



**HAL**  
open science

# UTOPIAN - Identification des zones d'enjeux prioritaires de conservation au sein des platiers récifaux de l'île de La Réunion - Bilan d'activité 2021-2022

Broudic Léo, Mathieu Pinault

## ► To cite this version:

Broudic Léo, Mathieu Pinault. UTOPIAN - Identification des zones d'enjeux prioritaires de conservation au sein des platiers récifaux de l'île de La Réunion - Bilan d'activité 2021-2022 : Étude de cas sur le complexe récifal de Saint-Pierre. 1, BESTRUN. 2022. hal-04636034

**HAL Id: hal-04636034**

**<https://hal.science/hal-04636034>**

Submitted on 5 Jul 2024

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

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

# BILAN D'ACTIVITÉ 2021-2022

## UTOPIAN IDENTIFICATION DES ZONES D'ENJEUX PRIORITAIRES DE CONSERVATION AU SEIN DES PLATIERS RÉCIFAUX DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

20 septembre 2022

Dans le cadre du programme 

Pour le compte de l'



## **AVEC LE SOUTIEN FINANCIER DE :**

Programme LIFE4BEST de l'Union européenne, de l'OFB et de l'AFD

## **RÉDACTION :**

Léo BROUDIC (BEST RUN – ENTROPIE)

Mathieu PINAULT (MAREX – ENTROPIE)

## **PARTENAIRES SCIENTIFIQUES :**

Lionel BIGOT (ENTROPIE)

Lucie PENIN (ENTROPIE)

Tévamie RUNGASSAMY (RNMR)

Julien WICKEL (MAREX)

Jean Benoit NICET (MAREX)

Pierre VALADE (OCEA CONSULT)

Margot THIBAUT (BEST RUN – ENTROPIE)

Florence TRENTIN (VIE OCÉANE)

## **VERSION EN DATE DU :**

20 septembre 2022

## **À CITER SOUS LA FORME :**

BROUDIC, L., PINAULT, M. (2022). UTOPIAN – Identification des zones d'enjeu prioritaires de conservation au sein des platiers récifaux de La Réunion.

29 p + annexes.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION – RÉSUMÉ DES OBJECTIFS DU PROJET</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE I – ÉVALUATION DES ZONES D'ENJEUX DE CONSERVATION</b>	<b>2</b>
<b>1.1 – PERSONNES PRÉSENTES SUR LE TERRAIN</b>	<b>2</b>
<b>1.2 – CALENDRIER DES SORTIES SUR LE RÉCIF DE SAINT-PIERRE</b>	<b>2</b>
<b>1.3 – MÉTHODES ET PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE</b>	<b>3</b>
<b>1.4 – RÉSULTATS, DISCUSSIONS</b>	<b>4</b>
1.4.1 – Analyse des données	4
1.4.2 – Spatialisation des métriques mesurées in situ	4
1.4.3 – Définition d'indicateurs écologiques synthétiques	6
1.4.4 – Caractérisation des habitats	8
1.4.5 – Données environnementales complémentaires	10
1.4.6 – Fluctuations saisonnières des résultats	13
1.4.7 – Formation des plongeurs et évaluation du biais observateur	14
1.4.8 – Comparaison des métriques avec celles des réseaux de surveillance	14
1.4.9 – Comparaison des indicateurs CORRAM, DCE et HYScores	16
<b>1.5 – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	<b>19</b>
1.5.1 – Atouts et pistes d'amélioration de la méthode CORRAM	19
1.5.2 – Champs potentiels d'utilisation des indicateurs de vitalité et de structure	20
1.5.3 – Perspectives 2022 – 2023	22
<b>PARTIE 2 – LA SENSIBILISATION AU CŒUR D'UTOPIAN</b>	<b>23</b>
<b>2.1 – « ET MOI, UNE FOIS J'AI VU UN REQUIN » - PROJET AVEC L'ILLUSTRATRICE SCIENTIFIQUE JEANNE STERKERS</b>	<b>23</b>
2.1.1 – Règle du jeu	23
2.1.2 – Avant la fin, un début s'impose	24
2.1.3 – Un avenir pour « <i>Qui veut la peau du corail ?</i> »	25
<b>2.2 – « MAIS, S'IL N'Y A PLUS D'ARBRE, ON NE PEUT PAS RESPIRER » - PROJET TUTEUR AVEC LES BTS GPN</b>	<b>25</b>

2.2.1 – Parlons du bassin versant, créons une maquette	25
2.2.2 – Deux planches de bois et un avenir	25
<b>2.3 – FORMATION À LA MÉTHODE CORRAM</b>	<b>26</b>
<b>2.4 – « OUI, UNE QUESTION AU FOND DE LA SALLE ? » - CONFÉRENCES</b>	<b>27</b>
<b>2.5 – UTOPIAN EN VIDÉO</b>	<b>28</b>
2.5.1 – L’art de PLP Production	28
2.5.2 – « Oh, oh, tu passes à la télé	28
<b>CONCLUSION D’UTOPIAN 2021 – 2022</b>	<b>28</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>30</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>32</b>

## INTRODUCTION - RÉSUMÉ DES OBJECTIFS DU PROJET

Les réseaux de surveillance pérennes de La Réunion, comme le Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), le suivi du benthos de substrats durs de la directive-cadre sur l'eau (DCE), le suivi de l'effet réserve, l'étude spatio-temporelle de la population d'*Epinephelus merra* (POPMER) et le réseau participatif Reef Check (Fig. 1), mettent en exergue le déclin généralisé des communautés récifales de l'île, soulignant un remplacement progressif des peuplements coralliens par les macroalgues opportunistes (IFRECOR, 2021).



Figure 1. Logos des réseaux de surveillance pérennes de La Réunion ; de gauche à droite : Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), Réseau de Contrôle de Surveillance de la DCE, réseaux de la Réserve Naturelle Marine de La Réunion (effet réserve et POPMER), Reef Check Réunion.

Ces réseaux de surveillance, dont certains sont répliqués annuellement et se poursuivent depuis 1998, permettent le suivi d'indicateurs quantitatifs sur des stations de référence, dites "sentinelles", échantillonnées principalement selon les méthodes du Line Intercept Transect (LIT), du Point Intercept Transect (PIT), du Belt Transect (BELT) et des quadrats, largement éprouvées et consolidées depuis les années 1960 (Talbot, 1965 ; Risk, 1972 ; Loya, 1978 ; English *et al.*, 1997 ; Hill et Wilkinson, 2008).

Si les résultats acquis lors de ces suivis semblent converger vers une dynamique générale de dégradation des récifs de l'île, cette tendance dissimule une grande hétérogénéité spatiale, dont les patterns de distribution pourraient dépendre de nombreux facteurs, tant intrinsèques aux écosystèmes (géomorphologie, profondeur, confinement, peuplements dominants) qu'issus d'expositions différentes aux pressions naturelles et anthropiques (températures, pluies, houles, courants, eaux usées, érosion et lessivage, etc.).

En complément de ces réseaux de surveillance, des programmes spécifiques de suivi de l'impact de phénomènes climatiques (blanchissement) et météorologiques extrêmes (coulées de boue, houles cycloniques), associés à un travail de cartographie des habitats, initié dès 2005 sur la base de méthodes standardisées de terrain (CAREX environnement et ARVAM, 2005 ; Nicet *et al.*, 2016) et d'images hyperspectrales satellitaires (Ropert *et al.*, 2016 ; Bajjouk, 2019), ont permis de mieux appréhender la mosaïque de paysages récifaux présents à La Réunion.

Pourtant, pour que les outils d'imagerie satellitaire puissent être véritablement opérationnels, il faudrait pouvoir réduire les coûts d'acquisition et de traitement tout en améliorant la fiabilité des résultats (Bissery, 2016). En outre, les programmes mis en œuvre à La Réunion (Sprectrhabet 2009-2010 et Hyscores 2015-2016) n'ont permis la discrimination que d'une gamme restreinte de catégories benthiques (corail, algue, herbier, roche, sable) et n'ont fourni aucun indicateur fonctionnel, identifié par le groupe de travail « récifs coralliens » DCE-IFRECOR 2016-2019 comme « à regarder en priorité par rapport à l'approche basée sur la composition et l'abondance de groupes d'espèces » (Monnier *et al.*, 2021). Ces outils sont également rendus « aveugles » par les panaches de bulles formés par le déferlement de la houle sur les platiers externes, ne permettant pas l'étude de ces habitats, d'intérêt remarquable à La Réunion (Bajjouk, 2019).



Sur la base des derniers bilans publiés sur l'état des réseaux de surveillance à La Réunion (IFRECOR, 2021 ; Monnier *et al.*, 2021) et dans le cadre de l'appel à projets LIFE4BEST, le projet UTOPIAN est né de la volonté de mêler approche multi-paramétrique et méthodes d'évaluations rapides *in situ*, dans le but de caractériser l'intégralité de la surface des platiers de La Réunion selon des indicateurs tant structurels (recouvrement par différents groupes d'organismes, morphotypes et taille des colonies coralliennes) que fonctionnels (état de santé des peuplements benthiques, interactions interspécifiques, recrutement larvaire), en intégrant aux analyses les peuplements de poissons et de macro-invertébrés (abondance des prédateurs apicaux, des herbivores et des espèces d'intérêt halieutique).

Le projet UTOPIAN devait initialement répondre aux trois objectifs suivants :

1. Produire des cartes traduisant l'état de conservation de l'ensemble épi-récifal des récifs de La Réunion selon la méthode CORRAM (CORal Reef Rapid Assessment Method) ;
2. Fournir des résultats nécessaires à l'atteinte des objectifs fixés par le plan de gestion 2021-2030 de la Réserve Naturelle Marine de La Réunion (RNMR) ;
3. Sensibiliser en formant un public initié aux écosystèmes coralliens et en communiquant au grand public.

En raison de contraintes d'accès à certaines zones des complexes récifaux de Saint-Gilles La Saline, d'Étang-Salé et de Saint-Leu au cours de l'année 2021-2022, le projet UTOPIAN s'est concentré sur les récifs de Saint-Pierre, des Colimaçons et de Cap Champagne. Dans ce présent document, qui synthétise les principaux résultats du projet, seul le récif de Saint-Pierre est présenté. L'ensemble des résultats sera accessible dans le rapport final, prévu pour fin septembre. Les cartes sont d'ores et déjà téléchargeables sur le site SEXTANT (<https://sextant.ifremer.fr/ocean-indien/Acces-aux-donnees/Acces-au-catalogue#/metadata/3655c6bd-9415-4216-9043-e1e498a2e8bc>).

## PARTIE I - ÉVALUATION DES ZONES D'ENJEUX DE CONSERVATION

### 1.1 - PERSONNES PRÉSENTES SUR LE TERRAIN

Léo Broudic (25 sorties)

Mathieu Pinault (8 sorties)

Tévamie Rungassamy (3 sorties)

Jérôme Suros (1 sortie)

### 1.2 - CALENDRIER DES SORTIES SUR LE RÉCIF DE SAINT-PIERRE

Date de sortie	Nombre de stations évaluées	Date de sortie	Nombre de stations évaluées
07/09/2021	4 stations évaluées	25/10/2021	11 stations évaluées
09/09/2021	5 stations évaluées	26/10/2021	10 stations évaluées
10/09/2021	10 stations évaluées	01/11/2021	9 stations évaluées
17/09/2021	6 stations évaluées	02/11/2021	12 stations évaluées
23/09/2021	9 stations évaluées	04/11/2021	5 stations évaluées
05/10/2021	15 stations évaluées	05/11/2021	9 stations évaluées
06/10/2021	12 stations évaluées	06/11/2021	1 station évaluée
11/10/2021	6 stations évaluées	19/11/2021	6 stations évaluées
15/10/2021	5 stations évaluées	21/11/2021	1 station évaluée
17/10/2021	6 stations évaluées	25/11/2021	2 stations évaluées
18/10/2021	10 stations évaluées	06/12/2021	9 stations évaluées

19/10/2021	8 stations évaluées	17/12/2021	8 stations évaluées
24/10/2021	10 stations évaluées		
<b>TOTAL</b>		<b>25 sorties</b>	<b>164 stations</b>

### 1.3 - MÉTHODES ET PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE

CORRAM (Pinault *et al.*, 2021) est une méthode d'évaluation rapide mise en œuvre sur des stations réparties de manière systématique sur l'ensemble des platiers des récifs frangeants étudiés. Elle évalue *in situ* 12 métriques semi-quantitatives (détaillées en annexe 1) traduisant le fonctionnement de l'écosystème récifal. Le recours à des méthodes d'évaluation rapide (Rapid Assessment Methods) lui confère une forte répliquabilité dans un temps réduit (164 parcours aléatoires et 786 points fixes en 25 jours de terrain), tout en conservant une information écologique de qualité.

La phase de terrain a eu lieu entre septembre et décembre 2021, en intersaison, afin d'éviter tout stress environnemental extrême (pic de chaleur, forte houle, forte pluie) susceptible de biaiser les résultats acquis (Pinault *et al.*, 2021).

Une station CORRAM représente un carré de 50 x 50 m (2 500 m<sup>2</sup>) au sein duquel 5 points fixes et 1 parcours aléatoire sont réalisés (Fig. 2). Un point fixe représente un cercle de 5,6 m de rayon (100 m<sup>2</sup>), dans lequel les métriques d'évaluation des organismes benthiques sont estimées (Fig. 3a). Un parcours aléatoire de 20 min permet d'estimer les métriques relatives à la faune mobile (Fig. 3b).





Figure 2. Plan d'échantillonnage réalisé sur l'ensemble épi-récifal du complexe de Saint-Pierre. Chaque station est délimitée par un carré de 50 x 50 m. a : points fixes (x786), b : parcours aléatoires (x164) et centroïdes des parcours (en orange).

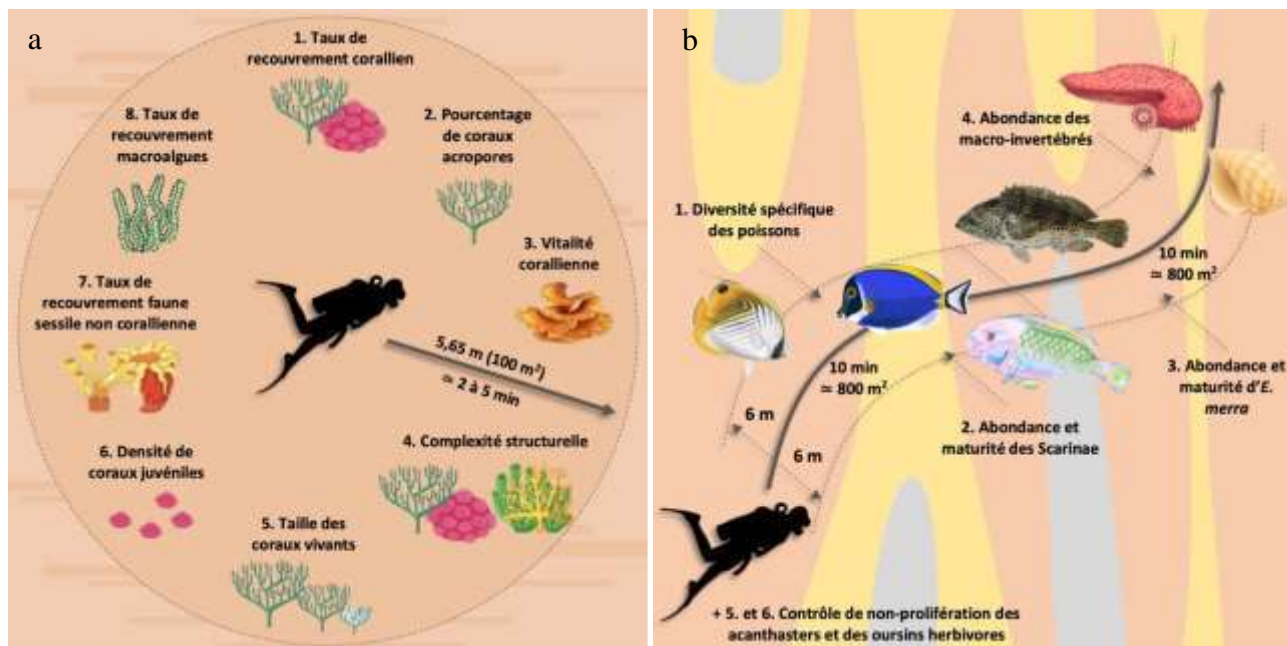


Figure 3. Méthode d'évaluation CORRAM. a : point fixe, à répliquer 5 fois par station (pour un total de 500 m<sup>2</sup>), b : parcours aléatoire, à répliquer 1 fois par station (environ 1 600 m<sup>2</sup>).

## 1.4 - RÉSULTATS, DISCUSSIONS

### 1.4.1 - Analyse des données

Suite à la bancarisation des informations collectées *in situ*, un travail d'interpolation des données a été réalisé par krigeage ordinaire (Annexe 2), afin d'obtenir des modèles statistiques de distribution de chaque métrique, en tout point de l'ensemble épi-récifal du complexe de Saint-Pierre. Ces modèles ont ensuite été représentés cartographiquement, sous forme de gradients de couleurs d'intensité variable en fonction de la valeur théorique de la métrique considérée en chaque point (Annexes 3 à 6).

Les 12 métriques mesurées ont également été rassemblées en indicateurs synthétiques, créés par classification ascendante hiérarchique selon les grandes fonctions écologiques auxquelles elles se réfèrent. Trois indicateurs ont ainsi été calculés :

1. Vitalité des peuplements benthiques : moyenne des métriques « Recouvrement par la faune sessile benthique non corallienne », « Recouvrement par les macroalgues », « État de santé des colonies coralliennes vivantes » et « Abondance des coraux juvéniles ».
2. Structure du peuplement corallien : moyenne des métriques « Recouvrement en coraux vivants », « Pourcentage du genre *Acropora* au sein du peuplement corallien », « Complexité structurelle du peuplement corallien » et « Diamètre des colonies coralliennes vivantes ».
3. Diversité et maturité du peuplement ichthyologique : moyenne des métriques « Diversité du peuplement ichthyologique », « Abondance et maturité des Scarinae » et « Abondance et maturité d'*Epinephelus merra* ».

Afin de prendre en compte la mosaïque d'habitats composant l'ensemble épi-récifal du complexe de Saint-Pierre (Nicet *et al.*, 2016), des fiches ont été créées, reprenant l'ensemble des informations écologiques étudiées, abordées selon les principaux édifices récifaux d'ordre géomorphologique, incluant la profondeur, la sédimentologie et l'hydrodynamisme (Annexe 7).

### 1.4.2 - Spatialisation des métriques mesurées *in situ*

L'interpolation des données par krigeage ordinaire permet une lecture des résultats par ratios surfaciques, c'est-à-dire en attribuant une fourchette de valeurs d'une métrique ou d'un indicateur donné à une proportion de la surface totale de l'espace récifal étudié. Ce rapprochement entre valeurs quantitatives et surfaces permet une spatialisation de l'enjeu de conservation et une meilleure appréhension des notions de rareté et de représentativité des résultats fournis. Il apporte également une représentation cartographique intuitive des zones d'intérêt remarquable et des zones dégradées, potentiellement impactées par les pressions naturelles et/ou anthropiques (Fig. 4a).

Ainsi, seuls 5% de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre possèdent une couverture corallienne supérieure à 50% (jusqu'à 80%). En outre, près de la moitié (47%) possède une couverture inférieure à 20% et un cinquième une couverture inférieure à 10%, pour une moyenne de 24% (Fig. 4b).

Ces valeurs peuvent être converties en surfaces de récif, avec par exemple 1,65 ha d'ensemble épi-récifal couvert à plus de 50% par les peuplements coralliens et 8 ha couverts par la totalité des colonies coralliennes cumulées. Cette évaluation par ratios surfaciques a été réalisée pour chaque métrique d'évaluation des peuplements benthiques mesurée au cours de cette étude (coraux totaux, coraux *Acropora*, macroalgues, autres : éponges, ascidies, zoanthaires, corallimorphes, coraux mous, etc.).



Figure 4. Carte des recouvrements coralliens estimés sur l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre, obtenue par krigeage ordinaire (a) et histogramme des ratios surfaciques correspondants (b).

Cette spatialisation fournit également un outil de surveillance de certaines populations en raréfaction, dont les effectifs sont devenus trop faibles pour être suivis par les méthodes du BELT ou du point fixe (Hill et Wilkinson, 2008). En suivant un cheminement aléatoire de 2 x 10 min à vitesse contrôlée (roving diver technique + tracking GPS) une surface d'environ 1 600 m<sup>2</sup> peut être échantillonnée et fournir rapidement une estimation semi-quantitative de populations ciblées.

En prenant l'exemple d'*Epinephelus merra*, les individus adultes (>17 cm - Froese et Pauly, 2022) ne sont plus représentés que par une faible population sur le récif de Saint-Pierre (Pinault, 2021). Pourtant, 68 individus adultes ont été recensés sur 34 stations, soit 13% de l'ensemble épi-récifal échantillonné, principalement localisé sur le bourrelet corallien. En outre, 228 juvéniles ont été observés, répartis sur

69% du récif. Enfin, une absence de l'espèce a été notée sur 31% du récif. Ces estimations illustrent la raréfaction et la grande hétérogénéité de répartition de l'espèce au sein de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre (Fig. 5).



Figure 5. Carte des abondances et maturités d'*E. merra* obtenue par krigeage ordinaire des résultats mesurés par parcours aléatoires de 10 min ( $\approx 800 \text{ m}^2$ ) sur l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre.

#### 1.4.3 - Définition d'indicateurs écologiques synthétiques

Comme pour les métriques écologiques, mesurées *in situ*, le krigeage ordinaire des indicateurs synthétiques (développés dans le cadre du présent projet) a permis une spatialisation des enjeux. Ceux-ci concernaient :

- La vitalité des peuplements benthiques (Fig. 6a),
- La structure du peuplement corallien (Fig. 6b),
- La diversité et la maturité du peuplement ichthyologique (Fig. 6c).

Si ces indicateurs n'ont à ce jour pas fait l'objet d'une validation institutionnelle (rapport, guide, publication), ils constituent en revanche une approche fonctionnelle de l'écologie, par association de données biologiques convergentes, associées par classification ascendante hiérarchique.

L'indicateur de vitalité regroupe ainsi toutes les caractéristiques benthiques indicatrices d'une dégradation de l'état écologique de l'écosystème (prolifération algale et de la faune benthique non corallienne, augmentation de la prévalence des maladies, réduction du recrutement de coraux juvéniles). Les valeurs les plus basses de l'indicateur (0 à 4) sont indicatrices d'une vitalité écologique faible et d'un écosystème récifal perturbé, les notes les plus hautes (8 à 10) indiquent une vitalité élevée, sans signe de dégradation importante. Il peut ainsi être estimé que 37% de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre présentent une forte vitalité et que 23% sont dégradés.

L'indicateur de structure du peuplement corallien s'attache à décrire de manière synthétique l'organisation architecturale et morphométrique du peuplement ainsi que sa diversité biologique. Il intègre ainsi l'ensemble des métriques impliquées dans l'évaluation des successions écologiques (Odum, 1969), comme le pourcentage de recouvrement corallien, la part du genre *Acropora*, la taille et la diversité de formes des colonies. Comme précédemment, les notes les plus basses (0 à 4) sont attribuées aux peuplements les moins structurés, souvent composés d'un nombre réduit d'espèces pionnières, tandis que les notes les plus hautes (8 à 10) traduisent un écosystème approchant le climax, caractérisé par une forte diversité et des espèces spécialisées, aux architectures plus complexes. Ainsi, 50% de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre possèdent un peuplement fortement structuré, tandis que 28% sont colonisés par un peuplement pionnier, de petite taille et aux architectures plus simples.

L'indicateur de diversité et de maturité du peuplement ichthyologique s'appuie sur de récents travaux menés sur le rôle des prédateurs apicaux (top-down) et des Scarinae herbivores (bottom-up) dans la régulation de l'écosystème (Green et Belwood, 2009). Ces espèces étant ciblées par une pêche traditionnelle régulière à Saint-Pierre, cet indicateur fournit également une vision sur le potentiel halieutique du récif. Cet indicateur révèle un net déficit du peuplement ichthyologique (notes de 0 à 4 sur 82% de l'ensemble épi-récifal), tant en termes d'abondance que de diversité, avec raréfaction des espèces les plus caractéristiques des récifs (corallivores, planctonophages, carnivores benthiques) et d'intérêt halieutique (*E. merra*, Scarinae) au profit d'espèces opportunistes omnivores (*Stegastes spp.*).





Figure 6. Cartes de la vitalité (a), de la structure du peuplement benthique (b) et de la diversité et maturité du peuplement ichthyologique (c) de l'espace épi-récifal de Saint-Pierre.

#### 1.4.4 - Caractérisation des habitats

Il est reconnu que la profondeur, la géomorphologie et l'hydrodynamisme conditionnent fortement la vitalité et la structure des peuplements récifaux. Le terme même d'habitat intègre ces notions physiques et géologiques à celle de peuplements benthiques dominants (Nicet *et al.*, 2016). Il semble donc cohérent d'étudier la distribution des indicateurs écologiques synthétiques au sein des différents habitats qui composent l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre.

Il apparaît ainsi que les habitats dont les peuplements benthiques possèdent les plus fortes vitalités sont soit exposés à la houle (platier externe), soit situés en limite de récif (fin de platier et chenal de houle). Les habitats aux peuplements benthiques les plus dégradés (bourrelet corallien, affleurements et blocs basaltiques) se situent proches de la côte, dans des eaux confinées, exposées aux influences du bassin versant. Les habitats les plus vastes (platier à alignements et platier compact) présentent un gradient côte large de vitalité croissante, appuyant l'hypothèse d'une influence défavorable de la côte (Fig. 7).



Carte BESTRUN / UMR Entropie 2022  
Donnée Léo Broudic 2021  
Qgis 3.20  
SCR : EPGS 4326

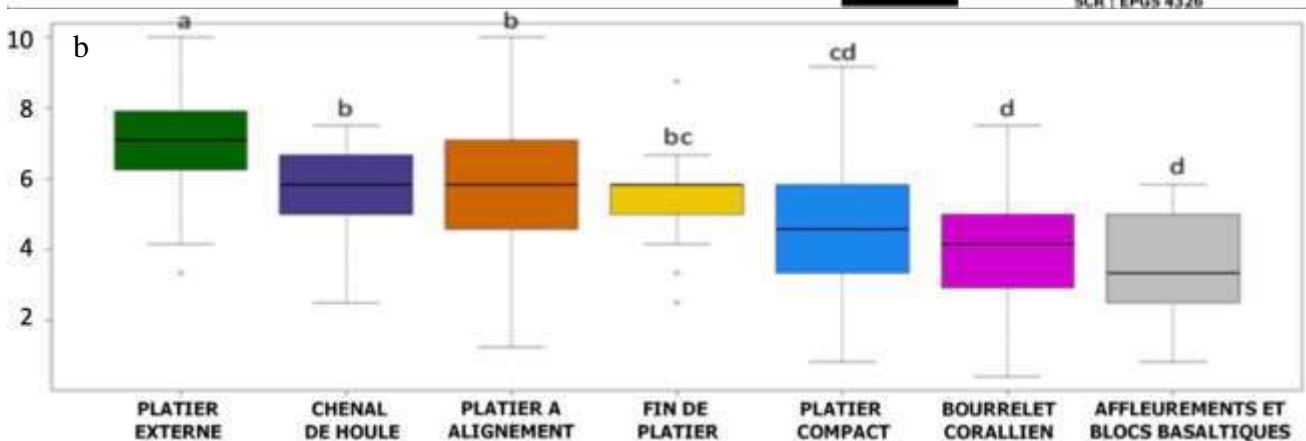


Figure 7. Carte (a) et box-plot avec test ANOVA (b) de la vitalité des peuplements benthiques récifaux de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre, représentée par habitat (selon Nicet et al., 2016).

L'étude de la structure montre une forte corrélation avec la vitalité des peuplements pour les habitats aux notes les plus élevées (platier externe et à alignements) et les plus faibles (affleurements et blocs basaltiques, platier compact) (Fig. 8), témoignant, dans le premier cas, d'habitats riches et diversifiés depuis de nombreuses années et, à ce jour, toujours relativement préservés des pressions naturelles et anthropiques et, dans le second cas, d'habitats dégradés de longue date (pressions anciennes), caractérisés par des peuplements peu structurés et régulièrement renouvelés (pionniers).

Cette corrélation entre structure et vitalité n'est en revanche pas respectée pour les habitats en limite de récif (chenal de houle et fin de platier), située proche d'embouchures de ravines, caractérisés par de faibles structures et de fortes vitalités. Ce constat pourrait témoigner de conditions de milieu favorable (influence océanique), périodiquement perturbé par la survenue de pressions aigües (dessalure, turbidité, coulée de boue), notamment lors d'épisodes météorologiques extrêmes.

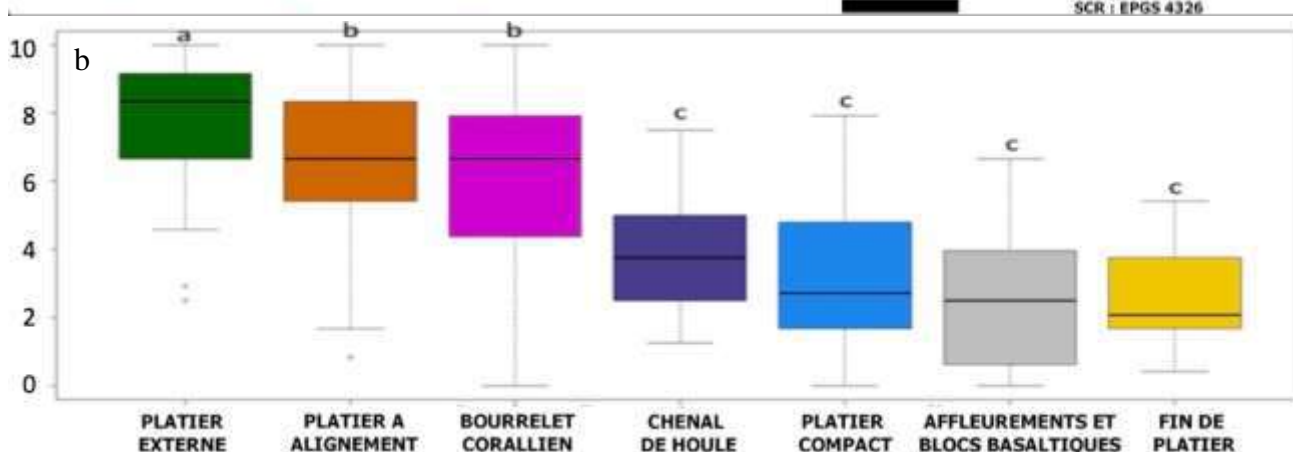
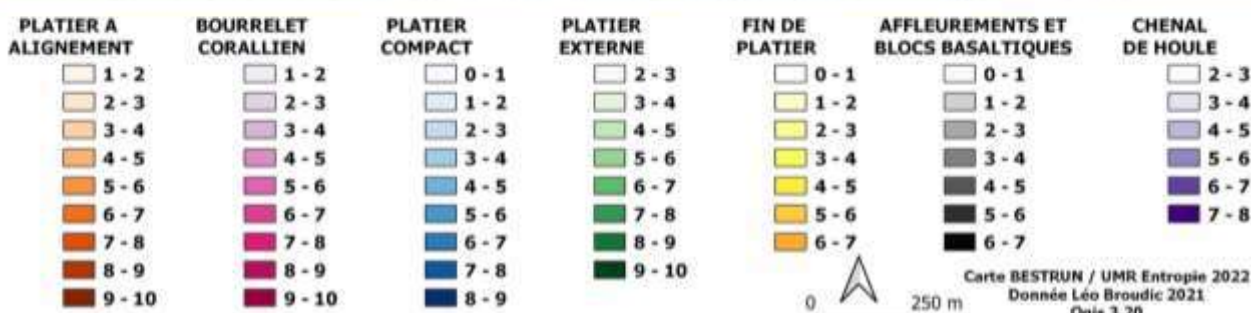


Figure 8. Carte (a) et box-plot (b) de la structure des peuplements benthiques récifaux de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre, représentée par habitat (selon Nicet et al., 2016).

Enfin, le bourrelet corallien se caractérise par de fortes structures, mais de faibles vitalités des peuplements. Cette spécificité pourrait révéler une vie corallienne ancienne très active, capable de construire des édifices diversifiés et de grandes tailles, mais exposée depuis les dernières décennies à des pressions chroniques, à l'origine d'une réduction de vitalité, marquée par l'apparition d'espèces opportunistes et par la dégradation progressive des assemblages caractéristiques de cet écosystème.

#### 1.4.5 - Données environnementales complémentaires

En complément des métriques écologiques et de la caractérisation des habitats, 8 variables abiotiques ont été estimées sur chaque station, dont 5 variables physicochimiques (température, pH, salinité, O<sub>2</sub>, turbidité) et 3 variables morphodynamiques et sédimentaires (taux de sédimentation, niveau de confinement et énergie de la houle). Ces variables, une fois bancarisées et géoréférencées ont également été modélisées par krigeage ordinaire puis cartographiées.

Les variables physicochimiques ont été mesurées à l'aide de sondes de terrain en ½ journée (9 à 14h) le 4 décembre 2021, sur 170 stations, par marée haute descendante, afin de permettre l'accès aux habitats les plus éloignés. Les dérives environnementales (liées à l'heure de la journée) et instrumentales (liées à la précision des sondes) ont été corrigées par le suivi continu d'une station de référence (selon Poma *et al.*, 2019). Les variables morphodynamiques et sédimentaires ont été estimées sur base bibliographique (niveau de confinement et énergie de la houle, selon Garnier *et al.*, 2003) et de métriques semi-quantitatives, estimées par point fixe lors de l'échantillonnage (0 : aucune particule ; 3 : sédimentation massive avec colmatage des interstices, d'après Pinault *et al.*, 2017).

La qualité des eaux et des sédiments, sous influence directe des usages du bassin versant, peut révéler la présence de pressions naturelles ou anthropiques, par l'accumulation ou la concentration chronique de composés néfastes à la vie corallienne en certaines zones du récif (hors épisode météorologique extrême). Toutefois, les effets de ces pressions sur les compartiments récepteurs (biotiques et abiotiques) peuvent être amplifiés et atténués selon que la masse d'eau soit confinée ou exposée à l'énergie de la houle (Oliver *et al.*, 2018). L'estimation contiguë d'indicateurs de pressions (qualité de l'eau et sédimentation) et de facteurs d'atténuation/amplification a ainsi fourni des éléments empiriques d'interprétation des résultats fournis par les indicateurs écologiques.

Il apparaît, en premier lieu, que lors de l'échantillonnage les eaux confinées de la dépression d'arrière récif et du platier interne se démarquaient par un gradient côte large, avec des températures plus élevées et des salinités plus faibles que les normales océaniques saisonnières près de la côte (7 à 10%). Ces caractéristiques physicochimiques et morphodynamiques pourraient accentuer la vulnérabilité des biocénoses situées proche de la côte, déjà soumises à l'influence du bassin versant (Adyasari *et al.*, 2019). Les valeurs d'oxygène dissous et de pH étaient également plus élevées, en lien avec l'activité photosynthétique des producteurs primaires aux heures d'échantillonnage (com. pers Cuet, 2021).

L'analyse des données physicochimiques et sédimentaires, selon la composante nord-ouest sud-est, montre 4 zones du linéaire côtier (Fig. 9 – secteurs rouges), caractérisées par de fortes turbidités (plus de 2,5 fois les normales saisonnières océaniques) et des taux de sédimentation équivalents à un recouvrement partiel des substrats par les particules terrigènes (Fig. 9b et c). Ces zones correspondent au littoral où l'urbanisation est la plus proche du rivage et s'identifient par un indicateur de vitalité corallienne particulièrement faible (0 à 4 - Fig. 6a), notamment sous l'effet cumulé d'une prolifération algale et d'une recrudescence des maladies coralliennes.

Ces zones littorales sont marquées par la présence de nombreuses buses de rejets d'eaux usées (zone 1), par l'embouchure de la ravine Salahin (zone 2) et par la proximité immédiate des digues du port (zones 3 et 4). La qualité et la quantité des eaux rejetées par les buses d'eaux usées et par la ravine Salahin (non pérenne) ne sont à ce jour pas connues. Des investigations hydrologiques et hydrodynamiques complémentaires sont à prévoir pour tenter d'élucider l'origine de ce faisceau d'indices de perturbation environnementale.



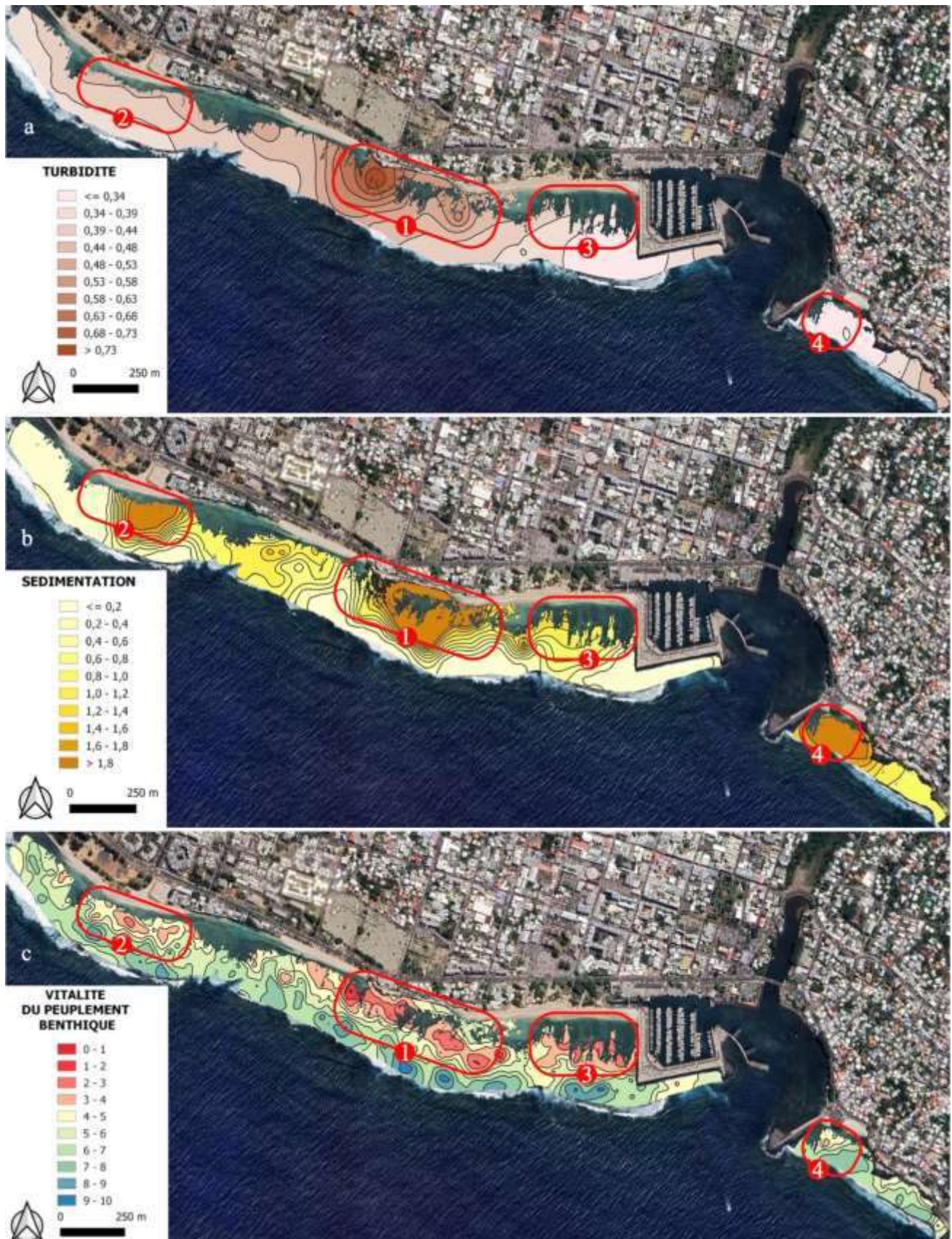


Figure 9. Carte de la turbidité des eaux (a : mesurée in situ, en NTU), du taux de sédimentation (b : mesuré in situ, selon Pinault et al., 2017) et de vitalité des peuplements benthiques de l'espace épipélagial de Saint-Pierre (c). En rouge : secteurs littoraux marqués par de fortes turbidités, de fortes sédimentations et de faibles vitalités coralliennes.

### 1.4.6 - Fluctuations saisonnières des résultats

Si la sensibilité et la fiabilité de la méthode CORRAM ont pu être abondamment testées au cours de l'étude menée sur l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre, présentée dans ce document, en revanche, sa capacité à suivre des tendances temporelles, souvent plus subtiles que les variations spatiales, n'a pas été évaluée. Il faudra en effet attendre de nouvelles campagnes de mesures *in situ* pour permettre une comparaison des ratios surfaciques obtenus à plusieurs années d'intervalle.

Toutefois, si les tendances générales observées par les réseaux de surveillance (dégradation progressive des récifs de l'île), ne peuvent à ce jour être évaluées par la méthode CORRAM, il a en revanche été possible de tester l'évolution des métriques et des indicateurs au cours de 11 mois consécutifs d'une année complète (variations intra-annuelles) sur 30 points fixes de mesure (15 aux Colimaçons et 15 à Cap Champagne) (Claud et Broudic, 2022).

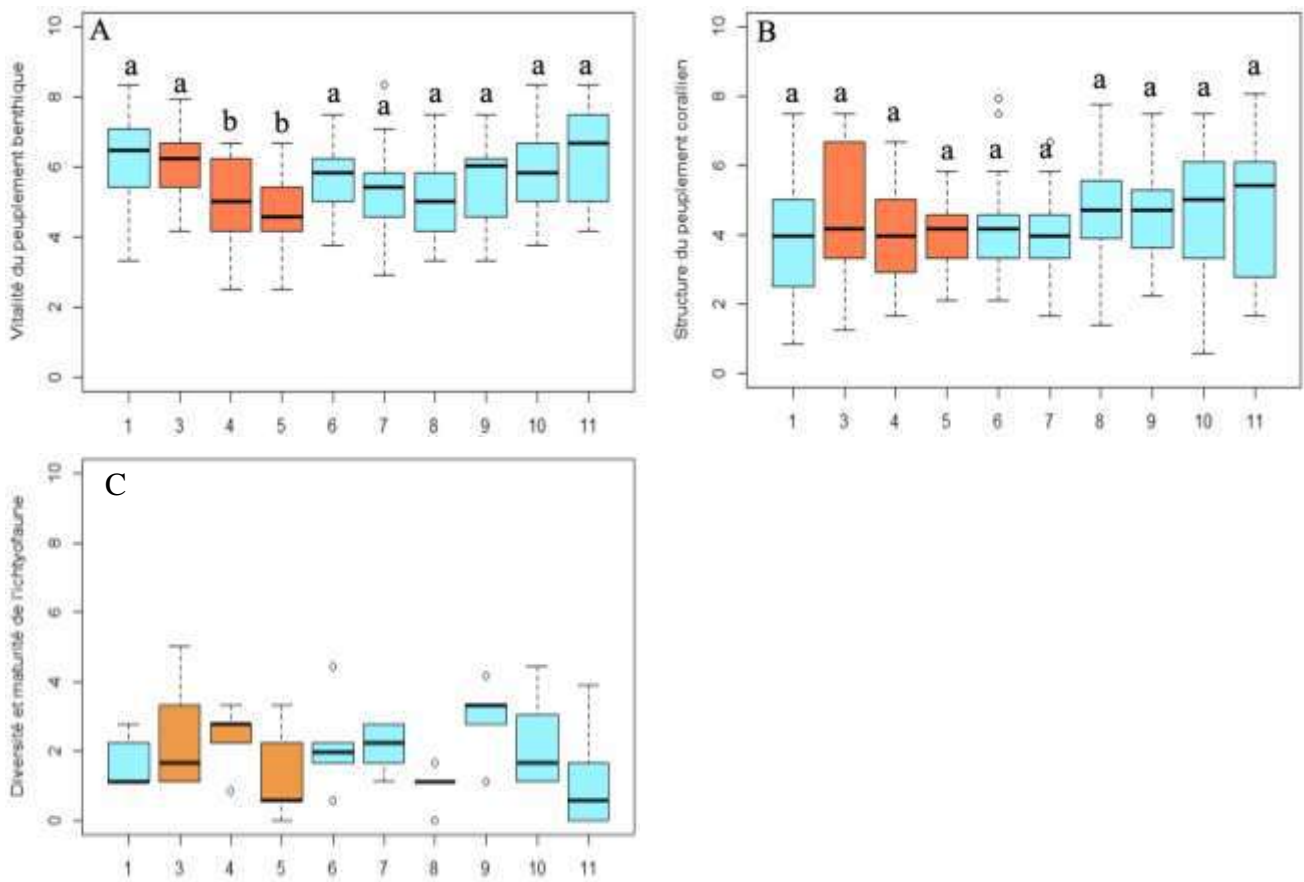


Figure 10 : Variations intra-annuelles des indicateurs vitalité (A) structure du peuplement corallien (B) et abondance et diversité ichthyologiques (C). Période d'octobre 2021 (1) à août 2022 (11), le mois de novembre 2021 n'a pas été échantillonné. Bleu : intersaison et hiver, Orange : été. Les lettres représentent les différences significatives entre les moyennes de chaque mois (test ANOVA).

Les résultats indiquent que seul l'indicateur vitalité corallienne varie significativement selon les mois, avec une baisse saisonnière marquée en janvier (4), suivie d'une reprise progressive à partir de mars (6), pour retrouver une valeur moyenne identique à celles mesurées lors de l'hiver précédent à partir de juin, juillet (9 et 10). Les métriques les plus impliquées dans cette variation sont la prolifération algale et la baisse de l'état de santé général des colonies coralliennes (blanchissement, fluorescence).

La structure du peuplement corallien reste stable au cours de l'année, probablement en raison de la grande stabilité des métriques qui composent cet indicateur (diversité et taille des colonies).

L'abondance et de diversité du peuplement ichthyologique montrent des valeurs très faibles, quel que soit le mois échantillonné, sans variation intra-annuelle significative des effectifs recensés (Fig. 10).

#### 1.4.7 - Formation des plongeurs et évaluation du biais observateur

Des formations à la méthode CORRAM ont été dispensées aux étudiant.es bénévoles du master BEST-ALI de l'Université de La Réunion et à toute autre personne ayant déjà une connaissance de l'écosystème récifal. En moyenne, le temps de formation était de 3 demi-journées. L'objectif était d'intégrer les différentes métriques CORRAM et d'intercalibrer les estimations du formateur et des bénévoles. Les séances se sont réalisées essentiellement à Trou d'Eau, où la bande de transition entre la dépression d'arrière récif et de l'ensemble épi-récifal est assez large pour accueillir un groupe de 2 à 5 bénévoles (Fig. 11).

Au total, 13 personnes ont été formées, dont 8 étudiant.es du master BEST-ALI et 3 agents de la Réserve Naturelle Marine de La Réunion (T. Rungassamy, J. Suros et L. Audineau). Les bénévoles ainsi formés ont pu aider sur le terrain pour l'échantillonnage des complexes récifaux de Cap Champagne et des Colimaçons (carte et ratio de la distribution surfacique des métriques et indicateurs CORRAM et DCE en annexes 8 à 23). Le biais observateur a été étudié et ne souligne aucune différence significative entre le formateur et les bénévoles à l'issue de la formation (Claud et Broudic, 2022).



Figure 11. Étudiants et professionnels de l'environnement marin lors de la formation à la méthode CORRAM (septembre 2021).

#### 1.4.8 - Comparaison des métriques CORRAM avec celles des réseaux de surveillance

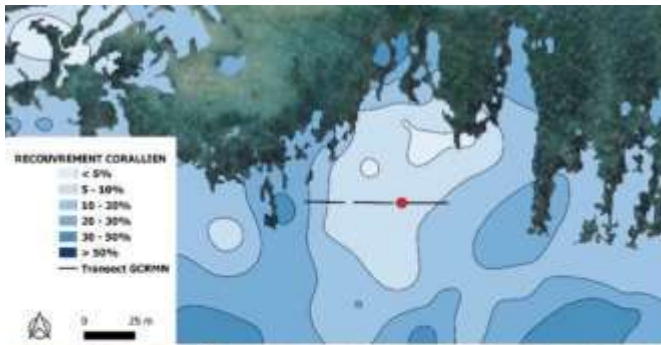
L'archivage des résultats sur les bases de données nationales (méthodes des points fixes ou du cheminement aléatoire compatibles avec la BD-Récif) a permis une sécurisation et une comparaison des données avec celles des réseaux de surveillance pérennes, acquises par stations sentinelles.

- Le Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN)

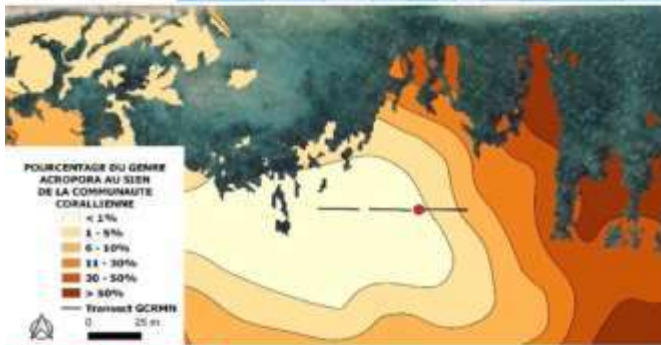
Les résultats mesurés sur les deux stations GCRMN (LIT de 3 x 20 m), situées sur le platier de Saint-Pierre, ont fourni en 2021 des taux de recouvrements coralliens et algaux assez proches de ceux mesurés sur les stations CORRAM (points fixes de 100 m<sup>2</sup>) les plus proches (respectivement : 25% et 66% de recouvrements coralliens et algaux sur la station GCRMN « Alizé Plage », pour 20% et 50% sur la station CORRAM n°101, située à 21 m | 42% et 51% sur la station GCRMN « Ravine Blanche », pour 30% et 45% sur la station CORRAM n°30 située à 13 m).

Toutefois, si un zoom est réalisé, par exemple, sur le site d'« Alizé Plage » (Fig. 12), il apparaît que le modèle d'interpolation des données acquises *in situ* par points fixes lors de cette étude est plus proche encore des valeurs mesurées sur la station GCRMN, témoignant de la puissance du krigeage ordinaire dans l'objectif d'une généralisation des résultats échantillonnés par stations (lissage de l'hétérogénéité

à fine échelle). Seules les valeurs du recouvrement algal restent légèrement plus faibles sur le modèle, la méthode CORRAM évaluant uniquement le recouvrement par les macroalgues (thalles > 2 cm), tandis que le GCRMN mesure les algues dressées, sans distinction de taille.



Métrique	GCRMN	CORRAM
Recouvrement corallien	25%	10 – 30%



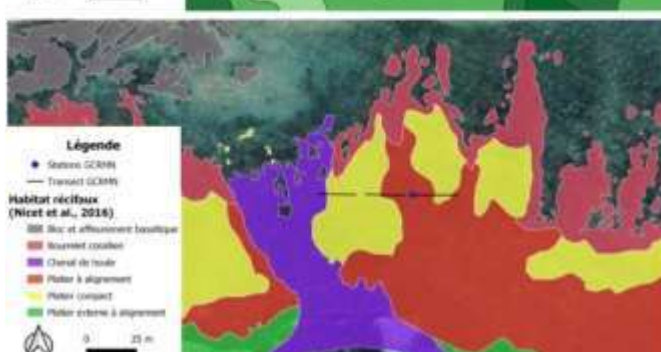
Métrique	GCRMN	CORRAM
Pourcentage d'Acropora	2,5%	1 – 5%



Métrique	GCRMN	CORRAM
Recouvrement FSB	6%	4 – 10%



Métrique	GCRMN	CORRAM
Recouvrement algal	66%	20 – 30%



Métrique	GCRMN	CORRAM
Habitats récifaux	3	6

Figure 12. Représentation du transect de la station GCRMN « Alizé plage » sur les cartes de quatre métriques de la méthode CORRAM et sur la carte des habitats récifaux de La Réunion (Nicet et al., 2016) et comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes.

- L'étude spatio-temporelle de la population d'*Epinephelus merra* (POPMER)

Le réseau POPMER met en œuvre sur chaque station (1) un suivi de la population d'*E. merra* au sein d'un BELT de 40 m<sup>2</sup> et (2) un suivi des peuplements benthiques, le long d'un LIT de 20 m. Le platier de Saint-Pierre est étudié via 10 stations, suivies annuellement depuis 2008 (Fig. 14).

Le suivi d'*E. merra* fournissait en 2020 sur le récif de Saint-Pierre des densités moyennes par 100 m<sup>2</sup> de 4,0 individus de toutes tailles et de 0,2 individu supérieurs à 17 cm, les individus de plus 17 cm étant considérés comme adultes (Froese et Pauly, 2022). Ces valeurs très faibles et marquées par une nette indentation de l'histogramme des densités, représentées par classe de taille, au-delà de 16 cm (Fig. 13) pourraient être la conséquence cumulée d'une dégradation des habitats et d'une surexploitation de croissance de la population d'*E. merra* (Pinault, 2021).



Figure 13. Densité (indiv./100 m<sup>2</sup>) d'*E. merra* estimées lors du programme POPMER sur les platiers de Saint-Pierre, représentée par classe de taille (cm) et de maturité (Pinault, 2021).

Les résultats acquis le long des LIT de 20 m, localisés, pour les besoins des objectifs du programme POPMER, sur l'interface avec la dépression d'arrière récif (bourrelet corallien), caractérisée par une bordure très étroite à *Acropora muricata* (Nicet et al., 2016), fournit des résultats assez distincts des valeurs fournies par les modèles d'interpolation de cette étude, tendant à lisser les hétérogénéités spatiales à fine échelle. Un suivi dédié de la bordure de récif, avec un point fixe répliqué tous les 50 à 60 m, permettrait de réduire l'effet du lissage et de mieux rendre compte de l'état de cette interface.



Figure 14. Représentation des stations GCRMN et POPMER et de leurs résultats en 2020-2021, sur fond de carte du recouvrement corallien.

#### 1.4.9 - Comparaison des indicateurs CORRAM, DCE et HYScores

Si le développement de trois nouveaux indicateurs écologiques synthétiques au cours de cette étude semble offrir des possibilités prometteuses, qu'en est-il de leur comparaison avec les indicateurs déjà employés à La Réunion ? Si de nombreux indicateurs ont été proposés les dernières années pour le suivi de l'état écologique des récifs d'Outre-mer (indicateurs IFRECOR-ONB, Reef Health Index, protocole d'évaluation rapide de Bouchon *et al.* (2003), etc.), à La Réunion, seuls les indicateurs : « benthos de substrats durs » de la DCE : noté « I », et « Vitalité Corallienne Hyperspectrale » du projet HYScores : noté « VCH », ont été utilisés.

Dans ce chapitre les trois indicateurs écologiques synthétiques de CORRAM ont été comparés aux indicateurs I (GT DCE Réunion "Benthos de substrats durs", 2017) et VCH (HYScores Bajjouk, 2019). Toutefois, une analyse comparative plus globale permettrait une meilleure exploration des convergences et divergences entre indicateurs préexistants, afin d'identifier certaines « familles », potentiellement complémentaire pour l'évaluation de l'écosystème récifal, connu pour sa grande complexité fonctionnelle.

Les indicateurs I et VCH ont été simulés à partir de leurs formules de calcul respectives, sur la base des métriques échantillonnées au cours de cette étude ( $i_n$  : métriques standardisées de 1 à 5). Lorsque certaines métriques manquaient (ACB+ACT pour  $i_3$ ), elles ont été estimées par photo-interprétation :

- $I = [10 \times \text{recouvrement corallien } (i_1) + 5 \times \text{coraux } Acropora (i_2) + \text{coraux } Acropora \text{ (branchus + tabulaires)} (i_3) + 2 \times \text{recouvrement algal } (i_4) + \text{algues calcaires } (i_5) + \text{coraux mous } (i_6)] / 20$
- $VCH = \text{recouvrement corallien } (\%) / [\text{recouvrement corallien } (\%) + \text{recouvrement algal } (\%)]$

L'étude des corrélations (Tab. 1) et des cartes de représentation des différents indicateurs (Fig. 15) montre tout d'abord une forte similarité entre les valeurs de I et de Structure du peuplement corallien, d'une part, et de VCH et de Vitalité de la communauté benthique d'autre part. Ce double constat n'est pas surprenant, l'indicateur I étant pondéré à 80% par des métriques structurelles (recouvrement corallien, coraux *Acropora*, *Acropora* branchus + tabulaires), tandis que l'indicateur VCH informe sur le ratio : recouvrement corallien / recouvrement algal au sein de la communauté benthique.

L'indicateur Diversité et maturité du peuplement ichthyologique est faiblement corrélé à la Structure du peuplement corallien et anticorrélé à sa Vitalité, ce qui pourrait indiquer une certaine affinité avec les peuplements coralliens structurés, mais en cours de dégradation, comme ceux des habitats « bourrelet corallien » et « platier à alignements », où le peuplement ichthyologique est le plus abondant. Toutefois cette affinité est probablement influencée par d'autres facteurs explicatifs (énergie de la houle, confinement, matière organique particulière, etc.), non élucidés au cours de cette étude.

Tableau 1 : Corrélation entre indicateurs CORRAM, DCE et HYScores (Pearson test \* :  $p < 10^{-12}$ )

	DCE	HYScores	CORRAM		
	INDIC I	VCH	STRUCTURE	VITALITÉ	POISSONS
INDIC I	1,00	0,70	<b>0,91*</b>	0,51	0,08
VCH		1,00	0,63	<b>0,75*</b>	-0,04
STRUCTURE			1,00	0,43	0,20
VITALITE				1,00	-0,19
POISSONS					1,00

En considérant à présent les indicateurs à travers la grille de lecture de la DCE (Fig. 16), développée pour les pentes externes des récifs coralliens de La Réunion (GT DCE Réunion "Benthos de substrats durs", 2017), il apparaît qu'au sein de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre, les indicateurs I et Structure du peuplement corallien permettent une discrimination spatiale très similaire des zones en Mauvais (12% et 12%) et en Très bon état écologique (17% et 22%). La différence principale entre ces deux indicateurs repose sur la grande complexité de calcul de l'indicateur I, qui nécessite de nombreuses conversions en indices standardisés, sources de fréquentes erreurs (Nicet *et al.*, 2019). En outre, les pondérations appliquées aux différentes métriques qui le composent rendent complexe son

interprétation écologique et le poids important donné au recouvrement corallien (50%) le rapproche fortement de cette métrique (Pearson correlation  $r = 0,87$  ;  $p < 10^{-12}$ ).

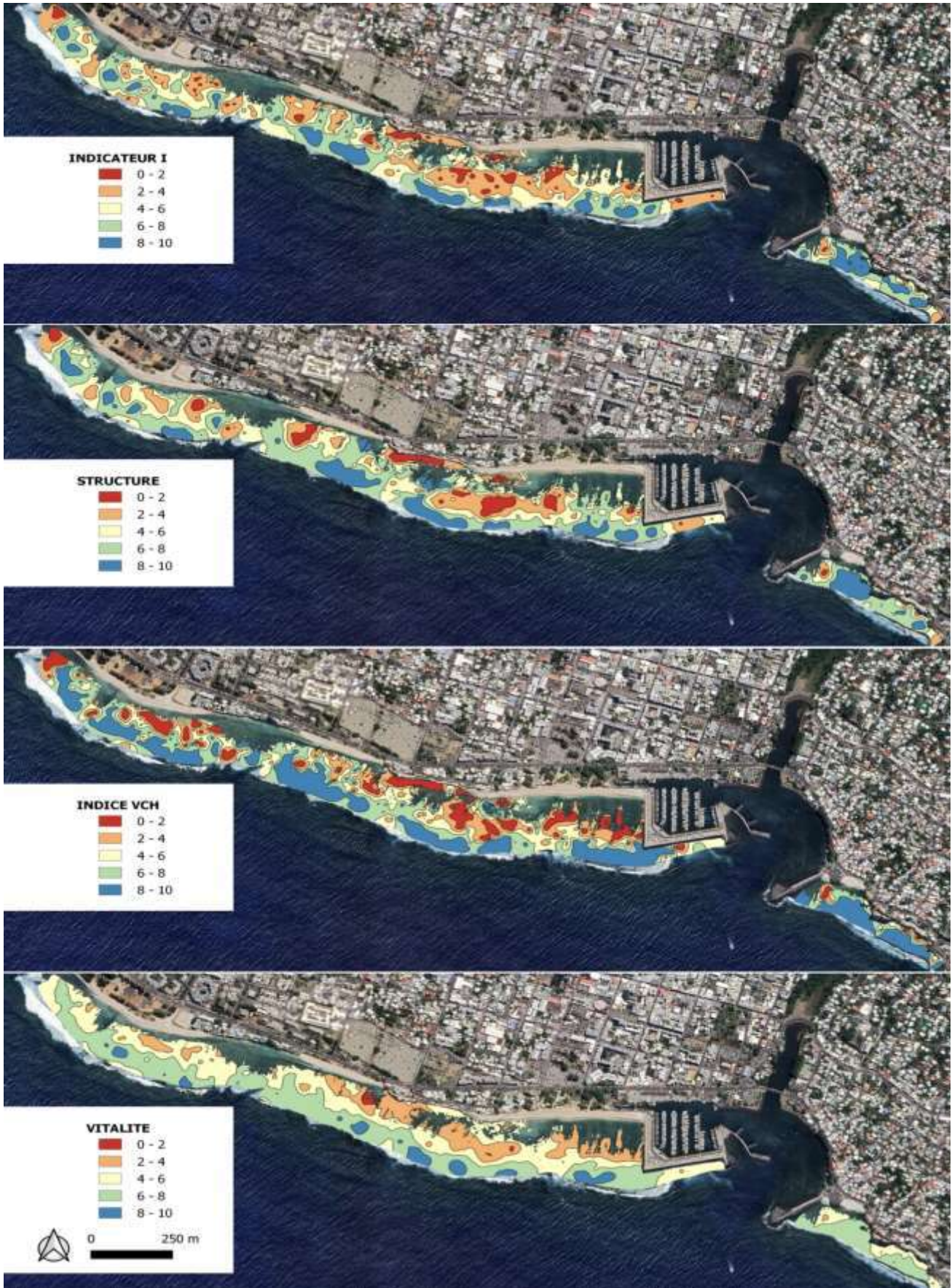


Figure 15. Comparaison des indicateurs I (DCE), Structure du peuplement corallien (CORRAM), VCH (HYSCORES) et Vitalité de la communauté benthique (CORRAM).

Bien que les indicateurs VCH et Vitalité soient fortement corrélés, en revanche, leur pouvoir de discrimination spatiale est bien distinct, avec un indicateur VCH qui maximise les zones aux états écologiques extrêmes (Mauvais et Très bon), quand l'indicateur Vitalité est plus parcimonieux et précis dans ses limites, comptabilisant une majorité d'états Moyens. Dans une optique de recherche de causalités, de mise en place de politiques de conservation ou de projets de remédiation, il semble préférable de disposer d'indicateurs précis quant à la localisation des impacts.

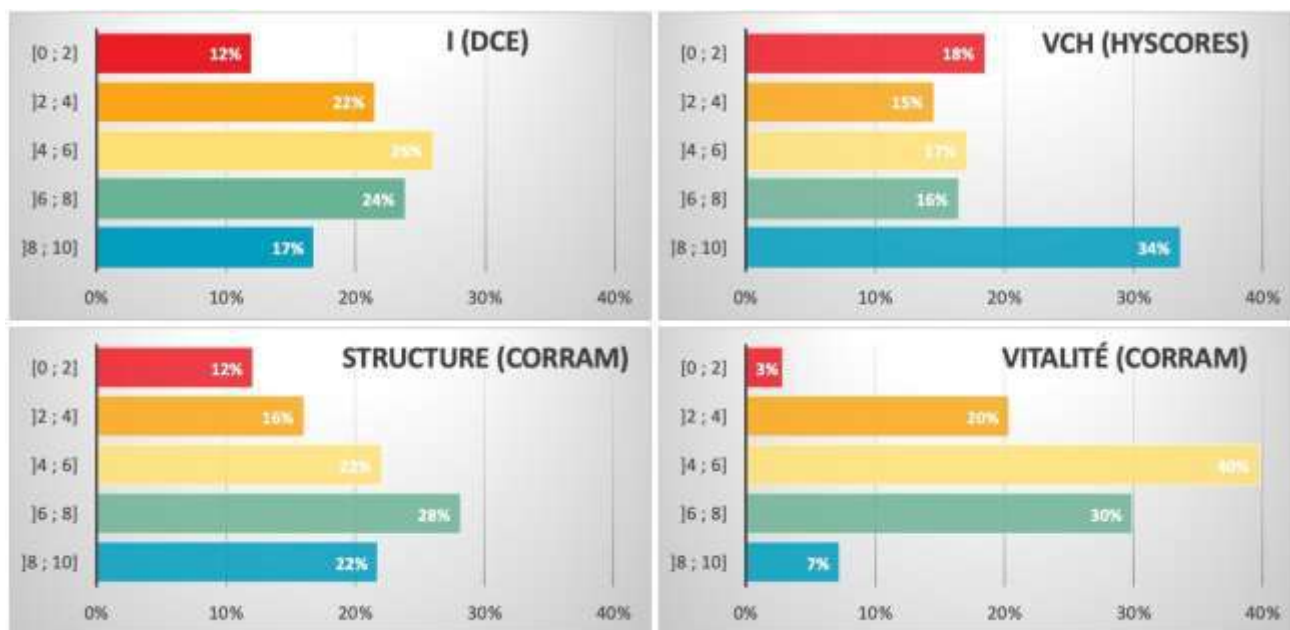


Figure 16 : Ratios surfaciques des différents indicateurs testés au sein du récif de St-Pierre, selon la grille de lecture de l'état écologique de la DCE à La Réunion. [0 ; 2] : Mauvais, [2 ; 4] : Médiocre, [4 ; 6] : Moyen, [6 ; 8] : Bon, [8 ; 10] : Très bon (GT DCE Réunion "Benthos de substrats durs", 2017).

Enfin, en regardant les patterns de distribution des zones en Mauvais et en Très bon état, délimitées au sein de l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre, les indicateurs I et Structure du peuplement corallien sont très fortement liés à la mosaïque des habitats récifaux (Fig. 8), avec les habitats : fin de platier, affleurements et blocs basaltiques et platier compact qui cumulent 76% (I) et 80% (Structure) des stations en Mauvais état, alors qu'ils ne représentent que 27% de l'ensemble épi-récifal. Inversement, l'habitat platier externe recèle respectivement 48% et 44% des stations en Très bon état, pour seulement 19% de l'ensemble épi-récifal.

Ce lien avec la délimitation des habitats n'est pas aussi franc pour les indicateurs VCH et Vitalité de la communauté benthique. Comme évoqué précédemment, ces indicateurs, composés de métriques sensibles aux variations de la qualité des eaux et des sédiments, semblent davantage influencés par les variables environnementales abiotiques, notamment de nature physicochimique, morphodynamique et sédimentaire. Les zones littorales présentant un Mauvais état écologique sont marquées par la proximité de pressions anthropiques directes, comme l'urbanisation littorale, le rejet d'eaux usées, les embouchures de ravines ou les ruptures de continuité hydrodynamique (digues du port).

## 1.5 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 1.5.1- Atouts et pistes d'amélioration de la méthode CORRAM



Au terme d'une année de programme UTOPIAN, bien que l'aire d'étude ait dû se limiter à l'ensemble épi-récifal de Saint-Pierre (incluant Terre-Sainte), les résultats scientifiques et pédagogiques fixés par la convention LIFE4BEST ont été remplis.

La méthode CORRAM s'est avérée :

- Rapide et simple de mise en œuvre (164 stations en 25 jours de terrain),
- Accessible à un public initié à l'écosystème récifal (niveau Master) après une courte formation,
- Suffisamment précise et sensible pour révéler des variations fines de l'écosystème.

En outre, les méthodes d'interpolation spatiale (krigeage ordinaire) se sont révélées tout à fait adaptées à la spatialisation des enjeux, avec un lissage de l'hétérogénéité observée à fine échelle et un rendu par ratios surfaciques, permettant un suivi de surfaces concernées par un enjeu de conservation donné (p.ex. zones possédant un recouvrement corallien >50%).

Le suivi de variables complémentaires (physicochimiques, morphodynamiques et sédimentaires) a permis d'identifier un faisceau d'indices convergents, semblant indiquer une pression chronique du bassin versant sur la qualité des eaux et des sédiments. Des investigations complémentaires seront toutefois nécessaires à l'identification de liens de causalité et certains aspects méthodologiques de CORRAM nécessiteront des améliorations, notamment *via* un recours à un modèle hydrodynamique de circulation des eaux sur les platiers et une analyse de la qualité hydrologique des masses d'eau récifales et des eaux de ruissellement à fine échelle.

Selon Monnier *et al.* (2021) : « concernant les suivis, les gestionnaires locaux attendent surtout des recommandations des scientifiques sur l'effort d'échantillonnage minimal – tout en étant attentif à ne pas recommander des solutions impliquant des efforts d'échantillonnage surdimensionnés. La définition de stratégies d'échantillonnage mériterait sans nul doute des études statistiques poussées à partir des jeux de données existants. ». Sur cette base, une première analyse de simplification du plan d'échantillonnage a été réalisée. Il apparaît que la pression d'investigation pourrait passer de 5 points fixes par station de 50 x 50 m à 3 points fixes par station de 60 x 60 m, sans perte d'information, soit une réduction de près de la moitié du nombre de points fixes par unité de surface échantillonnée.

Par ailleurs certaines métriques seront soit à préciser (pourcentages de recouvrement à fournir numériquement plutôt qu'en intervalles de valeurs), soit à éliminer (la métrique *E. merra* étant déjà mesurée via le programme POPMER pourra être remplacée par le suivi des prédateurs apicaux dans leur globalité). La métrique « abondance et diversité des macro-invertébrés » n'a pas permis au cours de cette étude d'interprétation écologique fiable et nécessitera une réorganisation dans sa méthode d'échantillonnage (estimation des densités d'oursins au sein des points fixes, au lieu des cheminements aléatoires et focalisation, lors du cheminement aléatoire, sur les holothuries, dont le rôle écologique est mieux connu que celui des mollusques, crustacés et autres invertébrés, pour la plupart nocturnes).

Enfin, l'approche par habitat sera à renforcer, notamment le long d'habitats très étroits, comme le bourrelet corallien, marquant l'interface entre le platier interne et la dépression d'arrière récif. Cet habitat pourra faire l'objet de stations complémentaires de caractérisation fine. Les cheminements aléatoires devront également respecter les frontières physiques (interface entre platier et dépression sableuse) ou plus diffuses (passage progressif d'un platier à alignements à un platier externe) entre les habitats, afin qu'ils restent attribuables à un habitat donné. Pour ce faire, un fond de carte avec le plan d'échantillonnage et la délimitation des habitats récifaux, importé dans le GPS, permettra à l'opérateur de rester au sein d'un seul habitat récifal lors de l'échantillonnage.

### 1.5.2 - Champs potentiels d'utilisation des indicateurs de vitalité et de structure benthiques

En écho au programme Score Reef (MTE-OFB-FRB-EPHE-IRD, 2019) et selon les conclusions de la synthèse des séminaires du groupe de travail « récifs coralliens » - DCE-IFRECOR, 2016-2019 (Monnier *et al.*, 2021) : « la somme des connaissances acquises et les nouveaux outils doivent être mieux connus et mis en œuvre sur l'ensemble des Outre-mer, avec les moyens appropriés. Leur

mobilisation pour l'évaluation de l'état écologique des récifs coralliens est essentielle pour cet enjeu écologique et sociétal majeur que constitue la protection des récifs. Ces besoins renvoient vers de nouvelles réflexions sur les bioindicateurs, afin que ceux-ci intègrent également la résilience (pour mesurer la capacité à rebondir). »

En ce sens, trois nouveaux indicateurs synthétiques ont été proposés dans cette étude, sur la base d'explorations et de classifications statistiques des métriques mesurées *in situ* (Broudic et Pinault, 2022) et dans le but de rassembler les informations convergentes sous forme de prédicteurs fiables de fonctions écologiques distinctes :

- La vitalité de la communauté benthique regroupe les métriques indicatrices d'une dégradation de l'état sanitaire de l'écosystème : prolifération algale et de la faune benthique opportuniste, augmentation de la prévalence des maladies, réduction du recrutement de coraux juvéniles.
- La structure du peuplement corallien s'attache à décrire l'organisation architecturale et morphométrique du peuplement ainsi que sa diversité biologique : pourcentage de recouvrement corallien, part du genre *Acropora*, taille et diversité de formes des colonies.
- La diversité et de maturité du peuplement ichthyologique s'appuie sur le rôle des prédateurs apicaux et des Scarinae dans la régulation de l'écosystème. Cet indicateur fournit également une vision sur le potentiel halieutique du récif échantillonné.

Si les données nous manquent pour poursuivre le travail de recherche de liens de causalité entre usages et impacts écologiques, les résultats acquis au cours de ce travail tendent à identifier la vitalité de la communauté benthique comme l'indicateur le plus sensible aux perturbations sanitaires du milieu. Les métriques qui le composent, très « réactives » aux variations de la qualité de l'eau et des sédiments, tendent à identifier des zones d'impact littorales, situées proches de zones de rejets d'eaux usées, de ravines et des digues du port.

L'indicateur de structure du peuplement corallien, reposant sur des métriques plus stables et résistantes au changement, pourrait permettre (1) la distinction entre habitats naturellement pauvres (platier compact et fin de platier) et habitats anciennement riches, mais aujourd'hui dégradés (bourrelet corallien), afin de recommander, même tardivement, leur protection et (2) de suivre l'impact de perturbations majeures, comme les houles cycloniques, les coulées de boue ou le blanchissement corallien (l'indicateur ne s'intéressant qu'aux colonies coralliennes vivantes).

Enfin, l'indicateur d'abondance et de maturité du peuplement ichthyologique pourrait fournir une estimation (1) de la fréquence d'observation de populations ou sous-populations d'espèces en raréfaction et (2) de la capacité de résilience offerte par la faune mobile installée dans les niches écologiques du récif. Cet indicateur reste complexe d'interprétation et devra être amélioré et confronté à de nouveaux cas expérimentaux pour en définir précisément les potentialités.

Les indicateurs de structure et de vitalité benthiques ont également révélé de fortes similarités avec les indicateurs I (DCE) et VCH (HYSCORES). Ils semblent par ailleurs être de bons descripteurs des habitats, qui présentent des valeurs distinctes selon leur localisation dans l'ensemble épi-récifal. Ces indicateurs, par leur simplicité de calcul et leur visualisation intuitive *via* des cartes en gradients de couleurs, répondent également à une demande nationale de simplification : « les rapports produits à l'échelle locale sont généralement trop complexes, trop détaillés et hétérogènes, peu communicants et donc peu utiles pour les acteurs locaux non spécialistes. » (Monnier *et al.*, 2021).

Ils pourraient également être employés dans le cadre du réseau de contrôle de surveillance « benthos de substrats durs » de la DCE, pour le suivi des platiers de La Réunion. En effet, si le premier volet du projet « Bioindication », initié en 2010, avait pour objectif de définir des indicateurs de dystrophie révélant un enrichissement en nutriments sur les platiers récifaux (Le Goff *et al.*, 2012). À l'issue d'une importante phase d'acquisition de données, en intégrant à la fois des paramètres physico-chimiques et

les peuplements algaux et coralliens, ce volet n'a pas permis de bâtir le ou les indicateur(s) attendu(s) (GT DCE Réunion "Benthos de substrats durs", 2017).

Enfin, la structure du peuplement corallien, par sa forte dépendance à l'habitat, pourrait permettre, à l'issue d'un échantillonnage exhaustif de l'ensemble épi-récifal des complexes de Saint-Gilles, Saint-Leu et Étang Salé, d'affiner le découpage cartographique des habitats récifaux de La Réunion (Nicet *et al.*, 2016) et éventuellement de fournir des pistes d'investigations complémentaires, en vue d'une extension des zones sanctuaires de la réserve naturelle marine de La Réunion.

### 1.5.3 - Perspectives 2022-2024

Le programme LIFE4BEST s'est terminé fin août 2022. Cet achèvement marque la fin de la première partie du projet UTOPIAN, qui vise à poursuivre son travail à Saint-Pierre, mais également sur l'ensemble des complexes récifaux de l'île. Les objectifs pour les années à venir sont notamment :

- Produire un modèle courantologique des masses d'eaux côtières pour comprendre les mécanismes de dilution, diffusion des apports par ruissellement et par infiltration (une demande de financement à la DEAL par l'association BESTRUN, en partenariat avec ACTIMAR et MAREX a été déposée le 22 août 2022). Avec ces informations, il sera possible d'explorer plus en profondeur les liens de causalité entre l'état de conservation et les pressions environnementales (naturelles et anthropiques) ;
- Évaluer les ratios surfaciques des métriques et indicateurs CORRAM, DCE et VCH sur l'ensemble épi-récifal des complexes de Saint-Gilles, Saint-Leu et Étang-Salé.
- Pérenniser les ateliers de formation des étudiants du Master BEST ALI à travers le module « mesures scientifiques », dédié à l'évaluation *in situ* et l'analyse des données. Les étudiants formés pourraient également participer à l'actualisation régulière des données sur les ensembles épi-récifaux des différents complexes de l'île (réserves intégrales exclues).
- Élaborer un outil d'aide à la décision (atlas cartographique et liens de causalité explorés) à destination des pouvoirs publics pour une meilleure prise en compte de l'enjeu de conservation des récifs coralliens dans la planification territoriale, si possible à travers un projet de thèse doctorale (L Broudic).

Les partenaires financiers des perspectives 2022-2024, que sont la DEAL 974, l'IFRECOR, l'OFB et la Fondation de la Mer, ont été sollicités pour une poursuite du projet. Cette poursuite dépendra également de l'aboutissement de la demande d'entrée en zones sanctuaires, à produire prochainement suite à la remise de ce bilan d'activité.

## **BIBLIOGRAPHIE**

ADYASARI, D., OEHLER, T., AFIATI, N., MOOSDORF, N. (2019). Environmental impact of nutrient fluxes associated with submarine groundwater discharge at an urbanized tropical coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 221, 30-38.

BAJJOUK, T., MOUQUET, P., ROPERT, M., QUOD, J. P., HOARAU, L., BIGOT, L., LE DANTEC, N., DELACOURT, C., POPULUS, J. (2019). Detection of changes in shallow coral reefs status: Towards a spatial approach using hyperspectral and multispectral data. *Ecological Indicators*, 96, 174-191.

BISSERY, C. (2016). Groupe de travail « récifs coralliens » de l'océan Indien – Définition des besoins et des mutualisations potentielles entre l'Ifremer et la DCE. Saint-Gilles-les-Bains, 30-31 mai. Rapport Ifremer-Réserve Nationale Marine de La Réunion-Onema, 17 p.

BOUCHON, C., BOUCHON-NAVARO, Y., LOUIS, M. (2003). Manuel technique d'étude des récifs coralliens de la région Caraïbe. Rapport UAG, 56 pp.

BROUDIC, L., PINAULT, M. (2022). Programme UTOPIAN. Compte rendu de la réunion d'avancement n°2. 14 février 2022. 77 p.

CAREX ENVIRONNEMENT, ARVAM (2005). Cartographie des récifs coralliens Conservation et réhabilitation. Phases 1 et 2.

CLAUD, R., BROUDIC, L. (2022). Suivi du biais observateur et de l'évolution temporelle des indicateurs CORRAM au cours de 11 mois de l'année. Rapport de stage de Master 1.

ENGLISH, S., WILKINSON, C.R., BAKER, V. (1997). Survey Manual for Tropical Marine Resources. Australian Institute of Marine Science, Townsville

FROESE, R., PAULY, D. (2022). FishBase. <https://www.fishbase.de/>

GARNIER, R., NICET, J.B., QUOD, J.P. (2003). Dragage du port de Saint-Pierre. Qualité des eaux et dispersion du panache turbide. 34 p + Annexes

GREEN, A.L., BELLWOOD, D.R., CHOAT, H. (2009). Monitoring functional groups of herbivorous reef fishes as indicators of coral reef resilience. A practical guide for coral reef managers in the Asia Pacific Region. IUCN, Gland, Switzerland. Available online at: [http://cmsdata.iucn.org/downloads/resilience\\_herbivorous\\_monitoring.pdf](http://cmsdata.iucn.org/downloads/resilience_herbivorous_monitoring.pdf).

GT DCE Réunion "Benthos de substrats durs" (2017). Fascicule technique pour la mise en œuvre du suivi "Benthos de substrats durs" du réseau de contrôle de surveillance DCE à La Réunion. Projet Bon Etat II, réactualisation de l'état des lieux du SDAGE Réunion et Assistance technique au Bassin La Réunion. RST-DOI/2017-05, 59 p.

HILL, J., WILKINSON, C. (2004) Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs. Australian Institute of Marine Science and Reef Check., Townsville

LE GOFF, R., ROPERT, M., BAJJOUK, T., BEIN, A., CAMBERT, H., CEBEILLAC, A., CUET, P., DELACOURT, C., DUVAL, M., MAUREL, L., MOUQUET, P., NICET, J.B., POPULUS, J., QUOD, J.P., TALEC, P., TURQUET, J., VERMENOT, C., ZUBIA, M., CAUVIN, B., POTHIN, K. (2012). Projet Bio-Indication à la Réunion : définition d'indicateurs adaptés aux récifs coralliens de la Réunion. Rapport Final 2012. Conventions Onema/Ifremer de 2009 à 2012. RST-DOI 2012-16. 123 p.

IFRECOR (2021). État de santé des récifs coralliens, herbiers marins et mangroves des outre-mer français. Bilan 2020. 335 pp

- LOYA, Y. (1978). Plotless and transect methods. Coral reefs: research methods. UNESCO, Paris, 197-217.
- MONNIER, O., COFFRE-VIEILLARD S., BISSERY, C. (2021). Évaluer l'état écologique des récifs coralliens. Réflexions à la croisée des politiques publiques de protection. Synthèse des séminaires du groupe de travail « récifs coralliens » DCE-IFRECOR 2016-2019. 140 p.
- NICET, J.B., BUREAU, S., PINAULT, M., WICKEL, J. (2019). Suivi DCE de l'état de santé 2019 des pentes externes des récifs frangeants de La Réunion – contrôle d'enquête. Rapport MAREX/ENTROPIE pour le compte de l'AFB et de l'OLE, 33 pages.
- NICET, J.B., MOUQUET, P., TOLLIS, S., BIGOT, L. (2016). Cartographie des habitats des récifs coralliens de La Réunion. Elaboration des fiches d'habitats marins et cartographie associée. Préfiguration de la Trame Bleue Marine. Rapport Université / Pareto pour le compte de la DEAL Réunion, 64 pages + annexes.
- ODUM, E.P. (1969). The Strategy of Ecosystem Development: An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. science, 164(3877), 262-270.
- OLIVER, L.M., FISHER, W.S., FORE, L., SMITH, A., BRADLEY, P. (2018). Assessing land use, sedimentation, and water quality stressors as predictors of coral reef condition in St. Thomas, US Virgin Islands. Environmental monitoring and assessment, 190(4), 1-16.
- OYANA, T.J. (2020). Spatial Analysis with R: Statistics, Visualization, and Computational Methods. CRC press.
- PINAULT, M. (2021). Analyse du jeu de données POPMER. Étude spatiotemporelle de la population d'*Epinephelus merra*. Données collectées de 2008 à 2020 sur 90 stations de platier. Rapport MAREX pour le compte de la RNNMR. 43 p + annexe.
- PINAULT, M., BROUDIC, L., NICET, J.B., WICKEL, J., PIOCH, S. (2021). CORRAM: a new Rapid Assessment Method for Coral Reefs. 10 p.
- PINAULT, M., PIOCH, S., PASCAL, N. (2017). Livret 2 - Guide pour la mise en œuvre des mesures compensatoires et la méthode de dimensionnement MERCI-COR. Édition IFRECOR. 76 p + Annexes.
- POMA, N., VIVALDI, F., BONINI, A., CARBONARO, N., DI RIENZO, F., MELAI, B., KIRCHHAIN, A., SALVO, P., TOGNETTI, A., DI FRANCESCO, F. (2019). Remote monitoring of seawater temperature and pH by low cost sensors. Microchemical Journal, 148, 248-252.
- RISK, M.J. (1972). Fish diversity on a coral reef in the Virgin Islands. Atoll Research Bulletin.
- ROPERT, M., MOUQUET, P., BAJJOUK, T., DELACOURT C. (2016). HYScores : Cartographies hyperspectrales appliquées aux écosystèmes coralliens et à leur état de santé. 121 p.
- TALBOT, F.H. (1965). A description of the coral structure of Tutia reef (Panganyika territory, East Africa), and its fish fauna. In Proceedings of the Zoological Society of London (Vol. 145, No. 4, pp. 431-470). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

## ANNEXES

Annexe 1 : Tableau des métriques écologiques de la méthode CORRAM suivi de la bibliographie citée (tiré et modifié de **Broudic et Pinault, 2020**)

FONCTIONS ÉCOLOGIQUES ÉVALUÉES PAR L'INDICATEUR	MÉTHODE D'ESTIMATION SEMI-QUANTITATIVE	METRIQUES ET SCORES ASSOCIÉS	PRESSIONS AUX EFFETS DÉLÉTERES AVÉRÉS SUR L'INDICATEUR	
			Origines anthropiques	Origines naturelles
<b>PEUPELEMENTS BENTHIQUES</b>				
<b>CORAUX DURS (SCLERACTINIARES)</b>				
<b>1. Recouvrement corallien</b>				
Les polypes coralliens synthétisent leur squelette calcaire sous forme de calices qui s'accumulent les uns sur les autres pour former, renforcer et faire croître le récif. Ils en sont les organismes fondateurs <sup>1,2,3</sup> . Le suivi d'un récif corallien se base donc en premier lieu sur le pourcentage de recouvrement des substrats durs par les colonies coralliennes vivantes. Plus un habitat aura un recouvrement corallien élevé, plus il aura une activité bio-constructrice importante <sup>4,5,6,7</sup> .	Quel pourcentage des substrats durs est recouvert par les peuplements coralliens vivants ?  Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m <sup>2</sup>	0. < 5% 1. 5 à 20% 2. 21 à 50% 3. > 50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pratiques de pêches destructrices<sup>66,67,68,69,70</sup></li> <li>• Pollutions des milieux<sup>66, 70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> <li>• Sur-fréquentation touristique<sup>79,80,81,82,83,84</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Invasion d'<i>Acanthaste</i><sup>84,85,86</sup></li> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup></li> </ul>
<b>2. Pourcentage du recouvrement du genre <i>Acropora</i> au sein du peuplement corallien</b>				
Dans des conditions abiotiques favorables, les genres <i>Acropora</i> et <i>Isopora</i> (Acroporidae) ont une croissance rapide, jusqu'à devenir des genres dominants du peuplement corallien <sup>6,9</sup> . Dans l'Indopacifique, un fort recouvrement par ces genres reflète un stade de successions écologiques élevé (stade théorique du climax) <sup>10</sup> . Du fait de leur faible tolérance aux variations des conditions abiotiques (notamment à la hausse des températures de l'eau), leur faible proportion témoigne généralement de l'action chronique et/ou aigue de pressions d'origine naturelle et/ou anthropique <sup>11,12</sup> .	Quel pourcentage du recouvrement par les coraux vivants est représenté par les genres <i>Acropora</i> et <i>Isopora</i> ?  Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m <sup>2</sup>	0. 0% 1. 1 à 10% 2. 11 à 50% 3. > 50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pratiques de pêches destructrices<sup>66,67,68,69,70</sup></li> <li>• Pollutions des milieux<sup>66,70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> <li>• Sur-fréquentation touristique<sup>79,80,81,82,83,84</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Invasion d'<i>Acanthaste</i><sup>84,85,86</sup></li> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup></li> </ul>
<b>3. Etat de santé des colonies coralliennes vivantes</b>				
L'exposition d'une colonie corallienne vivante à un stress ou à un pathogène, peut être à l'origine de réponses physiologiques multiples, de gravité croissante, allant d'une réduction de fertilité et de croissance, à une dépigmentation (fluorescence, blanchissement) ou à l'apparition de nécroses tissulaires <sup>13,14</sup> . Cet état de santé général peut ainsi être révélé par des caractères extérieurs, visibles et reconnaissables. La présence de colonies mortes, stade ultime des réponses physiologiques, témoigne d'une perturbation générale des caractéristiques abiotiques du milieu <sup>6,14,27</sup> .	Quel est l'état de santé général des colonies coralliennes (nécroses, débris, mortalité) et quelle est la prévalence des maladies au sein du peuplement ?  Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m <sup>2</sup>	0. Les colonies coralliennes présentent de nombreuses nécroses et des symptômes de maladies. Certaines peuvent être blanchies. De nombreuses colonies sont déjà mortes, avec accumulation de débris. 1. Les colonies coralliennes présentent de fréquentes nécroses et des symptômes de maladies, mais peu de colonies sont mortes et les débris sont peu abondants. 2. Les colonies coralliennes présentent de rares nécroses et/ou symptômes de maladies et très peu de colonies mortes (c.à.d. < 5) et de débris sont observés. 3. Aucune colonie n'est morte, nécrosée, blanchie, cassée ou infectée. Les peuplements coralliens présentent une vitalité maximale.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pratiques de pêches destructrices<sup>66,67,68,69,70</sup></li> <li>• Pollutions des milieux<sup>66, 70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Invasion d'<i>Acanthaste</i><sup>84,85,86</sup></li> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup></li> </ul>
<b>4. Complexité structurelle des peuplements coralliens</b>				
Les coraux peuvent adopter, au cours de leur croissance, des organisations spatiales variées. Des formes diversifiées fournissent une complexité élevée, permettant à de nombreuses espèces associées de s'y installer <sup>19,20,21</sup> . Il existe un lien entre architecture corallienne et structure écologique de l'écosystème. Les récifs coralliens peuvent ainsi être classés selon une succession de morphotypes de complexité croissante. Ces faciès morphologiques sont des prédicteurs fiables de plusieurs aspects de la valeur de conservation des récifs, notamment de la richesse en espèces coralliennes et de la présence d'espèces coralliennes rares <sup>22,23</sup> .	Quelles sont les formes de croissance (morphotypes) les plus représentées au sein du peuplement corallien ?  Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m <sup>2</sup>	0. Lorsqu'ils sont présents, les peuplements coralliens sont dominés par les formes encroûtantes, massives et submassives, présentant un relief peu prononcé. 1. En plus des morphotypes précédents, les peuplements coralliens présentent des formes foliacées, digitées ou en corymbes, offrant des reliefs plus marqués. 2. Les morphotypes coralliens sont diversifiés et tendent à se dresser verticalement : apparition des formes colonnaires et à branches épaisses. 3. Les morphotypes coralliens sont très diversifiés, notamment les formes branchues et/ou tabulaires qui dominent le peuplement et fournissent une grande diversité d'habitats.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pratiques de pêches destructrices<sup>66,67,68,69,70</sup></li> <li>• Pollutions des milieux<sup>66, 70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> <li>• Sur-fréquentation des zones récifales<sup>79,80,81,82,83,84</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Invasion d'<i>Acanthaste</i><sup>84,85,86</sup></li> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup></li> </ul>



5. Diamètre des colonies coralliennes vivantes				
<p>Bien que les vitesses de croissance soient très variables entre espèces, il est reconnu que plus une colonie corallienne est grande, plus elle est ancienne, résistante et fertile<sup>13,17</sup>. Les classes de taille des colonies vivantes informent donc, en fonction des vitesses de croissance des espèces concernées, sur le temps passé depuis la dernière perturbation majeure de l'écosystème, ayant entraîné une mortalité potentielle ou avérée (colonies mortes) des plus grandes colonies<sup>10,22,24</sup>. Elles informent également sur la capacité des colonies vivantes à survivre à d'éventuelles pressions susceptibles de survenir à l'avenir.</p>	<p>Comment les classes de taille des colonies vivantes sont-elles distribuées au sein du peuplement corallien ?</p> <p>Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m<sup>2</sup></p>	<p>0. Lorsqu'elles sont présentes, les colonies vivantes ont des tailles homogènes, avec des diamètres majoritairement inférieurs à 5 cm et aucune colonie supérieure à 40 cm.</p> <p>1. Les colonies coralliennes vivantes ont des tailles homogènes, avec des diamètres majoritairement inférieurs à 10-15 cm et aucune colonie supérieure à 40 cm.</p> <p>2. Les colonies coralliennes vivantes ont des tailles hétérogènes, avec des colonies de petites tailles, de tailles moyennes et de grandes colonies supérieures à 40 cm.</p> <p>3. Les colonies coralliennes vivantes ont des tailles hétérogènes, avec des colonies de petites tailles, de tailles moyennes et de grandes colonies supérieures à 100 cm.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>64</sup> 70,71,72,73,74,75,76</li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> <li>• Sur-fréquentation des zones récifales<sup>75,80,81,82,83,84</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup> 100,101</li> </ul>
6. Abondance des coraux juvéniles				
<p>La densité de coraux juvéniles (1 à 2 cm de diamètre<sup>13</sup>) est un indicateur de la capacité d'installation (colonisation) ou de renouvellement des populations (résilience). Une densité élevée est indicatrice d'une forte dynamique démographique<sup>14,15</sup>. En se fixant sur les substrats durs, non occupés par les colonies coralliennes adultes (régulation densité limitante), les recrues entrent en compétition avec les autres organismes de la communauté benthique (notamment les algues) et peuvent être consommées par les espèces excavatrices. Cet équilibre écologique peut être perturbé par des pressions d'origine naturelle et/ou anthropique, occasionnant des valeurs de densité plus faibles (mortalité accrue)<sup>13,14,17,18</sup>.</p>	<p>Quelle est la densité de coraux juvéniles (1 à 2 cm) observée sur les substrats durs, non occupés par les colonies coralliennes adultes ?</p> <p>Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m<sup>2</sup></p>	<p>0. 0 juvénile/m<sup>2</sup></p> <p>1. 1 à 2 juvéniles/m<sup>2</sup></p> <p>2. 3 à 4 juvéniles/m<sup>2</sup></p> <p>3. &gt; 4 juvéniles/m<sup>2</sup></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>64</sup> 70,71,72,73,74,75,76</li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup> 100,101</li> </ul>
FAUNE SESSILE NON CORALLIENNE (SPONGIAIRES, ZOANTHAIRES, ALCYONAIRES, GORGONAIRES, ANTIPATHAIRES, ETC.)				
7. Recouvrement en faune sessile non corallienne				
<p>Les espèces de la faune benthique sessile non corallienne (spongiaires, zoanthaires, alcyonaires, gorgonaires, antipathaires, ascidies, etc.) sont en compétition avec les autres espèces de la communauté benthique<sup>26,29,30</sup>. Toutefois, ces organismes hétérotrophes, se nourrissant des particules organiques en suspension dans l'eau de mer, peuvent supporter des turbidités élevées, au-delà des seuils de tolérance des espèces coralliennes et algales. Leur présence sur les récifs coralliens est donc liée à l'atténuation de l'intensité lumineuse avec la profondeur ou suite à la dégradation chronique de la qualité de l'eau (turbidité, matière organique en suspension)<sup>30,31</sup>.</p>	<p>Quel pourcentage des substrats durs est recouvert par la faune sessile non corallienne ?</p> <p>Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m<sup>2</sup></p>	<p>0. &gt; 10%</p> <p>1. 6 à 10%</p> <p>2. 1 à 5%</p> <p>3. 0%</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>64</sup> 70,71,72,73,74,75,76</li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup> 100,101</li> </ul>
MACROALGUES (CHLOROPHYTES, RHODOPHYTES, OCHROPHYTES)				
8. Recouvrement par les macroalgues				
<p>Les algues sont des producteurs primaires, s'alimentant de sels nutritifs inorganiques (nitrates, phosphates). Elles colonisent les substrats durs des zones euphotiques et sont en compétition avec les autres espèces de la communauté benthique<sup>32</sup>. Cette compétition peut être déséquilibrée en leur faveur suite à une disparition des herbivores ou à un apport excessif en sels nutritifs<sup>33,34,35</sup>. Elles envahissent alors les substrats durs et peuvent étouffer et empoisonner les colonies coralliennes, réduisant ainsi drastiquement leur vitalité et leur taux derecouvremment<sup>104</sup>. Outre leur rôle avéré de compétitrices des peuplements coralliens, les macroalgues sont également suivies dans le cadre de réseaux de bio-surveillance de la qualité de l'eau (fleshy macroalgal index)<sup>26,30</sup>.</p>	<p>Quel pourcentage des substrats durs est recouvert par les macroalgues charnues ou filamenteuses (&gt; 2 cm de hauteur) ?</p> <p>Score moyen estimé au sein de 5 points fixes de 100 m<sup>2</sup></p>	<p>0. &gt; 50%</p> <p>1. 21 à 50%</p> <p>2. 5 à 20%</p> <p>3. &lt; 5%</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>64</sup> 70,71,72,73,74,75,76</li> <li>• Aménagement du territoire<sup>71,74,75,77,78</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>87,88,89</sup> 100,101</li> </ul>

PEUPEMENTS ICHTYOLOGIQUES				
<b>9. Diversité spécifique des peuplements des poissons</b>				
<p>La diversité spécifique d'un peuplement peut être représentée comme le croisement du nombre d'espèces vivant dans un habitat (richesse spécifique) et de la répartition des individus au sein de ces espèces (équité spécifique)<sup>37</sup>. Il en résulte un indicateur composite, sensible à la fois au nombre d'espèces recensées et à l'équité de distribution de l'effectif total entre les différentes espèces<sup>38,39</sup>. Ainsi, une diminution de la richesse spécifique associée à une prolifération d'espèces opportunistes, entrainera une baisse de la diversité spécifique, caractéristique de successions écologiques régressives<sup>40</sup>.</p>	<p>Quelle est la diversité spécifique des six familles de poissons les plus communément observées sur les récifs coralliens ?</p> <p>Cf : <i>Tableau des six familles les plus communément observées sur les récifs coralliens selon Allen et Werner (2002)</i><sup>41</sup></p> <p>Score estimé au cours d'un cheminement aléatoire de 10 mn dans une station de 2 500m<sup>2</sup></p>	<p>0. Moins de 19 espèces appartenant aux six familles sont observées.</p> <p>1. Entre 20 et 27 espèces appartenant aux six familles sont observées</p> <p>2. Plus de 27 espèces appartenant aux six familles sont observées, mais l'effectif total du peuplement est marqué par la prolifération (≥ 20%) des espèces opportunistes <i>Stegastes spp.</i>, <i>Acanthurus triostegus</i>, <i>A. nigrofuscus</i> et <i>Ctenochaetus striatus</i>.</p> <p>3. Plus de 27 espèces appartenant aux six familles sont observées et les espèces opportunistes ne présentent aucune prolifération (&lt; 20% du peuplement).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>66, 70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Surpêche<sup>85,86,87,88,89</sup></li> <li>• Introduction d'espèces potentiellement envahissantes<sup>90,91,92,93</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>97,98,99</sup></li> </ul> <p>100,101</p>
<b>10b. Abondance et maturité d'<i>Epinephelus merra</i></b>				
<p><i>Epinephelus merra</i> est une petite espèce de méro (<math>&lt; 35</math> cm), se nourrissant de crustacés et de poissons, très commune dans les lagons peu profonds et les récifs semi-protégés de l'Indopacifique. Les juvéniles affectionnent particulièrement les enchevêtrements de coraux branchus du genre <i>Acropora</i>. Elle est mature à partir de 17 cm et une augmentation de la piscivorie est observée avec l'âge. Elle représente un maillon supérieur de la chaîne alimentaire des habitats de platier et de dépression post récifale. Elle fait l'objet d'une pêche traditionnelle intensive et sa population est suivie dans le cadre du réseau de surveillance POPMER à La Réunion<sup>42,43</sup>.</p>	<p>Quelle est l'abondance et la taille des individus d'<i>Epinephelus merra</i> ?</p> <p>Score estimé au cours d'un cheminement aléatoire de 10 mn dans une station de 2 500m<sup>2</sup></p>	<p>0. Aucun individu d'<i>E. merra</i> n'est observé.</p> <p>1. Quelques individus sont présents, mais aucun spécimen supérieur à 17 cm n'est observé.</p> <p>2. Entre 1 et 5 individus de taille supérieure à 17 cm sont observés, quel que soit le nombre de petits individus (juvéniles).</p> <p>3. Plus de 5 individus de taille supérieure à 17 cm sont observés, quel que soit le nombre de petits individus (juvéniles).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>66, 70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Surpêche<sup>85,86,87,88,89</sup></li> <li>• Introduction d'espèces potentiellement envahissantes<sup>90,91,92,93</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>97,98,99</sup></li> </ul> <p>100,101</p>
<b>11. Abondance et maturité des poissons perroquets</b>				
<p>Les organismes herbivores, comprenant une gamme d'espèces de poissons et d'invertébrés, jouent un rôle important dans la régulation de l'équilibre compétitif entre algues et coraux. Ils contribuent à empêcher les macroalgues d'envahir les coraux et de provoquer leur étouffement<sup>44</sup>. Parmi ces herbivores, les poissons perroquets (famille des Scaridae) s'alimentent en radant (scrapeurs) ou en arrachant (excavateurs) une partie du substrat algaïque, libérant ainsi un espace favorable à l'installation des recrues coralliennes<sup>51,52</sup>. Ces espèces sont ainsi reconnues pour leur rôle important dans les processus de résilience écologique<sup>53,54</sup>. Elles sont toutefois fortement ciblées par la pêche traditionnelle<sup>55</sup>.</p>	<p>Quelle est l'abondance et la taille des poissons perroquets (Scaridae) ?</p> <p>Score estimé au cours d'un cheminement aléatoire de 10 mn dans une station de 2 500m<sup>2</sup></p>	<p>0. Aucun poisson perroquet n'est observé.</p> <p>1. Les poissons perroquets sont présents, mais aucun individu de taille supérieure à 25 cm n'est observé.</p> <p>2. Entre 1 et 5 individus de taille supérieure à 25 cm sont observés, quel que soit le nombre de petits individus (juvéniles).</p> <p>3. Plus de 5 individus de taille supérieure à 25 cm sont observés, quel que soit le nombre de petits individus (juvéniles).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>66, 70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Surpêche<sup>85,86,87,88,89</sup></li> <li>• Introduction d'espèces potentiellement envahissantes<sup>90,91,92,93</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>97,98,99</sup></li> </ul> <p>100,101</p>



PEUPELEMENTS DE MACRO-INVERTÉBRÉS				
14. Abondance des macro-invertébrés				
<p>De nombreuses espèces de mollusques (bivalves, gastéropodes, céphalopodes), crustacés (langoustes, cigales, crevettes, crabes), et d'échinodermes (oursins, holothuries) font l'objet d'un commerce plus ou moins réglementé et lié à diverses activités humaines (pêche, aquariophilie, collection, etc.)<sup>65,66</sup>. Ces organismes, généralement de taille moyenne à grande, jouent un rôle important dans les processus de résilience écologique en participant au maintien des mécanismes de régulation des récifs coralliens et de recyclage de la matière organique (détritivores, filtreurs, prédateurs d'acanthaster, brouteurs du feutrage algal, etc.)<sup>65</sup>. Leur surexploitation participe à la réduction des capacités de résistance et de résilience de l'écosystème face à la présence de pressions d'origine naturelle ou anthropique<sup>65</sup>.</p>	<p>Quelle est l'abondance des espèces de macro-invertébrés pouvant faire l'objet de prélèvements (pêche, collection, braconnage, aquariophilie, etc.) ?</p> <p><i>Cf : Tableau des espèces de macro-invertébrés pouvant faire l'objet de prélèvements</i></p> <p>Score estimé au cours d'un cheminement aléatoire de 10 mn dans une station de 2 500m<sup>2</sup></p>	<p>0. Aucun individu n'est observé.            1. Entre 1 et 5 individus sont observés.            2. Entre 6 et 10 individus sont observés.            3. Plus de 10 individus sont observés.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollutions des milieux<sup>66, 70,71,72,73,74,75,76</sup></li> <li>• Surpêche<sup>65,66,67,68,69</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements globaux et phénomènes climatiques récurrents<sup>67,68,69, 100,101</sup></li> </ul>

## Annexe 2 : Principe des analyses d'autocorrélation spatiale : analyse de krigeage

### 1. Traitement des données : polir pour adoucir le brut

Les données ont été récoltées suivant un plan échantillonnage stationnel et stratifié par quadrillage (50x50 m). Les points fixes ont été déterminés semi-aléatoirement et géolocalisés, et la faune mobile est localisée par le centroïde du parcours aléatoire. Pour passer de données ponctuelles à des données spatiales continues, des techniques de modélisation puissantes et robustes voient le jour et semblent devenir un outil indispensable pour la gestion des ressources naturelles et la conservation biologiques (Krige, 1951 ; Collins et Bolstad, 1996 ; Hartkamp et al. Bolstad, 1996 ; Hartkamp et al., 1999).

#### 1.1. Principe et diversité des méthodes d'interpolations spatiales

Les méthodes d'interpolation spatiales estiment les valeurs d'une variable environnementale sur des sites non échantillonnés à l'aide de données provenant d'observation ponctuelle dans la même région, en d'autres termes, l'interpolation spatiale permet de passer de données ponctuelles en données spatiales continues (Collins et Bolstad, 1996 ; Hartkamp et al., 1999 ; Li et Head, 2008).

Li et Head (2008) décrivent brièvement 42 méthodes d'interpolation spatiales, en discriminant les analyses non-géostatistiques des analyses géostatistiques (kriging - Tableau 1). Les estimations de la quasi-totalité des méthodes d'interpolation spatiale peuvent être présentées comme des moyennes pondérées de données échantillonnées. Elles partagent toutes la même formule générale d'estimation suivante :

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

$\hat{Z}(x_0)$  est la valeur estimée de la variable étudiée au point d'intérêt  $x_0$ ,  $Z$  est la valeur observée au point échantillonné  $x_i$ ,  $\lambda_i$  est le poids attribué au point échantillonné et  $n$  représente le nombre de points échantillonnés utilisés pour l'estimation (Webster et Oliver, 2001).

Les analyses non-géostatistiques et géostatistiques reposent sur le principe d'autocorrélation spatiale des échantillons, c'est-à-dire, plus les échantillons sont proches les uns des autres, plus leurs valeurs sont similaires (Oliveau, 2010). L'indice  $I$  de Moran permet de calculer cet indice d'autocorrélation en considérant qu'un échantillon avec un nombre de voisins important va avoir plus de poids dans la valeur de cet indice (Oliveau, 2010). Une valeur de l'indice  $I$  de Moran proche de -1 indique une dispersion des échantillons tandis qu'une valeur proche de 1 indique un regroupement, c'est-à-dire, que les échantillons sont dépendants les uns des autres (Burrough et McDonnell, 2005 ; INSEE, 2018). L'information de dépendance spatiale est essentielle pour envisager tout modèle d'interpolations spatiales.

La différence fondamentale entre les analyses non géostatistiques et géostatistiques se trouve dans le calcul de  $\lambda_i$ . Les analyses non-géostatistiques, comme l'inverse distance weighting (IDW – la plus courante), a une méthode de calcul impliquant une fonction exponentielle par défaut, c'est-à-dire, que

Tableau 1. Les 42 méthodes d'interpolation spatiale décrites par Li et Head en 2008

Non-geostatistical	Geostatistical		Combined method
	Univariate	Multivariate	
Nearest neighbours	Simple kriging	Universal kriging	Classification combined other interpolation methods
Triangular irregular network related interpolations	Ordinary kriging	SK with varying local means	Trend surface analysis combined with kriging
Natural neighbours	Block kriging	Kriging with an external drift	Lapse rate combined with kriging
Inverse distance weighting	Factorial kriging	Simple cokriging	Linear mixed model
Regression models	Dual kriging	Ordinary cokriging	Regression trees combined with kriging
Trend surface analysis	Indicator kriging	Standardised OCK	Residual maximum likelihood-empirical best linear unbiased predictor
Splines and local trend surfaces	Disjunctive kriging	Principal component kriging	Regression kriging
Thin plate splines	Model-based kriging	Cofocused cokriging	Gradient plus inverse distance squared
Classification	Simulation	Kriging within strata	
Regression tree		Multivariate factorial kriging	
Fourier series		Indicator kriging	
Lapse rate		Indicator cokriging	
		Probability kriging	
		Simulation	



les échantillons les plus proches ont un poids plus fort dans l'estimation des données théoriques (Isaaks et Srivastava, 1989). Alors que les analyses géostatistique estiment le poids  $\lambda_i$  à l'aide d'analyse variographique en minimisant la variance des erreurs de prédiction (Isaaks et Srivastava, 1989). Ces analyses se regroupent sous le nom générique de krigeage, qui est une famille d'algorithmes de régression généralisée des moindres carrés, dont Danie Krige est le pionnier (Krige, 1951).

L'analyse variographique se traduit sous forme de semi-variogramme (Matherins et al., 1965). Un semi-variogramme expérimental est un nuage de point représentant la semi-variance d'une valeur observée entre deux points de données (paire de points). L'appariement des données évolue avec la distance, c'est-à-dire, que plus la distance augmente, plus la semi-variance augmente et se stabilise vers une asymptote, appelée « seuil » (*sill*). À partir du semi-variogramme observé (Figure 1A), il est possible de modéliser un semi-variogramme théorique (Figure 1B).

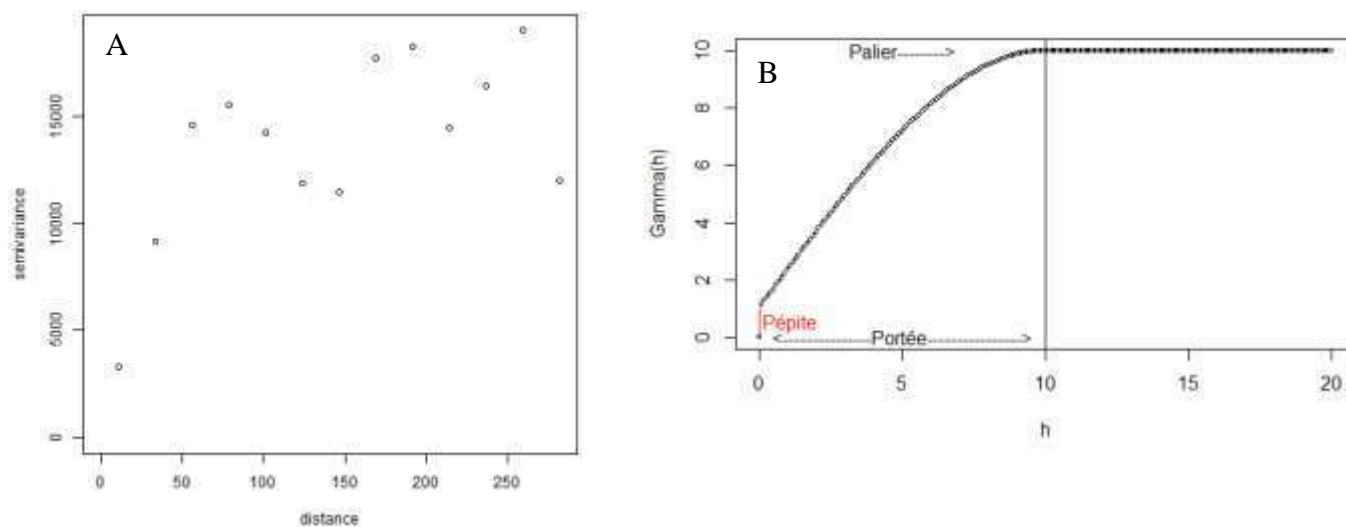


Figure 1. Semi-variogramme (A) expérimental et (B) théorique. Source INSEE, 2018

La projection du seuil sur l'axe des abscisses informe sur la « portée » (*range*). Les paires de points ayant une distance supérieure à la portée sont considérées comme indépendantes alors que les paires de points à une distance inférieure à la portée sont considérées comme autocorrélés spatialement. Enfin, la « pépite » (*nugget*) est l'ordonnée à l'origine théorique, c'est un résidu reflétant (i) la variance des erreurs d'échantillonnage et (ii) la variance spatiale à une distance plus courte que l'espacement minimal de l'échantillon (l'observation  $Z_i$  n'est pas équivalente à l'observation juxtaposée et espacée d'une distance  $h$   $Z_{i+h}$ ). En se basant sur le semi-variogramme expérimental, un semi-variogramme théorique peut être défini suivant les valeurs du seuil, de la portée et de la pépite, couplé à un modèle mathématique (exponentiel, sphérique, gaussien, linéaire, etc.). Ces valeurs composent le modèle de prédiction. La modélisation et l'estimation des semi-variogrammes sont extrêmement importantes pour l'analyse structurale des données et pour la définition du modèle de prédiction (Burrough et McDonnell, 1998).

Tableau 2. Comparaison des différentes méthodes de krigeage (tiré de Li et Head, 2014)

Geostatistical method	Univariable/ multivariable	Stationary/ local mean	Local trend	Information of coordinates	Secondary variable	Exhaustive secondary information	Stratification	Orthogonalisation of secondary information	Single or multiple samples in the search window
Simple kriging (SK)	Univariate	Stationary	No	No	No	na	No	na	Multiple
Ordinary kriging (OK)	UNIVARIATE	Local	No	No	No	na	No	na	Multiple
Universal kriging (UK)	Multivariate	Local	Yes	Yes	No	Yes	No	No	Multiple
SK with varying local means (SKlm)	Multivariate	Local	No/yes <sup>a</sup>	No	Yes	Yes	No	No	Multiple
Kriging with an external drift (KED)	Multivariate	Local	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Multiple
Simple cokriging (SCK)	Multivariate	Stationary	No	No	Yes	No	No	No	Multiple
Ordinary cokriging (OCK)	Multivariate	Local	No	No	Yes	No	No	No	Multiple
Standardised OCK (SOCK)	Multivariate	Both <sup>b</sup>	No	No	Yes	No	No	No	Multiple
Principal component kriging (PCK)	Multivariate	Local	No	No	Yes	No	No	Yes	Multiple
Simple collocated cokriging (SCCK)	Multivariate	Stationary	No	No	Yes	No	No	No	Single
Ordinary collocated cokriging (OCCK)	Multivariate	Local	No	No	Yes	No	No	No	Single
Simple kriging within strata (SKWS)	Multivariate	Within strata stationary	No	No	No	na	Yes	na	Multiple
Ordinary kriging within strata (OKWS)	Multivariate	Local	No	No	No	na	Yes	na	Multiple
Simple cokriging within strata (SCKWS)	Multivariate	Within strata stationary	No	No	Yes	No	Yes	No	Multiple
Ordinary cokriging within strata (OCKWS)	Multivariate	Local	No	No	Yes	No	Yes	No	Multiple

<sup>a</sup> The local trend is "no" if the secondary variable is categorical and "yes" if it is continuous.  
<sup>b</sup> Need the stationary means of both the primary and secondary variables.

Toutefois, le plan d'échantillonnage, qui a conditionné la récolte de donnée, va influencer le niveau de fiabilité du modèle de prédiction. En ce sens, plusieurs analyses géostatistiques (krigeage – Tableau 2) existent pour être le plus cohérent avec les contraintes imposées du plan d'échantillonnage (Li et Head, 2014 ; Zarco-Perelle et Simoes, 2017).

### 1.2. Comment choisir la méthode d'interpolation spatiale adaptée à un plan d'échantillonnage ?

Chaque méthode de krigeage possède des spécificités qui influent sur la qualité de la représentation graphique finale en fonction de la densité de donnée (Burrough and McDonnell, 1998), de la distribution spatiale des données (regroupement des données homogènes vs hétérogène – Li et Head, 2014), de la variation temporelle (Stahl et al., 2006), la surface d'évaluation (MacEachren and Davidson, 1987), de la nature du paysage (Little et al., 1997 ; Zhu and Lin, 2010), et du plan d'échantillonnage (si la taille de l'échantillonnage est trop faible, les sorties graphiques seront bruitées – Burrough and McDonnell, 1998).

Pour la présente étude, le plan d'échantillonnage imposait une densité de donnée conséquente pour l'ensemble des complexes récifaux, avec une distribution stochastique et des autocorrélations spatiales locales. Les bases de données de l'étude semblaient valider les conditions d'applications pour les analyses de géostatistique, excepté la densité de donnée pour les métriques de la faune mobile des complexes récifaux de Cap Champagne et des Colimaçons. Les échantillons étaient au nombre respectif de 16 et 15, or, d'après les suggestions de Burrough et McDonnell (1998), il faudrait au moins 50 à 100 échantillons pour stabiliser le semi-variogramme. Toutefois, d'après Journel et Huijbregts (1978) une alternative est possible à partir du moment où le semi-variogramme est composé de 30 à 50 paires de points avec une distance d'autocorrélation spatiale inférieure à la moitié de la dimension de la zone échantillonnée.

Afin de choisir l'analyse de krigeage la plus adaptée, Li et Head (2014) ont élaboré une clé dichotomique (Figure 2). Les semi-variogrammes présentaient tous une structure spatiale (point 1), dont l'estimation se basait sur une variable continue (point 2), sans variable secondaire (point 3) et avec une autocorrélation spatiale locale (*local means*, point 4\*). Ainsi, une analyse de krigeage ordinaire (KO) a été réalisée pour chaque métrique et indicateur.

1	Data or residuals show spatial structure or a non-linear variogram	
2	Estimation of continuous variable	
3	No information of secondary variables available	
4	Global mean known	SK
4*	Global mean unknown and using local means	OK
3*	Information of secondary variables available	
5	Global mean known	
6	Secondary variable is only categorical	
7	Stratification	SKWS
7*	Non-stratification	SKIm
6*	Secondary variable is not only categorical	
8	Stratification	SCKWS
8*	Non-stratification	
9	Sparse samples of secondary variable and multiple samples in search window	SCK
9*	Dense samples of secondary variable and single sample in search window	SCKK
5*	Global mean unknown and using local means	
10	Secondary information available for each point being estimated	
11	Spatial trend is apparent and only coordinates available	UK
11*	Other secondary variable available	
12	An apparent global relation with the secondary variable	SKIm
12*	The relation is not so apparent	KED
10*	Secondary information not available for each point being estimated	
13	Secondary variables including a categorical variable	
14	Only a categorical variable available	
15	Multiple samples in search window	OKWS
15*	Dense samples of secondary variable and single sample in search window	OCCK
14*	Other secondary information available	OCCWS
13*	Secondary variables without categorical variable	
16	Sparse samples of secondary variable and multiple samples in search window	
17	Many secondary variables and PCA needed	PCK
17*	PCA not needed to reduce the number of secondary variables	
18	Avoid negative weights and artificially limiting the effect of secondary variable	SOCK
18*	Accept above two drawbacks	OCK
16*	Dense samples of secondary variable and single sample in search window	OCCK
2*	Estimation of categorical variable or uncertainty assessment	IK & its variants
1*	Data or residuals show no spatial structure or linear variogram or sample size is too small to derive a reliable variogram	

Figure 2 : Clé dichotomique pour choisir le modèle de krigeage adapté en fonction des données (tiré de Li et Head, 2014)

### 1.3. Le krigeage ordinaire (KO) pour transformer des données ponctuelles en données spatiales continues : cheminement des outils statistiques

L'ensemble des métriques et des indicateurs écologiques ont été traités par krigeage ordinaire à différente échelle spatiale. Pour chaque complexe récifal, deux échelles ont été étudiées, une première sur l'emprise de l'ensemble épi-récifal, et une deuxième sur l'emprise de chaque entité géomorphologique homogène (habitat récifal défini par Nicet et al., 2016) au sein de l'ensemble épi-récifal (deux pour Cap Champagne et les Colimaçons et sept pour Saint-Pierre).

L'ensemble des tests statistiques ont été réalisé avec R (R Core Team 2021). La mise en page des cartes a été réalisée sur Qgis (Qgis.org 2022).

#### 1.3.1. Significativité de l'indice d'autocorrélation spatiale

La première étape pour étudier la significativité de l'indice  $I$  de Moran est de générer les polygones de Voronoï sous un système d'information géographique (Qgis). Les polygones de Voronoï sont créés de sorte que chaque emplacement dans un polygone soit plus proche du point d'échantillonnage présent dans ce polygone que de tout autre point d'échantillonnage (Shamon et Hoey, 1975). À partir de ces informations, la significativité de l'indice  $I$  de Moran, qui traduit l'autocorrélation spatiale des données, a été calculée à partir du test de Moran, *moran.test* (Cliff et Ord, 1981). Un test significatif

( $p$ -value < 0,05) traduit une autocorrélation spatiale des données et informe, par la valeur du  $I$ , sur le sens de la relation (positif ou négatif) et la force (proche de -1 ou 1).

### 1.3.2. Création d'une emprise géographique

L'analyse géostatistique sous R demande une base de données sous forme de *SpatialPointsDataFrame*. Les couches sont dans un premier temps converties en format *shapefile*, dans le Système de Coordonnée de Référence EPGS UTM 40S pour avoir des unités en mètre et non en degré. Les couches sont produites avec le logiciel Qgis pour être importées dans R avec la fonction *st\_read*.

Une emprise géographique doit être définie pour borner l'interpolation spatiale. En fonction de l'échelle spatiale des analyses, plusieurs emprises ont été définies. L'étude à l'échelle du complexe récifal a nécessité trois emprises géographiques, une de l'ensemble épi-récifal de Cap Champagne, une des Colimaçons et une de Saint-Pierre. L'étude à l'échelle habitat a demandé une emprise par habitat au sein d'un complexe récifal.

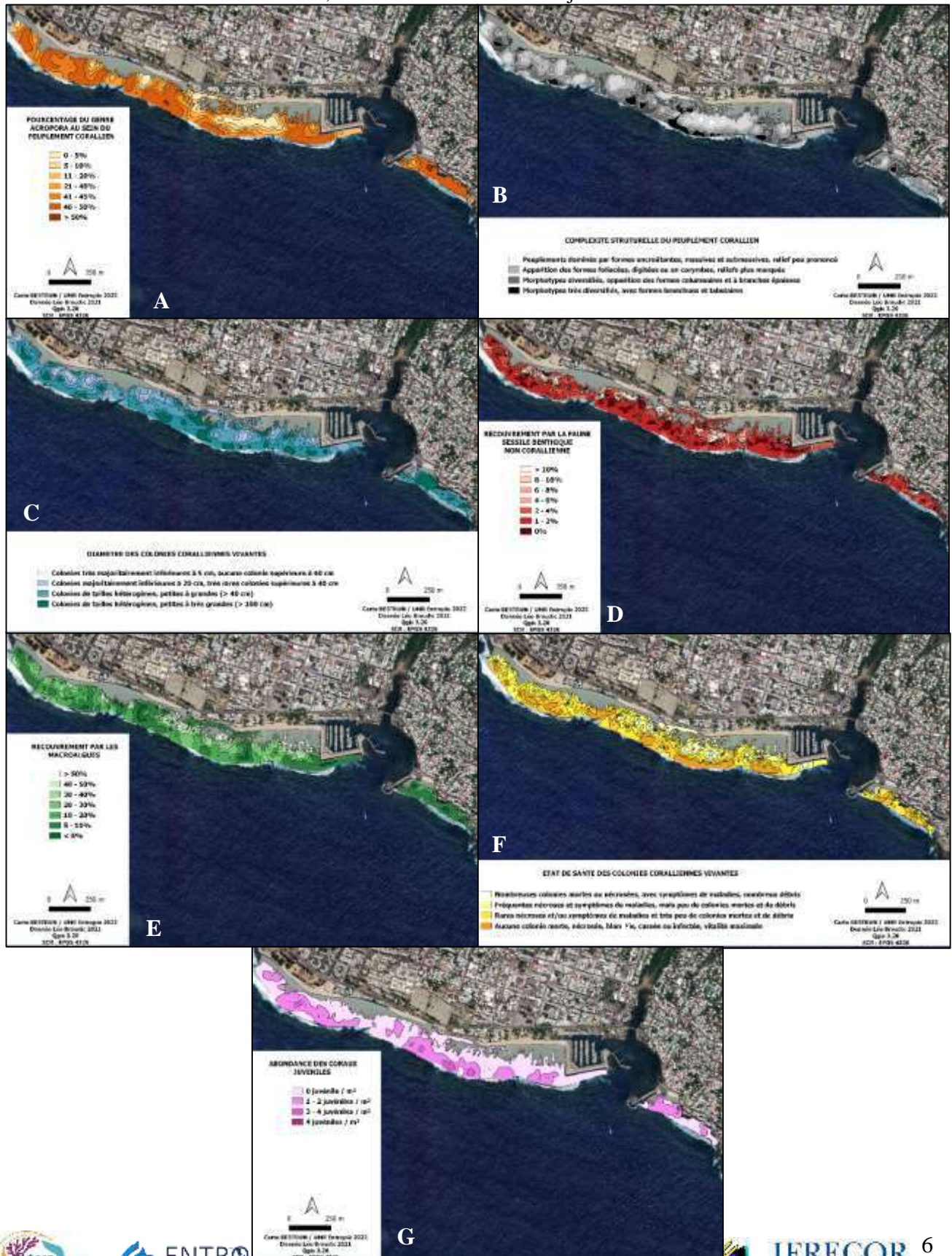
### 1.3.3. De l'analyse des semi-variogrammes à la représentation géographique en passant par le krigeage ordinaire

Les semi-variogrammes ont été calculés à partir du package *gstat*. Les semi-variogrammes expérimentaux ont été obtenus par la fonction *variogram* et les semi-variogrammes théoriques, par la fonction *fit.variogram*. Cette dernière permet de paramétrer le modèle de prédiction et de variance.

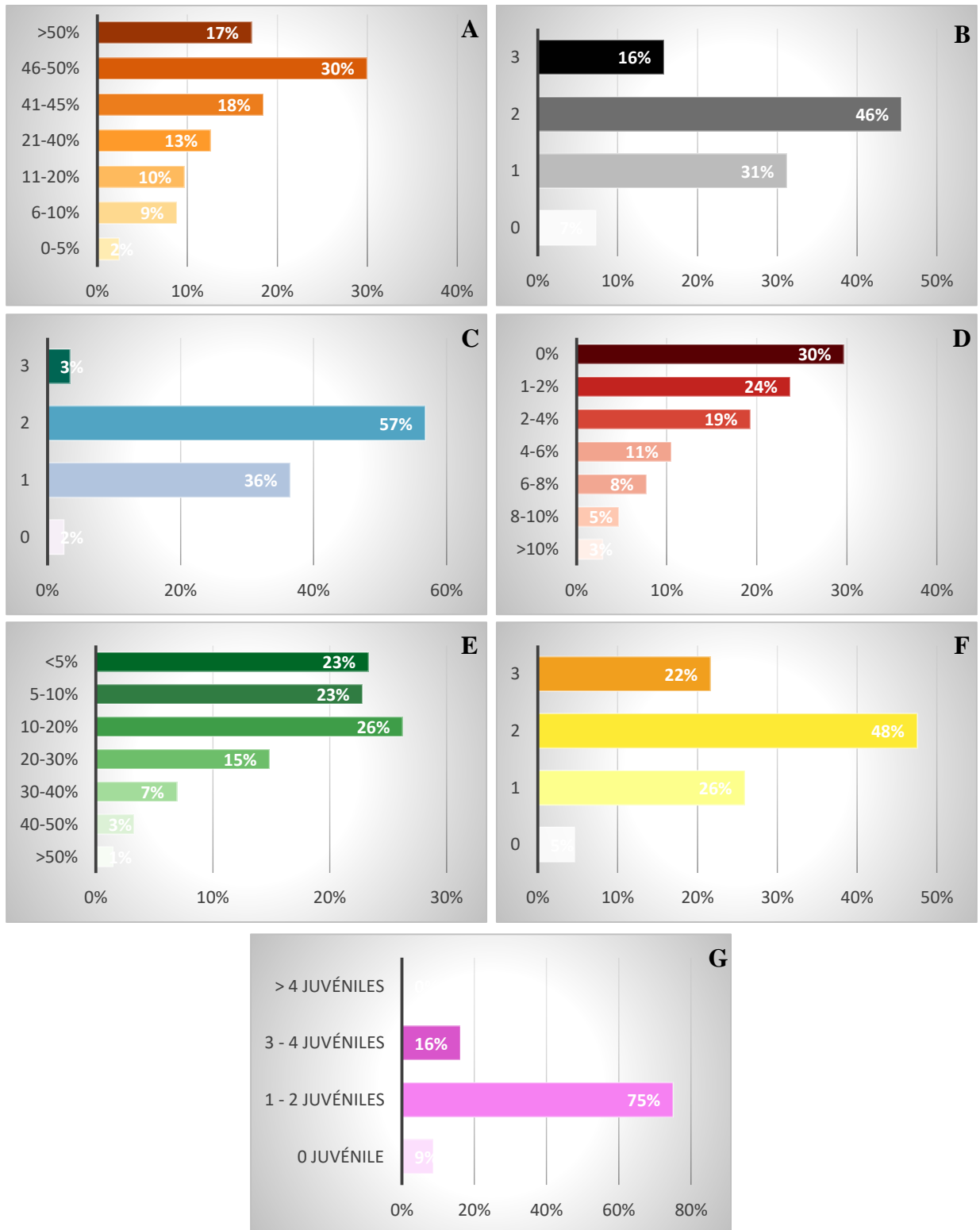
La fonction *gstat* permet de traduire toutes les informations nécessaires venant du modèle pour réaliser une analyse de krigeage à l'aide de la fonction *predict*. À la suite de ces analyses, deux sorties géographiques sont générées, une pour la prédiction des valeurs de la variable étudiée et une pour la variance des valeurs de la variable étudiée.

Les analyses géographiques sont exportées de R par la fonction *WriteRaster* sous le format Raster. Elles sont importées dans le logiciel Qgis pour la mise en page et la définition des seuils.

Annexe 3 : Distribution surfacique des métriques relatives au peuplement benthique au complexe récifal de Saint-Pierre. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Pourcentage du recouvrement du genre Acropora au sein du peuplement corallien, B : Complexité structurelle du peuplement corallien, C : Diamètre des colonies coralliennes vivantes, D : Recouvrement en faune sessile benthique non corallienne, E : Recouvrement par les macroalgues, F : État de santé des colonies coralliennes vivantes, G : Abondance des coraux juvéniles.

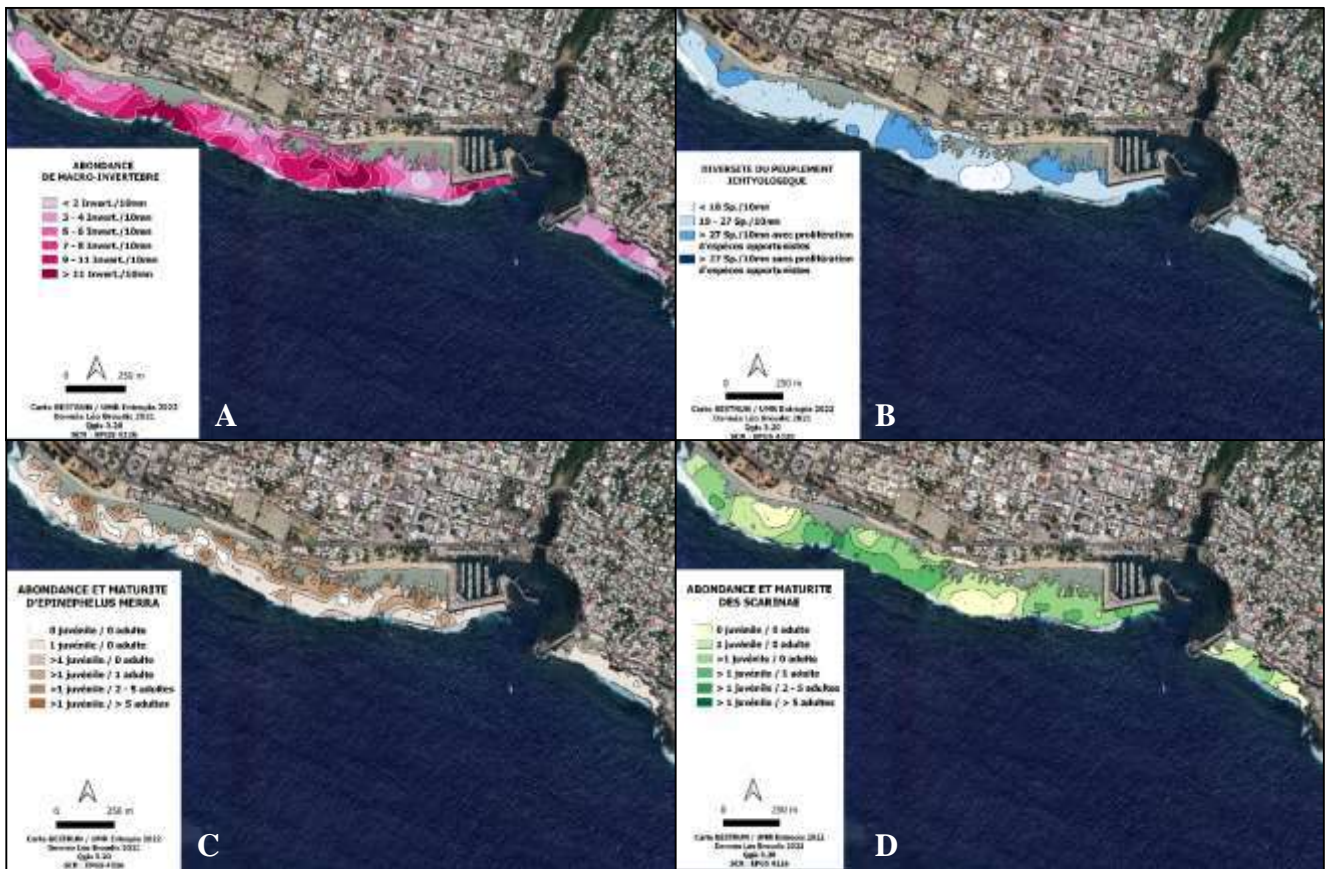


Annexe 4 : Ratio surfacique des métriques relatives au peuplement benthique au complexe récifal de Saint-Pierre. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Pourcentage du recouvrement du genre Acropora au sein du peuplement corallien, B : Complexité structurelle du peuplement corallien, C : Diamètre des colonies coralliennes vivantes, D : Recouvrement en faune sessile benthique non corallien, E : Recouvrement par les macroalgues, F : État de santé des colonies coralliennes vivantes, G : Abondance des coraux juvéniles.

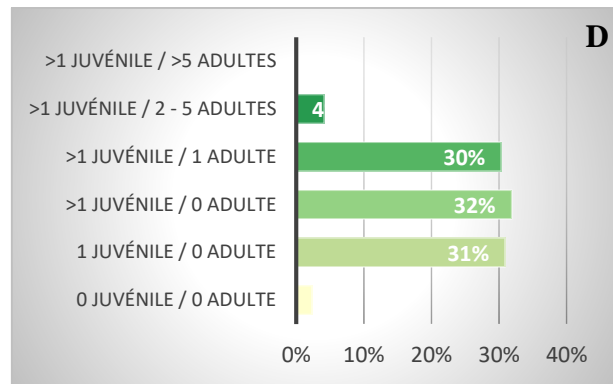
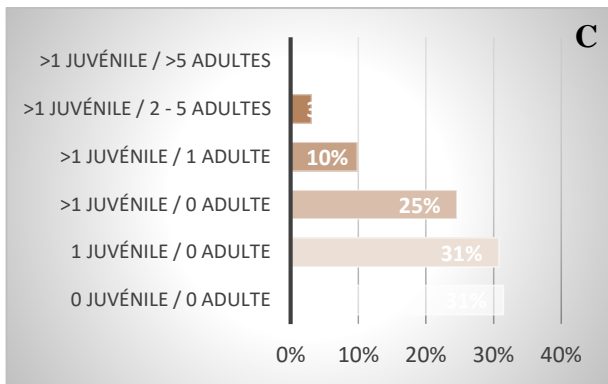
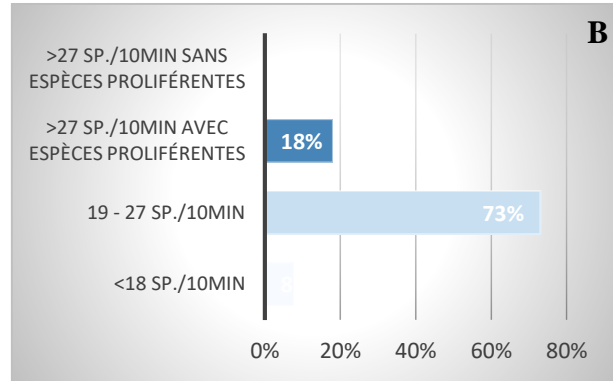
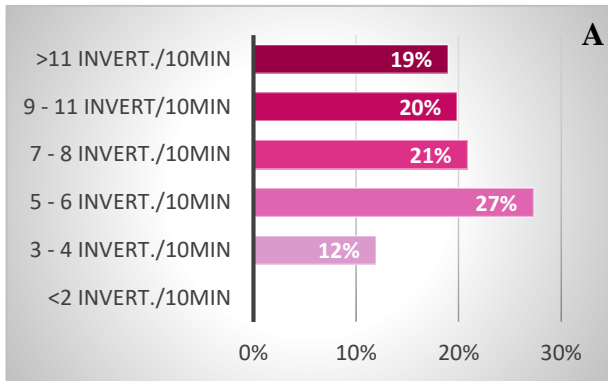




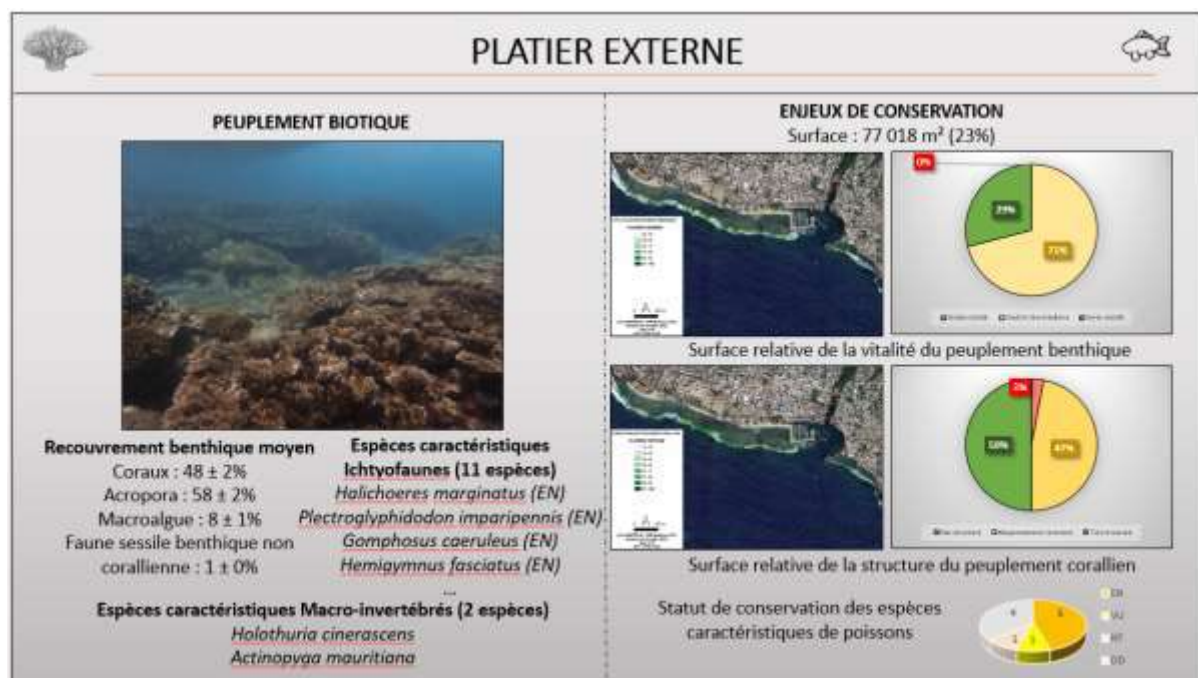
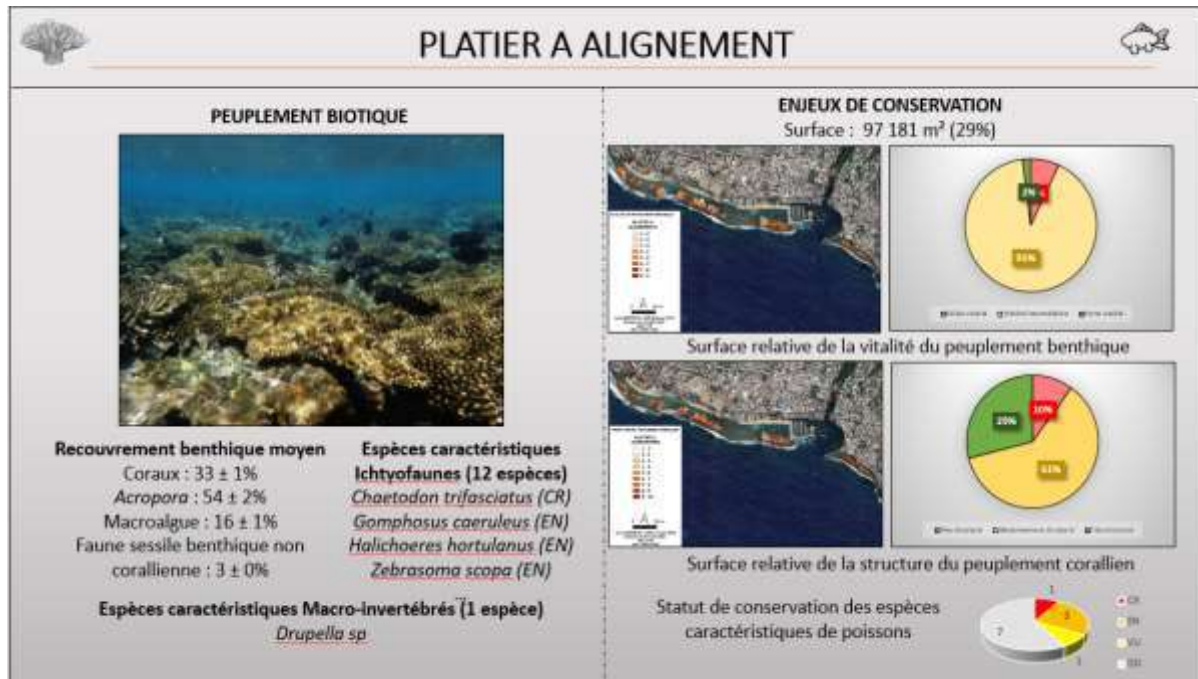
Annexe 5 : Distribution surfacique des métriques relatives à la faune mobile au complexe récifal de Saint-Pierre. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Abondance de macro-invertébrés, B : Diversité du peuplement ichthyologique, C : Abondance et maturité d'Epinephelus merra, D : Abondance et maturité des Scarinae

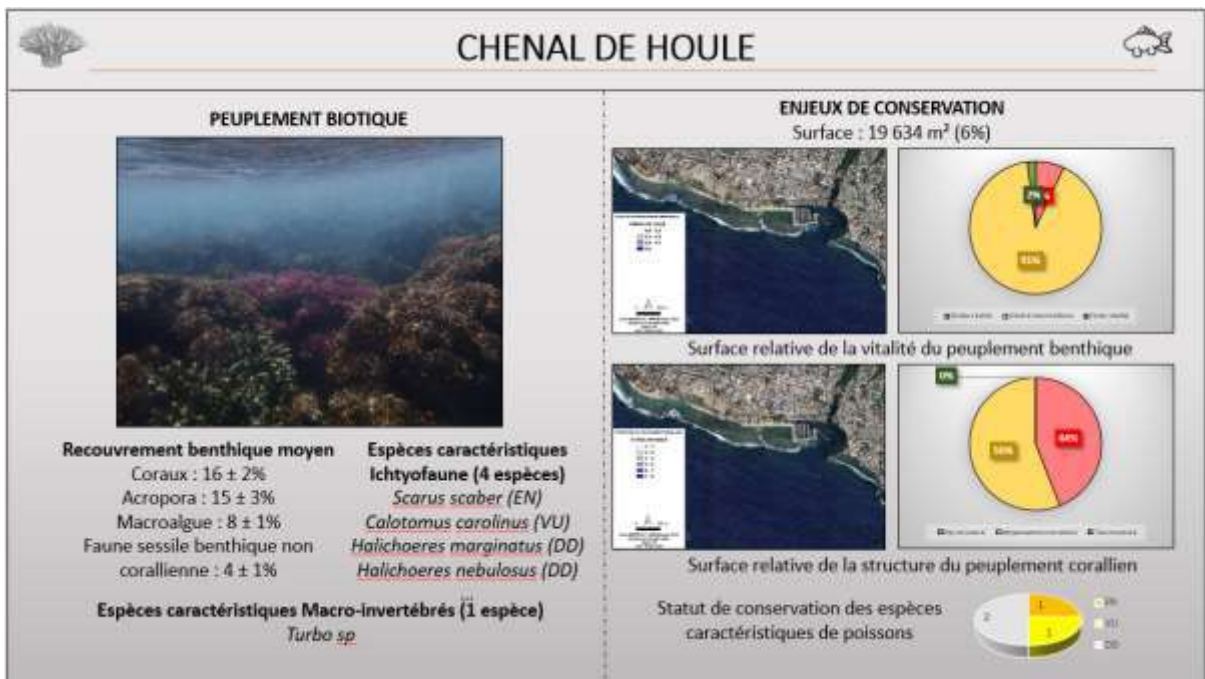
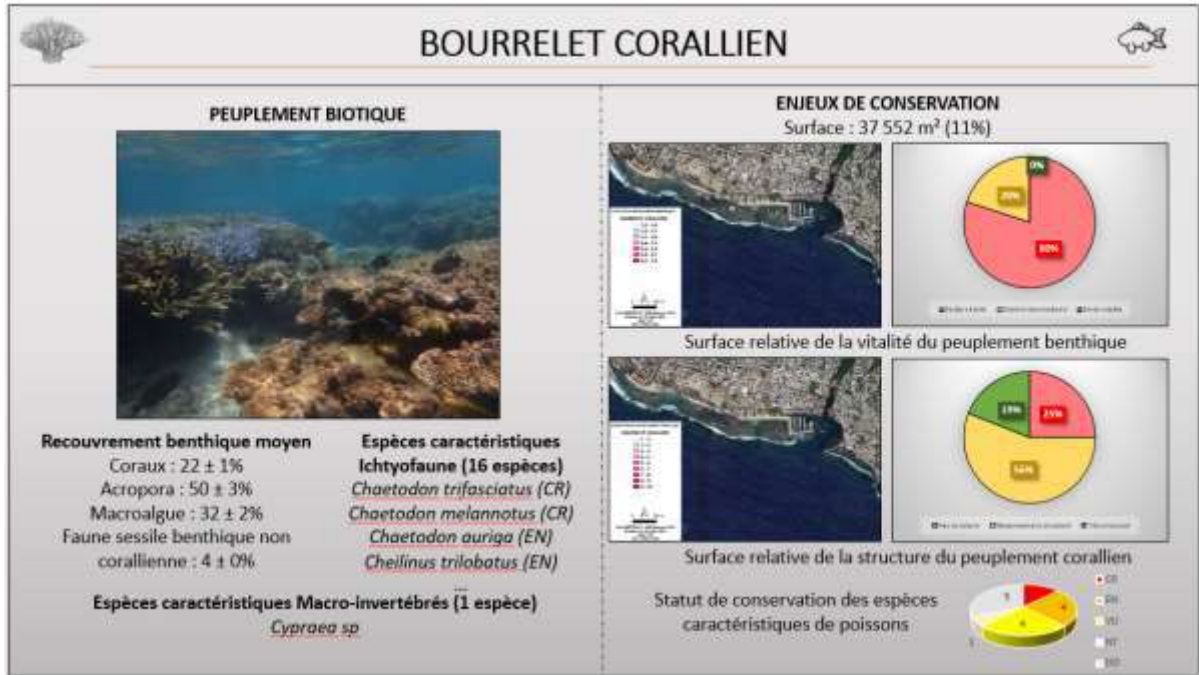


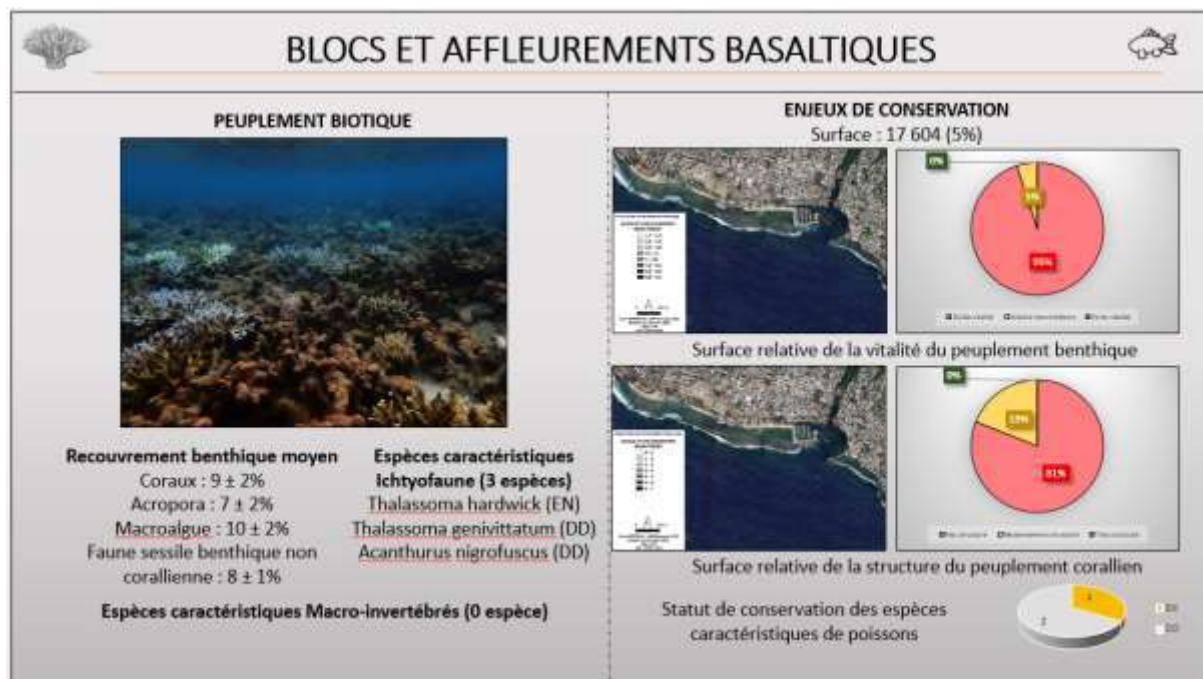
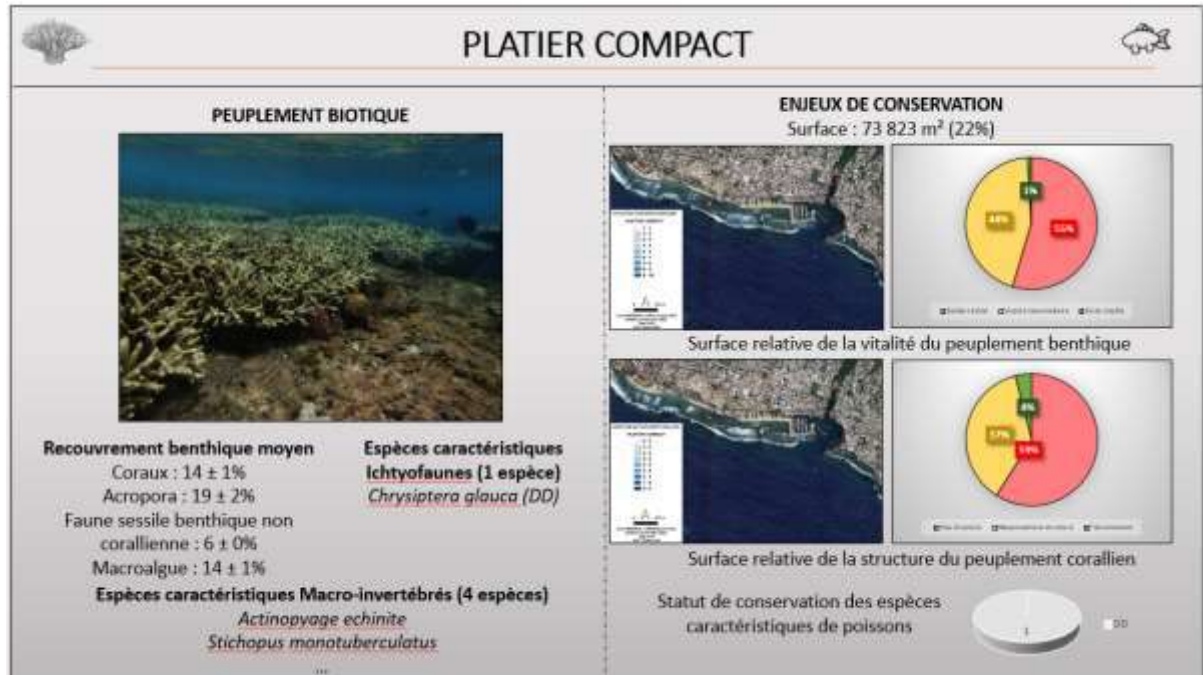
Annexe 6 : Ratio surfacique des métriques relatives à la faune mobile au complexe récifal de Saint-Pierre. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Abondance de macro-invertébrés, B : Diversité du peuplement ichthyologique, C : Abondance et maturité d'*Epinephelus merra*, D : Abondance et maturité des Scarinae



Annexe 7 : Fiches habitats composées, à gauche des informations sur le peuplement biotique avec le recouvrement moyen par groupe taxonomique et à droite des informations sur les enjeux de conservation propre à l'habitat avec la distribution spatiale, indicateurs et la proportion de zones dites « dégradée », « intermédiaire » et « conservée » selon la vitalité du peuplement benthique et la structure du peuplement corallien. [0-4] : Dégradé, ]4-8[ : Intermédiaire, [8 – 10] : Conservé.







## FIN DE PLATIER

### PEUPEMENT BIOTIQUE

**Recouvrement benthique moyen**  
 Coraux : 6 ± 1%  
 Acropora : 12 ± 4%  
 Macroalgue : 2 ± 1%  
 Faune sessile benthique non corallienne : 2 ± 1%

**Espèces caractéristiques Ichtyofaune (12 espèces)**  
 Gomphosus caeruleus (EN)  
 Plectroglyphidodon imparipennis (EN)  
 Plectroglyphidodon dickii (EN)  
 Thalassoma hardwick (EN)

**Espèces caractéristiques Macro-invertébrés (1 espèce)**  
 Heterocentrotus mamillatus

### ENJEUX DE CONSERVATION

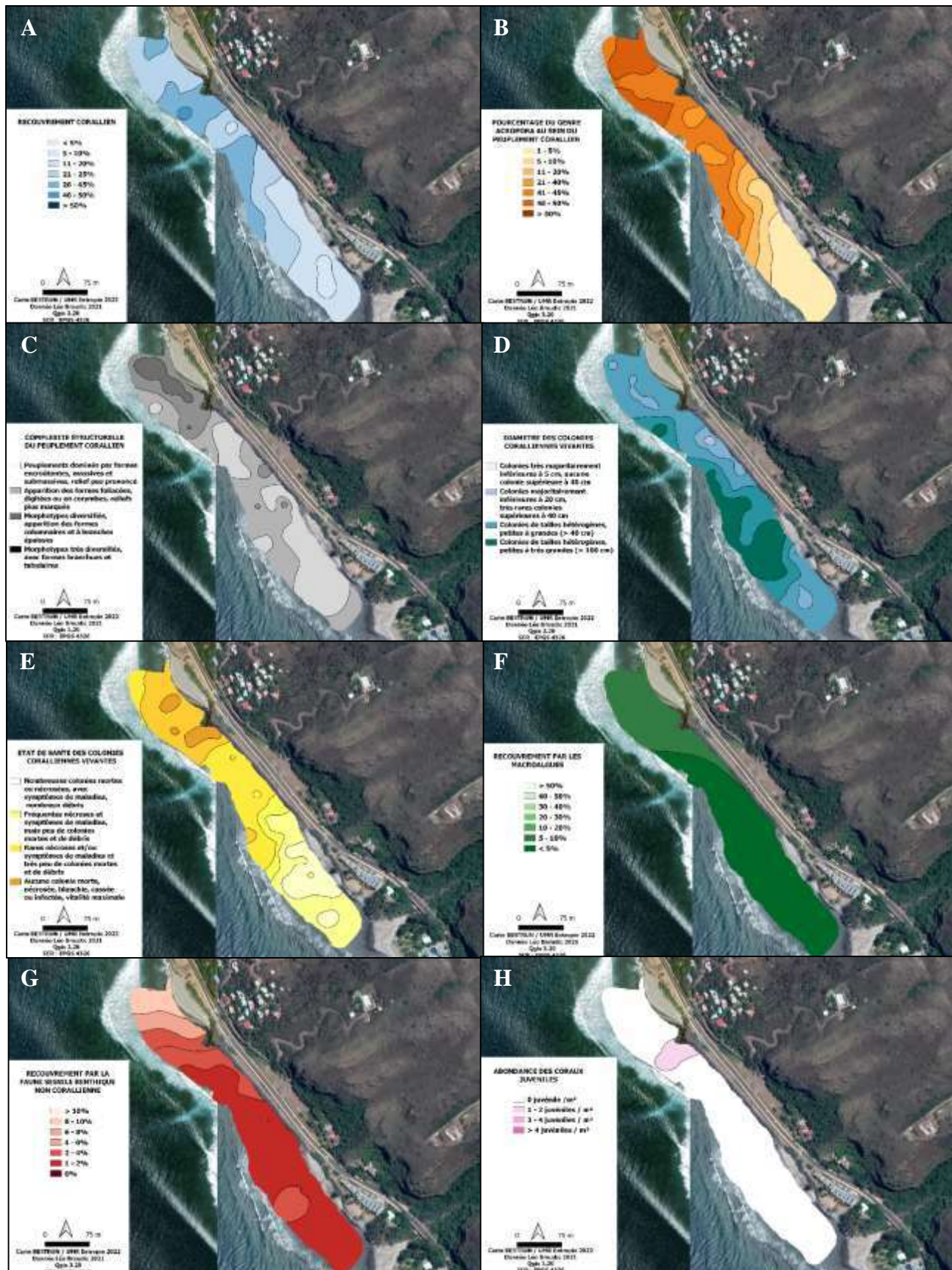
Surface : 7701 m<sup>2</sup> (2%)

**Surface relative de la vitalité du peuplement benthique**

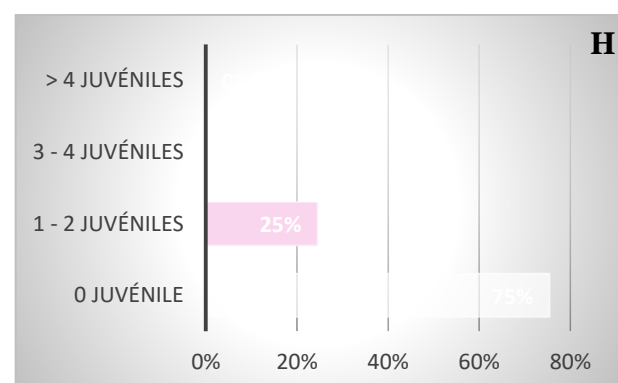
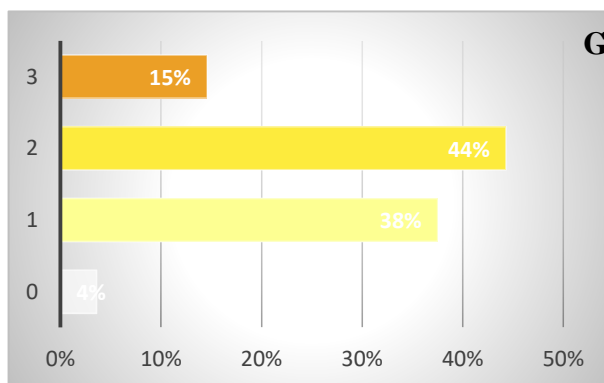
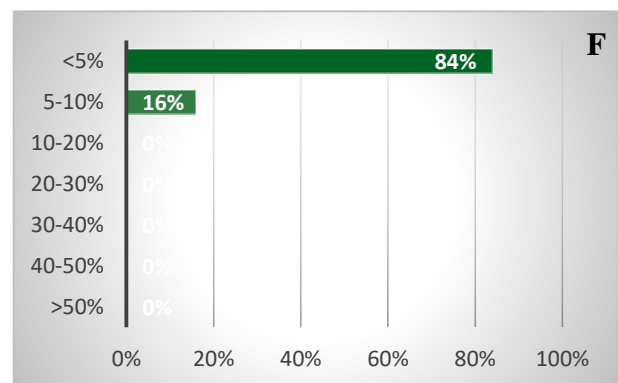
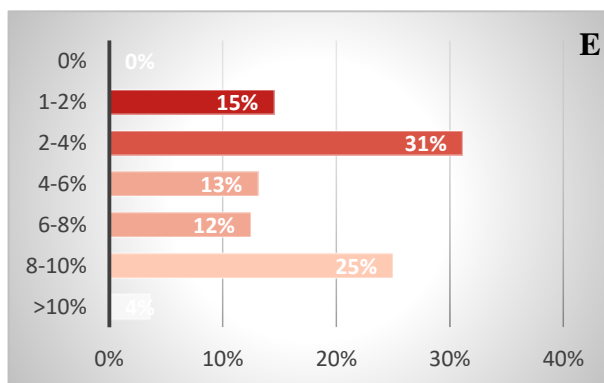
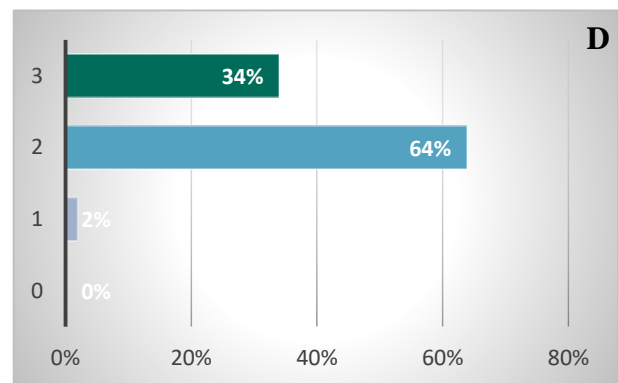
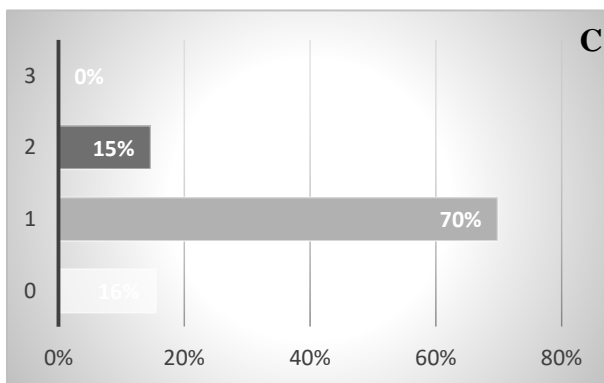
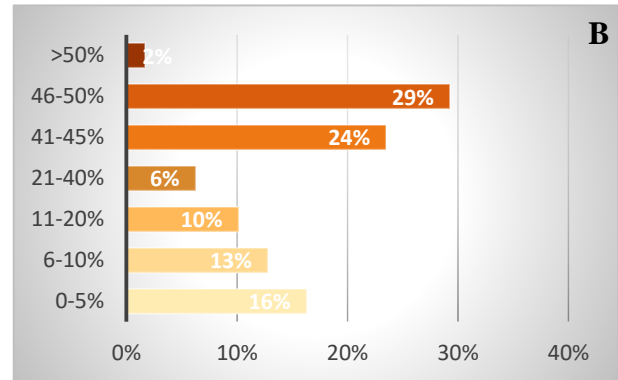
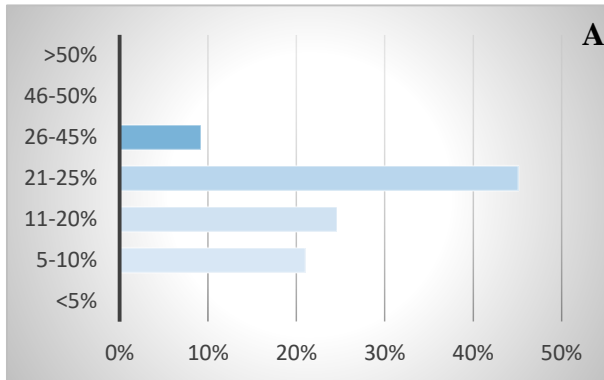
**Surface relative de la structure du peuplement corallien**

**Statut de conservation des espèces caractéristiques de poissons**

Annexe 8 : Distribution surfacique des métriques relatives au peuplement benthique au complexe récifal des Colimaçons. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Recouvrement par les coraux durs, B : Pourcentage du recouvrement du genre Acropora au sein du peuplement corallien, C : Complexité structurelle du peuplement corallien, D : Diamètre des colonies coralliennes vivantes, E : Recouvrement en faune sessile benthique non corallienne, F : Recouvrement par les macroalgues, G : État de santé des colonies coralliennes vivantes, H : Abondance des coraux juvéniles.

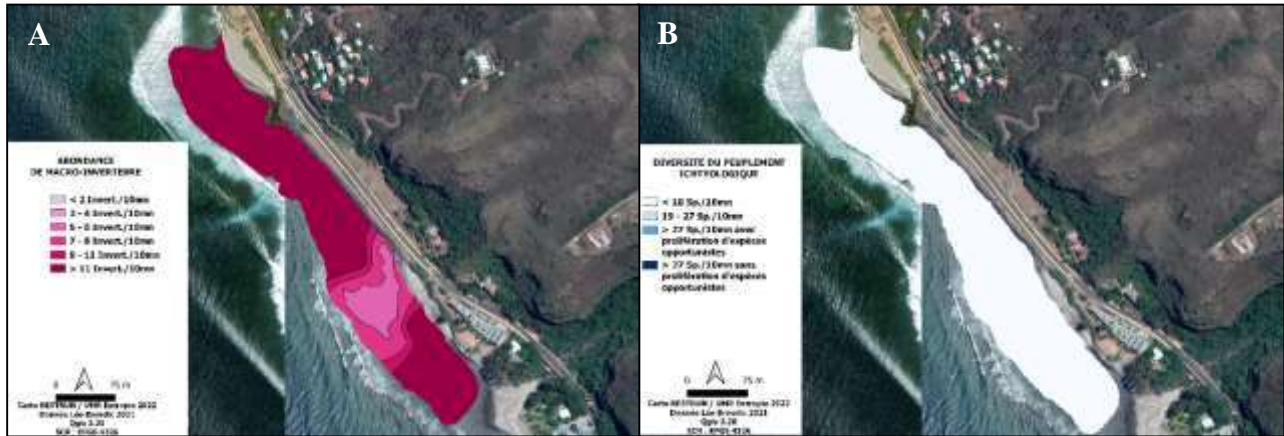


Annexe 9 : Ratio surfacique des métriques relatives au peuplement benthique au complexe récifal des Colimaçons. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Recouvrement par les coraux durs, B : Pourcentage du recouvrement du genre Acropora au sein du peuplement corallien, C : Complexité structurelle du peuplement corallien, D : Diamètre des colonies coralliennes vivantes, E : Recouvrement en faune sessile benthique non corallien, F : Recouvrement par les macroalgues, G : État de santé des colonies coralliennes vivantes, H : Abondance des coraux juvéniles.

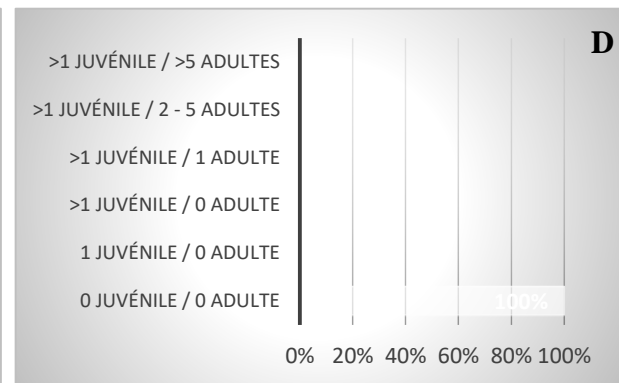
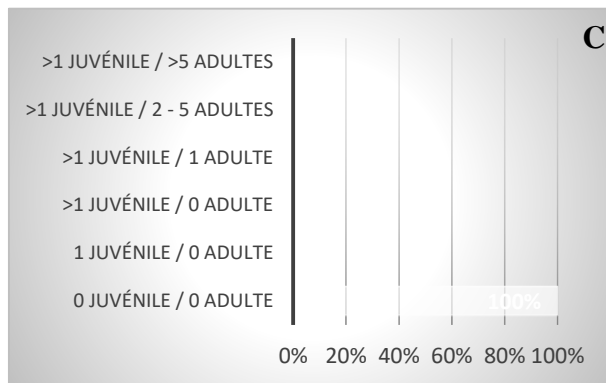
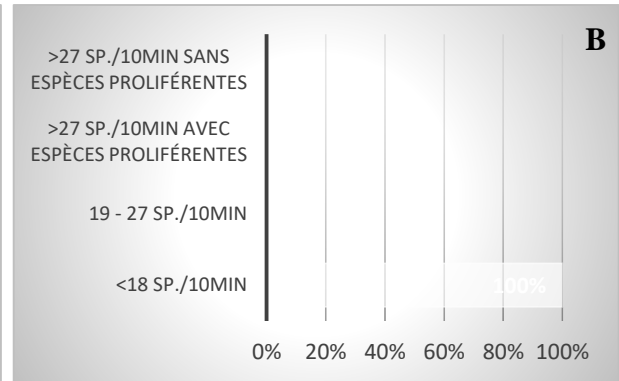
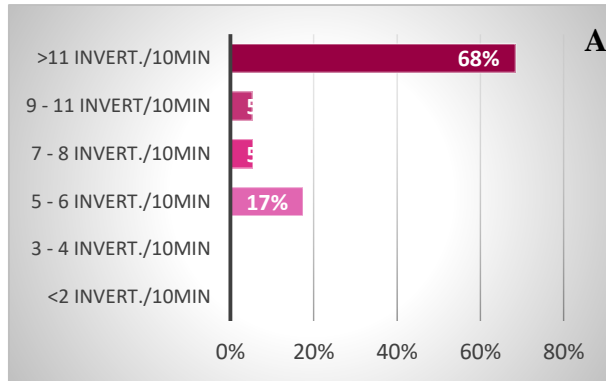




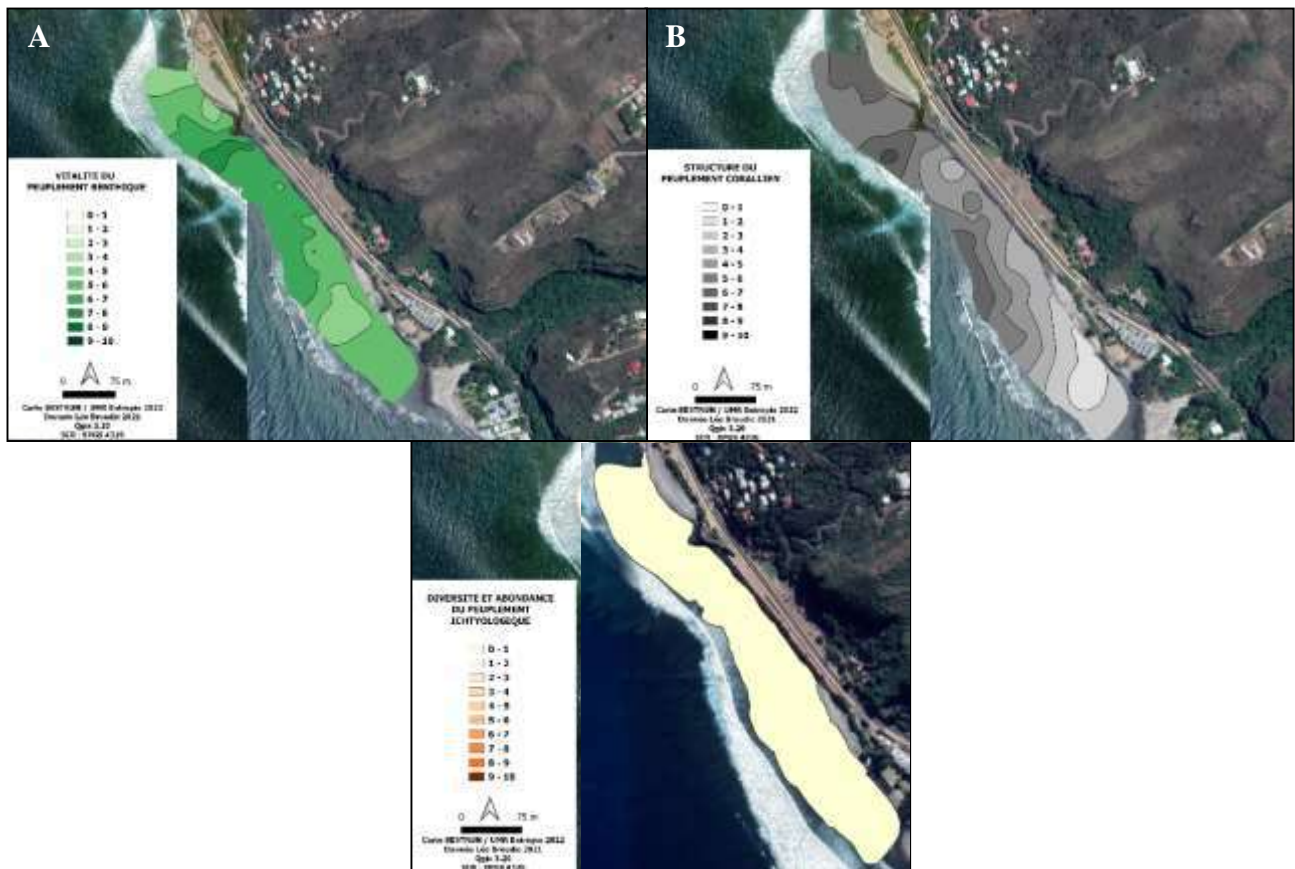
Annexe 10 : Distribution surfacique des métriques relatives à la faune mobile au complexe récifal des Colimaçons. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Abondance de macro-invertébrés, B : Diversité du peuplement ichthyologique. *Epinephelus merra* et les Scarinae n'ont pas été observés de la zone.



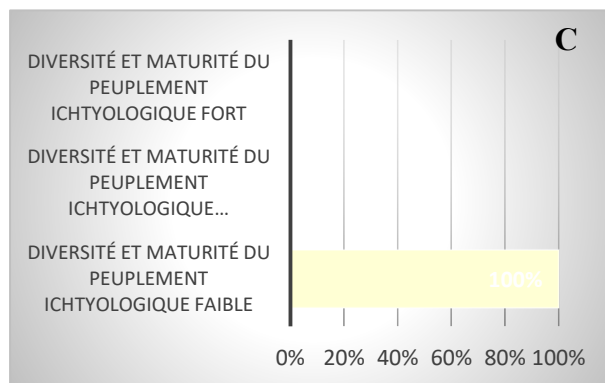
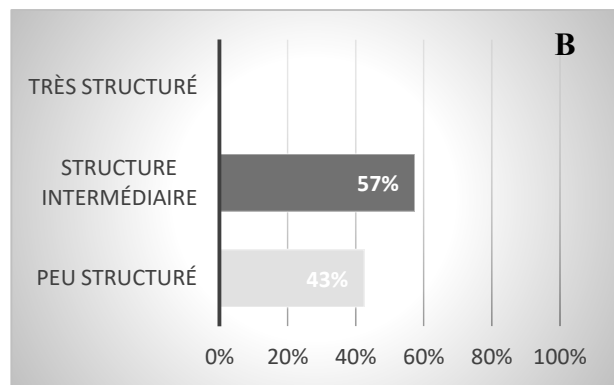
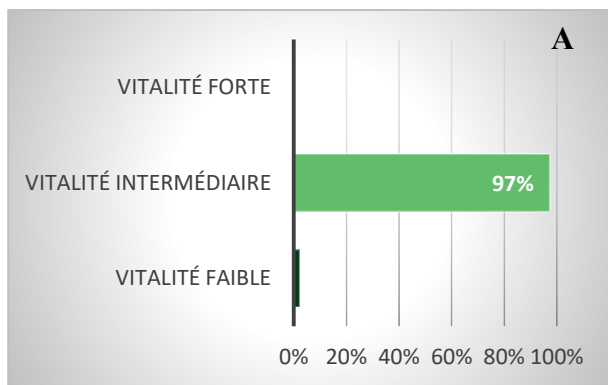
Annexe 11 : Ratio surfacique des métriques relatives à la faune mobile au complexe récifal des Colimaçons. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Abondance de macro-invertébrés, B : Diversité du peuplement ichtyologique, C : Abondance et maturité d'*Epinephelus merra*, D : Abondance et maturité des Scarinae.



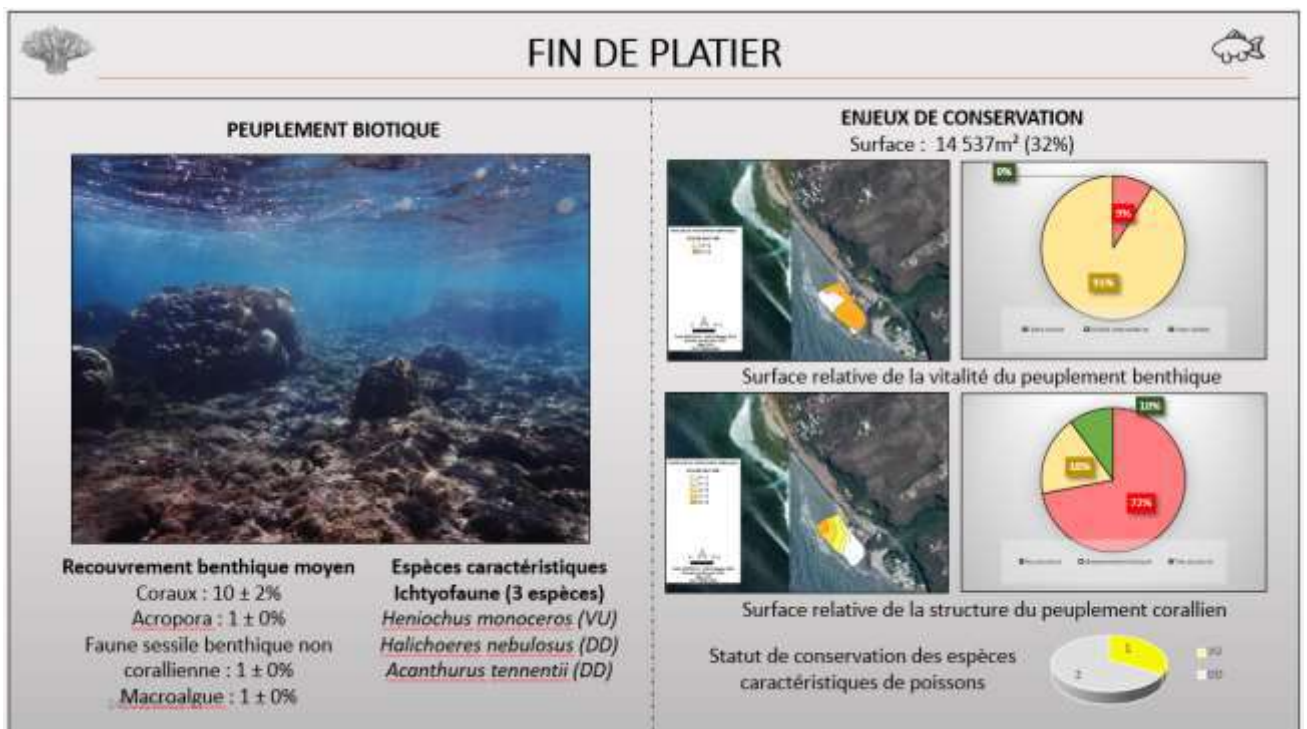
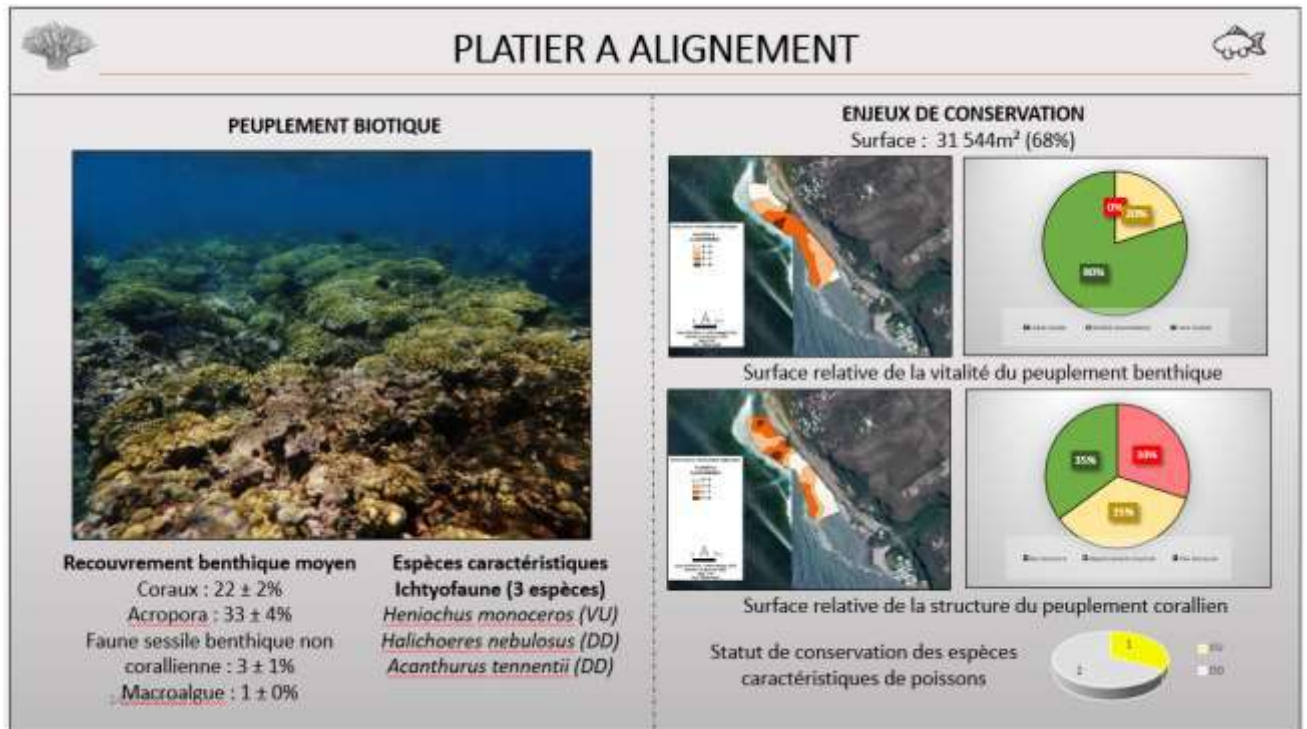
Annexe 12 : Distribution surfacique des indicateurs CORRAM au complexe récifal des Colimaçons. A : Vitalité du peuplement benthique, un 10/10 correspond à une zone avec une absence de faune sessile benthique corallienne, une quasi-absence de macroalgue (<5% du recouvrement benthique), une absence de débris, de maladie ou autres stress sur les colonies coralliennes et une succession du peuplement corallien par la présence de coraux juvénile, B : Structure du peuplement corallien, un 10/10 correspond à un recouvrement corallien et un recouvrement relatif du genre *Acropora* au sein de la communauté corallienne supérieure à 50%, une hétérogénéité dans les classes de taille des colonies coralliennes et une forte complexité structurale, avec une dominance de forme branchue et tabulaire. C : Diversité et abondance du peuplement ichthyologique, un 10/10 correspond à une forte diversité spécifique au sein des six familles de poissons cibles (>28 sp.) et à une forte abondance et maturité des Scarinae et des *Epinephelus merra* (>5 individus adultes). Les couleurs claires représentent des estimations de l'indicateur considéré faible et les couleurs foncées représentent des estimations de l'indicateur fort.



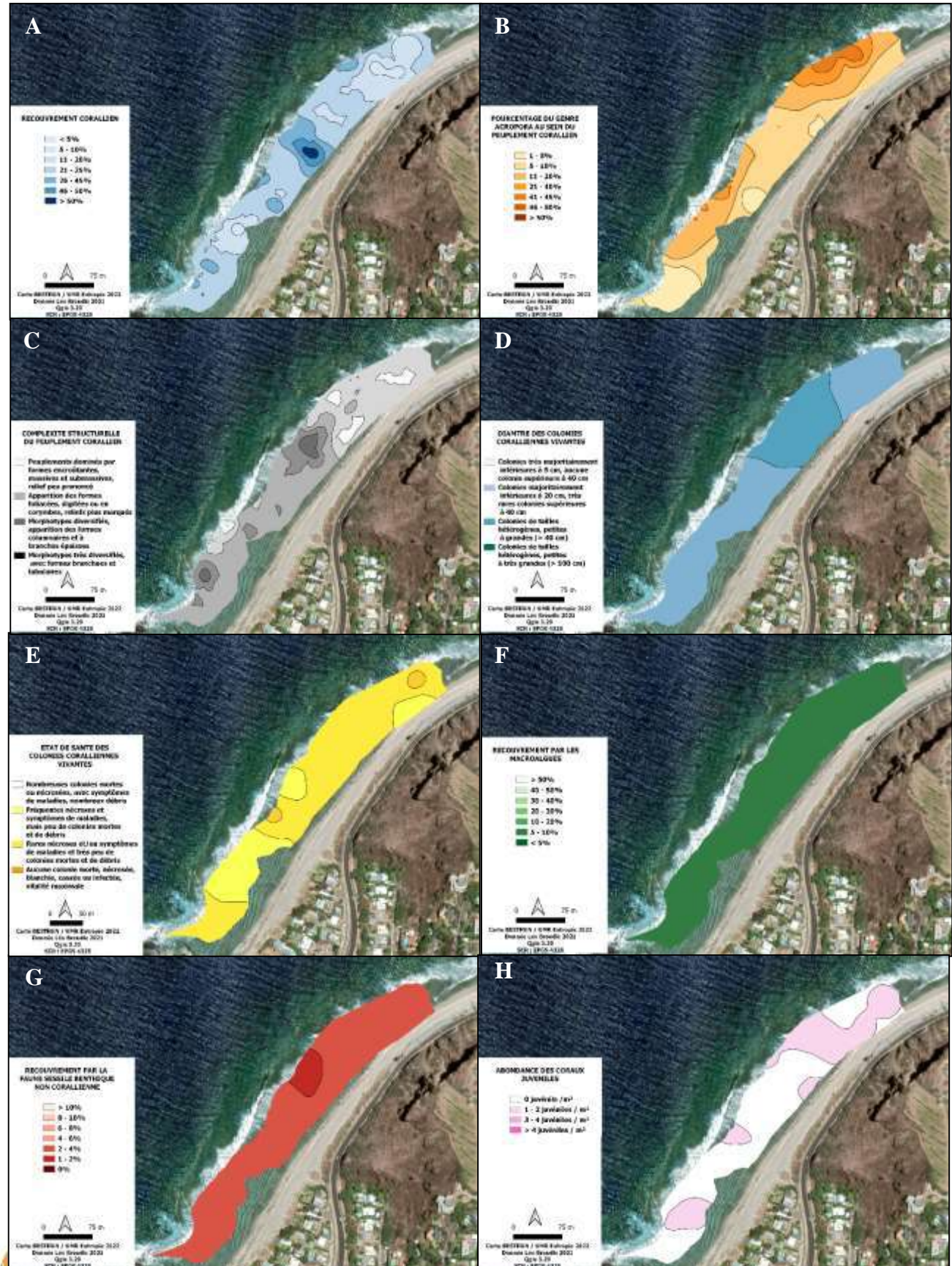
Annexe 13 : Ratio surfacique des indicateurs CORRAM au complexe récifal des Colimaçons. A : Vitalité du peuplement benthique, un 10/10 correspond à une zone avec une absence de faune sessile benthique corallienne, une quasi-absence de macroalgue (<5% du recouvrement benthique), une absence de débris, de maladie ou autres stress sur les colonies coralliennes et une succession du peuplement corallien par la présence de coraux juvénile, B : Structure du peuplement corallien, un 10/10 correspond à un recouvrement corallien et un recouvrement relatif du genre *Acropora* au sein de la communauté corallienne supérieure à 50%, une hétérogénéité dans les classes de taille des colonies coralliennes et une forte complexité structurale, avec une dominance de forme branchue et tabulaire. C : Diversité et abondance du peuplement ichthyologique, un 10/10 correspond à une forte diversité spécifique au sein des six familles de poissons cibles (>28 sp.) et à une forte abondance et maturité des Scarinae et des *Epinephelus merra* (>5 individus adultes). Les couleurs claires représentent des estimations de l'indicateur considéré faible et les couleurs foncées représentent des estimations de l'indicateur fort.



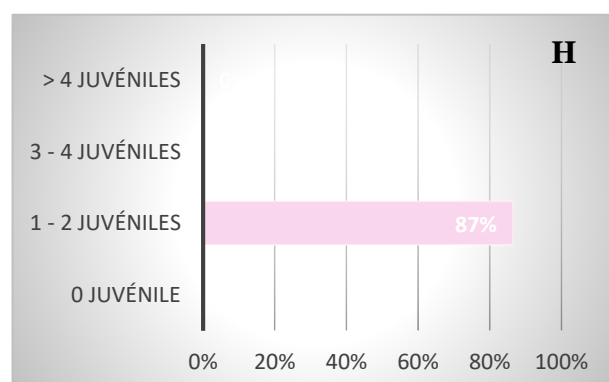
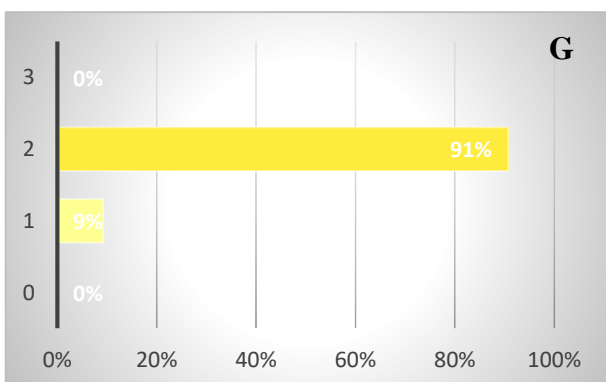
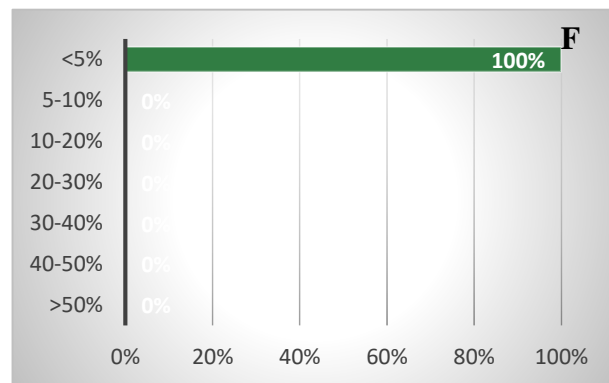
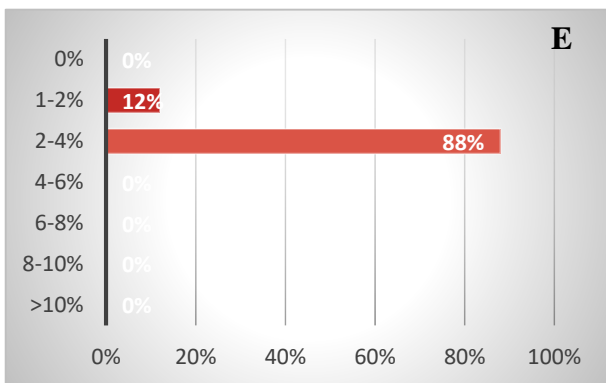
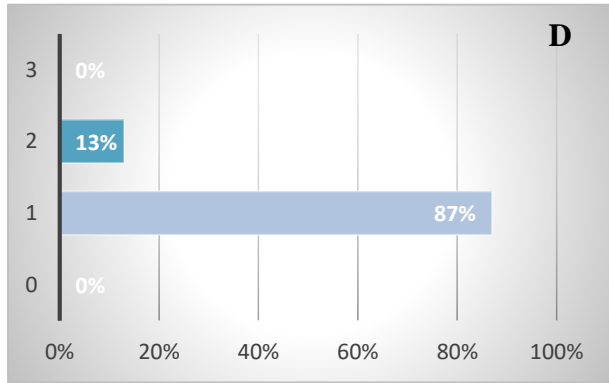
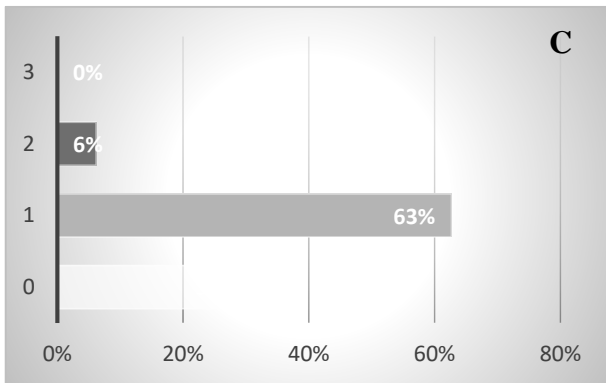
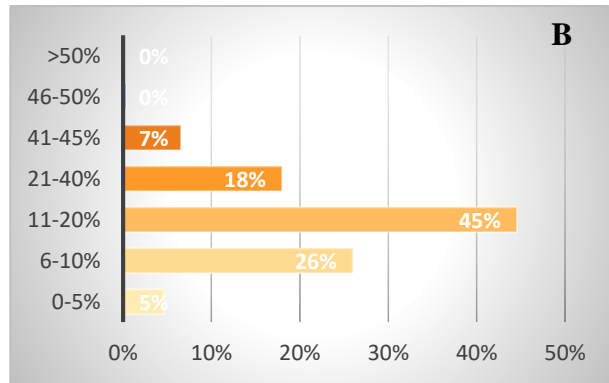
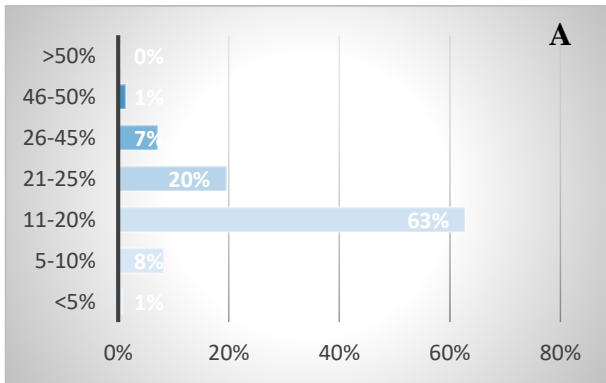
Annexe 14 : Fiches habitats composées, à gauche des informations sur le peuplement biotique avec le recouvrement moyen par groupe taxonomique et à droite des informations sur les enjeux de conservation propre à l'habitat avec la distribution spatiale, indicateurs et la proportion de zones dites « dégradée », « intermédiaire » et « conservée » selon la vitalité du peuplement benthique et la structure du peuplement corallien. [0-4] : Dégradé, ]4-8[ : Intermédiaire, [8 – 10] : Conservé.



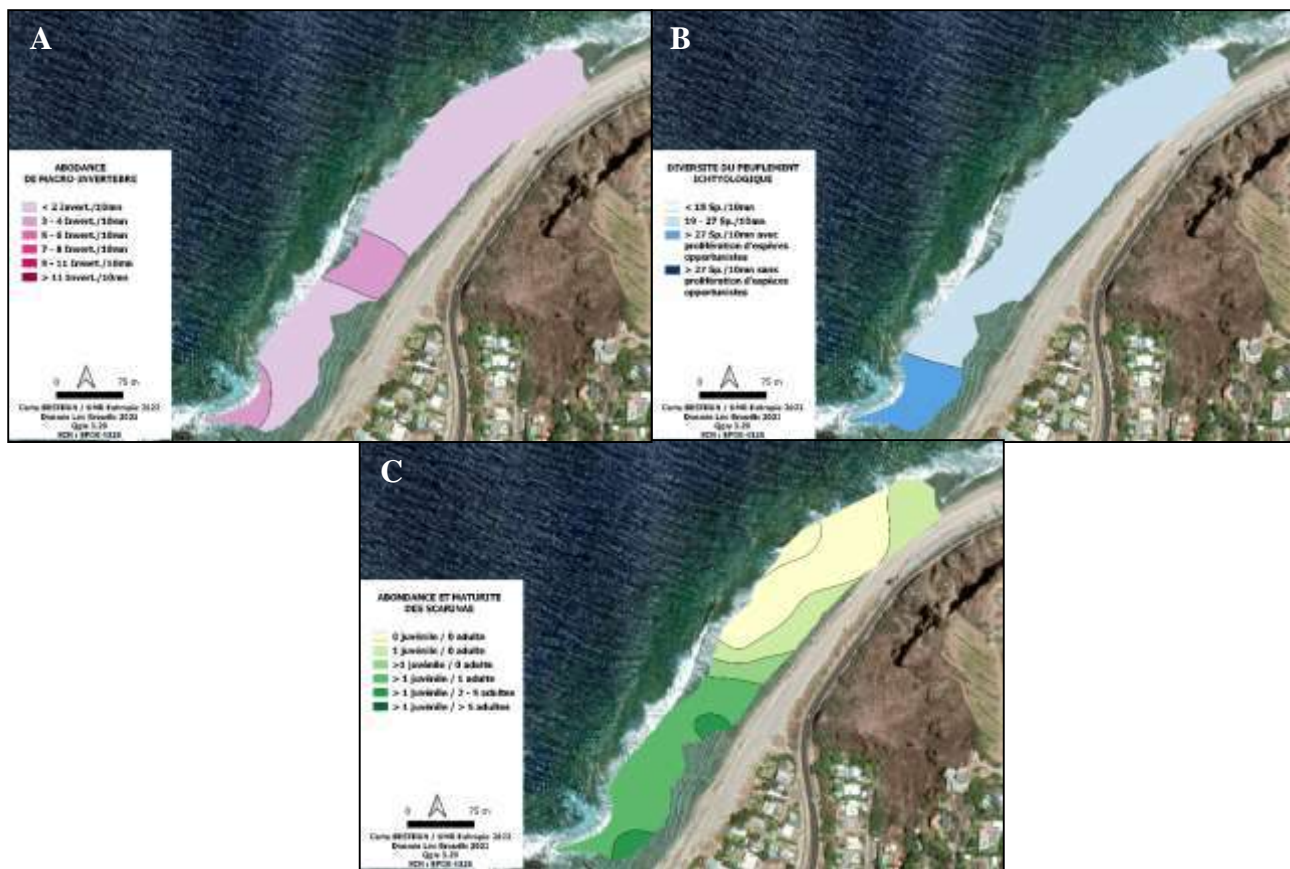
Annexe 15 : Distribution surfacique des métriques relatives au peuplement benthique au complexe récifal de Cap Champagne. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Recouvrement par les coraux durs, B : Pourcentage du recouvrement du genre *Acropora* au sein du peuplement corallien, C : Complexité structurale du peuplement corallien, D : Diamètre des colonies coralliennes vivantes, E : Recouvrement en faune sessile benthique non corallienne, F : Recouvrement par les macroalgues, G : État de santé des colonies coralliennes vivantes, H : Abondance des coraux juveniles.



Annexe 16 : Ratio surfacique des métriques relatives au peuplement benthique au complexe récifal de Cap Champagne. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Recouvrement par les coraux durs, B : Pourcentage du recouvrement du genre Acropora au sein du peuplement corallien, C : Complexité structurale du peuplement corallien, D : Diamètre des colonies coralliennes vivantes, E : Recouvrement en faune sessile benthique non corallien, F : Recouvrement par les macroalgues, G : État de santé des colonies coralliennes vivantes, H : Abondance des coraux juvéniles.

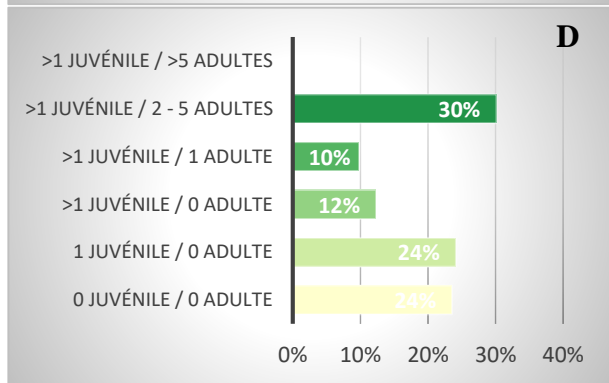
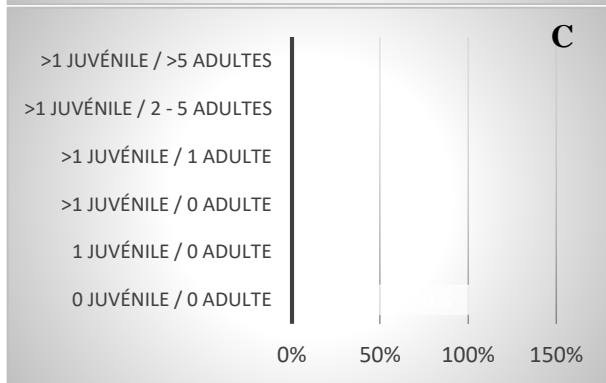
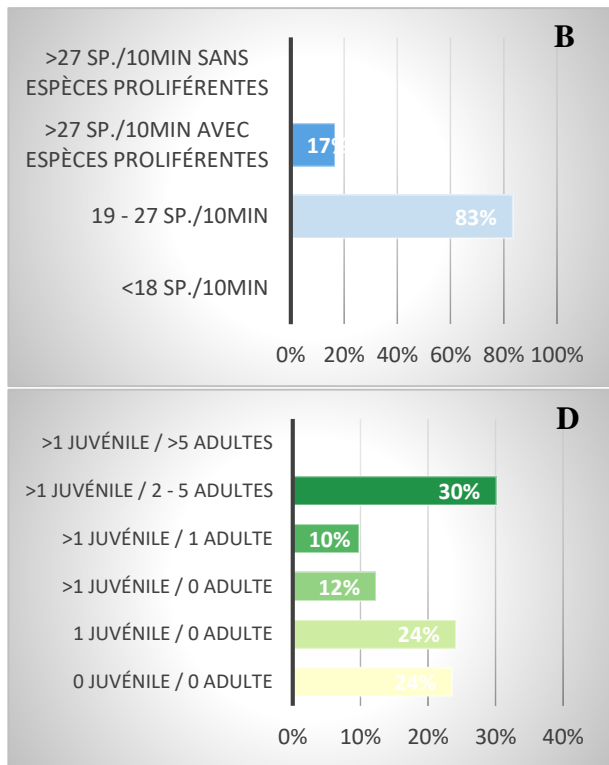
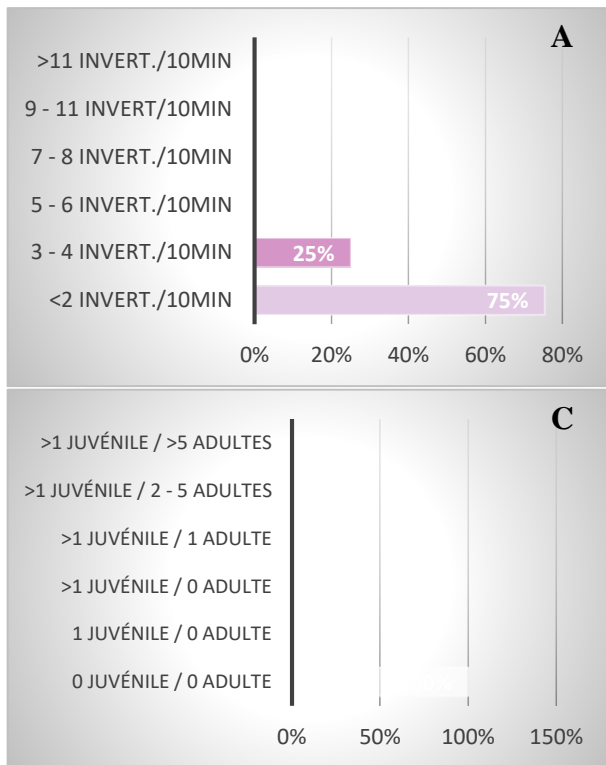


Annexe 17 : Distribution surfacique des métriques relatives à la faune mobile au complexe récifal de Cap Champagne. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Abondance de macro-invertébrés, B : Diversité du peuplement ichthyologique. C : Abondance et maturité des Scarinae. *Epinephelus merra* n'a pas été observé de la zone.

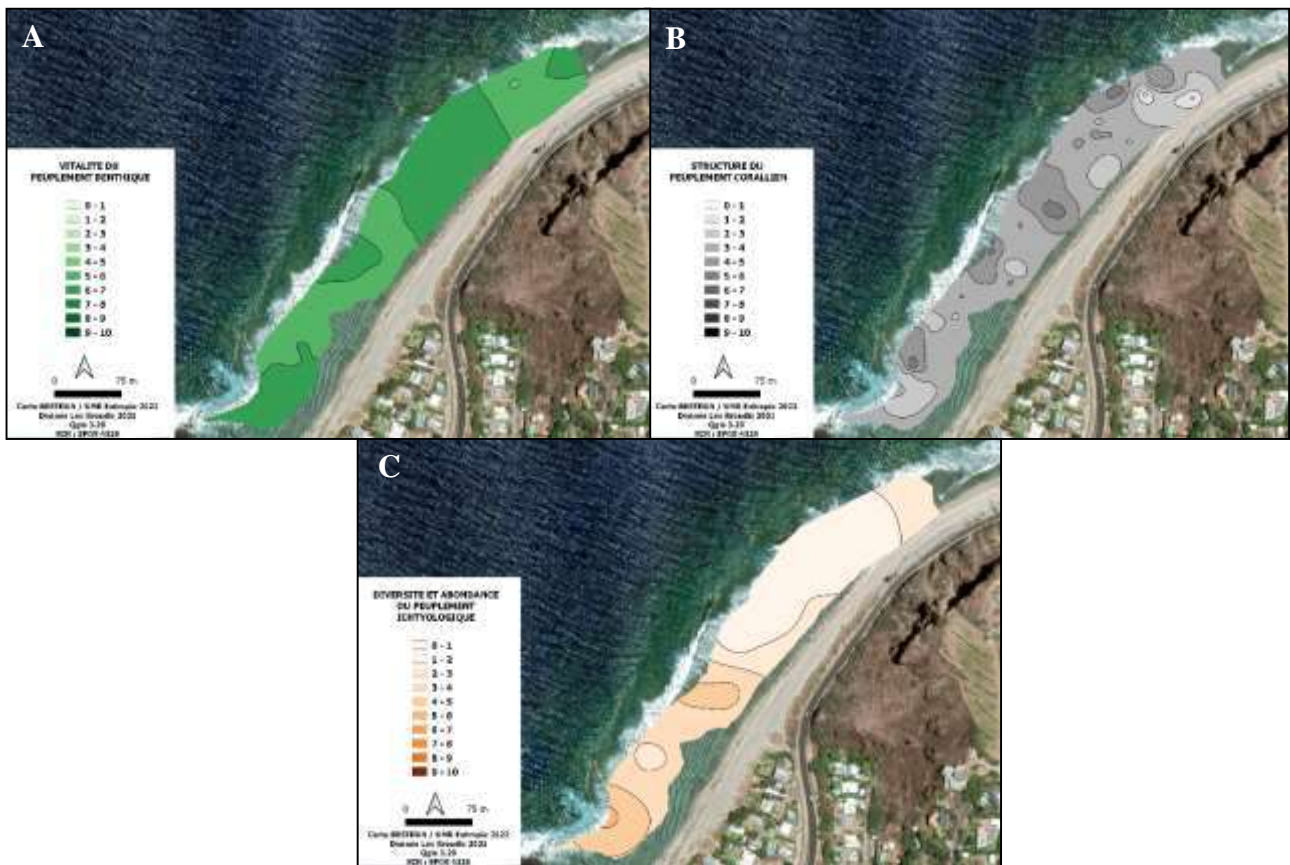




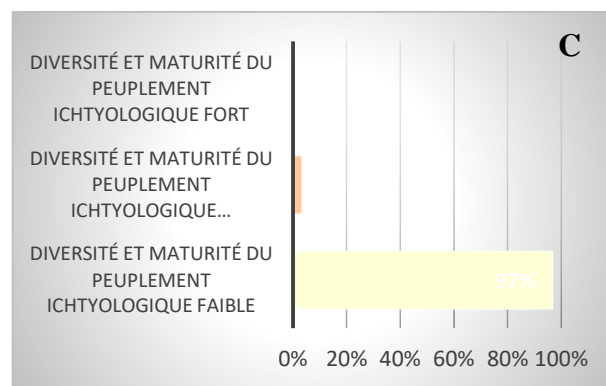
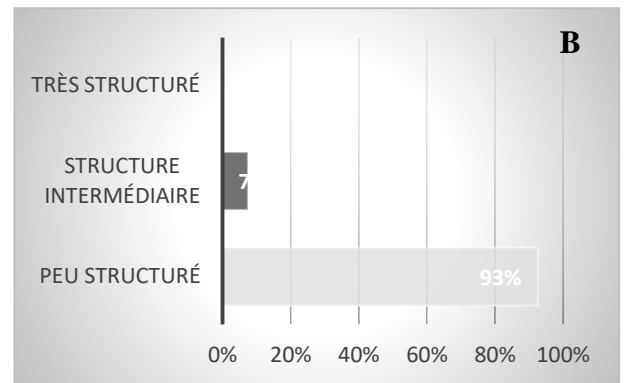
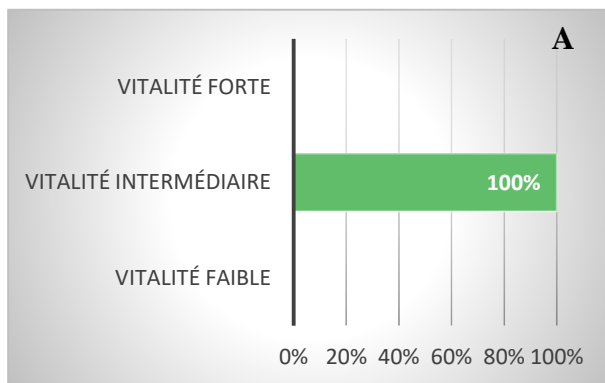
Annexe 18 : Ratio surfacique des métriques relatives à la faune mobile au complexe récifal de Cap Champagne. Les couleurs claires traduisent un état dégradé de la métrique et les couleurs foncées traduisant un état conservé de la métrique. A : Abondance de macro-invertébrés, B : Diversité du peuplement ichthyologique. C : Abondance et maturité d'*Epinephelus merra*, D : Abondance et maturité des Scarinea.



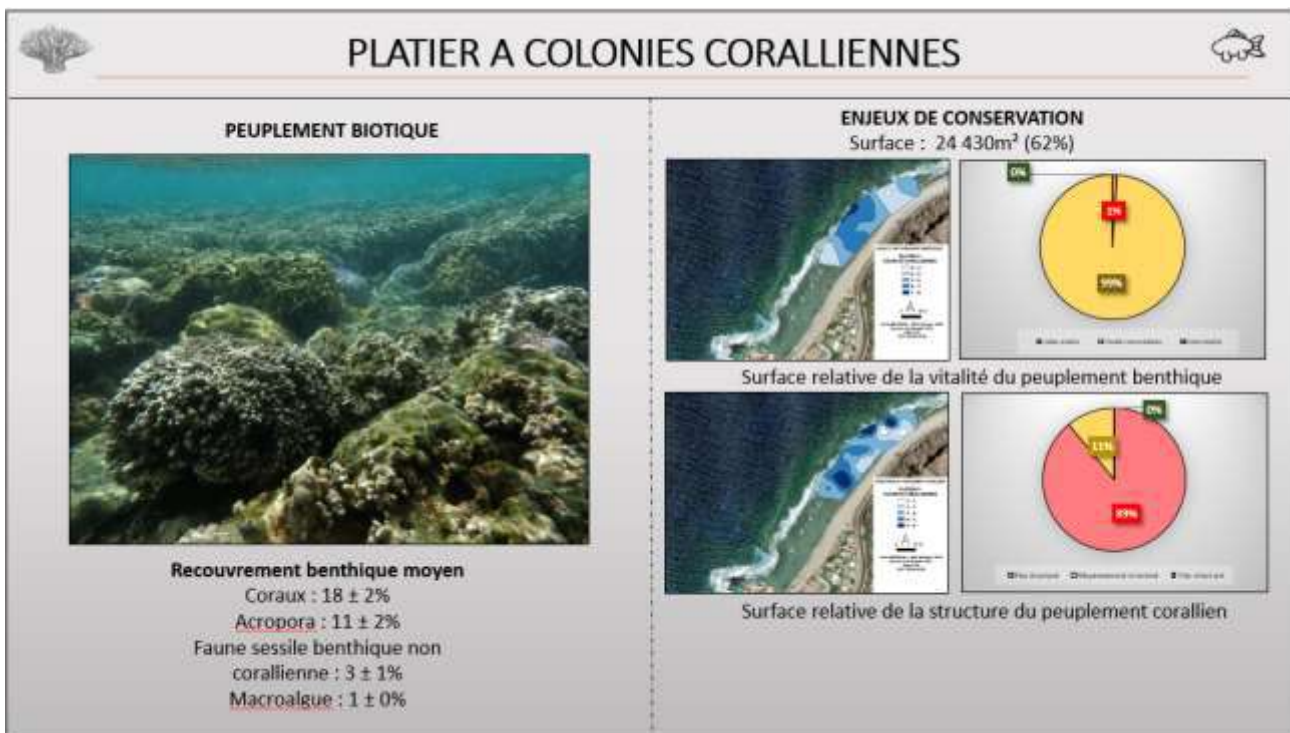
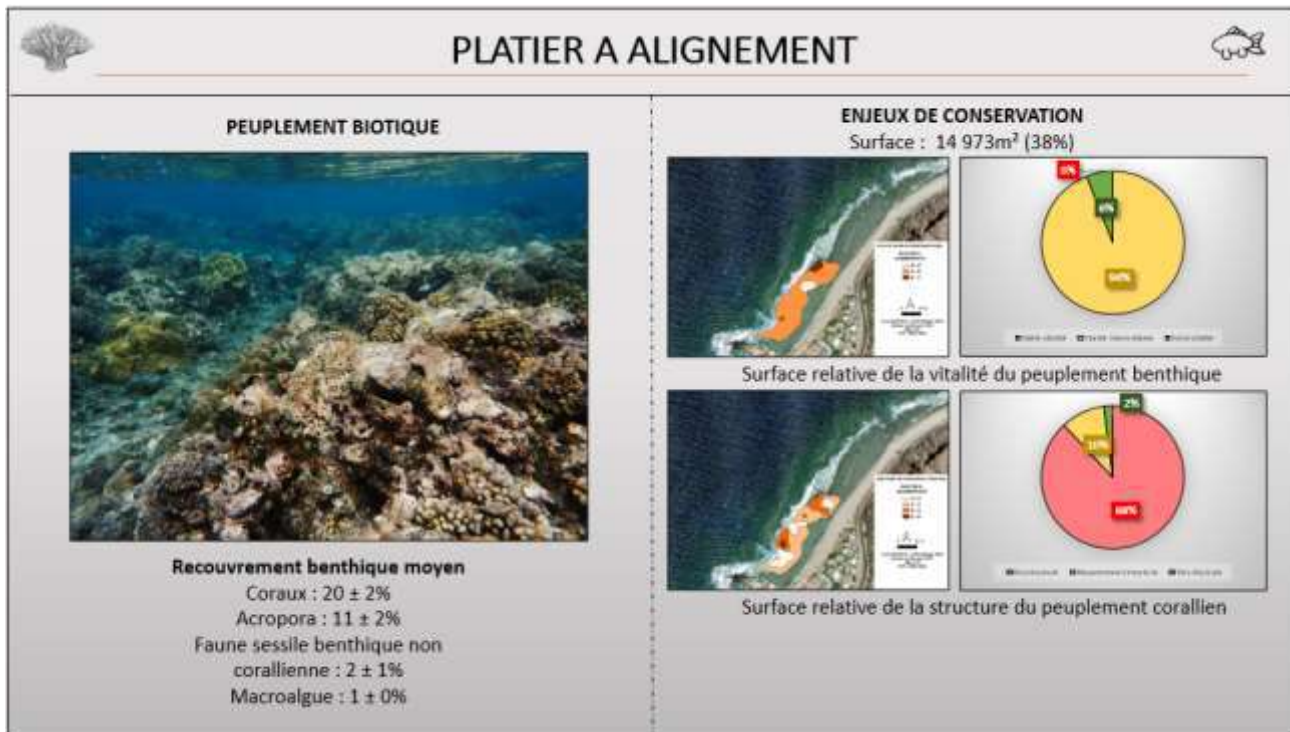
Annexe 19 : Distribution surfacique des indicateurs CORRAM au complexe récifal de Cap Champagne. A : Vitalité du peuplement benthique, un 10/10 correspond à une zone avec une absence de faune sessile benthique corallienne, une quasi-absence de macroalgue (<5% du recouvrement benthique), une absence de débris, de maladie ou autres stress sur les colonies coralliennes et une succession du peuplement corallien par la présence de coraux juvénile, B : Structure du peuplement corallien, un 10/10 correspond à un recouvrement corallien et un recouvrement relatif du genre *Acropora* au sein de la communauté corallienne supérieure à 50%, une hétérogénéité dans les classes de taille des colonies coralliennes et une forte complexité structurelle, avec une dominance de forme branchue et tabulaire. C : Diversité et abondance du peuplement ichthyologique, un 10/10 correspond à une forte diversité spécifique au sein des six familles de poissons cibles (>28 sp.) et à une forte abondance et maturité des Scarinae et des *Epinephelus merra* (>5 individus adultes). Les couleurs claires représentent des estimations de l'indicateur considéré faible et les couleurs foncées représentent des estimations de l'indicateur fort.



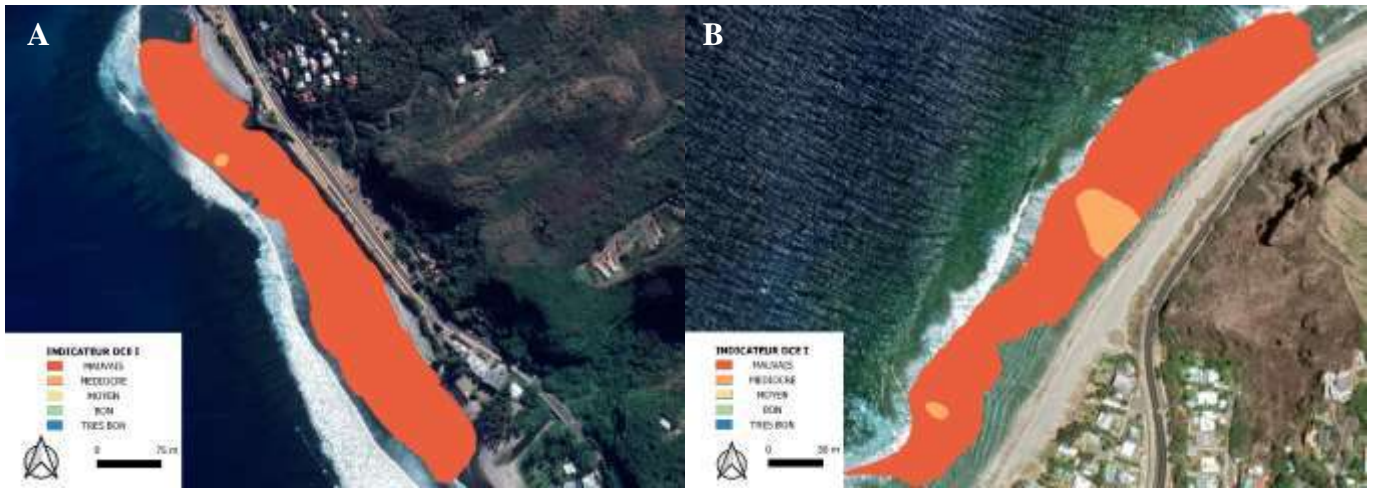
Annexe 20 : Ratio surfacique des indicateurs CORRAM au complexe récifal de Cap Champagne. A : Vitalité du peuplement benthique, B : Structure du peuplement corallien, C : Diversité et abondance du peuplement ichthyologique



Annexe 21 : Fiches habitats composées, à gauche des informations sur le peuplement biotique avec le recouvrement moyen par groupe taxonomique et à droite des informations sur les enjeux de conservation propre à l'habitat avec la distribution spatiale, indicateurs et la proportion de zones dites « dégradée », « intermédiaire » et « conservée » selon la vitalité du peuplement benthique et la structure du peuplement corallien. [0-4] : Dégradé, ]4-8[ : Intermédiaire, [8 – 10] : Conservé.



Annexe 22 : Distribution surfacique de l'indicateur DCE I. A : complexe récifal des Colimaçons et B : complexe récifal de Cap Champagne.



Annexe 23 : Ratio surfacique de l'indicateur DCE I. A : complexe récifal des Colimaçons et B : complexe récifal de Cap Champagne.

