



Association Tité



Rapport d'étude

Suivi pluriannuel 2019-2021

24 septembre 2021

Herbiers de magnoliophytes marines dans la Réserve Naturelle des îlets de Petite Terre



biotope



Avec le soutien financier de



PROJET COFINANCÉ par le fonds européen de développement régional

Citation recommandée	Biotope & Seaviews, 2021. Rapport d'étude des herbiers de magnoliophytes marines dans la Réserve Naturelle des îlets de Petite Terre – Suivis pluriannuels 2019 - 2021, Association Titè, 62 pages.	
Version/Indice	Version 1	
Date	24/09/2021	
N° de contrat	2019547	
Date de démarrage de la mission	19/06/2019	
Maître d'ouvrage	Association Titè La Capitainerie 97127 La Désirade https://reservesdesiradepetiteterre.com/	
Interlocuteurs	Eric DELCROIX Chargé de missions 0690 349 755 ericdelcroix.rnpt@gmail.com	Sophie LE LOC'H Conservatrice des Réserves Naturelles de Désirade et de Petite Terre ONF – Arboretum de Montebello 97170 Petit Bourg 0690 74 35 61 sophie.leloch@onf.fr
Mandataire	Biotope – Agence Caraïbes 9 avenue du Petit Florentin 97233 Schœlcher MARTINIQUE 0696 44 64 35 caraiibes@biotope.fr	Biotope - Antenne Guadeloupe 42 Résidence Océane Route des Hotels 97190 Gosier GUADELOUPE caraiibes@biotope.fr
Interlocuteur	Pierre CAHAGNIER	Responsable d'Agence pcahagnier@biotope.fr 0696 44 64 35
Biotope, Responsable du projet	Lucas BERENGER	Chef de Projet Développeur Milieu Marin 07 63 09 17 39 lberenger@biotope.fr
Cotraitant	Seaviews 8 avenue des Belugues 13600 La Ciotat	Christophe VIALA Président 06 22 86 01 94 viala@seaviews.fr
Seaviews, Responsable du Projet	Arnaud ABADIE	Ingénieur de recherche 07 63 10 26 42 abadie@seaviews.fr

Sauf mention contraire explicite, toutes les photos du rapport ont été prises sur site par le personnel de Biotope ou de Seaviews dans le cadre des prospections de terrain.

Sommaire

1	Présentation du projet	4
1.1	Contexte de l'étude	4
1.1.1	La Réserve Naturelle des îlets de Petite Terre	4
1.1.2	Les herbiers marins de Petite Terre	4
1.2	Objectifs de l'étude	8
2	Méthodologie	9
2.1	Plan d'échantillonnage et planning de l'étude	9
2.1.1	Zones à prospector pour la recherche des herbiers	9
2.1.2	Plan d'échantillonnage des herbiers sélectionnés pour le suivi de l'état de santé	10
2.1.3	Déroulé des campagnes de 2019 à 2021	11
2.2	Prospection pour reconnaissance de l'ensemble des zones d'étude	11
2.3	Cartographie des herbiers	12
2.3.1	Cartographie sur le terrain	12
2.3.2	Analyse des données cartographiques	15
2.4	Caractérisation des herbiers	16
2.4.1	Evaluation de l'état de santé	16
2.4.2	Classification des herbiers	22
3	Résultats, interprétations et perspectives	24
3.1	Prospection de la zone d'étude	24
3.2	Cartographie des herbiers	24
3.2.1	Délimitation des herbiers	24
3.2.2	Évaluation surfacique	25
3.2.3	Evolution morphologique	27
3.3	Caractérisation des herbiers	29
3.3.1	Evaluation de l'état de santé	29
3.3.2	Classification des herbiers	49
3.3.3	Bilan et comparaison de l'état de santé des herbiers aux études antérieures	51
3.4	Perspectives	54
3.4.1	Prospection d'autres zones d'étude	54
3.4.2	Préconisations pour le suivi des enveloppes des herbiers	54
3.4.3	Préconisations pour le suivi de l'état de santé des herbiers	55
3.4.4	Préconisation en matière de gestion des herbiers	55
4	Bibliographie	57
5	Annexes	58

1 Présentation du projet

1.1 Contexte de l'étude

1.1.1 La Réserve Naturelle des îlets de Petite Terre

La Réserve Naturelle des îlets de Petite Terre située dans l'archipel de la Guadeloupe a été créée en 1998 et s'étend sur une superficie de 842 ha pour sa partie marine. Celle-ci est composée d'un chenal de 150m entre les deux îlets qui constituent la réserve, Terre-de-Bas et Terre-de-Haut. Le chenal est fermé à l'Est par une barrière de corail qui crée un lagon protégé des houles de l'Atlantique.

La réserve est cogérée depuis 2002 par l'Association Tité et l'Office National des Forêts.

La Réserve Naturelle de Petite Terre, fait depuis des années l'objet de suivis des différentes biocénoses présentes, dont une partie concerne l'étude de l'état de santé des herbiers de magnoliophytes marines. La Réserve abrite en effet plusieurs de ces herbiers principalement dans la zone dite du lagon (entre les deux îlets). Les herbiers jouent un rôle clé pour de nombreuses espèces, comme les tortues vertes et les lambis.

Du fait de leurs localisations (à faible profondeur et à proximité des zones d'accueil) et de leur attractivité (zones d'observations privilégiées pour les requins et tortues), les herbiers sont cependant soumis à des pressions touristiques telles que le mouillage illégal et le piétinement, ainsi qu'à des pressions naturelles, particulièrement les houles cycloniques et peuvent être « étouffés » par les échouages de sargasses ou des ensablements.

A cela s'ajoute la menace d'une espèce allochtone, l'espèce de magnoliophyte invasive *Halophila stipulacea* qui se reprend sur l'ensemble des Antilles et qui est aujourd'hui présente à Petit Terre. Elle a été observée pour la première fois sur zone en avril 2017. Cette dernière a subi une forte régression à la suite d'un cyclone la même année, mais elle est aujourd'hui présente sur de larges étendues sans pour autant que son recouvrement ait été quantifié.

1.1.2 Les herbiers marins de Petite Terre

1.1.2.1 Les espèces de magnoliophytes marines présentes

Plus de 60 espèces de magnoliophytes marines sont actuellement connues, mais seulement 6 espèces de 2 familles sont considérées comme présentes dans les Petites Antilles jusqu'en 2015 : *Thalassia testudinum*, *Halophila decipiens* et *Halophila baillonis*, espèces de la famille des *Hydrocharitacés* et *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii* et *Halodule beaudettei* de la famille des *Potamogetonacées* (Legrand, 2010). Depuis « La typologie des herbiers de Martinique » rédigé par Le Moal *et al.* en 2015, dans le cadre de développement d'indicateur benthique DCE dans les DOM, la taxonomie de certaines de ces espèces a été remise en cause.

En effet, concernant le genre *Halodule*, de nombreuses confusions taxonomiques existent au niveau spécifique en raison de problèmes d'identification basés sur la morphologie. En 1970, Den Hartog propose une clé de détermination des *Halodule* basée sur la morphologie de l'extrémité des feuilles, et il identifie 6 espèces. Cette clé permet notamment la distinction de deux espèces présentes dans l'Océan Atlantique tropical : *Halodule wrightii* caractérisée par des feuilles aux extrémités bidentées et *Halodule beaudettei* caractérisée par des feuilles aux extrémités tridentées (figure 1). En parallèle d'autres auteurs observent une grande variabilité naturelle de ce critère morphologique, indiquant que pour des plants appartenant à

un même rhizome, l'extrémité des feuilles peut varier de bidentée à tridentée. Une étude phylogénétique de 2011, basée sur l'analyse de gène plastidial (*rbcL*) et nucléaire (*phyB*), suggère de plus, que, malgré quelques différences génétiques, *H. beaudettei* devrait être regroupée avec *H. wrightii*. Dans ce contexte, il semble préférable de considérer que les *Halodule* observées dans les Antilles appartiennent à l'espèce *Halodule wrightii*.

Halophila baillonis, a également été source de confusions, et a fait l'objet d'une publication en 2008 visant à clarifier sa nomenclature. D'après cette publication de Kuo & Wilson, Hooker publie en 1874 un extrait de lettre rédigé par Ascherson, dans laquelle ce dernier utilise pour la première fois le nom *H. baillonis* et fait référence à 3 spécimens, dont un collecté par Hahn en Martinique. Or, de nombreux éléments entraînent des confusions sur le nom et le concept de cette espèce : des changements successifs d'orthographe entre *H. baillonis* et *H. baillonii*, une description incomplète de l'espèce, une description de l'espèce qui n'est associée qu'*a posteriori* à un des 3 spécimens et la sélection en 1970 de ce spécimen comme lectotype de l'espèce. Finalement, il semble que la description d'Ascherson concernant *H. baillonis* fasse référence à l'espèce *H. decipiens*, et que le spécimen collecté par Hahn en Martinique ait formellement été identifié comme étant *H. decipiens*. En dehors de ce spécimen, *H. baillonis* n'a jamais été mentionnée en Martinique. En Guadeloupe, cette espèce est mentionnée par Feldman en 1936 et par Fournet en 2002. Ces deux références sont antérieures à la publication de Kuo & Wilson de 2008, et il n'existe pas d'autres éléments sur ce sujet pour confirmer ou non la présence de cette espèce en Guadeloupe (Le Moal, 2015).

L'approche la plus parcimonieuse est donc de considérer présentes en Guadeloupe les quatre espèces natives suivantes : *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, et *Halophila decipiens* auxquelles s'ajoute une nouvelle espèce exotique *Halophila stipulacea*. Cette dernière, observée aux Grenadines pour la première fois en 2002, est originaire de la mer Rouge. L'espèce s'est très vite répandue dans l'ensemble des îles des Caraïbes, elle est considérée comme une espèce invasive (IFRECOR, 2015 ; Synthèse de l'Onema, 2012-2014).

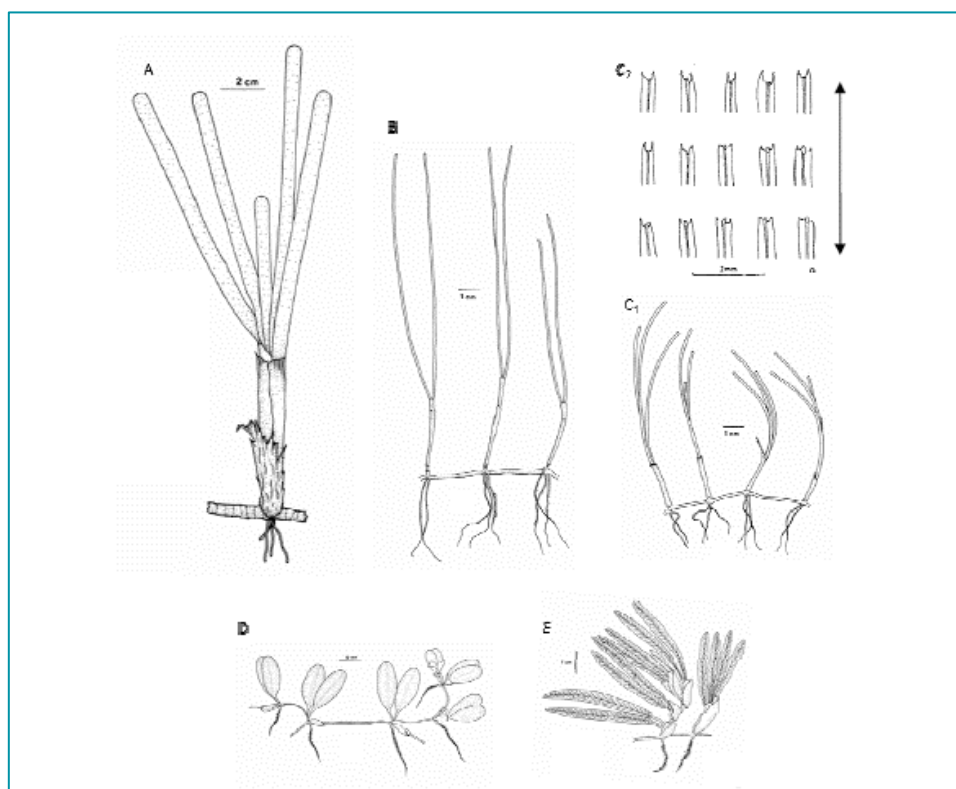


Figure 1 : magnoliophytes marines présentes aux Antilles françaises. A : *Thalassia testudinum* ; B : *Syringodium filiforme* ; C : *Halodule wrightii*. C1 : plante, C2 : détail de l'extrémité des feuilles ; D : *Halophila decipiens* ; E : *Halophila stipulacea*. (A, B, C1, D, E : d'après Philippon & Menez (1988). C2 : d'après Oliveira et al. (1983)) (La Moal et al. 2015).

Thalassia testudinum, *Syringodium filiforme* et *Halophila decipiens* sont des espèces ayant une très grande aire de répartition s'étendant à l'ensemble de la zone tropicale de l'Atlantique Ouest.

Thalassia testudinum est caractéristique des milieux stables et représente le stade climacique. Elle est considérée comme une espèce résistante aux stress environnementaux (turbidité, envasement) mais sensible au réchauffement, à l'émersion et aux pollutions principalement d'origine organique et la plus sensible aux perturbations anthropiques. Un herbier composé de cette seule espèce est représentatif de l'état de santé optimal de la communauté. La faune et la flore qu'elle abrite comprennent des espèces à haute valeur commerciale (mollusques, échinodermes, poissons), renforçant son intérêt écologique (Legrand, 2010).

Syringodium filiforme est une espèce pionnière ou de transition, que l'on retrouve dans des zones soumises à des perturbations continues ou répétées. Elle est en effet, plus résistante aux perturbations naturelles et anthropiques, et à croissance plus rapide. Le remplacement progressif des herbiers climaciques (herbiers à *Thalassia testudinum*) par cette espèce témoignerait d'une dégradation de cette biocénose (Legrand, 2010 ; Le Moal *et al.* 2015).

Halophila decipiens a la capacité de se développer dans une large gamme de profondeur allant de la surface jusqu'à 85 m de profondeur. Elle vit principalement entre 10 et 30 m, en peuplement monospécifique. C'est une espèce euryhaline. C'est aussi la seule véritable espèce de magnoliophyte marine pantropicale que l'on retrouve à la fois dans les zones tropicales des océans Atlantique, Pacifique, et Indien (INPN ; Le Moal *et al.* 2015)

Halodule wrightii est une espèce pionnière qui précède généralement *Syringodium filiforme* et *Thalassia testudinum* dans le processus de succession écologique des espèces. Les espèces du genre *Halodule* sont connues pour tolérer de larges gammes de températures et de salinités. *Halodule wrightii* se développe du bas de la zone de balancement des marées, où elle peut émerger à marée basse, jusqu'à 20 m de profondeur. Elle croît aussi bien sur sédiment sableux que vaseux, dans des zones abritées comme exposées (INPN ; Le Moal *et al.* 2015).

Les espèces présentes au sein de la Réserve de Petite Terre sont *Thalassia testudinum* et *Halodule wrightii* majoritairement, qui se retrouvent en herbier mixte, ainsi que *Syringodium filiforme* de manière plus éparse. *Halophila stipulacea* est également de plus en plus présente.

1.1.2.2 Connaissances antérieures à la présente étude

Au sein du lagon, l'un des herbiers, situé au Sud-Ouest de l'îlet de Terre-de-Haut, fait l'objet d'un suivi dans le cadre du suivi des Réserves depuis 2007, sur 3 radiales de 50 m. Ce suivi permet notamment de suivre un ensemble de paramètres : les densités et les longueurs de feuilles des deux espèces présentes majoritairement dans l'herbier (*Syringodium filiforme* et *Thalassia testudinum*), la fragmentation et l'état de santé global, ainsi que la mégafaune associée. L'évolution globale de la surface n'est en revanche pas suivi. D'après la connaissance du gestionnaire, les herbiers ont une surface comprise entre quelques mètres carrés et moins de 5000 m².

Les résultats principaux de ces suivis menés par Pareto puis Créocéan entre 2007 et 2019 indiquent que les espèces *S. filiforme* et *T. testudinum* dominent cet herbier bien que « *Halodule sp.* » soit également présente et abondante sur certaines zones. L'herbier présente des signes de fragmentation et de mitage de plus en plus prononcés, et sa densité a significativement diminué depuis 2007 pour les deux espèces. Enfin, une diminution de la longueur des feuilles a été observée, leur croissance étant restreinte par le fort ensablement et l'hydrodynamisme de la zone. Depuis avril 2017, la présence d'*Halophila stipulacea* est avérée (même si une observation avait été faite quelques années auparavant), sa colonisation a été rapide sur les fonds de sable du lagon, malgré une quasi-disparition après les cyclones de septembre 2017. Les données présentées sur la carte ci-dessous (figure 2) sont les dernières collectées par le gestionnaire. Il est à noter qu'à ce jour la surface occupée par *Halophila stipulacea* est nettement plus importante.

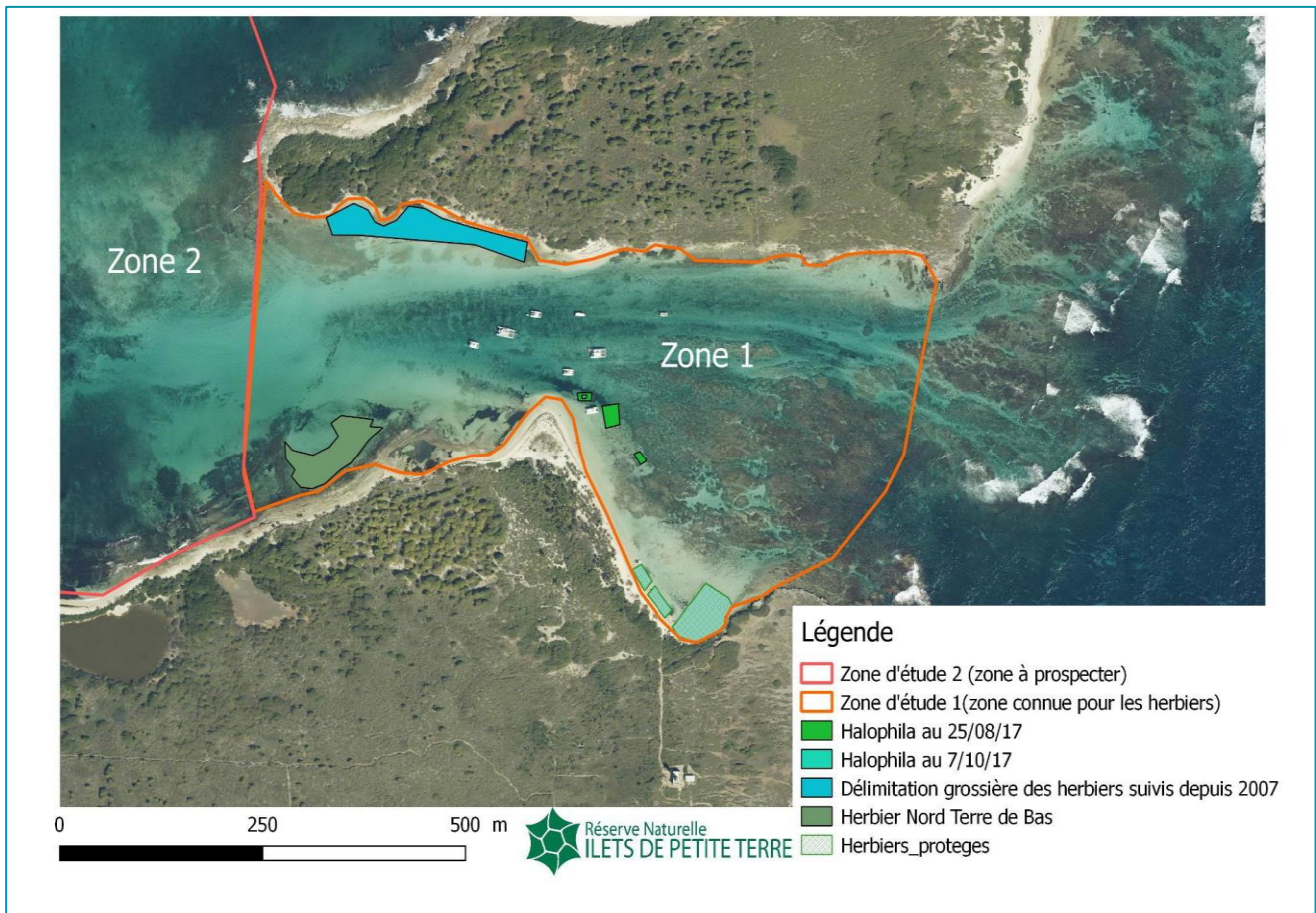


Figure 2 : Etude des herbiers de Petite Terre – Etat des connaissances antérieures à la présente étude (réalisation E. Delcroix, 21/03/2019)

En 2018, dans le cadre d'un projet IFRECOR à l'échelle des outre-mer français, un autre herbier (Herbier Nord) de Terre de Bas à fait l'objet d'un suivi. Ce suivi a eu pour objectif de déterminer son état de santé.

Depuis 2015, les gestionnaires ont mis en défense trois zones d'herbiers, afin de les soustraire aux piétinements des visiteurs (figure 2).

Enfin, les gestionnaires observent depuis plusieurs années une évolution en termes de surface de l'ensemble des herbiers, même dans des zones peu ou pas fréquentées.

1.2 Objectifs de l'étude

Dans un objectif de gestion et de protection des herbiers de magnoliophytes de Petite Terre, une bonne compréhension et connaissance de l'évolution de leur surface et de leur état de santé dans le temps, est nécessaire.

L'Association Tité, gestionnaire de la Réserve, souhaite ainsi disposer d'un état des lieux complet des herbiers de Petite Terre (= instant t), ainsi que d'une compréhension des évolutions que subissent ces milieux au cours d'une même année ainsi qu'au cours de trois années.

Les suivis précédents réalisés (en routine depuis 2007 et le suivis de 2018 dans le cadre de l'IFRECOR) ne permettent pas, en effet, de suivre l'évolution globale de la surface des herbiers, et ne concernent qu'une petite partie des herbiers de la Réserve. Le paramètre surfacique est important à étudier comme indicateur de l'état de santé des herbiers, d'autant plus que les gestionnaires observent qualitativement depuis plusieurs années une évolution des surfaces de l'ensemble des herbiers. De plus, l'évolution surfacique et la caractérisation des herbiers permettent également de suivre l'évolution de l'espèce à caractère envahissant, *H. stipulacea*, qui peut présenter une menace pour les espèces autochtones.

Enfin, les gestionnaires souhaitent suivre et évaluer l'impact des mesures prises pour protéger les quelques zones d'herbiers contre le piétinement des visiteurs, et mieux définir les zones sur lesquelles il faut intervenir en matière de protection.

Dans ce cadre, trois objectifs ont été définis :

- La prospection de la totalité des zones de la Réserve où des herbiers sont susceptibles d'être implantés (entre les îlets et sur la côte Nord de Terre-de-Bas), afin de localiser de manière exhaustive les herbiers présents au sein de la Réserve Naturelle de Petite Terre.
- La cartographie de la limite de tous les herbiers localisés ainsi que leur géoréférencement. L'objectif est d'effectuer un suivi de l'évolution globale des surfaces de chaque herbier.
- L'évaluation de l'état de santé des herbiers, via des indicateurs et la mise en place d'une classification.

Les paramètres de surface globale et d'état de santé seront étudiés au cours d'une même année et pendant trois ans, afin de caractériser les évolutions intra et inter- annuelles.

2 Méthodologie

Pour cette étude, la méthode s'est déclinée en 3 grandes phases :

- La prospection des zones d'étude (pour identification/localisation des herbiers – réalisée une fois en juillet 2019),
- La cartographie des herbiers, pour délimitation de ces habitats (réalisée sur tous les herbiers, cinq fois entre juillet 2019 et juillet 2021),
- La caractérisation de ces herbiers (réalisée sur une partie différente des herbiers lors des cinq campagnes réalisées entre juillet 2019 et juillet 2021),
- .

La présente partie présente donc les méthodologies retenues pour ces suivis.

2.1 Plan d'échantillonnage et planning de l'étude

2.1.1 Zones à prospector pour la recherche des herbiers

Le projet prévoyait la prospection de 2 zones afin de localiser tous les herbiers présents (Figure 3) :

- La zone 1, le lagon, déjà connue pour la présence d'herbiers ;
- La zone 2 située au nord de Terre-de-Bas.

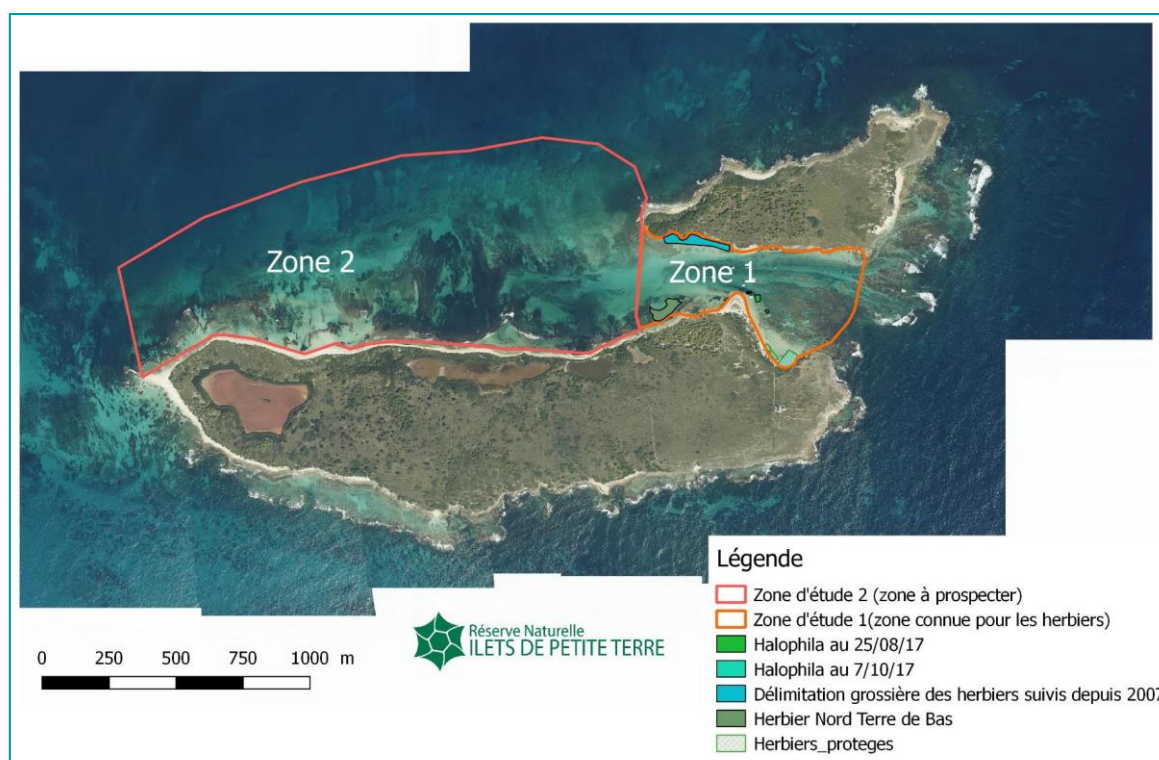


Figure 3 : Etude des herbiers de Petite Terre - Zones à prospector (réalisation E. Delcroix 21/03/2019)

2.1.2 Plan d'échantillonnage des herbiers sélectionnés pour le suivi de l'état de santé

Le plan d'échantillonnage est proposé et mis en place en fonction des herbiers trouvés à la suite des prospections réalisées dans les zones 1 et 2 (étape précédente). Ces reconnaissances ont mis en évidence 5 zones d'herbiers (uniquement présents dans la zone 1), qui font donc l'objet d'un suivi dédié (une station de suivi par zone).

Pour chaque station (n=5), le suivi se traduit par la réalisation de trois radiales de 50 m (réplicas), définies et localisées par un point GPS de départ et une direction (cap).

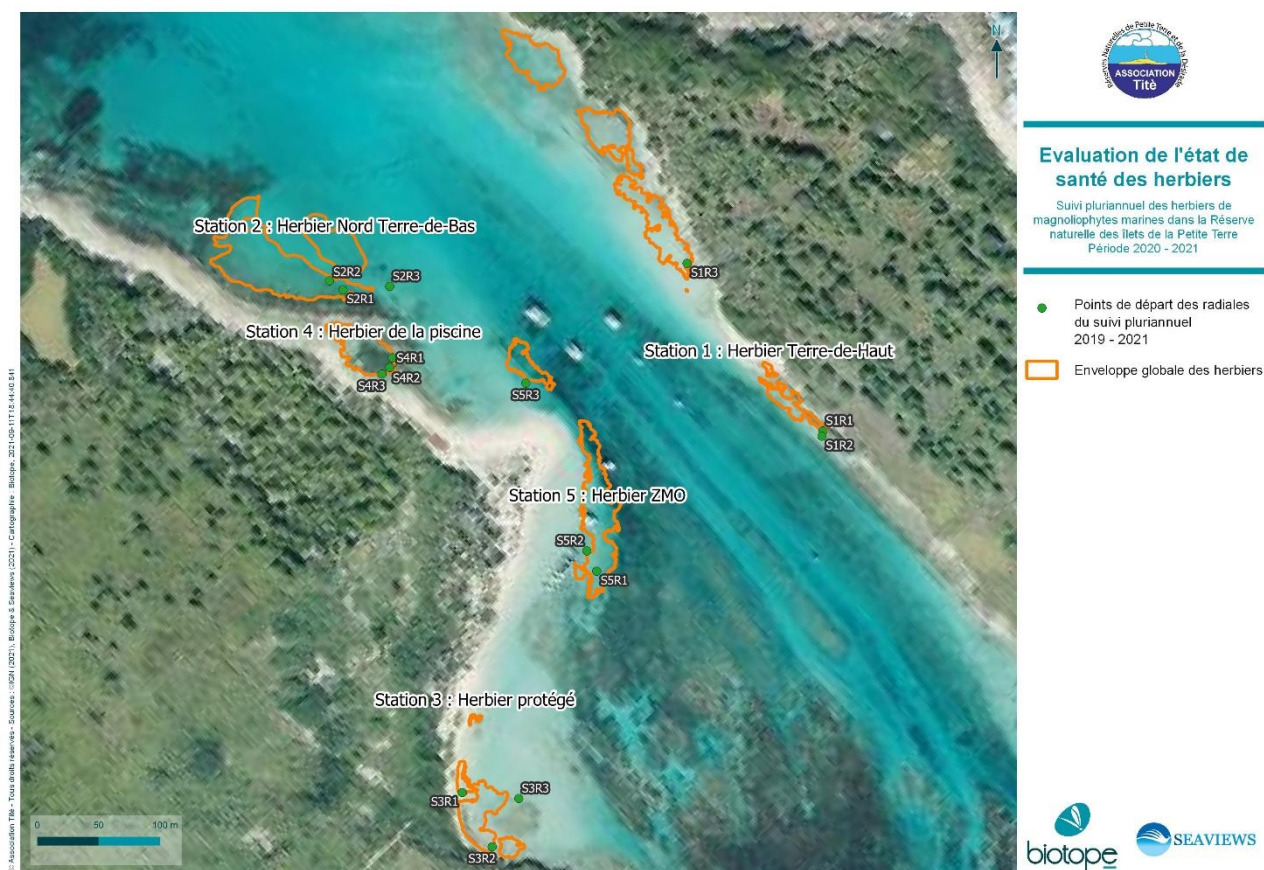


Figure 4: carte de localisation des herbiers suivis (stations) et du point de départ des 3 radiales au sein de chacun des herbiers. Le tableau ci-dessous indique les coordonnées GPS des points de départ des différentes radiales d'étude de l'état de santé des herbiers, ainsi que le cap à suivre pour dérouler le pentamètre (où SXXR = Station n°X, Radiale n°X).

Tableau 1 : Coordonnées des points de départ et cap à suivre pour les radiales d'étude de l'état de santé des herbiers

Code station	X	Y	Cap	Code station	X	Y	Cap
S1R1	-61,1094	16,1761	270°	S3R3	-61,1089	16,1726	240°
S1R2	-61,1094	16,1760	270°	S4R1	-61,1120	16,1741	270°
S1R3	-61,1110	16,1762	300°	S4R2	-61,1120	16,1741	270°
S2R1	-61,1127	16,1742	240°	S4R3	-61,1120	16,1740	270°
S2R2	-61,1128	16,1742	240°	S5R1	-61,1098	16,1741	330°
S2R3	-61,1125	16,1745	270°	S5R2	-61,1100	16,1742	330°
S3R1	-61,1093	16,1723	330°	S5R3	-61,1112	16,1747	270°
S3R2	-61,1088	16,1722	300°				

2.1.3 Déroulé des campagnes de 2019 à 2021

Le planning des campagnes des suivis est présenté dans le tableau ci-dessous.

Planning du suivi pluriannuel des herbiers de la RNPT	Année	2019												2020												2021											
	Mois	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09								
	Saison	Humide						Sèche						Humide						Sèche						Humide											
Station 1																																					
Station 2																																					
Station 3																																					
Station 4																																					
Station 5																																					

Figure 5 : Planning des suivis des 5 stations de la Réserve entre 2019 et 2021

L'ensemble des stations ne pouvant être suivi à chaque campagne, celles-ci ont été divisées en 2 groupes de suivi répartis entre les deux saisons : stations 1 et 2 en saison humide (juillet) et stations 3, 4 et 5 en saison sèche (décembre).

2.2 Prospection pour reconnaissance de l'ensemble des zones d'étude

A Petite Terre, les herbiers se développent dans des petits fonds allant de la subsurface immédiate à environ 4 mètres de profondeurs.

Les zones d'étude 1 et 2 totalisent 160 ha de surfaces à prospecter :

- Là où la navigation est possible, des transects à la vidéo tractée (caméra filaire avec retour écran en surface) sont réalisés ainsi que des transects par un plongeur tracté à l'arrière du bateau (méthode « Manta tow »).
- Là où la navigation n'est pas possible, dans les tous petits fonds, des transects en palmes-masque-tuba sont effectués.

L'ensemble des 2 zones d'étude est couvert afin de détecter la présence d'herbier et d'effectuer un inventaire exhaustif. Une fois un herbier repéré (du petit patch à une plus vaste prairie), son centre est géoréférencé.

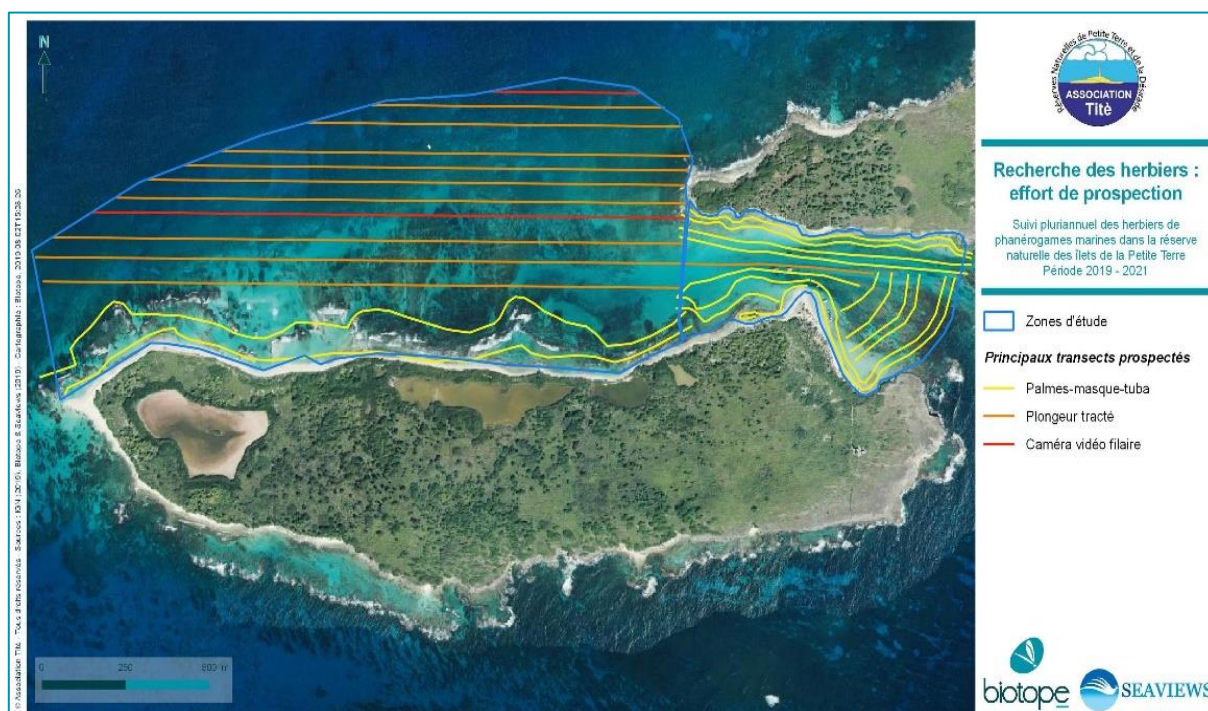


Figure 6: effort de prospection réalisé dans les zones d'études 1 et 2

2.3 Cartographie des herbiers

2.3.1 Cartographie sur le terrain

2.3.1.1 Principe général

Au vu de la très faible profondeur à laquelle se situent les herbiers de la Réserve et le faible relief de leur canopée, les méthodes classiques de cartographie sous-marine (acoustique, photographies aériennes) sont inefficaces. Il est donc nécessaire d'utiliser des moyens permettant de se déplacer librement, même dans des fonds de quelques décimètres de profondeur, et de pouvoir acquérir des données géoréférencées de la limite des herbiers pour en obtenir une cartographie précise (en termes de positionnement) et avec une haute résolution. Dans cette optique, deux techniques reposant sur l'utilisation d'une plateforme flottante dirigée par un nageur de surface ont été employées :

- L'une consistant à suivre la limite des herbiers situés à une profondeur inférieure à 2m avec la plateforme pour obtenir leur position précise ;
- L'autre reposant sur la photogrammétrie géoréférencée pour générer *in fine* une mosaïque photo géoréférencée de la limite dans les zones d'une profondeur supérieure à 2 m (Abadie *et al.* 2018).

2.3.1.2 Matériel

Un matériel adapté est donc utilisé, au travers d'une plateforme flottante « PHOTOCÉAN » développée par SEAVIEWS afin de réaliser des prises de vue subaquatiques géoréférencées depuis la surface. Dans ce but, elle est composée :

- D'un système flottant léger et compact permettant de la déployer depuis le bord et de la transporter facilement ;
- D'un GNSS RTK¹ North (précision centimétrique), de son antenne et de sa batterie permettant plusieurs heures d'acquisition sans charge ;
- D'une tablette étanche Caterpillar T20 disposant d'un GPS intégré. Cette tablette permet de naviguer grâce au logiciel ViewMap ;
- D'un appareil photo haute définition (24 Megapixels) Sony A6000 avec un objectif Sony 10-18 mm (grand angle) dans un caisson Ikelite monté sur un support rigide ;
- Un second appareil photo Canon M50 avec un objectif Canon EF-M 11-22 mm en caisson Ikelite est monté en parallèle afin d'augmenter la surface cartographiée.

Les appareils photo et le GNSS RTK sont synchronisés afin de fournir une position précise à chaque photographie. Les deux appareils ont été utilisés au cours des deux premières campagnes (juillet et décembre 2019). Un seul appareil (le Sony) a ensuite été employé pour le reste des campagnes dans le but de simplifier la manipulation du matériel mais en gardant une couverture de capture suffisante.

¹Global Navigation Satellite System : Système de positionnement par satellite utilisant l'ensemble des constellations satellitaires (GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILÉO) avec correction en temps réel (RTK : real time kinetic).

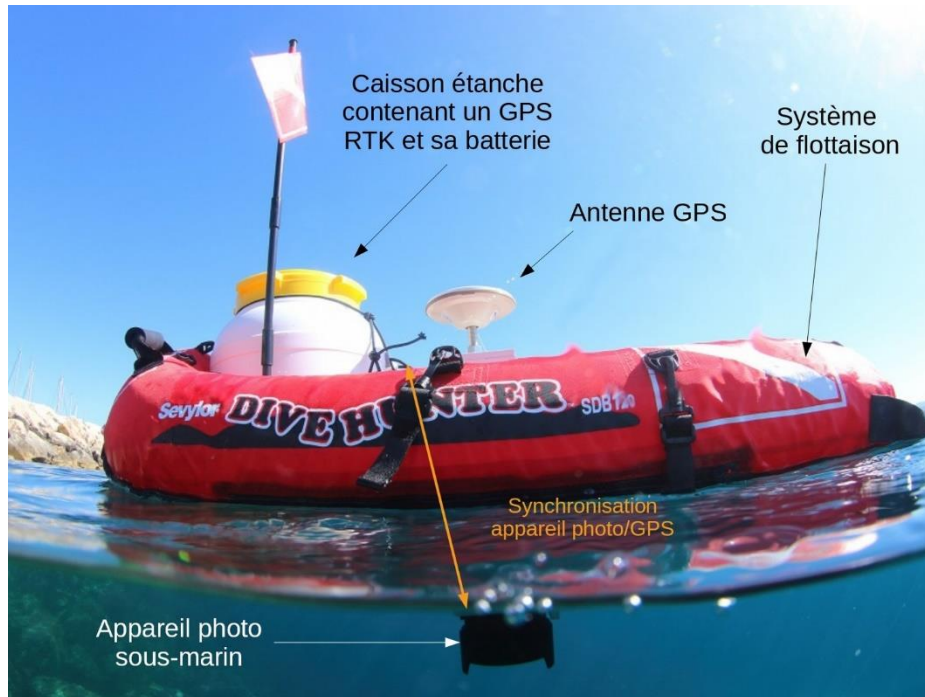


Figure 7: plateforme de photogrammétrie sous-marine géoréférencée PHOTOCEAN de Seaviews

2.3.1.3 Positionnement de la limite des herbiers

Le positionnement de la limite des herbiers de la réserve est réalisé en déplaçant la plateforme PHOTOCEAN en surface à la verticale de la bordure des aires occupées par les plantes marines. A noter que la position de la limite est parfois difficilement identifiable du fait de « faisceaux » étroits de colonisation s'éloignant de l'herbier principal. Pour pallier cette incertitude, ces faisceaux de colonisation n'ont pas été pris en compte lors de la délimitation des herbiers. La précision de positionnement de la limite des herbiers est centimétrique (estimée à environ 5 cm) grâce à l'utilisation d'un GNSS RTK sur la plateforme (rover) et au positionnement d'une base fixe enregistrant sa propre position en permanence durant la totalité de l'acquisition des données. La fréquence d'acquisition de la position de la plateforme est d'un point de coordonnées par seconde. Des photographies géoréférencées sont également acquises toute au long du suivi de la limite avec la plateforme afin d'établir la composition spécifique.

2.3.1.4 Photogrammétrie sous-marine géoréférencée

Le principe général de la photogrammétrie est illustré sur la figure ci-dessous (Figure 8). Une succession d'images prises avec un fort taux de recouvrement (idéalement 80 %) permettent de reconstituer un objet 3D à partir des points de correspondance identifiés sur chaque photo. Le positionnement des caméras dans l'espace est défini (angle de prise de vue des images), et résolvant une succession d'équations à multiples inconnues. Ce positionnement permet ensuite d'obtenir un nuage de points de correspondance en trois dimensions. À partir de ce nuage de points, un objet 3D de l'objet photographié est créé en générant des facettes (polygones). Enfin, l'objet 3D est texturé en utilisant les photos permettant ainsi d'obtenir un rendu réaliste à haute définition en couleur du sujet.

En photogrammétrie sous-marine, les photos sont la plupart du temps prises en plongée pour réaliser des clichés sous différents angles afin de modéliser avec précision la scène photographiée. Le géoréférencement de ces modèles est cependant très difficile et peu précis, car classiquement soumis à l'utilisation de systèmes de positionnement situés en surface et déportés du système de prises de vues.

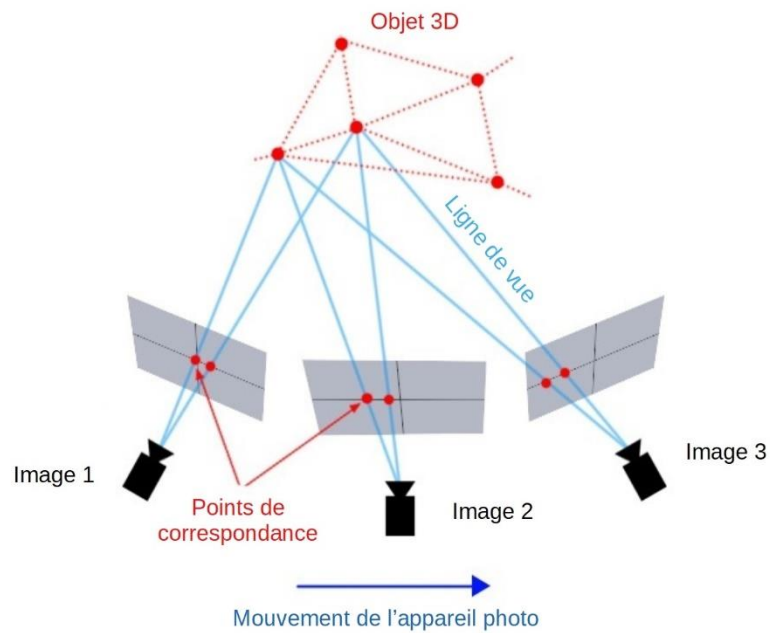


Figure 8: Principe général de la photogrammétrie

Pour corriger ce problème, Seaviews a développé des méthodes de photogrammétrie sous-marine géoréférencée. Le géoréférencement est réalisé en positionnant directement les photographies depuis la surface.

L'acquisition des données photogrammétriques et de positionnement a eu lieu en juillet 2019, décembre 2019, juillet 2020, décembre 2020 et juillet 2021, à chaque fois sur la totalité des surfaces couvertes par les herbiers dans la réserve.

Les données de géoréférencement du GNSS RTK ont été post-traitées à l'aide du logiciel RTKLIB afin de corriger d'éventuelles erreurs de positionnement. Les photos et les coordonnées GPS ont ensuite été synchronisées dans le logiciel ViewMap (développé par Seaviews) pour qu'à chaque photo corresponde une coordonnée géographique. Ces données de géoréférencement sont « écrites » dans les EXIF de chaque photographie toujours en utilisant ViewMap.

Les photographies géoréférencées ont été importées dans le logiciel Metashape Pro d'Agisoft pour réaliser l'ensemble des traitements photogrammétriques. Un nuage de point a été généré dans un premier temps à partir des points remarquables et des points de liaison identifiés par le logiciel (Figure 9). À partir de ce nuage de point a été créé un modèle numérique de terrain (MNT). Enfin, une mosaïque d'orthophotographies est produite en utilisant le MNT. Elle est ensuite exportée en plusieurs morceaux au format PNG en utilisant la projection UTM 20 Nord vers le SIG ViewMap.

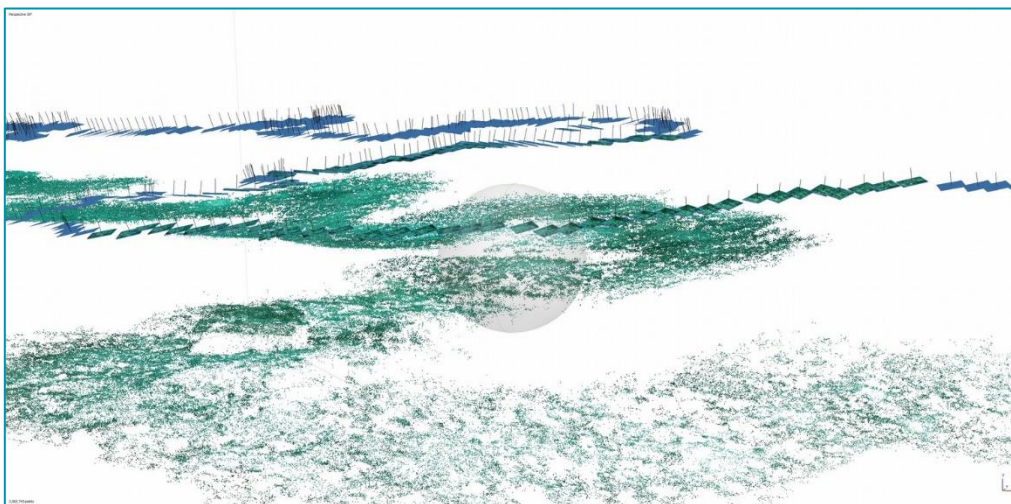


Figure 9: nuage des points de liaison de chaque photo géoréférencée dans Metashape Pro

2.3.2 Analyse des données cartographiques

2.3.2.1 Délimitation des herbiers

Chaque photo sous-marine géoréférencée est automatiquement attribuée à des coordonnées géographiques dans le logiciel ViewMap. La délimitation des herbiers à très faible profondeur est réalisée toujours dans ViewMap en transformant les données GPS en lignes puis en polygones.

Pour les zones où des orthophotographies sous-marines sont disponibles, ces dernières sont importées dans ViewMap où la limite des herbiers est clairement identifiée et dessinée manuellement grâce à la résolution centimétrique de la mosaïque photo.

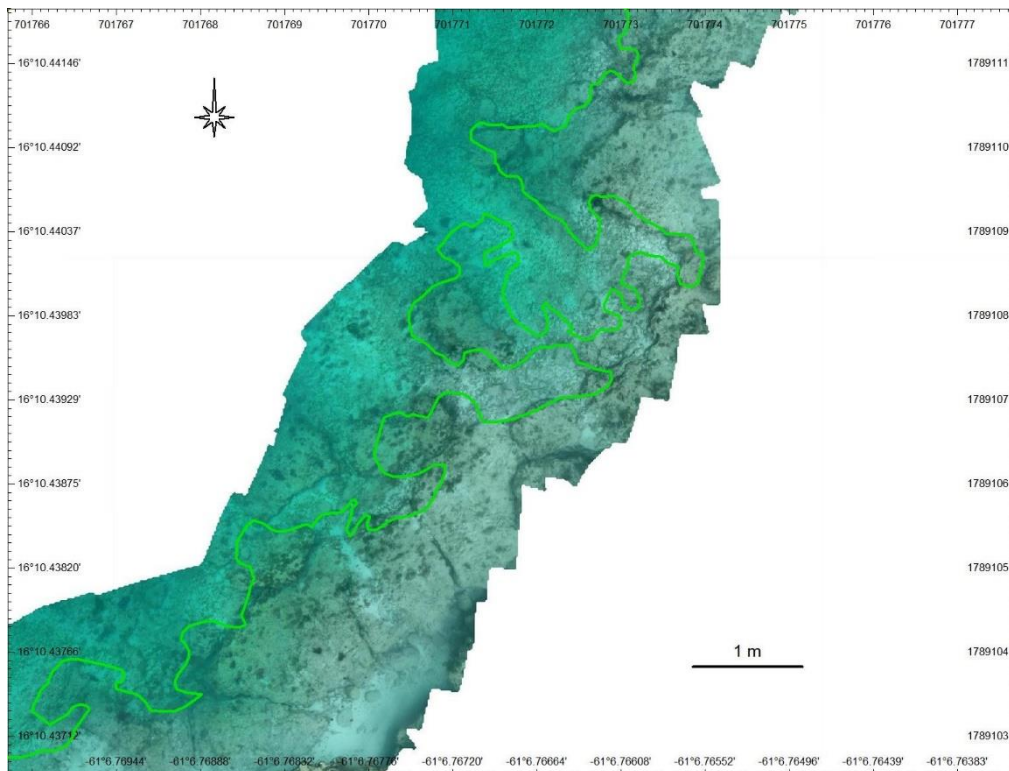


Figure 10: illustration de la segmentation de la limite des herbiers (en vert) à partir des orthophotographies

Une fois tous les polygones d'herbiers obtenus dans ViewMap, ils sont exportés au format kml pour être exploités dans le SIG QGIS.

2.3.2.2 Analyse de l'évolution spatiale des herbiers

L'évolution spatiale des herbiers est analysée de deux façons :

- Une étude quantitative pour mettre en lumière les changements de surface entre deux campagnes de mesure. Les surfaces sont calculées dans QGIS puis exportées dans un tableur afin d'obtenir des graphiques de leur évolution. Dans cette analyse les herbiers sont regroupés en sous-zones en fonction de leur emplacement géographique et/ou des espèces qui les composent.
- Une étude morphologique et spatiale pour mettre en évidence sur une carte la régression et la colonisation des herbiers. Cette étude concerne chaque polygone d'herbier et est réalisée dans QGIS. Des outils de géotraitement des vecteurs (intersection, différence, fusion) sont utilisés de façon successive afin d'obtenir une couche SIG finale présentant les zones de régression, de progression et sans évolution surfacique. Un code couleur intuitif est ensuite appliqué afin de fournir une carte facilement interprétable.

2.4 Caractérisation des herbiers

2.4.1 Evaluation de l'état de santé

Afin de pouvoir mettre en perspectives les données de vitalité des herbiers collectées lors de ce suivi 2019-2021, dans un souci d'homogénéité des protocoles et données collectées, le protocole utilisé est le même que celui utilisé dans pour les suivis de l'état de santé des Réserves Naturelles Marines de Guadeloupe, de Saint-Barthélemy et de Saint-Martin (modifié en 2013 suites aux propositions de C. Hily et validation DEAL).

Les herbiers de magnoliophytes marines sont suivis sur plusieurs stations dans les petits fonds (à -2 m de profondeur environ, car les herbiers de Petite Terre se situent à faible profondeur). Au sein de chaque station, les paramètres sont relevés sur trois radiales (sous-stations) de 50 m.

2.4.1.1 Paramètres globaux

Pour ce suivi, 6 paramètres globaux sont évalués sur l'herbier :

- 1) L'épibiose, qui est estimée sur une bande d'1 m de large sur l'ensemble de la radiale.

Epibiose	Valeur
Pas d'épibiose	0
Algues calcaires	1
Algues filamenteuses	2
Film sédimentaire	3

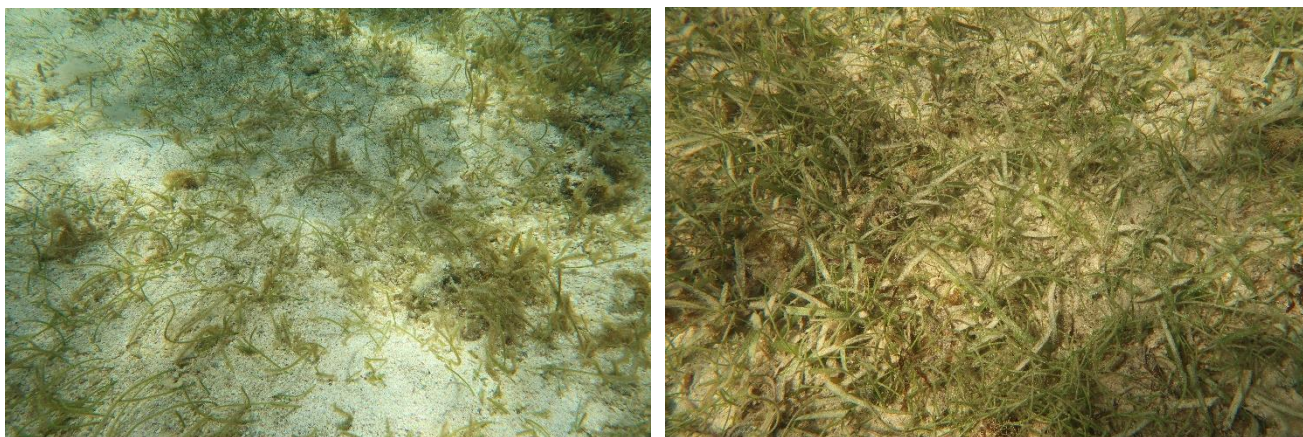


Figure 11 : herbier couvert d'algue filamenteuse (à gauche) et herbier couvrir d'un film sédimentaire (à droite)

2) Le relief général de l'herbier afin de mesurer l'effet de houle et les évènements cycloniques.

Relief	Valeur
Relief faible, dénivelé <15m, herbier quasiment plat, pas de dépression ni de microfalaise	1
Relief moyen, dénivelé 15-50m, dénivelés situés en limites de patch mais autrement l'herbier est plat et continu	2
Relief important, dénivelé >50m, herbier fortement vallonné et/ou comporte des microfalaises franches souvent sur plusieurs niveau	3



Figure 12: limite d'herbier en microfalaise

3) La part de macrophytes non fixés sur des trous de sable.

Macrophytes	Valeur
Pas ou très peu d'algues dérivantes ou de débris de feuilles de magnoliophytes	0
Mélange d'algues dérivantes et de débris de feuilles de magnoliophytes de l'ordre de quelques m ²	1



Figure 13: macroalgues dérivantes sur un herbier à *Halodule wrightii*

- 4) La présence de cyanobactéries (signe de surcharge du milieu en matières organiques, qui se présentent souvent comme des tâches couleur de rouille).

Cyanobactéries	Présence
Pas de cyanobactéries	0
Présence occasionnelle	1
Présence forte	2

- 5) La bioturbation (tumulus et entonnoirs d'au moins 10 cm de diamètre).

Bioturbation	Valeur
Absence de bioturbation, aucun monticule présent	0
Bioturbation moyenne, quelques monticules ou entonnoirs visibles mais très espacés les uns des autres	1
Bioturbation forte, herbier très fortement impacté par les monticules	2

- 6) L'évaluation de l'état de santé de l'herbier.

Etat de l'herbier	Valeur
Très bon état, herbier à <i>T. testudinum</i> monospécifique	1
Bon état, herbier mixte à <i>T. testudinum</i> et <i>S. filiforme</i> avec présence ou non de macroalgues typiques de l'herbier mais en faible abondance	2
Etat moyen, signe d'eutrophisation ou de sédimentation	3
Etat médiocre, herbier avec macroalgues ou envasé, eutrophisation ou hypersédimentation	4
Mauvais état, herbier envahi par les macroalgues ou très envasé	5

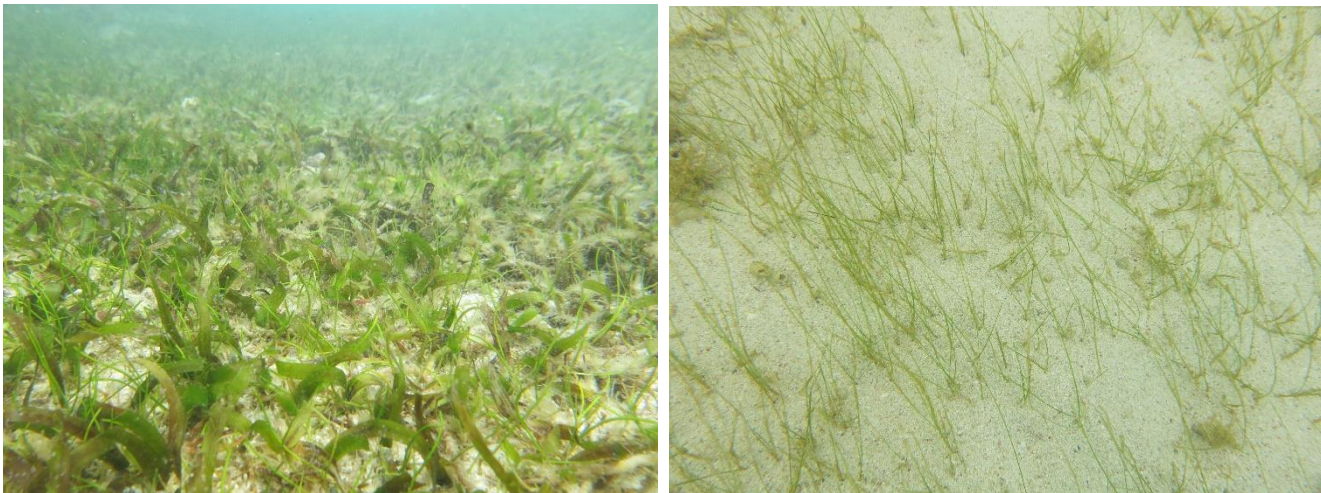


Figure 14: herbier mixte à *Thalassia testudinum* et *Syringodium filiforme* (à gauche) ; herbier monospécifique à *Halodule wrightii* (à droite)

2.4.1.2 Taux de fragmentation et de mitage de l'herbier

Des relevés sont réalisés le long d'un transect LIT (Line Intersect Transect), afin d'obtenir le taux de fragmentation et de mitage de l'herbier.

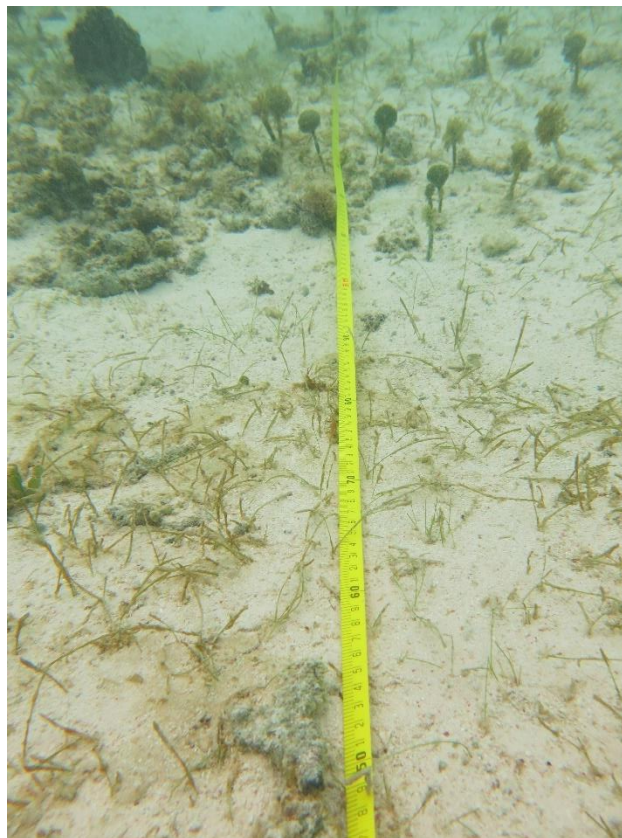


Figure 15: LIT, la nature du substrat et son étendue sont répertoriées le long d'un transect de 50 m

La fragmentation exprime le pourcentage de substrat nu (**zones de largeur > 2 mètres**) sur la radiale de 50 m.

Cette valeur à dire d'expert, est retenue non seulement parce qu'elle est cartographiable à des échelles de travail intéressant les gestionnaires, mais aussi parce qu'elle est cohérente au niveau fonctionnel. En effet, une surface minimum de 4 m² est théoriquement suffisante pour que s'y développe une biocénose spécifique différente de celle de l'herbier avec des effets de lisière et que la stabilité temporelle y soit au moins égale à un an dans la plus grande majorité des cas, compte tenu de la croissance végétative des espèces de magnoliophytes (comm. pers C. Hily) (Kerninon, 2012).

L'herbier peut être structuré en un certain nombre de patches de formes et surfaces variées, et la surface végétalisée peut également comporter des petites surfaces de substrat nu (zones de largeur >50 cm et <2 m) liées à des micro-aléas comme la bioturbation qui parfois peut être importante lorsque l'endofaune est abondante. On peut caractériser cette « micro-fragmentation » en parlant de « mitage » au sein des zones végétalisées (Kerninon, 2012 ; Hily & Kerninon, 2013).

Cette structuration des herbiers résulte de processus naturels (sédiment, herbivorie, croissance herbier) et/ou anthropiques, agissant à des échelles variées. Une fragmentation élevée pourra donc être le signe d'une perturbation localisée ou diffuse dans le site. Elle pourra aussi résulter d'activités biogéniques, telle que la bioturbation recouvrant les faisceaux de feuilles par des sédiments (Kerninon, 2012).

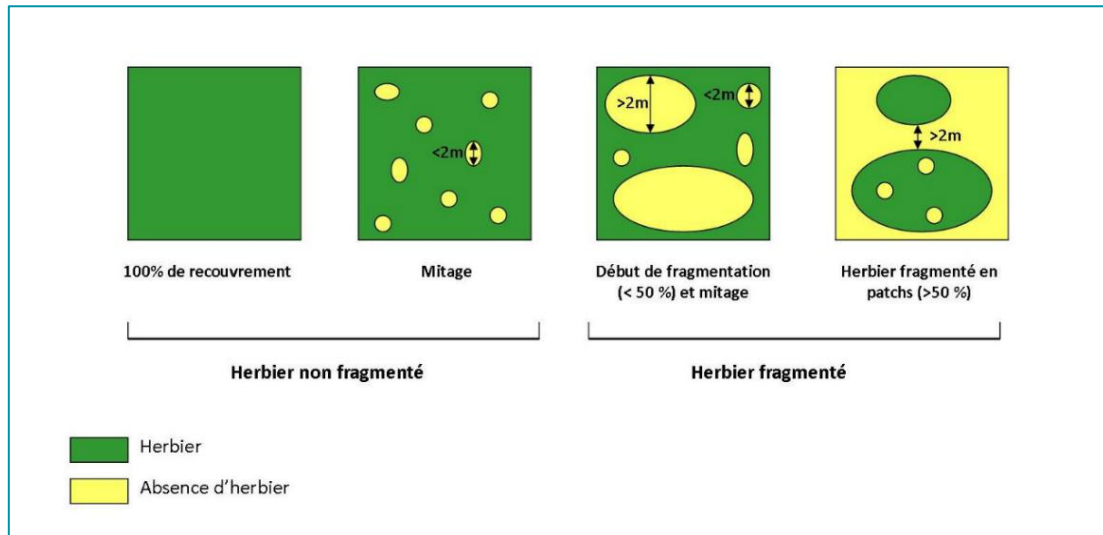


Figure 16: les étapes de fragmentation d'un herbier (Kerninon, 2012)

Des indications sur la dynamique (progression, érosion, régression) de l'herbier sont également relevés. Le long de chaque radiale, le plongeur évolue pour relever les points de rupture herbier vs. sable nu (intermattes de plus de 50 cm uniquement). Sur chaque point de rupture est noté : la présence de falaise (racines apparentes, signe d'érosion) ou la progression (limite d'herbier avec rhizomes dépassant significativement de l'enveloppe globale de l'herbier) ou la stabilité (absence de signe d'érosion ou de progression).

2.4.1.3 Densité de faisceaux

Au sein de chacune des trois radiales, 10 quadrats de 10 x 20 cm sont aléatoirement disposés (tous les 5 m, aléatoirement à droite ou à gauche de la radiale). Pour chaque espèce de magnoliophyte présente au sein des quadrats (*Thalassia testudinum* et *Syringodium filiforme* plus *Halodule wrightii*), deux paramètres sont relevés : la densité et la longueur des feuilles.

- La densité est estimée par le dénombrement du nombre de faisceaux foliaires par quadrat.
- La longueur de 10 feuilles les plus longues de plants pris au hasard (mais non « broutés ») et appartenant à des plants différents (1 feuille par plant) est mesurée depuis leur base jusqu'à leur extrémité, pour chaque radiale. Les plants mesurés sont répartis dans au moins 3 quadrats sur la radiale. La présence de signes de broutage de l'herbier est notée (dans le cas où pratiquement toutes les extrémités des feuilles sont cassées/broutées, la valeur de la longueur du faisceau sera complétée par la mention « C »).



Figure 17: plongeur réalisant le dénombrement de faisceaux foliaires dans un quadrat de 10x20 cm

Pour les mesures de LIT, la densité des faisceaux foliaires et la longueur des feuilles, il a été choisi de mesurer indifféremment les paramètres de *S. filiforme* et *H. wrightii*. Cela s'explique par le fait que ces deux espèces représentent les stades de développement antérieurs au stade climacique représenté par un herbier monospécifique à *T. testudinum*. Les deux espèces *S. filiforme* et *H. wrightii* sont très souvent entremêlées. Uniquement *S. filiforme* est considérée dans les études précédentes, cependant étant donné le fort recouvrement d'*H. wrightii* par endroits, l'espèce a également été prise en compte. La catégorie incluant ces deux espèces représente ainsi le stade de développement de l'herbier non climacique. Les données issues de l'analyse CPCe (voir 2.4.2 Classification des herbiers), permettront de nuancer le recouvrement de chacune des espèces et les éventuelles dominances.

2.4.1.4 Paramètres complémentaires

De manière à compléter les connaissances, des paramètres complémentaires sont relevés.

- La mégafaune associée à l'herbier est prospectée le long de la radiale (1 m de part et d'autre), correspondant à certains invertébrés : nombre d'oursins, de nacres, d'étoiles de mer et de lambis sur 2 mètres de large (couloir de comptage).



Figure 18: oursin blanc (*Tripneustes ventricosus*) sur un herbier à *Thalassia testudinum*

- Les caractéristiques du substrat « dans » et « hors » herbier. Le plongeur prélève une ou quelques poignées de sédiment et le laisse se redéposer sur le fond. Une valeur d'indice est donnée pour toute une radiale d'herbier et une autre pour le sédiment nu adjacent.

Tableau 2 : Catégories du substrat

Caractéristique du substrat	Valeur
Vase (le point fermé s'enfonce facilement dans le sédiment)	1
Sable fin vaseux (nuage turbide lorsque le sable se dépose mais le poing fermé ne pénètre quasiment pas)	2
Sable fin propre (pas de nuage turbide)	3
Sable grossier propre (grain de l'ordre de 1 à 5 mm), typiquement fragments et articles d'algues calcaires	4
Macrodébris coralliens ou graviers/cailloutis (ordre du cm ou plus)	5



Figure 19: sable grossier propre (à gauche) ; macro-débris coralliens (à droite)

2.4.2 Classification des herbiers

Une classification est proposée afin de caractériser de manière différenciée chaque herbier, classification qui repose sur la composition de l'herbier :

- Monospécifique ;
- Mixte à deux espèces ;
- Mixte à trois espèces ;
- Mixte à quatre espèces.

Cette classification permettra également de faire ressortir les relations de domination ou de codominance entre les espèces présentes au sein des herbiers mixtes (par exemple, mixte à deux espèces dont une majoritaire, mixte à deux espèces avec codominance ou mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire). Cette relation de dominance ou d'équilibre entre les espèces sera évaluée au sein de 3 grands quadrats photographiques de 1m² (1 quadrat par radiale, soit 3 par station), via une analyse en « point-count » (logiciel CPCe avec liste d'espèces adaptée) et via un seuil de décision en pourcentage du nombre de points du « point-count » attribués à chaque espèce sur le quadrat. Ainsi, 270 points seront répartis aléatoirement au sein du quadrat via le logiciel CPCe (soit 30 points pour chacun des 9 sous quadrats qui compose le quadrat d'1m²).

Les pourcentages attribués seront relatifs, c'est-à-dire que si un point indique du substrat meuble par exemple, l'espèce de phanérogame la plus proche sera comptabilisée et non le substrat meuble. Les pourcentages sont donc basés sur un recouvrement théorique de 100% de magnoliophytes.

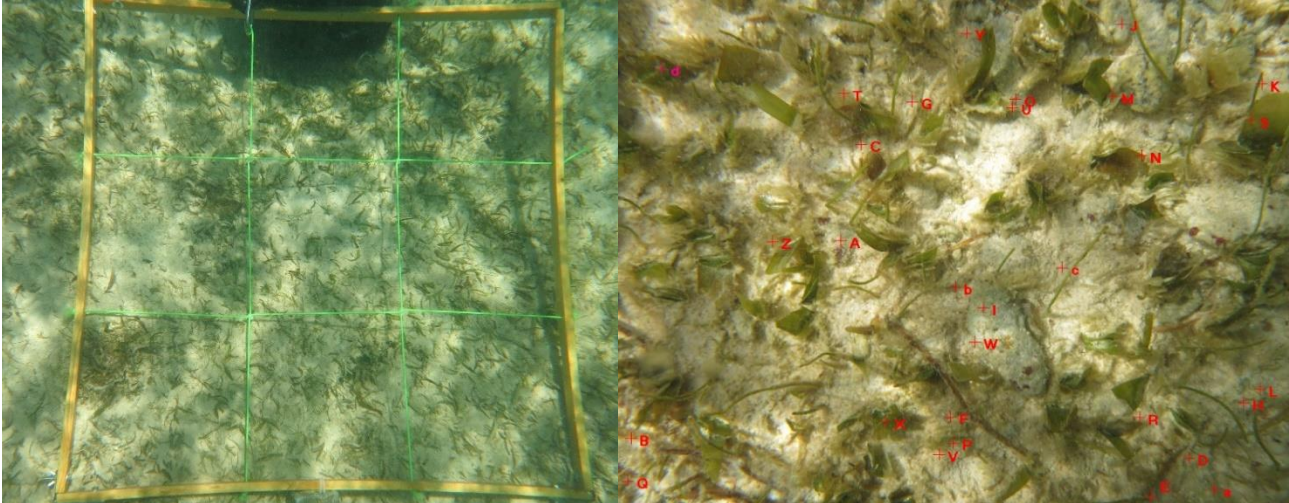


Figure 20: quadrat d'1m² divisé en 9 sous-quadrats ; 30 points placés aléatoirement sur un sous-quadrat par le logiciel CPCe

L'ensemble de ces données permettront de statuer et de suivre l'état de santé des herbiers de la Réserve Naturelle de Petite Terre.

3 Résultats, interprétations et perspectives

Ce suivi propose donc des résultats sur les **3 composantes** de l'étude, à savoir :

- La prospection de la zone d'étude, et l'identification/localisation des herbiers dans la réserve,
- La cartographie des herbiers,
- La classification des herbiers.

3.1 Prospection de la zone d'étude

Les résultats de la prospection ont montré :

- La présence d'herbiers de magnoliophytes uniquement dans la zone 1 (cf. Figure 21).
- L'absence d'herbier dans la zone 2.

3.2 Cartographie des herbiers

Pour les suivis de cette étude, la cartographie des herbiers doit ainsi permettre de fournir les résultats suivants :

- Une délimitation des herbiers avec cartographie précise,
- Une évaluation des surfaces des herbiers cartographiés,
- Une évolution morphologique des herbiers cartographiés.

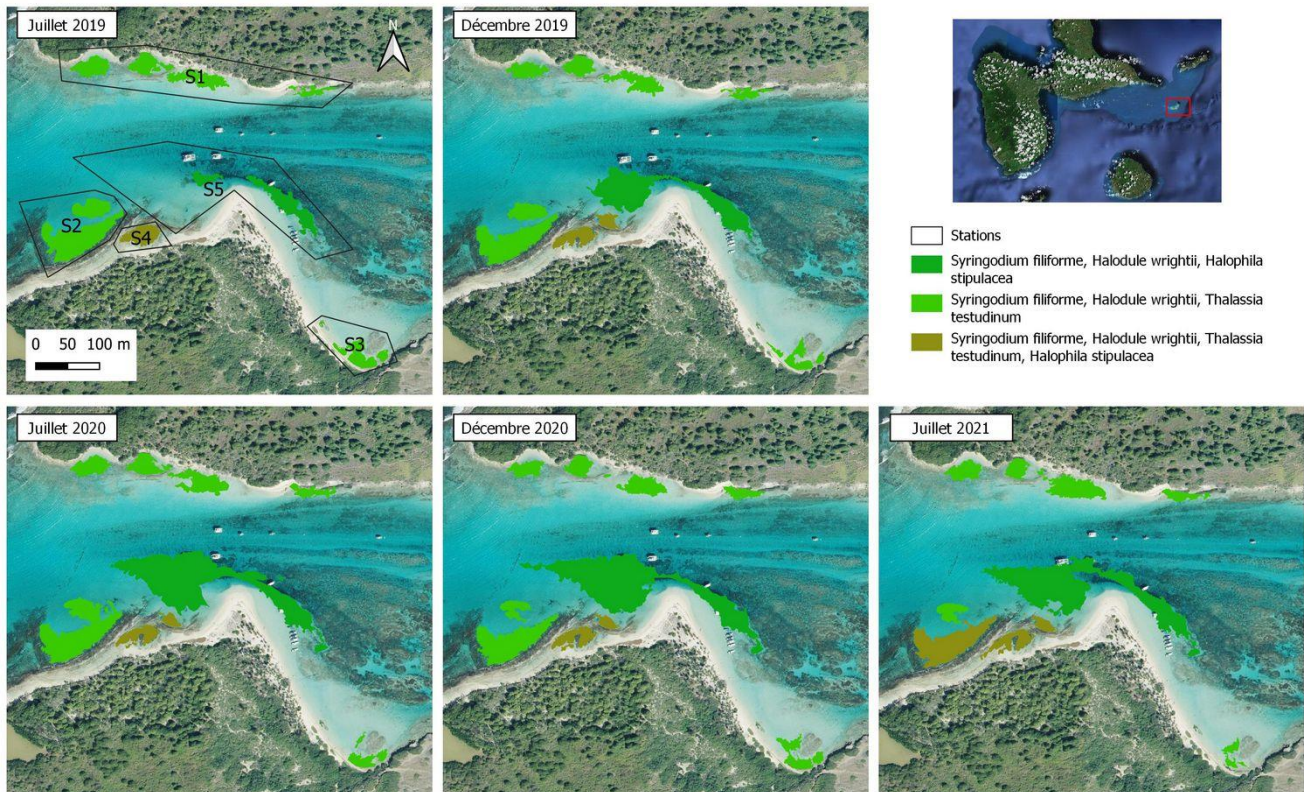
3.2.1 Délimitation des herbiers

Tous les herbiers cartographiés sont plurispécifiques et sont composés de la façon suivante suivantes :

- *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *Halophila stipulacea* ;
- *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *Thalassia testudinum* ;
- *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *Thalassia testudinum*, *Halophila stipulacea*.

La cartographie des herbiers montre que ces derniers se répartissent de part et d'autre de la passe située entre Terre-de-Bas et Terre-de-Haut dans les zones où le courant est moins fort. Les herbiers de *Thalassia testudinum* colonisent les zones peu profondes à l'abri du courant tandis que *Syringodium filiforme* et *Halodule wrightii* colonisent des zones plus exposées à proximité de *T. testudinum* voire sur la matte formée par cette dernière. *Halophila stipulacea* se développe dans la zone centrale la plus exposée au courant de la passe, ainsi que dans la zone close cerclée par les récifs coralliens appelée « la Piscine ». Dans ces deux zones, *H. stipulacea* côtoie *S. filiforme* et *H. wrightii*, ainsi que *T. testudinum* dans la zone dite de la « Piscine ».

La morphologie de la limite des herbiers semble indiquer une colonisation principalement influencée par le relief et les mouvements d'eau (courants, houle). Elle change peu d'aspect au cours des cinq campagnes de mesure. L'évolution de la morphologie de la limite montre cependant que les phénomènes de régression se produisent en bordure des herbiers.



Source des données :
 Orthophoto : IGN, BD ORtho 2016
 Limites d'herbiers : Biotope/Seaviews, Suivi pluriannuel des herbiers de magnoliophytes marines dans la réserve naturelle des îlets de la Petite Terre – Période 2019 - 2021, Contrat Biotope/Seaviews/Association Tité.



Figure 21: cartographie de la limite des herbiers de magnoliophytes marines lors des cinq campagnes de mesure

3.2.2 Évaluation surfacique

La surface totale occupée par les herbiers au cours de l'étude montre une tendance globale à l'augmentation : 16 118 m² en juillet 2019, 20 540 m² en décembre 2019, 26 827 m² en juillet 2020 et 25 905 m² en décembre 2020 (Figure 22). Une stagnation a été constatée en juillet 2021 (24 874 m²). Cette dynamique semble principalement due à la forte colonisation de *H. stipulacea*. En effet, entre juillet 2019 et juillet 2020 (trois campagnes) lorsque l'herbier principal qu'elle constitue est pris en compte la surface totale d'herbiers dans la réserve augmente d'environ 24 % (en considérant que c'est la station 5 qui contribue principalement à la couverture par *Halophila stipulacea* des herbiers de la réserve, même si l'espèce est présente ponctuellement sur d'autres stations). Alors que lorsque la station 5 est écartée du calcul, l'augmentation de la surface des herbiers n'est plus que d'environ 8 % sur la même période (Tableau 3). Entre les deux campagnes de 2020 (juillet 2020 et décembre 2020), une réduction globale de 7,7 % de la surface couverte par l'ensemble des herbiers (incluant *H. stipulacea*) est observée alors qu'elle n'est que de 0,2 % entre décembre 2020 et juillet 2021. Lorsque l'on exclut les herbiers comprenant *H. stipulacea*, cette réduction de couverture s'élève à -21,5 %. En revanche, une progression de 10,3 % a été constatée entre décembre 2020 et juillet 2021 pour les herbiers sans *H. stipulacea* (Tableau 3).

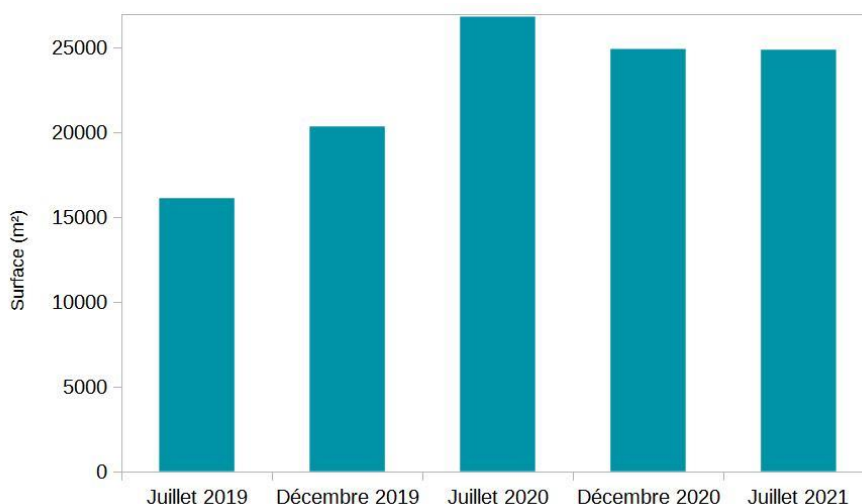


Figure 22: Evolution surfacique totale des herbiers à magnoliophytes marines au cours des cinq campagnes de mesure.

La colonisation du substrat par *H. stipulacea* est donc le principal acteur de la dynamique surfacique des herbiers pris dans leur ensemble au sein de la Réserve. Les herbiers composés d'espèces indigènes ont quant à eux une surface qui reste stable à l'exception de l'herbier dans la zone protégée. Ce dernier, après une relative période de stagnation sur l'année 2019, montre une tendance nette à la diminution de la surface qu'il couvre entre décembre 2019 et juillet 2021 en passant d'une surface de 2 017 m² à une aire de 572 m² (Tableau 3 ; Figure 23). Au vu des observations de terrain, cette diminution surfacique semble être due à un ensablement naturel en lien avec la dynamique des courants de la zone.

Tableau 3 : Evolution surfacique des herbiers à magnoliophytes marines entre juillet 2019 et juillet 2021.

	Surface (m ²)				
	Juillet 2019	Décembre 2019	Juillet 2020	Décembre 2020	Juillet 2021
Station 1	4687	4628	5343	3329	5213
Station 2	5464	4527	6003	5091	5284
Station 3	1626	2017	983	1424	572
Station 4	1340	1268	1208	1295	1344
Station 5	3006	7910	13294	13783	12461
Total	16123	20350	26831	24922	24874
Evolution (%)	0	20,8	24,2	-7,7	-0,2
Surface sans <i>H. stipulacea</i> = surface des herbiers hors station 5 (m²)	13117	12440	13537	11139	12413
Evolution sans <i>H. stipulacea</i> (%)	0	-5,4	8,1	-21,5	10,3

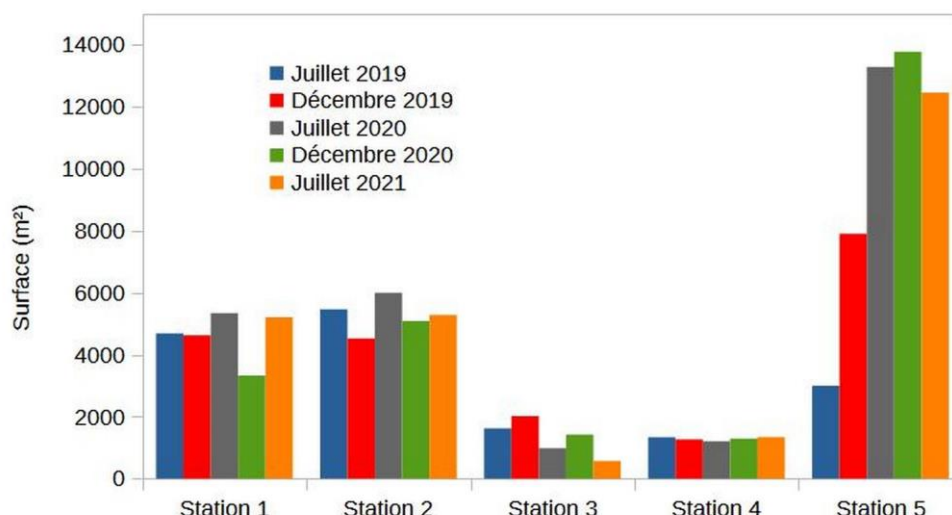


Figure 23: évolution surfacique de la surface couverte par les herbiers pour chaque zone et chaque campagne de mesure

3.2.3 Evolution morphologique

D'une façon globale, les herbiers de la station 1 ne montrent qu'une faible progression (+11,2%) sur toute la durée de l'étude (Tableau 5). De fortes variations sont cependant visibles, montrant des fluctuations saisonnières, avec une progression durant la période sèche et une régression durant la période humide (Tableau 4). Ces variations semblent naturelles et devraient être en lien avec les variations de la puissance du courant dans la passe du lagon. La morphologie des herbiers de la station évolue peu à l'exception de l'herbier central qui montre une forte colonisation dans sa partie Sud (Figure 24).

Un constat similaire est réalisé sur les herbiers de la station 2 avec une évolution globale encore plus limitée (-3,3%, Tableau 5). La morphologie de l'herbier au sud de la station varie très peu du fait des contraintes physiques (barrière rocheuse) de la zone (Figure 24). L'herbier au nord de la station a une évolution morphologique plus complexe avec une forte régression à l'est et une colonisation prononcée à l'ouest (Figure 24). La dynamique de cet herbier est très certainement fortement conditionnée par la variation des courants dans la passe et le transport sédimentaire qui en résulte.

L'herbier de la station 3 montre une forte régression (-64,8%) sur la totalité de la période d'étude (Tableau 5). Cette régression n'est pas homogène d'une campagne à l'autre (Tableau 4) laissant présager d'une variation saisonnière naturelle liée à des transports sédimentaires. D'un point de vue morphologique, la régression s'est déroulée au niveau des zones périphériques de l'herbier ne laissant ainsi que le « cœur » de l'herbier encore intact (Figure 24).

La station 4 se situant dans un lieu totalement fermé, et donc protégé des courants et de la houle, montre peu de variations surfaciques et morphologiques sur la durée de l'étude (+0,3 %, Tableau 5). L'évolution observée d'une campagne à l'autre est également faible (Tableau 4). D'un point de vue morphologique, l'herbier se creuse en son centre, menant probablement dans un futur proche à la formation de deux herbiers distincts (Figure 24). Ce phénomène de « scission » est difficilement explicable grâce aux seules données collectées pendant cette étude.

La plus grande évolution morphologique au cours des cinq campagnes de mesure est observée de la station 5 au niveau de l'herbier central. Constitué de *S. filiforme*, *H. wrightii*, et *H. stipulacea*, sa surface couverte progresse régulièrement vers l'Ouest (Tableau 4 ; Tableau 5). Du fait de la faible hauteur de sa canopée et de sa vitesse de colonisation, *H. stipulacea* ne semble pas impactée par le fort courant de la passe. Le substrat sableux nu à l'ouest est propice à son expansion tandis que les récifs situés au sud-est de la zone forment une barrière naturelle favorisant sa progression.

Tableau 4 : Evolution proportionnelle des herbiers à magnoliophytes marines entre chaque campagne de mesure. En rouge les régressions et en vert les progressions.

	Evolution (%)			
	J19 → D19	D19 → J20	J20 → D20	D20 → J21
Station 1	-1,3	15,4	-37,7	56,6
Station 2	-17,1	32,6	-15,2	3,8
Station 3	24,0	-51,3	44,9	-59,8
Station 4	-5,4	-4,7	7,2	3,8
Station 5	163,1	68,1	3,7	-9,6

Tableau 5 : Evolution proportionnelle des herbiers à magnoliophytes marines par rapport à la première campagne de mesure en juillet 2019. En rouge les régressions et en vert les progressions.

	Evolution (%)			
	J19 → D19	J19 → J20	J19 → D20	J19 → J21
Station 1	-1,3	14,0	-29,0	11,2
Station 2	-17,1	9,9	-6,8	-3,3
Station 3	24,0	-39,5	-12,4	-64,8
Station 4	-5,4	-9,9	-3,4	0,3
Station 5	163,1	342,2	358,5	314,5

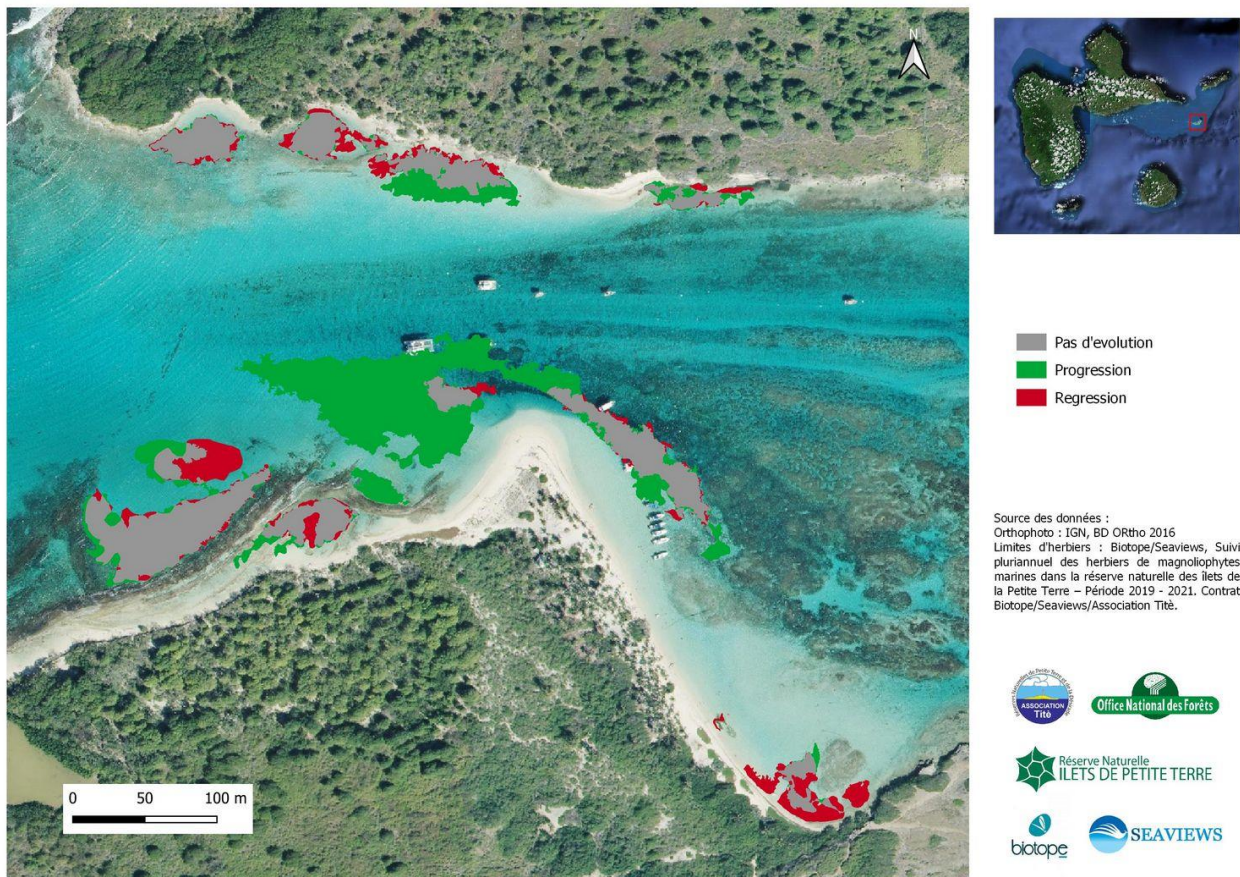


Figure 24 : évolution de la morphologie des herbiers entre juillet 2019 et juillet 2021

3.3 Caractérisation des herbiers

Ce suivi spécifique doit ainsi permettre de :

- Qualifier l'état de santé des herbiers,
- Classifier les types d'herbiers présents dans les zones et stations étudiées.

3.3.1 Evaluation de l'état de santé

3.3.1.1 Station 1

La station 1 est située sur la côte Sud de Terre-de-Haut, dans des fonds allant de 20 cm à 1,50 m de profondeur et subissant le déferlement des vagues. Cette station a été étudiée pendant la saison humide, durant les mois de juillet 2019, 2020 et 2021.

C'est un herbier avec alternance de zones monospécifiques à *Thalassia testudinum* et de zones mixtes à *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* et *Halodule wrightii*.

L'herbier se situe majoritairement sur du sable grossier propre avec des sections de sable fin. Il en est de même pour le substrat alentour. Le relief est faible à moyen, les dénivelés se situent plutôt en limite de patches. L'hydrodynamisme variable et pouvant être assez important est à noter.

Les paramètres globaux de la station indiquent un bon état général de l'herbier avec une amélioration au cours des années pour les radiales 2 et 3. L'herbier ne présente pas de signe de bioturbation, et la présence de cyanobactéries, de macrophytes ou de débris de feuilles de magnoliophytes n'est pas observée. L'herbier est cependant recouvert d'un film sédimentaire sur la majorité des radiales et persistant dans le temps. Ce film sédimentaire est dû au déferlement des vagues qui remettent en suspension la part la plus fine du sédiment.

Tableau 6 : indices des différents paramètres globaux de chacune des trois radiales de la station 1 en 2019, en 2020 et en 2021

	07/2019			07/2020			07/2021		
	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Epibiose	0	3	1	3 (et 2 et 4)	3	0	3	3	3
Relief	1	2	2	2	1	1	1	2	2
Macrophytes non fixées	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Cyanobactéries	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bioturbation	0	1	1	0	1	0	0	0	0
Etat de santé	2	3	3	2	2	2	2	2	2

Tableau 7 : mégafaune associée et type de substrat de la station 1 en 2019, 2020 et 2021

		07/2019			07/2020			07/2021		
		Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Mégafaune associée	Oursin	0	0	1	0	0	1	1	0	0
	Nacre	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	Etoile de mer	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Lambi	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Substrat	Dans l'herbier	4	3	3	4	4	3	4	4	3-4
	Hors herbier	4	4	4	4	4	3	4	4	3-4

La mégafaune associée est globalement pauvre avec une très rare présence d'oursins ou de nacres.

Le recouvrement des herbiers (mesures LIT) indiquent un taux moyen de 81,7% en 2019, de 66,7% en 2020 et de 83% en 2021. Le taux de mitage est très faible, bien qu'en augmentation, ne dépassant pas 2% en 2021. Le taux de fragmentation est le plus élevé en 2020 avec une valeur de 32,6% mais le sédiment nu est à nouveau en partie colonisé en 2021. Ce taux reste globalement moyen à l'échelle des trois années de suivis. Les limites d'herbiers observées au niveau des zones de fragmentation sont très majoritairement en progression.

Les taux de recouvrement spécifique évoluent en revanche fortement avec une diminution de *T. testudinum* en recouvrement monospécifique qui passe de 15,3% en 2019 à 0% en 2021. Le recouvrement mixte de *S. filiforme* et *H. wrightii* prenant progressivement la place de *T. testudinum*.

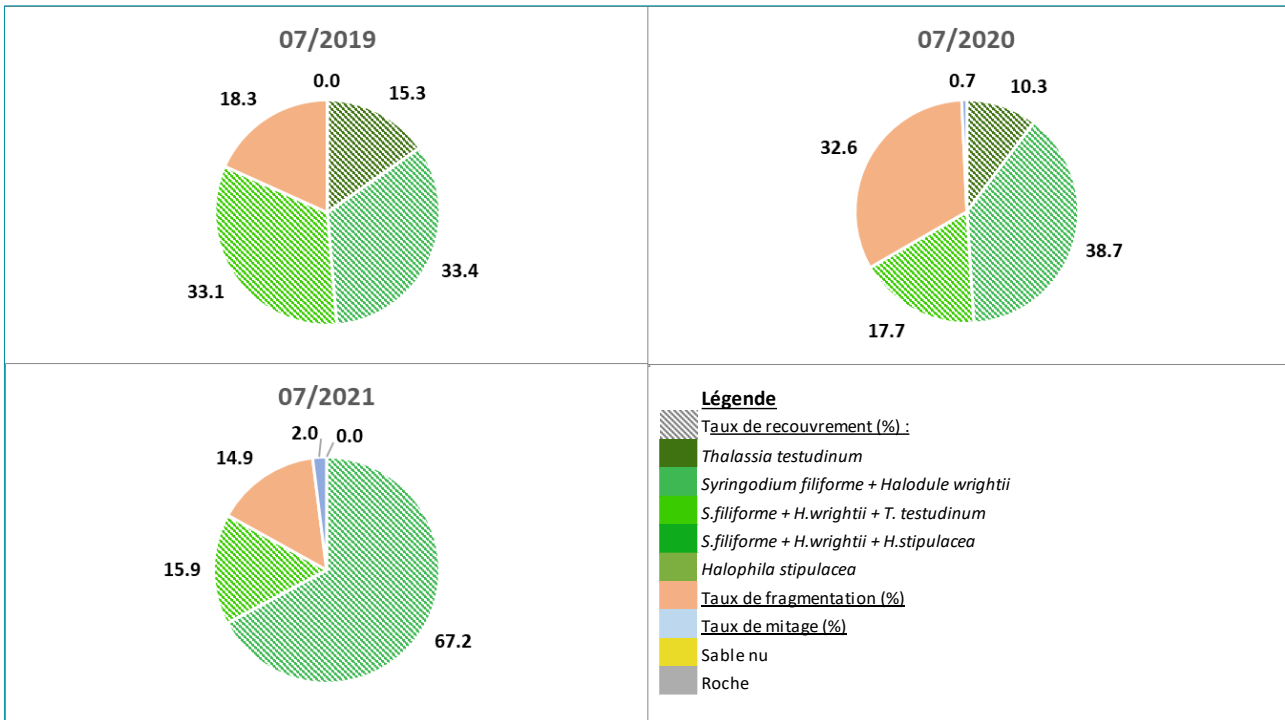


Figure 25 : taux moyens en pourcent de recouvrement, de fragmentation et de mitage de la station 1 en 2019, 2020 et 2021. Les taux moyens de recouvrements sont de 81,7% en 2019, de 66,7% en 2020 et de 83% en 2021.

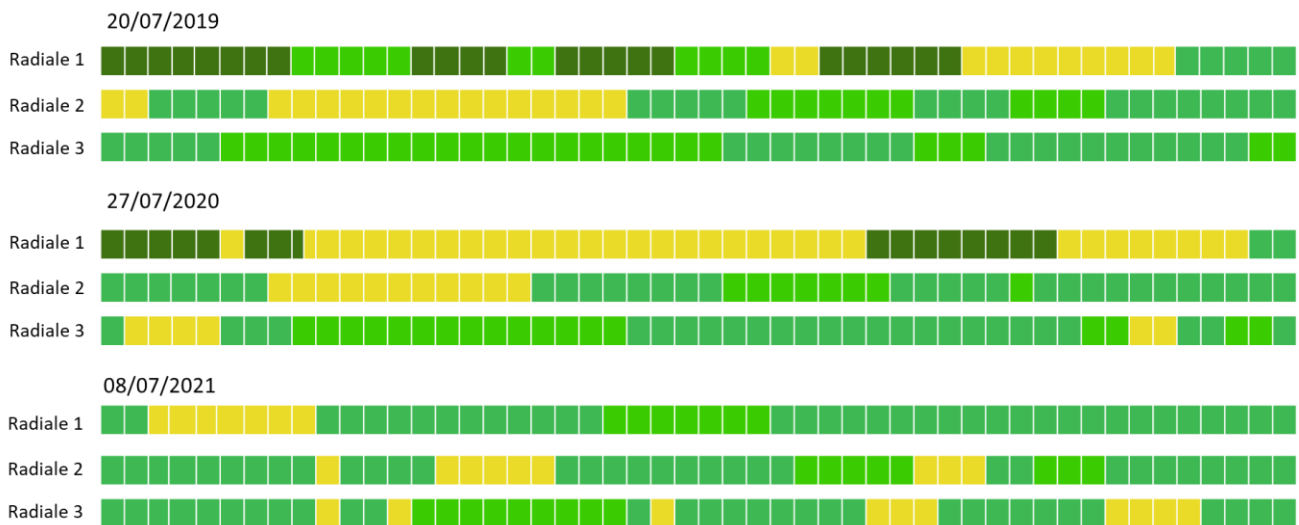


Figure 26 : représentation schématique du recouvrement des 3 radiales de la station 1 en 2019, 2020 et 2021 (1 carré = 1 m). On observe la disparition de *T. testudinum* en recouvrement monospécifique et après une transition de sable nu, son remplacement par un herbier mixte à *S. filiforme* et *H. wrightii* qui colonise également les zones auparavant fragmentées (pour la légende voir Figure 25 ci-dessus).

Le déclin de *Thalassia testudinum* est également mis en évidence par la mesure de densité des faisceaux foliaires. La densité moyenne de *T. testudinum* décroît de 645 faisceaux/m² en 2019 à 223 faisceaux/m² en 2020, pour finalement ne représenter plus que 27 faisceaux/m² en 2021.

A l'inverse, la densité en *Syringodium filiforme* et *Halodule wrightii* augmente au cours des trois années de suivis pour atteindre 2003 faisceaux/m² en 2021.

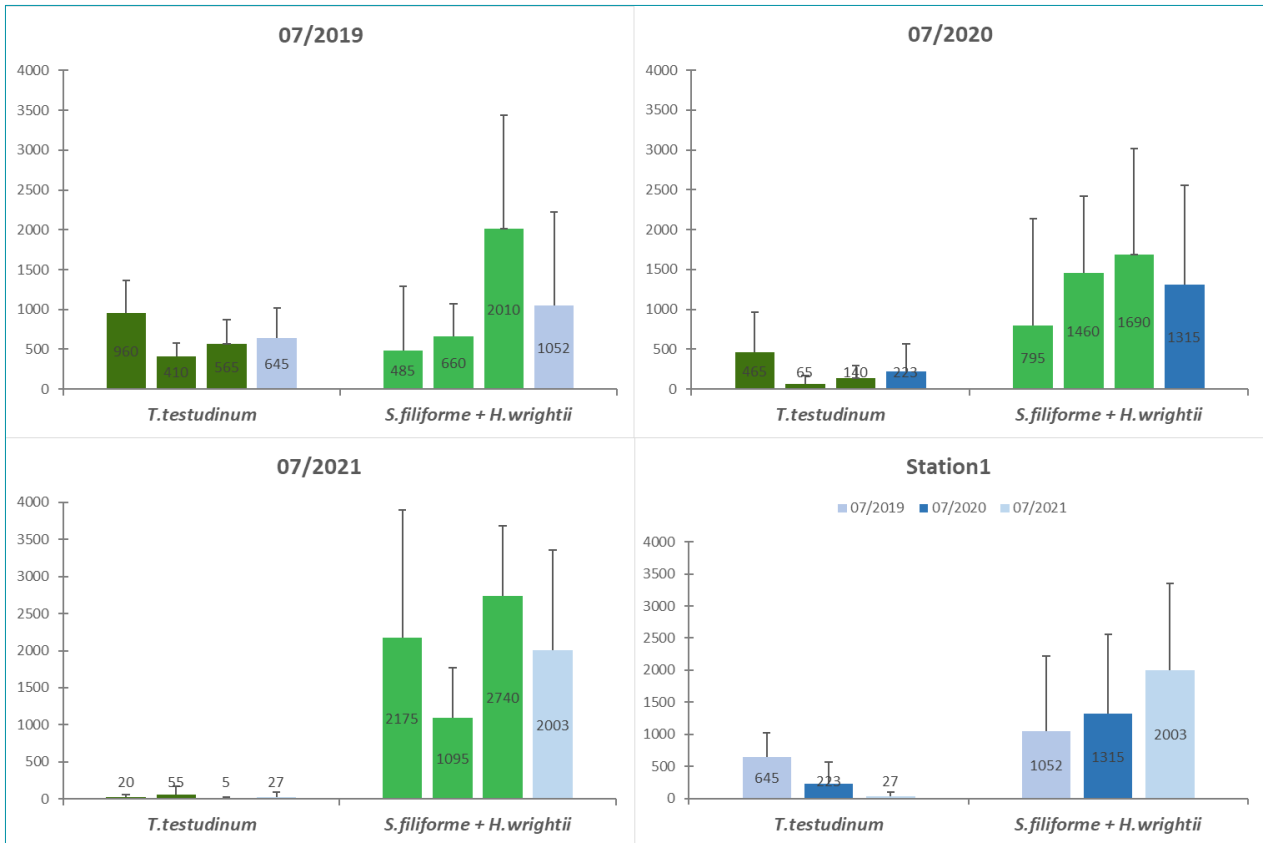


Figure 27 : densité moyenne des faisceaux foliaires (m²) de chacune des 3 radiales (en vert) et de la station 1 (en bleu) en 2019, 2020 et 2021.

Les mesures de densités au m² témoignent cependant d'une forte hétérogénéité des densités au sein de la station du fait d'écart-types globalement très élevés, particulièrement pour *S. filiforme* et *H. wrightii*.

La dégradation de *T. testudinum* semble particulièrement marquée entre juillet 2019 et juillet 2020, accompagnée par une fragmentation importante de l'herbier. Le déclin de *T. testudinum* se prolonge en 2021 et les zones mises à nues en 2020 sont majoritairement recolonisées par *S. filiforme* et *H. wrightii*, espèces pionnières, supportant les perturbations continues et répétées et à la croissance plus rapide. L'évolution du recouvrement vers des espèces de stade de développement inférieur, plus résistantes aux perturbations, pourrait en partie s'expliquer par la localisation de la station qui subit directement les variations du régime hydrodynamique et les fortes tempêtes.

Bien que la majorité des faisceaux mesurés de *T. testudinum* soient cassés (prédation, action mécanique), on observe une diminution de la longueur moyenne de leurs feuilles, passant de 50,2 mm en moyenne en 2019 à 45,9 mm en 2020 et 43,3 mm en 2021. La longueur moyenne des faisceaux de *S. filiforme* et *H. wrightii* a, elle, tendance à augmenter entre 2019 et 2020 (47,8 mm et 48,5 mm respectivement) mais diminue en 2021 (40,9 mm). Ceci pourrait témoigner de variations importantes du régime hydrodynamique et de la sédimentation.

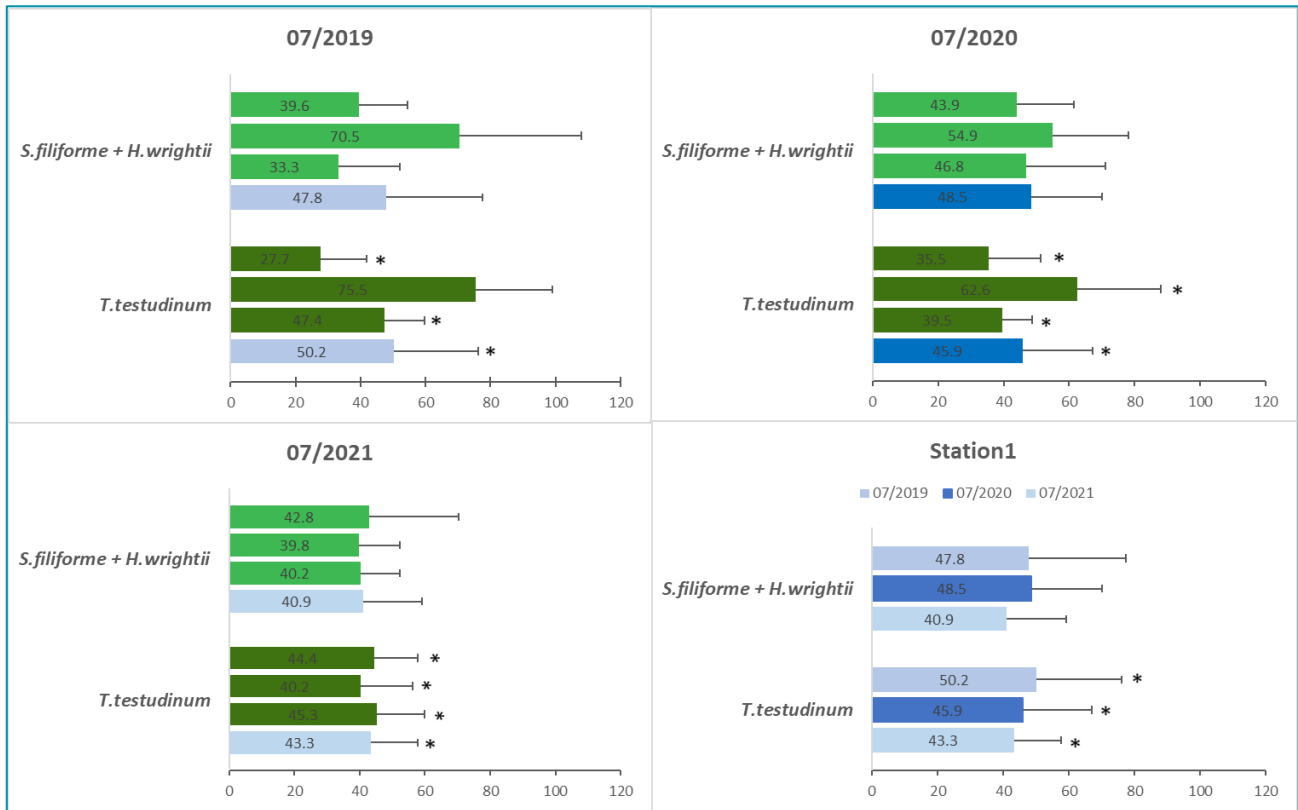


Figure 28 : longueur moyenne en mm de la plus longue feuille sur chacune des 3 radiales (en vert) et au sein de la station 1 (en bleu) en 2019, en 2020 et en 2021. * pourcentage moyen d'apex cassés > 50%

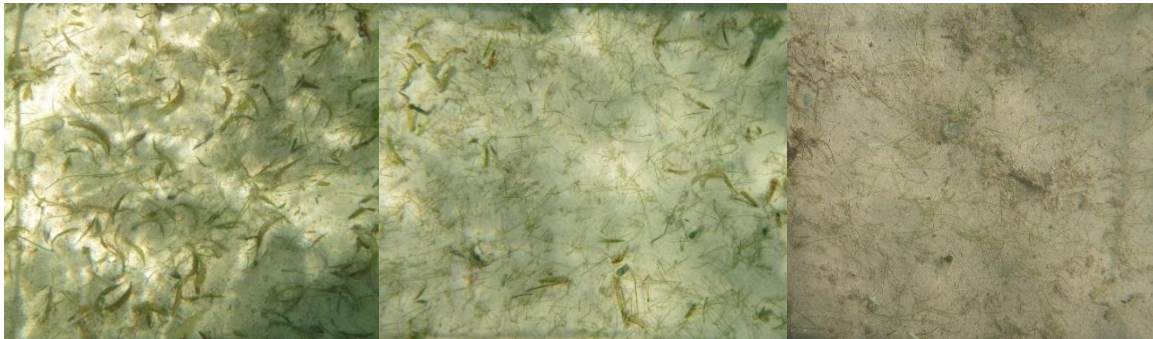


Figure 29 : évolution du recouvrement de la radiale 3 de la station 1 en 2019, 2020 et 2021 (de gauche à droite). On observe une diminution de la présence de *T. testudinum*.

L'ensemble de ces résultats semblent indiquer une perturbation répétée sur l'herbier de la station 1, probablement due au déferlement des vagues, accentué lors de certains événements météorologiques importants. Les espèces plus résistantes et à croissance plus rapide, tels que *S. filiforme* et *H. wrightii*, prennent progressivement la place de *T. testudinum*. Le remplacement progressif de cette dernière (qualifiée de climacique) témoigne d'une déstructuration morphologique et d'une dégradation de l'herbier (Legrand, 2010 ; Le Moal *et al.* 2015), notamment dans ses rôles écologiques fonctionnels. Il convient de poursuivre ces suivis de façon à mesurer cette évolution dans les années à venir.

3.3.1.2 Station 2

La station 2 est située au Nord de Terre de Bas, dans des fonds allant de 1,6 m à 3 m de profondeur. Une partie de l'herbier est localisé contre une barre rocheuse, et des roches à algues photophiles sont aussi présentes en quelques endroits. Cette station a été étudiée pendant la saison humide, durant les mois de juillet 2019, 2020 et 2021.

La station est un herbier mixte à *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* et *Halodule wrightii*. *Halophila stipulacea* a également été observée durant le dernier suivi de juillet 2021 mais hors des radiales.

Le substrat au sein de l'herbier et dans son pourtour est essentiellement composé de sable grossier propre avec des sections de sable fin. Le relief est très majoritairement peu marqué, sans microfalaises, témoignant d'un hydrodynamisme faible.

Les paramètres globaux indiquent un bon état de santé de l'herbier, avec absence de cyanobactéries, d'algues dérivantes et de débris de feuilles de magnoliophytes, excepté pour les radiales 2 et 3 en 2021 où la présence de macrophytes de l'ordre de quelques m² est observée. La bioturbation est faible à moyenne, avec la présence de quelques monticules et entonnoirs espacés, particulièrement en 2019. Tout comme la station 1, l'herbier est cependant recouvert d'un film sédimentaire.

Tableau 8 : indices des différents paramètres globaux de chacune des trois radiales de la station 2 en 2019, 2020 et 2021

	07/2019			07/2020			07/2021		
	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Epibiose	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Relief	2	1	1	1	1	2	1	1	1
Macrophytes non fixées	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Cyanobactéries	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bioturbation	0	1	1	0	1	0	0	1	0
Etat de santé	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tableau 9 : mégafaune associée et type de substrat de la station 2 en 2019, 2020 et 2021

		07/2019			07/2020			07/2021		
		Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Mégafaune associée	Oursin	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	Nacre	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	Etoile de mer	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Lambi	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Substrat	Dans l'herbier	4	3	3	4	4	3	4	4	4
	Hors herbier	4	4	4	4	4	3	4	4	4

La mégafaune associée est également pauvre pour cette station, avec quelques oursins et nacres uniquement.

Les mesures de LIT indiquent un taux de recouvrement moyen très élevé en 2019 et 2020 de 94,3% et 92,5% respectivement, mais une diminution importante en 2021 avec un taux moyen de recouvrement de 74,9%. Les détails des radiales ne sont pas indiqués dans les graphiques suivants, mais cette forte diminution en 2021 est due à la radiale 3 qui présente un taux de recouvrement de 26% alors que les radiales 1 et 2 ont un taux toujours très élevé de 98,6% et de 100%. Cette dégradation de la radiale 3 s'observe également par l'augmentation du taux de fragmentation qui augmente de 12,4% en 2020 à 74% en 2021 pour cette radiale. Les taux moyens de fragmentation et de mitage à l'échelle de la station restent en revanche bas avec des limites majoritairement stables ou en progression.

Cette dégradation du taux de recouvrement de la radiale 3 et l'augmentation de sa fragmentation peut en partie s'expliquer par sa localisation (voir Figure 4). Située plus proche du centre de la passe et moins protégée par la côte que les radiales 1 et 2, elle subit davantage les courants et les variations du régime hydrodynamique. Cependant, la dégradation ayant majoritairement eu lieu entre 2020 et 2021, alors qu'elle semble avoir eu lieu entre 2019 et 2020 pour la station 1, il est aussi possible que la cause de la fragmentation soit issue d'un arrachage mécanique, tel que les ancrages des bateaux. La radiale 3 étant localisée plus au large en profondeur plus importante. Un arrachage accidentel et un régime hydrodynamique important ont pu engendrer cette fragmentation.

Le recouvrement moyen de la station est largement représenté par un mélange des trois espèces *T. testudinum*, *S. filiforme* et *H. wrightii* qui représente 100% du taux de recouvrement en 2019. En 2020, une zone monospécifique à *T. testudinum* est observée mais celle-ci n'est plus retrouvée en 2021. On observe, comme pour la station 1, une recolonisation des zones mises à nues par les espèces *S. filiforme* et *H. wrightii*.

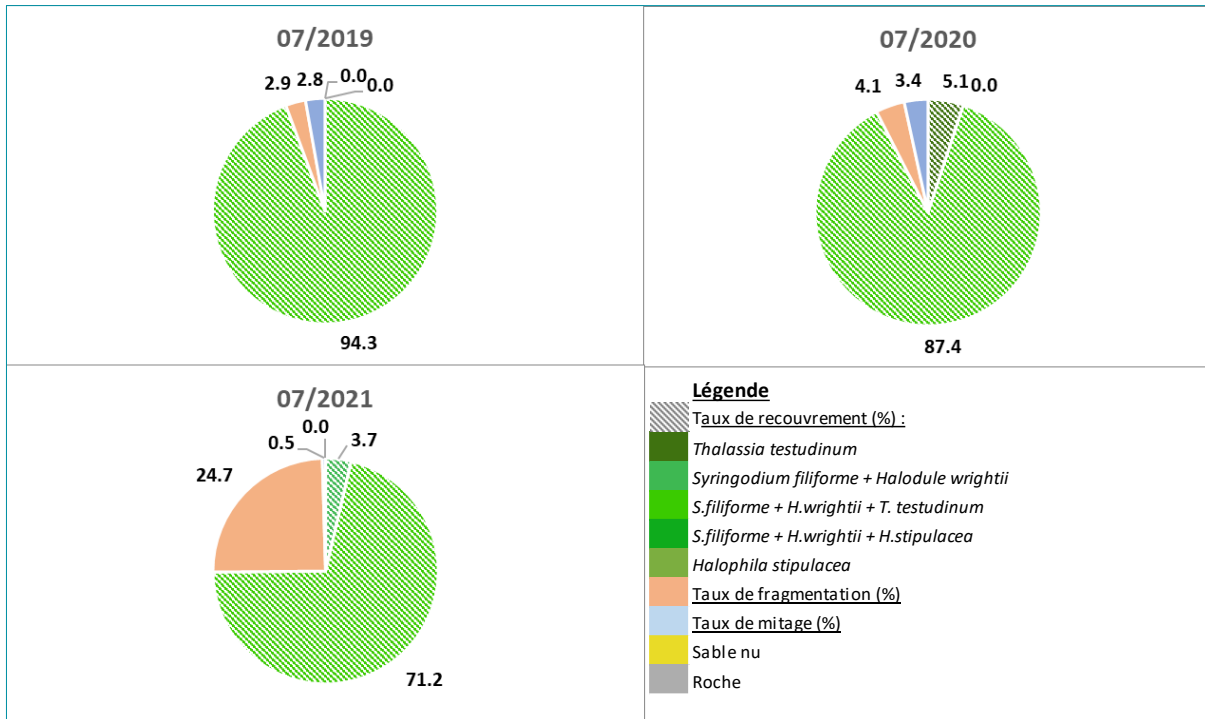


Figure 30 : taux moyens en pourcent de recouvrement, de fragmentation et de mitage de la station 2 en 2019, 2020 et 2021. Les taux moyens de recouvrements sont de 94,3% en 2019, de 92,5% en 2020 et de 74,9% en 2021.

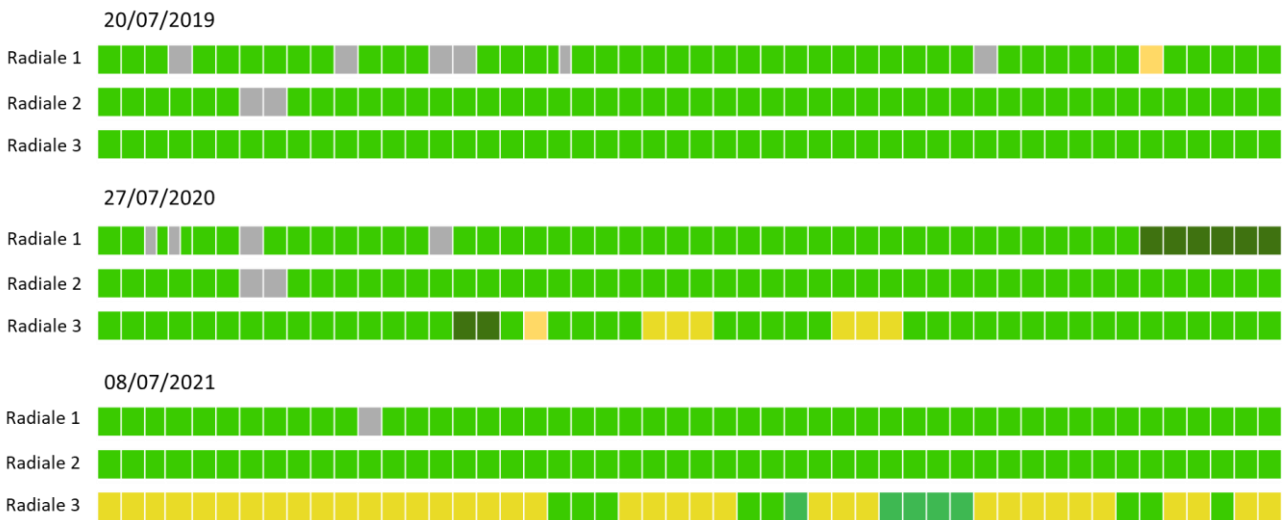


Figure 31 : représentation schématique du recouvrement des 3 radiales de la station 2 en 2019, 2020 et 2021 (1 carré = 1 m). On observe un recouvrement très important des trois espèces mélangées et la fragmentation progressive de la troisième radiale avec l'apparition de zones d'herbier mixte à deux espèces *S. filiforme* et *H. wrightii* (pour la légende voir Figure 30 ci-dessus).

L'évolution du recouvrement est également mise en évidence par les mesures de densité. La densité moyenne en faisceaux foliaires de *T. testudinum* est globalement plus importante que dans la station 1 mais suit la même tendance avec une diminution au cours des trois années, passant de 792 faisceaux/m² en 2019 à 650 faisceaux/m² en 2020 pour finalement diminuer jusqu'à 392 faisceaux/m² en 2021. La diminution la plus marquée est observée sur la radiale 3 qui passe de 340 faisceaux/m² en 2019 à 50 en 2021. Les densités en faisceaux foliaires de *S. filiforme* et *H. wrightii* suivent globalement aussi une diminution, excepté pour la radiale 1 qui montre une tendance inverse. A l'échelle de la station, les densités foliaires moyennes de ces deux espèces diminuent entre 2019 et 2020, et reste stable entre 2020 et 2021.

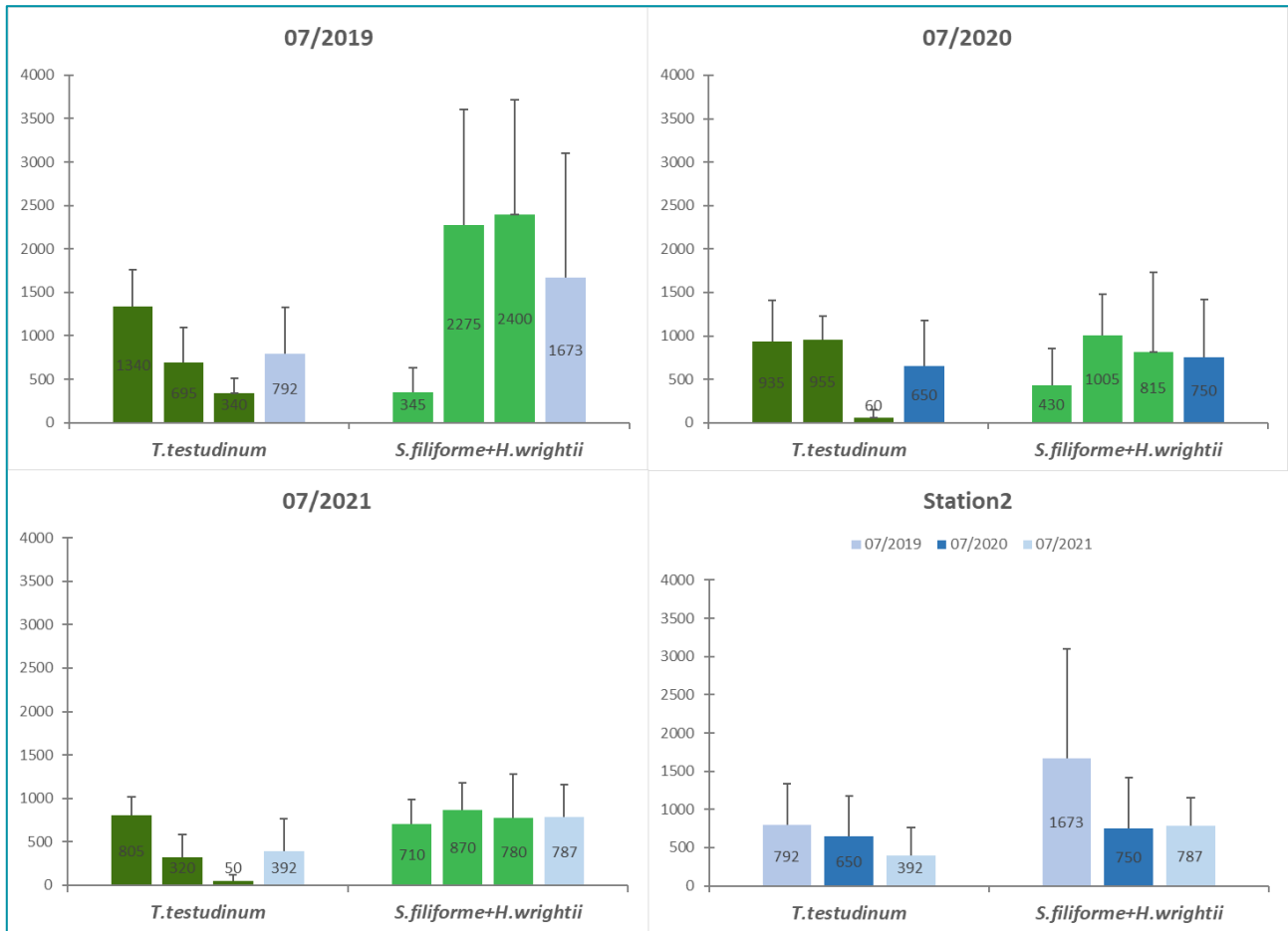


Figure 32: densité moyenne des faisceaux foliaires (faisceaux/m²) de chacune des 3 radiales (en vert) et de la station 2 (en bleu) en 2019, 2020 et 2021. En vert foncé : *T. testudinum* ; en vert clair : *S. filiforme* + *H. wrightii*

Les mesures de densités au mètre-carré témoignent également d'une forte hétérogénéité des densités au sein de la station du fait d'écart-types globalement très élevés particulièrement pour *S. filiforme* et *H. wrightii*.

Les mesures de la longueur des faisceaux foliaires apportent une information contradictoire, avec une augmentation de la longueur moyenne des faisceaux de *T. testudinum* au cours des trois années, passant de 49,2 mm en 2019, à 60,5 mm en 2020 et 67,7 mm en 2021.

La radiale 3 présente les longueurs de faisceaux les plus importantes. Cependant, les apex des faisceaux mesurés sont cassés à plus de 50% pour les deux autres radiales en 2019 et en 2021. Une pression de prédation plus importante, notamment par les tortues, sur ces radiales plus abritées, pourrait expliquer ces observations.

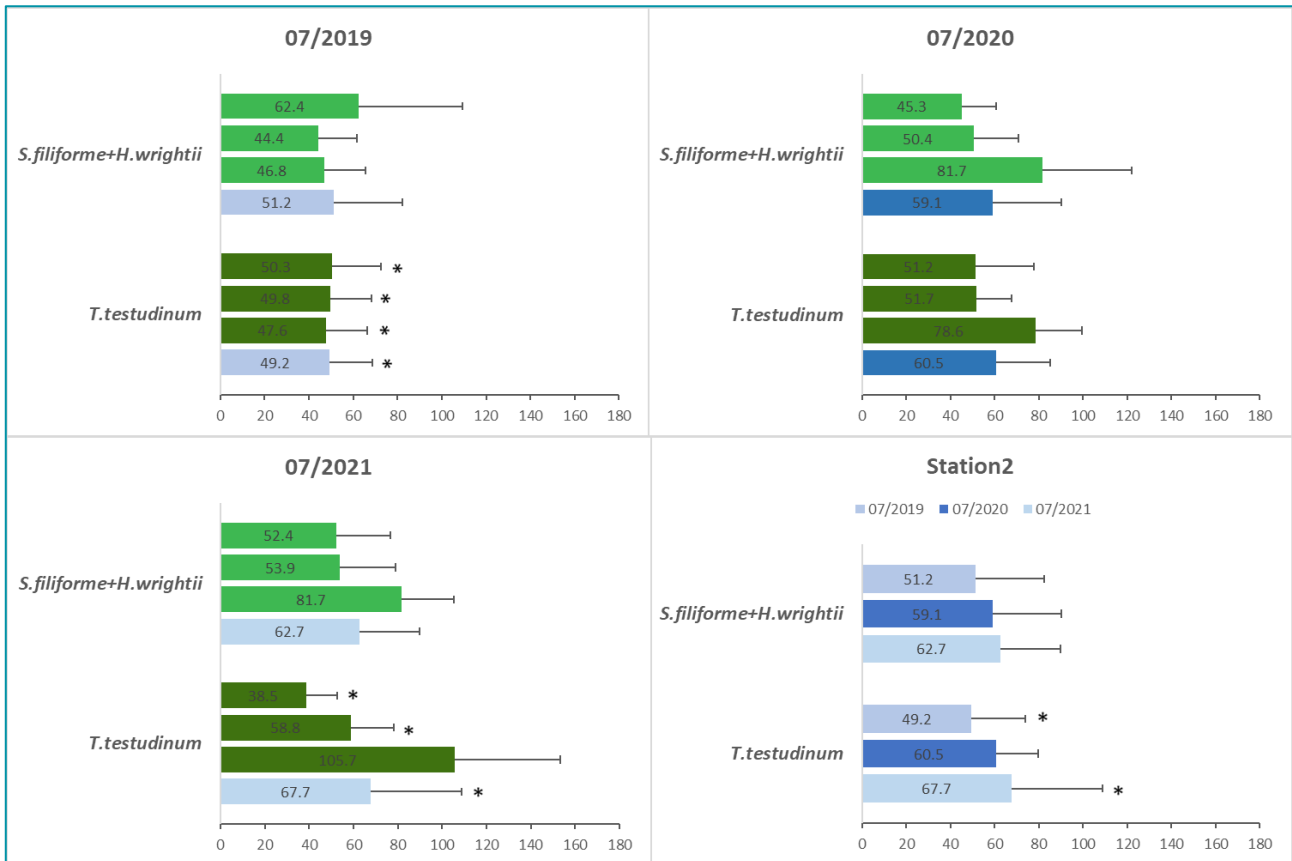


Figure 33 : longueur moyenne en mm de la plus longue feuille sur chacune des 3 radiales (en vert) et au sein de la station 2 (en bleu) en 2019, 2020 et 2021. * pourcentage moyen d'apex cassés > 50%

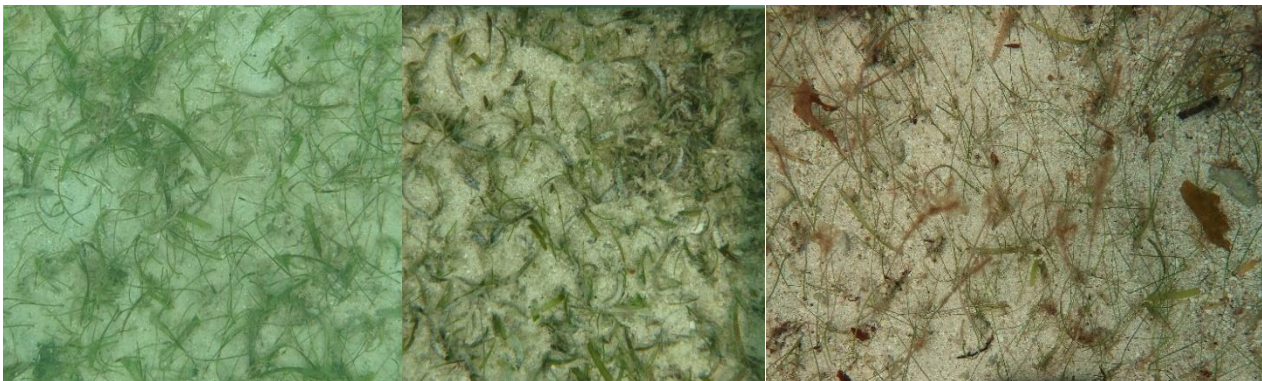


Figure 34 : évolution du recouvrement de la radiale 3 de la station 2 en 2019, 2020 et 2021 (de gauche à droite). On observe une diminution de la présence de *T. testudinum*, le film sédimentaire recouvrant les faisceaux et le développement d'épiphytes en 2021.

Malgré un état de santé évalué comme bon, les résultats obtenus indiquent, comme pour la station 1, une dégradation de l'état général de l'herbier par le déclin de l'espèce climacique *T. testudinum*. Cette dégradation est particulièrement marquée dans la zone de l'herbier la moins protégée, et située le plus extérieur à l'anse, et représentée par la radiale 3, dont l'état s'est dégradé à la suite de fragmentations observées en 2020. Cette fragmentation peut avoir pour causes des phénomènes naturels (mitage de l'herbier par l'endofaune, le broutage et élargissement progressif des zones nues par le régime hydrodynamique) ou anthropiques (arrachage accidentel de la matre par les ancrs de bateau) ou par une combinaison des deux.

3.3.1.3 Station 3

La station 3 correspond à la zone d'herbier protégé depuis 2015 (délimitation avec protection par des bouées et des cordages, pour éviter le piétinement). Elle est localisée dans une anse sableuse assez bien abritée du courant dominant du lagon et du déferlement des vagues. L'herbier se situe dans des fonds allant de 40 cm à 1,1 m et peut se retrouver dans très peu d'eau selon la marée (10 cm).

Cette station a été étudiée durant la saison sèche pendant les mois de décembre 2019 et 2020.

La station est un herbier majoritairement monospécifique à *H. wrightii* avec présence de *S. filiforme* en mélange. *T. testudinum*, et présentant des taches monospécifiques ou en mélange avec les deux autres espèces. *Halophila stipulacea* est également observée sur cette station.

Le substrat (station et alentours) est uniquement composé de sable grossier propre avec fragments et articles d'algues calcaires éventuelles. Le relief est majoritairement moyen, indiquant des dénivelés uniquement en limites de patches. Quelques rhizomes apparents ont été notés sur la deuxième radiale.

L'état de santé de l'herbier est globalement moyen, avec des signes d'eutrophisation ou de sédimentation. La présence de macrophytes non fixées n'est pas observée à l'inverse de la présence occasionnelle de cyanobactéries sur la radiale 3 en 2019 puis sur les radiales 2 et 3 en 2020. Des signes de bioturbation moyenne sont notés en 2020 pour deux radiales. Enfin, de la même manière que les stations 1 et 2, l'herbier est couvert d'un film sédimentaire.

Tableau 10 : indices des différents paramètres globaux de chacune des trois radiales de la station 3 en 2019 et en 2020

	12/2019			12/2020		
	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Epibiose	3	3	3	3	3	3
Relief	1	2	2	1	2	2
Macrophytes non fixées	0	0	0	0	0	0
Cyanobactéries	0	0	1	0	1	1
Bioturbation	0	0	0	0	1	1
Etat de santé	3	2	3 ou 4	3	2	3

Tableau 11 : mégafaune associée et type de substrat de la station 3 en 2019 et en 2020

		12/2019			12/2020		
		Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Mégafaune associée	Oursin	0	0	0	0	0	0
	Nacre	0	1	0	0	0	0
	Etoile de mer	0	0	0	0	0	0
	Lambi	18	0	0	1	0	0
Substrat	Dans l'herbier	4	4	4	4	4	4
	Hors herbier	4	4	4	4	4	4

De nombreux lambis sont observés sur une radiale en 2019 mais un seul en 2020 sur cette même radiale, attestant éventuellement de variations importantes de densité des populations.

Pour le recouvrement des herbiers (mesures LIT), le taux moyen est faible, avec un taux de 61,1% en 2019 et de 56,3% en 2020. Le recouvrement est dominé par le mélange *H. wrightii* et *S. filiforme* avec 48% du recouvrement en 2019 et 34,7% en 2020. Le recouvrement monospécifique en *T. testudinum* est très bas et diminue entre les deux années, passant de 5,6% en 2019 à 2,5% en 2020. Les zones d'herbier mixte avec les trois espèces augmentent d'environ 9% entre les deux années, témoignant possiblement d'un envahissement des zones monospécifiques à *T. testudinum* par les deux autres espèces. Enfin, *H. stipulacea* est observée en très faible pourcentage en 2020 sur la troisième radiale.

Le taux de fragmentation de l'herbier est assez variable entre les radiales mais relativement constant entre les deux années. Il est très élevé pour la radiale 1 (>70% pour les deux années) et modéré pour les radiales 2 et 3 (< 25%). Le taux de mitage, en revanche, augmente pour chacune des radiales et passe en moyenne de 2,3% en 2019 à 9% en 2020. Le mitage peut être provoqué par la bioturbation et être conséquent lorsque l'endofaune est importante. Cette augmentation pourrait témoigner d'un développement de la faune du sous-sol ou de son activité élevée entre 2019 et 2020. Les limites de fragmentation et de mitage sont toutes en progression.

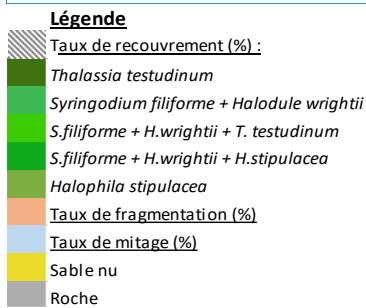
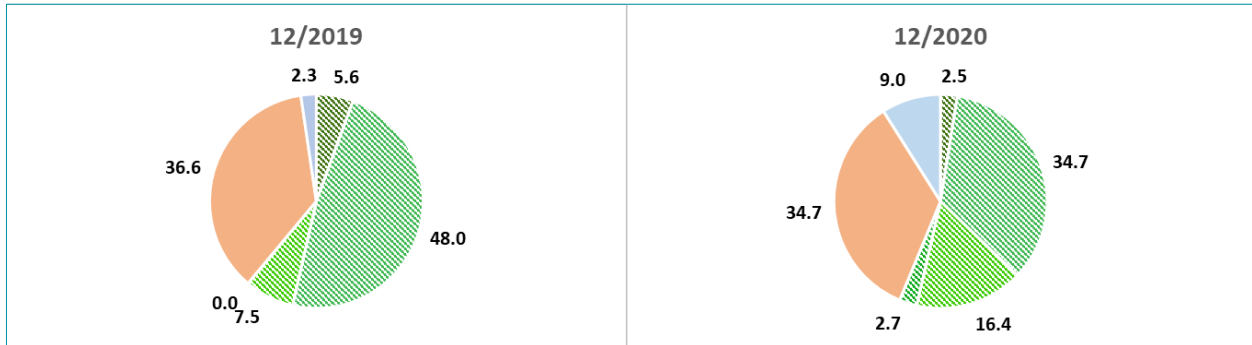


Figure 35 : taux moyens en pourcent de recouvrement, de fragmentation et de mitage de la station 3 en 2019 et en 2020. Les taux moyens de recouvrements sont de 61,1% en 2019 et de 56,3% en 2020

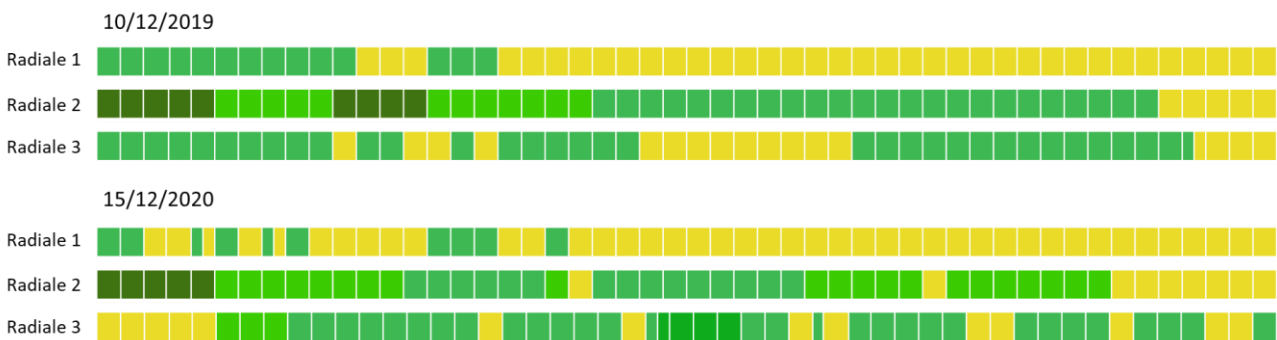


Figure 36 : représentation schématique du recouvrement des 3 radiales de la station 3 en 2019 et 2020 (1 carré =1m). On observe une fragmentation très importante pour la radiale 1 et une augmentation du taux de mitage pour l'ensemble des radiales entre 2019 et 2020 (pour la légende voir Figure 35 ci-dessus).

Les mesures de densité indiquent une régression générale de l'herbier avec une très forte variabilité des densités au sein de chacune des radiales (écart-types très élevés). *T. testudinum* est essentiellement rencontrée sur la radiale 2 et diminue de 375 faisceaux/m² en 2019 à 140 faisceaux/m² en 2020. Les densités en *H. wrightii* et *S. filiforme* sont également en légère baisse avec une densité moyenne de 1643 faisceaux/m² en 2019 et de 1320 faisceaux/m² en 2020.

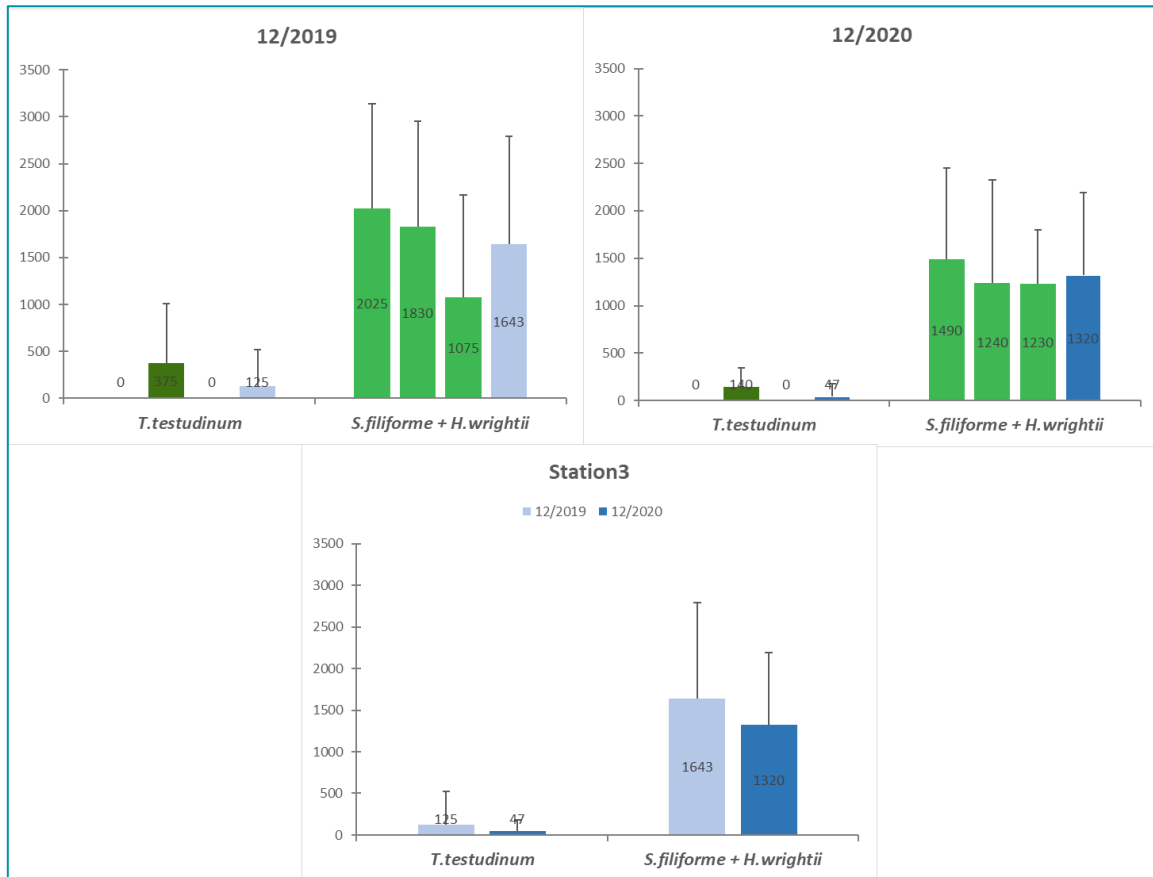


Figure 37 : densité moyenne des faisceaux foliaires (/m²) de chacune des 3 radiales (en vert) et de la station 3 (en bleu) en 2019 et en 2020.

La mesure de la longueur des faisceaux foliaires indique une diminution de la longueur chez *S. filiforme* et *H. wrightii* dont la longueur moyenne passe de 69,2 mm en 2019 à 56,2 mm en 2020 et une augmentation chez *T. testudinum* dont la longueur moyenne passe de 53,1 mm en 2019 à 58,3 mm en 2020. La radiale 2 sur laquelle se trouve *T. testudinum* est proche de la côte et dans le creux le plus maqué de l'anse de la plage, elle est ainsi peut-être davantage abritée de la houle et de la sédimentation.

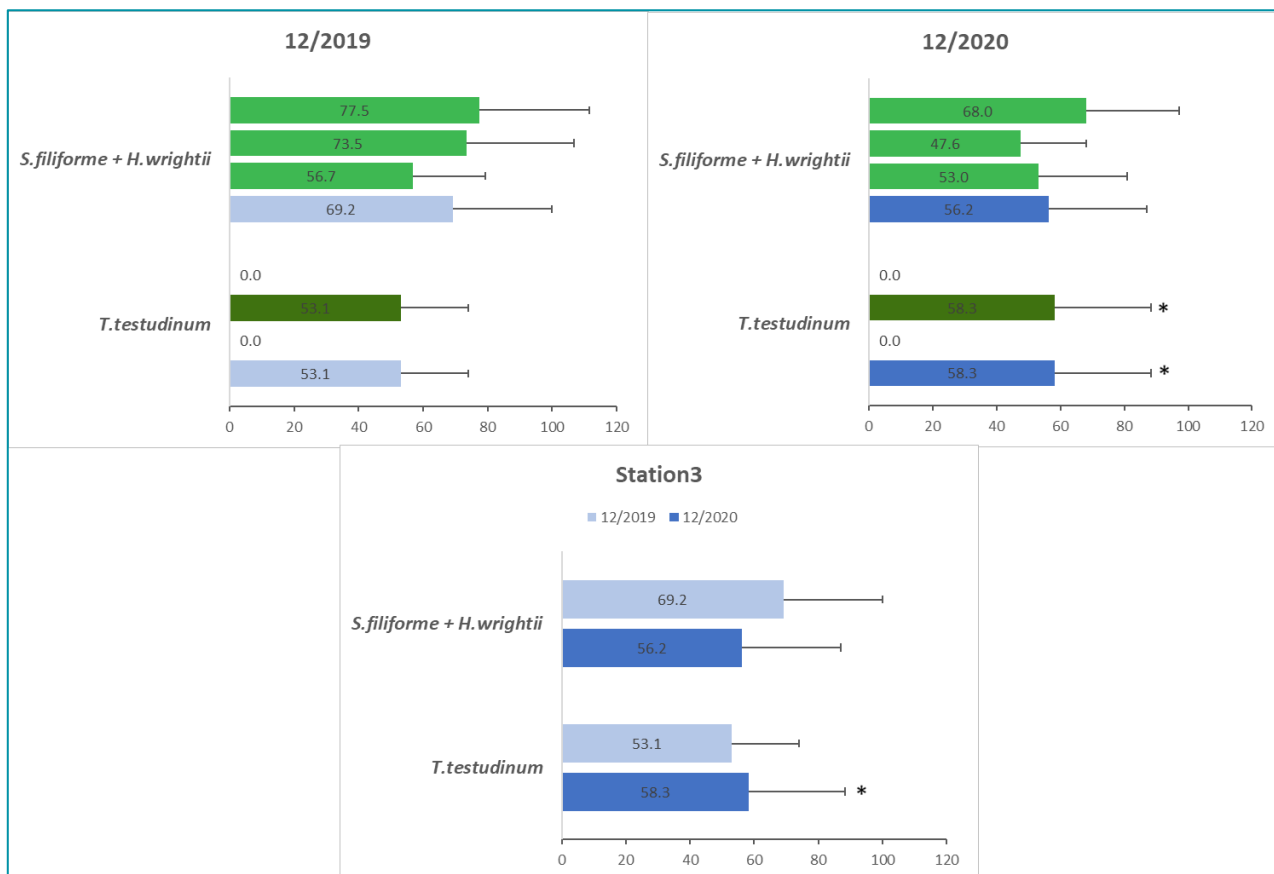


Figure 38 : longueur moyenne en mm de la plus longue feuille sur chacune des 3 radiales (en vert) et au sein de la station 3 (en bleu) en 2019 et en 2020. * pourcentage moyen d'apex cassés > 50%

Les données mesurées sur la station indiquent une tendance à la régression générale de l'herbier, particulièrement pour l'espèce climacique *T. testudinum*, déjà peu présente au début de l'étude. L'herbier étant protégé, l'origine des perturbations sont probablement naturelles. Les mitages dans l'herbier, provoqués par la bioturbation, peuvent être à l'origine de sa fragmentation progressive. Des phénomènes naturels d'érosion ou des événements météorologiques extrêmes sont à considérer, entraînant l'élargissement des zones nues. Enfin, l'herbier semble soumis à une sédimentation répétée.

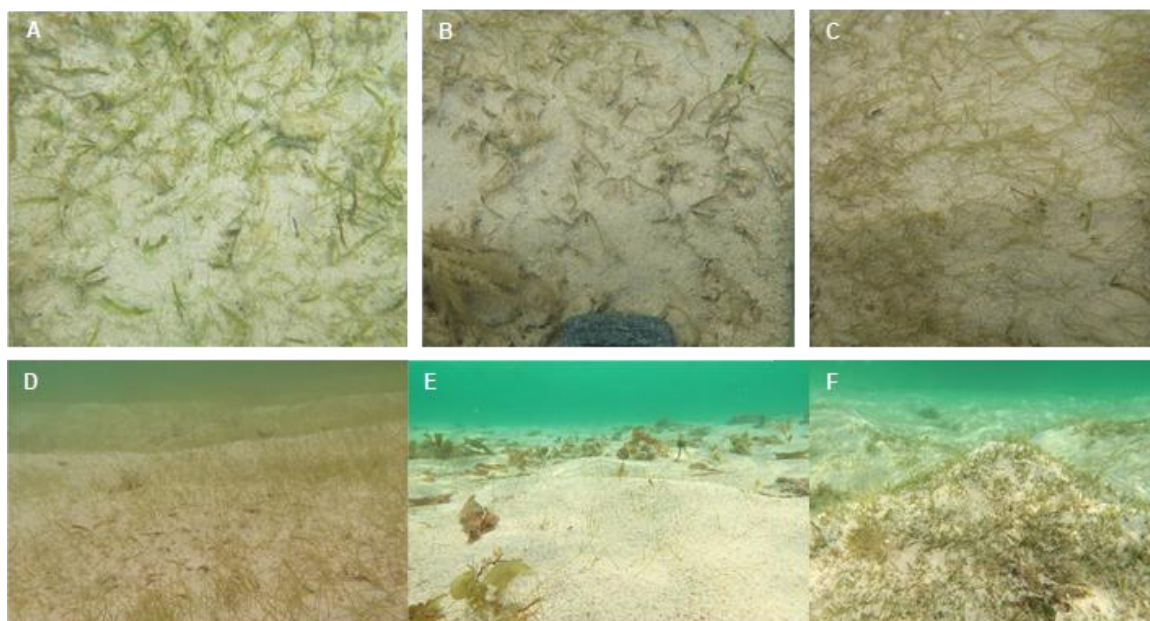


Figure 39 : évolution de la radiale 2 de la station 3 (A en 2019, B et C en 2020), forte sédimentation observée en 2020 ; D et E : illustration de l'hétérogénéité élevée des densités ; F : développement de *H. stipulacea* (photo de 2021)

3.3.1.4 Station 4

La station 4 est située au nord de Terre-de-Bas, dans une piscine naturelle formée par une barre rocheuse proche de la côte sableuse, sur des fonds allant de 50 cm à 1,2 m de profondeur. Une partie de l'herbier pousse donc le long de la roche. Cette station a été étudiée durant la saison sèche pendant les mois de décembre 2019 et 2020.

L'herbier est majoritairement composé de *T. testudinum* en recouvrement monospécifique ou mixte avec *S. filiforme* et *H. wrightii* (minoritaire). Deux patches de *H. stipulacea* ont été observés proche de deux radiales en 2019 et un seul de ces patches a été retrouvé en 2020.

Le substrat au sein de la station et aux alentours est uniquement composé de sable grossier propre avec fragments et articles d'algues calcaires éventuels. Le relief de la station est moyen à important avec des dénivelés en limite d'herbier, des vallonements et/ou des microfalaises franches. Ce relief témoigne d'un certain hydrodynamisme dans la piscine (présence en particulier d'une zone d'érosion au centre : gyre ?), d'une variation de sédimentation et de la présence de roches affleurantes ressortant parfois du sédiment meuble sous la forme de microfalaises.

L'état de santé de l'herbier est majoritairement bon à très bon, avec des zones monospécifiques à *T. testudinum*. La présence de macrophytes, de cyanobactéries et de bioturbation n'est pas observée. L'herbier ne présentait pas d'épibiose en 2019, alors qu'il est en revanche colonisé par des algues filamenteuses en 2020. Ce développement d'algue peut être ponctuel, et lié à des conditions environnementales particulières à l'échelle de quelques semaines ou d'une saison.

Tableau 12 : indices des différents paramètres globaux de chacune des trois radiales de la station 4 en 2019 et en 2020

	12/2019			12/2020		
	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Epibiose	0 ou 1	0	0	2	2	2
Relief	2	2	2 à 3	2	2	2 à 3
Macrophytes non fixées	0	0	0	0	0	0
Cyanobactéries	0 ou 1	0	0	0	0	0
Bioturbation	0	0	0	0	0	0
Etat de santé	1 ou 2	2	1 à 2	2	2	2

Tableau 13 : mégafaune associée et type de substrat de la station 4 en 2019 et en 2020

		12/2019			12/2020		
		Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Mégafaune associée	Oursin	1	1	15	2	0	0
	Nacre	1	0	0	0	0	0
	Etoile de mer	0	0	0	0	0	0
	Lambi	0	0	0	0	0	0
Substrat	Dans l'herbier	4	4	4	4	4	4
	Hors herbier	4	4	4	4	4	4

La mégafaune marine est plus importante, comparée aux stations précédentes, avec la présence en 2019 de nombreux oursins et d'une nacre. Les oursins présents sur la station le sont très certainement par la proximité de la roche. Ces observations ne sont en revanche pas réitérées en 2020 et l'herbier reste globalement peu habité par les espèces ciblées en comparaison d'autres herbiers aux Antilles.

Pour l'évaluation du recouvrement des herbiers (mesures LIT), le taux moyen de recouvrement est très bon à l'échelle de la station, avec un taux de 92,9% en 2019 et de 84,1% en 2020. Plus de la moitié du recouvrement est représenté par *T. testudinum* en formation monospécifique, et un quart environ par le mélange des trois espèces *T. testudinum*, *S. filiforme* et *H. wrightii*. Le recouvrement monospécifique de l'espèce climacique *T. testudinum* est cependant en régression et passe de

68,5% en 2019 à 54,1% en 2020. La part de recouvrement des trois espèces mélangées augmente légèrement, et on observe l'apparition de zones mixtes à deux espèces uniquement *S. filiforme* et *H. wrightii*. Le taux moyen de fragmentation et de mitage augmentent entre 2019 et 2020, passant de 6,5% à 15%, à respectivement 0,5% et 0,9%. Le taux de fragmentation déjà présent en 2019 sur la troisième radiale reste constant mais apparaît sur la radiale 1 et particulièrement sur la radiale 2. Les limites de zones de fragmentation sont majoritairement en érosion et partiellement stable, indiquant une tendance évolutive plutôt vers l'élargissement des zones fragmentées de l'herbier.

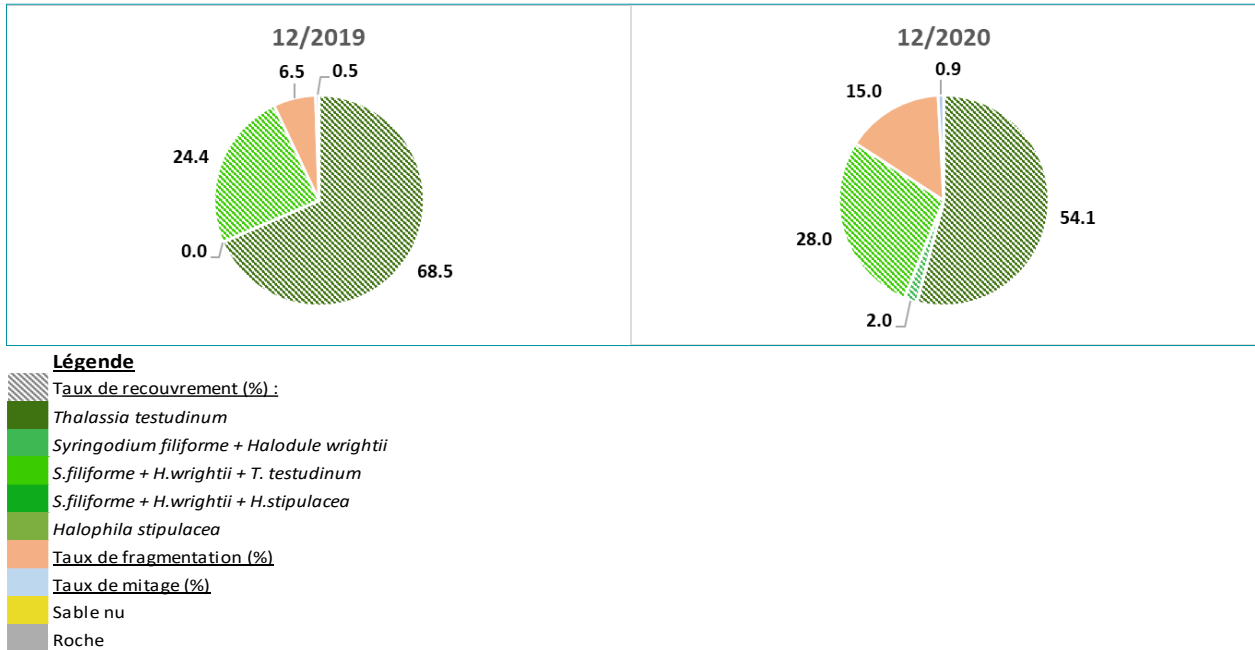


Figure 40 : taux moyens en pourcent de recouvrement, de fragmentation et de mitage de la station 4 en 2019 et en 2020. Les taux moyens de recouvrements sont de 92,9% en 2019 et de 84,1% en 2020

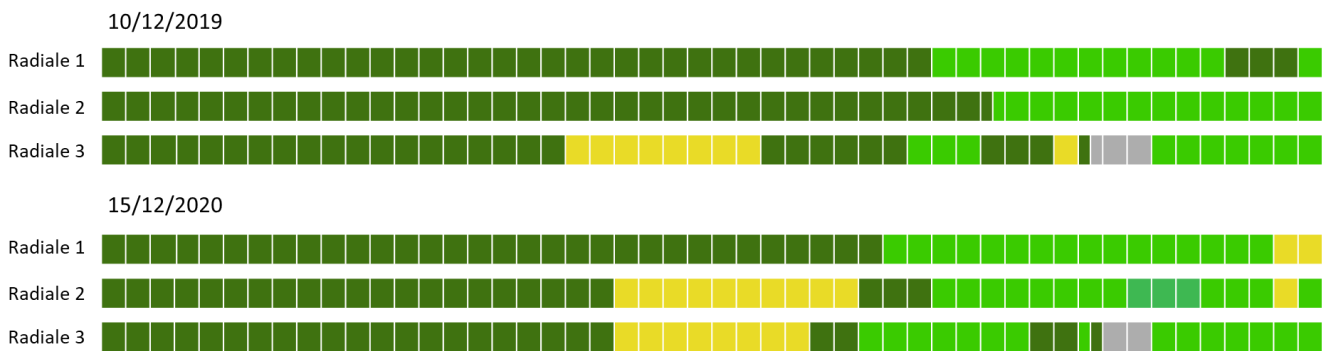


Figure 41 : représentation schématique du recouvrement des 3 radiales de la station 4 en 2019 et 2020 (1 carré =1m). On observe un début de fragmentation sur les radiales 1 et 2 et une légère diminution du taux de recouvrement monospécifique à *T. testudinum* (pour la légende voir Figure 40 ci-dessus).

Les mesures de densités apportent une information complémentaire avec une augmentation, à l'échelle des radiales et de la station, des densités moyennes des trois espèces. L'augmentation (excepté pour la radiale 2, en légère baisse) des densités en *T. testudinum* sont cependant très faibles (à l'échelle de la station : 955 faisceaux/m² en 2019 et 998 faisceaux/m² en 2020) et indique plutôt une stabilité des densités de l'espèce. La densité moyenne en *S. filiforme* et *H. wrightii* augmente de 160 faisceaux/m² en 2019 à 835 faisceaux/m² en 2020.

Comme pour les stations précédentes ces valeurs sont à relativiser par les écart-types très élevés, qui témoignent d'une forte hétérogénéité des densités au sein d'une radiale donnée et entre les radiales. Cependant, ces mesures indiquent que bien que le recouvrement en *T. testudinum* a tendance à diminuer, les densités restent importantes et se maintiennent. La tendance à l'érosion semble expliquer la diminution de la surface couverte par *T. testudinum* dont la vitalité se maintient tout de même globalement.

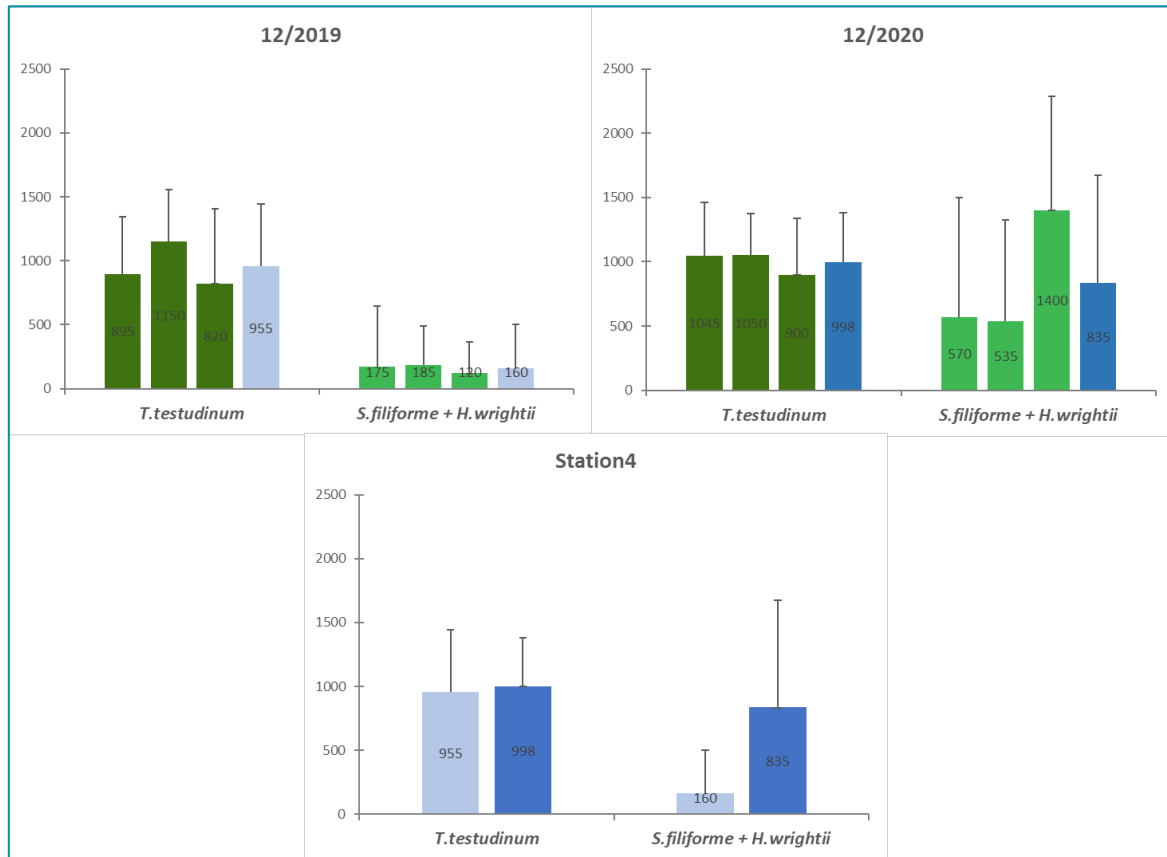


Figure 42 : densité moyenne des faisceaux foliaires (/m²) de chacune des 3 radiales (en vert) et de la station 4 (en bleu) en 2019 et en 2020.

Ces observations peuvent être confirmées par la mesure de la longueur moyenne de la plus longue feuille qui indique une longueur moyenne constante des feuilles entre 2019 et 2020 pour *T. testudinum* (54,2 mm et 56,1 mm respectivement). La tendance est similaire pour *S. filiforme* et *H. wrightii* mais avec une légère augmentation de la longueur passant de 43,2 mm en 2019 à 49,2 mm en 2020. Les données pour ces deux espèces sont cependant à relativiser car des données sont manquantes (la moyenne n'a été calculée que sur 4 à 5 mesures).

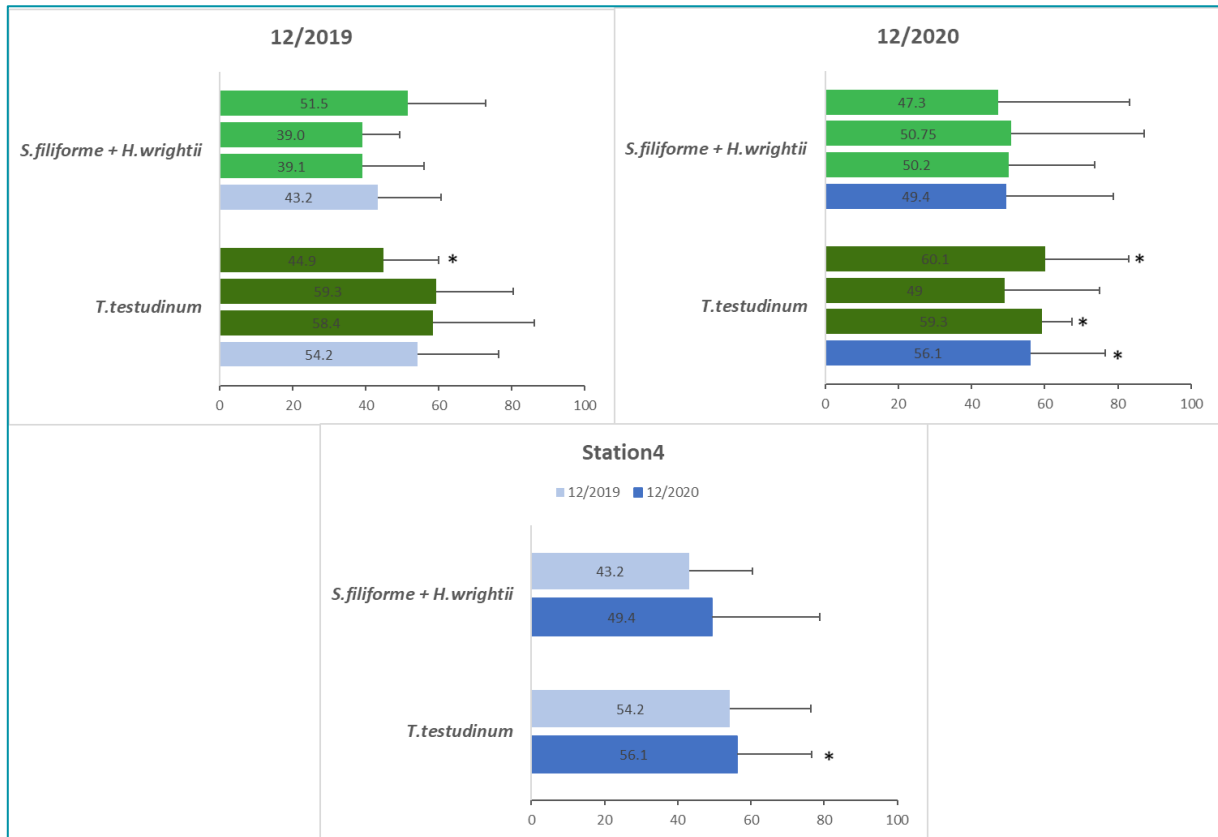


Figure 43 : longueur moyenne en mm de la plus longue feuille sur chacune des 3 radiales (en vert) et au sein de la station 4 (en bleu) en 2019 et en 2020. * pourcentage moyen d'apex cassés > 50%

Pour la station 4, l'ensemble de ces résultats indique le maintien d'un bon état de santé de l'herbier malgré une légère diminution du recouvrement en *T. testudinum* et l'apparition de zones de fragmentation. L'espèce conserve une densité de faisceaux et une longueur moyenne de feuille relativement constante. Des phénomènes d'érosion semblent expliquer la légère tendance à la régression du recouvrement monospécifique à *T. testudinum* et le remplacement par les espèces intermédiaires moins exigeantes, *S. filiforme* et *H. wrightii*. L'espèce envahissante *H. stipulacea* ne semble pas encore très installée sur cette station, mais cette dernière pourrait rapidement rentrer en compétition avec *T. testudinum*. La poursuite des suivis sur cette station semblerait particulièrement intéressant afin de confirmer ou non les tendances observées.

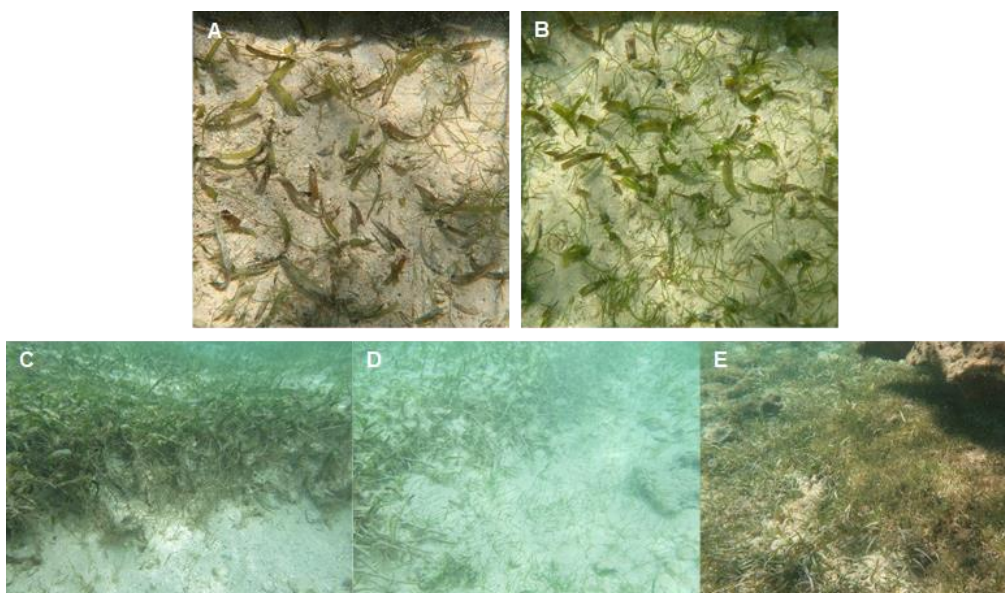


Figure 44 : évolution de la radiale 3 de la station 4 (A en 2019, B en 2020), on observe un maintien des densités ; C : microfalaie et mise à nue des racines de l'herbier ; D : régression de l'herbier mixte à trois espèces et recolonisation de l'espace par *S. filiforme* majoritairement, accompagné de *H. wrightii* en plus faible densité ; E : prolifération de *H. stipulacea* proche d'une zone monospécifique à *T. testudinum*

3.3.1.5 Station 5

La station 5 est située à proximité de la zone de mouillage organisée, proche de la côte de Terre-de-Bas (figure 4). L’herbier s’étend de 1,5 m à 3 m de profondeur.

Les radiales 1 et 2 sont directement au contact des derniers corps morts de la zone de mouillage, tandis que la radiale 3, plus éloignée des deux autres, est située plus proche du centre de la passe.

Cette station a été étudiée durant la saison sèche pendant les mois de décembre 2019 et 2020.

L’herbier est majoritairement composé d’*H. wrightii*, accompagné par *S. filiforme*. *H. stipulacea* est également bien présente, en patches monospécifiques ou mélangée aux autres espèces.

Le substrat (station et alentours) est uniquement composé de sable grossier propre avec fragments et articles d’algues calcaires éventuelles. Le relief de la station est variable, majoritairement moyen avec des dénivelés en limites de patches, à fort sur la radiale 2 avec des vallonements et/ou des microfalaises franches.

L’état de santé global de l’herbier est moyen avec des signes d’eutrophisation ou de sédimentation. La présence de mélanges d’algues dérivantes et de débris de feuilles de magnoliophytes est observée sur la troisième radiale. Des signes d’une bioturbation moyenne avec quelques monticules espacés sont présents sur la majorité des radiales en 2019 puis sur l’ensemble en 2020. La présence occasionnelle de cyanobactéries est seulement observée en 2019 (absence en 2020). Enfin, un film sédimentaire est observé durant les deux années.

Tableau 14 : indices des différents paramètres globaux de chacune des trois radiales de la station 5 en 2019 et en 2020

	12/2019			12/2020		
	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Epibiose	3	3	3	3	3	3
Relief	2	3	1	2	3	2
Macrophytes non fixées	0	0	1	0	0	1
Cyanobactéries	1+	1+	0	0	0	0
Bioturbation	1	1	0	1	1	1
Etat de santé	3	3	3	3	3	3

Tableau 15 : mégafaune associée et type de substrat de la station 5 en 2019 et en 2020

		12/2019			12/2020		
		Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3	Radiale 1	Radiale 2	Radiale 3
Mégafaune associée	Oursin	0	0	0	0	0	0
	Nacre	0	1	0	0	0	1
	Etoile de mer	0	0	0	0	0	0
	Lambi	0	8	0	0	0	0
Substrat	Dans l'herbier	4	4	4	4	4	4
	Hors herbier	4	4	4	4	4	4

La présence de macrofaune est globalement très faible bien que 8 lambis aient tout de même été observés sur la radiale 2 en 2019.

Pour les recouvrements des herbiers (mesures LIT), le taux moyen est très élevé, de 92,3% en 2019 et de 88,2% en 2020. Ce recouvrement est représenté à 43,4% par *S. filiforme* et *H. wrightii* en 2019 et à 56,1% par *S. filiforme*, *H. wrightii* et *H. stipulacea* en 2020. Cette dernière est présente aussi en recouvrement monospécifique, avec un taux moyen constant de 18,9% en 2019 et en 2020. A l’échelle des radiales, l’espèce semble évoluer rapidement avec des variations importantes

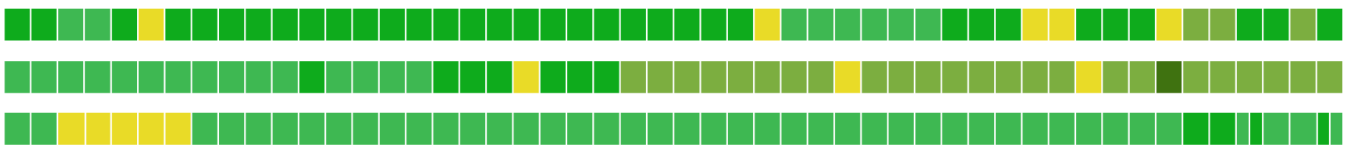
dans sa dynamique (prolifération vs régression), puisqu'elle est présente avec un taux de 48,4% sur la radiale 2 en 2019 contre seulement 6,8% en 2020. Inversement ; le taux de recouvrement d'*H. stipulacea* augmente de 8,2% en 2019 sur la radiale 1, pour atteindre 50% en 2020. L'espèce est absente de la radiale 3 en recouvrement monospécifique. La présence d'un très faible recouvrement de 0,2% de *T. testudinum* est à noter en 2019. L'espèce était probablement présente en proportion plus élevée dans le passé, et a régressé, possiblement à la suite du développement de *H. stipulacea*. Les taux de fragmentation et de mitage de la station sont faibles, mais en légère augmentation pour la fragmentation (3,4% en 2019 et 9,3% en 2020).



- Légende**
- Taux de recouvrement (%) :
 - Thalassia testudinum*
 - Syringodium filiforme* + *Halodule wrightii*
 - S. filiforme* + *H. wrightii* + *T. testudinum*
 - S. filiforme* + *H. wrightii* + *H. stipulacea*
 - Halophila stipulacea*
 - Taux de fragmentation (%)
 - Taux de mitage (%)
 - Sable nu
 - Roche
 - Maroalgues

Figure 45 : taux moyens en pourcentage de recouvrement, de fragmentation et de mitage de la station 5 en 2019 et en 2020. Les taux moyens de recouvrements sont de 92,3% en 2019 et de 88,2% en 2020

10/12/2019



15/12/2020



Figure 46 : représentation schématique du recouvrement des 3 radiales de la station 5 en 2019 et 2020 (1 carré = 1 m). On observe le développement de *H. stipulacea* en recouvrement mixte sur l'ensemble des radiales et en recouvrement monospécifique sur les radiales 1 et 2 uniquement (pour la légende voir Figure 45 ci-dessus).

Les densités mesurées en *S. filiforme* et *H. wrightii* sont en légère augmentation, passant de 820 faisceaux/m² en moyenne en 2019 à 980 faisceaux/m² en 2020. Au niveau de la radiale 1, la tendance est en revanche à la régression (850 faisceaux/m² en 2019 et 630 faisceaux/m² en 2020). Le développement de *H. stipulacea* sur cette radiale en recouvrement monospécifique est important, et la compétition générée par cette espèce invasive pourrait être la cause de la régression des espèces indigènes.

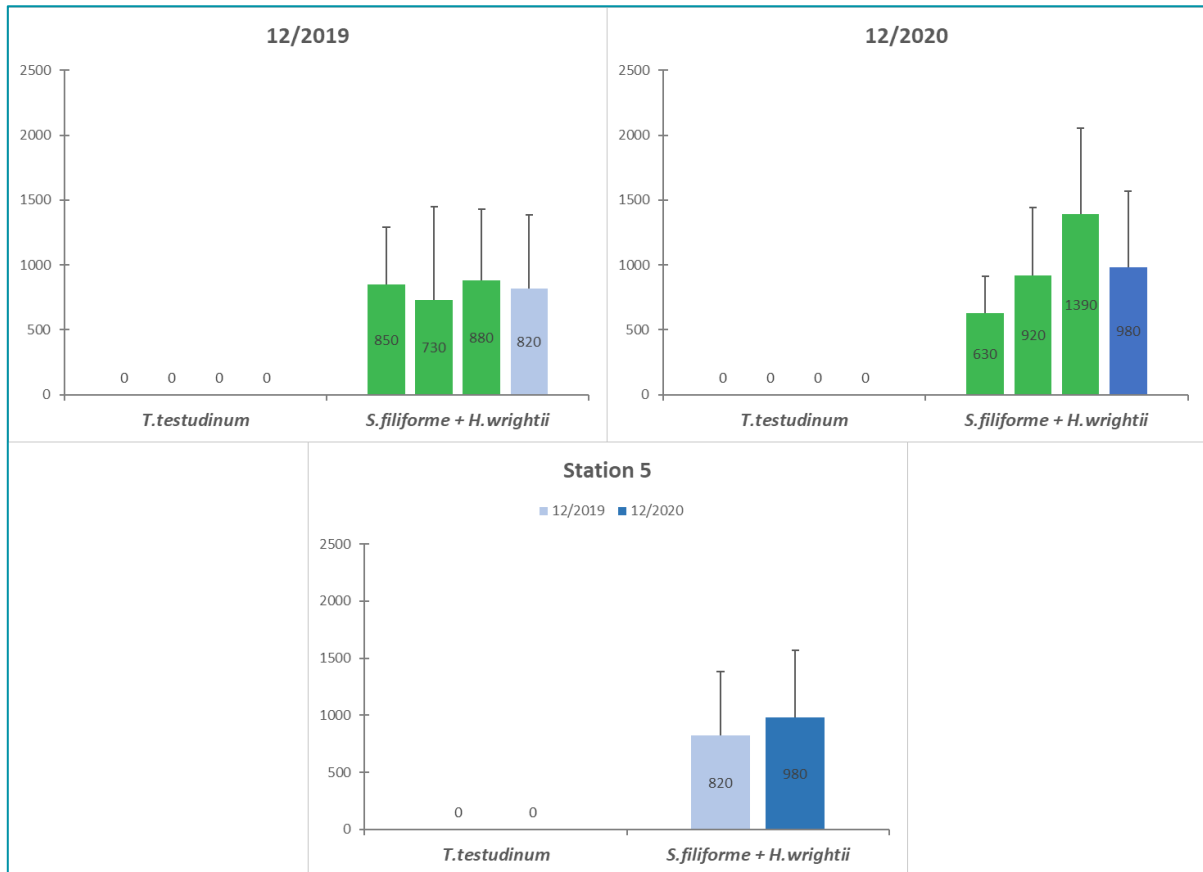


Figure 47: densité moyenne des faisceaux foliaires (/m²) de chacune des 3 radiales (en vert) et de la station 5 (en bleu) en 2019 et en 2020.

Concernant la longueur moyenne de la plus longue feuille, il ressort une augmentation assez importante de la longueur des feuilles de *S. filiforme* et *H. wrightii*, passant de 49,9mm en moyenne en 2019 à 85,9mm en 2020. Au niveau des radiales, les longueurs moyennes les plus faibles sont sur la radiale 3, davantage exposée au courant de la passe.

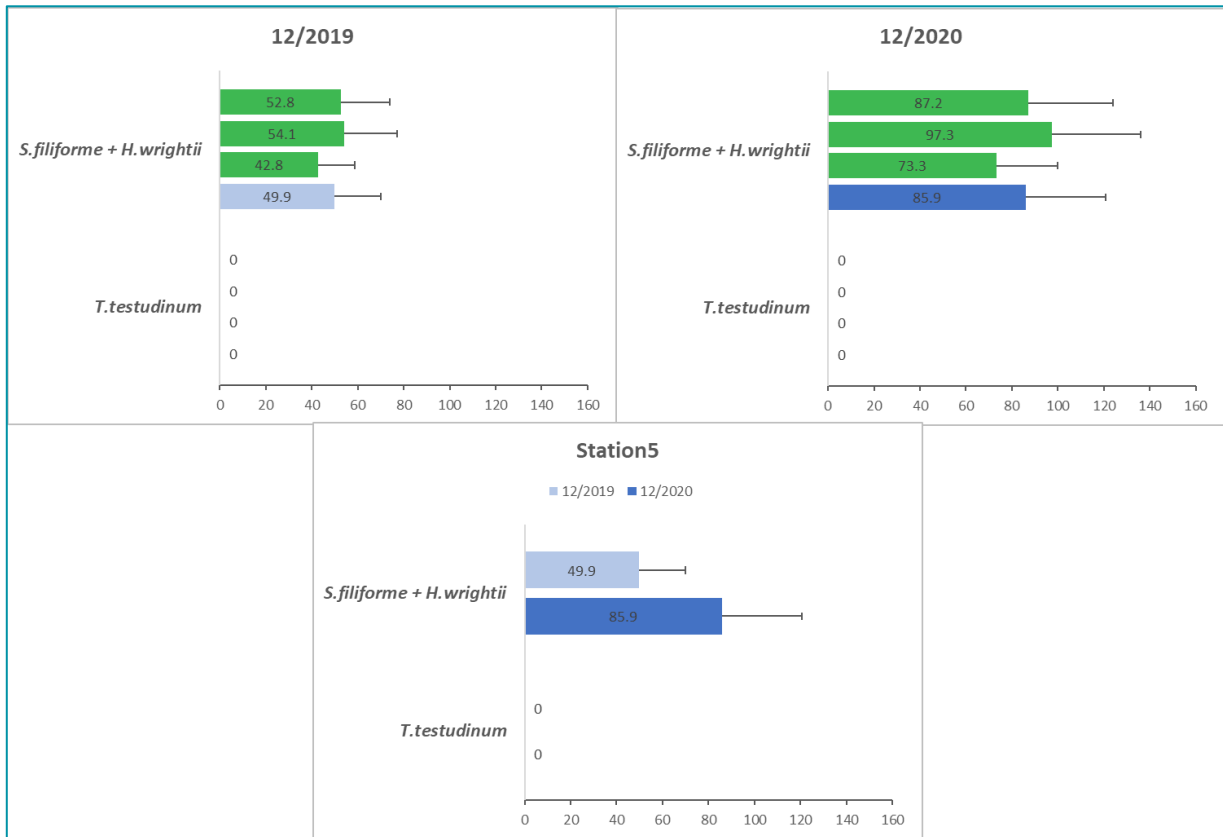


Figure 48 : longueur moyenne en mm de la plus longue feuille sur chacune des 3 radiales (en vert) et au sein de la station 5 (en bleu) en 2019 et en 2020. * pourcentage moyen d'apex cassés > 50%

Pour cette station 5, l'ensemble des paramètres étudiés indique un état de santé moyen de l'herbier, avec la présence de l'espèce intermédiaire *S. filiforme* et de l'espèce pionnière *H. wrightii* en densités assez importantes, mais en tolérance ou en compétition avec l'espèce invasive *H. stipulacea* qui se développe fortement en recouvrement monospécifique. L'herbier présente également une forte bioturbation à l'origine de mitages pouvant éventuellement se transformer en fragmentation et des microfalaises, signe d'érosion.

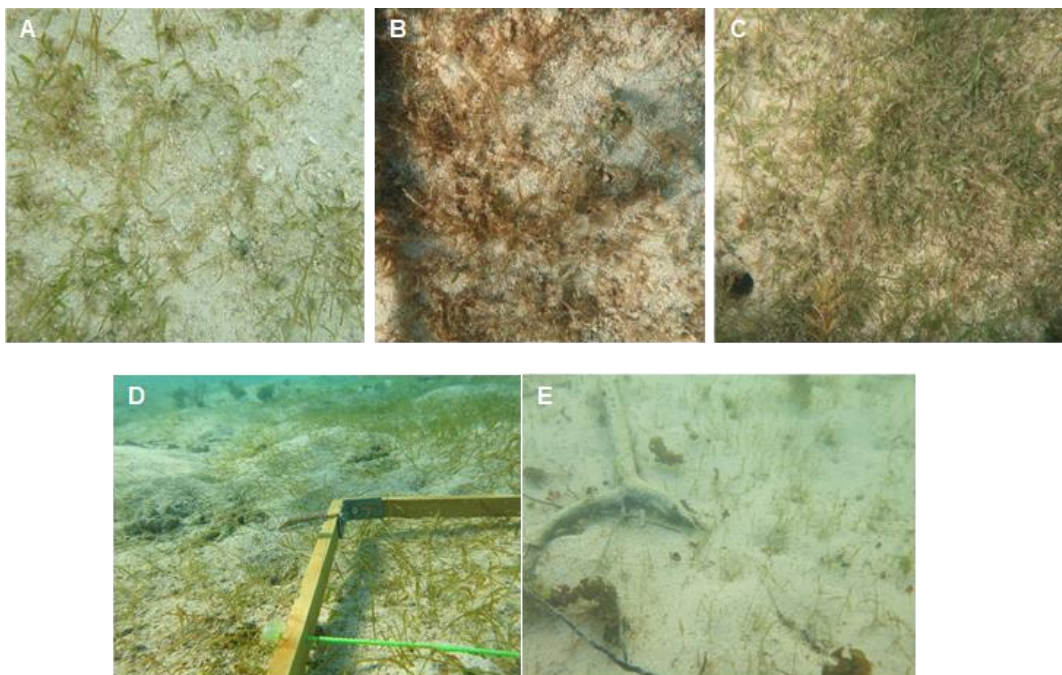


Figure 49 : Evolution de la radiale 3 de la station 5 (A en 2019, B en 2020), on observe une prolifération d'algues épiphytes ; C : *S. filiforme* et *H. wrightii* envahies par *H. stipulacea* ; D et E: densités variables de l'herbier.

3.3.2 Classification des herbiers

L'analyse du recouvrement au sein d'un quadrat de 1m² sur chacune des radiales de chaque station permet de mettre en évidence l'assemblage des espèces et les relations de dominance entre celles-ci. Cette analyse permet également de compléter les données obtenues sur les taux de recouvrements pour l'évaluation de l'état de santé des stations. Cependant, les pourcentages de recouvrement obtenus ici par l'analyse en « point count » ne sont représentatifs que d'un mètre-carré par radiale, ce mètre-carré n'étant pas positionné exactement au même endroit sur la radiale d'une année sur l'autre. Nous considérons pour l'analyse que ces données sont représentatives de chacune des stations mais elles sont donc à relativiser.

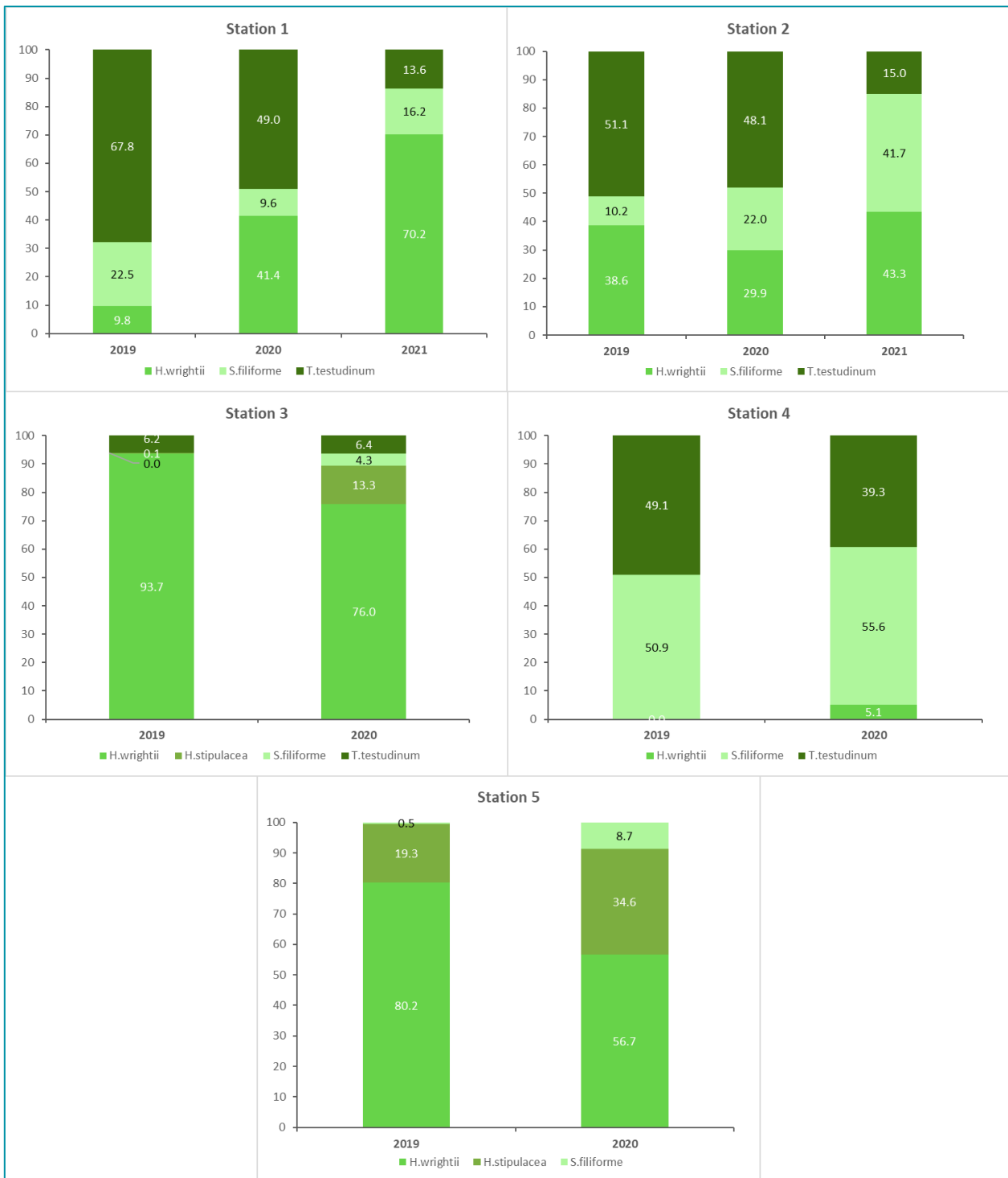


Figure 50 : Pourcentage du recouvrement moyen des espèces présentes au sein de chacune des stations

Les graphiques ci-dessus permettent de caractériser pour chaque station, l'assemblage des espèces. L'ensemble des herbiers de Petite Terre sont des herbiers mixtes, à deux espèces minimums, et majoritairement mixte à trois espèces.

Les relations de dominance entre les espèces évoluent au cours du temps pour trois stations sur cinq. Ces relations peuvent être définies comme suit : une espèce est dominante lorsque son taux de recouvrement moyen est \geq à 50%, deux espèces sont codominantes lorsque leur taux de recouvrement moyen sont équivalents à 10%.

- **Station 1** : l'herbier est mixte à trois espèces, *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* et *Halodule wrightii*.
 - En 2019 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *T. testudinum* (67,8%).
 - En 2020 : herbier mixte à trois espèces avec codominance de *T. testudinum* (49%) et *H. wrightii* (41,4%).
 - En 2021 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *H. wrightii* (70,2%) et codominance de *T. testudinum* (13,6%) et *S. filiforme* (16,2%).
- **Station 2** : l'herbier est mixte à trois espèces, *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* et *Halodule wrightii*.
 - En 2019 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *T. testudinum* (51,1%).
 - En 2020 : herbier mixte à trois espèces avec codominance de *S. filiforme* (22%) et *H. wrightii* (29,9%).
 - En 2021 : herbier mixte à trois espèces avec codominance de *S. filiforme* (41,7%) et *H. wrightii* (43,3%).
- **Station 3** : l'herbier est mixte à trois espèces, *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* et *Halodule wrightii* avec apparition de *Halophila stipulacea* en 2020.
 - En 2019 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *H. wrightii* (93,7%).
 - En 2020 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *H. wrightii* (70%).
- **Station 4** : l'herbier est mixte à deux espèces, *Thalassia testudinum* et *Syringodium filiforme* avec apparition de *Halodule wrightii*.
 - En 2019 : herbier mixte à deux espèces avec codominance de *T. testudinum* (49,1%) et *S. filiforme* (50,9%).
 - En 2020 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *S. filiforme* (55,6%).
- **Station 5** : l'herbier est mixte à trois espèces, *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii* et *H. stipulacea*.
 - En 2019 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *H. wrightii* (80,7%).
 - En 2020 : herbier mixte à trois espèces avec une espèce majoritaire : *H. wrightii* (56,7%).

Cette classification des herbiers est un moyen supplémentaire de mesurer l'évolution de la composition spécifique des herbiers. Cela met d'ailleurs en évidence que l'ensemble des stations montre une diminution du recouvrement de *T. testudinum* en faveur de l'espèce pionnière *H. wrightii*, ainsi que la prolifération de *H. stipulacea* dans les stations 3 et 5.

3.3.3 Bilan et comparaison de l'état de santé des herbiers aux études antérieures

Le bilan de l'état de santé des herbiers de la Réserve Naturelle de Petite Terre montre une modification de la composition spécifique des herbiers et une dégradation générale de leur qualité fonctionnelle, qui s'explique par une diminution du taux de recouvrement et des densités de *Thalassia testudinum* ainsi qu'une fragmentation de la majorité des herbiers. La régression de *T. testudinum* se fait au profit d'*H. wrightii*, espèce pionnière et moins exigeante sur le plan écologique, et dans une moindre mesure de l'espèce de stade intermédiaire *S. filiforme*. On observe notamment une colonisation des zones fragmentées par ces espèces. La hauteur moyenne de la canopée des herbiers à Petite Terre est globalement faible, ne dépassant pas 86mm (*T. testudinum* peut atteindre jusqu'à 60 cm de haut ailleurs dans les Antilles). Ces données témoignent d'un ensablement général avec des mouvements réguliers liés à un régime hydrodynamique variable, accentué par les houles cycloniques périodiques et probablement couplé pour certains herbiers au piétinement des visiteurs, au mouillage illégal et à la pression d'herbivorie qui se concentre davantage sur chaque patchs de *T. testudinum* au fur et à mesure de sa régression. La très faible abondance des espèces d'invertébrés associées aux herbiers peut confirmer la perte de fonctionnalité écologique.

Les stations 1 et 2 sont globalement évaluées en bon état malgré le déclin des densités de *T. testudinum* dès 2020. Les densités de la station 1 déclinent jusqu'à 27 faisceaux/m² en moyenne en 2021. Cette régression est plus modérée pour la station 2 (391 faisceaux/m² en 2021). Il est possible que les houles cycloniques aient fragilisé ces herbiers. Les stations 1 et 2 sont globalement peu protégées, exposées au courant et au déferlement des vagues. La très faible profondeur de la station 1 rend l'herbier particulièrement vulnérable aux conditions météorologiques. La fragmentation observée sur la station 2 pourrait aussi quant à elle avoir été provoquée par l'impact d'ancre de bateaux (mouillage illégal).

L'herbier protégé de la station 3 est un des herbiers en moins bon état, avec une diminution importante des zones monospécifiques à *T. testudinum* et une augmentation du taux de mitage sur un herbier déjà très fragmenté (34,7% en 2021). Bien que les limites de l'herbier soient malgré tout en progression, l'apparition de *H. stipulacea* sur cette station, ne permet pas vraiment d'espérer de bonnes conditions pour un rétablissement futur de *T. testudinum*.

La station 4 est la station en meilleur état, avec un recouvrement monospécifique en *T. testudinum* encore bien présent bien qu'en régression et subissant une assez forte érosion. La configuration du site (en « piscine ») le protège totalement du mouillage illégal et les visiteurs n'étant que peu attirés par ce milieu, il est bien protégé du piétinement. La prolifération de *H. stipulacea* sur cette station est cependant à noter.

La station 5 est la station la plus envahie par *H. stipulacea* et son état de santé général est moyen. Située près de la zone de mouillage organisé, où l'espèce a été observée pour la première fois en 2017. Il est probable que l'espèce ait été introduite à l'origine dans cette zone, rapportée par l'ancre de bateaux. Le mouillage illégal responsable de l'arrachage des plants peut être une cause de dispersion de l'espèce. Cette station est particulièrement marquée par l'absence de *T. testudinum* qui semblait pourtant être à priori présente avant 2019.

Le bilan de ce suivi vient globalement confirmer la tendance évolutive observée lors des suivis réalisés dans le cadre du « Réseau des Réserves » de Guadeloupe à l'échelle d'une station (située à l'extrémité Sud-Ouest de Terre-de-Haut) entre 2007 et 2019 (Créocéan, 2007 à 2019). Ces suivis soulignent particulièrement un bouleversement de la physionomie de l'herbier à la suite d'importantes houles cycloniques de 2017 avec l'ensablement de certains secteurs et la mise à nu du substrat rocheux sur d'autres. Les signes de fragmentations et de mitages sont également de plus en plus prononcés au cours de la période d'étude (taux moyen de 21%).

La fragilité de certaines zones des herbiers observée dès 2019 dans le cadre de la présente étude et la fragmentation déjà marquée notamment sur les stations 1 et 3 pourraient ainsi en partie s'expliquer par les perturbations de 2017, dont les effets, couplés à d'autres perturbations récurrentes, rendent très lente la restructuration des herbiers.

Les densités de 2019 selon l'étude menée par Créocéan sont en diminution, atteignant ainsi la valeur la plus basse jamais mesurée depuis le début de leurs suivis en 2007. Un déclin de la densité de *T. testudinum* est observé dès la deuxième année de suivi, bien que sa densité reste légèrement supérieure à celle de *S. filiforme*, espèce apparue en 2010.

Cette tendance à la diminution est en cohérence avec l'évolution des densités observées entre 2019 et 2021 pour *T. testudinum* mais ces densités ne sont pas supérieures à celles de *S. filiforme* dont le taux de recouvrement augmente sur certaines des stations. L'espèce *H. wrightii* n'a pas été prise en compte dans les suivis de 2007 à 2019 mais a été notée comme majoritairement présente sur une des 3 radiales étudiées. Sa dominance est aujourd'hui avérée dans la presque totalité des herbiers (excepté sur la station 4).

Tout comme indiqué par les présents suivis, la hauteur moyenne de la canopée était déjà faible entre 2007 et 2019, attestant d'un régime hydrodynamique fort et d'une dynamique constante d'ensablement.

Concernant les espèces benthiques associées, la diversité est faible et considérée en déclin au cours de ces suivis, avec un herbier considéré comme pauvre. En 2019, Créocéan ne relève que quelques oursins sur des zones mixtes d'herbier et de substrat dur ; et que les nacres et les lambis ne sont plus observés depuis quelques années à l'échelle de la seule station d'herbier suivie dans leur étude. Ces observations sont similaires à celles effectuées dans notre présente étude. Cette baisse de diversité et de densité pourrait être le résultat de l'évolution de la structure des herbiers devenus moins denses et moins étendus (IFRECOR, 2020). En effet, le déclin de *T. testudinum* et son remplacement par des espèces pionnières comme *H. wrightii* ou envahissante comme *H. stipulacea*, pose des problèmes pour les espèces associées aux herbiers, notamment les espèces herbivores comme les tortues qui se nourrissent de manière préférentielle sur les *T. testudinum* et en second lieu sur *S. filiforme*, plus riches nutritionnellement que *H. stipulacea*. Les herbiers à *T. testudinum* abritent également une faune plus diversifiée, probablement due à son meilleur rôle de protection étant donné la longueur de ses feuilles (Bouchon *et al.* 2015).

Les tendances évolutives des herbiers de la Réserve Naturelle de Petite Terre correspondent aux tendances observées à l'échelle de la Guadeloupe et des Antilles Françaises. Selon le dernier rapport de l'IFRECOR, les tendances évolutives des herbiers traduisent des modifications généralisées en termes de compositions spécifiques et de structure. La régression de *T. testudinum* au profit d'espèces opportunistes et envahissantes, traduit une détérioration de l'état de santé des herbiers des Caraïbes, par des changements de leur structure, de leur fonction et de leur résilience.

Les principales perturbations à l'origine de ces évolutions seraient liées aux impacts localisés de l'ancrage des bateaux et à la dégradation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux côtières (enrichissement en nutriments, pollutions et hypersédimentation). Ces perturbations constituent également les causes principales de déclin des herbiers de magnoliophytes marines à l'échelle mondiale.

Selon l'IFRECOR 2020, l'herbier de Petite Terre montre lui aussi des signes d'enrichissement nutritif par la présence de cyanobactéries mais surtout par l'enrichissement des feuilles des magnoliophytes en nutriments (azote et phosphore). Cet enrichissement nutritif serait d'origine naturelle. *T. testudinum* étant sensible aux pollutions organiques, cet enrichissement pourrait en partie expliquer son déclin à Petite Terre.

Les herbiers sont également menacés par l'espèce envahissante et très compétitive, *Halophila stipulacea*, qui est favorisée par ces conditions environnementales dégradées. Dans les Antilles, *H. stipulacea* s'est rapidement installée sur les fonds abrités. Ce qui correspond aux observations faites à Petite Terre dans un premier temps. Les stations 3, 4 et 5 (radiale 1 et 2 uniquement) sont les zones d'herbiers les plus protégées. L'espèce semble en effet peu résistante à la houle et aux courants dû au faible développement de son système racinaire. L'arrachage des plants par les courants, les fortes vagues, ou les ancres des bateaux est l'un des principaux vecteurs de propagation de l'espèce (Bouchon *et al.* 2015). Cependant, l'espèce a été observée sur la station 2 en juillet 2021, station plus exposée au courant ; et montre un développement important au niveau de la radiale 3 de la station 5 qui est aussi bien exposée au courant. On peut supposer qu'en l'absence de houles cycloniques qui pourraient limiter l'expansion d'*H. stipulacea* à Petite Terre ou générer des arrachages massifs, l'espèce peut continuer à se développer à partir des premiers noyaux de colonisation.

Une étude Bouchon *et al.* a été conduite en 2015 en Guadeloupe pour mieux comprendre le rapport de compétition entre *H. stipulacea* et *T. testudinum*. Celle-ci a montré une assez bonne résistance de *T. testudinum* à l'envahissement par *H. stipulacea*, probablement grâce au système racinaire des *Thalassia* qui peut descendre jusqu'à 5 m dans le sédiment et possiblement offrir une bonne résistance physique à l'espèce. Les autres espèces de magnoliophytes ont, comme *H. stipulacea*, un système racinaire peu développé ce qui leur confère une moindre résistance à l'espèce envahissante. Toutefois, l'étude n'a été réalisée que sur un seul site. Les conditions hydrodynamiques, la sédimentation et l'enrichissement organique de Petite Terre, fragilisant *T. testudinum* sur la majorité des sites, pourrait ainsi limiter la résistance de l'espèce à l'envahissement par *H. stipulacea*.

Les herbiers déjà dégradés peuvent être encore significativement affaiblis par d'autres facteurs pourtant naturels comme la pression d'herbivorie des tortues marines, celle-ci s'exerçant davantage sur les espèces natives. Également, les phénomènes de fortes houles pouvant conduire à d'importantes remobilisation du substrat. Enfin, l'échouage de sargasses pélagiques constituent également une menace pour les herbiers, ainsi que leur destruction physique (dragage, pêche, mouillage, piétinement) (IFRECOR, 2020).

La plupart de ces perturbations ont été observées à Petite Terre à cours des trois années de suivis ou sont connues des gestionnaires de la réserve (mouillage illégal, piétinement par les touristes).

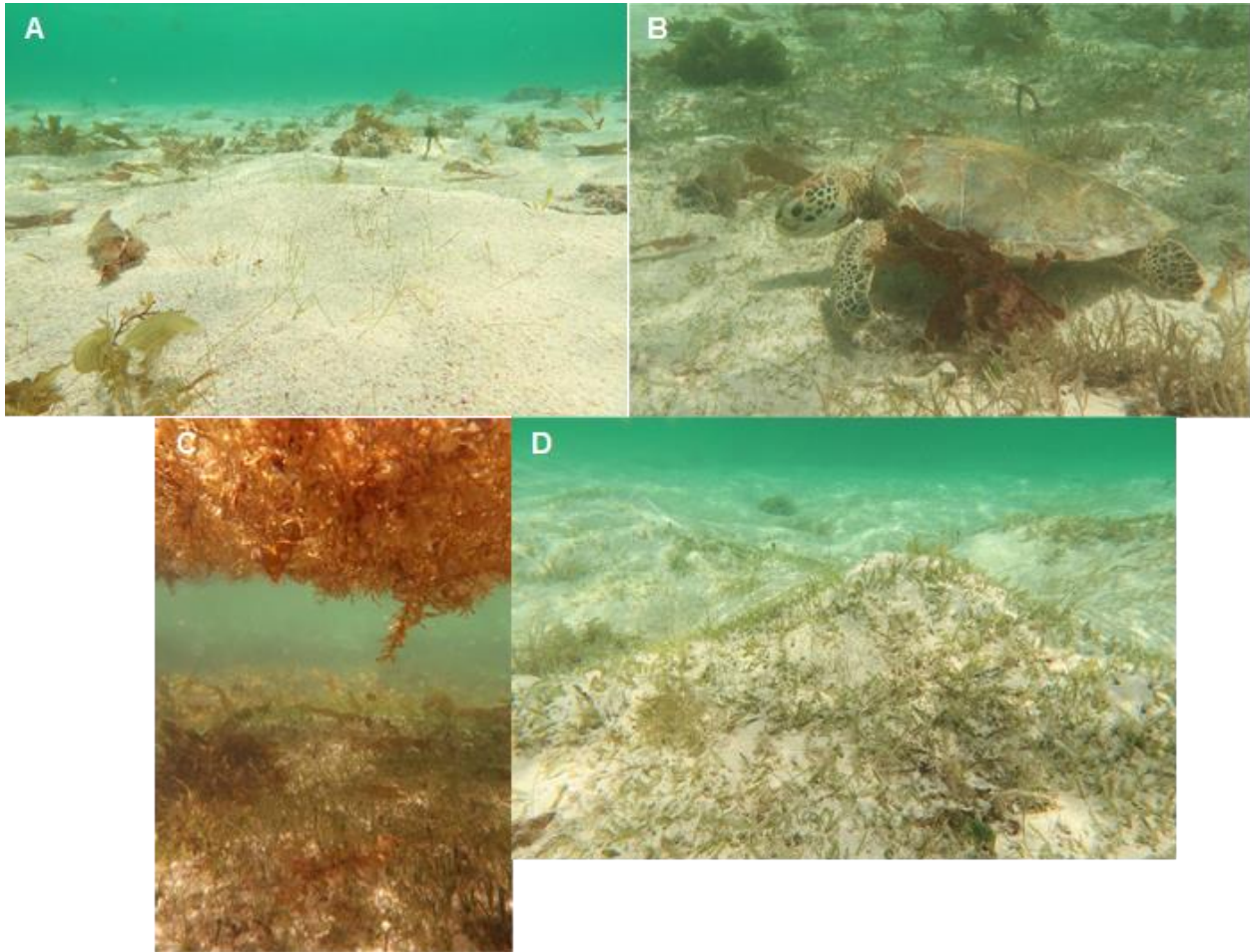


Figure 51: Pression sur les herbiers de magnoliophytes marines : A : hydrodynamisme fort et ensablement ; B : pression d'herbivorie par une tortue verte (*Chelonia mydas*) ; C : échouage de sargasse pélagique observé en 2021 ; D : prolifération d'*Halophila stipulacea*

3.4 Perspectives

3.4.1 Prospection d'autres zones d'étude

D'autres zones de la Réserve Naturelle de Petite Terre pourraient être prospectées afin de recenser de manière la plus exhaustive possible l'intégralité des herbiers présents. La présence d'herbiers dans des zones moins soumises à la pression touristique pourrait par exemple être une information intéressante afin de comparer l'évolution des herbiers en fonction des pressions qu'ils subissent. Au Sud de Terre-de-Bas, des petits lagons sont formés par des barrières coralliennes, potentiellement propices au développement d'un herbier. L'hydrodynamisme de ces zones pourrait également être différent et ainsi apporter des informations complémentaires sur les tendances évolutives des herbiers étudiés.

3.4.2 Préconisations pour le suivi des enveloppes des herbiers

La technique cartographique employée durant cette étude (par trajectoire GPS et/ou par photogrammétrie géoréférencée) apparaît comme la seule capable de disposer de la résolution d'observation nécessaire pour cartographier la limite des herbiers. En effet, compte tenu de la morphologie des herbiers de la réserve (feuilles courtes, fines, peu denses), ils ne possèdent pas de signature acoustique pour des levés au sondeur ou au sonar à balayage latéral.

Afin de cartographier les herbiers sous-marins peu profonds en zone littorale, plusieurs autres techniques basées sur l'utilisation de photographies en vue verticale sont possibles, photos satellites ou aériennes. Ces techniques ne sont cependant pas adaptées aux herbiers observés à Petite Terre, principalement pour des questions de résolution des images en rapport avec la morphologie des herbiers. Par exemple, la BD ORTHO (les seules orthophotographies aériennes disponibles pour la Guadeloupe) a une résolution de 20 cm qui est insuffisante pour détecter les herbiers d'*H. wrightii*, de *S. filiforme* et de *H. stipulacea* (ainsi que la *T. testudinum* sous sa forme rase telle qu'observée à Petite Terre). A cela s'ajoute l'ancienneté des photos, qui datent déjà de 2017.

La technique dite de l'hyperspectral, consistant à analyser les longueurs d'ondes lumineuses des pigments chlorophylliens des plantes marines, habituellement très efficaces sur les espèces telles que *Posidonia oceanica* et *Zostera marina*, serait ici peu efficace, encore une fois pour des questions de résolution des images et de morphologie des herbiers. De plus, en Guadeloupe, aucune donnée photographique hyperspectrale des zones littorales n'est disponible. Afin de réaliser des levés photographiques en utilisant la technique de l'hyperspectral il serait nécessaire de les réaliser par drone aérien équipé de capteurs spécifiques. Au vu des petites surfaces à cartographier et du coût d'un tel levé, l'avantage cartographique est minime (au mieux), sans garantie que les herbiers les moins denses soient détectés

La technique qui a été employée dans le cadre de la présente étude dispose donc de sérieux avantages au vu de la topologie de la zone à cartographier et des caractéristiques des herbiers :

- Emploi d'une bouée de chasse équipée d'un GPS haute précision synchronisé avec un appareil photo permettant une précision de positionnement centimétrique et une haute résolution d'observation ;
- Le faible tirant d'eau de la bouée permet de la déployer à très faible profondeur (jusqu'à 20 cm de profondeur) et elle ne nécessite qu'un unique nageur en surface pour être manipulée ;
- La haute précision de positionnement permet une très bonne répétitivité des mesures même lorsque l'opérateur de la bouée change d'une campagne de mesure à l'autre (ce qui est le cas lors de cette étude) ;
- Les orthophotographies géoréférencées issues de la photogrammétrie sous-marine permettent de placer avec précision la position de la limite des herbiers ainsi que d'obtenir des données *a posteriori* sur les fonds marins (présence d'espèces sessiles benthiques ou de déchets).

Des limites à cette méthode ont également été observées durant cette étude, le plus souvent en lien avec les caractéristiques des herbiers :

- Les herbiers composés d'*H. stipulacea* ont tendance à piéger des algues transportées par le courant. Cette couverture algale rend parfois difficile la détection de la limite de l'herbier que ce soit dans l'eau au moment de l'acquisition des données ou sur les orthophotographies ;

- La colonisation du substrat vierge par *Halodule wrightii* et *H. stipulacea* est réalisée par des faisceaux traçants très longs, s'étendant parfois sur plusieurs mètres à partir de l'herbier principal. Il est alors difficile de situer la position de la limite de ce dernier, c'est à dire prendre en compte ou non ces faisceaux comme faisant partie de l'herbier.

Les suivis des enveloppes d'herbiers dans la réserve ne nécessitent donc pas l'utilisation de matériel lourd et de navires compte tenu des faibles profondeurs à cartographier. Le point crucial est la précision du matériel de positionnement utilisé qui doit être centimétrique afin de pouvoir suivre finement l'évolution surfacique. La photogrammétrie sous-marine géoréférencée, quant à elle, est un réel apport afin d'aller plus loin dans l'analyse des fonds cartographiés. Elle constitue notamment une importante source d'informations pouvant servir *a posteriori* pour des thématiques autres que les herbiers sous-marins.

3.4.3 Préconisations pour le suivi de l'état de santé des herbiers

A court terme, un suivi supplémentaire pour les stations 3, 4 et 5 non étudiées en 2021 serait intéressant afin de compléter la tendance évolutive, vu notamment le déclin particulièrement marqué de *Thalassia testudinum* sur les stations 1 et 2.

A plus long terme, un suivi annuel de l'ensemble des stations serait également intéressant à poursuivre sur plusieurs années afin d'évaluer les changements spécifiques et structurels et l'impact des mesures de protection. Notamment, l'herbier protégé de la station 3, pour lequel les effets de la protection n'ont pas encore été observés. La présence de nombreux lambis en 2019 peut attester d'un effet positif de la protection, au moins sur les invertébrés benthiques.

Le nombre important de stations à étudier n'a pas permis d'effectuer un suivi deux fois par an, en saison sèche et en saison humide, sur chacun des herbiers, ce qui n'a pas permis une analyse intra-annuelle. L'évolution au cours d'une année serait intéressante à étudier, bien que les faibles variations des conditions météorologiques entre les deux saisons aux Antilles présagent probablement d'une faible variation intra-annuelle des herbiers.

Des suivis sur des transects fixes matérialisés pourraient permettre des observations et un diagnostic plus précis de l'état de santé des différents herbiers. Cependant, le fort hydrodynamisme de certains sites rend l'implantation de marqueurs permanents difficile. Les piquets positionnés par Créocéan pour les suivis de 2007 à 2019 furent difficilement localisés d'une année sur l'autre avec des pertes régulières.

La classification des herbiers par l'analyse en « *point count* » a montré des proportions variables selon les stations de *S. filiforme* et *H. wrightii*. Les futures suivis devraient donc quantifier séparément les densités et la longueur moyenne de la plus longue feuille de chacune des deux espèces.

La méthode en « *point count* » semble également apporter une information assez intéressante concernant les relations entre les espèces et leurs évolutions. Son application avec des quadrats fixes en trois points de chacune des radiales par exemple pourrait permettre un suivi plus précis de l'évolution de la composition spécifique et de la structure des herbiers. Cependant, comme évoqué plus haut l'implantation de marqueurs fixes paraît difficile sur certaines stations et le temps nécessaire à l'analyse est conséquent.

L'évolution surfacique d'*Halophila stipulacea*, dont la prolifération est assez inquiétante pourrait faire l'objet d'un suivi particulier afin de quantifier sa progression et ses relations avec les autres espèces présentes (résistance, cohabitation ou envahissement).

La zone à plus forte densité en *T. testudinum* est la station 4, aussi, il serait intéressant de surveiller la progression de *H. stipulacea* sur cette station et l'éventuelle résistance de *T. testudinum*.

Il nous a semblé que beaucoup des variations observées au niveau des herbiers (enveloppes, densités) pouvaient être dues à des mouvements sédimentaires. Aussi, il apparaîtrait intéressant de réaliser des suivis hydrosédimentaires et bathymétriques à pas de temps réguliers pour comprendre et quantifier ces mouvements ; ainsi que pour préciser leur impact sur la dynamique des herbiers.

3.4.4 Préconisation en matière de gestion des herbiers

Les perturbations à l'origine du déclin général des herbiers de Petite Terre semblent être majoritairement d'origines naturelles (mouvements hydrosédimentaires surtout) et ne peuvent faire l'objet de mesures de gestion particulières. Il convient cependant de continuer à limiter autant que possible les perturbations d'origines anthropiques qui viennent fragiliser d'autant plus les herbiers.

Le maintien de la mise en défense de la station 3 reste la mesure la plus efficace contre les perturbations anthropiques physiques (piétinement notamment). Et bien que l'état de l'herbier soit assez médiocre, l'observation de nombreux lambis en 2019 sur cette zone pourrait être un signe positif.

La mise en protection de la station 4 pourrait également être envisagée afin de préserver l'herbier à *T. testudinum* qui présente le meilleur état de santé et les plus fortes densités. Ceci afin de limiter sa fragilisation qui pourrait engendrer une plus faible résistance face à *H. stipulacea*. L'encerclement de la zone par des bouées et des cordages, tel que pour la station 3 pourrait être mis en place, ainsi qu'un panneau d'information pour sensibiliser les usagers aux impacts du piétinement.

La gestion du mouillage illégal reste un élément essentiel dans la limitation de la prolifération de *H. stipulacea* et dans la fragilisation des herbiers (fragmentation). Il est essentiel de maintenir la surveillance du lagon, la sensibilisation des plaisanciers et des professionnels du secteur.

Aucune méthode de lutte pouvant être utilisée à grande échelle contre *H. stipulacea* n'est aujourd'hui connue. Toutefois, les surfaces étant encore limitées à Petite Terre, une expérimentation d'arrachage pourrait être étudiée. Il faudrait alors respecter scrupuleusement un protocole prévenant toute dispersion de boutures vers d'autres secteurs.

4 Bibliographie

Abadie A, Boissery P, Viala C 2018. Georeferenced underwater photogrammetry to map marine habitats and artificial structures. *The Photogrammetric Record*. 33, 448–469.

Bouchon, Claude, Julie Mellinger, et Yolande Bouchon-Navaro. « *Halophila stipulacea* : une espèce invasive de Phanérogame marine dans les Antilles », 2015, 18p.

Créocéan pour l'association Tité « Suivi de l'état de santé des biocénoses marines de la Réserve Naturelle de Petite Terre – Année 2019 et évolution 2007-2019 », 2020, 84p.

Ifrecor, 2016. Etat des récifs coralliens et des écosystèmes associés de l'Outre-mer Français en 2015, 168p.

Ifrecor, 2021. Etat de santé des récifs coralliens, herbiers marins et mangroves des outre-mer français. Bilan 2020. 335 pp.

Kerninon, Fanny. « Première actions de mise en place d'un réseau d'observation des herbiers de phanérogames marines de l'Outre-mer », 2012, 135p.

Legrand, Hélène. « Cartographie des biocénoses benthiques du littoral martiniquais et eutrophisation en zone récifale en relation avec les sources de pression d'origine anthropique », 2012, 297p.

Le Moal, Morgane, Aish, Annabelle, Monnier, Olivier. « Récifs coralliens et herbiers des outre-mer. Réflexions autour du développement d'outils de bioindication pour la directive cadre sur l'eau », Synthèse de l'Onema, 2012-2014, 47p.

Le Moal, Morgane, Kerninon, Fanny, Aish, Annabelle, Monnier, Olivier, Dore, Anthony, Witte Isabelle, Payri, Claude. « Développement d'indicateurs benthiques DCE (benthos récifal et herbiers de phanérogames) dans les DOM : typologie des herbiers de Martinique : version finale », 2015, 35p.

Hily, Chrisitan, Kerninon, Fanny. « Proposition de protocole de suivi stationnel des herbiers de phanérogames marines : paramètres mesurés et détails techniques », Document de travail partiel (extrait du rapport « Quels protocoles pour quelles questions ? Propositions d'une boîte à outils pour l'observation des herbiers de phanérogames marines à destination des gestionnaires des espaces littoraux de l'Outre-mer. Hily C. Kerninon F. » en préparation), 2013, 10p.

5 Annexes

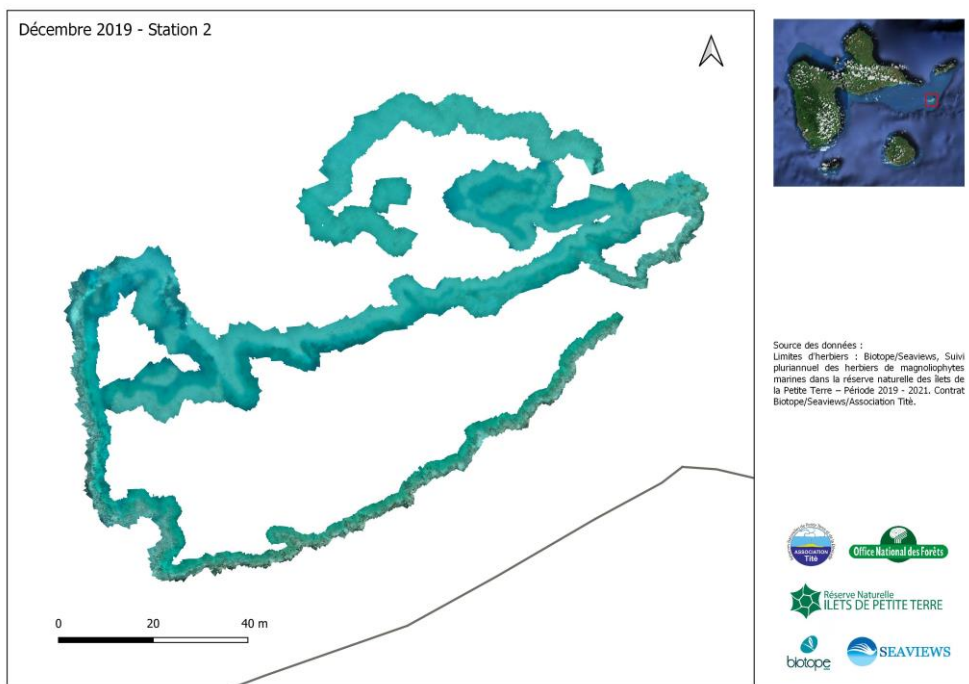


Figure 52 : Orthophotographie sous-marine de la Station 2 en décembre 2019

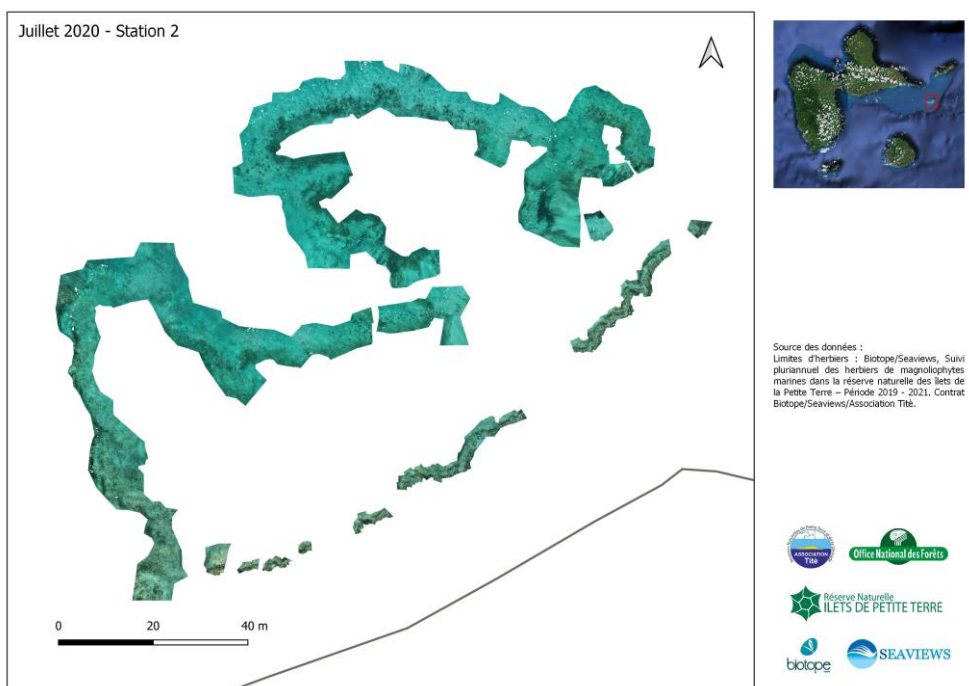


Figure 53 : Orthophotographie sous-marine de la Station 2 en juillet 2020

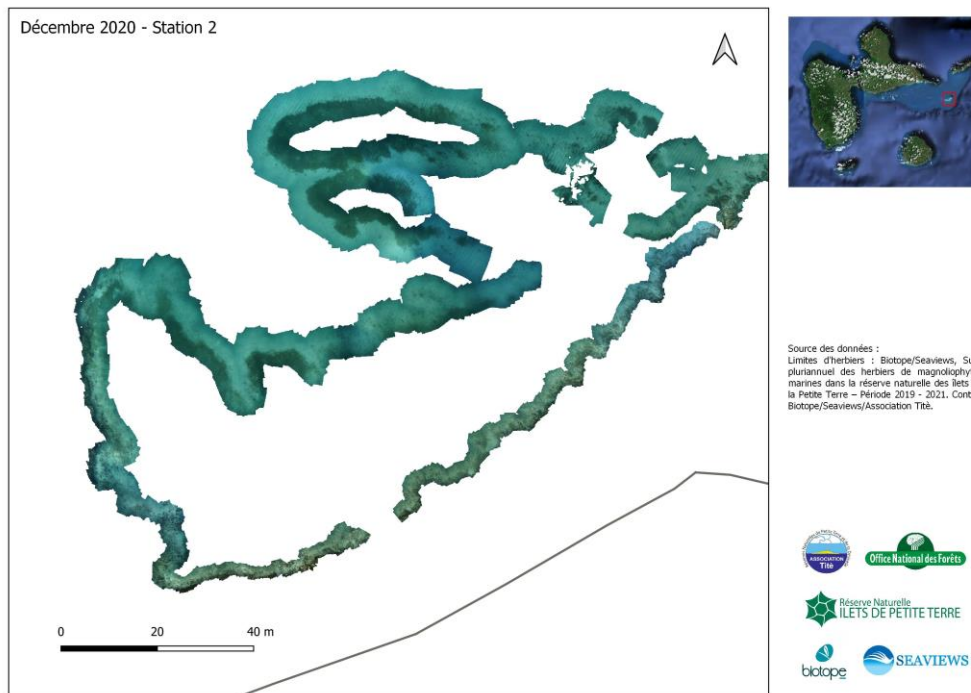


Figure 54 : Orthophotographie sous-marine de la Station 2 en décembre 2020

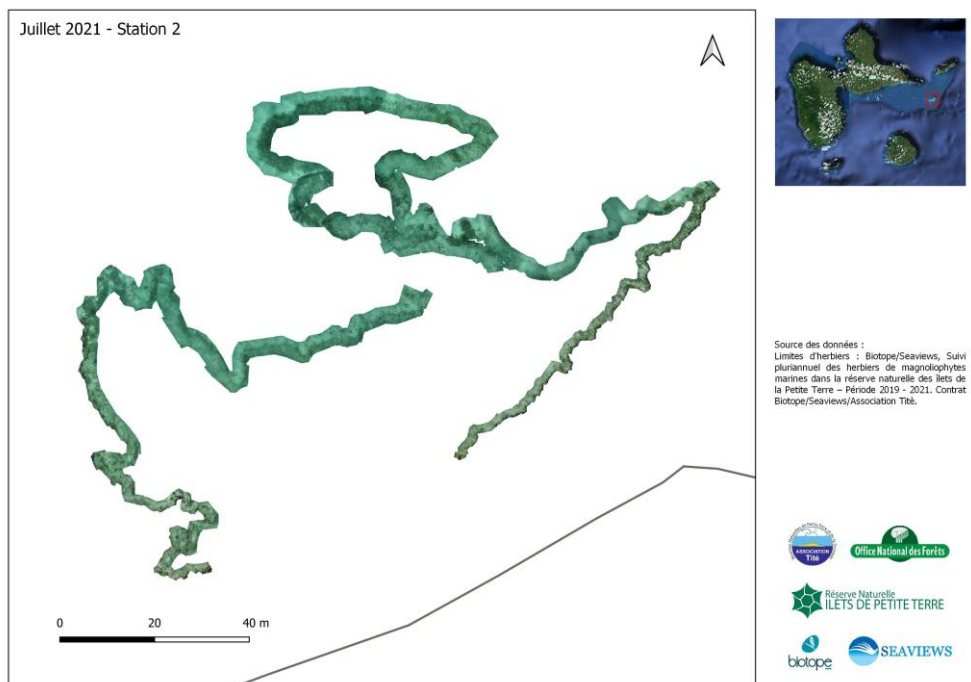
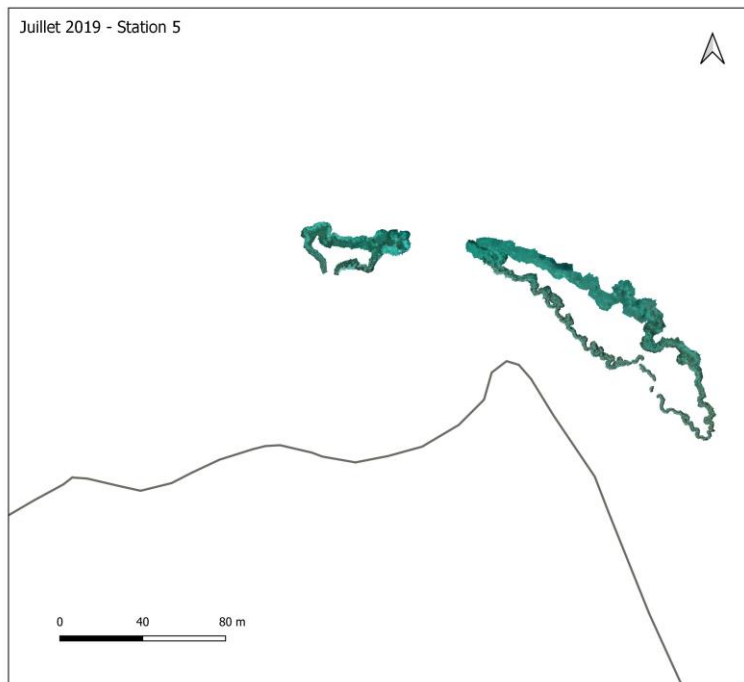


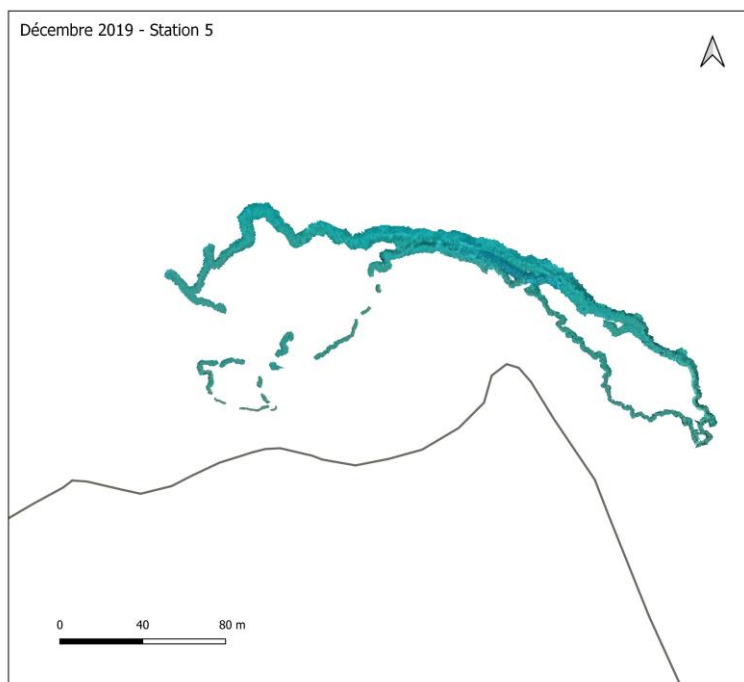
Figure 55 : Orthophotographie sous-marine de la Station 2 en juillet 2021



Source des données :
 Limites d'herbiers : Biotope/Seaviews, Suivi
 pluriannuel des herbiers de magniophytes
 marines dans la réserve naturelle des îlets de
 la Petite Terre – Période 2019 - 2021. Contrat
 Biotope/Seaviews/Association Tité.



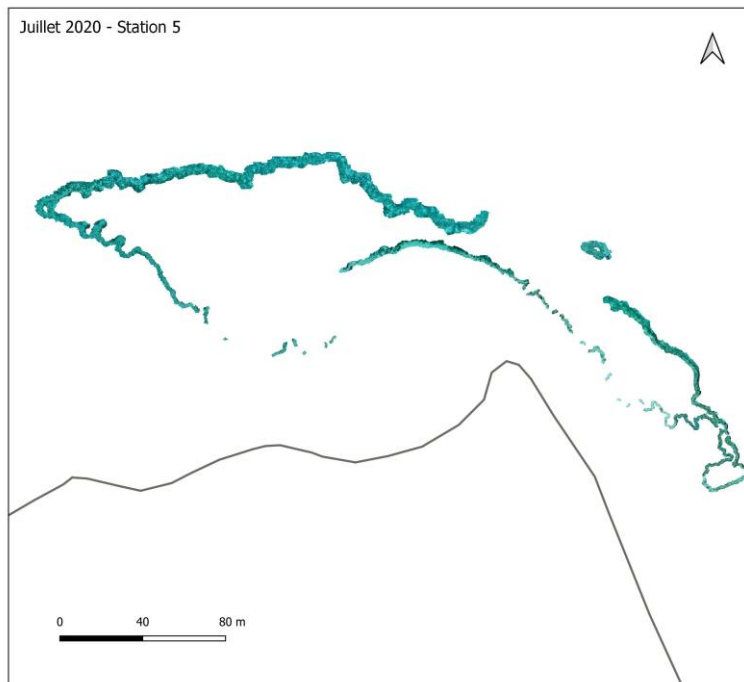
Figure 56 : Orthophotographie sous-marine de la Station 5 en juillet 2019



Source des données :
 Limites d'herbiers : Biotope/Seaviews, Suivi
 pluriannuel des herbiers de magniophytes
 marines dans la réserve naturelle des îlets de
 la Petite Terre – Période 2019 - 2021. Contrat
 Biotope/Seaviews/Association Tité.



Figure 57 : Orthophotographie sous-marine de la Station 5 en décembre 2019



Source des données :
 Limites d'herbiers : Biotope/Seaviews, Suivi
 pluriannuel des herbiers de magniophytes
 marines dans la réserve naturelle des îlets de
 la Petite Terre - Période 2019 - 2021. Contrat
 Biotope/Seaviews/Association Tité.



Figure 58 : Orthophotographie sous-marine de la Station 5 en juillet 2020



Source des données :
 Limites d'herbiers : Biotope/Seaviews, Suivi
 pluriannuel des herbiers de magniophytes
 marines dans la réserve naturelle des îlets de
 la Petite Terre - Période 2019 - 2021. Contrat
 Biotope/Seaviews/Association Tité.



Figure 59 : Orthophotographie sous-marine de la Station 5 en décembre 2020.

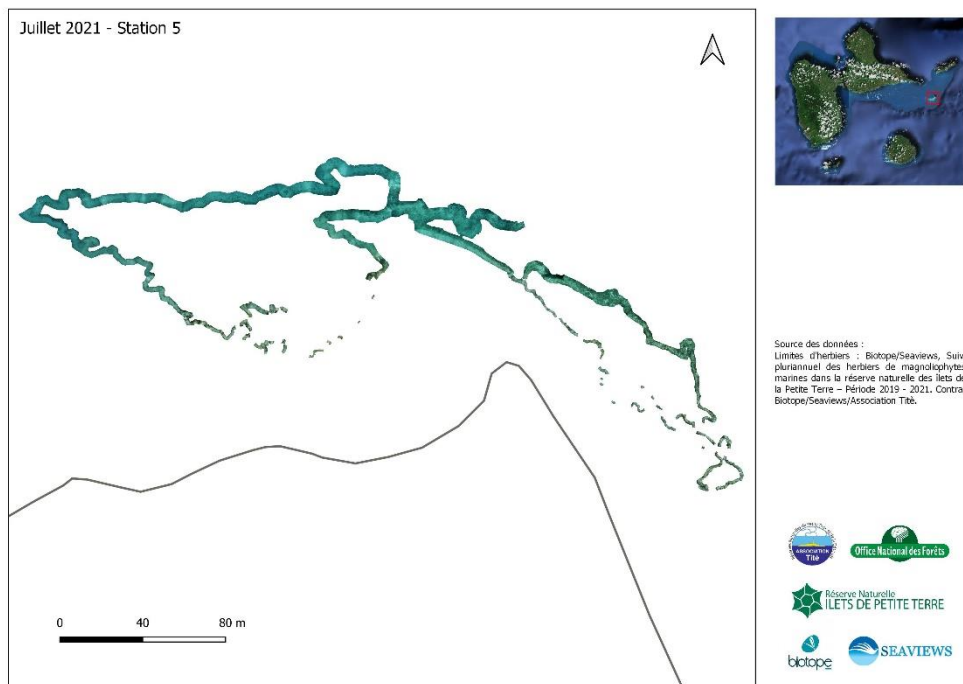


Figure 60 : Orthophotographie sous-marine de la Station 5 en juillet 2021.