Lion avec les deux drones Sphyrna. Cet enregistrement de 6h30 cumulées sur les 2 hydrophones, entre 1h30 et 5h30 du matin, est à 384 kHz Fe sur 2 x 5 hydrophones avec les 2 drones équipés de JASON SMIoT 5 voies.

Cette étude en cours tire le plus d'informations possibles de la forme d'onde, de la structure mais aussi de la réflexion des clics d'un groupe de globicéphales. La méthode utilisée consiste à séparer des clics produits très proches les uns des autres et de déterminer leur source (individu). Cela permet d'évaluer si l'individu est statique ou non et si la forme d'onde du clic est une signature individuelle de l'animal. Ces calculs considérables, sont en cours, potentiellement sur le super ordinateur Français Jean-Zay sur lequel nous avons obtenu l'accès pour les traitements de SOM.

12.6.2 PERSPECTIVE DES MESURES SPHYRNA COUPLÉES À LA FIBRE OPTIQUE MEUST

Un des points forts de cette mission est la mesure jointe du bruit de fond naturel des Sphyrnas et la fibre optique de l'observatoire MEUST. Cette fibre optique originale, gérée par l'UMR GeoAzur dans le cadre du projet NumerEnv auquel participe Dyni, remonte sur 40km des abysses de Pelagos vers Toulon (cf Fig. 12.9).

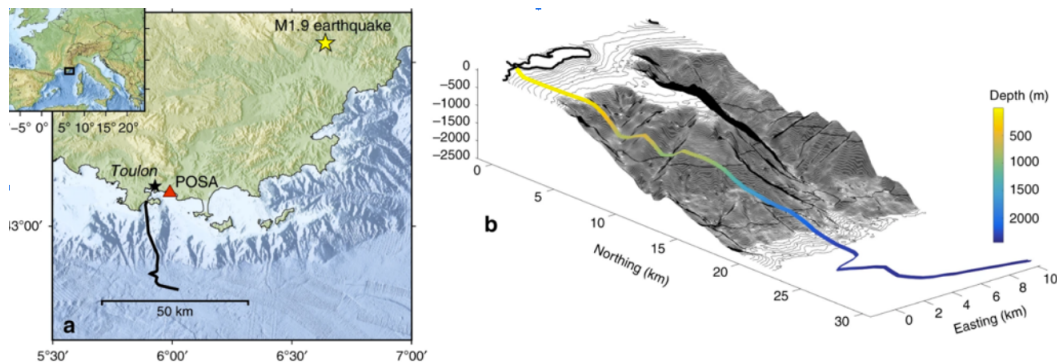


Figure 12.9: La fibre optique du protocole MEUST : les drones y ont été placés de part et d'autre en dérive durant des heures pour en contrôler les mesures basse fréquence. La fréquence d'échantillonnage de la fibre est de l'ordre de 100 Hz.

Les Sphyrnas ont dérivé durant le confinement plus de 6h de part et d'autre de cette fibre. En même temps cette fibre a mesuré des sons basse fréquence ($F_e = 100$ Hz), incluant notamment d'éventuelles vocalises de Roqual(s) propagées sur une longue distance. Les mesures de la fibre optique sont en cours de comparaison avec celles des antennes acoustiques des Sphyrnas. Cette fibre optique, fixée par -2500m, au Sud de la Presqu'île de Giens, a déjà mis en évidence des microséismes. Un intérêt, dans ce silence relatif, est de tester la sensibilité de cette mesure optique aux émissions bioacoustiques. Nous testerons notamment si le déplacement de mysticètes détectable par les Sphyrnas est mesurable par cette fibre. Ces estimations seront comparées aux localisations de sources calculées via les antennes pentaphoniques des

deux Sphyrnas qui seront placés en dérive de part et d'autre de la fibre. Si ces mesures sont validées, cette fibre a un grand potentiel pour l'observation de la biodiversité, et d'autres applications sont envisageables. On démontre ainsi l'intérêt des observatoires mobiles Sphyrnas pour des contres mesures d'intruments ayant même plusieurs km de long.



13

Annexes

13.1 VISUALISATIONS INTERACTIVES DES CHASSES EN 3D

Ces annexes contiennent les représentations des chasses collaboratives, issues de nos calculs sans retouche. Elles sont disponibles en ligne sur nos sites de recherche Sphyrna :

Carte globale : <http://philippe.cosentino.free.fr/vamos/sphyrna-odyssey>

Vues 3D et 2D ou mixtes, avec figuration des cones d'émission des biosonar :

http://sabiody.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_et_al_Mercier_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_accelx2.mp4, (4.3G)

http://sabiody.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_et_al_Mercier_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_accelx2_skyview.mp4, (3.6G)

http://sabiody.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/SO_Glotin_Thellier_et_al_PhyseterAlliance_Monaco_20200114_3DtracksX_Y_Z.mp4, (383M)

13.2 DONNÉES ENVIRONNEMENTALES ET DÉTECTIONS

Ces annexes contiennent les données chlorophylle A, Température surface de toute la mission, et autres données chimiques, et enfin les tables dB par octaves pour ACCOBAMS tels que définis dans le chapitre acoustique, en format CSV comme requis, incluant les détections obtenues à ce jour des espèces cibles :

http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/data/S020192020_ChloroA.mp4, (60M)
http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/data/S020192020_TempSurf.mp4, (145M)
http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/data/S020192020_chem_other.csv, (5.9K)
http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/data/S020192020_db_hourmedian_annot_r1.csv, (58K)

13.3 CARTES 3D INTERACTIVES DE COURANT, SALINITÉ ET TEMPÉRATURE

http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/current_WE
http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/current_NS
http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/current_norm
<http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/temp>
<http://sabiod.univ-tln.fr/pub/SPHYRNA/3D/salt>

References

- [1] Abeille, R., Doh, Y., Dufour, O., Giraudet, P., Halkias, X., Glotin, H., Prevot, J., Rabouy, C., & Razik, J. (2012). *Détection et classification sur transect audiovisuel de populations de cétacés du Nord Pelagos aux Iles d'Or*. Technical report, PELAGOS International Sanctuary. http://sabiiod.org/pub/PELAGOS_DECAV.pdf.
- [2] Abeille, R., Doh, Y., Giraudet, P., Glotin, H., Prévot, J.-M., & Rabouy, C. (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. *Journal of the Scientific Reports of Port-Cros National Park*, 28.
- [3] Almeida, P. J. A. L., Vieira, M. V., Kajin, M., Forero-Medina, G., & Cerqueira, R. (2010). Indices of movement behaviour: conceptual background, effects of scale and location errors. *Zoologia*, 5, 674–680.
- [4] Amodei, D., Ananthanarayanan, S., Anubhai, R., Bai, J., Battenberg, E., Case, C., Casper, J., Catanzaro, B., Cheng, Q., Chen, G., et al. (2016). Deep speech 2: End-to-end speech recognition in english and mandarin. In *International conference on machine learning* (pp. 173–182).
- [5] Balestrieri, R., Cosentino, R., Glotin, H., & Baraniuk, R. (2018). Spline filters for end-to-end deep learning. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 364–373).
- [6] Bénard, F., Glotin, H., & Giraudet, P. (2011). Highly defined whale group tracking by passive acoustic stochastic matched filter. In *Advances in Sound Localization*. IntechOpen.
- [7] Benhamou, S. (2004). How to reliably estimate the tortuosity of an animal's path: straightness, sinuosity, of fractal dimension? *Journal of Theoretical Biology*, 229, 209–220.

- [8] Best, P., Ferrari, M., Poupard, M., Paris, S., Marxer, R., Symonds, H., Spong, P., & Glotin, H. (2020). Deep learning and domain transfer for orca vocalization detection. In *International joint conference on neural networks*.
- [9] Best, P. & Glotin, H. (2019). Noise pollution and effect on marine life. *Research Report, Abyssound FUI, RRLIS CNRS Univ. Toulon*.
- [10] Bon, C., Penna, A., d'Ovidio, F., Arnould, J., Poupard, T., & Bost, C. (2015). Influence of oceanographic structures on foraging strategies: Macaroni penguins at crozet islands. *Movement ecology*, 3, 32.
- [11] Collaborative (2017). Biodiversity and ecosystem (eo 1): Common indicator 3: Species distributional range - marine mammals. *United Nation, Barcelona Convention - Mediterranean 2017 Quality Status Report*.
- [12] Connolly et al. (2014). Regional impact of submarine canyons during seasonal upwelling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 953–975.
- [13] Cotte, C., Ovidio, F., Chaigneau, A., Levy, M., Taupier-Letage, I., Mate, B., & Guinet, C. (2011). Scale-dependent interactions of mediterranean whales with marine dynamics. *Limnology and Oceanography*, 56.
- [14] Craparo, E. & Karatas, M. (2020). Optimal source placement for point coverage in active multistatic sonar networks. *Naval Research Logistics (NRL)*, 67(1), 63–74.
- [15] Dejean (2011). Persistence of environmental dna in freshwater ecosystems. *Plos One*, 6(8), 1–4.
- [16] Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In *IEEE Int. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 248–255).
- [17] Domsps, B., Dumas, D., Guérin, C.-A., & Marmain, J. (2020). High-frequency radar ocean current mapping at rapid scale with autoregressive modeling.
- [18] Edward A. Codling, M. J. P. & Benhamou, S. (2008). Random walk models in biology. *Journal of the Royal Society Interface*, 5, 813–834.
- [19] Fairbrass, A. J., Firman, M., Williams, C., Brostow, G. J., Titheridge, H., & Jones, K. E. (2019). Citynet—deep learning tools for urban ecoacoustic assessment. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(2), 186–197.

- [20] Ferrari, M., Glotin, H., Marxer, R., & Asch, M. (2020). Docc10: Open access dataset of marine mammal transient studies and end-to-end cnn classification. In *IJCNN*.
- [21] Ferrari, M., Poupard, M., Giraudet, P., Marxer, R., Prévot, J.-M., Soriano, T., & Glotin, H. (2019). Efficient artifacts filter by density-based clustering in long term 3d whale passive acoustic monitoring with five hydrophones fixed under an autonomous surface vehicle. In *IEEE OCEANS* (pp. 1–7).
- [22] Fonseca, E., Plakal, M., Ellis, D. P., Font, F., Favory, X., & Serra, X. (2019). Learning sound event classifiers from web audio with noisy labels. In *IEEE Int. Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 21–25).
- [23] Forcada et al. (2004). Bottlenose dolphin abundance in the nw mediterranean: addressing heterogeneity in distribution. *Marine Ecology Progress Series*, 275, 275–287.
- [24] Fourniol, M., Gies, V., Barchasz, V., Kussener, E., Barthelemy, H., Vauché, R., & Glotin, H. (2018a). Analog ultra low-power acoustic wake-up system based on frequency detection. In *IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)* (pp. 109–115).
- [25] Fourniol, M., Gies, V., Barchasz, V., Kussener, E., Barthelemy, H., Vauché, R., & Glotin, H. (2018b). Low-power wake-up system based on frequency analysis for environmental internet of things. In *Proc. IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*.
- [26] Fourniol, M., Gies, V., Barchasz, V., Kussener, E., & Glotin, H. (2018c). Applications of an ultra low-power analog wake-up detector for environmental iot networks and military smart dust. In *IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)* (pp. 16–22).
- [27] Fukumori, K., Nguyen, H. T. T., Yoshida, N., & Tanaka, T. (2019). Fully data-driven convolutional filters with deep learning models for epileptic spike detection. In *Int. Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (IEEE ICASSP)* (pp. 2772–2776).
- [28] Gannier (2002). Summer distribution of fin whales, *balaenoptera physalus*, in the north-western mediterranean marine mammals sanctuary. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 157, 135–150.
- [29] Gannier (2017). Distribution comparée du dauphin commun (*Delphinus Delphis*) et du dauphin bleu et blanc (*Stenella Coeruleoalba*) en méditerranée occidentale. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 72(4), 335–352.

- [30] Gannier (2018). Comparaison de l'habitat estival de quatre cétacés teuthophages préférentiels en méditerranée nord-occidentale. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 73(4), 582–602.
- [31] Gannier et al. (1994). Cetacean occurrence in the gulf of lion surroundings. *Eur. Res. Cetaceans*, 8, 87–91.
- [32] Garibaldi, F. & Podestà, M. (2014). Stomach contents of a sperm whale (*physeter macrocephalus*) stranded in italy (ligurian sea, north-western mediterranean). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 94(6), 1087–1091.
- [33] Giraudet, P. & Glotin, H. (2006a). Echo-robust and real-time 3d tracking of marine mammals using their transient calls recorded by hydrophones array. In *Int. Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proc.*, volume 4: IEEE.
- [34] Giraudet, P. & Glotin, H. (2006b). 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.
- [35] Glotin, H., Caudal, F., & Giraudet, P. (2008). Whale cocktail party: real-time multiple tracking and signal analyses. *Canadian acoustics*, 36(1), 139–145.
- [36] Glotin, H., Clark, C., LeCun, Y., Dugan, P., Halkias, X., & Sueur, J. (2013a). Machine learning for bioacoustics ICML4B, 1st workshop on. In *Int. Conf. Machine Learning, workshop*. http://sabiiod.org/ICML4B2013_book.pdf.
- [37] Glotin, H., Giraudet, P., Ricard, J., Malige, F., Patris, P., Roger, V., Prévot, J.-M., Poupard, M., Philippe, O., & Cosentino, P. (2017a). Projet VAMOS : Visées aériennes de mammifères marins jointes aux observations acoustiques sous-marines de la bouée BOMBYX et antares: nouveaux modèles en suivis et lois allométriques du *Physeter macrocephalus*, *Ziphius Cavirostris* et autres cétacés. http://sabiiod.org/pub/PELAGOS_VAMOS.pdf.
- [38] Glotin, H., Hildebrand, J., Dunleavy, K., & Roch, M. (2018a). Detection classification localisation challenge. In *DCLDE Conference Proceedings* (pp. 134). http://sabiiod.univ-tln.fr/DCLDE/files/DCLDE2018_OfficialProgram.pdf.
- [39] Glotin, H., LeCun, Y., Artieres, T., Mallat, S., Tchernichovski, O., & Halkias, X. (2013b). *Neural information processing scaled for bioacoustics, from neurons to big data*. NeurIPS (NIPS) Workshop. http://sabiiod.org/NIPS4B2013_book.pdf.

- [40] Glotin, H., Ricard, J., & Balestrieri, R. (2017b). Fast chirplet transform injects priors in deep learning of animal calls and speech. In *International Conference on Learning Representation (workshop sess)*.
- [41] Glotin, H., Spong, P., Symonds, H., Roger, V., Balestrieri, R., Ferrari, M., Poupard, M., Towers, J., Veirs, S., Marxer, R., et al. (2018b). 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.
- [42] Glotin, H. G. P., Giraudet, P. V., & Caudal, F. (2014). Real-time robust method for determining the trajectory of one or more cetaceans by means of passive acoustics, using a laptop computer. US Patent 8,638,641.
- [43] Glotin, H. G. P., Mischenko, A., & Giraudet, P. V. (2015). Joint constraints imposed on multiband time transitivity and doppler-effect differences, for separating, characterizing, and locating sound sources via passive acoustics. Patent WO2015177172A1 <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/2d/de/a0db00f3ca53fb/w02015177172A1.pdf>.
- [44] Gnone et al. (2011). Distribution, abundance, and movements of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) in the pelagos sanctuary mpa (north-west mediterranean sea. *Aquat. Conserv.: Mar. and Freshw. Ecosyst*, 21, 372–388.
- [45] Grill, T. & Schlüter, J. (2017). Two convolutional neural networks for bird detection in audio signals. In *25th European Signal Processing Conference (IEEE EUSIPCO)* (pp. 1764–1768).
- [46] Guihou, K., Marmain, J., Ourmieres, Y., Molcard, A., Zakardjian, B., & Forget, P. (2013). A case study of the mesoscale dynamics in the north-western mediterranean sea: a combined data–model approach. *Ocean Dynamics*, 63(7), 793–808.
- [47] Halkias, X. C., Paris, S., & Glotin, H. (2013). Classification of mysticete sounds using machine learning techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5), 3496–3505.
- [48] Harley, H., Putman, E., & Roitblat, H. (2003). Bottlenose dolphins perceive object features through echolocation. *Nature*, 424, 667–9.
- [49] Harper et al. (2019). Prospects and challenges of environmental dna (edna) monitoring in freshwater ponds. *Hydrobiologia*, 826, 25–41.

- [50] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770–778).
- [51] Huang, J. J. & Leanos, J. J. A. (2018). Aclnet: efficient end-to-end audio classification cnn. *arXiv preprint arXiv:1811.06669*.
- [52] Jacobsen, J.-H., Oyallon, E., Mallat, S., & Smeulders, A. W. (2017). Multiscale hierarchical convolutional networks. *arXiv preprint arXiv:1703.04140*.
- [53] Kandia, V. & Stylianou, Y. (2006). Detection of sperm whale clicks based on the Teager–Kaiser energy operator. *Applied Acoustics*, 67, 1144–1163.
- [54] Karatas, M., Gunal, M. M., & Craparo, E. M. (2016). Performance evaluation of mobile multistatic search operations via simulation. In *Proceedings of the 49th Annual Simulation Symposium* (pp. 1–6).
- [55] Kim, Y., Yim, J., Yun, J., & Kim, J. (2019). Nlnl: Negative learning for noisy labels. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 101–110).
- [56] Kingma, D. P. & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- [57] Kiranyaz, S., Ince, T., Abdeljaber, O., Avci, O., & Gabbouj, M. (2019). 1-d convolutional neural networks for signal processing applications. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 8360–8364).
- [58] Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 1097–1105).
- [59] Laran et al. (2017). Seasonal distribution and abundance of cetaceans within french waterspart i: the north-western mediterranean, including the pelagos sanctuary. *Deep-Sea Res. Part II*, 141, 20–30.
- [60] LeCun, Y., Bengio, Y., et al. (1995). Convolutional networks for images, speech, and time series. *The handbook of brain theory and neural networks*, 3361(10).
- [61] LeCun, Y., Boser, B., Denker, J. S., Henderson, D., Howard, R. E., Hubbard, W., & Jackel, L. D. (1989). Backpropagation applied to handwritten zip code recognition. *Neural computation*, 1(4), 541–551.

- [62] Madsen, P.-T., Payne, R., Kristiansen, N., Wahlberg, M., Kerr, I., & Møhl, B. (2002). Sperm whale sound production studied with ultrasound time/depth-recording tags. *J. of Exp. Biology*, 205(13), 1899–1906.
- [63] Mann, e. a. (2017). *Deep Thinkers : Inside the Minds of Whales, Dolphins, and Porpoises*. Chicago Univ.
- [64] Migon, C., Nival, P., & Sciandra, A. (2020). *The Mediterranean Sea in the Era of Global Ghange - Volume 1*, volume 1 of *Environmental Sciences Series*. ISTE Science Publishing LTD.
- [65] Nosal, E.-M. & Frazer, L. N. (2007). Sperm whale three-dimensional track, swim orientation, beam pattern, and click levels observed on bottom-mounted hydrophones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(4), 1969–1978.
- [66] Ourmières, Y., Zakardjian, B., Béranger, K., & Langlais, C. (2011). Assessment of a nemo-based downscaling experiment for the north-western mediterranean region: Impacts on the northern current and comparison with adcp data and altimetry products. *Ocean Modelling*, 39(3-4), 386–404.
- [67] Poupard, M., Best, P., Schlüter, J., Symonds, H., Spong, P., & Glotin, H. (2019a). *Large-scale unsupervised clustering of Orca vocalizations: a model for describing orca communication systems*. Technical report, PeerJ Preprints.
- [68] Poupard, M., de Montgolfier, B., & Glotin, H. (2019b). Ethoacoustic by bayesian non parametric and stochastic neighbor embedding to forecast anthropic pressure on dolphins. In *OCEANS* (pp. 1–5): IEEE.
- [69] Poupard, M., Ferrari, M., Schluter, J., Marxer, R., Giraudet, P., Barchasz, V., Gies, V., Pavan, G., & Glotin, H. (2019c). Real-time passive acoustic 3d tracking of deep diving cetacean by small non-uniform mobile surface antenna. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 8251–8255).
- [70] Pukelsheim, F. (1994). The three sigma rule. *The American Statistician*, 48(2), 88–91.
- [71] Reeves et al. (2006). The status and distribution of cetaceans in the black sea and mediterranean sea. *IUCN Centre for Mediterranean Cooperation, Malaga, Spain*.
- [72] Rendell et al. (2014). Abundance and movements of sperm whales in the western mediterranean basin. *Aquat. Conserv.: Mar. and Freshw. Ecosyst*, 24(S1), 31–40.

- [73] Salgado-Hernanz et al. (2019). Trends in phytoplankton phenology in the mediterranean sea based on ocean-colour remote sensing. *Remote Sensing of Environment, Elsevier Ed.*, 221, 50–64.
- [74] Stoeckle et al. (2018). Gofish: A versatile nested pcr strategy for environmental dna assays for marine vertebrates. *PLoS ONE*, 13(12), 1–17.
- [75] Thulasidasan, S., Chennupati, G., Bilmes, J. A., Bhattacharya, T., & Michalak, S. (2019). On mixup training: Improved calibration and predictive uncertainty for deep neural networks. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 13888–13899).
- [76] Waerebeek et al. (1999). Spatial and temporal distribution of the minke whale, *baenaoptera acutorostrata* (lacepede, 1804), in the mediterranean sea, with reference to stock identity. *Journal of Cetacean Research and Management*, 1(3), 223–237.
- [77] Watts, A. W. & Jennifer Miksis-Olds, U. o. N. H. (2018). The ocean as a living sensor: Environmental dna and acoustics for detecting marine life. *The Marine Science & Policy Series [Concept summary]*, The Rockefeller University (New York City).