

Projet ARENA : Amélioration des connaissances sur les fonctionnalités écologiques des milieux sableux



Financeurs



Partenaires



Station STARESO
Punta Revellata – BP 33 – 20260 Calvi (Corse) - FRANCE
Tel : +00 33 (0)6 86 22 32 61
Email : stareso@stareso.corsica
Site web : www.stareso.com

N° SIRET : 80540827500016
Immatriculation au RCS : 805 408 275 RCS Bastia



Projet ARENA : Amélioration des connaissances sur les fonctionnalités écologiques des milieux sableux

Rapport final



Ce document doit être cité dans la littérature de la manière suivante :

MARENGO M., BORROSSI L., FONTAINE Q., FULLGRABE L., MARTELLI X., SEVENO J., BOULENGER A., PLAZA S., BITALY M., CHAPAT M., WOEHREL A., JAMME S., CAVALIERI G., RICHIR J., ARRANZ H., GOBERT S., LEJEUNE P., MAGNIN M., GRAFFARD C., GERVAISE C., LOSSENT J., MOUILLOT D.(2025). Projet ARENA : Amélioration des connaissances sur les fonctionnalités écologiques des milieux sableux. Projet R&D, 88 pages.

Table des matières



I. Contexte de l'étude.....	5
II. Objectif de l'étude.....	10
III. Méthodologie.....	12
IV. Résultats.....	28
V. Sensibilisation.....	76
VI. Conclusion.....	80
VII. Bibliographie.....	83



CONTEXTE DE L'ÉTUDE



1. Contexte de l'étude

La Méditerranée, reconnue pour sa richesse culturelle et historique, abrite également une biodiversité marine d'une exceptionnelle diversité (Coll et al. 2010). Cette région est reconnue comme un haut lieu de la biodiversité mondiale, avec une proportion remarquable d'espèces endémiques (Bianchi and Morri 2000).

Les écosystèmes marins méditerranéens sont constitués d'une variété d'habitats, allant du coralligène aux herbiers marins, en passant par les zones rocheuses et les substrats meubles tels que les fonds sableux (Colloca et al. 2017). Les cartographies des côtes méditerranéennes françaises, subdivisent les substrats meubles en deux sous catégories : les substrats meubles infralittoraux qui représentent 38% de la surface totale cartographiée ainsi que les substrats meubles circalittoraux qui représentent 25% de la surface totale. L'ensemble des substrats meubles représente ainsi la majorité (63 %) de la surface côtière méditerranéenne française sous-marine entre 0 et 100 mètres de profondeur. Ainsi, les fonds meubles représentent une surface plus importante que les herbiers de *Posidonia oceanica* (28% de la surface totale). Cependant, ces habitats, qui constituent une grande partie des fonds marins, sont parmi les moins étudiés. Fonds sableux, meubles, vasières ou encore cailloutis, les substrats meubles ont très longtemps été considérés comme secondaires dans le fonctionnement des écosystèmes et n'ont été que peu décrits. Réputés comme peu attrayants avec un faible intérêt écologique les fonds sableux côtiers (0 - 100 m) concentrent la très grande majorité des projets d'aménagement en mer et constitue l'habitat le plus impacté par le développement des activités humaines et notamment l'artificialisation côtière (Holon et al. 2015).

L'habitat « substrats meubles » est rarement pris en compte dans les politiques de gestion ou bien dans les études d'impacts (séquence « Eviter, Réduire, Compenser », ERC) au motif que cet habitat est colonisé essentiellement par une biodiversité dite « ordinaire ». Ces lacunes sont en grande partie facilitées par un défaut de connaissance des bénéfices fonctionnels qu'apportent les substrats meubles. Historiquement perçus comme des étendues marines de faible intérêt écologique, ces habitats sont pourtant cruciaux pour la biodiversité marine et les ressources halieutiques côtières (Fig.1).



1 Espèce d'intérêt halieutique, le chapon (*Scorpaena scrofa*) sur le milieu sableux.

Les habitats de substrats meubles peuvent abriter une grande richesse et diversité spécifique remplissant d'importantes fonctions écologiques : nourricerie, frayère, zone d'alimentation, de reproduction ou de repos. Ces biocénoses marines occupent des superficies considérables sur le plateau continental dans l'ensemble de la Méditerranée. Ils abritent de nombreuses espèces à la base de la chaîne trophique. Cette diversité permet la présence de nombreuses espèces de poissons et de crustacés particulièrement recherchées par les pêcheurs professionnels.

La méconnaissance de ces milieux concerne pour l'essentiel l'épifaune, la faune endogée vivant à l'intérieur du sédiment semble elle, mieux documentée et suivie (Donnay et al. 2014; Dubois et al. 2021). Pour cette dernière, les données acquises lors des études d'impact, les travaux de recherche, certains plans de gestion d'aires marines protégées ou bien encore les dispositifs de surveillance des différentes directives européennes, sont considérées comme abondantes (Borja et al. 2009; Cabana et al. 2013). Pour autant, leur interprétation reste bien souvent limitée à la caractérisation d'un état écologique et non pas à la caractérisation des fonctionnalités écologiques, à l'identification d'écotones ou bien encore aux rôles de ces substrats avec les autres habitats (roches infralittorales, coralligène, herbier de posidonie...) par exemple en termes de connectivité.



A ce jour, comme la plupart des biocénoses côtières, les habitats de substrats meubles sont exposés à de nombreuses pressions d'origine anthropique comme les arts trainants, le clapage en mer, l'urbanisation, les pollutions, ou encore le changement climatique (Danovaro, 2003). De plus, il est possible que ces biocénoses soient soumises à une augmentation des pressions à venir due à un report d'activité de la plaisance en lien avec la protection des herbiers (ex : interdiction de mouillage). L'étude de leur étendue spatiale, de leurs états, des fonctionnalités écologiques et de leurs réponses aux pressions qu'ils subissent reste primordiale dans un contexte de gestion durable et de protection.

Pour l'évaluation et la surveillance des populations marines, diverses techniques sont utilisées. Une multitude de techniques ont été utilisées pour collecter des données sur l'abondance des espèces marines, notamment les comptages en plongée, la vidéo sous-marine, l'acoustique, filets maillants, casiers et diverses méthodes de pêche (Davis et al. 2015).

Parmi les différentes techniques d'échantillonnage utilisées depuis les années 1950, le recensement visuel sous-marin (Underwater Visual Census, UVC) est l'une des méthodes les plus couramment appliquées (Samoilys and Carlos 2000). Le recensement visuel sous-marin est la méthode non destructive la plus couramment utilisée pour étudier les communautés marines et évaluer leur diversité, en particulier dans les habitats côtiers (Caldwell et al. 2016). Les méthodes UVC, impliquant l'observation directe par les plongeurs sous-marins, sont efficaces pour obtenir des données sur la diversité et évaluer l'état des communautés de poissons côtières (Fig.2).



2

Exemple de recensement visuel sous marin effectué par l'équipe de STARESO.

Des techniques indépendantes de la pêche telles que les UVC peuvent être utilisées pour déterminer et quantifier la richesse et l'abondance des espèces ainsi que la distribution et la taille des poissons (Edgar et al. 2004). Les techniques UVC sont utiles pour caractériser un large éventail de tailles et de comportements de poissons ainsi que les types d'habitats associés. Les UVC restent de loin la méthode la plus populaire pour étudier les populations de poissons et soutenir les décisions de conservation et de gestion des pêches (Dickens et al. 2011).

Alors que la surveillance nécessite des observations visuelles et le comptage des organismes, des progrès récents ont montré que la collecte de données acoustiques peut compléter et apporter de nouvelles informations concernant l'évaluation de la biodiversité marine. En raison de l'importance du son pour l'écologie de la faune marine, les mesures du paysage sonore sont considérées comme prometteuses pour la surveillance des espèces marines (Staaterman et al. 2013; Lindseth and Lobel 2018). Dans un habitat donné, l'environnement acoustique ou «paysage sonore» comprend les sons émis par les animaux (biophonie), les sons émis par des sources abiotiques telles que le vent ou la pluie (géophonie) et les sons émis par les humains (anthrophonie).

La surveillance acoustique passive offre une approche non invasive et non destructive qui permet d'étudier la richesse et la diversité des communautés d'espèces marines (ex : invertébrés, poissons et mammifères marins) en utilisant leurs émissions sonores (Bertucci et al. 2020; Stowell and Sueur 2020). Sa complémentarité avec d'autres méthodes réside dans le fait que les données peuvent être enregistrées en continu, sur de longues périodes (heures à années) et quelles que soient les conditions abiotiques telles que la profondeur, la lumière ou la visibilité. La surveillance acoustique passive est donc très prometteuse pour la gestion des habitats côtiers, mais ces habitats font également face au défi lié à l'impact du bruit provenant de diverses activités humaines. L'augmentation du bruit de fond au cours des 50 dernières années a été attribuée à la croissance des activités anthropiques, principalement dû au trafic maritime en particulier aux basses fréquences (<1 kHz) (Hildebrand 2009; Magnier and Gervaise 2020).



De nombreuses études ont démontré que la pollution sonore pouvait avoir des effets néfastes sur la communication, le comportement et l'état physiologique des poissons, des mammifères marins et des crustacés, comprenant des modifications des zones de frayères, des interférences avec la recherche de nourriture, ou la perturbation des voies migratoires (Celi et al. 2015). Ainsi mieux comprendre les interactions potentielles entre les bruits des activités anthropiques et le cycle de vie des espèces, est un enjeu majeur pour les années à venir.

Les véhicules télécommandés sous-marins (underwater Remotely Operated Vehicle, ROV) sont des outils de collecte pour l'évaluation de la biodiversité et la surveillance des poissons et céphalopodes dans les écosystèmes marins (Sward et al. 2019). Cette méthode utilise le champ de vision des caméras pour compter, identifier et mesurer les individus. Cette technique non destructive est utilisée pour caractériser les communautés de poissons, estimer les biomasses et étudier leurs comportements (Bond et al. 2022). Les ROV se sont avérés être une méthode robuste pour évaluer la structure des communautés de poissons dans les eaux profondes, les milieux sableux, les herbiers marins ou encore les habitats pélagiques. Ainsi, la vidéo apporte de nombreuses informations essentielles et utiles à l'amélioration des connaissances sur le milieu marin. Les progrès technologiques récents ont favorisé leur utilisation par rapport à d'autres méthodes de suivi traditionnel.

L'utilisation de la vidéo pour étudier la vie marine a connu une forte augmentation au cours des vingt dernières années, conduisant à une utilisation généralisée de diverses techniques d'enquête vidéo pour l'échantillonnage des populations marines (Macreadie et al., 2018). Cette croissance est due en partie aux progrès technologiques qui ont rendu les systèmes vidéo plus abordables et faciles à utiliser. Ces améliorations incluent une meilleure qualité vidéo, des durées d'enregistrement accrues, une réduction de la taille et du coût des enregistreurs vidéo, ainsi que des modifications des supports d'enregistrement (Kumar et al., 2023). Parmi les avantages de l'utilisation de la vidéo, on compte la possibilité d'éliminer les limitations de temps et de profondeur associées aux relevés en plongée, la capacité de vérifier les images à plusieurs reprises et la relative facilité de formation des observateurs pour traiter les enregistrements (Fig.3).

Il est important de souligner que les techniques d'échantillonnage vidéo sont également non invasives/extractives.



3 Différents modèles de ROV utilisés en baie de Calvi.

L'ADN environnemental (ADNe), est une méthode qui repose sur le principe que tous les organismes vivants, indépendamment de leur taille, stade de vie, sexe ou de leur écologie, laissent dans leur environnement des traces d'ADN résultant de leur activité biologique ou de leur décomposition après mort (Duhamet et al., 2023). Ces traces peuvent provenir de diverses sources telles que les fèces, l'urine, les gamètes, le mucus, la salive ou encore des fragments de peau.

Caractérisé par un mélange complexe d'ADN nucléaire, mitochondrial ou chloroplastique, l'ADNe peut se trouver sous forme intracellulaire (contenu dans des cellules vivantes) ou extracellulaire (libre dans l'environnement) (Dalongeville et al., 2022). Après sa libération, l'ADN est soumis à un processus de dégradation influencé par des facteurs biotiques tels que les bactéries, les champignons et les enzymes dégradantes, ainsi que par des facteurs abiotiques, incluant les radiations UV, l'acidité et les variations de température. Cependant, dans certaines conditions, notamment les environnements froids et secs, cette dégradation peut être ralentie. En particulier, dans les sédiments marins, l'ADNe peut subsister de quelques mois à plusieurs millénaires, dépendant fortement des conditions environnementales.



En milieu marin, dans la colonne d'eau, l'ADN libéré peut être détecté pour une durée relativement courte, généralement quelques jours, avant de se dégrader. Cette méthode est utilisée pour identifier, à partir d'un échantillon d'eau, l'ensemble des espèces d'un groupe taxonomique donné présentes dans le milieu étudié (ADNe metabarcoding). Cette technique, non invasive et standardisée, élimine les biais observateurs et permet de réaliser les inventaires de biodiversité, sans dérangement de la faune. Cette méthode améliore la détection des espèces de poissons rares et cryptiques qui peut échapper aux enquêtes traditionnelles (Flück et al. 2022). Ainsi, l'ADNe offre une avancée significative pour les opérations de surveillance environnementale et pour la conservation, permettant des inventaires de biodiversité plus complets et moins perturbateurs pour les écosystèmes étudiés (Polanco Fernández et al. 2021) (Fig.4).

Par conséquent, l'utilisation de méthodes diversifiées et complémentaires, telles que le recensement visuel sous-marin, l'acoustique passive, l'utilisation de ROV, et l'ADNe, offre une compréhension holistique et précise de la biodiversité présente dans ces habitats. Ces techniques, chacune avec ses propres avantages, permettent de pallier les limites associées à l'emploi d'une seule méthode et fournissent une perspective plus complète et détaillée des écosystèmes marins.

Les techniques telles que le recensement visuel sous-marin fournissent des observations directes et détaillées sur les espèces et leur comportement en milieu naturel. L'acoustique passive, quant à elle, permet de capter les sons émis par les organismes marins, fournissant des données essentielles sur des espèces souvent invisibles ou cachées.

Les ROVs permettent l'exploration des zones profondes, là où la présence humaine est limitée, capturant des images dans des zones que peu d'autres méthodes peuvent atteindre. Par ailleurs, l'analyse de l'ADNe complète ces approches en détectant les traces génétiques laissées par toutes les formes de vie présentes, y compris les plus éphémères ou les moins visibles, facilitant ainsi l'étude de la biodiversité sans perturber les espèces ni leur habitat.

Face aux changements et aux pertes de biodiversité que subissent de nombreux habitats marins, ces techniques pourraient s'avérer cruciales pour élaborer des stratégies de conservation efficaces pour ces milieux de fonds sableux et les espèces qui y sont associées (Hughes et al. 2017 ; Schluter et Pennell, 2017).



4 Illustration des possibilités d'inventaire de la biodiversité grâce à l'ADNe.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE



2. Objectifs de l'étude

Le projet ARENA a vocation à approfondir l'état des connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes marins au sein des habitats de substrats meubles/fonds sableux méditerranéens, de 0 à 100 mètres de profondeur. Cette étude vise à pallier le manque d'informations et à fournir des données scientifiques robustes pour la conservation et la gestion durable de ces écosystèmes (Fig.5). Les objectifs spécifiques du projet sont détaillés comme suit :

1. Évaluation et inventaire de la biodiversité

- Réaliser et compléter les inventaires de la biodiversité des communautés marines dans les milieux sableux, en évaluant la flore et la faune épigée pour identifier la richesse spécifique, la structure, et la diversité des espèces.

2. Suivi spatio-temporel

- Effectuer un suivi continu et détaillé des variations des communautés marines sur une période d'un an, afin de documenter les changements dans la composition et l'abondance des espèces, et analyser les tendances temporelles et spatiales au sein de ces habitats.

3. Caractérisation des interfaces écologiques et zones fonctionnelles

- Mieux caractériser les interfaces entre les zones sableuses et les autres habitats marins, tels que les herbiers de posidonie.
- Identifier et définir l'importance écologique des milieux sableux, reconnaissant leur rôle comme écotones, et localiser les zones de fonctionnalités écologiques clés telles que les frayères, les nourriceries et les voies de migration.

4. Évaluation des impacts anthropiques

- Identifier et quantifier les pressions anthropiques influençant ces habitats, spécialement l'impact de l'ancrage et d'autres activités humaines (ex : pollutions), pour évaluer leur effet sur la structure et le fonctionnement des communautés marines.

Ces objectifs sont conçus pour fournir une vue d'ensemble holistique et intégrée des écosystèmes marins des substrats meubles, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées en matière de politique environnementale et de conservation marine.



MÉTHODOLOGIE



3. Méthodologie

3.1. La zone d'étude : la baie de Calvi

Située à l'extrême Nord-Ouest de la Corse, la baie de Calvi largement ouverte vers le Nord est le point le plus proche de la France continentale. La baie de Calvi, est située au sein de la masse d'eau côtière FRECO1AB « Pointe Palazzu – Sud Nonza » du bassin Rhône Méditerranée et Corse.

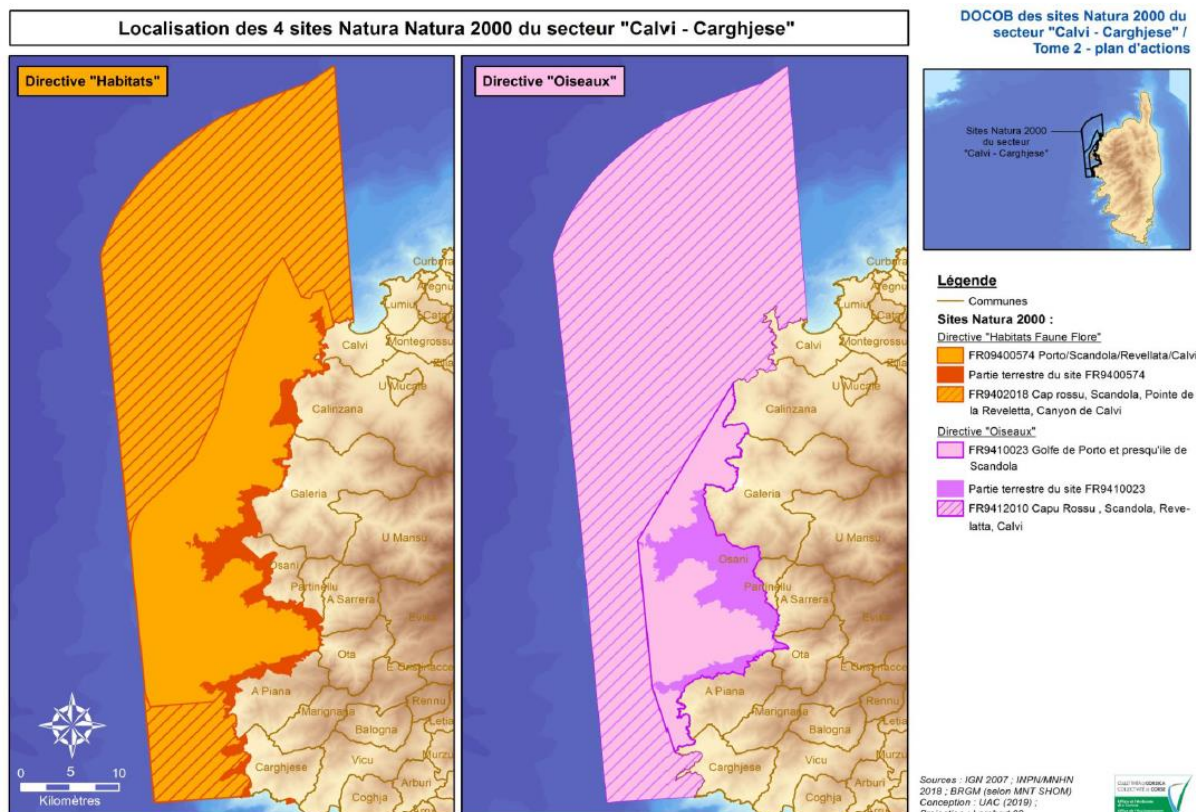
La baie est séparée en 2 par la citadelle située en son centre juste au Nord du port. Sa partie Est, délimitée par la pointe de Spano et la citadelle, possède une grande plage en fond de baie au large de laquelle de multiples activités de loisirs (école de voile, jet ski, zone de baignade...), une zone de mouillages organisée et une aquaculture cohabitent. Sa partie Ouest, située entre la pointe de la Revellata et la citadelle, fait partie de la zone Natura2000 « Porto-Scandola-Revellata-Calvi-Calanches de Piana » et est composée de 2 plus petites baies situées de part et d'autre de la pointe de l'Oscelluccia et au fond desquelles se trouvent les plages de l'Alga et de l'Oscelluccia.

La baie de Calvi est une baie caractéristique du bassin nord-ouest méditerranéen où coexistent un ensemble d'usages et où se développe un ensemble d'écosystèmes marins emblématiques.

Cette baie est donc un site où pressions anthropiques locales et influences climatiques globales conditionnent l'ensemble des processus naturels (Fullgrabe et al., 2023).

Le projet se situe en partie au sein d'une zone Natura 2000 (Fig. 6). En effet, la moitié Ouest de la baie de Calvi, presqu'île de la Revellata incluse, est entièrement située au sein du secteur « Calvi-Carghjese ». Ce secteur s'étend le long de la façade maritime nord-occidentale de la Corse sur une superficie de 127 500 ha. Il comprend 2 ZSC et 2 ZPS :

- la ZSC FR9400574 « Porto / Scandola / Revellata / Calvi / Calanches de Piana » (zone à 83% marine d'environ 50 000 ha) ;
- la ZSC FR9402018 « Cap Rossu, Scandola, Pointe de la Revellata, Canyon de Calvi » (zone 100% marine d'environ 74 000 ha) ;
- la ZPS FR9410023 « Golfe de Porto et presqu'île de Scandola » (zone à 67% marine d'environ 25 500 ha) ;
- la ZPS FR9412010 « Capu Rossu, Scandola, Revellata, Calvi » (zone 100% marine d'environ 99 500 ha).



La baie de Calvi abrite l'ensemble des écosystèmes marins emblématiques et caractéristiques de la mer Méditerranée. Ces écosystèmes jouent de nombreux rôles écologiques, rendent de nombreux services écosystémiques mais sont relativement sensibles aux perturbations environnementales d'origine naturelle et anthropique. Outre la richesse de la baie de Calvi en termes d'écosystèmes et d'habitats, celle-ci est considérée comme présentant un bon état de conservation écologique. En effet de nombreux travaux menés dans la baie et le recours d'indicateurs de qualité du milieu s'accordent sur le caractère préservé et peu impacté par l'activité humaine de la baie de Calvi.

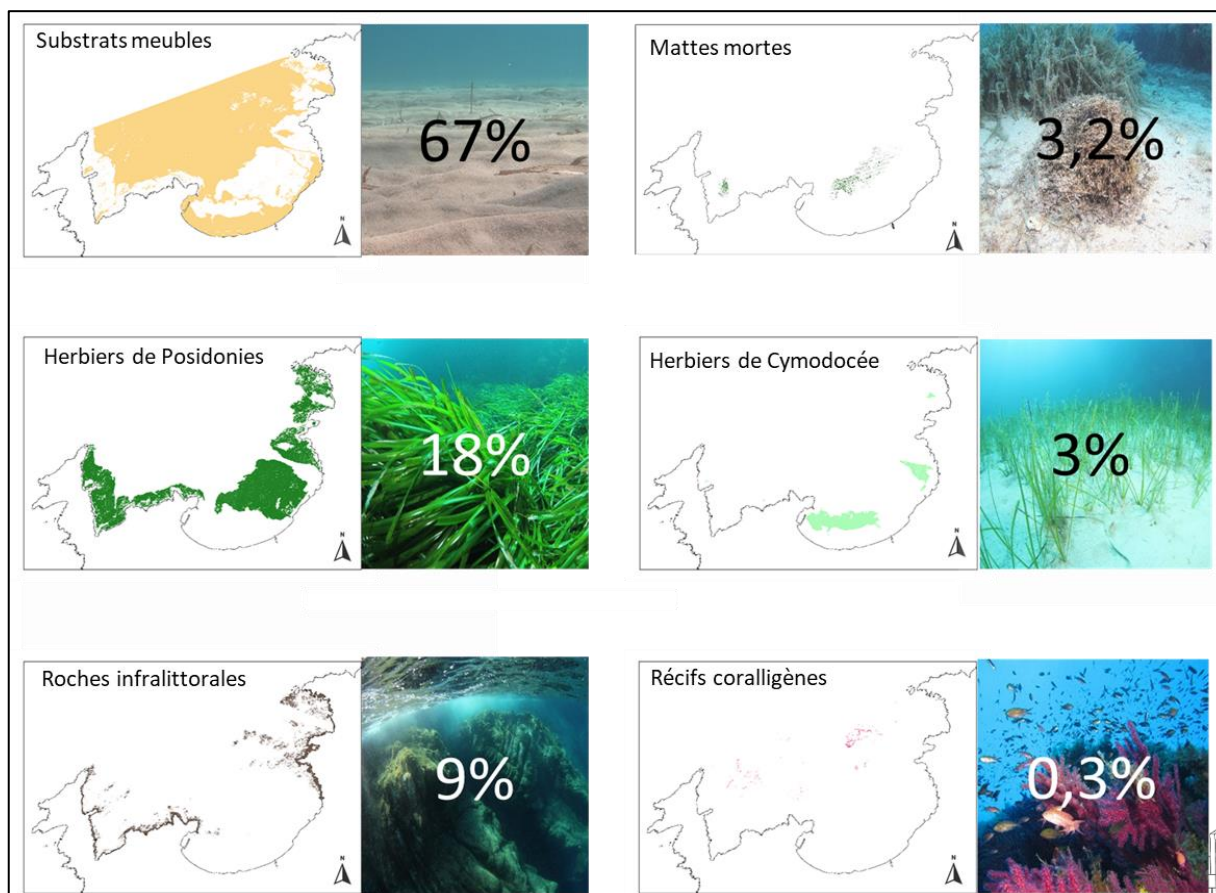
Malgré un bon état de conservation écologique, la baie de Calvi est caractérisée par la présence de pressions anthropiques liées au développement des activités humaines. En effet, outre l'effet du changement climatique global, les pressions d'origine anthropique auxquelles sont exposés ces écosystèmes sont :

- le développement de la population, notamment touristiques, qui a un impact sur les rejets domestiques via une station d'épuration et un émissaire en mer ;
- le développement des activités autour du bassin versant, dont la viticulture, qui, via les cours d'eau et les eaux de ruissellement peut influencer la baie ;

- le développement des activités touristiques en mer tels que la plaisance, la plongée, le nautisme et les activités portuaires ;
- l'activité aquacole avec la culture du loup (*Dicentrarchus labrax*) ;
- les activités de pêches professionnelles, plaisancières incluant la chasse sous-marine.

Des cartographies des biocénoses marines de la baie de Calvi ont été réalisées par acoustique grâce à l'emploi d'un sondeur multifaisceaux. Ces données ont permis de caractériser la nature des fonds marins au niveau de l'aire d'étude avec une précision centimétrique (résolution d'environ 10 cm) de les classer en 7 habitats et de calculer leur surface respective de la manière suivante (Fig. 7) :

- Substrats meubles (tous types de sédiments confondus) (67%) ;
- Herbier à *Posidonia oceanica* (18%) ;
- Substrats rocheux à algues photophiles (9%) ;
- Matte morte de Posidonie (3,2%) ;
- Herbier à *Cymodocea nodosa* (3%) ;
- Coralligène (0,3%) ;



7

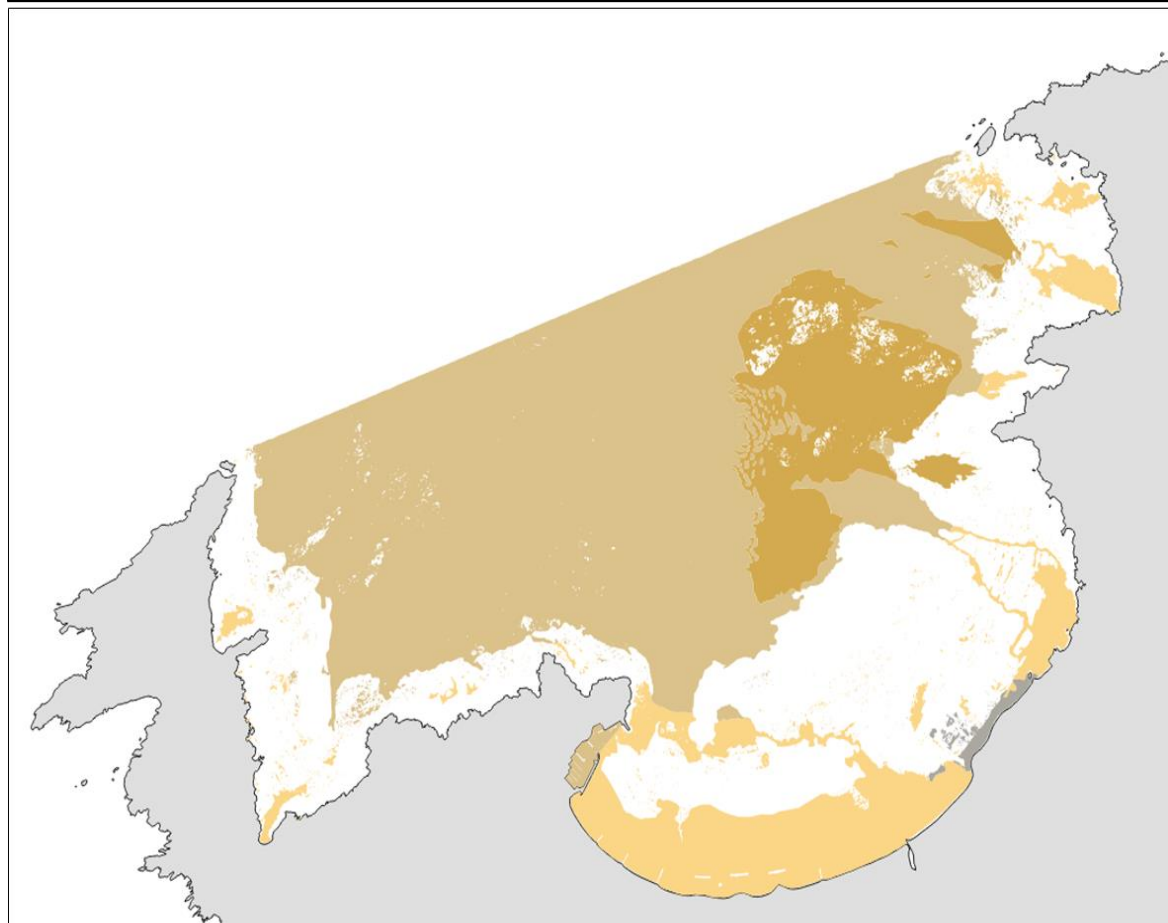
Cartographie illustrant les biocénoses marines de la baie de Calvi (Seaviews, 2018 ; STARECAPMED 2012-2021)

La baie de Calvi est donc composée à 67% de substrats meubles dont en allant de la côte et les plus faibles profondeurs vers le large et les plus grandes profondeurs (Fig. 8) :

- 68% de détritiques côtiers (9 971 314 m² soit environ 997 ha).
- 17% de sables fins bien calibrés (2 526 431 m² soit environ 252 ha) ;

- 15% de sédiments grossiers (2 171 529 m² soit environ 217 ha) ;
- 1% de galets infralittoraux (90 961 m² soit environ 9 ha) ;

Cartographie des biocénoses de type substrats meubles au sein de la baie de Calvi



Biocénoses marines

- Détritiques côtiers (9 971 314 m², 997 ha, 68 %)
- Galets infralittoraux (90 961 m², 9 ha, 1 %)
- Sables fins bien calibrés (2 526 431 m², 252 ha, 17 %)
- Sédiment grossier (2 171 529 m², 217 ha, 15 %)

0 0,5 1 km



Sources des données :
 - STARESO (cartographie du sol et du sous-sol, AMO ZMEL)
 - Seaviews, 2018, 2021 (Biocénoses)
 - SHOM/IGN, 2013 (trait de côte histolitt v2)

Système de coordonnées :
 WGS 84 / EPSG 4326



Réalisation : STARESO



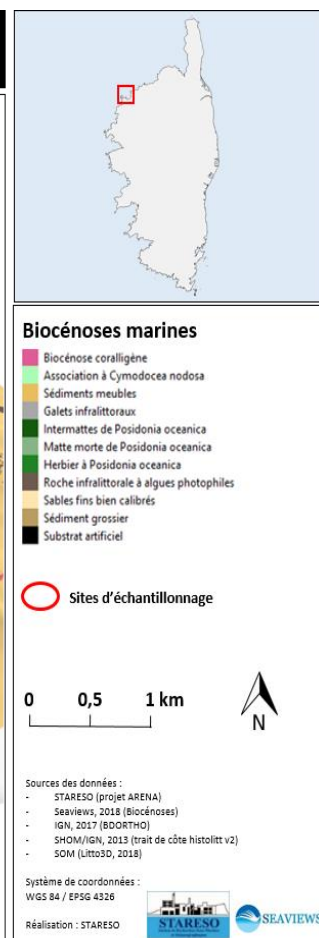
3.2. Les sites d'étude

Cette étude s'est déroulée dans la baie de Calvi, précisément sur les sites de l'Alga, et l'Oscelluccia, où cinq stations de suivi ont été établies à des profondeurs allant de 10 à 127 m. Ces sites ont été sélectionnés en raison de leurs caractéristiques géomorphologiques distinctives, comme la complexité paysagère et la topographie, ainsi que de leur richesse biologique.

De plus, l'impact des activités humaines, telles que la plaisance, ou la pêche ont également été un critère déterminant dans le choix de ces sites.

La station 1 devant STARESO (STARESO 40), correspondant à des habitats de substrats meubles (détritique côtier et sable fin) compris entre 40 et 100 m de profondeur peut être considérée comme une zone témoin (« le moins sous-pression »). Elle est située à proximité immédiate d'un herbier de posidonie sur sable qui est développé, dense et continu, c'est un herbier considéré comme de référence en Méditerranée (Gobert 2002). Cette zone de référence va subir un report du mouillage des grandes unités de plaisance (24m) en lisière des milieux sableux (Fig.9).

PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE PROJET ARENA BAIE DE CALVI



9 Localisation des 5 sites d'étude du projet ARENA en baie de Calvi.

La station 2 (Oscelluccia 12) et la station 3 (Alga 12) correspondent à des habitats de substrats meubles entre 0 et 15 m de profondeur. Ce sont des stations considérées comme des poches de sable localisées dans des criques côtières entourées d'herbiers de posidonie. Ces zones ont été sélectionnées car elles subissent, depuis des années, une importante pression d'ancrage (petite plaisance) et les dommages causés par cette dernière ont été identifiés par cartographie fine dans le cadre du projet STARECAPMED. En baie de Calvi, environ 8 ha d'herbiers ont été détruits entre 2012 et 2018 à cause du mouillage de plaisance (Fullgrabe et al. 2023) (Fig.10)

La station 4 (Alga 40) correspond à des habitats de substrats meubles (détritique côtier et sable fin) à une profondeur moyenne de 40 m. Cette station peut être considérée comme une zone interfacée avec des zones d'herbiers de posidonie sous pression d'ancrage. Cette zone a été sélectionnée car elle subit, depuis des années, une importante pression d'ancrage impliquant l'ancrage d'unités supérieures à 24m (grande plaisance). Comme déjà observé le report de la pression d'ancrage sur cette zone va être augmenté (Fig.11).



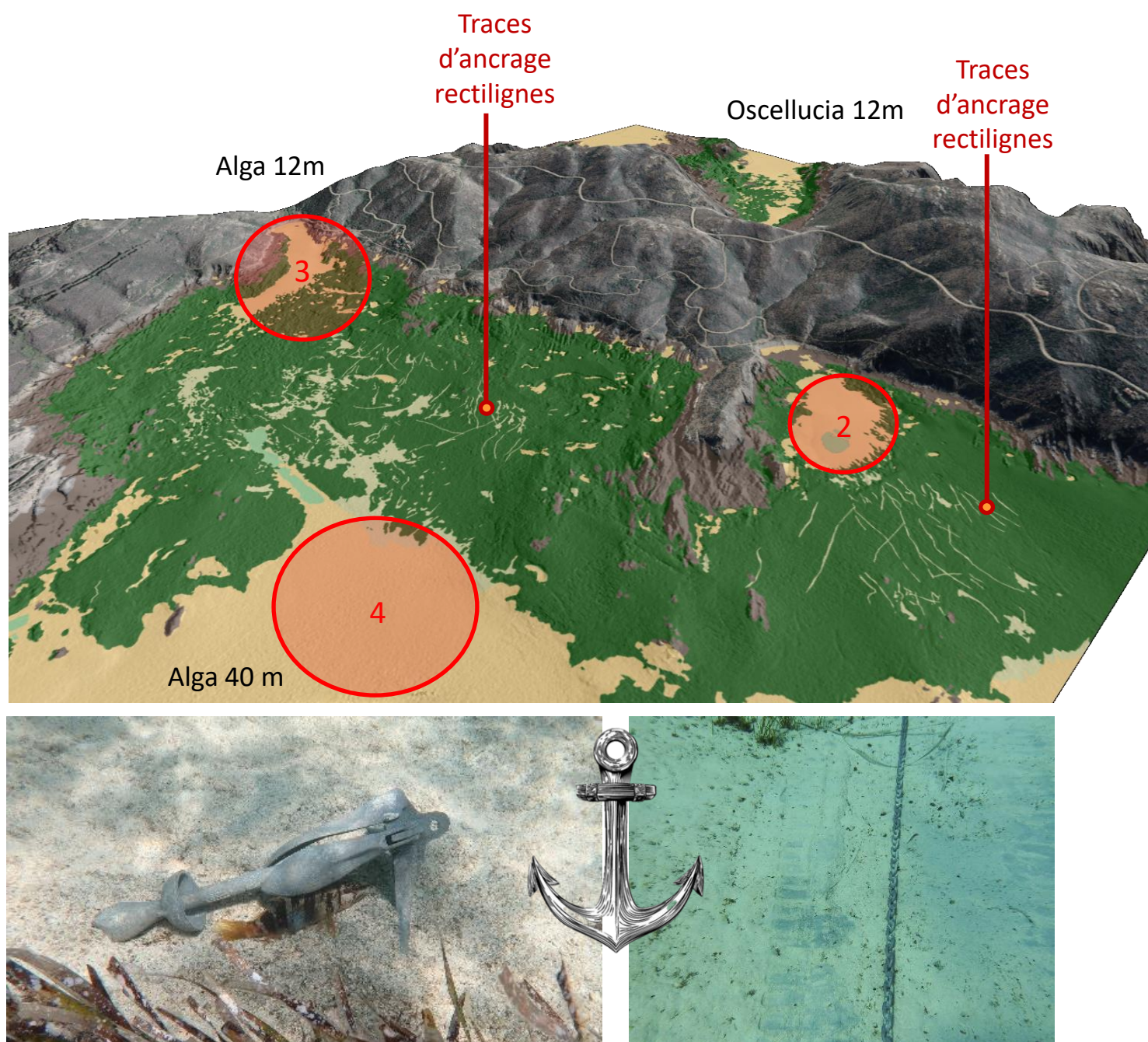
10

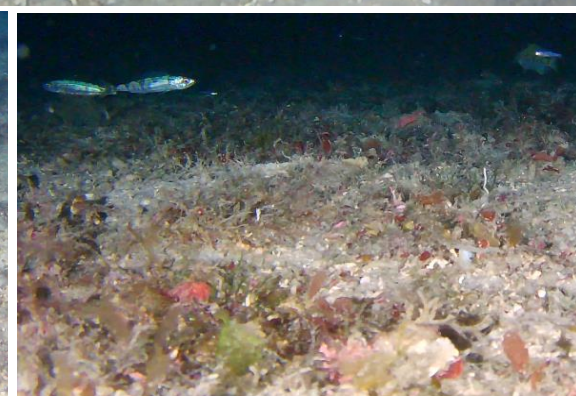
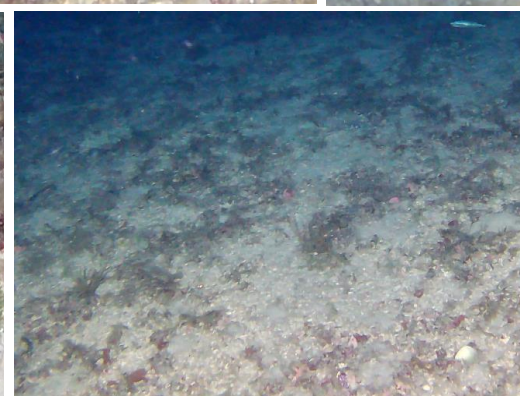
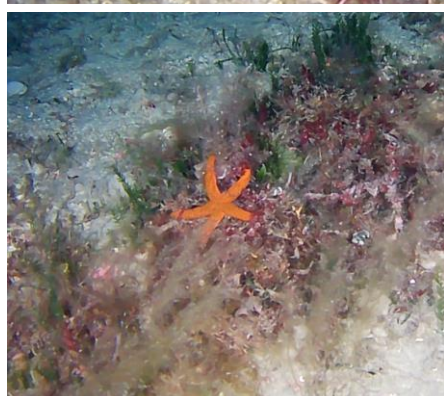
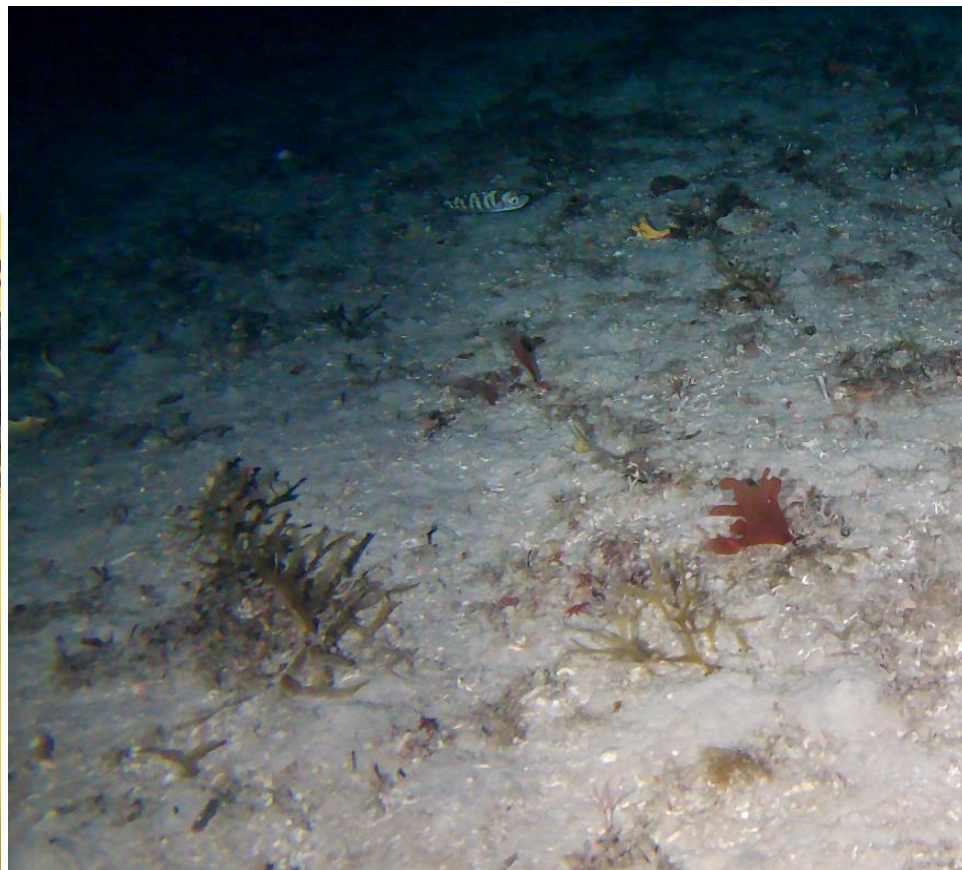
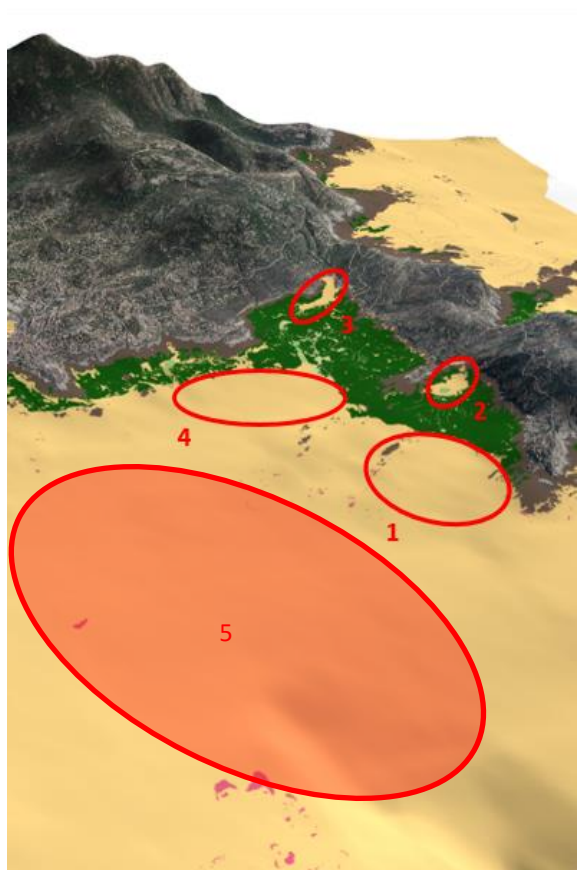
Localisation des sites d'étude Alga et Oscelluccia, photos prises en période estival lors du pic de fréquentation plaisancière.

La station 5 (Calvi 40-100) se compose d'habitats de substrats meubles, principalement constitués de détritique côtier et de sable fin, et s'étend entre 40 et 127 m de profondeur. Elle est située à proximité immédiate de la tête du canyon sous-marin de Calvi. Ce milieu est caractérisé par une homogénéité relative des sédiments meubles, typique des zones bathymétriques intermédiaires à profondes. Cette zone est également identifiée comme étant de plus en plus exposée au report des activités de grande plaisance, notamment le mouillage des unités supérieures à 24 m (Fig.12).

Par ailleurs, elle constitue une zone où sont pratiquées des activités de pêche professionnelle et récréative, ce qui renforce son intérêt écologique et économique.

Ces sites apparaissent donc comme un lieu d'étude idéal pour évaluer la biodiversité marine des habitats à substrats meubles et suivre l'influence potentielle des activités humaines sur ces communautés marines.





12 Cartographie des biocénoses et localisation du site 5, entre 40 et 100 m de profondeur.

3.3. Matériels et méthodes

Afin de mieux comprendre la structure et la dynamique des communautés marines, l'étude de la diversité et de l'abondance des espèces est fondamentale (Mallet et al., 2014).

Ainsi, l'échantillonnage a été fait à l'aide de méthodes non destructives (Recensement visuel en plongée sous-marine/ underwater visual census, ROV) et de technologies émergentes novatrices (Surveillance acoustique passive/ bioacoustique et ADN environnemental). A travers la combinaison de méthodes, cela a permis de collecter un ensemble de données qualitatives et quantitatives complémentaires et d'avoir une vision précise des communautés marines présentes sur les habitats de substrats meubles.

3.3.1. Les recensements visuels sous-marins

Les recensements visuels sous-marins (Underwater Visual Census, UVC) ont été réalisés par des plongeurs biologistes de STARESO selon la méthode des transects linéaires (Harmelin-Vivien et al., 1985). Chaque transect a été prospecté dans une zone sableuse, entre 12 et 40 mètres de profondeur sur les sites Alga 12, Oscellucia 12, STARESO 40 et Alga 40.

Le long de chaque transect, toutes les espèces présentes ont été identifiées, dénombrées, et leur taille estimée avec une précision au centimètre près. Une attention particulière a été portée à la biodiversité des communautés épigées caractéristiques des habitats sableux, afin d'évaluer la richesse spécifique, la structure et la diversité des assemblages.

La biomasse des espèces a été estimée à partir des relations taille-poids spécifiques à chaque espèce, avec des données tirées principalement de la base de données FishBase (www.fishbase.se/search.php).

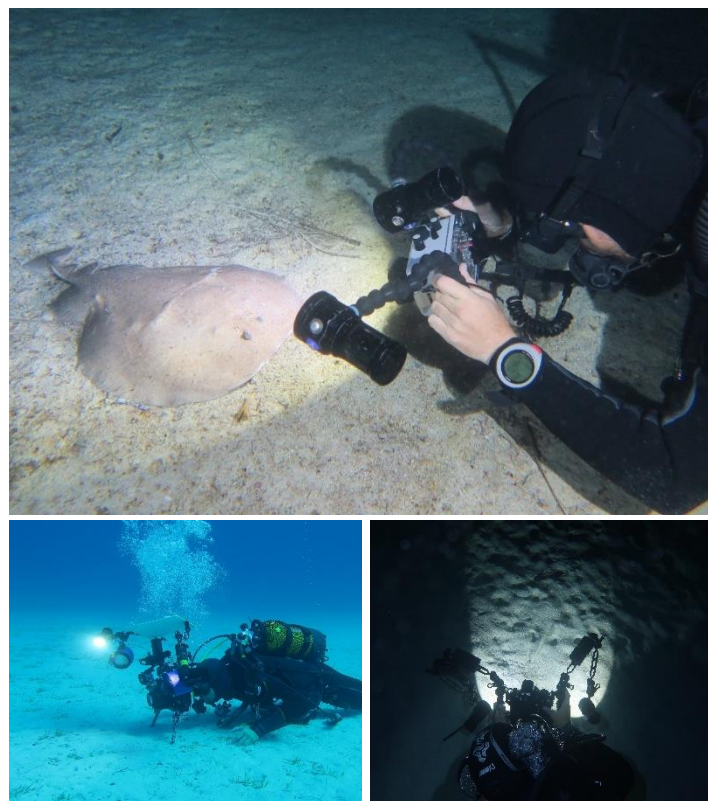
Une partie des observations a également porté sur les interactions entre les zones sableuses et les habitats adjacents, tels que les herbiers de posidonies, afin d'identifier les interfaces écologiques et leur rôle en tant qu'écotones.

Les relevés ont été effectués en équipe de deux plongeurs simultanément (réplicats), avec une fréquence de quatre plongées par saison (printemps, été, automne, hiver) et par site, pour un total de 64 recensements (128 plongées).

Ces recensements ont été effectués entre le 7 juin 2023 et le 14 mars 2024. Pour chaque saison et site, une plongée diurne (10 h/14 h) et trois plongées nocturnes (18h-23h, suivant les saisons) ont été réalisées. Les conditions environnementales (température, visibilité, courant, luminosité) ont été notées avant chaque relevé afin de garantir la comparabilité entre saisons et sites (Fig.13).

Les plongées ont permis de documenter des comportements spécifiques et récurrents, particulièrement chez des espèces rares ou emblématiques, tels que des comportements de reproduction ou des activités trophiques. Ces comportements ont été enregistrés en photo et vidéo et annotés en association avec les autres paramètres d'observation (site, période, habitat). Les vidéos ont été analysées a posteriori pour préciser la nature des comportements et leur rôle écologique dans ces milieux.

Les données issues des UVC ont été exploitées pour calculer la richesse spécifique (S), les indices de diversité (Shannon-Wiener H' , Pielou J'), ainsi que la densité et la biomasse par m^2 . Ces indicateurs ont permis d'évaluer la composition et la structure des communautés entre sites et saisons. Cette approche a permis de collecter des données précieuses pour un suivi spatio-temporel des variations des communautés marines et pour la caractérisation des zones fonctionnelles essentielles, telles que les frayères et les nourriceries.



13

Plongeurs de STARESO effectuant les recensements visuels en plongée sous-marine (jour et nuit).

3.3.2. L'ADN environnemental

Les prélèvements d'ADNe ont été réalisés sur quatre sites fixes suivis durant un an, à raison d'une campagne par saison (soit 4 campagnes : printemps, été, automne, hiver). Les échantillonnages ont été réalisés simultanément aux prospections biologiques, entre 15 et 40 m de profondeur, directement dans la zone d'étude afin de cibler la masse d'eau associée aux habitats prospectés (Fig.14).

Sur chaque site, deux réplicats ont été réalisés afin de renforcer la robustesse des détections et de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du signal ADN.

Au total, ce dispositif représente :

- 4 sites × 2 réplicats × 4 saisons = 32 échantillons d'ADNe sur l'année.

L'échantillonnage a été effectué directement en plongée à l'aide d'une pompe péristaltique étanche à double tête (Subspace, Geneva, Switzerland), offrant un débit nominal d'environ 1,0 L·min⁻¹. Le choix d'une pompe péristaltique permet de limiter les contaminations, car l'eau pompée n'entre en contact qu'avec le tuyau, facilement remplaçable, et non avec des éléments internes non nettoyables. Les tuyaux ont été changés entre chaque station afin de limiter tout risque de contamination croisée.

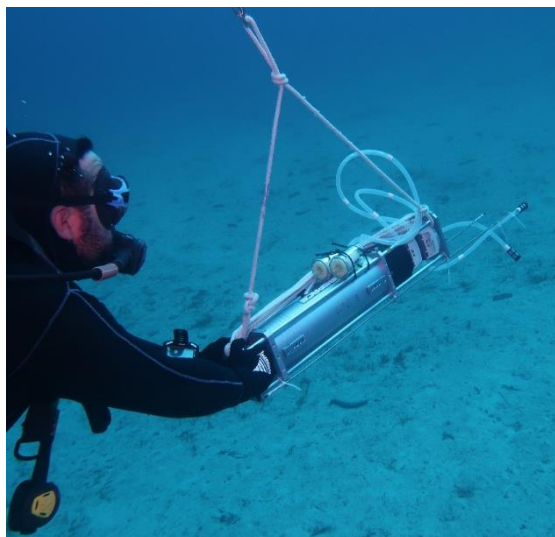
La filtration a été réalisée sur des capsules filtrantes encapsulées à large surface, avec une taille de pore réduite de 0,20 µm, afin de maximiser la capture des fragments d'ADNe (particules fines et ADN libre ou associé). Pour chaque échantillon, un volume standardisé de 30 L a été filtré. Avec un débit réglé à 1 L·min⁻¹, la durée de filtration était d'environ 30 minutes par échantillon.

Immédiatement après filtration, la capsule a été vidée de l'eau résiduelle puis remplie de 80 mL de tampon de conservation CL1 (SPYGEN) (tampon de lyse : Tris-HCl 0,1 M, EDTA 0,1 M, NaCl 0,01 M, N-lauroyl sarcosine 1 %, pH 7,5–8). Ce tampon permet une conservation à température ambiante pendant plusieurs semaines à plusieurs mois jusqu'à extraction.

Chaque capsule a été ensuite fermée hermétiquement, étiquetée, puis stockée jusqu'à transfert. Les métadonnées associées (site, date, heure, profondeur, coordonnées, opérateurs, conditions de mer, volume filtré) ont été renseignées et transmises au laboratoire avec les échantillons.

Les analyses de laboratoire (extraction, amplification, purification, séquençage nouvelle génération et traitement bioinformatique) ont été réalisées par la société SPYGEN, spécialisée dans l'ADNe, qui a également fourni le matériel de prélèvement (kits de filtration, filtres encapsulés 0,20 µm, solutions tampons, tuyaux, crépines, gants, pompe péristaltique).

Les extractions ont été réalisées dans une salle dédiée à l'ADN rare ou dégradé. Afin de contrôler la pureté des consommables et de détecter d'éventuelles contaminations croisées, des contrôles négatifs ont été intégrés à chaque étape (extraction négative et PCR négative) et analysés en parallèle des échantillons.



L'ADNe extrait a été amplifié par PCR à l'aide de marqueurs adaptés à la détection des vertébrés marins, notamment poissons téléostéens et élamobranthes. Afin de maximiser la sensibilité et limiter l'effet stochastique lié à la faible concentration d'ADNe, 12 PCR répliquées ont été réalisées par échantillon (Fig.15).

Les bibliothèques ont été séquencées par séquençage haut débit (NGS) sur plateforme Illumina (type MiSeq/NextSeq selon le run). Les données ont été traitées via un pipeline bioinformatique dédié comprenant filtrage qualité, élimination des erreurs d'amplification/séquençage et assignation taxonomique par comparaison aux bases de référence SPYGEN MED2022® et GenBank®.

Les résultats ont été fournis sous forme, pour chaque échantillon, d'une liste d'espèces détectées, associée au nombre de séquences attribuées et au nombre de réplicats PCR positifs (sur 12). Dans certains cas, la région ciblée ne permet pas de différencier certaines espèces présentant des séquences identiques : les taxons sont alors identifiés au niveau du genre, de la famille ou regroupés en complexes d'espèces.



PRINCIPALES ÉTAPES DE L'ANALYSE



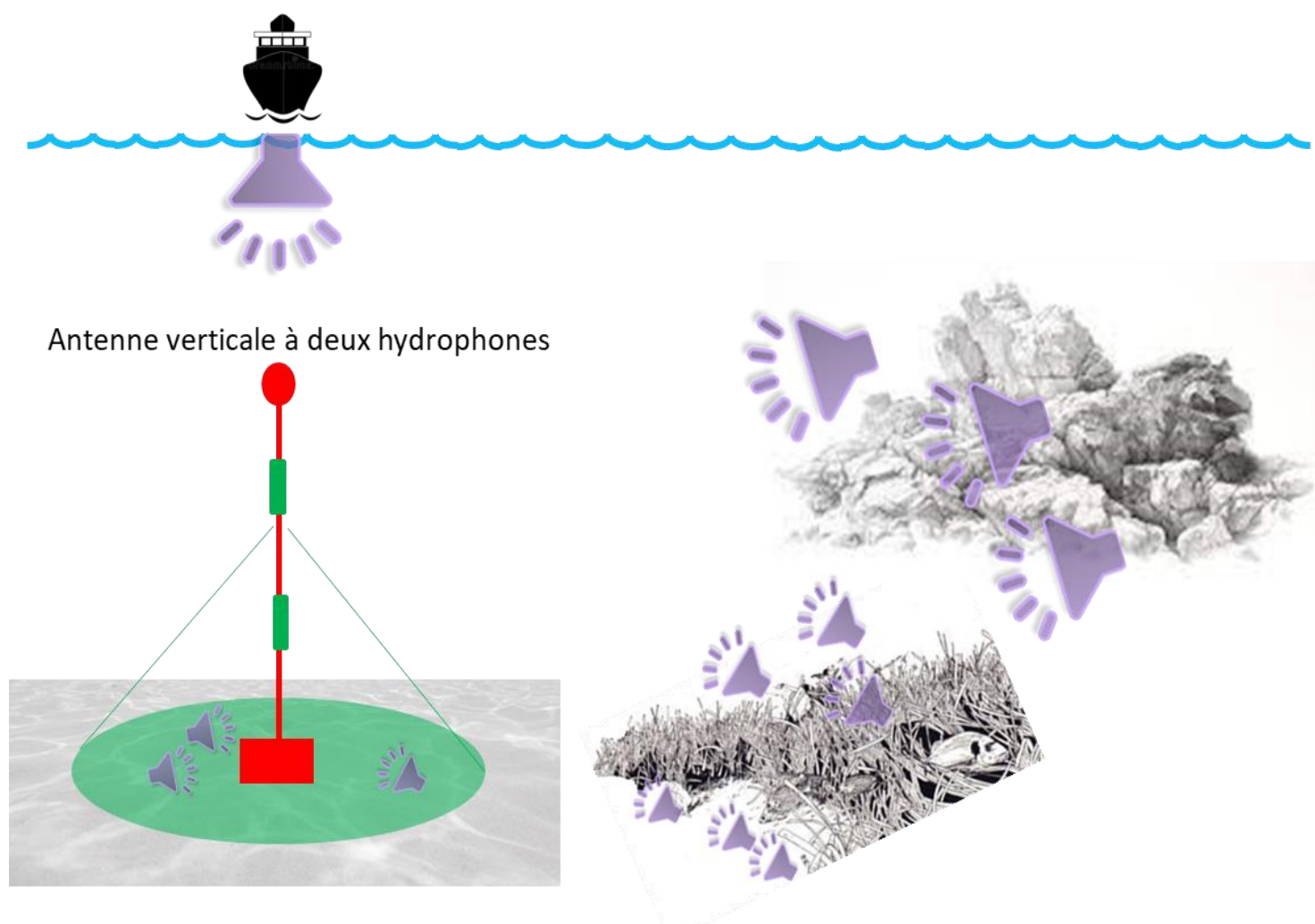
3.3.3. La surveillance acoustique passive

Un enregistreur acoustique positionné sur une station va entendre les sons émis par les invertébrés marins, les poissons et les cétacés (la biophonie) et aussi le bruit rayonné par les bateaux à moteur dans le disque de captation de l'enregistreur dont le rayon varie en fonction de la nature de l'émetteur. Des études ont montré que la biophonie benthique existait tant pour les roches, les herbiers que les substrats sableux et que les niveaux sonores de la biophonie des roches étaient supérieurs à ceux des herbiers qui eux aussi étaient supérieurs à ceux de substrats meubles (Lossent et al, 2017).

Ainsi, sans prendre de précaution un enregistreur positionné sur un substrat meuble peut entendre des sons provenant des herbiers et roches jusqu'à 2 km.

Pour permettre une écoute et des analyses locales, des techniques d'écoute directionnelle ont été mises au point (Gervaise et al, 2019) et testées avec succès sur les substrats sableux en baie de Calvi (Lossent et al, 2017). Les enregistreurs acoustiques sont connectés à une antenne verticale à deux hydrophones pour écouter un disque centré sur l'antenne et positionné sur le fond d'un rayon réglable entre 2 et 10 m. Ainsi les antennes et leurs enregistreurs permettent une écoute locale des sons produits par les animaux du substrat uniquement (Fig.16).

Cette écoute directionnelle est valable pour la biophonie benthique mais elle ne s'applique pas aux sons émis par les poissons et aux sons émis par les bateaux. Pour les sons des poissons le caractère local de l'écoute est assuré par la faible distance de propagation des sons que nous évaluons à 50 m.



16

Schéma conceptuel présentant la discrimination que permet un réseau d'hydrophones des différentes composantes du paysage acoustique.

Concernant les systèmes déployés sur les deux sites, les mesures des hydrophones (HTI 92, <https://www.hightechincusa.com/products/hydrophones/hti92wb.html>) sont mises en mémoire dans un enregistreur acoustique autonome (RESEA 4 voies, RTSYS, <https://rtsys.eu/fr/acoustic-recorders>).

Les caractéristiques de l'instrumentation placent la chaîne de mesure utilisée dans la gamme haute des solutions de mesure utilisées en acoustique passive. Elle génère un bruit propre faible (niveau de bruit inférieur à 10 dB du niveau de bruit de mer minimal renseigné par le modèle de Wenz (Wenz, 1962)), couvre une grande gamme de fréquences (5 Hz à 78 kHz) sur une dynamique de 24 bits, en outre la chaîne est totalement calibrée en termes de niveau mesuré. Par ses caractéristiques « haut de gamme », l'instrumentation est parfaitement adaptée à la captation des sons émis par les poissons, les invertébrés marins et les sons anthropiques. L'enregistreur est autonome en énergie et son fonctionnement est automatique. Il permet en l'état de mesurer les sons environ 40 heures sur 4 voies.

L'instrumentation déployée sur chaque site de mesure est composée d'un enregistreur acoustique autonome à 4 voies synchronisées dont deux voies sont connectées à un réseau vertical de 2 hydrophones positionnés respectivement à 1 m et 4 m du fond marin.

Ce réseau d'hydrophones innovant permet de localiser les sons d'invertébrés benthiques sur le fond. Les deux sites de déploiement des capteurs acoustiques se trouvent dans la baie de Calvi sur les sites STARESO 40 et Alga 12. Le 1er site de déploiement (STARESO 40) se trouve sur la limite inférieure de l'herbier à 40 m de profondeur à proximité d'un herbier de référence de la STARESO, il constitue donc le site de référence (sans pression d'ancrage).

Le 2ème site (Alga 12) se situe dans la rivière de retour de la baie de l'Alga à 12 m de profondeur à proximité d'un herbier impacté par les ancrages et subissant notamment une forte pression anthropique en période estivale.

Les échantillonnages acoustiques ont été réalisés sur les 4 saisons à raison de 5 jours de mesure tous les 3 mois sur les deux sites. Huit sorties en plongée ont permis d'équiper les 2 sites sur une totalité de 45 jours de mesure. Le Tableau 1 présente le calendrier des sorties.

Tableau 1. Calendrier des sorties pour la mise à l'eau et le relevage de l'instrumentation.

Date	Action
24/05/2023	Mise à l'eau des enregistreurs sur les 2 sites de mesure pour la session PRINTEMPS
31/05/2023	Relevage des enregistreurs de la session PRINTEMPS
01/09/2023	Mise à l'eau des enregistreurs sur les 2 sites de mesure pour la session ETE
06/09/2023	Relevage des enregistreurs de la session ETE
29/11/2023	Mise à l'eau des enregistreurs sur les 2 sites de mesure pour la session AUTOMNE
08/12/2023	Relevage des enregistreurs de la session AUTOMNE
07/03/2024	Mise à l'eau des enregistreurs sur les 2 sites de mesure pour la session HIVER
15/03/2024	Relevage des enregistreurs de la session HIVER



Une fois l'écoute directionnelle réalisée et focalisée sur les substrats meubles ou les interfaces, les productions sonores locales ont été analysées quantitativement.

L'analyse comprend deux volets :

- Volet 1 : Quantification de la biophonie,
- Volet 2 : Quantification de l'anthropophonie.

Les analyses reposent sur des algorithmes dédiés à la détection, à la classification et au dénombrement des sons « intéressants » mis au point par Chorus lors de la dernière décennie et adaptés au besoin du projet ARENA.

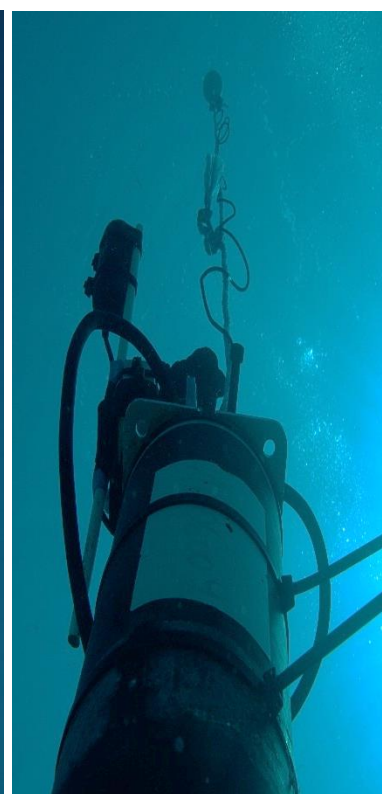
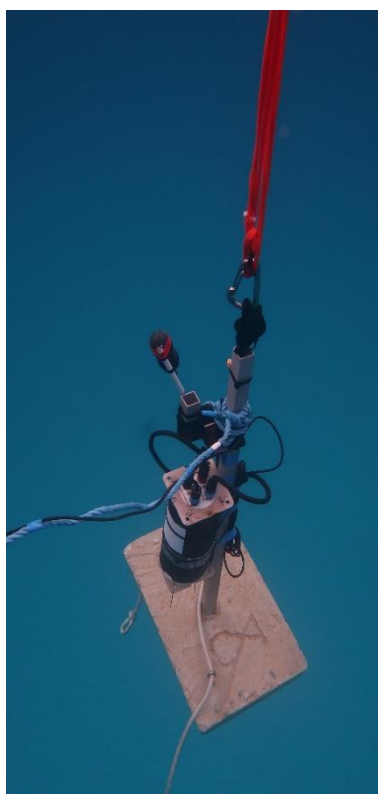
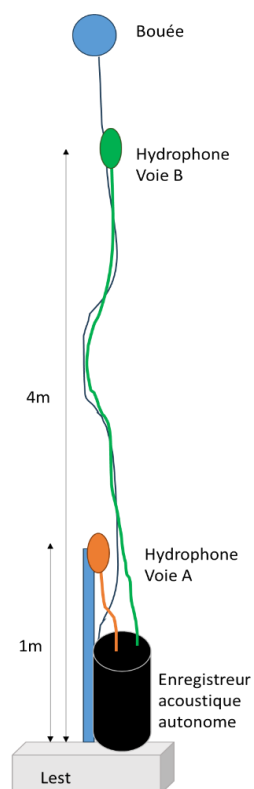
Pour le volet 1 (Biophonie), l'attention a été portée sur :

- **Les poissons** : les espèces clés, dont la signature acoustique était connue (Parmentier et al., 2018 ; Di Iorio et al., 2020) et pour lesquelles des détecteurs automatisés étaient disponibles (Le Bot et al., 2015), ont été étudiées. La biophonie globale de l'ensemble des poissons (Di Iorio et al., 2018 ; Désirera et al., 2019 ; Di Iorio et al., 2021) a également été analysée. Pour chaque station et chaque période de mesure, le nombre de sons émis par les poissons par unité de temps a été produit, et les variabilités associées à la position et à la saison ont été examinées (Fig.17).

- **Les invertébrés**, la biophonie globale produite a été considérée, et pour chaque station ainsi que pour chaque période de mesure, le nombre de sons émis par les invertébrés par unité de temps et par unité de surface a été élaboré afin de caractériser localement l'écosystème (Lossent et al., 2011 ; Gervaise et al., 2019).

Pour le volet 2 (Anthropophonie), l'attention a été portée sur :

- **Le dénombrement des passages d'embarcations** motorisées à partir de la signature acoustique particulière créée par une source sonore en mouvement (Gervaise et al., 2012 ; Magnier et Gervaise, 2020) ;
- **L'association à ces passages de plusieurs métriques de la DCSMM** présentant le niveau de pollution acoustique et la gêne acoustique générée (Magnier et Gervaise, 2020).



17

Photo des déploiements d'hydrophones réalisés sur les 2 sites dans le cadre du projet ARENA.

3.3.4. Le véhicule sous-marin téléguidé (ROV – Remotely Operated Vehicle)

Afin de compléter les observations réalisées d'étendre la prospection à des profondeurs non accessibles aux plongeurs, un véhicule sous-marin téléguidé (ROV – Remotely Operated Vehicle) a été utilisé sur l'ensemble des sites étudiés. Un drone sous-marin téléguidé Fifish Pro W6 (Qysea), dédié à l'exploration et à l'inspection des environnements subaquatiques, a été déployé lors des prospections. Ce dispositif a permis de réaliser des prospections standardisées, reproductibles, et associées à un enregistrement vidéo continu pour une analyse a posteriori.

Le ROV utilisé est relié au navire par un câble assurant à la fois l'alimentation et la transmission des données en temps réel. Il est piloté depuis la surface par un opérateur spécialisé de STARESO, à l'aide d'une interface de contrôle dédiée, avec retour vidéo direct sur support mobile (smartphone/tablette).

Le Fifish Pro W6 dispose des caractéristiques principales suivantes (Fig.18) :

- Profondeur maximale d'immersion : jusqu'à 350 m, permettant l'exploration des zones profondes et la réalisation d'inspections au-delà des limites de plongée humaine.
- Capteur vidéo : caméra 4K UHD (capteur CMOS 1 pouce) et champ de vision grand angle (~166°), permettant une couverture large des habitats et une identification fine des organismes.



- Stabilisation : stabilisation électronique garantissant une qualité d'image exploitable pour la post-analyse et la photo-identification.
- Éclairage : projecteurs LED haute puissance (jusqu'à 6000 lumens) permettant l'acquisition de séquences dans des conditions de faible luminosité, y compris sur substrats sombres ou en profondeur.
- Manœuvrabilité : six propulseurs (4 horizontaux, 2 verticaux) offrant une mobilité tridimensionnelle (avant/arrière, latéral, vertical), adaptée au suivi de transects et à l'inspection précise d'objets/structures.
- Autonomie : environ 8 h de fonctionnement (batterie lithium-ion), facilitant des sessions prolongées de prospection sans interruption majeure.
- Transmission : flux vidéo et données en temps réel via câble, limitant les pertes de signal et augmentant la précision des inspections.

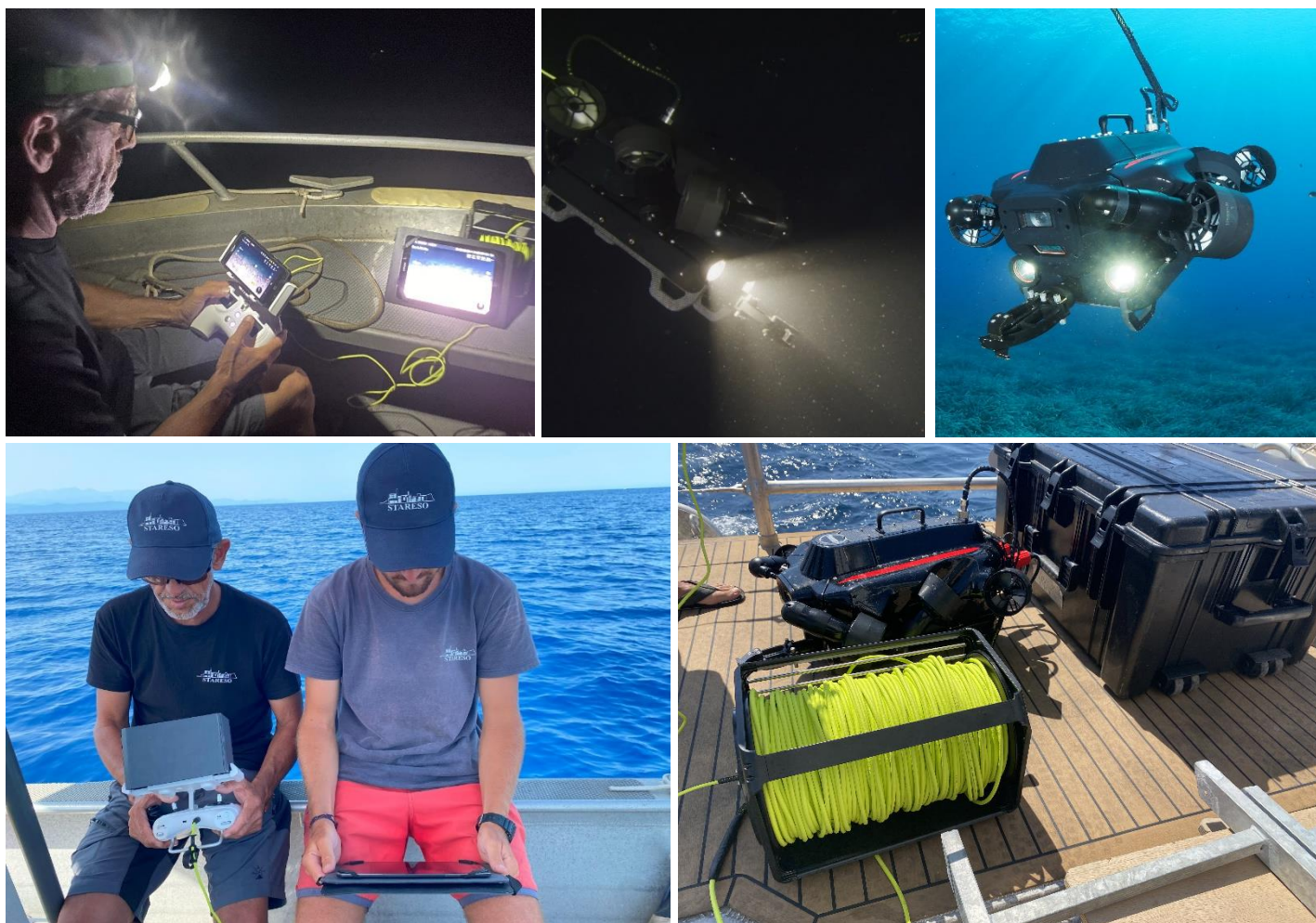


Lorsque nécessaire, un module de mesure laser intégré au ROV a été utilisé afin d'estimer la taille des individus observés, avec une précision centimétrique lors des analyses vidéo. Les prospections ont été réalisées depuis le bateau, selon des trajectoires définies à l'avance (transects linéaires et/ou prospections ciblées). L'intégralité des transects a été filmée (Fig.19), permettant :

1. une analyse en temps réel pour orienter la prospection et confirmer la nature des substrats/habitats ;
2. une post-analyse par vidéo-interprétation, visant la validation des identifications, l'extraction d'observations quantitatives et qualitatives, et l'archivage des preuves visuelles.

Les vidéos et photographies obtenues ont été utilisées pour :

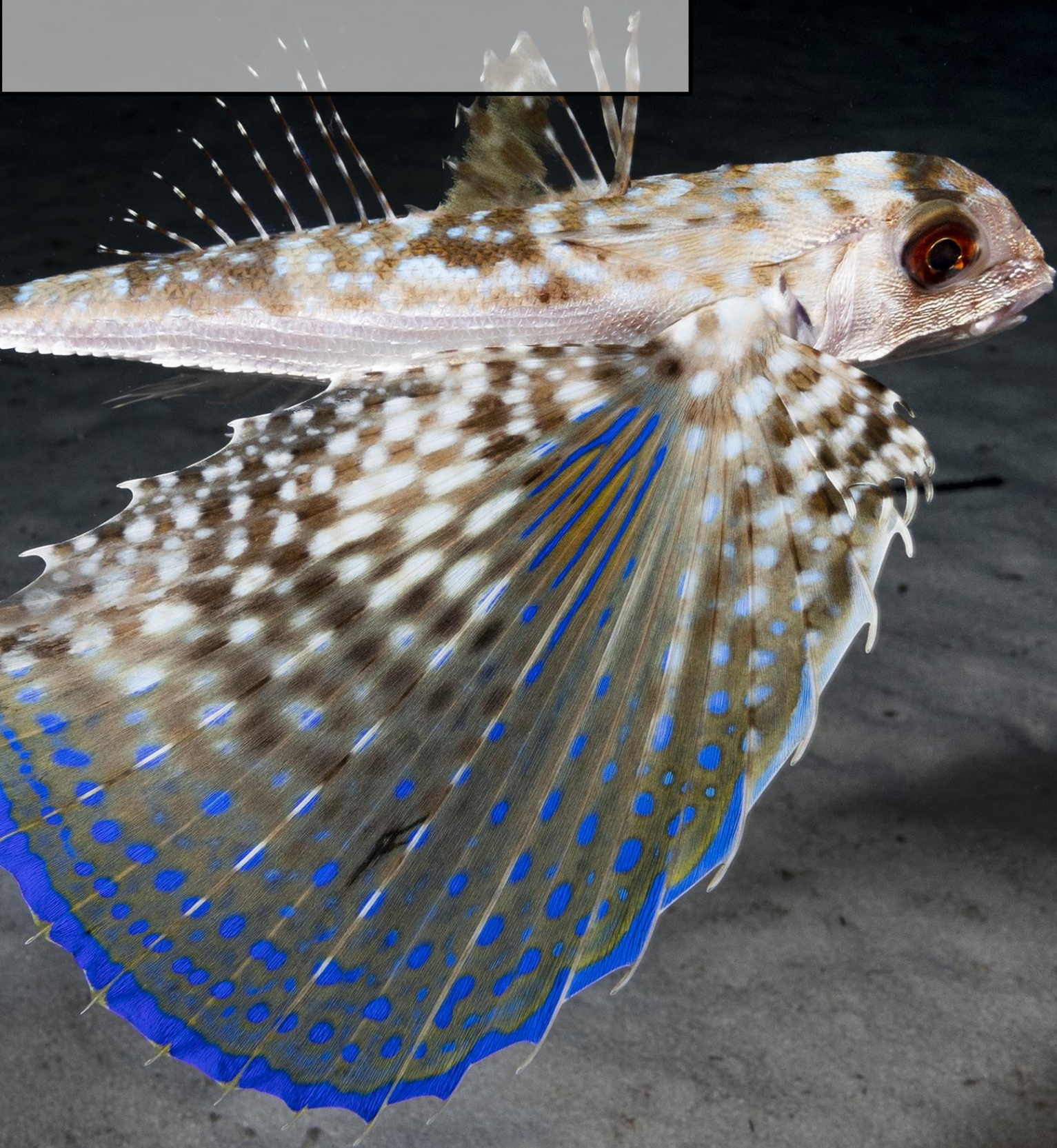
- Évaluer l'état de conservation général des habitats naturels, en documentant la structure des peuplements, la qualité des substrats et la présence éventuelle de dégradations (ex. dommages d'ancrage, déchets, filets).
- Réaliser un inventaire faunistique et floristique semi-exhaustif, basé sur l'observation directe des organismes et leur confirmation via support vidéo/photographique.
- Effectuer un recensement des espèces protégées, emblématiques, remarquables, exogènes et/ou invasives, avec documentation visuelle systématique.
- Lorsque pertinent, estimer la taille des individus par analyse des séquences vidéo, grâce à l'outil de mesure laser.



19

Photo du ROV Ffish PRO W6 utilisé par STARESO dans le cadre du projet ARENA.

RÉSULTATS



4. Résultats

4.1. Recensement visuel en plongée sous-marine (visual census)

4.1.1. Richesse spécifique et composition taxonomique

La richesse spécifique totale s'élève à 164 espèces. La répartition de cette biodiversité au sein de 11 embranchements différents (Fig.20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29). Les Chordata constituent l'embranchement le plus représenté, avec 77 espèces (47,0%), soit près de la moitié de la richesse spécifique totale. Les Arthropoda et les Mollusca présentent des richesses spécifiques comparables, avec respectivement 20 (12,2%) et 19 espèces (11,6%). Les Echinodermata totalisent 11 espèces (6,7%), tandis que les Annelida (6,1%) et les Cnidaria (6,1%) regroupent chacun 10 espèces. Les embranchements algaux sont représentés par 5 espèces de Chlorophyta et 5 espèces de Rhodophyta (6,0%). Les embranchements les moins diversifiés sont les Bryozoa (3 espèces), ainsi que les Ochrophyta et les Tracheophyta, avec 2 espèces chacun ($\leq 1,8\%$).

La structuration taxonomique observée, marquée par une forte dominance des Chordata, est cohérente avec les inventaires visuels réalisés en milieu côtier méditerranéen, où les poissons constituent généralement le groupe le plus facilement détectable et le plus représenté en termes de richesse spécifique (Cecapoli et al., 2024).

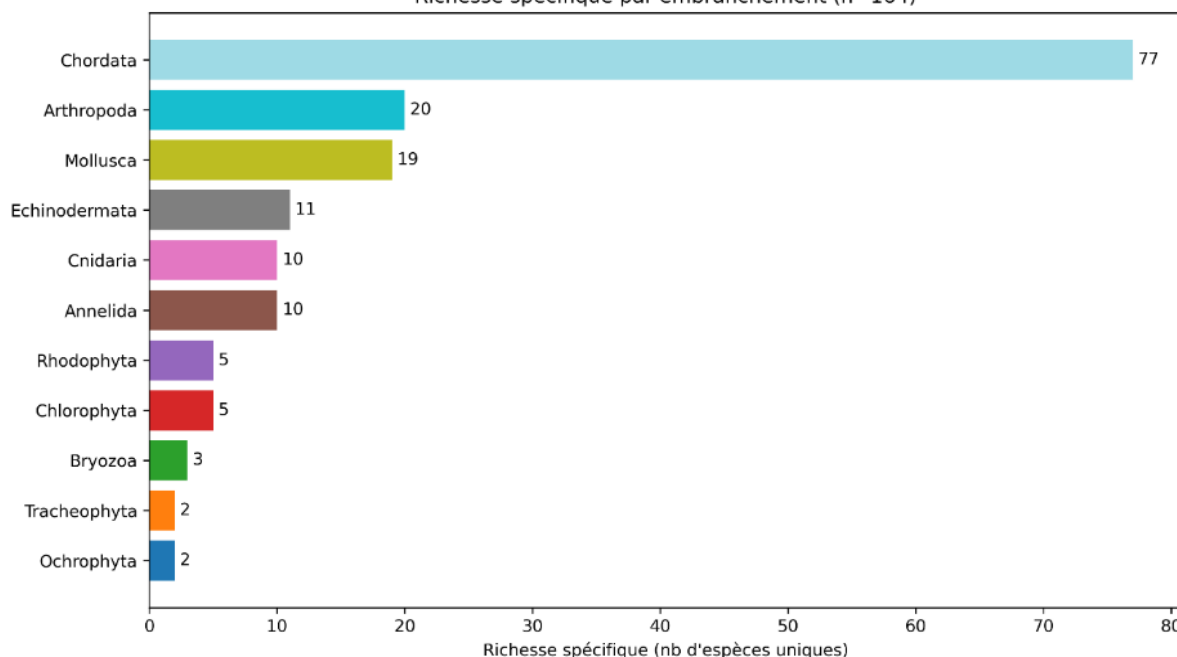
Cette dominance reflète à la fois une réalité écologique, liée à la diversité et à la mobilité des poissons côtiers, et un effet méthodologique lié aux protocoles de recensement visuel en plongée sous-marine, plus adaptés à la détection des vertébrés de taille moyenne à grande (Prato et al., 2017).

La contribution des Arthropoda et des Mollusca à la richesse spécifique totale souligne néanmoins l'importance des invertébrés dans la structuration des communautés associées aux milieux sableux. Ces groupes, souvent sous-estimés dans les inventaires visuels en raison de leur taille ou de leur comportement cryptique, représentent ici plus de 20 % de la richesse spécifique totale. Leur présence traduit la capacité des milieux sableux à abriter une biodiversité benthique diversifiée.

Les Echinodermata, Annelida et Cnidaria constituent un ensemble intermédiaire, révélant une diversité fonctionnelle importante au sein des fonds sableux. Ces embranchements regroupent des espèces jouant des rôles écologiques variés, notamment dans les processus de bioturbation, de transfert de matière et de structuration trophique, contribuant ainsi au fonctionnement global de l'écosystème (Valentine and Heck 2005).

Dans l'ensemble, la composition taxonomique observée met en évidence que les milieux sableux ne se limitent pas à des habitats dominés par un nombre restreint de groupes biologiques, mais qu'ils accueillent une diversité d'embranchements reflétant une organisation écologique complexe.

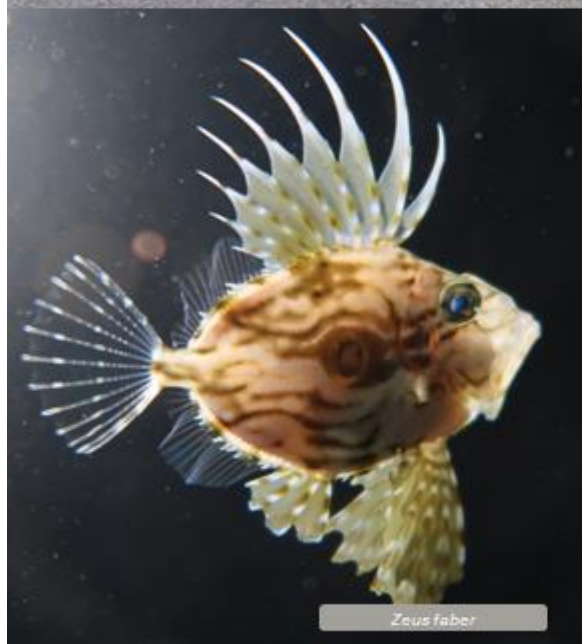
Richesse spécifique par embranchement (n=164)



20

Richesse spécifique par embranchement pour les recensement visuel en plongée sous-marine.









Bolinus brandaris



Eledone moschata



Octopus vulgaris



Sepioidae sp.



Sepia officinalis



Diogenes pugilator



Pagurus cuanensis



Dardanus calidus



Ilia nucleus



Diogenes pugilator



Astropecten platyscanthus



Echinocardium sp.



Astropecten aranciatus



Ophioderma longicaudum



Holothuria tubulosa



27 Exemples d'espèces recensées sur les milieux sableux lors des recensements visuels en plongée sous-marine



28 Exemples d'espèces recensées sur les milieux sableux lors des recensements visuels en plongée sous-marine



Serpulidae sp.



Lanice conchilega



Myxicola infundibulum



Lanice conchilega



Sabella pavonica

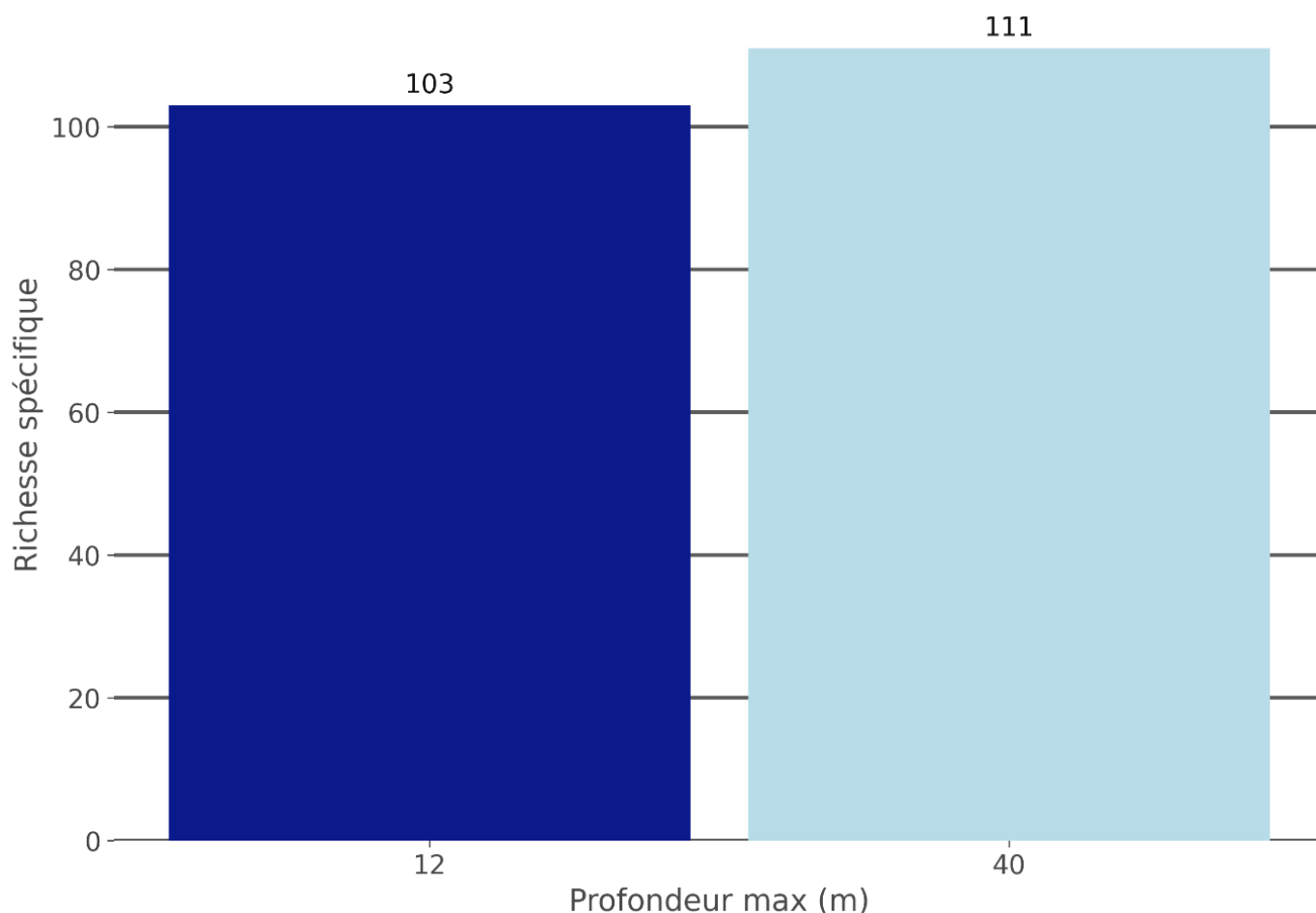
29 Exemples d'espèces recensées sur les milieux sableux lors des recensements visuels en plongée sous-marine

4.1.2. Effet de la profondeur sur la richesse spécifique

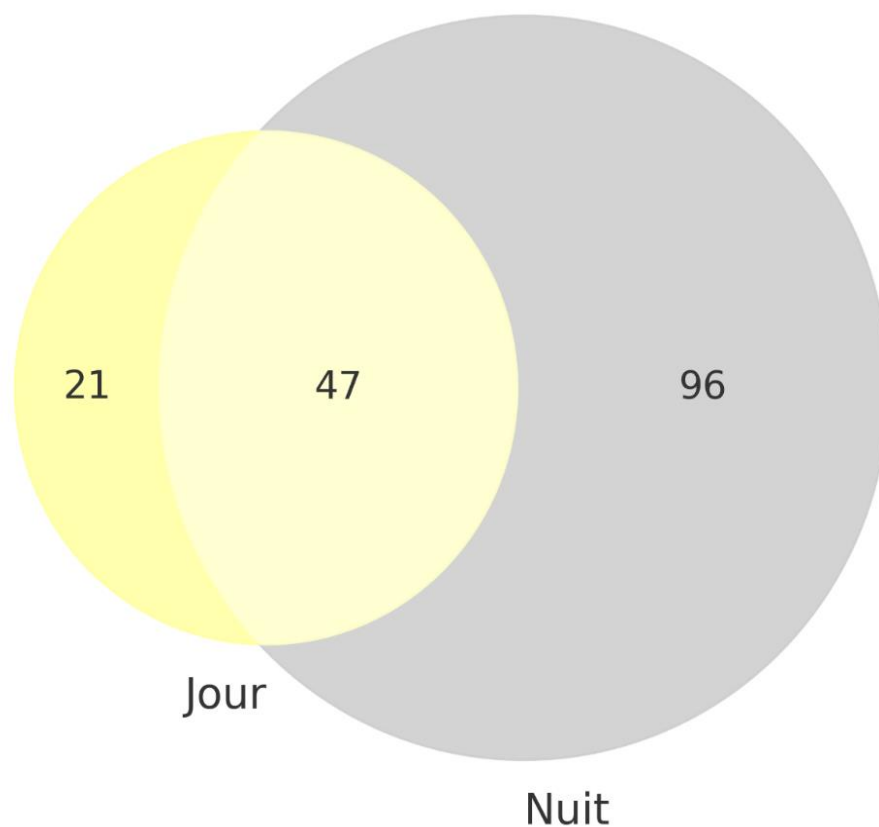
À 12 m, 103 espèces distinctes ont été recensées, tandis qu'à 40 m, la richesse spécifique atteint 111 espèces. La richesse spécifique légèrement plus élevée observée à 40 m par rapport à 12 m suggère une influence modérée de la profondeur sur la structuration des communautés associées aux milieux sableux. L'absence de différence marquée entre les deux profondeurs indique une continuité écologique entre les fonds sableux peu profonds et plus profonds, plutôt qu'une rupture nette de la composition spécifique (Fig.30).

4.1.3. Effet du cycle nyctéméral sur la richesse et l'abondance

La richesse spécifique a été comparée entre les phases Jour et Nuit à partir des espèces recensées. Le diagramme de Venn (Fig.31) met en évidence une différenciation marquée entre les assemblages observés de Jour et de Nuit. Sur l'ensemble des 164 espèces recensées, 68 espèces sont détectées de Jour (41,5% de la richesse totale) et 143 espèces de Nuit (87,2%). Parmi elles, 47 espèces sont communes aux deux périodes (28,7%). La phase de Jour comprend 21 espèces exclusives (12,8%) comme le rason (*Xyrichtys novacula*), la girelle commune (*Coris julis*), tandis que la phase de Nuit présente 96 espèces exclusives, comme les ophidions (*Ophidion rochei*) ou les congres des Baléares (*Ariosoma balearicum*) (58,5%).



30 Richesse spécifique suivant la profondeur (12 m et 40 m) par recensement visuel en plongée sous-marine.



31

Diagramme de Venn de la richesse spécifique entre Jour et Nuit par recensement visuel en plongée sous-marine.

L'abondance moyenne des espèces (exprimée en nombre d'individus par plongée de 15 minutes) diffère significativement entre les périodes de Jour et de Nuit (test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). En effet, une abondance moyenne significativement plus élevée a été observée la nuit ($15,59 \pm \text{écart-type}$) comparée au jour ($8,67 \pm \text{écart-type}$). Cette différence est également visible sur le diagramme en boîte (Fig.32), où la médiane nocturne est nettement supérieure à celle du jour, accompagnée d'une plus grande dispersion des valeurs.

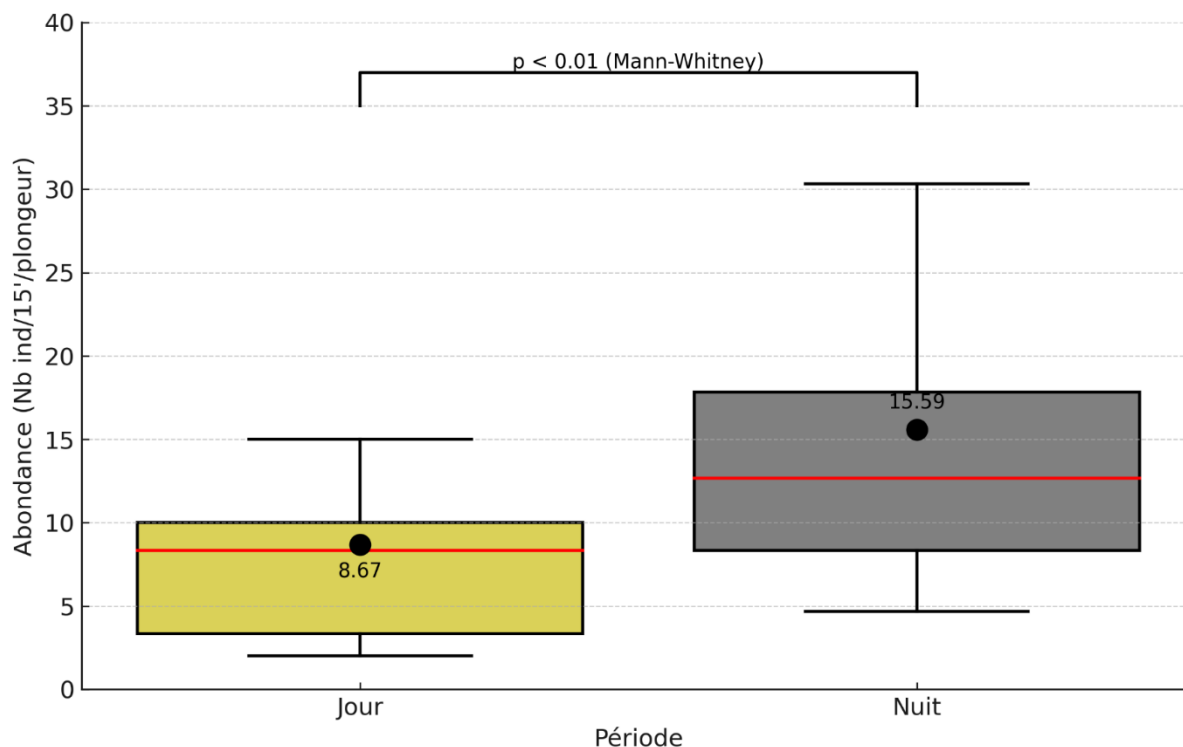
Les résultats montrent une abondance significativement plus élevée des espèces observées pendant les plongées nocturnes par rapport aux plongées diurnes. Ce schéma suggère une activité accrue de certaines espèces la nuit, ou une augmentation de leur détectabilité à ce moment-là. Ces observations sont cohérentes avec plusieurs études ayant mis en évidence des changements de comportement ou de distribution des organismes marins selon le cycle nycthéméral (ex. : Hobson, 1973 ; Colton & Alevizon, 1983).

Une explication plausible est que certaines espèces adoptent un comportement cryptique ou sont moins actives durant le jour pour éviter la prédation, émergeant plutôt la nuit pour se nourrir ou se déplacer.

À l'inverse, d'autres espèces pourraient être plus facilement détectables la nuit en raison de l'effet des éclairages utilisés lors des plongées nocturnes, ce qui peut attirer ou immobiliser certains organismes, comme c'est le cas chez les crustacés et certains poissons.

Ces résultats soulignent l'importance d'inclure des observations nocturnes dans les protocoles de suivi de la biodiversité marine afin de mieux caractériser la composition et les fluctuations des communautés.





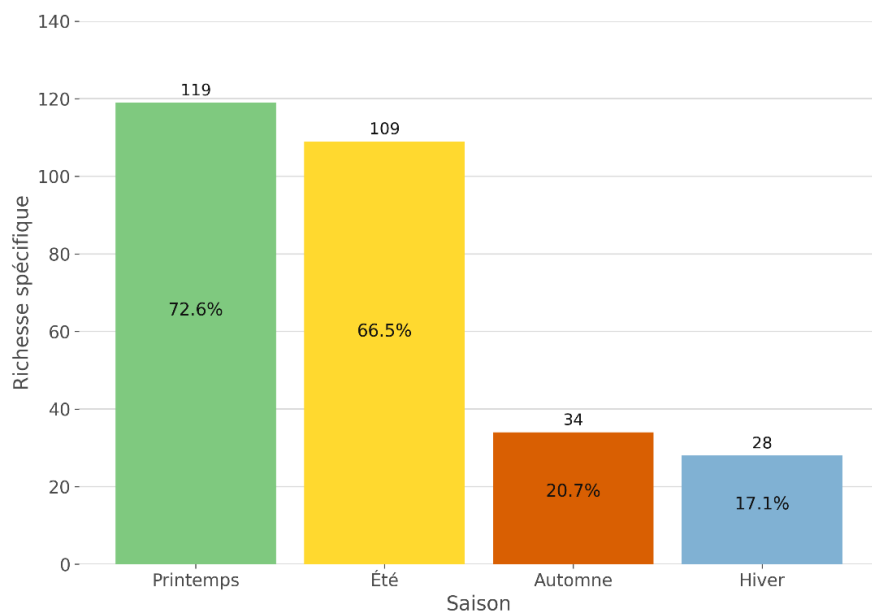
32

Abondance des espèces (exprimée en nombre d'individus par plongée de 15 minutes) suivant le Jour et la Nuit par recensement visuel en plongée sous-marine.

4.1.4. Variations saisonnières de la richesse et de la diversité spécifique

La richesse spécifique varie fortement selon la saison, avec une diversité maximale observée au Printemps (119 espèces) et en Été (109 espèces), tandis que les valeurs sont nettement plus faibles en Automne (34 espèces) et en Hiver (28 espèces) (Fig.33).

Ces résultats mettent en évidence une structure saisonnière marquée des communautés recensées, et suggèrent que la période Printemps–Été concentre une part importante des taxons détectés dans le jeu de données.



33

Variation saisonnière de la richesse spécifique par recensement visuel en plongée sous-marine.



L'analyse des indices de diversité met en évidence une forte variabilité saisonnière de la structure des communautés, associée à des changements marqués dans la dominance spécifique. En hiver, les faibles valeurs de l'indice de Shannon (H') et de l'indice de Simpson ($1 - D$) traduisent une diversité spécifique réduite et une forte dominance de quelques espèces, principalement le gobie nageur de ferrier (*Pseudophya ferreri*), le sauclet (*Atherina hepsetus*) et le pagure poilu (*Pagurus cuanensis*), qui concentrent l'essentiel des abondances observées. Cette configuration indique une communauté fortement déséquilibrée, caractérisée par une distribution très hétérogène des individus entre les taxons.

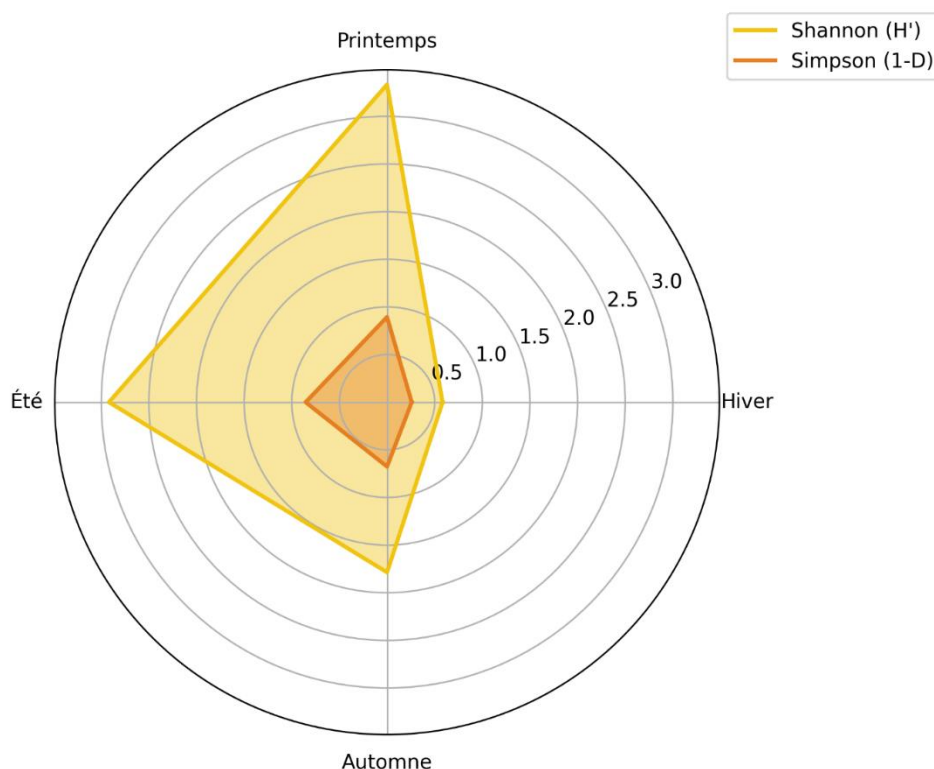
Au printemps, les indices de diversité atteignent leurs valeurs maximales, reflétant une augmentation conjointe de la richesse spécifique et de l'équitabilité. La communauté printanière est dominée par des crevettes (*Mysidae spp.*) et des bogues (*Boops boops*), mais sans qu'aucune de ces espèces n'exerce une domination écrasante. Cette saison se distingue par une répartition plus homogène des abondances, traduisant une structuration optimale des communautés et une forte contribution d'un grand nombre de taxons à la diversité globale.

En été, la diversité reste élevée, bien que légèrement inférieure à celle observée au printemps. Les assemblages sont principalement structurés autour des bogues (*Boops boops*), des saupes (*Sarpa salpa*) et/ou des jarrets (*Spicara smaris*).

L'émergence de ces espèces dominantes s'accompagne toutefois du maintien d'un cortège d'espèces secondaires, contribuant à une diversité spécifique encore importante et à une équitabilité relativement élevée.

À l'automne, une diminution progressive des indices de diversité est observée, traduisant une réduction de la richesse spécifique et une augmentation relative de la dominance. La communauté est principalement dominée par des sauclets (*Atherina hepsetus*), bogues (*Boops boops*) et des mollusques bivalves (*Tellinidae spp.*), indiquant un recentrage des abondances sur un nombre plus limité de taxons, tout en conservant une diversité supérieure à celle observée en hiver.

La structuration saisonnière marquée des communautés mise en évidence par les indices de diversité reflète des dynamiques écologiques fortement dépendantes du cycle annuel, typiques des écosystèmes côtiers méditerranéens (Bussotti et al. 2022). Les variations des indices de Shannon et de Simpson, ainsi que de l'équitabilité, traduisent une alternance entre des phases de forte dominance spécifique et des périodes de diversité plus élevée et mieux répartie. Dans l'ensemble, ces résultats soulignent l'importance de considérer la dimension saisonnière dans l'analyse et la gestion des écosystèmes côtiers sableux. Ils mettent en évidence que les périodes de forte diversité, notamment le printemps et l'été, susceptibles de jouer un rôle majeur dans le fonctionnement et la résilience de ces communautés.



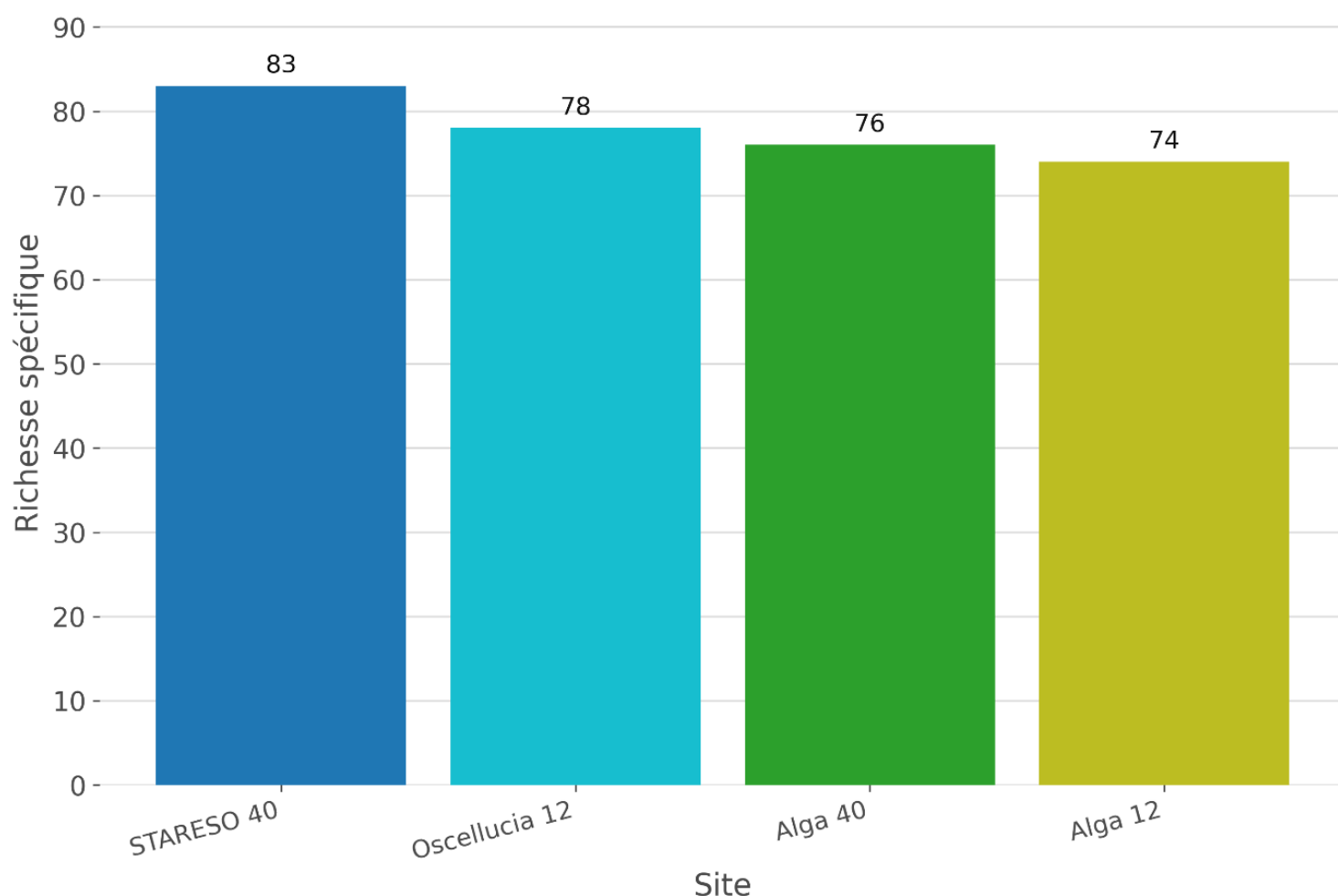
34

Variation saisonnière des indices de diversité. Représentation radar des indices de Shannon (H' , en jaune) et de Simpson ($1-D$, en orange) calculés pour chaque saison.

4.1.5. Variabilité spatiale et similarité des communautés

Les résultats de la richesse spécifique entre sites montrent des valeurs relativement proches, avec une valeur maximale enregistrée à STARESO 40 (83 espèces). Les sites Oscellucia 12, Alga 40 et Alga 12 présentent respectivement 78, 76 et 74 espèces. La richesse spécifique varie donc de 74 à 83 espèces selon les sites, avec un écart maximal de 9 espèces entre le site le plus riche (STARESO 40) et le site le moins riche (Alga 12) (Fig.35).

Ces résultats suggèrent une diversité globale comparable entre sites. Ces résultats sont cohérents avec les travaux récents sur la biodiversité côtière méditerranéenne, qui soulignent que les habitats sableux peuvent contribuer fortement à la β -diversité, via des assemblages spécifiques et des espèces à distribution restreinte (Cecapoli et al., 2024).



35

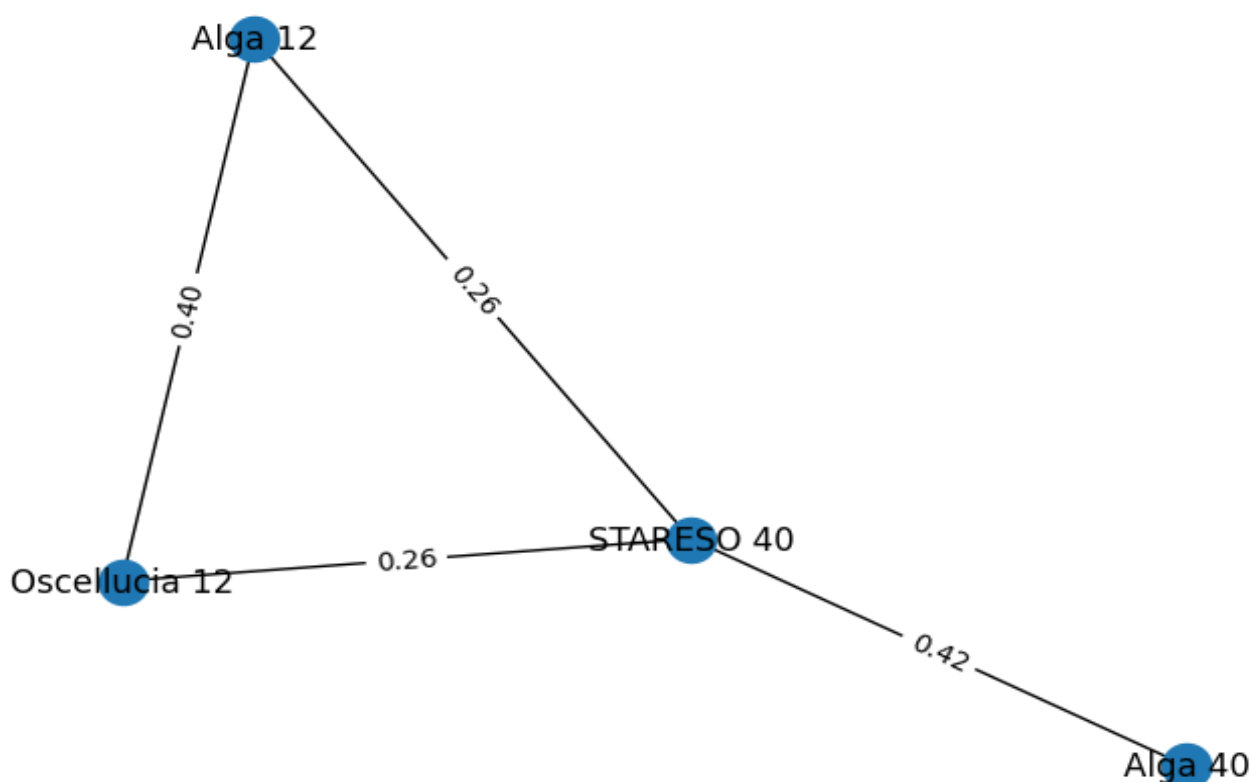
Variation saisonnière de la richesse spécifique par sites et exemples de biodiversité présentes par recensement visuel en plongée sous-marine.

L'analyse de la similarité de composition spécifique entre les sites d'étude a été réalisée à partir des données de présence/absence des espèces observées lors des inventaires visuels. L'indice de Jaccard a permis de quantifier le degré de similarité entre chaque paire de sites. Cette représentation permet de visualiser des groupes de sites partageant une composition spécifique relativement proche, tandis que d'autres apparaissent plus faiblement connectés au sein du réseau.

Les valeurs de similarité obtenues varient de 0,20 à 0,42. Les plus fortes similarités ont été observées entre les sites STARESO 40 et Alga 40 ($J = 0,42$), ainsi qu'entre Oscellucia 12 et Alga 12 ($J = 0,40$), indiquant une proportion relativement élevée d'espèces communes entre ces paires de sites. Des similarités intermédiaires ont également été mises en évidence entre Alga 12 et STARESO 40 ($J = 0,26$) et entre Oscellucia 12 et STARESO 40 ($J = 0,26$). À l'inverse, la plus faible similarité a été observée entre Alga 40 et Oscellucia 12 ($J = 0,20$) (Fig.36).

Les indices de Jaccard observés, compris entre 0,20 et 0,42, traduisent une proportion limitée d'espèces communes entre les sites, suggérant une structuration spatiale des communautés. Les plus fortes similarités ont été observées entre les sites STARESO 40 et Alga 40, ainsi qu'entre Oscellucia 12 et Alga 12.

Ces proximités de composition spécifique peuvent être liées à des caractéristiques environnementales similaires, telles que la profondeur. Elles peuvent également refléter des contextes écologiques comparables en termes de pressions anthropiques ou de connectivité biologique.



4.2. Recensement par ADN environnemental (ADNe)

4.2.1. Richesse taxonomique

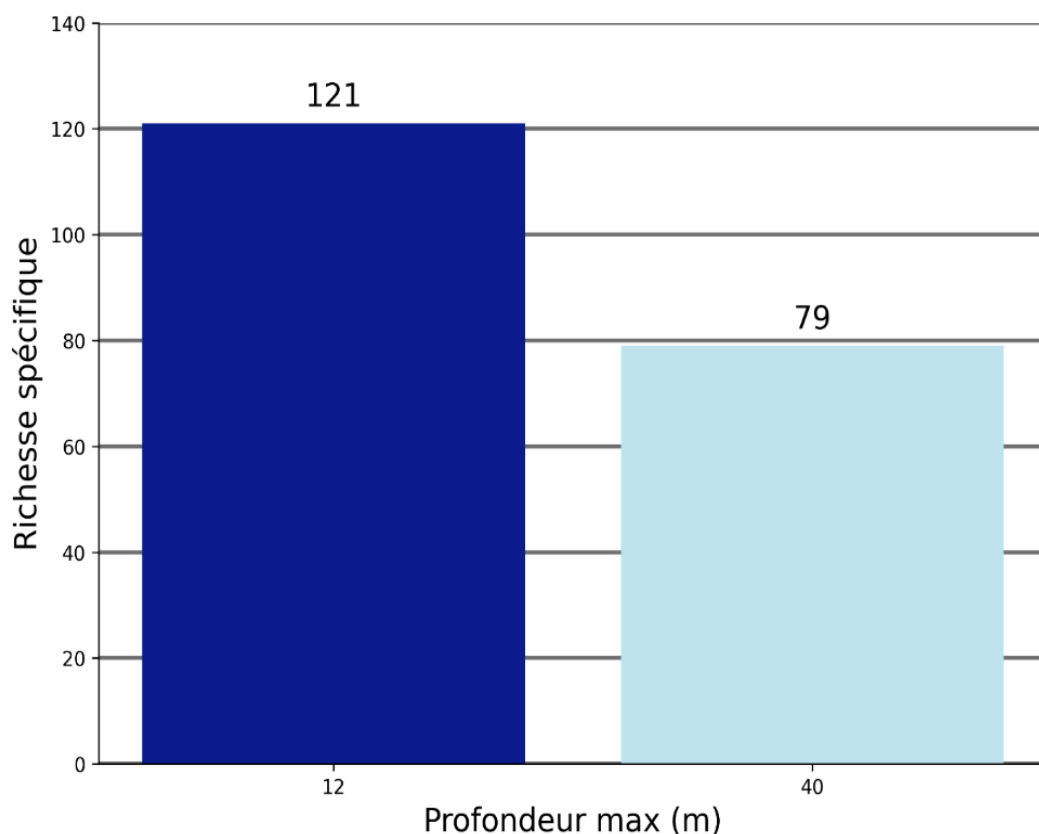
La richesse taxonomique mise en évidence par l'analyse de l'ADN environnemental, avec 133 taxons détectés, traduit une diversité biologique élevée au sein du site étudié. Cette richesse taxonomique comprend 115 taxons identifiés au niveau spécifique, ainsi que des taxons identifiés à des niveaux taxonomiques supérieurs (genres et familles), et des taxons phylogénétiquement proches correspondant à des groupes d'espèces non discriminables avec le marqueur génétique utilisé (ex : *Labrus_merula_Labrus_viridis* ; *C. heterurus_H. speculiger*).

La proportion importante de taxons identifiés au niveau spécifique souligne la bonne performance du marqueur génétique utilisé pour la caractérisation des communautés présentes (particulièrement les téléostéens). Toutefois, la détection de taxons identifiés uniquement aux niveaux de genre ou de famille, ainsi que de taxons complexes regroupant plusieurs espèces proches phylogénétiquement, met en évidence les limites de résolution taxonomique associées à certaines séquences génétiques.

Ces limites sont bien documentées dans les approches d'ADNe et peuvent être liées à la similarité des séquences entre espèces proches, à la longueur du fragment amplifié ou à la complétude des bases de données de référence (Taberlet et al., 2018). L'ADNe permet en outre de détecter des organismes cryptiques ou faiblement abondants, contribuant ainsi à une estimation plus complète de la biodiversité potentiellement présente.

4.2.2. Effet de la profondeur sur la richesse taxonomique

La richesse spécifique varie nettement en fonction de la profondeur (Fig.37). Un total de 121 taxons a été recensé à 12 m, contre 79 taxons à 40 m. Les résultats mettent en évidence une diminution nette de la richesse spécifique avec l'augmentation de la profondeur, traduisant l'existence d'un gradient bathymétrique structurant la biodiversité. Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer plusieurs profondeurs dans les dispositifs de suivi écologique afin de mieux appréhender la diversité totale des communautés.



37

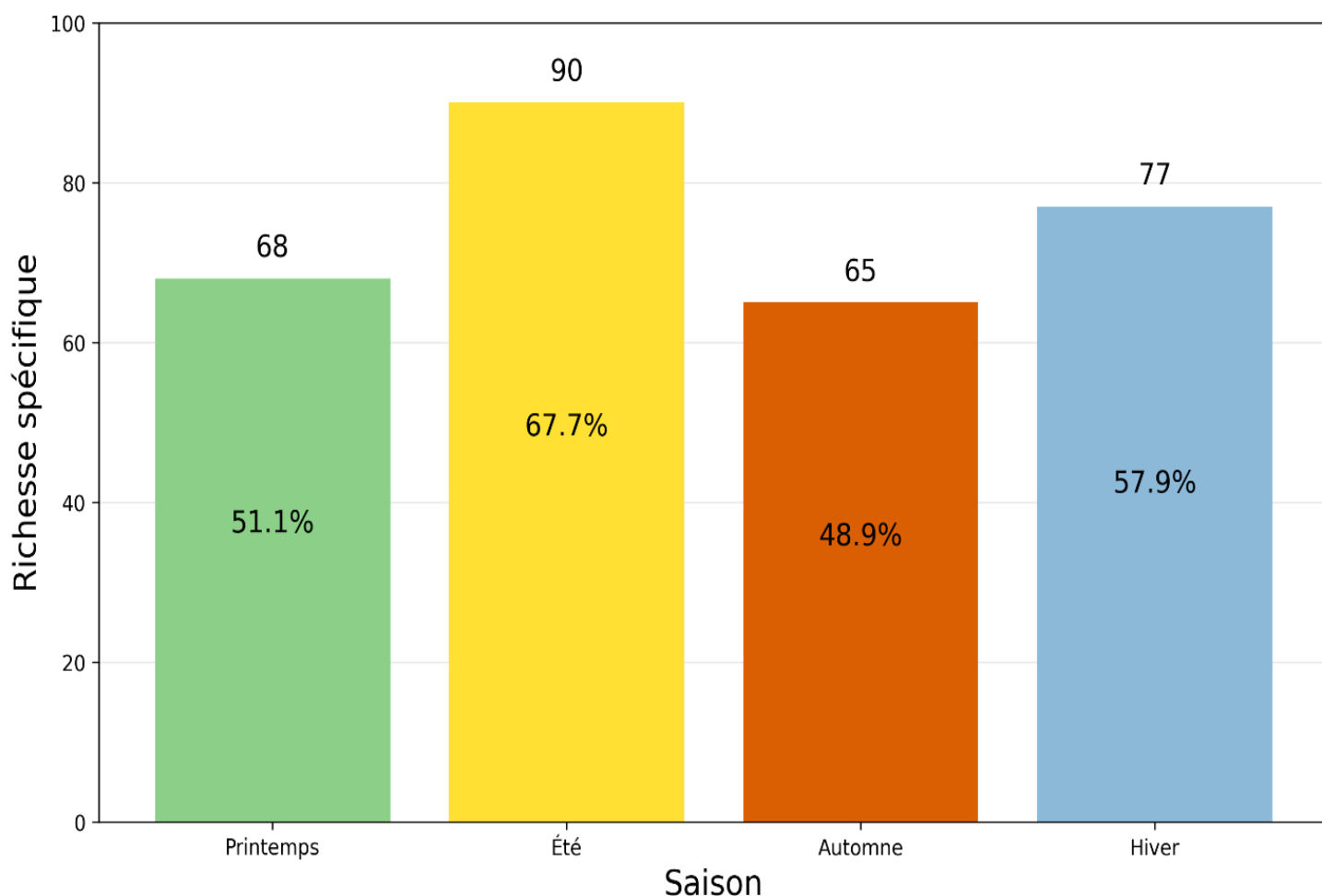
Variation de la richesse spécifique observée en fonction de la profondeur d'échantillonnage.

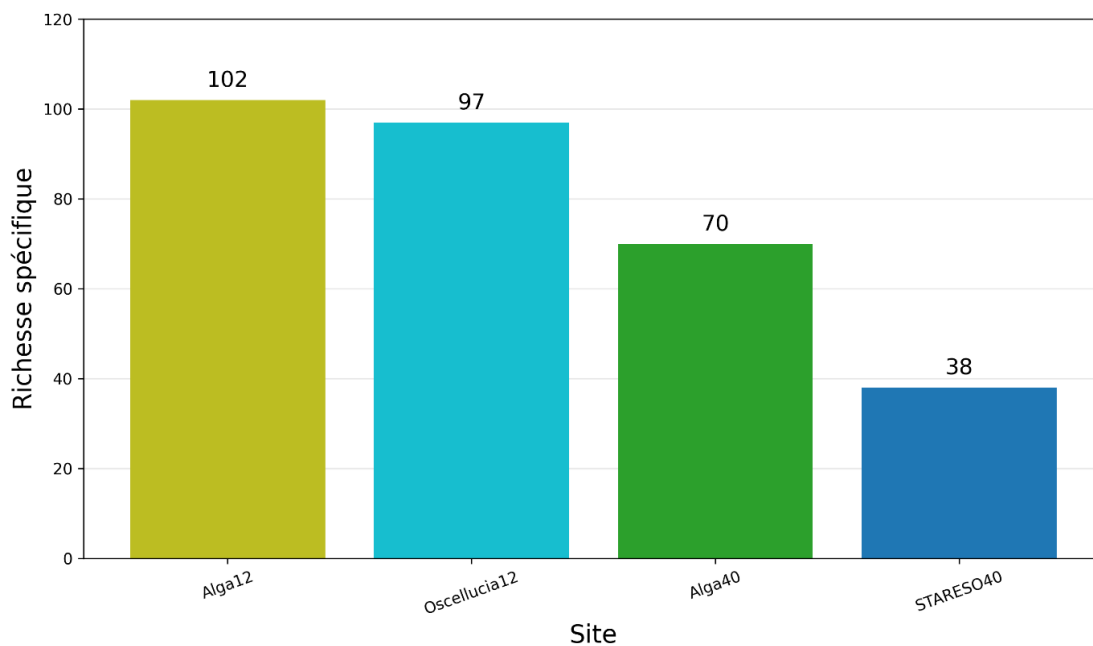
4.2.3. Variations saisonnières de la richesse taxonomique

La richesse taxonomique varie de manière marquée selon la saison (Fig. 38). Le nombre de taxons recensés est maximal en été, avec 90 taxons, correspondant à 67,7 % de la richesse totale observée. Au printemps, 68 taxons ont été identifiés (51,1 %). L'automne présente la richesse taxonomique la plus faible, avec 65 taxons (48,9 %), tandis que l'hiver montre une richesse intermédiaire avec 77 taxons, représentant 57,9 % de la richesse totale. Les résultats mettent en évidence une variabilité saisonnière marquée de la richesse taxonomique, avec un maximum observé en été et des valeurs plus faibles durant les autres saisons. Ce schéma est cohérent avec les dynamiques écologiques classiquement décrites en Méditerranée, où la période estivale correspond à une activité biologique accrue de nombreuses espèces benthiques et necto-benthiques (Rozanski et al., 2024).

4.2.4. Variabilité spatiale des communautés : richesse et similarité entre sites

La richesse taxonomique varie nettement entre les sites étudiés (Fig.39). Le site Alga12 présente la richesse spécifique la plus élevée, avec 102 taxons recensés. Il est suivi par le site Oscellucia12, qui compte 97 taxons. Les sites situés à plus grande profondeur montrent une richesse plus faible, avec 70 taxons observés à Alga40 et seulement 38 taxons à STARESO40. Ce gradient met en évidence des différences marquées de richesse spécifique entre les sites, suggérant une structuration spatiale des communautés biologiques au sein de la zone d'étude. Les différences observées dans la richesse taxonomique entre les sites traduisent probablement l'influence combinée de facteurs environnementaux et bathymétriques.



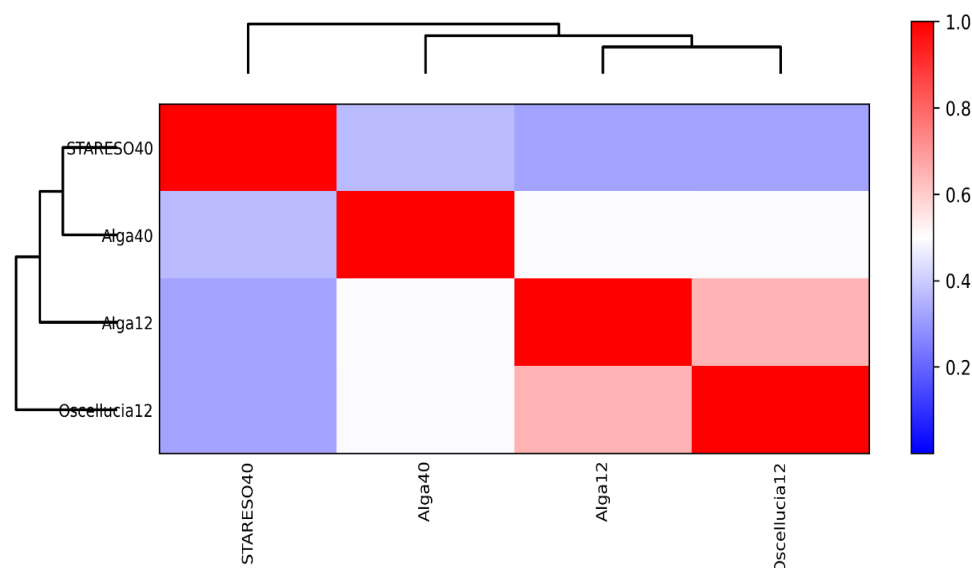


39

Variation de la richesse taxonomique observée selon les sites d'étude.

La heatmap de similarité met en évidence des différences marquées dans la composition spécifique des communautés entre les sites étudiés (Fig.40). La plus forte similarité est observée entre les sites Alga12 et Oscellucia12, indiquant un cortège spécifique largement partagé. Ces deux sites forment un groupe cohérent au sein du dendrogramme, traduisant une proximité écologique forte. Le site Alga40 présente une similarité intermédiaire avec les sites peu profonds, suggérant une composition spécifique partiellement commune, tout en montrant une différenciation nette. À l'inverse, le site STARESO40 se distingue par une faible similarité avec l'ensemble des autres sites, traduisant une composition spécifique singulière. La classification hiérarchique confirme cette structuration, en séparant clairement les sites peu profonds (12 m) des sites plus profonds, avec un isolement marqué du site STARESO40.

Les résultats mettent en évidence une structuration spatiale claire des communautés biologiques, principalement organisée selon un gradient bathymétrique. Ces résultats soulignent que, malgré une apparente uniformité, les milieux sableux présentent une hétérogénéité spatiale importante. Les différences observées entre sites peuvent s'expliquer par des variations locales de la morphologie du fond, de la dynamique sédimentaire, de l'exposition aux courants et à la houle, ou encore par la proximité d'autres habitats structurants (herbiers, substrats rocheux, zones mixtes).



40

Heatmap de similarité de la biodiversité entre les sites d'étude, basée sur l'indice de Jaccard (présence/absence des taxons). Les couleurs représentent le degré de similarité, allant de faible (bleu) à élevé (rouge). Les dendrogrammes associés (en haut et à gauche) résultent d'une classification hiérarchique et illustrent les proximités écologiques entre les sites en fonction de leur composition spécifique.

4.2.5. Influence des facteurs spatio-temporels sur la composition

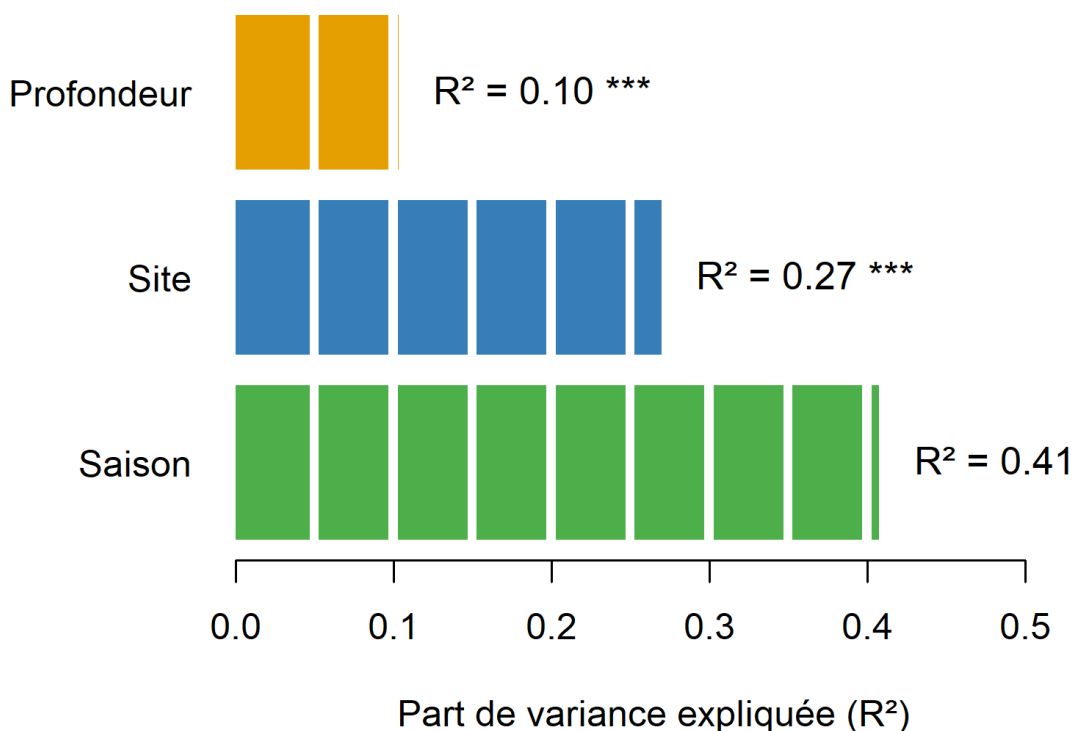
La composition taxonomique des communautés a été analysée à l'aide d'une analyse de variance multivariée par permutations (PERMANOVA). Trois facteurs explicatifs ont été considérés : le site, la profondeur et la saison. L'analyse PERMANOVA met en évidence une influence significative des trois facteurs étudiés sur la composition taxonomique des communautés sableuses (Tableau 2; Fig.41).

La saison constitue le facteur expliquant la plus grande part de la variabilité observée ($R^2 = 0,41$; $p < 0,001$), suivie de l'effet du site ($R^2 = 0,27$; $p < 0,001$). La profondeur exerce également un effet significatif, bien que plus modéré ($R^2 = 0,10$; $p < 0,001$).

Tableau 2. Résultats de la PERMANOVA (distance de Jaccard).

Facteur	ddl	R^2	F	p-value
Site	2	0,27	20,90	0,001 ***
Profondeur	1	0,10	16,00	0,001 ***
Saison	3	0,41	21,06	0,001 ***
Résidus	9	0,06		
Total	15	1,00		

Importance relative des facteurs (PERMANOVA – distance de Jaccard)

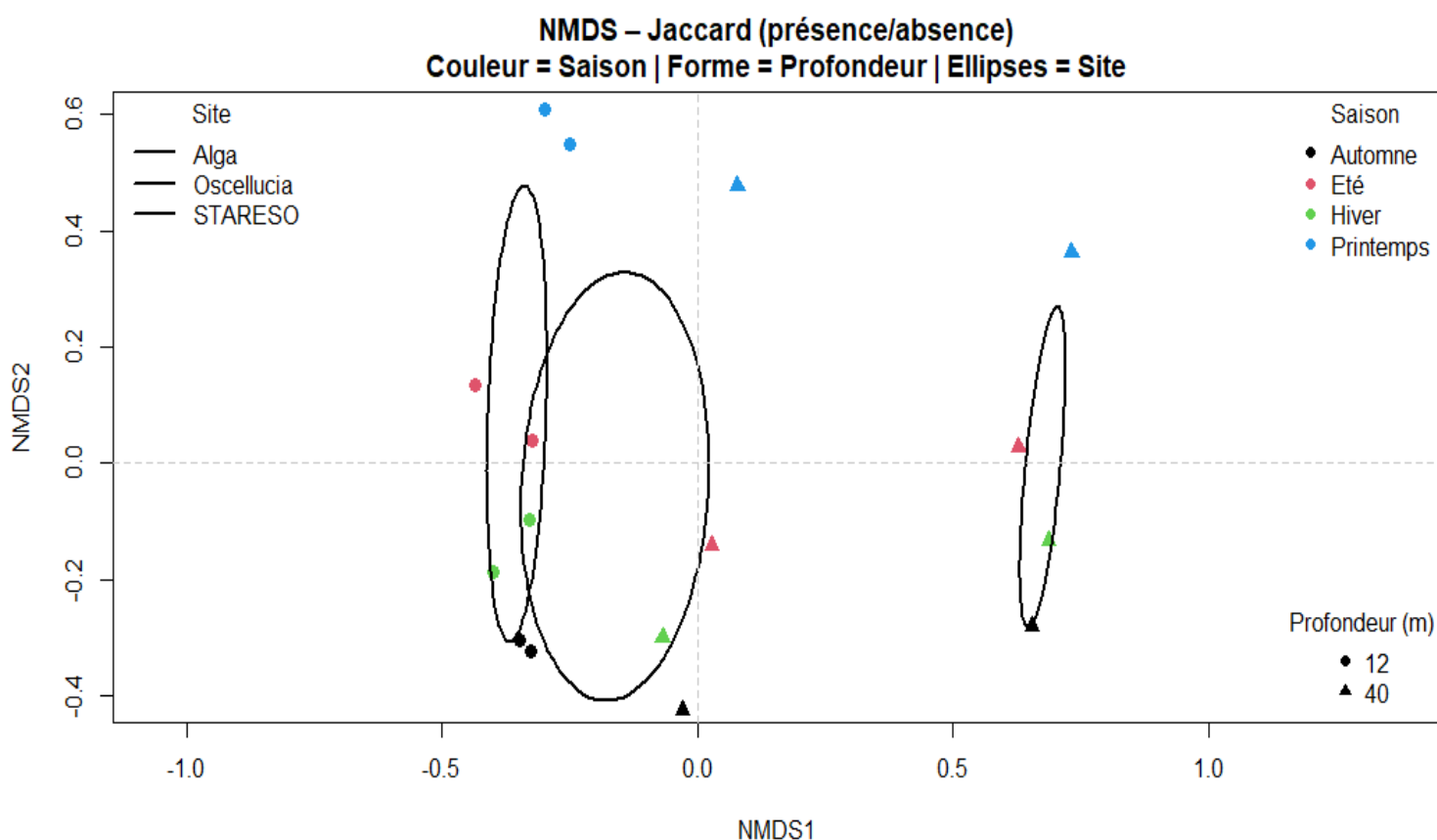


41

Importance relative des facteurs environnementaux expliquant la composition taxonomique des communautés associées aux milieux sableux, estimée à partir des valeurs de R^2 issues de la PERMANOVA (données de présence/absence issues de l'ADN environnemental, distance de Jaccard). Les barres représentent la part de variance expliquée par chaque facteur (site, profondeur et saison; *** $p < 0,001$).

L'ordination NMDS (stress = 0,14) confirme ces résultats en illustrant une structuration claire des assemblages en fonction des facteurs spatiaux, bathymétriques et saisonniers, avec un regroupement cohérent des échantillons partageant des conditions similaires (Fig.42). Ces résultats montrent que la composition taxonomique des communautés est influencée de manière significative et indépendante par le site, la profondeur et la saison. La profondeur constitue un gradient écologique structurant, tandis que la saison et la localisation spatiale expliquent une part importante de la variabilité observée.

L'absence d'interaction significative entre le site et la saison suggère que les effets saisonniers sont relativement homogènes entre les sites. L'ensemble de ces résultats met en évidence une structuration multi-factorielle des communautés, résultant de la combinaison de gradients spatiaux, bathymétriques et temporels.



42

Ordination NMDS (Non-metric Multidimensional Scaling) basée sur la distance de Jaccard (données de présence/absence) illustrant la structuration de la composition taxonomique des communautés. Chaque point représente un échantillon (combinaison site × profondeur × saison). Les couleurs indiquent les saisons, les symboles les profondeurs d'échantillonnage et les ellipses représentent la dispersion des échantillons par site.

4.3. Recensement par Acoustique passive (Son)

4.3.1. Biophonie benthique (invertébrés)

Sur la totalité des sessions de mesure réalisées et dans l'intégralité du paysage acoustique, $70,2 \pm 9,4$ impulsions benthiques localisables par seconde ont été enregistrées en moyenne, c'est-à-dire audibles sur les deux hydrophones. Après localisation des impulsions, $268,1 \pm 44,7$ impulsions benthiques localisables par heure et par m^2 ont été quantifiées en moyenne dans le disque d'écoute de 5 m de rayon (soit $0,074 \pm 0,012$ impulsions $\cdot s^{-1}\cdot m^{-2}$).

Peu mobiles et très nombreux, les invertébrés benthiques émettent, volontairement ou involontairement, des sons constituant une biophonie d'invertébrés. Chaque espèce produisant des sons selon des modalités spécifiques, seuls quelques exemples de productions sonores peuvent être cités. Les crevettes claqueuses dites « pistolet » ou « snapping shrimp » produisent des sons lors de la fermeture extrêmement rapide des pinces, induisant la formation de bulles et de micro-implosions (Figure 8). Ces sons sont émis lors de l'alimentation, de la chasse ou de la défense du territoire. Des sons sont également produits par les oursins lors des déplacements et de la nutrition via la lanterne d'Aristote ; un craquement est alors généré, puis amplifié par le squelette sphérique de l'oursin. Les sons individuels de ces invertébrés se superposent et se combinent pour former une biophonie benthique (Coquereau et al., 2016). La production sonore est principalement observée dans les environnements côtiers (Au et Bank, 1998 ; Versluis et al., 2000 ; Chitre et al., 2012).

Le sable constitue ainsi un habitat hébergeant une biophonie benthique particulièrement marquée et, à ce titre, biologiquement active, du fait des émissions sonores produites par les espèces vivant sur et dans cet habitat : un disque de 5 m de rayon (soit $19,6 m^2$) représente 0,11 % de la biophonie benthique du paysage acoustique.

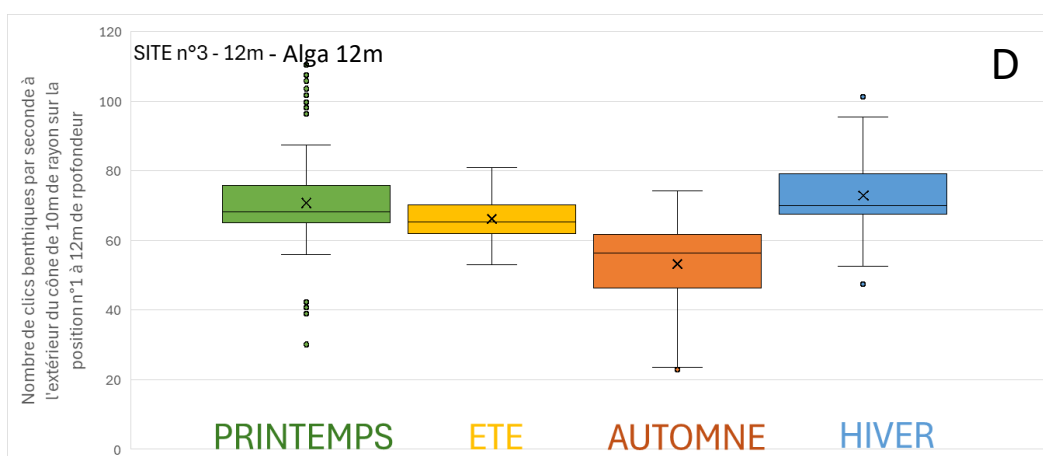
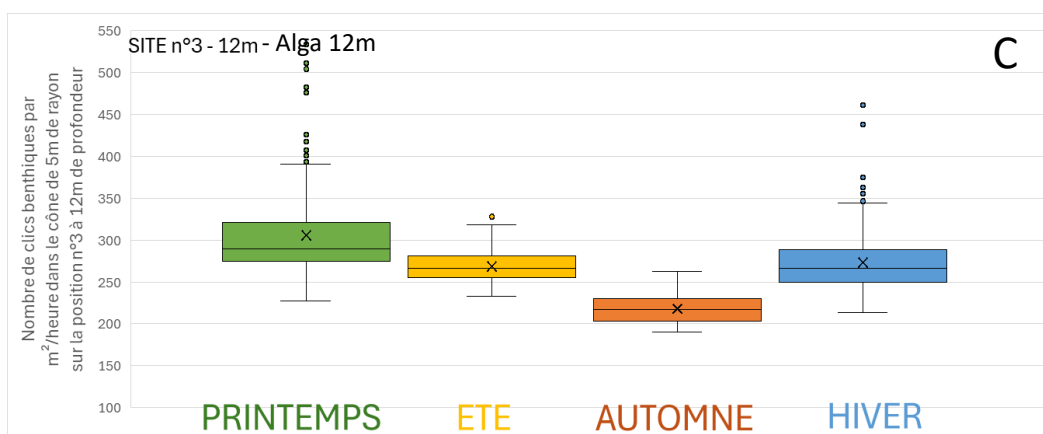
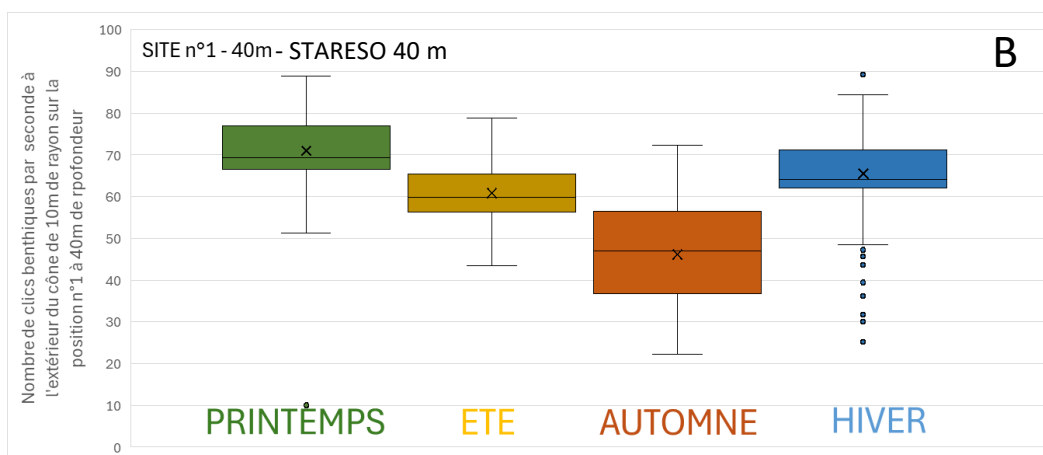
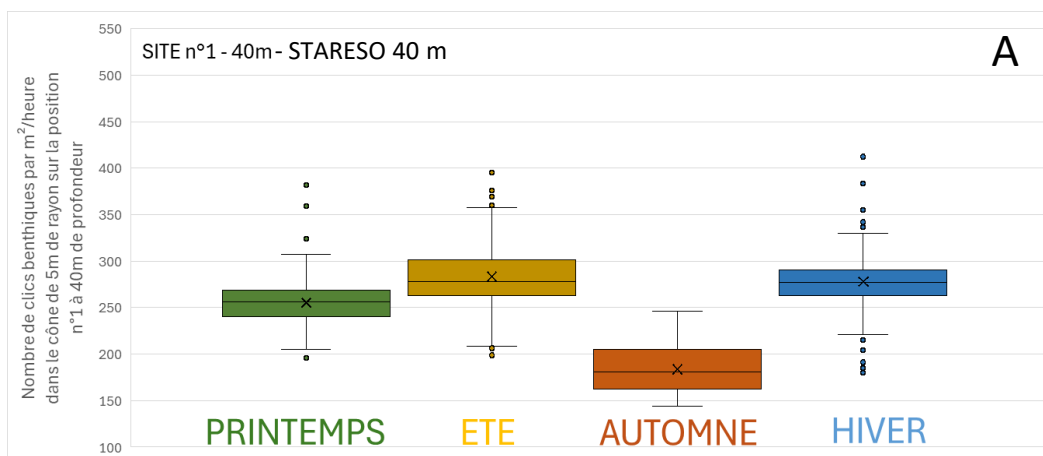
4.3.2. Variations saisonnières de la biophonie benthique

La densité des impulsions benthiques dans le disque d'écoute autour de l'enregistreur présente des valeurs plus élevées au printemps, en été et en hiver qu'en automne, saison durant laquelle une diminution moyenne d'environ 50 % est observée. Ces différences sont significatives. Une saisonnalité des activités benthiques est ainsi mise en évidence, en cohérence avec la bibliographie.

La biophonie benthique localisée dans le disque de 5,4 m de rayon suit un rythme saisonnier, avec un nombre d'impulsions benthiques significativement plus élevé en été et en hiver qu'en automne (Fig. 43). Une légère différence entre les sites est observée : à 40 m, un maximum d'impulsions benthiques est atteint en été, tandis qu'à 12 m le maximum est observé au printemps pour les impulsions localisées à proximité du capteur. Sur les deux positions de mesure, l'automne (fin novembre – début décembre) correspond au minimum d'impulsions benthiques localisées.

La biophonie benthique localisée dans le disque de 5,4 m présente des variabilités temporelles similaires à celles observées pour le reste de la biophonie benthique du paysage acoustique, c'est-à-dire l'ensemble des impulsions benthiques non localisées dans un disque de 10 m de rayon.

La biophonie benthique locale apparaît peu sensible à l'activité humaine ou à l'état de pression, les niveaux observés en été étant comparables à ceux mesurés en hiver.



43

Boîtes à moustaches du nombre d'impulsions benthiques pour la position n°1 (40 m ; A–B) et la position n°3 (12 m ; C–D). (A, C) Impulsions/m²/heure dans un disque de 5,4 m autour de l'enregistreur (échantillons = heures). (B, D) Impulsions/seconde en dehors d'un disque de 10 m (échantillons = fichiers). Mesures incluant le jour et la nuit.

La méthodologie innovante d'étude de la biophonie benthique à l'échelle locale appliquée dans le cadre du projet ARENA a été appliquée sur d'autres habitats dans des disques de surface équivalentes de 5 m de rayon.

Il en ressort que le sable émet une biophonie benthique abondante, notamment plus abondante que l'herbier de Posidonies et de l'ordre de grandeur de la biophonie d'un banc de maerl en Méditerranée (Tableau 3).

4.3.3. Biophonie ichtyologique (poissons)

Au total 33,299 vocalises de poissons ont été enregistrées sur les positions de mesures suivies sur le sable dans le projet ARENA, sur les 710 heures de mesures de nuit analysées, ce qui représente en moyenne 47,7 +/- 37,9 vocalises enregistrées par heure de mesure nocturne.

Parmi les 33 299 vocalises de poissons enregistrées, 87% sont des vocalises de rascasses, 11% sont des vocalises d'*Ophidion rochei*, 1.65% sont des vocalises de corbs, 0.24% sont des vocalises stéréotypées appelée « Série d'Impulsions Rapides » (SIR) et 0.38% sont des autres vocalises de poissons.

Les poissons émettent volontairement des sons à des fins de communication lors principalement de la reproduction (localisation et sélection des mâles, parades nuptiales synchronisation de l'émission des gamètes), de signalement de présence, d'alerte et de défense de territoire. Devant porter de l'information, la forme des signaux est élaborée et elle permet une détection et une classification.

Cependant les portées des sons restent limitées car elles sont adaptées aux distances d'interaction entre poissons variant de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Les poissons produisent aussi des sons involontaires lorsqu'ils se nourrissent.

Parmi les 32 000 espèces de poissons, au moins 700 ont été identifiées comme productrices de sons. Les poissons produisent des sons de communication par 4 mécanismes différents :

- en faisant vibrer leurs vessies natatoires grâce à des muscles rapides spécialement conçus pour les émissions sonores qui mettent en mouvement des marteaux osseux qui frappent la vessie natatoire ;
- en faisant vibrer des tendons ou autre organe interne avec des muscles spécialement conçus pour les émissions sonores ;
- par relâchement de gaz contenu dans la vessie natatoire ;
- la stridulation en faisant vibrer leurs dents, deux os les uns sur les autres ou les aiguilles des nageoires.

Les productions sonores par vibration des vessies natatoires et stridulation des tendons sont les plus fréquentes et sont celles qui produisent les plus grands niveaux sonores.

Tableau 3. Moyennes et écart types du nombre d'impulsions benthiques par m² et par heure localisées dans des disques de 5m de rayon sur d'autres habitat par rapport à l'habitat sableux étudié dans le projet ARENA.

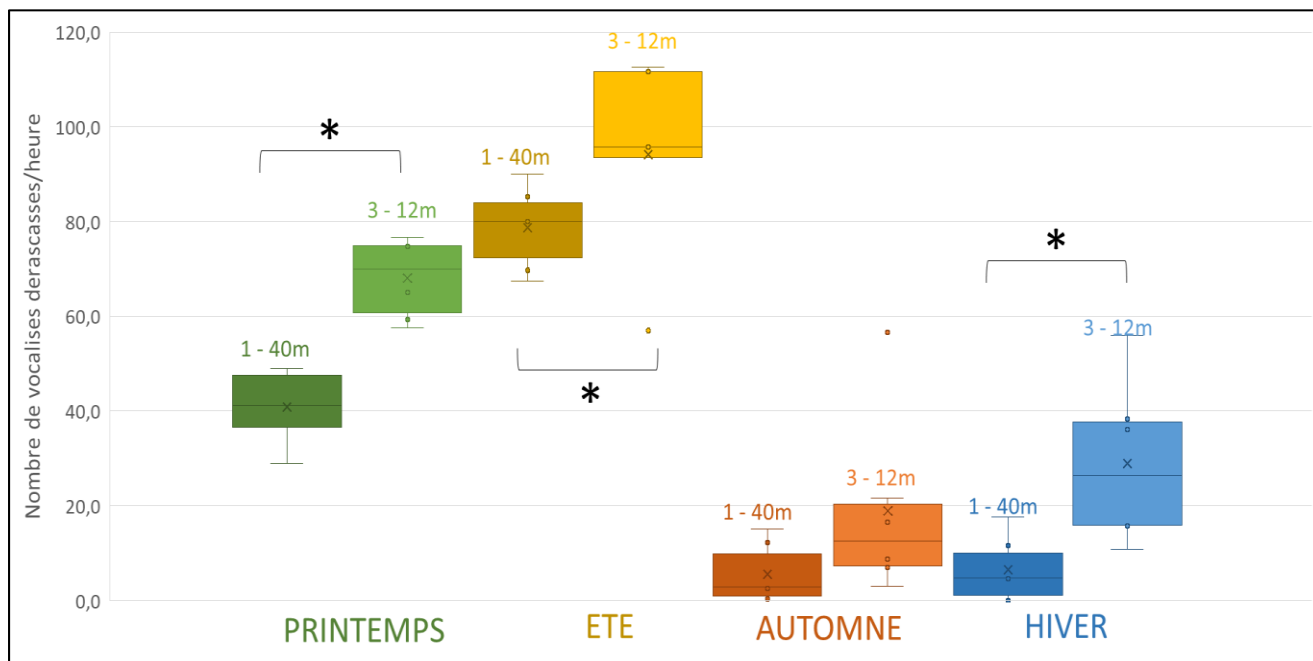
Habitat étudié	Localisation géographique	Nombre d'impulsions benthiques/m ² /heure
Sable (Projet ARENA)	Méditerranée, Corse, France	342 +/- 136
Herbier de Posidonies	Méditerranée, PACA, France	276 +/- 33
Forêt de kelp	Norvège	483 +/- 70
Bancs de maerl	Méditerranée, Baléares, Espagne	365 +/- 61
Récifs coraliens	Bonaire	403 +/- 53
Récifs coraliens	Martinique, France	487 +/- 33
Récifs coraliens	Barbade	436 +/- 41

4.3.4. Analyse de la classe sonore /KWA/

Les boîtes à moustaches du nombre de vocalises de rascasses cumulées par site et par saison (Fig. 44) montrent que le nombre total de vocalises enregistrées par heure dépend à la fois de la saison et de la position.

Concernant l'effet saisonnier, les poissons vocalisent davantage en été que durant les autres saisons (significativement : +60 % par rapport au printemps, 6 fois plus qu'en hiver et 8 fois plus qu'en automne). Le printemps arrive ensuite, avec significativement 3,7 fois plus de vocalises qu'en hiver et 5 fois plus qu'en automne. L'hiver présente environ 40 % de vocalises en plus que l'automne. Il faut toutefois noter que, dans l'échantillonnage, les mesures ont été réalisées tardivement dans la saison, ce qui peut expliquer que l'hiver présente des indicateurs plus élevés que l'automne. Cette dynamique saisonnière est cohérente avec la bibliographie sur la période de vocalisation des poissons en Méditerranée, généralement liée à la reproduction (Parmentier et al., 2010 ; Parmentier et al., 2018).

Concernant l'effet spatial, la position n°3 (12 m, baie de l'Alga) enregistre en moyenne davantage de vocalises que la position n°1 (40 m), sur l'ensemble des sessions de mesure. Cette différence est significative au printemps ($p = 0,0323$) et en hiver ($p = 0,0143$), avec des tendances similaires mais non significatives en été ($p = 0,4316$) et en automne ($p = 0,1669$). La proximité de l'hydrophone avec l'herbier, plus marquée sur la position n°3 (STARSO 40m), et donc avec les rascasses présentes dans cet habitat, dont la signature sonore se propage à grande distance, pourrait contribuer à expliquer ce résultat.



44

Boîtes à moustaches du nombre de vocalises de rascasses (/kwa/) en fonction de la saison échantillonnée et en fonction de la position (1 ou 3). Le symbole * représente le caractère significatif de la différence entre les deux boîtes. Les échantillons sont les 5 à 6 nuits de chaque session de mesure.

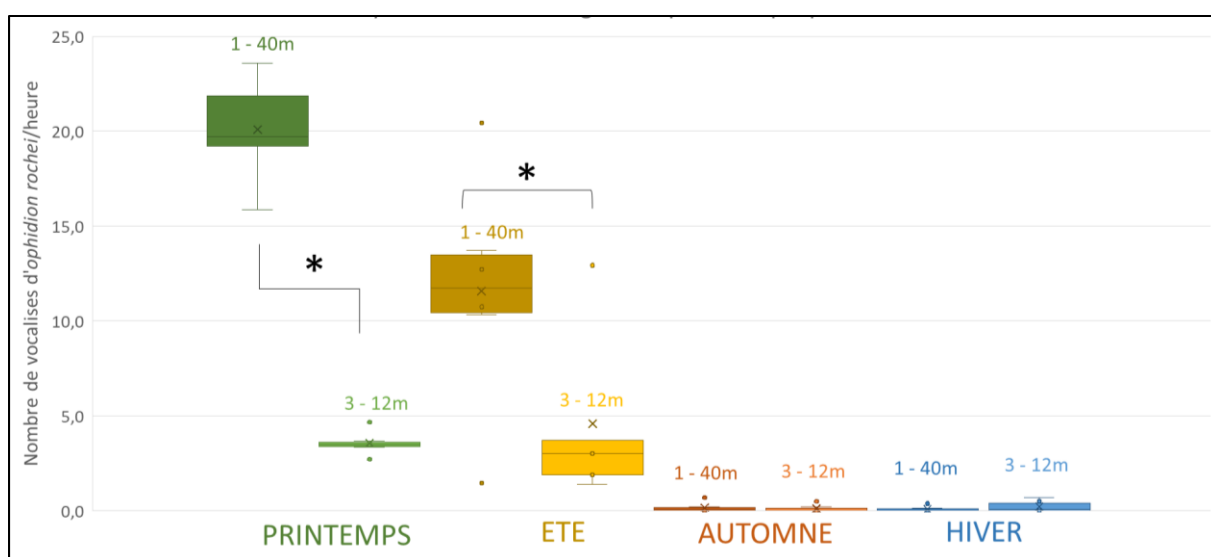
4.3.5. Analyse de la classe sonore OPHIDION

Le nombre de vocalises d'ophidion varie fortement avec la saison avec une augmentation fin du printemps et une diminution en fin d'été jusqu'à ne plus du tout émettre de vocalise en automne et en hiver (Fig.45).

Le site d'étude n°1 à STARESO 40 m est identifié par les données acoustiques comme un site hébergeant la reproduction des ophidions. Le site n°1 présente en moyenne 8 +/- 9,1 émissions d'ophidions par heure avec un minimum de 0 et un maximum de 23,6 émissions/heure. Le site d'étude n°3 à Alga 12 m est une zone de présence significativement moins intense d'émissions sonores d'ophidions que le site n°1 pour toutes les saisons avec une moyenne de 2,1 +/- 2,9 émissions sonores/heure. Ce constat peut être expliqué par l'étendu de l'habitat sableux sur le site n°1 à STARESO 40 m contre l'étendue réduite de l'habitat sableux dans la rivière de retour à 12m.

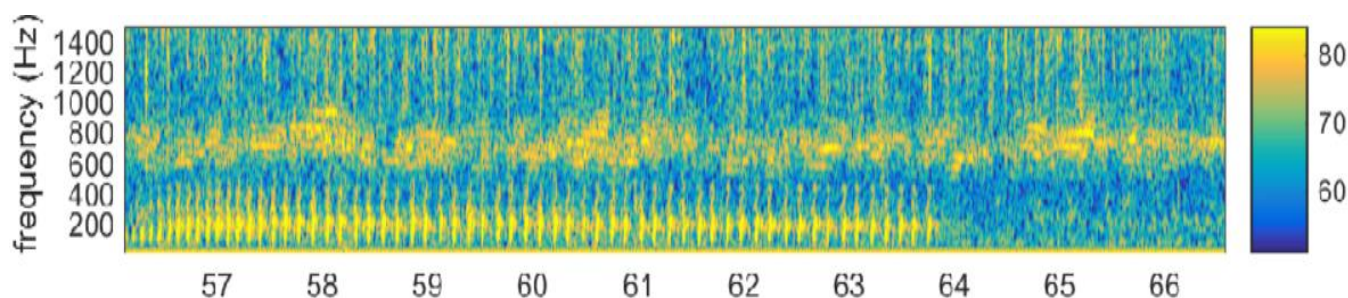
Comme pour les autres Ophidiiformes, les mâles de *Ophidion rochei* possèdent une paire de 3 muscles dédiés à la production sonore (vitesse de contraction rapide et fréquence de contraction grande) qui sont fixés à la paroi de la vessie natatoire.

Chaque contraction des muscles met en mouvement un 'marteau osseux' qui percute et fait vibrer la vessie natatoire qui émet alors une impulsion sonnante comme un bruit de tambour (Dijkgraaf 1947). Le son de l'ophidion est généralement constitué d'un train de 1 à 27 impulsions (Fig. 46) se répétant avec un « Inter-Pulse-Interval (IPI) » croissant compris entre 85.8 ± 0.2 ms et 113.7 ± 0.4 ms. Chaque impulsion possède une fréquence dominante comprise entre 226 ± 1 et 420 ± 1 Hertz (Parmentier et al, 2010) inversement proportionnelle à la taille des mâles vocalisateurs. Les ophidions émettent des sons au moins de mai à septembre entre 20 :00 et 02 :00 avec un pic entre 22 :00 et 23 :00.



45

Boîtes à moustaches du nombre de vocalises d'*Ophidion rochei* en fonction de la saison échantillonnée et en fonction de la position (1 ou 3). Le symbole * représente le caractère significatif de la différence entre les deux boîtes. Les échantillons sont les 5 à 6 nuits de chaque session de mesure.



46

Exemple de production sonore d'ophidions (spectrogramme de 10s).

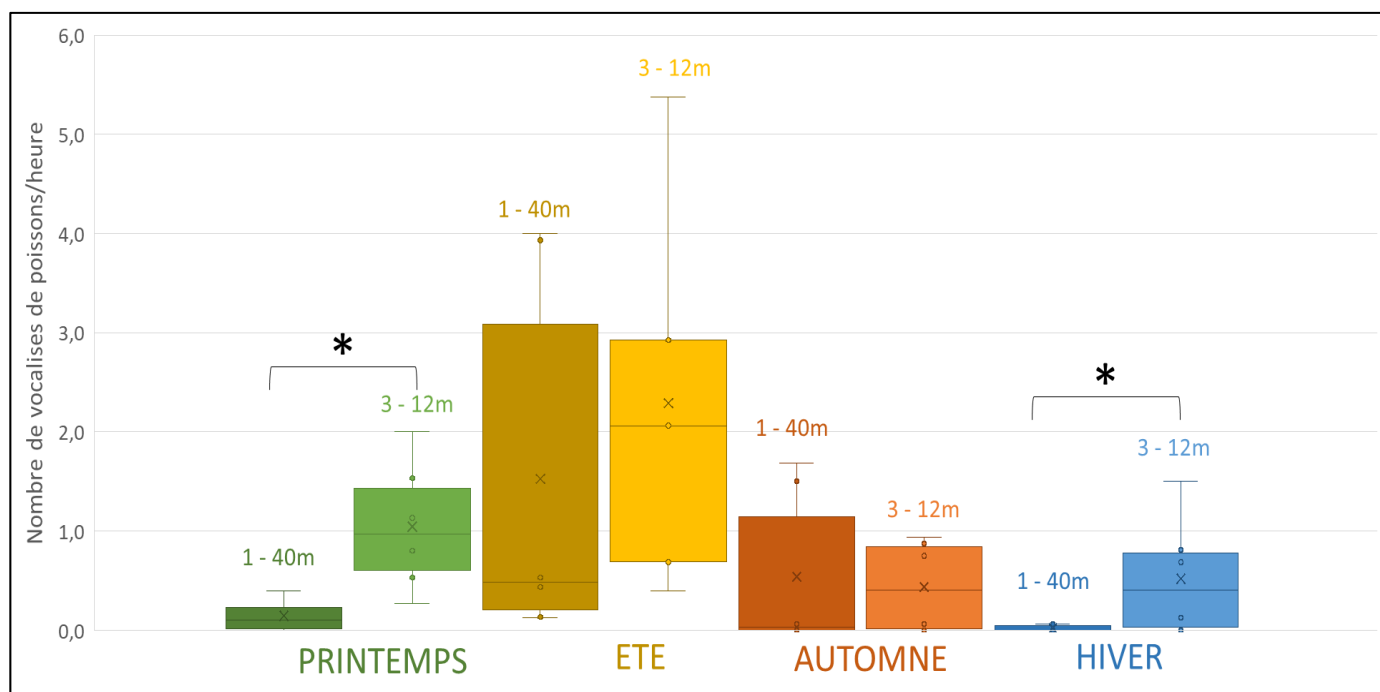
4.3.5. Analyse de la classe CORB

Les deux sites de mesure ne peuvent pas être identifiés clairement comme des sites hébergeant la reproduction intense des corbs, car le nombre de vocalises est faible comparé à d'autres sites de méditerranée hébergeant la reproduction (5000 sons/nuit dans l'Agriate, 8000 sons/nuit dans la Réserve de Cerbère Banyuls contre un maximum de 86 sons par nuit enregistré sur le site n°3 à Alga 12 m de profondeur).

L'évolution du nombre d'émissions sonores de corbs par heure au cours des saisons pour les 2 sites a été étudiée (Fig.47, Tableau 4). On constate que le corb a une période bien définie d'activité acoustique cohérente avec la bibliographie.

Le nombre de sons de corbs augmente au mois de mai et de manière importante à l'été pour diminuer en automne et hiver. On compte en moyenne 3 fois plus de vocalises de corbs à l'été qu'au printemps.

Le site n°3 (Alga 12 m) présente au printemps, en été et en hiver plus de vocalises de corbs que le site n°1 (STARESO 40 m). Cette différence est significative au printemps et en hiver.



47

Boîtes à moustache du nombre de vocalises de corbs en fonction de la saison échantillonnée et en fonction de la position (1 ou 3). Le symbole * représente le caractère significatif de la différence entre les deux boîtes. Les échantillons sont les 5 à 6 nuits de chaque session de mesure.

Tableau 4. Moyennes et écarts-types du nombre de vocalises de corbs enregistrées par site et par saison.

Position/Saison	Printemps	Eté	Automne	Hiver
1 - 40m	0,1 +/- 0,2	1,5 +/- 1,9	0,5 +/- 0,8	0
3 - 12m	1 +/- 0,6	2,3 +/- 2	0,4 +/- 0,5	0,5 +/- 0,6
2 positions confondues	0,6 +/- 0,6	1,9 +/- 1,9	0,5 +/- 0,6	0,3 +/- 0,5

Le corb est un poisson mobile qui évolue pour sa reproduction de préférences sur les roches et/ou abris. La présence épisodique des corbs rend compte du passage des animaux sur les zones sableuses et il existe peut-être un site de reproduction à proximité.

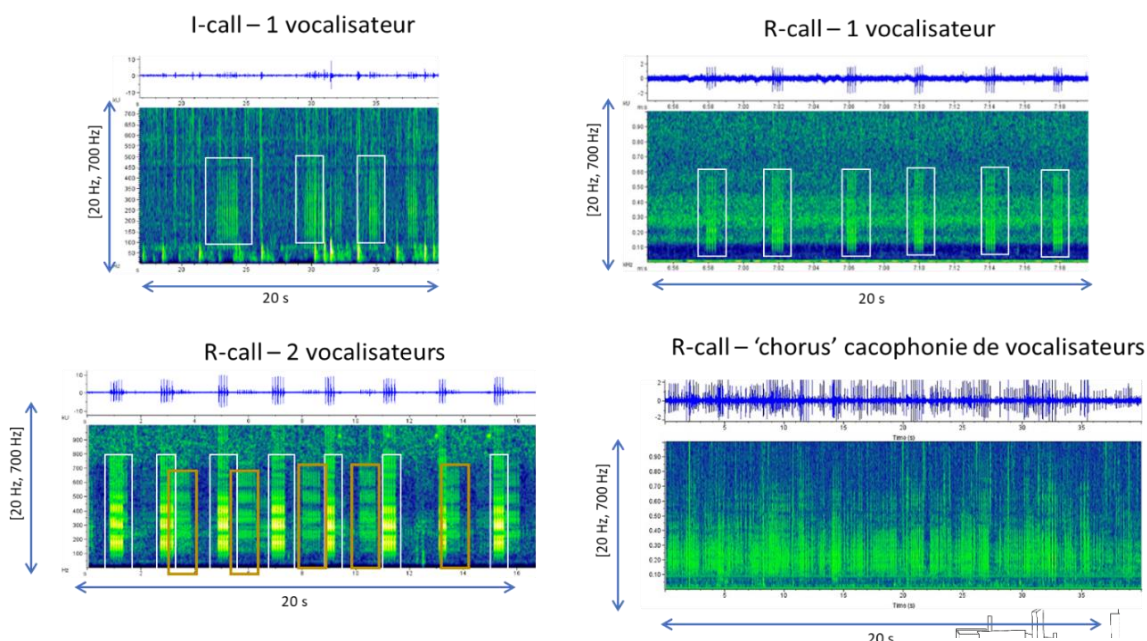
Comme pour les autres Sciaenidae dont les vocalises sont connues, les mâles de corbs possèdent une série de muscles dédiés à la production sonore (vitesse de contraction rapide et fréquence de contraction grande) qui sont fixés à la paroi de la vessie natatoire. Chaque contraction des muscles met en mouvement un 'marteau osseux' qui percute et fait vibrer la vessie natatoire qui émet alors une impulsion sonnante comme un bruit de tambour (Dijkgraaf 1947). Le son du corb est généralement constitué d'un train de 4 à 6 impulsions se répétant avec un « Inter-Pulse-Interval (IPI) » compris entre 100 et 144 millisecondes. Chaque impulsion possède une fréquence dominante comprise entre 210 et 350 Hertz (Parmentier et al., 2018) inversement proportionnelle à la taille des mâles vocalisateurs.

Ce son peut être émis 1) tout seul ou sans un rythme de répétition (ITI : Inter Train Interval) fixe, avec un nombre d'impulsions et un inter-pulse-interval variables, dans ce cas on parle de « Irregular Call » (I-Call, Picciulin et al. 2012) ou 2) de manière stéréotypée, en série, avec un rythme de répétition fixe et un nombre d'impulsions et un IPI stable, dans ce cas on parle de « Regular Call » (R-call, Picciulin et al., 2012) (cf. Figure 21).

Cette production sonore stéréotypée est stable dans le temps et dans l'espace (à l'échelle d'une décennie et pour la méditerranée nord-occidentale) (Parmentier et al. 2018). La recherche de ces sons permet donc l'étude de la présence des corbs vocalisateurs.

Les corbs émettent des sons au moins de mai à septembre entre 17 :00 et 24 :00 avec un pic entre 20 :00 et 23 :00 (Picciulin et al., 2012, Parmentier et al., 2018). Cette activité sonore correspond à la période de ponte du corb et est liée à la reproduction (signalement de présence, sélection des mâles prêts pour la reproduction, synchronisation de l'émission des gamètes). En effet, les Sciaenidae forment des leks dans lesquels les mâles attirent les femelles en produisant des séries de vocalises à répétition (R-call). Cette production sonore stéréotypée joue un rôle dans la compétition entre mâles (Gilmore 2002, Parsons 2009). Pour d'autres espèces que le corb méditerranéen, *Cynoscion regalis* et *Argyrosomus japonicus*, les R-calls servent à attirer femelles et mâles pour la formation de sites d'agrégations reproductives. Chez *Sciaenops ocellatus* et *Umbrina cirrosa*, des mâles ont été observés lorsqu'ils vocalisaient en suivant des femelles (Picciulin et al., 2012).

Le rôle des I-calls est moins clair et les vocalises ne suivent pas de rythme nocturne clair comme le R-call. Contrairement aux R-calls, ces sons ne sont pas indicateurs de sites fonctionnels, mais peuvent servir pour identifier des sites de fréquentation.



4.3.6. Etude des classes SIR et COCKTAIL

Après l'analyse des productions sonores spécifiques attribuées à plusieurs espèces ciblées en Méditerranée (corb, ophidion, rascasse ; le mérrou n'ayant pas été détecté sur le site étudié), l'analyse porte sur la biophonie ichtyologique restante.

Celle-ci comprend une vocalise stéréotypée de type « SIR » (« Série d'Impulsions Rapides »), ainsi que l'ensemble des autres émissions sonores de poissons regroupées dans la classe « COCKTAIL » (Tableau 6). Les résultats montrent que la vocalise « SIR » est majoritairement détectée au printemps. Au cours de cette saison, elle est également plus fréquente sur le site n°1 (40 m) que sur le site n°3 (12 m). Concernant la classe « COCKTAIL », le site n°1 présente globalement un nombre plus élevé de vocalises que le site n°3, en particulier en automne (différence significative) et au printemps.

4.3.7. Synthèse des résultats la biophonie ichtyologique

Les deux sites d'écoute présentent 3 types de vocalises d'espèces de poissons à la signature connue et dont une espèce est protégée :

1. Étant à proximité immédiate d'un herbier, l'émission sonore des « kwas » (c'est-à-dire possiblement des rascasses) omniprésente dans les herbiers a été détectée sur les 2 sites d'écoute et présente une saisonnalité qui est connue.
2. Les sites d'écoute présentent des émissions sonores de corbs. La présence épisodique des vocalises de corbs rend compte du passage des animaux sur les zones sableuses et il existe peut-être un site de reproduction à proximité.
3. Les sites abritent des ophidions (*Ophidion rochei*) et semblent abriter aussi une activité de reproduction de cette espèce.

La présence de vocalises de poissons dépend de manière significative de la saison, avec beaucoup plus de vocalises à l'été et au printemps qu'à l'automne et en hiver.

Le nombre de vocalises d'ophidion, de « SIR » et d'autres vocalises est plus important sur le site n°1 à 40 que sur le site n°3 à 12m. Le nombre de vocalises de corbs et de kwa est plus important sur le site n°1 à STARESO 40 m que sur le site n°3 à Alga 12 m .

Tableau 6. Moyennes et écarts-types du nombre de vocalises « SIR » enregistrées par site et par saison.

Position	Printemps	Eté	Automne	Hiver
1 – 40 m	0,5 +/- 1,1	0	0	0 +/- 0,1
3 – 12 m	0,2 +/- 0,2	0,1 +/- 0,1	0	0
2 positions confondues	0,4 +/- 0,8	0,1 +/- 0,1	0	0

4.3.9. Anthrophonie : bruit des bateaux et pressions humaines

Le nombre de passages de bateaux a été évalué entre le lever et le coucher du soleil. Cette période a été adaptée en fonction de la saison étudiée. Sur l'ensemble des mesures, $10,8 \pm 12,9$ passages de bateaux par jour ont été détectés en moyenne, avec un minimum de 0 et un maximum de 57 bateaux par jour (Tableau 7).

- Le nombre de passages de bateaux est plus élevé en mai et en septembre qu'en décembre et en mars.
- Le nombre de passages de bateaux est approximativement deux fois plus important sur le site STARESO 40 m que sur le site Alga 12 m.

La Figure 49 présente l'évolution du nombre moyen de passages de bateaux par saison, ainsi que les écarts-types associés.

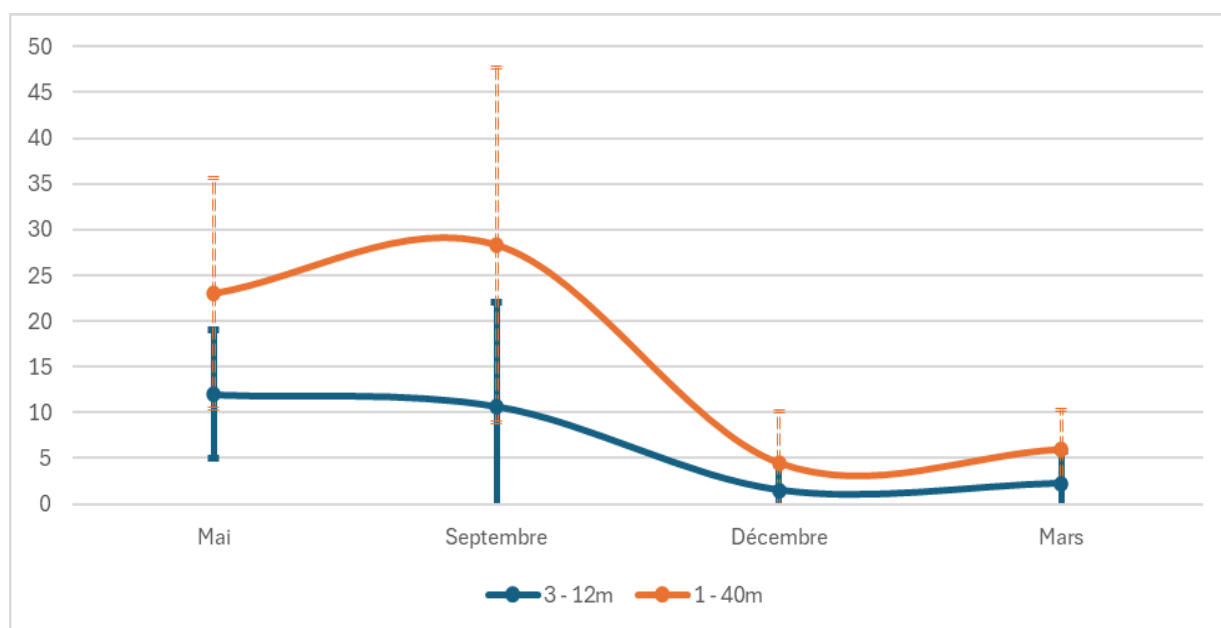
Chaque passage de bateau induit une augmentation ponctuelle du niveau de bruit, susceptible d'avoir des effets sur la faune marine.

Dans la continuité de l'étude de la biodiversité par acoustique passive, l'analyse a été centrée sur les invertébrés et les poissons. Ces groupes présentent des capacités auditives adaptées aux sons sous-marins, principalement dans une bande de fréquences relativement basse comprise entre 20 Hz et 2 kHz (Duarte et al., 2021).

Une revue bibliographique approfondie portant sur les effets du son sur la ressource halieutique (Gervaise & Lossent, 2020) a montré que des sons d'origine anthropique peuvent induire des dérangements comportementaux à partir de niveaux sonores compris entre 110 dB re. 1 μ Pa et 120 dB re. 1 μ Pa, dans la bande d'audition des poissons ([20 Hz, 20 kHz]).

Tableau 7. Moyenne, écart type du nombre de passages de bateaux par jour en fonction de la saison et de la position étudiée.

Position/saison	Mai	Septembre	Décembre	Mars
3 - 12m	12 +/- 7	10,7 +/- 11,3	1,5 +/- 2,8	2,3 +/- 3,5
1 - 40m	23 +/- 12,6	28,3 +/- 19,4	4,5 +/- 5,6	6 +/- 4,2
2 positions confondues	17,5 +/- 11,4	19,5 +/- 17,8	3 +/- 4,5	4,1 +/- 4,2



49

Série temporelle du nombre moyen de bateaux par mois ainsi que les écarts-types.

Les séries temporelles du niveau sonore ont donc été évaluées dans cette gamme fréquentielle (SPLrms [20 Hz, 2 000 Hz], T = 60 s). La Figure 50 présente les variations temporelles du niveau de bruit enregistrées au site Alga 12 m en décembre et en septembre. La série temporelle de décembre apparaît relativement stable, tandis que celle de septembre présente de nombreux pics.

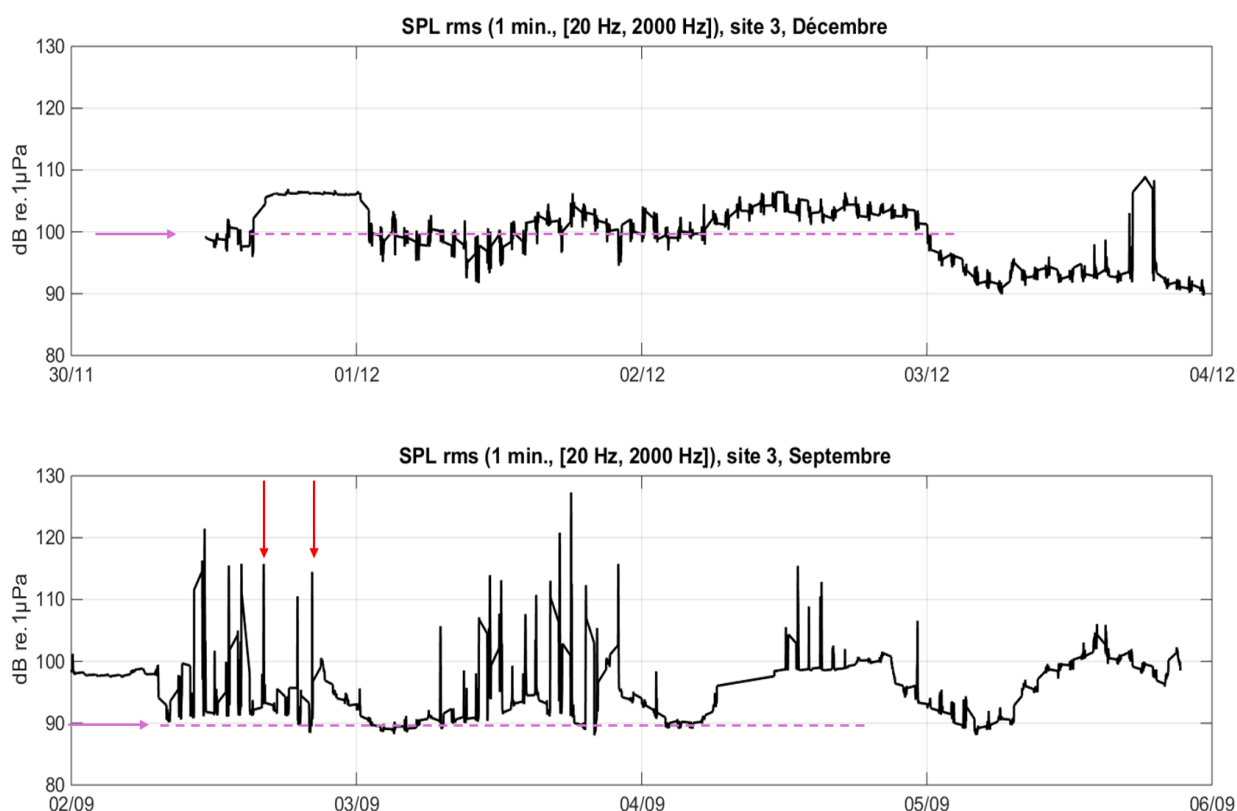
- Chaque pic (flèche violette) correspond à un passage de bateau, traduisant une fréquence de passages plus élevée en septembre qu'en décembre.
- En dehors des passages de bateaux, le niveau sonore se stabilise autour d'une valeur minimale correspondant au pied de bruit (trait horizontal pointillé violet), principalement généré par l'agitation de la surface sous l'effet du vent. Ce pied de bruit est plus élevé en décembre (≈ 100 dB) qu'en septembre (≈ 90 dB).

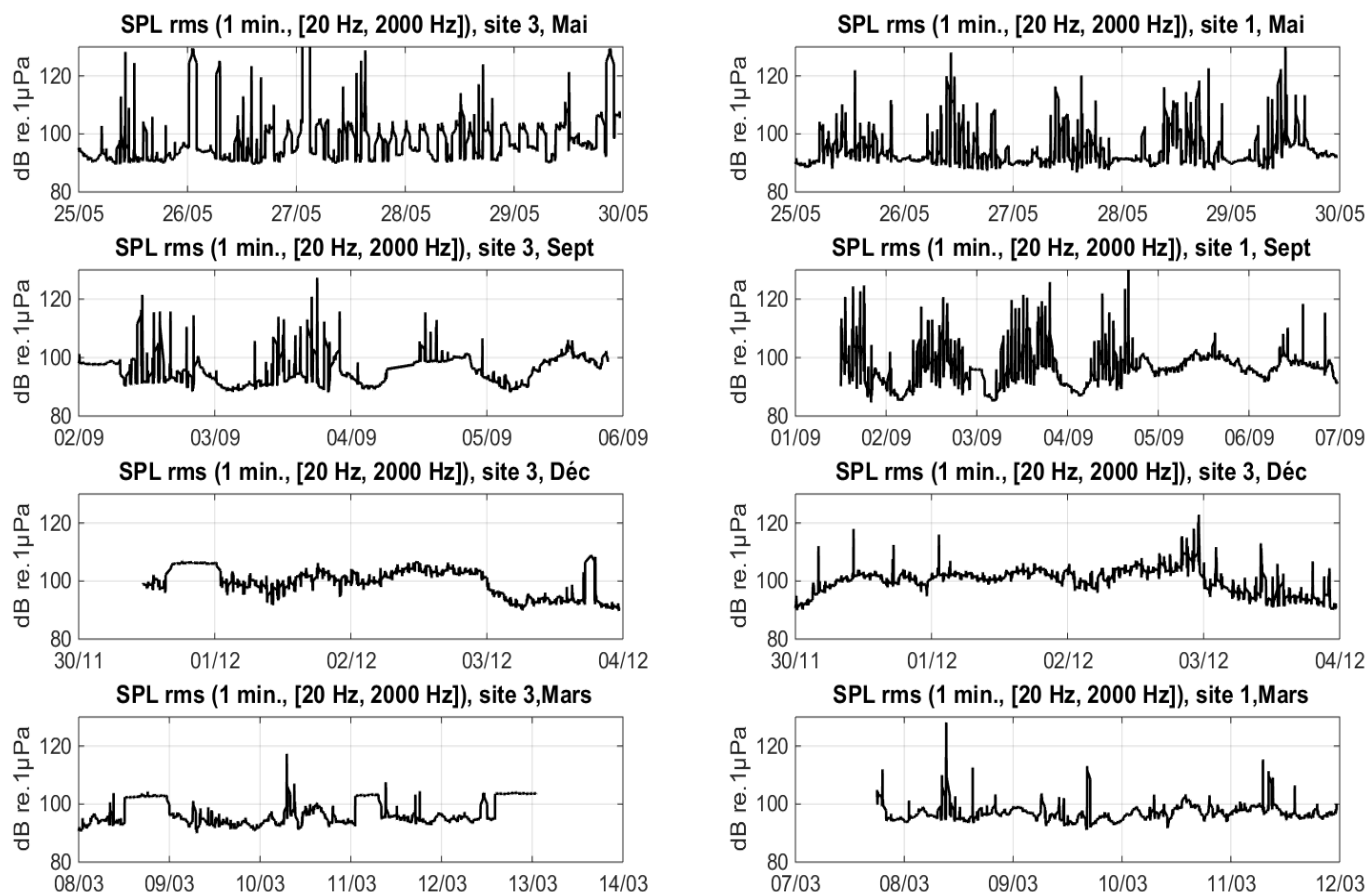
La Figure 51 présente les séries temporelles du niveau de bruit dans la bande d'audition des poissons et des invertébrés pour les deux sites les 4 mois de mesure (mai, septembre, décembre, mars) :

- Les mois de mai et septembre présentent plus de pics sonores dus aux bateaux que les mois de décembre et mars,
- Les mois de décembre et mars présentent des pieds de bruit plus élevés que ceux des mois de mai et septembre,
- Le site STARESO 40 m présente plus de pics sonores créés par les bateaux que le site Alga 12 m.

Pour chaque session de mesure et chaque site, nous avons calculé le pourcentage de temps sur lequel le niveau de bruit est supérieur à 110 dB re.1 μ Pa et 120 dB re. 1 μ Pa (Tableau 8) :

- Les pourcentages sont faibles et inférieurs à 6 %,
- Ils atteignent leur niveau maximum en mai et septembre et sont très faibles en décembre et mars,
- Les pourcentages sont plus élevés au site STARESO 40 m qu'au site Alga 12 m.





51 Evolution temporelle du niveau de bruit dans la gamme d'audition des poissons et invertébrés, à gauche : site 3 – Alga 12 m, à droite : site 1 – STARESO 40 m , de haut en bas Mai, Sept, Déc, Mars.

Tableau 8. Pourcentage du temps sur lequel le niveau de bruit est supérieur à 110 dB et 120 dB.

		site 1	site 3
Mai	proba(SPL >110 dB)	5,4 %	2,1 %
	proba(SPL >120 dB)	4,00 %	0,30 %
Sept.	proba(SPL >110 dB)	3,20 %	1,60 %
	proba(SPL >120 dB)	0,50 %	0,1 %
Déc.	proba(SPL >110 dB)	1,90 %	0,00 %
	proba(SPL >120 dB)	0,10 %	0,00 %
Mars	proba(SPL >110 dB)	0,60 %	0,10 %
	proba(SPL >120 dB)	0,10 %	0,00 %

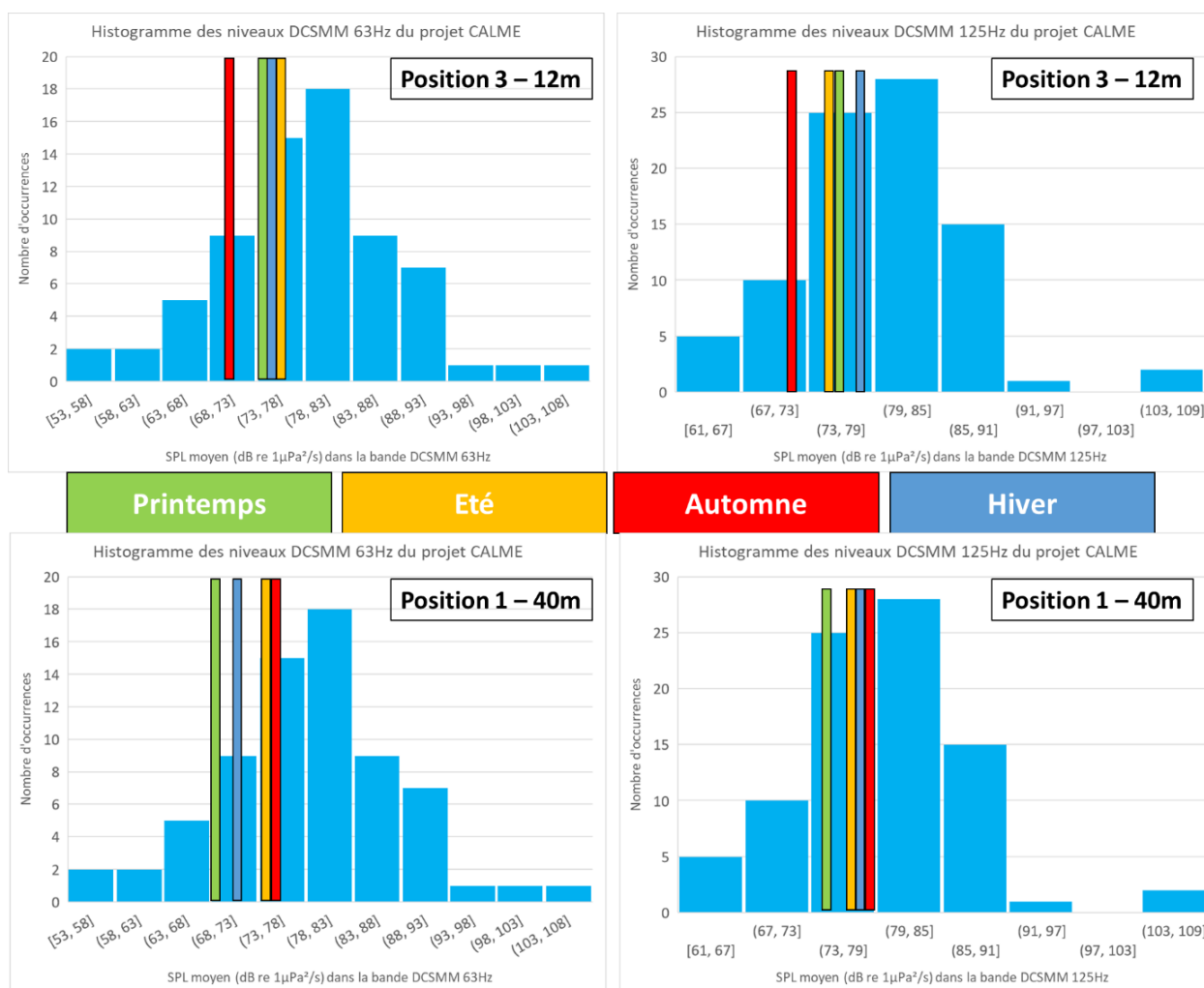
4.3.10. Évaluation et hiérarchisation des pressions humaines sur les milieux sableux

L'un des objectifs du projet était d'évaluer, hiérarchiser et quantifier les pressions humaines s'exerçant sur la biodiversité des milieux sableux. Les résultats obtenus, notamment en matière de bruit sous-marin, apportent des éléments rassurants quant à l'état acoustique actuel de ces habitats, tout en mettant en lumière des pressions émergentes encore peu documentées.

L'évaluation des niveaux de bruit sous-marin réalisée dans le cadre de cette étude permet de renseigner le critère 2 (bruit continu) du descripteur 11 (« introduction d'énergie, dont le bruit sous-marin ») de la Directive Cadre pour la Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Les niveaux sonores mesurés dans les bandes de tiers d'octave centrées sur 63 Hz et 125 Hz, exprimés en SPL rms (dB re. 1 μ Pa), se situent à des niveaux faibles.

La comparaison des niveaux sonores enregistrés aux références issues du réseau CALME montre que les deux stations de mesure se positionnent dans la moitié la moins bruyante du réseau, toutes saisons confondues (Fig.52). Ces résultats suggèrent que, dans l'état actuel, la pression acoustique liée aux activités humaines, et notamment à la plaisance motorisée, demeure limitée sur les milieux sableux étudiés. Aucun signal ne permet d'indiquer une perturbation significative du cycle de vie des espèces liée au bruit sous-marin dans les bandes de fréquence considérées.

Ces résultats sont cohérents avec les observations biologiques réalisées sur le terrain, qui montrent la persistance de comportements fonctionnels essentiels (alimentation, reproduction, nurserie) sur ces habitats, y compris en période de fréquentation estivale.



Toutefois, si la pression acoustique apparaît actuellement faible, d'autres formes de pressions humaines émergent et méritent une attention particulière. La mise en œuvre de l'arrêté-cadre (123/2019 du 3 juin 2019) relatif à la protection de l'herbier de Posidonie, interdisant le mouillage des navires de plus de 24 mètres au sein de l'herbier, entraîne mécaniquement un report des activités de plaisance vers les milieux sableux adjacents.

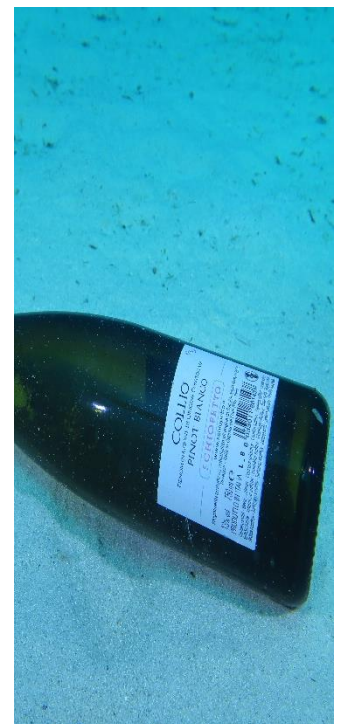
Ce report d'usage, et en particulier l'augmentation potentielle des pratiques d'ancrage sur les fonds sableux, constitue une pression mécanique et physique encore peu documentée. À l'heure actuelle, les connaissances relatives aux effets de l'ancrage répété sur la structure des fonds sableux, sur les communautés benthiques et sur les fonctions écologiques associées demeurent limitées. Les résultats de ce projet soulignent ainsi la nécessité d'intégrer ces pressions émergentes dans les réflexions futures, tant du point de vue scientifique que dans les stratégies de gestion spatialisée des usages.

De plus, les observations réalisées en période estivale ont également mis en évidence une pollution par les déchets, principalement plastiques, associée à la fréquentation touristique et à la plaisance.

De nombreux déchets ont été recensés sur les milieux sableux, en particulier dans les baies de l'Alga et d'Oscelluccia, secteurs fortement fréquentés par les voiliers et les unités de plaisance.

La fréquentation de ces baies est estimée à environ 2 000 bateaux sur la saison estivale, avec des pics pouvant atteindre jusqu'à 150 bateaux par jour (Fontaine et al 2019, Fullgrabe et al. 2023). Cette pression ponctuelle mais intense se traduit par une accumulation de déchets, susceptible d'affecter la qualité des habitats sableux et les organismes qui y sont associés (Fig.53). Bien que les impacts écologiques directs de cette pollution n'aient pas été quantifiés dans le cadre de cette étude, leur présence répétée souligne une pression anthropique importante, en particulier durant les périodes de forte fréquentation.

L'ensemble de ces résultats met en évidence un contraste entre une pression acoustique actuellement faible et des pressions physiques et diffuses potentiellement croissantes, liées au report des usages et à la fréquentation touristique. Ils soulignent l'importance d'une approche intégrée de l'évaluation des pressions humaines, prenant en compte non seulement le bruit sous-marin, mais également les impacts mécaniques, physiques et liés aux déchets.



4.4. Recensement par prospections ROV (véhicule sous-marin téléguidé)

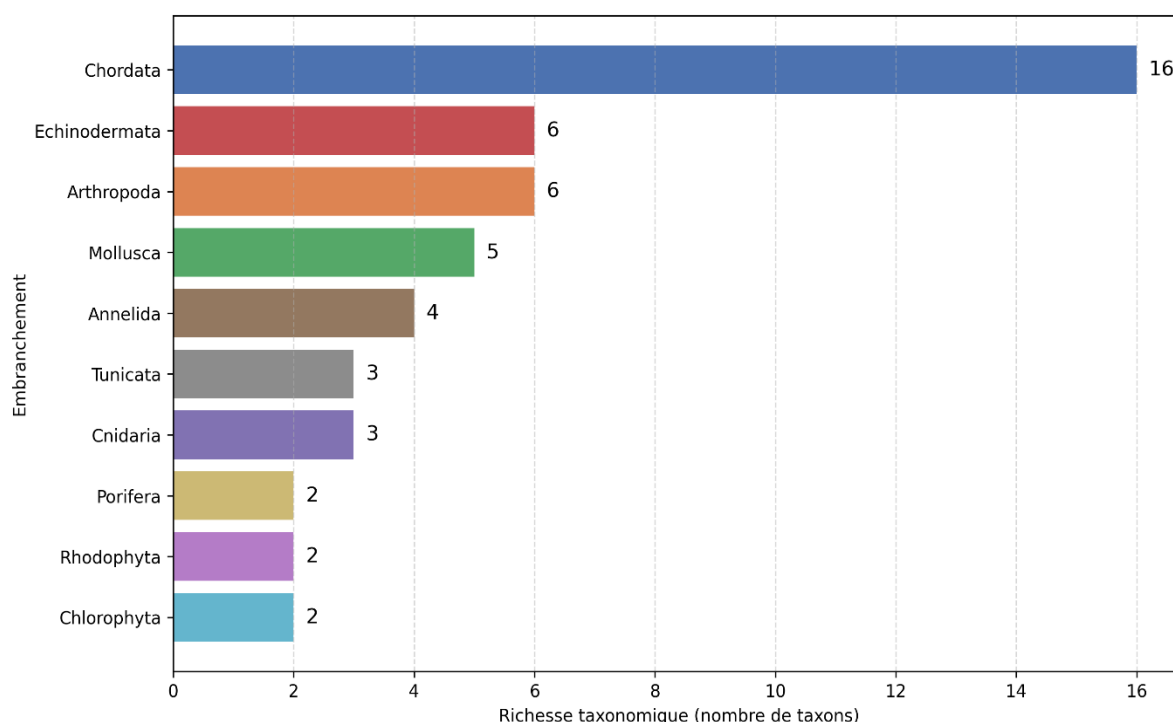
4.4.1. Richesse taxonomique et composition des communautés observées

Les prospections réalisées à l'aide d'un véhicule téléguidé sous-marin (ROV) ont permis d'identifier un total de 57 taxons distincts, traduisant une richesse taxonomique notable au regard de la méthode ROV et témoigne d'une biodiversité benthique et démersale élevée sur les milieux sableux (Fig.54, 55, 56). Cette richesse taxonomique est cohérente avec les résultats obtenus par des suivis ROV en Méditerranée, où Vigo et al. (2023) rapportent par exemple l'identification d'environ 43 taxons lors de prospections vidéo, confirmant que les transects ROV constituent un outil non invasif particulièrement adapté à la caractérisation des communautés benthiques et démersales, y compris sur fonds meubles.

L'analyse de la richesse taxonomique répartis au sein de 10 embranchements met en évidence une structure taxonomique dominée par les Chordata, qui regroupent 16 taxons, représentant le groupe le plus diversifié au sein des communautés observées. Cette dominance reflète principalement la forte représentation des poissons téléostéens sur les habitats sableux explorés lors des prospections ROV.

Comme pour les inventaires visuels en plongée, les prospections vidéo ont tendance à favoriser la détection des organismes visibles (poissons et macrofaune épibenthique), tandis que la faune endobenthique reste plus difficile à caractériser sans prélèvements complémentaires (Damveld et al., 2018).

Les Arthropoda et les Echinodermata constituent les groupes suivants en termes de richesse, avec respectivement 6 taxons chacun. Les Arthropodes sont majoritairement représentés par des crustacés décapodes et des mysidacés, tandis que les Échinodermes incluent plusieurs espèces d'astérides, d'oursins et d'holothuries, caractéristiques des fonds meubles méditerranéens. Les Mollusca présentent une richesse taxonomique intermédiaire, avec 5 taxons, comprenant notamment des céphalopodes et des gastéropodes. Les Annelida et les Cnidaria affichent des richesses comparables, avec respectivement 4 et 3 taxons, correspondant à des organismes sessiles fréquemment associés aux habitats sableux et aux substrats meubles hétérogènes. Les Tunicata, les Porifera, ainsi que les groupes algaux (Chlorophyta et Rhodophyta) présentent des richesses plus faibles, avec 2 à 3 taxons par embranchement.





Zeus faber



Spicara smaris



Serranus cabrilla



Scorpaena notata



Grammonus ater



Octopus vulgaris



Apomatus similis



Sphaerechinus granularis



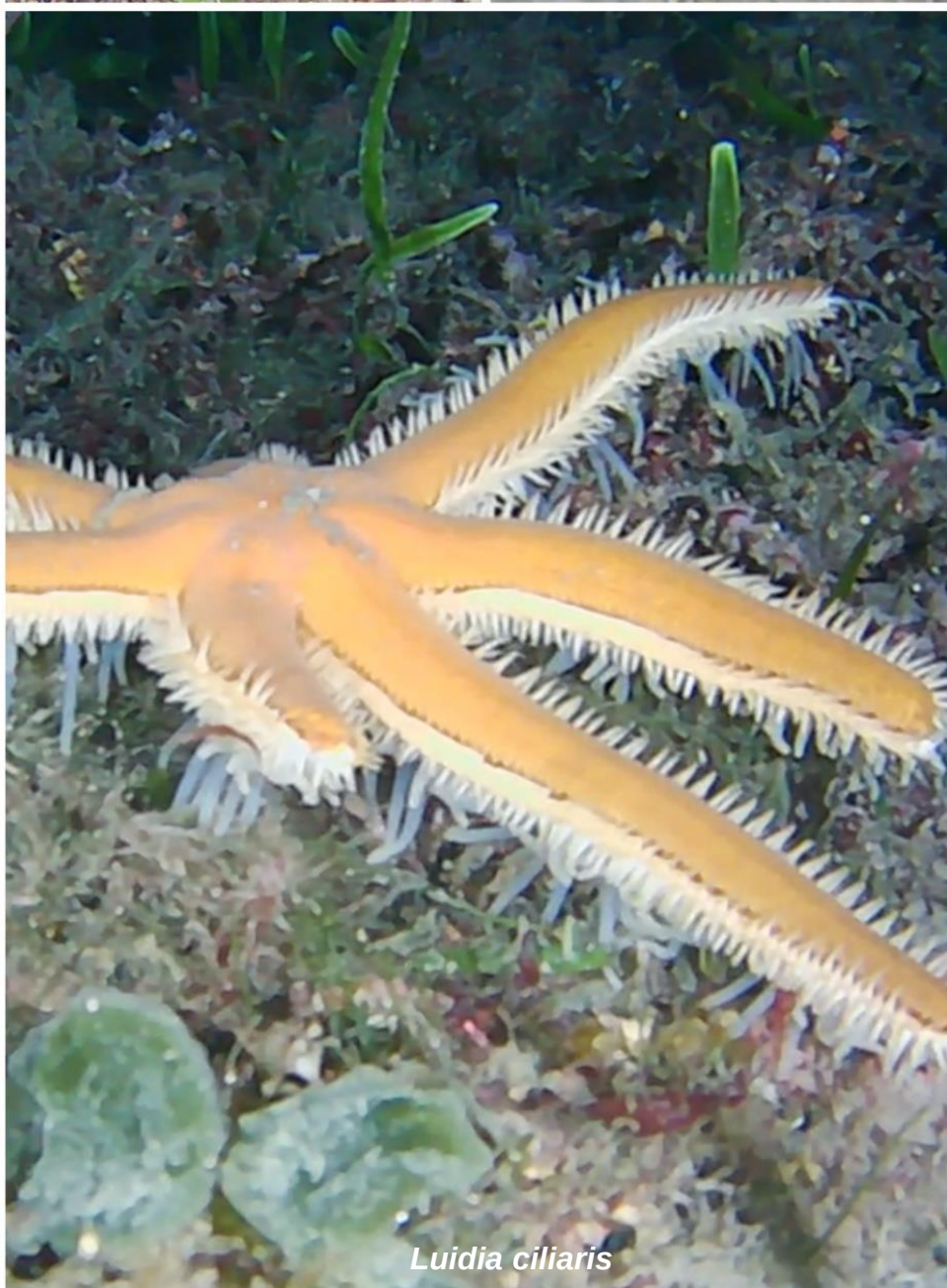
Echinaster sepositus



Alcyonium palmatum



Phallusia mammillata

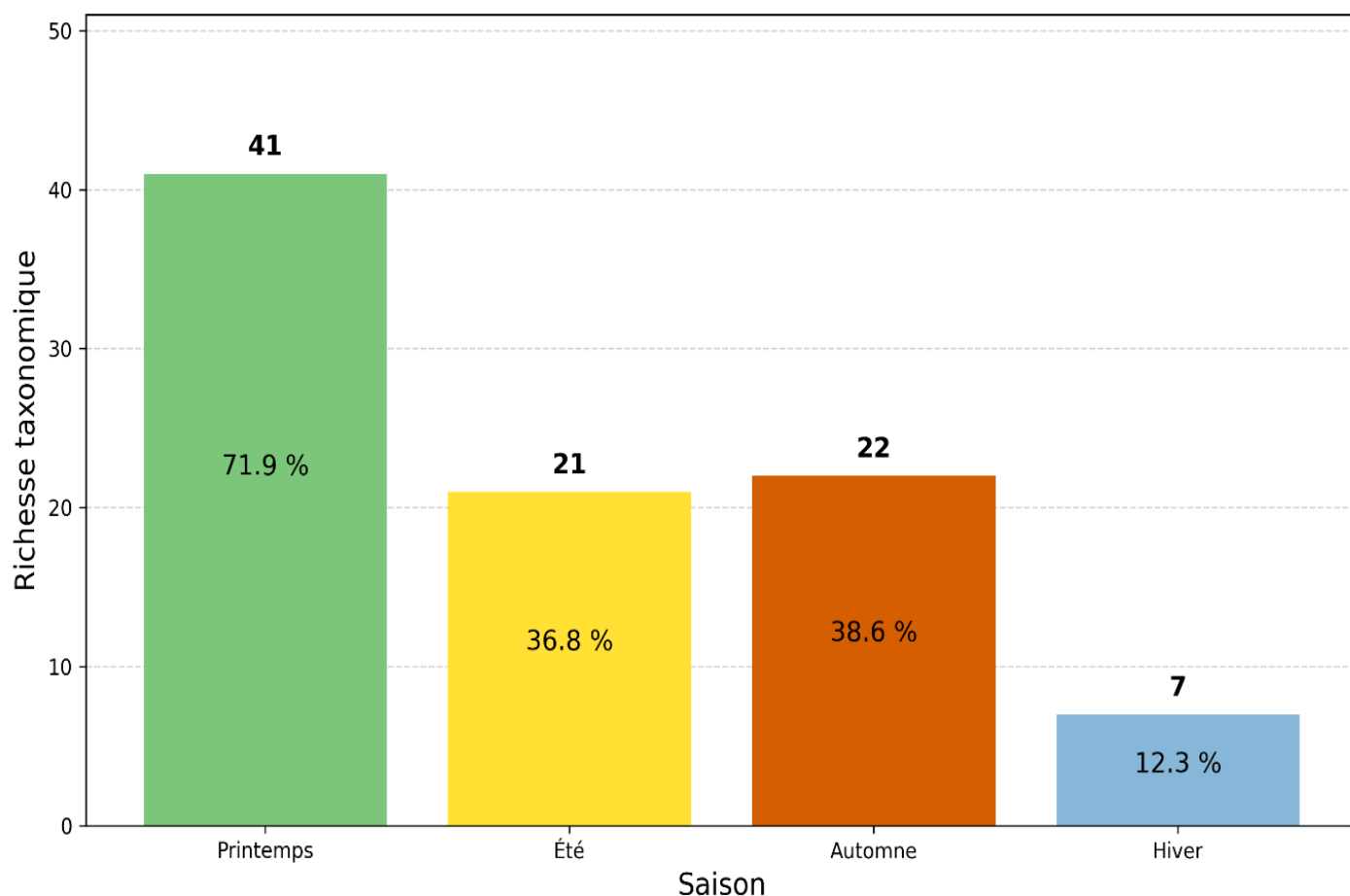


Luidia ciliaris

4.4.2. Variations saisonnières de la richesse taxonomique

L'analyse de la richesse taxonomique par saison révèle une variabilité saisonnière marquée. La richesse spécifique maximale est observée au printemps, avec 41 taxons recensés, soit environ 72 % de la richesse taxonomique totale (Fig.57). En été, la richesse taxonomique diminue à 21 taxons, traduisant une réduction notable du nombre de taxons observés. En automne, la richesse taxonomique est de 22 taxons. Enfin, la richesse taxonomique la plus faible est enregistrée en hiver, avec seulement 7 taxons observés. Dans l'ensemble, ces résultats soulignent l'importance de la prise en compte de la saisonnalité dans l'évaluation de la biodiversité à partir de prospections ROV.

Ils mettent en évidence la nécessité d'intégrer des campagnes multi-saisonnières afin de caractériser de manière exhaustive la diversité taxonomique et d'éviter une sous-estimation de la biodiversité liée à un échantillonnage ponctuel.



57

Richesse taxonomique observée par saison lors des prospections ROV. Les valeurs au-dessus des barres indiquent le nombre de taxons observés par saison.

4.5. Approche multi-méthodes et enjeux de conservation

4.5.1. Comparaison des méthodes d'échantillonnage

Le diagramme de Venn comparant les quatre méthodologies d'échantillonnage (ADNe, recensement visuel, enregistrements acoustiques et ROV) met en évidence une forte complémentarité des approches employées (Fig.58).

Au total, 280 taxons ont été recensés toutes méthodes confondues. Le recensement visuel est la méthode ayant détecté le plus grand nombre de taxons (161 taxons), suivi de l'ADNe (132 taxons) et du ROV (57 taxons). Les enregistrements acoustiques présentent une richesse beaucoup plus limitée, avec 3 taxons détectés.

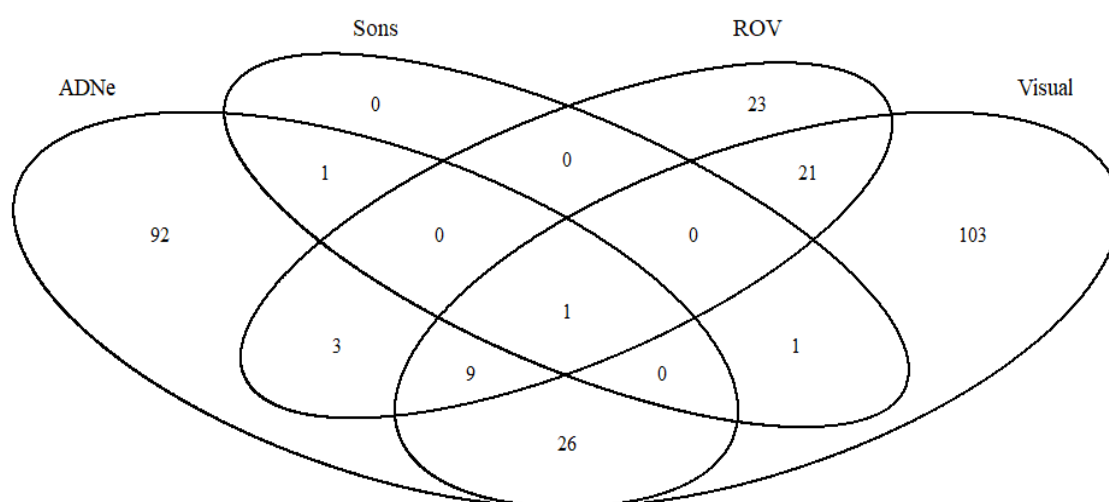
Les résultats du projet ARENA mettent en évidence la forte complémentarité des méthodologies non invasives mises en œuvre pour l'évaluation de la biodiversité marine. L'ensemble des approches utilisées (ADNe, recensement visuel, acoustique passive et ROV) repose sur des protocoles non létaux et non destructifs, compatibles avec des suivis répétés et une application à long terme dans un contexte de gestion environnementale (Tableau 9).

Les différences de richesse spécifique observées entre les méthodes reflètent avant tout la nature des informations produites et les biais méthodologiques associés (Mallet et al., 2014).

L'ADNe s'est révélée particulièrement performante pour la détection des Chordés, notamment des poissons, y compris des espèces rares ou cryptiques difficilement observables in situ. En revanche, la représentation plus limitée d'autres embranchements souligne les limites actuelles des bases de données de référence, qui devront être enrichies pour améliorer la résolution taxonomique de cette approche.

Le recensement visuel présente un spectre taxonomique large et permet d'accéder à des informations essentielles sur l'abondance, la taille et le comportement des espèces. Toutefois, cette méthode reste sensible aux conditions environnementales, aux biais liés aux observateurs et à des contraintes logistiques importantes, limitant son déploiement à grande échelle spatiale (MacNeil et al., 2008).

La méthode acoustique passive, bien que caractérisée par une faible richesse spécifique identifiée, apporte une information fonctionnelle unique. La détection de sons associés à des comportements reproducteurs a notamment permis d'identifier des zones de frayères, information inaccessible par l'ADNe et difficilement observable par les méthodes visuelles. L'acoustique offre également la possibilité d'évaluer la pression anthropique via l'analyse du bruit ambiant, les niveaux enregistrés à Calvi indiquant une influence faible de la navigation par comparaison aux valeurs de référence du réseau CALME.



Le recours au ROV a permis l'exploration prolongée de zones profondes (40–100 m), difficilement accessibles en plongée, et la production de données réanalysables par plusieurs experts, réduisant ainsi les biais d'observation (Lowry et al. 2012). Cette méthode complète efficacement les observations directes en élargissant la fenêtre spatiale et temporelle d'échantillonnage.

L'absence de taxons communs à l'ensemble des quatre méthodes souligne qu'aucune approche ne permet, à elle seule, de caractériser exhaustivement la biodiversité (Polanco Fernández et al., 2021). Ces résultats confirment qu'un compromis doit être recherché entre les objectifs écologiques, l'échelle spatiale et temporelle considérée, la nature des variables étudiées (présence, abondance, comportement, fonctions écologiques) et les moyens disponibles.

La combinaison raisonnée de plusieurs méthodologies apparaît ainsi comme la stratégie la plus pertinente pour concevoir des plans d'échantillonnage robustes et adaptés aux enjeux de gestion.

Tableau 9. Comparaison des informations écologiques accessibles selon les méthodes d'observation (ADNe, recensement visuel, acoustique, ROV).

Méthode	Présence	Abondance	Biomasse	Taille	Comportement
ADNe	✓	✗	✗	✗	✗
Visual census	✓	✓	✓ (indirect)	✓	✓
Acoustique	✓ (fonctionnelle)	✗	✗	✗	✓
ROV	✓	✓ (relative)	✗	✗	✓



4.5.2. Statut de conservation des taxons recensés

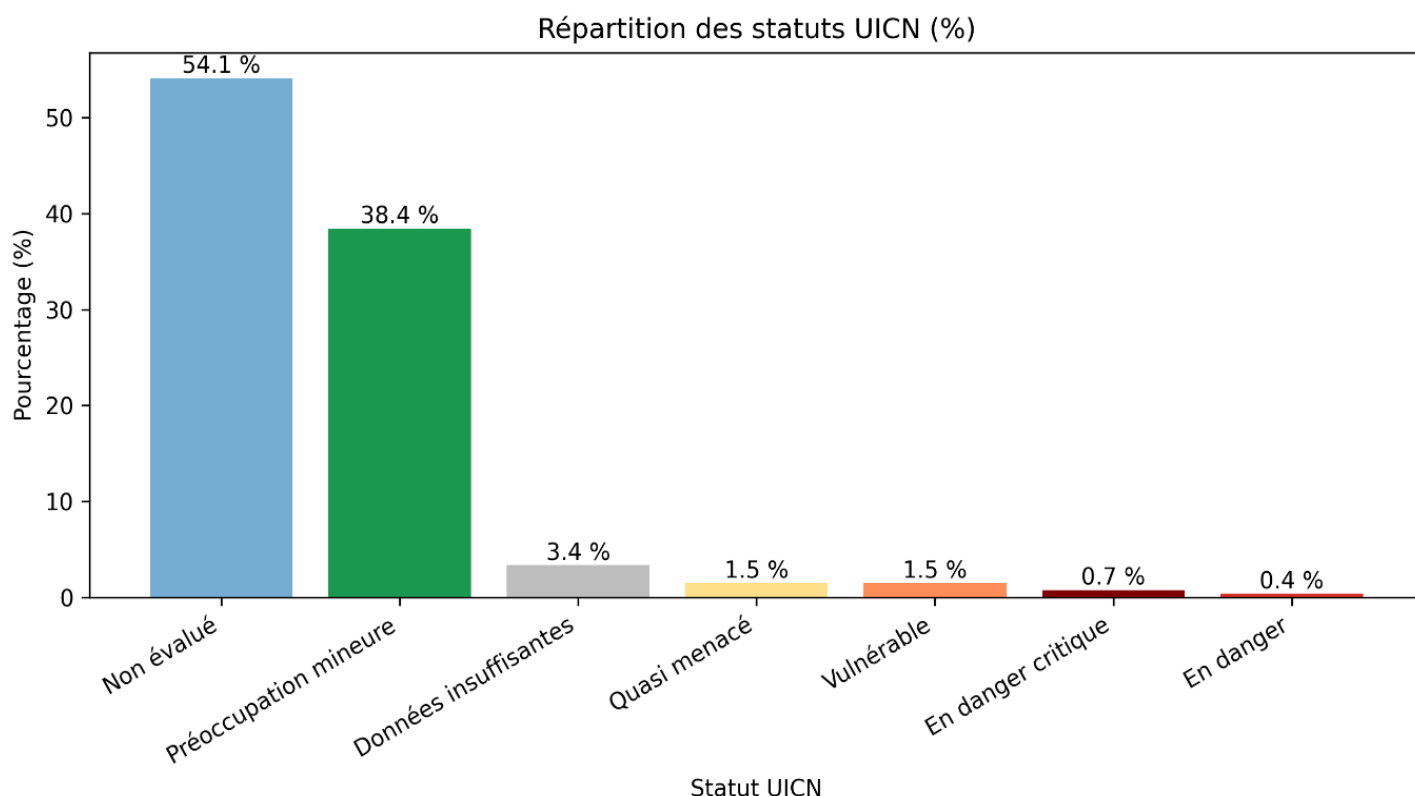
La distribution des statuts de conservation selon la classification de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) révèle une prédominance marquée de taxons non évalués, représentant 54,1 % de l'ensemble des taxons recensés. Les espèces classées en préoccupation mineure constituent la seconde catégorie la plus représentée, avec 38,4 % des taxons (Fig.59).

Les taxons pour lesquels les données disponibles sont insuffisantes pour permettre une évaluation fiable (données insuffisantes) représentent 3,4 % de l'effectif total.

Les espèces classées comme vulnérables (VU) représentent 1,5 % des taxons recensés et incluent la raie pastenague (*Dasyatis pastinaca*), le denti (*Dentex dentex*), le poisson lune (*Mola mola*) et la raie torpille marbrée (*Torpedo marmorata*).

La catégorie en danger (EN) est représentée par une seule espèce, le diable de mer méditerranéen (*Mobula mobular*), correspondant à 0,4 % de l'assemblage étudié. Les espèces classées en danger critique (CR) concernent 0,7 % des taxons et comprennent la raie aigle vachette (*Aetomylaeus bovinus*) et l'aigle de mer (*Myliobatis aquila*).

Dans l'ensemble, les taxons classés dans les catégories UICN indiquant une menace avérée (CR, EN et VU) représentent une proportion cumulée de 2,6 % de l'assemblage étudié. Cette proportion de taxons menacés est nettement inférieure à celle rapportée dans les données issues de la pêche artisanale en Corse, où 14,47 % des taxons capturés sont classés comme menacés (Marengo et al., 2023).



59

Répartition des taxons étudiés selon leur statut de conservation établi par l'UICN.

4.5.3. Vulnérabilité à la pêche des taxons recensés

La vulnérabilité à la pêche des taxons recensés a été évaluée à l'aide du Fishing Vulnerability Index (FVI) développé par Cheung et al. (2007), qui permet de classer les espèces selon leur sensibilité intrinsèque à l'exploitation en fonction de leurs traits biologiques et de leur histoire de vie.

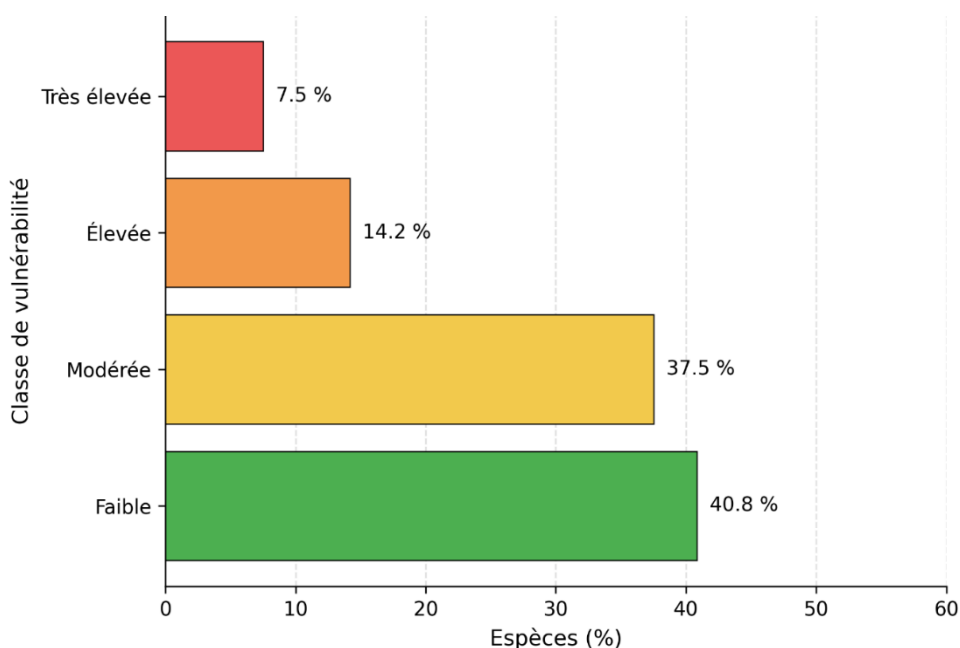
La distribution des classes de vulnérabilité met en évidence une prédominance des espèces présentant une vulnérabilité faible (40,8 %) et modérée (37,5 %) (Fig.60). Les espèces appartenant aux classes de vulnérabilité élevée et très élevée sont moins représentées, avec respectivement 14,2 % et 7,5 % des taxons recensés. Ainsi, près de 78 % des espèces observées appartiennent aux catégories de vulnérabilité faible à modérée.

Les espèces présentant une vulnérabilité très élevée sont principalement représentées par des élasmobranches, notamment la pastenague violette (*Dasyatis tortonesei*), la raie pastenague commune (*Dasyatis pastinaca*), la raie aigle commune (*Aetomylaeus bovinus*) et la raie aigle (*Myliobatis aquila*), ainsi que par des téléostéens, tels que le congre commun (*Conger conger*), la murène commune (*Muraena helena*), le centrolophe noir (*Centrolophus niger*) et l'anguille-serpent (*Ophisurus serpens*).

Ce résultat est cohérent avec les travaux montrant que les classes de vulnérabilité les plus élevées concernent principalement les espèces à traits de vie "K-stratégues", notamment les élasmobranches et les téléostéens longévifs à croissance lente (Cheung et al., 2005).

Les milieux sableux sont souvent considérés comme présentant un faible intérêt halieutique, en raison de leur apparente homogénéité. Cette perception conduit fréquemment à une sous-estimation de leur rôle écologique et fonctionnel dans les stratégies de gestion des habitats marins. Or, les résultats obtenus montrent que plusieurs espèces associées à ces milieux présentent des niveaux de vulnérabilité à la pêche élevés à très élevés, suggérant que les fonds sableux abritent également des taxons sensibles et potentiellement ciblés par différentes formes de pêche.

Bien que le FVI ne mesure pas directement la valeur économique ou commerciale des espèces, il constitue un indicateur pertinent de leur sensibilité à l'exploitation halieutique. À ce titre, la présence d'espèces à forte vulnérabilité dans les habitats sableux suggère que ces milieux jouent un rôle plus important qu'habituellement admis dans le soutien des ressources halieutiques, que ce soit comme zones d'alimentation, d'habitat préférentiel ou d'aires de transit.



60

Répartition des taxons étudiés selon leur statut de conservation établi par l'UICN.

4.5.4. Rôle écologique et fonctionnel des milieux sableux

L'un des objectifs du projet était d'identifier et de définir l'importance écologique des milieux sableux, en reconnaissant leur rôle en tant qu'écotones et habitats fonctionnels, abritant des zones clés telles que les frayères, les nourriceries, les zones d'alimentation et les voies de migration. Les observations réalisées, toutes techniques confondues, apportent des éléments convergents démontrant le rôle central de ces habitats dans le fonctionnement des écosystèmes côtiers (Fig.61).

Les milieux sableux étudiés ont révélé la présence de nombreuses zones de nourricerie pour un large cortège d'espèces. Des juvéniles de poissons ont été régulièrement observés, incluant des espèces à fort intérêt écologique, telles que la blennie papillon (*Blennius ocellaris*), notamment en phase de reproduction avec des individus adultes observés en train de couvrir leurs œufs. Des invertébrés benthiques caractéristiques de ces habitats, tels que les murex (*Bolinus brandaris*), les natices et d'autres gastéropodes, ont également été recensés, confirmant le rôle de ces milieux comme zones de développement précoce pour de nombreuses espèces.

Par ailleurs, ces habitats sableux constituent des zones de nourricerie pour des espèces d'intérêt halieutique majeur, notamment les chapons (*Scorpaena scrofa*), les rascasses rouges et brunes (*Scorpaena spp.*), ainsi que les grondins volants (*Trigla spp.*) (Franco et al., 2012). La présence régulière de juvéniles de ces espèces souligne l'importance des fonds sableux dans le renouvellement des populations exploitées.

Les observations ont également mis en évidence plusieurs zones de frayères fonctionnelles. Des frayères d'ophidions (*Ophidion spp.*) ont été identifiées, notamment grâce à la détection acoustique de leurs émissions sonores caractéristiques.

Des comportements reproducteurs de l'aurin (*Sparus aurata*) ont été observés, ainsi que des arènes de reproduction de jarrets en baie de Calvi, attestant de l'utilisation de ces milieux sableux comme sites de reproduction pour différentes espèces.

Les fonds sableux jouent également un rôle majeur en tant que zones d'alimentation. Des espèces telles que les raies pastenagues (*Dasyatis pastinaca*), les raies aigles (*Aetomylaeus bovinus*, *Myliobatis aquila*) et les uranoscopes (*Uranoscopus scaber*) ont été fréquemment observées en activité d'alimentation. De plus, une migration saisonnière de baudroies (*Lophius spp.*) a été mise en évidence au mois de septembre, ces espèces utilisant les milieux sableux pour se nourrir des juvéniles de poissons de l'année.

Enfin, les milieux sableux constituent un écotone majeur à l'interface avec l'herbier de posidonie, notamment dans une bande d'environ 20 mètres en bordure de l'herbier (Bell and Harmelin-Vivien et al., 1983). Les observations nocturnes ont révélé une forte fréquentation de cette zone par de nombreuses espèces utilisant le sable comme zone de repos ou de refuge, telles que les daurades royales (*Sparus aurata*), les chapons (*Scorpaena scrofa*) et les dentis (*Dentex dentex*).

L'ensemble de ces résultats met en évidence que les milieux sableux ne peuvent être considérés comme des habitats pauvres ou de faible intérêt. Au contraire, ils jouent un rôle écologique fondamental en assurant des fonctions essentielles à différentes phases du cycle de vie des espèces marines. Ces habitats présentent ainsi une importance écologique, halieutique et économique majeure, justifiant pleinement leur intégration dans les stratégies de gestion, de conservation et de suivi des écosystèmes marins côtiers.



Blennius ocellaris



Carapus acus



Chelidonichthys lastoviza



Scorpaena notata



Zeus faber



Torpedo marmorata

61 Exemples de fonctionnalités écologiques rendus par les milieux sableux (nourricerie, frayères, migrations).

4.5.5. Observations remarquables et nouvelles occurrences

Dans le cadre du projet, deux espèces jusqu'alors non recensées en Corse et considérées comme rares sur le littoral méditerranéen français continental (INPN, 2026) ont été observées au sein des milieux sableux étudiés.

La première espèce est le faufré noir (*Grammonus ater*), un poisson benthique, inféodé aux fonds meubles sableux ou vaseux et rarement observé en Méditerranée (Digenis et al., 2024). Cette espèce est généralement associée à des profondeurs comprises entre 30 et 300 m, avec une préférence pour les étages circalittoral et bathyal supérieur. Dans le cadre du projet, un juvénile a été observé en ROV de nuit le 12/06/2024, à 66 m de profondeur, devant la station STARESO, ce qui constitue une observation remarquable au regard de la rareté des données disponibles sur cette espèce en milieu côtier méditerranéen (Fig.62).



La seconde espèce correspond à l'anguille-serpent aptère (*Apterichtus caecus*), observée le 31/01/24 de nuit sur le site de l'Alga à 12 m de profondeur, espèce également rare et peu documentée (Böhlke, 1999), associée aux fonds sableux et vaseux. Son observation constitue une donnée nouvelle à l'échelle régionale et souligne le rôle des milieux sableux comme habitats d'accueil pour des espèces à distribution discrète ou cryptique.

Ces nouvelles occurrences renforcent l'importance écologique des milieux sableux étudiés et mettent en évidence leur rôle comme habitats fonctionnels susceptibles d'abriter des espèces rares, peu connues ou à répartition limitée. Elles soulignent également la nécessité de poursuivre les efforts d'inventaire et de suivi de ces habitats, souvent sous-considérés dans les stratégies de conservation et de gestion du littoral méditerranéen.



62

A gauche photos d'illustrations du faufré noir (*Grammonus ater*), à droite photos d'illustrations de l'anguille-serpent aptère (*Apterichtus caecus*).

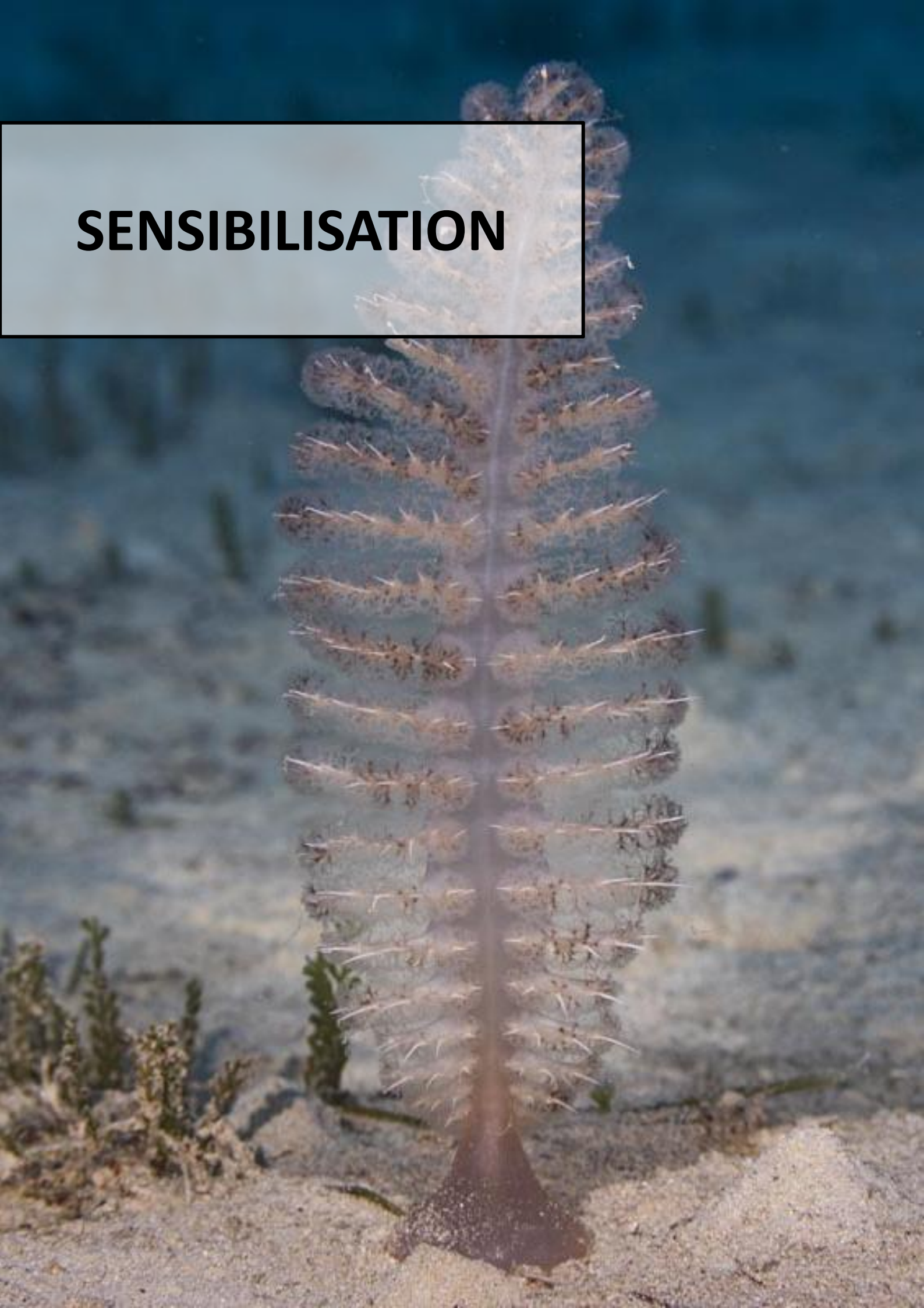
4.5.6. Remise en perspective : limites de la notion de biodiversité “ordinaire”.

Les milieux sableux sont fréquemment décrits comme des habitats de faible intérêt écologique, abritant une biodiversité dite « ordinaire », par opposition à des habitats jugés plus emblématiques ou structurés tels que les herbiers de posidonie ou les récifs coralligènes. La biodiversité « ordinaire » est généralement définie comme l'ensemble des espèces communes, ni menacées ni exploitées, qui représentent pourtant la majorité de la biodiversité mondiale (Gaston & Fuller, 2008). Si cette définition souligne leur importance quantitative dans le fonctionnement des écosystèmes, elle peut également conduire à une hiérarchisation implicite du vivant, opposant une biodiversité dite remarquable à une biodiversité considérée comme secondaire.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet remettent clairement en question cette perception sur les milieux sableux. Les observations montrent que les milieux sableux étudiés abritent une diversité spécifique élevée et accueillent des espèces présentant des statuts de conservation variés : espèces inscrites sur les listes rouges mondiales, espèces rares à l'échelle régionale, mais également espèces d'intérêt écologique et halieutique.

Ces résultats invitent à reconnaître les milieux sableux comme des composantes à part entière des écosystèmes côtiers, jouant un rôle fonctionnel essentiel dans le maintien de la biodiversité et des ressources halieutiques (Thrush et al., 2006). Par ailleurs, ces habitats sableux constituent également des zones d'interface (écotones) entre plusieurs écosystèmes côtiers majeurs, notamment les herbiers de posidonie et les récifs coralligènes. Dans la zone étudiée, où ils s'étendent jusqu'à 100 m de profondeur, ils jouent aussi un rôle de corridors de migration et de refuges pour certaines espèces associées à des milieux plus profonds, mettant en évidence une connectivité fonctionnelle entre les écosystèmes côtiers et les habitats profonds.

SENSIBILISATION



5. Sensibilisation/communication

Dans le cadre du projet ARENA, un important volet de valorisation et de communication a été mis en œuvre afin de mieux faire connaître les milieux sableux, longtemps restés peu considérés.



2023-2026

Au total, 14 événements de sensibilisation ont été organisés et animés, complétés par des expositions photographiques, la réalisation d'un atlas de la biodiversité, des interventions dans les établissements scolaires, ainsi qu'une diffusion auprès du grand public, et des questionnaires via différents supports médiatiques (presse, reportage FR3).

- **11 octobre 2023** : Journée portes ouvertes à STARESO (Calvi), dans le cadre de la Fête de la Science, avec inauguration d'une exposition photographique consacrée aux milieux sableux et à leur biodiversité.
- **14 octobre 2023** : Conférence sur les milieux sableux au Festival de la mer organisé par l'association / *Sbulecamare*, à Spano.
- **20 décembre 2023** : Diffusion sur France 3 Corse Via Stella du film *Corsica Salvatica – Regard sur la grande bleue* de Jean-Michel Martinetti, incluant une séquence dédiée aux milieux sableux.
- **2 décembre 2023** : Participation à l'événement *La Mer en Débat*, à Bastia, avec exposition temporaire de photographies sur les milieux sableux à destination du grand public.
- **9 avril 2024** : Animation pédagogique sur les milieux sableux au collège Léon Boujot de Porto-Vecchio, auprès des élèves de 6^e à 3^e.
- **25 juin 2024** : Présentation du projet ARENA lors du Cotech du Document Stratégique de Façade (DSF), animé par la DIRM.
- **27 juillet 2024** : Inauguration d'un panneau de sensibilisation dédié au projet ARENA sur le port de Lumio (Marine de Sant'Ambroggio), lors de l'événement Mar'in Festa 2024.
- **11 octobre 2024** : Reportage diffusé au Journal de 20h de TF1 (*Plongée en Corse : les couleurs se révèlent la nuit*), comprenant un sujet consacré aux milieux sableux.
- **24 novembre 2024** : Animation sur les milieux sableux à Bastia (Casa di e Scenze), dans le cadre d'une journée de projection documentaire ouverte au grand public.
- **15 décembre 2024** : Création d'un atlas de la biodiversité des milieux sableux dans le cadre du projet ARENA, avec impression et distribution de 500 exemplaires, et mise à disposition en libre accès et téléchargement sur les réseaux sociaux de STARESO.
- **23 novembre 2025** : Diffusion du documentaire *Mère Méditerranée* de Franck Lorrain lors du 10^e Festival International du Monde Marin Galathéa à Hyères, incluant une séquence sur les milieux sableux.
- **8 juillet 2025** : Journée d'échanges « Méditerranée : sauvons les habitats côtiers ! » organisée par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse à Marseille, avec présentation des résultats du projet ARENA.
- **30 septembre 2025** : Journée d'études « Habitats de substrat meuble » à Montpellier, co-organisée par la DIRM, l'OFB, l'Agence de l'Eau, l'OEC et la Région Occitanie, avec présentation des résultats du projet ARENA.
- **20 janvier 2026** : Réunion organisée à Bastia par les services de l'État (DMLC, DDT, DREAL, préfectures) sur la limitation de l'artificialisation en mer et sur le littoral, avec présentation des résultats du projet ARENA.

Spano - 14/11/23



Calvi - 11/10/23



Bastia - 02/12/23



Lumio - 27/07/24



Bastia - 23/11/24



3ème Edition
MAR'IN FESTA 2024



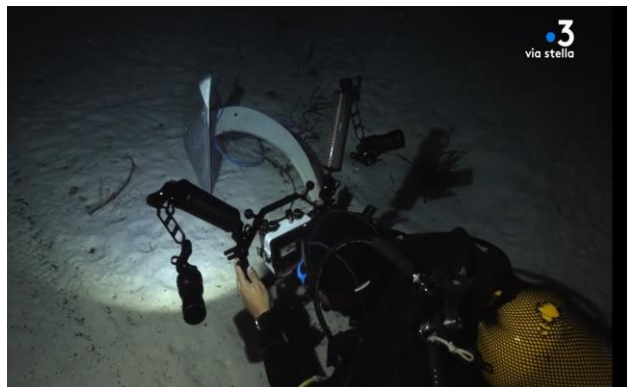
STARESO

MOSTRA
CASA DI E SCENZE

UCEANU
UNA CIUTTÀ INSOLITA
UNE PLONCEE INSCULTE

2024
21 | 09
19 | 07
2023

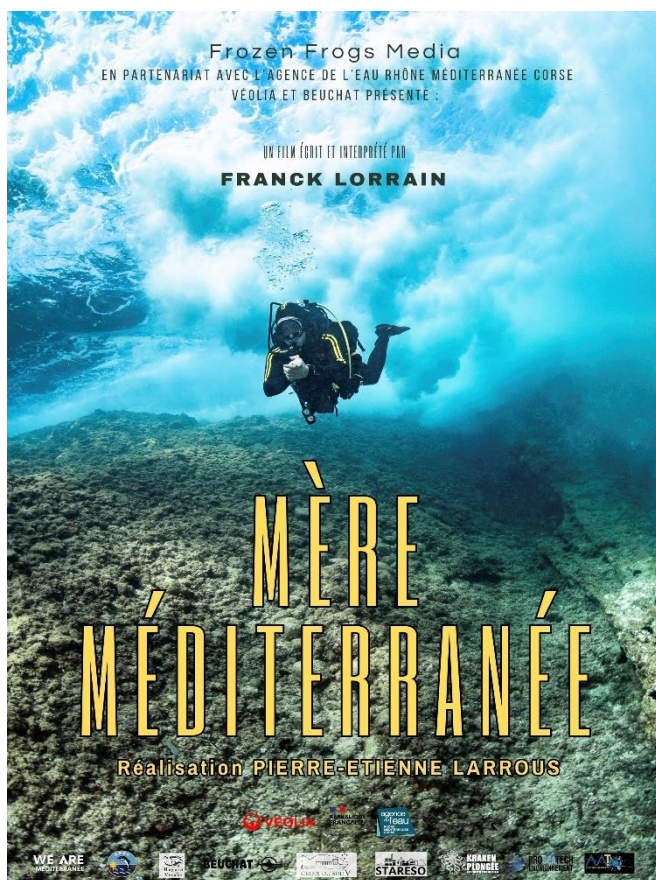
Fr3 Corse - 20/12/24



Porto-Vecchio - 09/04/24



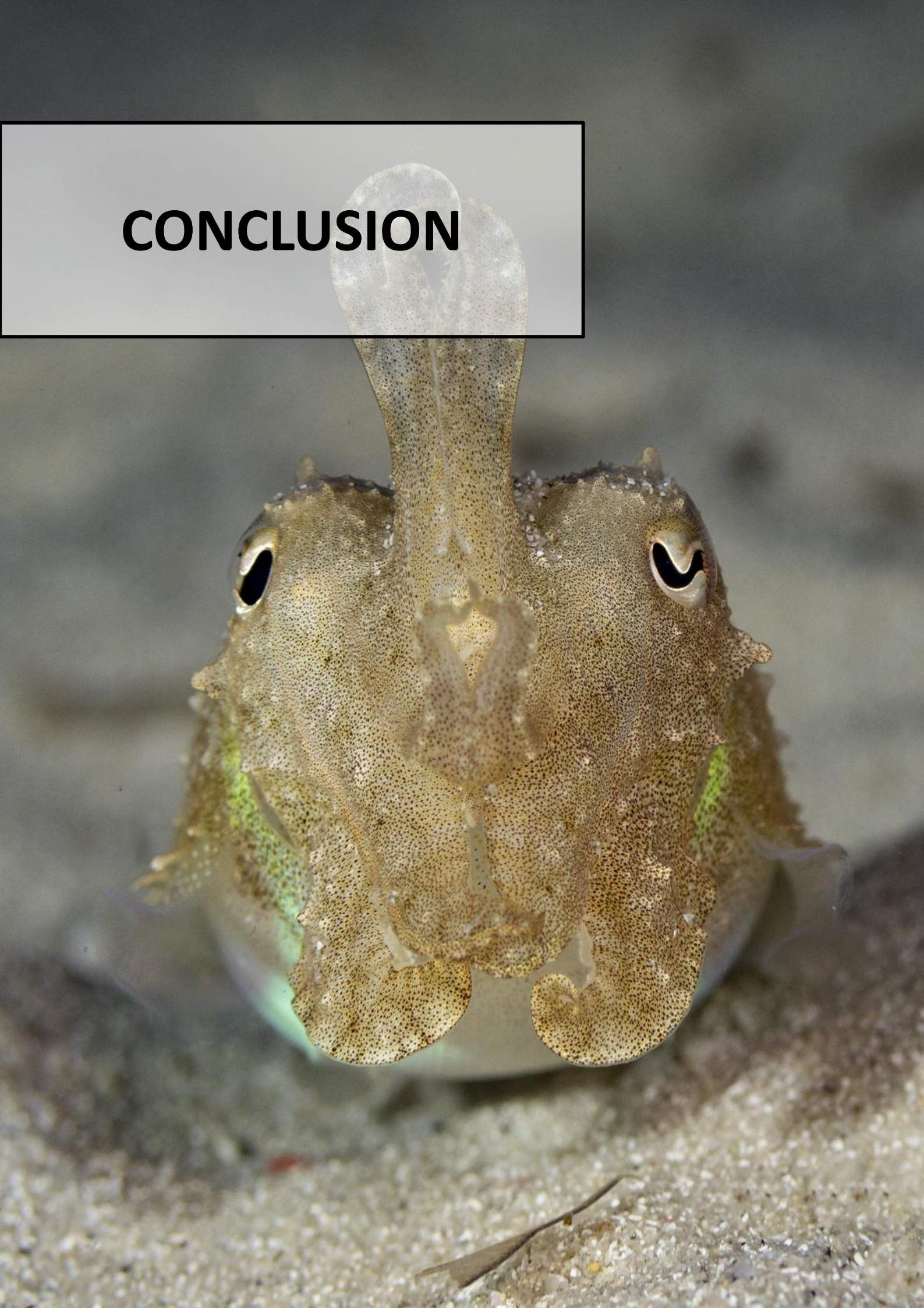
Hyères - 23/11/25



corse **VIA
STELLA**



CONCLUSION



VI. Conclusion

Le projet ARENA avait pour objectif principal d'approfondir l'état des connaissances sur le fonctionnement des habitats de substrats meubles méditerranéens, en ciblant spécifiquement les milieux sableux entre 0 et 100 m de profondeur. Dans un contexte où ces habitats représentent la majorité des surfaces côtières sous-marines en Méditerranée française, mais demeurent historiquement peu étudiés et insuffisamment intégrés dans les politiques de gestion, cette étude apporte des résultats nouveaux, robustes et directement mobilisables pour la conservation et l'aménagement du littoral.

Les résultats obtenus mettent d'abord en évidence une biodiversité nettement plus riche que celle généralement attribuée aux milieux sableux. Au total, 280 taxons ont été recensés toutes méthodes confondues, confirmant que ces habitats ne peuvent être considérés comme pauvres ou homogènes sur le plan écologique. Le recensement visuel a permis de documenter 164 espèces appartenant à 11 embranchements, révélant une structuration écologique complexe. Les communautés observées se caractérisent par une dominance des Chordés, mais également par une contribution importante des invertébrés benthiques, traduisant une diversité fonctionnelle élevée. Les données d'ADN environnemental ont confirmé cette richesse, avec 133 taxons détectés, et ont permis d'identifier des espèces cryptiques ou difficiles à observer in situ. Les prospections ROV ont complété ces observations en permettant l'exploration des zones profondes jusqu'à 127 m, mettant en évidence la présence d'un cortège faunistique spécifique associé aux habitats sableux intermédiaires et profonds.

Le suivi spatio-temporel sur un cycle annuel a montré que la structure des communautés sableuses est fortement influencée par des facteurs temporels, en particulier la saison et le cycle nycthéral. Les observations nocturnes ont révélé une biodiversité largement sous-estimée par les suivis diurnes : la richesse spécifique détectée de nuit (143 espèces) est plus de deux fois supérieure à celle observée de jour (68 espèces). Ces résultats démontrent l'importance déterminante d'intégrer des observations nocturnes dans les protocoles d'inventaire et de suivi, afin de mieux caractériser les dynamiques fonctionnelles des milieux sableux.

La saisonnalité apparaît également comme un facteur structurant majeur, avec une diversité maximale au printemps et en été, mais également une richesse non négligeable en hiver, soulignant la nécessité de suivis multi-saisonniers pour éviter une sous-estimation des communautés.

Un des apports majeurs du projet réside dans la caractérisation des fonctionnalités écologiques des milieux sableux, au-delà de leur simple description taxonomique. Les résultats montrent clairement que ces habitats jouent un rôle central dans le cycle de vie de nombreuses espèces. Plusieurs fonctions clés ont été identifiées : zones de nourricerie (présence récurrente de juvéniles), zones d'alimentation (raies, uranoscopes, baudroies), zones de repos et de refuge, mais également frayères fonctionnelles. L'approche acoustique passive a notamment permis d'identifier une activité reproductrice marquée chez *Ophidion rochei*, et de documenter la présence d'émissions sonores de corbs, témoignant d'une utilisation fonctionnelle de ces milieux et de leurs interfaces avec d'autres habitats. Ces éléments démontrent que les milieux sableux ne sont pas uniquement des espaces de transit ou des zones "neutres", mais qu'ils constituent des habitats indispensables au maintien des communautés côtières.

L'étude a également permis de mieux caractériser le rôle des interfaces entre substrats meubles et habitats structurants, en particulier l'herbier de *Posidonia oceanica*. Les observations montrent que les milieux sableux agissent comme des écotones majeurs, fréquentés intensément par de nombreuses espèces, notamment la nuit, et participant à la connectivité écologique entre habitats côtiers. Les prospections profondes (40–100 m) ont en outre révélé le rôle potentiel des fonds sableux comme zones de passage et d'accueil pour des espèces associées à des profondeurs plus importantes, illustrant la continuité fonctionnelle entre la zone côtière et les habitats plus profonds. Les occurrences remarquables de *Grammonus ater* et *Apterichtus caecus* renforcent cette conclusion, en soulignant la capacité des milieux sableux à héberger des espèces rares, discrètes ou peu documentées à l'échelle régionale.



Concernant l'évaluation des pressions anthropiques, les résultats montrent que la pression acoustique liée à la navigation demeure actuellement limitée sur les sites étudiés, les niveaux sonores enregistrés se situant parmi les plus faibles du réseau de référence CALME. Toutefois, l'étude met en évidence l'émergence de pressions mécaniques et diffuses potentiellement croissantes, notamment le report des activités de mouillage sur les fonds sableux en lien avec la protection réglementaire des herbiers. Cette pression, encore insuffisamment documentée, pourrait constituer à court terme un enjeu majeur pour la conservation des communautés sableuses et de leurs fonctionnalités. La présence récurrente de déchets plastiques en période estivale, associée à une fréquentation élevée des baies, constitue également un signal important quant à l'impact de la plaisance sur ces habitats.

Enfin, ce projet confirme l'intérêt scientifique et opérationnel d'une approche multi-méthodes reposant sur des techniques non destructives et complémentaires. Aucun outil ne permet à lui seul de caractériser exhaustivement la biodiversité et les fonctionnalités écologiques des milieux sableux. La combinaison du recensement visuel, de l'ADNe, de l'acoustique passive et du ROV apparaît comme une stratégie particulièrement robuste, permettant de couvrir à la fois la diversité taxonomique, les dynamiques spatio-temporelles, les comportements et certaines fonctions écologiques clés. Cette approche intégrée constitue une base méthodologique solide pour la mise en place de futurs dispositifs de suivi à l'échelle régionale.

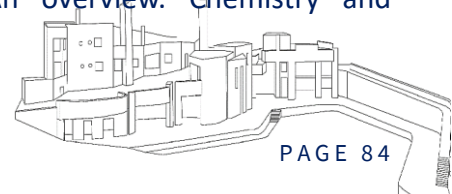
En conclusion, le projet ARENA démontre que les milieux sableux méditerranéens, loin d'être des habitats secondaires, représentent des composantes essentielles des écosystèmes côtiers. Ils abritent une biodiversité riche, assurent des fonctions écologiques majeures et jouent un rôle structurant dans la connectivité entre habitats. Ces résultats plaident pour une meilleure intégration des substrats meubles dans les stratégies de conservation, les politiques de gestion, et les procédures d'évaluation environnementale, notamment dans un contexte d'intensification des usages et de développement des aménagements en mer. Les connaissances produites dans le cadre de ce projet fournissent ainsi des bases scientifiques nouvelles pour soutenir une gestion plus écosystémique, et durable des milieux marins méditerranéens.



BIBLIOGRAPHIE



- Au, W. W., & Banks, K. (1998). The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kaneohe Bay. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103, 41–47.
- Bertucci, F., Maratrat, K., Berthe, C., Besson, M., Guerra, A. S., Raick, X., ... & Parmentier, E. (2020). Local sonic activity reveals potential partitioning in a coral reef fish community. *Oecologia*, 193(1), 125–134.
- Bianchi, C. N., & Morri, C. (2000). Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, problems and prospects for future research. *Marine Pollution Bulletin*, 40(5), 367–376.
- Bohlke, E. B., & Randall, J. E. (1999). *Gymnothorax castlei*, a new species of Indo-Pacific moray eel (Anguilliformes: Muraenidae). *Raffles Bulletin of Zoology*, 47(2), 549–554.
- Bond, T., McLean, D. L., Prince, J., Taylor, M. D., & Partridge, J. C. (2022). Baited remote underwater video sample less site attached fish species along a subsea pipeline compared to a remotely operated vehicle. *Marine and Freshwater Research*, 73(7), 915–930.
- Borja, A., Ranasinghe, A., & Weisberg, S. B. (2009). Assessing ecological integrity in marine waters, using multiple indices and ecosystem components: Challenges for the future. *Marine Pollution Bulletin*, 59(1–3), 1–4.
- Cabana, D., Sigala, K., Nicolaidou, A., & Reizopoulou, S. (2013). Towards the implementation of the Water Framework Directive in Mediterranean transitional waters: The use of macroinvertebrates as biological quality elements. *Advances in Oceanography and Limnology*, 4(2), 212–240.
- Caldwell, Z. R., Zgliczynski, B. J., Williams, G. J., & Sandin, S. A. (2016). Reef fish survey techniques: Assessing the potential for standardizing methodologies. *PLOS ONE*, 11(4), e0153066.
- Cecapolli, E., Calo, A., Giakoumi, S., Di Lorenzo, M., Greco, S., Fanelli, E., ... & Di Franco, A. (2024). Sandy bottoms have limited species richness but substantially contribute to the regional coastal fish β -diversity: A case study of the Central Mediterranean Sea. *Marine Environmental Research*, 201, 106701.
- Celi, M., Filiciotto, F., Vazzana, M., Arizza, V., Maccarrone, V., Ceraulo, M., ... & Buscaino, G. (2015). Shipping noise affecting immune responses of European spiny lobster (*Palinurus elephas*). *Canadian Journal of Zoology*, 93(2), 113–121.
- Cheung, W. W., Pitcher, T. J., & Pauly, D. (2005). A fuzzy logic expert system to estimate intrinsic extinction vulnerabilities of marine fishes to fishing. *Biological Conservation*, 124(1), 97–111.
- Cheung, W. W., Watson, R., Morato, T., Pitcher, T. J., & Pauly, D. (2007). Intrinsic vulnerability in the global fish catch. *Marine Ecology Progress Series*, 333, 1–12.
- Chitre, M., Legg, M., & Koay, T. B. (2012). Snapping shrimp dominated natural soundscape in Singapore waters. *Contributions to Marine Science*, 2012, 127–134.
- Colloca, F., Scarcella, G., & Libralato, S. (2017). Recent trends and impacts of fisheries exploitation on Mediterranean stocks and ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 4, 244.
- Colton, D. E., & Alevizon, W. S. (1983). Feeding ecology of bonefish in Bahamian waters. *Transactions of the American Fisheries Society*, 112(2A), 178–184.
- Coquereau, L., Grall, J., Chauvaud, L., Gervaise, C., Clavier, J., Jolivet, A., & Di Iorio, L. (2016). Sound production and associated behaviours of benthic invertebrates from a coastal habitat in the north-east Atlantic. *Marine Biology*, 163, 1–13.
- Dalongeville, A., Boulanger, E., Marques, V., Charbonnel, E., Hartmann, V., Santoni, M. C., ... & Mouillot, D. (2022). Benchmarking eleven biodiversity indicators based on environmental DNA surveys: More diverse functional traits and evolutionary lineages inside marine reserves. *Journal of Applied Ecology*, 59(11), 2803–2813.
- Damveld, J. H., van der Reijden, K. J., Cheng, C., Koop, L., Haaksma, L. R., Walsh, C. A., ... & Hulscher, S. J. (2018). Video transects reveal that tidal sand waves affect the spatial distribution of benthic organisms and sand ripples. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 11837–11845.
- Danovaro, R. (2003). Pollution threats in the Mediterranean Sea: An overview. *Chemistry and Ecology*, 19(1), 15–32.



- Desiderà, E., Guidetti, P., Panzalis, P., Navone, A., Valentini-Poirrier, C.-A., Boissery, P., Gervaise, C., & Di Iorio, L. (2019). Acoustic fish communities: Sound diversity of rocky habitats reflects fish species diversity. *Marine Ecology Progress Series*, 608, 183–197.
- Di Iorio, L., Bonhomme, P., Michez, N., Ferrari, B., Gigou, A., Panzalis, P., ... & Gervaise, C. (2020). Spatio-temporal surveys of the brown meagre *Sciaenops ocellatus* using passive acoustics for management and conservation. *bioRxiv*, 2020-06.
- Di Iorio, L., Raick, X., Parmentier, E., Boissery, P., Valentini-Poirrier, C.-A., Gervaise, C. (2018). 'Posidonia meadows calling': A ubiquitous fish sound with monitoring potential. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4, 248–263.
- Dickens, L. C., Goatley, C. H., Tanner, J. K., & Bellwood, D. R. (2011). Quantifying relative diver effects in underwater visual censuses. *PLOS ONE*, 6(4), e18965.
- Digenis, M., Akyol, O., Benoit, L., Biel Cabanelas, M., Yazilan Çamlık, Ö., Charalampous, K., ... & Gerovasileiou, V. (2024). New records of rarely reported species in the Mediterranean Sea (March 2024).
- Dijkgraaf, S. (1947). Ein Töne erzeugender Fisch im Neapler Aquarium. *Experientia*, 3, 493–494.
- Donnay, A., Pelaprat, C., Lejeune, P., & Gobert, S. (2014). Taxonomic sufficiency for soft-bottom macrozoobenthos long term study: A case study in Corsica. In *Zoology* 2014.
- Dubois, A., Barras, C., Pavard, J.-C., Donnay, A., Béatrix, M., & Bouchet, V. M. (2021). Distribution patterns of benthic foraminifera in fish farming areas (Corsica, France): Implications for the implementation of biotic indices in biomonitoring studies. *Water*, 13(20), 2821.
- Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science*, 371, eaba4658.
- Duhamet, A., Albouy, C., Marques, V., Manel, S., & Mouillot, D. (2023). The global depth range of marine fishes and their genetic coverage for environmental DNA metabarcoding. *Ecology and Evolution*, 13(1), e9672.
- Edgar, G. J., Barrett, N. S., & Morton, A. J. (2004). Biases associated with the use of underwater visual census techniques to quantify the density and size-structure of fish populations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 308(2), 269–290.
- Fontaine, Q., Marengo, M., Leduc, M., & Lejeune, P. (2019). Étude relative à la plaisance et aux mouillages en Corse : Rapport final – Année 2018/2019. Contrat OEC/STARESO, 189 pp.
- Franco, A., Pérez-Ruzafa, A., Drouineau, H., Franzoi, P., Koutrakis, E. T., Lepage, M., ... & Torricelli, P. (2012). Assessment of fish assemblages in coastal lagoon habitats: Effect of sampling method. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 112, 115–125.
- Flück, B., Mathon, L., Manel, S., Valentini, A., Dejean, T., Albouy, C., ... & Pellissier, L. (2022). Applying convolutional neural networks to speed up environmental DNA annotation in a highly diverse ecosystem. *Scientific Reports*, 12(1), 10247.
- Gaston, K. J., & Fuller, R. A. (2008). Commonness, population depletion and conservation biology. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(1), 14–19.
- Gervaise, C., Lossent, J. (2020). Étude des effets acoustiques des levés géophysiques et UXO du projet de raccordement électrique des éoliennes en mer de Saint-Brieuc sur la ressource halieutique. Rapport RTE, 51 pp.
- Gervaise, C., Lossent, J., Valentini-Poirrier, C.-A., Boissery, P., Noel, C., & Di Iorio, L. (2019). Three-dimensional mapping of the benthic invertebrates biophony with a compact four-hydrophones array. *Applied Acoustics*, 148, 175–193.
- Gervaise, C., Kinda, B. G., Bonnel, J., Stephan, Y., & Vallez, S. (2012). Passive geoacoustic inversion with a single hydrophone using broadband ship noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131, 1999–2010.
- Gilmore, R. G. (2002). Passive acoustic transects: Mating calls and spawning ecology in East Florida sciaenids.
- Harmelin-Vivien, M. L., Harmelin, J. G., Chauvet, C., Duval, C., Galzin, R., Lejeune, P., ... & Lasserre, G. (1985). Évaluation visuelle des peuplements et populations de poissons : méthodes et problèmes. *Revue d'Ecologie*, 40(4), 467–539.

Harmelin-Vivien, M. L., Harmelin, J. G., Chauvet, C., Duval, C., Galzin, R., Lejeune, P., ... & Lasserre, G. (1985). Évaluation visuelle des peuplements et populations de poissons : méthodes et problèmes. *Revue d'Écologie*, 40(4), 467–539.

Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 5–20.

Hobson, E. S. (1973). Diel feeding migrations in tropical reef fishes. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 24(1), 361–370.

Holon, F., Boissery, P., Guilbert, A., Freschet, E., & Deter, J. (2015). The impact of 85 years of coastal development on shallow seagrass beds (*Posidonia oceanica* L. (Delile)) in South Eastern France: A slow but steady loss without recovery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 165, 204–212.

Kumar, S., Lal, R., Ali, A., Rollings, N., Mehta, U., & Assaf, M. (2023). A real-time fish recognition using deep learning algorithms for low-quality images on an underwater drone. In *International Conference on Sustainable and Innovative Solutions for Current Challenges in Engineering & Technology* (pp. 67–79). Springer Nature Singapore.

Le Bot, O., Mars, J.-I., Gervaise, C., & Simard, Y. (2015). Rhythmic analysis for click train detection and source separation with examples on beluga whales. *Applied Acoustics*, 95, 37–49.

Lindseth, A. V., & Lobel, P. S. (2018). Underwater soundscape monitoring and fish bioacoustics: A review. *Fishes*, 3(3), 36.

Lossent, J., Di Iorio, L., Valentini-Poirier, C.-A., Boissery, P., & Gervaise, C. (2017). Mapping the diversity of spectral shapes discriminates between adjacent benthic biophonies. *Marine Ecology Progress Series*, 585, 31–48.

Lowry, M., Folpp, H., Gregson, M., & Suthers, I. (2012). Comparison of baited remote underwater video (BRUV) and underwater visual census (UVC) for assessment of artificial reefs in estuaries. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 416, 243–253.

MacNeil, M. A., Tyler, E. H., Fonnesebeck, C. J., Rushton, S. P., Polunin, N. V., & Conroy, M. J. (2008). Accounting for detectability in reef-fish biodiversity estimates. *Marine Ecology Progress Series*, 367, 249–260.

Magnier, C., & Gervaise, C. (2020). Acoustic and photographic monitoring of coastal maritime traffic: Influence on the soundscape. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(6), 3749–3757.

Mallet, D., Wantiez, L., Lemouellic, S., Vigliola, L., & Pelletier, D. (2014). Complementarity of rotating video and underwater visual census for assessing species richness, frequency and density of reef fish on coral reef slopes. *PLOS ONE*, 9(1), e84344.

Marengo, M., Vanalderweireldt, L., Horri, K., Patrissi, M., Santoni, M. C., Lejeune, P., & Durieux, E. D. H. (2023). Combining indicator trends to evaluate a typical Mediterranean small-scale fishery: The case study of Corsica. *Regional Studies in Marine Science*, 65, 103087.

Parmentier, E., Di Iorio, L., Picciulin, M., Malavasi, S., Lagardère, J.-P., Bertucci, F. (2018). Consistency of spatiotemporal sound features supports the use of passive acoustics for long-term monitoring. *Animal Conservation*, 21, 211–220.

Parmentier, E., Mann, D., Kever, L., & Fine, M. (2010). Diversity in the sound production mechanism in Ophidiiformes.

Parsons, M. J., McCauley, R. D., Mackie, M. C., Siwabessy, P., & Duncan, A. J. (2009). Localization of individual mullet (Argyrosomus japonicus) within a spawning aggregation and their behaviour throughout a diel spawning period. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1007–1014.

Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Calcagno, G., & Ferrero, E. A. (2012). Brown meagre vocalization rate increases during repetitive boat noise exposures: A possible case of vocal compensation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132, 3118–3124.

Polanco Fernández, A., Marques, V., Fopp, F., Juhel, J.-B., Borrero-Pérez, G. H., Cheutin, M. C., ... & Pellissier, L. (2021). Comparing environmental DNA metabarcoding and underwater visual census to monitor tropical reef fishes. *Environmental DNA*, 3(1), 142–156.

Prato, G., Thiriet, P., Di Franco, A., & Francour, P. (2017). Enhancing fish Underwater Visual Census to move forward assessment of fish assemblages: An application in three Mediterranean Marine Protected Areas. *PLOS ONE*, 12(6), e0178511.

Rozanski, R., Velez, L., Hocdé, R., Duhamet, A., Waldock, C., Mouillot, D., ... & Albouy, C. (2024). Seasonal dynamics of Mediterranean fish communities revealed by eDNA: Contrasting compositions across depths and Marine Fully Protected Area boundaries. *Ecological Indicators*, 166, 112290.

Samoilys, M. A., & Carlos, G. (2000). Determining methods of underwater visual census for estimating the abundance of coral reef fishes. *Environmental Biology of Fishes*, 57(3), 289–304.

Soldo, A., & Paliska, D. (2023). Diel and seasonal changes in the abundance and diversity of the infralittoral fish community in the Eastern Central Adriatic. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 29.

Staaterman, E., Rice, A. N., Mann, D. A., & Paris, C. B. (2013). Soundscapes from a Tropical Eastern Pacific reef and a Caribbean Sea reef. *Coral Reefs*, 32(2), 553–557.

Stowell, D., & Sueur, J. (2020). Ecoacoustics: Acoustic sensing for biodiversity monitoring at scale. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(3), 217–219.

Sward, D., Monk, J., & Barrett, N. (2019). A systematic review of remotely operated vehicle surveys for visually assessing fish assemblages. *Frontiers in Marine Science*, 6, 134.

Todd, V. L., Lavallin, E. W., & Macreadie, P. I. (2018). Quantitative analysis of fish and invertebrate assemblage dynamics in association with a North Sea oil and gas installation complex. *Marine Environmental Research*, 142, 69–79.

Valentine, J. F., & Heck, K. L. (2005). Perspective review of the impacts of overfishing on coral reef food web linkages. *Coral Reefs*, 24(2), 209–213.

Versluis, M., Schmitz, B., von der Heydt, A., & Lohse, D. (2000). How snapping shrimp snap: Through cavitating bubbles. *Science*, 289, 2114–2117.

Versluis, M., Schmitz, B., von der Heydt, A., & Lohse, D. (2000). How snapping shrimp snap: Through cavitating bubbles. *Science*, 289, 2114–2117.

Wenz, G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 1936–1956.



