



Direction de l'Environnement
et de l'Espace Urbain
Service Mer et Littoral

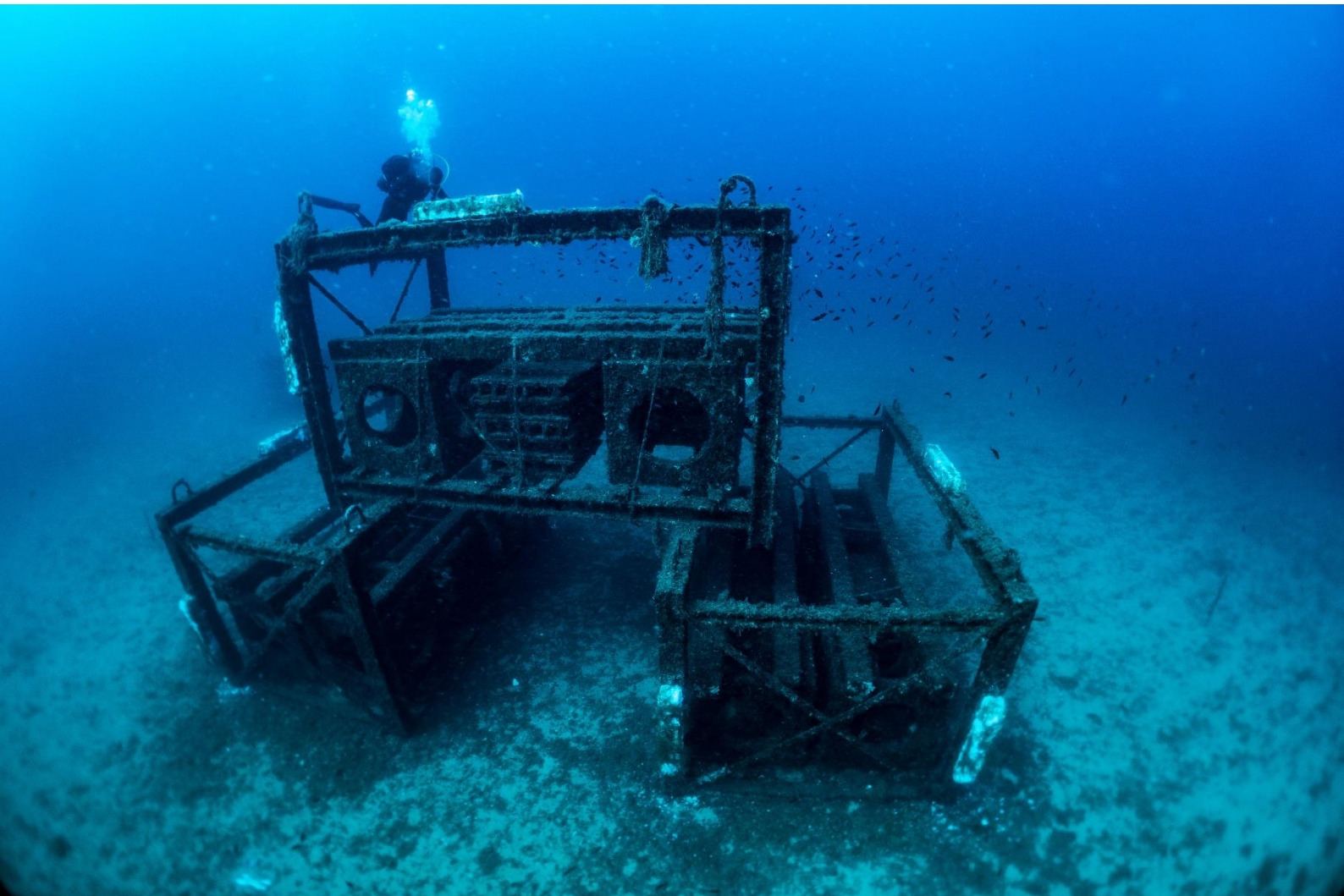


Réalisation d'un suivi scientifique biologique et halieutique dans le cadre de la gestion des récifs artificiels du Prado

Lot 1 - Suivi biologique et technique

Année 2019 - 2021

Synthèse



Réalisation d'un suivi scientifique biologique et halieutique dans le cadre de la gestion des récifs artificiels du Prado

Synthèses 2019-2021

Commanditaire :

Ville de Marseille
Direction de la Mer / Service de Ressources Partagées
2 Promenade Georges Pompidou
13233 Marseille cedex 20
Tel : 04 13 94 80 75 - e-mail : jguery@marseille.fr

Consultation n° 2019_45004_0010

Réalisation de l'étude :

GIS POSIDONIE, Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'environnement marin
OCEANOMED, MIO
Campus de Luminy, Case 901
13 288 MARSEILLE Cedex 9
Tél. : 04 86 09 05 73 Fax. : 04 86 09 06 43. e-mail : laurence.ledireach@univ-amu.fr

Coordinateur de l'étude :

Patrick ASTRUCH

Intervenants sur le terrain ou au laboratoire :

Patrick ASTRUCH, Laurence LE DIREACH, Elodie ROUANET, Thomas SCHOHN, Bruno BELLONI, Antonin LEFEVRE.

Rédaction :

Bruno BELLONI, Patrick ASTRUCH, Elodie ROUANET, Thomas SCHOHN, Laurence LE DIREACH.

Crédits photographiques, cartographiques et schématiques :

GIS Posidonie, sauf mention contraire.

Dossier : 1908

Ce document doit être cité sous la forme suivante :

Astruch P., Belloni B., Rouanet E., Schohn T., Le Diréach L., 2022. Réalisation d'un suivi scientifique biologique et halieutique dans le cadre de la gestion des récifs artificiels du Prado. Synthèse 2019 - 2021. *GIS Posidonie – Ville de Marseille*, Fr. 1-42.

Commanditaire :

Ville de Marseille, Direction de la Mer



Titulaire :

GIS Posidonie

Institut Méditerranéen d'Océanologie
Parc Scientifique et Technologique de Luminy
163, avenue de Luminy - Case 901
13288 MARSEILLE CEDEX 09 – France
Tél : 04 86 09 05 73/78

SIRET : 33 88 63 69 90 00 33
TVA N°: FR69338863699
Code NAF : 7219Z



Sommaire

1	Préambule	7
2	L'Opération 'RECIFS PRADO'	7
3	Douze années de suivis scientifiques biologique et techniques	10
3.1	Mission 1 : Suivi du peuplement de poissons	10
3.1.1.	Objectifs de la mission.....	10
3.1.2.	Rappel méthodologique	10
3.1.3.	Principaux résultats	12
3.2	Mission 2 : Suivi de la colonisation benthique des récifs.....	26
3.2.1.	Objectifs de la mission.....	26
3.2.2.	Rappel méthodologique	26
3.2.3.	Principaux résultats	28
3.3	Mission 3 : Suivi de l'herbier de posidonie en plongée.....	32
3.3.1.	Objectifs de la mission.....	32
3.3.2.	Rappel méthodologique	32
3.3.3.	Principaux résultats	34
3.4	Mission 4 : Suivi de l'état des structures en plongée.....	35
3.4.1.	Objectifs de la mission.....	35
3.4.2.	Rappel méthodologique	35
3.4.3.	Principaux résultats	36
4	Conclusion générale	38
5	Perspectives.....	39
5.1	Gestion	39
5.2	Suivis.....	39
6	Bibliographie.....	41

1 Préambule

Le présent document est une synthèse non-technique résumant les principaux résultats des campagnes de suivi réalisées entre 2019 et 2021 sur la concession de récifs artificiels de la baie du Prado. Les résultats complets et la bibliographie détaillée sont consultables dans le tome 'résultat' de l'étude (Schohn *et al.*, 2022), dont la méthodologie est détaillée dans le tome méthodologie (Belloni *et al.*, 2022a). Un atlas photographique illustrant les observations réalisées fait également partie des livrables de l'étude (Belloni *et al.*, 2022b).

2 L'Opération 'RECIFS PRADO'

Au début des années 2000, la Ville de Marseille lance un vaste programme d'aménagement des fonds marins de la baie du Prado, au moyen d'habitats écologiques immergés, appelé 'RECIFS PRADO 2006', qui deviendra par la suite l'Opération RECIFS PRADO'. Le projet vise à la fois la valorisation économique et écologique de la baie du Prado. Il est surtout très ambitieux puisque l'aménagement prévu constitue le plus vaste champ de récifs artificiels en France et un des plus importants de Méditerranée, avec 27 300 m³ immergés pour un budget global de 6 millions d'euros incluant le suivi scientifique. L'étude d'impact et l'étude avant-projet sont réalisées par BRL ingénierie (Carnus *et al.*, 2005a et b).

La zone d'immersion des récifs artificiels retenue se situe dans la baie du Prado, au large d'Endoume, au Sud du Château d'If. Le périmètre de la concession a été modifié en 2015 depuis l'arrêté préfectoral n°35/2015. La surface totale de la concession est désormais de 200 ha. Les récifs artificiels sont implantés entre la limite inférieure de l'herbier de posidonie (25 m de profondeur) et 32 m, sur des fonds de matre morte, comme conseillé dans l'étude de faisabilité, scénario 1 de 1999 (Bernard *et al.*, 1999).

Le principe retenu pour le projet d'immersion de récifs artificiels était donc celui d'un aménagement en récifs modulaires à la fois chaotique et organisé selon le concept d'urbanisation diffuse', qui est un groupement des récifs en 'hameaux' et 'villages' (Charbonnel *et al.*, 2011).

Six types de récifs ont été sélectionnés et immergés (Figure 1) :

- **Panier acier** (21 récifs de 187 m³ ; volume enveloppe global estimé à 4 725 m³ (**ACI**), récif constitué de cubes en béton et de poutres en acier ;
- **Fakir** (21 récifs de 75 m³ ; volume enveloppe global estimé à 1 575 m³) (**FAK**), récif constitué de cubes en béton ceinturés par des poutres en béton ;
- **Chicane** (100 récifs de 18.7 m³ ; volume enveloppe global estimé à 2 000 m³) (**CHI**), récif constitué de 2 niveaux de dalles horizontales plates en béton séparées par un muret vertical ;
- **Amas de cubes** (201 récifs de 10.4 m³ ; volume enveloppe global estimé à 3100 m³) (**AMA**), récif constitué de cubes en béton empilés ;

- **Filière haute** (14 récifs de 252 m³ ; volume enveloppe global estimé à 3 500 m³) (**FIL**) récif constitué d'un socle en béton au-dessus duquel sont tendues 2 nappes tressées horizontales en polypropylène près du fond et en hauteur ;
- **Enrochement** (43 récifs de 160 m³ ; volume global estimé à 6 900 m³) (**ENR**) récif constitué d'un amoncellement de blocs de roche de 3 tailles différentes, analogues à certaines digues portuaires.

Le volume global de filières basses installées sur les récifs a été estimé à 5500 m³. Ainsi **400 récifs** ont été immergés entre octobre 2007 et juillet 2008, représentant un volume enveloppe total estimé à **27 300 m³**. Les différents modules ont été également complexifiés suite aux différentes études et réflexions menées (Harmelin et Bellan-Santini, 1987 ; Bernard *et al.*, 1999 ; Charbonnel *et al.*, 2001 ; Charbonnel *et al.*, 2011), par ajout de pots à poulpe, de pochons de coquilles d'huîtres, de parpaings et de filières sur le sommet des modules.

Ces récifs sont disposés en '**villages**' de forme triangulaire de 300 m de côté (Figure 1), au nombre de six. Ces villages sont liés entre eux par des '**liaisons**' constituées de combinaisons de modules récifaux, et jouant ainsi un rôle de corridors biologiques, aussi bien entre les villages, que vers les habitats naturels adjacents comme l'herbier de posidonie.

Plus de dix ans après la fin des immersions, une nouvelle campagne de suivi a été commandée entre 2019 et 2021. Ce suivi biologique et technique des récifs artificiels immergés a été divisé en 5 missions distinctes répondant aux objectifs du suivi :

- **mission 1** : le suivi du peuplement de poissons en plongée,
- **mission 2** : le suivi de la colonisation des récifs,
- **mission 3** : le suivi de l'herbier de posidonies en plongée,
- **mission 4** : le suivi des structures en plongée,
- **mission 5** : valorisation des résultats.

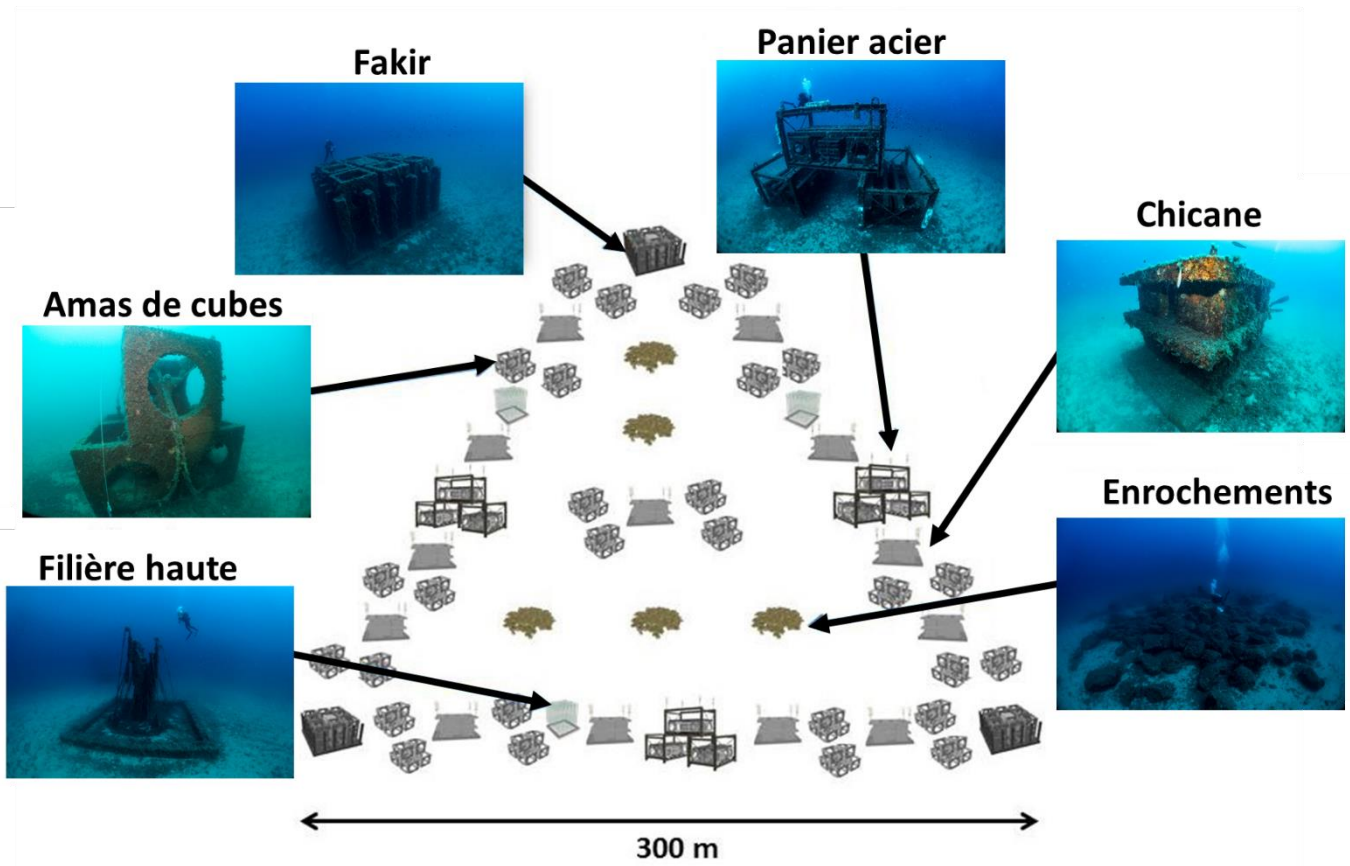


Figure 1. Organisation schématique d'un 'village' de récifs constitué de six types de récifs.

3 Douze années de suivis scientifiques biologique et techniques

3.1 Mission 1 : Suivi du peuplement de poissons

3.1.1. Objectifs de la mission

La diversité de l'ichtyofaune, l'abondance et la taille des poissons sont les indicateurs les plus visibles et le résultat attendu du processus de colonisation de récifs artificiels en milieu côtier. Ce suivi a pour objectif d'évaluer qualitativement et quantitativement la colonisation du peuplement de poissons et son évolution dans le temps. Les données de richesse spécifique (nombre d'espèces vues par récif, par campagne), d'abondance (nombre d'individus) et de biomasse permettent aussi de comparer l'efficacité biologique de l'architecture des récifs artificiels immergés. Ce sont les paramètres du suivi.

3.1.2. Rappel méthodologique

La méthodologie utilisée dans le cadre de cette campagne 2019-2021 est strictement la même que celle du suivi obligatoire réalisé entre 2009 et 2014 (Astruch *et al.*, 2014) et du suivi de 2015 (Astruch *et al.*, 2016) afin de pouvoir permettre des comparaisons. Les méthodes de recensement visuel des poissons en plongée (Harmelin-Vivien et Harmelin, 1975 ; Harmelin-Vivien *et al.*, 1985 ; Figure 2) ont été adaptées à la spécificité des récifs artificiels (Collart et Charbonnel, 1998) et au volume des récifs immergés dans le site du Prado. Au total, 4 campagnes de comptage ont été réalisées entre juin 2020 et mars 2021, représentant 64 plongées pour 168 réplicats. La présence d'autres espèces cibles de la pêche comme les mollusques céphalopodes (poulpe, seiche et calmar) et les crustacés décapodes (langouste, homard, et cigale de mer) est également relevée.



Figure 2 : Plongeur du GIS Posidonie réalisant un comptage visuel.

Les 6 types de récifs échantillonnés sont répartis sur 4 villages, soit 36 récifs au total par saison (Figure 3). Sur chaque récif, les observateurs recensent les espèces, le nombre d'individus de chaque espèce et estiment la taille de chaque poisson (longueur totale = Lt) à 2 cm près. Pour les récifs de type 'enrochements', qui sont trop vastes pour permettre un comptage total, chaque observateur déroule un

transect de 20 m de longueur et réalise un comptage sur une largeur de 5 m de l'ensemble du peuplement. Ce protocole permet une extrapolation de la surface de 100 m² échantillonnée par 1 m de hauteur en moyenne, à l'ensemble de l'enrochement (observations ramenées au m³).

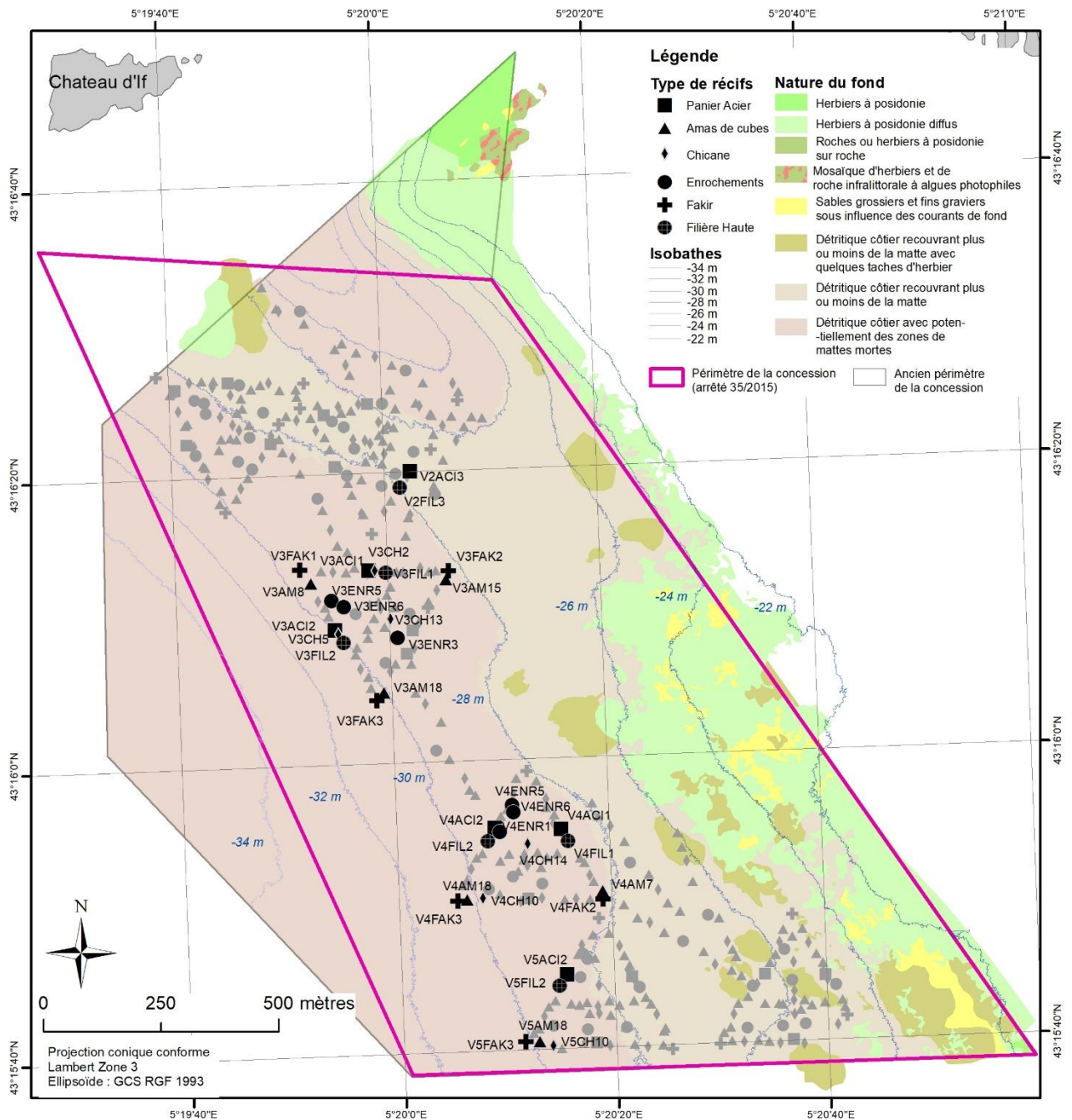


Figure 3 : Récifs artificiels échantillonnés dans le cadre du suivi du peuplement de poissons entre 2009 et 2021. Les récifs visités figurent en noir, les autres récifs figurent en gris.

3.1.3. Principaux résultats

3.1.1.1 Evolution temporelle du peuplement de poissons

La première année, la richesse spécifique (nombre d'espèces par comptage) a rapidement progressé pour atteindre un plateau à partir de 2010 environ. La Figure 4 présente l'évolution du nombre d'espèces cibles de la pêche par comptage.

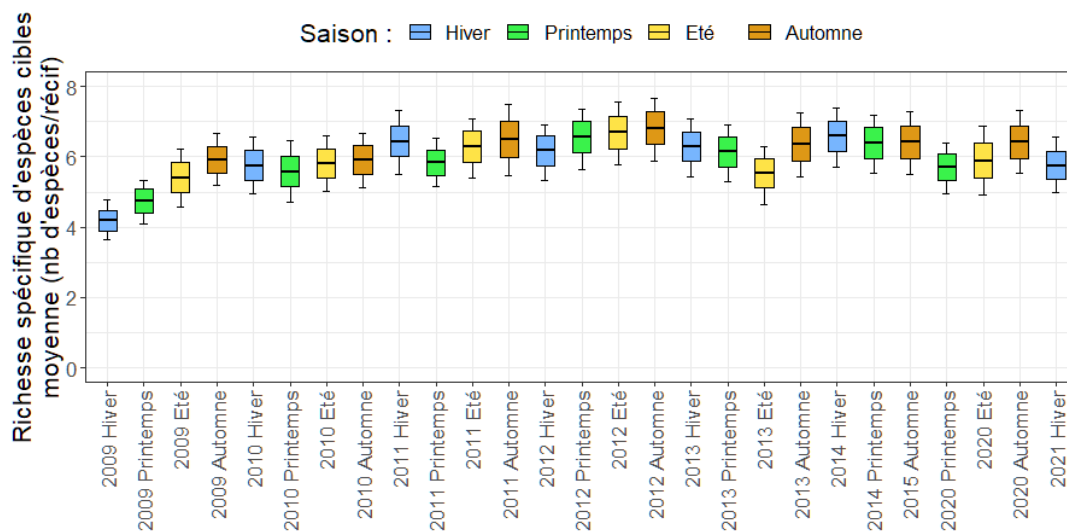


Figure 4. Richeur spécifique moyenne d'espèces cibles de la pêche par récif au cours de chaque campagne, tous récifs confondus. Chaque trait représente la moyenne, chaque boîte l'erreur type ; la barre d'erreur représente l'intervalle de confiance de la moyenne à 95%.

La densité (nombre d'individus dénombrés par comptage ramené à une unité d'1 m³) fluctue sans tendance progressive claire, même en ne considérant pas les espèces qui mangent du plancton (en pleine eau, moins inféodées aux récifs), on parle alors de densité réduite (Figure 5). Ce résultat signifie que globalement et sans tenir compte de la spécificité de chaque type de récif, il n'y a pas plus de poissons (en nombre) observés sur les récifs depuis le début du suivi. Quelques variations saisonnières s'observent néanmoins.

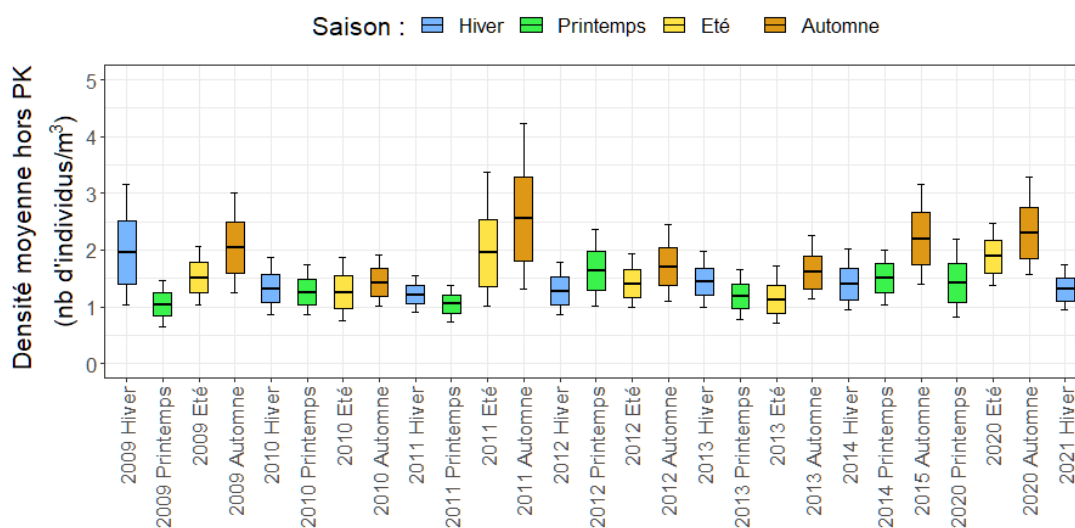


Figure 5. Densité réduite moyenne (individus par m³) au cours de chaque campagne, tous récifs confondus. Chaque trait représente la moyenne, chaque boîte l'erreur type ; la barre d'erreur représente l'intervalle de confiance à 95%.

La densité d'espèces planctonophages a particulièrement chuté dès le début du suivi en 2009. Elle a progressé pour atteindre des niveaux comparables à 2009 à partir de 2013/2014. Ce phénomène s'observe en dehors de la concession sur des zones naturelles et donc partout dans la baie de Marseille, il n'est pas propre au champ de récifs. Cette évolution (qui se traduit par une régression des bogues et une progression des castagnoles) serait liée à une diminution de l'abondance et de la taille du zooplancton en lien avec l'environnement marin (Figure 6 et Figure 7).

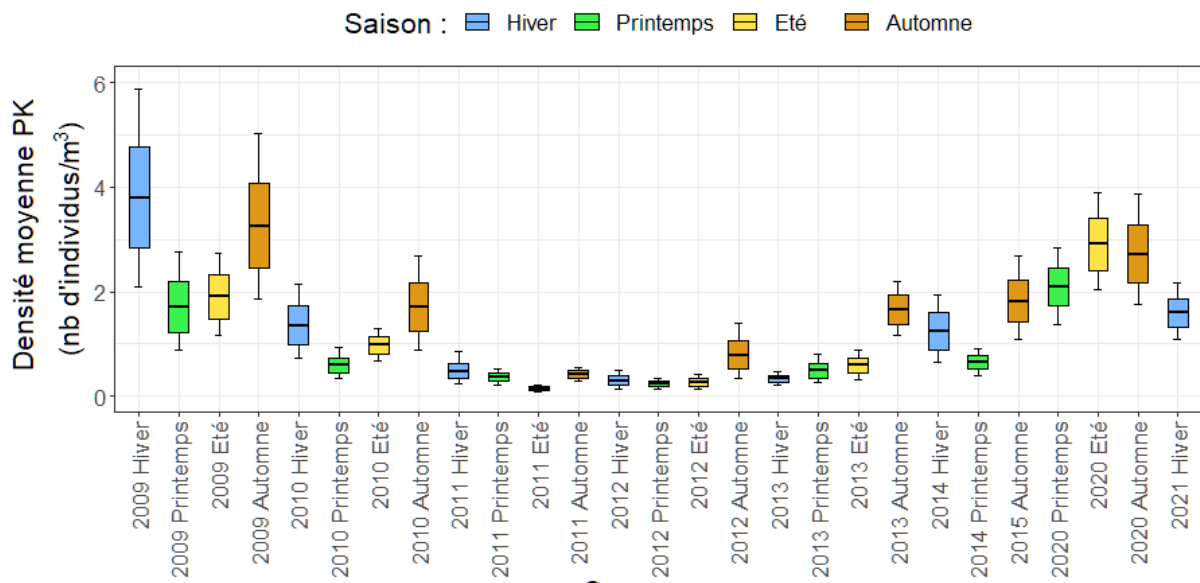


Figure 6. Densité moyenne de planctonophages (individus par m³) au cours de chaque campagne, tous récifs confondus. Chaque trait représente la moyenne, chaque boîte l'erreur type ; la barre d'erreur représente l'intervalle de confiance de la moyenne à 95%.

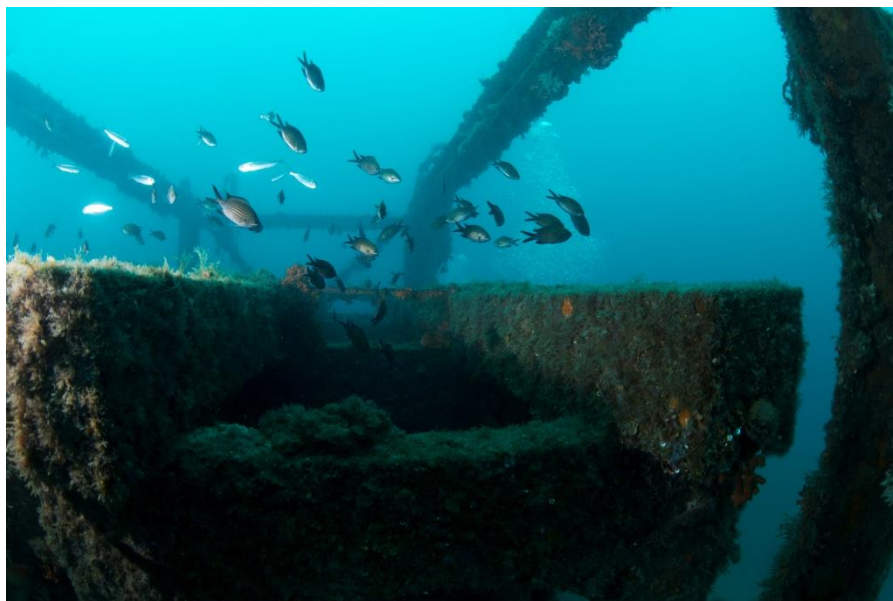


Figure 7 : Castagnoles (*Chromis chromis*) et bogues (*Boops boops*) sur un récif Panier acier

Alors que la biomasse totale ne montre pas de tendance particulière, la biomasse d'espèces cibles a sensiblement progressé au cours du suivi, en particulier à partir de l'automne 2015 et en 2020 (Figure 8). De grandes sérioles *Seriola dumerili* ont été observées en abondance sur un enrochement ENR au cours de l'été 2020 attestant de la présence saisonnière de grands poissons pélagiques prédateurs. Une biomasse globale qui augmente associée à une densité qui est stable indiquent que les poissons observés sur les récifs ont tendance à être plus gros, en particulier certaines espèces cibles de la pêche qui sont plutôt sédentaires et bénéficient de la protection du site.

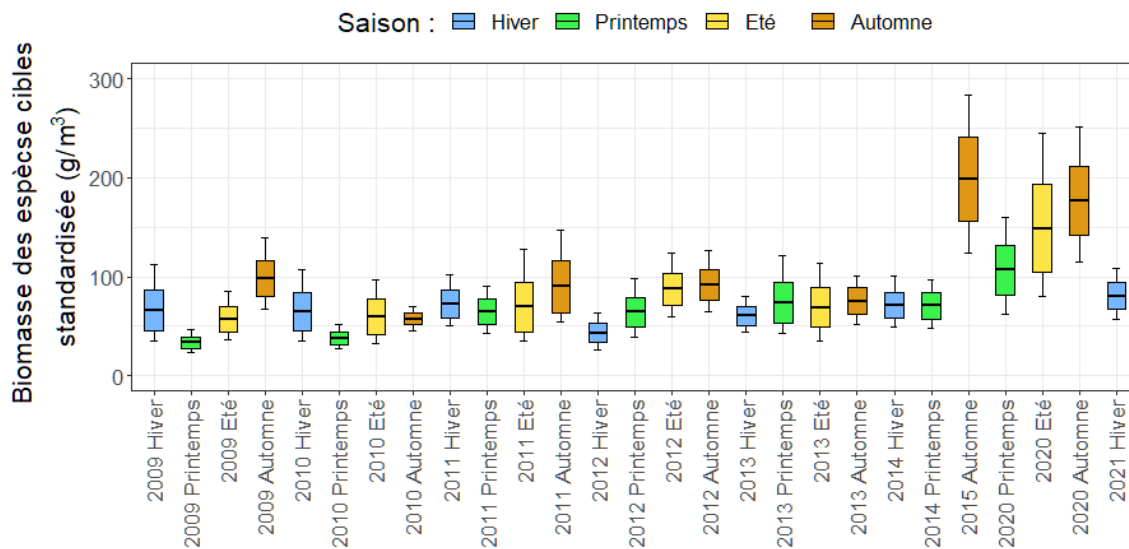


Figure 8. Biomasse moyenne d'espèces cibles de la pêche (g par m³) au cours de chaque campagne, tous récifs confondus. Les sérioles observées au cours de l'été 2020 ne sont pas prises en compte. Chaque trait représente la moyenne, chaque boîte l'erreur type ; la barre d'erreur représente l'intervalle de confiance à 95%.

La structure par catégories de régime alimentaire (groupes trophiques) du peuplement de poissons est un bon indicateur de sa qualité. L'abondance de carnivores : les espèces consommatrices de poissons (piscivores), d'invertébrés ou de vertébrés de grande (macro-) ou de moyenne taille (mesocarnivores) traduit l'équilibre de la chaîne alimentaire. Alors que les mesocarnivores (sars, labridés, rouget) varient avec une légère progression au cours de l'année 2020, les macrocarnivores (rascasses, murène, serran), les piscivores (chapon, congre) et les omnivores qui mangent de tout (sar à museau pointu, canthare) ont nettement progressé entre 2009 et 2020/2021 (Figure 9, Figure 10). Les planctonophages, dominés par les bogues en début de suivi (2009/2010) ont régressé pour être progressivement remplacés par des castagnoles, des mendoles et des picarels à partir de 2014.

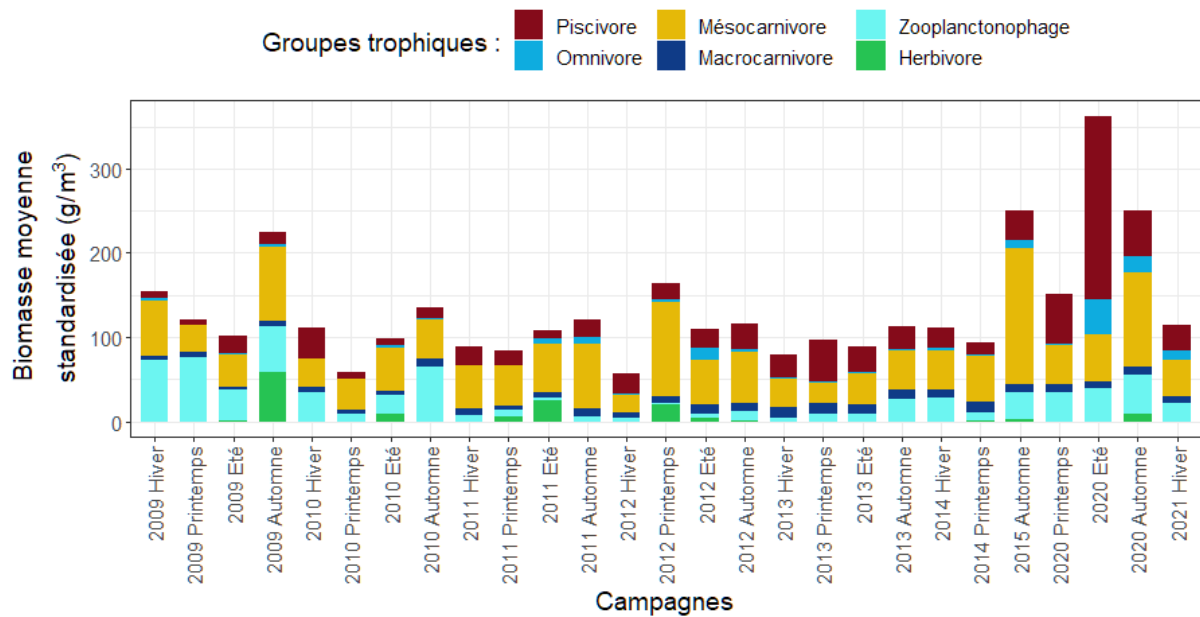


Figure 9. Biomasse moyenne (g par m³) de poissons par groupes trophiques et par campagnes, tous types de récifs confondus.



Figure 10 : Rougets (*Mullus surmuletus*) sur un enrochement (à gauche) ; Serran chevrette (*Serranus cabrilla*) sur un FAK (au milieu) et chapon (*Scorpaena scrofa*) sur un ACI (à droite).

La structure du peuplement de poissons par catégories de localisation dans la colonne d'eau et de comportement a évolué à l'échelle de la concession. La chute des espèces de pleine eau mobiles (Catégorie 1) en 2009 est visible tout comme la progression de la catégorie des espèces benthiques sédentaires (catégorie 6) (Figure 11). Les catégories les plus inféodées à l'habitat (2 et 6) sont celles qui ont progressé. Les espèces plus mobiles (catégories 3) sont bien présentes et en augmentation en 2015 et en 2020/2021 mais leur biomasse varie entre les saisons.

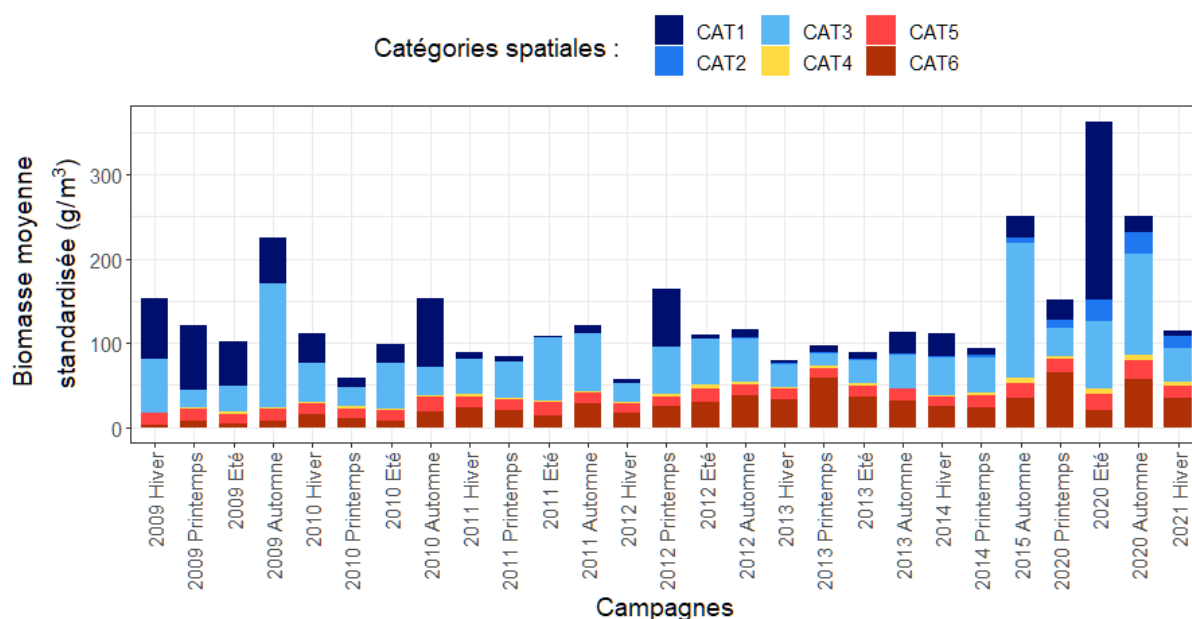


Figure 11. Biomasse moyenne (g par m³) de poissons par catégories spatiales et par campagnes, tous types de récifs confondus. (1 : espèces de pleine eau qui vivent en bancs mobiles, 2 : sédentaires en bancs dans toute la colonne d'eau, 3 : proches du fond avec déplacements horizontaux importants, 4 : espèces en contact avec le fond à forts déplacements horizontaux, 5 : espèces nageant près du fond à faible déplacement, 6 : espèces vivant sur le fond et à faible mobilité).

Le Tableau 1 ci-dessous présente l'évolution dans le temps des métriques du suivi des récifs du Prado entre 2009, 2013 et 2020/2021. Ce tableau met en évidence la dynamique globale du peuplement de poissons depuis le début du suivi en 2009. La richesse spécifique a rapidement augmenté (totale et espèces cibles) et atteint un plateau à partir de 2013. La densité totale de poissons varie beaucoup, la densité de poissons sans prendre en compte les espèces planctonophages dispersées dans la colonne d'eau est plus stable. Par contre, la biomasse totale a progressé de 2013 à 2020/2021 tout comme la biomasse d'espèces cibles de la pêche qui est multipliée par 2.6 depuis le début du suivi.

Dans le peuplement observé lors des comptages, les catégories alimentaires suivantes : macrocarnivores, omnivores et piscivores ont nettement progressé en biomasse depuis 2009, alors que les consommateurs de plancton ont beaucoup diminué de 2009 à 2013 et sont redevenus plus abondants depuis 2013.

Les espèces qui caractérisent ce peuplement ne sont pas les mêmes qu'au début : les catégories 2 (principalement la castagnole *Chromis chromis*, qui se trouve dans la colonne d'eau), 4 (les rougets *Mullus surmuletus*) et 6 (les espèces qui se déplacent peu sur le fond comme les rascasses, les congres, les mostelles, etc.) dominent.

Tableau 1. Synthèse des métriques analysées (x : moyenne ; et : écart type) en 2009, 2013 et 2020/2021 toutes saisons confondues (richesse spécifique : nombre d'espèces par comptage ; densité : nombre d'individus par m³ ; biomasse : g par m³). Les groupes trophiques (HE : Herbivores, MA : Macrocarnivores, ME : Mésocarnivores, OM : Omnivores, PI : Piscivores, PK : Planctonophages) et les catégories spatiales (1 : espèces de pleine eau grégaires et mobiles, 2 : sédentaires en bancs dans toute la colonne d'eau, 3 : proches du fond avec déplacement horizontaux importants, 4 : en contact avec le fond à forts déplacements horizontaux, 5 : proches du fond à faibles déplacements, 6 : posés sur le fond et sédentaire) sont exprimés en biomasse.

Métriques			2009	2013	2020	Facteur multiplicatif		
						2009-2013	2013-2020	2009-2020
Richesse spécifique	Totale	x	8.7	9.8	9.7	↑ 1.13	→ 0.99	↑ 1.12
		et	4.0	4.9	4.8			
	Espèces cibles	x	5.1	6.1	5.9	↑ 1.20	→ 0.98	↑ 1.17
		et	2.2	2.6	2.6			
Densité	Totale	x	4.30	2.11	4.06	↓ 0.49	↑ 1.92	→ 0.94
		et	5.23	2.23	4.18			
	Réduite	x	1.64	1.34	1.73	↓ 0.82	→ 1.29	→ 1.05
		et	2.56	1.64	2.14			
Biomasse	Totale	x	150.09	94.16	220.06	↓ 0.63	↑ 2.34	→ 1.47
		et	255.96	120.42	575.56			
	Espèces cibles	x	63.80	69.66	168.03	→ 1.09	↑ 2.41	↑ 2.63
		et	102.02	107.56	558.27			
Groupes trophiques	HE	x	15.12	0.00	2.24	↓ 0.00		↓ 0.15
		et	183.88	0.00	25.50			
	MA	x	5.38	11.83	8.80	↑ 2.20	↓ 0.74	↑ 1.64
		et	9.27	17.60	9.02			
	ME	x	56.05	35.08	64.71	↓ 0.63	↑ 1.84	→ 1.15
		et	88.80	39.81	105.12			
	OM	x	1.67	1.25	18.04	↓ 0.75	↑ 14.43	↑ 10.80
		et	9.57	3.49	69.26			
	PI	x	12.11	33.41	90.70	↑ 2.76	↑ 2.71	↑ 7.49
		et	46.64	95.65	537.54			
	PK	x	59.76	12.60	35.56	↓ 0.21	↑ 2.82	↓ 0.60
		et	126.39	27.08	50.44			
Catégories spatiales	CAT1	x	64.17	11.31	65.31	↓ 0.18	↑ 5.77	→ 1.02
		et	132.77	26.89	538.76			
	CAT2	x	0.08	1.29	19.45	↑ 16.13	↑ 15.08	↑ 243.13
		et	0.31	2.65	32.69			
	CAT3	x	64.97	26.95	68.20	↓ 0.41	↑ 2.53	→ 1.05
		et	218.77	40.01	134.81			
	CAT4	x	1.83	2.11	4.79	→ 1.15	↑ 2.27	↑ 2.62
		et	4.64	4.86	11.57			
	CAT5	x	13.80	12.12	18.17	↓ 0.88	→ 1.50	→ 1.32
		et	20.22	11.99	21.16			
	CAT6	x	5.24	40.38	44.14	↑ 7.71	→ 1.09	↑ 8.42
		et	16.69	103.01	95.21			

3.1.1.2 Analyse et comparaison par type de récifs pendant les campagnes 2020/2021

Le peuplement de poissons présente des différences marquées en fonction de la configuration (volume, dimension, complexité) de chaque type de récifs en 2020/2021.

Deux groupes de récifs se distinguent : (i) un premier groupe de récifs à grand volume, dont la richesse spécifique moyenne oscille entre 10 et 15 espèces par comptage environ (ACI, FAK et ENR) ; (ii) un deuxième groupe correspondant aux récifs à petit volume AMA et CHI ainsi qu'aux FIL, dont la richesse spécifique est de 5 espèces environ par comptage (Figure 12).

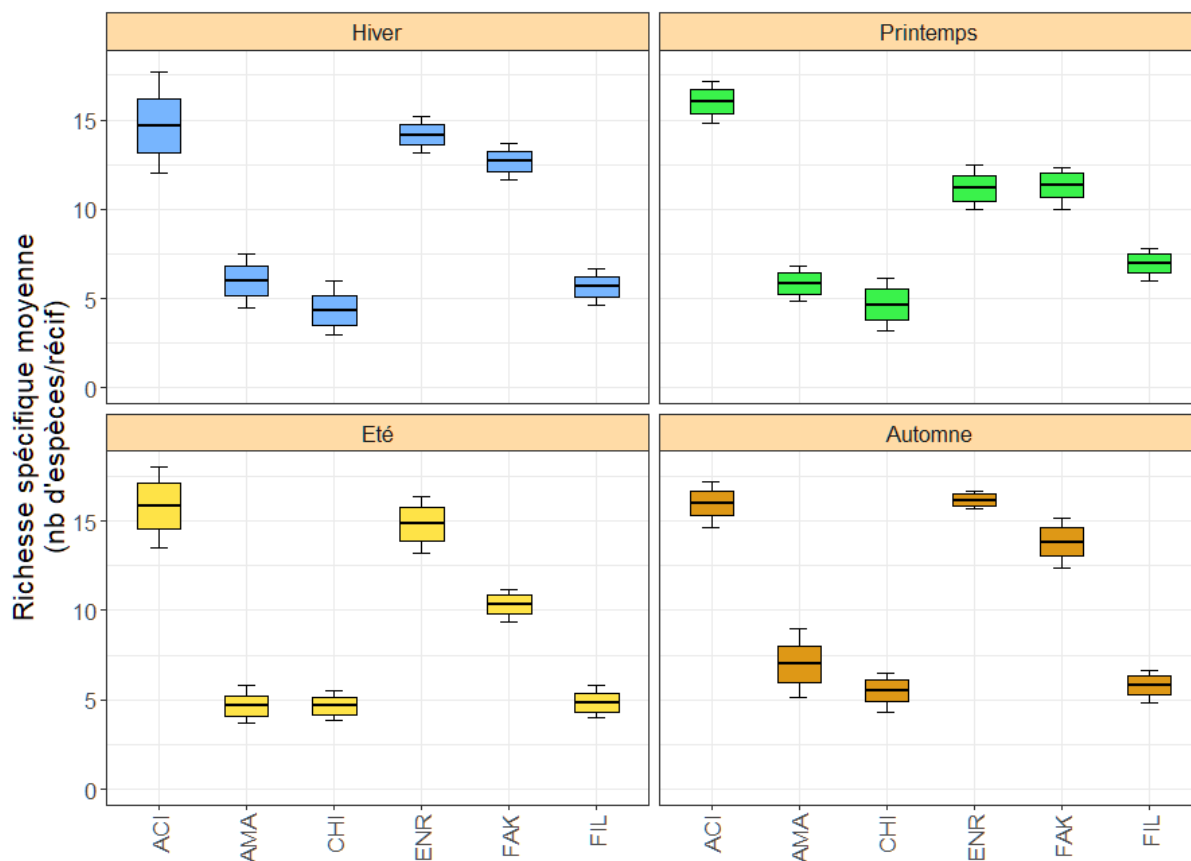


Figure 12. Richesse spécifique moyenne (nombre d'espèces par récif) pour chaque saison de l'année 2020/2021. Chaque trait représente la moyenne, chaque boîte l'erreur type ; la barre d'erreur représente l'intervalle de confiance de la moyenne à 95%.

La métrique biomasse tient compte à la fois du nombre de poissons et de leur taille, elle s'exprime en g ou en kg de poissons. Ramenée à une unité standardisée (g par m³), la biomasse moyenne par type de récif varie en fonction de la saison et du type du récif. Les récifs AMA et CHI (petits volumes) abritent les plus fortes biomasses moyennes d'espèces cibles de la pêche relativement à leur volume. Les évaluations en biomasse des poissons sur les récifs FAK conduisent à des valeurs assez proches. Les grands récifs (ACI, ENR), en raison de leurs grands volumes abritent des biomasses moyennes relativement plus faibles, ce qui ne signifie pas qu'il y a peu de poissons dessus, car comme ils sont grands, ils offrent une grande capacité de refuge aux poissons. Les récifs FIL abritent des biomasses particulièrement faibles car ils ont perdu le volume qu'ils occupaient dans la masse d'eau pour attirer les poissons nageurs (Figure 13).

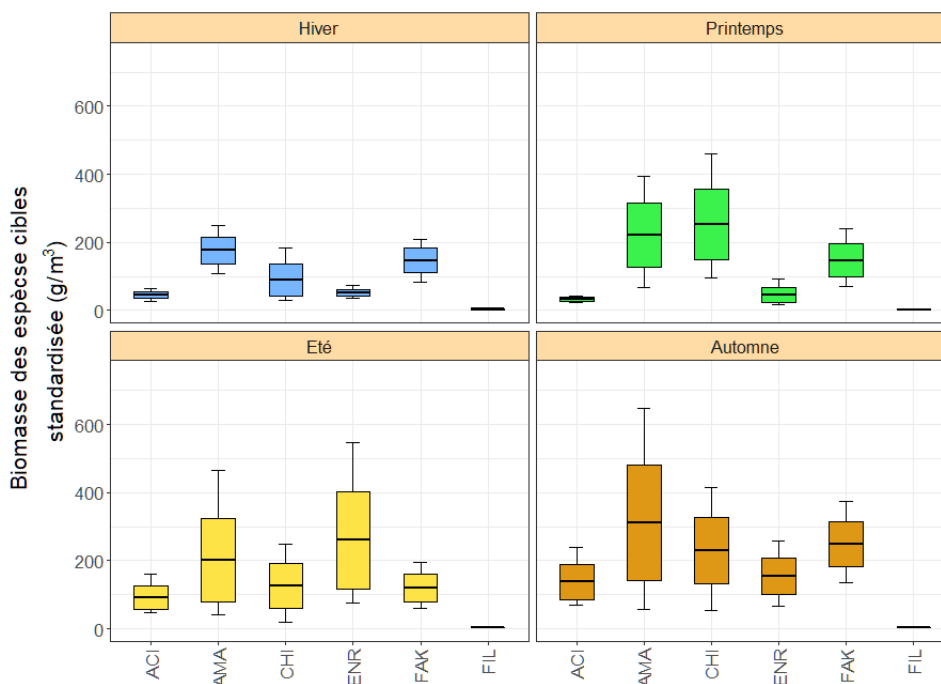


Figure 13. Biomasse moyenne d'espèces cibles de la pêche (g par m³) pour chaque saison de l'année 2020/2021 et pour chaque type de récif. Chaque trait représente la moyenne, chaque boîte l'erreur type ; la barre d'erreur représente l'intervalle de confiance de la moyenne à 95%. Les comptages sur ENR comportant les sérioles ont été retirés.

La composition du peuplement de poissons en fonction du régime alimentaire varie en fonction du type de récif. Sur les récifs complexes et volumineux ACI et FAK, elle est équilibrée, tous les groupes étant bien représentés. Sur les ENR, la structure des classes alimentaires varie fortement entre les saisons mais reste globalement équilibrée (abondance de consommateurs de poissons), à l'exception des consommateurs de plancton moins abondants que sur les autres récifs. Les récifs AMA et CHI abritent également tous les groupes alimentaires mais la structure varie fortement entre les saisons. Les prédateurs de poissons sont particulièrement abondants sur les récifs CHI (congres). Enfin, les récifs FIL abritent un peuplement peu structuré dominé par les carnivores recherchant des proies de moyenne taille (mesocarnivores) et les consommateurs de plancton (Figure 14, Figure 15).

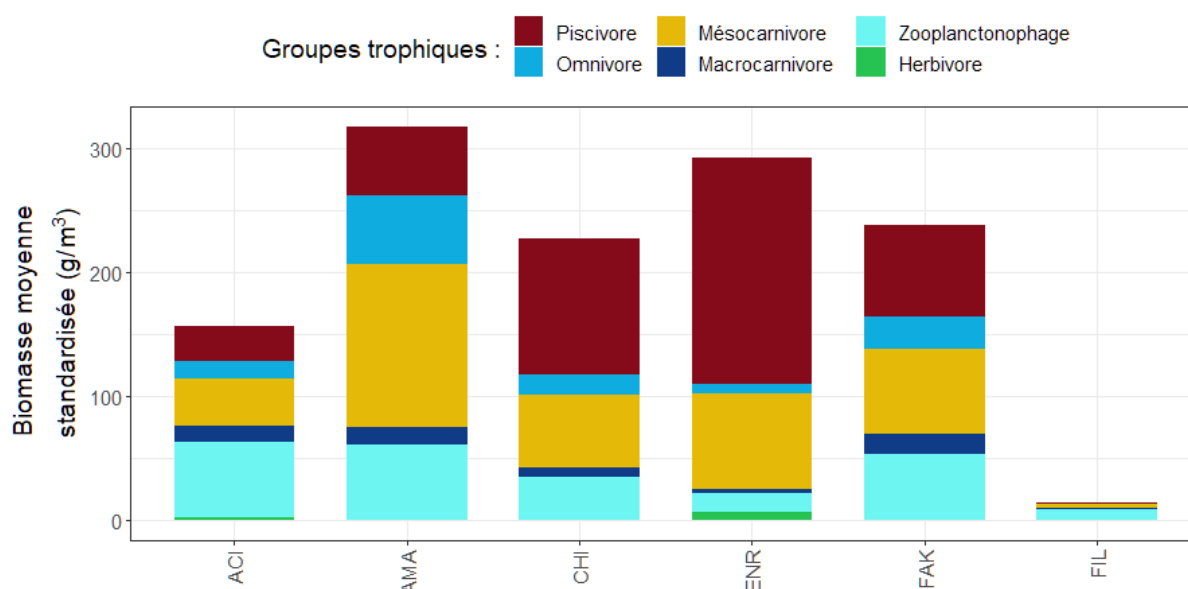


Figure 14. Biomasse moyenne (g par m³) pour chaque catégorie trophique par type de récif en regroupant les campagnes 2020/2021. Les comptages comprenant les bancs de sérioles *Seriola dumerili* n'ont pas été considérés.

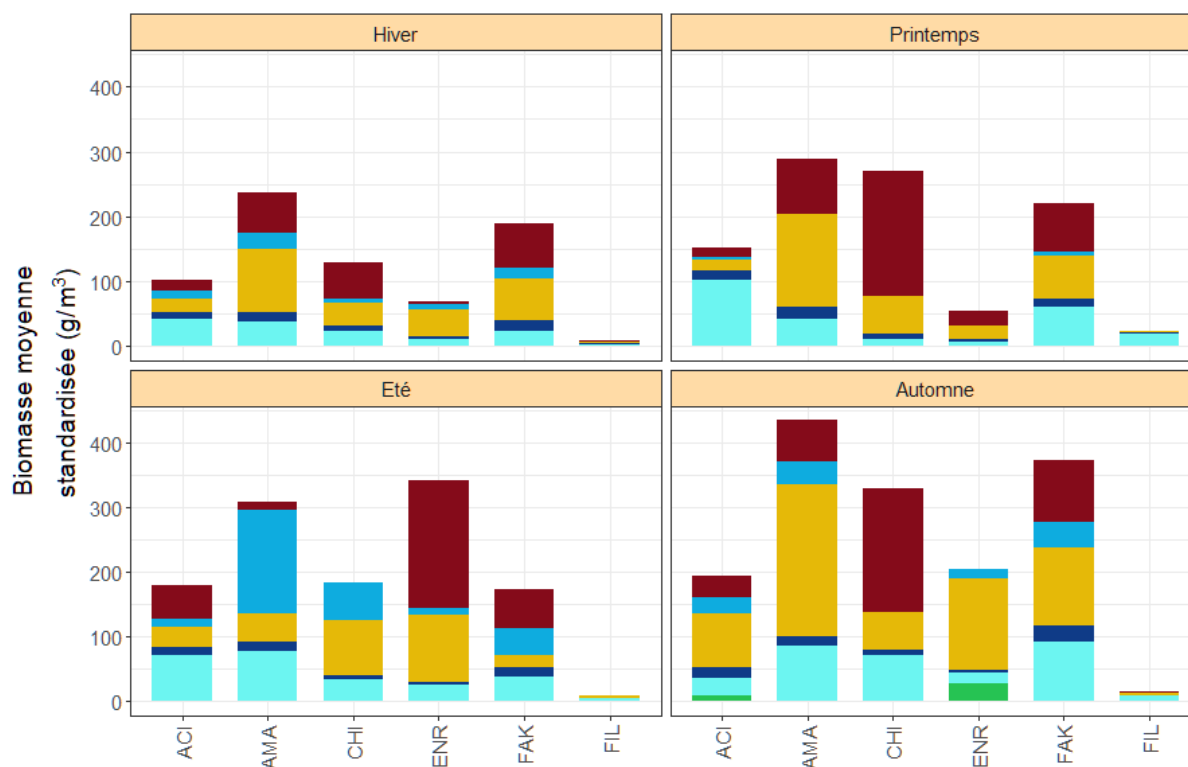


Figure 15. Biomasse moyenne (g par m³) pour chaque catégorie trophique par type de récif et par saison des campagnes 2020/2021. Les comptages contenant les bancs de sérioles n'ont pas été considérés.

La structure du peuplement de poissons par catégories de répartition dans la colonne d'eau et de comportement varie entre les types de récifs. La configuration de chaque récif favorise plutôt certaines catégories : les ENR se démarquent avec une biomasse plus importante de la catégorie 4 (espèces en contact avec le fond à déplacements horizontaux importants, il s'agit du rouget) et une proportion importante d'espèces mobiles de catégories 1 et 3 (sars, observation exceptionnelle de sérioles, dorade ; Figure 16). Les paniers ACI et les récifs FAK abritent une proportion de catégories sédentaires inféodées à l'habitat plus grande (2 : castagnole et 6 : chapon, congre, rascasses, mostelle, etc.) tout en accueillant une proportion d'espèces mobiles importante (catégorie 3 : sars et catégorie 1 plutôt pour ACI). Les petits récifs CHI accueillent une forte biomasse des catégories 6 (espèces posées sur le fond sédentaires) alors que les AMA accueillent principalement les catégories 2 (castagnole), 3 (espèces vivant près du fond et mobiles, sars) et 5 (espèces vivant près du fond peu mobiles : serran et girelle). Les récifs FIL fixent principalement des espèces des catégories 1 (espèces de pleine eau non inféodées comme la mendole), 2 (castagnole) et 5 (serran, crénilabre de méditerranée et girelle) (Figure 17, Figure 18).



Figure 16 : Sérioles (*Seriola dumerili*) sur un enrochement

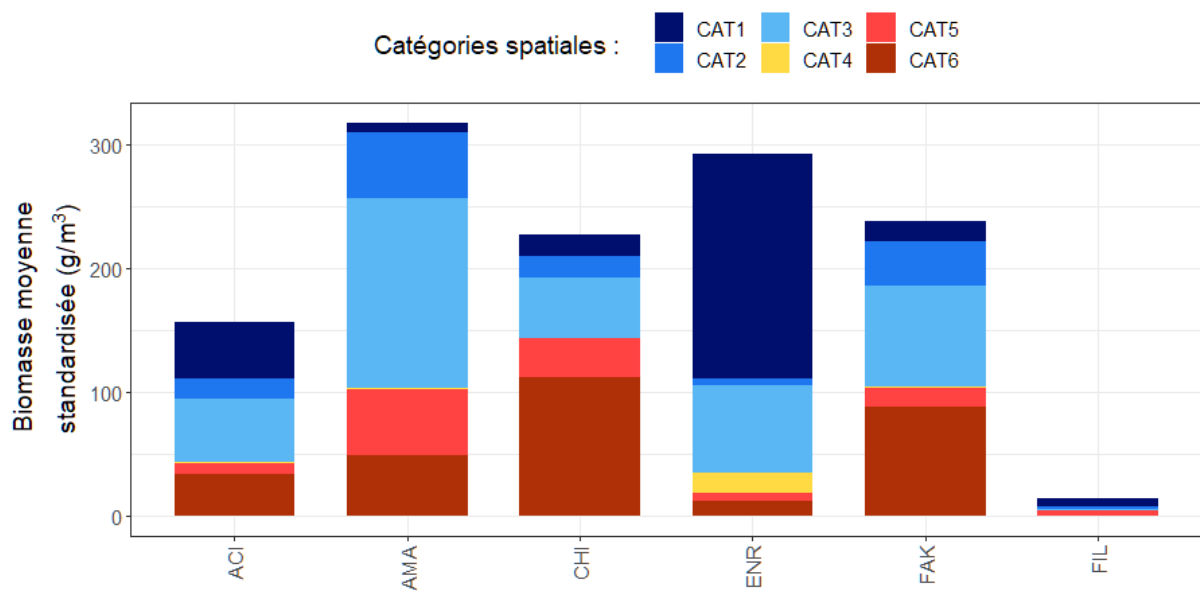


Figure 17. Biomasse moyenne (g par m³) pour chaque catégorie spatiale par type de récif en regroupant les 4 campagnes saisonnières de 2020/2021, sans les valeurs extrêmes (> 1.5 kg par m³).

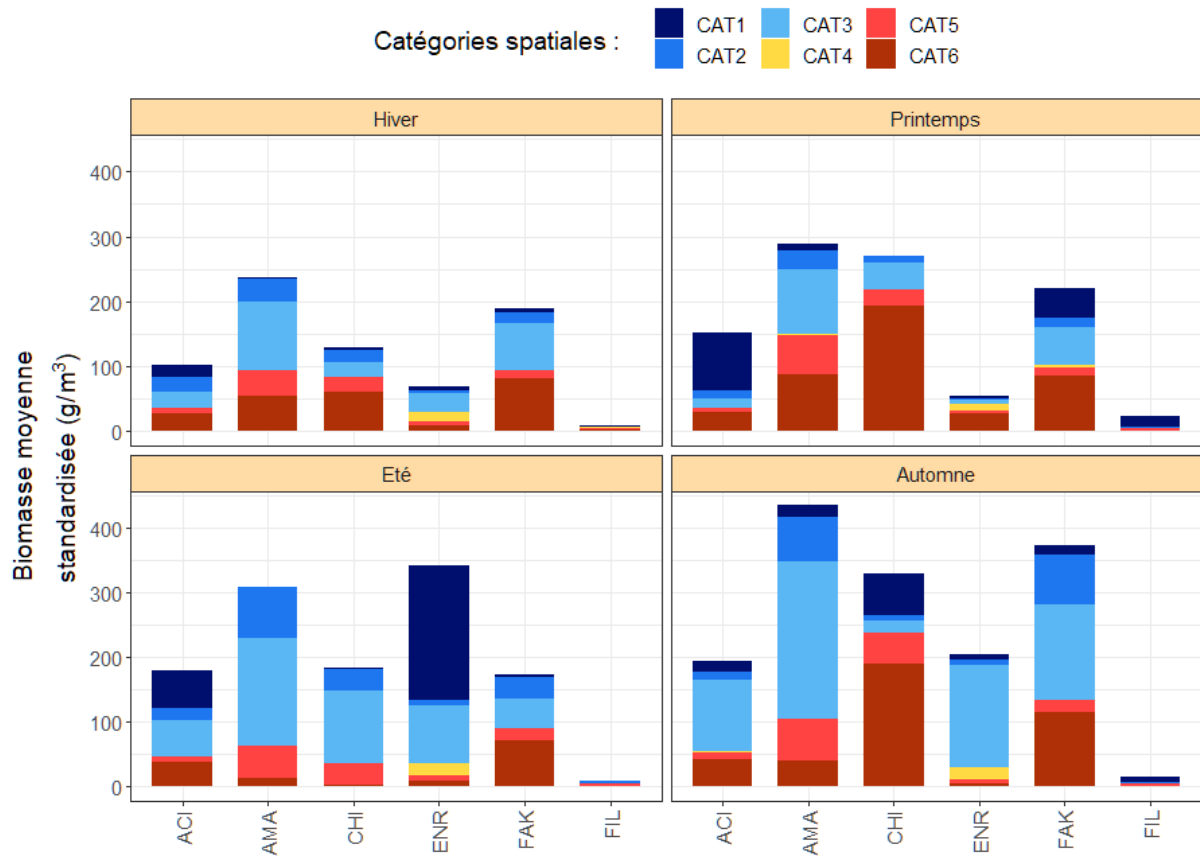


Figure 18. Biomasse moyenne (g par m³) pour chaque catégorie spatiale par type de récif et par saison des campagnes 2020/2021 sans les valeurs extrêmes (> 1.5 kg par m³).

Le Tableau 2 ci-après synthétise les principaux paramètres mesurés et leur évolution entre 2009 et 2020/2021 pour chaque type de récif.

Tableau 2. Synthèse des métriques analysées sur les 6 types de récifs (x : moyenne ; et : écart type) en 2009, 2013 et 2020/2021 toutes saisons confondues (richesse spécifique : nombre d'espèces par comptage ; densité : nombre d'individus par m³ ; biomasse : g par m³). Les groupes trophiques (HE : Herbivores, MA : Macro carnivores, ME : Mésocarnivores, OM : Omnivores, PI : Piscivores, PK : Planctonophages) et les catégories spatiales (1 : espèces de pleine eau grégaires et mobiles, 2 : sédentaires en bancs dans toute la colonne d'eau, 3 : proches du fond avec déplacements horizontaux importants, 4 : posées sur le fond à forts déplacements horizontaux, 5 : proches du fond à faibles déplacements, 6 : posées sur le fond et sédentaires) sont évalués en biomasse.

Métriques			ACI			AMA			CHI			ENR			FAK			FIL		
			2009	2020	Facteur multiplicatif 2009-2020	2009	2020	Facteur multiplicatif 2009-2020	2009	2020	Facteur multiplicatif 2009-2020	2009	2020	Facteur multiplicatif 2009-2020	2009	2020	Facteur multiplicatif 2009-2020	2009	2020	Facteur multiplicatif 2009-2020
Richesse spécifique	Totale	x	12.29	15.62	↑ 1.27	7.12	5.88	↓ 0.83	4.67	4.79	→ 1.03	11.23	14.08	↑ 1.25	11.25	12.04	→ 1.07	5.54	5.83	→ 1.05
		et	2.94	2.58		2.31	1.96		2.48	1.72		2.89	2.43		2.98	2.01		1.82	1.46	
	Espèces cibles	x	7.04	8.92	↑ 1.27	4.58	3.96	↓ 0.86	3.12	3.38	→ 1.08	6.32	8.17	↑ 1.29	6.50	7.42	↑ 1.14	2.92	3.79	↑ 1.30
		et	2.22	1.72		1.35	1.37		1.33	1.10		1.43	1.34		1.41	1.50		1.10	0.78	
Densité	Totale	x	3.88	4.93	→ 1.27	8.49	9.56	↑ 1.13	4.99	4.77	→ 0.96	3.65	1.75	↓ 0.48	3.06	4.83	↑ 1.58	2.39	0.82	↓ 0.34
		et	4.43	3.44		6.43	5.17		7.29	3.39		4.77	1.74		2.65	3.86		2.38	0.58	
	Réduite	x	0.55	0.78	→ 1.42	6.35	4.99	↓ 0.79	1.75	2.95	↑ 1.69	0.53	0.82	↑ 1.55	1.48	1.41	→ 0.95	0.27	0.34	↑ 1.26
		et	0.39	0.66		3.95	3.35		1.53	1.66		0.30	0.65		0.68	0.74		0.16	0.15	
Biomasse	Totale	x	106.26	156.88	→ 1.48	357.96	317.32	↓ 0.89	129.97	227.75	↑ 1.75	149.83	292.85	↑ 1.95	110.80	238.59	↑ 2.15	45.97	14.17	↓ 0.31
		et	92.60	91.04		555.26	311.20		215.73	236.40		147.92	1026.60		72.86	144.19		42.60	11.48	
	Espèces cibles	x	32.96	76.79	↑ 2.33	166.05	227.05	↑ 1.37	38.44	173.68	↑ 4.52	67.60	265.11	↑ 3.92	71.41	165.57	↑ 2.32	2.56	2.93	↑ 1.14
		et	33.52	84.24		199.01	270.26		41.87	200.68		80.62	1005.77		56.79	122.14		2.49	1.39	
Groupes trophiques	HE	x	0.00	2.07		99.26	0.00	↓ 0.00	0.00	0.00		1.22	6.81	↑ 5.58	4.14	0.00	↓ 0.00	0.00	0.00	
		et	0.00	10.15		486.25	0.00		0.00	0.00		6.75	47.21		18.40	0.00		0.00	0.00	
	MA	x	2.08	13.43	↑ 6.46	21.68	14.97	↓ 0.69	4.43	7.38	↑ 1.67	1.28	3.88	↑ 3.03	6.52	17.07	↑ 2.62	0.42	1.00	↑ 2.38
		et	1.10	5.99		15.05	7.70		4.49	6.66		0.81	2.77		4.75	13.64		0.38	0.54	
	ME	x	21.75	37.47	↑ 1.72	169.08	130.92	↓ 0.77	36.84	59.29	↑ 1.61	52.04	76.71	↑ 1.47	56.95	68.22	↑ 1.20	3.63	3.67	→ 1.01
		et	19.22	70.01		181.95	183.22		28.32	67.88		43.11	107.30		36.47	63.60		2.32	1.41	
	OM	x	0.62	14.01	↑ 22.60	8.18	54.87	↑ 6.71	0.34	15.85	↑ 46.62	0.81	7.94	↑ 9.80	0.91	25.68	↑ 28.22	0.03	0.01	↓ 0.33
		et	2.55	12.96		24.35	162.75		1.26	66.09		2.05	9.66		1.60	39.51		0.09	0.04	
	PI	x	12.44	28.76	↑ 2.31	14.14	55.83	↑ 3.95	8.60	110.20	↑ 12.81	15.39	182.48	↑ 11.86	18.32	74.56	↑ 4.07	0.48	0.63	↑ 1.31
		et	22.30	39.67		32.84	104.70		37.32	194.45		74.29	991.96		36.41	70.24		1.35	1.36	
	PK	x	69.37	61.14	↓ 0.88	45.62	60.74	↑ 1.33	79.77	35.03	↓ 0.44	79.08	15.03	↓ 0.19	23.95	53.06	↑ 2.22	41.42	8.86	↓ 0.21
		et	93.41	44.18		159.65	50.97		205.05	77.08		128.10	25.00		34.75	57.25		42.33	11.93	
Catégories spatiales	CAT1	x	70.11	45.39	↓ 0.65	47.09	7.64	↓ 0.16	87.30	17.39	↓ 0.20	89.71	181.83	↑ 2.03	23.86	16.79	↓ 0.70	41.42	6.30	↓ 0.15
		et	93.37	41.46		167.92	17.30		205.20	75.17		142.46	1003.52		34.72	34.16		42.33	11.53	
	CAT2	x	0.10	16.81	↑ 168.10	0.24	53.06	↑ 221.08	0.07	17.56	↑ 250.86	0.02	5.35	↑ 267.50	0.09	35.47	↑ 394.11	0.00	2.56	
		et	0.28	11.46		0.64	40.72		0.33	29.63		0.12	10.10		0.16	51.98		0.00	3.20	
	CAT3	x	25.54	51.25	↑ 2.01	242.02	153.51	↓ 0.63	24.58	48.94	↑ 1.99	52.04	71.03	↑ 1.36	56.87	81.56	↑ 1.43	1.67	0.08	↓ 0.05
		et	30.84	86.71		545.98	258.07		27.50	92.80		43.58	117.97		56.38	86.38		2.38	0.25	
	CAT4	x	0.96	0.35	↓ 0.36	1.57	0.59	↓ 0.38	0.65	0.07	↓ 0.11	3.35	15.64	↑ 4.67	2.90	0.96	↓ 0.33	0.03	0.30	↑ 10.00
		et	1.83	0.57		6.54	2.87		1.92	0.35		6.03	17.26		4.51	3.23		0.16	0.60	
	CAT5	x	6.28	8.98	→ 1.43	52.56	53.50	→ 1.02	16.21	31.62	↑ 1.95	3.16	6.84	↑ 2.16	12.37	15.17	↑ 1.23	2.85	4.23	↑ 1.48
		et	5.03	5.19		26.25	24.45		13.85	22.05		1.68	3.85		7.46	6.90		1.94	1.45	
	CAT6	x	3.27	34.09	↑ 10.43	14.48	49.03	↑ 3.39	1.17	112.17	↑ 95.87	1.54	12.16	↑ 7.90	14.70	88.64	↑ 6.03	0.00	0.69	
		et	5.56	20.21		18.42	93.38		2.88	193.45		8.40	39.91		35.19	69.88		0.00	1.36	

3.1.1.3 Evolution de quelques espèces cibles de la pêche

L'évolution de la biomasse des principales espèces observées sur les récifs entre 2009, 2013 et 2020 pour ne sélectionner que ces campagnes espacées dans le suivi est majoritairement positive. Le congre (x7.6), le sar à museau pointu (x22.9), la mostelle (x18.1) et le chapon (x12.6) ont les biomasses qui ont le plus fortement augmenté depuis 2009. D'autres espèces relativement mobiles ont une évolution positive plus modérée comme le sar vérade (x2.3), le labre merle (x3.45) ou le rouget (x3.03). La girelle, espèce mobile qui est présente partout, ne montre pas une progression très marquée (x1.2) alors que d'autres encore ont leur biomasse qui a même diminué : le loup, le sar commun ou encore le crénilabre tanche (Tableau 3).

Tableau 3. Synthèse de la biomasse moyenne (g par m³) pour 2009, 2013 et 2020 de 16 espèces cibles de la pêche et facteurs multiplicatifs entre les années.

Espèces	2009	2013	2020	Facteur multiplicatif		
				2009-2013	2013-2020	2009-2020
<i>Conger conger</i>	1.74	11.64	13.21	↑ 6.67	→ 1.13	↑ 7.57
<i>Coris julis</i>	3.44	2.39	4.18	↓ 0.69	↑ 1.75	→ 1.22
<i>Dicentrarchus labrax</i>	4.18	1.62	1.96	↓ 0.39	→ 1.21	↓ 0.47
<i>Diplodus puntazzo</i>	0.39	0.99	9.00	↑ 2.53	↑ 9.06	↑ 22.90
<i>Diplodus sargus</i>	14.58	9.91	4.50	↓ 0.68	↓ 0.45	↓ 0.31
<i>Diplodus vulgaris</i>	8.42	8.40	19.40	→ 1.00	↑ 2.31	↑ 2.30
<i>Labrus merula</i>	0.30	0.93	1.05	↑ 3.07	→ 1.12	↑ 3.45
<i>Mullus surmuletus</i>	1.49	2.06	4.51	→ 1.38	↑ 2.19	↑ 3.03
<i>Muraena helena</i>	0.00	0.00	2.71			
<i>Phycis phycis</i>	0.06	1.06	1.00	↑ 19.17	→ 0.94	↑ 18.05
<i>Scorpaena porcus</i> et <i>S. notata</i>	0.70	3.03	1.71	↑ 4.35	↓ 0.57	↑ 2.46
<i>Scorpaena scrofa</i>	0.46	2.38	5.77	↑ 5.21	↑ 2.42	↑ 12.62
<i>Serranus cabrilla</i>	1.32	2.29	2.46	↑ 1.73	→ 1.07	↑ 1.86
<i>Sparus aurata</i>	0.14	0.00	4.86			
<i>Symphodus mediterraneus</i>	0.21	0.57	0.41	↑ 2.76	↓ 0.72	↑ 1.97
<i>Symphodus tinca</i>	0.40	0.46	0.13	→ 1.16	↓ 0.28	↓ 0.32

3.1.1.4 Première extrapolation de la biomasse de poissons à l'échelle de la concession

Une extrapolation de la biomasse totale et de la biomasse d'espèces cibles de poissons a été tentée à l'échelle des 400 récifs de la concession pour les 27 campagnes de suivi. Sur la base de la biomasse mesurée sur chaque récif suivi, il a été possible d'attribuer par tirage au sort une biomasse aux autres récifs de la concession (10 000 simulations permettent d'obtenir une moyenne avec un intervalle de confiance, donc une fourchette pour chaque campagne).

La biomasse totale extrapolée pour chaque campagne varie entre 1 042 [904 – 1 196] kg (hiver 2012) et 9242 [6 422 – 12 502] kg (été 2020 ; avec une abondance exceptionnelle de sérioles vues sur un ENR), ce qui donne une évaluation des valeurs extrêmes. Cette biomasse totale de poissons sur les récifs du Prado varie fortement selon les saisons et selon les années. La biomasse extrapolée d'espèces cibles de la pêche

à l'échelle de la concession pour chaque campagne est comprise entre 595.7 [550.6 ; 645.3] kg (printemps 2009) et 8 213.6 [5 509.9 ; 11 349.9] kg (été 2020 ; là aussi en raison de l'abondance de sérioles sur un enrochement). **Les récifs AMA (n=201) et ENR (n=43) sont ceux qui contribuent le plus à la biomasse totale à l'échelle de la concession.** A l'exception des récifs FIL dont la contribution est maintenant anecdotique, la répartition de la biomasse par type de récifs est relativement équilibrée à l'échelle de la concession (Figure 19).

Tableau 4. Tableau récapitulatif du nombre de données tirées au sort pour chaque simulation de chaque campagne de suivi pour l'extrapolation des biomasses à l'échelle de la concession.

Type de récif	Nb de récif dont la biomasse est connue	Nb de récif dont la biomasse est inconnue et donc tirée au sort parmi les valeurs connues	Total
Panier-Acier (ACI)	6	14	21
Amas de cubes (AMA)	6	195	201
Chicane (CHI)	6	94	100
Enrochement (ENR)	6	37	43
Fakir (FAK)	6	15	21
Filière (FIL)	6	8	14

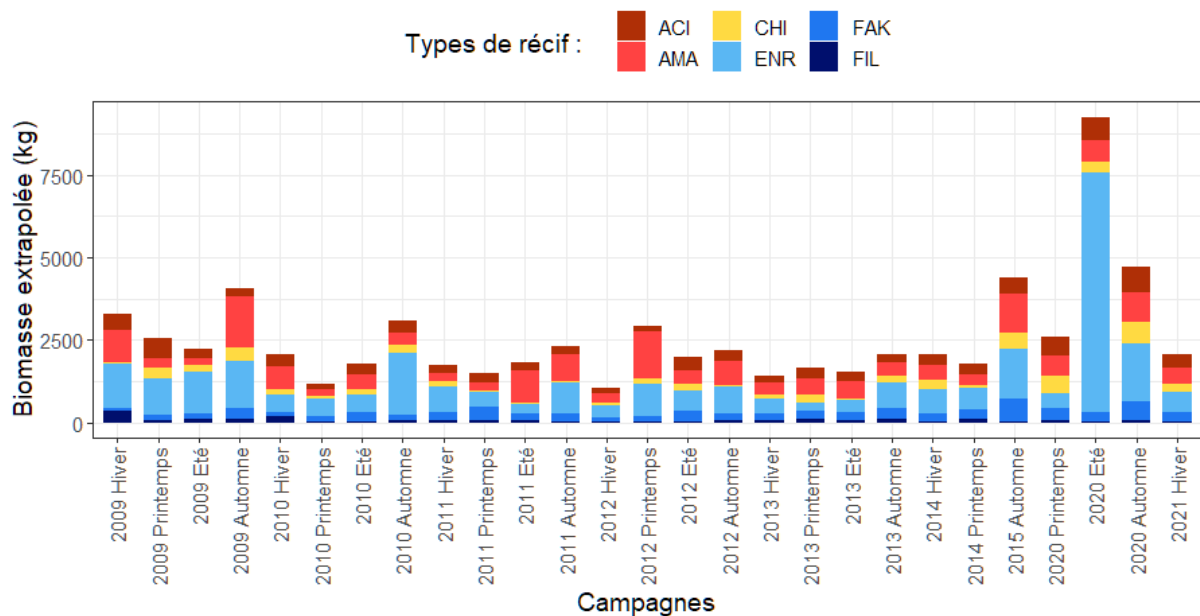


Figure 19. Biomasse totale (kg) extrapolée à l'échelle de la concession par campagne pour chaque type de récifs.

Cette analyse intéressante reste indicative et fournit un ordre de grandeur de la biomasse probablement observable sur la concession (sur la base de la méthode de comptage visuel de poissons employée).

3.2 Mission 2 : Suivi de la colonisation benthique des récifs

3.2.1. Objectifs de la mission

La colonisation d'un récif artificiel s'effectue également par la flore et la faune fixée, ainsi que par la petite faune sessile et sédentaire. L'objectif de cette mission est donc de suivre dans le temps la dynamique de colonisation des récifs artificiels par ces organismes, selon des approches typologiques (selon les différents types de récifs et matériaux), spatiales (par village), temporelles (annuelle, saisonnière) et paysagères.

3.2.2. Rappel méthodologique

Après la fin du suivi obligatoire et au cours des suivis de 2016 et de 2019-2021, les échantillonnages par grattage et par prélèvement d'un pochon de coquilles d'huîtres n'ont pas été reconduits. Par ailleurs, au cours du temps, la diversité et l'abondance des espèces ayant considérablement augmenté, l'échantillonnage des grands invertébrés par recensement *in situ* était devenu difficile à réaliser au cours d'une plongée. Lors du suivi de 2016, le recensement a été réalisé à partir d'images vidéo selon un parcours défini ; les principales espèces érigées ont, quant à elles, été recensées par comptage en plongée sous-marine.

Dans le cadre de ce suivi à T+12 ans, quatre méthodes ont été mises en œuvre afin de suivre la colonisation benthique des récifs artificiels :

- un recensement des invertébrés benthiques sessiles par quadrats photographiques (Figure 20);
- un recensement des macro-invertébrés par images vidéo selon un parcours défini (Figure 20);
- un recensement en plongée d'un cortège sélectionné d'espèces ;
- un suivi photographique du paysage récifal.



Figure 20 : Plongeurs en train de réaliser un photo-quadrat (à gauche) et un parcours vidéo (à droite) sur un amas de cubes.

L'échantillonnage a été effectué sur les 18 récifs des villages 3 et 4 suivis de 2009 à 2014 et en 2016 (Figure 21). Les plongées ayant permis de réaliser les photo quadrats et les parcours vidéo ont été réalisées le 13 et le 26 juin 2020. Le recensement visuel des macro-invertébrés s'est déroulé du 8 au 10 mars 2021. Le traitement des données issues des parcours vidéo a été réalisé sur les 12 récifs qui ont été suivis avec cette méthode en 2016.

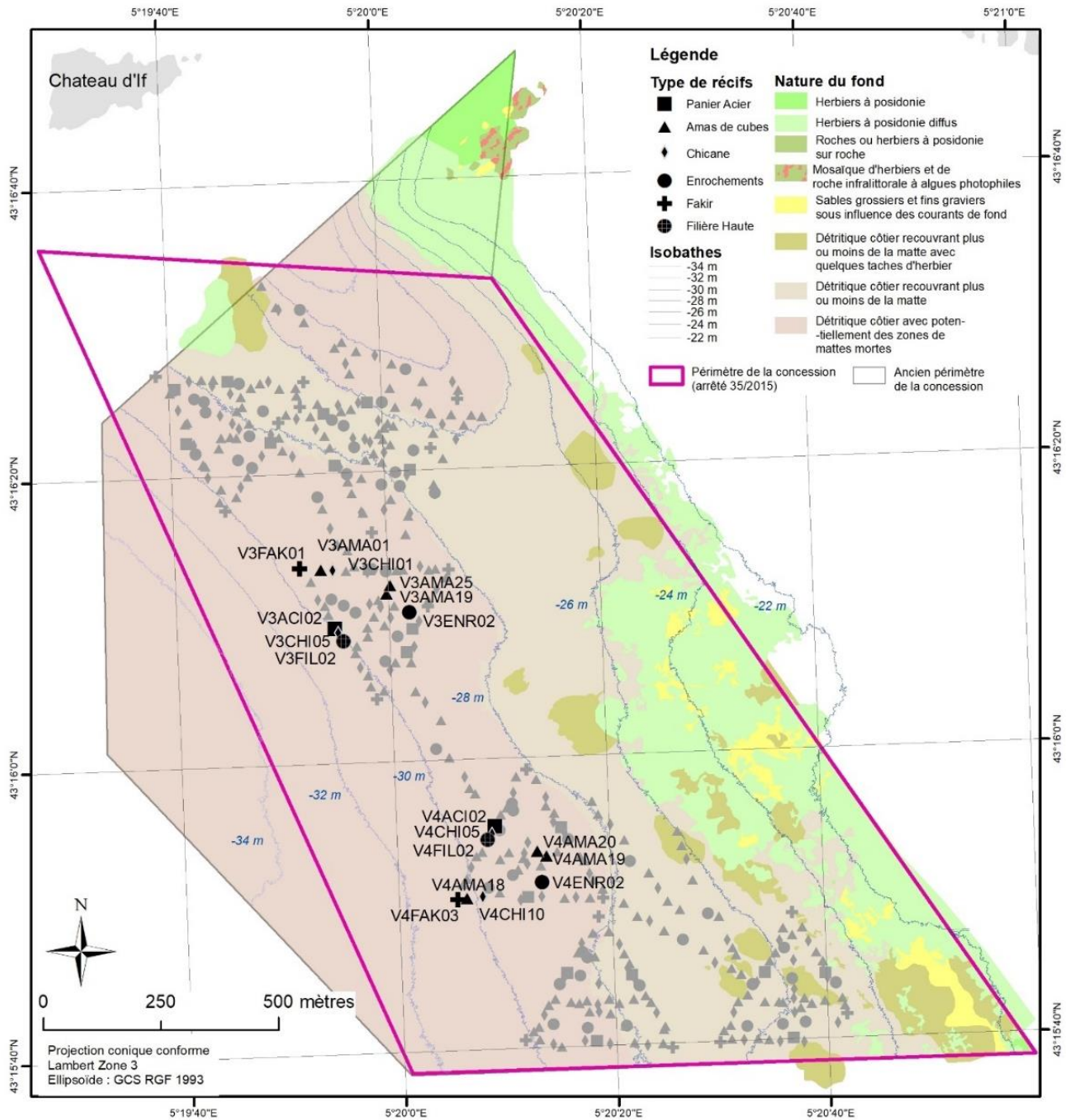


Figure 21 : Récifs artificiels échantillonnés dans le cadre du suivi des communautés benthiques en 2020/2021. Les récifs visités sont figurés en noir et les autres en gris

3.2.3. Principaux résultats

La diversité des espèces continue-t-elle d'augmenter au cours du temps ?

Le nombre total de taxons recensés, à partir de l'analyse des photo-quadrats, sur les parois verticales des récifs artificiels de la baie du Prado au cours des 10 années du suivi est de 66, et sur les parois horizontales de 31.

Certains groupes sont davantage représentés que d'autres, c'est le cas notamment des éponges dont 21 taxons différents ont été identifiés. Au cours des 12 années d'immersion, le nombre moyen de taxons a doublé (X2) sur les parois verticales passant de 4.4 ± 1.6 à T+2 ans (2010) à 9.6 ± 3.0 à T+12 ans (2020) (PERMANOVA : Pseudo-F = 87.704 et $p = 0.001$) et a presque quintuplé (X5) sur les parois horizontales passant de 1.0 ± 0.7 à 4.8 ± 1.9 en 10 ans (Figure 22).

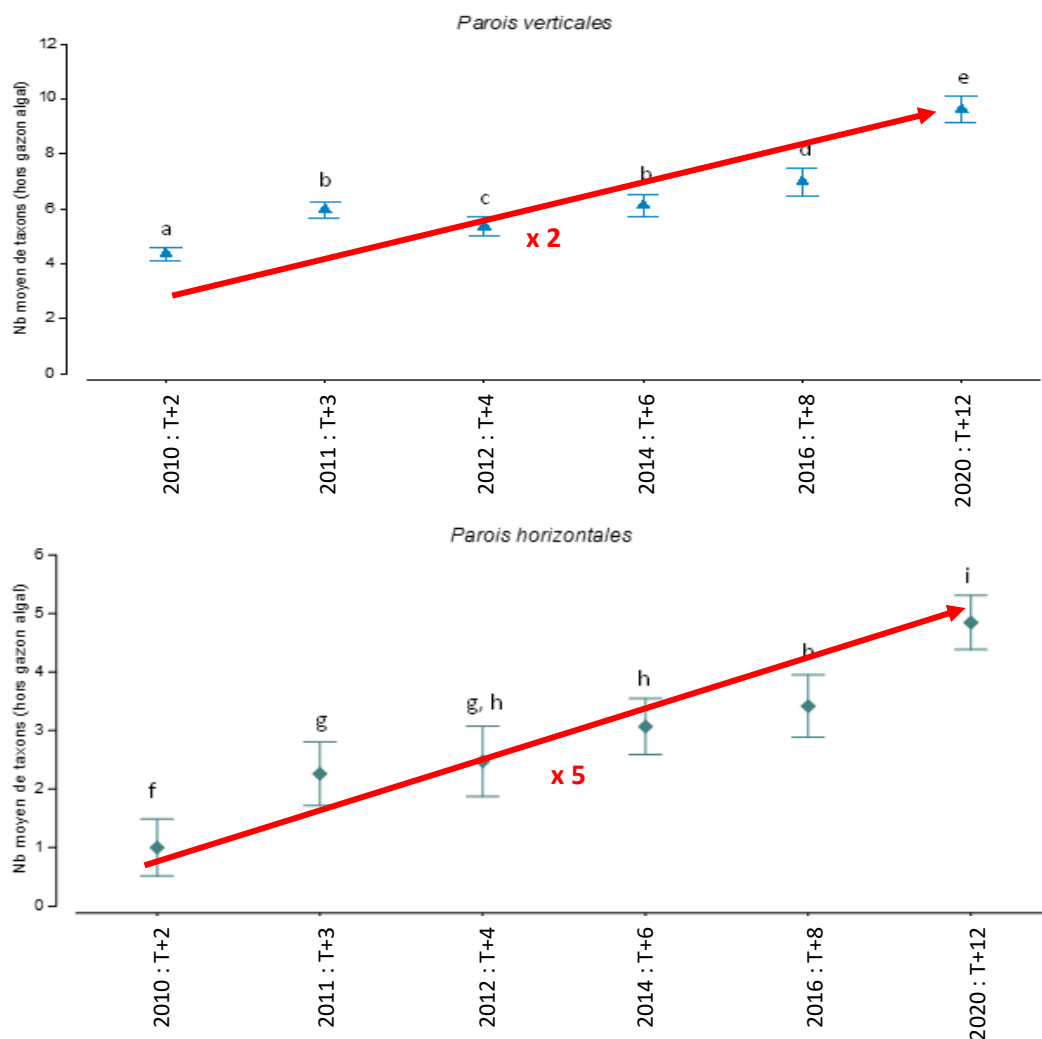


Figure 22 : Nombre moyen de taxons (hors gazon algal) recensés au printemps dans les photo-quadrats des parois verticales (haut) et horizontales (bas) des récifs artificiels entre 2010 (T+2 ans) et 2020 (T+12 ans). Les lettres indiquent les résultats des pair-wise tests (statistiques).

L'approche par analyse vidéo a permis d'identifier 46 taxons répartis dans 11 phylums (groupes) différents. Le nombre total de taxons observés en 2020 (T+12 ans) varie entre 31 pour le village 3 et 41 pour le village 4 alors qu'en 2016 (T+8 ans), 46 taxons avaient été recensés sur le village 3 et 41 sur le village 4 (la qualité de la vidéo et la capacité d'identification a posteriori limitent le nombre d'espèces observées).

Quelle communauté benthique retrouve-t-on sur les récifs de la baie du Prado ?

Les porifères (éponges) se développent toujours plus avec de grands massifs de *Hemimycale collumela*, *Phorbas* sp. ou encore *Dysidea avara*, alors que jusqu'à présent c'était surtout *Crambe crambe* qui était présente sur les parois récifales. Les bryozoaires, au développement plus rapide, présentent des successions de cohortes avec des colonies de *Pentapora fascialis* ou de *Turbicellepora avicularis* qui se succèdent (Figure 23), laissant un dépôt d'éléments calcifiés morts à la base des récifs, pouvant constituer un tapis épais par endroit (jusqu'à 30 cm). Les colonies de cnidaires grandissent et les placages de *Savignyella lafontii* sur les parois sont très développés ces dernières années, remplaçant les placages de gazons algaux. Enfin, la part de sédiment augmente. Cela peut paraître surprenant mais ces observations doivent être mises en lien avec le développement en espèces et l'augmentation de la structuration tridimensionnelle des assemblages, qui agissent comme un piège à sédiment. Dans la vaste plaine de détritique côtier que constitue la baie du Prado, des mouvements sédimentaires modérés peuvent se produire notamment lors de tempêtes, une certaine remise en suspension de sédiment dans la colonne d'eau peut conduire à un dépôt sur les récifs artificiels

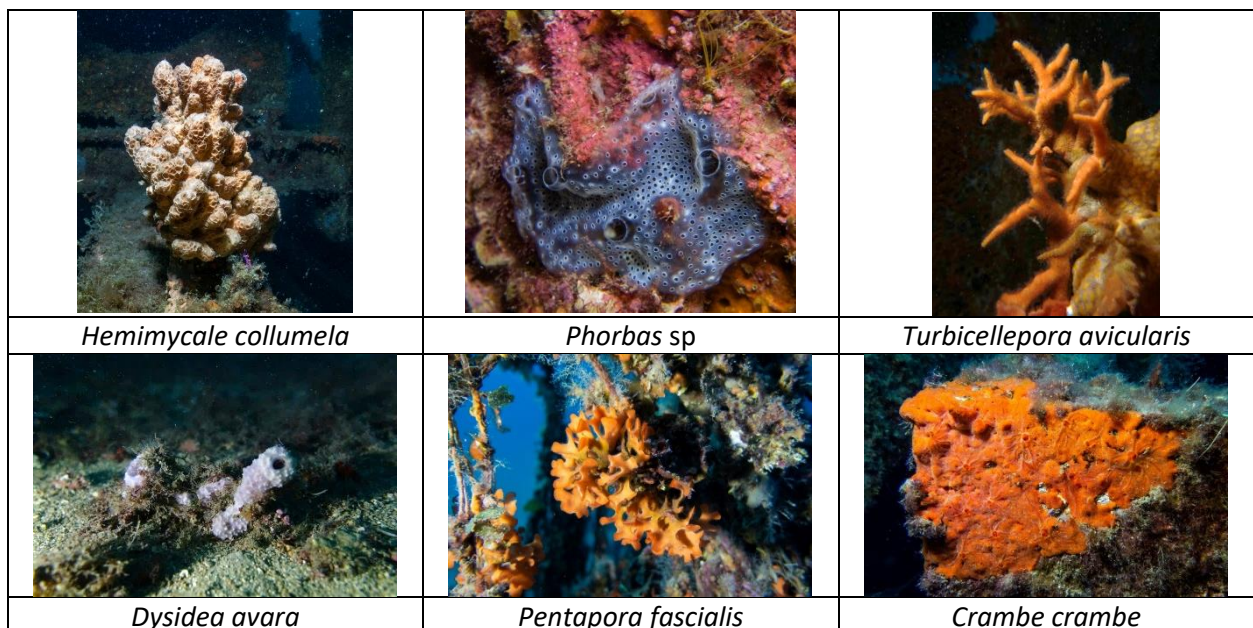


Figure 23 : Planche photographique présentant les taxons benthiques les plus présents sur les récifs artificiels

Les communautés benthiques varient elles en fonction du type de récif ?

Au cours du suivi, on constate de moins en moins de similitude entre les types de module. Lors des premières années après l'immersion, les différences étaient moins marquées et plus variables. Avec le temps, chacun des modules semble présenter une spécificité qui lui est propre (Figure 24).

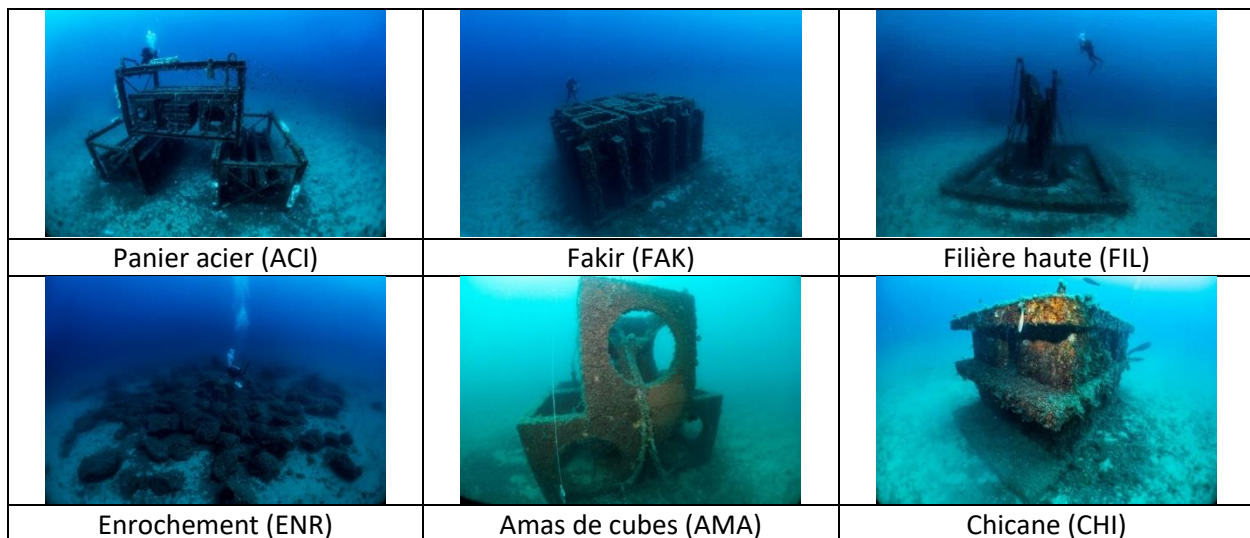


Figure 24 : Planche photographique présentant les différents types de modules composant les récifs de la baie du Prado

Au sein des récifs artificiels de la baie du Prado, les récifs Paniers-aciers sont les plus volumineux et les plus complexes (poutres verticales, horizontales et en diagonale). Ce sont aussi les récifs les plus hauts. Ils abritent un maximum de diversité spécifique et d'assemblages benthiques différents. Néanmoins, la colonisation de leurs parois verticales est marquée par la présence plus importante de porifères et de bryozoaires. Les modules Chicane ont la particularité d'avoir leurs parois verticales abritées par un plateau horizontal dépassant sur les quatre côtés, créant d'importantes zones ombragées. Les récifs Fakir sont, quant à eux, constitués d'unités béton ceinturées par de larges poutres massives verticales sur les extérieurs, engendrant une ombre portée sur les parois. Ces deux types de récifs sont caractérisés par la présence de communautés de porifères diversifiées et recouvrantes. Le développement des invertébrés sessiles en raison de l'ombre portée due aux structures est un phénomène bien connu. L'ombrage réduit l'abondance des macrophytes et conduit à une augmentation de l'abondance des invertébrés sessiles, contrairement aux surfaces horizontales où les niveaux de lumière sont élevés. Les Enrochements, aux parois plus ou moins verticales et plus ou moins rugueuses sont caractérisés par un recouvrement important de macrophytes. Des espèces annuelles comme *Halopteris filicina*, *Dictyota* sp. ou *Sphaerococcus coronopifolius* sont bien développées après plus d'une décennie d'immersion. Par ailleurs, ces récifs très volumineux mais ayant une hauteur limitée (1 à 2 m) sont marqués par des remises en suspension de sédiment meuble comme en témoigne leur présence dans les quadrats analysés. Les fortes valeurs de sédiment, probablement en lien avec la forme, l'inclinaison et la rugosité des surfaces ont également été constatées par Ponti *et al.* (2015). Enfin les modules Amas de cube, de petits volumes aux parois sans l'influence d'éléments architecturaux comme des poutres ou des plateaux horizontaux présentent tout de même des assemblages benthiques assez diversifiés avec aussi bien la présence de porifères que d'anthozoaires ou de macrophytes.

Les communautés benthiques sont-elles influencées par la nature des matériaux et leur exposition ?

Les récifs immergés dans la baie du Prado ont la particularité d'être constitués de divers matériaux de construction, à savoir : le béton (à surface lisse), le parpaing (à surface plus rugueuse), l'acier, la coquille d'huître, le polypropylène et la roche naturelle. Ces matériaux ont des spécificités qui leurs sont propres en termes de rugosité de surface ou de propriétés chimiques. Ces spécificités peuvent avoir une influence sur la colonisation des espèces (Punzo *et al.*, 2015). Pour autant, les observations ne semblent pas indiquer un fort lien entre la composition spécifique et la nature du substrat. Par contre, lorsque l'on considère l'orientation et l'exposition du substrat, les comparaisons montrent des influences plus marquées. Les surfaces horizontales, qu'elles soient constituées de béton, de parpaing ou d'acier sont caractérisées par la présence de macrophytes, favorisées par l'exposition à la lumière. Les surfaces verticales, aussi bien exposées au Nord qu'au Sud sont en revanche plus favorables au développement des éponges ou des bryozoaires.

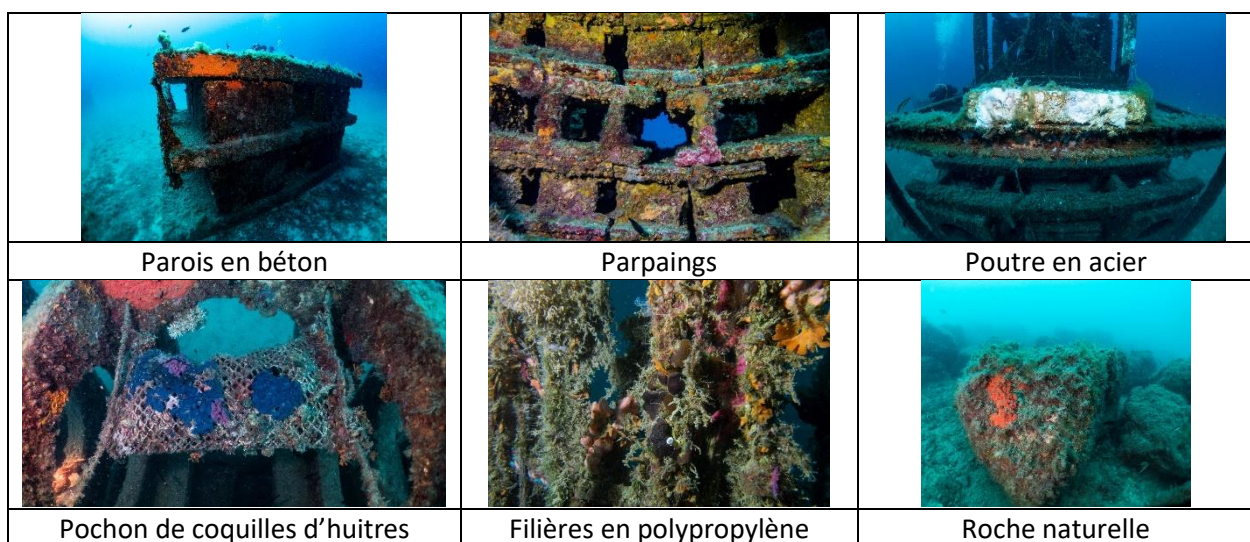


Figure 25 : Planche photographique présentant les différents matériaux composant les récifs de la baie du Prado

En conclusion, la colonisation, le développement et surtout la composition des espèces benthiques sont différents parmi les différents types de récifs. La complexité architecturale de par la diversité de types d'habitats (sciaphiles et cryptiques), de matériaux (béton, acier, roche, polypropylène) et d'exposition (à la lumière ou non) qu'elle implique, mais aussi par la disponibilité de surfaces de fixation, et l'influence de la localisation spatiale des récifs permettent ainsi une grande diversification du peuplement benthique des récifs artificiels de la baie du Prado. Les peuplements benthiques continuent à se développer avec une lutte pour coloniser et recouvrir les espaces disponibles ou accéder à la lumière.

3.3 Mission 3 : Suivi de l'herbier de posidonie en plongée

3.3.1. Objectifs de la mission

La concession de récifs artificiels se trouve à proximité directe de l'herbier de posidonie. L'intérêt de cette proximité est fonctionnel, bien entendu, à travers les interactions envisageables entre les récifs et l'herbier. Cependant, *Posidonia oceanica* est une espèce protégée par l'arrêté du 19 juillet 1988, il est donc primordial de mettre en œuvre les moyens adéquats de surveillance de l'herbier. Pour cela, il est indispensable de suivre l'évolution de la dynamique de l'herbier avec précision afin d'identifier un éventuel impact direct ou indirect imputable à la concession de récifs (modification de l'hydrodynamisme local, recouvrement de l'herbier par les modules).

3.3.2. Rappel méthodologique

La méthodologie employée dans le cadre de la mission 4 est celle utilisée par le GIS Posidonie depuis 40 ans, notamment à travers le Réseau de Surveillance Posidonie en Région PACA, confié au GIS Posidonie de 1984 à 2003.

Deux sites de suivi de l'herbier de posidonie ont été choisis à proximité de la concession de récifs artificiels pour surveiller un éventuel impact des récifs sur l'herbier. Un site se situe au Nord du Village 1, pratiquement en contact avec le récif V1ACI1, le second est localisé dans la partie Sud de la concession, à l'Est du Village 6, à proximité de V6CHI12 et V6ACI1. Le positionnement des deux balisages Nord et Sud est présenté sur la Figure 26.

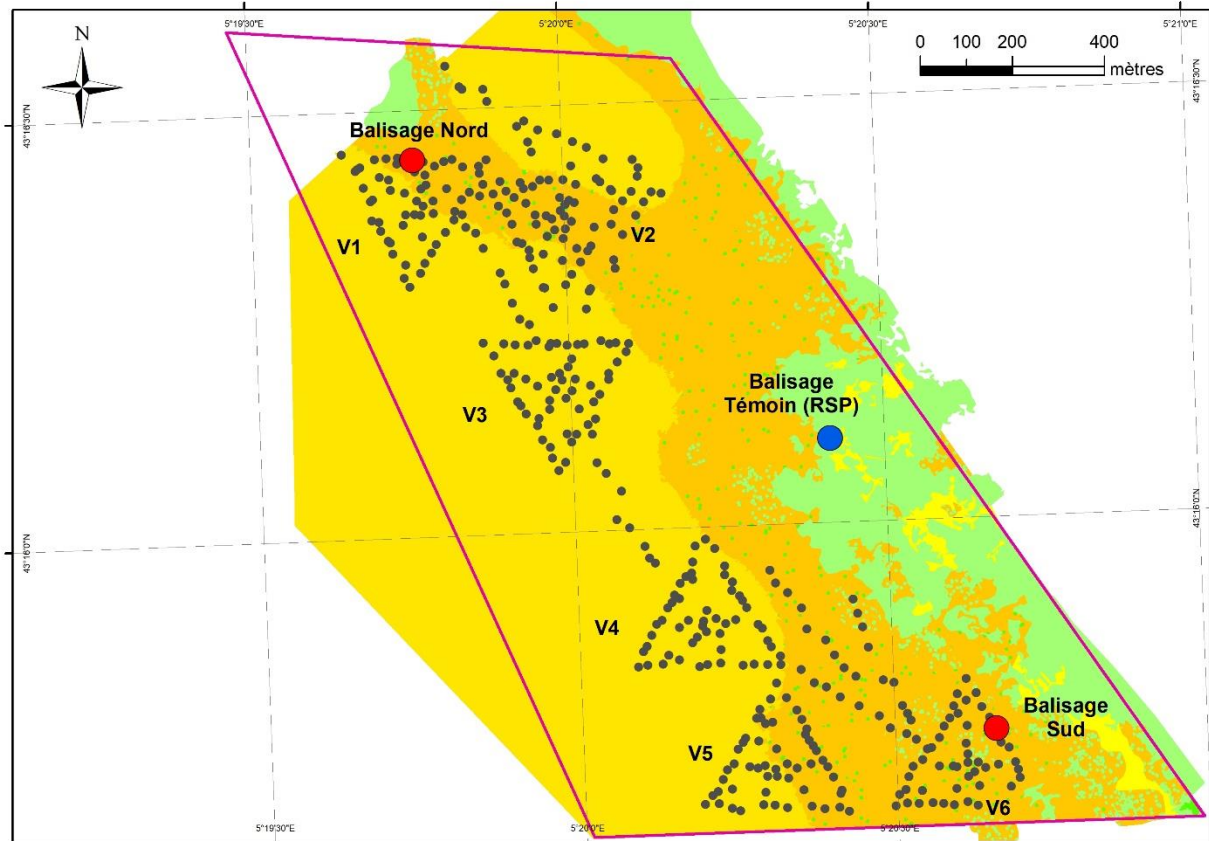


Figure 26 : Localisation des deux balisages de limite inférieure d'herbier de Posidonie et du balisage de référence RSP. (vert pâle : herbier de posidonie ; orange : matte morte ; jaune : substrats meubles).

Dans le cadre du Réseau de Surveillance Posidonie, un balisage de la limite inférieure de l'herbier de posidonie, situé au niveau de la rade Sud de Marseille, à quelques centaines de mètres des récifs artificiels, en face de la plage du Prophète, a été suivi. Ce balisage, installé en 1986 à 26 m de profondeur, a fait l'objet de 7 suivis, tous les 3 ans jusqu'en 2004 (EOL, 2004). Malgré un contexte particulier (turbidité, proximité de l'Huveaune et de la zone aménagée du Prado), il s'agit d'une limite d'herbier progressive. Le balisage est suffisamment proche de la concession (mêmes conditions environnementales) et éloigné des récifs (absence d'impact direct) pour être sélectionné comme station de référence.

Le suivi de l'herbier de posidonie a été effectué en décembre 2019. Lors de ces campagnes, une journée de terrain (soit 4 plongées) a été consacrée à chaque balisage pour tout d'abord remettre en état les balises, plaquettes et piquets photos (nettoyage), puis pour réaliser des observations (*in situ*, photo, vidéo) et le prélèvement de 15 rhizomes vivants pour réaliser les analyses lépidochronologiques et phénologiques tel que décrit dans le tome méthodologique (Belloni *et al.*, 2022a). Cette configuration a permis une surveillance fine de l'évolution de l'herbier sur une période de 5 ans. Si les récifs artificiels avaient eu une incidence significative sur l'herbier, ce dispositif aurait été capable de la détecter sans ambiguïté.

Les efforts ont donc été concentrés sur les observations, les mesures et les descriptions en plongée, qui permettent le meilleur diagnostic quant à l'évolution de l'herbier.

3.3.3. Principaux résultats

Comment a évolué l'herbier de posidonie de la baie du Prado au cours de ces 12 années ?

L'herbier de posidonie de la baie du Prado est globalement en progression. Le balisage témoin montre de très nets signes d'expansion mis en évidence depuis les années 1980s. Le balisage Sud, proche du Village 6, présente une dynamique progressive (Figure 27). L'herbier du balisage témoin montre toujours des signes évidents de la progression entamée depuis les années 1980s.

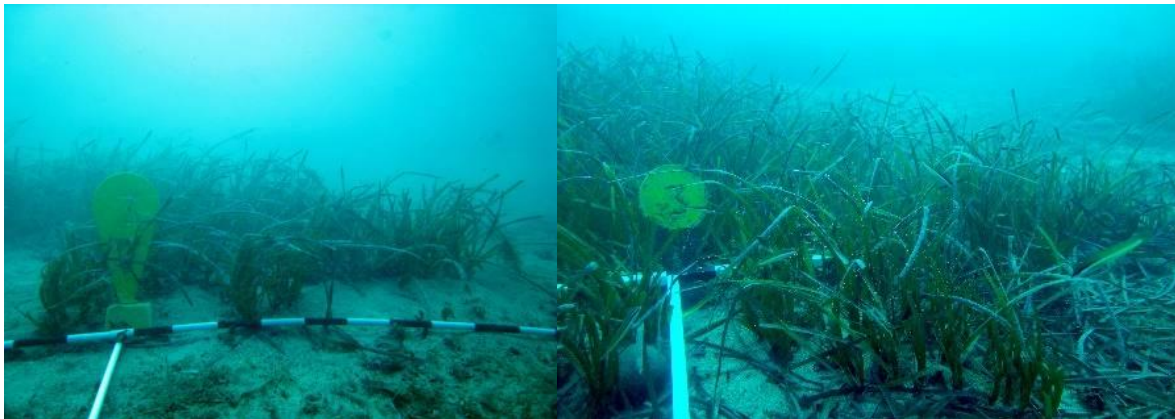


Figure 27 : Balise n°3 du balisage Sud en 2009 à gauche et en 2019 à droite, signe d'une forte progression.

L'herbier observé au Nord, bien que très peu dense, semblait avoir une dynamique progressive (nombreux rhizomes plagiotropes et traçants). Mais sa vulnérabilité face à d'éventuels mouvements sédimentaires entre autres, s'est traduite par une importante régression puis une disparition complète vérifiées en 2012, 2014 puis 2019.

Caulerpa cylindracea a été observée seulement sur le balisage Sud depuis le début du suivi. L'espèce est très présente dans le secteur, en particulier sur le détritique côtier et au sein de la concession des récifs artificiels. Son absence, en particulier au niveau du balisage Nord est sans doute liée à des variations interannuelles mais également à la saison de suivi (hiver-printemps), période à laquelle la chlorobionte invasive est moins développée. Il est à noter que l'espèce invasive n'a été observée dans la concession qu'au cours de la première année de suivi (2009/2010). En 2019, la caulerpe est toujours présente sur le balisage avec un faible recouvrement (environ 5 à 10 %).

En conclusion, à partir de l'analyse des mesures et des observations réalisées sur le balisage Sud, le balisage Nord et le balisage témoin (RSP), aucune atteinte significative liée à la présence des récifs artificiels n'est présente sur la concession. Les fluctuations observées sont d'origine naturelle (mouvements sédimentaires), et ce sont ces fluctuations qui conditionnent l'évolution de l'herbier de posidonie de la rade Sud de Marseille.

3.4 Mission 4 : Suivi de l'état des structures en plongée

3.4.1. Objectifs de la mission

A partir de l'immersion des récifs, il était impératif de surveiller attentivement l'évolution de l'état général des structures. Plusieurs aspects ont été appréhendés : (i) le maintien de l'intégrité des récifs face aux conditions environnementales (courantologie, sédimentation, corrosion, etc.) et (ii) une détérioration éventuelle imputable aux activités humaines (principalement déplacement ou accrochage dû à des engins de pêches ou trainés sur le fond).

3.4.2. Rappel méthodologique

Le suivi de l'état des récifs comporte deux compartiments distincts. Il consiste en un **suivi qualitatif de l'état des récifs** à travers une série d'observations ordonnées sur chaque type de module (Figure 28). Les principales observations réalisées sont :

- l'état général des structures (dégradation du béton, IPN, éléments manquants, abîmés, pots à poulpe, pochons à huîtres, état des filières, etc.) ;
- la présence d'engins de pêche (souvent observés) et leur possible impact sur les structures.

Le suivi qualitatif de l'état des structures a été réalisé au même moment que les suivis poissons, soit lors des 4 campagnes. Les mesures ont été réalisées lors des plongées de la mission 1 (à la suite des comptages de poissons), c'est-à-dire sur les mêmes récifs. Il a donc été possible de suivre 36 modules.



Figure 28 : Inspection visuelle qualitative de l'état des structures. A gauche : filières manquantes ou affaissées sur un amas de cubes, à droite : inspection d'un récif Fakir.

3.4.3. Principaux résultats

Quel est l'état général des récifs après 12 ans de suivi ?

A ce jour, à l'exception des récifs FIL dont les filières se sont affaissées et qui ont vu leur rôle fonctionnel impacté, l'ensemble des autres récifs artificiels du Prado qui ont été inspectés présentent toujours un bon état général et conservent donc l'intégralité de leurs fonctions.

Parmi les éléments à relever :

- Les pots à poulpe et les parpaings n'ont pas subi de dommages supplémentaires par rapport au suivi réalisé entre 2009 et 2014 (Figure 29). On peut penser d'ailleurs que la colonisation contribue depuis quelques années à les enraciner aux modules récifaux ;
- Un affaissement important de toutes les filières hautes a été observé en raison du fouling (Figure 30). Le poids des organismes présents sur ces récifs est trop important par rapport à la flottabilité des bouées qui avaient été installées initialement. Ces récifs ne jouent donc plus le rôle fonctionnel d'origine : attirer les espèces pélagiques. Les amas de cordes créent de nouveaux supports à la colonisation plus proche du fond ;
- Une disparition ou un affaissement total dû au fouling important des filières présentes sur les récifs Paniers acier, Chicane et Amas de cube ont été constatés (Figure 31) ;



Figure 29 : Pot à poulpe à l'extérieur du récif (V3ACI2, printemps 2020)



Figure 30 : Récif FIL affaissé (été 2020)



Figure 31 : Filières effondrées sur un récif CHI (été 2020)

- Les modifications courantologiques provoquées par la présence des récifs sont minimes et se traduisent par une légère zone de sédimentation ou d'érosion (quelques centimètres contre le récif), sans conséquences sur l'efficacité des récifs. Les débris organogènes issus de la production secondaire des récifs (grands bryozoaires, polychètes tubicoles, etc.) contribuent à alimenter le sédiment détritique alentour ;

La présence d'engins de pêche a été constatée, prouvant l'existence d'activités de pêche professionnelle ou de loisir dans une concession où celles-ci sont interdites (Figure 32) ;



Figure 32 : Ligne de pêche sur un récif ACI (printemps 2020)

- Les éléments métalliques des récifs Panier acier n'ont pas montré de corrosion excessive pouvant mettre en péril la structure générale du récif. Les anodes installées en 2017, mais également la forte colonisation benthique de ces structures peut jouer un rôle protecteur vis-à-vis de la corrosion (Figure 33) ;



Figure 33 : Anode installée sur un récif ACI (printemps 2020)

- Certaines anodes sur les récifs ACI se sont détachées et se retrouvent parfois sur le sol, ne jouant ainsi plus leur rôle de protection contre la corrosion (Figure 34) ;



Figure 34 : Anodes détachées et posées au sol (printemps 2020)

- La chlorobionte invasive *Caulerpa cylindracea*, qui était très présente en 2009 n'est plus observée de manière aussi importante.

4 Conclusion générale

Douze ans après l'immersion des 27 300 m³ de récifs artificiels dans la baie du Prado, la présente étude permet d'évaluer l'évolution de la colonisation au sein de la concession avec précision.

Le peuplement de poissons (Mission 1) continue de progresser en biomasse, en particulier les espèces cibles de la pêche. Une chute importante de la biomasse et de la densité est attribuée dans la première partie du suivi à la quasi-disparition des espèces planctonophages de pleine eau, celles-ci sont revenues à partir de 2014. Depuis, la biomasse tend à augmenter mais lentement et de façon différente selon que les espèces sont sédentaires ou effectuent des déplacements ou des migrations saisonnières. Les tendances diffèrent aussi entre les types de récifs, les récifs à gros volume (Panier Acier, Fakir et Enrochement) abritent un peuplement plus stable et pérenne que les petits volumes (Amas de cubes et Chicane). Les récifs Filière, qui se sont effondrés depuis 2013 en raison du fouling, ont vu leur performance chuter progressivement. Le succès de l'opération RECIF PRADO dépend de la surveillance et du maintien de l'interdiction de la pêche sur la zone, au bénéfice des habitats alentours.

La colonisation par les organismes benthiques (Mission 2) se poursuit également. Depuis l'immersion, la richesse spécifique et le recouvrement augmentent sur tous les types de récifs. Quelques différences s'observent entre les récifs, les parois horizontales (tous types de récifs) étant plutôt colonisées par des macrophytes alors que les parois verticales (enrochements et chicanes) sont principalement occupées par des éponges, bryozoaires et hydraires.

Comme évoqué dès la fin du suivi obligatoire en 2014, la présence des récifs artificiels n'a aucune incidence sur l'herbier de posidonie (Mission 3) qui maintient une dynamique progressive en limite inférieure à l'échelle de la rade Sud. Ce qui est une bonne nouvelle.

A l'exception des récifs Filière qui s'effondrent depuis 2013, tous les récifs jouent pleinement leur rôle 12 ans après immersion (Mission 4). La plupart des éléments manquants correspondent à des pertes lors de l'immersion et à la disparition progressive des filières sur chaque récif. La présence encore en 2020/2021 de plusieurs fragments d'engins de pêche rappellent le besoin d'une surveillance effective pour garantir le succès de la concession.

5 Perspectives

5.1 Gestion

Les résultats du suivi de la colonisation des récifs artificiels de la baie du Prado sont encourageants. En 2020, pour la première fois, la biomasse moyenne atteint la fourchette visée lors de la conception des récifs, c'est-à-dire entre 0.15 et 1 kg de poissons par m³ de récif. Cependant, les performances espérées pourraient être meilleures et soulèvent la question d'une pression de pêche importante à l'échelle de la baie de Marseille ou illégale dans la concession qui conduirait à limiter la progression des biomasses d'espèces cibles, en particulier des espèces les plus mobiles (sars, loup, dorade). Les résultats mettent en évidence l'efficacité écologique des structures écoconçues immergées depuis maintenant 12 ans. Le succès de la concession dépend maintenant de la surveillance et du respect de la réglementation interdisant la pêche sous toutes ses formes dans la zone. Cette surveillance, pilotée par la Ville de Marseille mais appuyée par les services de l'Etat et le Parc national des Calanques, doit combiner partenariat avec les pêcheurs, sensibilisation et si besoin sanctions aux contrevenants.

5.2 Suivis

La série temporelle démarrée en 2009 accumule une quantité de données précieuse pour appuyer la gestion de la concession de récifs de la baie du Prado. Elle doit perdurer dans le temps. La fréquence saisonnière et annuelle de suivi maintenue de 2009 à 2014 dans le cadre du suivi obligatoire n'est plus nécessaire aujourd'hui. Le suivi tous les 3 à 5 ans par exemple (donc le prochain au plus tard en 2024) du peuplement de poissons aux quatre saisons (idéalement), de la colonisation benthique à une seule saison (printemps), de l'herbier de posidonie et de l'état des structures est préconisé. Un tel suivi permettrait de connaître la suite de l'évolution de ces structures originales et de continuer à collecter les métriques au long terme. Au-delà de l'évolution des aménagements, cette série au long terme d'observation des poissons de la baie de Marseille, fait des récifs du Prado un laboratoire d'observation de l'ichtyofaune côtière. Les changements majeurs des communautés en lien avec la qualité de la gestion, mais aussi les évolutions environnementales liées au changement climatique et aux pressions dues aux activités humaines peuvent également être perceptibles dans le champ de récifs artificiels du Prado.

Au-delà du maintien de ce suivi classique, d'autres axes de recherches et d'investigations d'intérêt pourraient être développés : (i) la question de la connectivité des récifs au sein de la concession et avec les habitats naturels environnants doit être étudiée. Une étude par télémétrie acoustique sur quelques espèces cibles ou bien par analyse comparative des réseaux trophiques des récifs et des substrats naturels pourrait apporter des réponses ; (ii) une analyse pluridisciplinaire de la perception de la concession par les usagers et des services écosystémiques rendus par les récifs permettrait d'évaluer la contribution de la concession en termes de services rendus (approvisionnement, culture, etc.) ; un suivi des captures faites par les pêcheurs professionnels peu nombreux dans la zone permettrait aussi de les impliquer dans la gestion de cette zone aménagée et protégée exemplaire.

6 Bibliographie

- Astruch P., Bonhomme D., Bonhomme P., Fourt M., Le Diréach L., Rouanet E., 2014. Opération Récifs Prado : suivi scientifique, biologique et technique dans la zone d'immersion (suivi obligatoire). Rapport final 2009-2014. Méthodologie. GIS Posidonie – Ville de Marseille, Fr. 1-164.
- Astruch P., Rouanet E., Le Diréach L., Goujard A., 2016. Suivi du peuplement de poissons des récifs artificiels de la baie du Prado (2008-2015). Partenariat Ville de Marseille – GIS Posidonie, Marseille publ., 1-83 + annexes.
- Belloni B., Astruch P., Rouanet E., Schohn T., Le Diréach L., 2022a. Réalisation d'un suivi scientifique biologique et halieutique dans le cadre de la gestion des récifs artificiels du Prado. Rapport final 2019 - 2021. Méthodologie. *GIS Posidonie – Ville de Marseille*, Fr. 1-76.
- Belloni B., Schohn T., Rouanet E., Astruch P., Le Diréach L., 2022b. Opération Récifs Prado : Réalisation d'un suivi scientifique biologique et halieutique dans le cadre de la gestion des récifs artificiels du Prado – Atlas photographique - 2009-2021. *GIS Posidonie – Ville de Marseille*, Fr. 1-91.
- Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., 1999. Valorisation de la rade Sud de Marseille – Aménagements en récifs artificiels de la baie du Prado. Contrat ville de Marseille, Direction de l'Environnement et des Déchets & GIS Posidonie. GIS Posidonie Publ., Marseille, Fr. : 1-132.
- Carnus F., Charbonnel E., 2005a. Opération Récifs Prado 2006. Etude de projet. Contrat maîtrise d'œuvre Récifs Prado Ville de Marseille. BRL ingénierie & GIS Posidonie, Fr. : 1-15 + 1-13 + 1-10 + 1-4 + 1-23 + 7 cartes + 9 fiches descriptives + annexes.
- Carnus F., Charbonnel E., Pahin G., Demonbrison D., Chateauminois E., Fillon S., Berthe A., Le Diréach L., Bonhomme P., 2005b. Opération Récifs Prado 2006. Etude d'impact sur l'environnement. Contrat maîtrise d'œuvre Récifs Prado Ville de Marseille. BRL ingénierie & GIS Posidonie, Fr. : 1-94.
- Charbonnel E., Harmelin J.-G., Carnus F., Ruitton S., Le Diréach L., Lenfant P., Beurois J., 2011. Artificial reefs in Marseille (Mediterranean, France): from complex natural habitats to concepts of efficient artificial reef design. *Brazilian Journal of Oceanography*, 59 (special issue 9th CARAH): 177-178.
- Charbonnel E., Ody D., Le Diréach L., Ruitton S., 2001. Effet de la complexification de l'architecture des récifs artificiels du Parc national de Port-Cros sur les peuplements ichtyologiques. *Sci. Rep. Port-Cros natl. Park*, Fr., 18 :163-217.
- Collart D., Charbonnel E., 1998. Impact des récifs artificiels de Marseillan et d'Agde sur le milieu marin et la pêche professionnelle. Bilan du suivi 1996/1997. *Contrat Conseil Régional Languedoc-Roussillon*, Fr., 18 :163-217.
- EOL, 2004. Réseau de Surveillance Posidonie, Département des Bouches du Rhône, Année 2004. *Contrat EOL-Région Provence Alpes Côte d'Azur*, 155 p.

- Harmelin J.G., Bellan-Santini D., 1987. Modèles naturels pour les récifs artificiels en Méditerranée. *Actes Colloque Scientifique Interdisciplinaire Franco-Japonais (Océanographie)*, 6 : 85-92.
- Harmelin-Vivien M. et HARMELIN J.-G., 1975. Présentation d'une méthode d'évaluation "in situ" de la faune ichtyologique. *Trav. Sci. Parc nation. Port-Cros.*, 1 : 47-52.
- Harmelin-Vivien M., Harmelin J.-G., Chauvet C., Duval C., Galzin R., Lejeune P., Barnabe G., Blanc F., Chevalier R., Duclerc J., Lasserre G., 1985. Evaluation visuelle des peuplements et populations de poissons : problèmes et méthodes. *Rev. Ecol. (Terre Vie)*, Fr. 40 : 467-539.
- Punzo E., Spagnolo A., Fabi G., 2015. Testing of different materials for artificial reefs (Western Adriatic Sea). *Proceedings of the RECIF conference on artificial reefs: from materials to ecosystem*. Caen, France, 27-29 January 2015. Boutouil M., Le Boulanger S. eds. ESITC publ., Caen : 44-52.
- Schohn T., Astruch P., Belloni B., Rouanet E., Lefèvre A., Hermann E., Le Diréach L., 2022. Réalisation d'un suivi scientifique dans le cadre de la gestion des récifs artificiels du Prado. Rapport final 2019 - 2021. Résultats. GIS Posidonie – Ville de Marseille, Fr. 1-414 annexes.