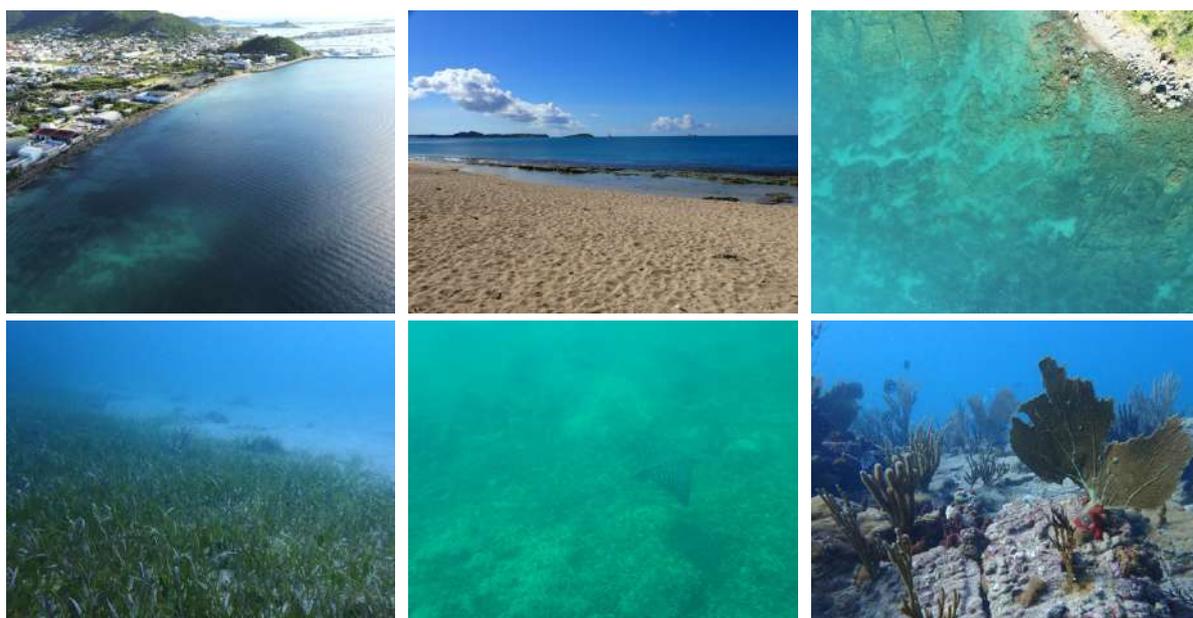




CARTOGRAPHIE ET ANALYSE DE L'ETAT DE CONSERVATION DES HABITATS MARINS DANS LES BAIES DE MARIGOT, GRAND-CASE ET CUL DE SAC SUR L'ILE DE SAINT-MARTIN



Rapport d'étude
VERSION FINALE



2102_02



PROJET FINANCÉ
par le fonds européen
de développement régional
*Dans le cadre de REACT-EU :
dispositif de relance de l'Union en
réponse à la pandémie de COVID-19*





Étude pour le compte de :



ETS PORTUAIRE DE ST MARTIN

Port de Galisbay Bienvenue - Baie de la Potence
97067 Saint Martin Cedex
Tel: 0590 87 82 60 - Fax: 0590 87 87 77
Courriel : Alberic.Ellis@portdemarigot.com
Site : www.portdemarigot.com

Rapport à citer sous la forme :

Impact Mer & i-Sea, 2021. Cartographie et analyse de l'état de conservation des habitats marins dans les baies de Marigot Grand Case et Cul-de-Sac sur l'île de Saint-Martin. Rapport pour : EPSM, 84 pp + annexes

Rédaction :

Guillaume Tollu – Impact Mer
Benoit Beguet - iSea
Catherine Desrosiers – Impact Mer
Cécile Curti - iSea

Coordination générale :

Guillaume Tollu
Virginie Lafon pour i-Sea

Terrain :

Catherine Desrosiers – Guillaume Tollu

Cartographie :

Benoit Beguet
Guillaume Tollu

Crédits photographiques :

Catherine Desrosiers, Guillaume Tollu



*Remerciements : en particulier à l'équipe de la RNNSM
pour leur aide précieuse, les apports bibliographiques, conseils et avis divers*



AVEC



Table des Matières

CONTEXTE	1
1 APPROCHE METHODOLOGIQUE	2
1.1 MISE A JOUR DE LA CARTE DES HABITATS MARINS.....	2
1.1.1 <i>Objectif.....</i>	2
1.1.2 <i>Données et méthodes.....</i>	2
1.1.3 <i>Identification des données</i>	11
1.1.4 <i>Ressource en ligne.....</i>	11
1.1.5 <i>Contact pour la ressource</i>	11
1.1.6 <i>Mot Clé.....</i>	11
1.1.7 <i>Emprise géographique.....</i>	12
1.1.8 <i>Résolution spatiale.....</i>	12
1.1.9 <i>Généalogie.....</i>	12
1.1.10 <i>Contraintes en matière d'accès et d'utilisation.....</i>	13
1.1.11 <i>Point de contact des métadonnées.....</i>	13
1.2 ANALYSE DE L'ETAT DE CONSERVATION	13
1.2.1 <i>Stations de suivi de l'état de conservation.....</i>	13
1.2.2 <i>Méthodologie déployée.....</i>	17
2 RESULTATS ET ELEMENTS DE DISCUSSION	23
2.1 RESULTATS DU VOLET CARTOGRAPHIQUE	23
2.1.1 <i>Évaluation de la classification.....</i>	23
2.1.2 <i>Résultat intermédiaire : détection des bateaux.....</i>	25
2.1.3 <i>Présentation des résultats cartographiques.....</i>	25
2.1.4 <i>Comparaison I-Sea 2020 et Pareto (2013).....</i>	32
2.2 ÉTAT DE CONSERVATION DES BIOCENOSSES BENTHIQUES DANS LES 3 BAIES.....	34
2.2.1 <i>Baie de Marigot.....</i>	35
2.2.2 <i>Baie de Grand-Case</i>	70
2.2.3 <i>Baie de Cul-de-Sac</i>	75
3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	79
3.1 CARTOGRAPHIE (I-SEA)	79
3.2 ÉTAT DE SANTE DES BIOCENOSSES DES BAIES CONCERNEES PAR LES PROJETS DE ZMEL (IMPACT MER) 79	
3.2.1 <i>Baie du Marigot.....</i>	79
3.2.2 <i>Baie de Grand-Case.....</i>	81
3.2.3 <i>Baie de Cul-de-Sac</i>	81
3.2.4 <i>Réflexion sur les outils de diagnostic à mettre en œuvre pour la suite des projets de l'EPSM, dans le cadre de suivis dans des herbiers très hétérogènes.....</i>	82
BIBLIOGRAPHIE.....	83
ANNEXES	85
ANNEXE 1 : ARRETE DU 25 AVRIL 2017 - LISTE DES CORAUX PROTEGES	86
ANNEXE 2 : LIVRABLES COMPLEMENTAIRES AU PRESENT RAPPORT.....	87
ANNEXE 3 : RAPPORT I-SEA DECEMBRE 2021.....	88

Table des figures

Figure 1 Localisation des secteurs concernés par l'étude. A : Baie de Marigot, B : Baie de Grand-Case, C : Baie de Cul-de-Sac (au Nord), © Pléiades 2019, 2020.....	1
Figure 2. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain (format point)	3
Figure 3. Série d'images satellite utilisée pour la cartographie.....	7
Figure 4. Carte des zonations correspondantes aux différentes configurations de couvertures nuageuses (mod= modèle, 1, 2, 3, ou 4 = nombre d'images utilisées dans le modèle, img= image)	8
Figure 5. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Marigot.....	9
Figure 6. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Grand-Case	9
Figure 7. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Cul-de-Sac	10
Figure 8. Remora rencontré sur l'herbier de Marigot.....	13
Figure 9. Carte de localisation des stations de suivi de la baie de Marigot.....	14
Figure 10. Carte de localisation des stations de suivi (numéros) de la baie de Grand-Case	15
Figure 11. Carte de localisation des stations de suivi (étoiles) de la RNSM dans la baie de Grand-Case	15
Figure 12. Carte de localisation des stations de suivi de la baie de Cul-de-Sac.....	16
Figure 13. Cartes des radiales d'observation et des biocénoses / états de santé de Pinel / Petite Clef (Schmitt 2013)	16
Figure 14. Schéma de l'organisation de l'expertise sur radiales	19
Figure 15. Matrice de confusion obtenue pour le modèle à 4 images, mode déséquilibré. Précision Globale 98%	24
Figure 16. Détection automatique des bateaux sur une région d'intérêt pour les 4 scènes Pléiades considérées	25
Figure 17. Cartographie des habitats marins de la Baie de Marigot (Saint-Martin) par analyse d'images satellite	26
Figure 18. Cartographie des habitats marins de la Baie de Grand-Case (Saint-Martin) par analyse d'images satellite	27
Figure 19. Cartographie des habitats marins de la Baie de Cul-de-Sac (Saint-Martin) par analyse d'images satellite	28
Figure 20. Cartographie simplifiée des habitats marins de la Baie de Marigot (Saint-Martin) par analyse d'images satellite.....	29
Figure 21. Cartographie simplifiée des habitats marins de la Baie de Grand-Case (Saint-Martin) par analyse d'images satellite.....	30
Figure 22. Cartographie simplifiée des habitats marins de la Baie de Cul-de-Sac (Saint-Martin) par analyse d'images satellite.....	31
Figure 23. Comparaison des cartographies de Pareto 2013 (à gauche) et i-Sea 2020 (à droite) sur la baie de Marigot	32
Figure 24. Localisation des relevés de terrain 'Plaine sédimentaire' sur les cartographies I-Sea 2020 et Pareto (2013).....	33
Figure 25. Observation des images d'archives 2013, 2017 et 2018 pour la baie de Marigot.....	33
Figure 26. Images Pléiades de 2020 et 2013 superposées, à droite, aux étendus « plaine sédimentaire sableuse à sablo-vaseuse » prédite à partir de la série d'images Pléiades 2020-2021 aux images de Pléiades 2013 et 2020.....	34
Figure 27. Composition de la couverture benthique de la station #SXM01 – Pointe du Bluff.....	35
Figure 28. Composition de la couverture benthique de la station #SXM01 – Pointe du Bluff.....	36
Figure 29. Illustrations de la station #SXM01 – Pointe du Bluff.....	37
Figure 30. Composition de la couverture benthique de la station #SXM02 – Banc de Médée	38
Figure 31. Composition de la couverture benthique de la station #SXM02 – Banc de Médée	39
Figure 32. Illustrations de la station #SXM02 – Banc de Médée	40
Figure 33. Illustrations de la station #SXM03 – Pointe Arago.....	42
Figure 34. Illustrations de la station #SXM03 – Galisbay.....	43

Figure 35. Illustrations de la station #SXM04 « Port »	45
Figure 36. Illustrations de la station #SXM05 « Amont »	47
Figure 37. Illustrations de la station #SXM06 « Aval »	49
Figure 38. Illustrations de la station #SXM07 « ExtrChenal »	51
Figure 39. Illustrations de la station #SXM08 « Chenal »	53
Figure 40. Illustrations de la station #SXM09 « SudChenal »	55
Figure 41. Illustrations de la station #SXM10 « NordZMEL »	57
Figure 42. Illustrations de la station #SXM15 « Milieu »	59
Figure 43. Illustrations de la station #SXM16 « NordZMEL2 »	61
Figure 44. Illustrations de la station #SXM17 « ZMEL »	63
Figure 45. Schéma de l'analyse en « gradient » des stations de suivi de la baie de Marigot	64
Figure 46. Composition des herbiers de la baie de Marigot (résultats du LIT – 8 typologies).....	65
Figure 47. Composition des herbiers de la baie de Marigot (résultats du LIT – 13 typologies - typologies ordonnées).....	65
Figure 48. Pourcentages de couverture des herbiers de la baie de Marigot (résultats des quadrats)	66
Figure 49. Pourcentages de couverture des différentes espèces d'herbiers (résultats des quadrats).....	67
Figure 50. Pourcentages de couverture des différentes espèces de macroalgues (résultats des quadrats).....	67
Figure 51. Densités moyennes des plants de <i>T. testudinum</i> et <i>S. filiforme</i> (ancien protocole DCE)	68
Figure 52. Longueur moyenne des plants de <i>T. testudinum</i> et <i>S. filiforme</i> (ancien protocole DCE).....	68
Figure 53. Illustration de continuité de faciès d'un patch d'herbier sur la station #SXM17 « ZMEL »	69
Figure 54. Carte de localisation des stations de suivi (numéros) de la baie de Grand-Case	70
Figure 55. Carte de localisation des stations de suivi (étoiles) de la RNSM dans la baie de Grand-Case	70
Figure 56. Composition des herbiers de la baie de Grand-Case (résultats du LIT).....	71
Figure 57. Pourcentages de couverture des herbiers de la baie de Grand-Case (résultats des quadrats).....	72
Figure 58. Illustrations de la station #SXM11 « ZMEL »	74
Figure 59. Illustrations de la station #SXM12 « Hors ZMEL »	74
Figure 60. Cartes diachroniques du Cul-de-Sac : de d. à g. 1950, 2000, 2010, 2020 environ (IGN).....	75
Figure 61. Comparaison des cartographies des habitats marins de l'étude (grand format Fig. 17) et de Schmitt 2013	76
Figure 62. Carte des états de santé de Pinel / Petite Clef (Schmitt 2013).....	76
Figure 63. Cartes des radiales de prospection et mesures d' <i>H. stipulacea</i> zone Cul-de-Sac/Pinel (Moisan 2014)	77
Figure 64. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Cul-de-Sac (grand format Fig.7)	77
Figure 65. Illustrations de baie de Cul-de-Sac	78
Figure 66 : Carte de synthèse de l'état de santé des biocénoses & comparaison avec Pareto 2013.....	80

Tableaux

Tableau 1. Fiche de terrain pour la saisie des stations de relevés de terrain	3
Tableau 2. Présentation de l'ensemble des unités typologiques relevés sur le site d'études et le nombre d'échantillons correspondant.....	10
Tableau 3 : État de santé général des communautés coralliennes réparti en cinq classes.....	18
Tableau 4 : Évolution des notations du protocole PIT (intercalibration GT Ifreco-DCE 2017).....	18
Tableau 5 : Classification de l'abondance en macroalgues	20
Tableau 6 : Description des catégories d'assemblage de phanérogames pris en compte dans le LIT	21
Tableau 7 : Détail des classes du paramètre « état de santé » (adaptées de Bouchon et al, 2003).....	22
Tableau 8. Résumé des performances de prédiction pour l'ensemble des modèles utilisés pour la production cartographique	24
Tableau 9 : Synthèse et comparaison des états de santé des stations de la baie de Marigot.....	80

Contexte

Dans le cadre des projets de développement du Port de Galisbay et d'aménagements de zones de mouillage et d'équipements légers dans les baies de Marigot, Grand-Case et Cul-de-Sac, l'Établissement Portuaire de Saint-Martin a souhaité :

- Faire réaliser, en 2021, une mise à jour de la cartographie des habitats marins des secteurs concernés, localisés sur la Figure 1,
- Obtenir une analyse des évolutions survenues entre la cartographie réalisée en 2013 et la cartographie 2021,
- Reconduire une analyse de l'état de conservation des habitats sur un échantillon de stations pré-ciblées.



Figure 1 Localisation des secteurs concernés par l'étude. A : Baie de Marigot, B : Baie de Grand-Case, C : Baie de Cul-de-Sac (au Nord), © Pléiades 2019, 2020

Pour cette étude, l'Établissement Portuaire a souhaité que soit mise en œuvre une approche comprenant 3 étapes :

- Une cartographie par analyse d'images satellitaires les plus récentes,
- Une campagne de prospection terrain sur au moins 100 stations,
- Une analyse de l'état de conservation des communautés benthiques reposant sur des expertises de terrain.

1 Approche méthodologique

1.1 Mise à jour de la carte des habitats marins

1.1.1 Objectif

L'Établissement de Saint Martin souhaite, d'une part, que l'approche de cartographie mise en œuvre soit reproductible, afin de permettre une analyse diachronique des surfaces dans le temps, et, d'autre part, qu'elle intègre la finesse de l'approche terrain à la vision synoptique, exhaustive et récurrente de l'observation par satellite.

Dans ce double objectif, i-Sea associée à Impact Mer ont mis en œuvre la stratégie suivante :

- La mise en œuvre de l'approche de cartographie Biocoast semi-automatisée et reproductible basée sur des données satellitaires couplées à des relevés d'habitats réalisés *in-situ*,
- La restitution d'une carte suivant une typologie finale du site élaborée et validée par les partenaires du projet,
- L'évaluation de l'état de conservation des différents habitats d'intérêt à l'échelle du site.

La philosophie portée par le groupement repose sur un travail de co-construction cartographique fondé sur des interactions très régulières en cours d'étude pour parvenir à un document unique le plus fiable et documenté possible.

Cette partie rend compte de la cartographie des habitats marins par satellite, en particulier :

- Des méthodes d'analyse et des données sélectionnées pour caractériser les différents habitats sur le secteur étudié,
- Des résultats obtenus concernant la typologie des habitats retenue ainsi que la cartographie des habitats naturels des sites étudiés.

1.1.2 Données et méthodes

La production de cartographie des habitats naturels par le procédé Biocoast développé par la société i-Sea s'articule autour de l'usage de deux sources de données principales : des images satellites et des données de terrain. Ces deux sources de données sont injectées dans une chaîne de traitements automatisée, basée sur l'usage d'algorithmes de *machine learning*, permettant de produire des cartographies prédictives. La section suivante présente dans le détail la méthodologie ainsi que les données utilisées durant cette étude.

1.1.2.1 Méthodes

Prospections terrain

L'objectif de cette collecte de données *in situ* est de relever un maximum d'observations géolocalisées, au sein des différentes unités typologiques présentes sur les sites de Saint-Martin.

Une campagne de prospections de terrain a été réalisée par Impact Mer en juin-juillet 2021 pour toutes les classes de milieux naturels existantes sur les sites.

Les données d'apprentissage ont été acquises sous deux formats :

- Format « points » (Figure 2), au début du projet : des points GPS ont été pris au centre d'une zone homogène de l'unité typologique visée d'au moins 6 m de rayon et des informations ont été fournies à i-Sea (Tableau 1), chargé de l'extension de ce point en polygone ;
- Format « polygone » pour un certain nombre des données d'apprentissage : les unités typologiques ont été détournées directement sur les images, à partir du point relevé sur le terrain.

Les informations relevées sur le terrain sont décrites dans le Tableau 1.

En étroite relation avec le travail d'analyse d'images satellitaires réalisé par i-Sea, la société Impact Mer a effectué l'ensemble des relevés terrain, permettant de calibrer, valider et corriger les analyses d'images satellitaires. Les experts sur le terrain, se placent au cœur d'une zone homogène afin de caractériser

l'habitat en présence. Une zone homogène est définie avec I-Sea comme une zone où l'habitat ne varie pas sur une distance minimale de 6 m de rayon (Figure 2).

La géolocalisation des experts terrain est assurée par la position obtenue par GPS. En complément, des photographies de l'habitat sur la station étudiée sont réalisées.

Conditions idéales d'un relevé terrain Biocoast

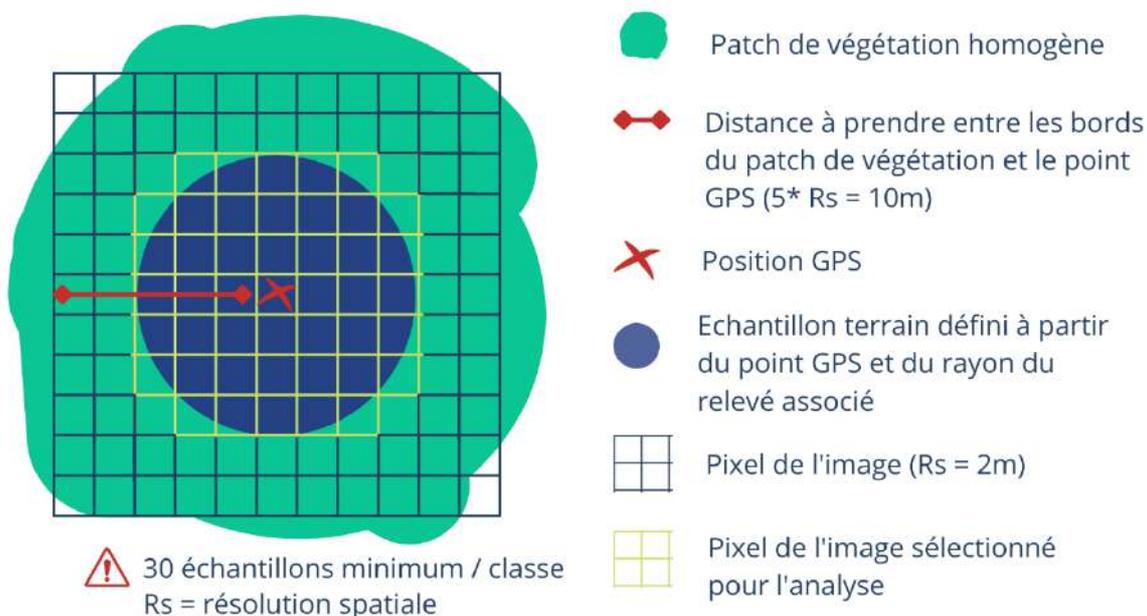


Figure 2. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain (format point)

Tableau 1. Fiche de terrain pour la saisie des stations de relevés de terrain

ATTRIBUT	DESCRIPTION	LISTE CHOIX
STATION	Identifiant unique de la station	Génération automatique
DATE	Date de la mission	JJ/MM/AAAA
UNITE TYPOLOGIQUE	Rattachement de la donnée d'apprentissage à une unité typologique	Code et intitulé de l'unité typologique
NATURE (uniquement pour les données au format « points »)	La station est relevée au sein d'une étendue ou d'un îlot/patch (les limites de la station sont visibles sur le terrain)	Étendue ou patch
RAYON (uniquement pour les données au format « points »)	Quelle est approximativement la taille de cette étendue (ou patch)	en mètres
COMMENTAIRES	Commentaires utiles à l'interprétation	ex : remarques sur l'état de conservation de l'unité typologique concernée sur la station
PHOTOS	Identifiants des photos associées à la station	

Au cours de l'avancée du projet, plusieurs versions de cartographie successives (cartographies V0, V1 et V2) ont été menées et ont permis d'orienter au fur et à mesure les campagnes de relevés *in-situ*. La numérisation des polygones sur SIG a été réalisée par photo-interprétation à partir de la géolocalisation de relevés de terrain. Pour certaines unités typologiques simples, des échantillons ont été ajoutés par photo-interprétation afin de compléter la base de données d'apprentissage.

Travail sur la typologie des habitats

La typologie des habitats visée dans cette étude était au départ celle construite par Pareto (2013). La complexité des milieux rencontrés, et l'impossibilité de réaliser de relevés sur des milieux très homogènes, a poussé à créer une typologie plus complexe. Cette typologie plus fine, présentée dans une section ultérieure (Tableau 2) permet à la fois de mieux décrire la réalité des types de surfaces présentes sur le site mais aussi de remonter à la typologie de Pareto (2013) pour des besoins de comparaison.

Cartographie par classification d'image

Méthodologie

Afin de déterminer une stratégie de classification d'images adaptée au problème de la reconnaissance et de la différenciation des types de végétation présents sur le site étudié, différentes approches ont été testées. La démarche méthodologique adoptée est présentée dans la Figure .

Une fois l'acquisition des données terrain et images réalisées, le travail sur la typologie des données terrain permet de définir une typologie et donc d'affecter à chacune des observations (polygones) une classe (code numérique). De nombreuses discussions et itérations entre les différents partenaires du projet, sont possibles et souvent nécessaires pour aboutir à une typologie finale.

En parallèle, une étape de prétraitement (*preprocessing*) consiste à vérifier et préparer la série d'images. En effet, il faut s'assurer de la bonne coregistration de chacune des images de la série temporelle et réajuster le recalage le cas échéant. Une opération de superposition de l'ensemble de la pile d'images est ensuite appliquée afin que chacun des pixels de la série temporelle occupe le même espace physique, autrement dit que toutes les images soient parfaitement superposables. Il est aussi essentiel de bien vérifier le positionnement de tous les polygones qui serviront à l'apprentissage et le test des classifieurs de façon à ne pas injecter dans le processus des pixels qui ne seraient pas précisément représentatifs de la classe d'intérêt.

Une fois ces pré-traitements réalisés, l'étape de traitement de données consiste à extraire des informations des images (indices radiométriques). Pour chaque image multispectrale utilisée, 6 indices radiométriques ont été calculés :

- Des indices de végétation : les NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, Rouse et al., 1973), RVI (*Ratio Vegetation Index*, Jordan, 1969) et SAVI (*Soil Adjust Vegetation Index*, Huete, 1988),
- Deux indices de sol : les RI (*Redness Index*, Mathieu et al., 2006) et BI (*Brightness Index*, Gao, 1996),
- Un indice d'eau: le NDWI (*Normalized Difference Water Index*, Gao, 1996).

Ces indices radiométriques permettent de mettre en relief et de donner du poids à certaines entités de l'occupation du sol, ils ont été testés et sélectionnés lors de multiples tests lors de la phase R&D du projet Blocoast. Ils sont à présent utilisés de façon systématique dans la chaîne de traitement Biocoast pour la cartographie des milieux naturels.

L'image multispectrale multi-temporelle est ensuite réalisée en concaténant l'ensemble des bandes spectrales et des indices calculés pour l'ensemble des dates considérées. Cela correspond à 4 bandes spectrales + 6 indices radiométriques pour chacune des dates. Les pixels contenus dans les polygones sont ensuite extraits pour constituer une base de données (BD) de référence.

Méthodologie : the big picture

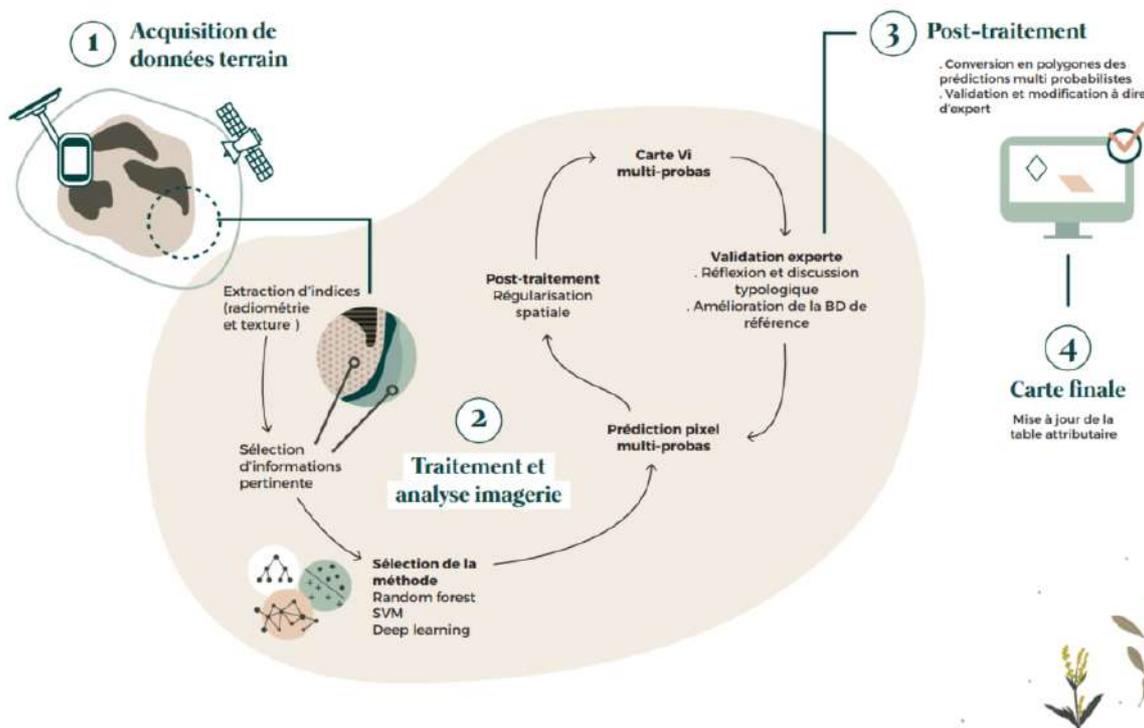


Figure 4. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement

Nous avons testé les méthodes de classification les plus couramment utilisées en télédétection : *Support Vector Machines* (SVM), *Multi Layer Perceptron* (MLP, réseaux de neurones) et *Random Forest* (ou forêts aléatoires, Pal, 2005 ; Beguet et al., 2014). Après différents tests, nous avons choisi de travailler avec les *Random Forests* qui apportent un bon compromis entre rapidité, simplicité de paramétrisation et performance.

Les *Random Forests* ou forêts aléatoires ont été introduites par Breiman (2001). C'est un algorithme d'apprentissage statistique très performant, à la fois pour des problèmes de classification et de régression. L'algorithme appartient à la famille des méthodes d'ensemble de classificateurs. Le principe général de ces méthodes est de construire une collection de classificateurs (prédicteurs) faibles, pour ensuite agréger l'ensemble de leurs prédictions afin d'obtenir un classificateur robuste. Le classificateur faible considéré est un arbre de décision de type *Classification and Regression Tree* (CART) (Breiman et al., 1984) dont le principe général est de partitionner récursivement l'espace d'entrée de façon dyadique, puis de déterminer une sous-partition optimale pour la prédiction.

Une fois la meilleure méthode sélectionnée, l'étape de classification finale est réalisée. Elle consiste à apprendre un modèle avec l'ensemble des échantillons disponibles avant de prédire l'ensemble des pixels de la série temporelle ainsi que l'indice de confiance associé.

Enfin, une régularisation spatiale par filtre majoritaire est appliquée au résultat de classification. Cette régularisation consiste à affecter à chaque pixel l'étiquette (ou classe) majoritaire (en termes de nombre d'occurrences) dans son voisinage. Le rayon de ce voisinage a été fixé à 2 pixels. Cette étape de post-traitement permet d'éliminer une partie du « bruit de classification » et propose un rendu visuel plus « proche de la réalité ».

En résumé, la chaîne de traitement sélectionnée pour réaliser la cartographie des types de végétation à partir d'une série temporelle d'images satellitaires à très haute résolution spatiale est classique. Elle intègre les étapes suivantes :

- Extraction d'information (ici calcul d'indices radiométriques ou pseudo-canaux),
- Concaténation des bandes et indices radiométriques pour l'ensemble des dates,
- Sélection aléatoire des échantillons (au niveau pixel) pour constituer une base de données d'apprentissage (ou entraînement) et une base de données de test (qui sera utilisée pour évaluer la capacité de prédiction du modèle),
- Apprentissage du modèle,

- Évaluation du modèle,
- Prédiction de l'ensemble de l'image multi-temporelle,
- Régularisation.

Mise en œuvre pratique

L'ensemble des données collectées sur terrain a été uniformisé, dans le but d'attribuer une classe à chacun des échantillons. Ces échantillons sont répartis au sein de l'ensemble des classes. Les données d'apprentissage au format *shape* de points ont été converties automatiquement en polygones sous SIG, et superposées aux images Pléiades. Chacun des polygones (buffer) a été corrigé et étendu de façon à correspondre aux limites visibles sur les supports de référence. Un certain nombre de polygones ont été repris et corrigés par photo-interprétation, cela afin de ne contenir qu'une seule classe d'occupation « visible » comme par exemple la présence de sol nu (sable) dans un polygone de végétation. Cela a permis de corriger certains défauts des premières versions de prédictions.

Cette étape est cruciale dans notre méthodologie de cartographie. En effet, le niveau de précision de la classification produite (d'un point de vue spatial et typologique) dépend essentiellement de la qualité et de la représentativité de cette base de données de référence.

Compte tenu de la structure de nos données de référence, nous avons choisi de travailler au niveau pixel (et non polygone) pour la détermination de pixels d'apprentissage et de test. En effet, certaines classes possèdent un nombre réduit de polygones, séparer alors les polygones en apprentissage et test ne permet pas d'appréhender une variabilité suffisante pour bien apprendre à reconnaître la classe considérée. Cette sélection des pixels d'apprentissage et de test au sein des mêmes polygones sera à prendre en compte pour l'interprétation des résultats. La méthode appliquée pour la constitution de la base de données d'apprentissage et la base de données de test est décrite ci-dessous :

- Tirage aléatoire au sein des polygones : 50% des pixels pour l'ensemble d'apprentissage et 50% utilisés pour l'ensemble de validation,
- Pour l'apprentissage : Équilibrage du nombre d'échantillons par classe à l'aide du nombre d'échantillons de la plus petite classe,
- Évaluation (test) sur la totalité des pixels de l'ensemble de test.

Travail par zones

La présence importante des nuages dans notre série temporelle, particulièrement sur la baie de Marigot, nous a poussé à élaborer une stratégie particulière pour le traitement des données. En effet, si un polygone d'apprentissage est positionné sous un nuage à un moment de notre série temporelle, la radiométrie est perturbée et notre système de classification supervisé va mal se comporter. Si on conserve uniquement les polygones qui ne sont jamais affectés par les nuages, nous allons perdre beaucoup trop d'information. Nous avons donc appliqué une stratégie « par zone », pour chaque image, un masque de nuages est créé. L'ensemble des masques de nuages est ensuite combiné pour obtenir une carte des zones de configurations possibles. Pour chaque configuration, un modèle spécifique sera entraîné, évalué et appliqué. La carte finale sera alors recomposée par l'ensemble des prédictions zone à zone. Les zones qui ne sont jamais couvertes par les nuages seront prédites à l'aide d'un modèle entraîné sur l'ensemble des données valides pour les 4 images. Les zones couvertes par uniquement 3 images (et nuageuses sur une quatrième) seront couvertes par un modèle adapté pour ces 3 images et ainsi de suite.

Post-traitements

Dans un premier temps, la prédiction brute (ou résultat de la classification) au niveau pixel est régularisée, un filtre majoritaire de rayon 2 pixels est appliqué. Cette première régularisation permet de lisser localement de potentiels « bruits » de classification.

Le résultat régularisé de la prédiction des classes d'intérêt au niveau pixel est ensuite converti en *shape*. La table attributaire de ce *shape* est uniformisée et mise à jour avec notamment le calcul des surfaces des polygones.

1.1.2.2 Données initiales

Données images

Une série temporelle Pléiades composée de 4 images d'archives (RGBPIR, 0.5m de résolution spatiale) a été récupérée entre le mois de février 2020 et le mois de février 2021. Cette série est de qualité acceptable mais avec une couverture nuageuse perturbante pour bon nombre de scènes. Ces images sont présentées Figure 3.

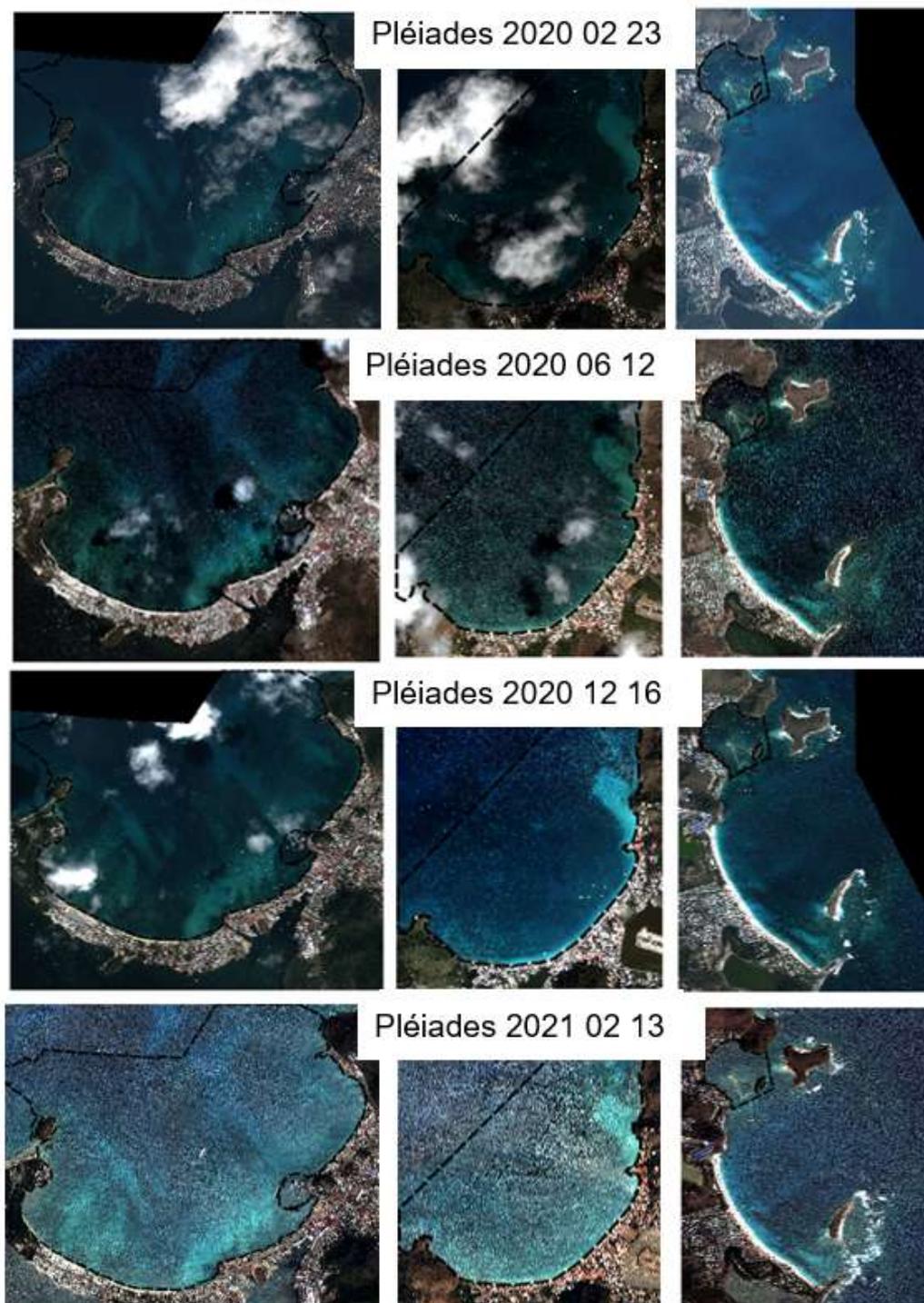


Figure 3. Série d'images satellite utilisée pour la cartographie

Cette présence importante des nuages, surtout sur la baie de Marigot, couvre une partie importante des échantillons disponibles. Ceci nous a poussé à réaliser la cartographie avec notre stratégie de zonations décrites plus haut. Nous avons donc construit une carte de zonations des différentes combinaisons de configurations d'images valides pour couvrir la baie de Marigot, cette carte est présentée Figure 4.

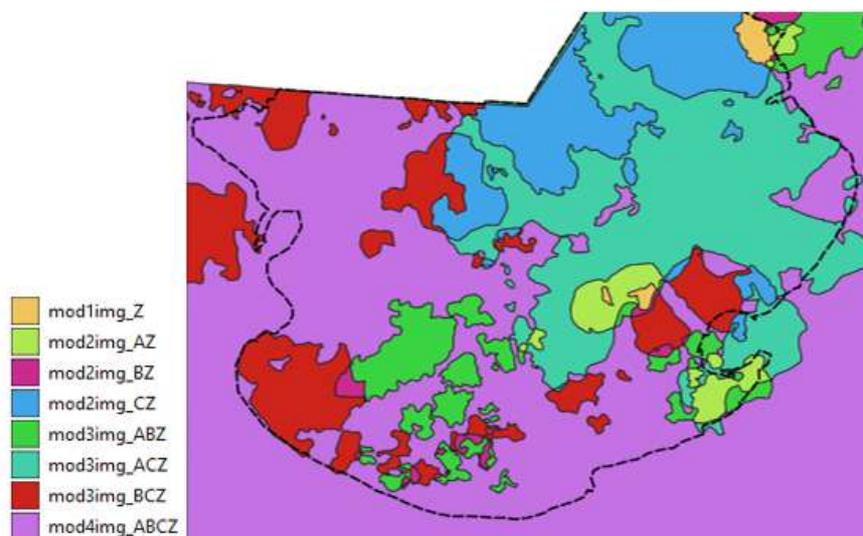


Figure 4. Carte des zonations correspondant aux différentes configurations de couvertures nuageuses (mod= modèle, 1, 2, 3, ou 4 = nombre d'images utilisées dans le modèle, img= image)

La Figure 4 nous permet d'observer que la baie de Marigot sera produite avec une combinaison de modèles utilisant différents arrangements d'images. La majorité du site sera prédite avec un modèle constitué de 4 images (mod4imgABCZ), une grande partie sera couverte par des modèles constitués de trois images (mod3img), enfin seules quelques petites zones ne seront couvertes que par deux ou même une seule image.

Données terrain

Les données de terrain acquises en juin-juillet 2021 ont été vérifiées puis préparées pour la production cartographique. Les figures suivantes permettent d'observer la répartition de ces informations sur les trois sites d'études. Tous les relevés collectés sur le terrain ont été spatialisés sous SIG par photo-interprétation, c'est-à-dire convertis et étendus en petits polygones homogènes. Certains de ces polygones ont pu être étendus et ainsi fournir plus de pixels pour l'apprentissage. Un ensemble de polygones ont aussi été ajoutés par photo-interprétation, cela uniquement pour les classes très simples comme le sol nu (les autres classes étant trop complexes à photo-interpréter).

Au total, 220 polygones d'apprentissage ont été fournis pour la cartographie du site. Le tableau suivant (Tableau 2) présente l'ensemble des données de terrain ayant servi à l'apprentissage et à l'évaluation des modèles de prédiction *RandomForest*, puis à l'apprentissage complet d'un modèle pour prédire l'ensemble du site d'étude.

La typologie finale retenue est plus fine que celle proposée par Pareto (2013), elle permet cependant, par regroupement, de retrouver cette typologie pour permettre une comparaison des résultats. Il est à noter qu'un grand nombre de classes ont un nombre d'échantillons très inférieur à la dizaine et sont par conséquent très sous-représentées, bon nombre avec moins de trois échantillons pour les représenter. La difficulté de rencontrer avec une certaine fréquence ces classes sur le terrain explique en partie cette faible représentativité.

Nous avons tout de même choisi de conserver l'ensemble des classes pour ce travail, il faudra cependant relativiser les résultats obtenus pour ces classes sous-représentées et ne pas avoir trop d'attentes quant à la robustesse possible des prédictions.

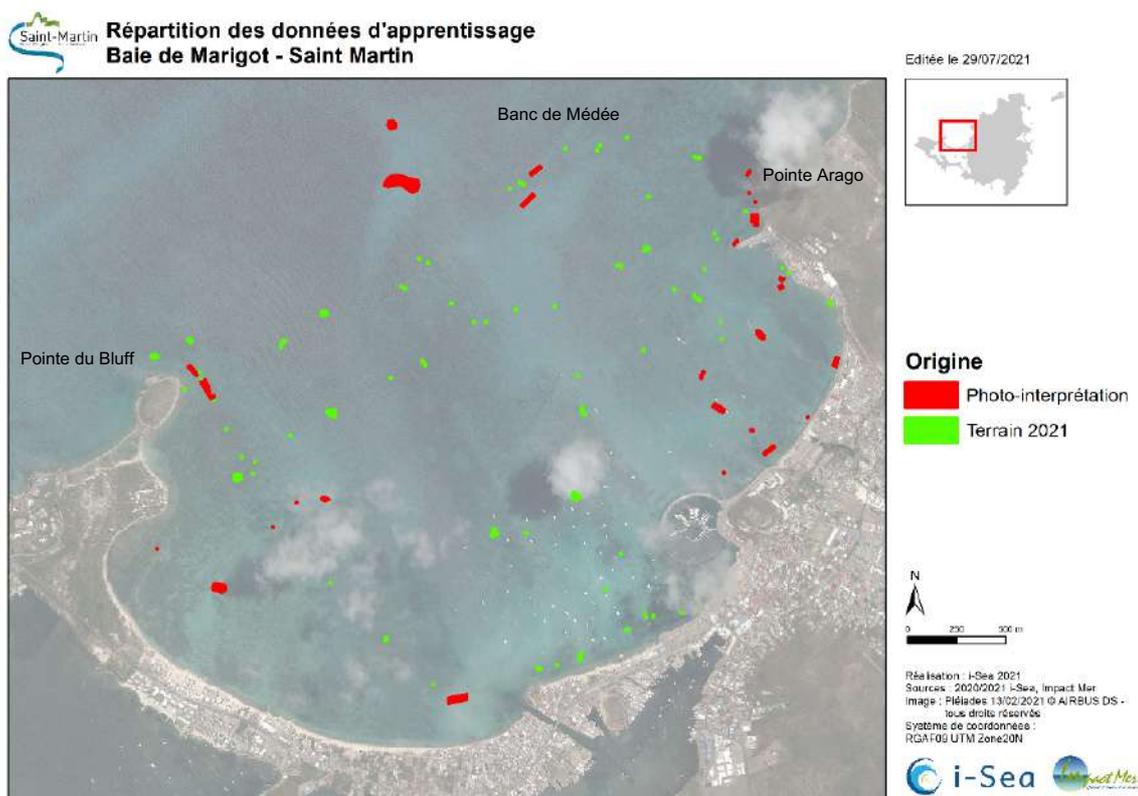


Figure 5. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Marigot

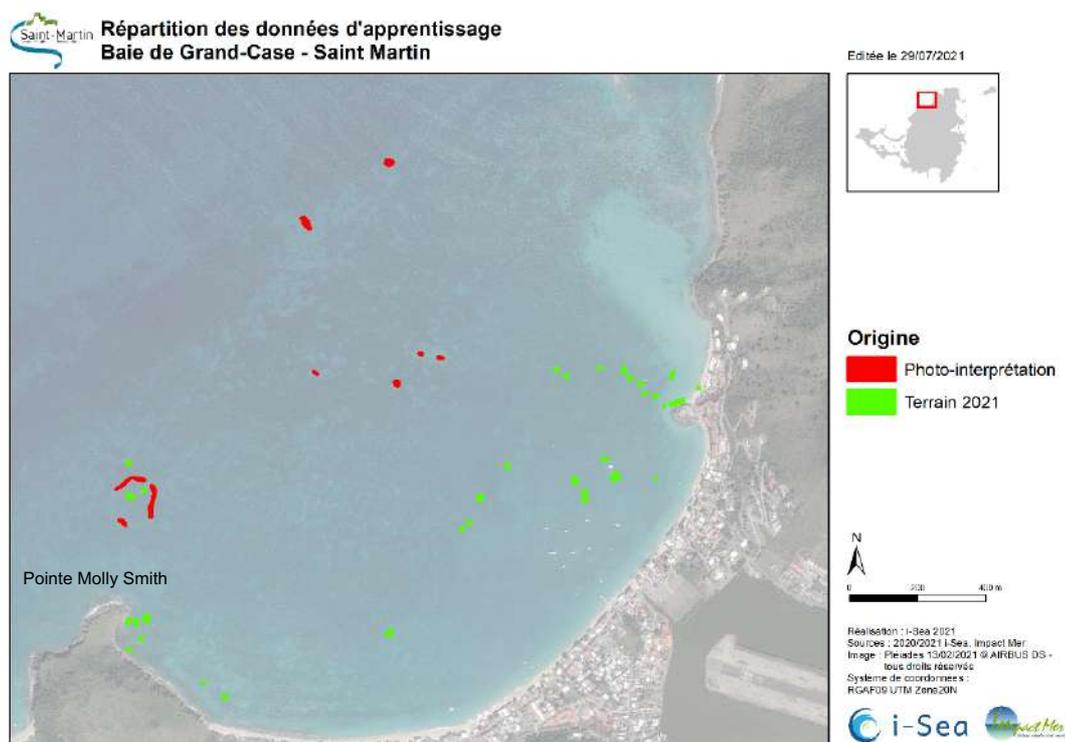


Figure 6. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Grand-Case

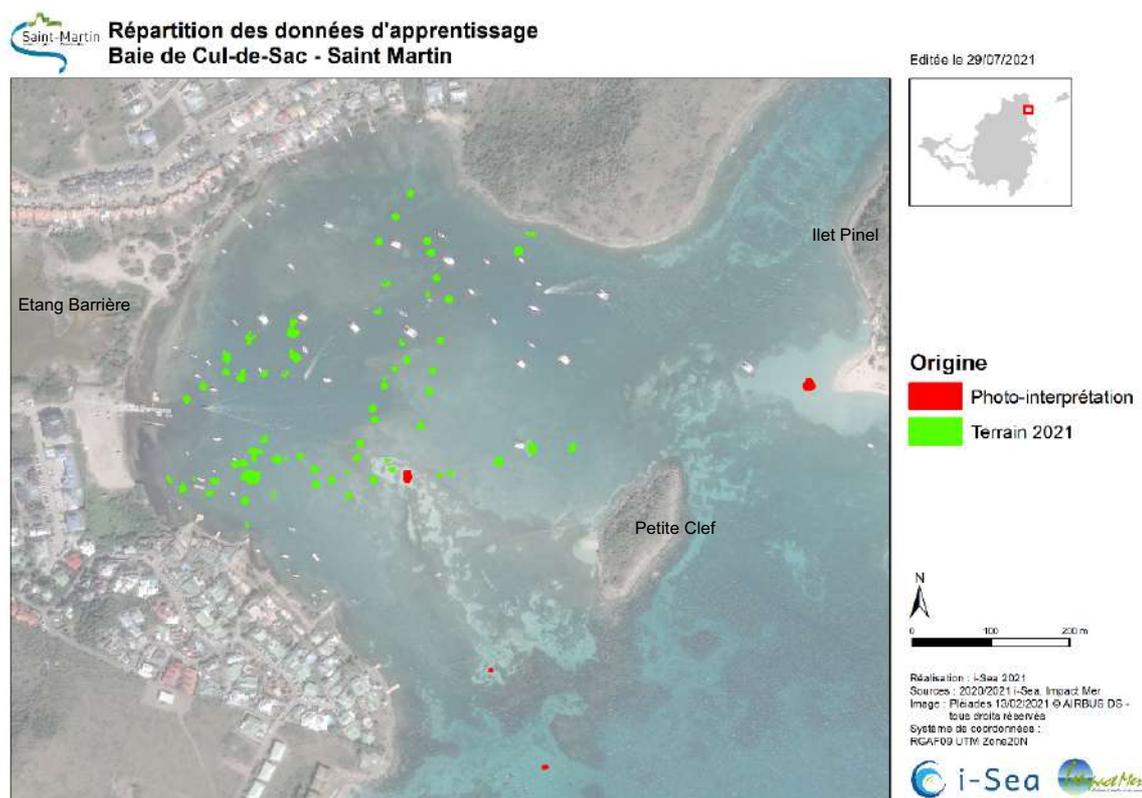


Figure 7. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Cul-de-Sac

Tableau 2. Présentation de l'ensemble des unités typologiques relevés sur le site étudiés et le nombre d'échantillons correspondant

TYOLOGIE	Cnt_TYOLOGIE
Affleurement rocheux a peuplements algaux dominants et peuplements coralliens epars	1
Affleurement rocheux a peuplements coralliens	4
Blocs artificiels a peuplements coralliens	2
Epave sur fond meuble	1
Front pionnier a herbiers a Halodule wrightii	2
Galets de bord de plage	2
Plaine sedimentaire a herbiers mixtes a Syringodium filiforme et Halophila stipulacea	4
Plaine sedimentaire a herbiers mixtes a Thalassia testudinum et Halophila stipulacea	7
Plaine sedimentaire a herbiers mixtes a Thalassia testudinum et Syringodium filiforme	49
Plaine sedimentaire a herbiers monospécifiques a Halophila stipulacea	26
Plaine sedimentaire a herbiers monospécifiques a Halophila stipulacea couvert de macroalgues	3
Plaine sedimentaire a herbiers monospécifiques a Halophila stipulacea et macroalgues Dictyota	3
Plaine sedimentaire a herbiers monospécifiques a Syringodium filiforme	8
Plaine sedimentaire a herbiers monospécifiques a Syringodium filiforme couvert de macroalgues	1
Plaine sedimentaire a herbiers monospécifiques a Thalassia testudinum	18
Plaine sedimentaire a herbiers monospécifiques a Thalassia testudinum et macroalgues	2
Plaine sedimentaire a macroalgues	2
Plaine sedimentaire a macroalgues a Halimeda sp. dominante	10
Plaine sedimentaire sableuse a sablo-vaseuse	60
Substrat rocheux a peuplements algaux dominants et peuplements coralliens epars	12
Substrat rocheux a peuplements coralliens	3
	220

1.1.3 Identification des données

1.1.3.1 Intitulé

Cartographie des habitats marins par télédétection multitemporelle Pléiades 2020-2021

1.1.3.2 Date

Création : 2021-07-29

1.1.3.3 Résumé

Les cartographies des habitats marins ont été produites par I-Sea avec la collaboration d'Impact Mer dans le cadre des projets de développement du Port de Galisbay et d'aménagements de zones de mouillage et d'équipements légers dans les baies de Marigot, Grand-Case et Cul de Sac. Elles sont le résultat de classifications supervisées (RandomForest) multi-temporelle d'images satellitaires (Pléiades) acquises durant les années 2020 et 2021 basées sur l'usage de données de référence produites et qualifiées sur le terrain (Impact Mer) et complétées par photo-interprétation selon la typologie définie par Impact Mer.

1.1.3.4 Reconnaissance

i-Sea, Impact Mer, Établissement portuaire de Saint Martin

1.1.3.5 Type et encodage

Séries de données

Shapefile

UTF-8

1.1.3.6 Identificateurs

StMartin_habitatsmarins_2020_2021_Marigot_UTM20N.shp

StMartin_habitatsmarins_2020_2021_Grand_Case_UTM20N.shp

StMartin_habitatsmarins_2020_2021_Cul_de_Sac_UTM20N.shp

1.1.3.7 Langue

Fre

1.1.4 Ressource en ligne

<http://i-sea.fr/fr/>

1.1.5 Contact pour la ressource

1.1.5.1 Auteur

Benoit Beguet

i-Sea

25 rue Marcel Issartier

33700 Mérignac

benoit.beguet@i-sea.fr

Guillaume Tollu

Impact Mer

20 rue Karukera - Cluny

97200 Fort de France Martinique FWI

gtollu@impact-mer.fr

1.1.5.2 Propriétaire

Guillaume Tollu

Impact Mer

20 rue Karukera - Cluny

97200 Fort de France Martinique FWI

gtollu@impact-mer.fr

1.1.6 Mot Clé

Catégorie ISO : Environnement

1.1.6.1 Non classé

Habitats naturels, télédétection satellitaire, classification supervisée, cartographie

1.1.6.2 Gemet-Inspire

Habitats et biotopes, répartition des espèces

1.1.7 Emprise géographique

Marigot :

Ouest : 487377.03 m

Est : 491437.09 m

Sud : 1996821.12 m

Nord : 1999979.65 m

Grand Case :

Ouest : 492429.62 m

Est : 494499.66 m

Sud : 2001200.49 m

Nord : 2003631.29 m

Cul de Sac :

Ouest : 497340.20 m

Est : 498110.54 m

Sud : 2001378.47 m

Nord : 2002219.29 m

Référentiel de coordonnées : RGAF09 / UTM zone 20N (EPSG : 5490)

1.1.8 Résolution spatiale

Données sources :

Pléiades : 2m

Échelle optimum d'emploi : 1/2000

1.1.9 Généalogie

Les cartographies sont issues de la chaîne de traitements d'images Biocoast développée et opérée par la société I-Sea. Elles sont le résultat de classifications supervisées (RandomForest) de séries temporelles d'images satellitaires Pléiades acquises entre 2020 et 2021 via le programme d'acquisition Dinamis. Les données de référence ayant servi à l'apprentissage du modèle de classification ont été fournies par Impact Mer puis complétées sur le terrain lors d'une campagne d'acquisition durant l'été 2021 mené par Guillaume Tollu. Ces échantillons ont été complétés par photo-interprétation pour certaines classes. La chaîne de traitement consiste à calculer pour chaque scène un ensemble d'indices radiométriques avant de concaténer l'ensemble des bandes spectrales d'origines et des indices de toutes les dates pour constituer une série temporelle d'images. Les pixels correspondants aux polygones de références sont ensuite extraits, un modèle de classification supervisé est entraîné et évalué. Le modèle est ensuite appliqué à l'ensemble des pixels de l'image. Une régularisation par filtre majoritaire est ensuite appliquée à la prédiction, cela afin de corriger de potentiels bruits de classification. Le raster prédit est ensuite vectorisé.

Les couches, StMartin_habitatsmarins_2020_2021_Marigot_UTM20N.shp, StMartin_habitatsmarins_2020_2021_Grand_Case_UTM20N.shp, StMartin_habitatsmarins_2020_2021_Cul_de_Sac_UTM20N.shp, ont été produites à partir d'une série temporelle d'images Pléiades (liste exhaustive : 2020223, 20200612, 20201216, 20210213).

Les tables attributaires associées à ces shapes contiennent les champs suivants :

Attributs :

[Typologie] = classe prédite

[Producteur] = Nom du producteur de la donnée

[Methode] = Méthode succincte de production de la donnée

[Surf_m2] = Surface en m² du polygone

[SRC] = système de projection de la donnée

1.1.10 Contraintes en matière d'accès et d'utilisation

Limite d'utilisation : Utilisation interdite pour un usage commercial. Modification et diffusion interdite de la donnée brute sans l'accord du distributeur

Autres contraintes :

Obligation de citation (rapport) : i-Sea 2021, Cartographie et analyse de l'état de conservation des habitats marins dans les baies de Marigot, Grand-Case et Cul de Sac sur l'île de Saint Martin

Obligation de citation (carte) : produit numérique i-Sea 2021

1.1.11 Point de contact des métadonnées

Nicolas Débonnaire

i-Sea

25 rue Marcel Issartier

33700 Mérignac

nicolas.debonnaire@i-sea.fr

Date des métadonnées : 30/07/2021



Figure 8. Remora rencontré sur l'herbier de Marigot

1.2 Analyse de l'état de conservation

1.2.1 Stations de suivi de l'état de conservation

L'état de conservation des habitats marins des baies de Marigot, de Grand-Case et de Cul-de-Sac a été étudié :

- pour les herbiers, suivant une combinaison des protocoles **i)** de suivi des herbiers mis en œuvre dans le cadre de l'application de la DCE aux Antilles françaises, **ii)** des dernières évolutions DCE, **iii)** des exigences de comparaison avec les méthodes antérieures (Pareto 2013), **iv)** des développements de méthodologies d'expertises de milieux à venir (Merci-Cor) ;
- pour les communautés coralliennes, selon les protocoles mis en œuvre dans le cadre de l'application de la DCE aux Antilles françaises, et des exigences de comparaison avec les méthodes antérieures (Pareto 2013).

Au total 17 stations dans les 3 baies ont été suivies :

- 13 stations dans la baie de Marigot :
 - 10 stations "Herbiers" (dont une « composite » dans le périmètre du projet de la ZMEL),
 - 3 stations "Récifs coralliens" (la localisation de ces 3 stations correspond à celle des stations de l'étude Pareto, 2013 : Banc de Médée, Pointes Arago & du Bluff),
- 2 stations "Herbiers" dans la baie de Grand-Case,
- 2 stations "Herbiers" dans la baie de Cul-de-Sac.

Les positions des stations d'herbiers ont été fixées en accord avec le client et ses assistants, en particulier au cours de la réunion du 29 juin 2021.

A noter que des stations d'autres suivis (suivis de la réserve et DCE) sont déjà positionnées. Les données existantes ont été récupérées auprès de la RNNSM et incluses dans l'analyse.

1.2.1.1 Baie de Marigot

La baie de Marigot a fait l'objet d'un suivi sur 10 stations d'herbiers de phanérogames marines et d'un suivi sur 3 stations de communautés coralliennes (Figure 9).



Figure 9. Carte de localisation des stations de suivi de la baie de Marigot

En ce qui concerne la localisation des 3 stations de suivi de benthos corallien, elle correspond à celle des stations de l'étude Pareto, 2013 :

- (#SXM01) la pointe du Bluff en sortie sud-ouest de la baie,
- (#SXM02) le Banc de Médée en sortie nord-ouest de la baie,
- (#SXM03) la pointe Arago au niveau du port de Galisbay (expertise hors protocole).

Ces stations sont positionnées sur les seules zones de la baie où sont présentes des communautés de fonds durs, partiellement coralliennes (couvertures limitées).

Pour le suivi des phanérogames marines 10 stations de suivi ont été positionnées.

Trois correspondent aux stations de l'étude Pareto, 2013 :

- (#SXM04) la station « port » située devant le port de Galisbay,
- (#SXM05) la station « amont » devant la pointe Arago,
- (#SXM06) la station « aval » en milieu de baie,

Auxquelles s'ajoutent 7 nouvelles stations :

- (#SXM07) la station « ExtrChenal »
- (#SXM08) la station « Chenal »
- (#SXM09) la station « SudChenal »
- (#SXM10) la station « NordZMEL »
- (#SXM15) la station « Milieu »
- (#SXM16) la station « NordZMEL2 »
- (#SXM17) la station « ZMEL ».

L'ensemble des stations d'herbiers permet un échantillonnage représentatif de la variabilité des différentes typologies des herbiers de la baie. Les résultats des stations sont traités et analysés entre autres suivant un gradient allant de la zone du projet ZMEL vers le large / la pointe Arago.

1.2.1.2 Baie de Grand-Case

Deux stations de suivi d'herbiers de phanérogames marines ont été positionnées en baie de Grand-Case. Une, (#SXM11), a été implantée en face des restaurants, dans la partie nord de la baie, la plus fréquentée pour le mouillage des navires, tandis que l'autre (#SXM12) est située plus au sud, sous l'axe aéroportuaire marqué par des bouées, dans une zone où l'exposition au fetch de la baie ne permet pas un mouillage sûr et confortable pour les plaisanciers.

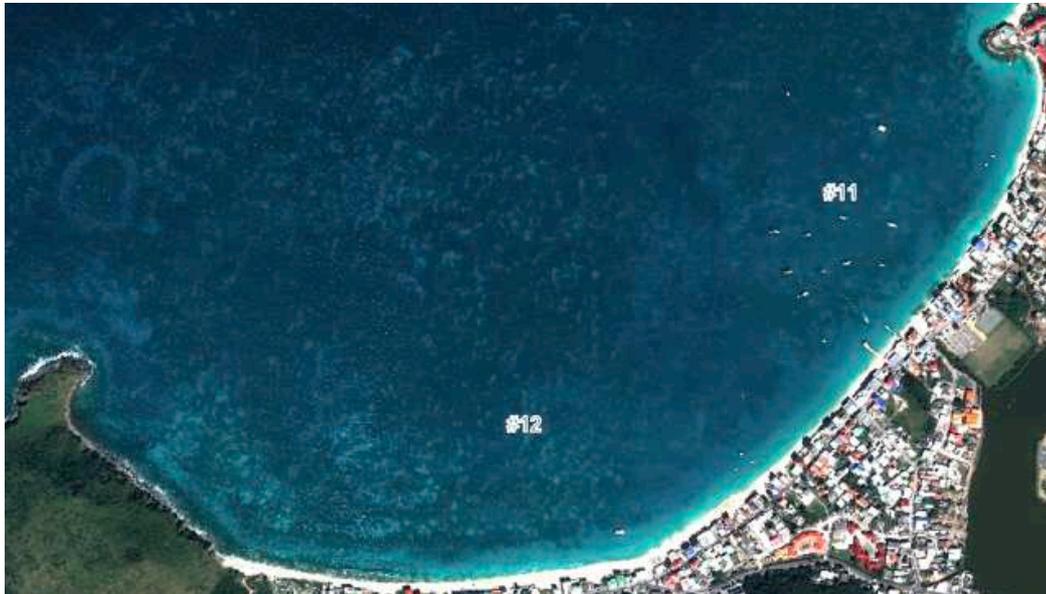


Figure 10. Carte de localisation des stations de suivi (numéros) de la baie de Grand-Case

Dans la baie de Grand-Case, la RNSM a également positionné deux points de suivi d'herbiers en face du bourg. Ces points sont comparés avec les deux points de suivi réserve positionnés un peu plus au large au niveau du Rocher Créole.

A noter que les stations de la RNSM sont suivies en appliquant un protocole différent de celui de la DCE, spécifique aux suivis de réserves locales. Les derniers résultats des suivis sur ces points sont intégrés à la discussion de l'étude.

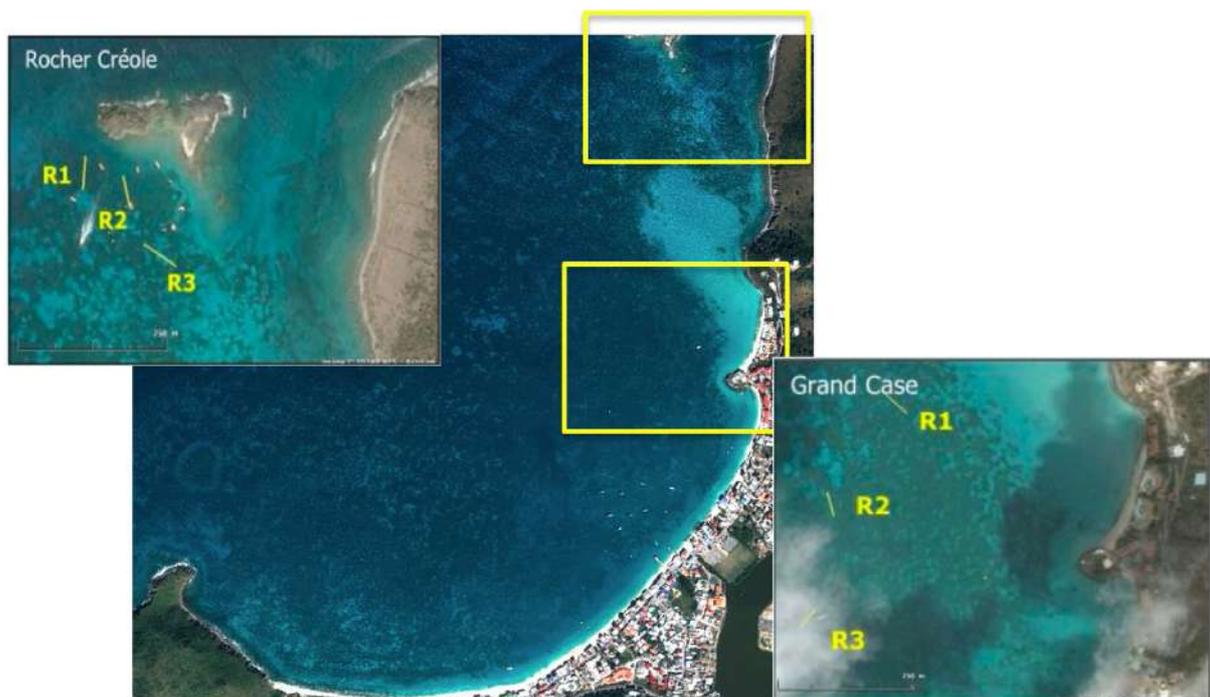


Figure 11. Carte de localisation des stations de suivi (étoiles) de la RNSM dans la baie de Grand-Case

1.2.1.3 Baie de Cul-de-Sac

Un suivi a été mis en œuvre sur 2 stations de la baie de Cul-de-Sac (Figure 12). Cependant ce suivi a à encore dû être adapté aux biocénoses rencontrées (stations au Nord et au Sud).

La baie de Cul-de-Sac présente très peu de zones d'herbiers de phanérogames marines où le protocole mis en œuvre était applicable. Le suivi a donc dû être adapté et s'est fait sur une zone au nord #SXM13, au niveau de la zone de mouillage, et une zone au sud #SXM14 moins fréquentée par les bateaux.



Figure 12. Carte de localisation des stations de suivi de la baie de Cul-de-Sac

La Baie de Cul de Sac a en outre fait l'objet d'une cartographie des biocénoses marines, notamment en sortie de baie de Cul-de-Sac et autour de l'îlet Petite Clef, dans le cadre d'un projet concernant l'îlet Pinel et mené par la Réserve Naturelle (Figure 13, Schmitt 2013).

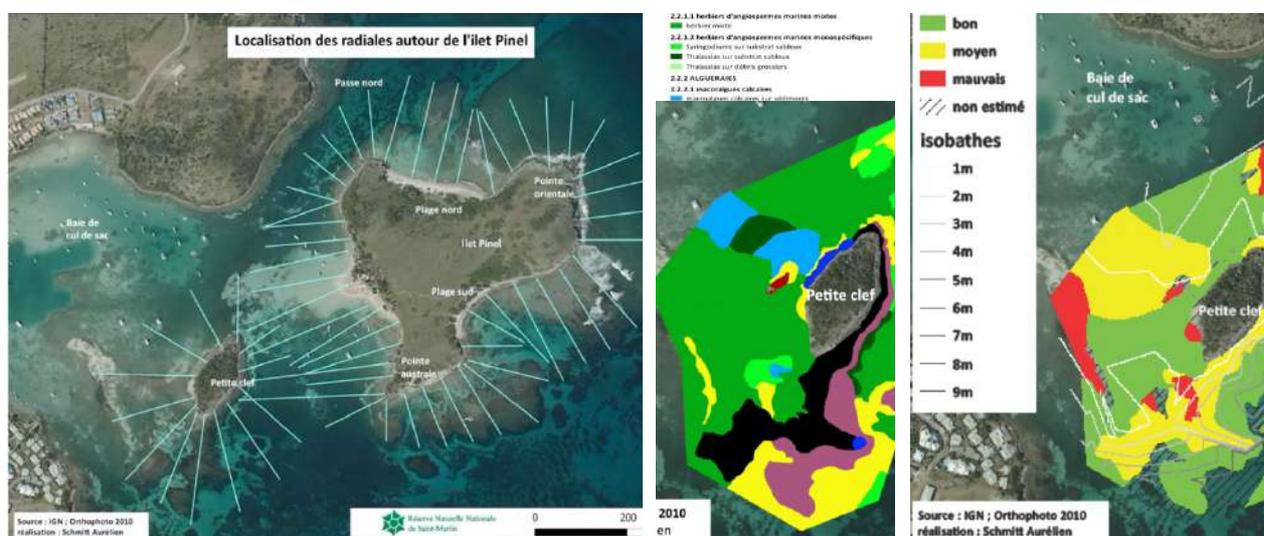


Figure 13. Cartes des radiales d'observation et des biocénoses / états de santé de Pinel / Petite Clef (Schmitt 2013)

1.2.2 Méthodologie déployée

La méthodologie de ce volet « analyse de l'état de conservation » a été adaptée des protocoles DCE actuels, de manière à répondre à un triple objectif :

- Répondre aux questionnements sur l'état de santé des biocénoses marines dans et à l'extérieur des zones des projets de ZMEL,
- Comparer ces états de santé avec ceux qui ont été observés en 2013 (Pareto 2013),
- Obtenir pour les herbiers de la baie de Marigot, des données de type Merci-cor afin de commencer à engranger des données qui permettront de mieux expertiser les pertes et les gains sur les sites impactés et les sites restaurés dans le cadre des grands projets à venir.

Pour ce faire, une concertation avec des référents DCE, nos experts, et F. Kerninon (référente Merci-cor pour les herbiers de phanérogames marines) a permis de définir un protocole « faisable » techniquement, et réunissant l'essentiel des critères nécessaires à la conduite de l'expertise sur les différents items envisagés.

En effet depuis les suivis de Pareto, 2013, les protocoles DCE ont évolué et sont dans le cas des herbiers encore en évolution. Impact Mer mène d'ailleurs actuellement des travaux de mise au point des indicateurs avec l'experte herbiers Fanny Kerninon (Post-Doc Ifreco, Univ. Brest UBO - Lemar).

Dans ce contexte, il est proposé de coupler des protocoles DCE actuels avec ceux utilisés à l'époque de l'étude antérieure. Ainsi il sera à la fois possible de comparer les résultats qui seront obtenus avec le passé et avec les travaux en cours et à venir.

En ce qui concerne le protocole Merci-cor pour les herbiers de phanérogames marines uniquement, seuls les indicateurs de la méthode FFFB « Faune et flore fixes benthiques » ont été utilisés. Les indicateurs de la méthode FM « Faune mobile » n'ont pas été évalués sur les sites.

1.2.2.1 Protocoles DCE communautés coralliennes 2013 / 2020

Le suivi des communautés benthiques coralliennes actuel se compose :

- **d'une évaluation de l'état général de l'écosystème récifal,**
- **d'un échantillonnage de la composition et de l'abondance relative des peuplements coralliens et des autres organismes benthiques susceptibles d'être en compétition avec les coraux (algues et invertébrés sessiles). Avec reconnaissance au niveau du genre pour les macroalgues et les coraux (PIT),**
- **d'un échantillonnage des oursins, par espèce (Quadrats 1mx1m),**
- **de la notation du blanchissement, des nécroses et des maladies coralliennes. La méthode de notation de ces éléments est en cours d'évolution en même temps que la réflexion sur la création d'un indice corail multiparamètres.**
- **PROTOCOLE 2013 : quadrat macroalgues (25X25cm et comptages des recrues de corail).**

L'échantillonnage de ces paramètres se déroule en plongée sous-marine (scaphandre autonome). Le suivi est réalisé sur des transects non permanents.

État de santé des récifs

La méthodologie d'évaluation de l'état de santé des récifs qui a été retenue est issue de Bouchon *et al.* (2004) et adaptée aux exigences de la DCE (5 classes ont été définies contre 4 dans Bouchon, 2004).

Six transects de 10 m sont réalisés. Pour chacun, l'état de santé de la communauté corallienne est évalué visuellement selon les 5 classes définies dans le tableau ci-après. Le très bon état est caractérisé par un peuplement corallien (dense ou non), sans nécrose et sans macroalgue. Il doit cependant être temporisé par les caractéristiques géographiques et géomorphologiques du site (fond de baie, zones exposées aux cyclones, etc.). L'état général de la station est calculé en moyennant les notes attribuées aux 6 transects.

Tableau 3 : État de santé général des communautés coralliennes réparti en cinq classes

Note de l'État de Santé	Peuplement corallien
1 = Très bon état	Coraux non nécrosés avec gazon algal et absence de macroalgues
2 = Bon état	Coraux peu nécrosés ou quelques macroalgues ou sédimentation
3 = État moyen	Coraux avec nécroses, peuplement dominé par les macroalgues ou hypersédimentation
4 = État médiocre	Coraux nécrosés avec macroalgues et/ou hypersédimentation et envasement
5 = Mauvais état	Coraux morts ou envahis de macroalgues ou totalement envasés, aucune espèce sensible

État de santé globale = moyenne des notes des 6 transects

Cet état de santé est évalué visuellement.

L'état de santé n'est actuellement pas utilisé pour l'évaluation DCE mais sera réalisé.

Peuplements coralliens et autres groupes d'organismes benthiques sessiles : composition et abondance relative (PIT)

Le protocole relatif aux communautés benthiques sessiles coralliennes est issu du manuel technique d'études des récifs coralliens de la région Caraïbe Bouchon *et al.* (2001) et basé sur les descripteurs et la codification de CoReMo 3. Les données brutes DCE correspondent aux codes CoReMo anglais, augmentées du champ "Notes". De plus, toutes les colonies coralliennes et les macroalgues sont identifiées au niveau du genre/espèce quand cela est possible.

Remarque : Dans CoReMo, les coraux de feu Millepora sont notés comme étant des coraux durs (HC). Cette même codification est utilisée dans la DCE.

Des photographies de macroalgues peuvent être transmises aux experts partenaires du MNHN (T. De Bettignies, L. Le Gall et J. Mahieu) pour avis, confirmation ou identification.

Un plongeur (plongeur n°1 sur la figure ci-après déroule un **transect de 10 m** et l'attache sur les piquets installés de manière permanente. Si la géomorphologie de la station le permet, les six transects peuvent être réalisés à la suite le long d'un multi décimètres de 60 m. Le plongeur réalise un passage unique sur le transect et réalise un relevé de type « **point intercept** » (PIT). Ce relevé consiste à identifier la nature du substrat et les taxons présents en un point sous le transect **tous les 20 cm**. La méthode de notation a fait l'objet, lors du séminaire de 2017, d'une intercalibration entre les opérateurs utilisant le protocole PIT :

Tableau 4 : Évolution des notations du protocole PIT (intercalibration GT Ifreco-DCE 2017)

Notations sur le terrain	Décision prise
Turf (TU) et macroalgues (MA)	Si MA distinguable même si <3 cm = MA sinon TU
Épaisseur de sédimentation Sable (SD)/ Vase (SI)	Si le substrat meuble s'en va en « époussetant » le substrat = RC et non SD ou SI Attention : définition non applicable pour le suivi GCRMN réalisé en photoquadrat.
Gorgones (GO)	GO si le décimètre et PIT sont sur le pied de la GO
Sargasse	Si le décimètre et PIT sont sur le pied de la sargasse
Oursins / invertébrés mobiles	Déplacement de l'individu si possible pour noter la catégorie de peuplement/substrat. Pour suivi photoquadrat, substrat adjacent
Succession de couche	<ul style="list-style-type: none"> Couche « vivante » à prendre en priorité (ex TU ou AC sur RB et non RB) Si vivant sur vivant (ex: MA sur SP) : prise en compte de la couche supérieure uniquement si crée une perturbation de la couche vivante inférieure
Débris (RB) agrégés par algues calcaires (AC)	Considéré comme RC

Cette opération est réalisée six fois par station benthos.

L'effort d'échantillonnage est donc de 50 points par transect de 10 m soit 300 points par station. Cette technique d'échantillonnage permet d'obtenir des informations qualitatives sur le benthos récifal et sur son état de stress (blanchissement, indice explicité ci-après).

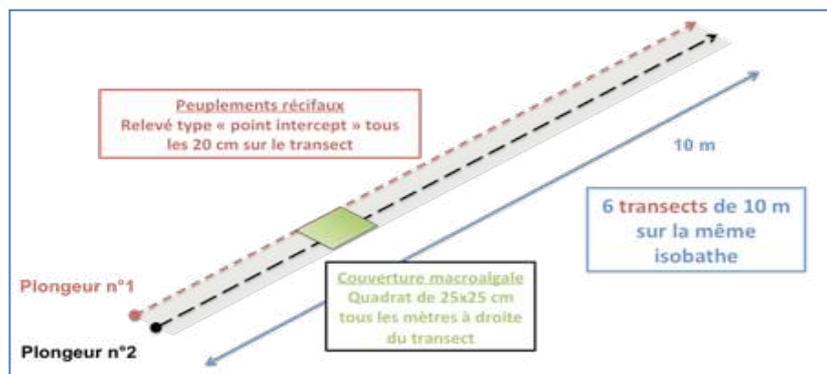


Figure 14. Schéma de l'organisation de l'expertise sur radiales

Les **indices « corail » et « macroalgues »** calculés à partir des données du PIT sont utilisés pour l'évaluation DCE.

Densité des oursins

Cet élément est testé depuis 2010 pour les diadèmes et le protocole a été modifié en 2013 pour comptabiliser (et distinguer) toutes les espèces d'oursins rencontrés (de 2010 à 2012 seule l'espèce *Diadema antillarum* était recensée).

Le protocole d'échantillonnage est le suivant : un quadrat de 1 m x 1 m est positionné à chaque mètre linéaire du transect et la totalité des oursins est comptabilisée (soit 60 quadrats par station soit 60 m²).

L'« indice oursin » est en cours de réflexion et pourrait servir à l'élaboration d'un éventuel indice multimétrique. Il n'est pas utilisé actuellement pour l'évaluation DCE.

Indice oursin = densité moyenne des individus sur les 60 quadrats (Nombre d'individus / m²)

Blanchissement, nécroses et maladies

Le blanchissement **et les nécroses** sont notés pour chaque colonie corallienne rencontrée sur le PIT, selon cinq catégories : 0% / 1-10% / 11-50 % / 51-90% / 91-100%. **Pour les nécroses sont notés également : leur position centrale ou en périphérie de la colonie ; leur caractère récent ou ancien.** L'abondance (absence/occasionnel/présence en abondance) des maladies est notée de manière distincte, sur la totalité du transect (10 m) sur un *belt* large de 1 mètre. **Les maladies sont codifiées, suivant les critères de l'AGRRA (2016) : la maladie de la bande noire (BBD), la maladie de la bande blanche (WBD), la variole blanche (WP) et la maladie des taches noires (DS)...**

DCE 2013 : Quadrats macroalgues

Afin d'obtenir une approche plus détaillée de la couverture macroalgale, un suivi de ces organismes est réalisé par un deuxième plongeur simultanément au suivi des communautés coralliennes.

Le plongeur n°2 réalise 10 quadrats de 25 x 25 cm le long de chaque transect de 10 m établi par le plongeur n°1, avec un pas d'espace régulier d'un mètre. Le quadrat est disposé contre le mètre linéaire (à droite) en face d'une graduation entière. Ainsi, la surface échantillonnée est de 0,625 m² par transect soit 3,75 m² par station.

Pour chacun de ces quadrats sont notés :

1. Le recouvrement en macroalgues qui est évalué visuellement selon les 5 classes du tableau.
2. Le **genre ou l'espèce de macroalgue dominante**. Les macroalgues les plus communes du littoral antillais qu'il est important d'identifier sont mentionnées, à titre indicatif (liste non exhaustive) dans le tableau.
3. La **nature du substrat** (substrat majoritaire présent dans le quadrat)
4. La couverture en cyanobactéries, qui n'appartiennent pas aux macroalgues mais qui sont indicatrices d'eutrophisation, est notée en remarque mais ne rentre pas dans l'évaluation de la classe de recouvrement.

Remarque : soulignons que lors de cet échantillonnage, seuls l'espèce d'algue et le substrat dominant dans chaque quadrat sont échantillonnés (les autres espèces et substrats observés sont cependant notés en remarques). Ces deux indications de type qualitatif peuvent aider à l'interprétation de l'état de santé de l'environnement marin en termes d'eutrophisation. Cependant, elles ne peuvent en aucun cas être interprétées en termes quantitatifs car les proportions exactes de ces éléments au sein du quadrat ne sont pas indiquées (classe de couverture). Les résultats obtenus ne peuvent donc pas être assimilés à une « couverture » spécifique ou abiotique (contrairement à l'échantillonnage effectué avec les points intercept qui prend en compte toutes les espèces et substrats rencontrés).

Indice « macroalgue » = moyenne des classes de couverture sur tous les quadrats de la station

Tableau 5 : Classification de l'abondance en macroalgues

Classes	Type de présence	% recouvrement
0	Pas de macroalgues	0%
1	Présence éparse	1-10%
2	Présence nettement visible	11-50%
3	Présence et couverture forte	51-90%
4	Couverture totale	91-100%

Recrutement corallien

Le comptage des recrues coralliennes (coraux juvéniles <2cm) est effectué sur une largeur de 0,5m à gauche du transect (marquage à l'aide d'un tube en PVC de 0,5m).

Ces informations permettront d'évaluer la capacité de renouvellement des peuplements coralliens.

La surface échantillonnée est donc de 30m² par station.

Eléments complémentaires notés sur le terrain

De plus, des paramètres complémentaires sont consignés avec les données brutes : date et heure de plongée, nom des observateurs, point GPS de la zone considérée comme homogène (systèmes WGS84 UTM 20N), conditions climatiques du jour. Ces informations permettent de disposer de facteurs explicatifs liés aux conditions d'échantillonnage et de tracer les données dans le cadre de l'assurance qualité.

1.2.2.2 Protocoles DCE herbiers 2013 / 2020

Le suivi de l'écosystème herbier est réalisé lorsqu'un site propice à la réalisation du protocole d'échantillonnage est présent dans la masse d'eau dans le cadre de la DCE. Pour ce suivi, des **zones suffisamment grandes et homogènes** seront choisies dans la mesure du possible. Le suivi se déroule en plongée sous-marine (scaphandre autonome) sur un secteur comprenant une zone d'herbier homogène (*Thalassia testudinum* pur ou mixte c'est-à-dire avec du *Syringodium filiforme*) en évitant autant que possible la périphérie de l'herbier (conditions écologiques différentes).

A noter que la présence de la **phanérogame marine envahissante *Halophila stipulacea*** a beaucoup modifié le paysage sous-marin de certaines zones ces dernières années. Aussi, certains sites peuvent aujourd'hui présenter une population d'*Halophila* importante.

Composition de l'herbier

Pour chaque herbier **trois transects fixes** (géoréférencés) de 50 m de long sont déroulés.

La méthode du **LIT (*Line Intersept*)** est appliquée afin de noter :

- les changements dans la **composition spécifique**
- les zones de **fragmentation** (>2m) et de **mitage** (entre 0,5-2m) c'est à dire les zones sans phanérogames mais dont le substrat est meuble (= potentiellement colonisables par les phanérogames).
- les zones de **substrat dur** (= non colonisables)
- le type de limite des zones : stable (l'herbier s'arrête brusquement), progressif (l'herbier progresse un peu sur la zone nue), érosif (présence de **microfalaises**).

La composition spécifique en phanérogames est exprimée en termes d'assemblage d'espèces comme décrit dans le tableau ci-après. Le pourcentage d'absence/présence de chaque espèce ou assemblage d'espèce sur le transect peut ainsi être calculé.

Remarque : ce pourcentage doit être distingué du pourcentage de recouvrement (≈densité) du substrat qui est mesuré dans les quadrats (Cf. ci-après).

Tableau 6 : Description des catégories d'assemblage de phanérogames pris en compte dans le LIT

Catégorie	Description
TT pur	Herbier monospécifique à <i>Thalassia testudinum</i>
SF pur	Herbier monospécifique à <i>Syringodium filiforme</i>
HS Pur	Herbier monospécifique à <i>Halophila stipulacea</i>
TT + SF	Herbier mixte à <i>Thalassia testudinum</i> et <i>Syringodium filiforme</i>
TT + SF + HS	Herbier mixte à <i>Thalassia testudinum</i> , <i>Syringodium filiforme</i> et <i>H. stipulacea</i>
TT + HS	Herbier mixte à <i>Thalassia testudinum</i> et <i>Halophila stipulacea</i>
SF + HS	Herbier mixte à <i>Syringodium filiforme</i> et <i>Halophila stipulacea</i>

Un **BELT de 1 m** est également réalisé le long du transect.

Dans l'ensemble du couloir de 1 m, est comptabilisé le nombre :

- d'**oursins** (en distinguant les espèces)
- de **colonies coralliennes** (en distinguant les genres/espèces quand cela est possible)
- de signes de **bioturbation** (« monts » et « entonnoirs »).

Sont également notés :

- l'abondance (absence, tache occasionnelle ou présence sur nombreux pieds, herbier bien colonisé) des **cyanophycées**
- la présence en abondance/présence occasionnelle/absence de signes de **bioturbation** (« monts » et « entonnoirs »)
- la présence en abondance/présence occasionnelle/absence **d'algues dérivantes**, de **débris de feuilles de phanérogames** (quelques m²), de **macroalgues épiphytes**
- La nature du substrat selon les catégories suivantes (Source : Kerninon et Hily, 2015) : Vase, Sable fin vaseux, Sable fin propre, Sable grossier propre, Macrodébris coralliens ou graviers/cailloutis
- L'état de santé, selon la grille adaptée de Bouchon et al. (2003) (tableau ci-après).

Tableau 7 : Détail des classes du paramètre « état de santé » (adaptées de Bouchon et al, 2003)

Classe	Caractéristique de l'herbier de phanérogames
1	<i>Herbier de TT pur</i>
2	<i>Herbier mixte à TT et SF ou Herbier à SF pur</i>
3	<i>Signe d'eutrophisation ou de sédimentation</i>
4	<i>Herbier avec macroalgues ou envasé. Eutrophisation ou hypersédimentation marquée</i>
5	<i>Herbier envahi par les macroalgues ou envasé</i>

Couverture végétale

3 quadrats de 50 x 50 cm, par transect sont positionnés le long du transect, de façon aléatoire autour de 5m, 25 et 45m. Les quadrats sont sous-divisés en 25 carrés de 10 cm X 10 cm, soit une surface de 4%.

Au sein de chaque quadrat :

- le recouvrement du substrat en pourcentage réel est évalué par espèce de phanérogames, par espèce de macroalgues et pour les cyanophycées
- le substrat colonisé par les cyanophycées est noté
- la nature des épibioses présentes est renseignée, par ordre de dominance
- la floraison des phanérogames est recherchée
- la présence/absence de sénescence ou maladies sur les feuilles est indiquée.

Densité et longueur de feuilles

Ce suivi ne fait pas partie du protocole appliqué en 2021, mais a été ajouté afin de comparer les résultats à ceux de 2013. Dans 30 quadrats de 10 x 20 cm, soit un quadrat tous les 5 m sur chaque transect, le nombre des plants de *T. testudinum* et *S. filiforme* sont comptés.

Dans les quadrats et autour si nécessaire, si possible 100 des plus longues feuilles de chaque plant (non « broutées ») sont également mesurées pour *Thalassia testudinum* ainsi que pour *Syringodium filiforme*.

2 Résultats et éléments de discussion

2.1 Résultats du volet cartographique

2.1.1 Évaluation de la classification

Cette section présente les résultats obtenus pour l'évaluation des performances de classification. Les matrices de confusions obtenues pour le cas équilibré (même nombre d'échantillons par classe, celui de la plus petite classe) ne sont pas présentées, en effet le nombre d'échantillons de la plus petite classe étant trop insuffisant pour évaluer quoi que ce soit.

L'évaluation du modèle complet à 4 images, en mode déséquilibré (distribution d'origine de la donnée) est présentée dans la figure ci-dessous (Figure 15). Comme expliqué précédemment, la base de données d'apprentissage est extrêmement déséquilibrée et bon nombre de classes sont trop sous-représentées. Il convient alors d'interpréter cette matrice de confusion ainsi que les scores de précisions globales obtenus sur les ensembles de validation des différents modèles avec une grande prudence. D'une part, les classes trop peu représentées vont avoir une estimation de leur précision très surestimée du fait de la faible indépendance entre apprentissage et validation (le cas extrême où il n'y a qu'un polygone disponible). D'autre part, les classes au contraire très sur-représentées vont mécaniquement être mieux reconnues. Nous avons tout de même produit ces éléments d'évaluation à titre indicatif, une base de données d'apprentissage plus robuste et plus représentative serait nécessaire à une évaluation statistique plus explicative. Nous pouvons observer sur la matrice de confusion présentée pour le modèle complet à 4 images que toutes les classes semblent être très bien reconnues. Ce résultat nécessite donc d'être fortement relativisé.

Enfin, nous avons reporté l'évaluation de l'ensemble des modèles ajustés et utilisés pour prédire la baie de Marigot (les autres baies ayant toutes été prédites par le modèle à 4 images). Ces résultats sont reportés dans le tableau suivant (Tableau 8). Les performances s'étalent de 72% de bonne reconnaissance pour le modèle à 1 seule image à 98% pour le modèle à 4 images.

Une fois cette étape de validation effectuée, nous avons pu prédire l'ensemble des pixels disponibles et prédire la typologie visée sur l'ensemble du site.



	Précision Globale
mod1img_Z	72,00 %
mod2img_AZ	94,00 %
mod2img_BZ	96,00 %
mod2img_CZ	87,00 %
mod3img_ABZ	98,00 %
mod3imgACZ	95,00 %
mod3imgABZ	97,00 %
mod3img_ABCZ	98,00 %

Tableau 8. Résumé des performances de prédiction pour l'ensemble des modèles utilisés pour la production cartographique

2.1.2 Résultat intermédiaire : détection des bateaux

Ce paragraphe est ici donné à titre indicatif, il présente un résultat intermédiaire pouvant avoir un intérêt pour de futures études. Nous avons, dans l'ensemble des images concernées, un grand nombre de bateaux visibles. Ces bateaux ne sont pas positionnés au même endroit dans chacune des images et cela rend la prédiction temporelle tout à fait incohérente pour les pixels concernés. Nous avons donc choisi de traiter ce problème en détectant automatiquement les bateaux dans chacune des images et en réaffectant aux polygones concernés la classe avec le polygone avait la plus grande surface de contact. Cela nous a permis de gommer les artefacts dus à la présence des bateaux.

Cette détection automatique des bateaux a été réalisée à l'aide d'un outil *DeepLearning* i-Sea, entraîné et ajusté pour cartographier les bateaux dans des images à très haute résolution spatiale (ex. images Pléiades). Notre algorithme a permis de détecter la grande majorité des bateaux et corriger les erreurs de façon automatique.

La figure suivante (Figure 16) présente les résultats obtenus sur 4 images différentes pour une petite région d'intérêt. De nombreuses perspectives, notamment le suivi des activités nautiques, pourraient bénéficier de ce type d'outil.

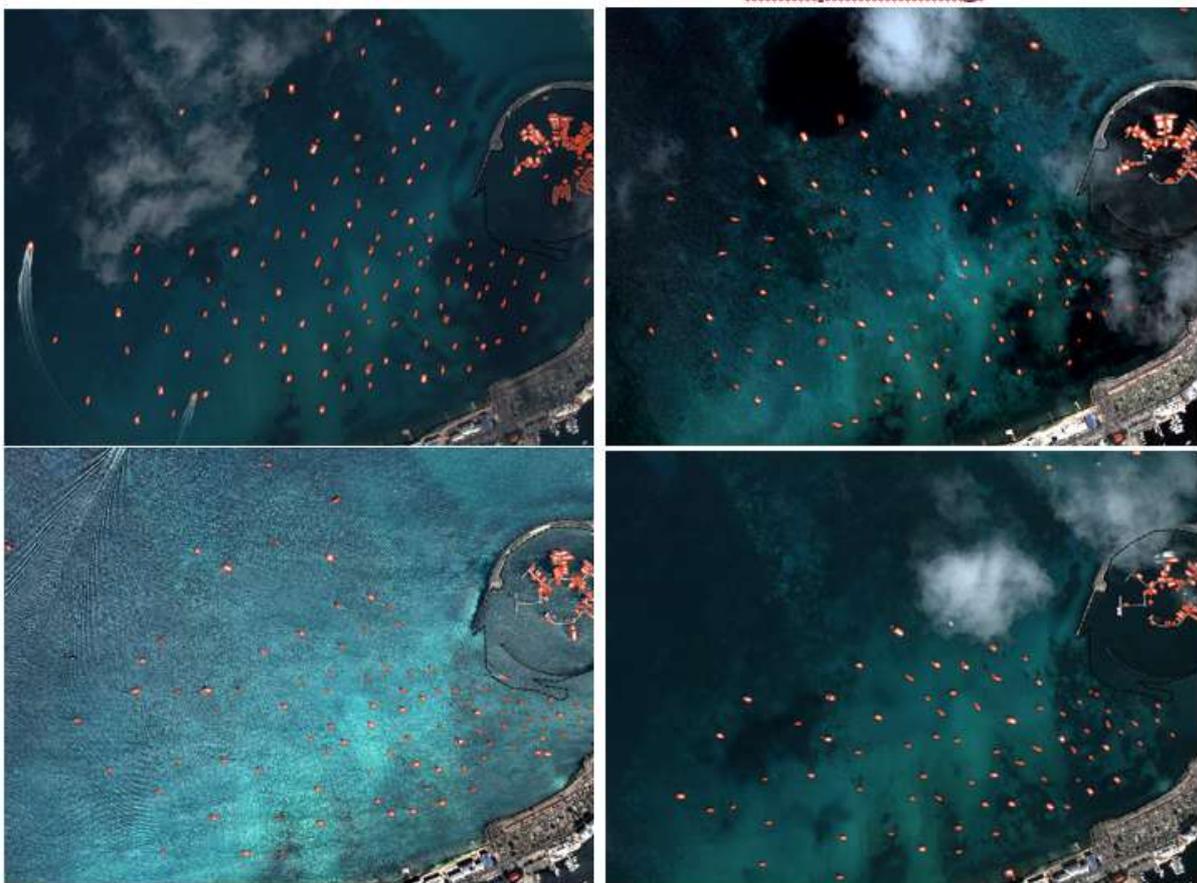


Figure 16. Détection automatique des bateaux sur une région d'intérêt pour les 4 scènes Pléiades considérées

2.1.3 Présentation des résultats cartographiques

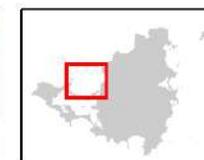
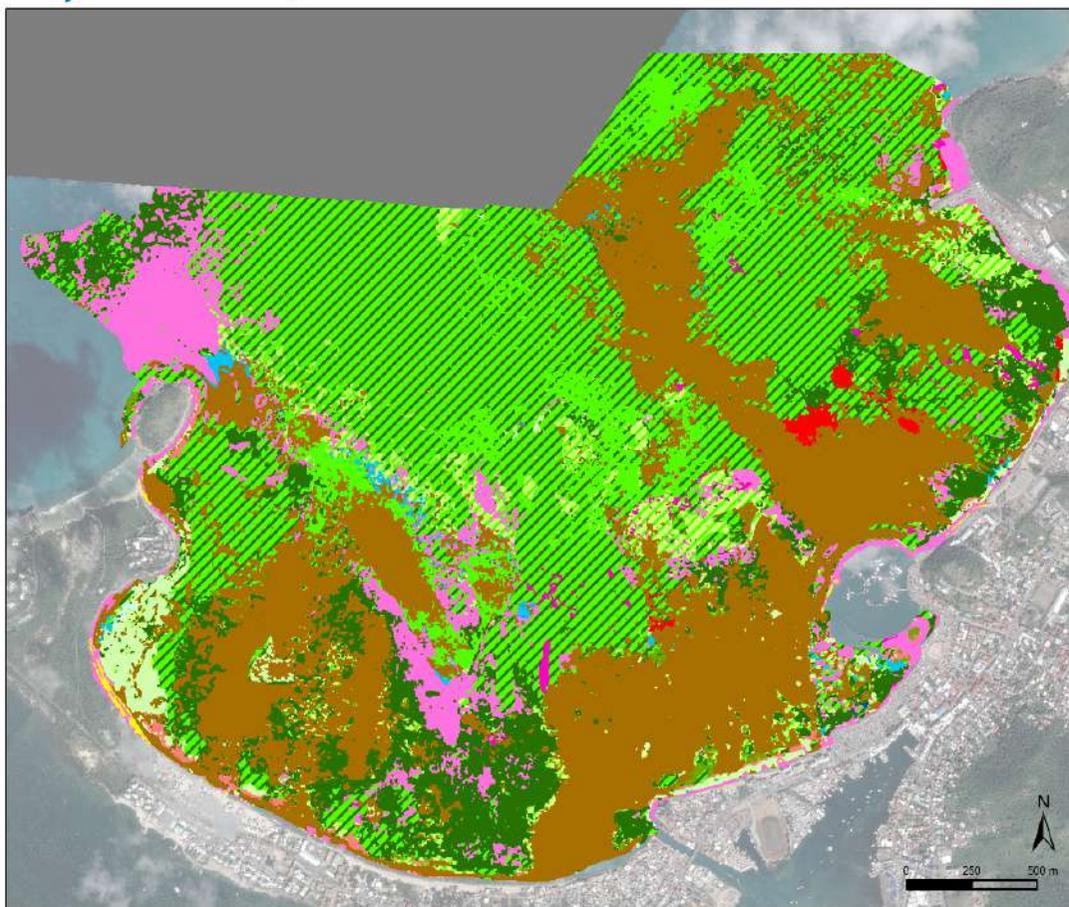
Cette section présente l'ensemble des cartographies, pour les 3 baies étudiées, produites durant l'année 2021 sur la base d'une série temporelle Pléiades 2020 et d'une campagne de terrain 2021.

Deux niveaux typologiques sont présentés, un premier niveau très fin, avec la typologie visée par l'étude et un niveau beaucoup plus grossier (mais aussi plus robuste) permettant d'isoler les classes concernant les types d'herbiers d'une grande classe ne concernant que les sédiments, tout en conservant une information sur la présence d'algues ou de coraux.



Cartographie des habitats marins par télédétection multitemporelle Pléiades 2020-2021 Baie de Marigot - Saint Martin

Editée le 29/07/2021



- Affrètement rocheux à peuplements algaux dominants et peuplements coralliens épars
- Affrètement rocheux à peuplements coralliens
- Blocs artificiels à peuplements coralliens
- Epave sur fond meuble
- Front pionnier à herbiers à Halodule wrightii
- Galets de bord de plage
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à S. tilliforme et Halophila sp
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à T. testudinum et Halophila sp
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à T. testudinum et S. tilliforme
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à Halophila sp
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à Halophila sp et macroalgues
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à Halophila sp et macroalgues Chaetocera
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à S. tilliforme
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à S. tilliforme et macroalgues
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à T. testudinum
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à T. testudinum et macroalgues
- Plaine sédimentaire à macroalgues
- Plaine sédimentaire à macroalgues à Halimeda sp. dominante
- Plaine sédimentaire sablonneuse à sable vaseuse
- Substrat rocheux à peuplements algaux dominants et peuplements coralliens épars
- Substrat rocheux à peuplements coralliens

Réalisation : i-Sea 2021
Sources : 2020/2021 i-Sea, Impact Mer
Image : Pléiades 2020 © AIRBUS DS - tous droits réservés
Système de coordonnées :
RGAFF09 UTM Zone20N



Figure 17. Cartographie des habitats marins de la Baie de Marigot (Saint-Martin) par analyse d'images satellite

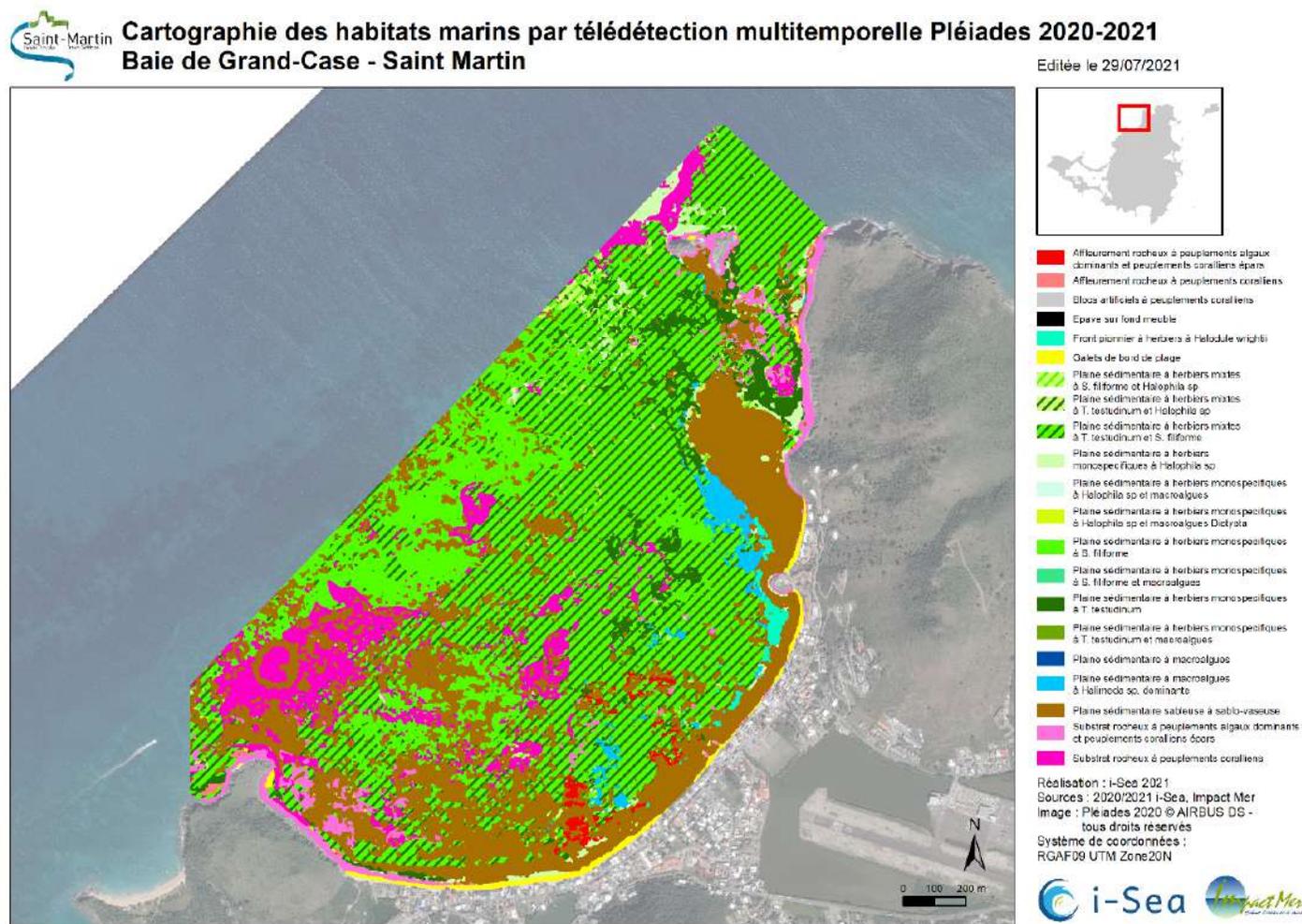
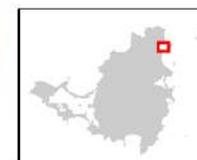
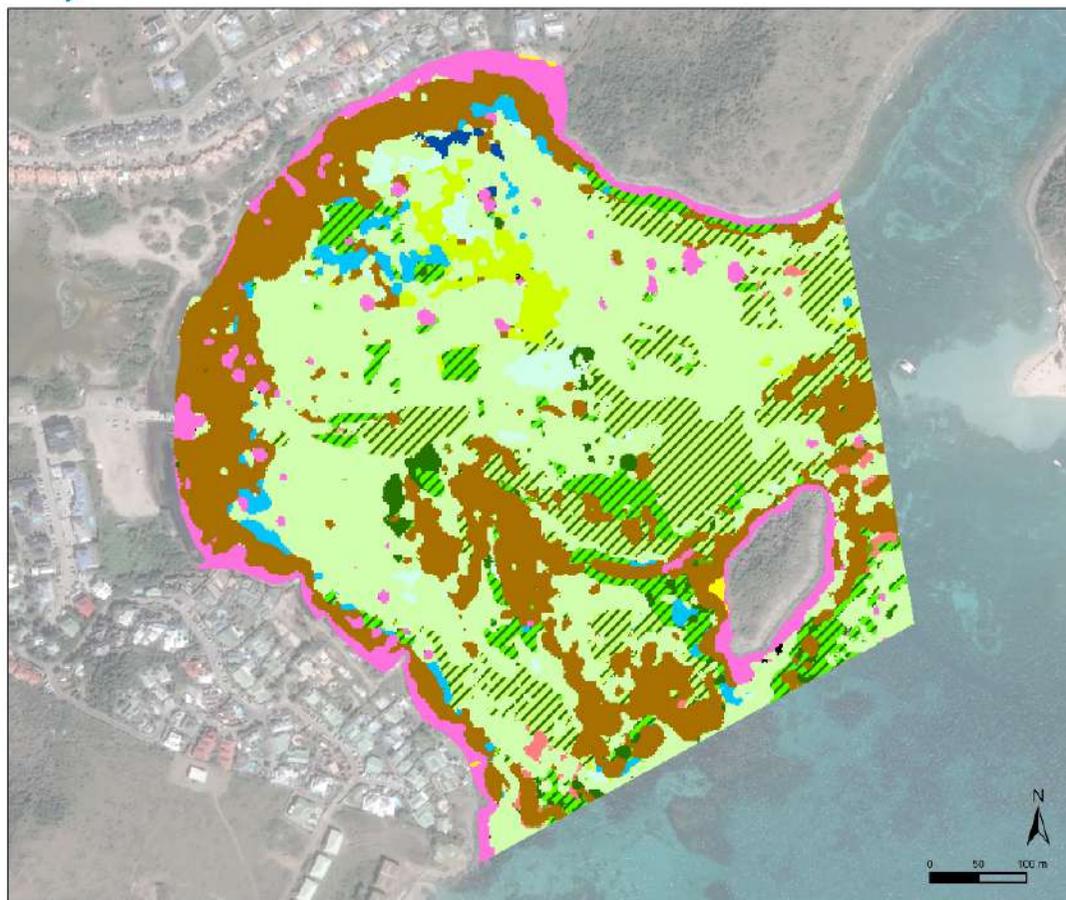


Figure 18. Cartographie des habitats marins de la Baie de Grand-Case (Saint-Martin) par analyse d'images satellite



Cartographie des habitats marins par télédétection multitemporelle Pléiades 2020-2021 Baie de Cul-de-Sac - Saint Martin

Éditée le 29/07/2021



- Affleurement rocheux à peuplements algaux dominants et peuplements coralliens éparés
- Affleurement rocheux à peuplements coralliens
- Ollots artificiels à peuplements coralliens
- Epaves sur fond meuble
- Front pionnier à herbiers à *Halodule wrightii*
- Oelets de bord de plage
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à *S. filiforme* et *Halophila* sp.
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à *T. testudinum* et *Halophila* sp.
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme*
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *Halophila* sp.
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *Halophila* sp. et macroalgues
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *Halophila* sp. et macroalgues
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *S. filiforme*
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *S. filiforme* et macroalgues
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *T. testudinum*
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *T. testudinum* et macroalgues
- Plaine sédimentaire à macroalgues
- Plaine sédimentaire à macroalgues à *Halimeda* sp. dominants
- Plaine sédimentaire vaseuse à sablo-vaseuse
- Substrat rocheux à peuplements algaux dominants et peuplements coralliens éparés
- Substrat rocheux à peuplements coralliens

Réalisation : i-Sea 2021
Sources : 2020/2021 i-Sea, Impact Mer
Image : Pléiades 2020 © AIRBUS DS - tous droits réservés
Système de coordonnées :
RGAF09 UTM Zone20N

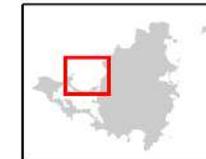
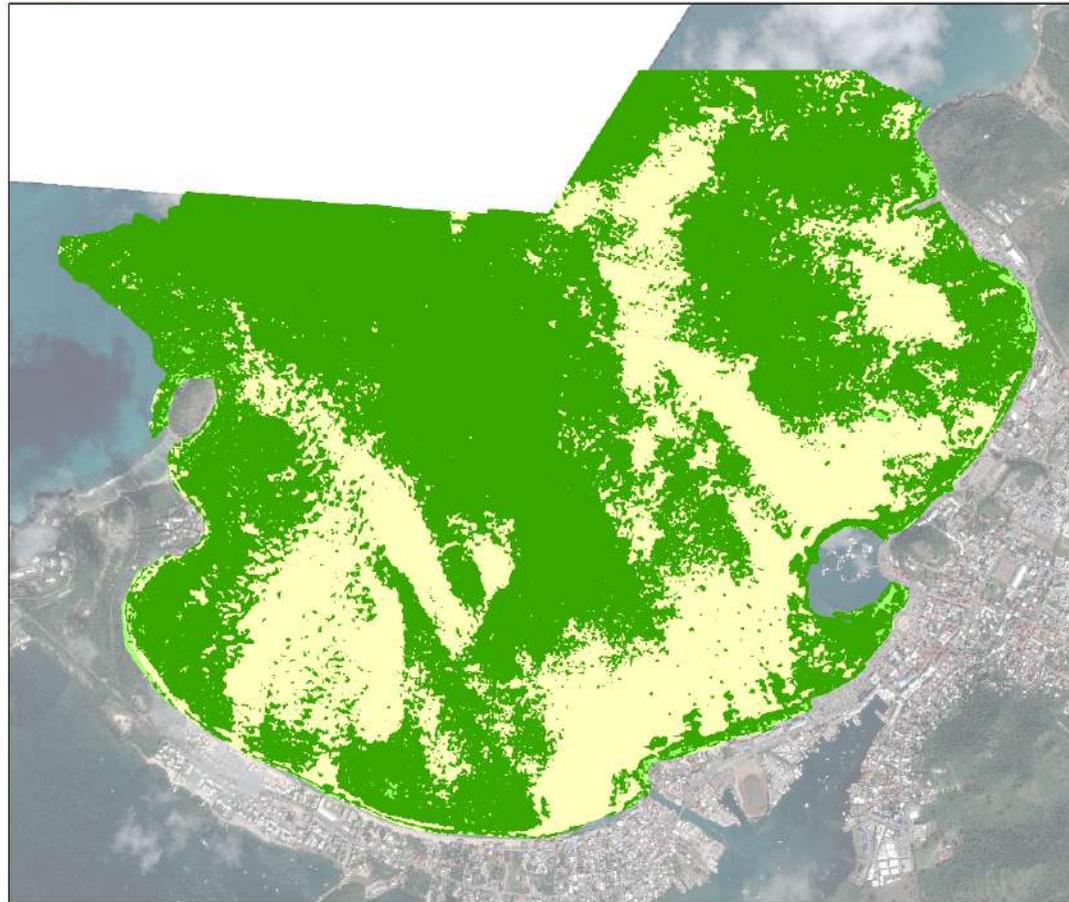


Figure 19. Cartographie des habitats marins de la Baie de Cul-de-Sac (Saint-Martin) par analyse d'images satellite



Cartographie des habitats marins (version simplifiée) par télédétection Pléiades Baie de Marigot - Saint Martin - 13/02/2021

Éditée le 29/07/2021



Typologie

- Algues
- Coraux
- Herbiers
- Sédiment nu



Réalisation : i-Sea 2021
Sources : 2020/2021 i-Sea, Impact Mer
Image : Pléiades 13/02/2021 © AIRBUS DS -
tous droits réservés
Système de coordonnées :
RGAF09 UTM Zone20N



Figure 20. Cartographie simplifiée des habitats marins de la Baie de Marigot (Saint-Martin) par analyse d'images satellite

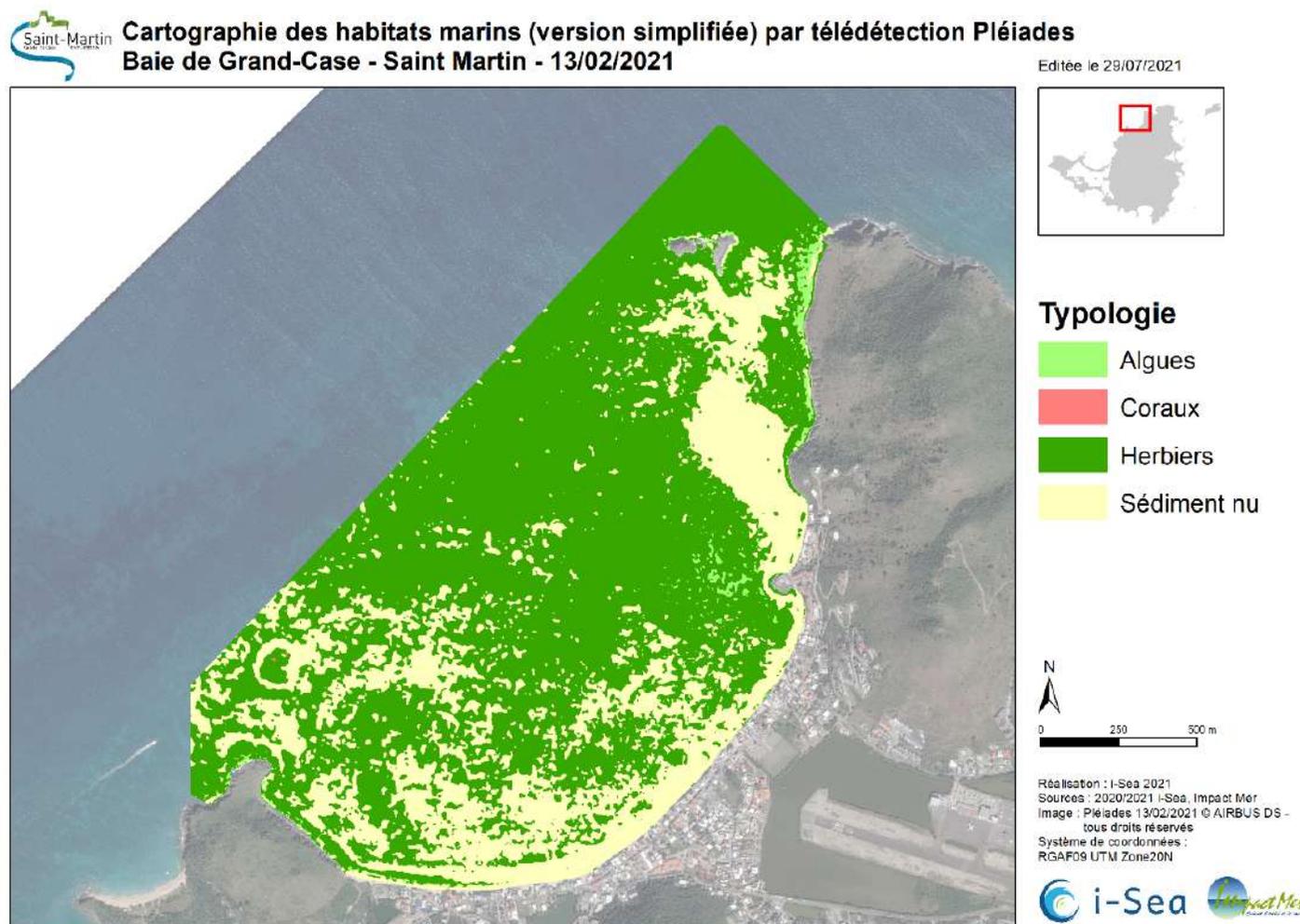
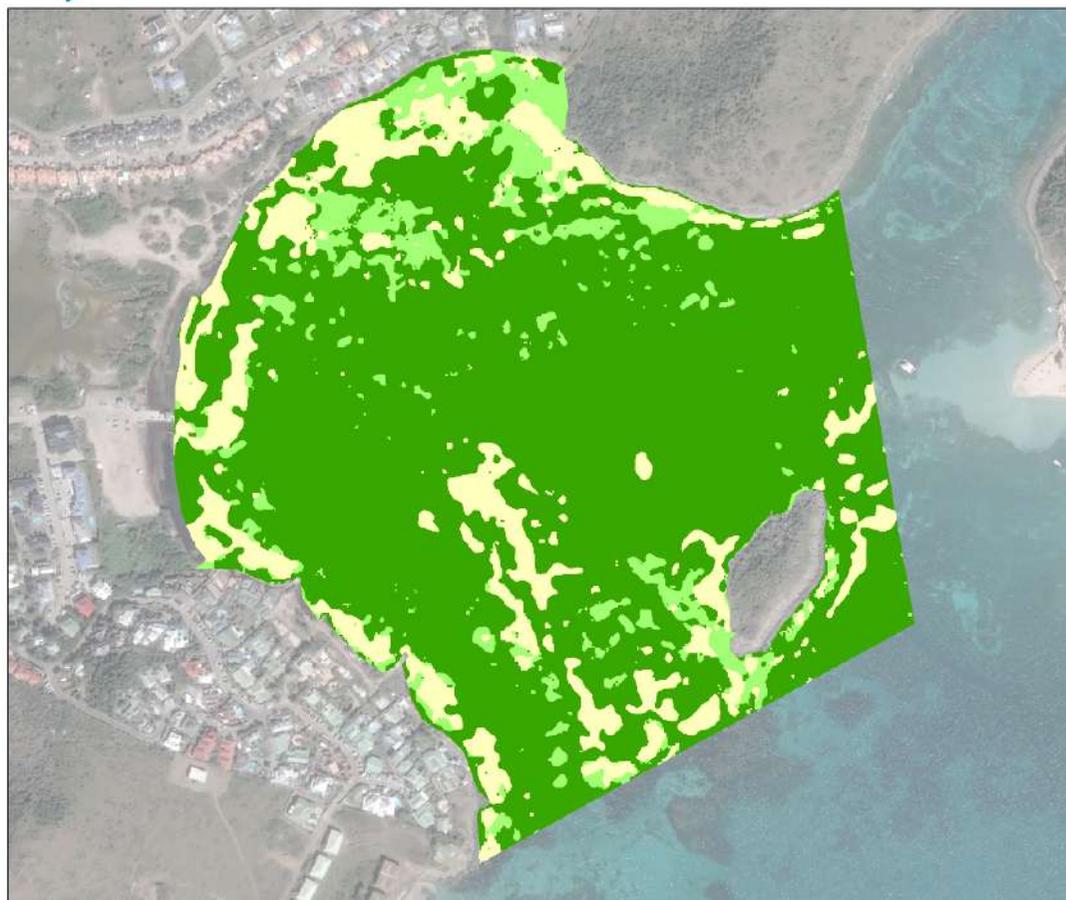


Figure 21. Cartographie simplifiée des habitats marins de la Baie de Grand-Case (Saint-Martin) par analyse d'images satellite



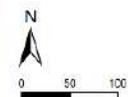
Cartographie des habitats marins (version simplifiée) par télédétection Pléiades Baie de Cul-de-Sac - Saint Martin - 13/02/2021

Éditée le 29/07/2021



Typologie

- Algues
- Coraux
- Herbiers
- Sédiment nu



Réalisation : i-Sea 2021
Sources : 2020/2021 i-Sea, Impact Mer
Image : Pléiades 13/02/2021 © AIRBUS DS -
tous droits réservés
Système de coordonnées :
RGAF09 UTM Zone20N



Figure 22. Cartographie simplifiée des habitats marins de la Baie de Cul-de-Sac (Saint-Martin) par analyse d'images satellite

2.1.4 Comparaison I-Sea 2020 et Pareto (2013)

Une fois notre cartographie produite, nous avons pu comparer nos résultats avec ceux produits par Pareto (2013). La Figure 23 permet d'observer les deux cartographies avec la même typologie sur la baie de Marigot.

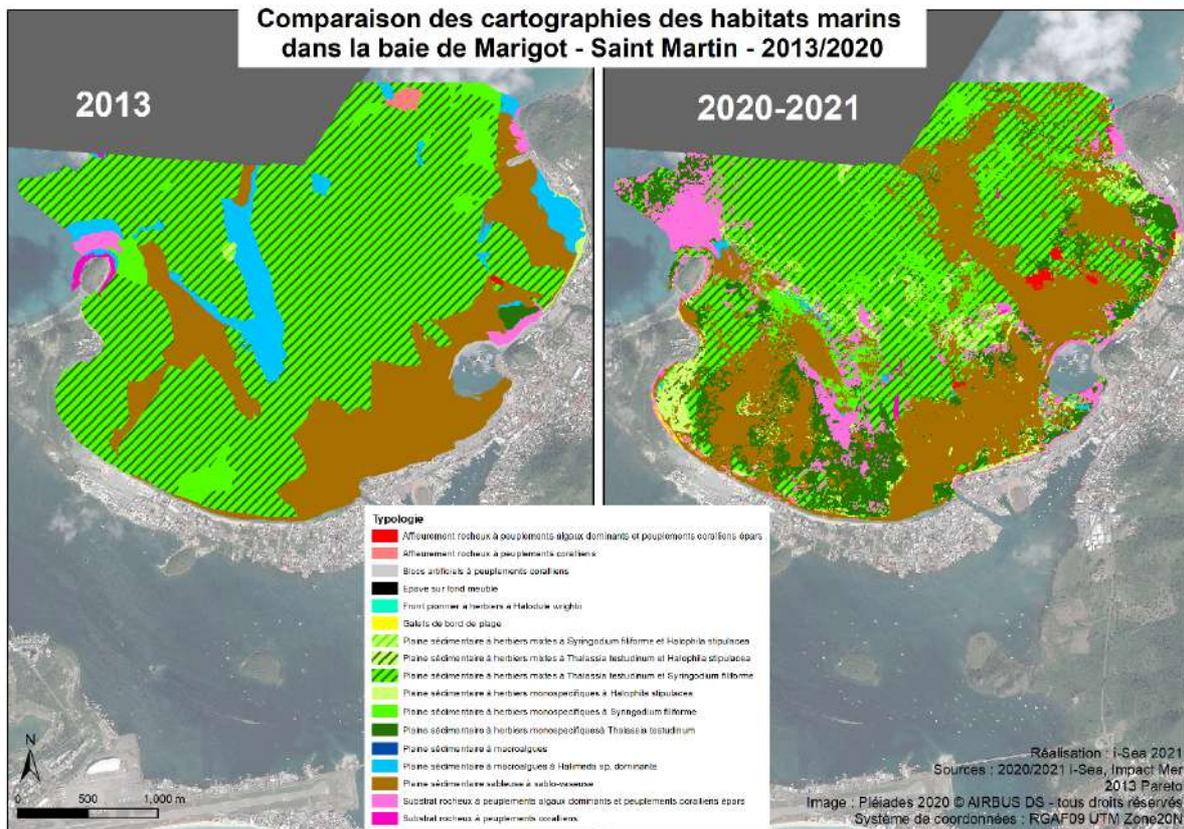


Figure 23. Comparaison des cartographies de Pareto 2013 (à gauche) et i-Sea 2020 (à droite) sur la baie de Marigot

La première remarque concerne la finesse des contours, le travail par télédétection satellitaire optique à très haute résolution spatiale permet un contournage fin des entités à cartographier ce que ne permet pas le travail uniquement de terrain.

Globalement on retrouve les positions des grandes enveloppes couvertes par les herbiers et les sédiments nus sauf dans deux endroits particuliers où les différences sont importantes.

Dans le premier quart sud-ouest, on peut observer que la zone sédimentaire définie par Pareto (2013) est beaucoup plus étendue en 2020, néanmoins cette zone avait déjà bien été détectée et une certaine cohérence se dégage de ce résultat.

Une seconde zone est plus critique au Nord du site, si pour Pareto l'herbier couvrait l'ensemble de la baie, nous détectons une importante plaine sédimentaire. Si les premières interprétations nous orientaient vers une possible dégradation du milieu et une possible régression des surfaces en herbier depuis 2013, avec notamment un possible effet de l'ouragan Irma sur le fond de la baie de Marigot, nous avons souhaité vérifier cela en images.

Nous avons bien positionné les points de relevés terrains correspondants à la classe « Plaine sédimentaire sableuse à sablo-vaseuse » sur notre carte 2020 et bien vérifié que cette plaine détectée en 2020 avait bien été repérée en 2021 sur le terrain. La Figure 24 permet de se rendre compte de la position de ces points sur la cartographie ainsi que sur la cartographie Pareto (2013).

● Plaine sédimentaire sableuse à sablo-vaseuse

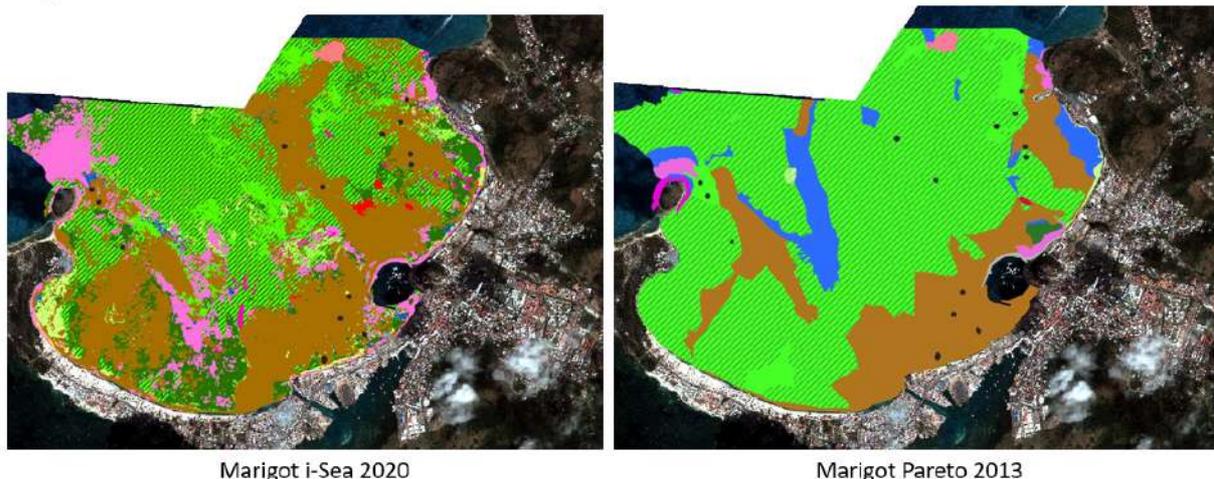


Figure 24. Localisation des relevés de terrain 'Plaine sédimentaire' sur les cartographies I-Sea 2020 et Pareto (2013)

Nous sommes ensuite allés à la recherche d'images d'archives pouvant aider notre interprétation, les images les plus parlantes que nous avons pu récupérer sont présentées Figure 25. Pour l'année 2013, si la première image (16/03) ne permet pas de reconnaître la distribution spatiale des faciès sédimentaires et habitats marins, la seconde est par contre très informative. Nous retrouvons dans cette image du 16/10/2013 une forme et colorimétrie très proche de celle détectée et cartographiée comme étant de la plaine sédimentaire en 2020. Cette forme se retrouve aussi en 2017 et 2018 ce qui nous amène à penser que l'herbier occupe plus probablement les contours que nous lui avons prédits dans cette zone depuis au moins 2013 et qu'il n'a donc peut-être pas connu les perturbations que la simple comparaison Pareto (2013) / i-Sea 2020 pouvait laisser paraître.

La Figure 26 permet de zoomer sur cette zone et montre la superposition entre une partie de la couche d'habitats marins prédite avec les images Pléiades acquises en entre 2020 et 2021, en particulier la plaine sédimentaire sableuse à sablo-vaseuse, avec les images de 2013 et 2020. Cette comparaison semble confirmer la probabilité que l'étendue de sédiments prédite en 2020 était déjà observée en octobre 2013.

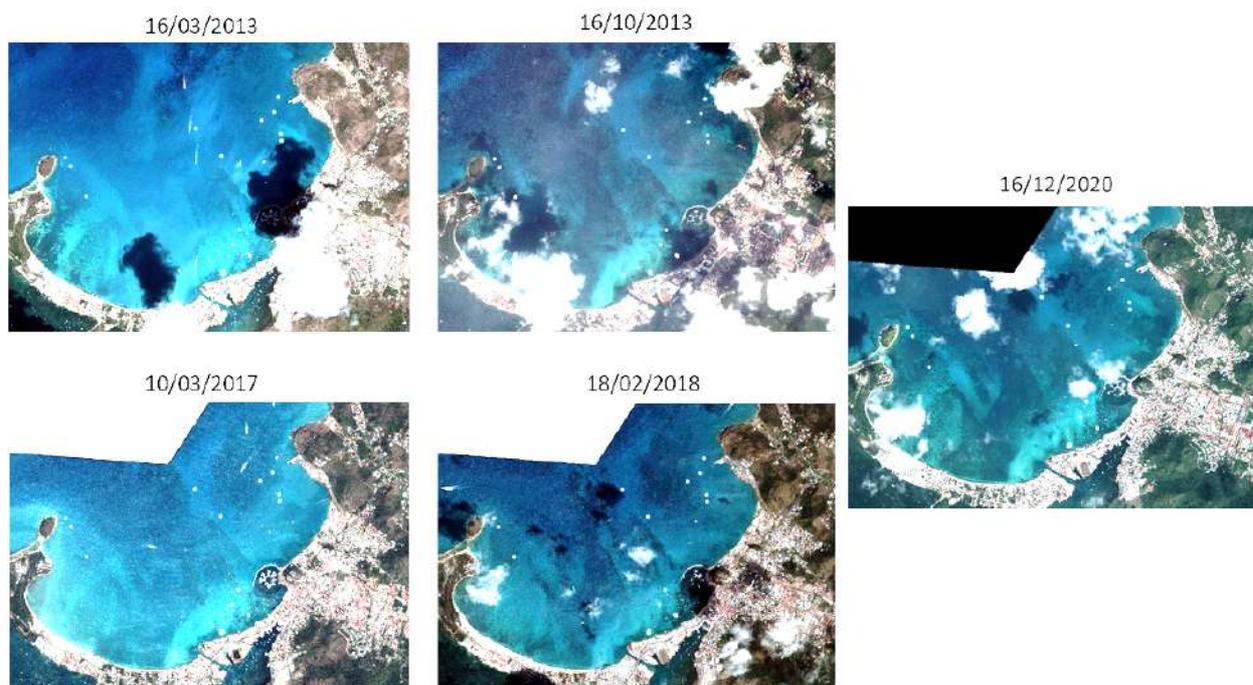


Figure 25. Observation des images d'archives 2013, 2017 et 2018 pour la baie de Marigot

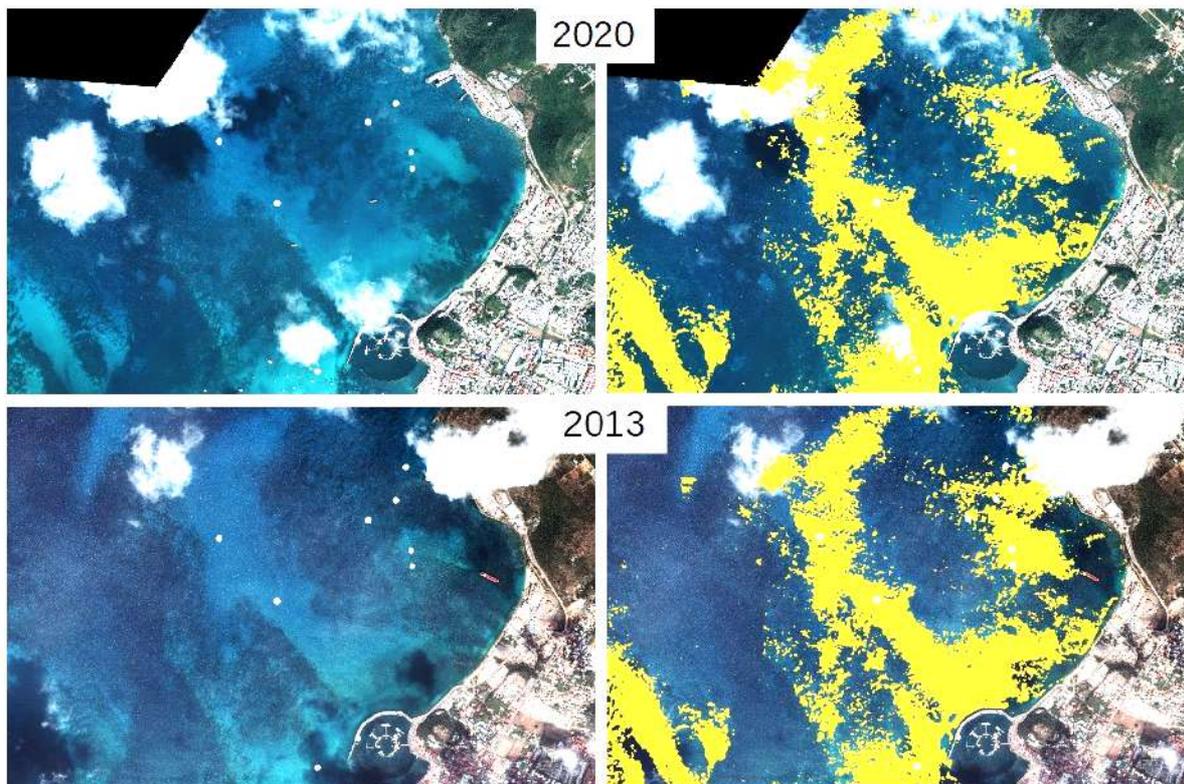


Figure 26. Images Pléiades de 2020 et 2013 superposées, à droite, aux étendus « plaine sédimentaire sableuse à sablo-vaseuse » prédite à partir de la série d'images Pléiades 2020-2021 aux images de Pléiades 2013 et 2020

2.2 État de conservation des biocénoses benthiques dans les 3 baies

Les résultats obtenus au cours de la phase 3 – « État de conservation des biocénoses benthiques dans les 3 baies concernées par les projets de ZMEL » - sont présentés tout d'abord par baie / par station. Ils sont ensuite repris de manière générique et analysés comparativement ensemble dans la suite du rapport.

2.2.1 Baie de Marigot

2.2.1.1 BENTHOS – #SMX01 - Pointe du Bluff

Un suivi des communautés coralliennes a été mené sur la station de la Pointe du Bluff, qui avait déjà fait l'objet d'un suivi lors de l'étude précédente sur la zone, dans le cadre des travaux portuaires (Pareto 2013). Les résultats obtenus sont ainsi comparés à la littérature et aux résultats antérieurs.

La Pointe du Bluff est un site remarquable du Conservatoire du littoral. Elle est emblématique de la baie et de Saint-Martin. Elle est formée d'une presqu'île rattachée à la pointe par un tombolo dont la particularité est d'être dédoublé et de délimiter une lagune, ce qui lui confère un intérêt de « curiosité géologique remarquable » pour le BRGM.

La station #SXM01 a été positionnée, au cours de l'étude précédente, sur la côte Est de la presqu'île de la Pointe du Bluff, dans la continuité du platier rocheux du littoral. Ce platier se poursuit sous l'eau sous forme de dalles et de galets jusqu'à environ 5-7 mètres de profondeur où commence une pente de sable de faible déclivité.

La profondeur moyenne de la station est de 4,5 m, similaire à l'étude de 2013 (5m).

La station suivie de la Pointe du Bluff présente une assez faible couverture corallienne de 12% (11% en 2013). Comme durant le précédent suivi, les peuplements sont globalement en bon état de santé (classe 2) avec une présence limitée de macroalgues et une légère sédimentation.

La couverture algale relevée est assez élevée avec 59% (58% en 2013) tandis que la proportion des autres organismes benthiques est moyenne à élevée avec 25% (22% en 2013). La proportion de couverture abiotique est très limitée avec 4% (9% en 2013).

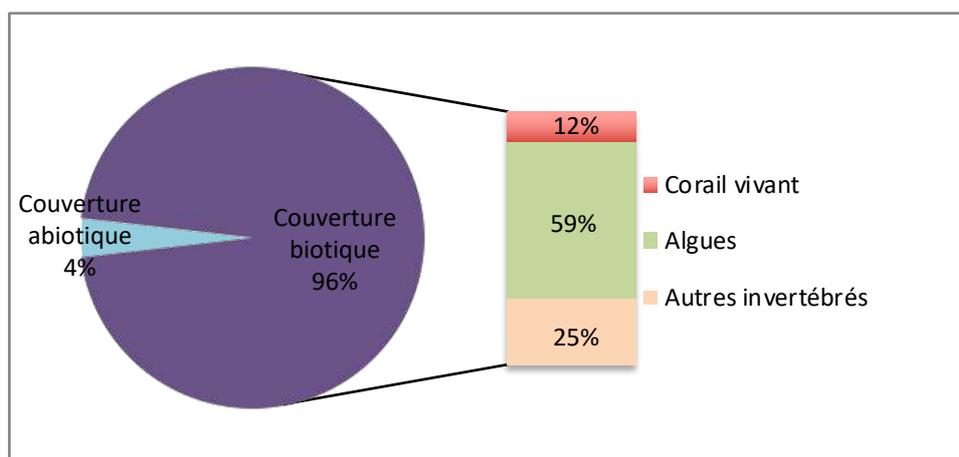


Figure 27. Composition de la couverture benthique de la station #SXM01 – Pointe du Bluff

Le détail des peuplements benthiques présente :

- Une faible proportion de coraux bioconstructeurs représentant 12% de la couverture vivante totale. Sept espèces ont été relevées. Les espèces majoritaires rencontrées sont dans l'ordre *Agaricia humilis*, *Porites astreoides*, *Siderastrea radians*. Sur le transect, les colonies touchées par la maladie SCTLD sont 2 *Montastrea cavernosa*, 2 *Pseudodiploria strigosa* ainsi que 2 *A. humilis*. Quelques colonies présentent des nécroses à moins de 10% sauf une colonie avec plus de 50% de surface nécrosée (*Mcav* touchées par la SCTLD). Il n'est pas observé de blanchissement. L'état de santé attribué est de 2,5 (2 en 2013).
- Le pourcentage élevé de la couverture algale est principalement expliqué par une importante contribution du turf avec 30% (40% en 2013) et des macroalgues non calcaires qui représentent 13% du peuplement alors qu'elles n'en représentaient que 4% en 2013. Il s'agit principalement des *Dictyota sp.* Par ailleurs les macroalgues calcaires (*Halimeda sp.*) présentent une proportion de 4,7% de couverture contre 2% en 2013. Enfin les algues calcaires encroûtantes contribuent à 11,7% contre 16% précédemment. Tout comme en 2013, très peu de cyanophycées sont observées. Le suivi de couverture moyenne en macroalgues montre 97% de quadrats présentant moins de 10% de représentation (95% en 2013). Ainsi, à pourcentage total presque identique, une modification significative est observée avec une hausse importante de la représentation des macroalgues non

calcaires, très majoritairement représentées par *Dictyota sp.*, au détriment des autres groupes, tendance signe d'enrichissement en nutriments et MO.

- Les invertébrés benthiques contribuent ensemble (éponges, gorgones et autres) à 25% du peuplement contre 24% en 2013. Les spongiaires dominent avec 16% (2013 : 15%) contre 9% de gorgones.
- Enfin la couverture abiotique sur cette station est faible avec 4% du total, majoritairement du sable entrecoupant les roches, mais également quelques zones de roches nues et du corail mort non recolonisé à minima par du turf.

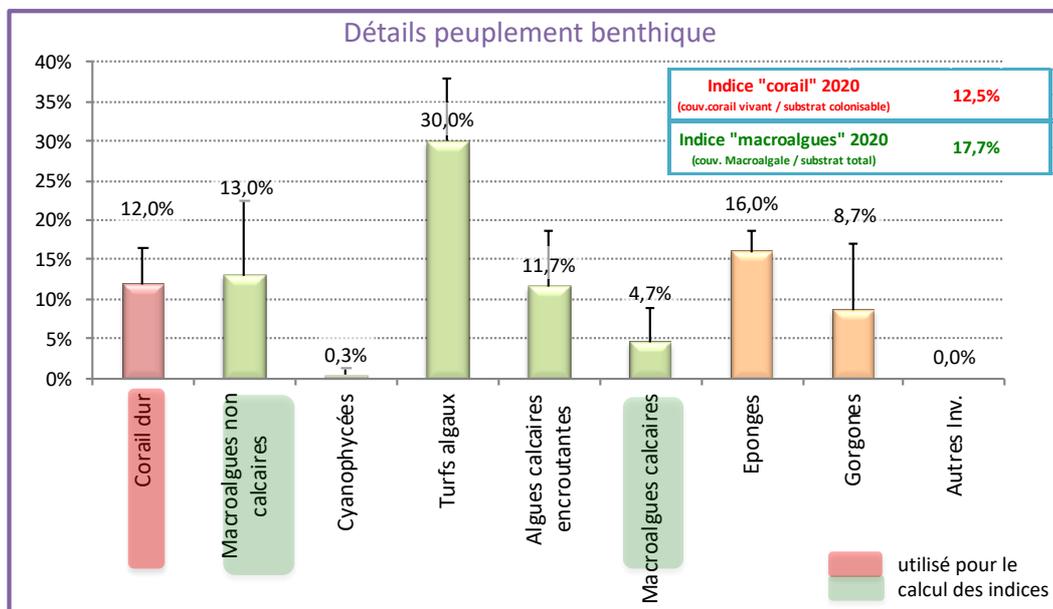


Figure 28. Composition de la couverture benthique de la station #SXM01 – Pointe du Bluff

Le recrutement corallien observé sur le transect s'est limité à quelques recrues regroupées en fin de zone. En 2013 avait été observé un recrutement relativement élevé malgré la faible couverture corallienne sur la station, avec 5,8 recrues/m² ($\pm 1,3$), concernant principalement le genre *Siderastrea*. Lors de ces nouveaux relevés, non seulement les recrues sont presque totalement absentes mais en plus le genre *Siderastrea* est présent mais faiblement représenté parmi les colonies coralliennes relevées.

Ce taux de recrutement élevé est probablement lié à la nature du substrat qui est favorable à une meilleure dynamique de colonisation corallienne sur cette station. En effet, elle présente une couverture en mélobésiées importante (16% des peuplements). Contrairement aux autres communautés algales, elles gênent peu la fixation des larves coralliennes. Par ailleurs la structure du substrat offre des zones de fixation relativement protégées dans les anfractuosités entre les dalles rocheuses. Ce résultat témoigne d'une capacité de régénération (résilience) globalement bonne des communautés coralliennes sur le site mais d'un faible taux de survie des larves coralliennes. (Pareto 2013)

Cette analyse issue de Pareto 2013 a donc évolué de manière négative, avec tout comme à l'époque une proportion limitée de coraux, mais également un faible recrutement, possiblement dû à la modification des recouvrements algaux, avec 1% d'augmentation globale avec surtout l'augmentation de recouvrement des macroalgues. La couverture abiotique passe de 9 à 4%, ce qui limite *in fine* les possibilités de recrutement larvaire.

Par ailleurs, les relevés d'oursins ont également été très limités. Seul l'oursin *Diadema Antillarum* est représenté avec en moyenne 0,35 \pm 0,24 oursins par m² (2/m² \pm 0,8 ind. en 2013).

La rareté globale des oursins constitue un déficit d'herbivores qui assurent un rôle de régulateur des turfs algaux. Ce déséquilibre de la chaîne trophique est susceptible de contribuer à un surdéveloppement des peuplements algaux, aux dépens des communautés coralliennes. La fixation de larves coralliennes (recrues) nécessite en effet la présence de substrats nus ou peu colonisés par les gazons algaux. (Pareto 2013)

Par rapport à 2013, les couvertures coralliennes et macroalgales sont similaires. Les autres organismes benthiques ont augmenté de 3% par rapport à 2013 : les éponges sont présentes dans les mêmes proportions alors que les gorgones ont augmenté et que les autres invertébrés ont diminué. A l'inverse, le substrat abiotique a diminué, lié à la diminution des zones de sable. Il est probable que la position des transects soit imputable à cette différence plutôt qu'une évolution du milieu.



Figure 29. Illustrations de la station #SXM01 – Pointe du Bluff

2.2.1.2 BENTHOS – #SXM02 - Banc de Médée

Un suivi des communautés coralliennes a été mené sur la station du Banc de Médée, qui avait déjà fait l'objet d'un suivi lors de l'étude précédente. Les résultats obtenus sont ainsi comparés à la littérature et aux résultats antérieurs.

Le banc de Médée est le seul haut-fond rocheux de la baie. Des peuplements de communautés coralliennes ont colonisé cet affleurement rocheux de dimensions très limitées (quelques centaines de mètres de circonférence). La station est positionnée sur le banc, dans une gamme de profondeurs comprises entre 5 et 6,2 m (moyenne de 5,6 m). D'après la carte marine, la profondeur du point haut du banc de Médée est de 4,8 m.

La station suivie sur le banc de Médée présente une couverture corallienne limitée à 11% (14% en 2013). Comme au niveau de la pointe du Bluff et aussi durant le précédent suivi, les peuplements sont globalement en bon état de santé (classe 2) avec une présence assez limitée de macroalgues et une légère sédimentation (Figure 30).

La couverture algale relevée est modérée mais bien présente avec 49% (48% en 2013) tandis que la proportion des autres organismes benthiques est élevée avec 35% (en augmentation puisque 28% en 2013). La proportion de couverture abiotique est limitée à 5% (10% en 2013).

Il est à noter que le parcours du transect traverse une large bande de sable d'environ 2 mètres vers son milieu, qui augmente la contribution de la couverture abiotique et réduit celle des différentes typologies du substrat biotique.

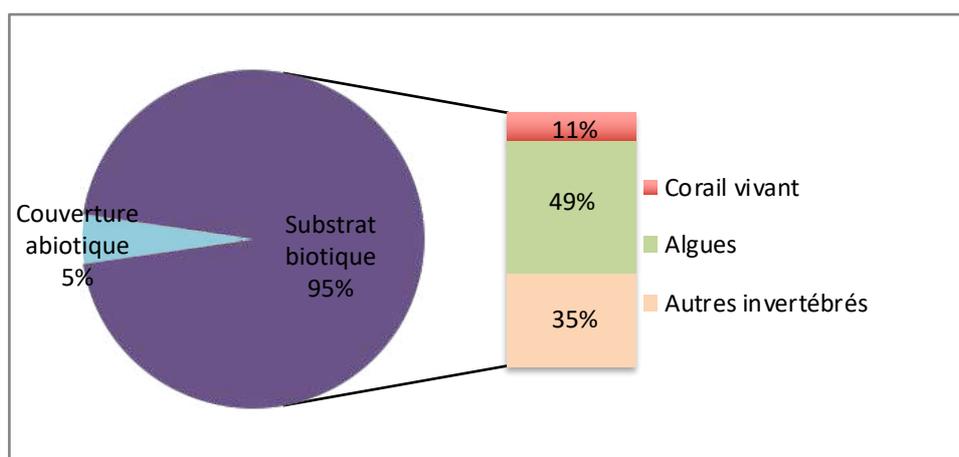


Figure 30. Composition de la couverture benthique de la station #SXM02 – Banc de Médée

Le détail des peuplements benthiques présente :

- Une représentation des coraux limitée à 11% de la couverture vivante totale (15% en 2013). Six espèces ont été relevées. Les espèces majoritaires rencontrées sont dans l'ordre *Siderastrea siderea* et *Porites astreoides*. Sur le transect, seule une colonie d'*Orbicella faveolata* est touchée par la maladie SCTLD. Quelques colonies présentent des nécroses à moins de 10% sauf une colonie avec plus de 50% de surface nécrosée. Il n'est pas observé de blanchissement. L'état de santé attribué est de 2,3.
- La contribution algale de 49% de la couverture est dominée par le turf avec 26% (45% en 2013) et des macroalgues non calcaires (18,3% du peuplement contre 5% en 2013). Il s'agit principalement des *Dictyota sp.* Les algues calcaires encroûtantes ne sont représentées qu'à 2%, mais cela est proche des 3% de 2013. Tout comme en 2013, là encore les macroalgues calcaires sont absentes de ce site, tandis que peu de cyanophycées sont observées (3,3%, <1% en 2013). Le suivi de couverture moyenne en macroalgues montre 95,3% de quadrats présentant moins de 10% de représentation (100% en 2013). La différence réside ici dans 4,7% de sable correspondant au couloir de sable déjà évoqué.

- Les invertébrés benthiques contribuent ensemble (éponges, gorgones et autres) à 34,6% du peuplement contre 31% en 2013. Les spongiaires dominent avec 23,6% (2013 : 22%) contre 8,3% de gorgones (2013 : 9%). Le constat est identique qu'à l'époque avec une diversité importante.
- Enfin la couverture abiotique sur cette station est faible avec 5% du total, majoritairement le passage de sable évoqué. Sur le reste du site, la couverture abiotique est rare voire inexistante.

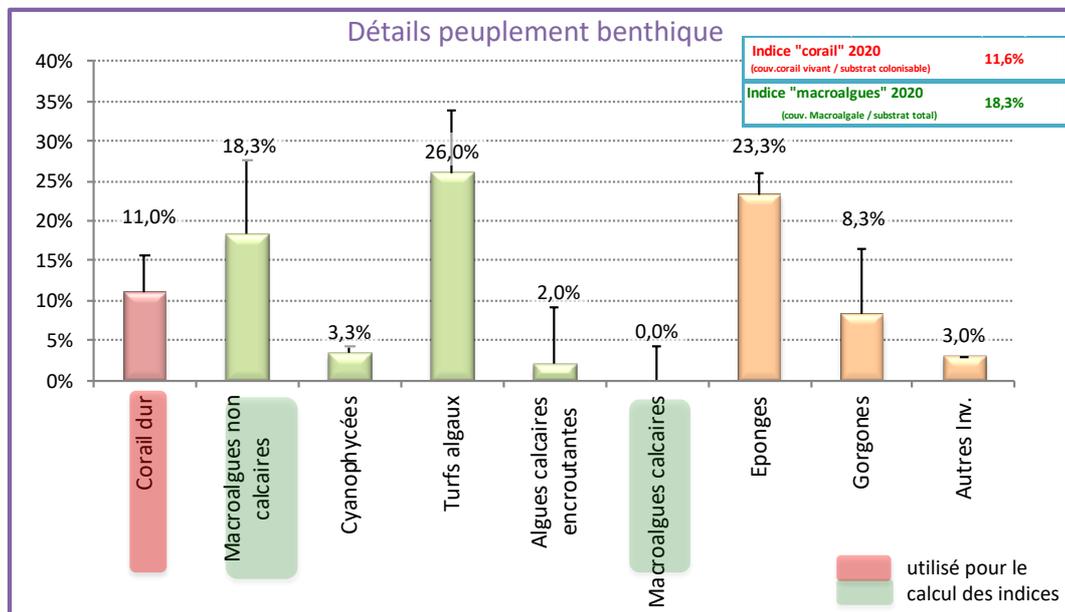


Figure 31. Composition de la couverture benthique de la station #SXM02 – Banc de Médée

Le Banc de Médée ne présente presque aucun recrutement corallien (moins de 10 recrues relevées). Cela pourrait être expliqué par l'importance de la proportion de substrat colonisé. Il est cependant également possible que la disponibilité des larves sur la zone ait été faible puisque les deux sites suivis sur la baie ont montré des recrutements limités.

Les comptages d'oursins n'ont également montré que quelques occurrences de *Diadema antillarum* sur la zone échantillonnée. Aucune autre espèce n'a été observée.

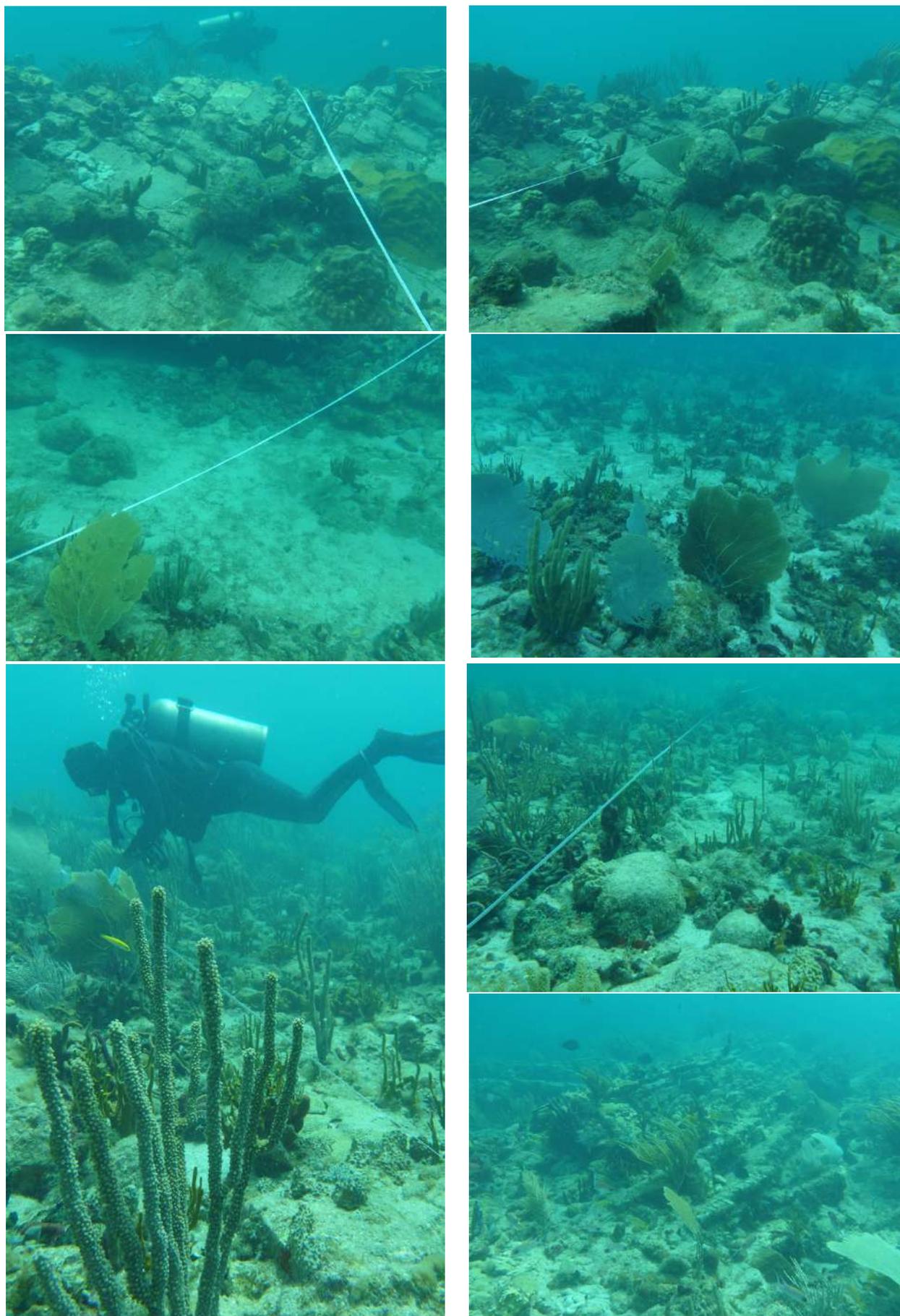


Figure 32. Illustrations de la station #SXM02 – Banc de Médée

2.2.1.3 BENTHOS – #SXM03 – Pointe Arago / Galisbay

Il n'est pas possible de réaliser de suivi des communautés coralliennes sur la zone de Galisbay, du fait de la très faible représentation des organismes vivants, de surcroît des communautés coralliennes, sur les substrats naturels de la Pointe Arago (Figure 33) et ceux majoritairement artificiels de la zone de l'aménagement (Figure 34).

De ce fait, comme pour l'étude précédente, l'expertise sur cette zone a consisté en une exploration et des observations qualitative au niveau de la zone du futur aménagement.

L'ensemble de la partie Ouest de la pointe Arago, de l'enrochement de la digue, puis de l'enrochement du plateau de stockage du côté sud du port ont été parcourus en notant et photographiant les faciès, biocénoses et espèces rencontrés.

La partie intérieure du port, le long des quais, a été exclue. En plus des difficultés d'accès en lien avec l'exploitation de la zone, il n'y a pas d'intérêt en termes de biocénoses benthiques et du fait des projets de travaux portuaires.

Du Nord au Sud :

La Pointe Arago présente des roches foliées en continuité du relief terrestre. Des galets plus ou moins volumineux s'intercalent entre les plaques. Quelques mètres à dizaines de mètres plus loin ces faciès rocheux laissent place à des alternances d'herbiers et algueraies. La section de substrats rocheux ne présente, comme il a été préalablement signalé, pas une couverture suffisante pour mettre en œuvre le protocole. Hormis quelques colonies de corail, gorgones, spongiaires disparates, la majorité du substrat est couverte de turf et algues calcaires encroûtantes accompagnés de macroalgues. La transition avec l'enrochement de la digue du port présente une « plage » de galets de dimensions variables.

La digue est formée d'un enrochement jusqu'à quelques mètres de profondeur. Les blocs sont peu colonisés mais on retrouve ponctuellement des macroalgues, algues calcaires encroûtantes et du turf, du corail de feu *Millepora sp.*, des gorgones etc. Un émissaire est localisé au premier tiers du linéaire. La dernière partie est constitué d'Acropodes™ présentant le même type de peuplement éparse, mais également quelques colonies du corail corne d'élan *Acropora palmata* de dimensions et états de santé variables. Cette espèce fait partie de celles figurant sur l'arrêté du 25 avril 2017 (en Annexe).

L'enrochement de la zone de stockage, au sud du bassin portuaire, est formé de blocs disposés jusqu'à environ -2, -3m de profondeur. Au pied de l'enrochement, c'est en majorité un herbier de la phanérogame marine *Halophila stipulacea* qui s'est développée, avec certains secteurs complétés de *Thalassia testudinum* ou *Syringodium filiforme* épars ou bien de différentes espèces de macroalgues molles (*Dictyota sp.* majoritairement) ou plus souvent calcaires (*Halimeda sp.*) en pied d'enrochement. Sur les blocs et quelques roches éparses en pied d'enrochement se développent quelques rares colonies coralliennes (*Porites sp.*, *Siderastrea sp.* ...), gorgones ou zones de macroalgues. L'état de santé de ces organismes est moyen et la majorité du substrat est recouverte de turf et hypersédimentée. Des cyanophycées sont bien présentes par endroits. A noter quelques colonies de coraux de l'espèce *Orbicella faveolata* figurant sur l'arrêté du 25 avril 2017 (en Annexe).

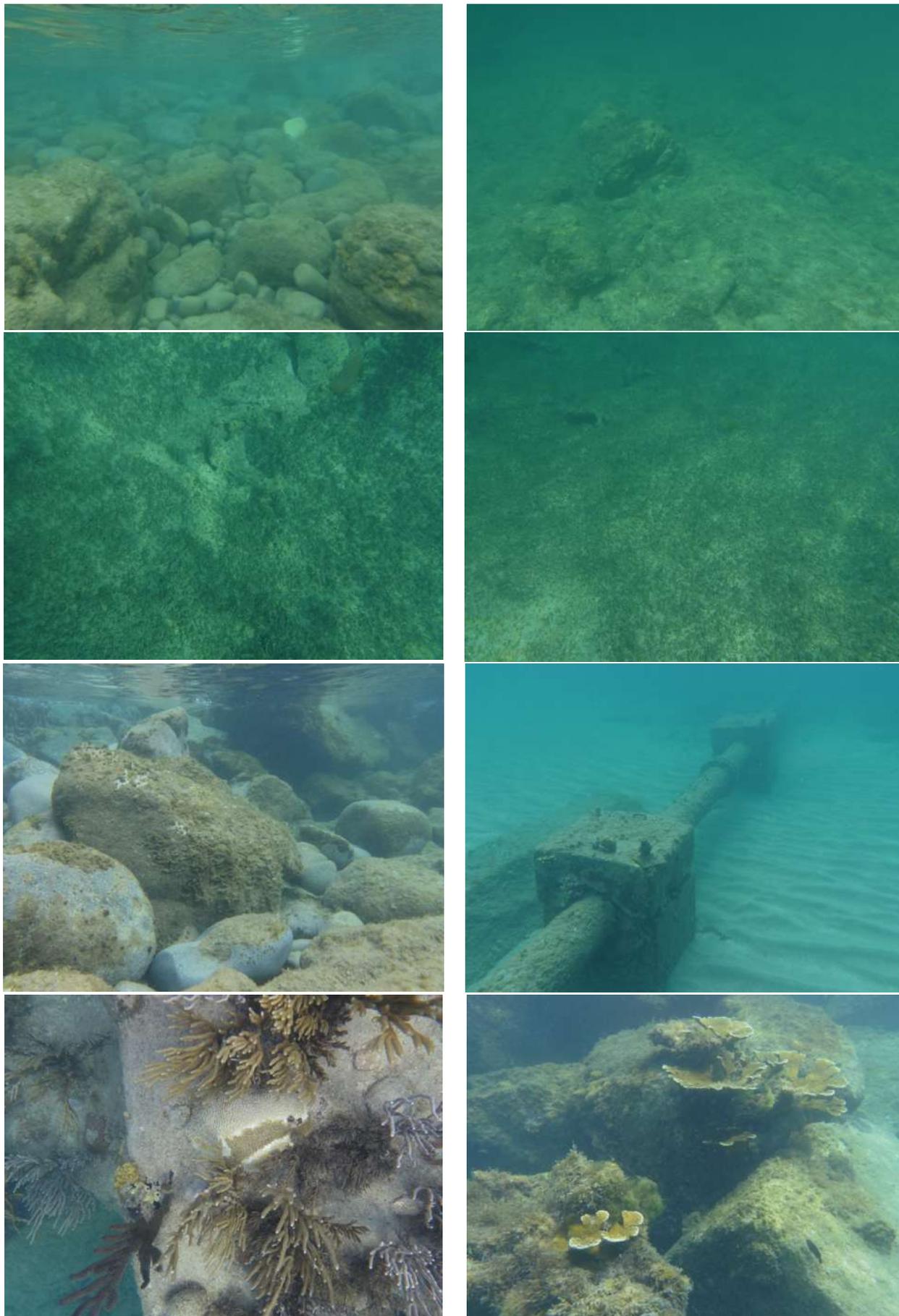


Figure 33. Illustrations de la station #SXM03 – Pointe Arago



Figure 34. Illustrations de la station #SXM03 – Galisbay

L'analyse détaillée des données de suivi des herbiers dans chaque baie doit se faire directement en comparant les différentes métriques. Ci-après sont brièvement décrits et illustrés les sites mais c'est ensuite une analyse commune qui est menée.

2.2.1.4 HERBIERS – (#SXM04) la station « Port » située devant le port de Galisbay

La station #SXM04 « Port » pour le suivi des herbiers de phanérogames marines est celle qui est disposée le plus près de la zone portuaire de Galisbay. Elle fait partie des stations localisées dans la zone même d'atteinte du projet portuaire mais est parmi les plus éloignées du projet ZMEL.

Elle avait été fixée et suivie au cours de l'étude Pareto, 2013, dont les principaux éléments sont cités dans le cadre ci-dessous.

« Cette station de suivi est implantée à 5,5 m de profondeur, au sein de la baie de la Potence, au droit de l'actuel port de commerce, soit au niveau de la zone directement concernée par les futurs travaux de dragage portuaires (d'après les informations fournies par le MO). Elle est caractérisée par un substrat à sableux à sablo-vaseux, constitué de tests calcaires d'*Halimeda* sp., des eaux claires, une agitation modérée et une sédimentation assez marquée.

L'herbier y est mixte à *Thalassia testudinum* et *Syringodium filiforme*, d'aspect moyennement dense. La zone d'herbier présente un aspect épars car entrecoupée de langues sableuses. L'herbier apparaît en état de santé moyen (indice 3 : classe 3). Il paraît en effet soumis à une sédimentation modérée et les macroalgues y sont abondantes. On note notamment la présence de macroalgues calcaires telle que *Halimeda incrassata* et de macroalgues non calcaires (*Caulerpa serrulata*, *Penicillus* sp., *Avrainvillea* sp.).

L'herbier présente une densité moyenne pour les 2 espèces *T. testudinum* (533 plants/m²) et *Syringodium filiforme* (812 plants/m²). Les hauteurs moyennes et maximales de feuilles sont relativement élevées (respectivement 23 et 38 cm).

Ces résultats témoignent globalement d'un herbier en état de santé moyen, soumis à des pressions d'origine terrigène issues notamment de la zone portuaire proche.

La densité cumulée des 2 espèces apparaît plus faible que sur les 2 autres stations étudiées mais la densité en *T. testudinum* y est toutefois relativement importante, traduisant des conditions de milieu néanmoins favorable au développement de l'espèce. » (Pareto 2013)

La profondeur moyenne de la station est de 6 mètres (5,6 min 6,3 max). Quelques zones sont marquées par des variations bathymétriques dont les transitions peuvent être des pentes douces ou des microfalaises marquées. Le sédiment est assez fin, partiellement constitué de particules fines (vase – nuage turbide) même si globalement biogénique (calcaires à *Halimeda*).

Les données du LIT montrent une couverture majoritaire d'herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme* mais avec une proportion importante d'herbiers à *S. filiforme* pur. Des zones de l'herbier mixte TT + SF sont également colonisées par une proportion limitée de *H. stipulacea*, uniquement sur le transect T1.

Les observations du protocole BELT ont permis de mettre en évidence un déficit complet en macrofaune accompagnatrice. La présence de cyanophycées est modérée (taches occasionnelles). La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont absentes ou peu présentes.

Les densités moyennes observées avec le protocole ancien DCE encore utilisé à l'époque de l'étude Pareto 2013 sont très faibles pour les deux espèces avec 110 plants/m² de *T. testudinum* (533 en 2013) et 300 plants/m² de *S. filiforme* (812 en 2013).

Cette perte de l'ordre de 70% de densité est très importante. Les écart-types des valeurs sont élevés ce qui démontre une grande variabilité des densités dans la zone échantillonnée.

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que la valeur moyenne pour *T. testudinum* est de 21,5 cm, proche de 23 cm en 2013 mais là encore l'écart-type de 6,1 cm est élevé. Les plants de *S. filiforme* sont très courts, 20,9 cm contre 38 en 2013 ce qui était une forte valeur. L'écart-type de 5,6 cm est également élevé.

L'état de santé de cet herbier est de 3,2, à mi-route entre un herbier mixte TT+ SF ou SF pur en bon état et un herbier présentant des macroalgues (surtout *Halimeda*), un début d'eutrophisation (cyanophycées) et d'envasement (particules fines), mais également fragmenté et soumis à une importante bioturbation, tout en ne présentant presque aucune espèce de macrofaune accompagnatrice.

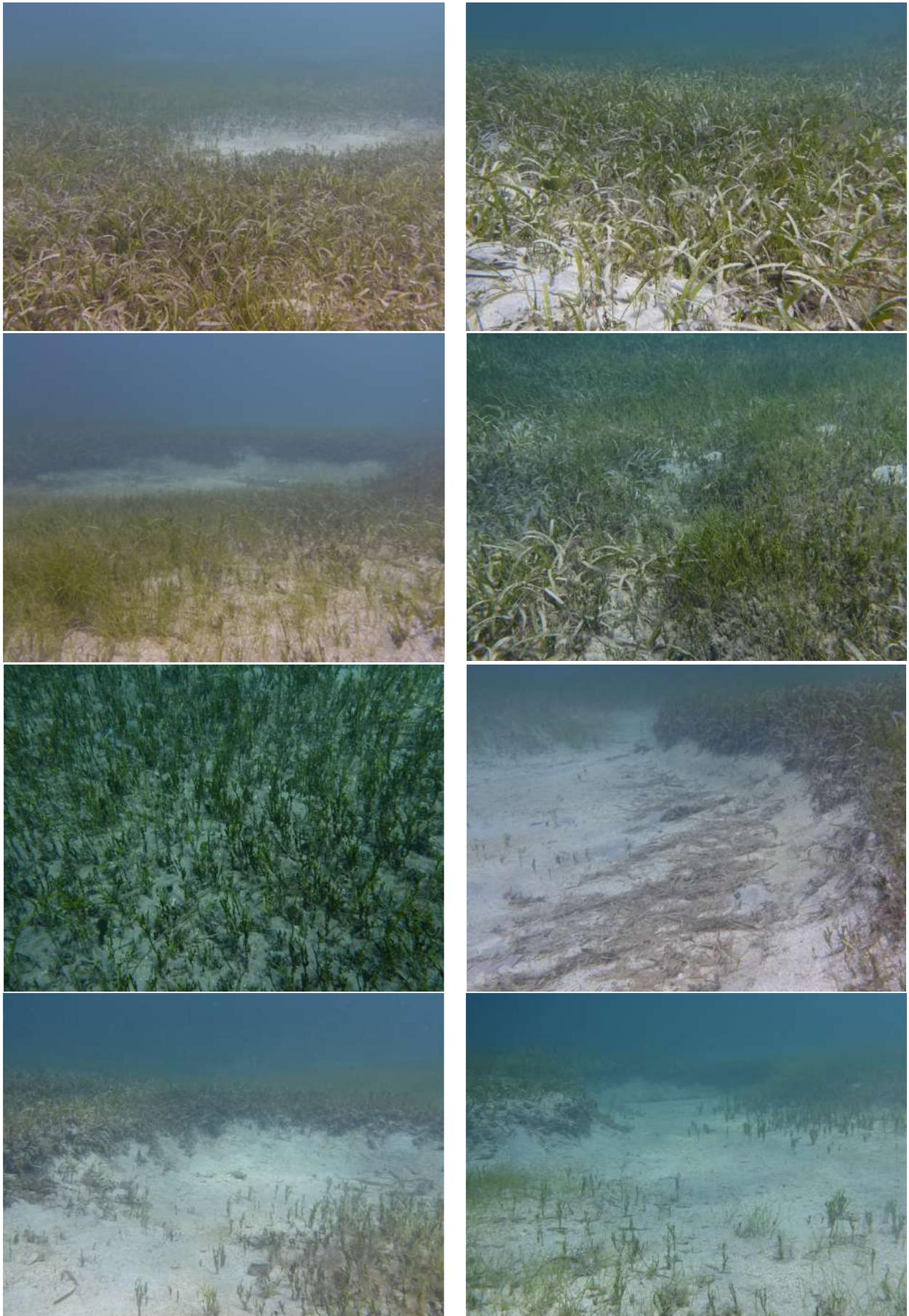


Figure 35. Illustrations de la station #SXM04 « Port »

2.2.1.5 HERBIERS – (#SXM05) la station « amont » devant la pointe Arago

La station de suivi #SXM05 est la station « amont » de l'étude Pareto, 2013. Elle est localisée un peu au large de la pointe Arago.

Cette station avec également avait été fixée et suivie au cours de l'étude Pareto, 2013, dont les principaux éléments sont cités dans le cadre ci-dessous.

« Cette station est implantée à 6,8 m de profondeur, à environ 250 m à l'ouest nord-ouest de la Pointe Arago. Elle est caractérisée par un substrat à dominante sableuse constitué de sable grossier (débris coquillers et tests calcaires d'*Halimeda* sp.), des eaux claires, une agitation modérée et une sédimentation modérée.

L'herbier sur la station amont est mixte à *Thalassia testudinum* et *Syringodium filiforme*. D'aspect dense, il apparaît en état de santé moyen (indice 2,5 : classe 3). On y trouve localement de nombreuses macroalgues calcaires du genre *Halimeda* et, sur l'ensemble de l'herbier, des macroalgues non calcaires telles que *Caulerpa serrulata*, *Penicillus* sp. et *Avrainvillea* sp. L'herbier est mixte mais présente une succession de zones où l'une ou l'autre des 2 espèces prédominent largement. Ainsi, on observe une forte prédominance de *S. filiforme* au nord nord-ouest, avec localement la présence de cyanobactéries. Les plants de *S. filiforme* sont de moins en moins denses en allant vers le Nord, jusqu'à laisser place à des fonds sableux.

A l'inverse au sud-est (vers la côte), l'espèce *T. testudinum* prédomine au sein de l'herbier. La limite supérieure de l'herbier y est bien nette, faisant apparaître les racines de l'herbier. La présence de microfaises en limite d'herbier est en général le signe d'un herbier en érosion.

L'herbier présente une densité moyenne à forte de *T. testudinum* (627 plants/m²) et une forte densité en *Syringodium filiforme* (1762 plants/m²). Les hauteurs moyennes et maximales de feuilles sont relativement élevées (respectivement 24 et 36 cm).

Ces résultats témoignent globalement d'un herbier en état de santé moyen mais soumis à des pressions d'origine terrigène, favorables au développement des peuplements algaux et de l'espèce opportuniste *S. filiforme*. La densité en *T. testudinum* apparaît toutefois assez élevée, témoignant de conditions de milieu favorables au développement de cette espèce. » (Pareto 2013)

La profondeur moyenne de la station est de 6,7 mètres (6,6 min 6,9 max). Des variations bathymétriques dans les transects sont relevées mais la zone est plus régulière. Quelques creux importants et microfaises importantes sont cependant observés. Le sédiment est majoritairement biogénique (calcaires à *Halimeda*) et d'une granulométrie moyenne.

Le LIT met en évidence une couverture majoritaire d'herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme* mais aussi des herbiers à *S. filiforme* pur ainsi que l'herbier mixte TT + SF colonisé par *H. stipulacea*. Les dominances relatives des différentes espèces sont très variables.

Dans le BELT il apparaît là aussi que la macrofaune accompagnatrice est très peu présente. A noter que quelques oursins diadèmes juvéniles ont été observés hors Belt La présence de cyanophycées est modérée. La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante par endroits. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont absentes ou peu présents.

Les densités moyennes observées avec le protocole ancien DCE encore utilisé à l'époque de l'étude Pareto 2013 sont très faibles pour les deux espèces avec 125 plants/m² de *T. testudinum* (627 en 2013) et 380 plants/m² de *S. filiforme* (1762 en 2013). La variabilité des densités dans la zone échantillonnée est très visible mais les différences observées sont vraiment importantes. Elles pourraient mettre en évidence l'importante fragmentation ou être dues à des biais à déterminer.

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que la valeur moyenne pour *T. testudinum* est de 17,3 cm, assez proche de 24 cm en 2013 (écart-type de 5,3 cm). Les plants de *S. filiforme* sont très courts, 17 cm contre 36 en 2013 ce qui était une forte valeur. L'écart-type est de 4,8 cm.

L'état de santé de cet herbier est de 2,8, à mi-route entre un herbier mixte TT+ SF ou SF pur en bon état et un herbier présentant peu d'eutrophisation (cyanophycées), de macroalgues et d'envasement, mais très fragmenté et soumis à une importante bioturbation, tout en ne présentant que peu d'espèces de macrofaune accompagnatrice.



Figure 36. Illustrations de la station #SXM05 « Amont »

2.2.1.6 HERBIERS – (#SXM06) la station « aval » en milieu de baie

La station de suivi #SXM06 est la station « aval » de l'étude Pareto, 2013. Elle est localisée en milieu de baie de Marigot, à équidistance d'une droite passant par les pointes du Bluff et Arago.

Cette station avec également avait été fixée et suivie au cours de l'étude Pareto, 2013, dont les principaux éléments sont cités dans le cadre ci-dessous.

« La station aval est implantée à 8,6 m de profondeur, au centre de la baie de Marigot. Elle est caractérisée par un substrat à dominante sableuse, constitué de sable grossier (tests calcaires d'*Halimeda* sp.), des eaux claires, une agitation modérée et une sédimentation assez marquée.

L'herbier y est mixte à *Thalassia testudinum* et *Syringodium filiforme*. D'aspect relativement dense et haut, il apparaît en état de santé moyen (indice 3 : classe 3), du fait de la présence de nombreuses macroalgues et de signes de sédimentation. On y trouve notamment des macroalgues calcaires du genre *Halimeda* et de nombreuses macroalgues non calcaires telles que *Caulerpa mexicana*, *Avrainvillea* sp., *Penicillus* sp. On note également la présence de colonies coralliennes de petite taille, de l'étoile de mer commune (*Oreaster reticulatus*), ou encore de lambis (*Strombus gigas*). Quelques feuilles apparaissent broutées ; cet herbier pourrait faire l'objet d'un broutage par les tortues (*Chaelonia mydas*), l'espèce *T. testudinum* correspondant en effet à leur aliment privilégié.

L'herbier présente une densité moyenne de *T. testudinum* (350 plants/m²) à forte en *S. filiforme* (1747 plants/m²). Les hauteurs de feuilles apparaissent particulièrement importantes, avec 29 cm en moyenne et des maxima et minima élevées (respectivement 29 et 18 cm).

Ce résultat témoigne d'une croissance satisfaisante sur cette station et d'une recherche de lumière, probablement du fait de la profondeur (8,6 m) et de la présence de particules en suspension sur la colonne d'eau (sédimentation modérée) sur la zone.

En allant vers le nord, l'herbier devient monospécifique à *T. testudinum*, d'aspect moins dense, avec une abondance croissante des peuplements de macroalgues et la présence localisée de quelques cyanobactéries.

Ces résultats témoignent globalement d'un herbier en état de santé moyen mais soumis à des pressions d'origine terrigène, favorables au développement des peuplements algaux et de l'espèce opportuniste *S. filiforme*, à une profondeur qui lui est plus favorable qu'à l'espèce *T. testudinum*. » (Pareto 2013)

La profondeur moyenne constatée est bien de 8,6 mètres (8,5 min 8,8 max). La bathymétrie de la station est en effet très homogène. Le sédiment est sableux moyen à grossier (*Halimeda*). Tout comme en 2013, une sédimentation marquée est relevée.

Les données du LIT mettent en valeur un herbier mixte à *T. testudinum* et *S. filiforme* (environ 80%). Il présente cependant également des zones d'herbiers à *S. filiforme* pur et un transect présente également du TT pur sur plusieurs larges zones (plus de 20%).

Le protocole BELT montre peu de macrofaune accompagnatrice à l'exception d'un oursin noir *Diadema antillarum* dans le Transect 2 (aussi un juvénile hors Belt). Trois lambis et une étoile sont également observés hors zone. Aucune cyanophycée n'a été observée. La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont modérément présents.

Les densités moyennes observées avec le protocole ancien DCE encore utilisé à l'époque de l'étude Pareto 2013 sont très faibles pour les deux espèces avec 160 plants/m² de *T. testudinum* (350 en 2013) et 443 plants/m² de *S. filiforme* (1747 en 2013).

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que la valeur moyenne pour *T. testudinum* est de 20,7 cm, contre 29 cm en 2013 mais là encore l'écart-type de 6,5 cm est élevé. Les plants de *S. filiforme* sont très courts, 19,6 cm. L'écart-type de 5,3 cm est également élevé.

L'état de santé de cet herbier est de 2,6 pour un herbier mixte TT+ SF ou SF pur en bon état sans eutrophisation (cyanophycées), avec peu d'envasement (particules fines) et de macroalgues et également soumis à une importante bioturbation.

La première image de la Figure 37 montre une importante trace d'impact d'ancrage d'un gros navire. La station « Aval », bien au large et éloignée des côtes, fait partie de la zone de mouillage définie sur la carte marine.



Figure 37. Illustrations de la station #SXM06 « Aval »

2.2.1.7 HERBIERS – (#SXM07) la station « ExtrChenal »

Cette station, tout comme toutes les suivantes, ont été ajoutées aux stations déjà étudiées dans le cadre des travaux de Pareto 2013, pour étudier de manière plus approfondie les herbiers des 3 baies concernées par les études ZMEL.

L'effort d'échantillonnage a été réparti autour des ZMEL et également plus loin vers le large et la zone portuaire dans la logique de servir également aux suivis des herbiers en lien avec le projet d'extension du port de commerce en ce qui concerne la baie de Marigot.

La profondeur moyenne de la station est de 9,6 mètres (9,4 min 9,9 max).

Ce spectre réduit de profondeurs rencontrées n'évite cependant pas la présence de microfalaises sur un site très diversifié. Le sédiment est localement fin, partiellement constitué de particules fines (vase). Des zones nues concentrant des dépôts de litière de débris végétaux (DF) sont observées.

Le LIT montre *S. filiforme* très constitutif de la couverture, en herbier mixte avec TT ou HS (en particulier sur T3), ou bien pur. C'est ce même T3 qui présente les microfalaises évoquées auparavant. Le protocole de suivi par quadrats corrobore l'importance relative de SF.

Le BELT ne présente pas d'enregistrements de macrofaune accompagnatrice : aucun oursin, aucun corail. Les taches de cyanophycées sont inexistantes ou occasionnelles. La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Comme déjà spécifié, les débris de feuilles sont très présents par endroits, les algues dérivantes ainsi que les macroalgues épiphytes occasionnelles.

Les densités moyennes observées avec le protocole ancien DCE encore utilisé à l'époque de l'étude Pareto 2013 sont faibles pour l'espèce *T. testudinum* avec 112 plants/m² (pas de mesure en 2013) et également pour *S. filiforme* avec 397 plants/m² (pas de mesure en 2013).

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que les valeurs moyennes pour *T. testudinum* et *S. filiforme*, respectivement de 14,6 (± 5,7) et 14,4 cm (± 4,2) sont faibles et assez variables témoignant d'un herbier assez ras et désorganisé.

L'état de santé de cet herbier est de 2,7. Il présente un peu d'eutrophisation (cyanophycées), de macroalgues et d'envasement (particules fines), mais fragmentation et bioturbation, sans aucune espèce de macrofaune accompagnatrice.

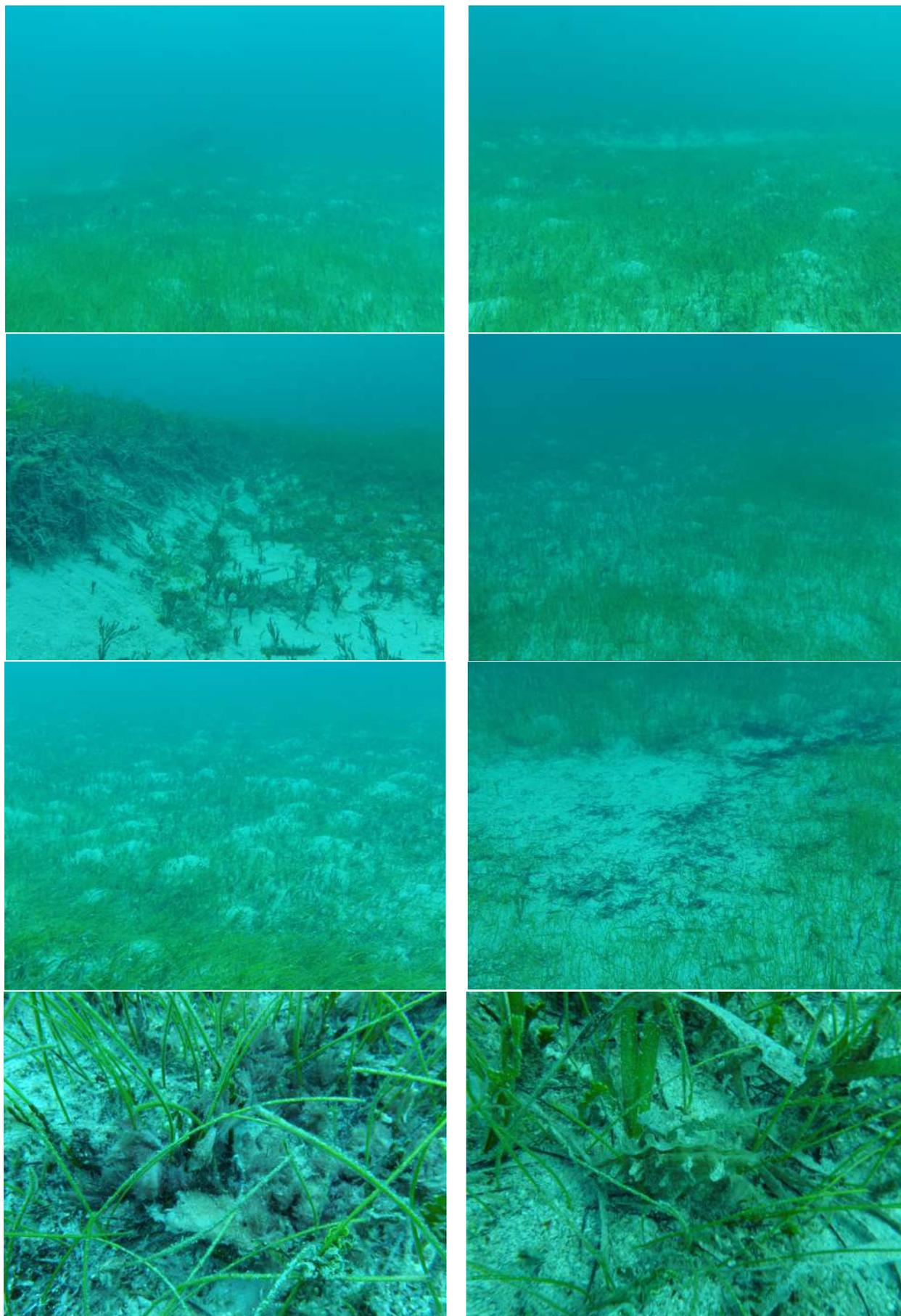


Figure 38. Illustrations de la station #SXM07 « ExtrChenal »

2.2.1.8 HERBIERS – (#SXM08) la station « Chenal »

La station #SXM08 dite « Chenal » a été positionnée dans le chenal projeté du projet d'extension du port de commerce, à peu près au milieu du couloir qui sera dragué dans le cadre des travaux pour augmenter le tirant d'eau des navires pouvant être accueillis par l'EPSM.

La profondeur moyenne de la station est de 7,8 mètres (7,6 min 8,2 max).

La station présente des microfalaises marquées, des zones de mitage et de fragmentation. Le sédiment est assez fin, partiellement constitué de particules fines (vase – nuage turbide) même si globalement biogénique (calcaires à *Halimeda*).

Les données du LIT montrent en premier lieu une importante variabilité inter-transects et donc intra-site, avec un T1 marqué par la fragmentation et présentant majoritairement du SF pur et mixte avec TT, tandis que les autres transects ne présentent pas de SF pur, T2 de l'*Halophila stipulacea* mixte avec SF.

Quelques oursins *Diadema antillarum* ont été observés sur le T3 avec le protocole BELT. La macrofaune accompagnatrice se limite cependant à ces quelques rares observations. La présence de cyanophycées est faible à modérée (quelques taches occasionnelles). La bioturbation (monts et entonnoirs) est de nouveau importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont absentes ou peu présentes.

Les densités moyennes observées avec le protocole ancien DCE encore utilisé à l'époque de l'étude Pareto 2013 sont faibles pour les deux espèces avec 125 plants/m² de *T. testudinum* (pas de mesure en 2013) et 252 plants/m² de *S. filiforme* (pas de mesure en 2013).

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que la valeur moyenne pour *T. testudinum* est de 17 cm, avec là encore un l'écart-type élevé de 5 cm. Les plants de *S. filiforme* sont très courts, 15,8 cm. L'écart-type de 4,5 cm est également assez élevé.

L'état de santé de cet herbier est de 3,2. L'herbier mixte est très variable sur la station et présente toutes les dominances possibles avec TT, SF et HS. Les signes d'eutrophisation (cyanophycées) sont faibles, un envasement modéré est observé (particules fines). Les macroalgues (*Halimeda* surtout) sont bien présentes. La bioturbation est importante par endroits.

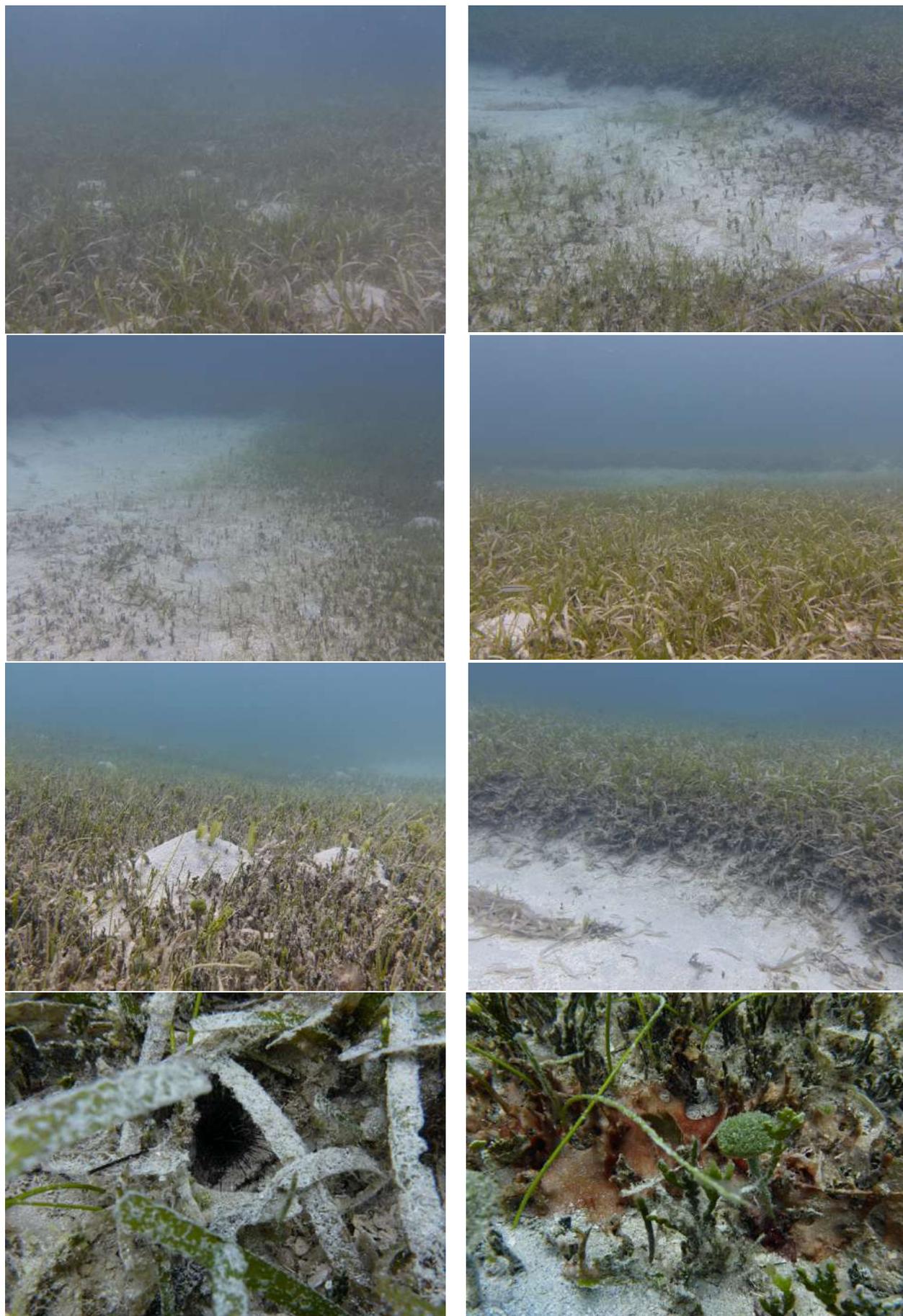


Figure 39. Illustrations de la station #SXM08 « Chenal »

2.2.1.9 HERBIERS – (#SXM09) la station « SudChenal »

La station #SXM09 nommée « SudChenal » a été positionnée à proximité au sud-ouest de la station précédente #SXM08 « Chenal », en dehors de la zone d'emprise des travaux de dragage projetés, de manière à comparer les deux zones et pouvoir servir de « témoin » dans l'hypothèse de travaux avérés. Elle est distante du point précédent d'environ 200 mètres.

La profondeur moyenne de la station est de 8,3 mètres (8 min 8,4 max).

La station présente plusieurs microfalaises marquées. Le sédiment est assez fin, largement constitué de particules fines (vase – nuage turbide). La bioturbation est importante, en particulier sur T3.

Les données du LIT montrent une couverture majoritaire d'herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme*, en particulier sur T3. Les 2 autres transects présentent mitage et fragmentation. L'alternance spécifique est là aussi limitée avec aussi un peu de HS par endroits.

Les observations du protocole BELT ont permis de mettre en évidence un déficit complet en macrofaune accompagnatrice. Cependant à l'extérieur des emprises de suivi, un oursin noir et 2 lambis ont été observés à proximité. La présence de cyanophycées est modérée (taches occasionnelles). La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont peu présentes et plus présentes par endroits.

Les densités moyennes observées sont de nouveau très faibles pour les deux espèces avec 165 plants/m² de *T. testudinum* et 285 plants/m² de *S. filiforme*.

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que la valeur moyenne pour *T. testudinum* est de 18,4 cm (écart-type de 4,3 cm). Les plants de *S. filiforme* sont très courts, 17,8 cm (écart-type de 4,9 cm).

L'état de santé de cet herbier est de 2,8, avec des macroalgues, un début d'eutrophisation (cyanophycées) et une tendance à l'envasement (particules fines). Il est également largement fragmenté et soumis à une importante bioturbation, tout en ne présentant que quelques organismes de macrofaune accompagnatrice observés en dehors des transects (deux lambis et un oursin Diadème).



Figure 40. Illustrations de la station #SXM09 « SudChenal »

2.2.1.10 HERBIERS – (#SXM10) la station « NordZMEL »

La station « NordZMEL » (#SXM10) a été positionnée au plus près de la ZMEL, après prospection d'une large zone de sable et d'herbiers trop éparses pour y réaliser un suivi.

Il s'agit donc avec #SXM16 « NordZMEL2 » disposée à distance équivalente du zonage de projet de ZMEL, des stations permettant de disposer des données de suivi des herbiers les plus proches.

La profondeur moyenne de la station est de 5,2 mètres (4,9 min 5,4 max).

La station, moins profonde que la majorité des autres, est parmi les plus homogènes et ne présente pas de microfalaises comme beaucoup des autres. Le sédiment est assez fin, partiellement constitué de particules fines (vase – nuage turbide). Comme sur toute la zone la bioturbation est marquée et la couverture assez continue présente cependant une certaine mosaïque de mixité spécifique.

Les données du LIT montrent une couverture majoritaire d'herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme*, en particulier sur les transects T2 et T3 qui ne présentent que cette typologie en continu. T1 présente une zone de SF pur et une zone un peu atypique avec HS majoritaire mais également du TT et du SF.

Les observations du protocole BELT ont permis de mettre en évidence un déficit complet en macrofaune accompagnatrice, avec uniquement quelques observations (oursins dont un blanc juvénile, un lambi, une colonie de corail *Manicina*) en dehors du belt. La présence de cyanophycées est modérée (taches occasionnelles). La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont absentes ou peu présentes.

Les densités moyennes observées sont faibles pour les deux espèces avec 254 plants/m² de *T. testudinum* et 387 plants/m² de *S. filiforme*.

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que les valeurs moyennes pour *T. testudinum* et *S. filiforme*, respectivement de 20,7 (± 4,9) et 20,3 cm (± 5,3) sont assez faibles et variables.

L'état de santé de cet herbier est de 2,7, avec un herbier majoritairement mixte TT+ SF en bon état, avec un peu de HS, et un herbier présentant des macroalgues (surtout *Halimeda* et *Dictyota*), un peu d'eutrophisation (cyanophycées) et d'envasement (particules fines), peu ou pas fragmenté et soumis à un peu de bioturbation, tout en ne présentant presque aucune espèce de macrofaune accompagnatrice sur les transects mais à proximité (dont un oursin blanc juvénile, symbole plus que signe effectif de résilience du milieu).



Figure 41. Illustrations de la station #SXM10 « NordZMEL »

2.2.1.11 HERBIERS – (#SXM15) la station « Milieu »

La station #ZMEL15 dite « Milieu » a été positionnée entre les stations en lien avec la ZMEL et celles en lien avec le port de commerce, pour servir avec la station #ZMEL06 « Aval » de station distante de tous les aménagements futurs.

Cette station avait été prépositionnée plus au nord-est. Elle a finalement dû être déplacée plus au sud-ouest une fois sur le terrain, du fait de l'absence d'herbier suffisamment « consistant » sur une large bande dans l'axe port de plaisance / large sortie de baie, comme cela a été discuté dans les comparaisons entre la cartographie produite par Pareto en 2013 et la cartographie produite dans le cadre de cette étude.

La profondeur moyenne de la station est de 5,8 mètres (5,4 min 6,4 max).

Comme la précédente, la station est moins profonde que la majorité des autres. Par contre ici le site est bien plus hétérogène, en couvertures végétales comme en topographie, avec d'importantes microfalaises et de nombreux creux. Le sédiment est assez fin, partiellement constitué de particules fines (vase – nuage turbide). Comme sur toute la zone la bioturbation est marquée et la couverture assez continue présente cependant une certaine mosaïque de mixité spécifique.

Les données du LIT montrent une couverture largement majoritaire d'herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme* sur l'ensemble de la station. Il y a quelques zones de SF pur, également une zone limitée de TT pur observée sur T3.

Comme sur les autres stations de la baie, le protocole BELT ne permet de relever que quelques spécimens de macrofaune accompagnatrice, avec uniquement un oursin noir juvénile et une colonie de corail *Manicina*. La présence de cyanophycées est faible à modérée (taches occasionnelles). Comme ailleurs, la bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont peu présentes.

Les densités moyennes observées sont faibles pour les deux espèces avec 187 plants/m² de *T. testudinum* et 194 plants/m² de *S. filiforme*.

Pour les longueurs de feuilles, il apparaît que les valeurs moyennes pour *T. testudinum* et *S. filiforme*, respectivement de 16,5 (± 4,8) et 16 cm (± 4,6) sont faibles et assez variables.

L'état de santé de cet herbier est de 2,6, avec un herbier majoritairement mixte TT+ SF en bon état, présentant une très légère eutrophisation (cyanophycées), quelques macroalgues et un peu d'envasement (particules fines), peu fragmenté et soumis à un peu de bioturbation, tout en ne présentant presque aucune espèce de macrofaune accompagnatrice.

A noter la présence et le comportement d'un rémora « résident » durant tout le suivi, qui a accompagné chaque plongeur un moment, et est venu s'accrocher à chacun, pour de courtes durées puisque déçu par le peu de mobilité des plongeurs durant la mise en œuvre des protocoles de suivi.

Sa présence laisse penser à la proximité de tortues marines, bien qu'aucune n'ait été observée sur la station, ni même sur l'ensemble des stations de suivi de la baie.



Figure 42. Illustrations de la station #SXM15 « Milieu »

2.2.1.12 HERBIERS – (#SXM16) la station « NordZMEL2 »

La station « NordZMEL2 » (#SXM16) a été positionnée au plus près de la ZMEL, après prospection d'une large zone de sable et d'herbiers trop éparses pour y réaliser un suivi. Il s'agit donc avec #SXM10 « NordZMEL » disposée à distance équivalente du zonage de projet de ZMEL, des stations permettant de disposer des données de suivi des herbiers les plus proches.

La profondeur moyenne de la station est de 5,9 mètres (5,4 min 6,2 max).

La station est assez proche de la côte, elle est peu profonde. Elle est largement homogène, en couvertures végétales comme en topographie, avec néanmoins des microfalaises et des creux. Le sédiment est assez fin mais principalement constitué de sables fins et moyens. Comme sur toute la zone la bioturbation est marquée.

Les données du LIT montrent une couverture largement majoritaire d'herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme* sur l'ensemble de la station (tout T2 et T3). On trouve un peu de SF pur, ainsi que HS.

Le BELT permet d'enregistrer un peu de macrofaune accompagnatrice : quelques oursins blancs et nairs, un lambi. La présence de cyanophycées est modérée (taches occasionnelles). La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont modérées.

Les densités moyennes observées sont faibles pour les deux espèces avec 145 plants/m² de *T. testudinum* et 255 plants/m² de *S. filiforme*.

Pour les longueurs de feuilles, les valeurs moyennes pour *T. testudinum* et *S. filiforme*, sont respectivement de 20,6 cm ($\pm 12,6$) et 15,4 cm (± 5). Pour TT la longueur est assez élevée mais la variabilité très importante.

L'état de santé de cet herbier est de 3,8, avec un herbier majoritairement mixte TT+ SF en bon état, présentant une très légère eutrophisation (cyanophycées) et un envasement limité (particules fines), peu fragmenté et soumis à un peu de bioturbation. Les macroalgues sont cependant bien présentes (*Halimeda*, *Dasycladus*, *Dictyota*...) et peu de macrofaune accompagnatrice est observée, mais des espèces d'intérêt halieutique, oursins blancs et lambis, rarement observés ailleurs dans la baie.

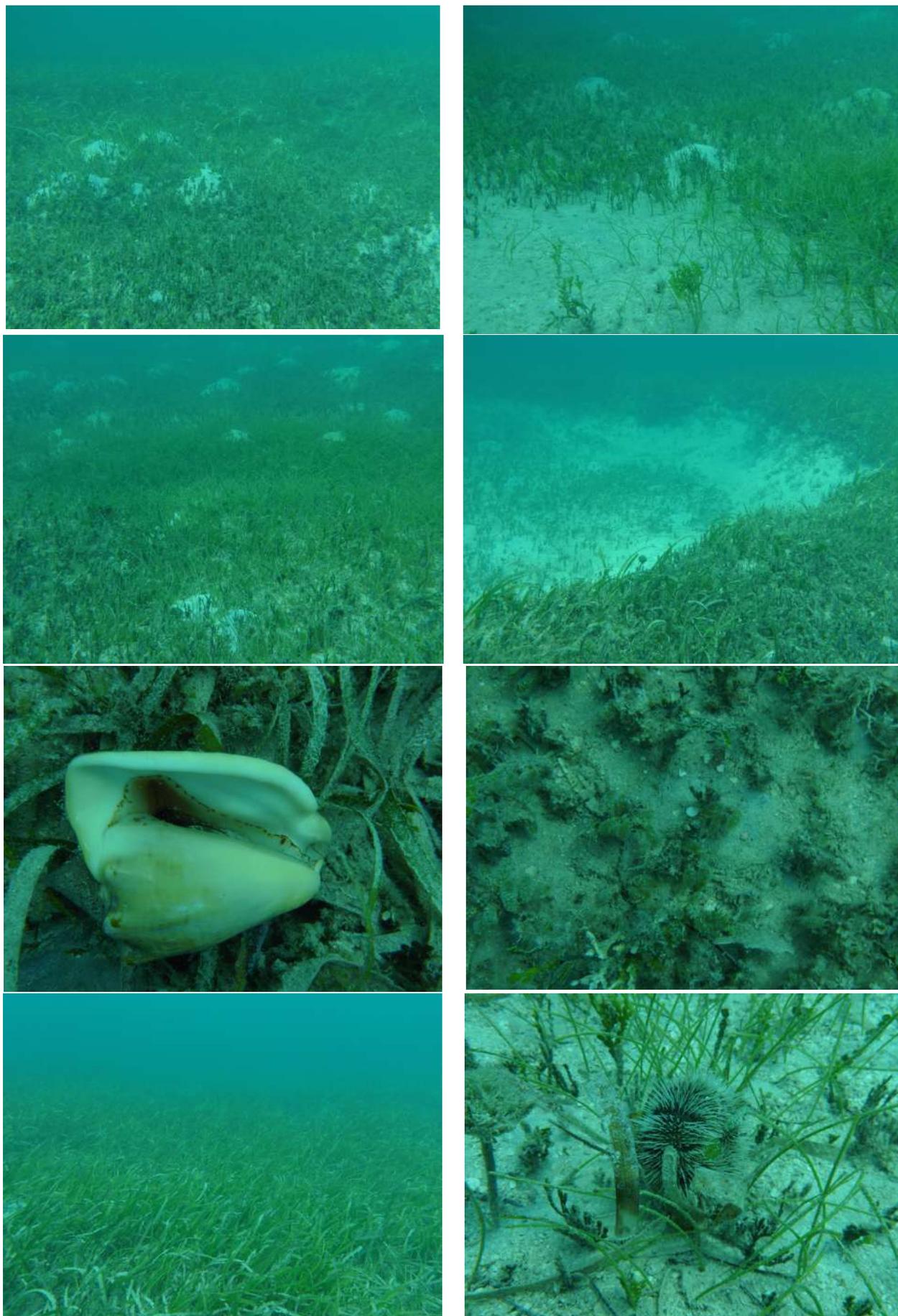


Figure 43. Illustrations de la station #SXM16 « NordZMEL2 »

2.2.1.13 HERBIERS – (#SXM17) la station « ZMEL »

La station « ZMEL » #SXM17 n'est pas une station typique décomposée en 3 transects voisins, car il n'a pas été possible de trouver une zone d'herbiers de dimension suffisante.

Dès lors, les 3 transects ont été positionnés sur 3 zones différentes, distantes de plusieurs dizaines de mètres sur la longueur de la zone pressentie pour la mise en place de la ZMEL.

La station est la moins profonde, avec une moyenne de 4 mètres (3,6 min 4,6 max).

Toute la zone est très hétérogène, en couvertures végétales comme en topographie, avec d'importantes microfalaises, des creux. A noter la présence de macrodéchets, parfois de grandes dimensions, probablement encore reliquats des dégâts occasionnés par le passage du cyclone Irma.

Le sédiment est variable et partiellement constitué de particules fines (vase – nuage turbide). Comme sur toute la zone la bioturbation est marquée.

Les données du LIT montrent une couverture très diversifiée, avec *T. testudinum*, *S. filiforme*, et *H. stipulacea* à divers niveaux de proportions relatives ou parfois purs.

Les observations du protocole BELT ont permis de mettre en évidence un déficit presque complet en macrofaune accompagnatrice. La présence de cyanophycées est globalement faible à modérée (taches occasionnelles) mais quelques zones sont largement envahies. La bioturbation (monts et entonnoirs) est importante sur l'ensemble du site. Les algues dérivantes, débris de feuilles et macroalgues épiphytes sont bien présentes.

Les densités moyennes observées sont faibles pour les deux espèces avec 187 plants/m² de *T. testudinum* et 63 plants/m² de *S. filiforme*.

Pour les longueurs de feuilles, il apparait que les valeurs moyennes pour *T. testudinum* et *S. filiforme*, respectivement de 18,9 (± 5,7) et 17,7 cm (± 5,3) sont faibles et assez variables.

L'état de santé de cet herbier est de 4,2, avec les différentes phanérogames représentées, mais aussi diverses macroalgues (*Dictyota*, *Halimeda*, *Penicillus*...) mais surtout une eutrophisation importante par endroits (cyanophycées) et de l'envasement (particules fines).

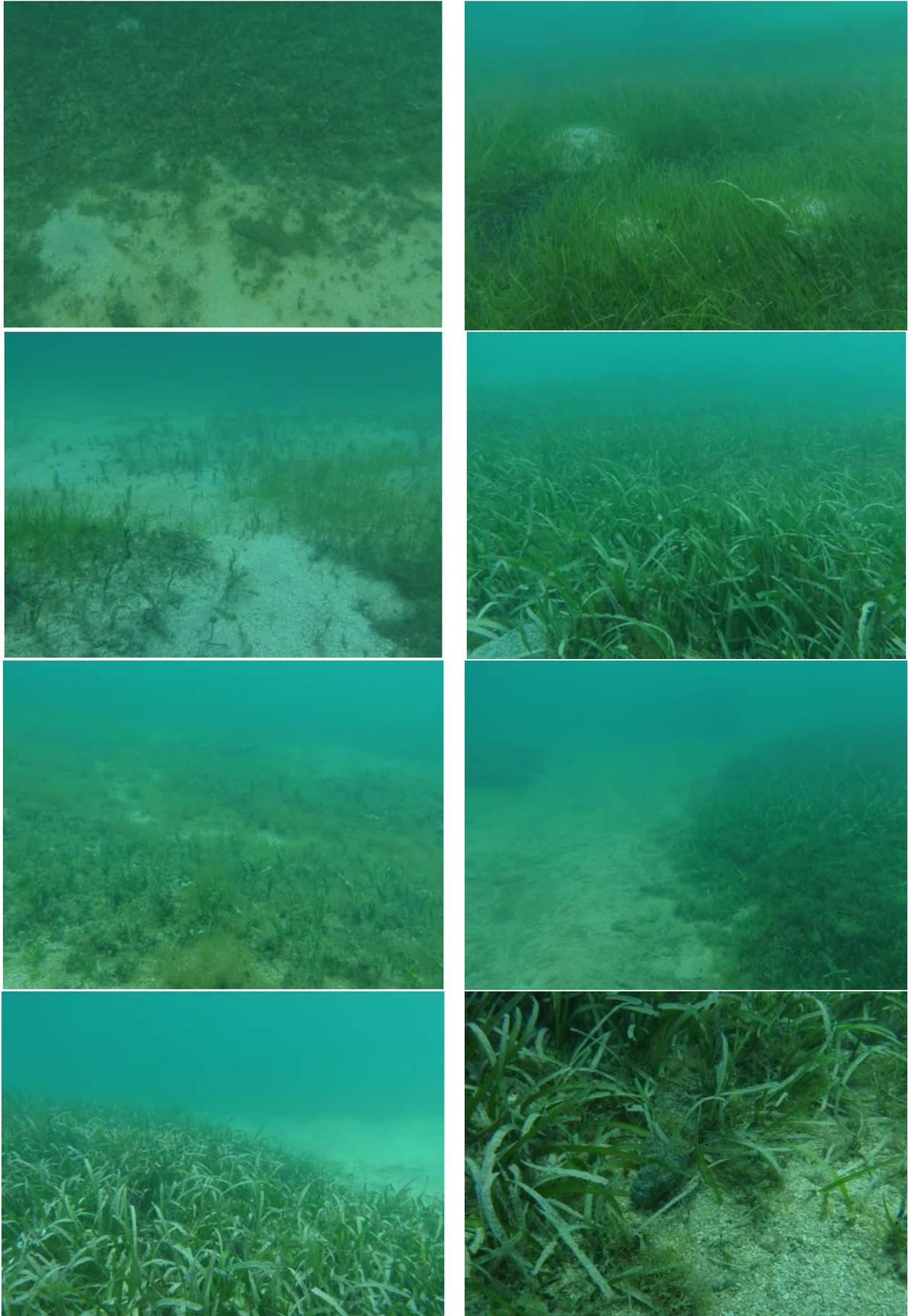


Figure 44. Illustrations de la station #SXM17 « ZMEL »

2.2.1.14 HERBIERS – Analyse générale des herbiers de la baie de Marigot

L'ensemble des stations d'herbiers de la baie de Marigot a été reclassé pour les besoins de l'analyse comparative des données et de leur représentation graphique suivant un gradient partant de la zone de projet de ZMEL (#SXM17) vers les stations les plus éloignées soit dans l'ordre : 17 / 16 / 10 / 15 / 6 / 4 / 9 / 8 / 7 / 5.



Figure 45. Schéma de l'analyse en « gradient » des stations de suivi de la baie de Marigot

Cette approche n'est cependant qu'une proposition pour permettre de trier les données et ordonner les représentations graphiques des résultats, mais il aurait été possible d'en choisir d'autres.

Composition des herbiers

Pour rappel, la méthode du LIT (Line Intercept) est appliquée afin de noter (1) les changements dans la composition spécifique ; (2) les zones de fragmentation (>2m) et de mitage (entre 0,5-2m) c'est à dire les zones sans phanérogames mais dont le substrat est meuble (= potentiellement colonisables par les phanérogames) ; (3) les zones de substrat dur (= non colonisables) ; (4) le type de limite des zones : stable (l'herbier s'arrête brusquement), progressif (l'herbier progresse un peu sur la zone nue), érosif (présence de microfalaises). La composition spécifique en phanérogames est exprimée en termes d'assemblage d'espèces comme décrit dans les figures ci-après. Le pourcentage d'absence/présence de chaque espèce ou assemblage d'espèce sur le transect peut ainsi être calculé.

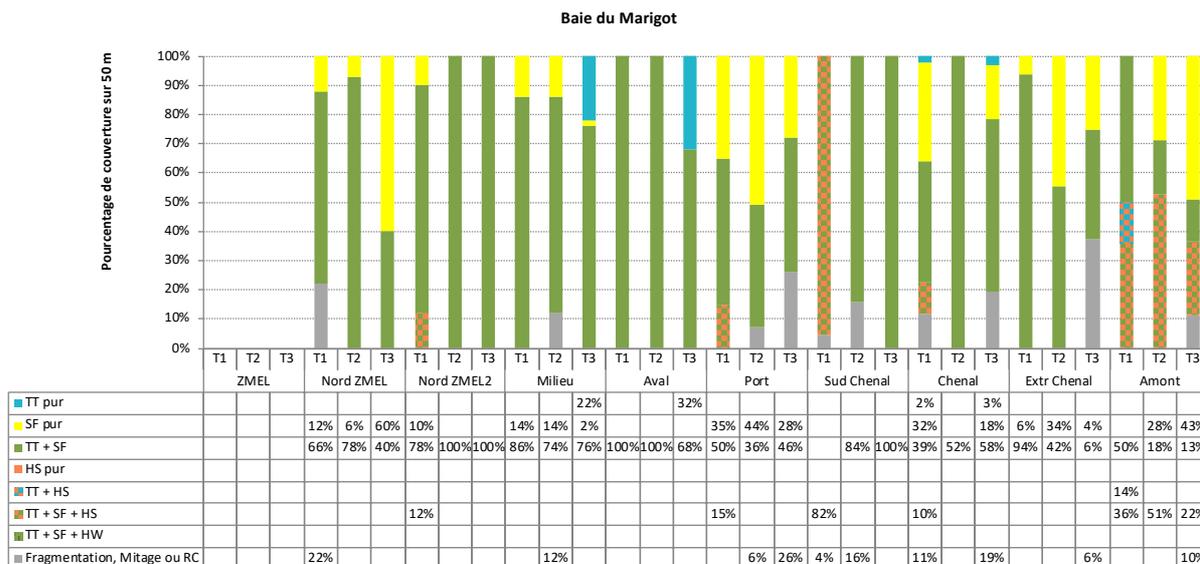


Figure 46. Composition des herbiers de la baie de Marigot (résultats du LIT – 8 typologies)

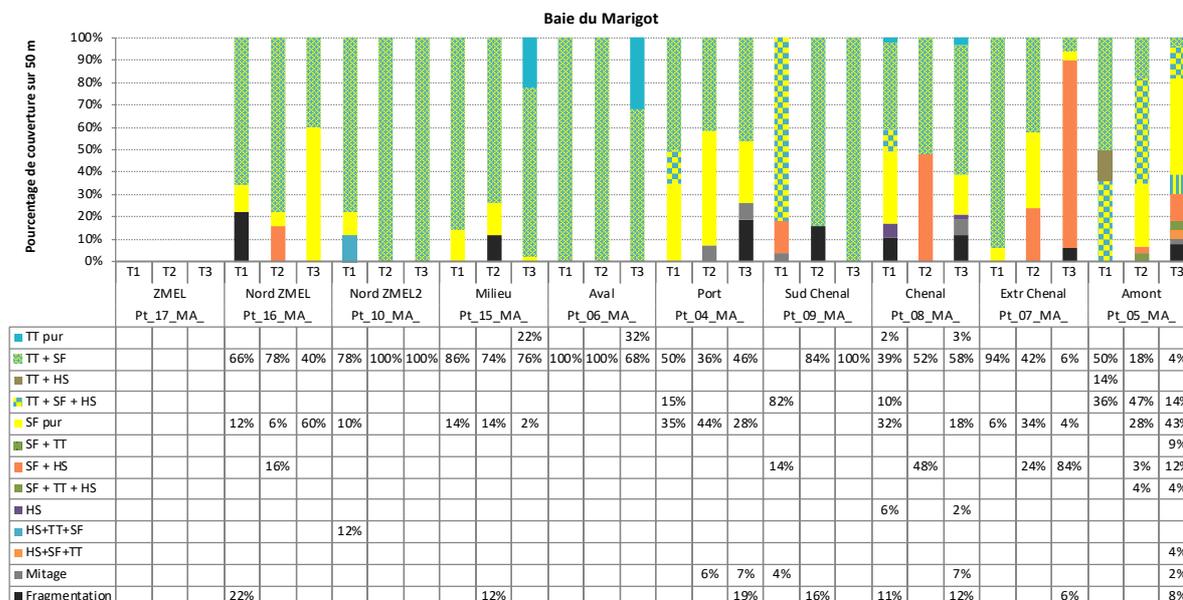


Figure 47. Composition des herbiers de la baie de Marigot (résultats du LIT – 13 typologies - typologies ordonnées)

Les Figures 46 et 47 présentent les résultats de composition interspécifique des herbiers de phanérogames marines obtenues à travers le suivi de type LIT dans la baie de Marigot.

Dans l'analyse de la Figure 46, les typologies d'herbiers sont celles qui sont utilisées classiquement dans le protocole du LIT. Ici l'importance relative de telle ou telle espèce n'est pas mise en évidence dans leur ordonnancement dans le cadre d'herbiers mixtes à 2, 3 voire plus d'espèces. C'est la méthode actuellement couramment employée (DCE entre autres).

La Figure 47 présente une analyse alternative, où un protocole plus détaillé a été mis en œuvre, où les herbiers mixtes sont précisés avec la notion d'importance relative des espèces. Ici TT+SF n'est pas équivalent à SF+TT.

Dans l'analyse de la Figure 46, le mitage et la fragmentation sont regroupés. Regrouper le mitage et la fragmentation est la méthode actuellement employée dans le cadre de l'analyse des données DCE. Le substrat meuble est ainsi considéré comme potentiellement colonisables par les phanérogames, réputé disponible.

L'herbier mixte TT+SF est de loin le plus représenté. Beaucoup d'autres variantes de mixité d'herbiers sont également représentées ainsi que des herbiers monospécifiques. Sans tendance de gradient visible, ce qui ressort est une importante variabilité intra- (transects) et inter- stationnelle.

BELT

Pour rappel, un suivi de type « Belt » de 1 m est réalisé le long du transect. Dans l'ensemble du couloir de 1 m, est comptabilisé le nombre (1) d'oursins (en distinguant les espèces) ; (2) de colonies coralliennes (en distinguant les genres/espèces quand cela est possible) ; (3) de signes de bioturbation (« monts » et « entonnoirs »). Sont également notés l'abondance (absence, tache occasionnelle ou présence sur nombreux pieds, herbier bien colonisé) des cyanophycées ; la présence en abondance/présence occasionnelle/absence d'algues dérivantes, de débris de feuilles de phanérogames (quelques m²), de macroalgues épiphytes ; la nature du substrat selon les catégories suivantes (Source : Kerninon et Hily, 2015) : Vase, Sable fin vaseux, Sable fin propre, Sable grossier propre, Macrodébris coralliens ou graviers/cailloutis ; l'état de santé, selon la grille adaptée de Bouchon et al. (2003) (tableau).

L'analyse des différentes stations a bien mis en évidence une très faible occurrence des oursins, toutes espèces confondues. Au-delà de ce comptage, il en va de même pour les colonies coralliennes et les autres espèces classiques accompagnatrices classiquement observées dans les herbiers.

Un certain nombre de signes de déséquilibre des herbiers sont largement observés sur toutes les stations suivies, avec en premier lieu une bioturbation importante, souvent des signes d'eutrophisation plus ou moins marqués, des macroalgues, des débris et épiphytes, des marques d'envasement. Toutes ces observations ont conduit à un déclassement de l'ensemble des stations sur les indices d'état de santé (Bouchon *et al.* 2003) en deçà de 2. Aucun herbier dit climacique n'a été observé. Les herbiers mixtes présentent systématiquement des critères de déclassement : eutrophisation, envasement, macroalgues, qui ne sont jamais trop importants mais bien présents. Il est possible de déceler un gradient, en particulier en ce qui concerne l'envasement et la couverture en macroalgues.

Couverture végétale / Quadrats

Pour rappel, 3 quadrats de 50 x 50 cm, par transect sont positionnés le long du transect, de façon aléatoire autour de 5m, 25 et 45m. Au sein de chaque quadrat - Le pourcentage du substrat par les phanérogames, les macroalgues et les cyanophycées est évalué - les taxons dominants de phanérogames et de macroalgues sont indiqués (par ordre de dominance quand cela est possible = dominance relative) - le substrat colonisé par les cyanophycées est noté - la nature des épibioses présentes est renseignée, par ordre de dominance - la floraison des phanérogames est recherchée - la présence/absence de sénescence ou maladies sur les feuilles est indiquée.

La Figure 48 présente les pourcentages relatifs de couverture en phanérogames marines, macroalgues et cyanobactéries issus des relevés par quadrats sur les 10 différents herbiers étudiés dans la baie de Marigot.

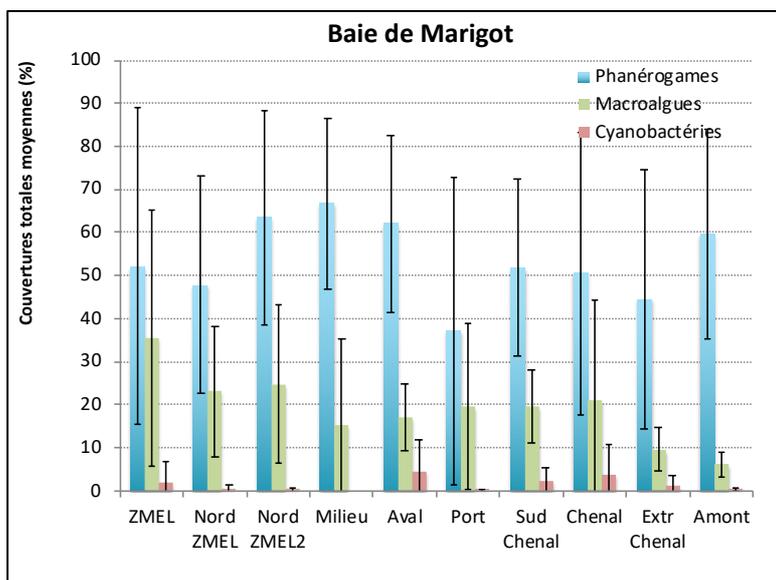


Figure 48. Pourcentages de couverture des herbiers de la baie de Marigot (résultats des quadrats)

Les écarts-types importants représentés témoignent d'une forte variabilité intra-station. Ainsi les différents quadrats d'une même station présentent sur tout l'herbier des couvertures souvent différentes entre les phanérogames, les macroalgues et quelques pourcentages de cyanobactéries.

Une analyse inter-saisons, avec les stations ordonnées suivant un gradient intérieur vers extérieur de la baie, ne permet pas de noter de motif très visible dans l'évolution des couvertures sinon des macroalgues plus présentes près du / des bord(s). Cela paraît pouvoir être corrélé avec les influences terrigènes des bassins versants et des eaux moins profondes. Cependant la logique d'organisation des stations mise en place ici reste discutable.

La Figure 49 présente les pourcentages relatifs de couverture en phanérogames marines issus des relevés par quadrats sur les 10 différents herbiers étudiés dans la baie de Marigot.

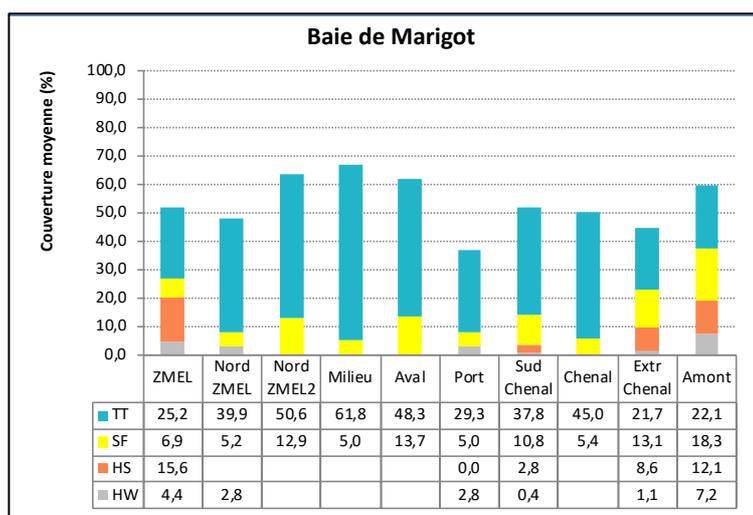


Figure 49. Pourcentages de couverture des différentes espèces d'herbiers (résultats des quadrats)

La Figure 50 présente les pourcentages relatifs de couverture en macroalgues issus des relevés par quadrats sur les 10 différents herbiers étudiés dans la baie de Marigot.

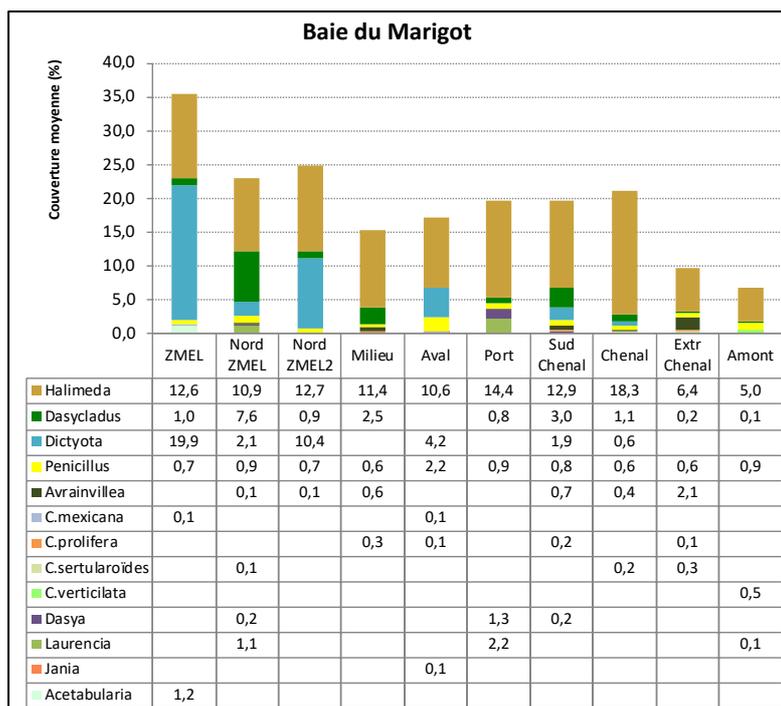


Figure 50. Pourcentages de couverture des différentes espèces de macroalgues (résultats des quadrats)

Diversité des peuplements

L'étude ciblée de la diversité des peuplements observés permet la recherche des espèces indicatrices de perturbation exacerbées. Les genres de macroalgues *Acetabularia* (et *Dictyota*) sont en particulier retrouvés près du bord dans des zones supposées très perturbées.

Ce résultat doit être tempéré, en particulier pour *Dictyota sp.*, par la disponibilité d'affleurements rocheux au bord pouvant servir de supports de colonisation atypiques pour des herbiers.

Densité par m² / Longueurs des feuilles

La Figure 51 présente les résultats du comptage de densités moyennes des plants de *T. testudinum* et *S. filiforme* dans 30 quadrats de 10x20 cm sur les différentes stations étudiées dans la baie de Marigot (protocole 2013).

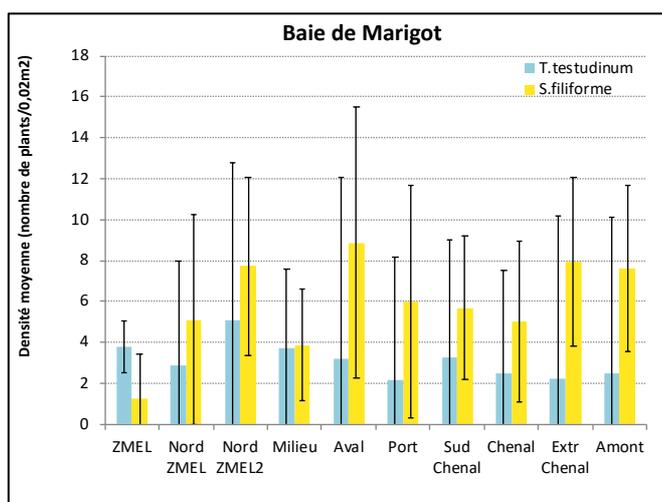


Figure 51. Densités moyennes des plants de *T. testudinum* et *S. filiforme* (ancien protocole DCE)

Les résultats montrent en premier lieu une importante variabilité des données, à la fois intra-station et inter-stations. Cela pourrait être partiellement expliqué par le biais de comptage par 3 observateurs ainsi qu'un effort d'échantillonnage non constant.

Cependant des facteurs environnementaux peuvent également corroborer ces observations, avec de plus les autres métriques relevées dans le cadre de l'étude, en particulier celles de couvertures en pourcentages issues de l'analyse des quadrats.

La Figure 52 présente les résultats de longueur moyenne des feuilles de *T. testudinum* et de *S. filiforme* sur les différentes stations étudiées dans la baie de Marigot.

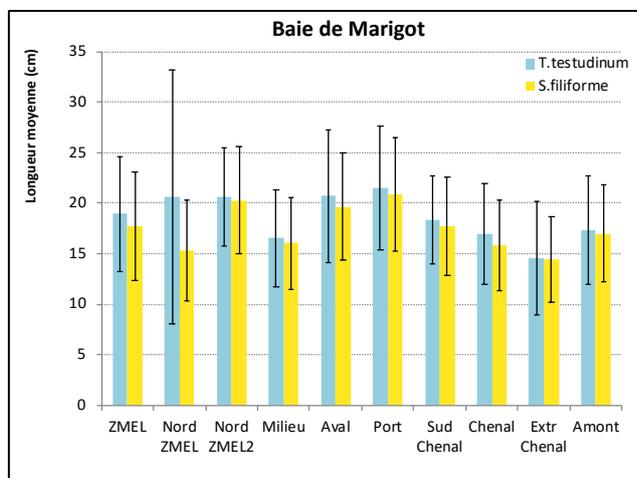


Figure 52. Longueur moyenne des plants de *T. testudinum* et *S. filiforme* (ancien protocole DCE)

La variabilité intra-station des résultats est assez importante mais cohérente pour ce type de suivi rendant compte de variabilités naturelles. Cela s'observe pour les deux espèces faisant l'objet du suivi.

La variabilité inter-stations est relativement faible pour les deux espèces.

Par contre les valeurs de densités et de longueurs sont globalement faibles par rapport aux normales observées pour un herbier en bon état de santé. Les couvertures et hauteurs de canopées pour les deux espèces sont ainsi faibles sur l'ensemble de la baie.

La station de suivi #SXM06 en particulier, station « aval » de l'étude Pareto, 2013 située en milieu de baie de Marigot, présente les effets d'un impact le plus visible du suivi, logiquement fréquemment répété au fil du temps.

L'observation de cicatrises de tranchées importantes laisse à penser qu'il s'opère une substitution de *T. testudinum* climaxique par les autres espèces *S. filiforme* voire *H. stipulacea* invasive, voire des macroalgues de plus en plus nombreuses et diversifiées.

La piste de coffres d'amarrage à faire poser dans cette zone centrale autour de #SXM06 pourrait participer à réduire les impacts *ie* de compenser les impacts du projet d'extension. Cela permettrait même de travailler sur le « gain net » de la doctrine avec un niveau au-delà de la compensation à la fois sur le thème et la zone.

Il conviendrait de mener des études complémentaires ciblées pour bien caractériser l'impact sur le milieu et son importance, donc la quantification de la « perte ».

La Figure 53 montre une vision panoramique d'un patch d'herbier sur la station #SXM17 « ZMEL », illustrant la continuité de zones de densités de peuplements différents, en particulier sur cette zone fortement perturbée.



Figure 53. Illustration de continuité de faciès d'un patch d'herbier sur la station #SXM17 « ZMEL »

2.2.2 Baie de Grand-Case

2.2.2.1 Éléments historiques et contextuels

Deux stations de suivi d'herbiers de phanérogames marines ont été positionnées en baie de Grand-Case. Une (#SXM11) a été implantée en face des restaurants, dans la partie nord de la baie, la plus fréquentée pour le mouillage des navires, tandis que l'autre (#SXM12) est située plus au sud, sous l'axe aéroportuaire marqué par des bouées, dans une zone où l'exposition au fetch de la baie ne permet pas un mouillage sûr et confortable pour les plaisanciers.

La profondeur de la station (#SXM11) est de 4,2 m en moyenne (Min. 3,9m – Max. 4,6m).

La profondeur de la station (#SXM12) est de 4,4 m (Min. 4,3m – Max. 4,6m).

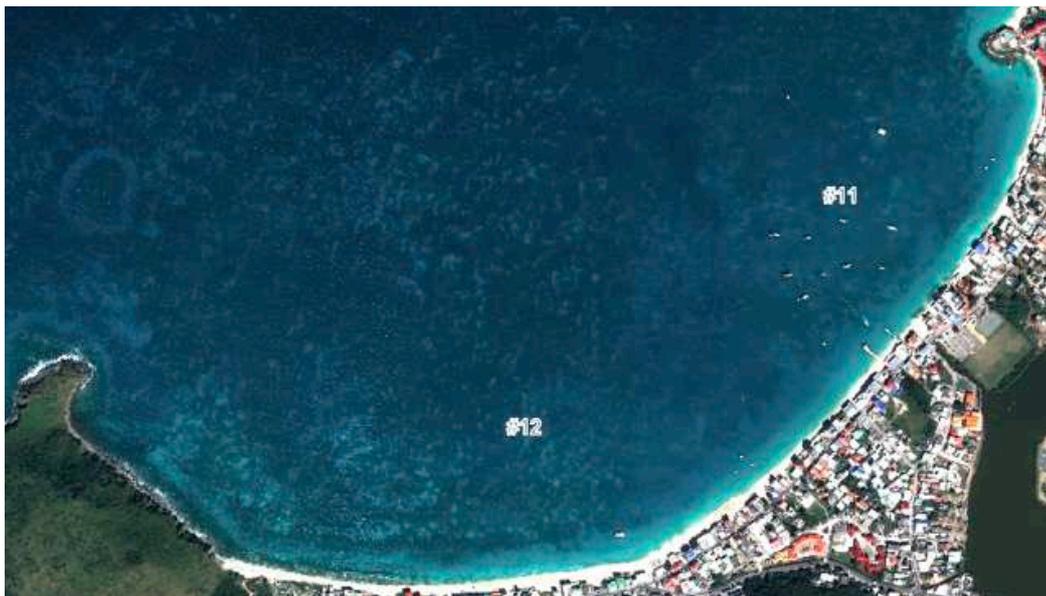


Figure 54. Carte de localisation des stations de suivi (numéros) de la baie de Grand-Case

Dans la baie de Grand-Case, la RNSM a également positionné deux points de suivi d'herbiers en face du bourg, qui sont comparés avec les deux points de leur suivi réserve dans cette zone, positionnés au niveau du Rocher Créole.

Les derniers résultats de ces suivis sur ces points de suivi sont intégrés à la discussion de l'étude.

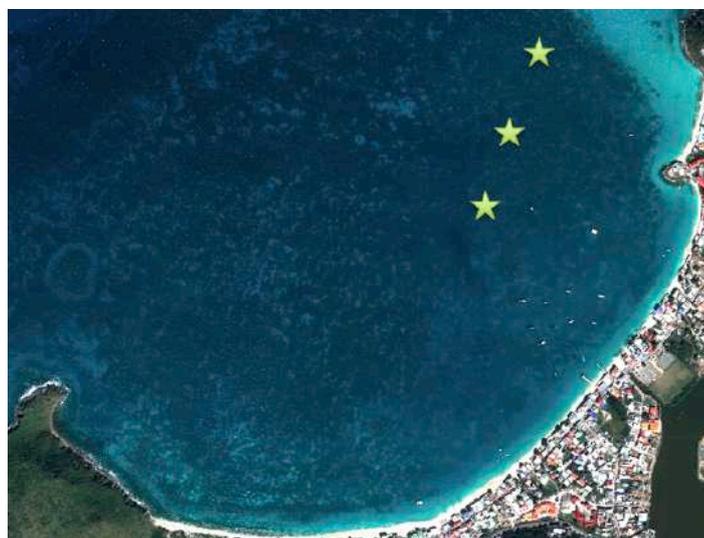


Figure 55. Carte de localisation des stations de suivi (étoiles) de la RNSM dans la baie de Grand-Case

2.2.2.2 HERBIERS – Résultats des suivis à Grand-Case

Composition des herbiers

La Figure 56 présente la composition des herbiers de phanérogames marines de la baie de Grand-Case à travers la décomposition des résultats du protocole LIT sur les stations de cette baie.

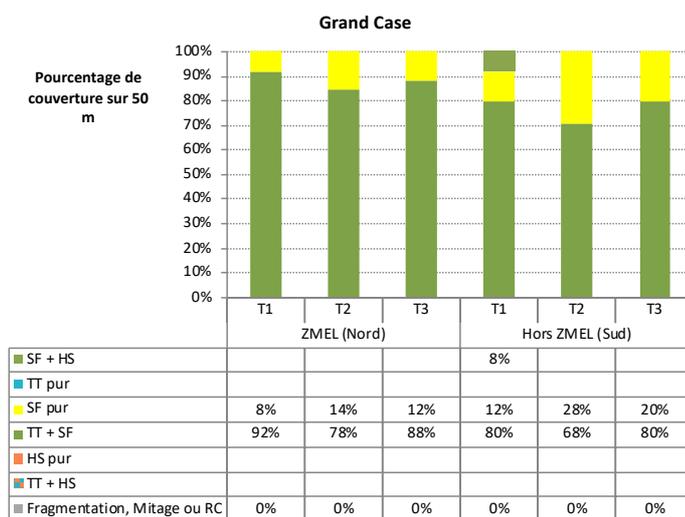


Figure 56. Composition des herbiers de la baie de Grand-Case (résultats du LIT)

Les stations d'herbiers de la baie de Grand-Case ne présentent pas de zones de TT pur, dites zones d'herbier climacique. Des zones de SF pur sont présentes par endroits sur tous les transects, avec des pourcentages de couverture compris entre 8% et 28%. La majorité des herbiers suivis sont cependant des herbiers mixtes à TT+ SF avec également un peu de *H. stipulacea* sur un transect au sud (mixte avec SF). Enfin des zones de mitage & fragmentation peu nombreuses sont observées.

A noter que la composition des herbiers est moins panachée que ce qui peut être fréquemment rencontré, et par exemple que ce qui a été observé dans la baie de Marigot, avec ici seulement 4 catégories distinctes représentées.

BELT

Pour rappel, un suivi de type « Belt » de 1 m est réalisé le long du transect. Dans l'ensemble du couloir de 1 m, est comptabilisé le nombre (1) d'oursins (en distinguant les espèces) ; (2) de colonies coralliennes (en distinguant les genres/espèces quand cela est possible) ; (3) de signes de bioturbation (« monts » et « entonnoirs »). Sont également notés l'abondance (absence, tache occasionnelle ou présence sur nombreux pieds, herbier bien colonisé) des cyanophycées ; la présence en abondance/présence occasionnelle/absence de signes de bioturbation (« monts » et « entonnoirs ») ; la présence en abondance/présence occasionnelle/absence d'algues dérivantes, de débris de feuilles de phanérogames (quelques m²), de macroalgues épiphytes ; la nature du substrat selon les catégories suivantes (Source : Kerninon et Hily, 2015) : Vase, Sable fin vaseux, Sable fin propre, Sable grossier propre, Macrodébris coralliens ou graviers/cailloutis ; l'état de santé, selon la grille adaptée de Bouchon et al. (2003) (tableau).

Les données du suivi avec le protocole de type « Belt » dans la baie de Grand-Case ont permis de mettre en évidence des particularités de ce qui a pu être rencontré dans la baie de Marigot.

Plusieurs points communs sont relevés : peu/pas de macrofaune accompagnatrice observée, forte bioturbation. Ici l'eutrophisation est bien marquée avec des cyanophycées bien présentes, en particulier au niveau des transects nord, dans une moindre mesure au sud.

Du fait de ces constats, auxquels s'ajoute une couverture algale importante, les états de santé sont largement déclassés avec des indices de 3,3 au Nord et de 3 au Sud.

Couverture végétale / Quadrats

La Figure 57 présente la composition végétale marine relevée dans les quadrats sur les stations de la baie de Grand-Case.

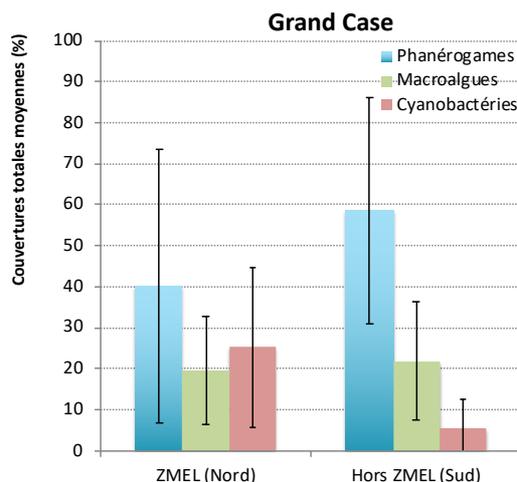


Figure 57. Pourcentages de couverture des herbiers de la baie de Grand-Case (résultats des quadrats)

Ce graphique met en premier lieu en évidence l'importance relative des macroalgues et cyanobactéries. La baie est largement marquée par une eutrophisation probablement expliquée par l'urbanisation de la zone, mais également par la fréquentation nautique. Il conviendrait de discriminer l'apport du bassin versant et de s'intéresser à l'étang voisin pour quantifier les différentes contributions.

A noter des variabilités intra-stations importantes.

Densités & longueurs de feuilles

La station Nord (SXM11) présente des densités de TT de 130 plants/m² et de SF de 63 plants/m². Ces deux valeurs sont faibles voire très faibles. La station Sud (SXM12) présente des densités de TT de 153 plants/m² et de SF de 90 plants/m², également très faibles.

Ces données sont corroborées par les photos et observations de l'importance de la fragmentation et de la bioturbation qui montrent le niveau de perturbation de la baie.

SUIVIS RESERVE

La station présentant la densité la plus importante est l'îlet Pinel avec 1353 plants/m², contre 1187 plants/m² au Rocher Créole et seulement 923 plants/m² à Grand-Case. *S. filiforme* domine sur l'ensemble des stations et représente un peu moins des 2/3 du couvert en herbier. En réserve les densités en *T. testudinum* sont plus importantes, avec 483 plants/m² à l'îlet Pinel, 438 plants/m² au Rocher créole et 310 plants/m² à Grand Case.

La densité moyenne des plants qui avait globalement baissé en 2015, amorce une remontée en 2016 sur l'ensemble des stations. Mais ce sont les stations en réserves qui continuent d'afficher les plus fortes densités d'herbier depuis 2013. Sur la station de Pinel affiche l'une des plus fortes densités observées depuis le début du suivi en 2012, principalement du fait de l'observation de la plus forte densité en *T. testudinum* enregistrée depuis le début du suivi de cette station en 2012. Cependant, depuis 2011, les herbiers sont dominés par *Syringodium filiforme* alors que jusqu'en 2010, c'était *Thalassia testudinum* qui était majoritaire. Ce changement de dominance pourrait s'expliquer par les phénomènes d'eutrophisation, de sédimentation et le développement de l'urbanisation côtière qui limitent le développement de *Thalassia testudinum* et auxquels *Syringodium filiforme* serait moins sensible.

La longueur moyenne des feuilles des deux espèces est homogène et assez élevée sur les trois stations. Elles sont comprises en moyenne entre 19cm et 21,5 cm pour *T. testudinum* et entre 18,3cm et 20 cm pour *S. filiforme*. Les feuilles les plus petites mesurent entre 9 cm et 11,5 cm pour *T. testudinum* et entre 7 cm et 9,5 cm pour *S. filiforme* ; alors que les plus grandes mesurent de 30 cm pour les deux espèces. La station de l'îlet Pinel abrite les plus importantes longueurs de feuilles toutes espèces confondues pour 2016.

Depuis 2013, la longueur des plus grandes feuilles apparaît relativement stable au cours du temps, avec des variations de l'ordre de deux centimètres entre deux années consécutives ; ce qui est cohérent avec un taux de croissance de l'ordre de 3 cm/an pour *T. testudinum*, mais relativement faible pour *S. filiforme* dont la croissance peut varier entre 17 et 25 cm/an.

En ce qui concerne *T. testudinum*, la longueur moyenne des plus grandes feuilles atteignait son maximum enregistré en 2011 (> 24,5 cm), avant d'amorcer une importante diminution jusqu'en 2015 (< 20cm), passant de 24 à 19 cm sur cette période. Les valeurs enregistrées en 2016 traduisent une très légère augmentation, principalement pour la station de Pelican Rock (passant de 19 à 21 cm). Ainsi, depuis la mise en place des stations la longueur des plus grandes feuilles est en moyenne de 20,7 cm au Rocher Créole, de 21,2 cm à Grand case et de 21,3 cm à Pelican Rock.

S. filiforme quant à elle, affiche sur la station du Rocher Créole une diminution de sa hauteur de canopée entre 2013 et 2015, passant de 19,5 à 17,7 cm. Une très légère augmentation est ensuite constatée sur cette même station entre 2015 et 2016 (de 17,7 à 18,3 cm), ce qui reste en dessous de la hauteur moyenne enregistrée de 2013 à 2016 (18,6 cm). Pour cette même espèce, les autres stations de suivi affichent des évolutions inverses, ainsi qu'une hauteur moyenne de 19,6 cm à Grand Case et 20 cm à Pelican rock. La station de Grand Case affiche la meilleure stabilité de la hauteur de canopée composée par cette espèce.



La présence marquée des cyanophycées dans la zone « ZMEL », déjà à l'heure actuelle une zone de mouillage « sauvage » des navires de plaisance (voiliers en particulier), est bien mise en évidence.

L'urbanisation de ce bassin versant est également marquée.





Figure 58. Illustrations de la station #SXM11 « ZMEL »



En 2016, les suivis de la RNSM sur leurs transects témoins hors réserve à Grand Case permettent de mettre en évidence des indices d'eutrophication (cyanobactéries) et d'hypermédimentation (sédiments plus fins et dépôts sur les feuilles) et des surfaces mitées de 5% contre 2% à Rocher Créole en réserve (RNNSM, 2017).



Figure 59. Illustrations de la station #SXM12 « Hors ZMEL »

2.2.3 Baie de Cul-de-Sac

2.2.3.1 Éléments historiques et contextuels

La baie de Cul-de-Sac a fait l'objet d'une longue exploration dans le but de trouver des stations potentielles pour l'application des suivis tels que décrits dans la méthodologie de l'étude, c'est-à-dire des superficies d'herbiers si possible avec *Thalassia testudinum* (considérée comme étant l'espèce climacique de l'herbier en « bon état de santé ») et/ ou *Syringodium filiforme*, sur des surfaces suffisantes pour établir une station de suivis sur transects et quadrats.

Les fonds marins de cette baie sont très perturbés du fait de différents facteurs :

- En fond et milieu de baie, elle a été sujette à un long passé d'épisodes d'impacts directs dus à des prélèvements de sédiments marins pour les constructions sur l'île (Schmitt, 2013) ;
- Épisodes d'eutrophisation anciens et récents, du fait de sa forme fermée et ouverte aux vents dominants, désormais très fréquents du fait d'échouages et de décomposition sur place de nappes de sargasses régulières voire quasi-permanentes ;
- Impact des usages de mouillage de divers navires de plaisance, de transport de passagers (îlet Pinel en particulier) et de pêche professionnelle et de loisir ;
- Impact du bassin versant, limité mais fortement anthropisé (hypersédimentation, macro-/micropolluants).



Figure 60. Cartes diachroniques du Cul-de-Sac : de d. à g. 1950, 2000, 2010, 2020 environ (IGN)

D'après l'analyse diachronique des clichés satellite disponibles (Figure 60), l'ensemble de ces facteurs a fortement perturbé la baie ces dernières années et conduit à son envasement et sa colonisation progressive, en particulier du fond de baie et de la partie Nord par des phanérogames en dehors de la zone initiale (haut-fond dans la continuité de la Petite Clef).

La disparition d'une bonne partie de la mangrove littorale, l'urbanisation et les modifications hydriques de l'étang ont accentué l'hypersédimentation de la baie qui a favorisé les développements de macroalgues et de phanérogames indigènes pionnières ensuite supplantées par l'espèce invasive *H. stipulacea*.

Pour mieux comprendre ces phénomènes, comme introduit plus tôt, le Cul de Sac a en outre fait l'objet d'une cartographie des biocénoses marines « à la marge » (juste en sortie de baie de Cul-de-Sac, autour de l'îlet Petite Clef) dans le cadre d'un projet de cartographie des biocénoses marines de l'îlet Pinel mené dans le cadre d'un stage à la Réserve Naturelle (Schmitt 2013). La carte obtenue est comparée à celle produite avec la présente étude (avec prudence puisque 8 ans de décalage entre les 2 projets).

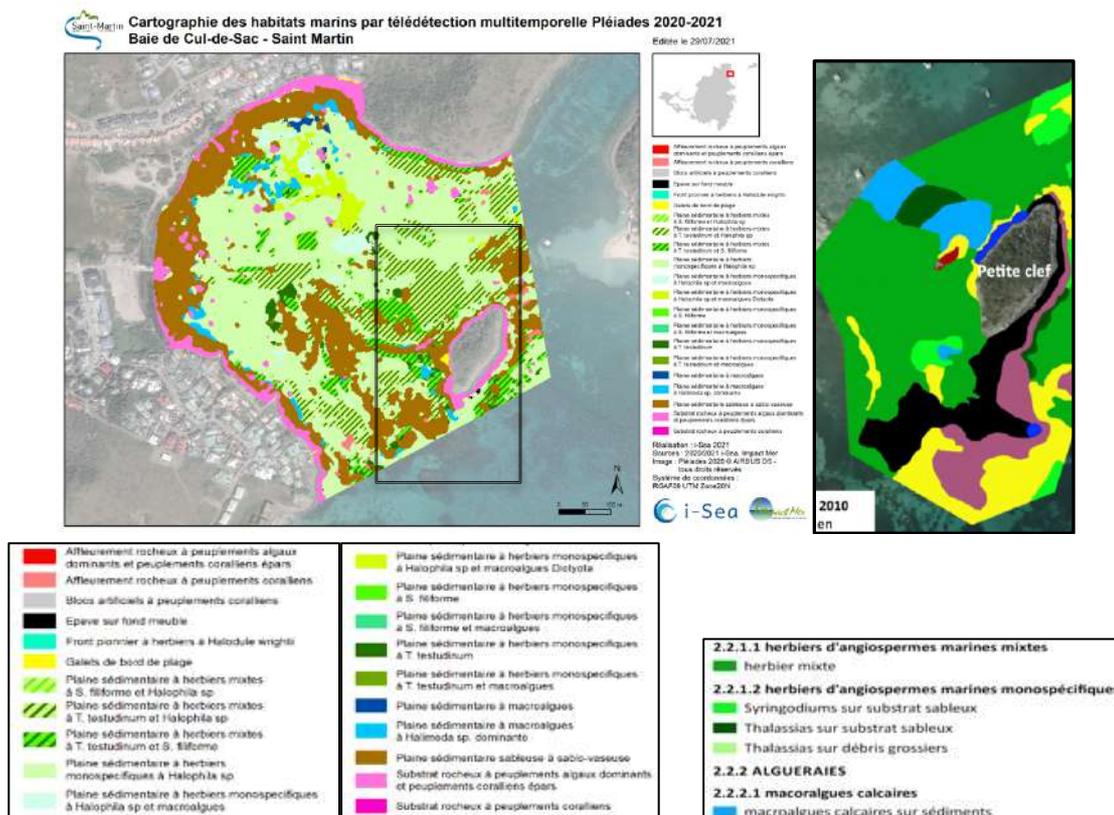


Figure 61. Comparaison des cartographies des habitats marins de l'étude (grand format Fig. 17) et de Schmitt 2013. Les typologies de la présente étude sont adaptées de Pareto 2013, tandis que Schmitt a utilisé des typologies propres, assez simplifiées. Il apparaît cependant que les motifs principaux d'occurrences des herbiers mixtes, des macroalgues et des fonds meubles se retrouvent entre les deux cartes. La présence de l'espèce *Thalassia testudinum* en particulier sur des points précis est bien mise en évidence.

Le stage de Schmitt 2013 a également permis d'avancer une carte de zonage des états de santé des biocénoses de la zone dont un extrait est présenté ci-dessous (Figure 62).

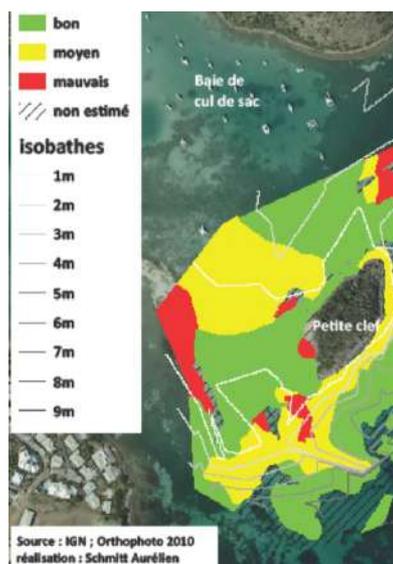


Figure 62. Carte des états de santé de Pinel / Petite Clef (Schmitt 2013)

Cette carte fait apparaître la dégradation des états de santé des herbiers et algues sous le vent de la Petite Clef, sous influence de la baie de Cul-de-Sac.

Une étude prospective sur la prolifération de l'herbe marine, espèce exotique envahissante (EEE) *Halophila stipulacea* a été menée en 2014 dans le cadre d'un stage accueilli par la RNNSM (Moisan, 2014). Dans ce cadre, un focus a été porté sur le Petit Cul-de-Sac et le pourtour de la Petite Clef dans son voisinage immédiat (Figure 63) et également sur le sec de Grand Case mais sans signalement.



Figure 63. Cartes des radiales de prospection et mesures d'*H. stipulacea* zone Cul-de-Sac/Pinel (Moisan 2014)

L'espèce *H. stipulacea* a supplanté largement les biocénoses en place antérieurement, qui avaient déjà proliféré dans une baie plutôt sable + banc de TT quand la qualité des eaux était encore bonne. Compétition interspécifique HS supplante SF (Willette & Ambrose 2012) / (Willette et al. 2014)

Les explorations menées dans la zone pour apporter les données d'apprentissage du volet de cartographie de l'étude ont permis de se rendre compte de la faible proportion d'herbiers dans la baie, et de la forte présence de vases nues ou recouvertes de films biosédimentaires voire de cyanophycées ou de sargasses en décomposition, et de nombreuses zones colonisées par des macroalgues molles ou calcaires ou par des herbiers de la phanérogame marine invasive *Halophila stipulacea*.

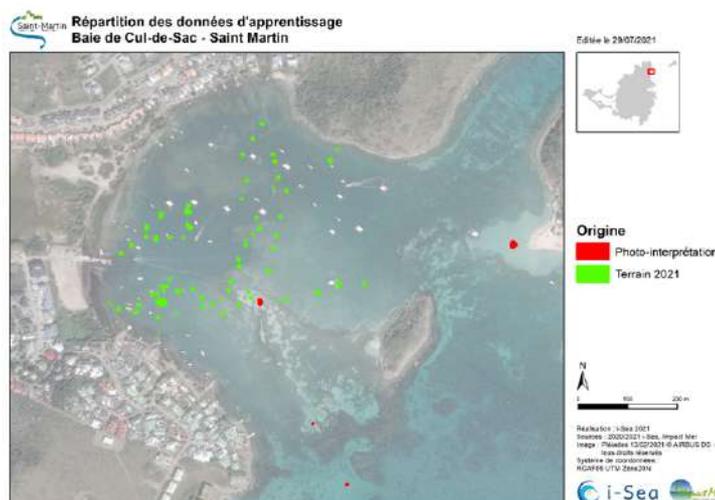


Figure 64. Carte de répartition des données de terrain sur le site de la Baie de Cul-de-Sac (grand format Fig.7)

Ainsi le suivi dans la baie de Cul-de-Sac a été mis en œuvre sur 2 stations #SXM13 au Nord et #SXM14 au Sud mais le protocole a encore dû être adapté aux biocénoses rencontrées, la baie ne présentant que des zones d'herbiers de phanérogames marines compatibles avec le protocole de suivi limitées, voire « reliques ».

2.2.3.2 HERBIERS –Expertise Amont (SXM13) / Aval (SXM14)

A l'issue des prospections n'ayant montré presque aucune zone d'herbiers dans la zone, la station « ZMEL » a été établie à la côte sur la côte Nord, dans une bande présentant un patch avec des herbiers de *Thalassia testudinum*.

La zone limitée a permis de réaliser des mesures isolées, mais pas l'établissement de protocoles complets (transects, quadrats...).

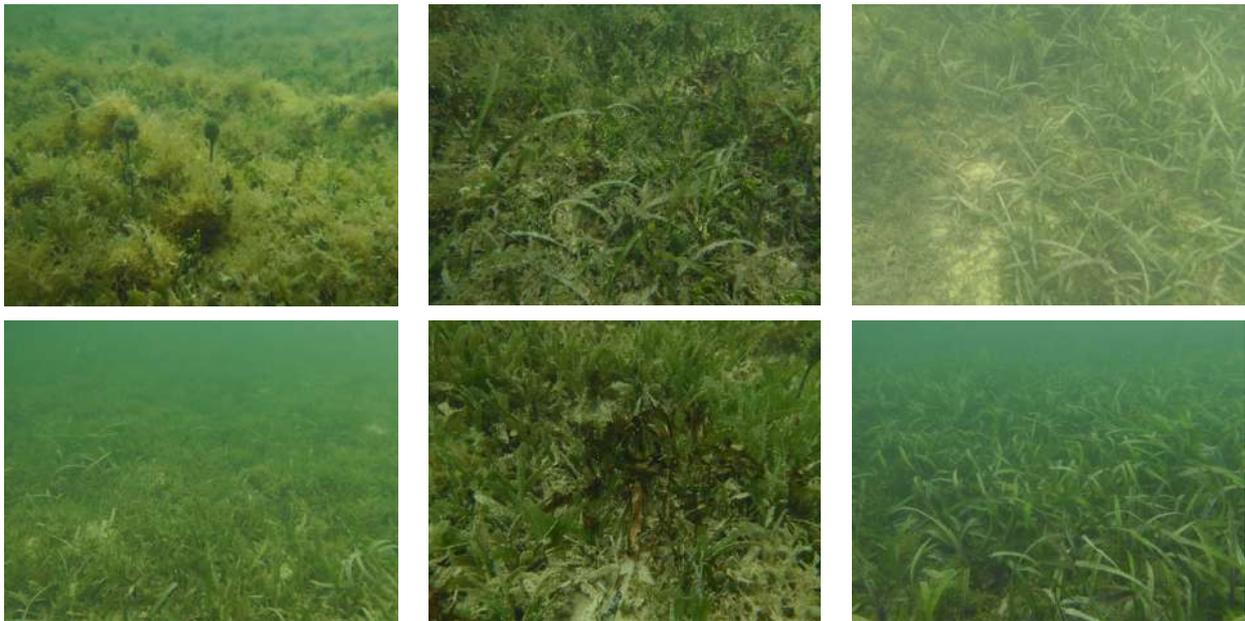


Figure 65. Illustrations de baie de Cul-de-Sac

Des mesures ponctuelles, à l'instar de ce qui a pu être fait pour la station « ZMEL », ont pu être réalisées sous le vent de la Petite Clef, le long du banc de sable principal. Là encore, les zones d'herbiers *ad-hoc* sont limitées et ne permettent pas de réaliser les protocoles complets réalisés dans le reste de l'étude, mais de faire des observations dans des quadrats et des observations et mesures ponctuelles. Les métriques de suivi habituelles sont inapplicables sur ces biocénoses.

La baie est largement eutrophisée et ne présente plus que quelques zones relictuelles d'herbiers présentant du TT et/ou du SF.

Le fond de baie a entièrement été colonisé par des macroalgues et par endroit un herbier de *Halophila stipulacea* uniquement. L'espèce est tolérante aux envasements et à une turbidité importante et a largement supplanté ici les espèces locales.

3 Conclusions et perspectives

3.1 Cartographie (i-Sea)

La présente étude menée en collaboration entre la société Impact Mer et la société i-Sea a permis de produire la cartographie des habitats des grandes baies de Saint-Martin.

La chaîne de traitement d'images Biocoast a pu être appliquée avec succès pour produire la cartographie des habitats. Nous avons pu bénéficier d'une série temporelle de 4 images Pléiades, qui, malgré la présence de nuages, nous a permis de produire des résultats de qualité grâce à une stratégie spécifiquement adaptée. La campagne de relevés terrain réalisée en 2021 a permis de produire des données d'apprentissages contemporaines et fines. Bien que cette base de données d'apprentissage ne soit pas suffisamment robuste pour permettre une évaluation statistiquement significative, elle a permis d'ajuster des modèles de classification supervisée pertinents pour la cartographie visée.

Une attention particulière a été portée sur la détection et la gestion des bateaux dans cette étude, ces résultats ont été fournis à titre indicatifs car ils sont d'une grande qualité et d'une grande précision et ils laissent ainsi envisager de futures applications opérationnelles.

Enfin, nous avons tenté de comparer les résultats cartographiques produits avec ceux de référence produite par Pareto (2013). Cependant, des différences très significatives sont apparues pour les surfaces couvertes par les herbiers et les plaines sédimentaires. Afin de ne pas mal interpréter ces différences, nous sommes remontés dans les archives d'images et avons pu émettre l'hypothèse selon laquelle la cartographie de Pareto pourrait être inexacte dans cette zone particulière. En effet, la forme de la zone de plaine sédimentaire prédite (et vue sur le terrain en 2020) se retrouve dans les images d'archives jusqu'en 2013. Cela ne nous permet donc pas de conclure sur l'évolution des surfaces en herbier entre 2013 et 2020. Des études plus approfondies seraient nécessaires pour mener à bien ce travail de comparaison sans tirer de conclusions maladroites ou trop hâtives.

3.2 État de santé des biocénoses des baies concernées par les projets de ZMEL (Impact Mer)

3.2.1 Baie du Marigot

Les herbiers de phanérogames marines de la baie de Marigot montrent en premier lieu une très grande variabilité, et ce à tous points de vue : dans leur composition spécifique en phanérogames, en macroalgues, en espèces accompagnatrices, dans les caractéristiques des substrats, dans le degré de fragmentation...

La principale constante est une importante bioturbation retrouvée sur l'ensemble des stations expertisées dans la baie, quelles que soient les localisations et les profondeurs.

Des comparaisons suivant des gradients ont été menées, en particulier dans la logique de cette étude avec un gradient de la zone de ZMEL envisagée vers le large et le pointe Arago. Bien-sûr la large distribution des stations dans la baie permet de respecter le principe général d'un tel gradient, mais pas au sens parfaitement linéaire. Cette distribution des stations est apparue comme une solution satisfaisante mais d'autres auraient pu être mises en œuvre. Cependant une analyse binaire mettant en comparaison les stations ZMEL par rapport aux autres par exemple ne paraît pas adéquate, en particulier du fait de la différence notable d'implantation des transects sur la « station » composite ZMEL.



Figure 66 : Carte de synthèse de l'état de santé des biocénoses & comparaison avec Pareto 2013

Les classes synthétiques reprises dans la carte en Figure 66 sont reprises dans la colonne « Synthèse » du Tableau 9 ci-dessous. Les classes sont issues d'un arrondi à 0,5 supérieur des indices d'état de santé (adapt. Bouchon *et al*, 2003).

L'objectif était de tenter de confirmer le gradient supposé, d'où l'ordre des stations dans le tableau.

Tableau 9 : Synthèse et comparaison des états de santé des stations de la baie de Marigot

Station	Indice État de Santé	Biocénose	Pareto 2013	Impact Mer 2021	Synthèse
Pt_01_MA	Pointe du Bluff	Coraux	2	2,5	2
Pt_02_MA	Banc de Médée	Coraux	2	2,3	2
Pt_03_MA	Pointe Arago / Galisbay	Herbier	-	-	
Pt_05_MA	Amont	Herbier	2,5	2,8	3
Pt_07_MA	Extr Chenal	Herbier	-	2,7	3
Pt_08_MA	Chenal	Herbier	-	3,2	3
Pt_09_MA	Sud Chenal	Herbier	-	2,8	3
Pt_04_MA	Port	Herbier	3	3,2	3
Pt_06_MA	Aval	Herbier	3	2,6	3
Pt_15_MA	Milieu	Herbier	-	2,6	3
Pt_10_MA	Nord ZMEL2	Herbier	-	2,7	3
Pt_16_MA	Nord ZMEL	Herbier	-	3,8	4
Pt_17_MA	ZMEL	Herbier	-	4,2	4

Il apparaît que les indices convertis en classes ne mettent que peu de gradient en évidence, mettant en évidence encore plus que les indices détaillés, que « l'herbier global » de la baie est de classe 3 ie « Signe d'eutrophisation ou de sédimentation », soit un herbier mixte ou SF pur montrant un début d'eutrophisation et/ou de sédimentation, n'allant pas jusqu'à un phénomène marqué.

La quantité de macroalgues est également un facteur déclassant fondamental à considérer.

La difficulté importante à suivre en particulier les stations de suivi ZMEL, et également les stations les plus proches, laisse à penser que la meilleure manière de monitorer les évolutions des peuplements, avec une potentielle recolonisation des zones dégradées après la mise en place de mouillages pérennes, serait la mise en place de stations de suivis fixes, donc pérennes.

C'est la stratégie qui a été mise en œuvre ces dernières années dans le cadre des suivis des stations d'herbiers de la DCE, avec la mise en place de 3 transects pérennes, avec des repères sur les points de départ, et des points GPS de début et fin de chaque transect.

La mise en place de pièges à sédiments pourrait permettre de mieux comprendre les évolutions et éventuels enrichissements observés, voire des phénomènes d'eutrophisation.

Les principales conclusions telles que la grande diversité et les états de santé variables et fluctuants observés (*cf* Pareto 2013) ne plaident pas en faveur de réaliser des restaurations. En effet cela n'augure que de peu de chances de réussite des opérations, ni même d'une bonne compréhension des facteurs positifs et négatifs des expérimentations.

3.2.2 Baie de Grand-Case

La baie de Grand-Case est utilisée de manière naturelle et intuitive par les navigateurs dans sa partie nord, au vent, et c'est également là qu'est envisagée la création d'une ZMEL. Le mouillage sur cette zone compte la majorité du temps déjà plusieurs dizaines de navires de dimensions variables, parfois des yachts. Des incidences d'impacts laissés par les ancrages de ces navires ont pu être observées.

La zone expertisée hors ZMEL, au sud des bouées de marquage de l'axe de l'aéroport, est naturellement moins abritée du fait de son exposition plus large au vent dominant avec un *fetch* suffisant pour lever un clapot pouvant rendre la zone très inconfortable au mouillage.

Un projet de ZMEL dans cette baie devrait permettre de limiter les pressions bien visibles des ancrages répétés des navires. Des mesures de réduction des pressions du bassin versant pourraient venir en complément pour soutenir la recolonisation des herbiers, vers un bon état de santé de ces biocénoses.

3.2.3 Baie de Cul-de-Sac

La baie de Cul-de-Sac s'est révélée être un milieu hétérogène et particulier. Elle a été modifiée de longue date avec l'urbanisation graduelle de son bassin versant, les prélèvements de sables pour le BTP en fond de baie, l'enrichissement graduel de la baie du fait des apports anthropiques... Elle a été de nouveau totalement transformée avec l'arrivée de l'espèce de phanérogame marine *Halophila stipulacea* qui l'a largement envahie et a supplanté les peuplements antérieurs dès avant 2014 (Moisan, 2014). Plus récemment ce sont les arrivages de sargasses pélagiques qui étouffent régulièrement la baie et transforment de nouveau les biocénoses présentes.

Ces différents facteurs expliquent qu'il n'est pas possible d'appliquer les protocoles habituels dans cette baie. Les rares zones d'herbiers permettant d'utiliser les métriques DCE ou Merci-cor sont très atypiques et peu représentatives de l'ensemble de la baie. Il convient dès lors d'employer des métriques de suivis adaptés : descriptions qualitatives des peuplements et cartographie des biocénoses et surtout de leur évolution comme cela a été réalisé dans cette étude.

En tout état de cause, il apparaît que les apports d'un projet de ZMEL dans cette baie, auquel pourrait s'ajouter un effort sur la gestion hydrique du bassin versant (limitation des apports en nutriments) ainsi que la limitation des échouages de sargasses, par des ramassages plus efficaces par exemple plus en amont, ou un barrage déviant pourraient participer à rétablir l'état de santé des biocénoses de la baie.

3.2.4 Réflexion sur les outils de diagnostic à mettre en œuvre pour la suite des projets de l'EPSM, dans le cadre de suivis dans des herbiers très hétérogènes

L'utilisation des différents outils de suivis et métriques utilisés ces dernières décennies et jusqu'à présent pour le suivi de l'état de santé des biocénoses marines et en particulier des herbiers de phanérogames des baies de Marigot, Grand-Case et Cul-de-Sac en dehors des réseaux de suivis pérennes de type DCE ou suivis réserves a mis l'accent sur un certain nombre de difficultés méthodologiques.

Les protocoles ont bien évolué entre l'étude Pareto 2013, qui sert de référence sur la cartographie des biocénoses marines et des états de santé à la présente étude, et les protocoles DCE actuels et Merci-Cor appliqués aux herbiers, encore en cours d'élaboration, entre autres dans le cadre des travaux de post-doctorat du Dr. F. Kerninon.

La difficulté principale mise en évidence dans le cadre des suivis réalisés ici réside dans la très grande variabilité des herbiers rencontrés. Cela est particulièrement manifeste au niveau de la baie de Marigot.

Dans une même unité écologique de quelques km² d'herbiers, se rencontrent seulement 4 espèces de phanérogames marines et quelques espèces de macroalgues, mais dans une mosaïque d'alternances de proportions relatives, qui rendent très difficile la caractérisation de l'état écologique malgré l'application de métriques qui disposent d'une certaine antériorité sur de nombreux sites à Saint-Martin et Saint-Barths, en Guadeloupe, en Martinique.

Même si tous les herbiers rencontrés ailleurs présentent une certaine variabilité dans les proportions relatives des espèces dans les herbiers mixtes, ou dans les alternances rapides entre les herbiers monospécifiques et éventuellement la variabilité des macroalgues, il apparaît que les herbiers rencontrés sur les sites étudiés, en particulier pour la baie de Marigot, présentent des variabilités « extrêmes » dues aux facteurs de colonisations différentielles des espèces de phanérogames.

Il convient dès lors d'essayer d'expliquer les causes de ce phénomène. Les hypothèses se tournent vers l'importance des perturbations d'origine naturelle (nombreuses remobilisations sédimentaires liées aux cyclones) et anthropique (perturbations et « cicatrisations » en lien avec les jets d'ancre de navires de toutes dimensions), mais également plus fondamentalement en lien avec les fondements géologiques de l'établissement de ces zones d'herbiers.

En effet, la baie de Marigot en particulier semble reposer sur un socle de roches foliées calcaires, tuffs dont on retrouve les traces au niveau de la pointe du Bluff, du banc de Médée et de la pointe Arago (BRGM 1990). Les données du rapport concernent uniquement les zones terrestres mais il est possible d'extrapoler que la couche de sables qui recouvre ce socle n'est pas très épaisse et il apparaît que des variations de bathymétries, de nature et tenue des bancs de sables pourraient expliquer la variabilité des peuplements et également les signes d'érosion, les microfalaises etc si caractéristiques de l'ensemble de cette baie.

Bibliographie

- Beguet, B., 2014. Characterization and mapping of forest structure from Very High-Resolution satellite images. PhD Informatics-Image Analysis., University of Bordeaux, ENSEGID-IPB / INRA.
- Bouchon, C., Bouchon-Navaro, Y., 1998. Etat des récifs coralliens en Martinique. In: Gabrié, C (Ed) Etat des récifs coralliens dans la région Caraïbe Université des Antilles et de la Guyane: 56.
- Bouchon, C., Bouchon-Navaro, Y., Louis, M., 2004. Critères d'évaluation de la dégradation des communautés coralliennes dans la région Caraïbe. *Revue d'Ecologie (la Terre et la Vie)*, 59 (1-2): 113-121.
- Bousquet C., 2016. Évaluation de l'impact de la fréquentation sur l'herbier de phanérogames de Tintamarre, Saint-Martin. Rapport de stage Université de La Rochelle RNSM, 77 pages annexes incluses
- Breiman L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Breiman L., Friedman, J.H., Olsen, R.A., Stone, C.J., 1984. *Classification and Regression trees*. Wadsworth International Group, Belmont, CA.
- Chalifour, J., 2017. Suivi de l'état de santé des communautés coralliennes et des herbiers de la RNN de Saint-Martin, État des lieux 2016 et évolution 2007-2016, 22 pages + annexes.
- Gao, B.C, 1996. A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of the Environment* 58: 257-266.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25 (3): 295–309. doi:10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- IFRECOR, 2016. État des récifs coralliens et des écosystèmes associés des Outre-mer français en 2015, 168 pages.
- Impact Mer, 2011. Étude globale des étangs de Saint-Martin. CELRL, RNNSM.
- Impact Mer, 2011. Étude globale des étangs de Saint-Martin. Fiches de synthèse par étang. Rapport pour CELRL, RNNSM, 45 p.
- Impact Mer, 2012. Réalisation du suivi des étangs et des mangroves de Saint-Martin en vue de la mise en œuvre de rejet de STEP - Propositions globales. Rapport pour EEASM 283p.
- Impact Mer, 2015. Directive Cadre européenne sur l'Eau - Suivi chimique et biologique des stations des réseaux de référence et de surveillance des Masses d'Eau Côtières au titre de l'année 2014. Etat écologique partiel. Rapport de Synthèse

Impact Mer, 2021. Directive Cadre européenne sur l'Eau - Suivi physico-chimique et biologique des eaux littorales de la Martinique au titre de la DCE pour l'année 2020. Rapport de Campagne Complet. ODE OFB, 51 pp.

Impact Mer, 2021. Directive Cadre européenne sur l'Eau - Suivi physico-chimique, biologique et chimique des stations du réseau de surveillance des Masses d'Eau Côtières et de la Masse d'Eau de Transition au titre de l'année 2019. État global partiel. Rapport de Synthèse. Rapport final pour ODE OFB, 274 pp.

i-Sea 2021, Cartographie par satellite des habitats marins dans les baies de Marigot, Grand-Case et Cul de Sac sur l'île de Saint-Martin. Établissement Portuaire de Saint-Martin, 34p

Jordan, Carl F., 1969. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor". *Ecology*. 50 (4): 663–666. doi:10.2307/1936256. ISSN 0012-9658.

Kerninon F., 2020. Développement d'outils méthodologiques pour le suivi et l'évaluation de l'état de santé des herbiers d'outre-mer français et de leur environnement, dans un contexte de perturbations.

Mathieu, R., Cervelle, B., Rémy, D., Pouget, M., 2006. Field-based and spectral indicators for soil erosion mapping in semi-arid Mediterranean environments (Coastal Cordillera of central Chile). *Wiley InterScience* DOI:10.1002/esp.1343.

Maurin C. (2016), Suivi de l'état de santé des communautés coralliennes et des herbiers de la RNN de Saint-Martin, État des lieux 2015 et évolution 2007-2015, 47 pages + annexes.

Moisan, E., 2014. Première étude d'*Halophila stipulacea* dans les eaux de Saint-Martin (FWI). Stage Université de Corse, RNNSM.

Pal, M., 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217–222.

Pareto, 2013. Extension des structures portuaires commerciales de Galisbay (Saint-Martin): Cartographie des fonds marins et état de vitalité des peuplements. Août 2013, 80 pages.

Petit V., Lesage P., Rançon J.Ph., 1990. Étude géologique de Saint-Martin – Guadeloupe. B.R.G.M. Agence régionale des Antilles, 105 pages annexes incluses

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D., Deering, W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, ERTS Third Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309-317.

Schmitt A., 2013. Cartographie des habitats épibenthiques de l'îlet Pinel et de leurs états de santé. Stage UBO, RNNSM, 53 pages annexes incluses.

Sermage C., 2006. Suivi écologique des herbiers de la côte Sud Caraïbe de la Martinique et impact des ancrages des bateaux de plaisance. Stage U. La Rochelle, OMMM, 47 pages annexes incluses.

Willette D.A., Ambrose R.F., 2012. Effects of the invasive seagrass *Halophila stipulacea* on the native seagrass, *Syringodium filiforme*, and associated fish and epibiota communities in the Eastern Caribbean. *Aquatic Botany*, 103 : 74-82.

Willette D.A., Chalifour J., Debrot A.O.D., Engel M.S., Miller J., Oxenford H.A., Short F.T., Steiner S.C.C., Védie F., 2014. Continued expansion of the trans-Atlantic invasive marine angiosperm *Halophila stipulacea* in the Eastern Caribbean. *Aquatic Botany*, **112** : 98-102.

ANNEXES

Annexe 1 : Arrêté « coraux » du 25 avril 2017

Annexe 2 : Livrables complémentaires

Annexe 3 : Rapport i-Sea décembre 2021 : i-Sea 2021, Cartographie par satellite des habitats marins dans les baies de Marigot, Grand-Case et Cul de Sac sur l'île de Saint-Martin. Établissement Portuaire de Saint-Martin, 34p

Annexe 1 : Arrêté du 25 avril 2017 - Liste des coraux protégés



JORF n°0100 du 28 avril 2017
texte n° 20

Arrêté du 25 avril 2017 fixant la liste des coraux protégés en Guadeloupe, en Martinique et à Saint-Martin et les modalités de leur protection

NOR: DEVL1710040A
ELI: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2017/4/25/DEVL1710040A/jo/texte>

La ministre de l'environnement, de l'énergie et de la mer, chargée des relations internationales sur le climat, Vu le code de l'environnement, notamment ses articles L. 411-1, L. 411-2 et R. 411-1 à R. 411-14 ; Vu l'ordonnance n° 2016-1687 du 8 décembre 2016 relative aux espaces maritimes relevant de la souveraineté ou de la juridiction de la République française ; Vu la convention pour la protection et la mise en valeur du milieu marin de la région des Caraïbes, publiée sous le décret n° 2000-830 du 24 août 2000 ; Vu le protocole relatif aux zones et à la vie sauvage spécialement protégées à la convention pour la protection et la mise en valeur du milieu marin de la région des Caraïbes (ensemble trois annexes), publié sous le décret n° 2002-969 du 4 juillet 2002 ; Vu l'avis du Conseil national de la protection de la nature en date du 10 mars 2017 ; Vu les observations formulées lors de la consultation du public réalisée du 14 mars au 6 avril 2017, en application de l'article L. 123-19-1 du code de l'environnement,

Arrête :

Article 1

Au sens du présent arrêté, on entend par :

- « spécimen » : tout corail vivant ou mort, ainsi que toute partie ou tout produit obtenu à partir de celui-ci ;
- « spécimen prélevé dans le milieu naturel » : tout spécimen dont le détenteur ne peut justifier qu'il est issu d'un élevage constitué de spécimens acquis conformément à la réglementation en vigueur au moment de leur acquisition.

Article 2

Pour les espèces de coraux dont la liste est fixée ci-après :

1° Sont interdits en Guadeloupe, en Martinique et à Saint-Martin, et dans les eaux marines sous souveraineté et sous juridiction, et en tout temps :

La mutilation, la destruction, l'enlèvement de spécimens dans le milieu naturel ;
On entend par mutilation les actions provoquant un colmatage, un étouffement, une abrasion, une fracturation ou une fragmentation, des nécroses, un blanchissement des spécimens.

2° Sont interdits sur tout le territoire national et en tout temps le transport, le colportage, l'utilisation commerciale ou non, la détention, la mise en vente, la vente ou l'achat des spécimens prélevés dans le milieu naturel des territoires mentionnés au 1° après l'entrée en vigueur du présent arrêté.

Famille des Acroporidaés
Acropora cervicornis : Corne de cerf.
Acropora palmata : Corne d'élan.
Acropora prolifera : Corne de cerf diffuse.
Famille des Merulinidés
Orbicella annularis : Corail étoile massif.
Orbicella faveolata : Corail étoile massif.
Orbicella franksi : Corail étoile en bloc.
Famille des Agaricidés
Agaricia grahamae : Agarice de Graham.
Agaricia lamarcki : Agarice de Lamarck.
Agaricia undata.
Famille Incertae cedis
Cladocora arbuscula : Corail arbuscule.
Famille des Meandrinidés
Dendrogyra cylindrus = Dendrogyra cylindricus : Corail cierge.

Famille des Mussidés
Mycetophyllia aliciae : Corail cactus rugueux.
Mycetophyllia danaana : Corail cactus à crêtes basses.
Mycetophyllia ferox : Corail cactus rugueux.
Mycetophyllia lamarckiana : Corail cactus ride.
Famille des Oculinidés
Oculina diffusa = Madrepora virginea : Oculine diffuse.

Article 3

Des dérogations aux interdictions fixées à l'article 2 peuvent être accordées dans les conditions prévues aux articles L. 411-2(4°) et R. 411-6 à R. 411-14 du code de l'environnement.

Article 4

La ministre de l'environnement, de l'énergie et de la mer, chargée des relations internationales sur le climat, est chargée de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au Journal officiel de la République française.

Fait le 25 avril 2017.

Ségolène Royal

Annexe 2 : Livrables complémentaires au présent rapport

- L'ensemble des images Pléiades commandées, tuilées et ortho rectifiées. L'emprise des images sera d'environ 70 km² couvrant approximativement toute la partie française de l'île,
- Images drones : orthophotos et images multispectrales d'extrait des 3 baies en GeoTiff,
- BD terrain comportant les positions GPS des points de vérité-terrain, les typologies des biocénoses observées, les références des photographies (jointes),
- La carte exhaustive des habitats benthiques sur les baies de Marigot, Grand-Case et Cul-de-Sac en formats numérique (shape compatibles ArcGIS / QGIS) et PDF (A0 et A3) sous forme d'un Atlas cartographique détaillant chaque baie individuellement. Les cartes auront une emprise proche de celle illustrées sur les zooms de la Figure 1 ;
- Les données brutes et analysées des stations suivant les méthodologies DCE 2013/2020,
- Le rapport final d'étude pour chaque zone d'étude (en Word et en PDF) faisant état des données et méthodologies mises en œuvre sur les 3 phases d'études ainsi que des résultats des travaux et analyses réalisés,
- Un diaporama de présentation des résultats obtenus pour chacune des trois baies étudiées.

Annexe 3 : Rapport i-Sea décembre 2021

i-Sea 2021, Cartographie par satellite des habitats marins dans les baies de Marigot, Grand-Case et Cul de Sac sur l'île de Saint-Martin. Établissement Portuaire de Saint-Martin, 34p