



Rapport final du projet ACaPELA (ACoustique PELAgique)

Viviane David, Anne Mouget, Loïc Le Goff, Patrice Brehmer, Yannick Perrot,
Pierre Thiriet, Éric Feunteun, Anthony Acou

► To cite this version:

Viviane David, Anne Mouget, Loïc Le Goff, Patrice Brehmer, Yannick Perrot, et al.. Rapport final du projet ACaPELA (ACoustique PELAgique). PatriNat (OFB-CNRS-MNHN), IRD, Dinard. 2022, 72 p. + 6 p. d'annexes. mnhn-04136808

HAL Id: mnhn-04136808

<https://mnhn.hal.science/mnhn-04136808>

Submitted on 21 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Surveillance DCSMM D1-Poissons et Céphalopodes des milieux pélagiques côtiers (SP 3/action 7)

Rapport final du projet ACaPELA (ACoustique PELAgique)

David V.^{1,2}, Mouget A.³, Le Goff L.³, Brehmer P.², Perrot Y.², Thiriet P.⁴, Feunteun E.³, & Acou A.⁴

¹ UAR OFB-CNRS-MNHN PatriNat, 45 rue Buffon, 75005 Paris

² IRD Délégation régionale France Ouest, UMR Lemar (UBO, CNRS, IRD, Ifremer), 29280, Plouzané

³ MNHN, Station marine de Dinard (CRESCO), UMR Borea (MNHN, CNRS, UPMC, IRD, Université de Caen, UA), 38 Rue du Port Blanc, 35800 Dinard

⁴ Office Français pour la Biodiversité – UAR OFB-CNRS-MNHN PatriNat, Station marine du MNHN, 38 Rue du Port Blanc, 35800 Dinard

le 30/06/2022

Ce travail a bénéficié du financement de



Pour citer ce document :

David V., Mouget A., Legoff L., Brehmer P., Perrot Y., Thiriet P., Feunteun E. & Acou A. (2022). Rapport final du projet ACaPELA (ACoustique PELAgique). Fond Européens pour les affaires maritimes et la pêche (FEAMP). Rapport Sci. et Technique PatriNat, MNHN, IRD, Dinard, 72 p.

Contacts :

acou@mnhn.fr; viviane.david@mnhn.fr; anne.mouget@mnhn.fr; patrice.brehmer@ird.fr;
eric.feunteun@mnhn.fr

Mots-clefs

Poissons pélagiques, biocénose, acoustique, sondeur, sonar, côtier, ultra-côtier, surveillance, DCSMM

Résumé

Le projet ACaPELA (ACoustique PELagique) est un projet porté par le MNHN (Station marine de Dinard) et réalisé en collaboration avec l'IRD (UMR LEMAR) et PatriNat (OFB-CNRS-MNHN). Ce projet R&D a pour objectif de développer et valider la méthodologie de surveillance DCSMM pour l'évaluation de l'état écologique des populations et peuplements de poissons et céphalopodes (PCs) des milieux pélagiques côtiers, c'est-à-dire les espèces pélagiques ou benthopélagiques fréquentant la colonne d'eau (le pelagos) dans les zones dont la bathymétrie est comprise entre 0 et 40 m (zones dites côtières). Les protocoles d'échantillonnages proposés consistent à combiner l'utilisation de deux technologies d'acoustiques actives complémentaires, orientées verticalement : un sondeur large bande (Simrad EK80, 70, 120 et 200 kHz) et un sonar multifaisceaux (Simrad M3, 500 kHz).

L'allocation des objets détectés (ou écho-traces) est réalisée en croisant les données acoustiques avec des techniques dites de « vérités terrain » dans le but d'identifier les individus à l'échelle spécifique, les dénombrer et estimer leur taille. Débuté fin 2019, ACaPELA a achevé la phase 1 de son développement méthodologique en mars 2021 et a entamé depuis sa phase 2 (développement méthodologique des stratégies d'échantillonnages et des indicateurs). La phase 1 a permis l'adaptation du matériel aux contraintes liées aux zones côtières et aux petits fonds (0-40 m), la mise en place du protocole et de la stratégie d'échantillonnage incluant la sélection des sites et le positionnement des radiales en prenant en compte les facteurs environnementaux et anthropiques susceptibles d'impacter les populations. Depuis fin 2019, 16 campagnes ont été planifiées, réparties sur 4 zones situées dans 2 sous-régions marines (SRM) différentes (Mers Celtiques et Méditerranée Occidentale). Ces campagnes ont permis de tester la méthodologie dans des écosystèmes variés dans l'optique d'un déploiement national et initier l'acquisition des séries chronologiques. La stratégie d'échantillonnage dans chaque SRM ainsi que les différents résultats de ces missions sont présentés dans ce rapport. Différentes méthodes (pêche au chalut méso-pélagique, observation par plongée, observation par caméras en utilisant un « *Hammerhead* », instrument remorqué et télécommandé équipé d'un système stéréoscopique) ont notamment été testées pour réaliser l'allocation spécifique, c'est-à-dire attribuer une espèce à une écho-trace observée. Le chalut mesopélagique s'est révélé efficace uniquement en eau très peu profonde, tandis que les observations par plongée, quoique très efficaces, ne peuvent être utilisées à large échelle pour des raisons évidentes de logistique et sécurité des plongeurs. Ainsi, le *Hammerhead* équipé du système stéréoscopique apparaît être la méthode la plus prometteuse pour un déploiement à large échelle même si le développement d'algorithmes de type *deep learning* est nécessaire pour automatiser l'identification ainsi que l'estimation du nombre et de la taille des individus.

La phase 2 s'est centrée sur l'amélioration et la finalisation des différents protocoles d'acquisition de données et surtout sur les traitements et analyses des données acoustiques acquises. Ce dernier point est crucial pour calculer les métriques pouvant renseigner les critères DCSMM. L'objectif est d'évaluer le Bon Etat Ecologique (BEE) à l'échelle des populations (D1) (abondance des espèces pélagiques, distribution spatio-temporelle, habitat des espèces, etc.) et/ou à l'échelle du peuplement (D4) (composition spécifique et abondances relatives par guildes fonctionnelles) et d'évaluer les impacts des pressions anthropiques sur l'état écologique des PCs pélagiques côtiers. Les critères qu'il est possible de renseigner ont ainsi été explorés et décrits dans ce rapport. D'autre part, les méthodes pour évaluer le BEE à partir des données obtenues lors des missions sont également présentées. A ce stade, le dispositif ACaPELA n'est pas encore opérationnel pour renseigner le critère D1 (approche par espèce) puisque celui-ci nécessite l'obtention de vérités terrain afin d'identifier l'espèce. En revanche, le dispositif ACaPELA est opérationnel pour renseigner le critère D4 (approche par peuplement) puisque celui-ci peut être renseigné sans vérité terrain, notamment par le suivi de grandes guildes trophiques (plancton, poisson, top prédateurs) en fonction de leur localisation dans la colonne d'eau (pélagique vs benthopélagique). Ces guildes sont distinguées en fonction de leur réponse acoustique et de données disponibles dans la littérature mais pourront être affinées (e.g., sous-groupe de poissons pélagiques en fonction de leur comportement en banc (agrégation, forme, etc.)). Les outils acoustiques utilisés dans ACaPELA permettent donc de tisser des synergies avec les autres programmes thématiques (e.g., Habitats Pélagiques, Habitats Benthiques, Mammifères marins).

Table des matières

Table des matières	4
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux	9
1. Introduction et contexte de l'étude	10
2. Matériel et méthodes du dispositif ACaPELA	12
2.1. Localisation et couverture spatiale des campagnes	12
2.2. Calendrier des campagnes	13
2.3. Stratégie d'échantillonnage dans les zones d'études	15
2.3.1. Rade de Brest et baie de Douarnenez	16
2.3.2. Roscoff	16
2.3.3. Baie de Saint-Malo	17
2.3.4. Parc National des Calanques à Marseille	18
2.4. Métriques acoustiques et paramètres environnementaux acquis au cours des campagnes	20
2.4.1. Les métriques acoustiques	20
2.4.2. Les données de vérité terrain	25
2.4.3. Les stations CTD	29
3. Méthodologie pour répondre aux besoins de la DCSMM	30
3.1. Pertinence de ce dispositif pour une surveillance DCSMM.	30
3.1.1. Rappel des objectifs des PdS	30
3.1.2. Critères pouvant être renseignés par le dispositif ACaPELA.....	31
3.2. Evaluation du Bon Etat Ecologique	33
4. Résultats du dispositif ACaPELA	36
4.1. Résultats sans allocation spécifique.....	36
4.1.1. Répartition spatiale des poissons pélagiques.....	36
4.1.2. Gradient côte-large	37
4.1.3. Estimation de l'abondance des poissons pélagiques en banc le long des transects...	39
4.1.4. Variabilité temporelle	40
4.1.5. Analyses par grandes guildes trophiques.....	42
4.2. Résultats avec allocation spécifique	45
4.2.1. Pêches sur détection	45
4.2.2. Observations visuelles par des plongeurs	46
4.2.3. Observations par vidéos	47
4.2.4. Modèles d'allocations d'espèce.....	50
4.3. Résultats complémentaires sur les paramètres environnementaux des sites étudiés	53
4.4. Evaluation de l'impact anthropique	55
5. Discussion	61

5.1.	Importance des zones côtières pour les poissons pélagiques	61
5.2.	Variabilités spatio-temporelles de la distribution et abondance des poissons pélagiques .	61
5.3.	Allocations spécifiques pour renseigner le Descripteur 1 DCSMM.....	62
5.4.	Approche par guildes trophiques	63
5.5.	Approche mécanistique utile à la gestion des AMP	63
6.	Conclusions et perspectives.....	64
6.1.	Perspectives du projet ACaPELA.....	64
6.2.	Complémentarité du dispositif ACaPELA au regard d'autres dispositifs	66
6.2.1.	Suivis par plongée	66
6.2.2.	Suivis ADNe.....	67
6.2.3.	Vers une « surveillance multi-sources et multi-échelles »	67
6.3.	Synergies à construire avec d'autres programmes thématiques	68
7.	Références	69
	Annexe 1 : Délimitations et découpages administratifs maritimes	73
	Annexe 2 : Présentation des navires de la flotte océanographique française	74
	Annexe 3 : Productions du projet ACaPELA.....	76

Liste des figures

Figure 1. Frise chronologique présentant les différentes phases de développement méthodologique du dispositif R&D ACaPELA. La flèche jaune indique le stade de développement du dispositif à la rédaction de ce rapport (juin 2022).	12
Figure 2. Distribution des espèces ciblées par les pêcheurs et prises accessoires en Bretagne. Le nombre dans chaque rectangle représente le nombre de réponses obtenues lors de notre enquête (en juin et juillet 2020). Source : rapport de stage d'Eva Russier.	13
Figure 3. Calendrier des missions effectuées entre Décembre 2019 et Juillet 2022.	14
Figure 4. Représentation schématique du positionnement des radiales en prenant en compte les facteurs environnementaux, anthropiques et spécificités locales dans la mesure du possible.	15
Figure 5. Carte de la zone de Brest et Douarnenez (a). Les radiales réalisées dans la rade de Brest et en baie de Douarnenez sont représentées en traits pleins violets. Photographie du navire l'Albert Lucas (b), navire de façade basé à Brest, avec sa perche déployée (© INSU-CNRS).	16
Figure 6. (a) Carte de la zone de Roscoff. Les radiales réalisées dans la baie de Roscoff à bord du Néomysis sont représentées par les traits pleins violets et les rectangles rouges et blancs représentent les points de suivi par plongée des plongeurs MNHN-Dinard. (b) Photographie du navire Néomysis (©Wilfried Thomas, Station Biologique de Roscoff).	17
Figure 7. (a) Carte de la baie de Saint-Malo. Les radiales réalisées dans cette zone sont représentées par les traits pleins rouges. (b) Photographie du semi-rigide Emeraude explorer du Museum National d'Histoire Naturelle instrumenté par une perche acoustique.	18
Figure 8. Carte de la zone du Parc National des Calanques de Marseille avec en orange la localisation des ZNP (a). Les radiales réalisées Radiales réalisées dans le Parc National des Calanques de Marseille en traits verts. Photographies du navire de l'Antédon II (b) et du Cro-Magnon (c).	20
Figure 9. Présentation d'un échogramme. La couleur dépend de l'intensité acoustique. Le fond, plusieurs types de bancs de poissons ainsi que des poissons isolés peuvent être observés.	21
Figure 10. Photographie du matériel acoustique avec en orange à gauche les 3 fréquences de l'EK80 et en bleu à droite le M3 (a). Représentation schématique des deux systèmes acoustiques, le sonar multifaisceaux M3 (gris clair) avec sa fauchée large (120°) et le sondeur split-beam EK80 (gris foncé) avec sa faible fauchée (7°) (b).	21
Figure 11. Visualisation d'un échogramme renvoyé par le sondeur SIMRAD EK80 en mode CW pour les trois fréquences (de gauche à droite 200, 120 et 70 kHz).	22
Figure 12. Observation 3-D d'un banc enregistré par le sonar multi-faisceaux. Les couleurs représentent les différents niveaux d'intensité acoustique (en dB).	24
Figure 13. Déploiement du chalut méso-pélagique. Photographies du chalut prêt à filer (a), d'un kite du chalut qui permet son ouverture (b) et du logiciel Scanmar permettant une estimation de l'ouverture du chalut et de son positionnement dans la colonne d'eau (c).	26
Figure 14. Photographies d'un plongeur notant les informations concernant les bancs de poissons pour le protocole en « plongée libre » (a) et d'un plongeur tracté équipé de la communication filaire pour le protocole en « plongée tractée » (b).	27
Figure 15 : Photographie du ROV (Remotely Operated underwater Vehicle) testé en juin 2020 à Roscoff et Douarnenez	28
Figure 16. Photographie du cube de calibration SeaGIS utilisé pour calibrer le système stéréoscopique (a) et système stéréoscopique testé dans le Parc National des Calanques de Marseille en août 2020 équipé de deux caméras GoPros Héro 6 dans des caissons et de deux bouées oranges pour la stabilisation sous l'eau (b).	29
Figure 17. Photographie du « Hammerhead » (OSIL) équipé du système stéréoscopique construit par le dispositif ACaPELA.	29
Figure 18. Schéma d'évaluation du Bon Etat Ecologique (BEE) en utilisant une série temporelle. En noir les années utilisées pour établir les seuils de référence. En vert les variation d'un indicateur restant dans le seuil ; en rouge les variations d'un indicateur passant sous le seuil de BEE.	34

Figure 19. Représentation schématique de la définition du BEE d'une population d'espèce tel que réalisé par les co-pilotes Ifremer D1PC. Source : (Brind'Amour and Delaunay, 2018).	35
Figure 20. Carte de présence/absence de bancs de poissons pélagiques dans les zones de Roscoff en juin 2021 (a) et de Saint-Malo en mars 2021 (b). Les carrés rouges représentent les absences tandis que les carrés verts représentent la présence avec une maille de 500x500 m.	36
Figure 21. Résultats de la campagne de Douarnenez en Juin 2020 par les données d'écho-intégration a) Cartographie des MVBS (Mean Volume Backscattering Strength, en dB) à 120 kHz avec une interpolation entre les radiales (en noir). En bleu, les zones de faible MVBS et en rouge avec une importante MVBS donc potentiellement une biomasse importante et (b) boxplots comparant les MVBS (en dB) le long de la radiale côte-large en fonction de la classe de profondeur observée. Les 3 fréquences de l'EK80 sont représentées avec en vert 70 kHz, en orange 120 kHz et en violet 200 kHz.....	37
Figure 22. Visualisation des bancs extraits à 120 kHz le long de la radiale côte-large à Douarnenez (a). La couleur des points représente le niveau de densité acoustique moyenne du banc, exprimée en S_v (dB). Boxplots présentant les différences de densité acoustique moyenne du banc, exprimée en S_v , en fonction des catégories de profondeur (b).	38
Figure 23. ACP (Analyse en Composante Principale) incluant l'ensemble des caractéristiques spatiales, morphologiques et acoustiques pour différencier la structure des bancs des zones ultra-côtières (<15m de profondeur et <2,5 km des côtes).....	39
Figure 24. Relation entre l'abondance de poissons pélagiques dans les bancs observés par les plongeurs et le volume des bancs (m^3) obtenu avec le sonar M3 après extraction sous Matecho.....	39
Figure 25. Estimation de l'abondance des poissons pélagiques le long des transects dans le Parc National des Calanques en 2020.....	40
Figure 26. Mise en place du suivi long terme dans les zones de Brest et Douarnenez et dans la zone de Roscoff. Le graphique a présente la localisation des zones d'études, les graphiques b et c présentent les résultats acoustiques du sonar M3 pour la zone de Brest et Douarnenez tandis que les graphiques d, e et f présentent les résultats acoustiques du sonar M3 pour la zone de Roscoff.	40
Figure 27. Surface (m^2) et volume (m^3) des bancs échantillonnés par le sonar M3 pour les zones de Brest et Douarnenez (MC) (a, b) et dans la zone de Roscoff (MC) (c, d).	41
Figure 28. Evolution des densités acoustiques en fonction des saisons sur les sites de Brest et Douarnenez (a. et b.) et Roscoff (c. et d.). Les boxplots présentent les données l'écho-intégration (a et c) et de l'extraction de bancs (b et d) à partir des données du sondeur EK80.....	42
Figure 32. Cartographie lors de la campagne de Roscoff en Juin 2021 présentant le nombre de cellules classées « poissons pélagiques » dans la colonne d'eau de 0,1 nmi de long.	43
Figure 33. Cartographie lors de la campagne de Roscoff en Juin 2021 présentant le pourcentage de cellules classées « poissons pélagiques » dans la colonne d'eau de 0,1 nmi de long.	44
Figure 34. Pourcentage de cellules classées « poissons pélagiques » en fonction des mois échantillonnés dans la zone de Roscoff en 2020 et 2021.	44
Figure 35. Répartition des cellules d'échointégration classifiées comme du poisson. Le nombre de cellules dans la colonne d'eau est symbolisé par la couleur du point (bleu = 1 cellule, rouge = 20 cellules par colonne d'eau).	45
Figure 36. Histogramme des tailles des sprats (<i>Sprattus sprattus</i>) pêchés les 05/06/2020 et 06/07/2020 dans la rivière de Morlaix dans la zone de Roscoff à l'aide du chalut méso-pélagique (n = 502 individus mesurés).....	46
Figure 37. Histogramme des tailles des maquereaux communs (<i>Scomber scombrus</i>) pêchés en baie de Douarnenez (a) et baie de Lannion présente dans les alentours de Roscoff (b) respectivement en juin et juillet 2020 (n = 35 et 56 individus mesurés, respectivement).	46
Figure 38. Allocation des espèces aux échotraces du sondeur EK80 et sonar M3. Les figures 'a' et 'b' présentent les observations faites sur le sondeur EK80 et sonar M3 respectivement. Les figures c et d présentent respectivement des photographies d'un individu <i>Chromis chromis</i> et de l'ensemble de l'agrégation observée par le plongeur tracté.	47

Figure 39. Histogramme des tailles individuelles d'un banc de bogues (Boops boops) mesurées par le logiciel SeaGIS suite à l'acquisition vidéo grâce au système stéréoscopique. Les lignes vertes représentent les limites inférieures et supérieures de tailles estimées par les plongeurs.....	48
Figure 40. Localisation des bancs de poissons pélagiques observés en Bretagne (a) et dans le Parc National des Calanques (b) lors des missions en 2020 et 2021. La couleur des points est dépendante de l'espèce. Seules les espèces ayant été observées lors des vérités terrain ont été représentées ici.	50
Figure 41. Classement (d'une partie) des bancs et agrégations, pour lesquels l'espèce est connue, selon l'indice de sphéricité calculé à partir du sonar M3. La structure 3D est présentée pour chacun de ces bancs et agrégations et l'indice de sphéricité est indiqué en haut de chaque figure.....	51
Figure 42. Représentations graphiques de l'Analyse Discriminante Linéaire (LDA) pour la classification des différentes espèces de poissons (a) Plan LD1–LD2, (b) Plan LD2–LD3, (c) Plan LD1 – LD3 et (d) représentation en 3D.	52
Figure 43. Influence des variables sur les différentes fonctions discriminantes de la LDA.	52
Figure 44. Prédictions des bancs et agrégations d'Athérines (a), bogues (b) castagnoles (c) et mendoles (d) le long des transects réalisés dans le Parc National des Calanques en avril 2021 sans vérité terrain. Les lignes grises représentent les zones de non prélèvement.....	53
Figure 45. ACP des stations CTD permettant de mettre en évidence les variabilités saisonnières pour les sites de (a) Brest (b) Roscoff et (c) Marseille. Les ellipses présentées sont des ellipses de confiance à 95%. Toutes les stations pour une même zone (Brest, Roscoff ou Marseille) sont numérotées et les couleurs sur les figures dépendent des missions effectuées à un mois différent comme renseigné dans les légendes.....	55
Figure 46. Visualisation des bancs extrait à 120 kHz le long des radiales côte-large effectuées dans la ZNP (entourée par les traits noirs) et hors ZNP. Les radiales sont tracées en bleu et les points représentent les bancs extraits, la couleur variant en fonction du S_v des bancs.	56
Figure 47. Boxplots présentant les différences entre les bancs échantillonnés dans la zone de non prélèvement (ZNP) et en-dehors pour le S_v moyen à l'EK80 à 120 kHz.	56
Figure 48. Boxplots présentant les volumes (m^3) des bancs échantillonnés par le sonar M3 pour les athérines, les bogues et les castagnoles observés dans la zone de non prélèvement (no-take zones NTZ) et en-dehors par les plongeurs en août 2020 et avril 2021.	57
Figure 49. Interface de NetLogo présentant une simulation du modèle-individu centré du Parc National des Calanques. Les zones violettes représentent les ZNP. La couleur du fond varie avec les données de bathymétrie du SHOM et les données d'habitat obtenus sur le site web MEDTRIX. Les traits jaunes représentent les radiales, les carrés rouges le long des radiales correspondant aux endroits où le modèle simule une détection de banc.	59
Figure 50. (a) Résultat de l'analyse de sensibilité locale (variation de 10% de la valeur des paramètres). Les dummy (paramètres n'ayant aucune influence) sont représentés à 99% et 95% (n=5000 simulations). (b) Comparaison des simulations du modèle (n=100 par condition) pour le ratio de détection dans et en dehors des ZNP par rapport aux observations (avec une calibration manuelle simple) pour les probabilités de partir de la ZNP variant de 0.7 à 1.	60
Figure 51. (a) Carte représentant les zones considérées dans le modèle pour les extensions des ZNPs vers l'ouest et l'est autour de l'île Riou (b) Prédictions du nombre de détections en ZNP rapporté au nombre de cellules spatiales attribuées aux ZNPs lors de l'extension de la zone de protection autour de l'île de Riou vers l'ouest (ligne noire) et vers l'est (ligne bleue) (n=100 simulations par pourcentage). Les lignes en pointillé représentent le nombre de détections minimales et maximales.	60
Figure 52. Localisation des navires utilisables pour le dispositif ACaPELA. Les navires qui ont déjà été utilisés ont une flèche en rouge tandis que ceux qui n'ont pas encore été testés sont en bleu.....	66
Figure 53. Schéma de la complémentarité des dispositifs (échosondage, plongée, ADNe).	68

Liste des tableaux

Tableau 1. Composition en sous-programmes thématiques du PdS « Poissons-céphalopodes ». ...	10
Tableau 2. Présentation des différents groupes d'espèces de poissons pélagiques et benthopélagiques côtiers.	11
Tableau 3. Résumé des missions effectuées entre Décembre 2019 et Juillet 2022. MO : Méditerranée Orientale, MC : Mers Celtiques.....	14
Tableau 4. Métriques acoustiques issues de l'échosondeur SIMRAD EK80.	23
Tableau 5. Métriques acoustiques issues du sonar multi-faisceau SIMRAD M3.....	25
Tableau 6. Nombre de profils CTD réalisés au cours des différentes campagnes ACaPELA.....	30
Tableau 7. Critères DCSMM pour renseigner le descripteur 1 « Biodiversité ».	31
Tableau 8. Critères DCSMM pour renseigner le descripteur 4 « Structure et fonctionnement de l'écosystème ».	31
Tableau 9. Présentation des grandes guildes trophiques pour une approche D4.	32
Tableau 10. Critères DCSMM pouvant être renseignés en fonction des outils et méthodes d'analyses du projet.....	33
Tableau 11. Récapitulatifs des paramètres et valeurs associés utilisés pour caractériser les grandes guildes trophiques.....	42
Tableau 12. Résumé des différentes méthodes d'allocation testées (nombre de vérités terrains obtenus, zone pour laquelle on a eu des vérités terrain, avantages et inconvénients des méthodes).....	49

Abréviations

ACaPELA	ACoustique PELAgique
BEE	Bon État Écologique
CTD	<i>Conductivity Temperature Depth</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DCSMM	Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (Europe)
DSF	Documents Stratégiques de Façade
FM	<i>Frequency Modulated</i>
IBM	<i>Individual-Based Modelling</i>
IRD	Institut de recherche pour le développement
MC	Mers Celtiques
MNHN	Muséum national d'histoire Naturelle
MMN	Manche – Mer du Nord
MO	Méditerranée Occidentale
MOI	Institut Méditerranéen d'Océanologie
PAMM	Plan d'Action pour le Milieu Marin
PC	Poissons et Céphalopodes
PdS	Programme de Surveillance
PELGAS	Campagne écosystémique « PELagiques GAScogne » de l'Ifremer
PELMED	Campagne écosystémique « PELagiques MEDiterranée » de l'Ifremer
POCOROCH	POissons COtiers des ROches et Herbiers
SP	Sous-Programme
SRM	Sous-Régions Marine
ROV	Remotely Operated underwater Vehicle
ZNP	Zone de Non Prélèvement

1. Introduction et contexte de l'étude

La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) vise l'atteinte et/ou le maintien du Bon Etat Ecologique (BEE) des écosystèmes marins (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2013). Pour sa mise en œuvre en France métropolitaine, les Plans d'Action pour le Milieu Marin (PAMM) prévoient cinq actions, dont le développement et la mise en œuvre des Programmes de Surveillance (PdS). Les PdS doivent contribuer à terme à la collecte des données nécessaires au développement des indicateurs et des seuils DCSMM du BEE, évaluer l'atteinte ou non du BEE, évaluer les impacts sur l'état écologique des pressions induites par les activités humaines et enfin contribuer à l'évaluation de la réalisation des objectifs environnementaux et de l'efficacité des mesures définies dans les PAMM.

Pour les « Poissons et Céphalopodes » (PC), le PdS est divisé en 4 Sous-Programmes (SP) organisés selon un triple gradient environnemental : distance à la côte (milieux côtiers vs milieux du plateau continental et du large), position dans la colonne d'eau (espèces benthodémersales vs pélagiques) et nature du fond (substrats meubles vs substrats durs et/ou habitats biogéniques). Le Tableau 1 présente le découpage du PdS.

Tableau 1. Composition en sous-programmes thématiques du PdS « Poissons-céphalopodes ».

SP	Désignation
SP1	Poissons et céphalopodes benthodémersaux sur substrats durs et habitats biogéniques côtiers
SP2	Poissons et céphalopodes benthodémersaux sur substrats meubles côtiers
SP3	Poissons et céphalopodes pélagiques en milieux côtiers
SP4	Poissons et céphalopodes pélagiques et benthodémersaux sur le plateau continental et au large.

Le sous-programme 3 (SP3) est dédié à la surveillance des PC dans les milieux pélagiques côtiers, c'est-à-dire les PCs fréquentant la colonne d'eau (le pelagos) dans les zones dont la bathymétrie est comprise entre 0 et 40 m (zones dites « côtières »¹). La surveillance des milieux pélagiques repose actuellement sur les campagnes halieutiques annuelles de l'Ifremer PELGAS (Golfe de Gascogne) et PELMED (Golfe du Lion). Elles sont basées sur une méthodologie commune consistant en une combinaison d'échosondage et de chalutage sur détection, opérée via des navires océanographiques (N/O Thalassa et Europe) (Bourdeix, 2018; Doray *et al.*, 2018). Ces deux campagnes ont pour principal objectif d'évaluer les stocks de petits pélagiques (*e.g.* anchois et sardines) du Golfe de Gascogne et du Golfe du Lion respectivement. Les données sont collectées à différentes profondeurs (25 m – 400 m) (Beaubrun *et al.*, 2013; Bourdeix Jean-Hervé, 2015; Doray *et al.*, 2018) mais la surveillance réalisée reste lacunaire dans les milieux côtiers (bathymétrie inférieure à 20 mètres) en raison des caractéristiques des navires océanographiques (important tirant d'eau et faible manœuvrabilité) et de la configuration des sondeurs et sonars acoustiques utilisés (fréquences peu adaptées aux milieux peu profonds).

Considérant que les milieux côtiers sont des zones très productives (Brehmer *et al.*, 2006) qui peuvent couvrir de grandes surfaces (*e.g.* la zone 0-20 m couvre 8% du plateau continental du Golfe du Lion) et s'étendre à plus de 10 nmi de la côte (Guillard and Lebourges, 1998), il est primordial que les zones côtières soient couvertes par une surveillance dédiée. Ce sont également des milieux qui assurent de nombreuses fonctions biologiques et écologiques pour les espèces pélagiques à différents stades et/ou sur l'ensemble de leur cycle de vie (Tableau 2). Par exemple, les panaches estuariens et les zones côtières peuvent constituer des frayères et des nourriceries pour de nombreuses espèces pélagiques et sont

¹ Il n'existe pas de définition consensuelle de ce qu'est le côtier. Ici, nous considérons les isobathes de 0 à 40 m

notamment qualifiés d'habitat halieutique essentiel (Regimbart, Guitton and Le Pape, 2018). En particulier, les nourriceries assurent une fonction clé dans le cycle biologique des espèces et constituent donc un maillon essentiel du renouvellement des populations et de leur pérennisation (Peterson, 2003; Rochette *et al.*, 2010). Ainsi, la productivité primaire des zones côtières se répercute sur l'ensemble de l'écosystème marin.

De plus, les milieux côtiers constituent des territoires à forts enjeux stratégiques pour l'économie et l'environnement. Ainsi, les estuaires et les zones côtières peuvent subir de fortes pressions anthropiques dues à l'urbanisation des littoraux, les pêcheries, les pollutions diffuses et chroniques des masses d'eau et perturbation physique des habitats par les activités anthropiques tels que dragage, extraction, pêche, mouillage, etc. (Borja, Muxika and Rodríguez, 2009).

Tableau 2. Présentation des différents groupes d'espèces de poissons pélagiques et benthopélagiques côtiers.

Intitulé du groupe d'espèces	Exemples d'espèces incluses
Petits pélagiques grégaires planctonivores	Athérines, sprats, sardines, anchois, chinchards
Grands pélagiques grégaires macro-carnivores	Thons, bonites
Pélagiques erratiques	Orphies, poissons lune
Benthopélagiques planctonivores	Castagnoles, oblades
Benthopélagiques prédateurs	Bars, lieus jaunes
Autres benthopélagiques	Mulets, vieilles

Le dispositif ACaPELA (ACoustique PELAgique) a pour objectif de développer et valider la méthodologie de surveillance DCSMM pour l'évaluation de l'état écologique des populations et peuplements des PCs des milieux pélagiques côtiers. Dans cet objectif, les campagnes pélagiques côtières devront collecter des données permettant de contribuer aux renseignements des descripteurs et critères DCSMM pour évaluer le BEE à l'échelle des populations (D1) (abondance des espèces pélagiques, distribution spatio-temporelle, habitat des espèces, etc.) et/ou à l'échelle du peuplement (D4) (composition spécifique et abondances relatives par guildes fonctionnelles) et permettre d'évaluer les impacts des pressions anthropiques sur l'état écologique des PCs pélagiques côtiers.

Le projet ACaPELA est en deuxième phase de développement méthodologique (Figure 1). La phase 1 était principalement axée sur le développement des outils et leur adaptation aux contraintes des zones ultra-côtières, avec notamment une bathymétrie réduite. Un important travail a également été réalisé sur la stratégie d'échantillonnage et le traitement des données acoustiques (calibration, nettoyage, extraction des données, etc.). La phase 2 poursuit donc les acquis de la phase 1 avec une part importante du temps consacrée à l'analyse des résultats des campagnes et au développement d'indicateurs et de métriques pour l'évaluation du BEE. L'objectif de ce rapport est donc de présenter les résultats finalisés de la phase 1 du développement méthodologique avec notamment la mise au point du protocole à l'échelle locale mais également les travaux effectués en phase 2 sur l'analyse des différents résultats et la mise au point des métriques et des indicateurs.

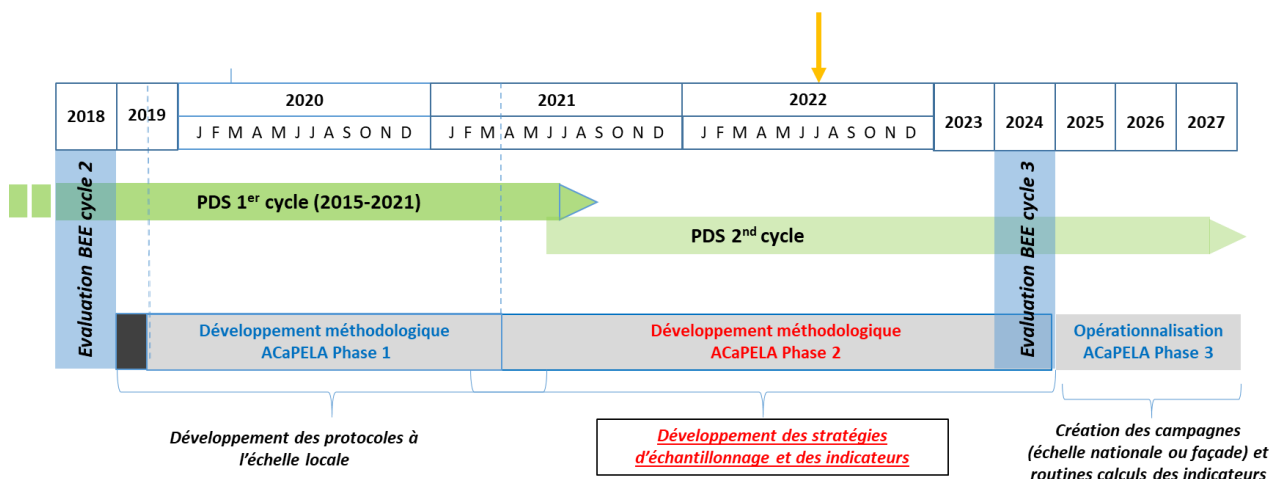


Figure 1. Frise chronologique présentant les différentes phases de développement méthodologique du dispositif R&D ACaPELA. La flèche jaune indique le stade de développement du dispositif à la rédaction de ce rapport (juin 2022).

2. Matériel et méthodes du dispositif ACaPELA

2.1. Localisation et couverture spatiale des campagnes

La région Bretagne a été naturellement choisie pour mettre en place la méthodologie du dispositif ACaPELA puisque les établissements, et donc les agents rattachés à ce dispositif sont situés à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) de Brest et à la station Marine du MNHN (Muséum National d'Histoire Naturelle) de Dinard. En outre, la région Bretagne présente une plus grande diversité de peuplements, ce qui est très important pour la mise en place d'une méthodologie souple, adaptable à un déploiement national de surveillance.

Afin d'améliorer nos connaissances sur les espèces pélagiques côtières, leur cycle de vie et leur distribution en Bretagne et de mettre éventuellement en évidence des zones à prospecter en priorité, une enquête auprès des pêcheurs locaux (professionnels, semi-professionnels ou amateurs) a été réalisée entre juin et juillet 2020 dans le cadre d'un stage de Master 1 (Russier, 2020). Cette enquête a permis de caractériser la distribution spatiale des espèces ciblées ou prises accessoirement par les pêcheurs. Elle a eu également pour intérêt de donner la parole aux pêcheurs locaux. Ainsi, ils étaient nombreux à penser que la zone côtière était une zone d'abondance de poissons autrefois mais qu'elle ne l'est plus aujourd'hui, cette diminution pouvant être liée aux activités anthropiques telles que la surpêche dans ces zones côtières. De plus, un nombre important de pêcheurs ont également avancé comme explication le déplacement des populations de poissons. Ainsi, cette enquête a mis en évidence l'intérêt de la mise en place d'une surveillance dans les milieux pélagiques côtiers, et donc de la mise en place d'une méthodologie permettant d'étudier au mieux ces zones.

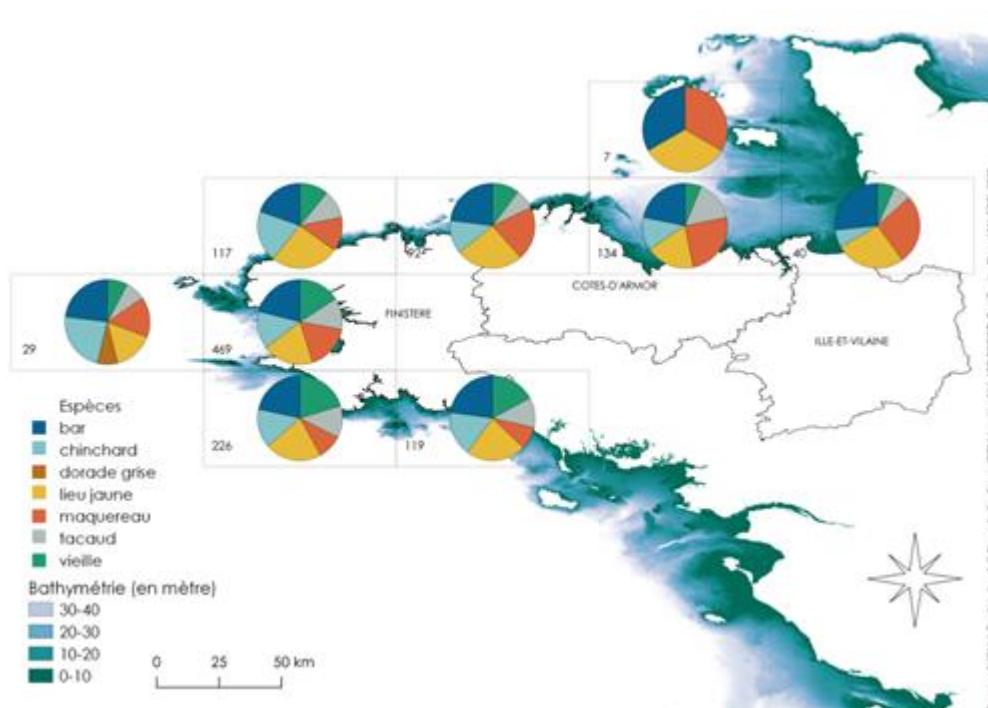


Figure 2. Distribution des espèces ciblées par les pêcheurs et prises accessoires en Bretagne. Le nombre dans chaque rectangle représente le nombre de réponses obtenues lors de notre enquête (en juin et juillet 2020). Source : rapport de stage d'Eva Russier.

Les zones d'acquisition des données du dispositif ACaPELA ont été diversifiées afin de s'assurer que les méthodes et protocoles déployés soient adaptables à des navires et des écosystèmes variés, dans l'optique d'un déploiement à l'échelle nationale. De plus, il a semblé important de tester la méthodologie dans une SRM présentant des caractéristiques bien différentes (en termes de conditions biotiques et abiotiques et d'espèces de pélagiques présentes) de celles les SRMs présentes en Bretagne. C'est la raison pour laquelle, des missions ont été effectuées dans la SRM Méditerranée occidentale. De plus, cette zone d'étude présentait un intérêt certain pour le couplage des méthodes acoustiques et observations en plongée.

En conséquence, 4 zones d'études ont été échantillonnées à ce jour et celles-ci sont situées dans 2 SRMs distinctes (voir annexe 1) :

- Baie de Saint Malo (SRM MC) ;
- Baie de Roscoff (SRM MC) ;
- Rade de Brest et baie de Douarnenez (SRM MC) ;
- Parc National des Calanques (SRM MO).

Dans les sections suivantes seront présentés plus précisément le calendrier des campagnes ainsi que le choix des sites par rapport aux connaissances sur les populations de poissons pélagiques présentes ainsi que les navires disponibles pour prospecter dans ces zones.

2.2. Calendrier des campagnes

Au total, 15 missions réparties sur les 4 sites sélectionnés avec 4 saisons échantillonnées sur quatre années ont été réalisées (Figure 3) jusqu'en juin 2022. Une dernière mission en juillet 2022 est également prévue. Le Tableau 3 résume toutes les campagnes effectuées (de 2019 à 2022) dans ces 4 sites.

Figure 3. Calendrier des missions effectuées entre Décembre 2019 et Juillet 2022.

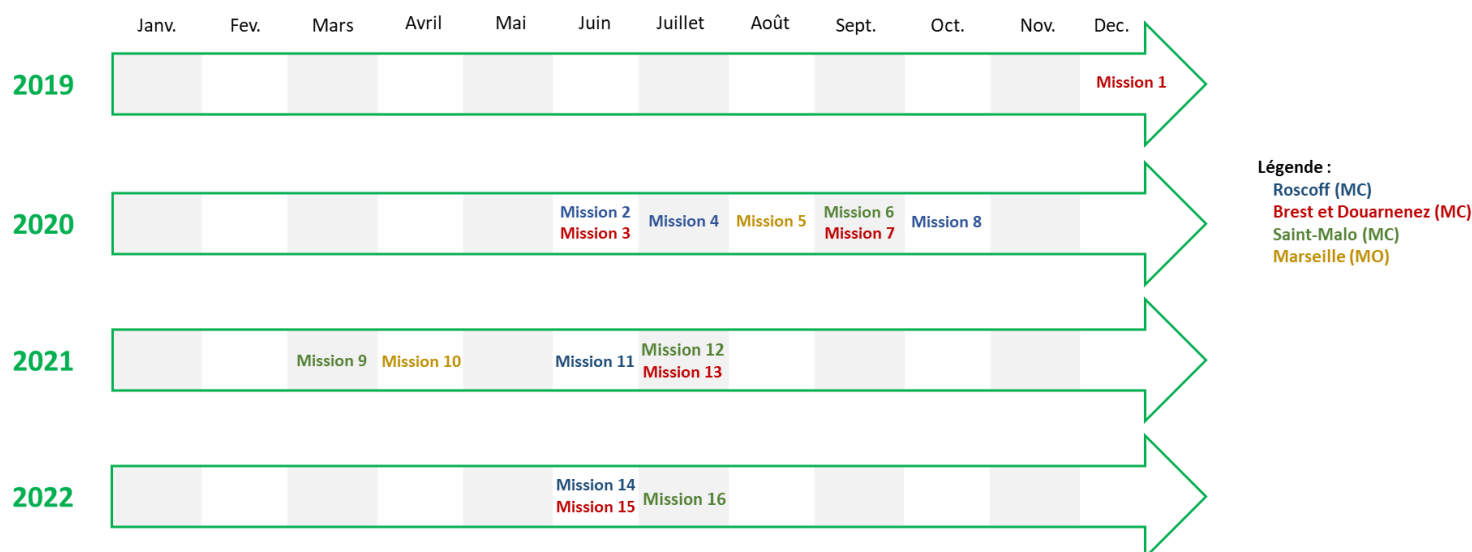


Tableau 3. Résumé des missions effectuées entre Décembre 2019 et Juillet 2022. MO : Méditerranée Orientale, MC : Mers Celtiques.

Mission	Zone d'étude (SRM)	Dates de la mission	Types d'opération
1	Rade de Brest (MC)	02 au 19 décembre 2019	Premiers tests : mise en place des outils acoustiques
2	Roscoff (MC)	03 au 11 juin 2020	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
3	Brest et Douarnenez (MC)	17 au 25 juin 2020	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
4	Roscoff (MC)	02 au 10 juillet 2020	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
5	Marseille (MO)	17 au 23 août 2020	Prospection acoustique, plongée, CTD, vidéos, mise au point de méthodologies de couplage acoustique/plongée
6	Saint-Malo (MC)	07 au 09 septembre 2020	Prospection acoustique : tests sur semi-rigide CTD
7	Brest et Douarnenez	14 au 17 septembre 2020	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
8	Roscoff (MC)	01 au 08 octobre 2020	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
9	Saint-Malo (MC)	15 au 26 mars 2021	Prospection acoustique : tests sur semi-rigide, CTD
10	Marseille (MO)	3 au 8 avril 2021	Prospection acoustique, plongée, CTD, vidéos, couplage acoustique/plongée
11	Roscoff (MC)	03 au 11 juin 2021	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
12	Saint Malo (MC)	19 au 21 juillet 2021	Prospection acoustique, CTD
13	Brest et Douarnenez	22 au 28 juillet 2021	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
14	Roscoff (MC)	13 au 17 juin 2022	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
12	Brest et Douarnenez	20 au 23 juin 2022	Prospection acoustique, pêches sur détection, CTD, vidéos
13	Saint-Malo (MC)	25 au 27 juillet 2022	Prospection acoustique, CTD

La première campagne a eu lieu en décembre 2019 en rade de Brest avec le navire l'Albert Lucas (Figure 3). Cette campagne test (Acou and Brehmer, 2019) a permis (i) de valider l'installation du sondeur EK80 et du sonar M3 sur le sabot et la perche du navire, (ii) de calibrer à quai le sondeur et le sonar, (iii) de valider le protocole de pêche sur détection au chalut méso-pélagique et enfin (iv) d'acquérir les premières données nécessaires au développement des algorithmes de traitement des données acoustiques. Les campagnes suivantes ont permis les acquisitions de données le long des transects définis pour chaque zone.

2.3. Stratégie d'échantillonnage dans les zones d'études

Dans les zones d'études choisies, les radiales ont été positionnées de manière à évaluer la répartition des PCs selon le gradient côte/large (gradient bathymétrique), la nature des fonds, et un gradient anthropique quand cela a été possible (en Méditerranée notamment) (Figure 4). En effet, le Parc National des Calanques possède des zones de non prélèvement (ZNP). Le gradient anthropique a donc été pris en compte en réalisant 4 radiales au sein de la ZNP, complétées par 8 radiales supplémentaires de part et d'autre de cette ZNP (4 radiales à l'est, 4 radiales à l'ouest).

Les radiales actuelles permettent de couvrir un total de 360 nmi (soit 666 km) sur l'ensemble des côtes françaises (entre 52 et 105 nmi en fonction des zones étudiées). Par rapport à d'autres méthodes déployées telles que la plongée, le dispositif ACaPELA permet donc bien une couverture spatiale importante. De plus, les radiales ont été choisies pour couvrir le maximum de gradients bathymétriques et d'habitats différents tout en limitant le temps bateau et notamment les déplacements jusqu'au site d'échantillonnage. C'est donc une stratégie d'échantillonnage optimisée, prenant en compte les éléments locaux (e.g. estuaires, îles, hauts-fonds) ainsi que la réalité du terrain (courants, marées, dangers de navigation).

Les radiales sont réalisées uniquement de jour, comme c'est le cas pour les campagnes PELGAS et PELMED. Ce choix a été conditionné par des raisons de sécurité (certains éléments ne sont pas éclairés près des côtes, comme les casiers par exemple), de disponibilité des équipages et navires de station mais également pour être dans les mêmes conditions pour les données et réduire les facteurs de variabilité. Les biocénoses adoptent en effet des comportements très différents entre le jour et la nuit. Pour ces raisons, les données ne sont pas non plus enregistrées pendant l'aube et le crépuscule, zones de transitions ou de nombreux mouvements sont observés dans la colonne d'eau (migrations nycthémerales et modification du comportement agrégatif principalement).

Les radiales ont été répliquées régulièrement à différentes saisons et années (en 2020, 2021 et 2022, au moins une saison par année) afin d'étudier les variabilités intra- et inter-annuelles. Dans le cadre d'un suivi à long-terme, il est en effet important d'étudier la composante saisonnière de la variabilité des échotrases pour cibler la ou les meilleures saisons nécessaires pour l'évaluation du BEE des populations de PCs.

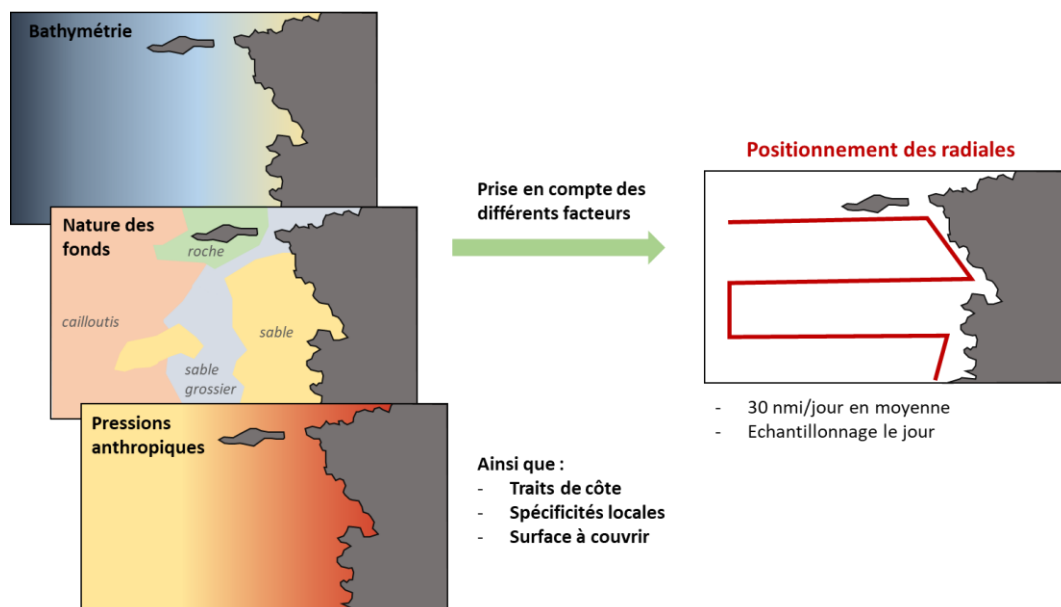


Figure 4. Représentation schématique du positionnement des radiales en prenant en compte les facteurs environnementaux, anthropiques et spécificités locales dans la mesure du possible.

2.3.1. Rade de Brest et baie de Douarnenez

Le site de Brest a été choisi pour sa rade, avec un port important, et le contraste qu'elle offre avec la mer d'Iroise qui est une mer ouverte. Cette localisation permet également de prospecter dans la même campagne la baie de Douarnenez, située plus au Sud. La baie de Douarnenez est un haut lieu de la pêche de petits pélagiques, notamment par des bolincheurs (*e.g.*, la sardine, etc.) (Coiffec *et al.*, 2006). Enfin, ce site est proche de la radiale la plus au Nord de la campagne PELGAS.

Ainsi, les principales opérations effectuées dans ce site d'étude sont des échantillonnages le long des radiales (Figure 5a), de la pêche sur détection au chalut méso-pélagique ainsi qu'à la ligne, des tests de vidéos sous-marines (GoPros et Paralenz) et des stations CTD (*Conductivity Temperature Depth*) pour mesurer les paramètres physico-chimiques de l'eau. Enfin, les campagnes en mer sont réalisées dans cette zone avec le navire de l'Albert Lucas². Ce navire fait partie de la flotte océanographique française (Figure 5b). C'est un navire de station de 11,50 m, armé en pêche côtière, généralement mobilisé pour diverses activités d'observation, de recherche et d'enseignement en écologie marine et océanographie. Il opère jusqu'à 20 milles des côtes, principalement dans les zones de la rade de Brest et la mer d'Iroise. Le N/O Albert Lucas (CNRS, IUEM) est mis à la disposition de la communauté scientifique nationale par appel d'offres semestriel. Entre 2019 et 2022, des dossiers ont donc été déposés, et évalués favorablement par les Comités Locaux d'Évaluation qui hiérarchisent les demandes. Le calendrier est ainsi établi pour le semestre suivant.

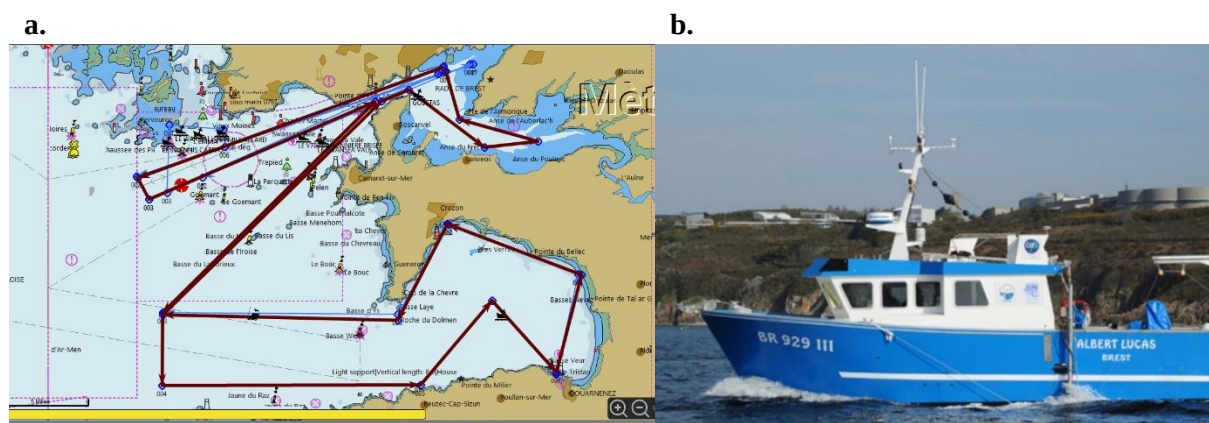


Figure 5. Carte de la zone de Brest et Douarnenez (a). Les radiales réalisées dans la rade de Brest et en baie de Douarnenez sont représentées en traits pleins violets. Photographie du navire l'Albert Lucas (b), navire de façade basé à Brest, avec sa perche déployée (© INSU-CNRS).

2.3.2. Roscoff

Cette zone a été sélectionnée car sa configuration diffère de celle de la rade de Brest qui est une zone très protégée comme la baie semi-fermée de Douarnenez. Cette différence d'organisation permet d'explorer des biocénoses potentiellement différentes. De plus, des comptages plongée type UVC (*Underwater Visual Census*) sont régulièrement réalisés par le MNHN, dans le cadre du projet POCORoch (POissons COtiers des ROches et Herbiers) pour la surveillance des poissons côtiers rocheux (Le Joncour et Thiriet, 2020). En effet, l'expertise des plongeurs est un élément essentiel pour connaître les espèces de poissons pélagiques présents dans cette zone d'étude, même si POCORoch se focalise plutôt sur les espèces benthopélagiques. De plus, une zone Natura 2000 est présente sur le site

²<https://www.flotteoceanographique.fr/Nos-moyens/Navires-engins-et-equipements-mobiles/Navires-de-station/Albert-Lucas>

de Roscoff, ce qui est intéressant pour comparer l'estimation des niveaux d'abondance des pélagiques et benthopélagiques dans des zones protégées ou non.

Les principales opérations effectuées dans ce site d'étude sont des échantillonnages le long des radiales (Figure 6a) sont : de la pêche au chalut méso-pélagique ainsi qu'à la ligne, des tests de vidéos sous-marines (GoPros, Paralenz) et des stations CTD pour mesurer les paramètres physico-chimiques de l'eau. Enfin, les campagnes en mer sont réalisées dans cette zone avec le navire Néomysis³ (DT-INSU) appartenant à la flotte océanographique française (Figure 6b). Ce navire, de 11,90 m de long est équipé pour la pêche et permet, comme l'Albert Lucas, une installation du matériel scientifique et notamment acoustique du projet. Ce navire appartenant à la flotte océanographique française, les réservations se font selon les mêmes modalités que pour l'Albert Lucas, via un appel d'offre semestriel.

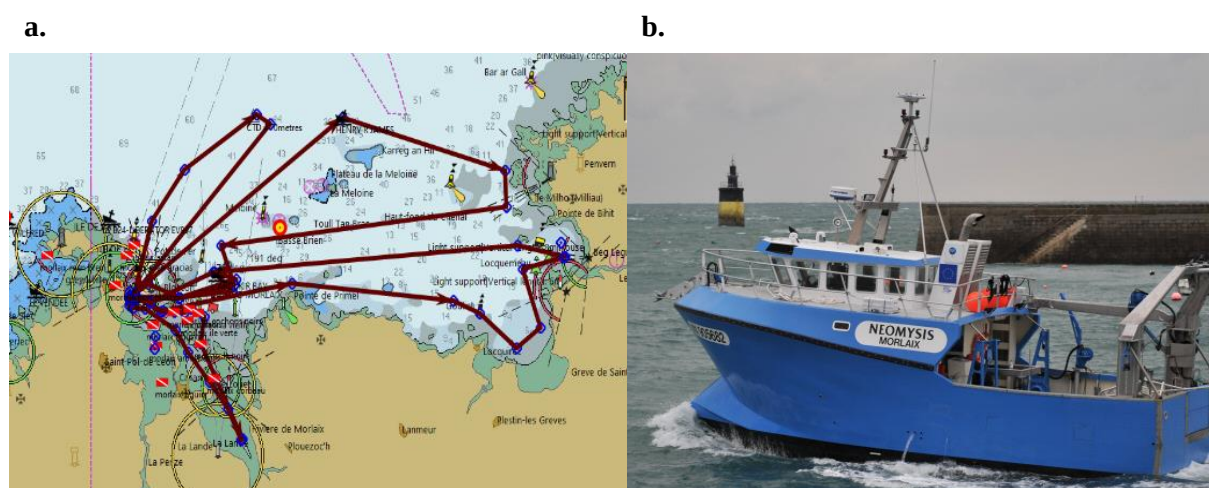


Figure 6. (a) Carte de la zone de Roscoff. Les radiales réalisées dans la baie de Roscoff à bord du Néomysis sont représentées par les traits pleins violets et les rectangles rouges et blancs représentent les points de suivi par plongée des plongeurs MNHN-Dinard. (b) Photographie du navire Néomysis (©Wilfried Thomas, Station Biologique de Roscoff).

2.3.3. Baie de Saint-Malo

La baie de St Malo est la zone la plus à l'Est de nos sites en Bretagne. Cela permet d'avoir un nombre important de sites pour valider la capacité de notre suivi à s'adapter à l'importante variabilité des habitats et biocénoses de l'ensemble du littoral français. De plus, cette zone est depuis longtemps étudiée par la station marine du Museum National d'Histoire Naturelle de Dinard ce qui permet une connaissance fine des espèces présentes et des zones qu'elles fréquentent préférentiellement.

Ainsi, les principales opérations effectuées dans ce site d'étude sont des échantillonnages le long des radiales (Figure 7a) et des stations CTD pour mesurer les paramètres physico-chimiques de l'eau. Un navire de la station marine a été mobilisé pour les campagnes en mer : l'Emeraude Explorer qui est un semi-rigide. Pour cela, nous avons conçu une perche et un système de fixation spécialement adapté aux contraintes d'un semi-rigide. Nous avons également développé un taud pour l'Emeraude Explorer afin de protéger le matériel acoustique et informatique.

³<https://www.flotteoceanographique.fr/Nos-moyens/Navires-engins-et-equipements-mobiles/Navires-de-station/Neomysis>

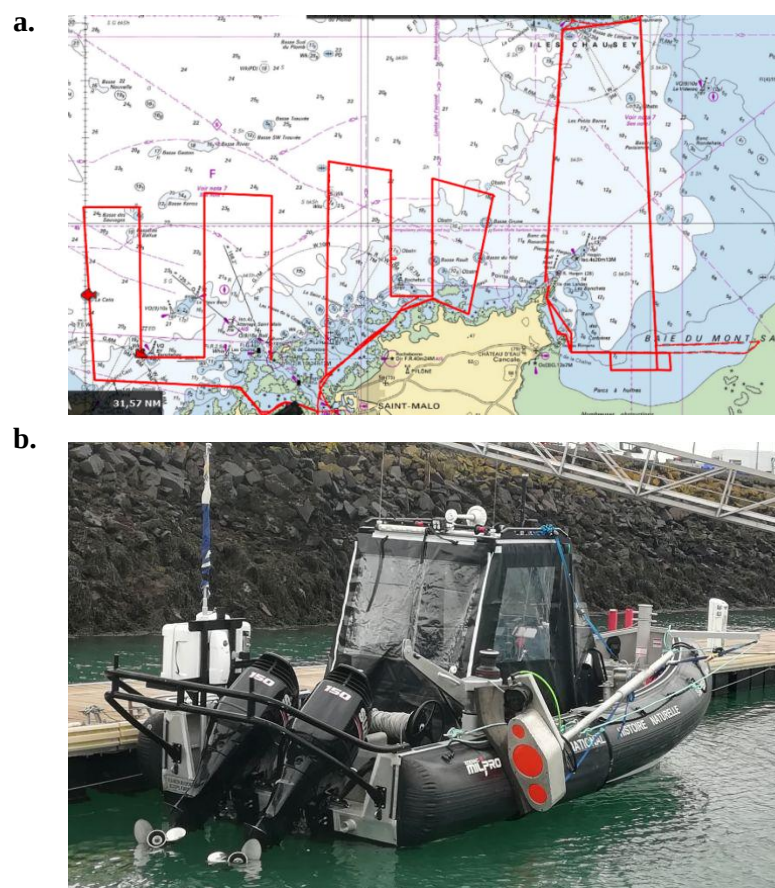


Figure 7. (a) Carte de la baie de Saint-Malo. Les radiales réalisées dans cette zone sont représentées par les traits pleins rouges. (b) Photographie du semi-rigide *Emeraude* exploré du Museum National d'Histoire Naturelle instrumenté par une perche acoustique.

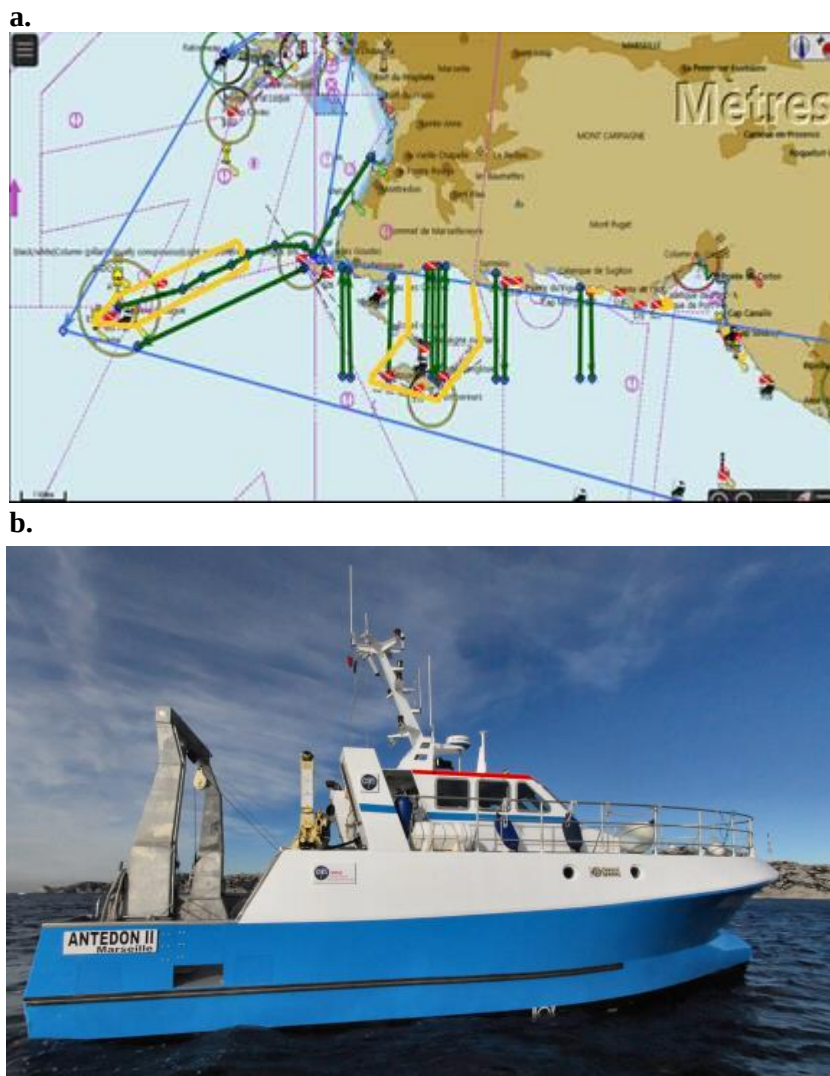
2.3.4. Parc National des Calanques à Marseille

La zone de Marseille permet de compléter le panel de sites avec une zone d'étude en Méditerranée, dont les écosystèmes sont fondamentalement différents de ceux prospectés en Mers Celtiques. Cette zone présente une grande diversité et une forte abondance d'espèces de poissons, ainsi qu'une bonne visibilité (autour de 10-15 m) qui favorise le déploiement de méthodes basées sur l'observation (plongée) ou l'acquisition vidéo (GoPros, Paralenz). La forte abondance d'individus et la bonne visibilité ont permis de tester l'obtention de vérités terrain par observation visuelle en plongée et par vidéo. La mise en place de ces nouvelles méthodes de vérités terrain était d'autant plus essentielles que dans le Parc National des Calanques, les opérations de chalutage sont interdites. Un autre élément important dans le choix de ce site est la présence d'éléments de gestion (réserve intégrale) qui en font un élément de comparaison essentiel (zone exempte de pression de pêche) dans l'objectif d'une évaluation d'un BEE pour le compte de la DCSMM. En effet, faute de séries temporelles à long-terme des abondances par espèce (ou guildes d'espèces), une approche spatiale est nécessaire. Ainsi, les zones de non prélèvement présentes dans le Parc National des Calanques pourraient servir de référentiel à atteindre pour définir un BEE.

Ainsi, les principales opérations effectuées dans ce site d'étude sont des échantillonnages le long des radiales (Figure 8a), des stations CTD pour mesurer les paramètres physico-chimiques de l'eau ainsi que des observations visuelles par des plongeurs ou par vidéos pour réaliser les vérités terrain. Les radiales ont été positionnées afin de prendre en compte les différents niveaux de protection du Parc : cœur, aire maritime adjacente, Zone de Non Prélèvement (ZNP), mais aussi la bathymétrie et la nature

des fonds présents dans le Parc des Calanques. Ces données pourraient permettre de tester un « effet réserve » sur les espèces pélagiques, réputées très mobiles et donc potentiellement moins influencées que les espèces necto-benthiques par une gestion type zonage spatial.

Enfin, les campagnes en mer sont réalisées dans cette zone avec le navire Antédon II⁴ (DT INSU-CNRS) de la flotte océanographique française (Figure 8b). En revanche, le couplage des données acoustiques avec des observations faites par des plongeurs a été fait avec le navire Cro-Magnon de l'association « Septentrion Environnement » afin de collaborer avec les plongeurs de l'association qui avaient une bonne connaissance du site d'étude, des espèces présentes et des protocoles (Thiriet, 2019) utilisés pour estimer leur taille et effectif.



⁴<https://www.flotteoceanographique.fr/Nos-moyens/Navires-engins-et-equipements-mobiles/Navires-de-station/Antedon-II>

c.



Figure 8. Carte de la zone du Parc National des Calanques de Marseille avec en orange la localisation des ZNP (a). Les radiales réalisées Radiales réalisées dans le Parc National des Calanques de Marseille en traits verts. Photographies du navire de l'Antédon II (b) et du Cro-Magnon (c).

2.4. Métriques acoustiques et paramètres environnementaux acquis au cours des campagnes

2.4.1. Les métriques acoustiques

L'acoustique active est une méthode d'observation du milieu marin utilisant les propriétés de la propagation des ondes dans l'eau (Benoit-Bird et Lawson, 2016). Le sondeur EK80 et le sonar M3 envoient des ondes acoustiques dans leur faisceau de détection et réceptionnent tous les échos renvoyés par les objets s'y trouvant. En effet, ces ondes émises sont réfléchies dès lors qu'il y a un changement de densité dans le milieu, comme lors de la rencontre avec un obstacle tel que le fond, un poisson, une bulle, des crustacés ou des mammifères marins. Ainsi, l'analyse des échos renvoyés par ces objets apportent de précieuses informations quant à la nature de l'objet rencontré.

L'intensité acoustique (*backscattering strength* S_v en dB) varie en fonction des cibles rencontrées. L'intégralité des échos renvoyés par toutes les cibles présentes dans le faisceau acoustique peut être projetée sur un échogramme (Figure 9), dont l'axe des abscisses représente l'avancement du bateau et l'axe des ordonnées la profondeur. Le sondeur à la surface de l'eau étant situé en haut de l'échogramme. L'échelle de couleur représente l'intensité acoustique, exprimée en décibel (dB). Plus l'objet insonifié répond fortement (fond, important banc de poissons, bulles), plus la couleur sera rouge voire brune. Les échos plus faibles apparaissent en bleu et vert.

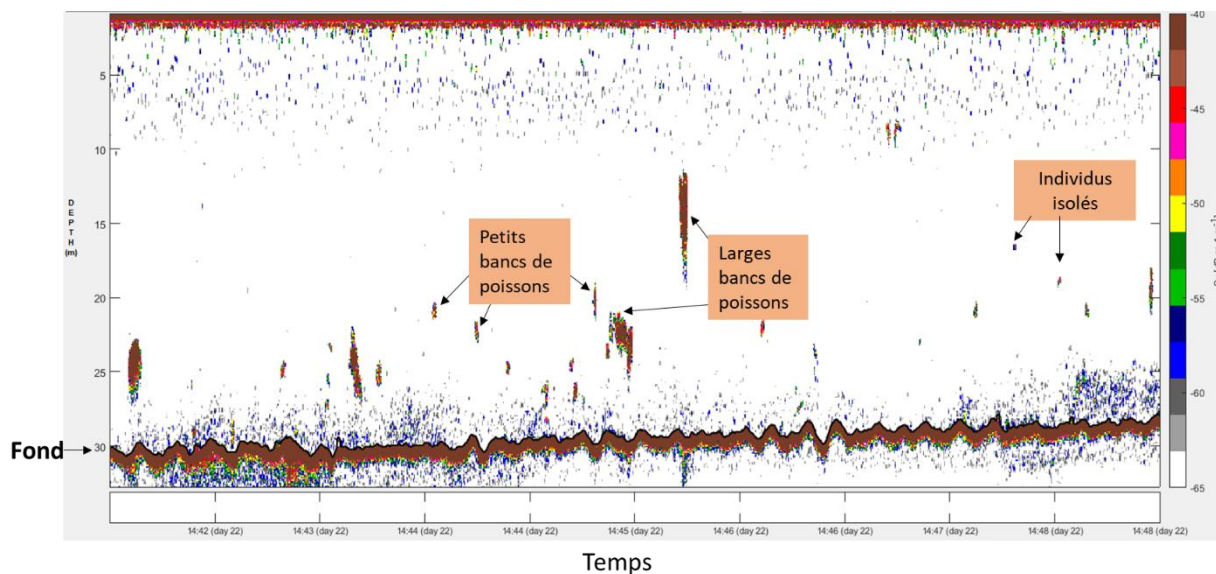
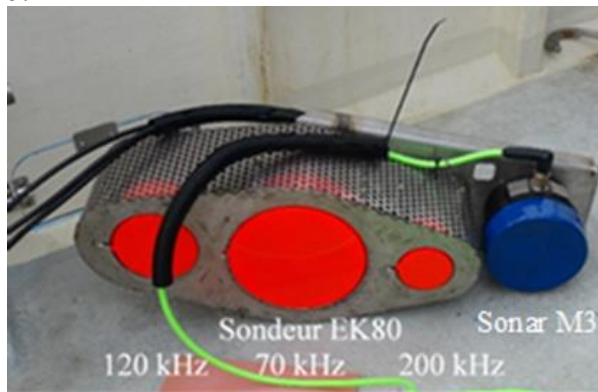


Figure 9. Présentation d'un échogramme. La couleur dépend de l'intensité acoustique. Le fond, plusieurs types de bancs de poissons ainsi que des poissons isolés peuvent être observés.

La méthode de surveillance des PCs dans le cadre du dispositif ACaPELA est basée sur le couplage de deux outils acoustiques que sont le sondeur EK80 et le sonar multifaisceaux M3 (Figure 10a). Le sondeur EK80 est un outil acoustique largement utilisé dans les campagnes acoustiques. Il existe donc déjà des procédures bien connues (calibration, extraction et traitement des données) mais ce sondeur présente une faible largeur de fauchée (7°) ce qui limite la surface insonifiée à faible profondeur. L'utilisation des sonars multifaisceaux tel que le sonar M3 est plus récente, mais cet outil présente un potentiel important puisqu'il possède une large fauchée (120°) ce qui permet de couvrir une zone plus importante que l'EK80 (Figure 10b) et permet d'insonifier les bancs dans leur totalité. Ainsi, le sonar M3 permet d'obtenir des données sur la structure 3-D des bancs, en revanche il n'utilise qu'une fréquence (500 kHz) alors que le sondeur EK80 a trois fréquences (70, 120 et 200 kHz) ce qui permet de faire des analyses de réponses en fréquence qu'il n'est pas possible de faire avec le sonar M3. Enfin, lorsqu'ils sont équipés d'une centrale inertielle et d'un module bathymétrique, les sonars multifaisceaux sont utiles pour faire des relevés bathymétriques et obtenir des cartographies des fonds. Pour toutes ces raisons, les deux outils acoustiques (EK80 et M3) sont complémentaires et adaptés aux besoins du dispositif ACaPELA (Figure 10b).

a.



b.

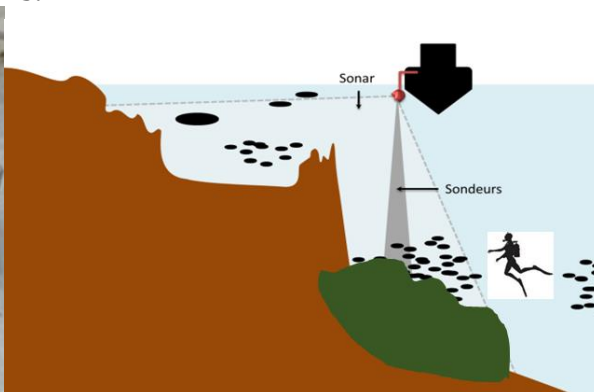


Figure 10. Photographie du matériel acoustique avec en orange à gauche les 3 fréquences de l'EK80 et en bleu à droite le M3 (a). Représentation schématisée des deux systèmes acoustiques, le sonar multifaisceaux M3 (gris clair) avec sa fauchée large (120°) et le sondeur split-beam EK80 (gris foncé) avec sa faible fauchée (7°) (b).

2.4.1.1. L'échosondeur SIMRAD EK80

Le sondeur EK80 est largement utilisé pour l'estimation des stocks de pélagiques (Zwolinski *et al.*, 2014). Il est constitué de trois bases permettant d'enregistrer en trois fréquences en mode CW (*Continuous Wave*) : 70, 120 et 200 kHz. Ces fréquences sont particulièrement adaptées au travail dans les petits fonds car elles permettent d'acquérir des données d'une grande précision. En comparaison, plusieurs fréquences sont utilisées lors des campagnes PELGAS et PELMED, dont une fréquence plus faible (38 kHz) qui permet l'acquisition de données à des profondeurs plus importantes et le calcul des estimations de stocks (Doray, Massé and Petitgas, 2010). De plus, les bases émettant en fréquence faible sont de taille et de poids conséquents, ce qui serait incompatible avec leur installation sur de petits navires côtiers. Il est à noter également que notre sondeur EK80 a un angle d'ouverture faible (7°). Le diamètre observé par l'EK80 est donc de 1,20 m à 10 m de profondeur 3,60 m de diamètre à 30 m de profondeur, ce qui ne permet pas toujours d'échantillonner la totalité du banc.

Chaque transducteur de l'EK80 peut fonctionner en deux modes :

(i) le mode CW dans lequel chaque transducteur n'émet que sur sa fréquence (70, 120 ou 200 kHz ; Figure 11). Ce mode est utilisé dans la grande majorité des estimations de stocks, et notamment sur PELGAS et PELMED (Bourdeix, 2018; Doray *et al.*, 2018). Ce mode permet notamment de réaliser une écho-intégration sur l'ensemble de la colonne d'eau et d'en extraire des variables qui entrent en compte dans le calcul des biomasses. Ce mode permet également d'avoir une réponse en fréquence discrète des bancs et des cibles individuelles.

(ii) le mode FM (*Frequency Modulated*) dans lequel chaque transducteur émet dans une gamme de fréquence continue, autour de sa fréquence initiale. Cela permet d'avoir une réponse en fréquence continue des cibles vues au sondeur. La donnée obtenue est donc plus complète et pourrait permettre plus facilement une identification de l'espèce ou du groupe d'espèces. Mais ce type de données est plus complexe à exploiter car encore peu développé. Il n'est donc pas envisageable aujourd'hui de déployer ce type de données pour une surveillance en routine.

Quel que soit le mode utilisé, le sondeur ne donne pas directement accès à l'identification spécifique. Pour obtenir cette information, des vérités terrain sont donc nécessaires.

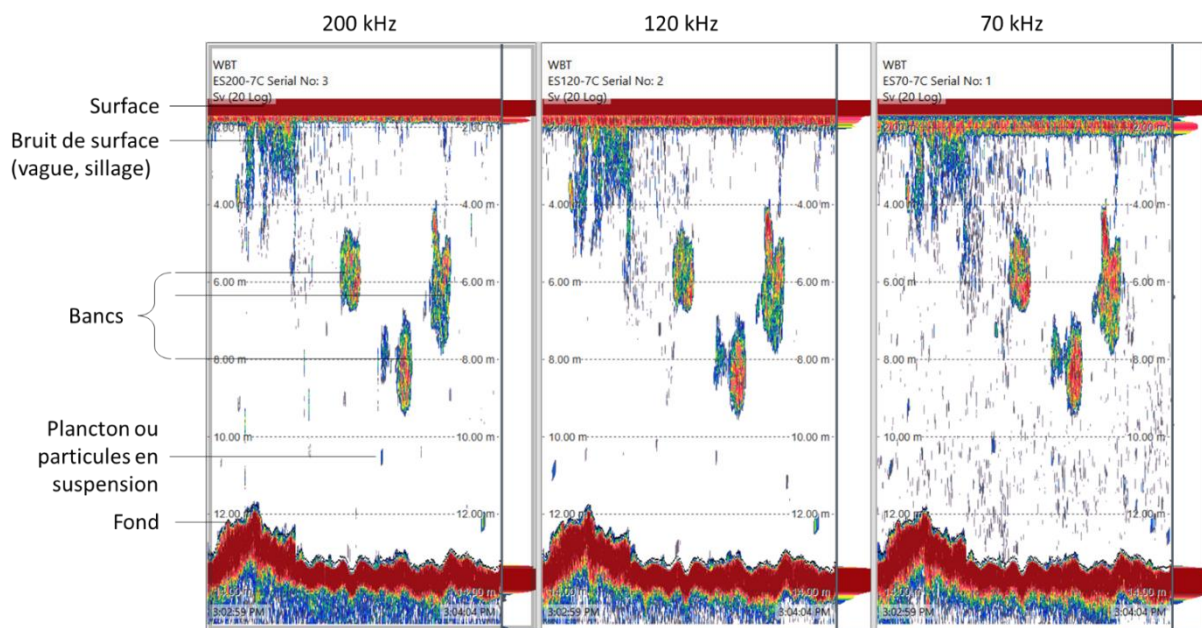


Figure 11. Visualisation d'un échogramme renvoyé par le sondeur SIMRAD EK80 en mode CW pour les trois fréquences (de gauche à droite 200, 120 et 70 kHz).

Plusieurs variables quantitatives peuvent être obtenues par le sondeur EK80. Une première méthode est **l'écho-intégration** qui permet d'intégrer l'énergie rétrodiffusée dans ce que l'on appelle une « cellule d'intégration ». Concrètement, cette méthode permet d'homogénéiser horizontalement et verticalement les valeurs d'énergie acoustique reçues. Ainsi, l'écho-intégration permet d'obtenir une valeur quantitative proportionnelle à la densité acoustique moyenne par unité de distance ou de temps (Burczynski, 1982). Cette densité estimée des organismes peut être utilisée pour l'évaluation des ressources par exemple ou pour les études comportementales telles que le fonctionnement des migrations nyctémérales, les interactions trophiques, ou la distribution des organismes à différentes échelles spatio-temporelles (Béahle, 2015).

Une autre méthode est **l'extraction de banc**. Le **S_v (coefficient de réflectivité d'un volume)** ou le **S_A (coefficient de réflectivité d'une aire)** sont obtenus pour des entités, tels que les bancs de poissons au sein desquels les individus ne peuvent pas être isolés. En plus des variables quantitatives en lien avec l'énergie acoustique, d'autres variables peuvent être obtenues comme la **localisation spatiale et temporelle des cibles ou bancs observés (coordonnées, temps, position dans la colonne d'eau)**. L'écho-extraction des bancs, c'est-à-dire l'extraction des données des bancs à partir d'une valeur seuil d'énergie choisie (classiquement -60 dB) permet également de renvoyer des données quantitatives quant à la structure 3-D de ces bancs (hauteur, largeur, longueur, surface maximale, volume).

La dernière variable utilisée est la **TS (*Target Strength*)**. Elle représente l'intensité acoustique des cibles individuelles et s'exprime négativement en décibels (dB). Cette mesure n'est effectuée que sur les individus isolés et non regroupés en bancs. Cette mesure de TS est classiquement utilisée en estimation des stocks de poissons (Doray, Massé and Petitgas, 2010) pour le dénombrement et l'estimation de taille.

Ainsi, les résultats acoustiques peuvent être analysés à plusieurs niveaux (Tableau 4). Toutes ces variables quantitatives peuvent apporter des informations cruciales sur l'ensemble des composants biotiques du milieu, du zooplancton aux prédateurs supérieurs, quant à leur abondance, biomasse et distribution spatio-temporelle. Le tableau suivant présente la résolution taxonomique de ces métriques brutes, c'est-à-dire le classement des espèces par grandes guildes trophiques ou au niveau de l'espèce.

Tableau 4. Métriques acoustiques issues de l'échosondeur SIMRAD EK80.

Type de données de l'EK80	Métriques brutes	Résolution taxonomique	
		A l'échelle de la biocénose pélagique	A l'échelle spécifique
Echo-intégration	Coefficient de réflectivité d'un volume de 1m x 0.1 mille nautique (S _v en dB) et coefficient de réflectivité d'une aire (S _A en dB)	Toujours réalisable	Seulement avec des vérités terrain
Extraction de bancs	Hauteur du banc (min/max) (m)	Toujours réalisable	Seulement avec des vérités terrain
	Longueur du banc (m)		
	Surface maximum du banc (m ²)		
	Coefficient de réflectivité du volume, S _v à 70 kHz (dB)		
	Coefficient de réflectivité du volume, S _v à 120 kHz (dB)		
	Coefficient de réflectivité du volume, S _v à 200 kHz (dB)		
	Coefficient de variation du S _v à 70 kHz		
	Coefficient de variation du S _v à 120 kHz		
	Coefficient de variation du S _v à 200 kHz		
	Différence (Δ) entre les S _v à 70 et 120 (dB)		
	Différence (Δ) entre les S _v à 70 et 200 (dB)		
	Différence (Δ) entre les S _v à 120 et 200 (dB)		
	Distance (absolue et relative) banc / fond (m)		
	Distance (absolue et relative) banc / surface (m)		
Cibles individuelles	Index de réflectivité de l'individu (<i>Target Strength</i> , TS) (dB)	Toujours réalisable	Seulement avec des vérités terrain
	Position dans la colonne d'eau (profondeur, altitude) (m)		
	Nombre d'individus par cellules de 1m x 0.1 mille nautique		

2.4.1.2. Le sonar multi-faisceau SIMRAD M3

Le sonar multi-faisceaux SIMRAD M3 a une fréquence de 500 kHz et un angle de fauchée très large (120°) permettant d'explorer un plus vaste volume d'eau que le sondeur EK80. Le sonar M3 permet la détection et le dénombrement des différents bancs. Il permet également d'estimer la structure 3-D et les caractéristiques morphologiques des bancs (Figure 12). Dans le cas d'une utilisation conjointe avec l'échosondeur EK 80, le M3 permet aussi d'évaluer les biais sur l'estimation des densités de l'EK80 en prenant en compte les bancs non échantillonnés par le sondeur EK80. De même que pour le sondeur EK80, le sonar ne donne pas accès à l'information de l'espèce, des vérités terrain sont nécessaires pour cela.

Lorsqu'il est associé à une centrale inertielle et à un module bathymétrique, le sonar M3 permet également une caractérisation du profil bathymétrique en 3-D. Néanmoins, le sonar M3 n'est pas un sonar dédié spécifiquement à la bathymétrie, d'autres sonar pouvant être plus adapté. Il est également possible d'envisager une discrimination des types de substrats (roches, zone peu profondes, nature des fonds, etc..) même si celle-ci est en pratique difficile à réaliser. Le projet « Roches Douvres » porté par la station marine de Dinard a permis l'acquisition au printemps 2022 de la station inertielle mais les données (en cours d'acquisition) ne seront pas présentées ici.

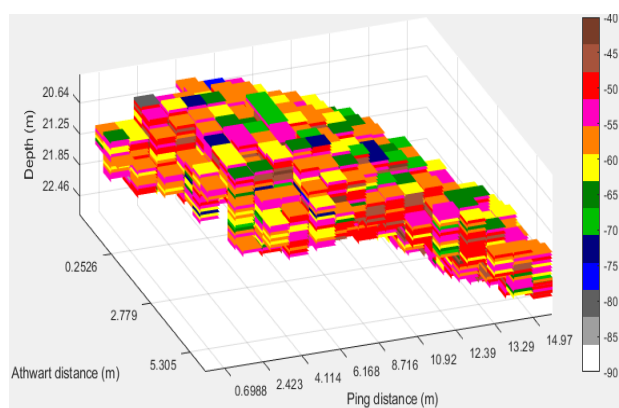


Figure 12. Observation 3-D d'un banc enregistré par le sonar multi-faisceaux. Les couleurs représentent les différents niveaux d'intensité acoustique (en dB).

De plus, un tilt de 15° a été utilisé, c'est-à-dire une cale permettant d'orienter latéralement de 15° le sonar et donc d'échantillonner toute la colonne d'eau dans cette direction. Cette configuration permet également d'échantillonner des zones (faibles fonds, têtes de roche) peu accessibles par l'EK80 et d'observer les potentiels comportements d'évitement des poissons face au navire (Brehmer *et al.*, 2019). En effet, ces comportements d'évitement ont été suggérés être plus importants en petits fonds (Drašík and Kubečka, 2005).

Les métriques acoustiques issues du sonar multi-faisceaux SIMRAD M3 sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Métriques acoustiques issues du sonar multi-faisceau SIMRAD M3

Type de données du M3	Métriques brutes	Résolution taxonomique	
		A l'échelle de la biocénose pélagique	A l'échelle spécifique
Extraction de bancs	Hauteur du banc (moyenne, min, max) (m)	Toujours réalisable	Seulement avec des vérités terrain
	Largeur du banc (moyenne, min, max) (m)		
	Longueur du banc (m)		
	Surface maximum du banc (m²)		
	Volume du banc (m³)		
	Ratio de trous dans le banc		
	Coefficient de variation de la hauteur		
	Coefficient de variation de la largeur		
	Coefficient de variation du ratio de trous		
	Elongation (largeur/longueur)		
	Elongation (hauteur/longueur)		
	Elongation (largeur/hauteur)		
	Indice de sphéricité		
	Indice de rectangularité		
	Indice de rondeur		
	Indice de rugosité		
	Indice de planéité		
	Périmètre le long de la longueur (m)		
	Périmètre le long de la largeur (m)		
	Périmètre le long de la hauteur (m)		
	Symétrie le long de la longueur		
	Symétrie le long de la largeur		
	Symétrie le long de la hauteur		
	Coefficient de réflectivité du volume du banc, Sv du banc (dB)		
	Distance (relative et absolue) banc / fond (m)		
	Distance (relative et absolue) banc / surface (m)		
	Coefficients de variation de la distance		

2.4.2. Les données de vérité terrain

Pour allouer spécifiquement les détections acoustiques pélagiques et benthopélagiques (évaluation des écotraces renvoyées par les sondeurs EK80 et sonar M3) présentes dans les zones côtières, il est nécessaire de croiser les données d'échosondage à des données récoltées *in situ* (ou vérités terrains) au même moment où la colonne d'eau est analysée par acoustique.

Ces vérités terrain sont acquises soit via des méthodes de capture (chalutage, pêche à la ligne), soit par des observations de plongeurs ou enregistrements vidéos (caméras GoPros et Paralenz). Elles sont effectuées le plus souvent « sur détection », c'est-à-dire en temps réel, lorsqu'un banc ou des individus seront détectés sur les sondeurs EK80 et sonar M3 (écotraces).

Toutes ces méthodes ont été testées dans le cadre du projet. Pour chacune d'entre elles, les moyens nécessaires à leur mise en œuvre et leur efficacité sont présentés afin de déterminer la ou les méthodes qui peuvent faire l'objet d'un déploiement à large échelle dans l'optique d'une surveillance nationale.

2.4.2.1. Pêche sur détection

Pêche par chalut méso-pélagique

Lors des campagnes PELMED et PELGAS, les vérités terrain sont effectuées grâce à un chalut méso-pélagique. Pour réaliser de la pêche sur détection en milieu côtier, un chalut méso-pélagique a été adapté (Figure 13a) (Guillard *et al.*, 2011). Ce chalut présente les dimensions suivantes : 6,30 x 4,20 m.

L'originalité de ce chalut réside dans son ouverture horizontale qui est assurée par 4 « kites » (Figure 13b), sorte de parachutes, qui, du fait de la traction, permet l'ouverture du chalut. Cela permet de se dispenser d'autres systèmes d'ouvertures plus lourds et plus contraignants de mise en œuvre, tels que les poutres ou les panneaux. L'ouverture verticale est assurée par des flotteurs et des lests. La modification du boulage, des lests et des différents réglages ont permis d'avoir une ouverture horizontale de 7 m pour une ouverture verticale maximale de 10 m. Afin de pouvoir effectuer la capture d'espèces à une profondeur donnée (*i.e.* celle où des bancs de poissons sont détectés par les sondeurs/sonars), le chalut a été équipé de capteurs Scanmar (Figure 13c) qui fournissent la profondeur d'immersion du chalut, sa distance par rapport au fond et à la surface, ainsi que ses ouvertures verticale et horizontale. Néanmoins, de nombreux problèmes techniques ont été constatés avec le logiciel et le capteur (estimation d'ouverture aberrante, difficulté à transmettre le signal entre le capteur du chalut et l'hydrophone, etc.). Des améliorations ont eu lieu grâce à l'intervention du technicien mais globalement ce système de positionnement n'est pas opérationnel pour les profondeurs prospectées dans le cadre du projet (< 50 m).

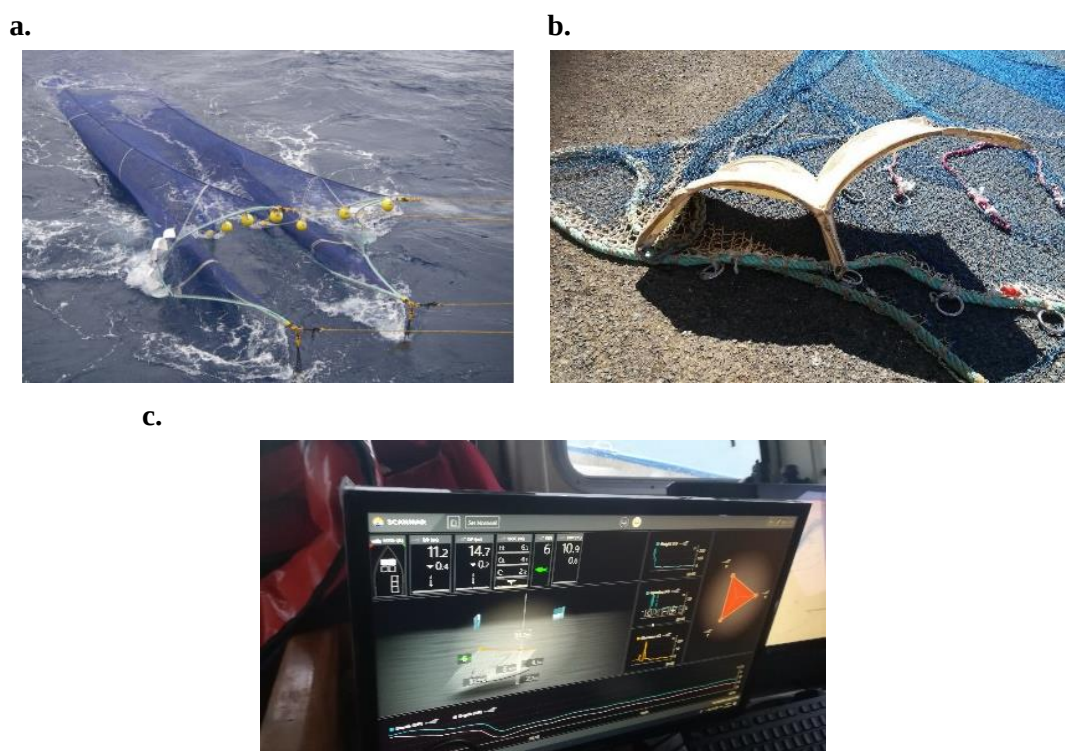


Figure 13. Déploiement du chalut méso-pélagique. Photographies du chalut prêt à filer (a), d'un kite du chalut qui permet son ouverture (b) et du logiciel Scanmar permettant une estimation de l'ouverture du chalut et de son positionnement dans la colonne d'eau (c).

Pêche à la ligne

Des méthodes de pêches alternatives comme l'utilisation de ligne à main ont été utilisées lorsque la capturabilité de certaines espèces pélagiques au chalut méso-pélagique était limitée (*e.g.* maquereaux communs). Lorsque des poissons ont été pêchés, l'espèce, taille et poids de chacun des individus étaient notés avant de les remettre à l'eau. La principale limite de cette méthode est qu'elle est très sélective et peut donc apporter un biais d'identification dans l'allocation spécifique.

2.4.2.2. Observations visuelles en plongée sous-marine

Plusieurs essais pour coupler des données acoustiques avec des vérités terrain par des plongeurs ont été réalisés. Bien qu'un premier essai peu fructueux ait été fait en juillet 2020 à Roscoff (car peu de poissons présents lors de l'essai), cette méthodologie a pour l'instant été principalement testée dans le Parc National des Calanques. En effet, les observations visuelles y sont facilitées par la bonne visibilité sous l'eau (10 m en moyenne) et par le nombre important de bancs de petits pélagiques présents dans le Parc National des Calanques. Deux méthodes ont été testées : la « plongée libre » et la « plongée tractée ».

La « plongée libre » nécessite trois plongeurs. Le premier plongeur recherche les bancs susceptibles d'être intéressants à observer au sondeur EK80 et sonar M3. Le deuxième plongeur doit avoir une bonne connaissance des espèces locales puisqu'il est chargé de relever les types de regroupement (bancs ou agrégations de poissons), déterminer les espèces et estimer le nombre d'individus ainsi que leur taille moyenne (intervalle de taille) (Figure 14a). Un dernier plongeur est relié par communication filaire à un semi-rigide pour communiquer ces informations à bord, celui-ci est également équipé d'un parachute rouge repérable à la surface. Une fois un banc repéré et décrit (espèce, nombre, taille) par les plongeurs, le navire équipé du matériel acoustique doit passer au-dessus de ce banc pour l'insonifier. La localisation du banc est repérée par le parachute rouge du dernier plongeur et par les indications fournies par celui-ci. De plus, les plongeurs confirment ensuite que le navire est passé au-dessus du banc voulu. La vitesse lors des acquisitions acoustiques est de 5 nds.

Comme son nom l'indique, la « plongée tractée » consiste à tracter un plongeur derrière le navire équipé des outils acoustiques EK80 et M3 (Figure 14b) à une distance de 20 m environ. Le plongeur est muni d'un système de communication filaire avec le bateau. La vitesse du navire est réduite à environ 2 nds afin de maintenir le plongeur à une profondeur autour de 10 m de profondeur. Lorsque des bancs ou agrégations de poissons sont détectés par le sondeur EK80 et le sonar M3, le plongeur est instantanément prévenu via la communication filaire. Après 20 à 30 secondes (intervalle de temps nécessaire au plongeur pour observer un banc préalablement détecté par les sondeurs), celui-ci va pouvoir communiquer au pont les différentes informations : banc ou agrégation, espèces, estimation du nombre d'individus, de la taille des individus et profondeur du banc. Cette méthode demande donc un niveau d'expertise élevé puisque le plongeur doit pouvoir renseigner dans un laps de temps relativement court l'espèce, l'abondance et la classe de taille des bancs ou agrégations de poissons.

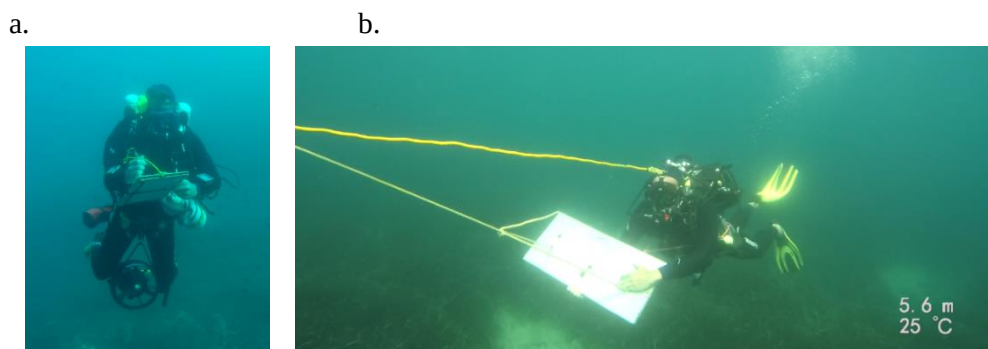


Figure 14. Photographies d'un plongeur notant les informations concernant les bancs de poissons pour le protocole en « plongée libre » (a) et d'un plongeur tracté équipé de la communication filaire pour le protocole en « plongée tractée » (b).

2.4.2.3. Observations par vidéos

Caméras seules

Des observations par vidéos ont été réalisées tout d'abord avec un ROV⁵ de l'IRD en juin 2020 à Roscoff et Douarnenez. Dans les deux cas, et malgré des conditions relativement clémentes, les tests n'ont pas été concluants du fait de la difficulté à manœuvrer celui-ci. Au-delà de ce problème de manœuvrabilité, ce ROV n'est équipé que d'une seule caméra (Figure 15), ce qui permet donc, dans le meilleur des cas, l'identification des espèces et leur dénombrement, mais pas l'estimation de leur taille moyenne.



Figure 15 : Photographie du ROV (Remotely Operated underwater Vehicle) testé en juin 2020 à Roscoff et Douarnenez

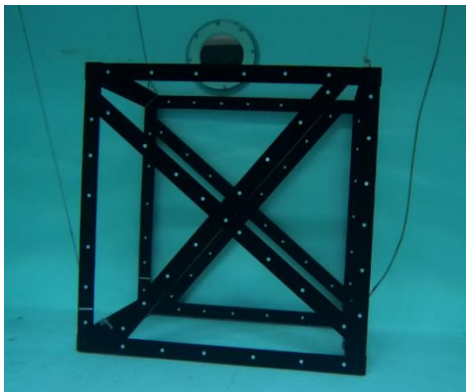
Système stéréoscopique

Pour mesurer individuellement la taille des poissons, il est nécessaire d'utiliser un système stéréoscopique composé de deux caméras fixées sur une barre dans une configuration précise (écartées de 70 cm et avec un angle convergent de 5°) (Langlois *et al.*, 2020). Un système stéréoscopique composé de deux caméras GoPros Héro protégées par des caissons (SeaGIS) (Figure 16a), prêté par l'IRD de Brest, a donc été utilisé dans le Parc National des Calanques en août 2020 où la visibilité de l'eau est meilleure pour tester ce dispositif. Ainsi, lors des « plongées libres », le premier plongeur filmaient les bancs ou agrégations de poissons avec ce système stéréoscopique. Ce système a été préalablement calibré dans un bassin de l'Ifremer de Brest avant le départ en mission (Figure 16b).

Des images vidéos par des caméras de type Paralenz (caméra spécifique à l'utilisation sous-marine) ont également été réalisées lors des plongées tractées où il n'était pas possible d'utiliser le système stéréoscopique.

⁵ <https://www.deeptrekker.com/products/underwater-rov>

a.



b.



Figure 16. Photographie du cube de calibration SeaGIS utilisé pour calibrer le système stéréoscopique (a) et système stéréoscopique testé dans le Parc National des Calanques de Marseille en août 2020 équipé de deux caméras GoPros Héro 6 dans des caissons et de deux bouées oranges pour la stabilisation sous l'eau (b).

Suite à l'analyse des données d'août 2020, le dispositif ACaPELA a développé un nouveau système stéréoscopique pour avoir un système plus réduit que celui emprunté à l'IRD de Brest. Ce prototype utilise des caméras de type Paralenz afin de s'affranchir des caissons et obtenir un système plus léger et moins encombrant. D'autre part, une collaboration a été mise en place avec l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) de Marseille pour équiper du système stéréoscopique un « *Hammerhead*⁶ » (OSIL), instrument sous-marin remorqué et télécommandé, afin de pouvoir tracter les caméras derrière le bateau à la profondeur voulue (Figure 17). Pour équiper le Hammerhead, il était donc nécessaire d'avoir un système plus compact et léger d'où l'utilisation des Paralenz.

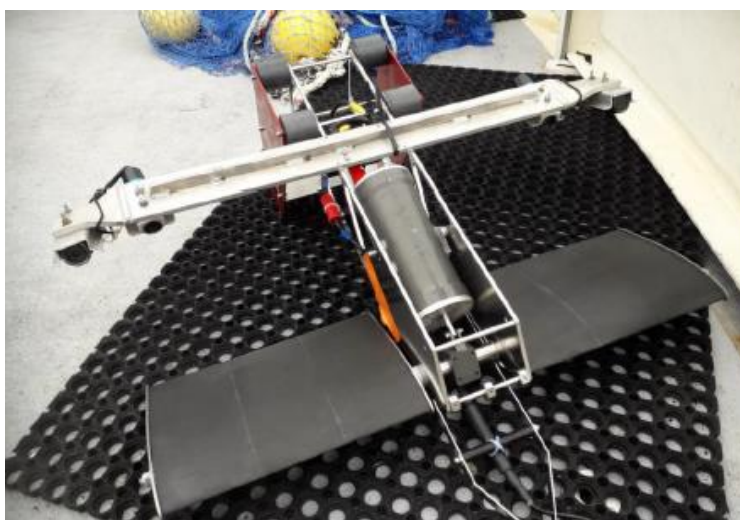


Figure 17. Photographie du « Hammerhead » (OSIL) équipé du système stéréoscopique construit par le dispositif ACaPELA.

2.4.3. Les stations CTD

Des profils CTD (*Conductivity Temperature Depth*) sont indispensables pour (i) paramétrer le matériel acoustique (la célérité des sons dans l'eau est fonction de la température, la pression et la salinité) et (ii) acquérir des données environnementales susceptibles d'expliquer la variabilité des abondances par espèce ou guildes d'espèces. Lors des campagnes, des stations CTD sont donc réalisées régulièrement afin de connaître les spécificités physico-chimiques de la colonne d'eau et de pouvoir les

⁶ <https://osil.com/product/hammerhead/>

corrélés avec les résultats obtenus par acoustique. Lors de chaque station, la sonde CTD calibrée est immergée puis descendue proche du fond avant d'être remontée, le tout à vitesse constante (autour de 1 m.s⁻¹). Celle-ci mesure en continu la pression, la température, la salinité, la conductivité, la fluorescence et l'oxygène dissous. Ces enregistrements permettent ainsi de connaître la structuration fine de la colonne d'eau. En effet, les paramètres environnementaux mesurés par CTD sont structurants pour les populations qui sont sensibles à des structures telles que les thermoclines, oxyclines ou haloclines. Plusieurs stations ont ainsi été réalisées sur l'ensemble des campagnes réalisées (Tableau 6).

Tableau 6. Nombre de profils CTD réalisés au cours des différentes campagnes ACaPELA.

Mission	Zone d'étude	Dates de la mission	Nombre de CTD réalisées
1	Rade de Brest	02 au 19 décembre 2019	9
2	Roscoff	03 au 11 juin 2020	9
3	Brest et Douarnenez	17 au 25 juin 2020	21
4	Roscoff	02 au 10 juillet 2020	16
5	Marseille	17 au 23 août 2020	7
6	Saint-Malo	07 au 09 septembre 2020	2
7	Brest et Douarnenez	14 au 17 septembre 2020	14
8	Roscoff	01 au 08 octobre 2020	14
9	Saint-Malo	15 au 26 mars 2021	11
10	Marseille	3 au 8 avril 2021	8
11	Roscoff	03 au 11 juin 2021	21
12	Saint Malo	19 au 21 juillet 2021	11
13	Brest et Douarnenez	22 au 28 juillet 2021	9
14	Roscoff	13 au 17 juin 2022	12
15	Brest et Douarnenez (sonde de célérité et non CTD)	20 au 23 juin 2022	15
16	Saint Malo	25 au 29 juillet 2022	-
Nombre total de profils réalisés			179

3. Méthodologie pour répondre aux besoins de la DCSMM

Pour rappel, le dispositif ACaPELA est actuellement en phase 2 du développement méthodologique qui a pour objectif de développer les stratégies d'échantillonnage et les indicateurs. Cette phase permet de valider les choix réalisés en termes de sites d'échantillonnage et de positionnement des radiales. Celles-ci doivent en effet prendre en compte les particularités des sites (présence d'îles ou de rochers par exemple) et permettre de répondre aux besoins de la stratégie d'échantillonnage (test de l'effet côte/large ou de gradients de pression, test des effets saisonniers et interannuels, analyse de la répétabilité et représentativité de l'échantillonnage, etc.). Dans une zone déjà échantillonnée, les campagnes répètent donc systématiquement les mêmes radiales mais le protocole d'échantillonnage est peu à peu affiné (emplacement des CTD, ordre des radiales en fonction de la météorologie ou des marées, choix du sens de réalisation des radiales) afin d'optimiser le post-traitement et le suivi long-terme. Les méthodes de vérité terrain sont également encore testées et améliorées. Cependant, la part la plus importante dans cette phase reste le développement des indicateurs avec un travail d'analyse des données acoustiques à poursuivre.

3.1. Pertinence de ce dispositif pour une surveillance DCSMM.

3.1.1. Rappel des objectifs des PdS

L'objectif des PdS est de collecter des données en vue de l'évaluation de l'état écologique des eaux marines. Le BEE est qualifié par 11 descripteurs couvrant l'ensemble des composantes biocénétiques et des pressions pesant sur les écosystèmes marins.

Le descripteur 1, intitulé « Biodiversité », vise le maintien de la biodiversité et se définit comme suit : « La diversité biologique est conservée. La qualité des habitats et leur nombre, ainsi que la distribution et l'abondance des espèces sont adaptées aux conditions physiographiques, géographiques et climatiques existantes ». Le descripteur 1 se décline en trois thèmes couvrant l'ensemble des composantes biocénologiques de l'écosystème (Habitats pélagiques, Habitats benthiques, Composantes d'espèces mobiles). Pour chacune des composantes d'espèces mobiles - dont les poissons et les céphalopodes - le descripteur 1 du BEE est renseigné grâce à 5 critères présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7. Critères DCSMM pour renseigner le descripteur 1 « Biodiversité ».

Critère	Désignation
D1C1	Taux de mortalité par captures accidentelles
D1C2	Abondance des populations
D1C3	Caractéristiques démographiques des populations
D1C4	Distribution spatiale des populations
D1C5	Habitat des espèces

Le descripteur 4, intitulé « Réseau trophique » se définit comme suit : « Tous les éléments constituant le réseau trophique marin, dans la mesure où ils sont connus, sont présents en abondance et diversité normales et à des niveaux pouvant garantir l'abondance des espèces à long terme et le maintien total de leurs capacités reproductives. ». Les critères pouvant renseigner le descripteur 4 sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8. Critères DCSMM pour renseigner le descripteur 4 « Structure et fonctionnement de l'écosystème ».

Critère	Désignation
D4C1	Diversité des espèces de la guildes trophique
D4C2	Abondance dans les guildes trophiques
D4C3	Distribution des taille de guildes trophique
D4C4	Productivité de guildes trophiques

3.1.2. Critères pouvant être renseignés par le dispositif ACaPELA

Tout d'abord, l'acoustique active présente de nombreux intérêts pour l'étude de biocénoses dans leur ensemble. En effet, cette méthodologie permet l'acquisition de données sur des surfaces importantes avec une grande efficacité. De plus, cette méthode est non-invasive et relativement aisée à mettre en œuvre une fois les instruments installés à bord. Cette méthode est déjà utilisée par l'Ifremer (Doray, Massé and Petitgas, 2010) et a donc toute sa place dans le cadre d'une surveillance des zones côtières et ultra-côtières.

Les variables descriptives pouvant être suivies par le dispositif ACaPELA sont multiples, elles peuvent provenir de l'écho-intégration, l'écho-extraction des bancs, des cibles individuelles mais également des vérités terrain. Analyser plusieurs types de variables permet en outre d'avoir une vision intégrée de l'état des populations de poissons pélagiques, puisque toutes ces variables descriptives ne sont pas susceptibles d'être impactées de la même manière par les pressions anthropiques (par exemple, impact sur la taille des individus sans impact sur l'abondance des populations).

Approche D1 « spécifique » pas encore opérationnelle

Afin de renseigner le descripteur 1, il est nécessaire d'obtenir des vérités terrain pour connaître l'espèce et ainsi évaluer le BEE à l'échelle de l'espèce.

La construction d'une base de données de référence pour les couples de données acoustiques et vérités terrain a été initiée sur l'ensemble des sites prospectés. Mais celle-ci n'est pour l'instant pas assez importante pour pouvoir renseigner les critères D1C2, D1C3 et D1C4. Il est donc nécessaire de poursuivre l'acquisition de vérités terrain afin d'agrandir cette base de données de référence et avoir un nombre suffisant de vérités terrain par espèce. En effet, avec une base de données suffisamment importante, la variabilité des réponses acoustiques par espèce pourra être calculée. Il est notamment important de savoir si les signatures acoustiques sont variables dans le temps et l'espace pour pouvoir, le cas échéant, extrapoler les résultats à d'autres signatures acoustiques pour lesquelles l'espèce n'est pas connue. Dans ce cas, l'espèce sera prédite en se basant sur des méthodes statistiques prenant en compte l'ensemble des variables acoustiques obtenues lors de l'échosondage et définissant un objet non identifié (par exemple un banc) et en comparant ces variables avec les données par espèce provenant de la base de référence des couples de données acoustiques et vérités terrain.

A ce stade, le dispositif ACaPELA n'est donc pas encore opérationnel pour renseigner le descripteur D1 à l'échelle de l'espèce, et notamment les critères D1C2, D1C3 et D1C4. Des résultats prometteurs ont néanmoins été obtenus pendant les missions dans le Parc National des Calanques, ce qui montre l'intérêt du couplage des données acoustiques avec des vérités terrain. Il est donc nécessaire de poursuivre la collecte des données en utilisant les différentes méthodes testées pour faire de l'allocation spécifique, afin d'avoir une base de données suffisante pour prédire les espèces le long des radiales pour l'ensemble des zones d'étude.

Vers une approche D4 opérationnelle

Sans allocation spécifique, c'est-à-dire sans l'obtention de vérités terrain, les écotraces peuvent tout de même être classées en grandes guildes trophiques (plancton, poissons et top-prédateurs). En effet, les données acoustiques peuvent être analysées de manière à évaluer le BEE de ces grandes guildes trophiques simultanément et ainsi répondre à une approche D4 par grandes guildes trophiques. Le Tableau 9 présente le paramétrage réalisé grâce aux données de littérature pour distinguer ces grandes guildes trophiques : plancton, poisson et top-prédateurs.

Tableau 9. Présentation des grandes guildes trophiques pour une approche D4.

	Pas de présence $S_v < -80$ dB	Plancton $-80 \leq S_v < -65$ dB	Poisson $-65 \leq S_v < -30$ dB	Top prédateur -30 dB $\leq S_v$
Pélagique ($\geq 30\%$ de la colonne d'eau)	Cellule sans présence biologique	Plancton pélagique	Poisson pélagique	Top prédateur pélagique
Benthopélagique ($< 30\%$ de la colonne d'eau)		Plancton benthopélagique	Poisson benthopélagique	Top prédateur benthopélagique

En particulier, concernant les PCs, cette méthode permettra de suivre l'évolution du groupe « poissons pélagiques » mais également celui du « top-prédateur » puisque celui-ci peut contenir des mammifères marins, mais également des poissons (thons par exemple). Le suivi de ces grandes guildes trophiques peut être réalisé sur toutes les façades de France métropolitaine, à toutes saisons, pour toutes les conditions de turbidité de l'eau et avec tout type de navire côtier (navires de station ou non). Les paramètres fixés pourront être utilisés pour traiter les (i) données acoustiques issues de l'écho-intégration généralement utilisées dans les calculs de biomasse, (ii) l'écho-extraction des bancs, et (iii) les cibles individuelles permettant de prendre en compte des individus isolés (en dehors des bancs). Les

guildes trophiques pour les bancs échantillonnés pourront être affinées en utilisant des paramètres propres aux bancs tels que leur forme, leur taille ou leur densité. Les individus de la catégorie « top-prédateur » pourront être aussi analysés individuellement via l'extraction des cibles individuelles (TS).

La définition de ces grandes guildes trophiques pourra être améliorée en distinguant par exemple d'autres sous-catégories. En effet, des paramètres pourront être fixés pour affiner les groupes en fonction, par exemple, du niveau d'agrégation et la forme du banc qui peuvent varier en fonction de l'espèce (Pavlov and Kasumyan, 2000). Par exemple, l'analyse des données de Marseille a pu mettre en évidence l'intérêt de s'intéresser à la variable « Nombre de trous », représentant le niveau d'agrégation, puisque des différences significatives ont pu être observées entre des espèces formant des agrégations (*Chromis chromis* et *Boops boops*) et une espèce formant des bancs (*Sarpa Salpa*).

Ainsi, avec les données obtenues lors des suivis acoustiques du dispositif ACaPELA, les critères D4C2 et D4C3 pourront être renseignés pour toutes les SRMs échantillonnées sous réserve d'adapter l'échantillonnage à l'ensemble de la zone ultra-côtière (Tableau 10).

Tableau 10. Critères DCSMM pouvant être renseignés en fonction des outils et méthodes d'analyses du projet.

Outil	Type de données	Critères DCSMM du D1 pouvant être renseignés	Critères DCSMM du D4 pouvant être renseigné
EK80	Extraction de bancs	D1C2 à D1C4 seulement avec de l'allocation spécifique	D4C2 à D4C3
	Echo-intégration	D1C2 à D1C4 seulement avec de l'allocation spécifique	D4C2 à D4C3
	Cibles individuelles	D1C2 et D1C4 seulement avec de l'allocation spécifique	D4C2 à D4C3
M3	Extraction de bancs	D1C2 à D1C4 seulement avec de l'allocation spécifique	D4C2 à D4C3
Vérité terrain	Données générales (espèce, abondance, taille)	D1C2 à D1C4	D4C2

3.2. Evaluation du Bon Etat Ecologique

Les seuils caractérisant l'atteinte (ou non) du BEE peuvent être estimés selon deux approches.

Approche temporelle

La méthode la plus classique consiste à utiliser une série temporelle suffisamment longue (au moins 8/10 années d'après HELCOM (2018)) de manière i) à quantifier la variabilité interannuelle souvent élevée chez les pélagiques côtiers (notamment liée au recrutement), ii) à comparer les variations récentes d'un critère d'état (*e.g.* abondance D1C2) à une période de référence considérée en bon état écologique. A ce jour, nous n'avons que trois années d'échantillonnage (2020, 2021 et 2022 en cours d'acquisition), ce qui est faible au vue de la durée de vie des populations échantillonnées (2-3 ans pour la plupart des espèces de petits pélagiques). Il est donc nécessaire de continuer le suivi sur le long terme afin d'avoir des données couvrant plusieurs générations de petits pélagiques et d'appréhender les variations interannuelles naturelles d'abondance des populations.

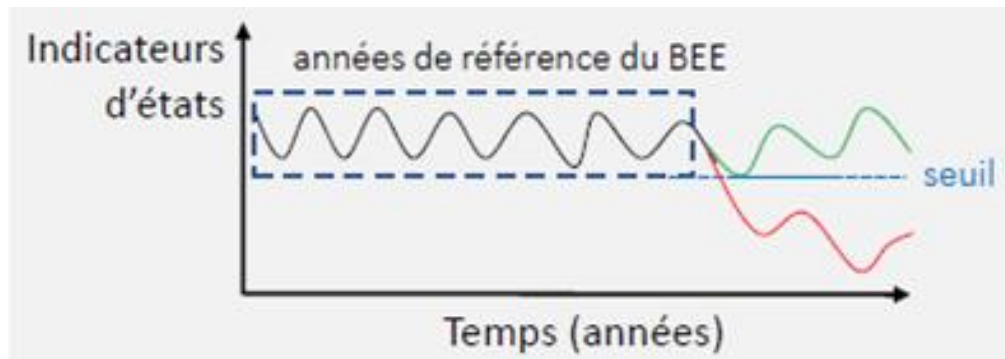


Figure 18. Schéma d'évaluation du Bon Etat Ecologique (BEE) en utilisant une série temporelle. En noir les années utilisées pour établir les seuils de référence. En vert les variations d'un indicateur restant dans le seuil ; en rouge les variations d'un indicateur passant sous le seuil de BEE.

Néanmoins, il est difficile de pouvoir s'appuyer sur un état initial exempt de pressions anthropiques pour pouvoir efficacement comparer l'état actuel des populations à un état en antérieur considéré en BEE. Face à cette absence de période de référence, il existe des méthodes utilisant les points de rupture entre deux périodes de stabilité dans la série temporelle pour évaluer le BEE (Brind'Amour and Delaunay, 2018). Un paramètre important à prendre en compte est le nombre minimum d'années qui peuvent être considérées comme formant une période stable. L'Ifremer se base notamment sur un minimum de 3 années consécutives (Figure 19). La période de stabilité la plus récente est alors comparée à celle actuelle pour définir l'état de la population.

En complément de cette approche, il est également possible d'analyser des tendances linéaires en ajustant des régressions linéaires simples sur les dernières années échantillonnées. Dans le cas où une augmentation significative de la tendance sur les dernières années est observée, il est considéré qu'il y a une amélioration globale de l'état de la population (Figure 19). A l'inverse, lorsqu'une diminution significative de la tendance sur les dernières années est observée, il est considéré qu'il y a une détérioration globale de l'état de la population (Brind'Amour and Delaunay, 2018).

Analyse des points de rupture sur la période long terme		Tendance linéaire du dernier cycle DCSMM 2010 – 2015	Statut général de la population
Point(s) de rupture dans la série		↗ → ↘	Cible atteinte Amélioration récente Cible atteinte Stabilité récente Cible atteinte Détérioration récente
		↗ → ↘	Cible non atteinte Amélioration récente Cible non atteinte Stabilité récente Cible non atteinte Détérioration récente
Pas de point de rupture dans la série		↗ → ↘	Pas d'évolution Amélioration récente Pas d'évolution Détérioration récente
			Amélioration globale
			Détérioration globale

Figure 19. Représentation schématique de la définition du BEE d'une population d'espèce tel que réalisé par les co-pilotes Ifremer D1PC. Source : (Brind'Amour and Delaunay, 2018).

Approche spatiale (i.e. selon des gradients de pression)

Dans cette approche pour évaluer le BEE, les radiales sont positionnées de façon à prendre en compte les gradients environnementaux (bathymétrie, nature du fond, etc.) et les gradients anthropiques qui sont les principaux gradients impactant les populations de poissons pélagiques. La variable acoustique est ensuite analysée pour évaluer la contribution de chacun des facteurs.

Cette approche a notamment été mise en place lors des missions dans le Parc National des Calanques où les radiales ont été positionnées de manière à évaluer l'impact de la présence des ZNP sur les populations de poissons. Les premiers résultats montrent effectivement un effet réserve (ZNP) sur les variables acoustiques telles que le volume des bancs mais des analyses sont encore nécessaires pour bien distinguer l'impact des facteurs environnementaux en comparaison au gradient de pression de pêche. En effet, les ZNPs sont en général localisées dans des habitats favorables aux espèces.

Pour réaliser ce même travail en atlantique, il est nécessaire d'avoir des cartes représentant les pressions anthropiques afin de cibler les zones à échantillonner en fonction de ces gradients de pressions. Les cartes fournies par le projet Carpediem (Quemmerais-Amice *et al.*, 2020) pourront par exemple être utilisées.

Enfin, la répartition des espèces est très variable dans l'espace et le temps car celle-ci peut être affectée par des facteurs biotiques (traits d'histoire de vie, prédation, compétition entre les espèces, disponibilité de la nourriture), abiotiques (paramètres physico-chimiques de l'eau) et anthropiques (pêches, urbanisation des littoraux, eutrophisation, forçages climatiques, etc.). Pour prendre en compte l'ensemble de ces facteurs et ainsi évaluer au mieux le BEE, une méthode complémentaire serait de développer des modèles mathématiques prédisant la répartition spatio-temporelle des populations à l'échelle des espèces ou groupes d'espèces. Ainsi, les différents types de données issues du dispositif ACaPELA pourront servir à élaborer ces modèles.

4. Résultats du dispositif ACaPELA

4.1. Résultats sans allocation spécifique

4.1.1. Répartition spatiale des poissons pélagiques

Les données acoustiques sont riches d'informations que l'on peut exploiter sans données d'allocation d'espèces. S'il n'est pas possible de réaliser un suivi par espèce, d'autres métriques sont exploitables et permettent un suivi spatio-temporel des peuplements.

Ainsi, l'échantillonnage le long des transects permet de connaître la répartition spatiale des populations de poissons pélagiques. La Figure 20 présente les données de présence/absence des bancs de poissons pélagiques avec une maille de 500 x 500 m pour les zones de Saint Malo et Roscoff échantillonnées en mars et juin 2021. Dans cet exemple, les données acoustiques obtenues lors des transects sur les bancs de poissons sont transformées en données de présence/absence de poissons pélagiques, ce qui permet de calculer facilement des pourcentages de présence et absence le long de ces radiales et de visualiser facilement des zones privilégiées pour les bancs de poissons pélagiques.

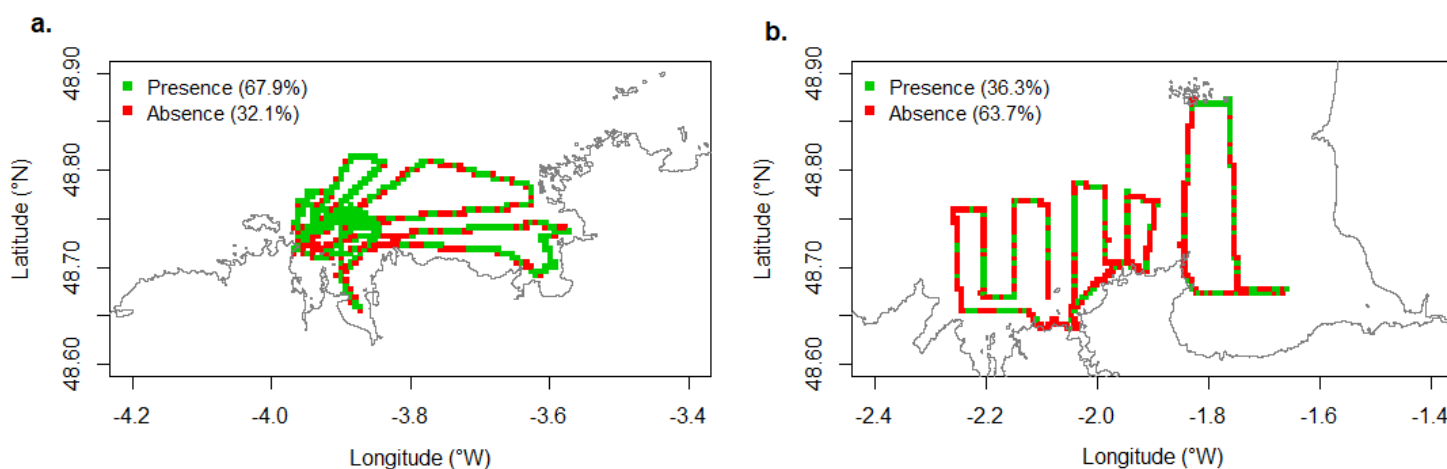


Figure 20. Carte de présence/absence de bancs de poissons pélagiques dans les zones de Roscoff en juin 2021 (a) et de Saint-Malo en mars 2021 (b). Les carrés rouges représentent les absences tandis que les carrés verts représentent la présence avec une maille de 500x500 m.

4.1.2. Gradient côte-large

L'analyse des données acoustiques a permis de mettre en exergue l'importance du gradient côte-large ce qui est essentiel pour évaluer l'intérêt de la zone côtière non échantillonnée par les campagnes PELGAS et PELMED. Les radiales effectuées dans la zone de Douarnenez permettent pour cela une bonne visualisation de ce gradient côte-large. L'écho-intégration est faite à partir des données de l'EK80 et sont présentées en Figure 21. Le principal produit de l'écho-intégration est le Mean Volume Backscattering Strength (MVBS), un proxy de la biomasse globale. La Figure 21a présente les données issues de l'écho-intégration à 120 kHz le long des radiales et interpolées entre celles-ci. Cette carte permet d'avoir une vision globale de la répartition de la biomasse dans la colonne d'eau dans cette zone. De fortes intensités acoustiques sont notamment retrouvées proches des côtes et dans la baie de Douarnenez. La Figure 21b retranscrit ces résultats sous forme de « boxplots » par catégorie de profondeur. La variable MVBS augmente significativement pour les faibles profondeurs, et ce quelle que soit la fréquence mise en œuvre.

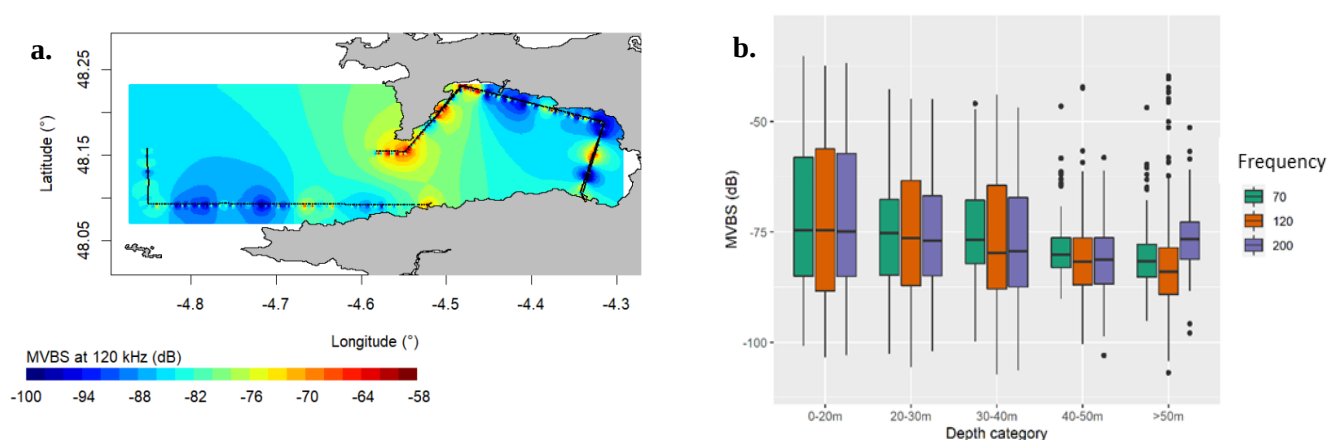


Figure 21. Résultats de la campagne de Douarnenez en Juin 2020 par les données d'écho-intégration a) Cartographie des MVBS (Mean Volume Backscattering Strength, en dB) à 120 kHz avec une interpolation entre les radiales (en noir). En bleu, les zones de faible MVBS et en rouge avec une importante MVBS donc potentiellement une biomasse importante et (b) boxplots comparant les MVBS (en dB) le long de la radiale côte-large en fonction de la classe de profondeur observée. Les 3 fréquences de l'EK80 sont représentées avec en vert 70 kHz, en orange 120 kHz et en violet 200 kHz.

Le gradient côte large peut également être visualisé avec les données acoustiques d'extraction des bancs. Avec l'EK80 les agrégations et bancs (total de 31) de ces radiales sont différents selon leur positionnement le long du gradient côte-large et un nombre important de bancs a notamment été mis en évidence dans les zones ultra-côtières où la bathymétrie est inférieure à 30 m. De plus, les bancs situés en faible profondeur ont un S_v plus important (Figure 22), ce qui pourrait être corrélé à un niveau d'agrégation plus important des individus.

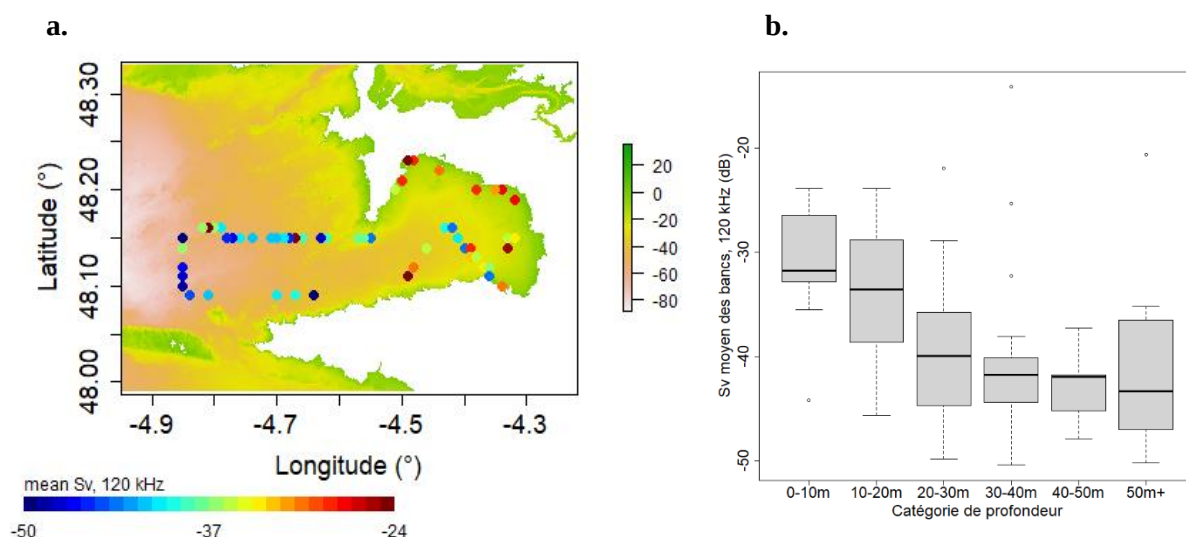


Figure 22. Visualisation des bancs extraits à 120 kHz le long de la radiale côte-large à Douarnenez (a). La couleur des points représente le niveau de densité acoustique moyenne du banc, exprimée en S_v (dB). Boxplots présentant les différences de densité acoustique moyenne du banc, exprimée en S_v , en fonction des catégories de profondeur (b).

La même analyse avec le sonar M3 a mis en évidence qu'un nombre important de bancs n'avait pas été échantillonné par le sondeur EK80 (> 50 %), néanmoins la répartition des bancs le long des radiales côte-large est similaire. Ce résultat met ainsi en évidence l'intérêt d'utiliser le M3 pour échantillonner une plus grande zone que l'EK80, et ce tout particulièrement dans les petits fonds et les têtes de roches qui resteront inaccessibles pour l'EK80. De plus, le M3 a l'avantage de voir les bancs en entier et donc de renseigner les caractéristiques morphologiques 3-D.

Les zones ultra-côtières présentent non seulement une intensité acoustique (S_v) plus élevée que dans les zones plus au large, mais elles présentent également une structure de bancs différente, telle que mise en évidence par une ACP (Analyse en Composante Principale, Figure 23). Cette représentation inclut l'ensemble des caractéristiques des bancs, qu'elles soient spatiales, morphologiques ou acoustiques. Les variables ont été indiquées comme relatives à la bathymétrie afin d'en limiter l'impact direct (par exemple, la profondeur indiquée n'est pas la profondeur absolue mais la profondeur relative, c'est-à-dire la profondeur du banc divisée par la profondeur du fond). L'ACP montre qu'il y a une réelle différence dans l'organisation des bancs dans la colonne d'eau, ce qui révèle une différence fondamentale dans la structuration des populations de poissons dans la colonne d'eau.

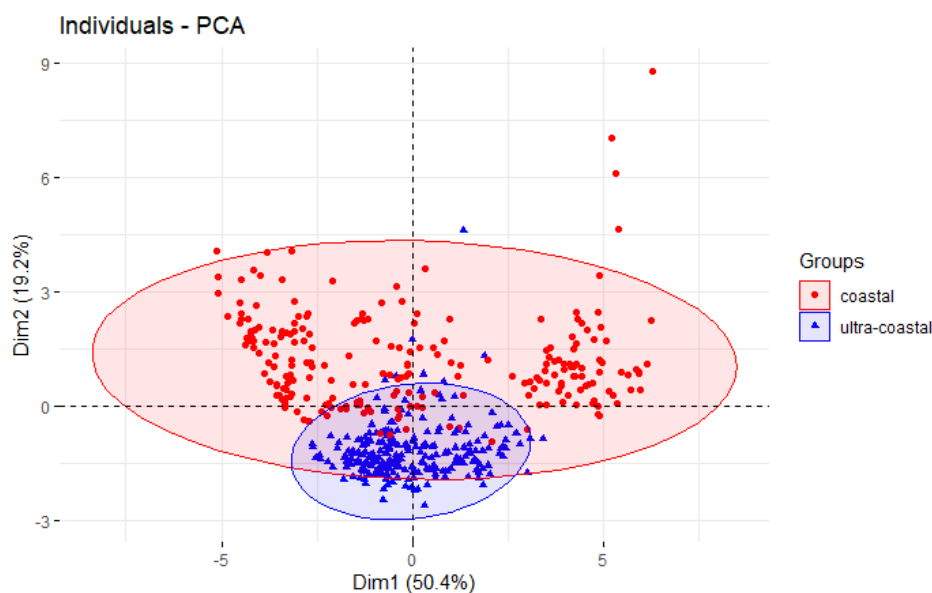


Figure 23. ACP (Analyse en Composante Principale) incluant l'ensemble des caractéristiques spatiales, morphologiques et acoustiques pour différencier la structure des bancs des zones ultra-côtières (<15m de profondeur et <2,5 km des côtes).

4.1.3. Estimation de l'abondance des poissons pélagiques en banc le long des transects

Lors des couplages avec des observations par plongée, il a été montré que les variables morphologiques des bancs obtenus en 3-D avec le sonar M3, et notamment la variable descriptive « volume des bancs » augmente significativement avec le nombre d'individus observé dans les bancs (Figure 24). En effet, les abondances ont pu être renseignées par les plongeurs lors des deux missions permettant d'avoir des vérités terrain réalisées dans le Parc National des Calanques en 2020 et 2021. Sur la Figure 24, tous les bancs et agrégations pour lesquels on a eu des données d'abondance (toutes espèces confondues) ont été pris en compte.

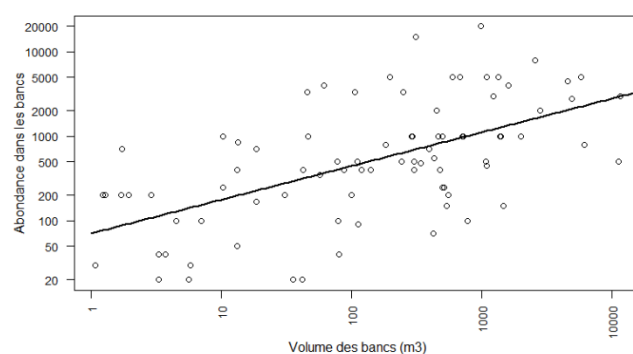


Figure 24. Relation entre l'abondance de poissons pélagiques dans les bancs observés par les plongeurs et le volume des bancs (m³) obtenu avec le sonar M3 après extraction sous Matecho

Ainsi, cette variable (volume des bancs) constituerait un bon proxy de l'abondance dans les bancs de poissons pélagiques. La relation linéaire permettant d'estimer l'abondance en fonction du volume du banc obtenu avec le M3 est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Log}(\text{Abondance}) = 0.39878 \times \text{Log}(\text{Volume}) + 4.26229$$

Avec le volume donné en m³ et l'abondance en nombre d'individus dans le banc.

En utilisant le volume de tous les bancs échantillonnés le long des transects dans le Parc National des Calanques, nous pouvons donc estimer l'abondance des poissons le long de ces transects (Figure

25). Sur cette figure, la maille choisie est de 0.1 km et chaque volume de banc est sommé dans une maille. Les plus fortes densités de poissons pélagiques ont été retrouvée dans les zones de bathymétrie faible pouvant constituer des zones d'habitat préférentielles.

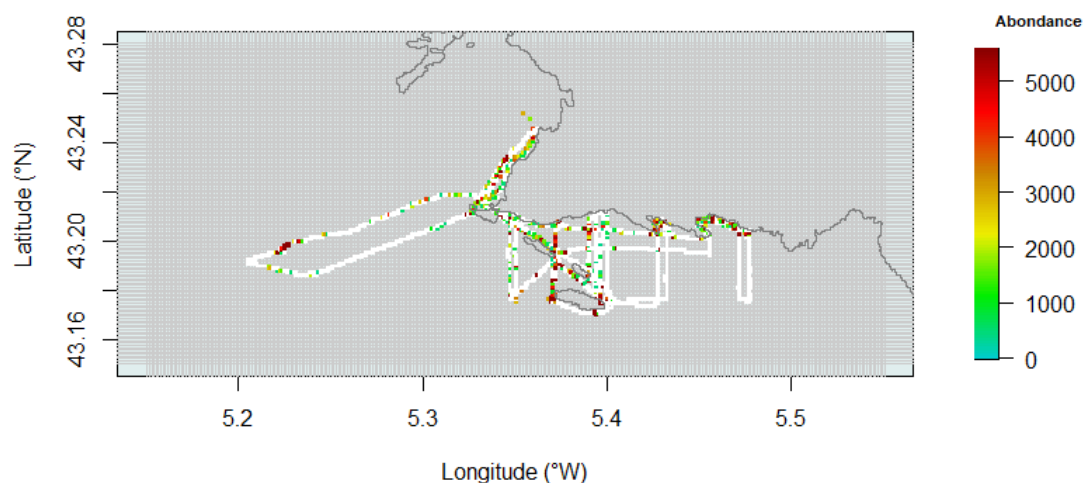


Figure 25. Estimation de l'abondance des poissons pélagiques le long des transects dans le Parc National des Calanques en 2020

4.1.4. Variabilité temporelle

Les données d'écho-extraction des bancs permettent également de suivre la variabilité temporelle. Ainsi, la Figure 26 présente les suivis réalisés en 2020 lors des campagnes faites dans les zones de Brest et Douarnenez et dans la zone de Roscoff à différentes saisons.

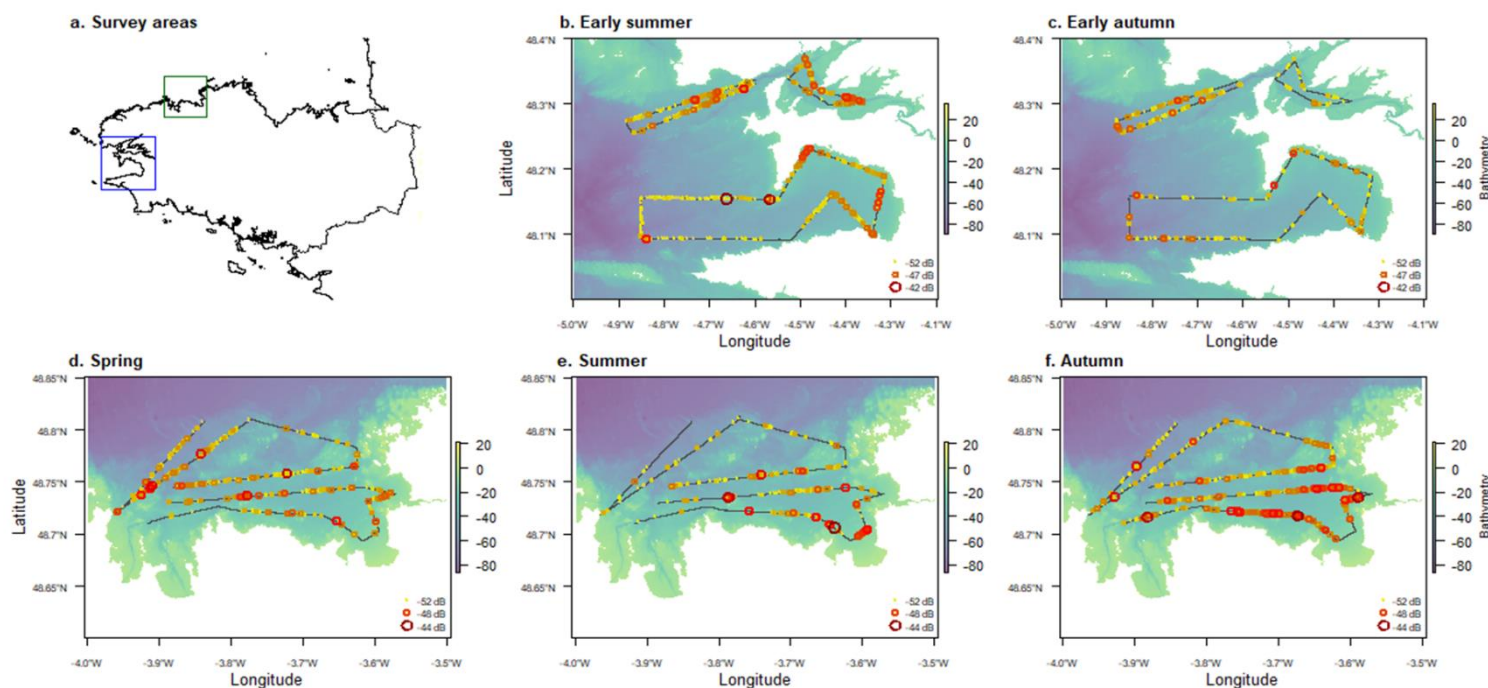


Figure 26. Mise en place du suivi long terme dans les zones de Brest et Douarnenez et dans la zone de Roscoff. Le graphique a présente la localisation des zones d'études, les graphiques b et c présentent les résultats acoustiques du sonar M3 pour la zone de Brest et Douarnenez tandis que les graphiques d, e et f présentent les résultats acoustiques du sonar M3 pour la zone de Roscoff.

En comparant les mêmes radiales effectuées à plusieurs saisons différentes, une variabilité saisonnière a été mise en évidence sur les caractéristiques des bancs. Ainsi, la Figure 27 représente l'évolution de la surface et volume des bancs calculés avec le sonar M3 en fonction des saisons dans les zones de Brest et Douarnenez (MC) et dans la zone de Roscoff (MC). Pour ces deux zones, une diminution significative de la surface et du volume des bancs est observée en automne 2020 comparé au printemps et été 2020 (Figure 27). Cette comparaison est possible car il s'agit des mêmes radiales mais pour permettre une comparaison inter-sites, ces données seront standardisées par une unité d'effort.

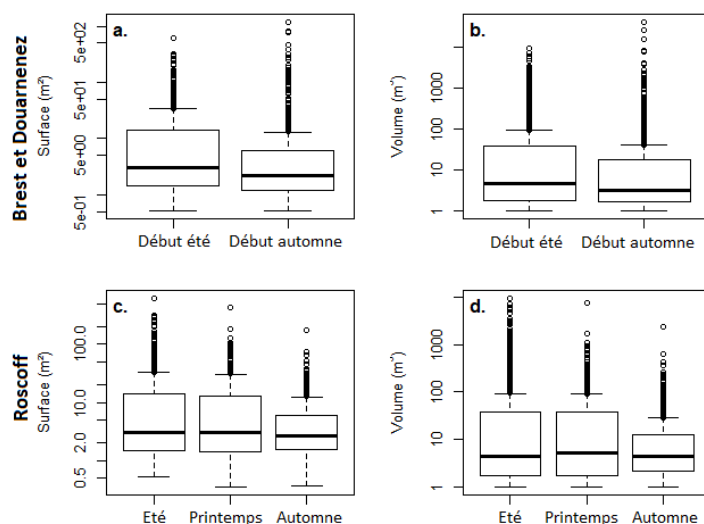


Figure 27. Surface (m²) et volume (m³) des bancs échantillonnés par le sonar M3 pour les zones de Brest et Douarnenez (MC) (a, b) et dans la zone de Roscoff (MC) (c, d).

De plus, les données ont également été analysées avec le sondeur EK80 (Figure 28) afin de pouvoir ensuite comparer les résultats à ceux du sonar M3 et les analyser conjointement. L'EK80 ne perçoit pas la totalité des bancs mais les résultats obtenus lors de l'extraction de bancs sont similaires dans les deux cas et ils permettent d'aboutir aux mêmes conclusions. Les données de l'EK80 ont également été traitées par écho-intégration (Figure 28a,c), permettant ainsi une approche complémentaire à celle des bancs car elle inclut la totalité de la colonne d'eau, depuis les cibles individuelles, les couches planctoniques ou les agrégations pélagiques plus ou moins compactes. Ces dernières analyses confortent les résultats trouvés précédemment mais permettront au final une analyse plus complète de l'écosystème dans sa globalité. La Figure 28 présente en effet une variabilité saisonnière similaire à celle observée (Figure 27) avec des MVBS, proxy de la biomasse, moins importants en septembre qu'en Juin à Brest et Douarnenez et une variation plus nuancée sur le site de Roscoff mais où une diminution entre juillet et octobre est observée.

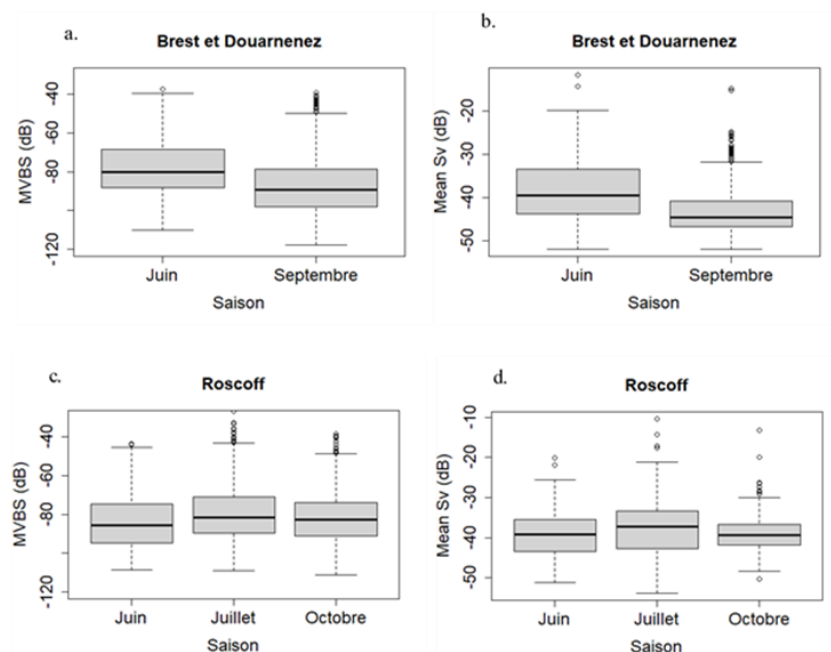


Figure 28. Evolution des densités acoustiques en fonction des saisons sur les sites de Brest et Douarnenez (a. et b.) et Roscoff (c. et d.). Les boxplots présentent les données l'écho-intégration (a et c) et de l'extraction de bancs (b et d) à partir des données du sondeur EK80.

4.1.5. Analyses par grandes guildes trophiques

Les analyses présentées dans les paragraphes précédents ne permettent pas des suivis par espèce. En revanche, en se basant sur des données de littérature, il est possible d'estimer des paramètres pour catégoriser les observations acoustiques et distinguer plusieurs grandes guildes trophiques. Les données de littérature utilisées pour distinguer ces grandes guildes trophiques sont présentés en Tableau 11.

Tableau 11. Récapitulatifs des paramètres et valeurs associées utilisés pour caractériser les grandes guildes trophiques

Descripteur utilisé	Valeurs	Exemples d'espèces	Références
Comportement d'agrégation	Banc	Sardine, barracuda, maquereaux	(Brehmer <i>et al.</i> , 2006)
	Agrégation	Bogues, castagnoles	
	Cibles individuelles	Lieu jaune, bar	
Position dans la colonne d'eau	Benthique	Anguille, plie, flétan	(Brehmer <i>et al.</i> , 2006)
	Démersal	Anguille, dorade, tacaud, merlu	
	Pélagique	Hareng, sardine, anchois, maquereau	
Valeurs de S_v (dB)	[-80; -65[	Niveau trophique acoustique bas (plancton)	(Diogoul <i>et al.</i> , 2021)
	[-65; -30[	Niveau trophique acoustique moyen (poissons pélagiques)	
	> -30	Niveau acoustique haut (prédateurs supérieurs)	(Benoit-Bird et Lawson, 2016b)

A partir des données de littérature, des paramètres ont donc été choisis pour distinguer les grandes guildes trophiques et notamment la guildes « poissons pélagiques ». Ces grandes guildes trophiques se distinguent par :

- L'intensité acoustique (S_v) : d'après Diogoul *et al.* (2021), le plancton a une réponse acoustique variant de -80 et -65 dB, les poissons ont une réponse acoustique variant entre -65 et -30 dB et les top-prédateurs sont au-dessus de -30 dB (Benoit-Bird and Lawson, 2016b).
- Leur position dans la colonne d'eau : en première approximation, un paramétrage fixé au tiers inférieur de la colonne d'eau a été considéré pour distinguer les espèces pélagiques (70 % supérieurs de la colonne d'eau) des espèces benthopélagiques (30 % inférieurs de la colonne d'eau).
- Enfin des informations complémentaires concernant le niveau d'agrégation (banc, agrégation, cibles individuelles) ou la forme des bancs pourraient permettre d'affiner les types d'espèces au sein d'un groupe fonctionnel (Brehmer *et al.*, 2007).

Pour la guildes « poissons pélagiques », ces paramètres ont été appliqués après écho-intégration des données sur des cellules de 1m de haut sur 0,1 nmi de long sur l'ensemble des radiales réalisées. Ces cellules classifiées sont ensuite analysées pour connaître leur répartition spatiale selon les différents gradients et également pour suivre leur évolution temporelle. La carte présentée en Figure 29 présente la répartition des cellules classées « poissons pélagiques » lors de la campagne de Roscoff de Juin 2021. Pour faciliter la lecture, le nombre de cellules classées « poissons pélagiques » selon ces critères a été sommée sur l'ensemble de la colonne d'eau.

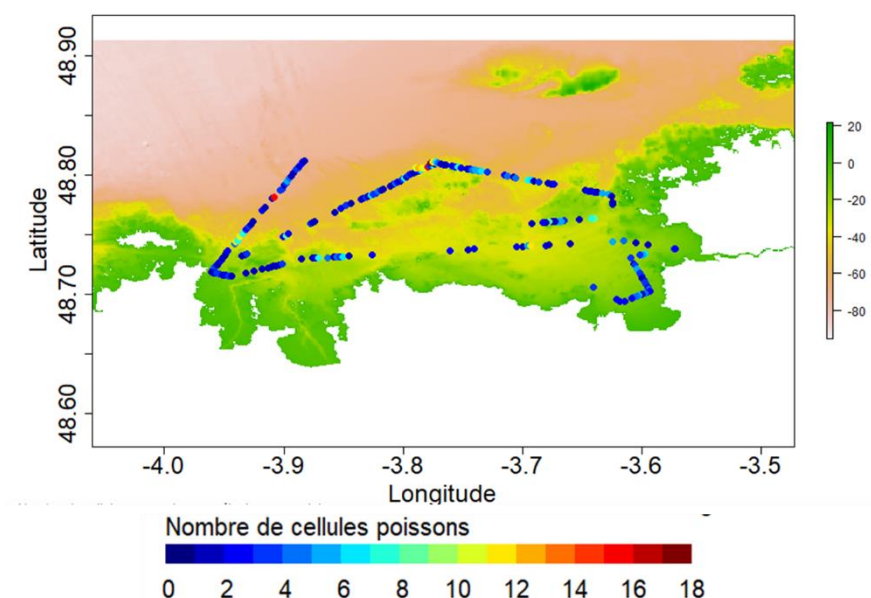


Figure 29. Cartographie lors de la campagne de Roscoff en Juin 2021 présentant le nombre de cellules classées « poissons pélagiques » dans la colonne d'eau de 0,1 nmi de long.

Pour éviter d'avoir un impact de la profondeur de la colonne d'eau et d'obtenir de plus grands nombres de cellules classifiées poissons au large, le nombre de cellules poissons est divisé par le nombre total de cellules de la colonne d'eau pour estimer un pourcentage de cellule « poissons pélagiques ». Cette représentation (Figure 30) permet de mettre en évidence des zones ultra-côtières où il y a un pourcentage élevé de cellules « poissons pélagiques ».

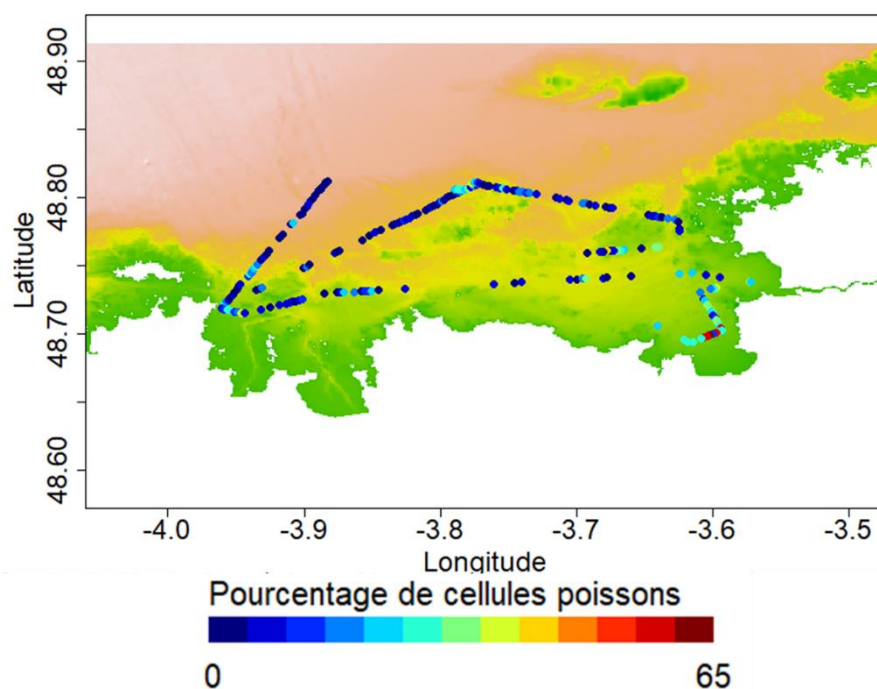


Figure 30. Cartographie lors de la campagne de Roscoff en Juin 2021 présentant le pourcentage de cellules classées « poissons pélagiques » dans la colonne d'eau de 0,1 nmi de long.

Il est ainsi possible de calculer le pourcentage respectif de la guildes « poissons pélagiques » et d'en faire un suivi long terme. Par exemple, la Figure 31 représente les pourcentages de cellules classées en « poissons pélagiques » en fonction du mois échantillonné en 2020 et 2021 dans la zone de Roscoff. Ce même résultat est présenté sous forme de cartes (Figure 32), ce qui permet de visualiser la répartition de ces cellules et leur variabilité spatiale.

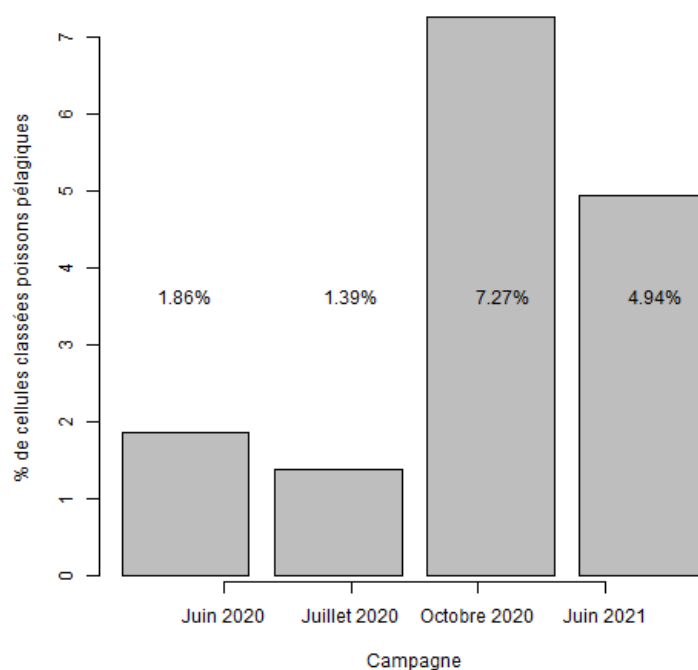


Figure 31. Pourcentage de cellules classées « poissons pélagiques » en fonction des mois échantillonnés dans la zone de Roscoff en 2020 et 2021.

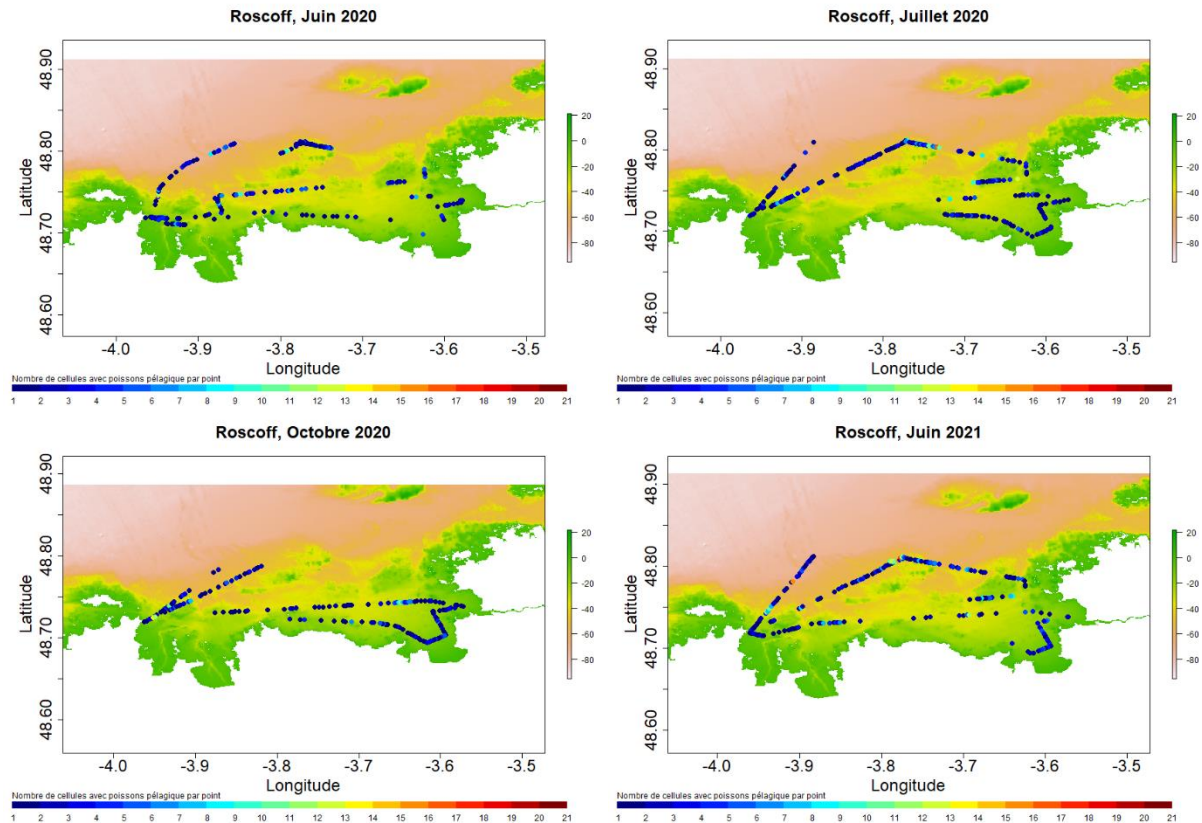


Figure 32. Répartition des cellules d'échointégration classifiées comme du poisson. Le nombre de cellules dans la colonne d'eau est symbolisé par la couleur du point (bleu = 1 cellule, rouge = 20 cellules par colonne d'eau).

Des analyses semblables pourraient être appliquées aux données de l'extraction de bancs et aux cibles individuelles. Ces guildes trophiques pourront de plus être affinées avec l'accumulation de données de vérité terrain et le travail avec d'autres dispositifs complémentaires. Par exemple, le M3 peut apporter des données cruciales quant au niveau d'agrégation et à la forme des bancs, pouvant aider à discriminer des groupes plus restreints d'espèces de poissons ayant des caractéristiques similaires. A noter que la modification des guildes pourra être effectuée de manière rétroactive, puisque les paramètres choisis sont appliqués aux données acoustiques extraites et permettra donc d'affiner les analyses déjà réalisées.

4.2. Résultats avec allocation spécifique

4.2.1. Pêches sur détection

La pêche sur détection à l'aide du chalut méso-pélagique s'est montrée efficace seulement en petits fonds. Des juvéniles de sprats (*Sprattus sprattus*), petits prêtres (*Atherina presbyter*), quelques bars (*Dicentrarchus labrax*), maquereaux communs (*Scomber scombrus*) et anchois (*Engraulis encrasicolus*) ont été pêchés, principalement dans la zone de Roscoff, notamment dans la rivière de Morlaix où la bathymétrie était inférieure à 15 m. A titre d'exemple, la Figure 33 présente l'histogramme des tailles des sprats pêchés lors des missions de juin et juillet 2020 dans la zone de Roscoff avec le chalut méso-pélagique. Ainsi, en juin 2020, 186 juvéniles ont été mesurés avec des tailles variant de 2,2 à 9,5 cm ($\mu = 4.1$ cm et $SD = 1.0$) et 316 juvéniles ont été mesurés en juillet 2020 avec des tailles variant de 2,8 à 8,9 cm ($\mu = 4.9$ cm et $SD = 0.6$).

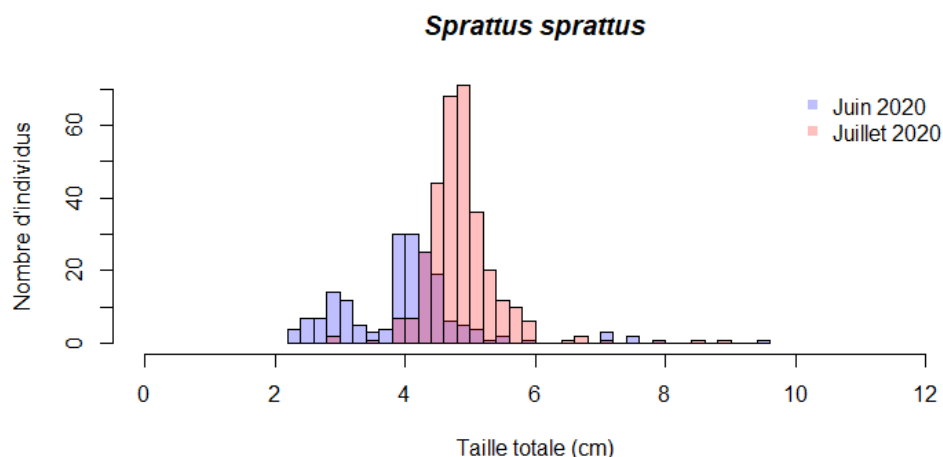


Figure 33. Histogramme des tailles des sprats (*Sprattus sprattus*) pêchés les 05/06/2020 et 06/07/2020 dans la rivière de Morlaix dans la zone de Roscoff à l'aide du chalut méso-pélagique ($n = 502$ individus mesurés).

D'autre part, la pêche à la ligne à main a permis de faire de l'allocation d'échotraces à des bancs de maquereaux communs (*Scomber scombrus*) en baie de Lannion et en baie de Douarnenez. Un total de 107 individus a été pêché avec des tailles variant 8,5 à 41,5 cm, ce qui met en évidence des cohortes différentes (Figure 34). D'autre part, les échotraces observées dans ces deux baies étaient similaires (en forme et en réponse acoustique) et les conditions environnementales étaient également similaires (bathymétrie comprise entre 10 et 20 m, fond composé de sable fin).

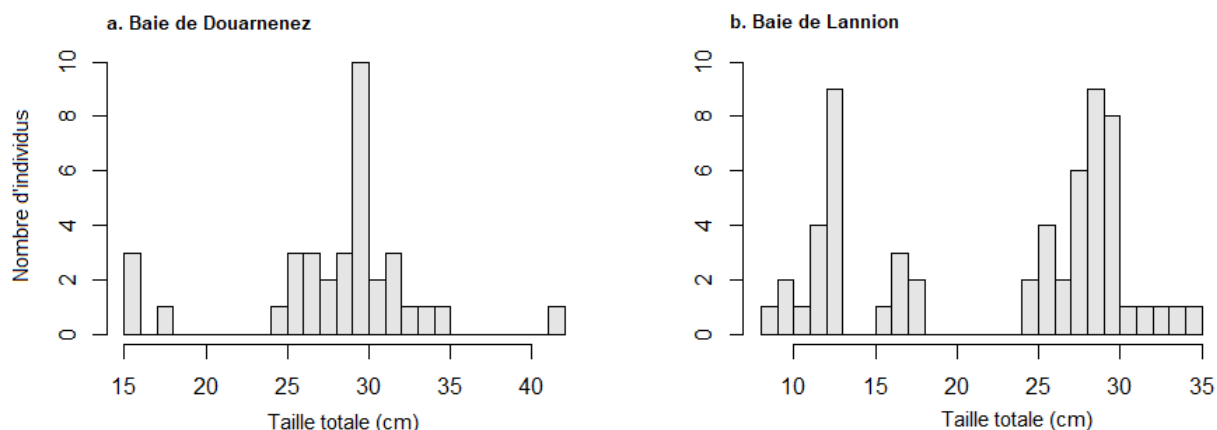


Figure 34. Histogramme des tailles des maquereaux communs (*Scomber scombrus*) pêchés en baie de Douarnenez (a) et baie de Lannion présente dans les alentours de Roscoff (b) respectivement en juin et juillet 2020 ($n = 35$ et 56 individus mesurés, respectivement).

Ainsi, au total pour la pêche sur détection, 6 bancs monospécifiques et 5 bancs plurispécifiques ont été identifiés. L'efficacité de cette méthode est faible puisque la pêche a été efficace seulement en petits fonds. De plus, la pêche sur détection reste invasive, par conséquent des méthodes telles que les observations par plongées ou vidéos pourraient représenter des méthodes à privilégier autant que possible pour la mise en place d'une surveillance long-terme.

4.2.2. Observations visuelles par des plongeurs

Les tests de couplage avec des observations visuelles faites par des plongeurs dans le Parc National des Calanques en août 2020 ont été concluants. En effet, le protocole consistant à avoir trois plongeurs à l'eau pour la méthode « plongée libre » a permis d'identifier spécifiquement 12 bancs monospécifiques

et 11 bancs plurispécifiques. La méthode « plongée tractée » a permis quant à elle l'identification de 37 bancs monospécifiques et 11 bancs plurispécifiques. De plus, différentes espèces ont pu être observées comme des castagnoles (*Chromis chromis*), des bogues (*Boops boops*), des barracudas (*Sphyraena viridensis*), des oblades (*Oblada melanura*), des saupes (*Sarpa salpa*), des mendoles (*Dentex dentex*), des sars communs (*Diplodus sargus*), des sars à têtes noires (*Diplodus vulgaris*), des picarels (*Spicara spp*) ainsi que des juvéniles d'athérines. Par exemple, la Figure 35 présente un banc de castagnoles vu simultanément par le sondeur EK80, le sonar M3 et par la caméra. L'identification a également été validée *de visu* par les plongeurs.

D'autres observations importantes pour l'exploitation et l'interprétation *a posteriori* des données acoustiques ont également pu être renseignées comme la nature des fonds. Ainsi, les zones d'herbiers semblent facilement détectables au sondeur.

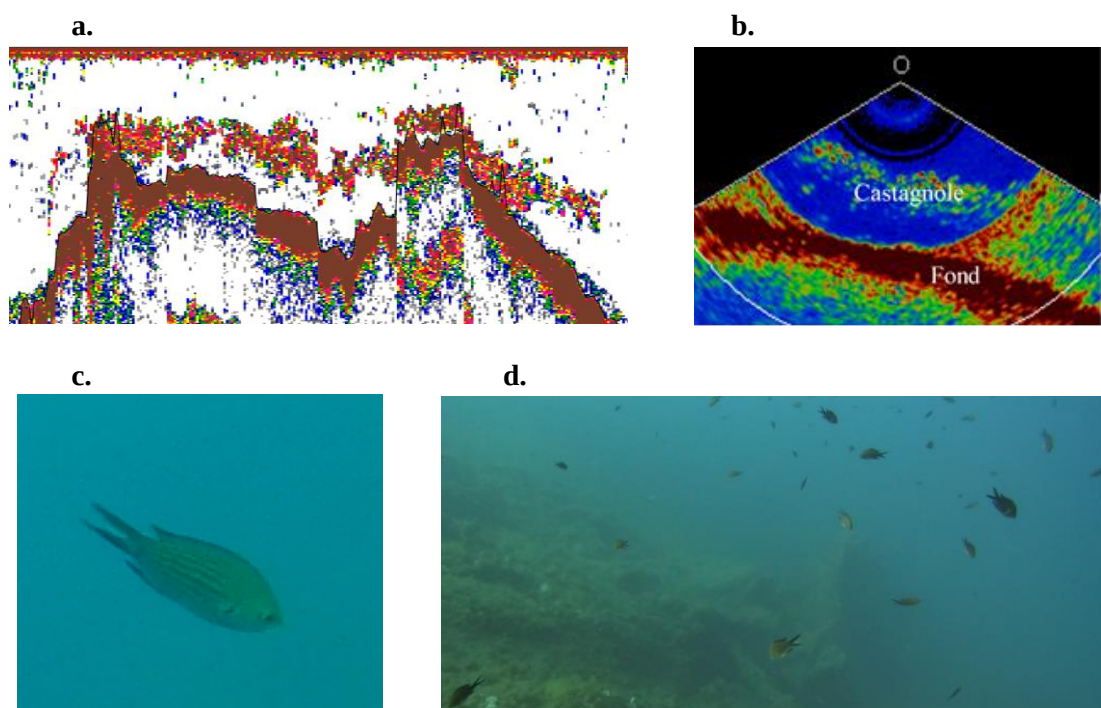


Figure 35. Allocation des espèces aux écho-traces du sondeur EK80 et sonar M3. Les figures 'a' et 'b' présentent les observations faites sur le sondeur EK80 et sonar M3 respectivement. Les figures c et d présentent respectivement des photographies d'un individu *Chromis chromis* et de l'ensemble de l'agrégation observée par le plongeur tracté.

4.2.3. Observations par vidéos

L'utilisation des caméras lors de la mission à Marseille dans le Parc National des Calanques où la visibilité de l'eau est généralement très bonne s'est montrée prometteuse. Ainsi, les poissons pélagiques ont pu être identifiés sur les vidéos et les résultats ont été comparés avec les identifications renseignées par les plongeurs. De plus, l'utilisation d'un système stéréoscopique permet de renseigner les tailles des individus, ce qui est une information cruciale pour les calculs de biomasse. Les tailles individuelles d'un banc de bogues (*Boops boops*) estimées par le système stéréoscopique ont été comparées à celles estimées par les plongeurs (Figure 36). Le système stéréoscopique permet d'obtenir des mesures précises des individus et d'observer la distribution des tailles alors que les plongeurs ne peuvent fournir que des intervalles de tailles. De plus, l'utilisation d'un système stéréoscopique évite un possible effet observateur. Cela évite également de devoir travailler uniquement avec des plongeurs ayant reçu une formation et un entraînement pour estimer correctement les tailles des individus. Enfin, ces résultats

montrent l'intérêt d'utiliser un système stéréoscopique pour identifier, dénombrer et mesurer des individus.

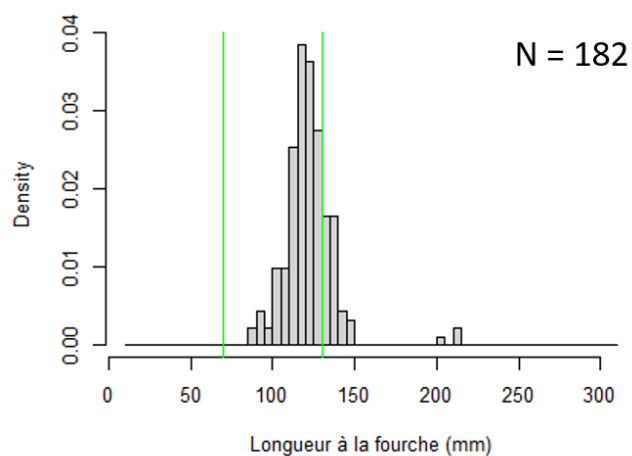


Figure 36. Histogramme des tailles individuelles d'un banc de bogues (*Boops boops*) mesurées par le logiciel SeaGIS suite à l'acquisition vidéo grâce au système stéréoscopique. Les lignes vertes représentent les limites inférieures et supérieures de tailles estimées par les plongeurs.

Le dispositif ACaPELA a par la suite réalisé une nouvelle mission en avril 2021 sur le même site que la mission précédente. Elle avait pour but de valider certains points soulevés et consolider les acquis. Lors de cette mission, le *Hammerhead*, instrument remorqué et télécommandé, devait être équipé du système stéréoscopique construit par ACaPELA. Le test du *Hammerhead* dans le Parc National des Calanques lors de la mission en avril 2021 a été néanmoins annulé à cause du fait que l'expérimentateur était cas contact au COVID-19. En revanche, à l'occasion de cette mission, la planche de plongée tractée a été équipée du système vidéo stéréoscopique pour tester ce nouveau prototype en tracté. Les visionnages des vidéos issues de la mission d'avril 2021 montrent que le positionnement des caméras doit probablement être adapté à la méthode tractée mais la méthode semble prometteuse.

Pour ces raisons, nous avons souhaité tester le *Hammerhead* lors de la mission à Roscoff en juin 2021. Ce test était d'autant plus intéressant qu'il n'était pas certain d'avoir une bonne visibilité en Bretagne. Le *Hammerhead* a donc été équipé du système stéréoscopique. Les résultats sont prometteurs puisque 8 bancs de sprat (*Sprattus sprattus*) ont pu être identifiés. Cet appareil a également été mis en œuvre en baie de Douarnenez, en juillet 2021. Cela a permis de valider l'utilisation de cet appareil sur un autre navire mais aucun banc n'a été vu lors de cette campagne, que ce soit à l'acoustique ou via les caméras. Les pêcheurs locaux ont effectivement confirmé qu'il n'y avait que peu de poissons à ce moment-là dans la baie. Ce test n'a donc pas permis d'avancer sur le test de l'efficacité de cette méthode pour l'allocation spécifique. Ce temps a néanmoins été mis à profit pour valider la manœuvrabilité du *Hammerhead* équipé d'un nouveau système stéréoscopique et compléter le protocole de mise en œuvre de ce matériel prometteur. Une autre mission début juin 2022 à Roscoff a été réalisée pour valider l'efficacité de ce protocole. Des observations de bancs de poissons ont également été faites, néanmoins il est nécessaire d'analyser plus longuement ces vidéos pour conclure sur le nombre de bancs observés.

En résumé, plusieurs méthodes d'allocation d'espèce ont été testées. En Bretagne, nous avons ainsi pu identifier plusieurs bancs monospécifiques de maquereaux et sprats en juin et juillet 2020 et juin 2021 (Figure 37a). De même, un grand nombre d'espèces a été observé dans le parc National des Calanques en août 2020 et avril 2021 (Figure 37b). Le jeu de données d'allocation d'espèces sera complété au fur et mesure des missions réalisées afin d'acquérir un nombre suffisant de répliques

indépendants dans le temps et dans l'espace, et ainsi obtenir la variabilité des signatures acoustiques spécifiques.

Parmi les méthodes de vérité terrain testées, la méthode basée sur le *Hammerhead* équipé du système stéréoscopique apparaît la plus prometteuse pour un déploiement national à large échelle. C'est une méthode relativement simple à mettre en œuvre et non-invasive (Tableau 12). Son efficacité est évidemment limitée dans les eaux très turbides mais les tests réalisés à Roscoff en juin 2021 dans des conditions de visibilité moyennes (inférieures à 5 m) étaient suffisantes pour observer les espèces, et très probablement dénombrer les individus et estimer les tailles individuelles (analyses en cours). Cependant, si l'utilisation de cette méthode devait être généralisée, il serait nécessaire d'utiliser des méthodes d'intelligence artificielle comme le *deep learning* pour créer des algorithmes qui permettent d'automatiser l'identification des espèces (Salman *et al.*, 2020) ou la détection d'individus pour la mesure.

Tableau 12. Résumé des différentes méthodes d'allocation testées (nombre de vérités terrains obtenus, zone pour laquelle on a eu des vérités terrain, avantages et inconvénients des méthodes).

Méthodes testées	Espèces (en banc monospécifique)	Nombre répliquats indépendants	Localisation	Date	Avantages	Inconvénients
Pêche	Sprats Maquereaux communs	3 3	Roscoff, Douarnenez	Juin et juillet 2020	Utilisable avec une visibilité réduite Faible temps de post-traitement	Invasif Déploiement plus ou moins facile selon le navire Sélectivité : moyenne à forte
Plongée	Bogues Castagnoles <i>Atherina</i> spp. Mendoles Saupes Oblades <i>Spicara</i> spp. Sars Barracudas	35 33 20 10 2 2 2 1 1	Parc National des Calanques	Août 2020 et avril 2021	Faible temps de post-traitement Faible sélectivité faible Méthode non invasive	Plus difficile à déployer Besoin de plongeurs experts Utilisable avec seulement une bonne visibilité Non envisageable en routine
<i>Hammerhead</i> et vidéos	Sprats	8	Roscoff	Juin 2021	Faible sélectivité Méthode non invasive Profondeur modulable pendant le déploiement	Cout d'acquisition Long temps de post-traitement Reconnaissance sur vidéos des espèces plus difficile qu'en plongée

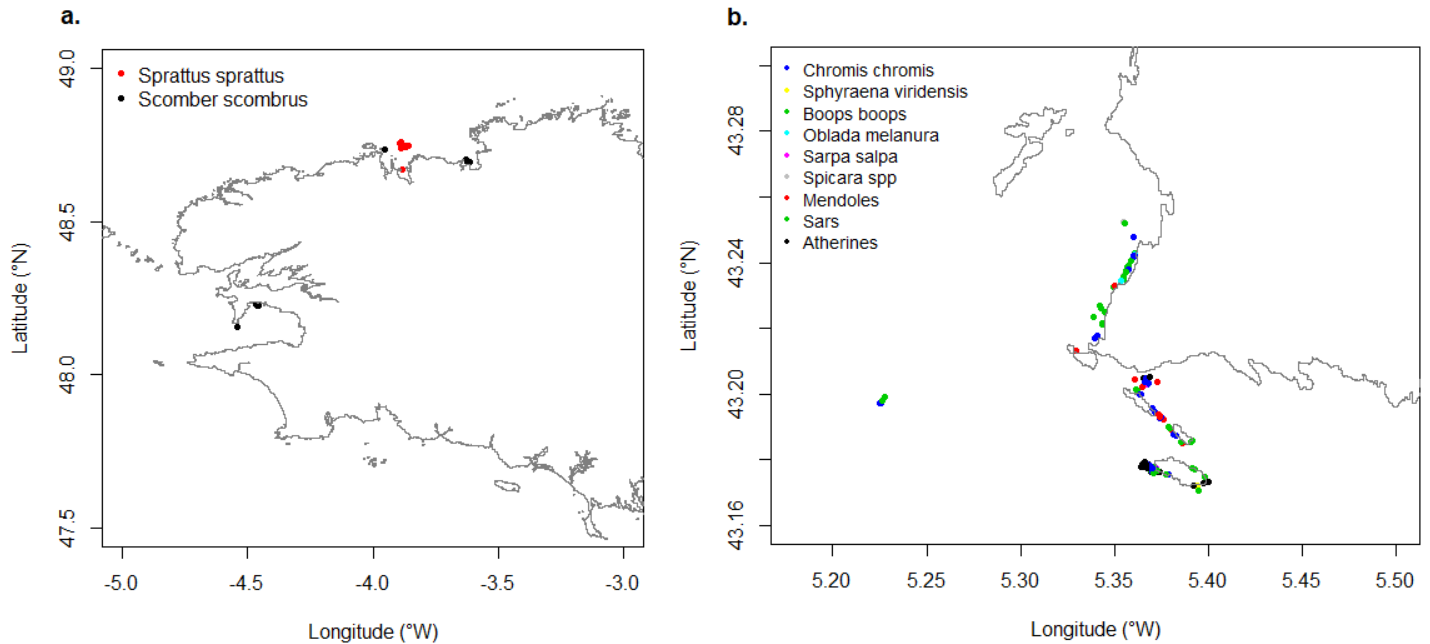


Figure 37. Localisation des bancs de poissons pélagiques observés en Bretagne (a) et dans le Parc National des Calanques (b) lors des missions en 2020 et 2021. La couleur des points est dépendante de l'espèce. Seules les espèces ayant été observées lors des vérités terrain ont été représentées ici.

4.2.4. Modèles d'allocations d'espèce

A partir des couples de données acoustiques et « vérités terrain » issues des deux missions réalisées dans le Parc National des Calanques (2020 et 2021), un jeu de données a été constitué. Celui-ci est composé de 35 agrégations de bogues (*Boops boops*), 33 agrégations de castagnoles (*Chromis chromis*), 10 agrégations de mendoles (*Spicara maena*) et 20 bancs de juvéniles d'athérines. Pour chacune de ces agrégations ou bancs, l'utilisation complémentaire des deux outils acoustiques a permis d'obtenir un total de 49 variables acoustiques permettant une description complète de ces bancs et agrégations. A titre d'exemple, la Figure 38 présente la structure 3D d'une partie des bancs et agrégations, pour lesquels l'espèce est connue, classés par ordre croissant par rapport à la variable descriptive : indice de sphéricité. La sphéricité est une mesure du degré auquel une forme se rapproche de la forme d'une sphère. Plus généralement, un important travail a été mené pour avoir le plus de variables descriptives possibles de ces bancs et agrégation provenant à la fois de l'EK80 et du M3 afin de pouvoir discriminer au mieux les groupes d'espèces en se basant sur l'exploitation de ces variables.

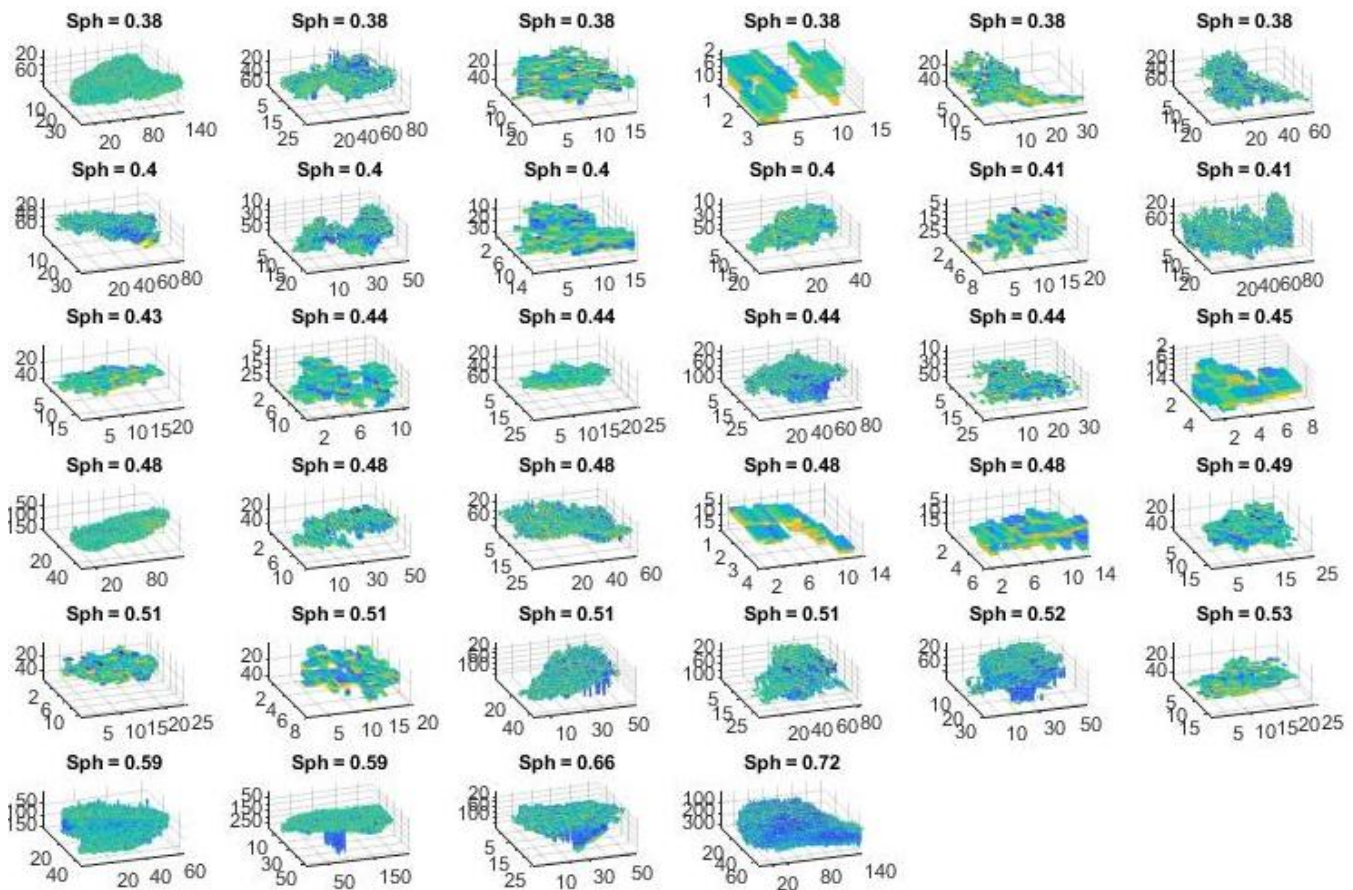


Figure 38. Classement (d'une partie) des bancs et agrégations, pour lesquels l'espèce est connue, selon l'indice de sphéricité calculé à partir du sonar M3. La structure 3D est présentée pour chacun de ces bancs et agrégations et l'indice de sphéricité est indiqué en haut de chaque figure.

L'analyse du jeu de donnée obtenu a permis de développer des modèles pour l'allocation d'espèces en utilisant des Analyses Discriminantes Linéaires (LDA). Une première LDA montre une très bonne discrimination de toutes les espèces, et notamment les trois espèces vivant en agrégation et très proches au niveau de la biologie et de l'écologie (bogues, catagnoles et mendoles) (Figure 39). La précision du modèle a été estimée à 87,6 %. En particulier, la précision serait de 100 %, 78,2 %, 82,7 % et 89,5 % pour *Atherina* spp., *B. boops*, *C. chromis* et *S. maena* respectivement. Ce sont principalement les variables correspondant aux coefficients de variation de l'énergie acoustique (S_v aux fréquences 70, 120 et 200 kHz), ainsi que des variables concernant la forme des bancs (indices de sphéricité, élongations, etc.) qui ont permis cette discrimination (Figure 40).

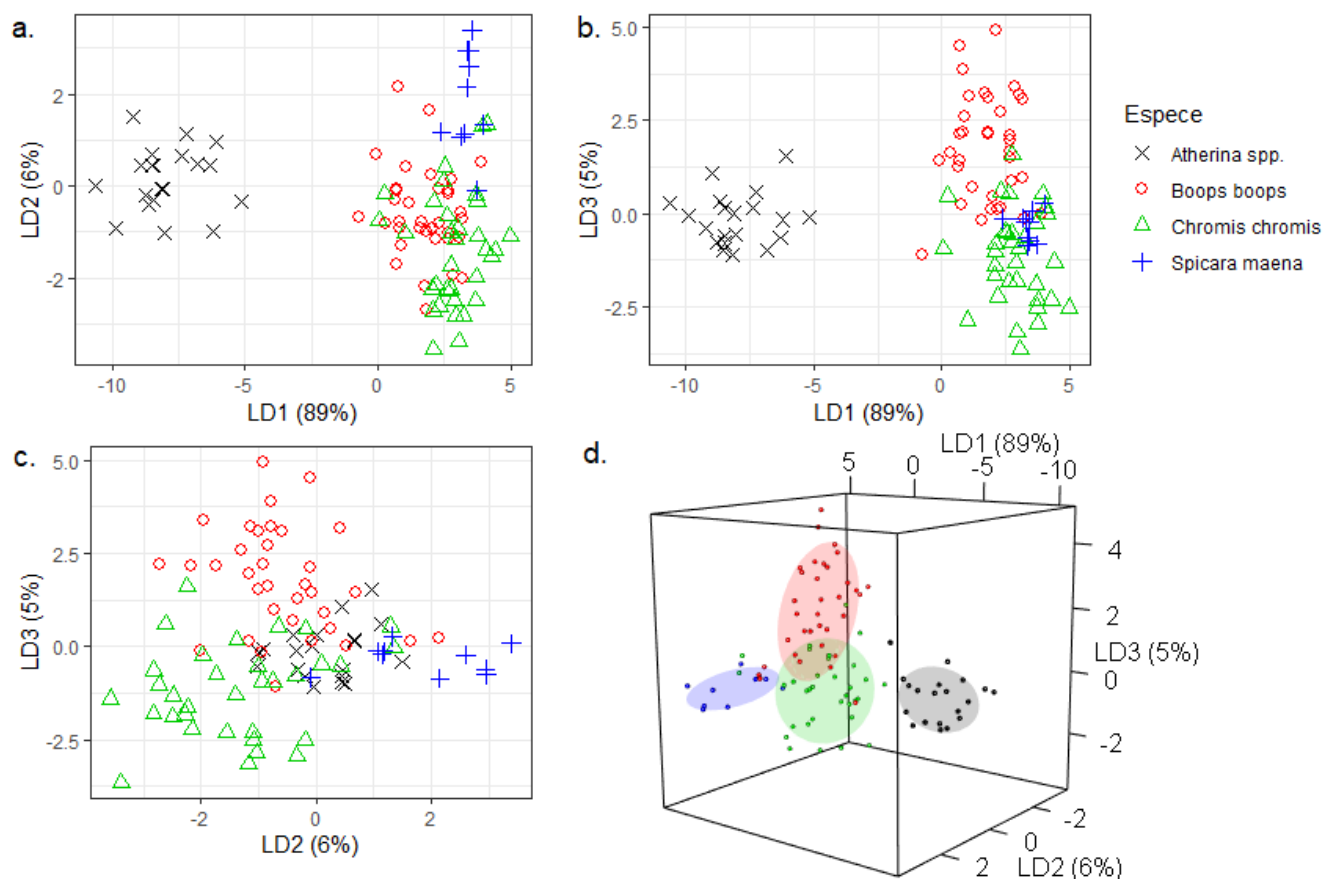


Figure 39. Représentations graphiques de l'Analyse Discriminante Linéaire (LDA) pour la classification des différentes espèces de poissons (a) Plan LD1-LD2, (b) Plan LD2-LD3, (c) Plan LD1-LD3 et (d) représentation en 3D.

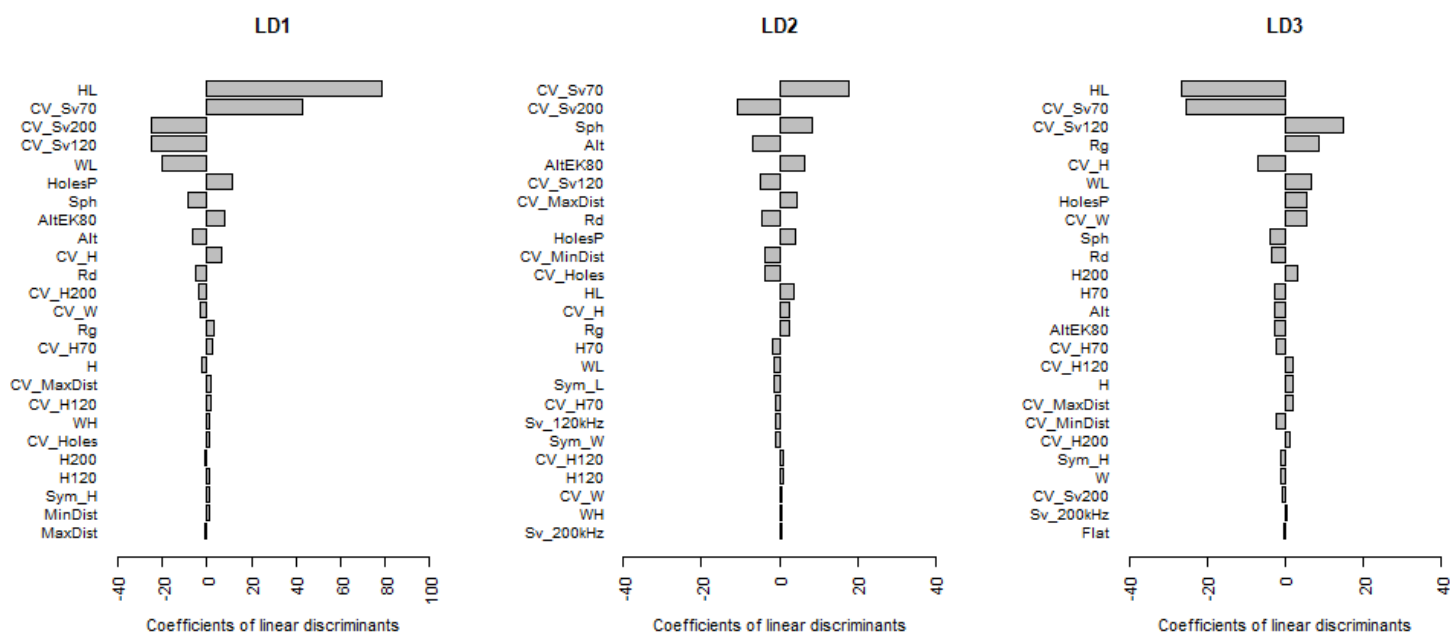


Figure 40. Influence des variables sur les différentes fonctions discriminantes de la LDA.

De plus, nous avons montré que pour obtenir une bonne discrimination de ces espèces, il est nécessaire de coupler les variables issues de l'EK80 et du M3 puisque des modèles LDA utilisant seulement les variables que d'un seul outil acoustique (EK80 ou M3) permettait une moins bonne discrimination (78,7 et 77,0% respectivement).

Ainsi, ces **modèles LDA permettent une discrimination des espèces**. En utilisant ces modèles sur d'autres données provenant des transects réalisés dans le Parc National des Calanques pour lesquelles nous n'avons pas de vérité terrain, il est donc possible de prédire l'espèce (Figure 41). L'objectif étant de réattribuer statistiquement une espèce à un banc échosondé pour lequel il n'y avait pas eu de vérités terrain, mais qui est caractérisé par des variables acoustiques dont les valeurs sont proches de celles acquises pour les espèces avec allocation spécifique. L'utilisation des prédictions du modèle peut permettre d'analyser la distribution des espèces dans les aires marines protégées (ici, le Parc National des Calanques), et notamment dans les zones de protection fortes appelées zones de non prélèvements (entourées de lignes grises sur la Figure 41). D'après la figure, on observe que les bancs et agrégations avec les plus forts volumes se trouvent dans des zones proches des îles, et notamment proches de l'île Riou. Le volume des bancs et agrégations étant positivement corrélé à l'abondance, cela signifie que ces zones présentent des fortes densités d'athérines, bogues et castagnoles.

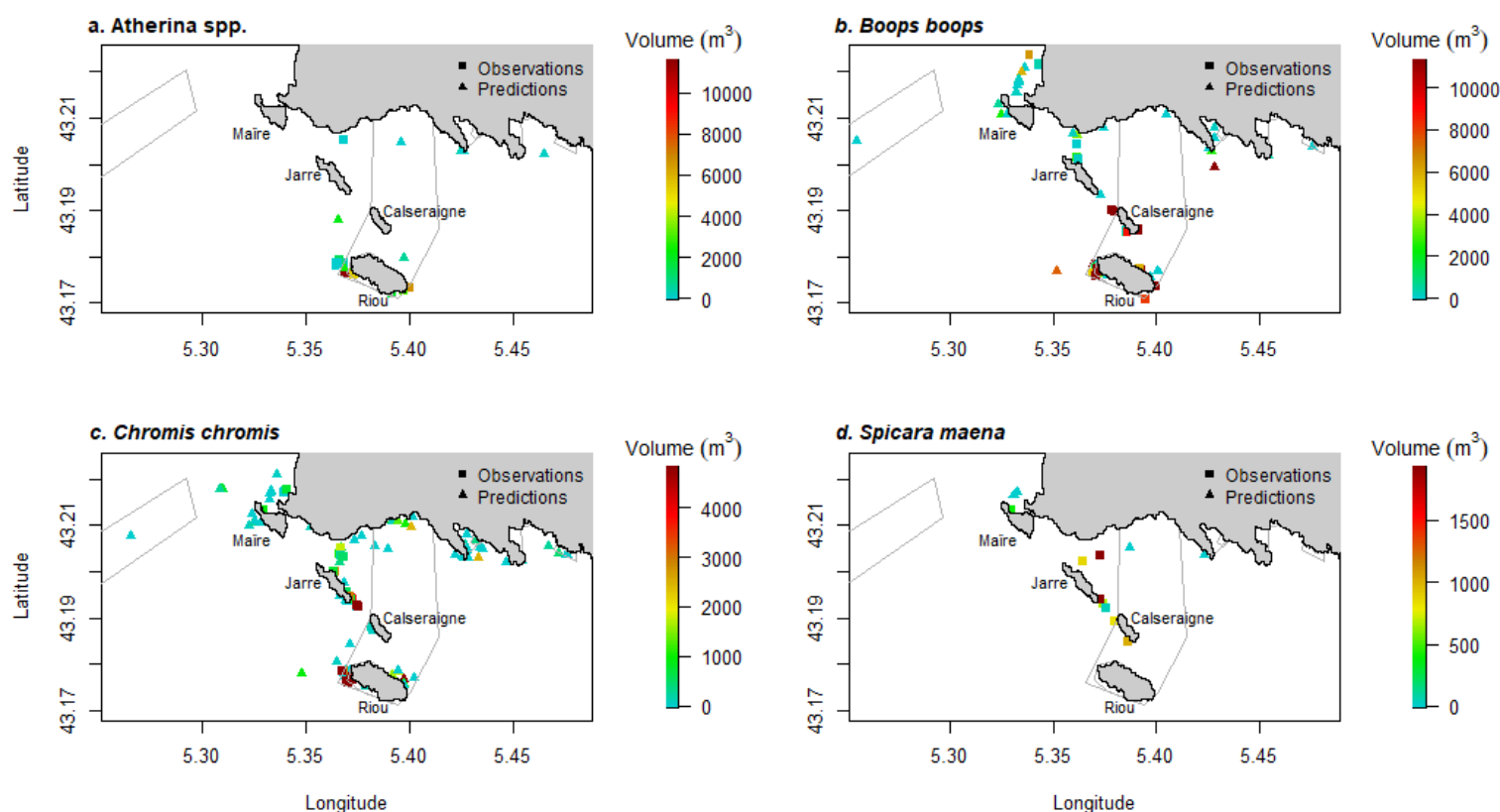


Figure 41. Prédiction des bancs et agrégations d'Athérines (a), bogues (b) castagnoles (c) et mendoles (d) le long des transects réalisés dans le Parc National des Calanques en avril 2021 sans vérité terrain. Les lignes grises représentent les zones de non prélèvement.

4.3. Résultats complémentaires sur les paramètres environnementaux des sites étudiés

En complément de l'analyse des données acoustiques, de nombreuses données ont été récoltées pendant les missions par les stations CTD. Des analyses statistiques ont ensuite été réalisées pour comparer les profils de température, salinité et oxygène dissous en fonction des sites échantillonnés, du

gradient côte-large ainsi qu'en fonction de la saison. En effet, toutes ces variables environnementales sont importantes à suivre pour bien comprendre la répartition et la variabilité spatio-temporelles des espèces de poissons pélagiques. L'analyse de ces données CTD a fait l'objet du stage de M1 de Helloïse Oulia effectué d'avril à juin 2021 (Oulia, 2021).

Les résultats ont montré que les zones étudiées sont très hétérogènes. La mer Méditerranée présente les niveaux de températures et salinité observés les plus élevés. Ceci est dû à sa position sur le gradient latitudinal et sa spécificité de mer semi-fermée. D'autre part, au sein d'un même site, les profils CTD ont mis en évidence des hétérogénéités spatiales et temporelles. Par exemple, les profils CTD sont plus hétérogènes dans la rade de Brest en comparaison à la mer d'Iroise car la rade de Brest est peu agitée, ce qui favorise la mise en place de structures telles que la thermocline et l'halocline avec des zones très variées, certaines soumises à l'influence d'estuaires (Aulne et Elorn) et d'autres davantage influencées par les eaux du large. La mer d'Iroise est davantage brassée par les vents et les courants, ce qui homogénéise la colonne d'eau et ne permet pas de disparités entre les stations.

Les profils verticaux montrent aussi une variation saisonnière des paramètres physico-chimiques comme des températures plus élevées en été qu'en hiver ou une salinité moins élevée en hiver qu'en été. L'analyse des profils CTD lors des différentes campagnes a également permis de mettre en évidence des fortes variations de température au cours des saisons pour les sites de Brest et Douarnenez ainsi que Marseille. Les ACP (Analyse en Composante Principale) permettent de montrer quels sont les paramètres qui évoluent au cours des saisons (Figure 42). Ces ACP montrent également des structures très variables en fonction des saisons avec des ellipses de confiance (95 %) qui ne se recoupent pas ou très peu. Il existe également des différences entre la surface et le fond. En effet, les eaux de la surface sont plus sensibles aux variations météorologiques ou saisonnières, notamment dans les écosystèmes côtiers à cause des faibles profondeurs (Abboud-Abi Saab *et al.*, 2004). Les paramètres physico-chimiques jouent un rôle important dans la structuration de la colonne d'eau, notamment la température et la salinité (Pujoni *et al.*, 2019).

Il existe ainsi une différence de structuration de la colonne d'eau en fonction des sites étudiées et des saisons. Les profils verticaux ont montré qu'il y avait globalement une homogénéité entre les stations au large et une hétérogénéité entre les stations côtières. Cette différence est principalement due aux influences fluviales dans les milieux côtiers. Au large, les courants sont assez forts pour brasser la masse d'eau et créer une homogénéité.

Les données issues des stations CTD ont tout d'abord été intégrées en tant que paramètre physique à intégrer dans les données brutes (célérité du son dans l'eau). Les données seront également intégrées à l'analyse des métriques acoustique. D'une part ces données seront croisées avec les préférences (thermiques notamment mais également d'oxygène et de salinité) des espèces potentiellement présentes afin d'en réduire la liste. D'autre part, ces données pourront être intégrés dans les modèles de répartition spatio-temporelle des PCs afin d'en améliorer la robustesse.

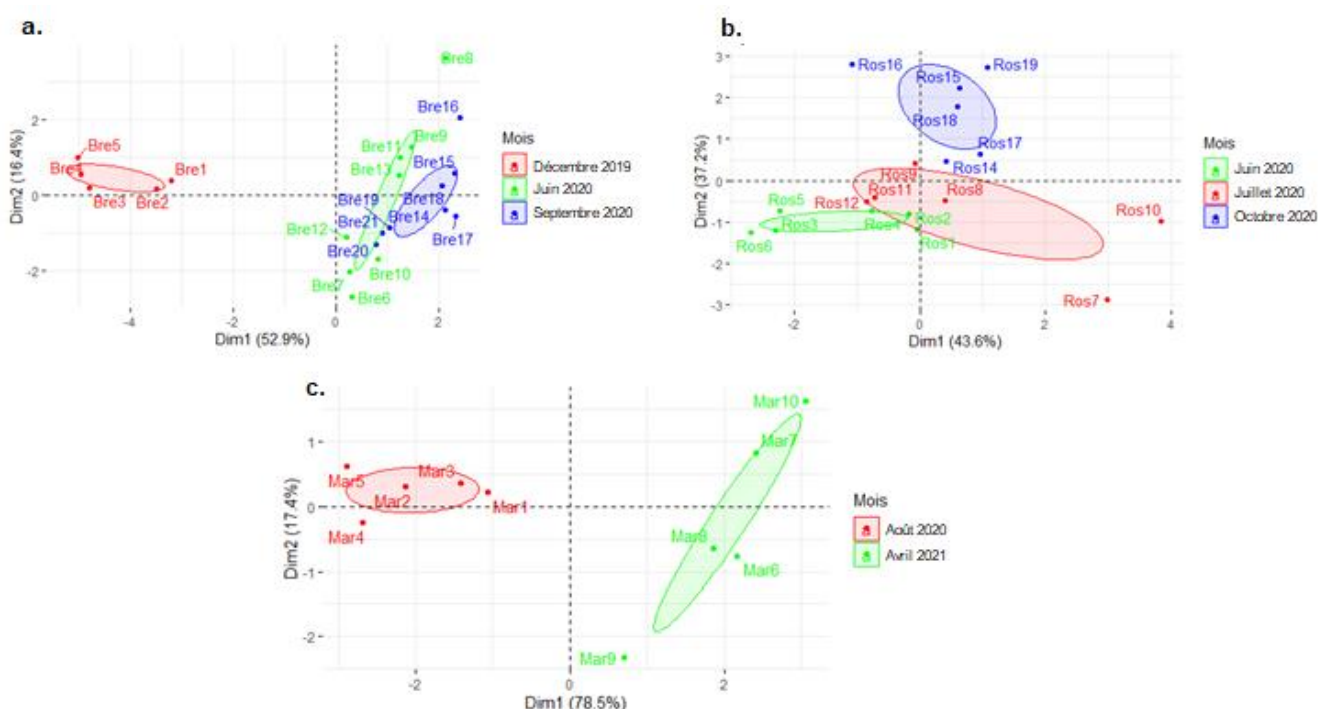


Figure 42. ACP des stations CTD permettant de mettre en évidence les variabilités saisonnières pour les sites de (a) Brest (b) Roscoff et (c) Marseille. Les ellipses présentées sont des ellipses de confiance à 95%. Toutes les stations pour une même zone (Brest, Roscoff ou Marseille) sont numérotées et les couleurs sur les figures dépendent des missions effectuées à un mois différent comme renseigné dans les légendes.

4.4. Evaluation de l'impact anthropique

4.4.1.1. Analyse d'un effet réserve à partir des variables acoustiques

L'utilisation de notre méthodologie basée sur les informations acoustiques peut également permettre de comparer l'état écologique des poissons pélagiques dans des zones protégées et hors de ces zones. Ainsi, lors de la mission dans le Parc National des Calanques, des échantillonnages ont été réalisés dans et hors d'une ZNP (Figure 43). Pour cela, 4 radiales ont été faites dans la ZNP, 4 radiales à l'ouest de la ZNP et 4 radiales à l'est de la ZNP.

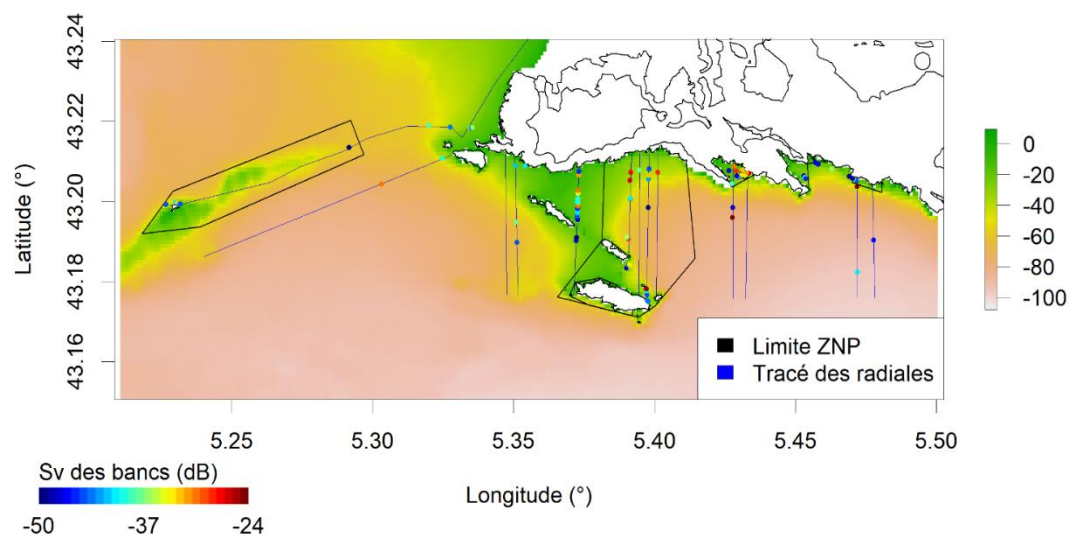


Figure 43. Visualisation des bancs extrait à 120 kHz le long des radiales côte-large effectuées dans la ZNP (entourée par les traits noirs) et hors ZNP. Les radiales sont tracées en bleu et les points représentent les bancs extraits, la couleur variant en fonction du S_v des bancs.

Les analyses (Figure 44) mettent en exergue une réelle différence entre les bancs observés au cœur de la ZNP et en dehors. En effet, des différences significatives pour le S_v moyen sont observées dans les ZNP en comparaison à la zone hors ZNP. Cette plus forte valeur de S_v pourrait résulter d'une augmentation de l'abondance, une diminution de la distance inter-individuelle ou à des compositions spécifiques différentes. Cependant, ces résultats restent à être interprétés dans leur contexte global, en tenant compte d'autres paramètres tels que la bathymétrie, la nature du fond ou encore la présence d'autres pressions anthropiques. Des analyses complémentaires seront également menées sur les cibles (poissons) individuelles qui sont potentiellement impactées par la mise en place de la ZNP, de manière similaire ou différentes des bancs. Ces cibles individuelles ne sont en effet pas prises en compte dans l'extraction de bancs du fait de leur comportement solitaire. Ce comportement peut être temporaire ou propre à certaines espèces (Molloy, McLean et Côté 2009).

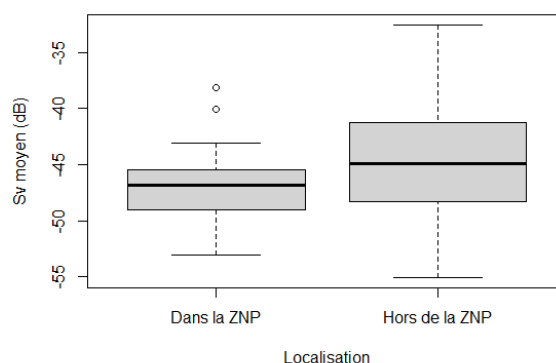


Figure 44. Boxplots présentant les différences entre les bancs échantillonnés dans la zone de non prélèvement (ZNP) et en-dehors pour le S_v moyen à l'EK80 à 120 kHz.

Il est également possible de comparer les données acoustiques hors et dans les ZNP pour lesquelles des vérités terrains ont été obtenues. Ainsi, les volumes des bancs d'athérines et des agrégations de bogues et de castagnoles étaient significativement plus importants dans la ZNP que hors ZNP (Figure 45). Sachant que l'abondance est significativement corrélée au volume des bancs, cela démontre que ces espèces forment des bancs et agrégations de plus grande abondance dans les ZNP qu'en dehors des ZNP.

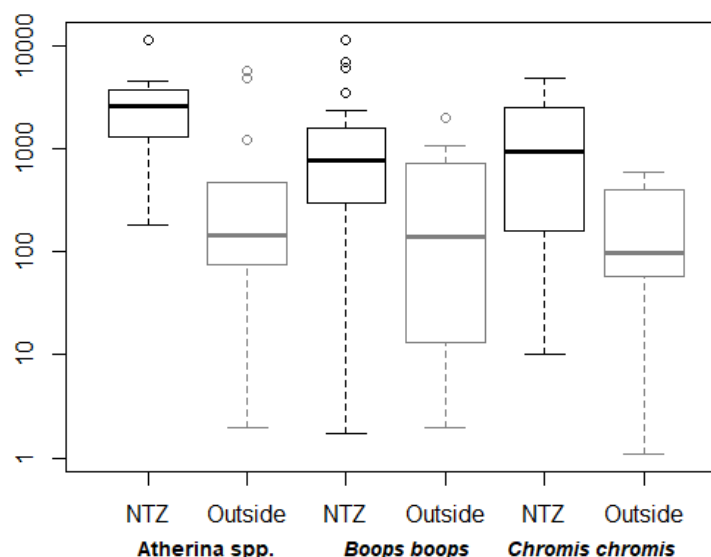


Figure 45. Boxplots présentant les volumes (m^3) des bancs échantillonnés par le sonar M3 pour les athérines, les bogues et les castagnoles observés dans la zone de non prélèvement (no-take zones NTZ) et en-dehors par les plongeurs en août 2020 et avril 2021.

Ces résultats suggèrent qu'il pourrait y avoir un effet « réserve » des ZNP. Cependant, des analyses complémentaires sont nécessaires pour bien évaluer l'influence de la ZNP sur la distribution et l'abondance des espèces, indépendamment des caractéristiques de l'habitat ou de la bathymétrie qui peuvent être différentes au sein de la ZNP et en dehors. En effet, les ZNP sont généralement localisées dans des habitats favorables. Ainsi, des analyses de l'abondance des espèces prenant en compte un effet localisation spatiale dans ZNP (présence ou non) et les caractéristiques de l'habitat (nature du fond, topographie) en co-variables sont nécessaires pour conclure sur cet effet « réserve ».

4.4.1.2. Modélisation des impacts anthropiques sur la distribution des poissons

Il existe à ce jour plusieurs types de modèles permettant de simuler les dynamiques de distribution spatiale des populations, ces modèles pouvant être classés en fonction de leur complexité, de leur niveau de détails et du degré auquel l'objet modélisé est représenté (Adams, 2002). Les modèles mécanistiques de type individu-centré (IBM) sont les modèles les plus complexes et permettant un niveau de détails le plus élevé. Ce type de modèle est de plus en plus utilisé en écologie (DeAngelis and Grimm, 2014) et est particulièrement adapté à l'analyse spatiale des espèces mobiles telles que les poissons pélagiques. Chaque agent ou individu est modélisé explicitement comme une entité autonome pouvant réaliser différentes actions qui leur sont propres. La simulation de ces agents va conduire à modéliser une dynamique de population globale, celle-ci n'étant ainsi pas explicitement formulée mais émergeant des interactions entre les agents et leur environnement (Grimm and Railsback, 2005).

Les IBMs peuvent prendre en compte les facteurs environnementaux et anthropiques pour simuler les populations. Pour cela, il est nécessaire d'avoir à disposition des données sur ces facteurs :

- données physico-chimiques température, salinité, pH, conductivité, oxygène dissous, chlorophylle a. Pour cela, les données obtenues lors des stations CTD sont disponibles mais des cartes peuvent être également obtenues sur internet (sites Copernicus et OceanColor par exemple). D'autres données environnementales pourraient être également intéressantes à obtenir telles que la turbidité de l'eau.

- données sur la bathymétrie, la distance à la côte et la nature de fond. Une bathymétrie précise validée par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) est à disposition. Le SHOM met également à disposition des cartes d'habitat marins. Les données d'habitat issues du projet

life MarHa serait également intéressantes à obtenir. Enfin, pour les missions dans le Parc National des Calanques, une carte précise présentant la nature des fonds et habitats est disponible sur le site web MEDTRIX.

- données sur les pressions anthropiques (pêche, utilisation des habitats, eutrophisation, contamination, etc.). Pour cela, les cartes fournies par le projet Carpediem (Quemmerais-Amice, 2018) sont désormais disponibles. Ce projet a notamment pour objectif de produire des cartes de synthèse et cumul des activités humaines et pressions.

Une version préliminaire d'un IBM spatialisé a été développée (Figure 46) pour analyser les données issues des missions faites dans le Parc National des Calanques. Ce modèle a été développé sous NetLogo (version 6.0.4) qui est un logiciel spécifique au développement de modèle individu-centré. L'objectif de cet IBM est de permettre une meilleure compréhension de l'impact des ZNP sur la répartition des bancs de poissons pélagiques présents dans le Parc National des Calanques. Pour cela, les espèces de poissons considérées sont toutes celles formant des bancs ou agrégations et observables dans la colonne d'eau par acoustique active. Les variables environnementales et anthropiques prises en compte dans le modèle sont la bathymétrie (données du SHOM), les données d'habitats (données MEDTRIX) et la localisation des ZNP dans le Parc National des Calanques. En particulier pour les données d'habitats, nous avons une cartographie précise des herbiers *Posidonia oceanica*, la matte morte, des coralligènes, des habitats artificiels, des biocénoses d'algues infralittorales, de galets infralittoraux et roches larges, des fonds meubles infralittoraux et circalittoraux ainsi que de la zone bathyale.

Ainsi, dans l'IBM, les agents sont les bancs de poissons pélagiques qui peuvent se déplacer et interagir avec leur environnement. L'environnement est modélisé par « patches » possédant plusieurs attributs : présence de terre ou mer, bathymétrie, type d'habitat, présence/absence de ZNP.

Lors de l'initialisation du modèle, les bancs de poissons sont répartis aléatoirement dans la mer. Ensuite, à chaque pas de temps du modèle, les bancs de poissons peuvent se déplacer dans la mer. Pour cela, ils cherchent à optimiser leur répartition dans le Parc National des Calanques, et se dirigent vers les zones de bathymétrie faible représentant de potentielles zones attractives quant aux conditions environnementales (Charton *et al.*, 2000; Moustakas and Silvert, 2006; Lamouret *et al.*, 2020) et continuent de chercher tant qu'ils n'en trouvent pas. Lorsqu'ils trouvent un habitat favorable, les individus peuvent choisir de rester dans cette zone, ce qui est représenté par la probabilité (variable *leave_hab*) dans le modèle. Si cet habitat favorable est de plus situé en ZNP, ils peuvent choisir de rester ou de partir de cette zone en fonction de la probabilité de partir (variable *leave_hab_ZNP*).

Le modèle est donc stochastique puisque qu'il prend en compte des processus aléatoires de déplacement des agents dans l'environnement et il contient quatre paramètres : le nombre d'individus dans l'environnement (NF.0), le seuil de bathymétrie pour la recherche d'un milieu favorable (*bath_fish*), la probabilité de partir d'un habitat favorable (*leave_hab*) et celle de partir d'une ZNP (*leave_hab_ZNP*). Enfin, les variables de sortie du modèle sont le nombre de bancs de poissons dans la ZNP et hors ZNP présents le long des radiales effectuées lors des missions dans le parc. Ces variables sont calculées après 200 itérations du modèle afin d'atteindre l'état d'équilibre pour la répartition des bancs de poissons dans l'environnement.

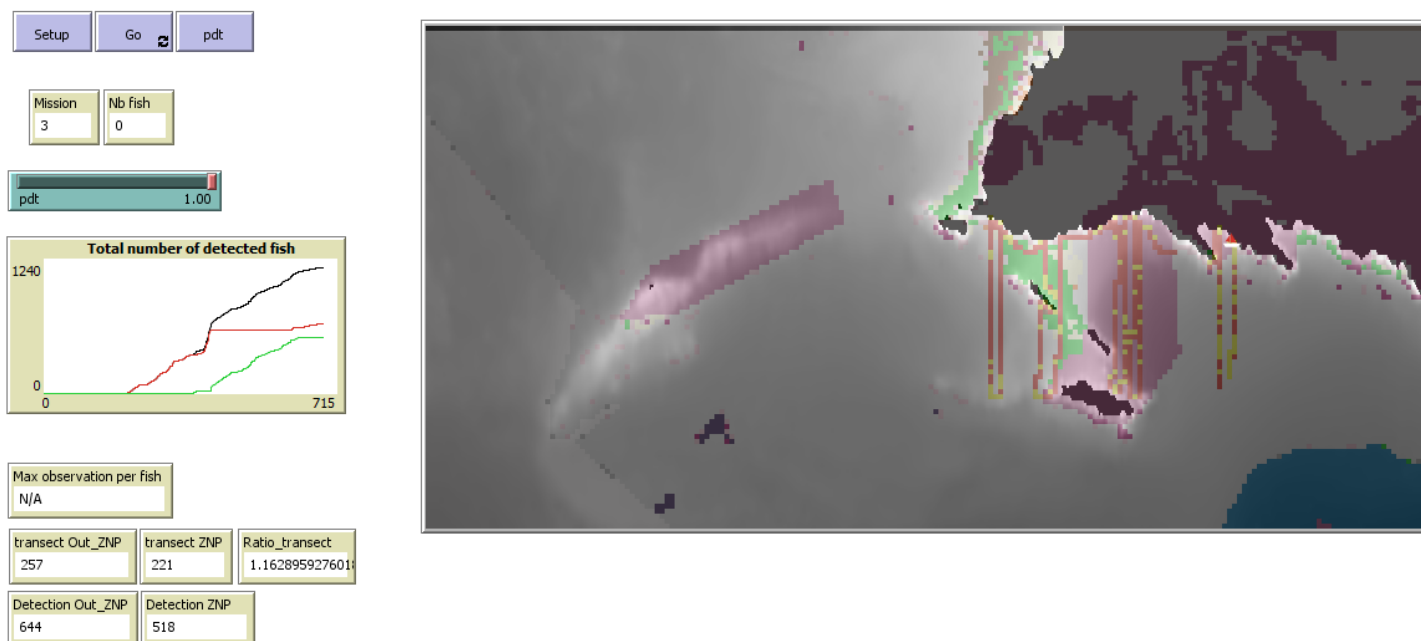


Figure 46. Interface de NetLogo présentant une simulation du modèle-individu centré du Parc National des Calanques. Les zones violettes représentent les ZNP. La couleur du fond varie avec les données de bathymétrie du SHOM et les données d'habitat obtenus sur le site web MEDTRIX. Les traits jaunes représentent les radiales, les carrés rouges le long des radiales correspondant aux endroits où le modèle simule une détection de banc.

Les analyses de sensibilité permettent de mettre en évidence l'influence et les interactions des paramètres sur les sorties du modèle. Une analyse de sensibilité dite locale (variation de la valeur des paramètres localement autour de leur valeur) a été réalisée avec une variation de 10% de la valeur des 4 paramètres (Figure 47a). Les résultats de l'analyse de sensibilité locale montrent que les deux premiers paramètres à calibrer en priorité sont celui permettant de trouver un endroit favorable (*bath_fish*) et celui lié à la décision de partir lorsque l'individu trouve un habitat favorable (*leave_hab*).

Nous avons ensuite effectué une première calibration simple des quatre paramètres du modèle en se basant sur une méthode manuelle. L'objectif de la calibration est de minimiser la différence entre les valeurs des sorties du modèle et des observations réelles (ici, nombre de bancs de poissons pélagiques observés dans et hors ZNP). Les observations réelles proviennent des données acoustiques acquises (observations acoustiques du nombre de bancs de poissons pélagiques) lors des missions réalisées en 2020 et 2021 dans le Parc National des Calanques. Nous avons ainsi à disposition trois jeux de données indépendants pour la calibration provenant des missions effectuées dans le Parc National des Calanques (en 2020 et 2021). En effet, en 2021, les transects ont été effectués deux fois sur deux navires différents (Cro-Magnon et Antédon II), ce qui constitue deux jeux de données pour 2021. Il est important de noter que les radiales effectuées ne sont pas exactement les mêmes à chaque mission ce qui apporte des informations complémentaires sur la répartition des bancs de poissons. Le modèle doit donc être capable de correctement simuler la répartition des bancs de poissons le long des radiales quelle que soit la mission effectuée. Des calibrations plus poussées de l'IBM pourront être par la suite réalisées en utilisant des méthodes comme des algorithmes génétiques disponibles dans le logiciel NetLogo.

Concernant les résultats de simulation du modèle, la Figure 47b présente la comparaison entre les observations (nombre de bancs de poissons pélagiques) faites avec les transects (3 observations car 3 missions considérées sur le Cro-Magnon et l'Antédon II). Une probabilité de partir de la ZNP égale à 1 correspond à aucun effet réserve. Les résultats montrent qu'avec cette probabilité égale à 1, le modèle prédit mal la répartition des individus dans le Parc National des Calanques. Il semble donc bien y avoir un effet réserve de la ZNP.

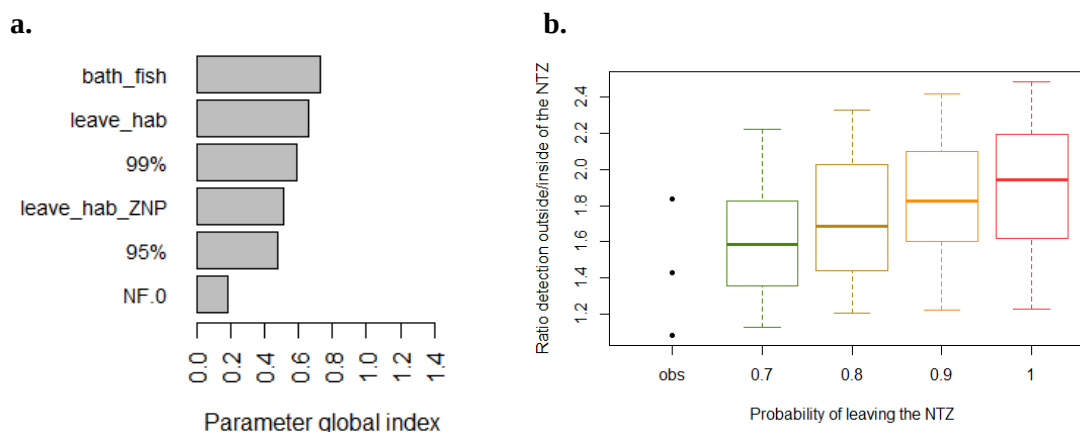


Figure 47. (a) Résultat de l'analyse de sensibilité locale (variation de 10% de la valeur des paramètres). Les dummy (paramètres n'ayant aucune influence) sont représentés à 99% et 95% (n=5000 simulations). (b) Comparaison des simulations du modèle (n=100 par condition) pour le ratio de détection dans et en dehors des ZNP par rapport aux observations (avec une calibration manuelle simple) pour les probabilités de partir de la ZNP variant de 0.7 à 1.

De plus, le modèle peut permettre de faire des prédictions de la répartition des bancs de poissons avec différents scénarios, induisant en outre des changements dans les conditions environnementales et anthropiques (diminution des habitats, changement des ZNP, etc.). Par exemple, le modèle peut permettre de simuler une extension de x% des ZNP autour de l'île de Riou vers l'ouest ou vers l'est. Cette extension est simulée en étendant la ZNP autour de l'île de Riou le long de la côte (extension du nombre de patches dans le modèle classés en ZNP), la largeur restant la même (Figure 48a). D'après les simulations (Figure 48b), le nombre de bancs de poissons rapporté au nombre de patches attribués à la ZNP montre une forte augmentation pour une extension allant jusqu'à 20% vers l'ouest de la ZNP (zone jaune à l'ouest sur la Figure 48a). En revanche, une extension vers l'est entraîne une diminution du nombre de bancs de poissons rapporté au nombre de cellules spatiales attribuées à la ZNP. Ce résultat s'explique principalement par le fait que des habitats favorables aux populations de poissons (notamment des herbiers de *Posidonia oceanica*) sont présents entre les îles Jarre et Calseraigne. Une extension de la ZNP vers l'ouest permettrait ainsi de densifier le nombre de bancs au niveau de ces îles. Une extension vers l'île Maire reste intéressante mais dans une moindre mesure. Par contre, cela semble assez peu intéressant de réaliser une extension vers l'est vu qu'il n'y a pas d'habitat favorable dans cette zone. Ainsi, cet exemple simple montre comment le modèle pourrait être utilisé comme outil d'aide à la décision par les gestionnaires pour prédire les effets et optimiser le placement des ZNP en prenant en compte les facteurs environnementaux.

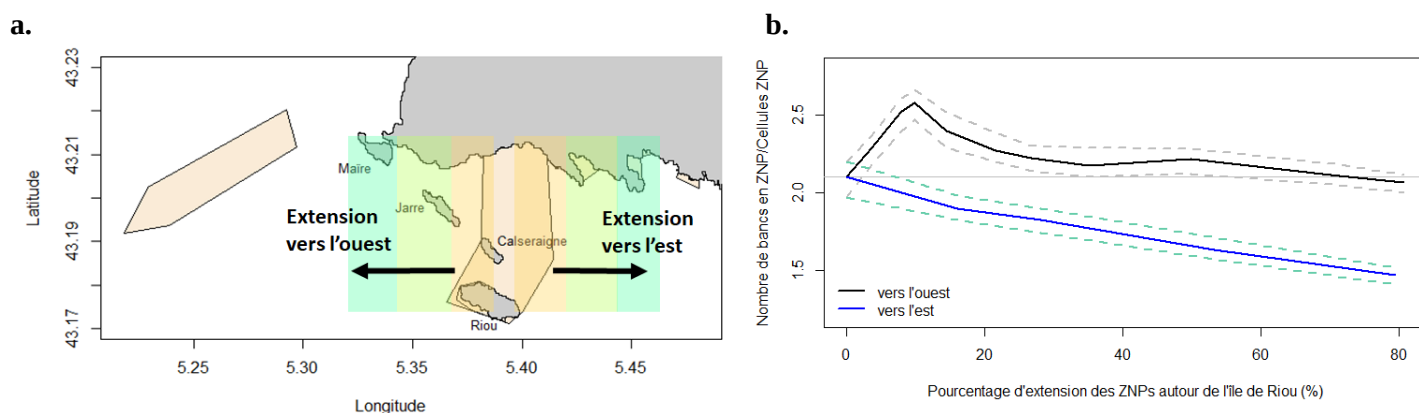


Figure 48. (a) Carte représentant les zones considérées dans le modèle pour les extensions des ZNPs vers l'ouest et l'est autour de l'île Riou (b) Prédiction du nombre de détections en ZNP rapporté au nombre de cellules spatiales attribuées aux ZNPs lors de l'extension de la zone de protection autour de l'île de Riou vers l'ouest (ligne noire) et vers l'est (ligne bleue) (n=100 simulations par pourcentage). Les lignes en pointillé représentent le nombre de détections minimales et maximales.

5. Discussion

5.1. Importance des zones côtières pour les poissons pélagiques

Tout d'abord, les résultats des analyses des premières campagnes du dispositif ACaPELA ont mis en évidence l'importance des zones côtières, et notamment des zones ultra-côtières (< 30 m), pour les poissons pélagiques. Les campagnes ont en effet intégré un gradient de profondeur allant des très faibles profondeurs (< 10 m) jusqu'à des profondeurs plus importantes (> 60 m). Lors des différentes campagnes, de nombreux bancs ont été observés en petits fonds. Par exemple, des détections importantes de maquereaux communs ont été réalisées observées durant l'été dans des zones peu profondes (10-20 m) dans la SRM MC.

Plus globalement, un gradient côte-large a été mis en évidence dans tous les sites étudiés avec une diminution de l'intensité acoustique (S_v) avec la bathymétrie. D'autres variables acoustiques telles que les variables morphologiques (hauteur, longueur, surface et volume) diminuaient également avec la profondeur. Ce résultat peut indiquer que i) les biomasses sont plus importantes en zone côtière, et/ou ii) que la distance entre les individus composant un banc diminue avec la profondeur et cela indépendamment du nombre d'individus ou de la biomasse du banc, et/ou iii) que les compositions spécifiques sont différentes. De plus, le nombre de trous dans les bancs augmentait avec la profondeur, ce qui peut suggérer que les bancs étaient plus denses à la côte. Afin d'améliorer la compréhension des changements de structure de bancs observés le long du gradient côte-large, obtenir un grand nombre d'observations vidéos des bancs en utilisant le *Hammerhead* serait d'un intérêt crucial. Cela permettrait ainsi de conclure sur le comportement de ces bancs in situ au large et à la côte, d'estimer la taille des individus dans les bancs pour voir si celle-ci varie le long du gradient côte-large et d'identifier les espèces présentes.

Enfin, ces résultats confirment l'importance de mettre en place une surveillance des zones ultra-côtières sur le long-terme qui ne sont actuellement peu ou pas couvertes par les campagnes de l'Ifremer (*e.g.* PELGAS).

5.2. Variabilités spatio-temporelles de la distribution et abondance des poissons pélagiques

Comme présenté dans le paragraphe précédent, l'analyse des données de plusieurs campagnes a mis en évidence une variabilité spatiale puisqu'un gradient côte-large a été observé pour plusieurs variables acoustique dont le S_v . Ces résultats semblent indépendants du site d'étude puisque ces mêmes différences côte-large ont été retrouvées quel que soit le site d'étude. D'autre part, il est intéressant d'étudier plusieurs façades maritimes puisque les espèces et conditions environnementales y varient fortement. Ainsi, nous avons observé par acoustique active un grand nombre de détections avec une forte variabilité des types bancs et agrégations dans le Parc National des Calanques en comparaison aux autres sites d'étude, ce qui est cohérent puisque cette zone présente une grande diversité et une forte abondance d'espèces de poissons.

D'autre part, une variabilité temporelle sur plusieurs variables acoustiques comme celles décrivant la morphologie des bancs (largeur, hauteur, longueur, surface et volume) a également été observée. En effet, une variabilité saisonnière de ces variables a été observée lors des missions successives réalisées à des saisons différentes. Cette variabilité peut s'expliquer par le fait que de nombreuses espèces de poissons pélagiques peuvent adopter des comportements migratoires (maquereaux, sardines, etc.) expliquant que leur biomasse à un endroit donné varie au cours des saisons. Par exemple, les bancs de maquereaux communs ont été observés à la fin du printemps/début d'été 2022 ce qui correspond à la fin de sa période de reproduction. De plus, les comportements migratoires sont à mettre en lien avec le

changement des conditions environnementales. Ainsi, la température de l'eau est connue pour être une variable importante expliquant la migration des maquereaux communs (D'Amours and Castonguay, 1992; Jansen *et al.*, 2012; Nikolioudakis *et al.*, 2019). C'est la raison pour laquelle le suivi des paramètres physico-chimiques de l'eau est primordial pour comprendre au mieux la distribution spatio-temporelle des espèces de poissons pélagiques. L'analyse des résultats de ces CTDs a effectivement montré des différences sur les paramètres physico-chimiques de l'eau en fonction des saisons (température, oxygène dissous, salinité) mais également des différences de structuration au sein d'une même zone à la même saison.

Afin d'appréhender la variabilité spatio-temporelle naturelle, il est donc nécessaire de poursuivre le suivi long-terme des zones d'études. En effet, ce suivi long terme est nécessaire pour obtenir un référentiel pour les lois de distributions des variables acoustiques et ainsi mettre en évidence les périodes où les données sont en deçà ou au-delà de la normale. D'après HELCOM (2018), il est nécessaire de continuer ce suivi long-terme sur 8/10 ans minimum afin de pouvoir déterminer des seuils du BEE. En particulier, il a été démontré que les variables morphologiques des bancs, notamment le volume, sont positivement corrélées à l'abondance dans le banc lors des couplages faits avec les plongeurs. Le suivi sur plusieurs saisons et années de ces variables pourrait donc permettre un suivi global de l'abondance dans les bancs des poissons pélagiques dans les zones d'études. Enfin, ce suivi long-terme permettrait également de caractériser et mieux comprendre le rôle fonctionnel des zones côtières (par exemple, rôle de nourriceries) pour les poissons pélagiques et leur utilisation durant leur cycle de vie.

5.3. Allocations spécifiques pour renseigner le Descripteur 1 DCSMM

Durant l'étude, des allocations spécifiques couplant des méthodes acoustiques avec des observations par pêche, plongée et/ou vidéos ont été réalisées. Par exemple, dans la SRM MC, les échotrases de maquereaux ont été allouées grâce à la pêche à la ligne. Le chalut méso-pélagique s'est avéré efficace uniquement en très petits fonds. De nombreux couples de données acoustiques et vérités terrain ont été obtenus pour la SRM MO dans la zone de Marseille, où les conditions pour mettre en place un couplage avec des plongeurs et/ou vidéos étaient optimales (bonne visibilité de l'eau, densité importante de poissons). La mise en place d'une collaboration avec le M.I.O de Marseille a de plus permis de tester le *Hammerhead* (OSIL) qui semble être une solution efficace pour tracter un système stéréoscopique et ainsi obtenir, en plus de l'identification de l'espèce et l'abondance, des données sur la taille des individus par vidéo. Les premiers tests de ce *Hammerhead* se sont révélés prometteurs en Bretagne puisque 8 échotrases indépendantes de sprats ont pu être allouées. Parmi toutes les méthodes d'allocation d'espèce testées, la vidéo semble la plus prometteuse. En effet, cette méthode est plus facile à mettre en œuvre que les méthodes de pêche ou basées sur la plongée et reste non invasive (contrairement à la pêche). Cependant, c'est une méthode dont le traitement est actuellement chronophage et qui nécessite de développer des méthodes automatiques de traitement des images vidéos. Cette méthode est aussi dépendante des conditions de visibilité même si des tests concluants ont déjà été menés en Méditerranée et en Bretagne. D'une manière générale, les méthodes d'observations sous-marines basées sur l'utilisation de caméras sont actuellement en plein essor (Mallet and Pelletier, 2014; Langlois *et al.*, 2020), il est donc réaliste de penser que leur utilisation sera facilitée dans les années à venir.

Avec les allocations d'espèce réalisées dans les différentes zones étudiées, nous avons obtenu des couples indépendants de données acoustiques et vérités terrain pour 11 espèces de poissons (Tableau 12) correspondant à 120 répliquats indépendants au total. Grâce à l'important effort d'acquisition de couples échotrases/vérités terrain réalisé dans le parc des Calanques à Marseille, des analyses statistiques ont permis de discriminer avec une fort taux de réussite les espèces en fonction des différentes variables acoustiques mesurées. Par exemple, le nombre de trous dans les bancs d'athérines c'est-à-dire l'espace entre les individus, était significativement plus faible que pour *Boops boops* et *Chromis chromis*. Ce résultat était cohérent avec les observations visuelles faites par les plongeurs ou

par vidéos qui montraient des agrégations lâches pour les bogues et castagnoles alors que les athérines formaient des bancs plus compacts. De plus, les athérines étaient situées significativement plus haut dans la colonne d'eau ce qui peut être mis en relation avec le fait que ces bancs étaient constitués principalement de juvéniles se nourrissant du plancton présent en haut de la colonne. L'ensemble des métriques obtenues par le sondeur EK80 et le sonar M3 (énergie acoustique, morphologie 3-D du banc et agrégation, position dans la colonne d'eau, densité du banc, etc.) sont donc utiles pour discriminer les espèces (athérines, bogues, castagnoles et mendoles). Par ailleurs, il est à noter que l'excellent niveau de discrimination atteint (> 78 % pour les 4 espèces) est grandement lié à l'utilisation conjointe des deux outils acoustiques (sondeur EK80 et sonar M3) qui permettent de caractériser finement les bancs d'un point de vue acoustique et morphologique.

Lorsque le nombre de couples écho-traces/vérité terrain au sein d'un site est suffisant, ces signatures acoustiques spécifiques peuvent être extrapolées à l'ensemble des radiales qui ne bénéficient pas toutes de « vérités terrain ». Ce travail a été conduit dans le Parc National des Calanques. Il a permis notamment d'extrapoler les espèces aux bancs et agrégations de poissons pélagiques observés dans et hors ZNP. De plus, les premiers résultats montrent que des différences significatives d'intensité acoustique et de volume de bancs existent entre les ZNP et hors ZNP. Des analyses complémentaires sont nécessaires pour évaluer l'effet des ZNP (effet confondant habitat * ZNP). **Mais les résultats d'ores et déjà acquis montrent clairement qu'un effort suffisant d'acquisition de couples écho-traces/vérités terrain permet au moins localement un suivi par espèce des abondances et des distributions de poissons pélagiques, tel que demandé par le descripteur 1 de la DCSMM.**

Ainsi, il est nécessaire de continuer la collecte des couples de données acoustique/vérité terrain pour caractériser ces métriques sur un plus grand nombre d'espèces. Ceci est fondamental pour analyser pour chacune d'entre elles les variabilités spatiales et temporelles de ces « signatures » acoustiques et évaluer dans quelles mesures elles peuvent être extrapolées dans l'espace (autres sites) et dans le temps (saison, année). En attendant, il est important d'enrichir cette base de données de référence et d'allouer du temps de mission terrain pour poursuivre l'acquisition de ces couples données acoustiques/vérités terrain parallèlement aux acquisitions acoustiques seules faites pendant les radiales.

5.4. Approche par guildes trophiques

Lorsque l'allocation spécifique n'est pas possible, une méthode alternative en utilisant des données de littérature (sur l'énergie acoustique et la position dans la colonne d'eau) a permis de constituer des grandes guildes trophiques (plancton, poissons, top-prédateurs pélagiques et benthopélagiques). Ce suivi par grandes guildes trophiques est opérationnel puisque les paramètres issus de la littérature permettant de constituer ces guildes peuvent être appliqués à toutes les données acoustiques récoltées lors des campagnes. Les résultats pour les sites échantillonnés à plusieurs saisons en 2020 ont montré une variabilité saisonnière du pourcentage de cellules attribuées au groupe « poissons pélagiques ». De plus, des zones ultra-côtières où il y a un pourcentage élevé de cellules « poissons pélagiques » ont été mises en évidence, notamment en baie de Lannion. Ces zones ultra-côtières peuvent donc constituer des zones privilégiées pour les poissons pélagiques et seraient donc intéressantes à protéger en priorité.

5.5. Approche mécanistique utile à la gestion des AMP

Toutes les données acoustiques des campagnes pourront être utilisées pour développer et calibrer des modèles mécanistiques. Une version exploratoire d'un modèle individu-centré pour analyser les données du Parc National des Calanques a été développée. Les facteurs environnementaux et anthropiques tels que la bathymétrie, les habitats et la présence de ZNP ont été pris en compte. Le développement de ces modèles devra être poursuivi mais cela permettrait de d'améliorer la

compréhension des impacts des facteurs environnementaux et anthropiques sur la distribution des espèces. De plus, le modèle peut permettre de faire des prédictions de la répartition des bancs de poissons avec différents scénarios en prenant en compte les mesures de gestion (mise en place/extension de ZNP, etc.). Ces modèles sont donc d'un intérêt crucial puisqu'ils peuvent être utilisés comme des outils d'aide à la décision par les gestionnaires pour le placement des ZNP afin d'optimiser les effets de ces zones.

6. Conclusions et perspectives

Le dispositif ACaPELA est basé sur des méthodes d'acoustique active qui permettent d'échantillonner les PCs avec une large couverture spatiale. Les résultats de 2019, 2020 et 2021 ont montré l'intérêt de ce dispositif pour suivre les populations de poissons pélagiques en zones côtières et ultra-côtières au cours du temps.

L'évaluation du BEE peut être réalisée en comparant l'état actuel des populations avec un état antérieur de référence, en cours d'acquisition. A ce jour, le suivi spécifique des espèces de poissons pélagiques comme demandé dans le descripteur 1 de la DCSMM n'est pas encore opérationnel. En effet, il nécessite l'acquisition d'échotracés spécifiques sur l'ensemble des façades (ou sous-régions marines), ce qui n'est pas le cas actuellement. Différentes méthodes d'allocation ont été testées (pêche, plongée, vidéo) et ont permis d'enrichir une base de référence d'échotracés spécifiques. A l'échelle locale, lorsque la base de référence est suffisamment renseignée et qu'une forte discrimination entre les espèces est observée, des méthodes statistiques permettent d'extrapoler les signatures à l'ensemble des radiales effectuées, comme cela a été fait dans le Parc National des Calanques. Il est donc fondamental d'enrichir cette base de référence sur l'ensemble des façades maritimes. L'acquisition des données sur les radiales mises en place pour le suivi long terme doit donc être poursuivie et assortie d'acquisition de vérités terrain, notamment avec l'aide du *Hammerhead* équipé de caméras.

En revanche, le suivi du peuplement (D4) est d'ores et déjà opérationnel. Il consiste à différencier des grandes guildes trophiques (plancton, poissons, top-prédateurs pélagiques et benthopélagiques) en fonction de seuils d'intensité acoustique disponibles dans la littérature et de leur position dans la colonne d'eau. Cette méthode est applicable pour chaque campagne réalisée dans les SRM puisqu'elle ne nécessite pas de vérités terrain. Enfin, des techniques de modélisation permettant de prédire la répartition spatio-temporelle des espèces ou grandes guildes trophiques pourront être également utilisées. Dans tous les cas, il est nécessaire de poursuivre le suivi par acoustique sur le long-terme afin d'établir un état de référence et d'évaluer la variabilité spatio-temporelle des populations acoustiques sur les différents sites d'étude.

6.1. Perspectives du projet ACaPELA

Afin de réaliser la surveillance des PCs en milieu côtier avec un déploiement à l'échelle nationale, il est nécessaire de poursuivre la collecte des données acoustiques au sein des sites pilotes mais également de l'étendre à d'autres sites. Il semble également important de poursuivre le développement des indicateurs écologiques.

La stratégie d'échantillonnage du dispositif en routine reste à définir. Celle-ci sera construite sur la base d'une étude cartographique menée dans le cadre de la construction de la stratégie globale de surveillance DCSMM des PCs (travail en cours). L'objectif consiste à mener une analyse méthodologique à l'échelle nationale à partir des données spatialisées disponibles (e.g. données du projet *life* MarHA, OFB, SHOM, SEXTANT, etc.) telles que la nature des habitats, la bathymétrie, la topographie paysagère et les caractéristiques des masses d'eaux (salinité, température, courant, etc.). Si les données le permettent, les données d'activités et de pression s'exerçant sur le milieu pourront

également être prises en compte. Ce travail en cours permettra donc d'identifier pour chaque façade ou groupe de façades, les zones à échantillonner, et des tests de puissance permettront de déterminer le nombre de radiales nécessaire pour assurer une surveillance robuste à l'échelle de cette zone. L'expérience acquise au cours des missions déjà effectuées montre qu'il est possible d'échantillonner 30 milles nautiques par jour (sous réserve des conditions météorologiques), cette couverture importante est un élément essentiel qui assure que l'échantillonnage pourra être représentatif d'une zone. Le positionnement des radiales est important car il doit prendre en compte les différents gradients naturels (bathymétrie, nature des fonds, etc.), les gradients de pressions anthropiques (pêche, pollutions, etc.) ainsi que la présence ou non de sites à enjeux, tels que les AMP ou ZNP. Tous ces éléments sont en effet cruciaux pour évaluer l'état écologique des différentes zones.

Le choix des sites devra également prendre aussi en considération des éléments pragmatiques : les conditions d'accessibilité et moyens à la mer disponibles. En effet, le projet ACaPELA se base principalement sur les navires de station, et ce afin de réduire les coûts et de profiter des connaissances de l'équipe sur la zone étudiée. Plusieurs navires de stations présentés en Figure 49 sont disponibles et sont localisés dans différentes façades des quatre sous-régions marines. Les caractéristiques de ces navires sont décrites plus précisément en annexe 2. La réservation de ces navires est gratuite et se fait sur le site de la flotte océanographique française comme pour les navires de l'Albert Lucas, du Néomysis et de l'Antédon II, néanmoins celle-ci doit être anticipée afin de ne pas manquer la date limite des appels d'offres. De plus, des collaborations avec des pêcheurs locaux sont également envisageables et des contacts ont notamment été obtenus grâce au sondage effectué par Eva Russier dans le cadre de son stage. Plusieurs contacts avec des pêcheurs ont d'ailleurs déjà été établis.

Concernant les périodes d'échantillonnage, s'il n'est pas possible de refaire les échantillonnages à plusieurs saisons pour appréhender la variabilité saisonnière, les résultats ont montré que les biomasses étaient plus importantes au printemps/été, ainsi il serait intéressant d'effectuer les échantillonnages à cette période. Cela correspond également à des périodes où les conditions météorologiques (vagues et vent notamment) sont plus propices à la prospection acoustique. Cependant, afin d'évaluer le plus justement possible l'état des populations, il serait intéressant de poursuivre l'étude de la variabilité saisonnière afin de comprendre au mieux les dynamiques de populations de poissons pélagiques et d'extrapoler les résultats obtenus à une saison donnée à l'ensemble de l'année. Pour les sites déjà prospectés, les mêmes périodes chaque année peuvent être plus facilement réservées pour les bateaux de station, surtout dans le cadre d'une surveillance à long terme bien installée. Il est à noter que le semi-rigide l'Emeraude Explorer appartient au MNHN, il est donc en théorie possible de l'utiliser toute l'année, le planning étant discuté en interne.

Enfin, quelle que soit la stratégie d'échantillonnage, il est essentiel de réserver deux ou trois journées au couplage avec les vérités terrains pour l'allocation spécifique et d'enregistrer régulièrement les caractéristiques physico-chimiques de la colonne d'eau.

Le plan d'échantillonnage actuel (quatre zones prospectées par an : Rade de Brest et baie de Douarnenez, Roscoff, baie de Saint-Malo et Parc National des Calanques) représente environ 40 jours de mer, incluant la réalisation des radiales et des vérités terrain. Le plan d'échantillonnage long terme pour le déploiement national doit être pensé pour évaluer suffisamment de sites pour être représentatif des différentes façades sans pour autant nécessiter un effort de terrain trop important. Pour cela, des scénarios tournant peuvent être envisagés, avec des échantillonnages par site tous les 2 ou 3 ans.

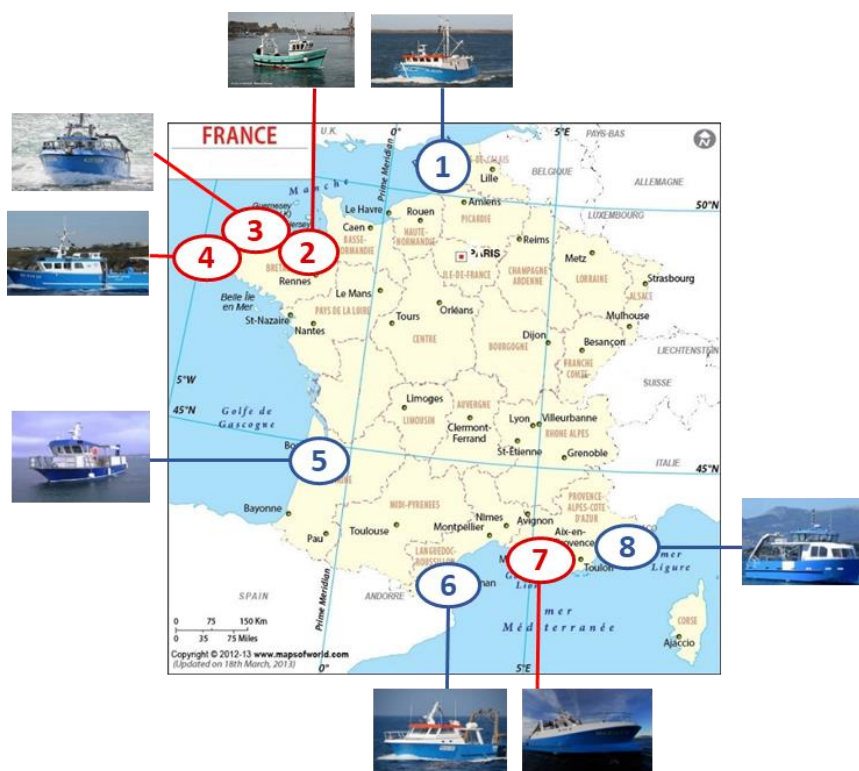


Figure 49. Localisation des navires utilisables pour le dispositif ACaPELA. Les navires qui ont déjà été utilisés ont une flèche en rouge tandis que ceux qui n'ont pas encore été testés sont en bleu.

6.2. Complémentarité du dispositif ACaPELA au regard d'autres dispositifs

D'autres dispositifs sont déjà mis en œuvre, notamment en manche Atlantique Nord comme les dispositifs de suivi par plongées effectués dans le cadre du projet POCOROCHE (POissons COTiers des ROches et Herbiers) ou les analyse d'ADN environnemental (ADNe).

6.2.1. Suivis par plongée

Les suivis par plongée permettent une détermination précise des espèces observées, ainsi qu'une estimation de leur taille et leur abondance, mais ils ne couvrent qu'une zone très restreinte. L'échosondage permet de prolonger cette zone de prospection avec une couverture spatiale importante mais avec des données moins précises en l'absence d'allocation spécifique. L'échosondage peut ainsi permettre d'extrapoler les données de comptage des plongeurs et les informations acquises par les plongeurs permettent d'enrichir les connaissances pour l'allocation spécifique des écotraces.

De plus, les suivis par plongées concernent principalement les espèces benthiques. Si les individus vus par les plongeurs sont très proches de la roche ou dans les laminaires, ils ne pourront pas être vus au sondeur EK80 et sonar M3 pour des raisons techniques (réverbération du fond). Ces suivis de plongée sont donc essentiels pour suivre les populations benthiques qui sont difficilement échantillonnées par échosondage. A l'inverse, les plongeurs ne suivent que très peu les populations pélagiques qui sont bien échantillonnées par échosondage.

Enfin, des essais de couplage entre les suivis par plongée et l'échosondage ont été réalisés dans la zone de Roscoff en 2020 et 2021. Néanmoins, sauf en cas d'observations d'une seule espèce lors du transect plongée, il est difficile d'attribuer une espèce observée par plongée aux écotraces puisque les deux suivis ne sont pas faits exactement en même temps. Il faudrait pour cela mettre en place une inter-

calibration des méthodes. En revanche, il est très complémentaire d'avoir les deux suivis réalisés en même temps. En effet, cela peut permettre, en outre, d'affiner les hypothèses faites sur les espèces présentes et observées par échosondage (en l'absence d'allocation spécifique notamment), avoir des observations par plongée quant à la nature et caractéristiques du fond échosondé (roche, sable, présence de laminaires, etc.). A l'inverse, pour les plongeurs, une cartographie de leur site de suivi par acoustique active est très intéressante pour mieux comprendre la distribution locale des espèces. Pour conclure, les dispositifs POCOROCH et ACaPELA sont complémentaires et l'inter-calibration des méthodes requiert encore du développement.

6.2.2. Suivis ADNe

L'ADN obtenu à partir d'échantillons d'eau offre depuis quelques années une réelle piste pour étudier les communautés de poissons. Plusieurs techniques peuvent être mises en place à partir de l'ADN environnemental (ADNe) : le metabarcoding qui cible la communauté et la digital PCR (ddPCR) utilisée pour cibler une espèce en particulier. Ce dispositif est très complémentaire des suivis par échosondage, notamment pour lesquels on n'a pas d'allocation d'espèce, puisque les suivis par ADNe permettent de connaître le spectre d'espèces présentes dans la zone de travail (D4C1). D'autre part, le suivi par ADNe peut appréhender les distributions spatio-temporelles de ces espèces, ce qui permet de mieux comprendre la variabilité spatio-temporelle observée avec les variables acoustiques.

De plus, cela pourrait permettre de confirmer certaines allocations d'espèce. L'ajout de données d'ADNe ne pourra néanmoins en aucun cas remplacer les vérités terrain qui permettent d'allouer avec une grande précision une échotrace à une espèce, une gamme de taille et une abondance. Enfin, un *screening* de l'ensemble des façades des quatre sous-régions marines, c'est-à-dire un échantillonnage le long de toutes les façades, est envisageable par ADNe ce qui pourrait permettre de renseigner le D1C4 (Distribution spatiale des populations) et/ou le D4C1 (Diversité des espèces de la guildes trophique).

6.2.3. Vers une « surveillance multi-sources et multi-échelles »

Comme vu précédemment, le dispositif ACaPELA est très complémentaire des autres dispositifs de suivi par plongée et ADNe. C'est la raison pour laquelle un objectif des travaux développés par PatriNat est de créer une « surveillance multi-sources et multi-échelles » qui tire bénéfice des complémentarités entre dispositifs et améliore le renseignement des critères DCSMM. En effet, chaque dispositif a une couverture spatiale et une résolution différente (Figure 50) et ils sont aussi complémentaires vis-à-vis des espèces étudiées (pélagiques vs. benthopélagiques) et du niveau de précision pour évaluer la diversité et la structure des populations et peuplements.

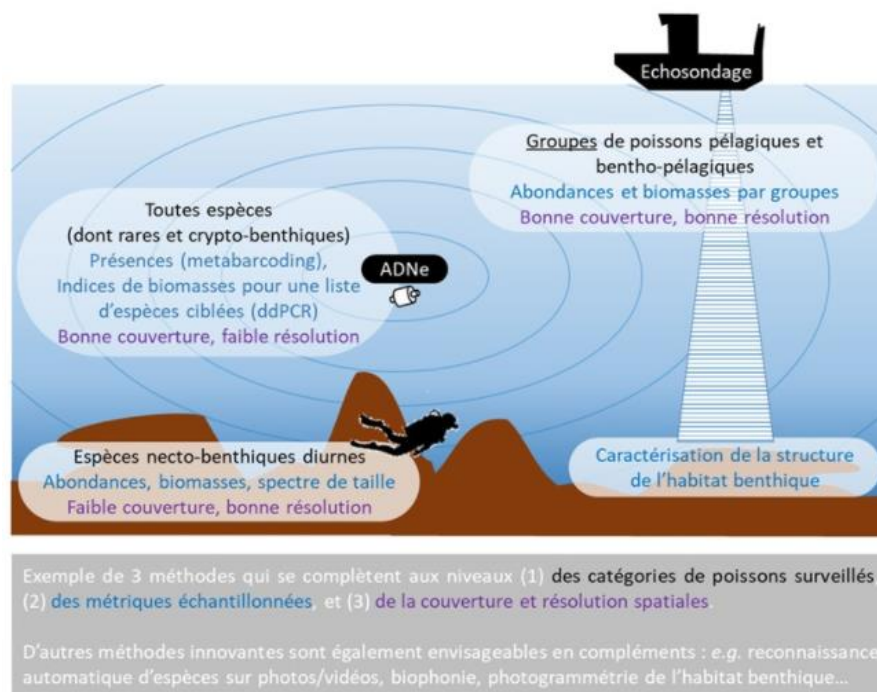


Figure 50. Schéma de la complémentarité des dispositifs (échosondage, plongée, ADNe).

Afin d'avoir une « surveillance multi-sources et multi-échelles », il est nécessaire d'inter-calibrer les méthodes (ADNe, échosondage et plongée) et les stratégies d'échantillonnages. Des observatoires état/pression par façades, combinant ADNe et méthodes complémentaires (*a minima* plongée et échosondage) seront sélectionnées. Ces zones seront sélectionnées selon plusieurs critères : les gradients de pressions anthropiques et naturels en présence (pêche, urbanisation/eutrophisation, EMR, distance à la côte, etc.) et l'antériorité des séries de données déjà récoltées par les dispositifs. En parallèle de ces observatoires état-pression, un *screening* de façade ADNe sera déployé permettant de collecter de la donnée à plus large échelle.

Ces observatoires état-pression devront notamment permettre :

- (1) d'évaluer finement les relations états-pression grâce aux complémentarités des différentes méthodes
- (2) de calibrer les indicateurs du *screening* ADNe et éclairer leur interprétation grâce à l'inter-calibration de l'ADNe avec les méthodes d'observations directes.

Enfin, la méthodologie de chaque dispositif (ADNe, échosondage et plongée) pourra être améliorée (*e.g.* description de l'habitat avec l'échosondage) et/ou complétée avec d'autres méthodes pour répondre notamment à des spécificités locales (*e.g.* stations vidéos fixes avec reconnaissance automatique, mise en place de technique d'acoustique passive pour connaître la biophonie).

6.3. Synergies à construire avec d'autres programmes thématiques

Le dispositif ACaPELA peut apporter des informations intéressantes pour d'autres programmes thématiques. Tout d'abord, avec l'acquisition de la centrale inertielle, le M3 peut permettre de faire des cartes de bathymétrie, en tenant compte des vagues grâce à la centrale inertielle, mais également de la hauteur de marée. En revanche, il est important de noter que le M3 n'est pas un sonar spécialement dédié à la bathymétrie mais plutôt à l'étude de la colonne d'eau, les données de bathymétrie n'auront donc peut-être pas une qualité optimale. La réponse acoustique du fond pourrait de plus être analysée pour réaliser des cartes d'habitat, même s'il n'existe pas à ce jour de méthode permettant d'extrapoler facilement la réponse acoustique à la nature du substrat et que des vérités terrain (observation du fond)

sont obligatoires. Ces cartes d'habitat pourraient cependant intéresser les programmes en lien avec le suivi des habitats benthiques (D1HB) et des habitats pélagiques (D1HP).

D'autre part, le dispositif ACaPELA étant centré sur les descripteurs relatifs aux PCs, les données sur les autres grandes guildes trophiques ne sont pas analysées en priorité. En revanche, elles peuvent intéresser les autres programmes thématiques. Par exemple, les données sur le plancton peuvent apporter des informations cruciales pour les sous-programmes « Phytoplancton (SP2) » et « Zooplancton (SP3) » du D1HP. Pour l'instant, ces données sont intégrées à l'analyse en tant que co-variables pour l'analyse des PCs, mais ce groupe fonctionnel pourrait également être affiné, notamment sur la base de la littérature existante et ainsi suivre plus précisément la répartition spatio-temporelle des communautés planctoniques. De plus, plusieurs observations de cétacés, en particulier des dauphins communs (*Delphinus delphis*), ont été enregistrées pendant les campagnes, ces données géo-localisées peuvent donc intéresser les responsables du programme thématique « mammifères marins ». En outre, des informations précises issues des outils acoustiques au moment des observations (par exemple, distance interindividuelle entre les dauphins, localisation dans la colonne d'eau, etc.), peuvent être intéressantes et sont disponibles si besoin.

Enfin, les données acoustiques peuvent être analysée de manière à évaluer le bon état écologique de grandes guildes trophiques simultanément et ainsi répondre à une approche D4 par grandes guildes trophiques (plancton, poissons, top-prédateurs).

7. Références

Abboud-Abi Saab, M. *et al.* (2004) 'Suivis temporels comparés de la structure thermique d'eaux côtières libanaises (Batroun) et françaises (Marseille) entre juin 1999 et octobre 2002', *Comptes Rendus Geoscience*, 336(15), pp. 1379–1390. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.004>.

Acou, A. and Brehmer, P. (2019) *Dossier de campagnes « ACaPELA » 1 à 3 Acoustique PELAgique*, p. 34p + annexes.

Adams, S.M. (2002) *Biological indicators of aquatic ecosystem stress*. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20023148159> (Accessed: 30 April 2021).

Beaubrun, P. *et al.* (2013) *Etat de l'art des connaissances sur les distributions spatiales des oiseaux marins et des petits poissons pélagiques dans le golfe du Lion*. Rapport final du Contrat DREAL-LR 11/3211726/F. Ifremer, p. 580. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00455/56628/58364.pdf> (Accessed: 9 September 2021).

Béhagle, N. (2015) *Acoustic structuration of micronekton of the Southwest Indian Ocean oceanic ecosystem*. Theses. Université de La Rochelle. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01661434>.

Benoit-Bird, K.J. and Lawson, G.L. (2016a) 'Ecological Insights from Pelagic Habitats Acquired Using Active Acoustic Techniques', *Annual Review of Marine Science*, 8(1), pp. 463–490. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-122414-034001>.

Benoit-Bird, K.J. and Lawson, G.L. (2016b) 'Ecological Insights from Pelagic Habitats Acquired Using Active Acoustic Techniques', *Annual Review of Marine Science*, 8(1), pp. 463–490. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-122414-034001>.

Borja, A., Muxika, I. and Rodríguez, J.G. (2009) 'Paradigmatic responses of marine benthic communities to different anthropogenic pressures, using M-AMBI, within the European Water

Framework Directive', *Marine Ecology*, 30(2), pp. 214–227. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2008.00272.x>.

Bourdeix Jean-Hervé (2015) 'PELMED 2015 croise,L'Europe R/V'. <https://doi.org/10.17600/15006400>.

Bourdeix, J.-H. (2018) 'PELMED 2018 croise,L'Europe R/V'. <https://doi.org/10.17600/18000586>.

Brehmer, P. *et al.* (2006) 'Evidence of a variable unsampled pelagic fish biomass in shallow water (20 m): the case of the Gulf of Lion', *ICES Journal of Marine Science*, 63(3), pp. 444–451. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.10.016>.

Brehmer, P. *et al.* (2007) 'Schooling behaviour of small pelagic fish: phenotypic expression of independent stimuli', *Marine Ecology Progress Series*, 334, pp. 263–272. <https://doi.org/10.3354/meps334263>.

Brehmer, P. *et al.* (2019) 'Vessel Avoidance Response: A Complex Tradeoff Between Fish Multisensory Integration and Environmental Variables', *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 27(3), pp. 380–391. <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1601157>.

Brehmer, P., Chi, T.D. and Mouillot, D. (2006) 'Amphidromous fish school migration revealed by combining fixed sonar monitoring (horizontal beaming) with fishing data', *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 334(1), pp. 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.01.017>.

Brind'Amour, A. and Delaunay, D. (2018) *Evaluation de la composante de l'écosystème 'Poissons et céphalopodes' du descripteur 1 'Biodiversité' en France métropolitaine*. Rapport scientifique de l'Ifremer pour l'évalutaion 2018 au titre de la DCSM. Ifremer, p. 216. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00458/57007/58905.pdf> (Accessed: 9 September 2021).

Burczynski, J. (1982) 'Introduction to the use of sonar systems for estimating fish biomass', *FAO Fish. Tech. Pap.*, 191, pp. 1–89.

Charton, J. a. G. *et al.* (2000) 'Evaluating the ecological effects of Mediterranean marine protected areas: habitat, scale and the natural variability of ecosystems', *Environmental Conservation*, 27(2), pp. 159–178. <https://doi.org/10.1017/S0376892900000199>.

Coiffec, G. *et al.* (2006) 'Analyse des petits pelagiques, sardine et anchois, dans le golfe de Gascogne'. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2287/> (Accessed: 17 May 2021).

D'Amours, D. and Castonguay, M. (1992) 'Spring migration of Atlantic mackerel, *Scomber scombrus*, in relation to water temperature through Cabot Strait (Gulf of St. Lawrence)', *Environmental Biology of Fishes*, 34(4), pp. 393–399. <https://doi.org/10.1007/BF00004743>.

DeAngelis, D.L. and Grimm, V. (2014) 'Individual-based models in ecology after four decades', *F1000Prime Reports*, 6, p. 39. <https://doi.org/10.12703/P6-39>.

Diogoul, N. *et al.* (2021) 'On the robustness of an eastern boundary upwelling ecosystem exposed to multiple stressors', *Scientific Reports*, 11(1), p. 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81549-1>.

Doray, M. *et al.* (2018) 'The PELGAS survey: Ship-based integrated monitoring of the Bay of Biscay pelagic ecosystem', *Progress in Oceanography*, 166, pp. 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.09.015>.

Doray, M., Massé, J. and Petitgas, P. (2010) *Pelagic fish stock assessment by acoustic methods at Ifremer*. Available at: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00003/11446/> (Accessed: 2 April 2020).

Draštík, V. and Kubečka, J. (2005) 'Fish avoidance of acoustic survey boat in shallow waters', *Fisheries Research*, 72(2), pp. 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.10.017>.

Grimm, V. and Railsback, S.F. (2005) *Individual-based Modeling and Ecology*: STU-Student edition. Princeton University Press. Available at: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt5hhnk8> (Accessed: 4 May 2022).

Guillard, J. *et al.* (2011) 'Three-dimensional internal spatial structure of young-of-the-year pelagic freshwater fish provides evidence for the identification of fish school species', *Limnology and Oceanography. Methods*, 9, pp. 322–328. <https://doi.org/10.4319/lom.2011.9.322>.

Guillard, J. and Lebourges, A. (1998) 'Preliminary results of fish population distribution in a Senegalese coastal area with depths less than 15m, using acoustic methods', *Aquatic Living Resources*, 11(1), pp. 13–20. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(99\)80026-6](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(99)80026-6).

HELCOM (2018) *Abundance of key coastal fish species*. HELCOM core indicator report. Online.

Jansen, T. *et al.* (2012) 'Migration and Fisheries of North East Atlantic Mackerel (*Scomber scombrus*) in Autumn and Winter', *PLOS ONE*, 7(12), p. e51541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051541>.

Lamouret, M. *et al.* (2020) 'Coupling the map of marine habitats and fish accumulation zones : a three-dimensional spatial approach for the management of halieutic ressources.', *Vie et Milieu / Life & Environment*, 70(3–4). Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03280374> (Accessed: 10 September 2021).

Langlois, T. *et al.* (2020) 'A field and video annotation guide for baited remote underwater stereo-video surveys of demersal fish assemblages', *Methods in Ecology and Evolution*, 11(11), pp. 1401–1409. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13470>.

Le Joncour, A. and Thiriet, P. (2020) *Surveillance des poissons côtiers rocheux de Manche Occidentale par comptages visuels en plongée sous-marine : Structure et contenu des bases de données générées par les campagnes POCOROCH 2016-2020*. UMS PatriNat, p. 83. Available at: <https://inpn.mnhn.fr/docs-web/docs/download/356230> (Accessed: 12 May 2021).

Mallet, D. and Pelletier, D. (2014) 'Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: A review of sixty years of publications (1952–2012)', *Fisheries Research*, 154, pp. 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.019>.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2013) *La mise en œuvre de la directive-cadre stratégie pour le milieu marin*. DICOM-DGALN/BRO/11021-3. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, p. 8. Available at: http://www.dcsmm-d4.fr/IMG/pdf/dcsmm_brochure-8p_fr_maj-juin-2013.pdf (Accessed: 9 January 2020).

Molloy, P.P., McLean, I.B. and Côté, I.M. (2009) 'Effects of marine reserve age on fish populations: a global meta-analysis', *Journal of Applied Ecology*, 46(4), pp. 743–751. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01662.x>.

Moustakas, A., Silvert, W. and Dimitromanolakis, A. (2006) 'A spatially explicit learning model of migratory fish and fishers for evaluating closed areas', *Ecological Modelling*, 192(1), pp. 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.007>.

Nikolioudakis, N. *et al.* (2019) 'Drivers of the summer-distribution of Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) in the Nordic Seas from 2011 to 2017; a Bayesian hierarchical modelling approach', *ICES Journal of Marine Science*, 76(2), pp. 530–548. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy085>.

Pavlov, D. and Kasumyan, A. (2000) 'Patterns and mechanisms of schooling behavior in fish: A review', *Journal of Ichthyology*, 40, pp. S163–S231.

Peterson, M.S. (2003) 'A Conceptual View of Environment-Habitat-Production Linkages in Tidal River Estuaries', *Reviews in Fisheries Science*, 11(4), pp. 291–313. <https://doi.org/10.1080/10641260390255844>.

Pujoni, D.G.F. *et al.* (2019) 'Modeling vertical gradients in water columns: A parametric autoregressive approach', *Limnology and Oceanography: Methods*, 17(5), pp. 320–329. <https://doi.org/10.1002/lom3.10316>.

Quemmerais-Amice, F. (2018) *Présentation du projet CARPEDIEM*. Ifremer, p. 32. Available at: <https://wwz.ifremer.fr/dyneco/content/download/120388/file/Pr%C3%A9sentation%20Fr%C3%A9d%C3%A9ric%20Quemmerais-Amice.pdf> (Accessed: 1 June 2021).

Quemmerais-Amice, F. *et al.* (2020) 'A Methodology and Tool for Mapping the Risk of Cumulative Effects on Benthic Habitats', *Frontiers in Marine Science*, 7. Available at: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2020.569205> (Accessed: 22 June 2022).

Regimbart, A., Guitton, J. and Le Pape, O. (2018) *Zones fonctionnelles pour les ressources halieutiques dans les eaux sous souveraineté française. Deuxième partie : Inventaire*. Rapport d'étude 46. Rennes, France, p. 175. Available at: <https://halieutique.agrocampus-ouest.fr/files/fichiers/pdf/5864.pdf>.

Rochette, S. *et al.* (2010) 'Effect of nursery habitat degradation on flatfish population: Application to *Solea solea* in the Eastern Channel (Western Europe)', *Journal of Sea Research*, 64(1–2), pp. 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2009.08.003>.

Salman, A. *et al.* (2020) 'Automatic fish detection in underwater videos by a deep neural network-based hybrid motion learning system', *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), pp. 1295–1307. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz025>.

Thiriet, P. (2019) 'Comptages-Temps, Méthode 2019'.

Zwolinski, J.P. *et al.* (2014) 'Building on Fisheries Acoustics for Marine Ecosystem Surveys', *Oceanography*, 27(4), pp. 68–79.

Annexe 1 : Délimitations et découpages administratifs maritimes

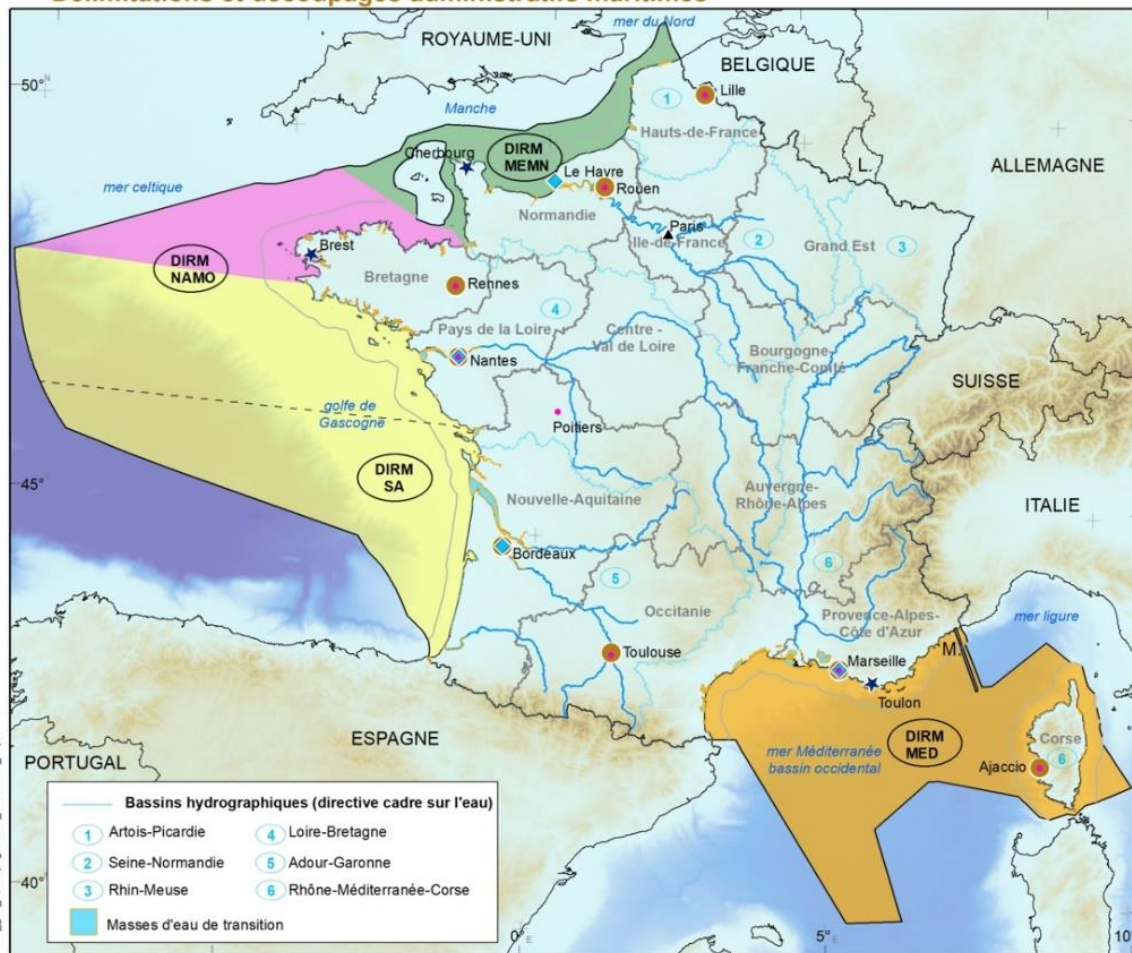


FRANCE METROPOLITAINE

Délimitations et découpages administratifs maritimes

EDITEE LE :

28/02/2020



Administrations maritimes

- ▲ Administration centrale
- ★ Préfctures maritimes (façades) :
 - Manche mer du Nord (Cherbourg)
 - Atlantique (Brest)
 - Méditerranée (Toulon)
- DREAL (implantations principales)
- ◆ DIRM (façade) :
 - MEMN : Manche Est mer du Nord
 - NAMO : Nord Atlantique Manche Ouest
 - SA : Sud Atlantique
 - MED : Méditerranée

Parties françaises des sous-régions marines (1)

- MMN : Manche Mer du Nord
- MC : Mers Celtiques
- GdG : Golfe de Gascogne
- MO : Méditerranée occidentale

Découpage régional

- Préfctures de Région
- Limites inter-régionales

Délimitations maritimes françaises *

- Limite de la mer territoriale
- Limite des eaux sous juridiction

0 50 100 kilomètres

0 50 100 milles nautiques

Sources des données :
 - délimitations maritimes françaises : SHOM, 02/2020
 - sous-régions maritimes françaises : AFB, 2018
 - découpages des régions métropolitaines : GAIAGO, 2015
 d'après données GEOCLAIION
 - localisation des administrations : AAMP, 2016
 - découpage administratif européen : EEA, sc, FAO, nc
 - bassins hydrographiques : SANDRE, 2016
 - masses d'eau de transition : SANDRE, 2016
 - bathymétrie : GEBCO, 2014

Système de coordonnées : Lambert 93 / RGF93 / IAG GRS 1980



DREAL : directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement ; DIRM : directions interrégionales de la mer ;
 SRM : sous-régions marines européennes (eaux françaises) / (1) délimitations maritimes spécifiques à la directive cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM)
 et ne tenant pas compte des eaux de transition de la directive cadre sur l'eau (DCE)

Annexe 2 : Présentation des navires de la flotte océanographique française

Tableau A1. Navires utilisables pour le dispositif ACaPELA et présentation de leurs caractéristiques principales.

		Nom/Armateur/port d'attache	Long/Tirant d'eau	Perche possible	Vérité terrain
1		SEPIA II	L : 12.59 m	A voir	Chalut
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 2.40 m		Pêche à la ligne
		Boulogne sur mer			Vidéo
2		EMERAUDE EXPLORER	L : 7.00 m	oui	Plongeur tracté
		CRESCO/MNHN	TE : 0.80 m		Pêche à la ligne
		Dinard			Vidéo
2		LOUIS FAGE	L : 10.00 m	oui	Chalut
		CRESCO/MNHN	TE : 1.40 m		Pêche à la ligne
		Dinard			Vidéo
3		NEOMYSIS	L : 11.94 m	oui	Chalut
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 2.10 m		Pêche à la ligne
		Roscoff			Vidéo
3		AURELIA	L : 6.30 m	oui	Plongeur tracté
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 0.20 m		Pêche à la ligne
		Roscoff			Vidéo
4		ALBERT LUCAS	L : 11.50 m	oui	Chalut
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 1.40 m		Pêche à la ligne
		Brest			Vidéo
4		HALIOTIS	L : 10.16 m	A voir	Plongeur tracté
		Ifremer	TE : 0.845 m		Pêche à la ligne
		BREST			Vidéo
5		PLANULA IV	L : 11.90 m	A voir	Plongeur tracté
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 1.40 m		Pêche à la ligne
		Arcachon			Vidéo
6		NEREIS II	L : 14.00 m	A voir	Chalut
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 1.30 m		Pêche à la ligne
		Port-Vendres			Vidéo
7		ANTEDON II	L : 16.10 m	OUI	Chalut
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 2.70 m		Pêche à la ligne
		Marseille			Vidéo
8		SAGITTA III	L : 11.98 m	A voir	Chalut
		Institut National des Sciences de l'Univers	TE : 1.40 m		Pêche à la ligne
		Toulon			Vidéo

Autres supports possibles :

9		CRO-MAGNON	L : 12m	Oui	Plongeur tracté
		Association Septentrion Environnement	TE :1.20m		Pêche à la ligne
		Marseille			
10		Armements pêche		oui	Détection mono

Annexe 3 : Productions du projet ACaPELA

- Rapports de stage

Eva Russier-Picard (2020). Enquête auprès des pêcheurs côtiers : caractérisation des populations pélagiques et benthopélagiques des milieux ultra-côtiers de Bretagne. Université de Bretagne Occidentale

Corentin Minart (2021). Analyse des caractéristiques de bancs et d'agrégations de poissons pélagiques côtiers par couplage de données hydroacoustiques et vidéo/plongée. Université des Antilles

Helloïse Oulia (2021). Analyse des caractéristiques physico-chimiques de la colonne d'eau via des données CTD. Université du Littoral Côte d'Opale

- Rapports techniques

Acou Anthony et Brehmer Patrice. 2019. Dossier de campagnes « ACaPELA » 1 à 3 Acoustique PELAgique. Rapport UMS Patrinat et IRD, 34 p. + annexes.

Mouget Anne, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, David Viviane. 2020. Rapport de campagne ACaPELA, B1-2019/12, Albert Lucas, SRM Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

Mouget Anne, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, David Viviane. 2020. Rapport de campagne ACaPELA, R1-2020/06. Néomysis, SRM Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, David Viviane, Mouget Anne. 2020. Rapport de campagne ACaPELA, B2-2020/06. Albert Lucas, SRM Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

David Viviane, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, Mouget Anne. 2020. Rapport de campagne ACaPELA, R2-2020/07. Néomysis, SRM Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

David Viviane, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, Mouget Anne. 2020. Rapport de campagne ACaPELA, M1-2020/08, Cro Magnon, SRM Mer Méditerranée. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

Le Goff Loïc, David Viviane, Mouget Anne, Acou Anthony, Brehmer Patrice. 2020. Rapport de mise en œuvre d'un chalut mésopélagique pour la capture de cibles détectées par acoustique. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Dinard.

Mouget Anne, Le Goff L., Brehmer P., Acou A., David Viviane. 2021. Rapport de campagne ACaPELA, D1-2021/03. Emeraude Explorer, SRM Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

David Viviane, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony Thiriet P., Sys J.-F., Mouget Anne. 2021. Rapport de campagne ACaPELA, M2-2021/04, Cro Magnon et Antedon II, SRM Mer

Méditerranée. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

David Viviane, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, Mouget Anne. 2021. Rapport de campagne ACaPELA, R3-2021/06. Néomysis, SRM Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

Mouget Anne, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, David Viviane. 2021. Rapport de campagne ACaPELA, D2-2021/07. Emeraude Explorer, Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

Le Goff Loïc, David Viviane, Brehmer Patrice, Acou Anthony, Mouget Anne. 2021. Rapport de campagne ACaPELA, B3-2021/07. Albert Lucas et un Merry Fischer, Mers Celtiques. European Maritime and Fisheries Fund (EMFF), DCSMM SP4, Projet ACaPELA; Rapport Tech. et Sci. MNHN-OFB-IRD; Plouzané

David Viviane, Le Goff Loïc, Brehmer Patrice, Acou Anthony, Mouget Anne. 2021. Calibration du sonar multifaisceaux de type SIMRAD M3 pour le projet ACaPELA. MNHN, IRD, OFB. Dinard

Mouget, A., Roudaut, G., David, V., Acou, A., Brehmer, P., Le Goff, L., 2021. Rapport de calibration de l'échosondeur Simrad EK80 (CW) pour le projet ACaPELA. MNHN, IRD, OFB. Dinard

- Communications lors de congrès

Anne Mouget, Viviane David, Anthony Acou, Eric Feunteun, Pierre Thiriet, Yannick Perrot, Loïc Le Goff, Patrice Brehmer. 2022. Ichthyological importance of shallow coastal areas for pelagic communities: contributions of echo sounding. 38th Annual Working Group on Fisheries Acoustics Science and Technology, International Council for the Exploration of the Sea, Hotel Royal Baobab, La Somone, Senegal

Viviane David, Corentin Minart, Anne Mouget, Yannick Perrot, Pierre Thiriet, Eric Feunteun, Adrien Cheminée, Loïc Le Goff, Anthony Acou, Patrice Brehmer. 2022. Species identification of fish shoals combining multibeam and split-beam echosounders with visual observations from diving. 38th Annual Working Group on Fisheries Acoustics Science and Technology, International Council for the Exploration of the Sea, Hotel Royal Baobab, La Somone, Senegal

Viviane David, 2021. Insight of high frequency multi-beam detection for quantitative indicators of pelagic fish communities in ultra-shallow waters. Global Ocean 2021, USA

Corentin Minart, 2021. An innovative sampling protocol for fish species identification methods in shallow waters : towed diver, towed video and stereoscopic camera system. Global Ocean 2021, USA

Anne Mouget, 2021. Effect of environmental parameters on acoustic characterisation of pelagic biocenoses in ultra-shallow (5-30 m) coastal areas. Global Ocean 2021, USA

Viviane David. 2020. Insight of high frequency multi-beam detection for quantitative indicators of pelagic fish communities in shallow waters. SeaTech week, France

Anne Mouget. 2020. Effect of environmental parameters on acoustic characterisation of pelagic biocenoses in ultra-shallow (5-40 m) coastal area. SeaTech, France

Anne Mouget. 2020. Is hydroacoustic an efficient tool to survey necto-benthic fishes in shallow rocky reefs? SeaTech, France

- **Publications**

- David, V., Mouget, A., Perrot, Y., Le Goff, L., Thiriet, P., Diogoul, N., Feunteun, E., Acou, A., & Brehmer, P. (2022). Insights from a multibeam echosounder to survey pelagic fish shoals and their spatio-temporal distribution in ultra-shallow waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 264, 107705. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107705>
- Minart, C., David, V., Mouget, A., Brehmer, P., Acou, A., Goff, L. L., Feunteun, E., & Thiriet, P. (2021). An innovative sampling protocol for fish species identification methods in shallow waters: Towed diver, towed video and stereoscopic camera system. *OCEANS 2021: San Diego – Porto*, 1–10. <https://doi.org/10.23919/OCEANS44145.2021.9706039>
- Mouget, A., David, V., Acou, A., Feunteun, E., Thiriet, P., Legoff, L., & Brehmer, P. (2021). Effect of environmental parameters on acoustic characterisation of pelagic biocenoses in ultra-shallow (5-30 m) coastal areas. *OCEANS 2021: San Diego – Porto*, 1–9. <https://doi.org/10.23919/OCEANS44145.2021.9705738>