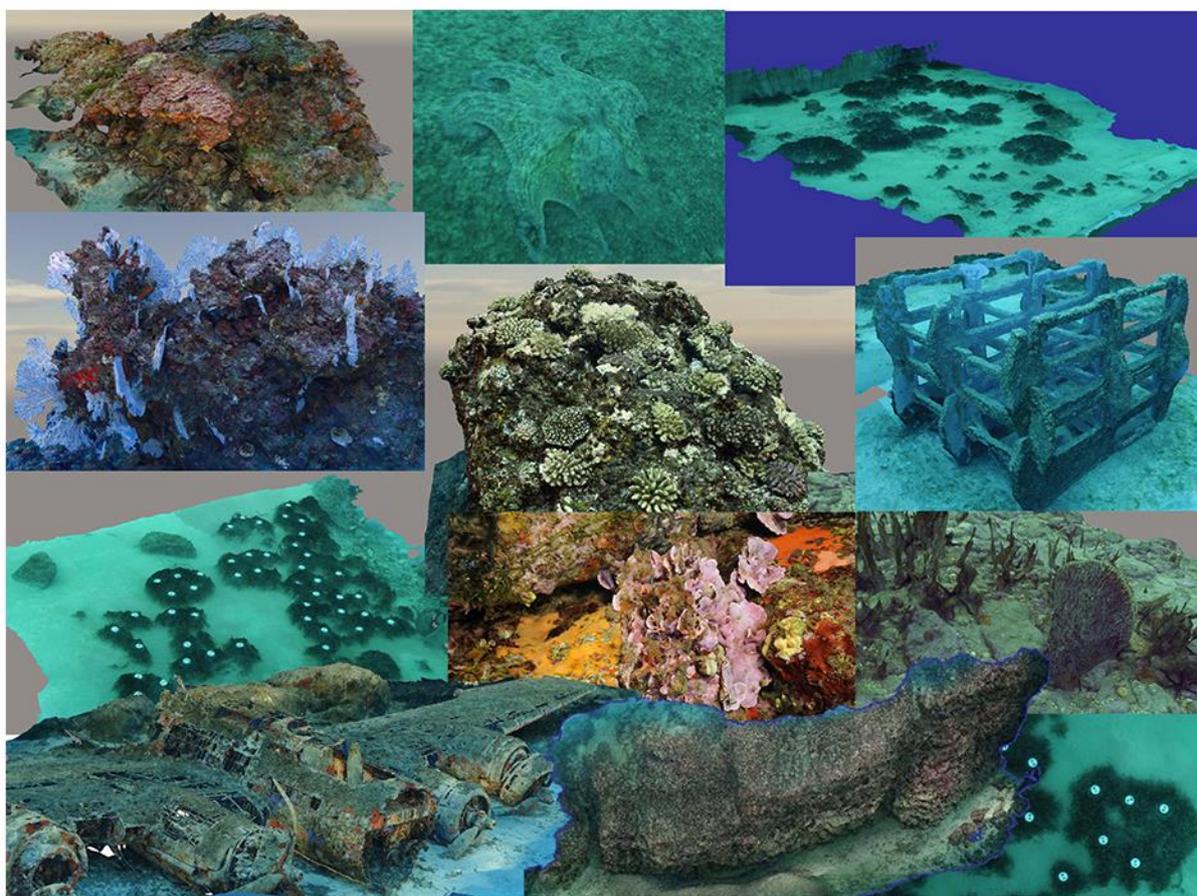


## Acquisitions photogrammétriques 2018 - 2019 et développements méthodologiques



Mars 2020

**ANDROMÈDE**  
OCÉANOLOGIE

7, place Cassan - Quai des pêcheurs  
34 280 Carnon - France  
Tél. : 04.67.66.32.48  
contact@andromede-ocean.com





**Coordination Andromède :**

HOLON Florian, [florian.holon@andromede-ocean.com](mailto:florian.holon@andromede-ocean.com)



**Coordination Agence de l'Eau RMC :**

BOISSERY Pierre, [Pierre.BOISSERY@eurmc.fr](mailto:Pierre.BOISSERY@eurmc.fr)



**Participants aux missions de terrain :**

DELARUELLE Gwenaëlle, DESCAMP Pierre, GUILBERT Antonin, HOLON Florian, MARRE Guilhem, MAURON Stephen, PERSONNIC Sébastien.

**Traitement des données et rédaction :**

MARRE Guilhem, DELARUELLE Gwenaëlle, FERY Célia, HOLON Florian.

**Crédit photographique :**

MARRE Guilhem, HOLON Florian

**Ce document doit être cité sous la forme suivante :**

*ANDROMÈDE Océanologie, 2020. Acquisitions photogrammétriques 2018 – 2019 et développements méthodologiques. Contrat Andromède Océanologie / Agence de l'eau. 137 p.*



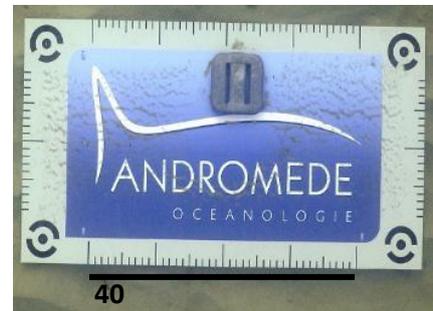
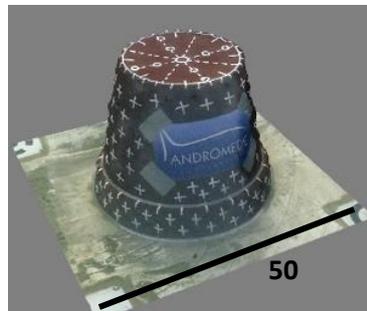
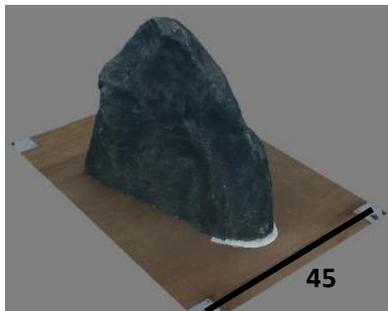
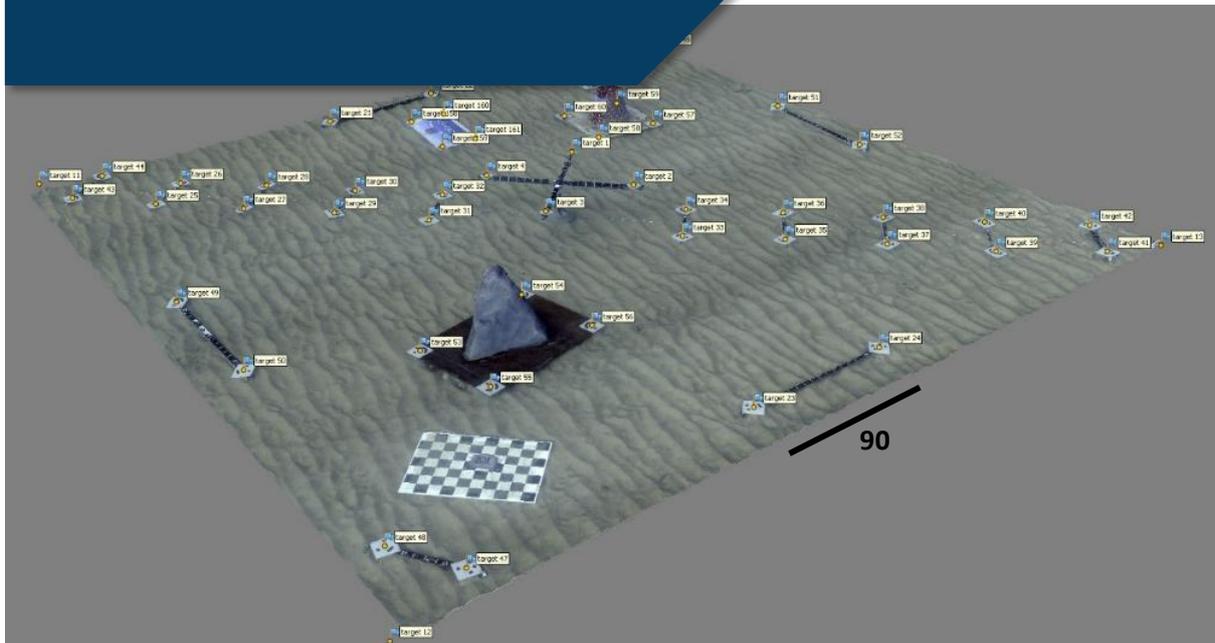
# Sommaire

CHAPITRE 1 : STANDARDISATION DU PROTOCOLE D'ACQUISITION.....	2
I. OBJECTIFS .....	2
II. METHODOLOGIE.....	2
III. PUBLICATION.....	4
CHAPITRE 2 : CARTOGRAPHIE DES HERBIERS DE POSIDONIE : APPORT DE LA PHOTOGRAMMETRIE	6
I. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	6
II. CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES HERBIERS.....	7
II.A. Méthodologie .....	7
II.B. Publication.....	8
III. TELEMETRIE ACOUSTIQUE ET PHOTOGRAMMETRIE : QUELLE METHODE POUR CARTOGRAPHIER LES HERBIERS ?.....	8
III.A. Nature du substrat de l'habitat .....	10
III.B. Taille de la zone.....	11
III.C. Limite inférieure clairsemée.....	12
III.D. Limite inférieure franche.....	14
III.E. Limite inférieure progressive.....	18
III.F. Limite inférieure régressive.....	20
III.G. Limite inférieure érosive.....	23
III.H. Synthèse.....	25
IV. VALORISATION DE LA PHOTOGRAMMETRIE POUR ILLUSTRER ET APPUYER LES RESULTATS OBTENUS PAR TELEMETRIE .....	29
CHAPITRE 3 : MODELISATION DES SITES TEMPO ET RECOR 2018-2019.....	35
I. SITES MODELISES EN 2018 .....	35
I.A. TEMPO.....	35
I.B. RECOR.....	49
II. SITES MODELISES EN 2019 .....	66
II.A. TEMPO.....	66
II.B. RECOR.....	85
CHAPITRE 4 : ACQUISITIONS SUR LES RECIFS ARTIFICIELS DU PARC MARIN DE LA COTE BLEUE .	113
I. PLAN D'ENSEMBLE .....	113
II. ACQUISITIONS PHOTOGRAMMETRIQUES.....	114
II.A. Module SB8.....	114
II.B. Module SB6.....	115
II.C. Module SS2.....	116
CHAPITRE 5 : AVANCEES ET PERSPECTIVES SUR L'ANALYSE DES MODELES RECOR.....	118
I. ETAT ACTUEL DES AVANCEES ET DEVELOPPEMENTS .....	118
I.A. Qualification de la structure du coralligène .....	118
I.B. Reconnaissance automatique d'espèces du coralligène.....	121
II. PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENTS.....	124
II.A. Reconnaissance d'espèces sur les modèles 3D.....	124
II.B. Développement d'un outil de sciences participatives coralligène.....	126
II.C. Suivi temporel des récifs coralligènes.....	126
II.D. Caractérisation spatiale des assemblages coralligènes.....	128



# Chapitre 1

## Standardisation du protocole d'acquisition



L'objectif de ce chapitre est de standardiser le protocole d'acquisition pour la modélisation 3D des habitats étudiés (herbier de posidonie, récifs coralligènes), et de mesurer la résolution des modèles produits ainsi que la précision et la variabilité des mesures réalisées sur nos modèles. Les résultats de ces analyses ont fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue « Frontiers in Marine Science ».

# Chapitre 1 : Standardisation du protocole d'acquisition

## I. Objectifs

La photogrammétrie permet de reconstituer en trois dimensions (3D) un objet ou une scène en utilisant la parallaxe entre des clichés pris sous différents angles de vue. Si les conditions d'acquisition sont relativement simples et maîtrisées en milieu terrestre, le monde subaquatique présente de nombreuses contraintes aux prises de vue photogrammétriques : pas de positionnement simple par système GPS, une visibilité réduite qui impose un rapprochement à l'objet et donc un nombre de photos plus important, l'utilisation de lumières artificielles au-delà d'une certaine profondeur, la présence de particules en suspension pouvant fausser les algorithmes, et enfin un temps d'acquisition limité par les contraintes physiologiques inhérentes à la plongée sous-marine.

L'objectif de cette première étude était de standardiser le protocole d'acquisition pour la modélisation 3D des habitats étudiés (herbier de posidonie, récifs coralligènes), et de mesurer la résolution des modèles produits ainsi que la précision et la variabilité des mesures réalisées sur nos modèles. Plus particulièrement, il s'agissait de tester l'effet des paramètres suivants sur la résolution et la précision des modèles :

- Type d'appareil photo numérique (APN) ;
- Orientation des prises de vue (verticale ou bien verticale + oblique) ;
- Altitude de vol (distance à la surface modélisée) ;
- Densité de photos (nombre de photos par unité de surface).

## II. Méthodologie

Deux expériences ont été menées dans cette étude.

La première a permis de tester toutes les combinaisons possibles des facteurs cités ci-dessus sur une même zone d'étude, et d'évaluer leurs effets relatifs sur la qualité de l'alignement des photos et la résolution des modèles. Ces analyses ont été menées avec le logiciel R.

La seconde expérience visait à quantifier la précision et la variabilité de mesures réalisées sur les modèles 3D reconstruits avec le jeu de paramètres optimal défini après analyses des résultats de l'expérience 1.

La figure 1 détaille la méthodologie employée pour cette étude.

**Experiment 1**

**Step 1: Acquisition with all combinations of parameters**

2 cameras   2 orientations   2 elevations   8 camera densities   3 replicates

$2 \times 2 \times 2 \times 8 \times 3 = 192$  datasets

**Data Processing with Agisoft Photoscan**

**Reconstruction settings:**  
 Alignment: High / Key point limit: 60 000 / no tie point limit / Generic preselection enabled  
 Optimize alignment: all properties  
 Dense cloud: High / mild filtering  
 Mesh: High / Arbitrary surface type  
 Texture size: 4096 pix / mosaic blending mode

**Model evaluation:**  
 Reprojection error (pix)  
 Dense cloud size (million points)  
 Model resolution (mm)  
 Total Processing Time (h)

**Step 2: Multivariate analysis with R (selection of the best parameters)**

Minimizing reprojection error   Maximizing dense cloud size   Minimizing model resolution   Minimizing processing time

**Step 3: Acquisition with the best combination of parameters**

**For each replicate, measure on the 3D model of:**

Length   Area   Area and volume

6 replicates → **Data Processing with Agisoft Photoscan** (same reconstruction settings than step 1)

**Experiment 2**

**Step 4: Best method's resolution, accuracy and precision**

**Resolution:** Average distance between 2 vertices

**Accuracy (mean error / C2M distance):** C2M distance with reference model

**Precision (SD error / C2M distance):** C2M distance with reference model

**For lengths, areas, volumes:**

$$\text{Relative measurement error} = \frac{3D \text{ measure} - \text{Real dimension}}{\text{Real dimension}}$$

Figure 1 : Méthodologie employée pour l'étude de l'effet des paramètres d'acquisition sur la qualité des modèles 3D.

### III. Publication

Les résultats de ces analyses ont fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue « Frontiers in Marine Science » en Mai 2019 (Annexe1) :



## Monitoring Marine Habitats With Photogrammetry: A Cost-Effective, Accurate, Precise and High-Resolution Reconstruction Method

Guilhem Marre<sup>1,2,3\*</sup>, Florian Holon<sup>1</sup>, Sandra Luque<sup>2</sup>, Pierre Boissery<sup>4</sup> and Julie Deter<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Andromède Océanologie, Mauguio, France, <sup>2</sup>TETIS, University of Montpellier, AgroParisTech, CIRAD, CNRS, IRSTEA, Montpellier, France, <sup>3</sup>ISEM, University of Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier, France, <sup>4</sup>Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Marseille, France, <sup>5</sup>MARBECC, University of Montpellier, CNRS, IFREMER, IRD, Labcom INTOSea, Montpellier, France

#### OPEN ACCESS

##### Edited by:

Katherine Dattorn,  
Macquarie University, Australia

##### Reviewed by:

Wili F. Figueira,  
University of Sydney, Australia  
Mitch Bryson,  
University of Sydney, Australia

##### \*Correspondence:

Guilhem Marre  
guilhem.marre@  
andromede-ocean.com

##### Specialty section:

This article was submitted to  
Marine Ecosystem Ecology,  
a section of the journal  
Frontiers in Marine Science

Received: 26 February 2019

Accepted: 08 May 2019

Published: 24 May 2019

##### Citation:

Marre G, Holon F, Luque S,  
Boissery P and Deter J (2019)  
Monitoring Marine Habitats With  
Photogrammetry: A Cost-Effective,  
Accurate, Precise  
and High-Resolution Reconstruction  
Method. *Front. Mar. Sci.* 6:276.  
doi: 10.3389/fmars.2019.00276

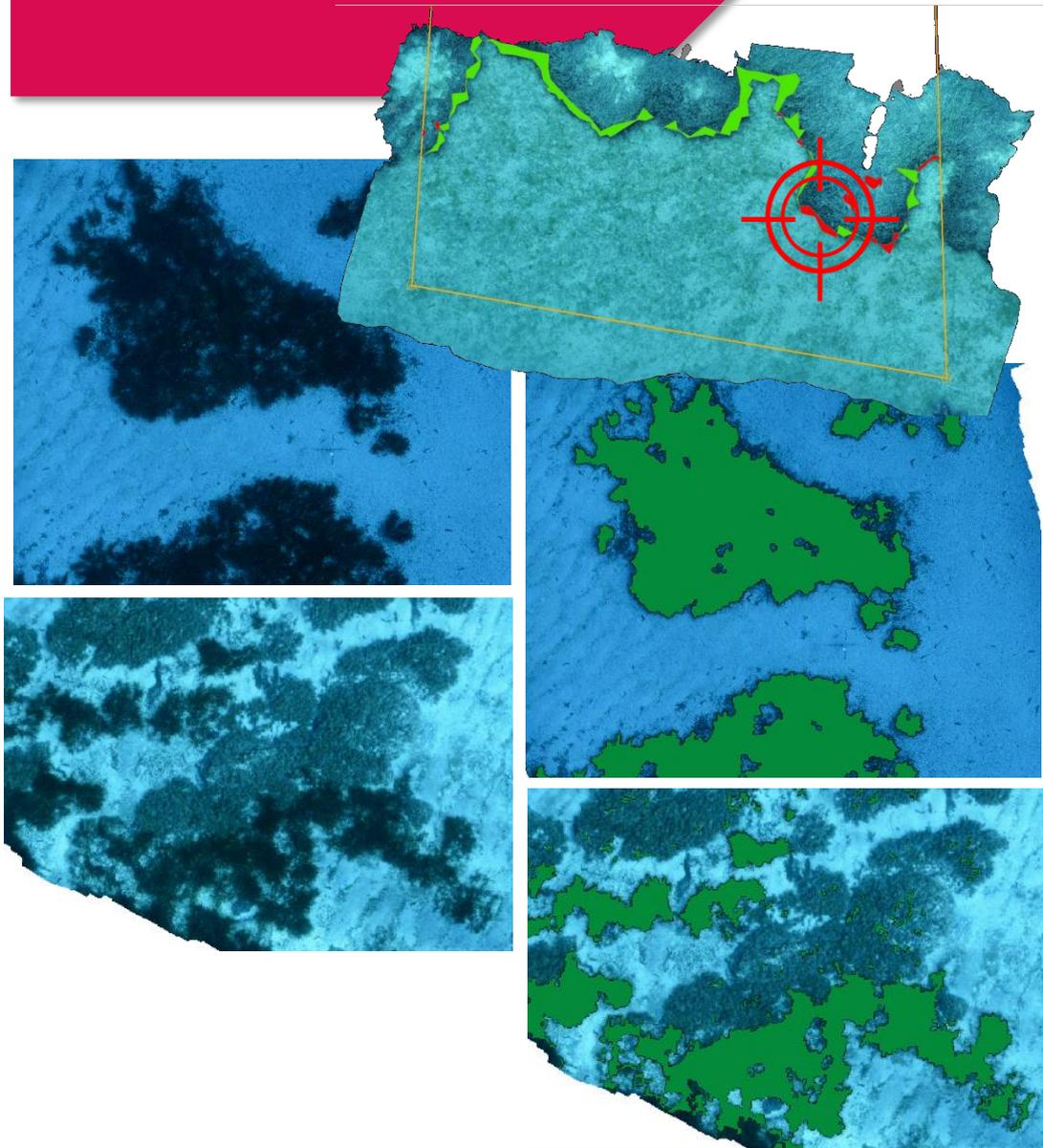
Underwater photogrammetry has been increasingly used to study and monitor the three-dimensional characteristics of marine habitats, despite a lack of knowledge on the quality and reliability of the reconstructions. More particularly, little attention has been paid to exploring and estimating the relative contribution of multiple acquisition parameters on the model resolution (distance between neighbor vertices), accuracy (closeness to true positions/measures) and precision (variability of positions/measures). On the other hand, some studies used expensive or cumbersome camera systems that can restrict the number of users of this technology for the monitoring of marine habitats. This study aimed at developing a simple and cost-effective protocol able to produce accurate and reproducible high-resolution models. Precisely, the effect of the camera system, flying elevation, camera orientation and number of images on the resolution and accuracy of marine habitat reconstructions was tested through two experiments. A first experiment allowed for testing all combinations of acquisition parameters through the building of 192 models of the same 36 m<sup>2</sup> study site. The flying elevation and camera system strongly affected the model resolution, while the photo density mostly affected bundle adjustment accuracy and total processing time. The camera orientation, in turn, mostly affected the reprojection error. The best combination of parameters was used in a second experiment to assess the accuracy and precision of the resulting reconstructions. The average model resolution was 3.4 mm, and despite a decreasing precision in the positioning of markers with distance to the model center (0.33, 0.27, and 1.2 mm/m Standard Deviation (SD) in X, Y, Z, respectively), the measures were very accurate and precise: 0.08% error ± 0.06 SD for bar lengths, 0.36% ± 0.51 SD for a rock model area and 0.92% ± 0.54 SD for its volume. The 3D geometry of the rock only differed by 1.2 mm ± 0.8 SD from the ultra-high resolution in-air reference. These results suggest that this simple and cost-effective protocol produces accurate and reproducible models that are suitable for the study and monitoring of marine habitats at a small reef scale.

**Keywords:** underwater photogrammetry, resolution, accuracy, precision, 3D habitat mapping, marine ecology

Figure 2 : Publication dans Frontiers in Marine Science « Monitoring Marine Habitats With Photogrammetry : A Cost-Effective, Accurate, Precise and High-Resolution Reconstruction Method ».

# Chapitre 2

## Cartographie des herbiers de Posidonie



Dans ce chapitre nous travaillons sur les apports de la photogrammétrie pour cartographier les herbiers de posidonie. Nous présentons tout d'abord une méthode permettant de cartographier de manière automatique les herbiers de Posidonie à partir des produits de la photogrammétrie. Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article scientifique, finalisé et soumis à « Marine Ecology Progress Series ». Dans un second nous comparons les avantages et inconvénients de la photogrammétrie par rapport à une autre méthode de cartographie des limites inférieures d'herbier : la télémétrie acoustique. Dans une troisième partie nous évaluons l'efficacité de la photogrammétrie pour suivre une limite inférieure d'herbier dans le temps.

# Chapitre 2 : Cartographie des herbiers de Posidonie : apport de la photogrammétrie

## I. Contexte et objectifs

Andromède Océanologie a mis en place en 2008, en collaboration avec l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (AERMC), le réseau de surveillance des herbiers de Posidonie « TEMPO ». Ce réseau, pérenne depuis 2011 sur toute la façade méditerranéenne française, a pour missions de promouvoir l'habitat des herbiers de posidonie et de surveiller à long terme l'évolution de son état. Les objectifs sont de recueillir des données descriptives sur la dynamique des herbiers à Posidonie et de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace, à la profondeur intermédiaire de -15 mètres et en limite inférieure.

Andromède utilise la méthode de **téléométrie acoustique** pour cartographier très précisément la limite inférieure des herbiers. Basée sur un principe d'interférométrie acoustique 3D, la téléométrie acoustique permet le positionnement centimétrique d'objets situés à plusieurs dizaines de mètres d'une antenne immergée à chaque plongée. Le plongeur réalise un point tous les 30 à 50 cm pour cartographier la limite grâce à l'Aquamètre D100-NG dernière génération relié à une tablette étanche avec système Android.

Le positionnement acoustique est une méthode très précise, alternative au balisage classique, qui permet de 1) multiplier facilement le nombre de points cartographiés et 2) d'éviter la pose de nombreuses balises pouvant endommager l'herbier ou être perdues. Par contre, cette méthode est couteuse en temps et contraignante sous l'eau (beaucoup de matériel). La photogrammétrie apparaît comme une **méthode novatrice et pertinente** pour le suivi des herbiers, puisqu'elle permet de capturer un paysage en 3D à un instant t, de reconstruire une orthomosaïque (vue globale « aérienne » de la zone) et un modèle en 3D fidèle à la réalité, avec un temps d'acquisition beaucoup plus court sous l'eau.

Dans ce chapitre nous travaillons sur les apports de la photogrammétrie pour cartographier les herbiers de posidonie. Nous présentons tout d'abord une méthode permettant de cartographier de manière automatique les herbiers de Posidonie à partir des produits de la photogrammétrie, afin d'avoir une méthode intégrée de suivi des herbiers, précise et rapide, depuis l'acquisition des données sur le terrain jusqu'à la production de cartes et d'indicateurs d'évolution de l'herbier. Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article scientifique, finalisé et soumis à « Marine Ecology Progress Series ». Dans un second nous comparons les avantages et inconvénients de la photogrammétrie par rapport à une autre méthode de cartographie des limites inférieures d'herbier : la téléométrie acoustique. Dans une troisième partie nous évaluons l'efficacité de la photogrammétrie pour suivre une limite inférieure d'herbier dans le temps.

## II. Cartographie automatique des herbiers

### II.A. Méthodologie

La méthode développée utilise le nuage de points épars et l'incertitude de reconstruction, paramètre estimé pour chaque point du nuage, pour cartographier les herbiers de posidonie. La méthode a été développée et optimisée sur 21 sites TEMPO. La figure suivante illustre les différentes étapes de production d'une cartographie de l'herbier.

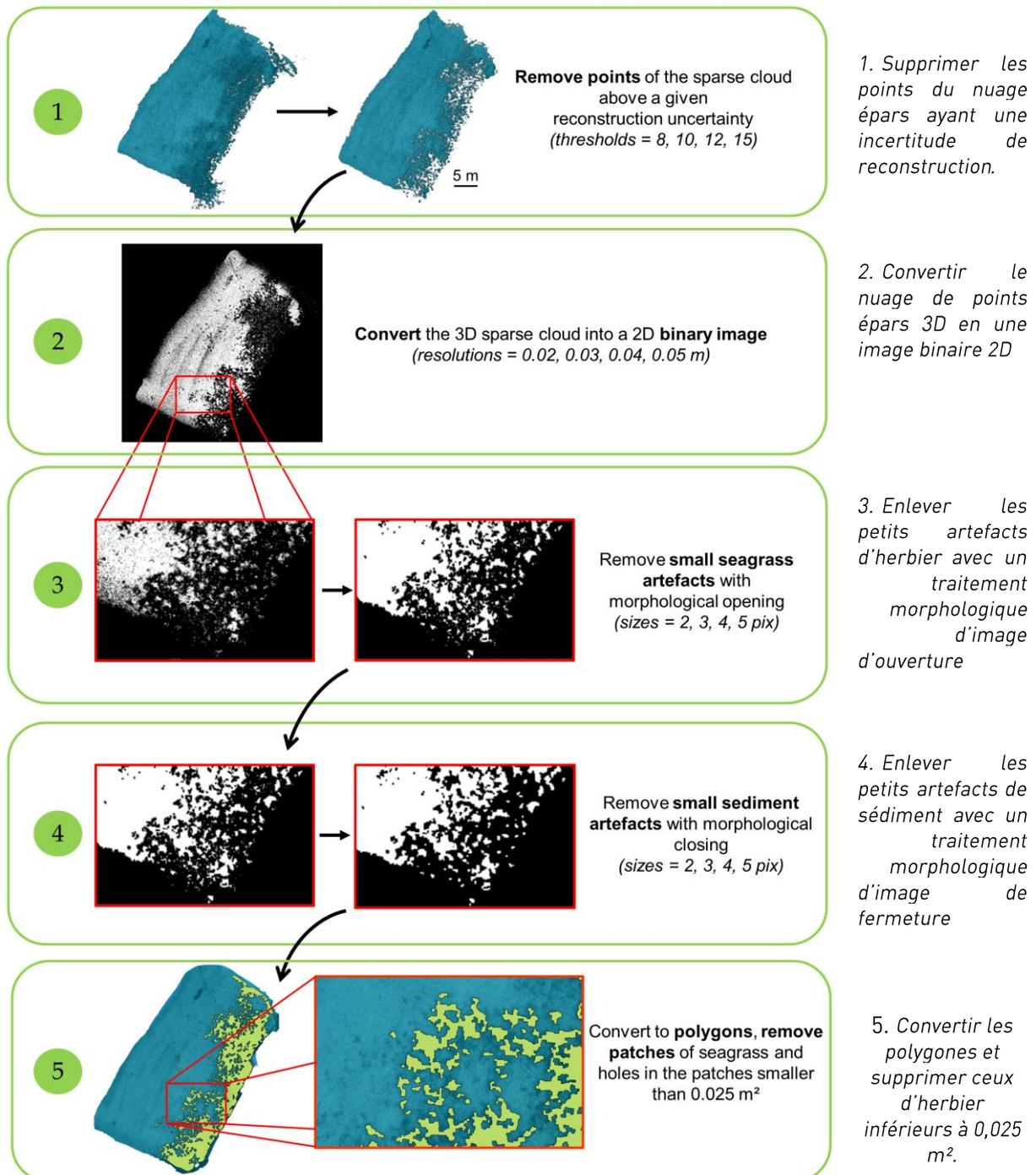


Figure 3 : Méthodologie de cartographie automatique des herbiers de Posidonie par photogrammétrie.

## II.B. Publication

Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article scientifique, finalisé et soumis à « Marine Ecology Progress Series » le 27 septembre 2019, intitulé « Fine-scale automatic mapping of living *Posidonia oceanica* seagrass beds with underwater photogrammetry ». *A ce jour (février 2020), la publication est en cours de révision suite aux premiers commentaires émis par le journal.*

## III. Télémétrie acoustique et photogrammétrie : quelle méthode pour cartographier les herbiers ?

Depuis 2011, la limite inférieure des herbiers de Posidonie est suivie par télémétrie acoustique sur près d'une **soixantaine de sites en Méditerranée française** (une vingtaine de sites par année de suivi) dans le cadre du réseau de surveillance TEMPO. Ces sites font l'objet d'acquisitions photogrammétriques depuis 2016, en complément de la télémétrie acoustique. Indépendamment de la capacité de l'algorithme développé ci-dessus à classer correctement les herbiers de posidonie, la photogrammétrie permet en effet de produire une ortho mosaïque du site à partir de laquelle il est possible de dessiner manuellement l'ensemble des taches d'herbier, y compris les plus petites et les plus isolées.

**62 sites TEMPO différents ont fait l'objet d'acquisitions photogrammétriques entre 2016 et 2018** en Méditerranée française : 22 en région PACA Est (2016), 26 en région Corse (2017) et 14 en régions PACA Ouest et Occitanie (2018). En 2019, 19 sites localisés en région PACA Est qui avaient été modélisés en 2016 ont fait l'objet de nouvelles acquisitions photogrammétriques.

La comparaison des deux méthodes sur quatre années de suivi, dont une année avec un retour sur les mêmes sites (2016-2019), montre que la télémétrie acoustique et la photogrammétrie sont deux méthodes qui permettent de cartographier les herbiers et de suivre l'évolution de la limite inférieure dans le temps. Chacune d'entre elles présente des avantages et inconvénients en termes d'acquisitions et de rendus, qui sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients en termes d'acquisitions et de rendus pour les méthodes de télémétrie acoustique et de photogrammétrie pour la cartographie des herbiers de posidonie.

	Avantages	Inconvénients
Télémétrie acoustique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cartographie au droit des faisceaux par le pointeur acoustique</li> <li>- Temps court pour télécharger les données et produire la cartographie sous SIG</li> <li>- Stockage facilité par un poids des données réduit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Installation et Acquisition longues</b></li> <li>- <b>Résolution</b> de la cartographie dépend du plongeur</li> <li>- Risques d'interférences avec l'émission d'autres bruits sous-marins</li> <li>- Cartographie non exhaustive sur les <b>faisceaux isolés</b> et petites taches</li> <li>- Soumis à Interprétation</li> <li>- Résultat en 2 dimensions</li> </ul>
Photogrammétrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisition courte</li> <li>- « <b>Photographie</b> » à un instant t de l'herbier, limitant l'interprétation de la donnée</li> <li>- Cartographie exhaustive d'un <b>herbier morcelé, de faisceaux isolés et petites taches</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limite moins précise en cas de <b>longues feuilles car difficultés à distinguer la base des faisceaux</b></li> <li>- Ne permet pas de cartographier l'intérieur d'un <b>herbier continu</b> (Manque de points d'accroche pour reconstruire le modèle photogrammétrique)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilité d'acquisition sur <b>une grande surface</b></li> <li>- Méthodologie appelée à évoluer rapidement</li> <li>- Modèle en 3 dimensions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Temps long de calcul des données</b></li> <li>- Possibilité que l'acquisition ne permette pas la reconstruction du modèle</li> <li>- Matériel d'acquisition coûteux</li> </ul>
--	--	--

Cette comparaison montre certaines complémentarités entre les deux méthodes. Elles pourraient être privilégiées en fonction de/du :

- la **nature du substrat** sur lequel se trouve l'herbier : meubles ou durs
- la **taille** de la zone d'étude
- la **typologie de la limite inférieure** de l'herbier: clairsemée, franche, progressive, régressive, érosive
- **temps à consacrer pour les acquisitions sous l'eau**: la télémétrie nécessite un temps d'installation et d'acquisition sous l'eau plus important que la photogrammétrie ainsi que du matériel plus encombrant (antenne, mât, pointeur) qu'un simple appareil photo.
- **temps à consacrer au traitement bureautique** : la photogrammétrie nécessite un temps de calcul important au bureau par rapport à la télémétrie dont le traitement est plus rapide et nécessite moins de place pour le stockage.

Les parties suivantes différencient les différentes typologies de limites herbier que nous avons suivi depuis 2016 sur les sites « TEMPO ». Nous présentons pour chacune la et les méthodes de suivi qui nous semble(nt) la (les) plus adaptée(s).



### III.A. Nature du substrat de l'habitat

Les sites TEMPO suivis sont majoritairement constitués par des herbiers sur substrats meubles (sable, matte morte (limite régressive)). La **photogrammétrie et la télémétrie acoustique sont deux méthodes adaptées pour cartographier les herbiers sur substrats meubles**. Le choix de la méthode dépendra de la typologie de la limite inférieure (cf. paragraphes III.C à III.G).

Quelques sites TEMPO suivis (moins de dix) sont constitués par des herbiers sur substrats durs (roche en place, éboulis). La **photogrammétrie est plus adaptée que la télémétrie acoustique pour cartographier les herbiers sur substrats durs notamment lorsqu'il s'agit d'un tombant rocheux**.

La figure suivante compare les cartographies d'herbier sur substrat rocheux réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur deux sites localisés en région PACA en 2019. Nous constatons que la méthode de photogrammétrie est la plus appropriée pour ce type de substrat car elle permet une cartographie plus fine et précise de l'herbier par rapport à la télémétrie acoustique.

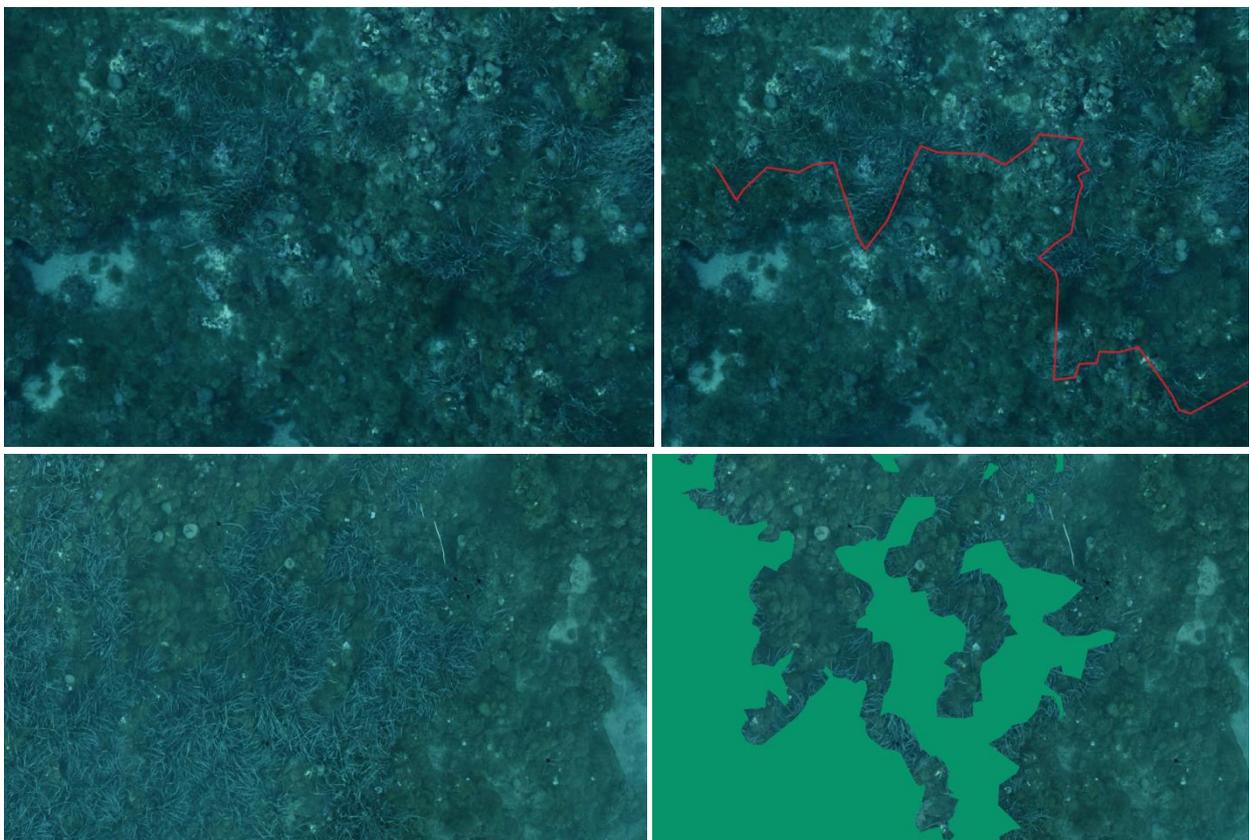


Figure 4: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la photogrammétrie (en haut) et de la télémétrie acoustique (en bas) sur deux sites d'herbier sur roche. [1] Site Pointe Bacon, région PACA, 2019 ; [2] Site Cap Nice Est, région PACA, 2019.

### III.B. Taille de la zone

La photogrammétrie et la télémétrie acoustique sont deux méthodes adaptées pour cartographier les herbiers sur des zones de taille petite (10 m<sup>2</sup>) à moyenne (<200 m<sup>2</sup>), qui correspondent généralement à la taille des sites TEMPO. Pour les grandes zones (>200 m<sup>2</sup>), la photogrammétrie est à privilégier. En effet, il faudrait réaliser plusieurs plongées d'acquisition avec la télémétrie alors qu'une seule plongée serait nécessaire en utilisant la photogrammétrie.

Les figures ci-dessous montrent deux modélisations réalisées en Corse (Andromède, 2019 <sup>1</sup>) de très grandes zones. La première illustre l'impact du mouillage dans l'herbier sur une zone de 1674 m<sup>2</sup>, et la seconde sur une zone de 2015 m<sup>2</sup>.

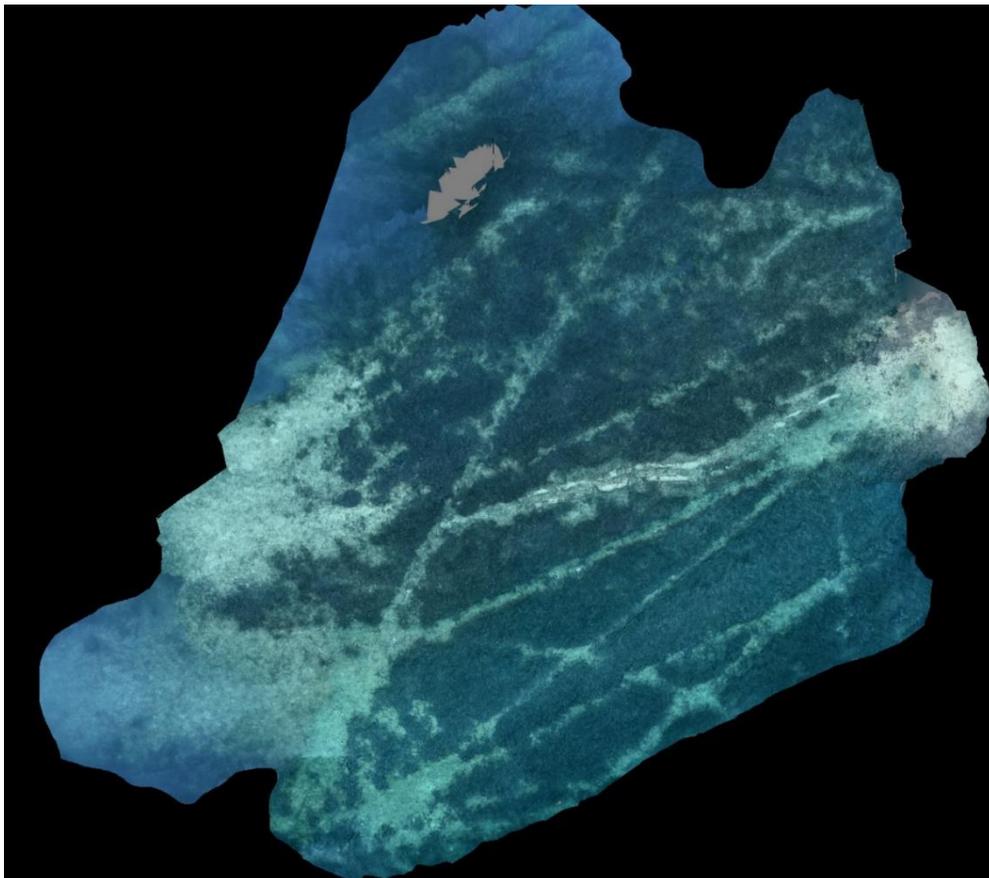
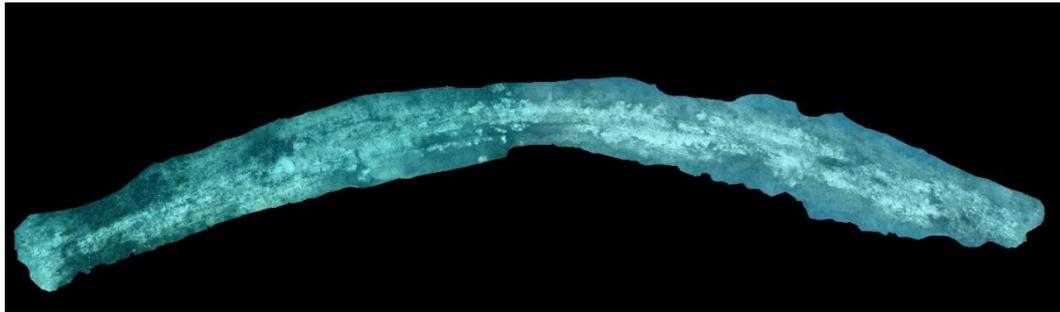


Figure 5 : La photogrammétrie est adaptée pour modéliser des grandes zones, ici de 1674 m<sup>2</sup> (en haut) et de 2015 m<sup>2</sup> (en bas).

<sup>1</sup> ANDROMEDE, 2019. Mise en évidence des effets de l'impact des ancrages de la grande plaisance sur les herbiers de posidonie de la Réserve naturelle des Bouches de Bonifacio. Contrat Andromède Océanologie Office de l'Environnement Corse. 55p.



### III.C. Limite inférieure clairsemée

D'après Meinesz et Laurent (1978), une **limite clairsemée** est constituée par un semi herbier, dont la densité est inférieure à 100 faiscs./m<sup>2</sup> et le recouvrement inférieur à 15%. Elle traduit en général un herbier en phase de démantèlement.

**La photogrammétrie est plus adaptée que la télémétrie acoustique pour cartographier les herbiers dont la limite est clairsemée.** Compte tenu de la faible densité de l'herbier sur ces sites, la cartographie concerne généralement des petits patches d'herbier vivant et faisceaux isolés. Or ces petites entités sont difficiles à cartographier par télémétrie acoustique car le plongeur n'a pas une assez bonne vision d'ensemble pour toutes les repérer et il risque d'en oublier, notamment en cas de faible visibilité sous l'eau. En revanche, à partir de l'orthophotographie issue de la photogrammétrie, il est possible et rapide de comparer l'évolution des faisceaux dans le temps.

La figure suivante compare les cartographies d'herbier avec une limite inférieure clairsemée réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur deux mêmes sites localisés en région PACA en 2018. Nous constatons que la méthode de photogrammétrie est la plus appropriée pour cette typologie de limite car elle révèle le morcellement de l'herbier. En effet, elle permet une cartographie plus fine et précise des patches et faisceaux par rapport à la télémétrie acoustique où 1) les faisceaux isolés sont regroupés sous forme de patch, 2) la délimitation des patches d'herbier vivant est assez grossière, et 3) les extrémités des patches sont reliées les unes aux autres en post-traitement donnant l'impression d'un herbier continu avec une limite franche.

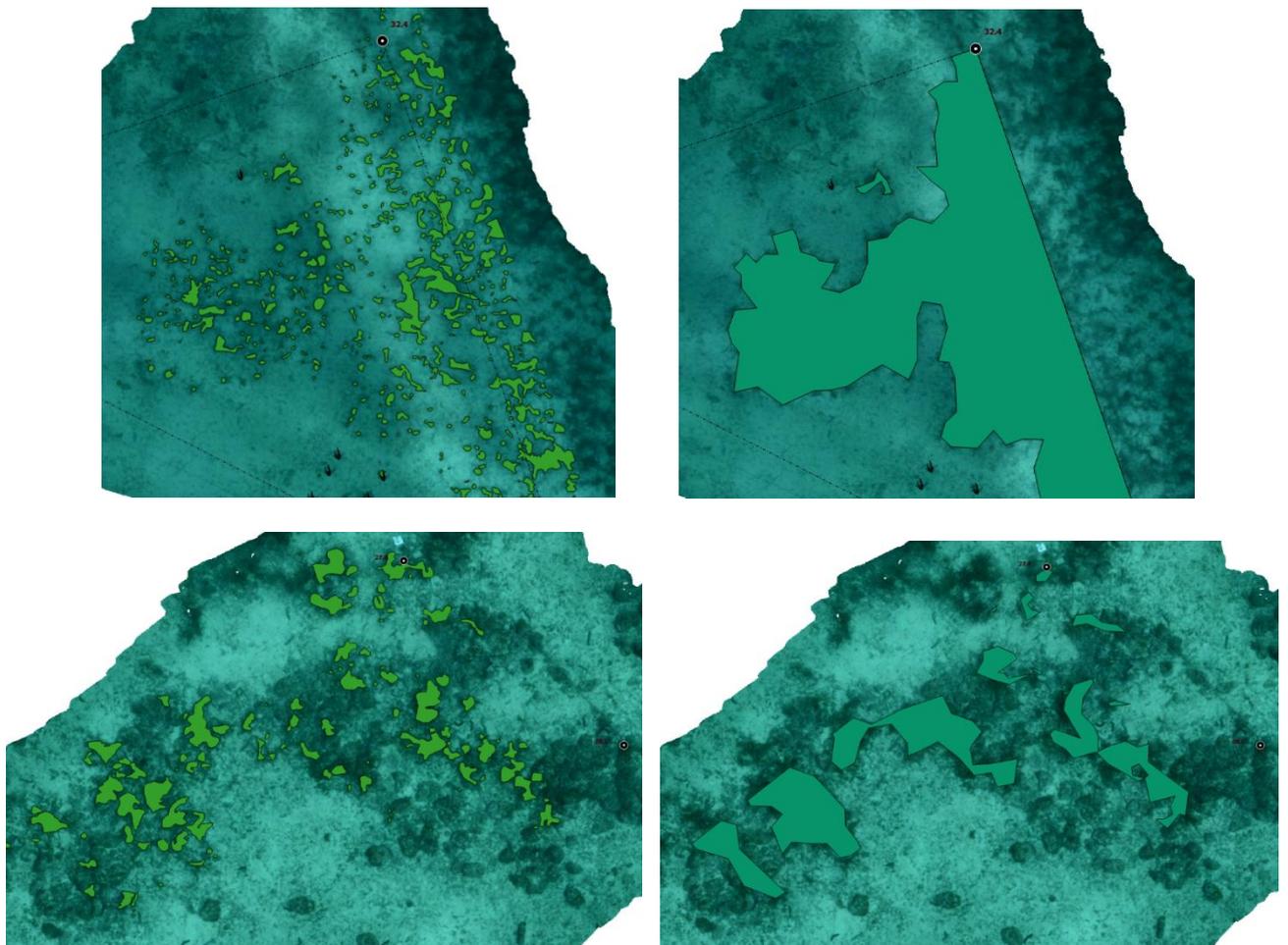


Figure 6: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la photogrammétrie (à gauche) et de la télémétrie acoustique (à droite) sur les mêmes sites d'herbier présentant une limite inférieure clairsemée. [1] Site Liouquet, région PACA, 2018 ; [2] Site Morgiou, région PACA, 2018.

Plusieurs cartographiques d'herbier présentant une limite inférieure clairsemée et réalisées à partir de la photogrammétrie sont présentées sur les figures ci-dessous, en vis-à-vis de l'orthophotographie. Nous pouvons constater que la méthode de photogrammétrie est très adaptée à cette typologie de limite d'herbier.

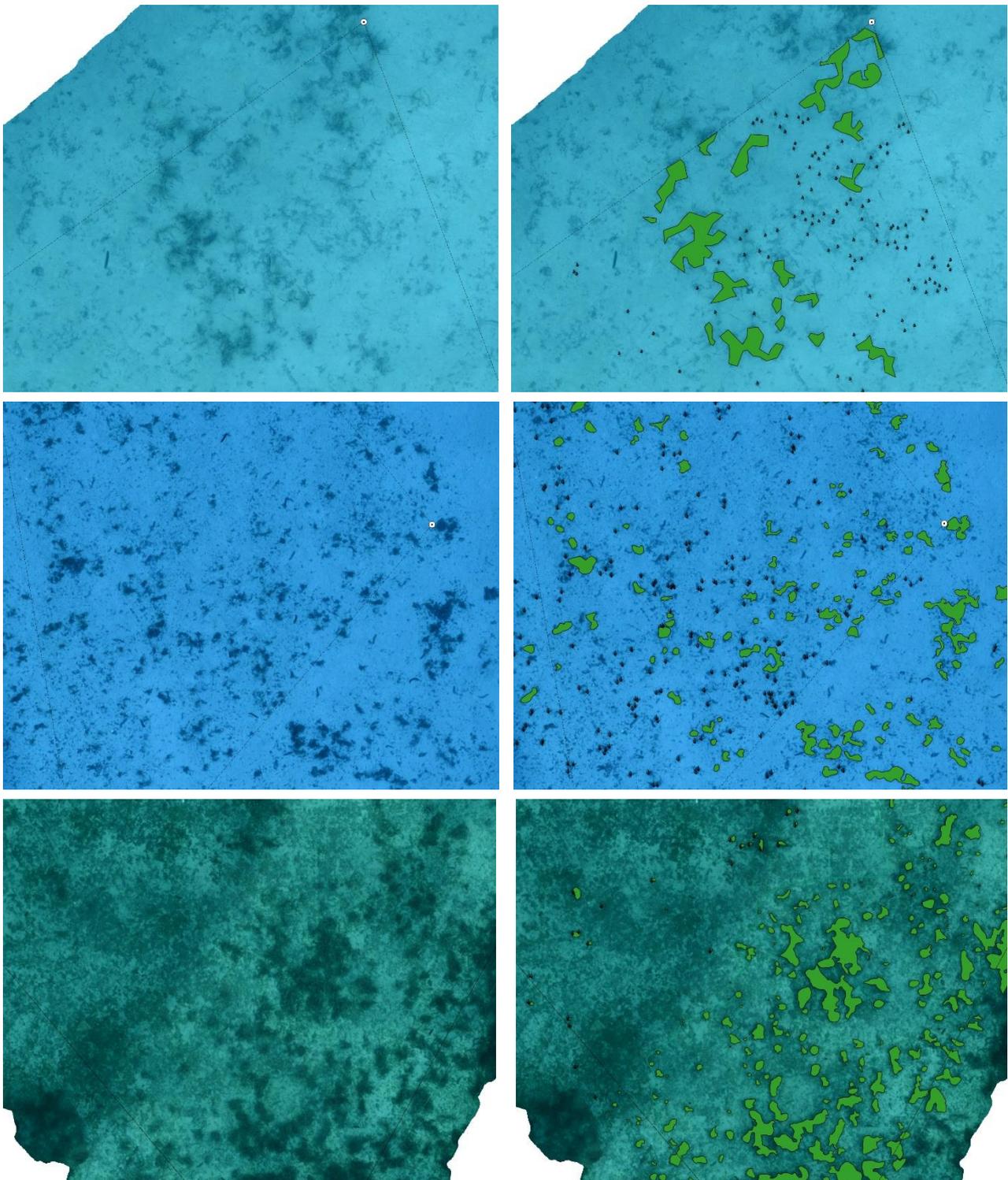


Figure 7: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la photogrammétrie sur des sites présentant une limite inférieure d'herbier clairsemée. [1] Site Côte orientale, région Corse, 2017 ; [2] Site Baie Tamarone Large, région Corse, 2017 ; [3] Site Embiez Nord, région PACA, 2018.



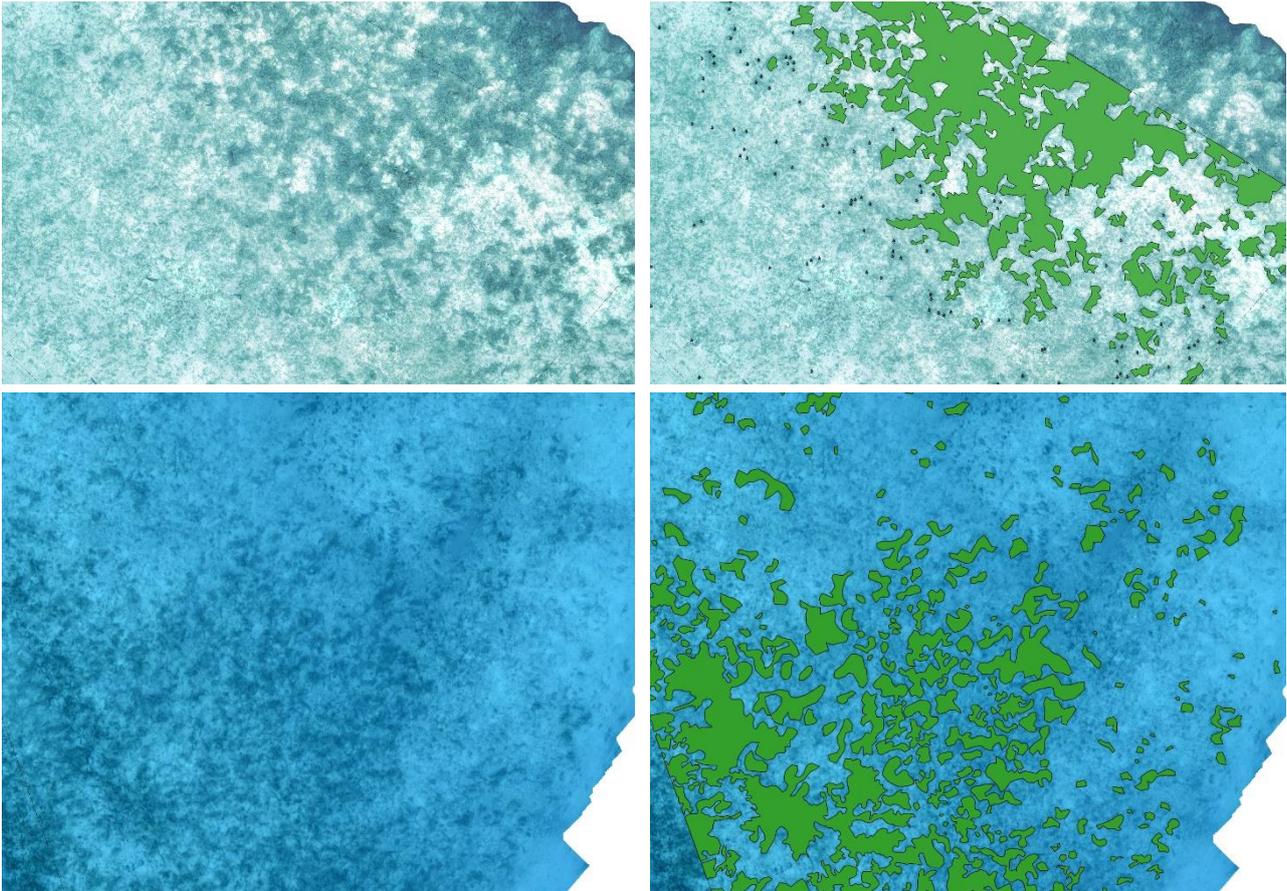


Figure 8: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la photogrammétrie sur des sites présentant une limite inférieure d'herbier clairsemée. [1] Site Pointe Andati, région PACA, 2016 ; [2] Site Fautea, région Corse, 2017.

### III.D. Limite inférieure franche

D'après Meinesz et Laurent (1978), une **limite franche** est brusque, nette sans matte morte en aval de la limite (stabilité de l'écosystème). Nous pouvons distinguer la limite franche de faible recouvrement (recouvrement < 25 %) et la limite franche de fort recouvrement (recouvrement > 25 %).

**La télémétrie acoustique est plus adaptée que la photogrammétrie pour cartographier les herbiers dont la limite est franche** (limite continue ou sous forme des grandes taches) **et qui présentent de longues feuilles** (qui recouvrent souvent la base des faisceaux empêchant de voir précisément la limite en photogrammétrie).

Les deux figures suivantes comparent les cartographies d'herbier présentant une limite franche avec de longues feuilles, réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur deux mêmes sites localisés en région PACA en 2018. Nous constatons que la méthode de télémétrie acoustique est plus appropriée pour cette typologie de limite car elle permet une cartographie fine et précise de l'herbier par rapport à la photogrammétrie où la délimitation de l'herbier est biaisée par la longueur des feuilles (flèches rouges sur les images du bas des deux figures suivantes). En recouvrant une partie du substrat, les feuilles empêchent de visualiser correctement la base des faisceaux et de cartographier l'herbier avec précision.

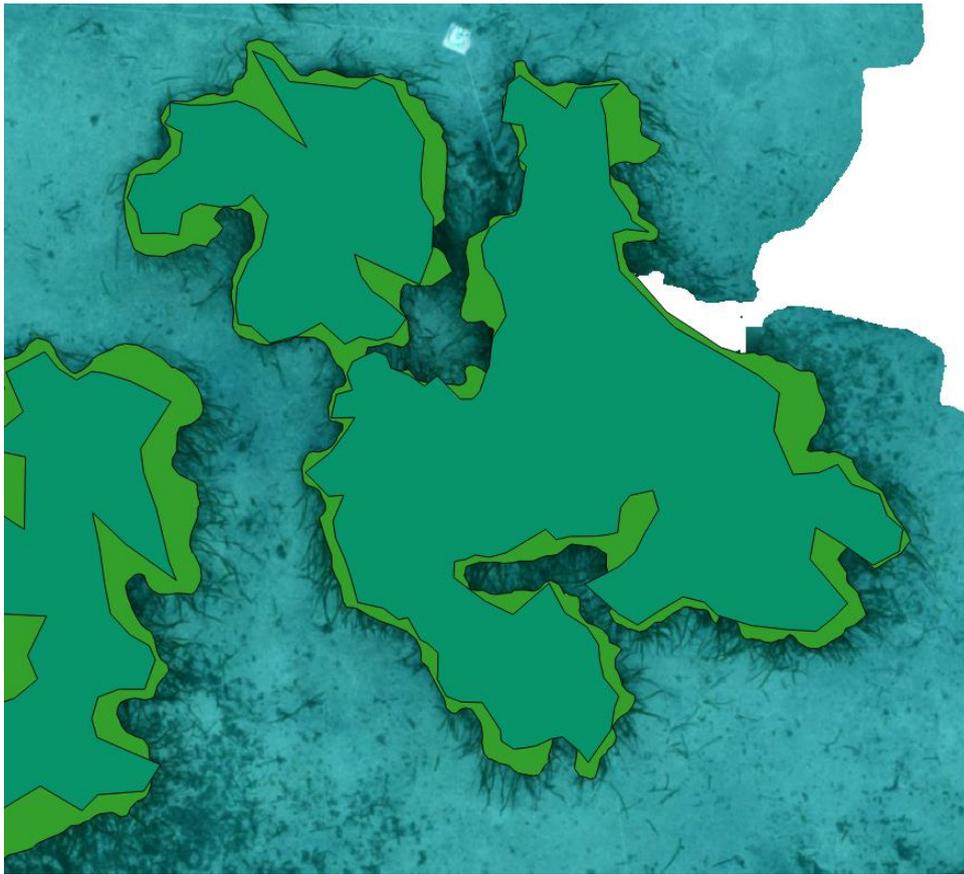


Figure 9: Site TEMPO « Cap Sicié Ouest », région PACA, présentant une limite inférieure d'herbier franche avec des longues feuilles. La méthode de télémétrie acoustique est adaptée à cette typologie de limite d'herbier. [1] Superposition des représentations cartographiques des limites de l'herbier de Posidonie réalisées à partir de la photogrammétrie (vert clair) et de la télémétrie acoustique (vert foncé) ; [2] Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la télémétrie acoustique. Les flèches rouges indiquent les zones où la délimitation de l'herbier par photogrammétrie est biaisée par la longueur des feuilles.



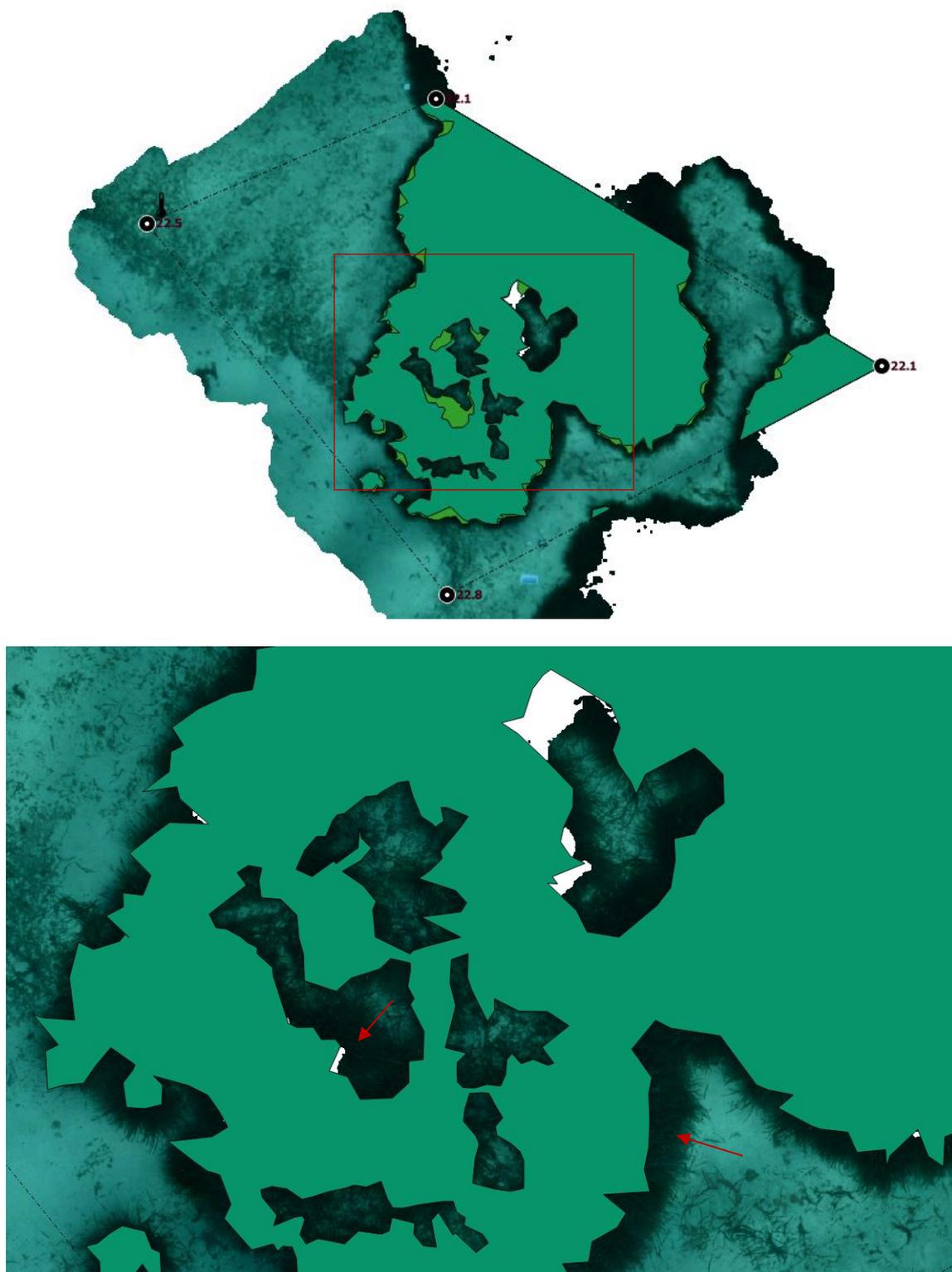


Figure 10 : Site TEMPO « Alon » région PACA, présentant une limite inférieure d'herbier franche avec des longues feuilles. La méthode de télémétrie acoustique est adaptée à cette typologie de limite d'herbier. [1] Superposition des représentations cartographiques des limites de l'herbier de Posidonie réalisée à partir de la photogrammétrie (vert clair) et de la télémétrie acoustique (vert foncé) ; [2] Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la télémétrie acoustique. Les flèches rouges indiquent les zones où la délimitation de l'herbier par photogrammétrie est biaisée par la longueur des feuilles

**La télémétrie acoustique et la photogrammétrie sont adaptées pour cartographier les herbiers dont la limite est franche (limite continue ou sous forme des grandes taches) et qui présentent de courtes feuilles.**

La figure suivante compare les cartographies d'herbier présentant une limite franche avec de courtes feuilles réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur un même site localisé en région PACA en 2019. Nous constatons que les deux méthodes sont appropriées pour ce type de limite franche pour un herbier à feuilles courtes.

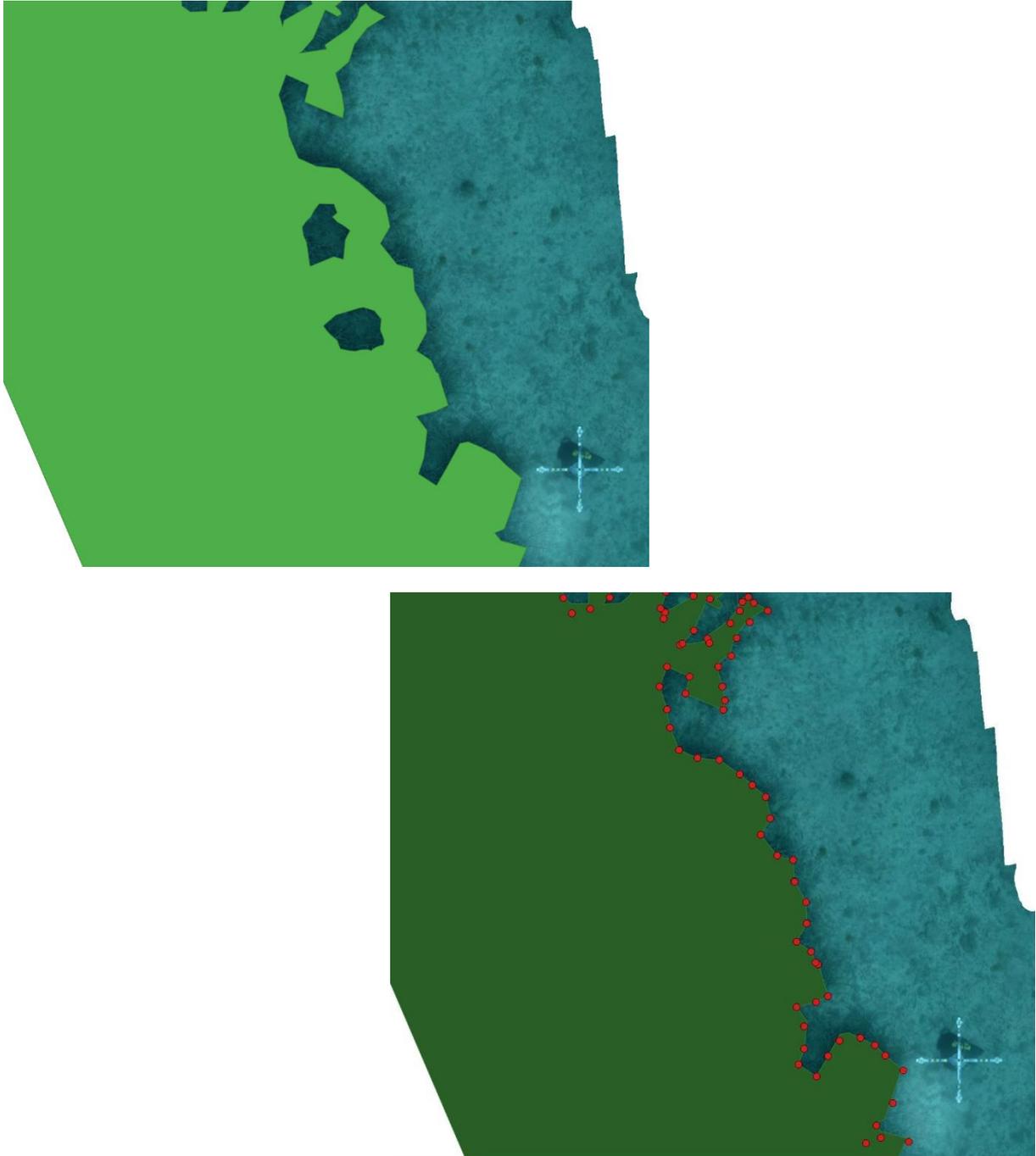


Figure 11 : Site TEMPO « Cap Gros Nord » région PACA, présentant une limite inférieure d'herbier franche avec des longues courtes. Les deux méthodes de télémétrie acoustique et de photogrammétrie sont adaptées à cette typologie de limite d'herbier puisque les cartographies sont identiques. [1] Représentation cartographique de la limite de l'herbier de Posidonie réalisée à partir de la photogrammétrie (vert clair) ; [2] Représentation cartographique de la limite de l'herbier de Posidonie réalisée à partir de la télémétrie acoustique (vert foncé). Les points rouges montrent les relevés de télémétrie acoustique.



### III.E. Limite inférieure progressive

D'après Meinesz et Laurent (1978), une **limite progressive** est caractérisée par la présence de rhizomes plagiotropes disposés parallèlement dans le sens de la pente sans édification de matte (bon état de santé de l'herbier).

Le réseau TEMPO comprend peu de sites d'herbier avec une limite progressive, mais le choix de la méthode semble dépendre de la densité de rhizomes plagiotropes. En effet, une limite progressive correspond à cartographier ces rhizomes rampants. Leur présence nécessite généralement une observation directe sous l'eau par un plongeur. À l'œil sur une photographie il est plus difficile d'observer les faisceaux plagiotropes car ils peuvent être confondus avec des faisceaux orthotropes, des petits patches d'herbier, etc.

La télémétrie acoustique semble plus adaptée que la photogrammétrie pour cartographier les herbiers dont la limite inférieure est progressive avec une forte densité de faisceaux plagiotropes (herbier quasi-continu). Même si les deux méthodes sont possibles, la photogrammétrie peut avoir une mise en œuvre difficile sur un herbier continu (difficulté de recouvrement entre les photos). De plus, la télémétrie permet de cartographier précisément les extrémités des faisceaux plagiotropes.

La figure suivante compare les cartographies d'un herbier avec une limite progressive dense, réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur un même site localisé en région PACA en 2019. Nous constatons que la méthode de télémétrie acoustique est la plus appropriée pour ce type de limite progressive dense car elle permet de visualiser correctement la base des faisceaux dans le cas de longues feuilles, de confirmer le type de faisceaux (plagiotropes) et de cartographier l'herbier avec précision. Cependant, les deux méthodes donnent des résultats très proches.

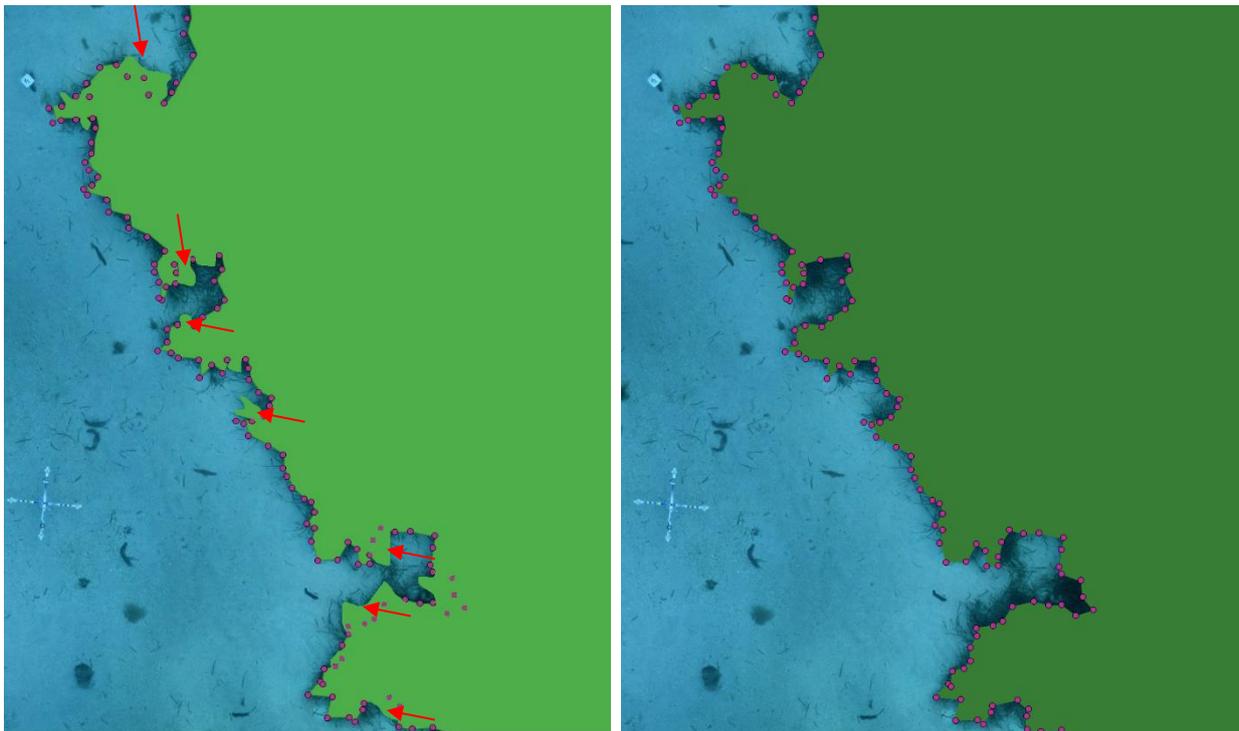


Figure 12: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la photogrammétrie (à gauche) et de la télémétrie acoustique (à droite) sur un site présentant une limite inférieure d'herbier progressive dense. Les points roses représentent la base des faisceaux plagiotropes cartographiés en télémétrie acoustique. On voit que cette méthode est plus précise que la photogrammétrie (les flèches rouges indiquent les secteurs cartographiés en herbier par photogrammétrie alors que ce sont juste des feuilles). Site Presqu'île de Giens, région PACA, 2019.

La photogrammétrie semble plus adaptée que la télémétrie acoustique pour cartographier les herbiers dont la limite inférieure est progressive avec une densité de faisceaux plagiotropes faible / moyenne. Cependant, l'idéal est de combiner les deux méthodes sur ce type de limite, peu répandue. En effet, la télémétrie acoustique permet de valider que les faisceaux sont bien de type plagiotope (validation plongeur), et le plongeur peut alors pointer l'extrémité de tous ces rhizomes rampants. Au cours du temps, il est possible de suivre l'évolution en longueur de ces rhizomes et ainsi de mesurer leur progression. Par contre, en termes de représentation cartographique de l'herbier, toutes les extrémités des rhizomes plagiotropes seront reliées les unes aux autres donnant l'impression d'un herbier continu avec une limite franche. La photogrammétrie permet, elle, de disposer de la position de l'ensemble des rhizomes (rampants ou non) dans l'espace et de suivre leur évolution au cours du temps. Par contre il n'y a pas de validation du plongeur, donc il existe une incertitude sur le fait que tous les rhizomes cartographiés soient bien de type plagiotope. Les deux méthodes sont donc complémentaires.

Les cartographies suivantes présentent un herbier avec une limite inférieure progressive peu dense. Elles ont été réalisées à partir de la photogrammétrie et de la télémétrie acoustique sur deux sites différents. Elles montrent que ces deux méthodes sont adaptées à cette typologie de limite d'herbier.

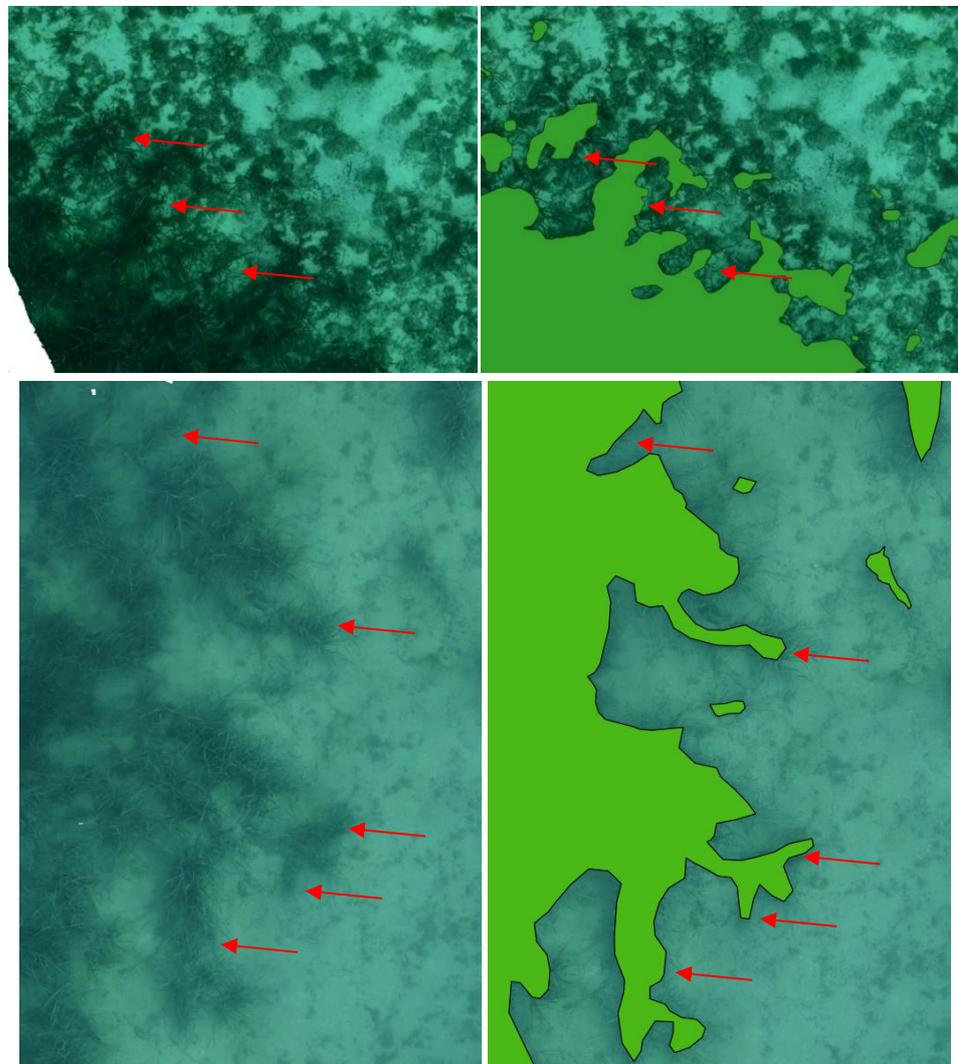


Figure 13: Représentation cartographique d'un herbier présentant une limite inférieure progressive peu dense. Les rhizomes plagiotropes présents sont indiqués par des flèches rouges.[1] Site Ile Plane, région PACA, 2018. Cartographie réalisée à partir de la télémétrie acoustique ; [2] Site La Gaillarde, région PACA, 2019. Cartographie réalisée à partir de la photogrammétrie.



### III.F. Limite inférieure régressive

D'après Meinesz et Laurent (1978), une **limite régressive** présente une étendue de matte morte recouverte ou non par le sédiment en aval de la limite proprement dite. Quelques faisceaux de feuilles subsistent en aval de la limite actuelle (perturbation et régression de l'herbier).

La **photogrammétrie** est plus adaptée que la **télémétrie acoustique** pour cartographier les herbiers dont la limite est régressive avec présence de patches sur la matte morte (faisceaux isolés / petites taches d'herbier vivant) puisque la morphologie de ce type de site est proche d'un herbier avec une limite inférieure clairsemée. Les nombreux faisceaux isolés sur la matte sont difficiles à cartographier par télémétrie acoustique car le plongeur n'a pas une assez bonne vision d'ensemble pour toutes les repérer et il risque d'en oublier, notamment en cas de faible visibilité sous l'eau. En revanche, à partir de l'orthophotographie issue de la photogrammétrie, il est possible et rapide de comparer l'évolution des faisceaux dans le temps.

La figure suivante compare les cartographies d'un herbier avec une limite régressive avec présence de patches réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur deux sites localisés en région PACA. Nous constatons que la méthode de photogrammétrie est la plus appropriée pour ce type de limite, régressive avec nombreux faisceaux isolés / petites taches, car elle permet une cartographie plus fine et précise de l'herbier contrairement à la télémétrie acoustique où la limite inférieure est représentée sous forme d'un linéaire reliant les patches.

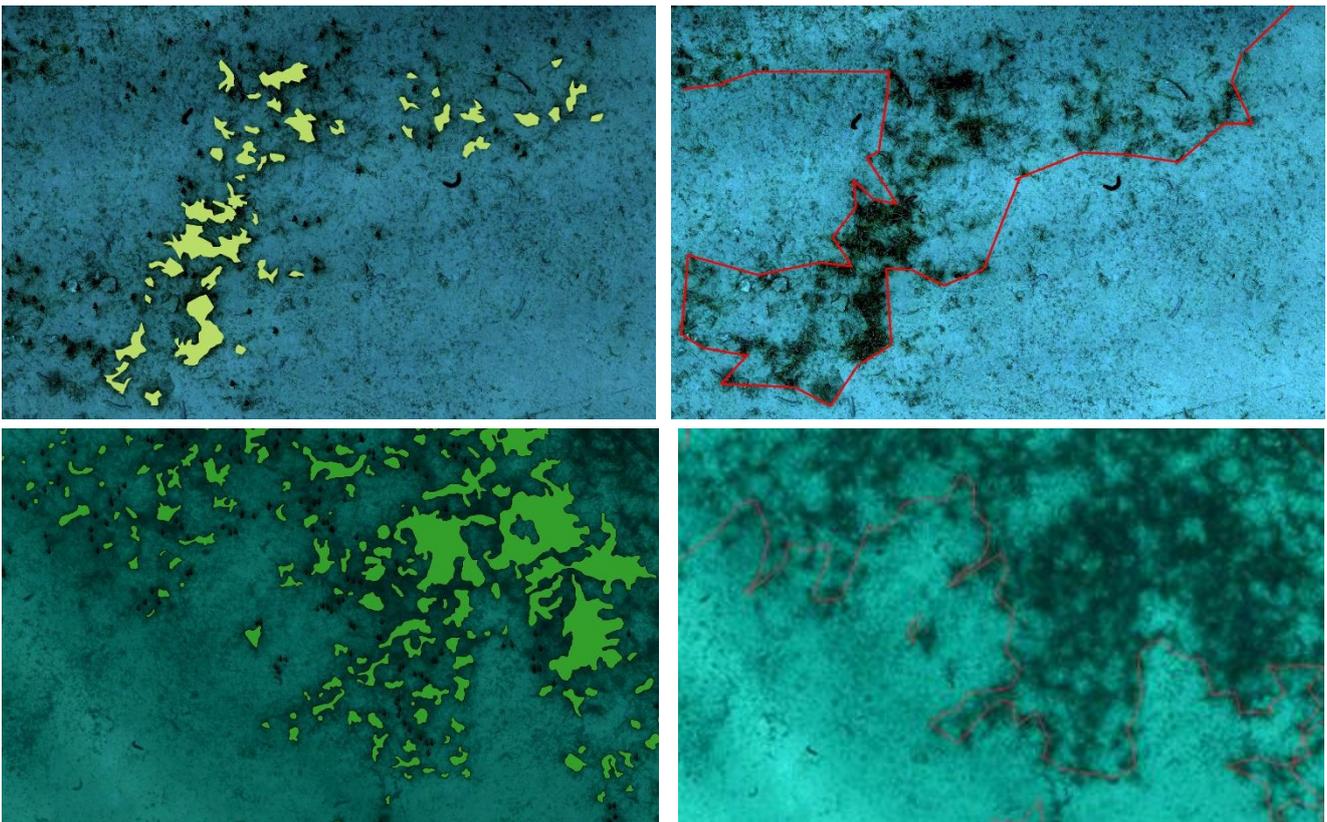


Figure 14: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la photogrammétrie (à gauche) et de la télémétrie acoustique (à droite) sur les mêmes sites d'herbier présentant une limite inférieure régressive avec patches. {1} Site Mer d'Eze, région PACA, 2016 ; {2} Site Cap Canaille, région PACA, 2018.

Plusieurs cartographiques d'herbier présentant une limite inférieure régressive avec patches d'herbier vivant (faisceaux isolés ou petites taches d'herbier) sur la matte morte et réalisées à partir de la photogrammétrie sont présentées sur les figures ci-dessous, en vis-à-vis de l'orthophotographie. On peut constater que la méthode de photogrammétrie est adaptée à cette typologie de limite d'herbier.

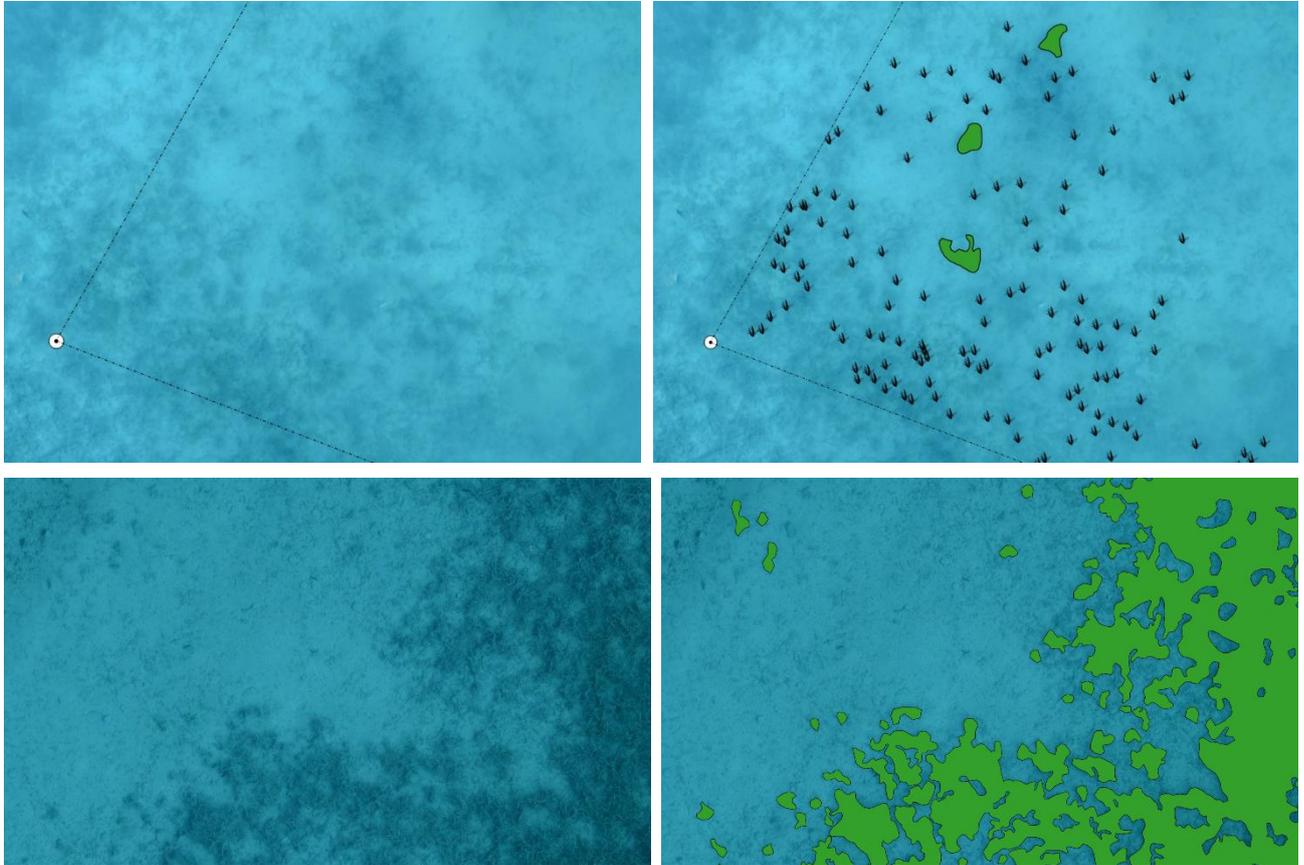


Figure 15: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la photogrammétrie sur des sites présentant une limite inférieure d'herbier régressive avec présence de patch d'herbier vivant. [1] Site Lupino, région Corse, 2017 ; [2] Site Golfe Santa Manza, région Corse, 2017.

La télémétrie acoustique semble plus adaptée que la photogrammétrie pour cartographier les herbiers dont la limite inférieure est régressive avec peu de patches d'herbier vivants sur la matte morte puisque la morphologie de ce type de site est proche d'un herbier avec une limite inférieure franche. Si les feuilles d'herbier vivant sont courtes les deux méthodes sont possibles, si les feuilles sont longues la télémétrie est à privilégier.

La figure suivante compare les cartographies d'herbier présentant une limite inférieure régressive sans patch d'herbier vivant réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur un même site localisé en région Corse. Dans cet exemple, nous constatons que les deux méthodes sont appropriées pour suivre l'évolution de la limite car les feuilles d'herbier sont courtes ici. La photogrammétrie permet d'avoir des détails sur la cartographie de l'herbier en amont de sa limite.



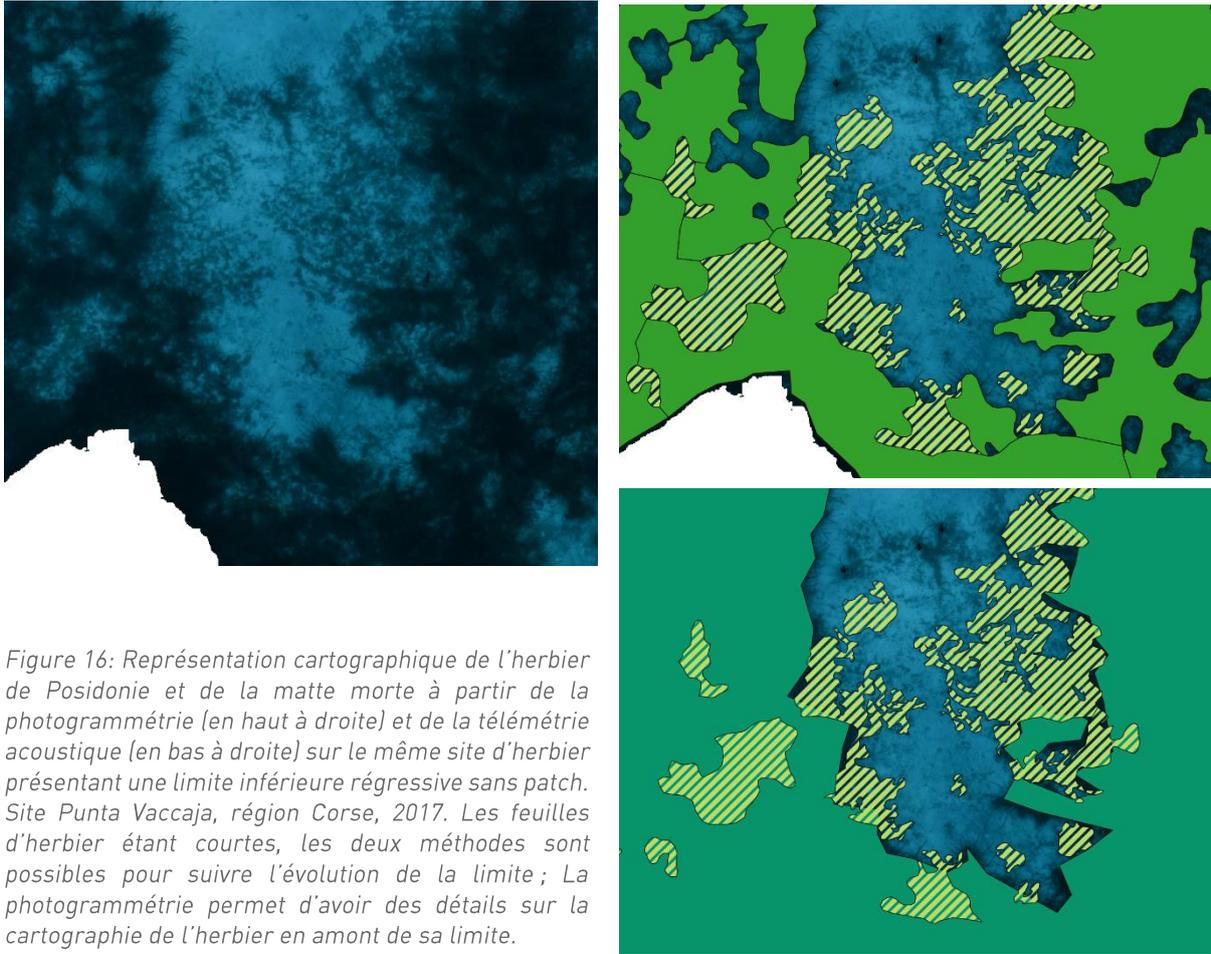


Figure 16: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie et de la matte morte à partir de la photogrammétrie (en haut à droite) et de la télémétrie acoustique (en bas à droite) sur le même site d'herbier présentant une limite inférieure régressive sans patch. Site Punta Vaccaja, région Corse, 2017. Les feuilles d'herbier étant courtes, les deux méthodes sont possibles pour suivre l'évolution de la limite ; La photogrammétrie permet d'avoir des détails sur la cartographie de l'herbier en amont de sa limite.

La figure suivante compare les cartographies d'herbier présentant une limite inférieure régressive sans patch d'herbier vivant réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur un même site localisé en région PACA. Dans cet exemple, nous constatons que la méthode de télémétrie acoustique est plus appropriée pour suivre l'évolution de la limite car les feuilles d'herbier sont longues ici. La télémétrie permet d'avoir la base des faisceaux alors qu'en photogrammétrie la délimitation de l'herbier est biaisée par la longueur des feuilles qui, en recouvrant une partie du substrat, empêchent de visualiser correctement la base des faisceaux et de cartographier l'herbier avec précision.

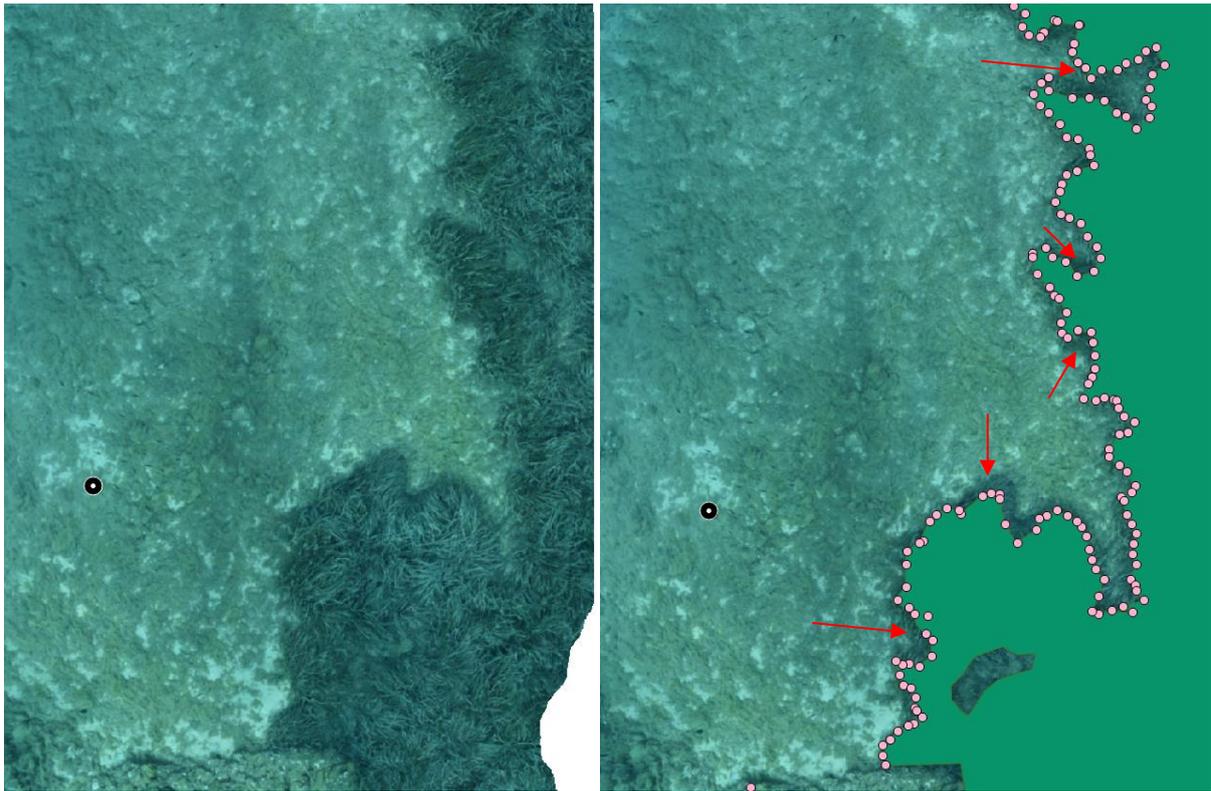


Figure 17: Représentation cartographique de l'herbier de Posidonie à partir de la télémétrie acoustique [points roses] sur un site d'herbier présentant une limite inférieure régressive sans patch. Site Lion de mer, région PACA, 2019. Les feuilles d'herbier étant longues, la télémétrie permet d'avoir la base des faisceaux alors qu'en photogrammétrie la délimitation de l'herbier serait biaisée par la longueur des feuilles (flèches rouges sur les images). En recouvrant une partie du substrat, les feuilles empêchent de visualiser correctement la base des faisceaux et de cartographier l'herbier avec précision.

### III.G. Limite inférieure érosive

D'après Meinesz et Laurent (1978), une **limite érosive** correspond à un tombant de matte qui marque la limite, ce qui traduit une érosion liée à l'action des courants de fond.

**La photogrammétrie et la télémétrie acoustique sont deux méthodes adaptées pour cartographier le tombant de matte morte caractéristique d'une limite érosive.**

La figure ci-contre montre les cartographies de deux tombants de matte morte réalisées à partir de la télémétrie acoustique et de la photogrammétrie sur deux sites localisés en région PACA et Corse. Nous constatons que les deux méthodes présentent un résultat cartographique identique du tombant pour ce type de limite érosive.

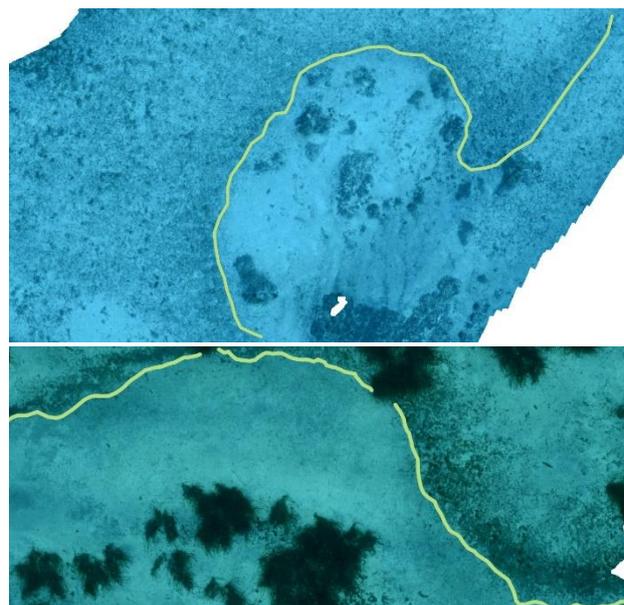


Figure 18: Représentation cartographique d'un tombant de matte à partir de la photogrammétrie et de la télémétrie acoustique. Les deux méthodes présentent un résultat cartographique identique. [1] Site Anse Cola, région Corse, 2017 ; [2] Site Cap Sicié, région PACA, 2018.



**Le choix de la méthode dépendra donc de la morphologie de l'herbier vivant** : s'il se présente sous forme de patchs (faisceaux isolés ou de petites tâches) alors la photogrammétrie sera privilégiée ; si l'herbier vivant se présente avec une limite franche et des feuilles longues alors la télémétrie acoustique sera plus adaptée ; enfin si l'herbier vivant se présente avec une limite franche et des feuilles courtes alors les deux méthodes peuvent être utilisées.

La figure suivante montre les cartographies des deux herbiers précédents réalisées 1) à partir de la photogrammétrie sur le site pour lequel l'herbier se présente sous forme de patchs (faisceaux isolés, petites tâches) qui s'apparente alors à une limite régressive avec patchs et 2) à partir de la télémétrie acoustique sur le site pour lequel l'herbier se présente sous forme de tâches avec limites franches et feuilles longues. Ainsi, si la limite est érosive, le choix de la méthode dépend de la morphologie de l'herbier vivant.

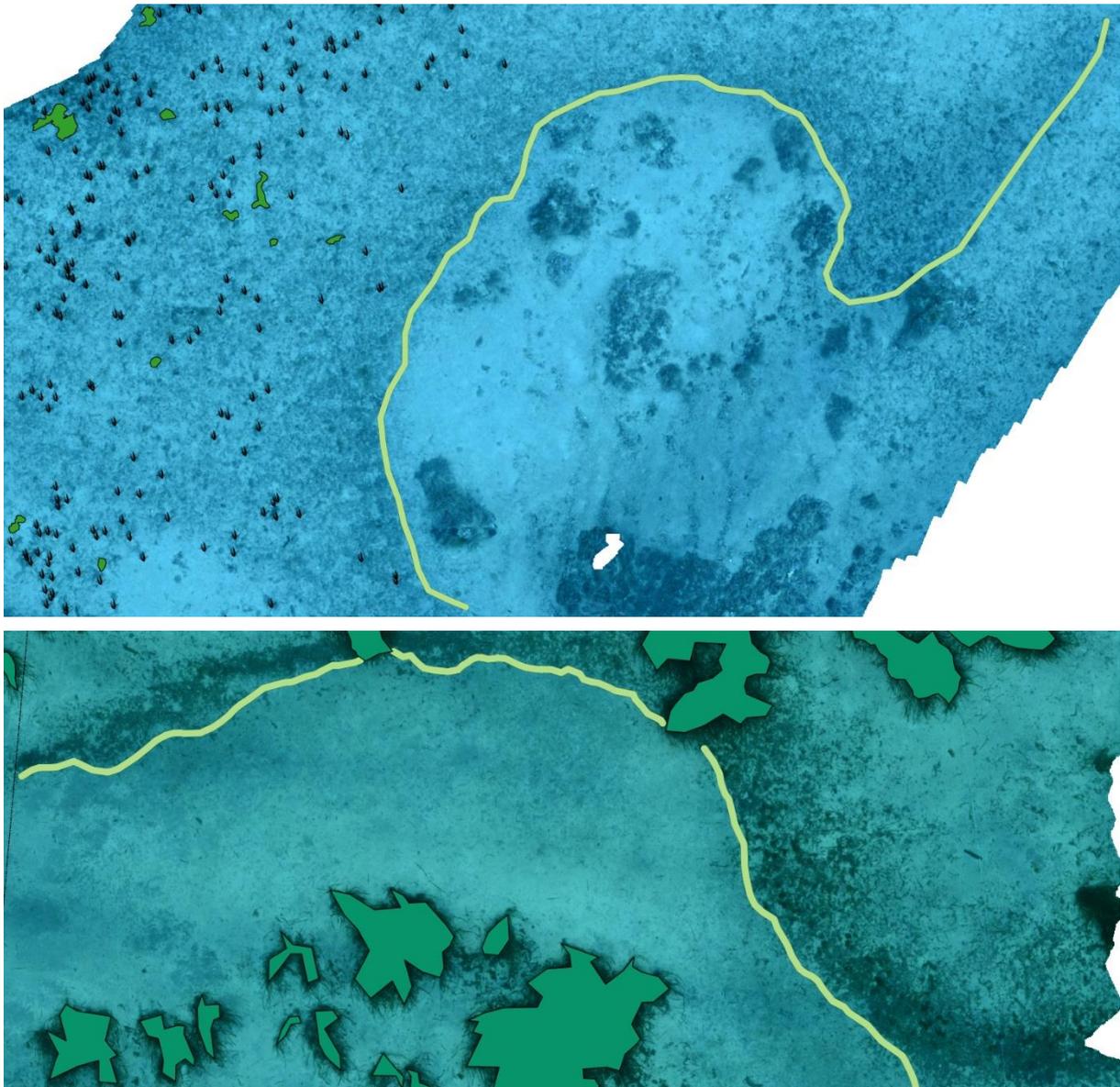


Figure 19: [1] Site Anse Cola, région Corse, 2017. Représentation cartographique à partir de la photogrammétrie des patchs d'herbier vivant sur matte morte ; [2] Site Cap Sicié, région PACA, 2018. Représentation cartographique à partir de la télémétrie pour ces tâches d'herbier franches à feuilles longues.

### III.H. Synthèse

Le tableau résume la méthode préconisée entre télémétrie acoustique et photogrammétrie pour la cartographie et le suivi des herbiers en fonction de la nature du substrat, de la taille de la zone d'étude et de la typologie de la limite inférieure de l'herbier.

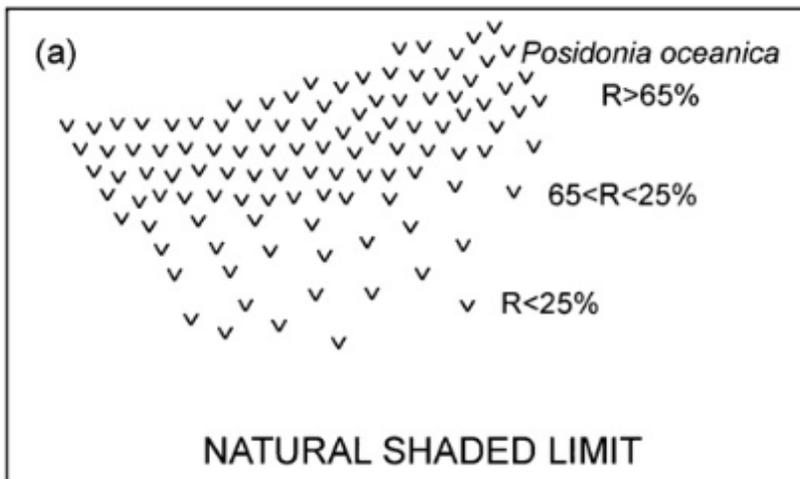
Tableau 2 : Méthode préconisée entre télémétrie acoustique et photogrammétrie pour la cartographie des herbiers.

Typologie de la limite inférieure	Photogrammétrie	Télémétrie	Remarques
<b>Clairsemée</b>	x		La photogrammétrie est plus adaptée pour cartographier un herbier de faible densité.
<b>Franche -</b> Feuilles d'herbier longues		x	La télémétrie acoustique est plus adaptée pour cartographier et suivre un herbier à feuilles longues présentant une limite franche.
<b>Franche -</b> Feuilles d'herbier courtes	x	x	Les deux méthodes sont adaptées pour cartographier et suivre un herbier à feuilles courtes présentant une limite franche.
<b>Progressive -</b> Forte densité de rhizomes plagiotropes	x	x	Les deux méthodes sont adaptées pour cartographier et suivre un herbier avec une limite progressive présentant une forte densité de rhizomes plagiotropes (herbier quasi-continu). La morphologie de l'herbier est proche d'une limite d'herbier franche, le choix de la télémétrie acoustique permet de valider le type de rhizomes mais les deux méthodes restent faisables.
<b>Progressive -</b> Densité faible à moyenne de rhizomes plagiotropes	x	x	L'idéal est de combiner les deux méthodes, si ce n'est pas possible la photogrammétrie est plus adaptée pour cartographier des rhizomes rampants isolés les uns des autres.
<b>Régressive -</b> Présence de patches (faisceaux isolés / petites taches d'herbier vivant) sur la matte morte	x		La photogrammétrie est plus adaptée pour cartographier un herbier présentant une limite régressive avec présence de patch sur la matte morte. La morphologie de l'herbier est proche d'une limite d'herbier clairsemée.
<b>Régressive -</b> Etendue de matte morte avec peu de faisceaux isolés	x	x	Les deux méthodes sont adaptées pour cartographier et suivre un herbier avec une limite inférieure régressive (étendue de matte morte) mais où la limite de l'herbier vivant est assez franche. La morphologie de l'herbier est proche d'une limite d'herbier franche, si les feuilles sont courtes les deux méthodes sont possibles, si les feuilles sont longues la télémétrie est à privilégier.
<b>Erosive</b>	x	x	Les deux méthodes sont adaptées pour cartographier et suivre un herbier tombant de matte. Le choix de la méthode dépendra de la morphologie de l'herbier vivant.
<b>Nature du substrat de l'habitat</b>	<b>Photogrammétrie</b>	<b>Télémétrie</b>	<b>Remarques</b>
Meubles (sables grossiers à envasés, matte morte)	x	x	
Durs (roche en place, éboulis)	x		
<b>Taille de la zone</b>	<b>Photogrammétrie</b>	<b>Télémétrie</b>	<b>Remarques</b>
Petite (<10 m <sup>2</sup> )	x	x	
Moyenne (<200 m <sup>2</sup> )	x	x	
Grande (>200 m <sup>2</sup> )	x		

Afin de synthétiser les paragraphes précédents sur les typologies de limite d'herbier, nous présentons des schémas issus de la publication de Montefalcone (2009<sup>2</sup>) avec, pour chacun, la et les méthode(s) préconisée(s) pour la cartographie et le suivi des herbiers.

<sup>2</sup> Montefalcone, M. (2009). Ecosystem health assessment using the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: a review. *Ecological indicators*, 9(4), 595-604.

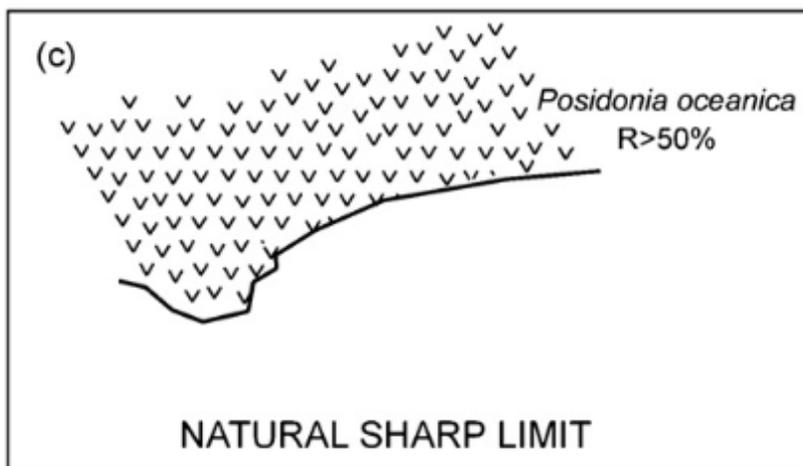




**Limite inférieure clairsemée**

PHOTOGRAMMETRIE

Le schéma s'apparente à celui d'une limite inférieure progressive avec une densité faible à moyenne de rhizomes plagiotropes.

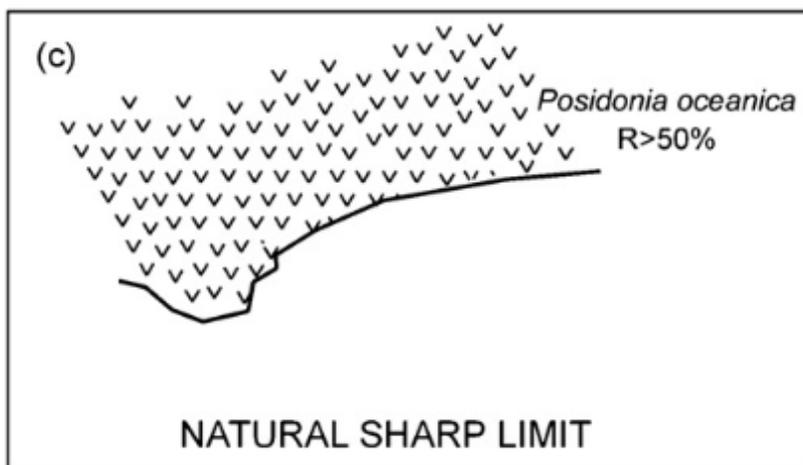


**Limite inférieure franche –  
feuilles courtes**

PHOTOGRAMMETRIE

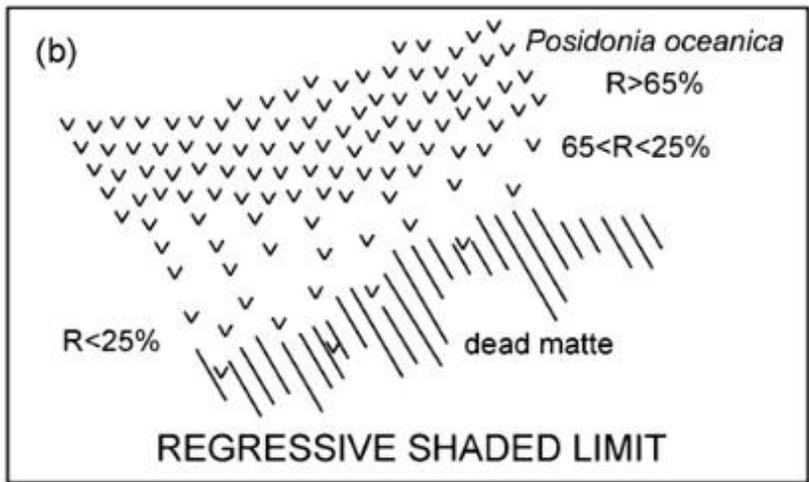
TELEMETRIE ACOUSTIQUE

Le schéma s'apparente à celui d'une limite inférieure progressive avec une forte densité de rhizomes plagiotropes.



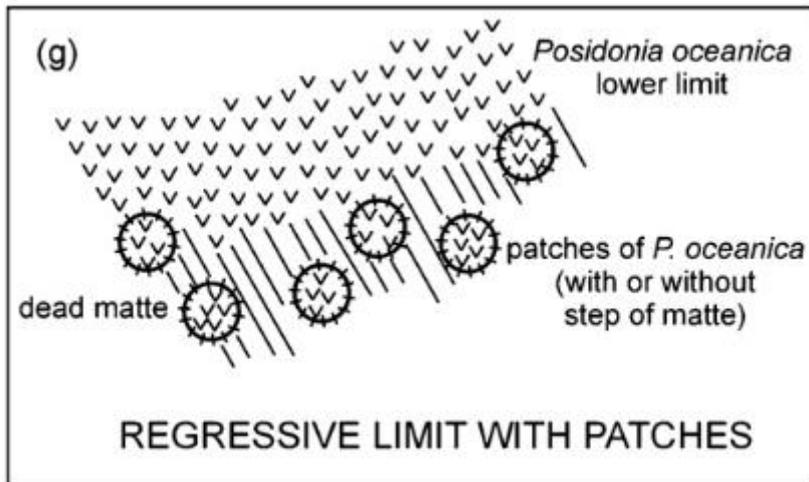
**Limite inférieure franche –  
feuilles longues**

TELEMETRIE ACOUSTIQUE



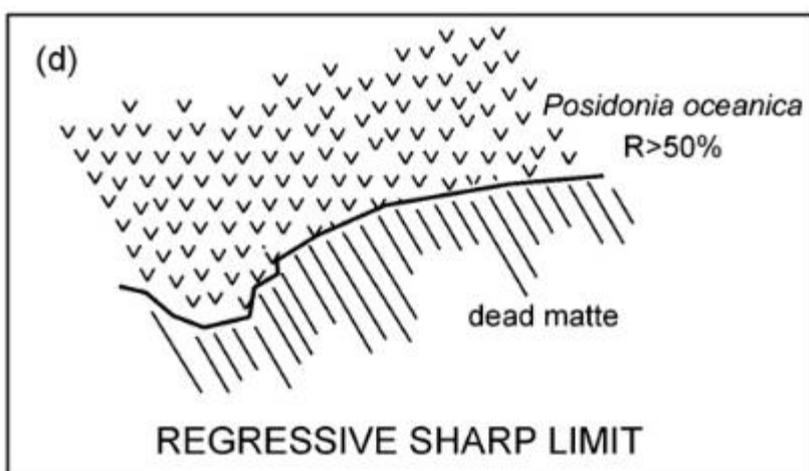
Limite inférieure régressive naturelle – présence de patches sur la matte (faisceaux isolés)

PHOTOGRAMMETRIE



Limite inférieure régressive – présence de patches sur la matte (taches)

PHOTOGRAMMETRIE



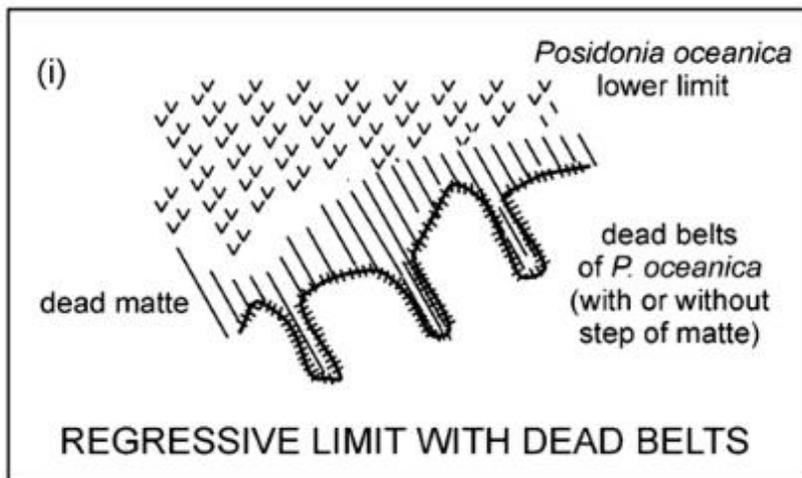
Limite inférieure régressive

PHOTOGRAMMETRIE

TELEMETRIE ACOUSTIQUE

Le choix de la méthode dépend de la longueur des feuilles



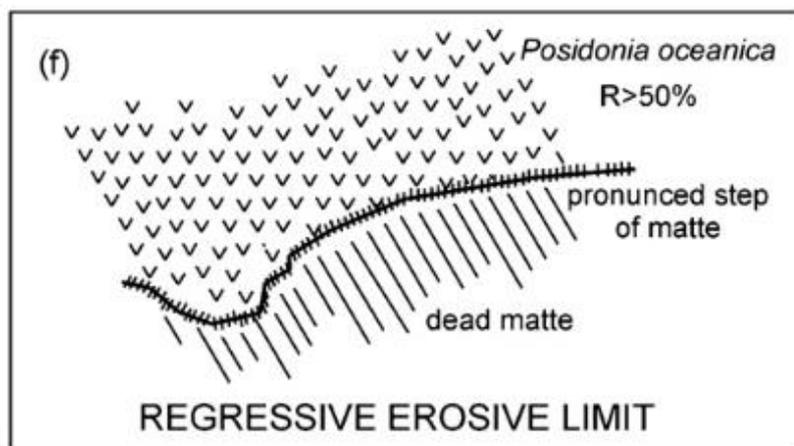


Limite inférieure régressive

PHOTOGRAMMETRIE

TELEMETRIE ACOUSTIQUE

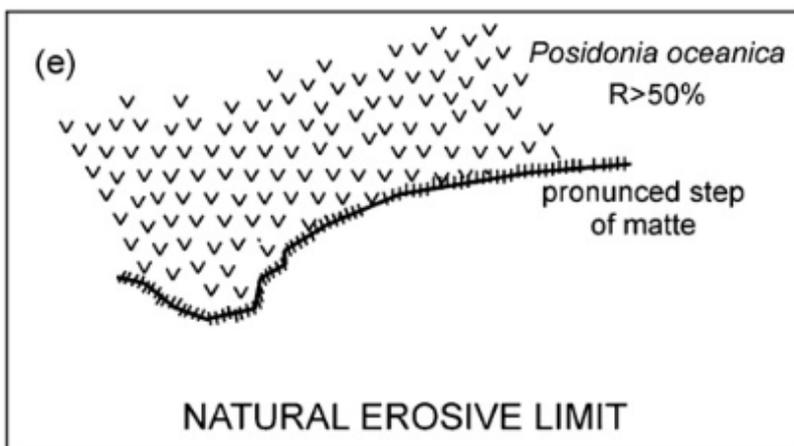
Le choix de la méthode dépend de la longueur des feuilles



Limite inférieure érosive régressive

PHOTOGRAMMETRIE

TELEMETRIE ACOUSTIQUE



Limite inférieure érosive naturelle

PHOTOGRAMMETRIE

TELEMETRIE ACOUSTIQUE

Entre 2011 et 2019, Andromède a cartographié les limites inférieures de 63 sites d'herbier correspondant à 173 cartographies différentes avec les retours sur sites. Ces cartographies ont été réalisées majoritairement dans le cadre du réseau de suivi TEMPO financé par l'Agence de l'eau RMC (56 sites différents). Le tableau suivant résume le nombre de fois où chaque typologie de limite inférieure d'herbier a été cartographiée (Nombre total = 173).

Tableau 3 : Typologie de limite d'herbier et nombre de cartographies réalisées par Andromède entre 2011 et 2019 (Nombre total = 173).

Typologie de limite d'herbier	Nombre de cartographies réalisées
Régressive	37
Clairsemée	39
Franche	93
Progressive	4

54 % des sites cartographiés (n=93) présentent des herbiers avec une limite inférieure franche, 23 % avec une limite inférieure clairsemée, 21 % avec une limite régressive et 2 % avec une limite progressive.

D'après les éléments fournis dans le Tableau 1, le Tableau 2, et le Tableau 3, la photogrammétrie semble la méthode à privilégier pour la cartographie des limites inférieures d'herbiers car elle est adaptée à quasiment toutes les typologies de limites inférieures, à toutes les natures de substrat et tailles de zone d'étude. Elle permet un archivage des orthophotographies à un instant t, de partager les modèles 3D sur internet, et les temps d'installation et d'acquisition sous l'eau sont relativement courts. Par contre cette méthode nécessite un temps de calcul assez long, de l'espace de stockage et est moins adaptée que la télémétrie acoustique pour des herbiers avec de longues feuilles.

## IV. Valorisation de la photogrammétrie pour illustrer et appuyer les résultats obtenus par télémétrie

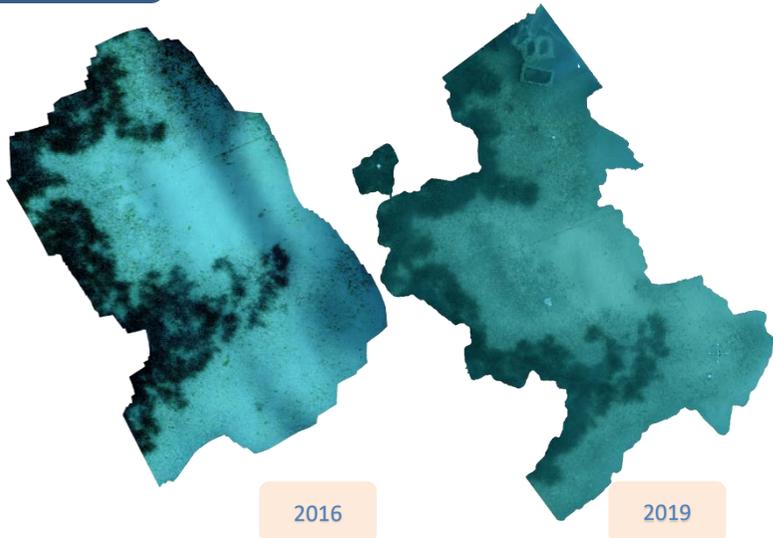
Tout comme la télémétrie acoustique, la photogrammétrie permet de cartographier l'herbier à un instant t et également de comparer son évolution dans l'espace et dans le temps. En superposant les différentes orthophotographies réalisées par photogrammétrie à chaque suivi, il est en effet possible de cibler les zones de discordance positive et négative.

62 sites d'herbier ont fait l'objet d'acquisitions photogrammétriques entre 2016 et 2018 sur les trois régions. En 2019, **19 sites localisés en région PACA Est** qui avaient été modélisés en 2016 ont fait l'objet de nouvelles acquisitions photogrammétriques. Grâce à ce jeu de données, nous pouvons comparer les cartographies de l'herbier réalisées par photogrammétrie à trois années d'intervalle.

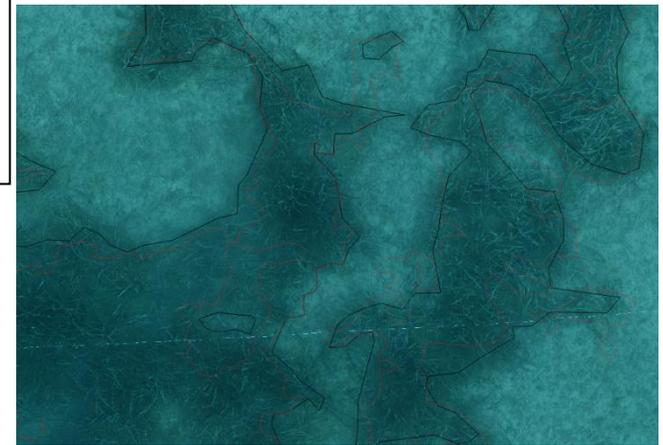
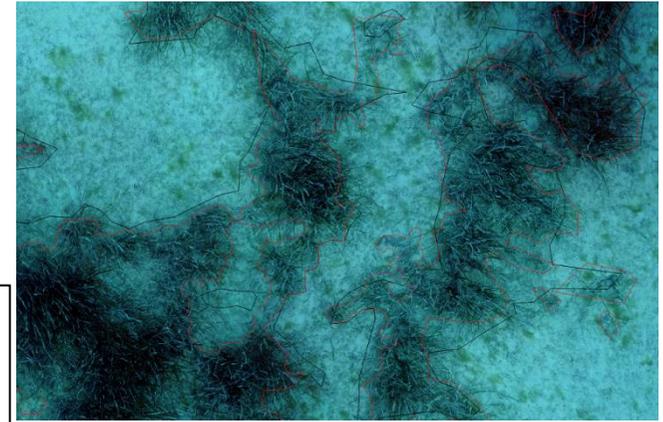
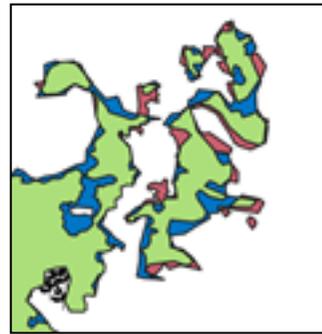
Nous présentons dans cette partie des exemples de comparaison des cartographies réalisées par photogrammétrie entre 2016 et 2019 sur des sites TEMPO en trois étapes :

- Etape 1 : Vue du site reconstitué en 3D par photogrammétrie en 2016 et en 2019 (à droite). Le carré noir indique la localisation de la zone modélisée à l'autre suivi en cas de surface inférieure.
- Etape 2 : Cartographie de l'herbier par photogrammétrie en 2019 et dynamique évolutive de l'herbier sur trois ans (période 2016-2019).
- Etape 3 : Exemples de zooms sur les modèles 3D en 2016 et en 2019 illustrant les discordances positives et/ou négatives.

ETAPE 1

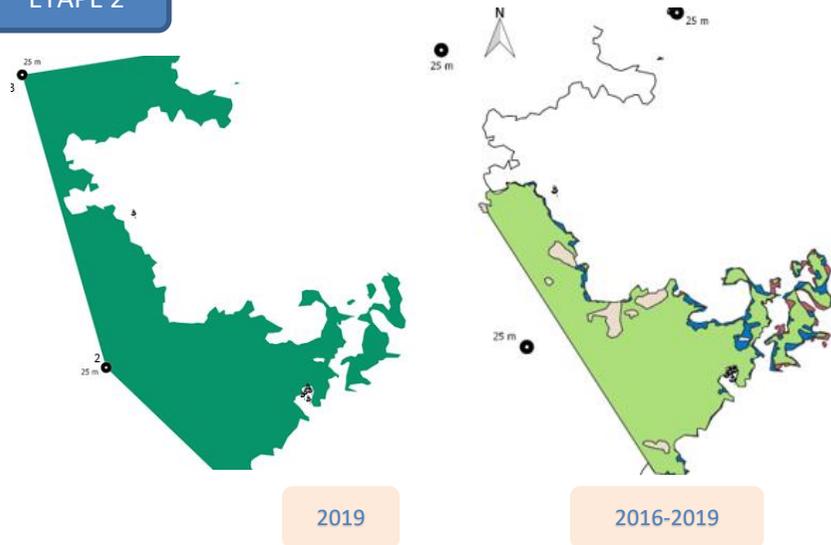


ETAPE 3



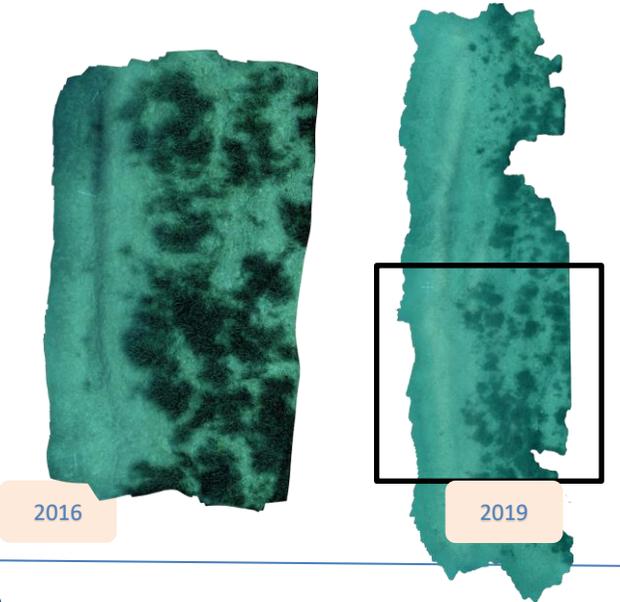
Zoom sur le modèle 3D du site Pointe Veille Est en 2016 (en haut) et 2019 (en bas) illustrant la progression de l'herbier entre ces deux

ETAPE 2

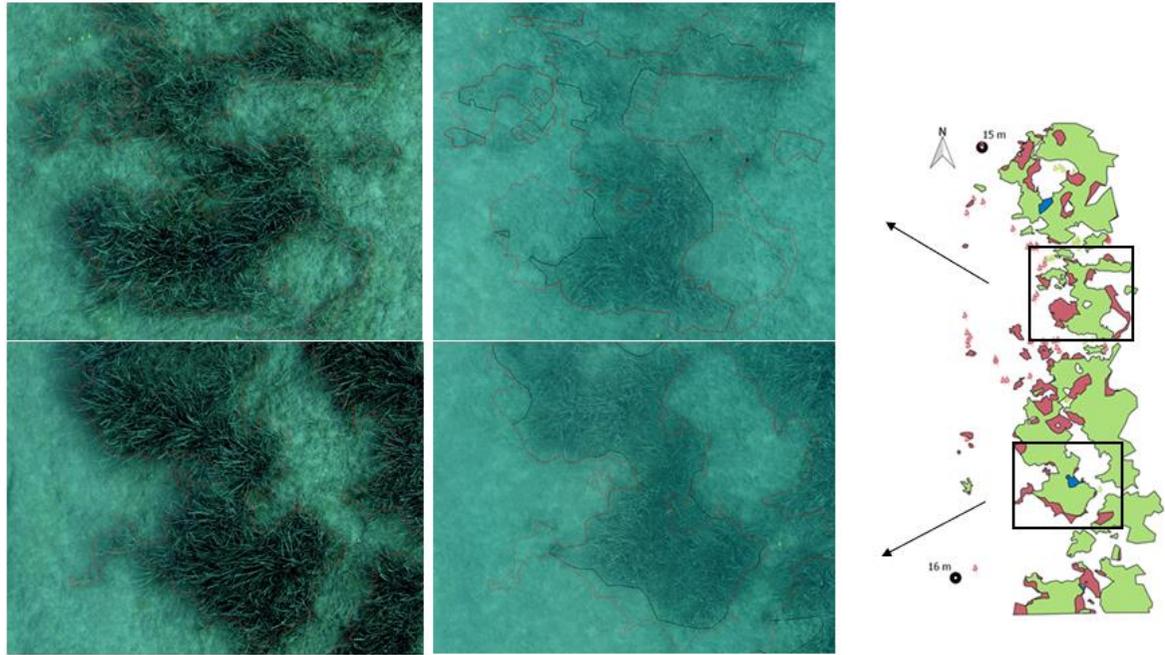


Site Pointe Veille Est

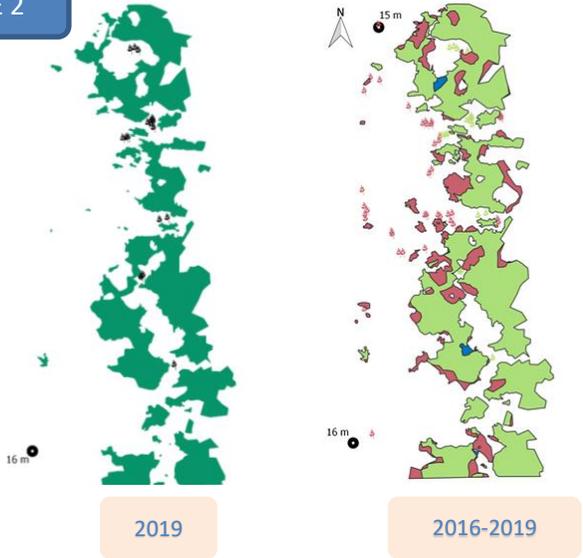
ETAPE 1



ETAPE 3



ETAPE 2



Zooms sur le modèle 3D du site Pointe Rube en 2016 (à gauche) et 2019 (à droite) illustrant la disparition de taches ainsi que la régression de l'herbier entre ces deux suivis

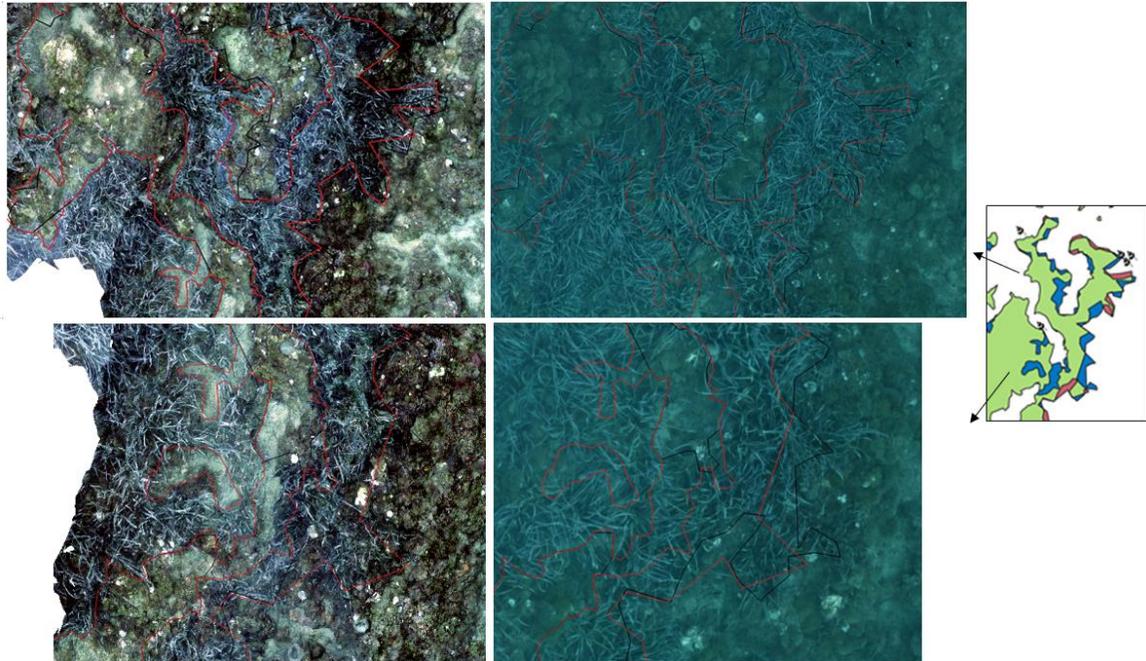
Site Pointe Rube



ETAPE 1

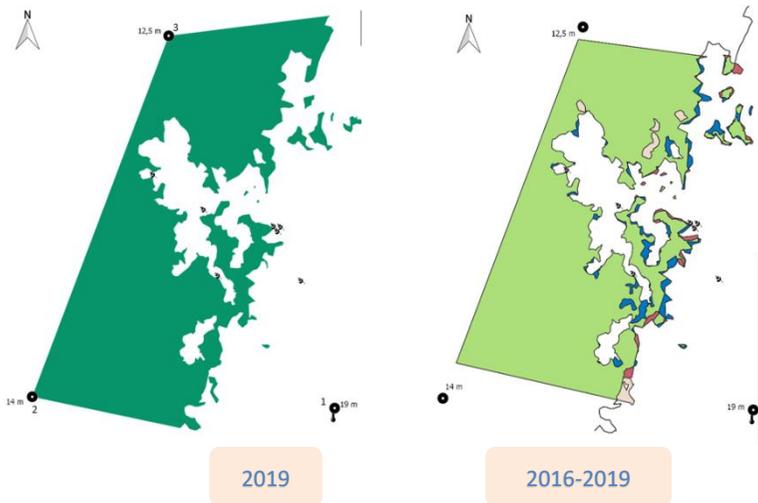


ETAPE 3



Zooms sur le modèle 3D du site Pointe Bacon en 2016 (à gauche) et 2019 (à droite) illustrant la progression de l'herbier entre ces deux

ETAPE 2



Site Pointe Bacon

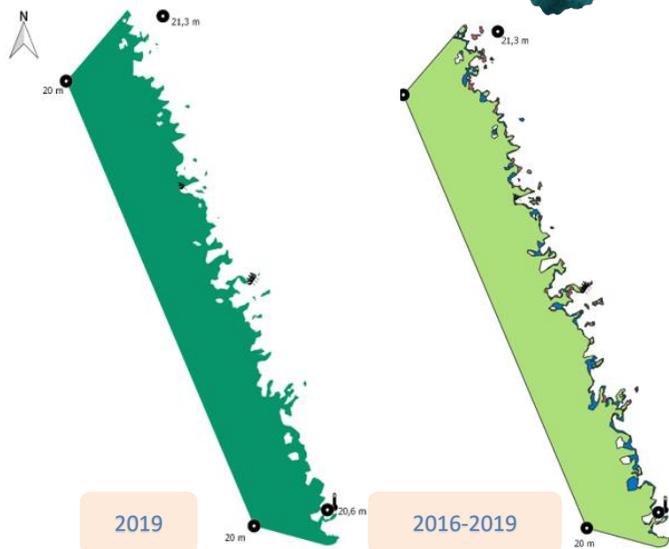
ETAPE 1



2016

2019

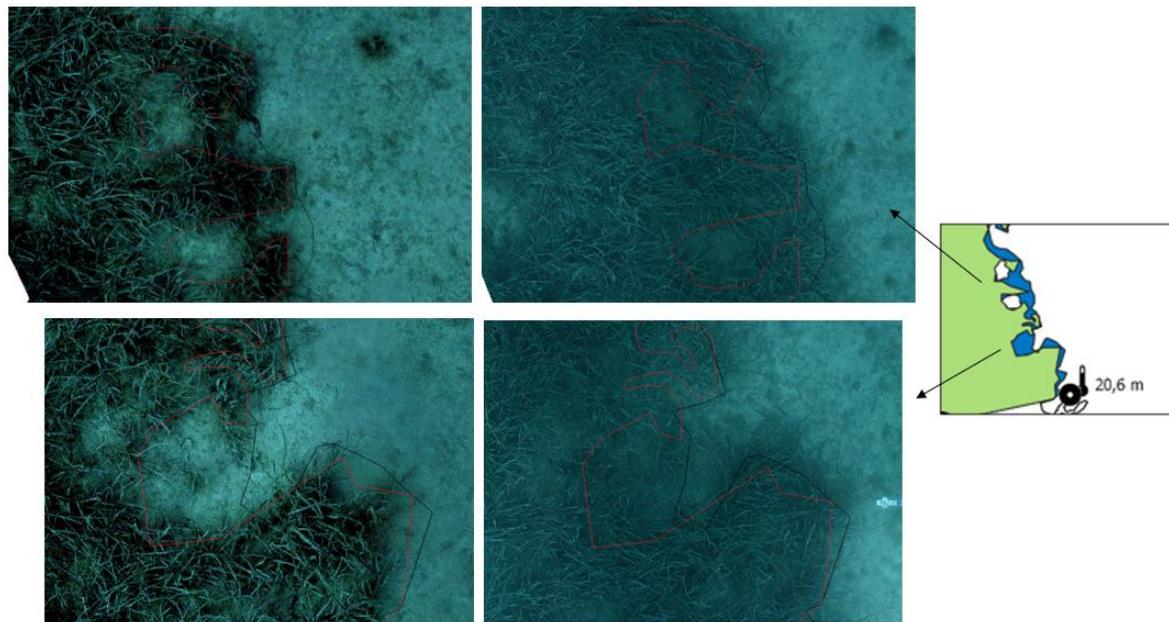
ETAPE 2



2019

2016-2019

ETAPE 3

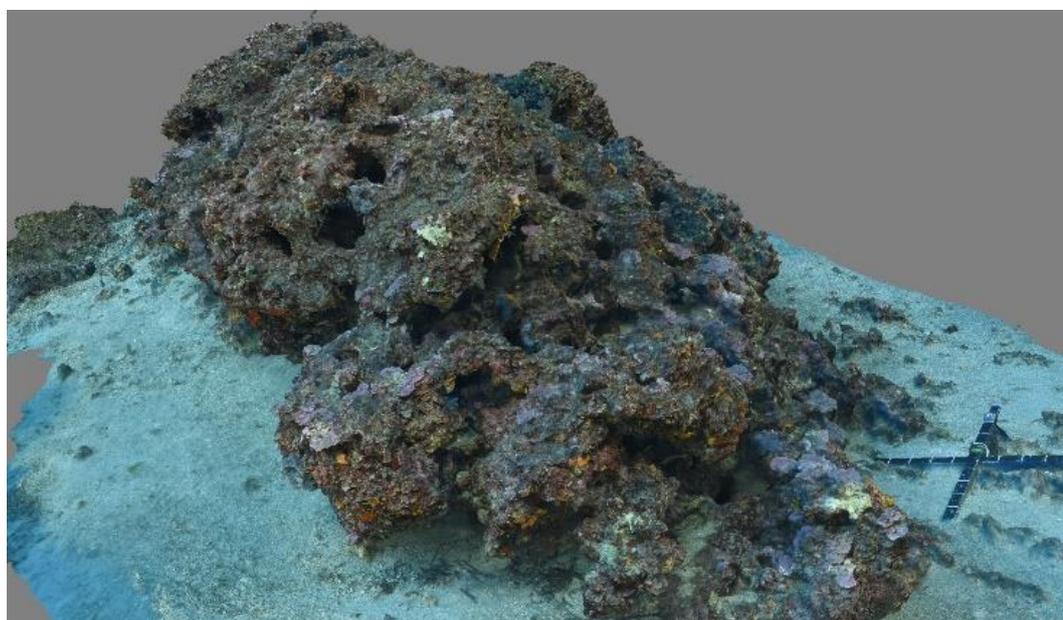


Zooms sur le modèle 3D du site Cap Gros Nord en 2016 (à gauche) et 2019 (à droite) illustrant la progression de l'herbier entre ces deux

Site Cap Gros Nord

# Chapitre 3

## Modélisation des sites TEMPO et RECOR 2018-



Ce chapitre présente les modèles réalisés en 2018 et 2019 par photogrammétrie sur les sites RECOR (suivi des récifs coralligènes – 42 sites) et TEMPO (suivi des herbiers de posidonie – 34 sites).

# Chapitre 3 : Modélisation des sites TEMPO et RECOR 2018-2019

## I. Sites modélisés en 2018

En 2018, les modèles ont été réalisés par photogrammétrie sur 14 sites TEMPO (suivi des herbiers de posidonie) et 17 sites RECOR (suivi des récifs coralligènes).

### I.A. TEMPO

#### I.A.1. Alon

Le modèle 3D du site TEMPO « Alon » a été construit à partir de 947 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

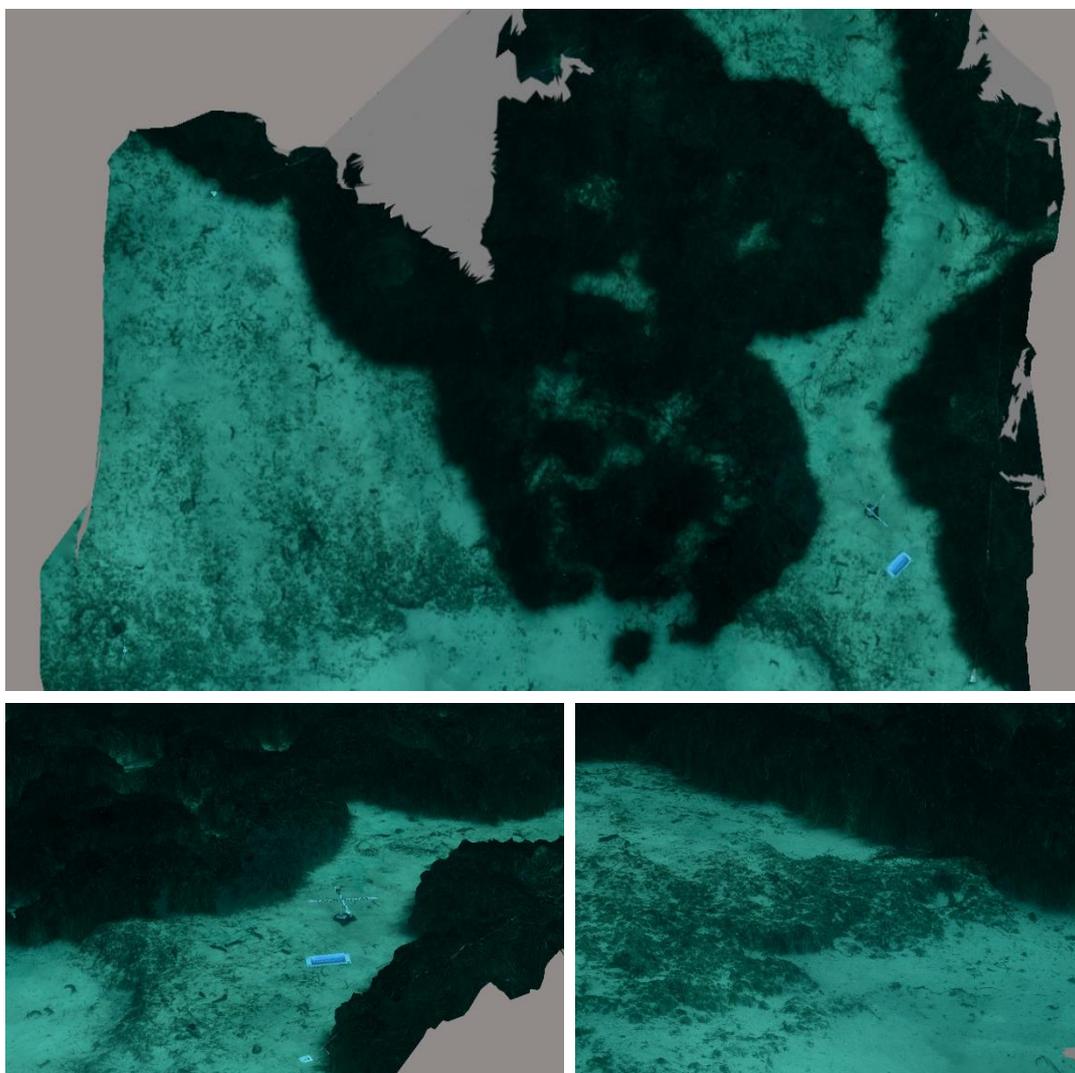


Figure 20 : Modèle du site TEMPO « Alon »

### I.A.2. Bonnieu Nord

Le modèle 3D du site TEMPO « Bonnieu Nord » a été construit à partir de 1228 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

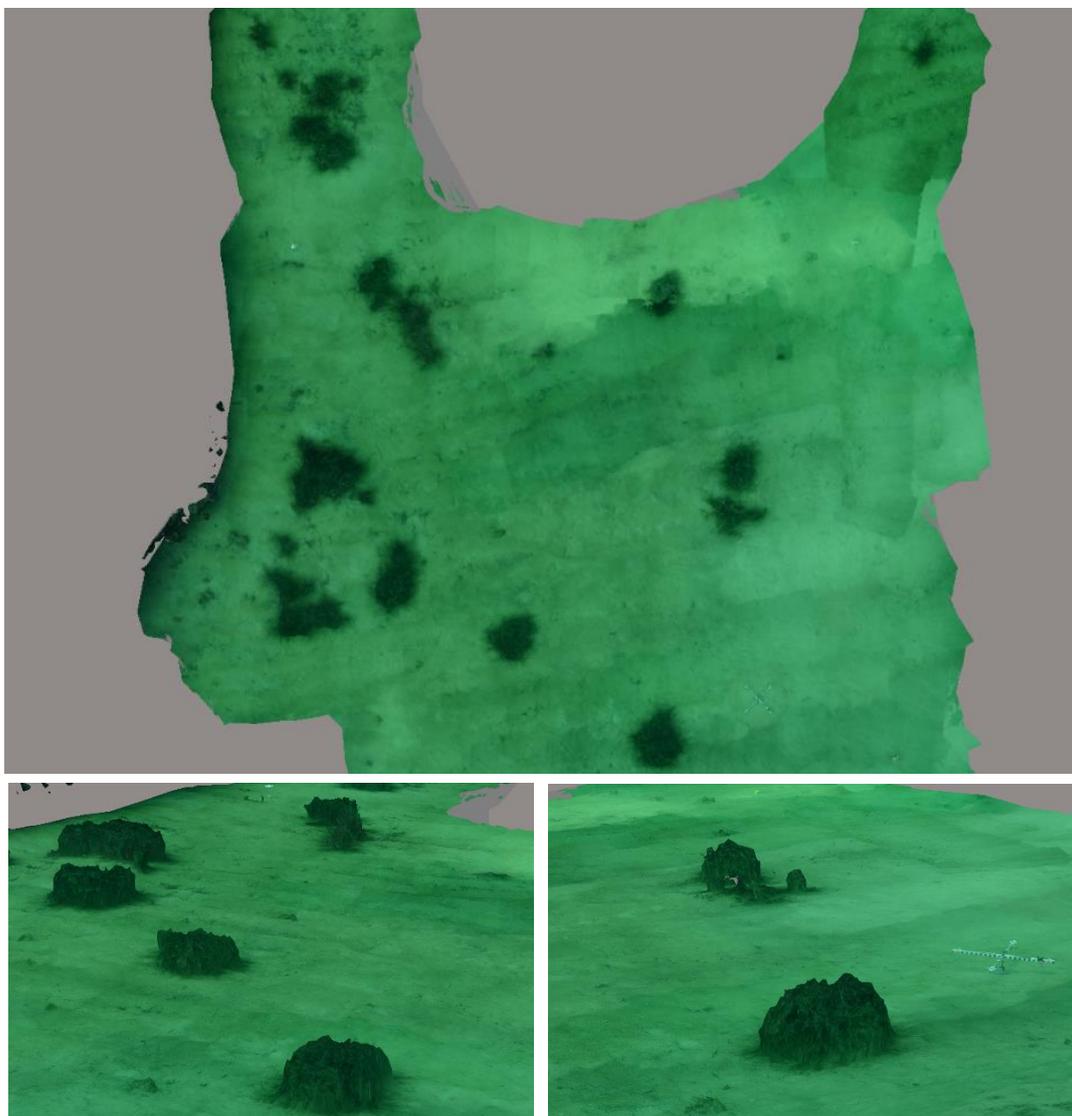


Figure 21 : Modèle du site TEMPO « Bonnieu Nord »

### I.A.3. Cap Canaille

Le modèle 3D du site TEMPO « Cap Canaille » a été construit à partir de 916 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

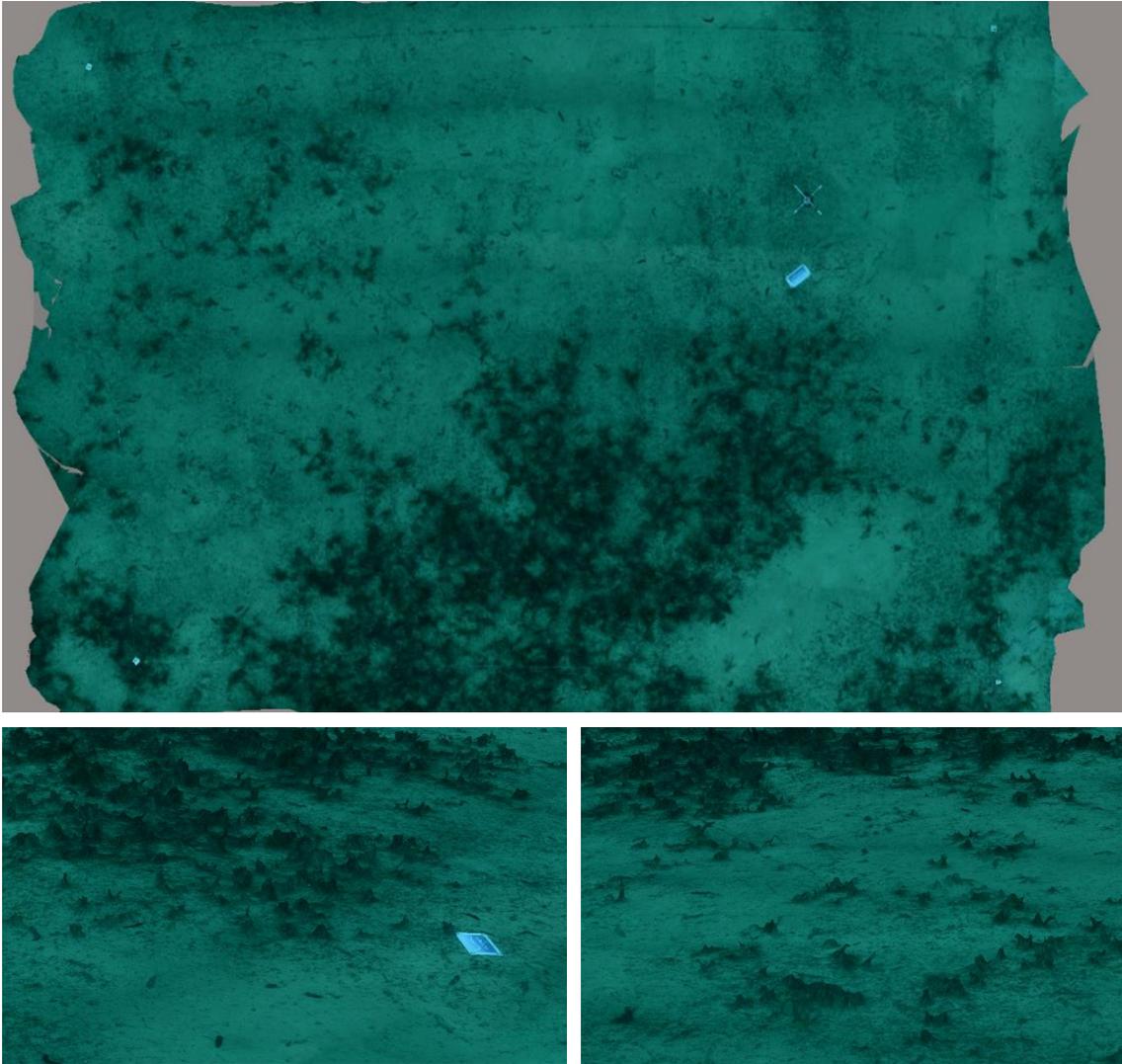


Figure 22 : Modèle du site TEMPO « Cap Canaille »



#### I.A.4. Cap Sicié Ouest

Le modèle 3D du site TEMPO « Cap Sicié Ouest » a été construit à partir de 766 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

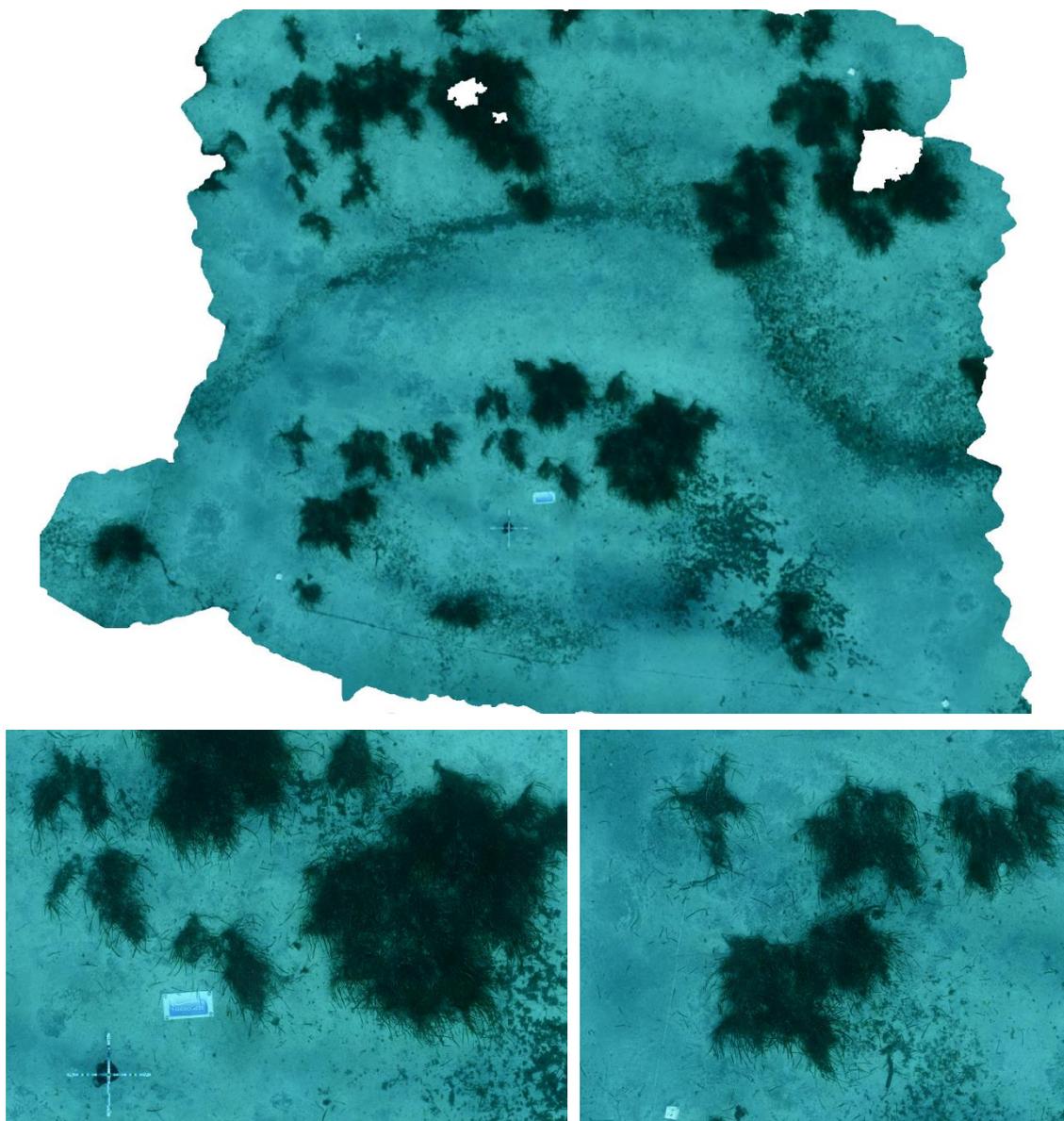


Figure 23 : Modèle du site TEMPO « Cap Sicié Ouest »

### I.A.5. Carry

Le modèle 3D du site TEMPO « Carry » a été construit à partir de 1206 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

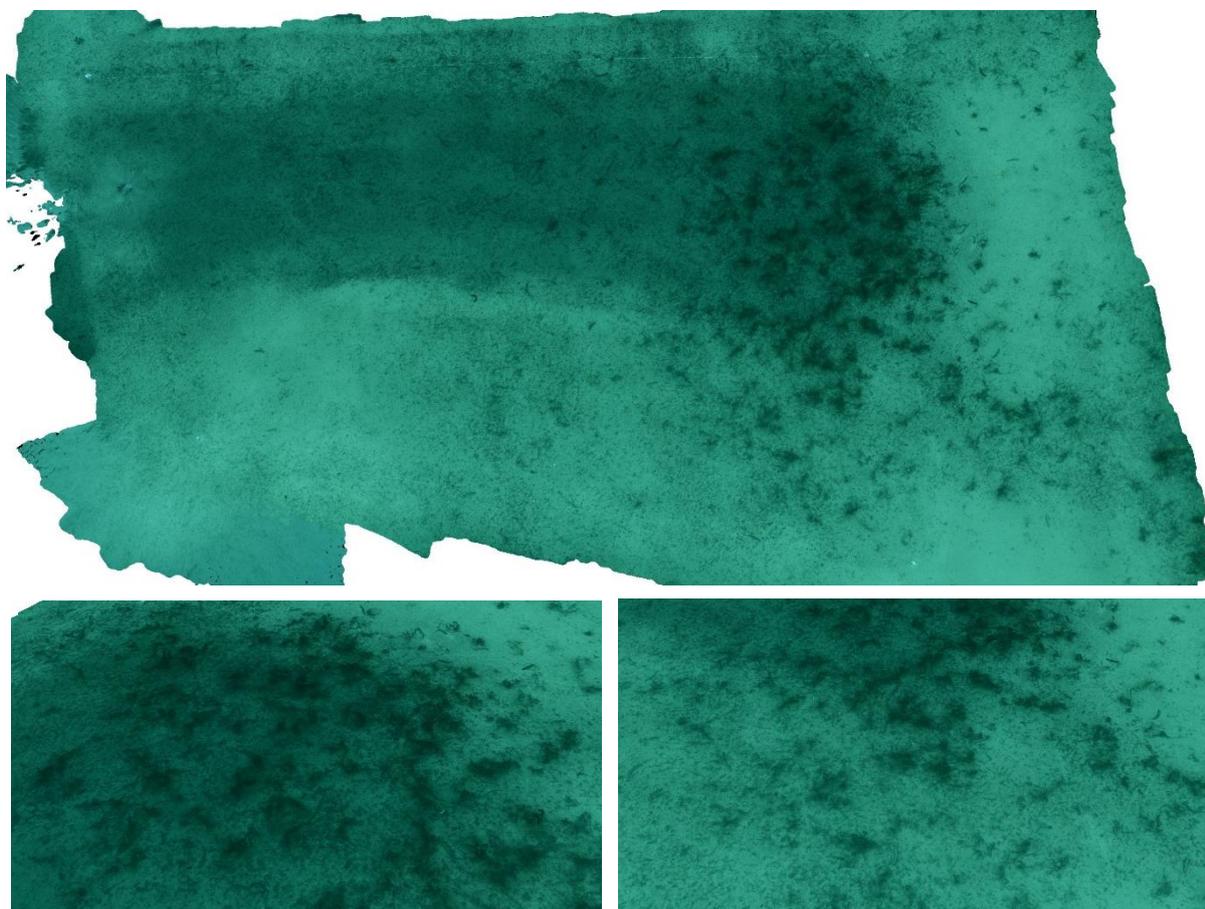


Figure 24 : Modèle du site TEMPO « Carry »



### I.A.6. Digue Marseille

Le modèle 3D du site TEMPO « Digue Marseille » a été construit à partir de 907 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

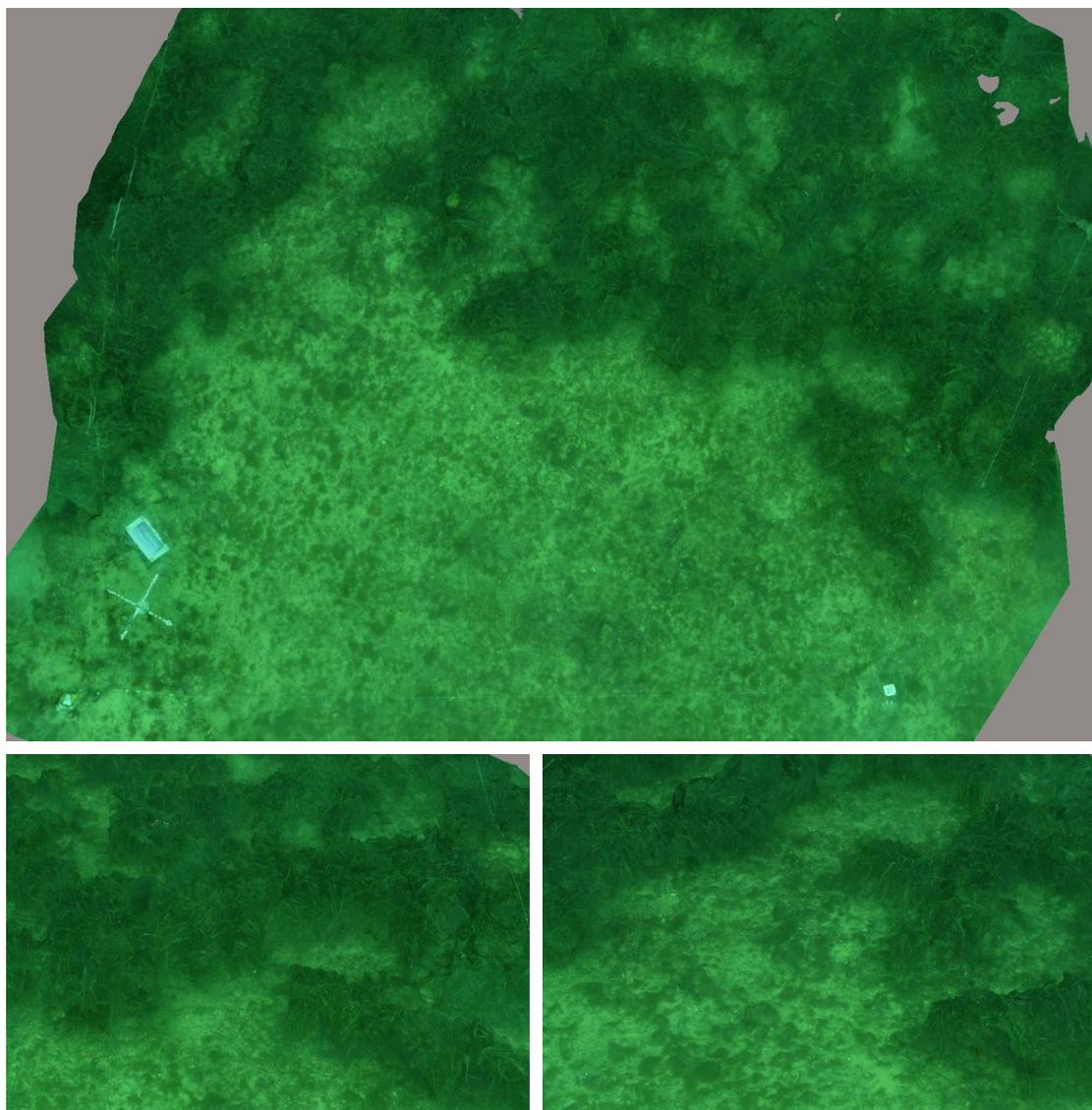


Figure 25 : Modèle du site TEMPO « Digue Marseille »

## I.A.7. Embiez Nord

Le modèle 3D du site TEMPO « Embiez Nord » a été construit à partir de 995 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

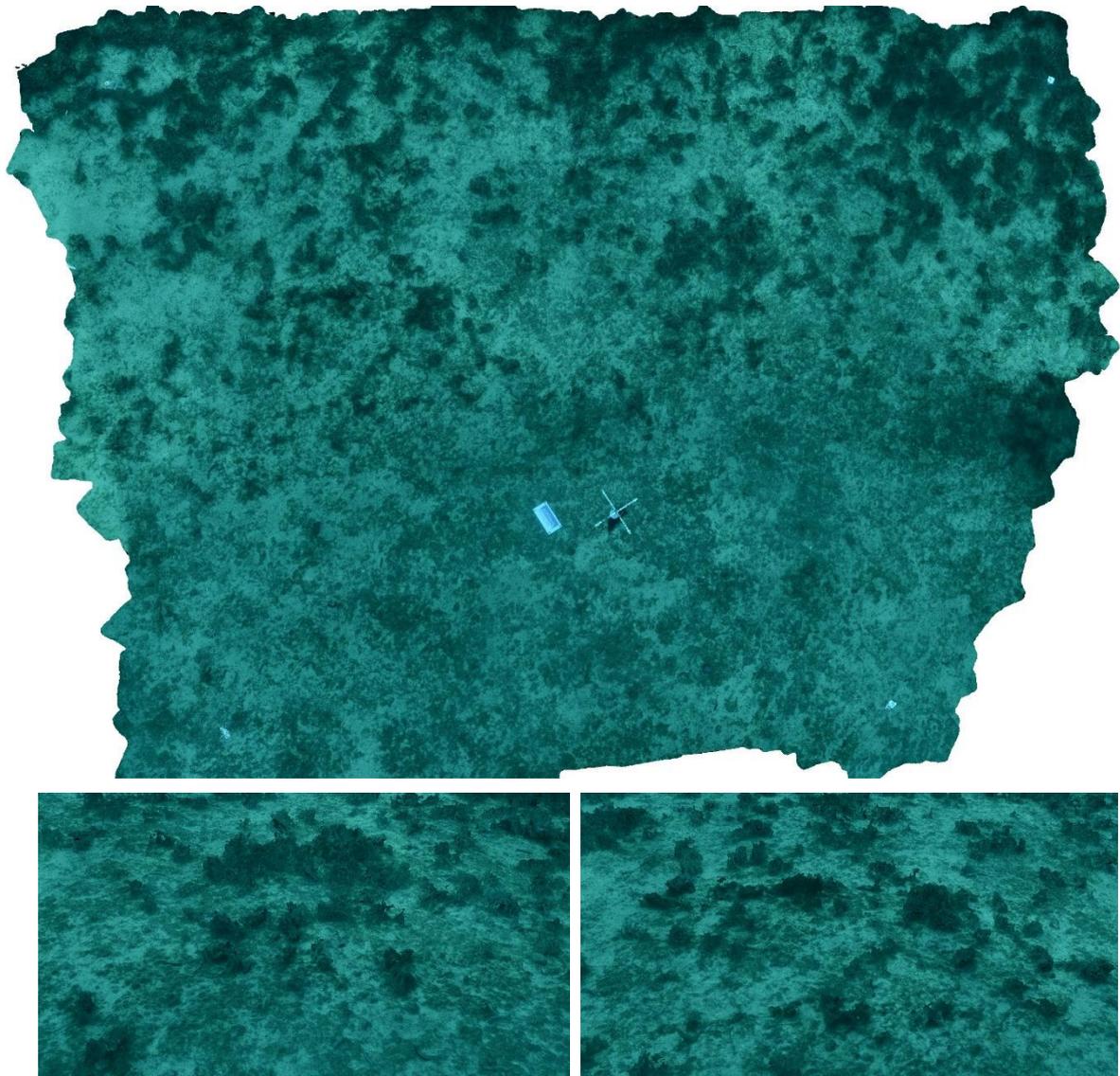


Figure 26 : Modèle du site TEMPO « Embiez Nord »



### I.A.8. Frioul

Le modèle 3D du site TEMPO « Frioul » a été construit à partir de 1122 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

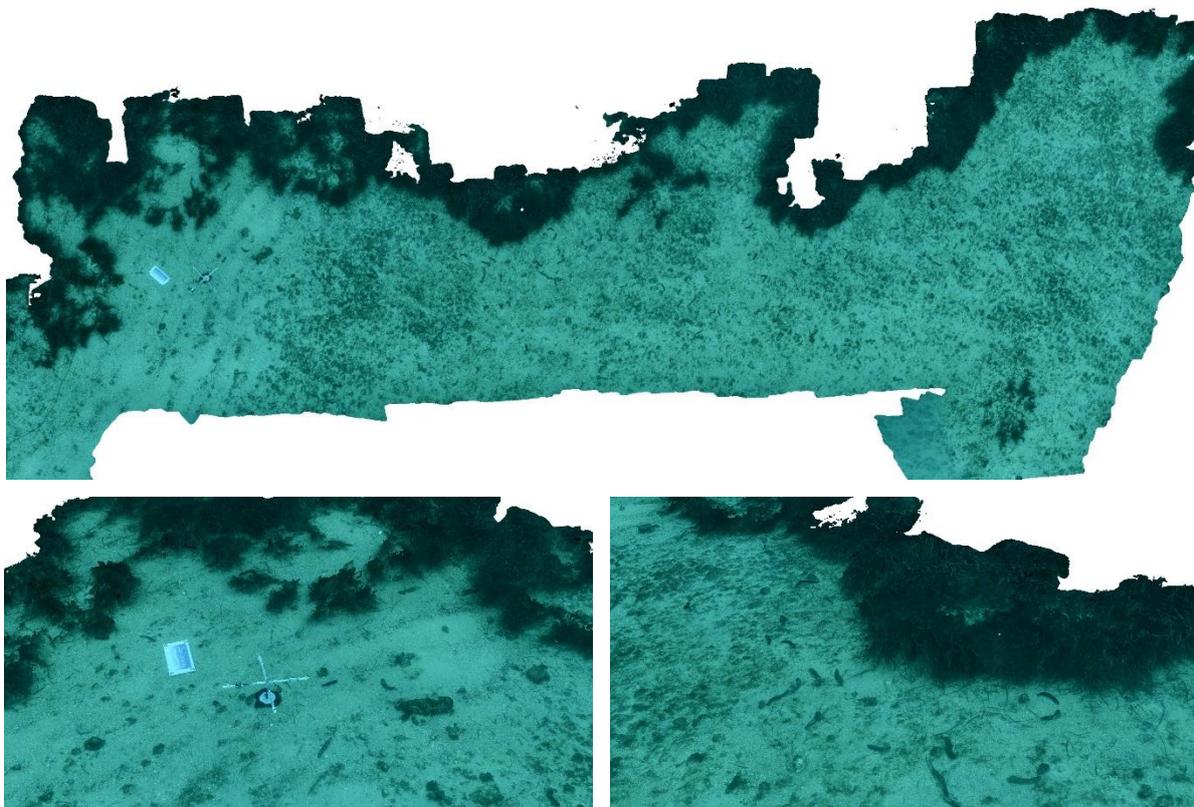


Figure 27 : Modèle du site TEMPO « Frioul »

### I.A.9. Grand Travers

Le modèle 3D du site TEMPO « Grand Travers » a été construit à partir de 1126 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

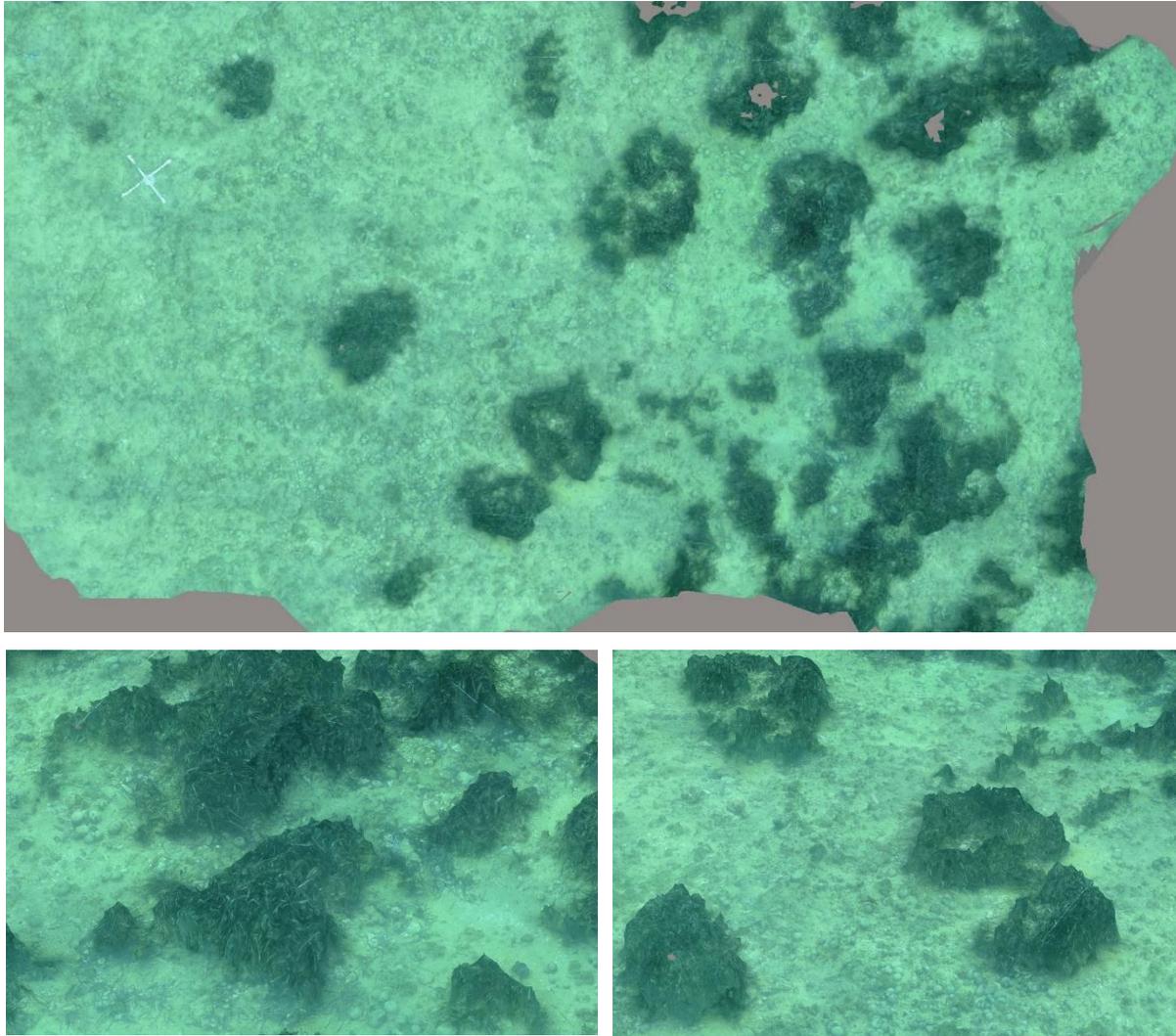


Figure 28 : Modèle du site TEMPO « Grand Travers »



### I.A.10. Ile Plane

Le modèle 3D du site TEMPO « Ile Plane » a été construit à partir de 988 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

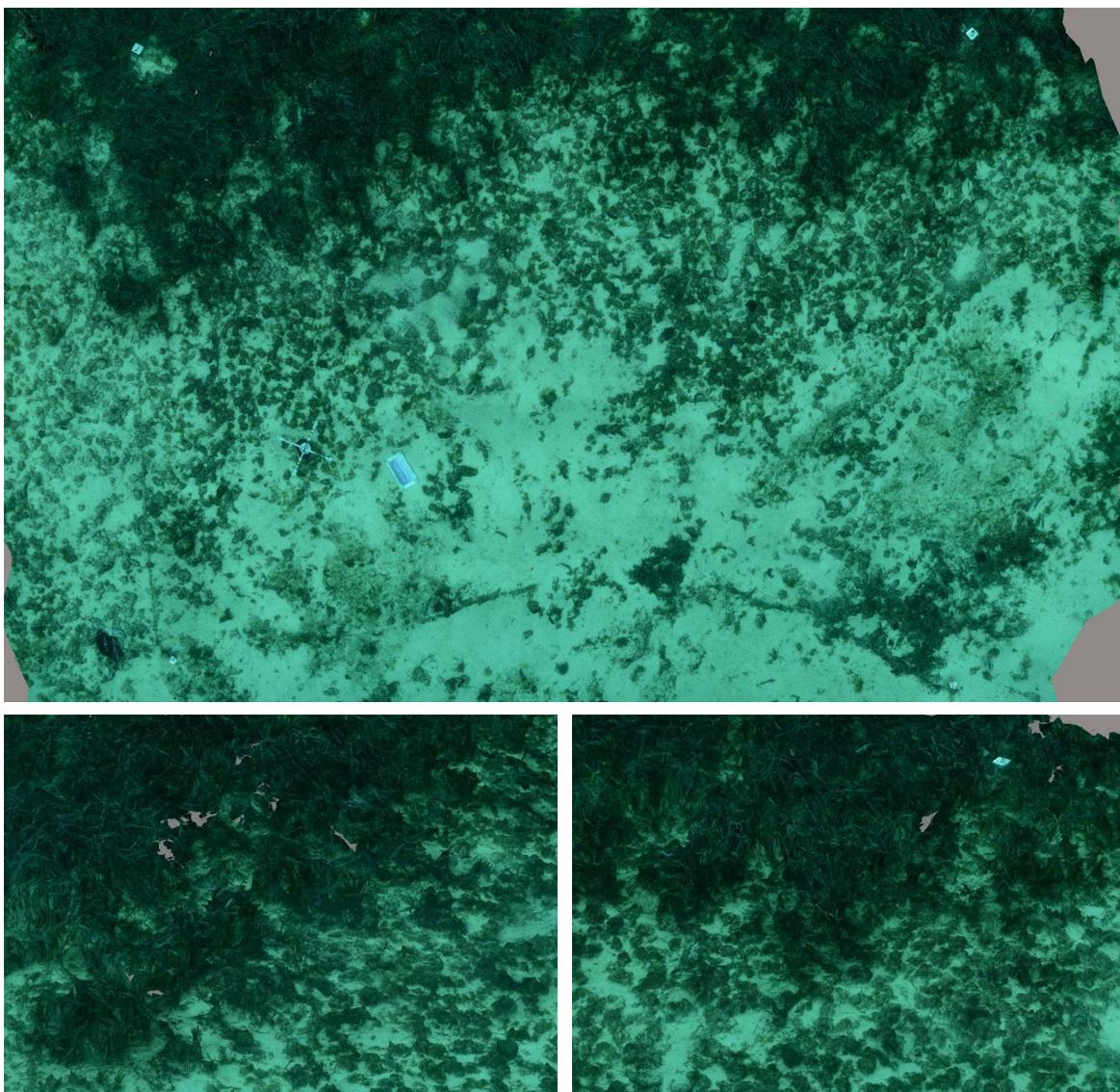


Figure 29 : Modèle du site TEMPO « Ile Plane »

## I.A.11. Liouquet

Le modèle 3D du site TEMPO « Liouquet » a été construit à partir de 1032 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

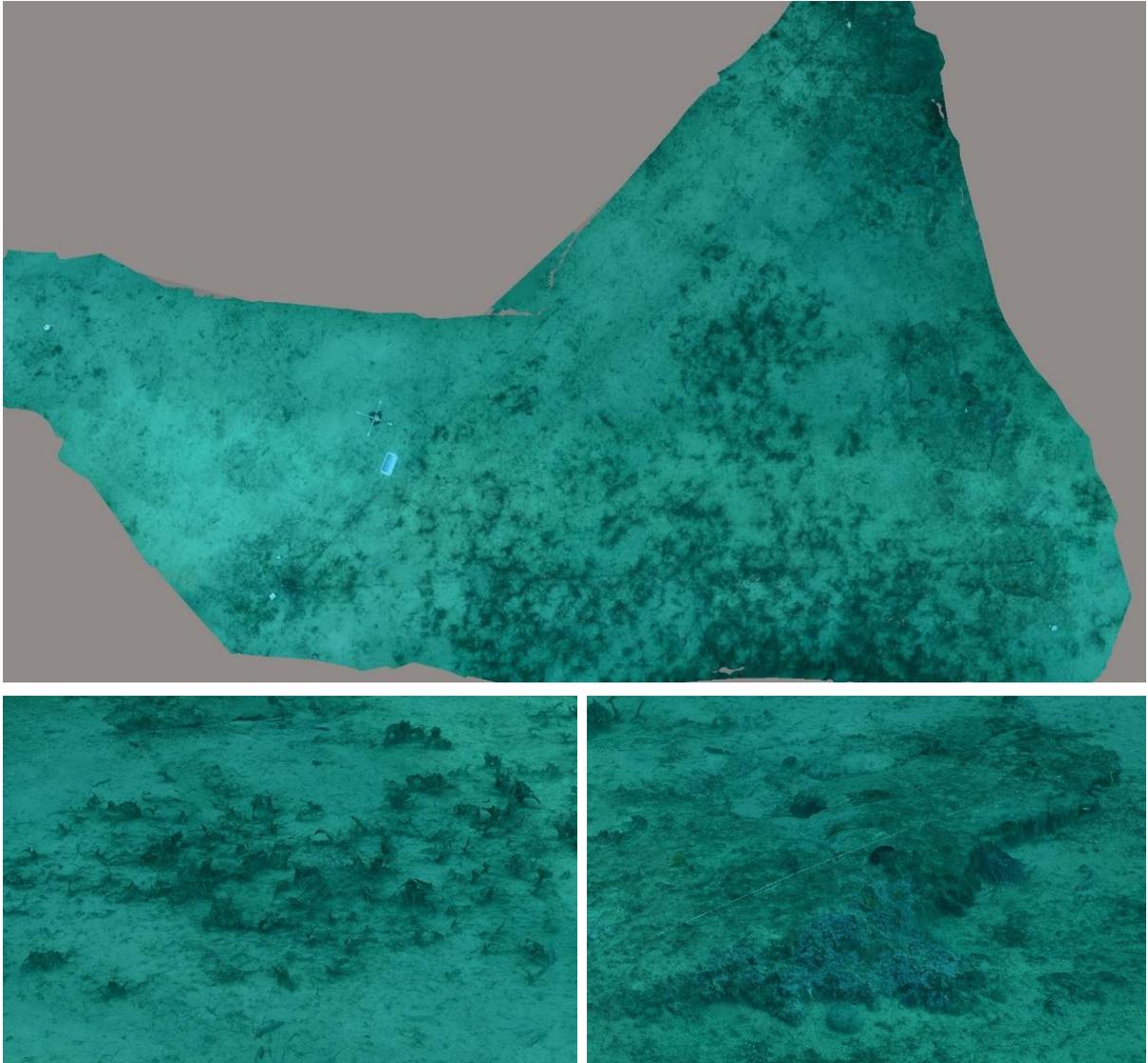


Figure 30 : Modèle du site TEMPO « Liouquet »



### I.A.12. Morgiou

Le modèle 3D du site TEMPO « Morgiou » a été construit à partir de 519 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

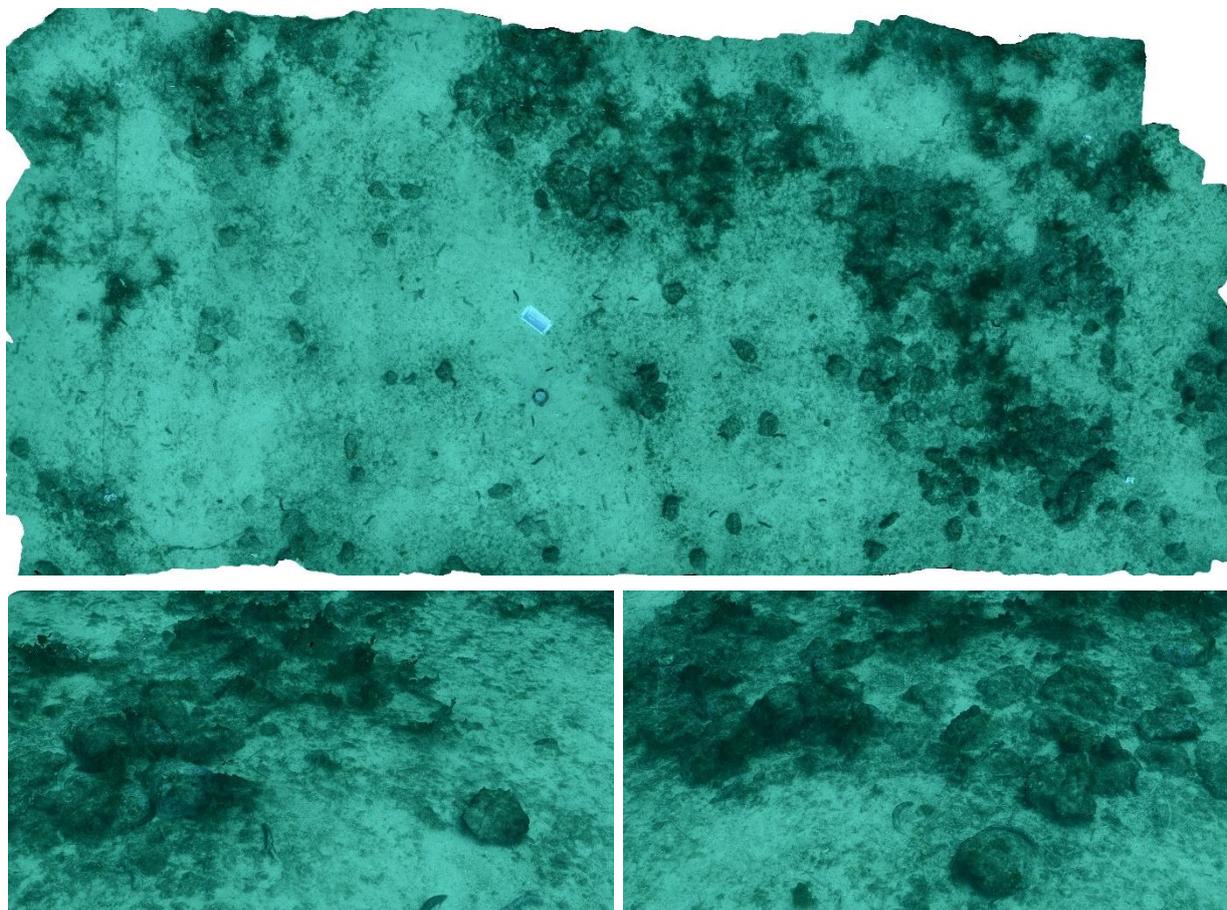


Figure 31 : Modèle du site TEMPO « Morgiou »

### I.A.13. Paulilles

Le modèle 3D du site TEMPO « Paulilles » a été construit à partir de 1347 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

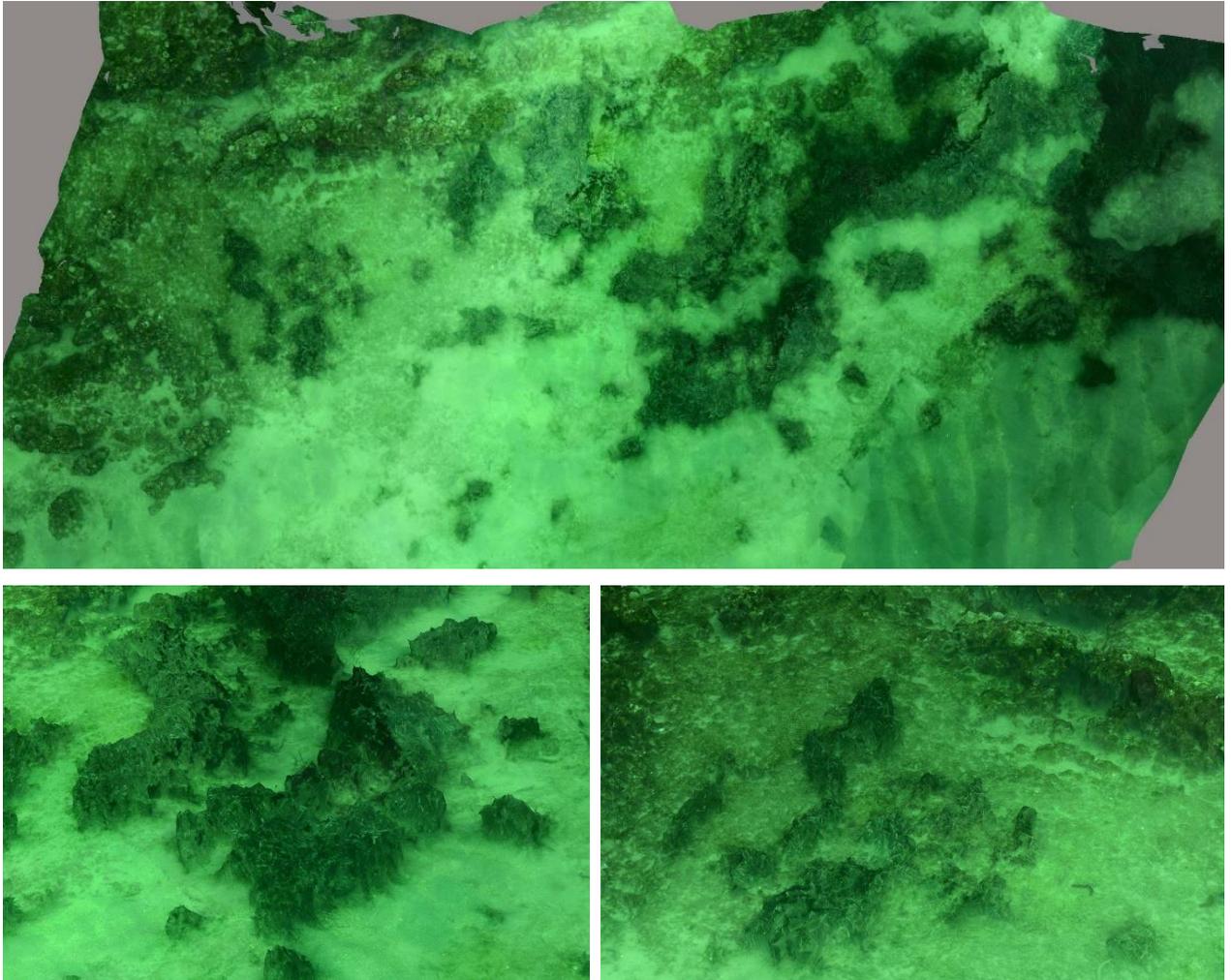


Figure 32 : Modèle du site TEMPO « Paulilles »



### I.A.14. Punta di Canelle

Le modèle 3D du site TEMPO « Punta di Canelle » a été construit à partir de 441 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

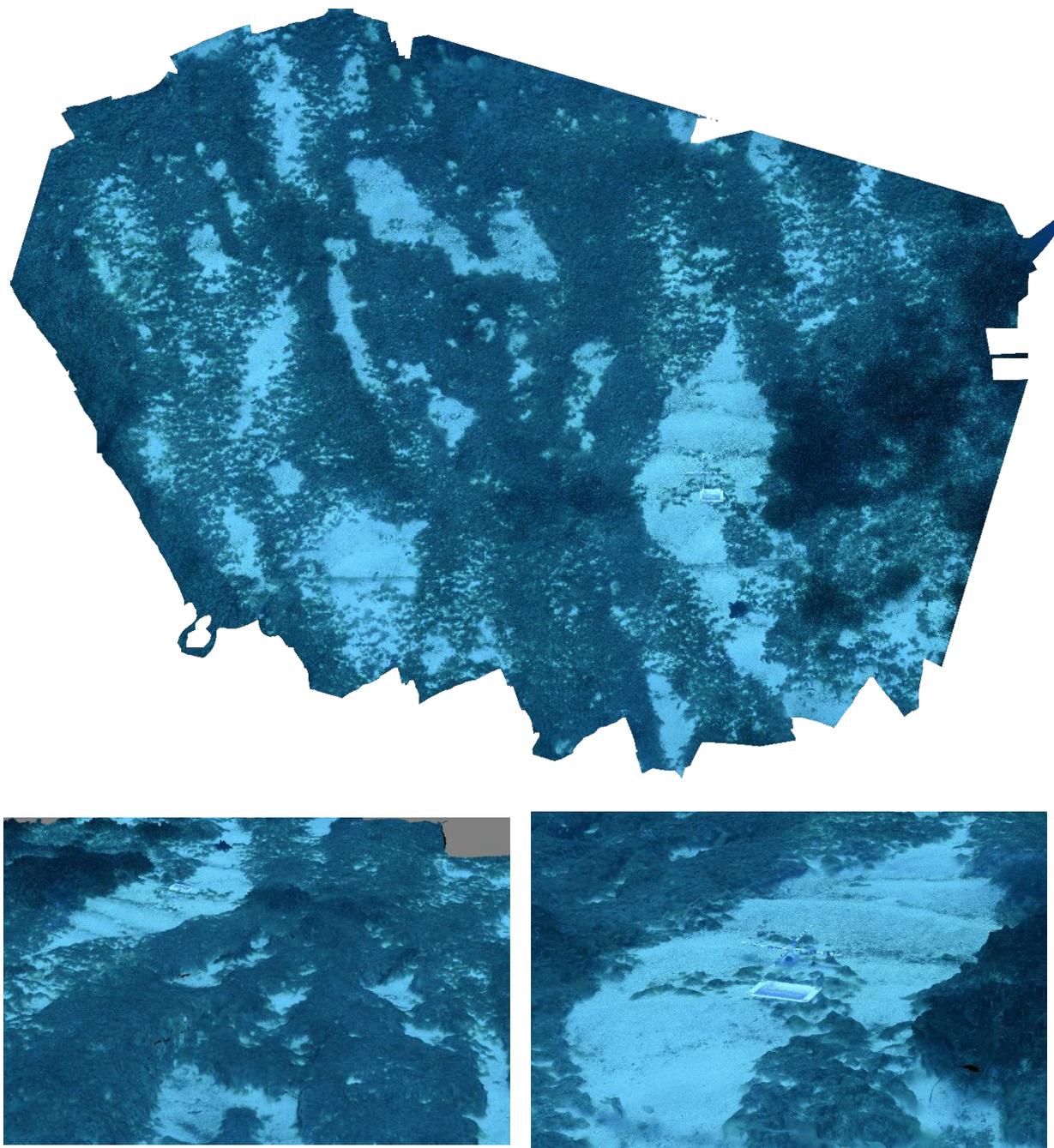


Figure 33 : Modèle du site TEMPO « Punta di Canelle »

## I.B. RECOR

### I.B.1. Banc des Blauquières

Le modèle 3D du site RECOR « Banc des Blauquières » a été construit à partir de 1155 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

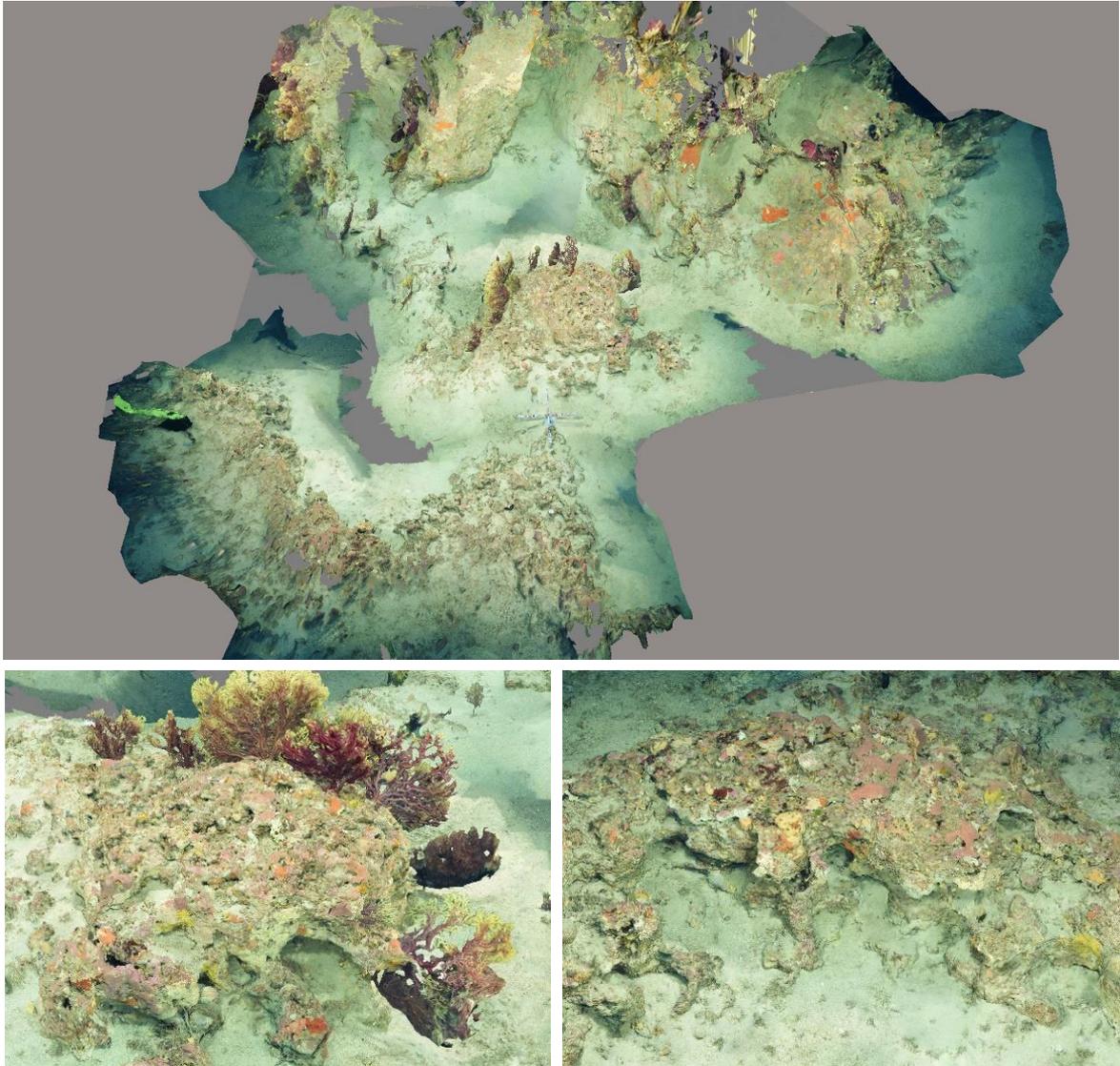


Figure 34 : Modèle du site RECOR « Banc des Blauquières »



### I.B.2. Beachrock Ciotat

Le modèle 3D du site RECOR « Beachrock Ciotat » a été construit à partir de 1725 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

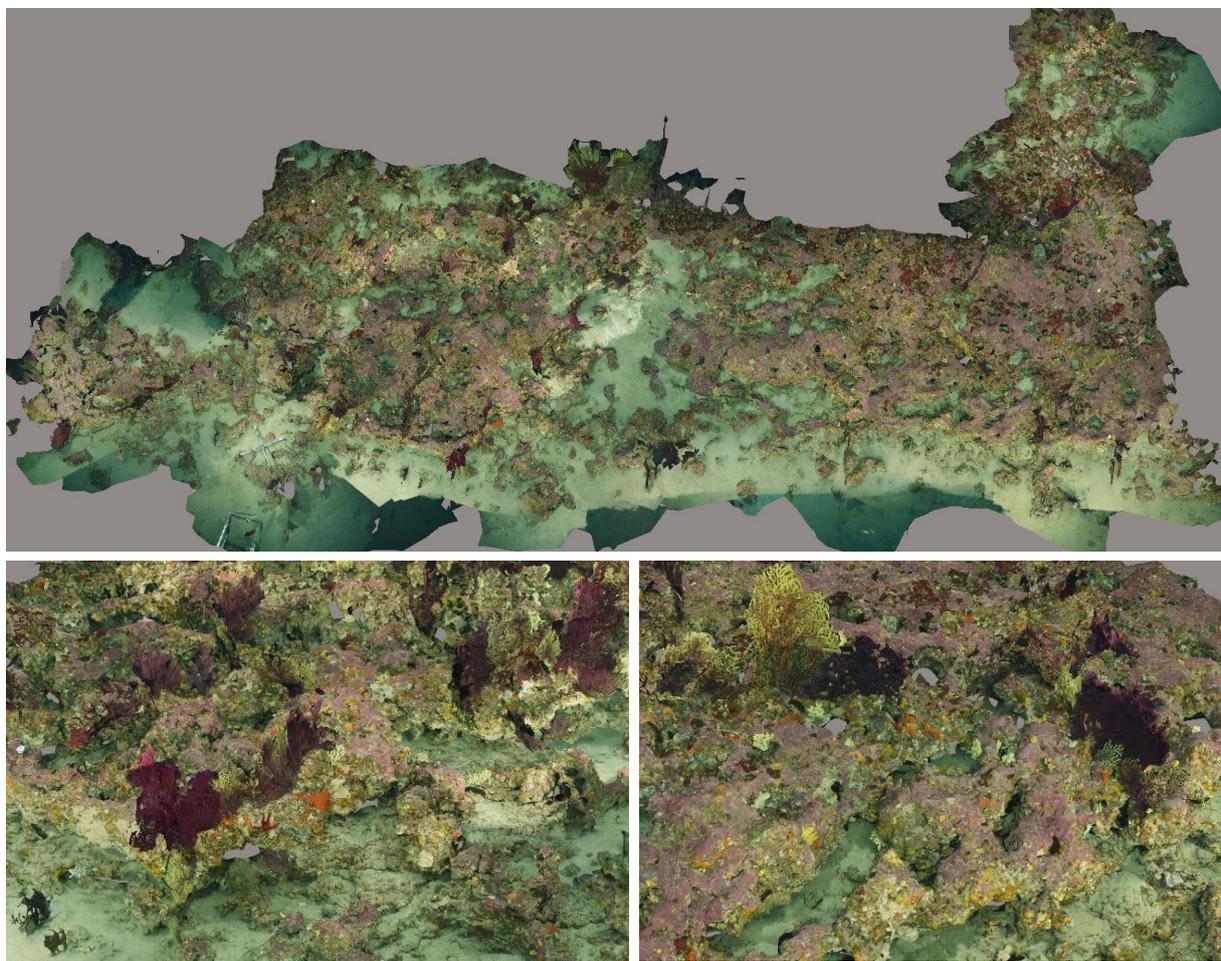


Figure 35 : Modèle du site RECOR « Beachrock Ciotat »

### I.B.1. Canari

Le modèle 3D du site RECOR « Canari » a été construit à partir de 284 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

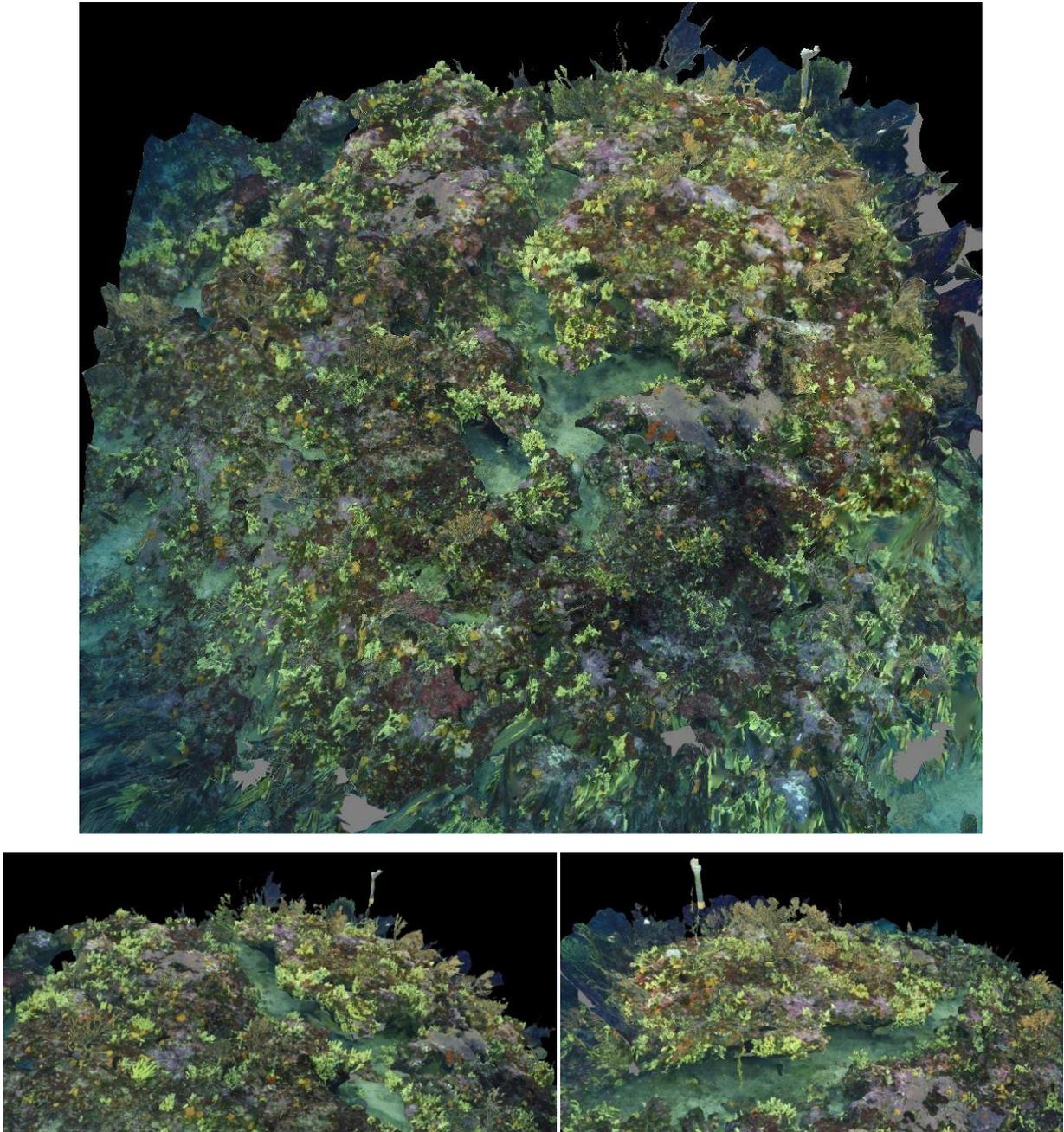


Figure 36 : Modèle du site RECOR « Canari »



### I.B.2. Carqueiranne

Le modèle 3D du site RECOR « Carqueiranne » a été construit à partir de 806 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

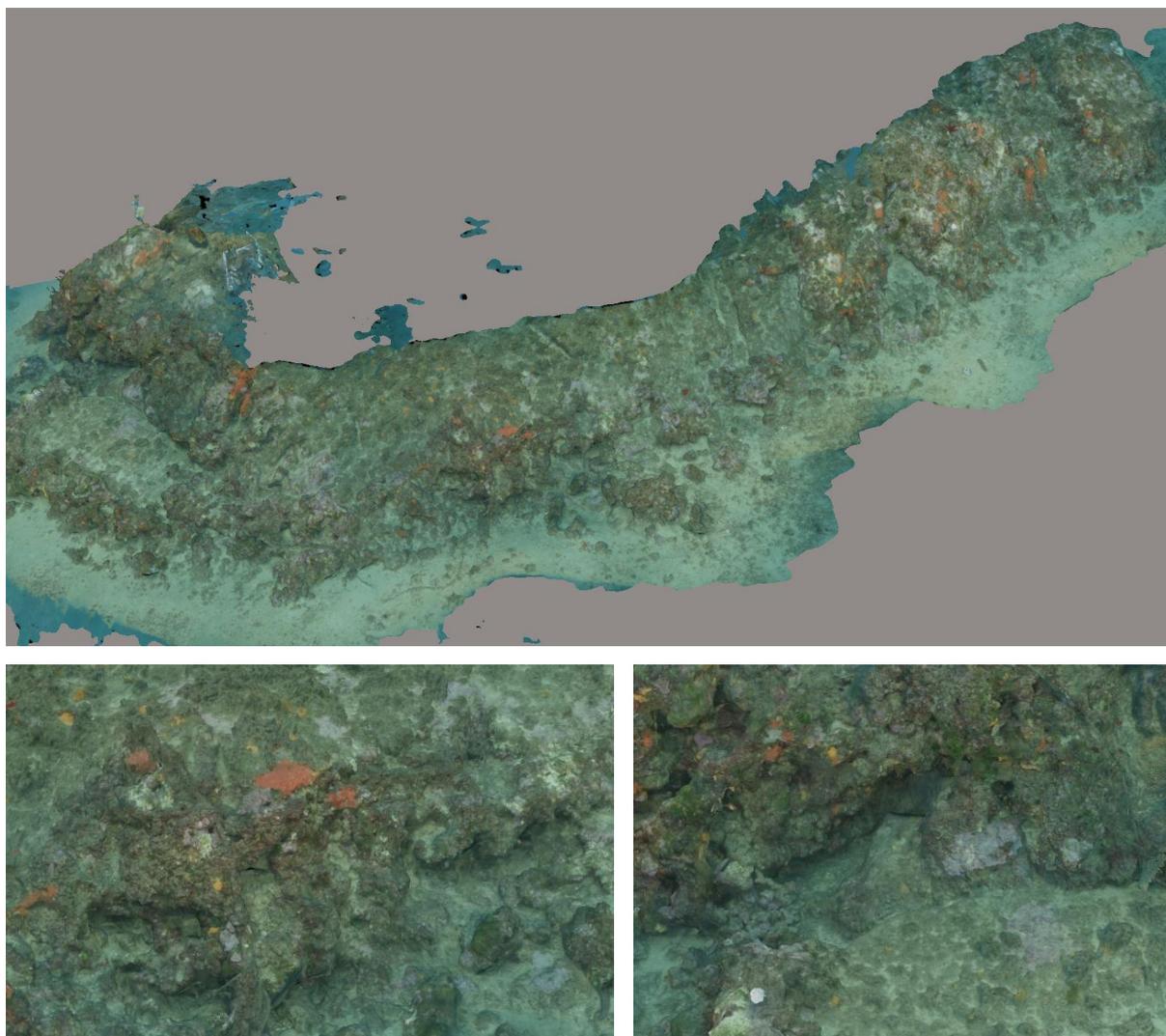


Figure 37 : Modèle du site RECOR « Carqueiranne »

### I.B.3. Cassidaigne

Le modèle 3D du site RECOR « Cassidaigne » a été construit à partir de 1333 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

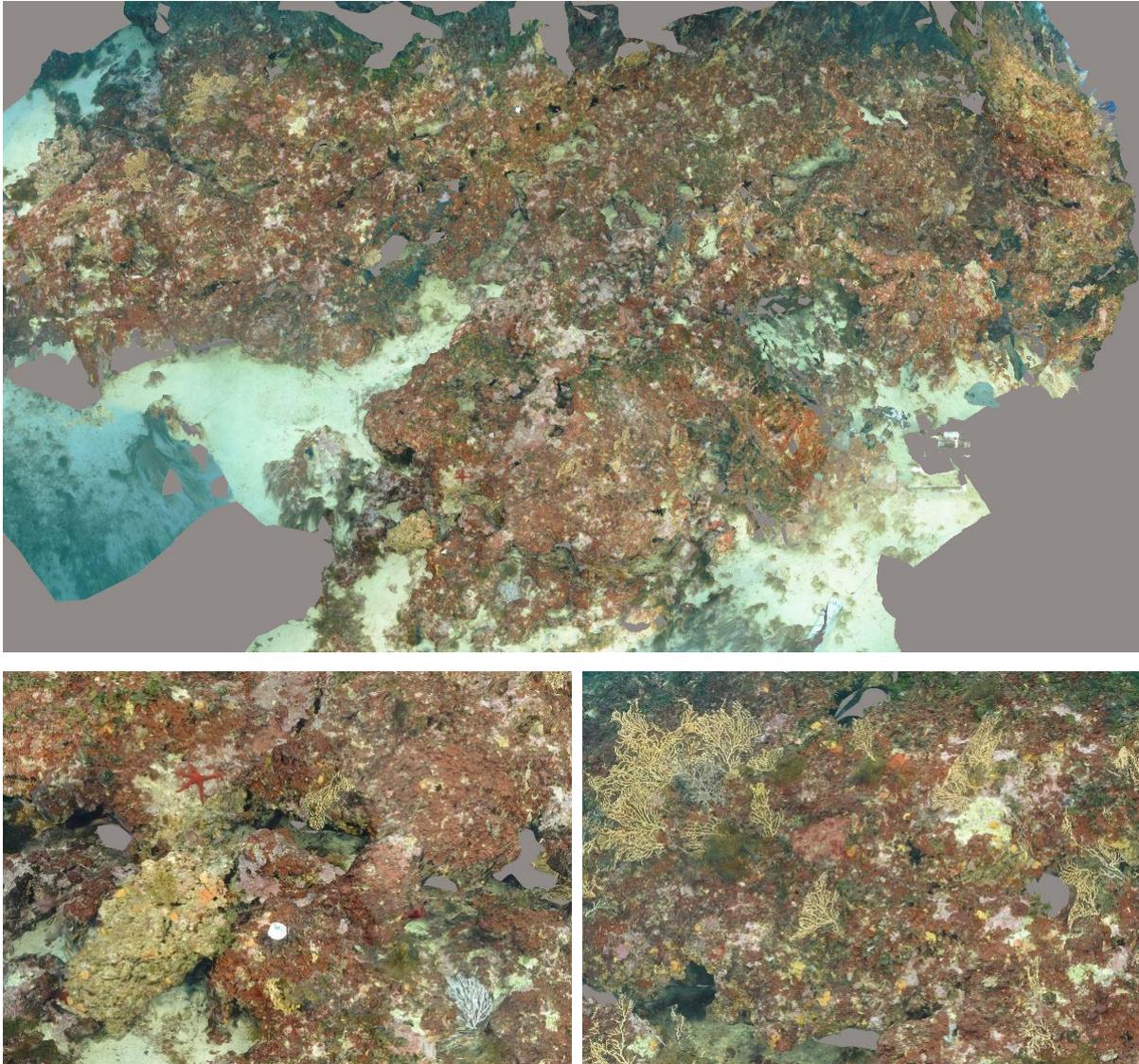


Figure 38 : Modèle du site RECOR « Cassidaigne »



### I.B.4. Centrale

Le modèle 3D du site RECOR « Centrale » a été construit à partir de 893 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

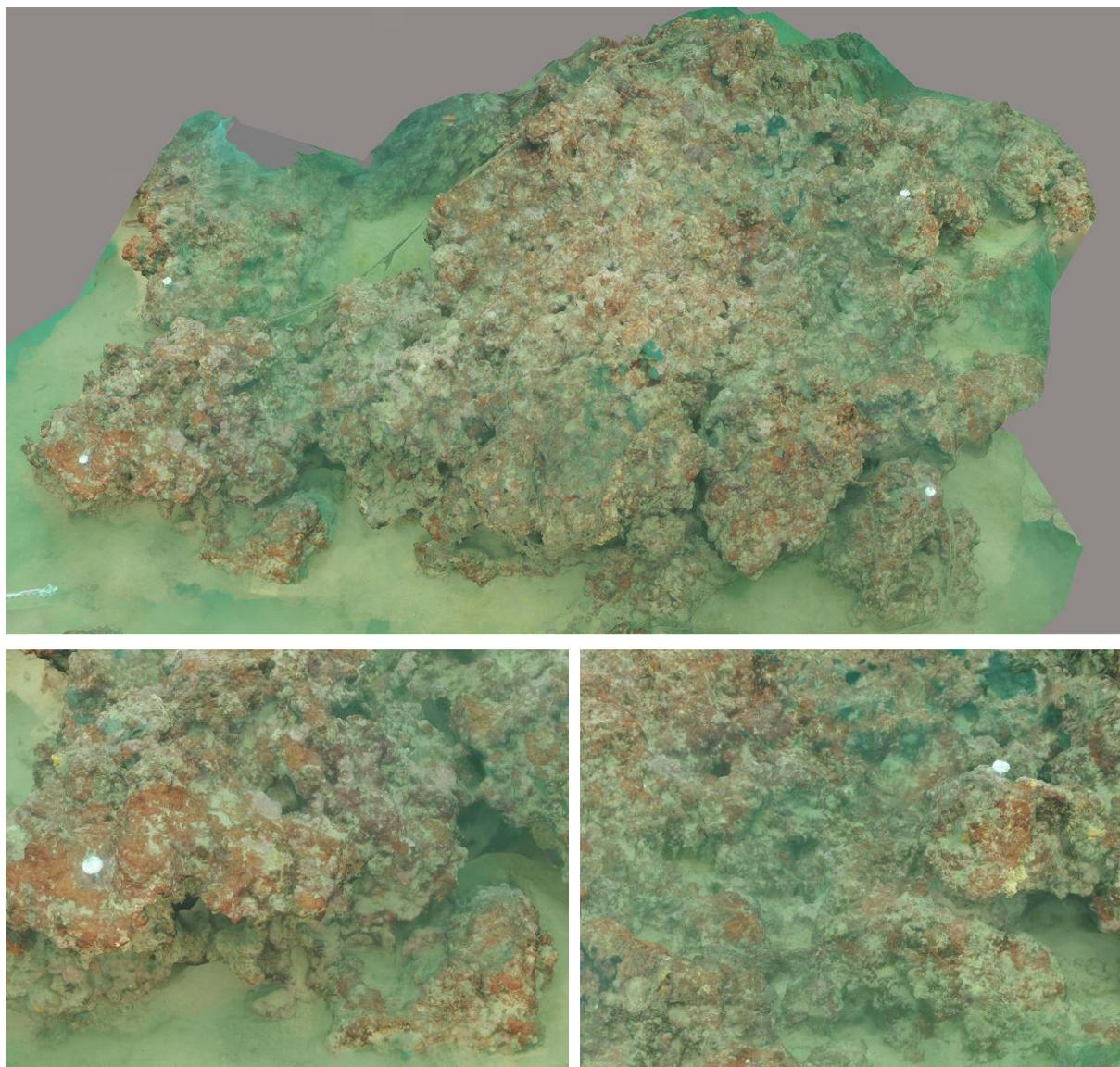


Figure 39 : Modèle du site RECOR « Centrale »

## I.B.5. Centuri

Le modèle 3D du site RECOR « Centuri » a été construit à partir de 537 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

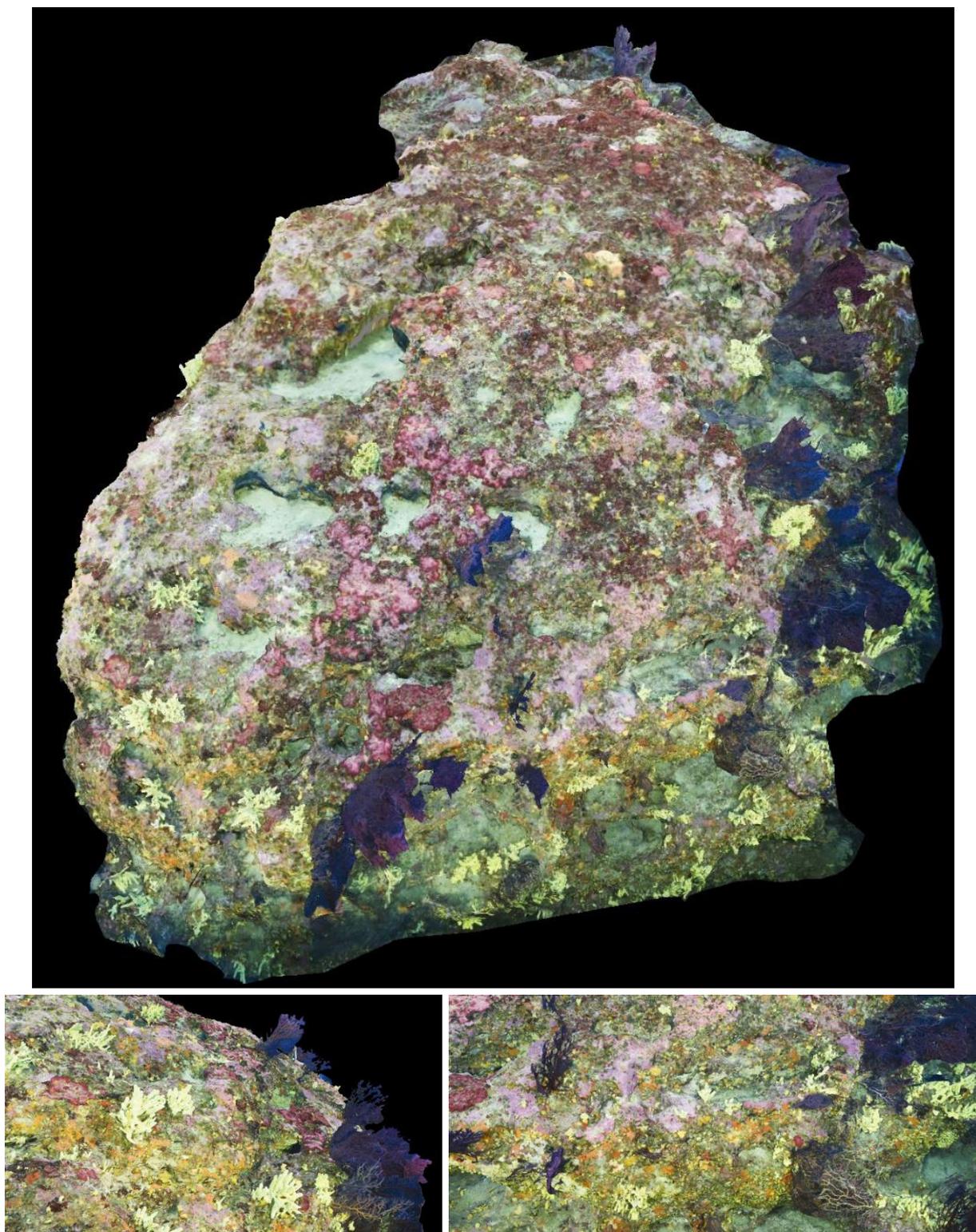


Figure 40 : Modèle du site RECOR « Centuri »

### I.B.6. Devenson

Le modèle 3D du site RECOR « Devenson » a été construit à partir de 1036 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

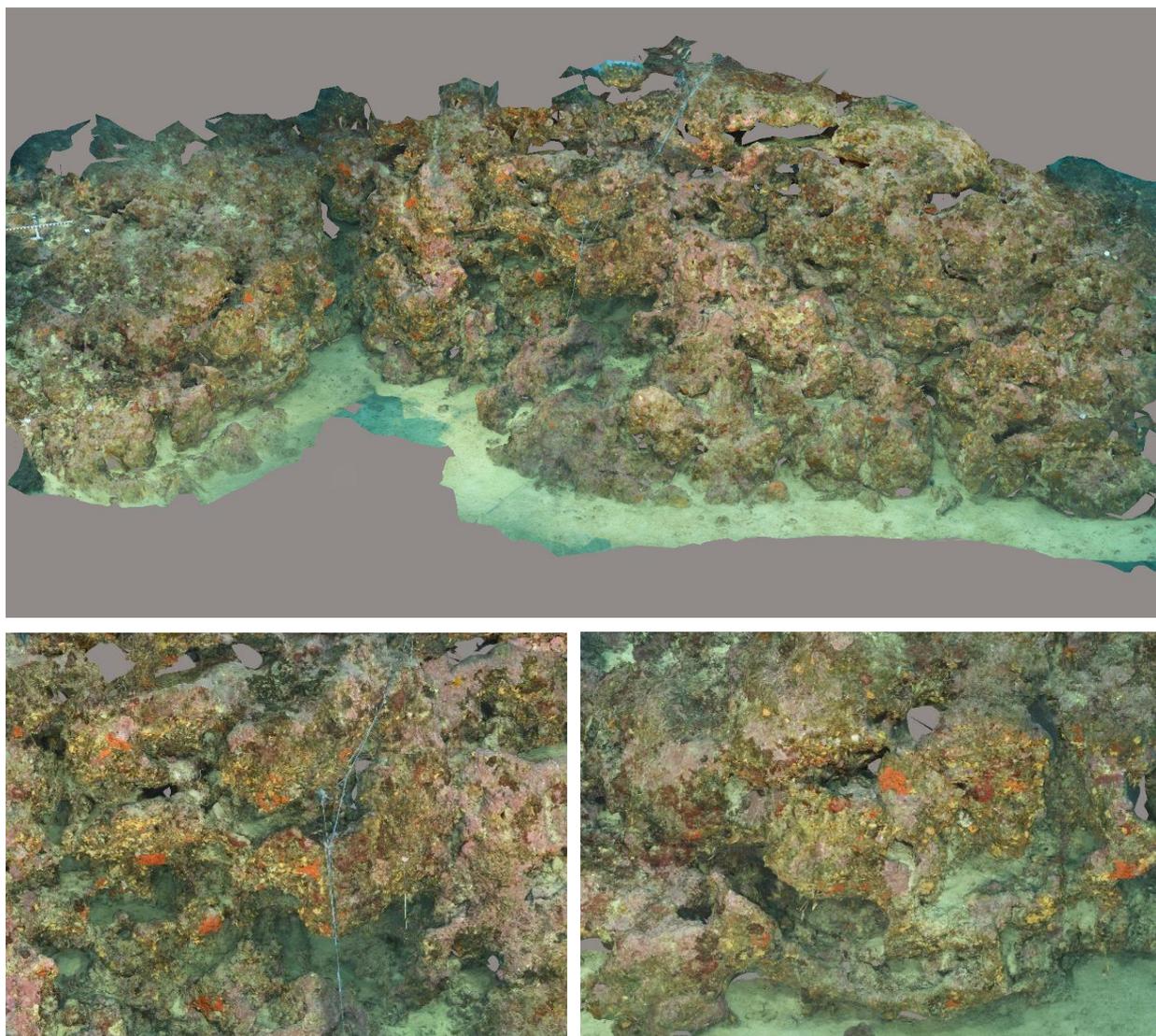


Figure 41 : Modèle du site RECOR « Devenson »

## I.B.7. Grand Four à Chaux

Le modèle 3D du site RECOR « Grand Four à Chaux » a été construit à partir de 1158 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

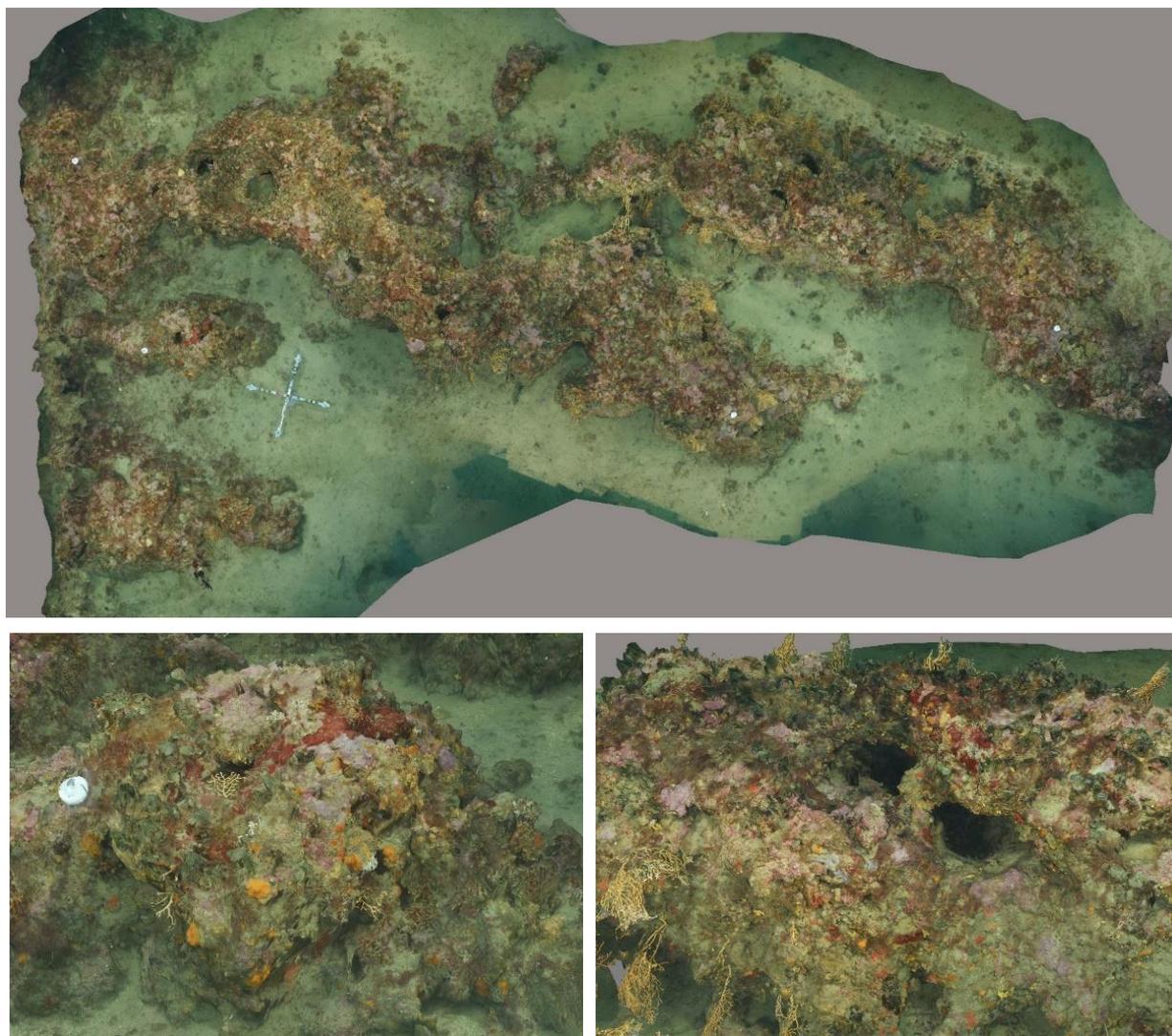


Figure 42 : Modèle du site RECOR « Grand Four à Chaux »

### I.B.8. Large Sud-Ouest Cassidaigne

Le modèle 3D du site RECOR « Large Sud-Ouest Cassidaigne » a été construit à partir de 771 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

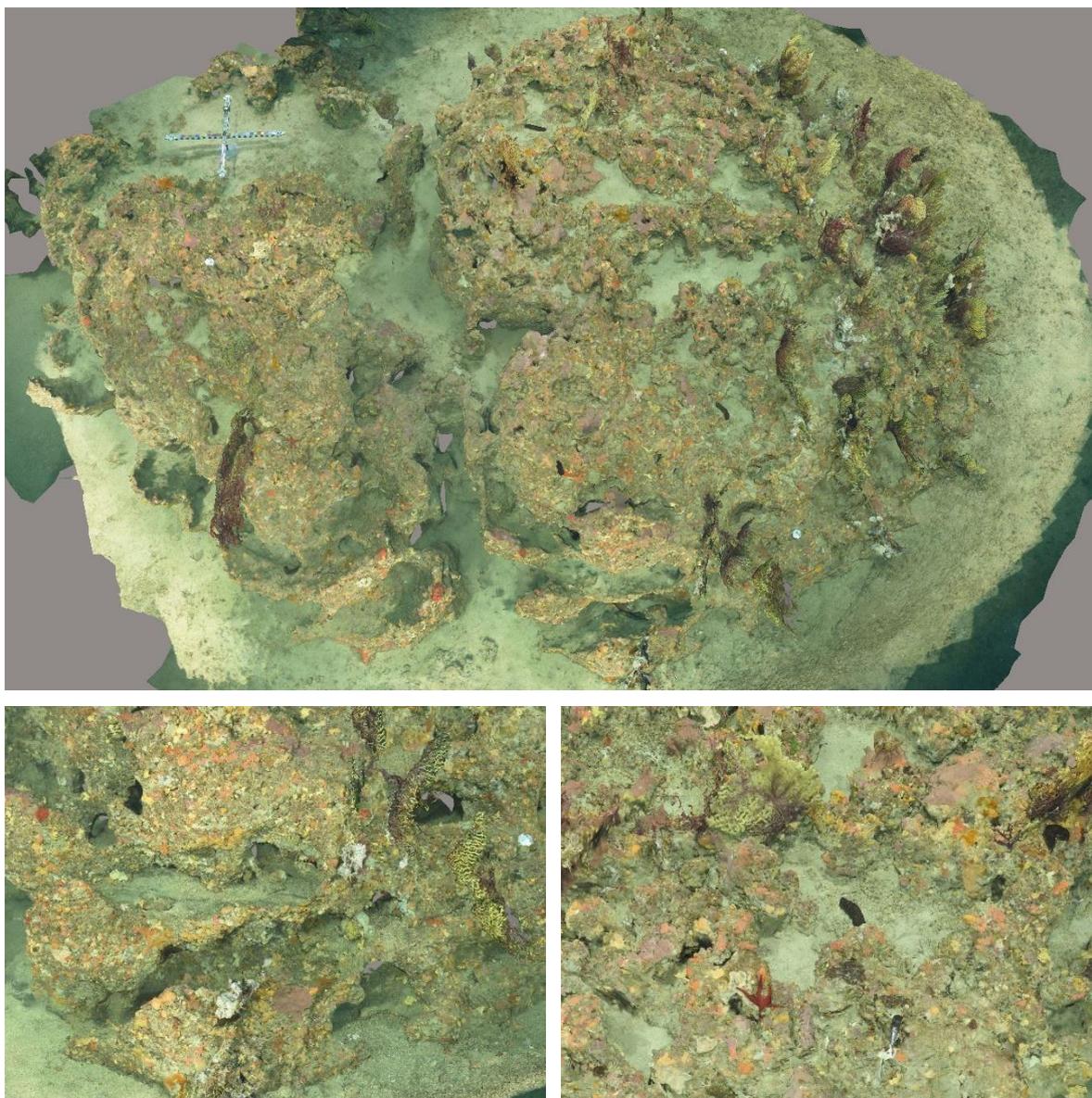


Figure 43 : Modèle du site RECOR « Large Sud-Ouest Cassidaigne »

### I.B.9. Mimosa

Le modèle 3D du site RECOR « Mimosa » a été construit à partir de 723 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

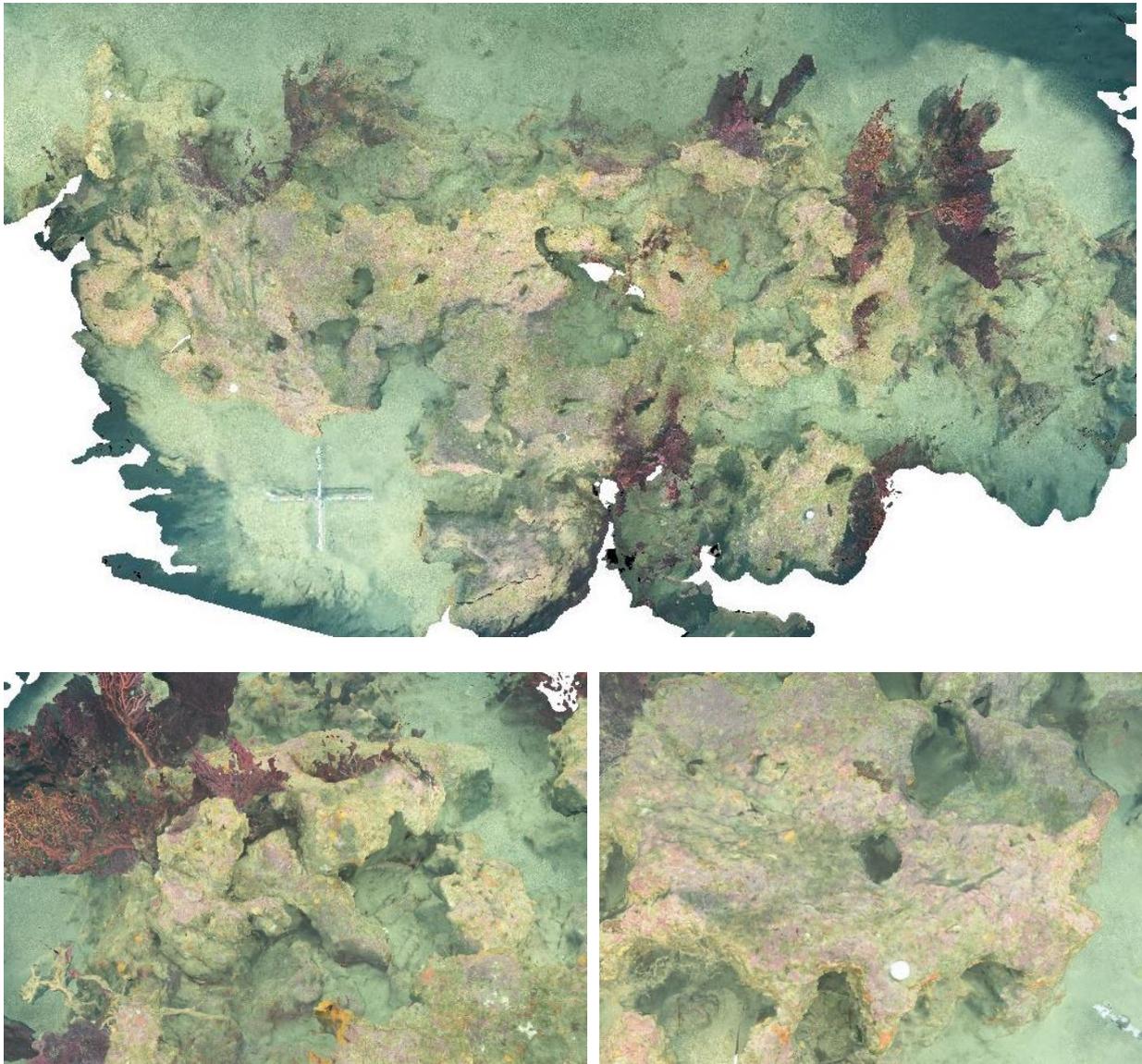


Figure 44 : Modèle du site RECOR « Mimosa »



### I.B.10. Pierre à Christian

Le modèle 3D du site RECOR « Pierre à Christian » a été construit à partir de 1296 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

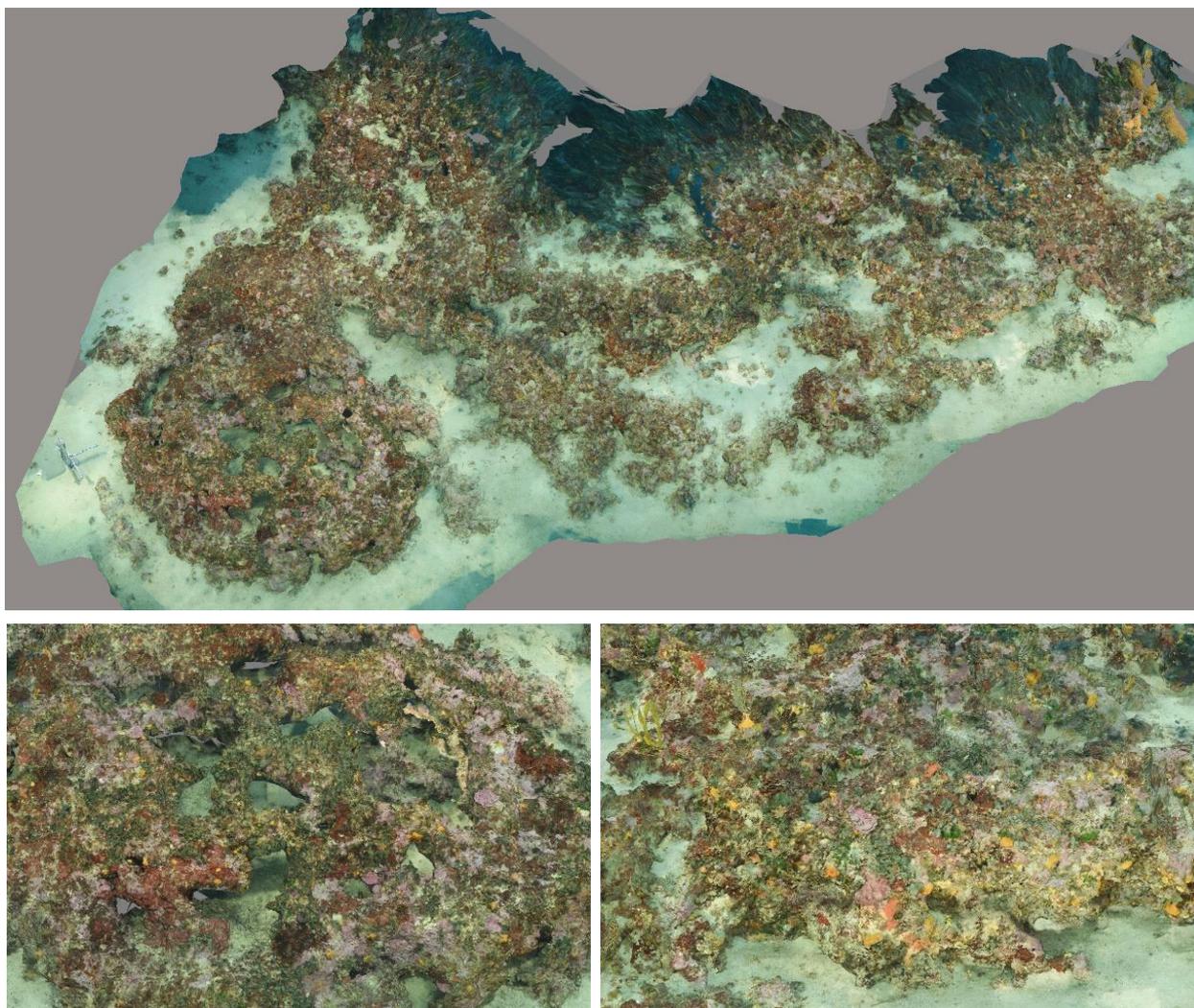


Figure 45 : Modèle du site RECOR « Pierre à Christian »

## I.B.11. Planier

Le modèle 3D du site RECOR « Planier » a été construit à partir de 1177 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

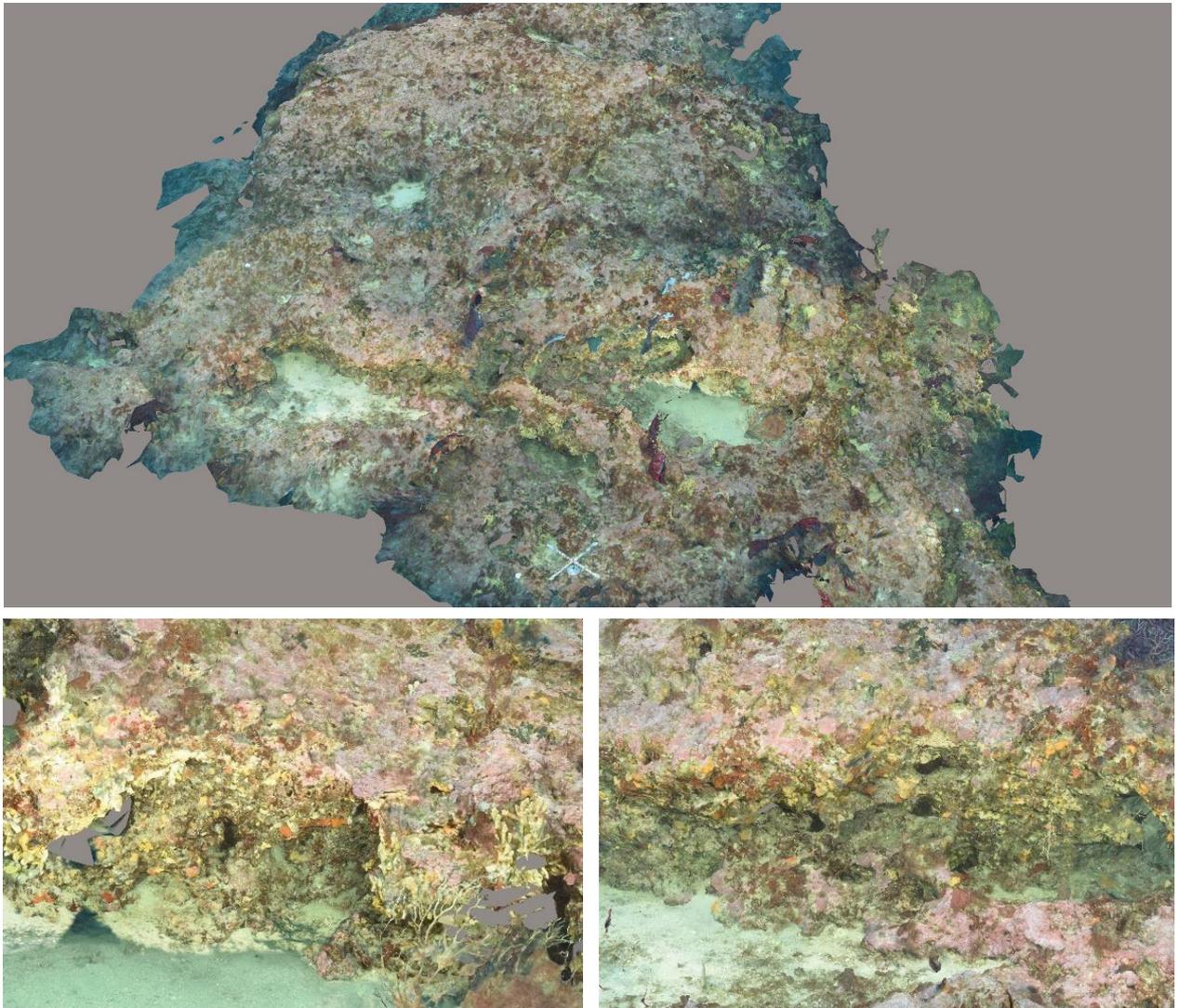


Figure 46 : Modèle du site RECOR « Planier »



### I.B.12. Rosier

Le modèle 3D du site RECOR « Rosier » a été construit à partir de 1188 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

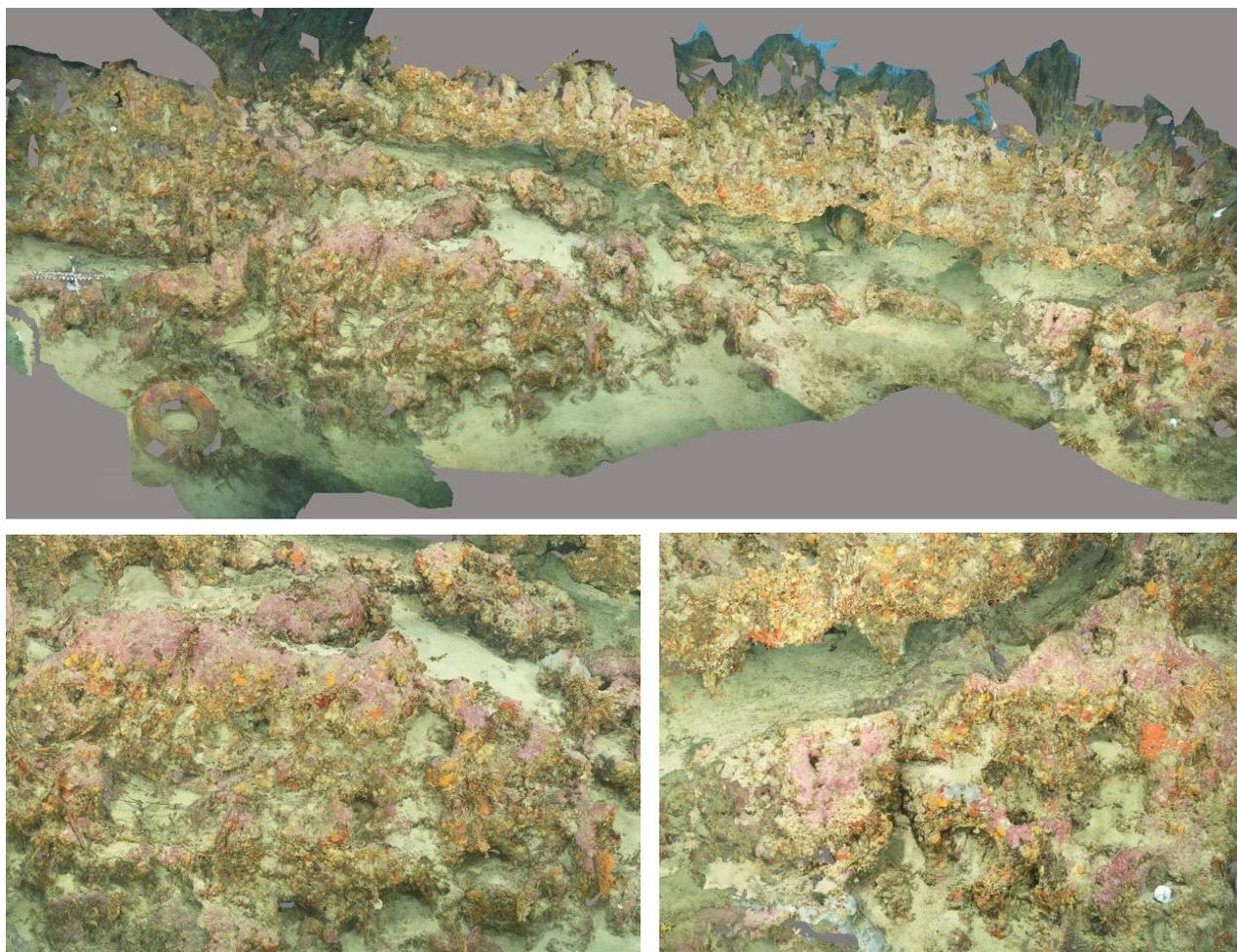


Figure 47 : Modèle du site RECOR « Rosier »

### I.B.1. Sanguinaires

Le modèle 3D du site RECOR « Sanguinaires » a été construit à partir de 625 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

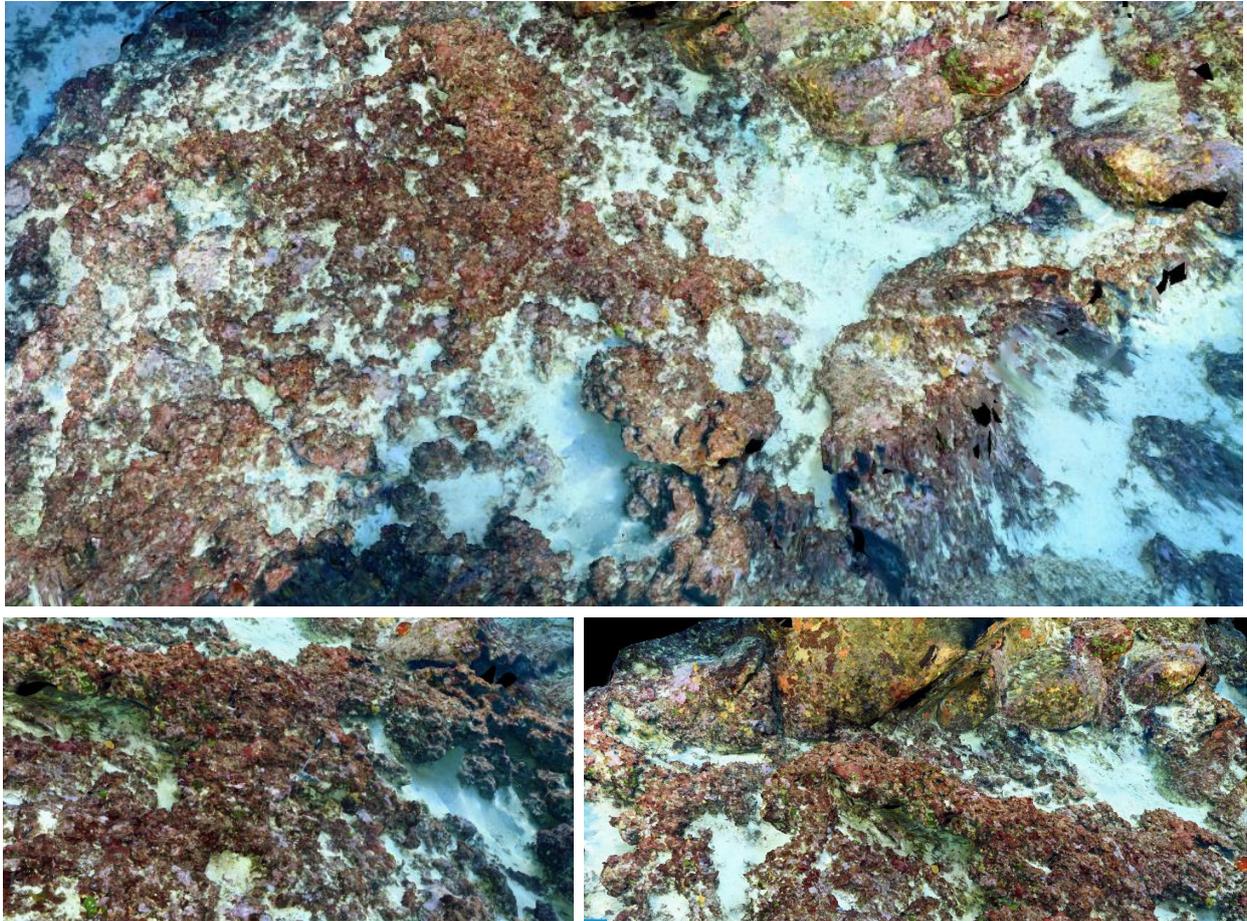


Figure 48 : Modèle du site RECOR « Sanguinaires »



### I.B.2. Sec à Joël Cap Cerbère

Le modèle 3D du site RECOR « Sec à Joël Cap Cerbère » a été construit à partir de 1403 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

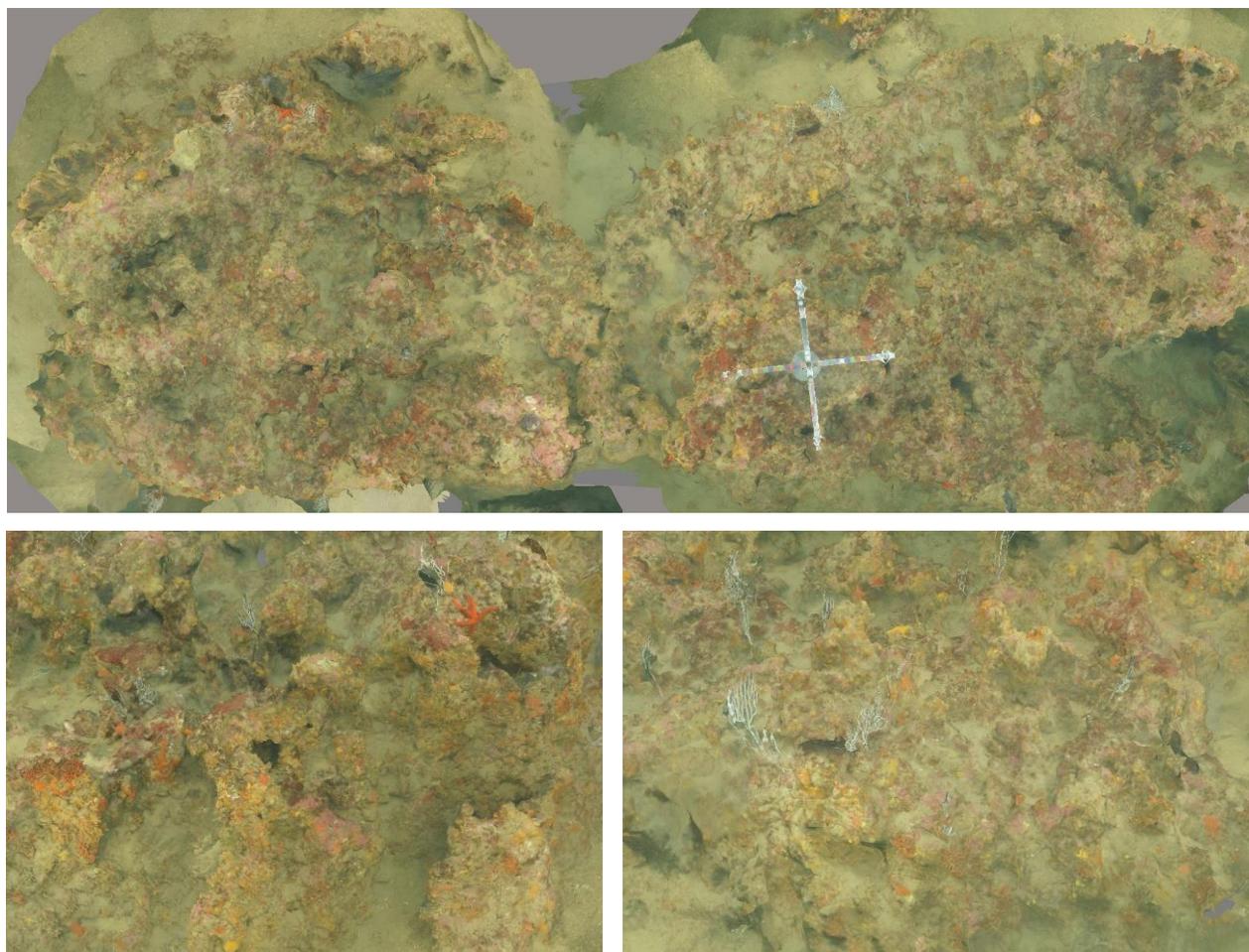


Figure 49 : Modèle du site RECOR « Sec à Joël Cap Cerbère »

### I.B.3. Tiboulen

Le modèle 3D du site RECOR « Tiboulen » a été construit à partir de 1422 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

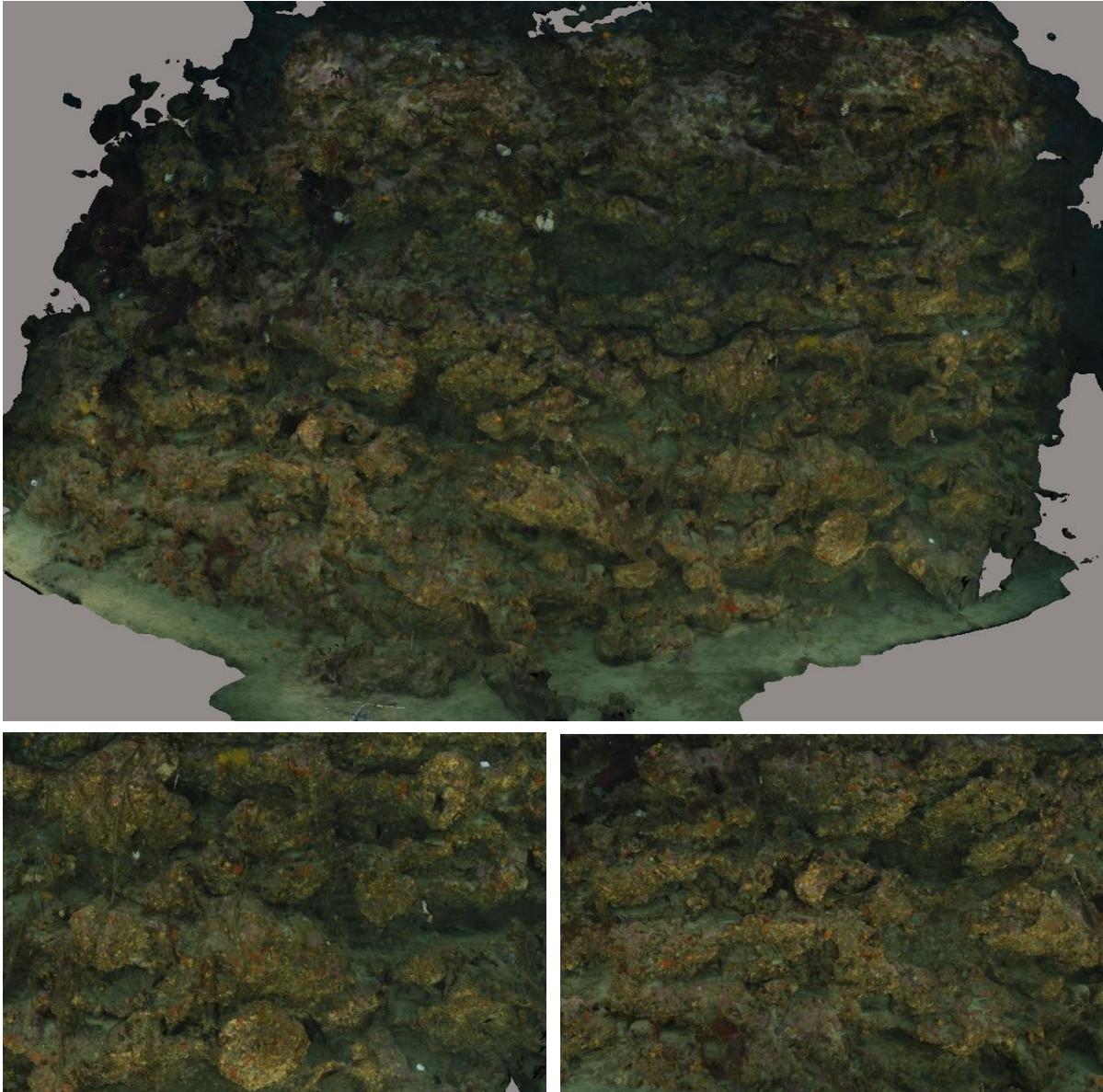


Figure 50 : Modèle du site RECOR « Tiboulen »



## II. Sites modélisés en 2019

En 2019, les modèles ont été réalisés par photogrammétrie sur 19 sites TEMPO (suivi des herbiers de posidonie) et 25 sites RECOR (suivi des récifs coralligènes).

### II.A. TEMPO

#### II.A.1. Agay Ouest

Le modèle 3D du site TEMPO « Agay Ouest » a été construit à partir de 2026 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

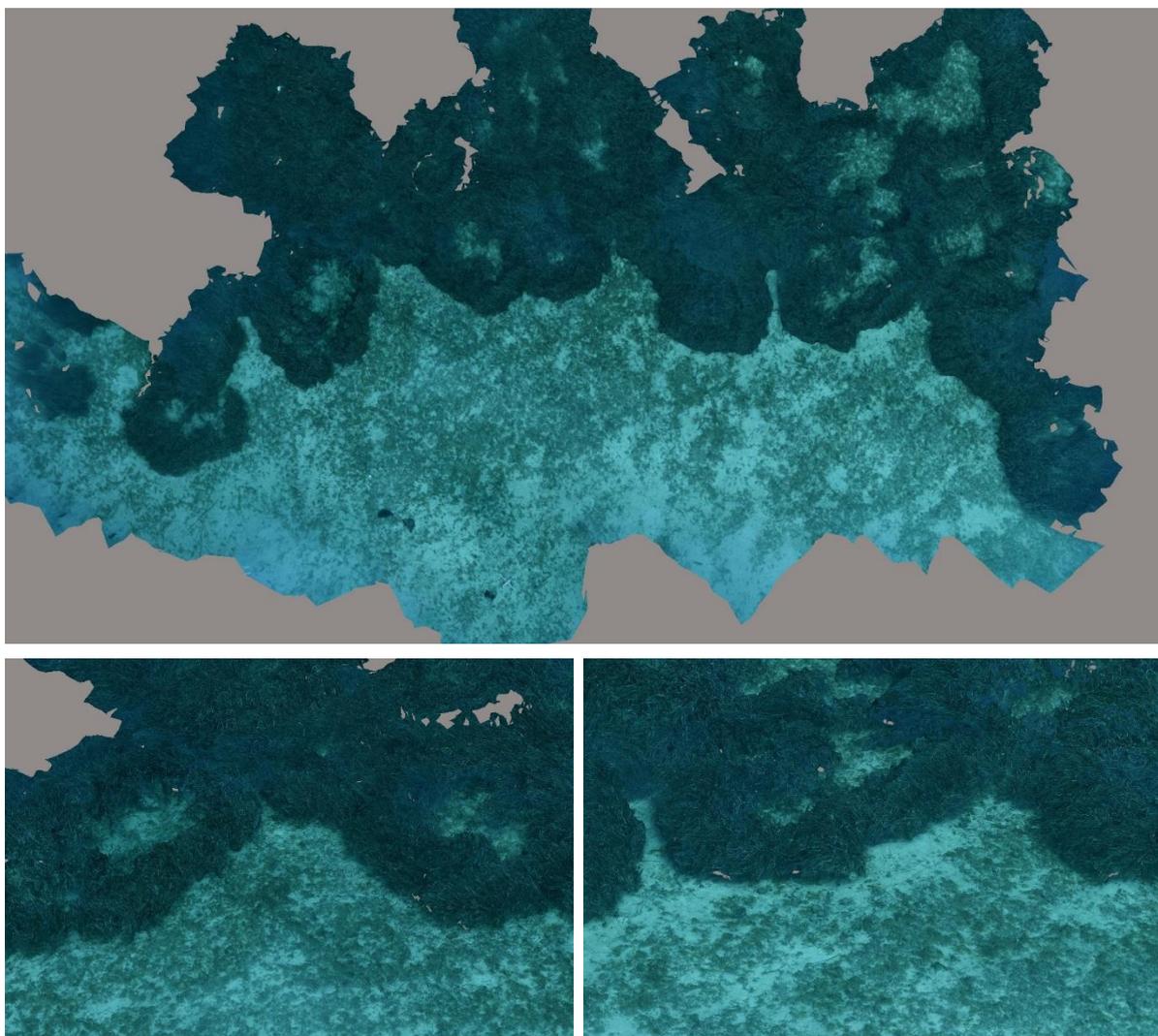


Figure 51 : Modèle du site TEMPO « Agay Ouest »

## II.A.2. Cap des Medès

Le modèle 3D du site TEMPO « Cap des Medès » a été construit à partir de 846 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

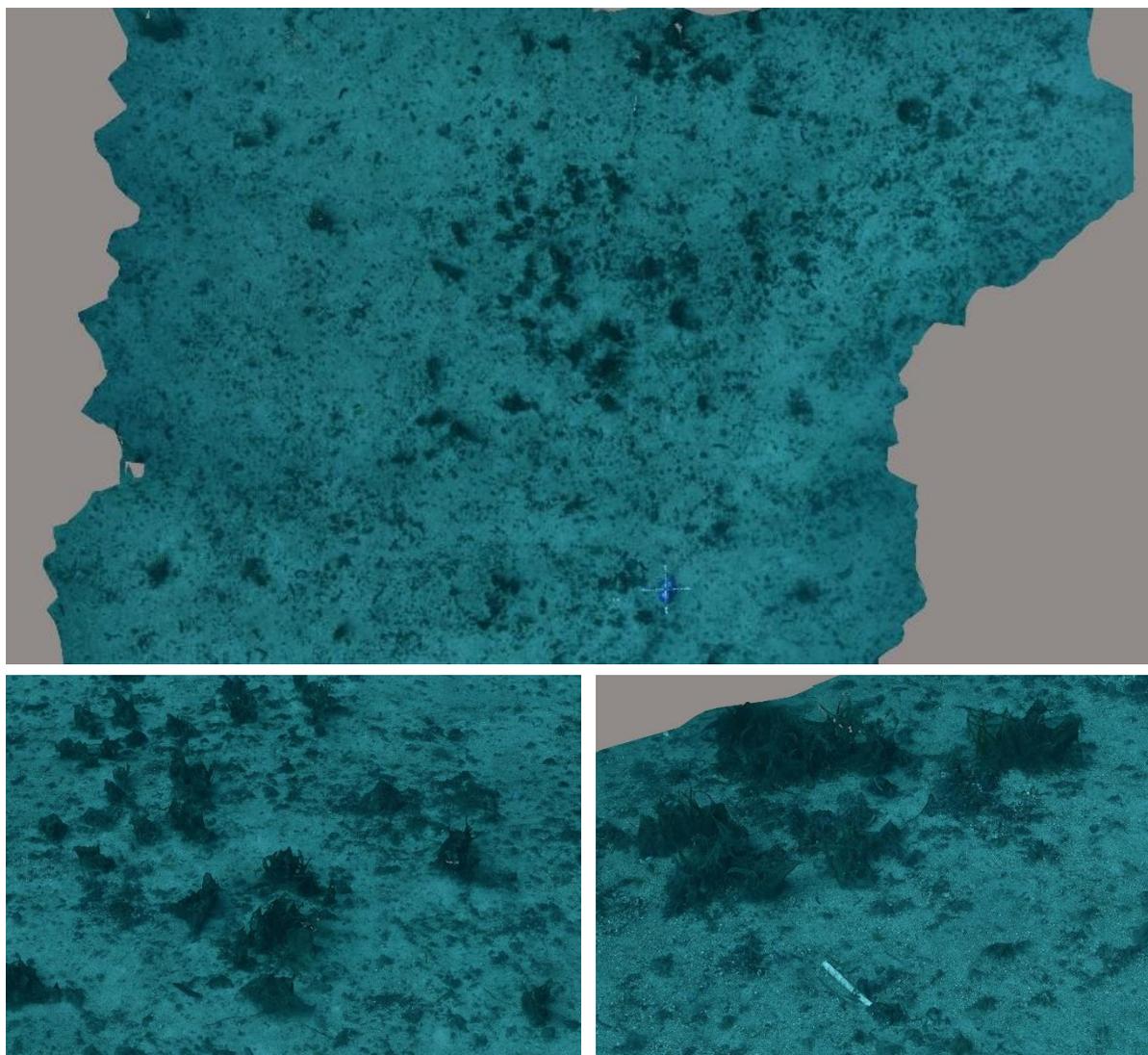


Figure 52 : Modèle du site TEMPO « Cap des Medès »



### II.A.3. Cap Gros Nord

Le modèle 3D du site TEMPO « Cap Gros Nord » a été construit à partir de 1604 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

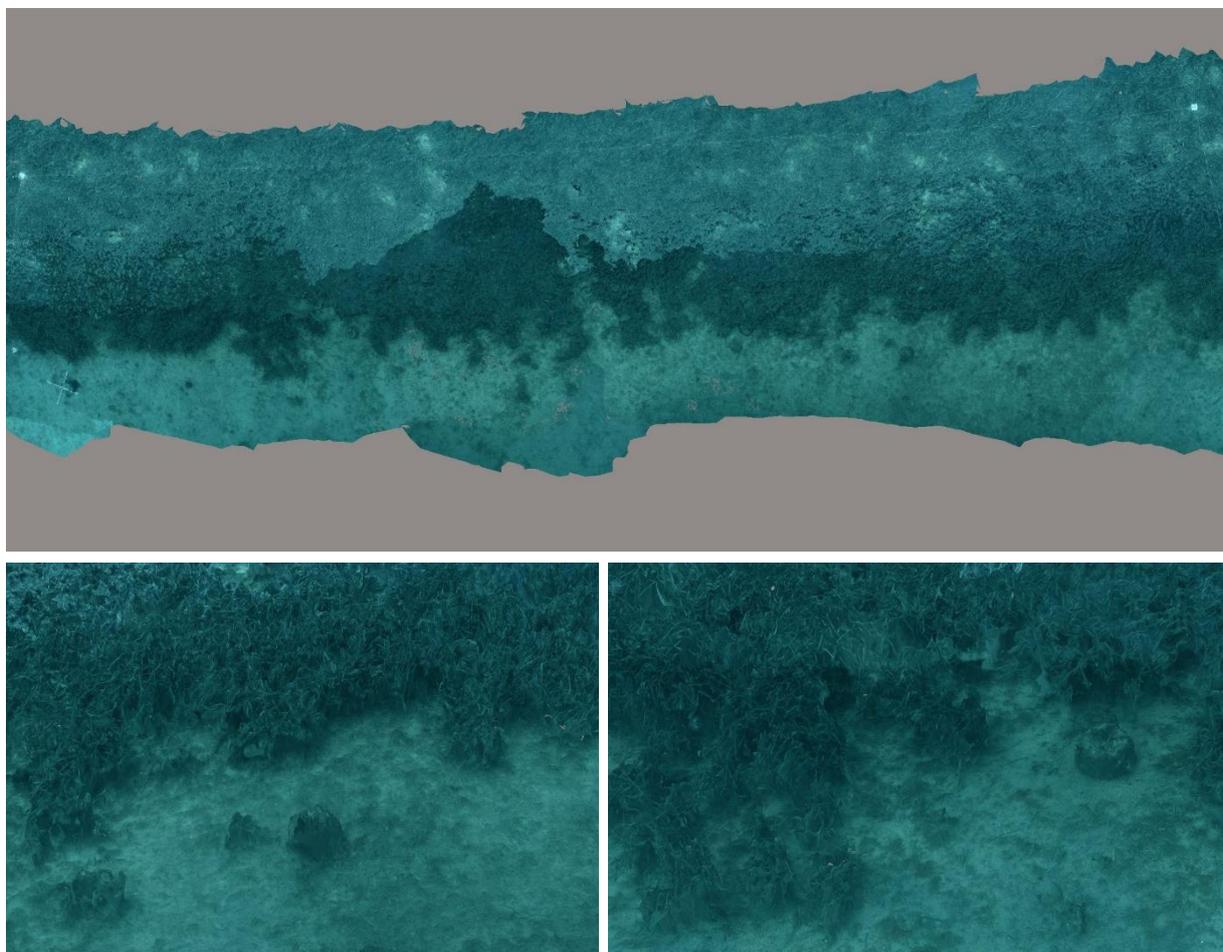


Figure 53 : Modèle du site TEMPO « Cap Gros Nord »

#### II.A.4. Cap Nice Est

Le modèle 3D du site TEMPO « Cap Nice Est » a été construit à partir de 1578 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

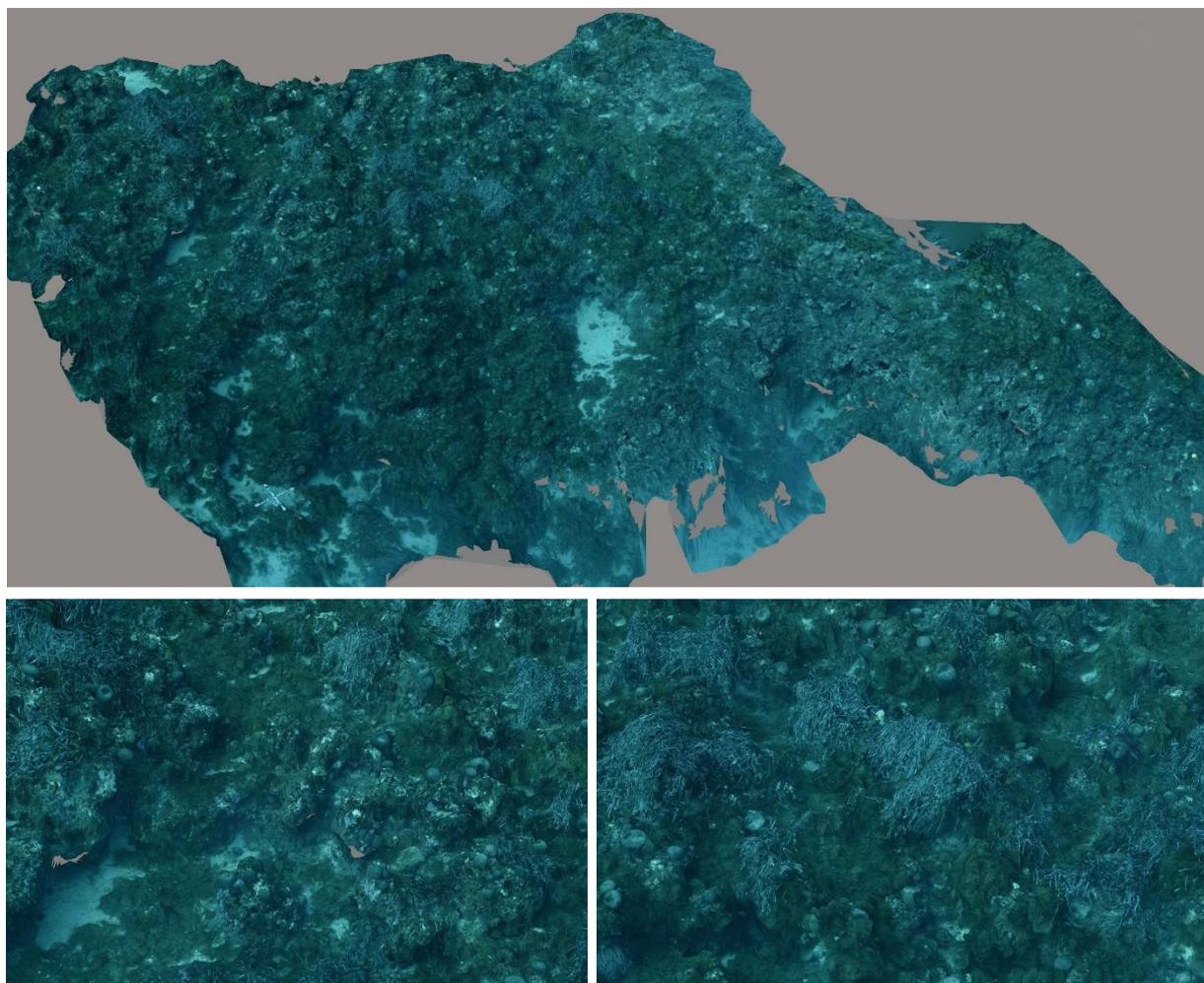


Figure 54 : Modèle du site TEMPO « Cap Nice Est »



### II.A.5. Cap Carqueiranne

Le modèle 3D du site TEMPO « Cap Carqueiranne » a été construit à partir de 828 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

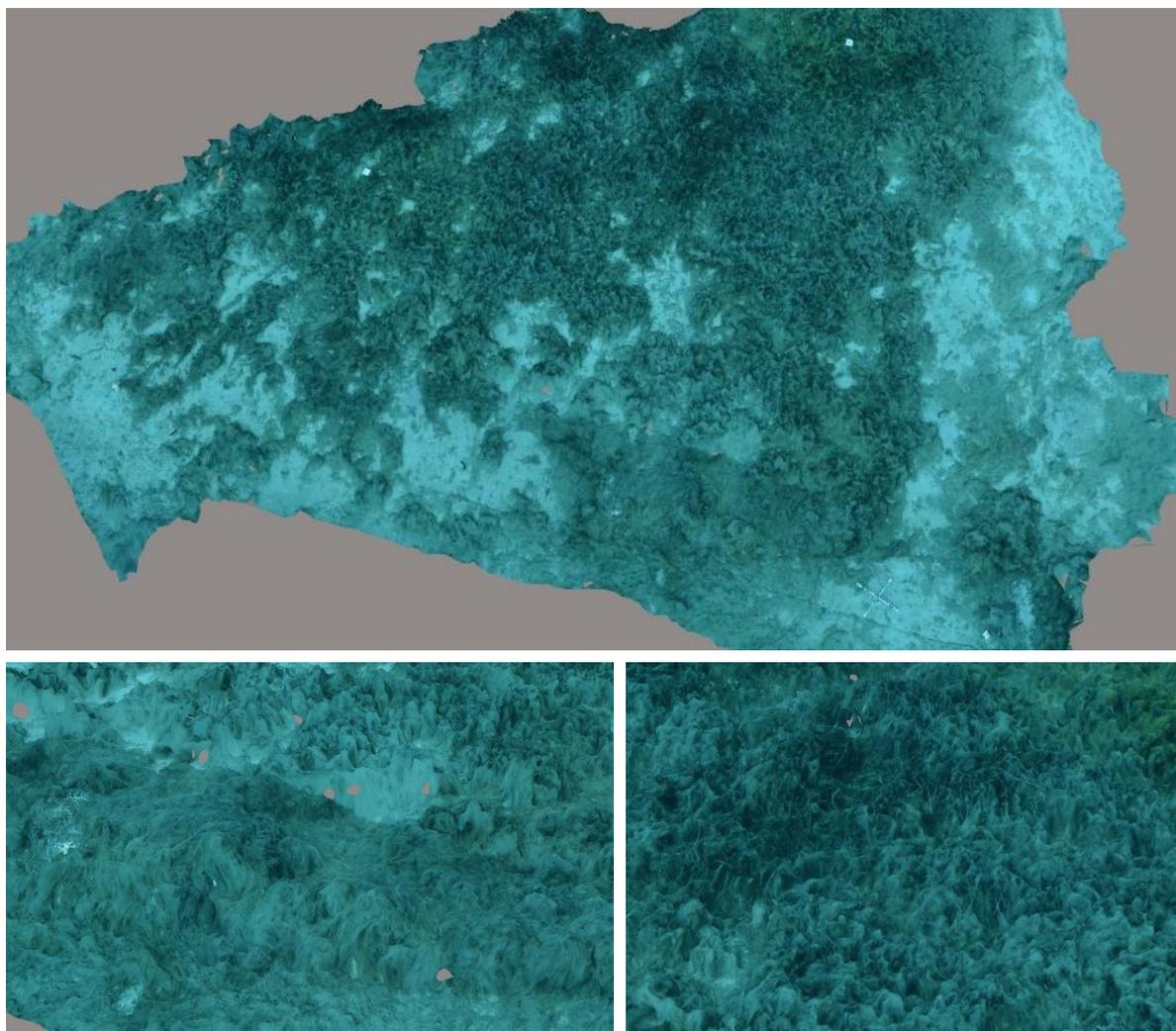


Figure 55 : Modèle du site TEMPO « Cap Carqueiranne »

## II.A.6. Fort Brégançon

Le modèle 3D du site TEMPO « Fort Brégançon » a été construit à partir de 644 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

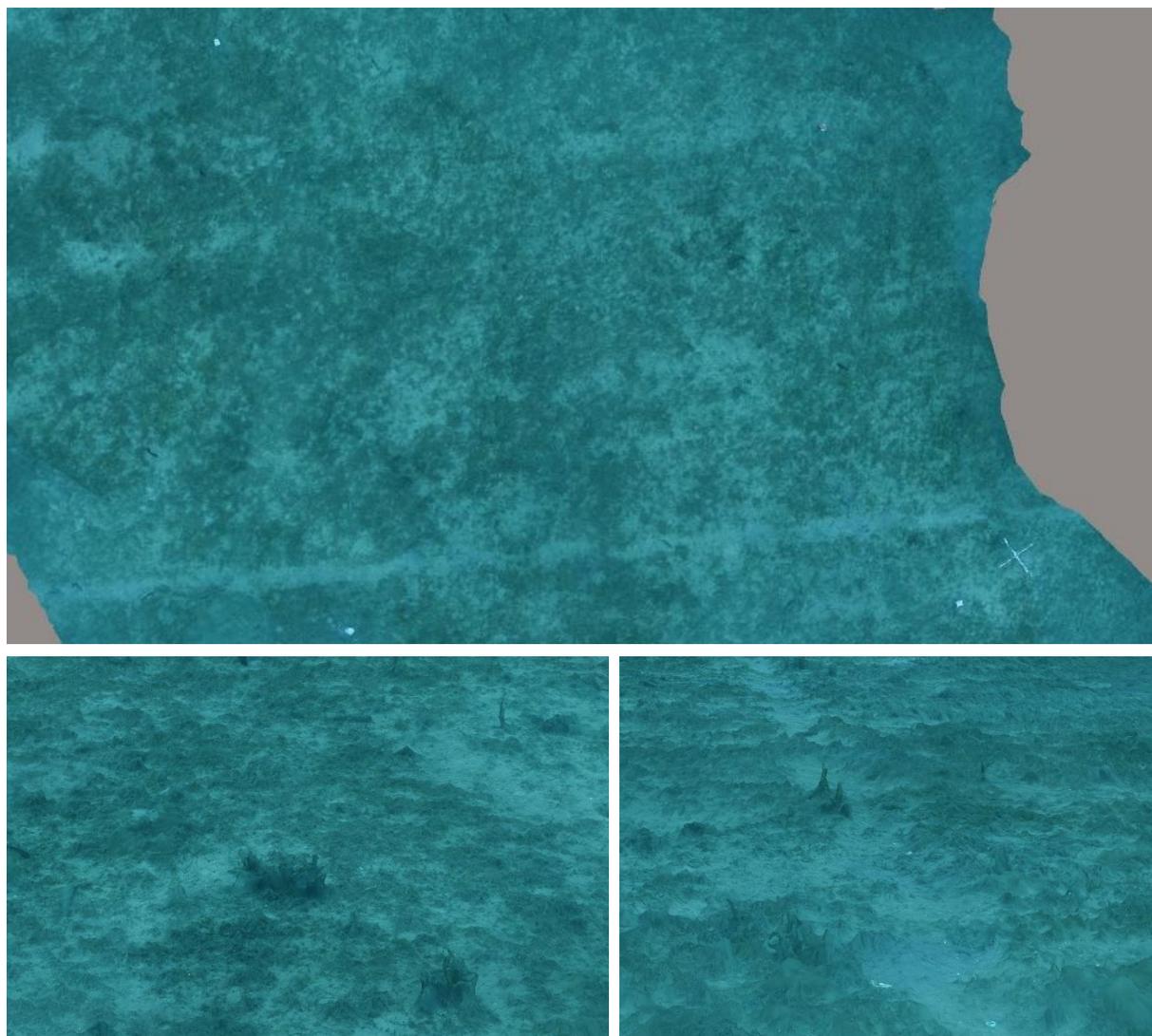


Figure 56 : Modèle du site TEMPO « Fort Brégançon »



### II.A.7. Juan

Le modèle 3D du site TEMPO « Juan » a été construit à partir de 2189 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

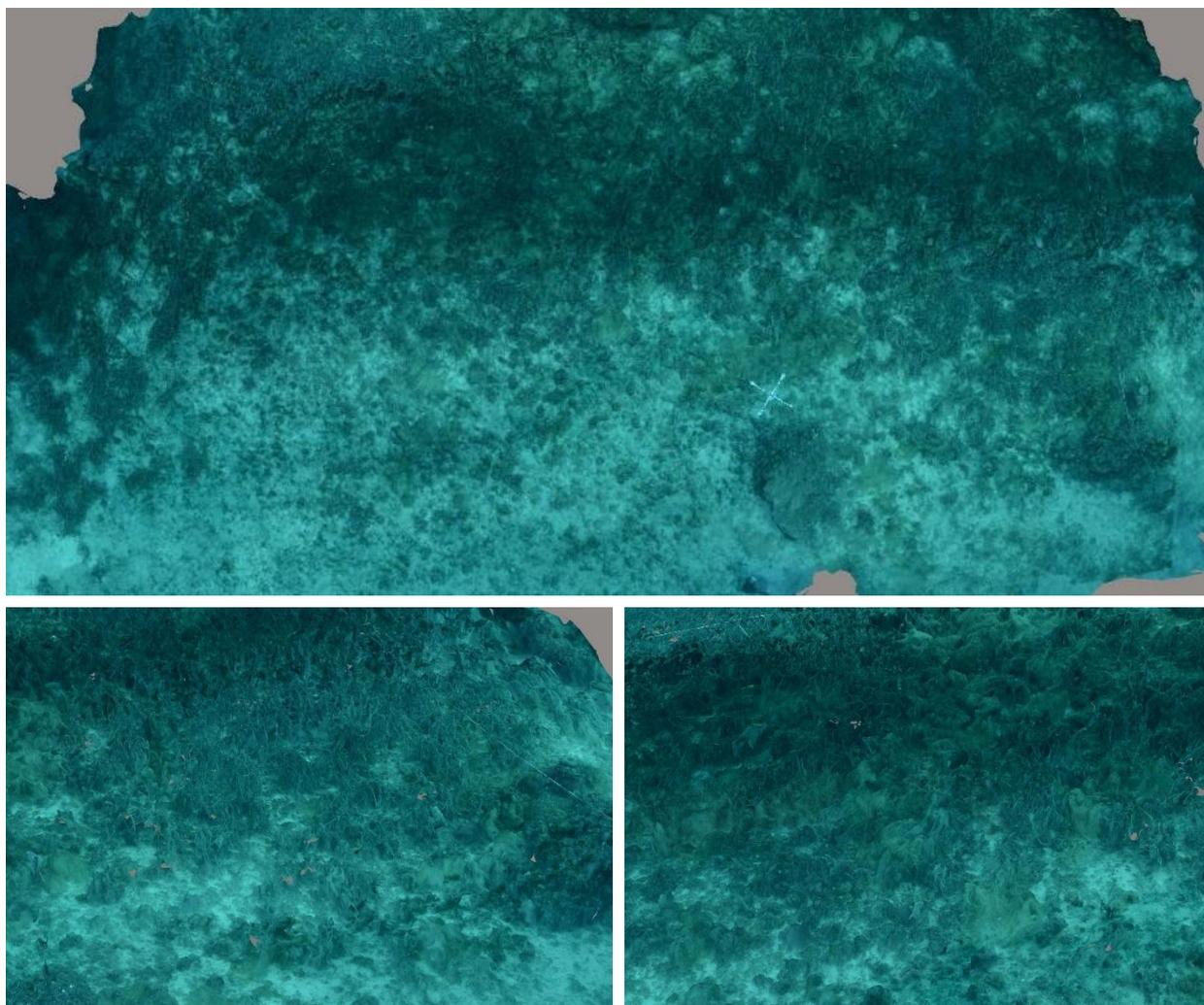


Figure 57 : Modèle du site TEMPO « Juan »

## II.A.8. Cap Roux

Le modèle 3D du site TEMPO « Cap Roux » a été construit à partir de 1483 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

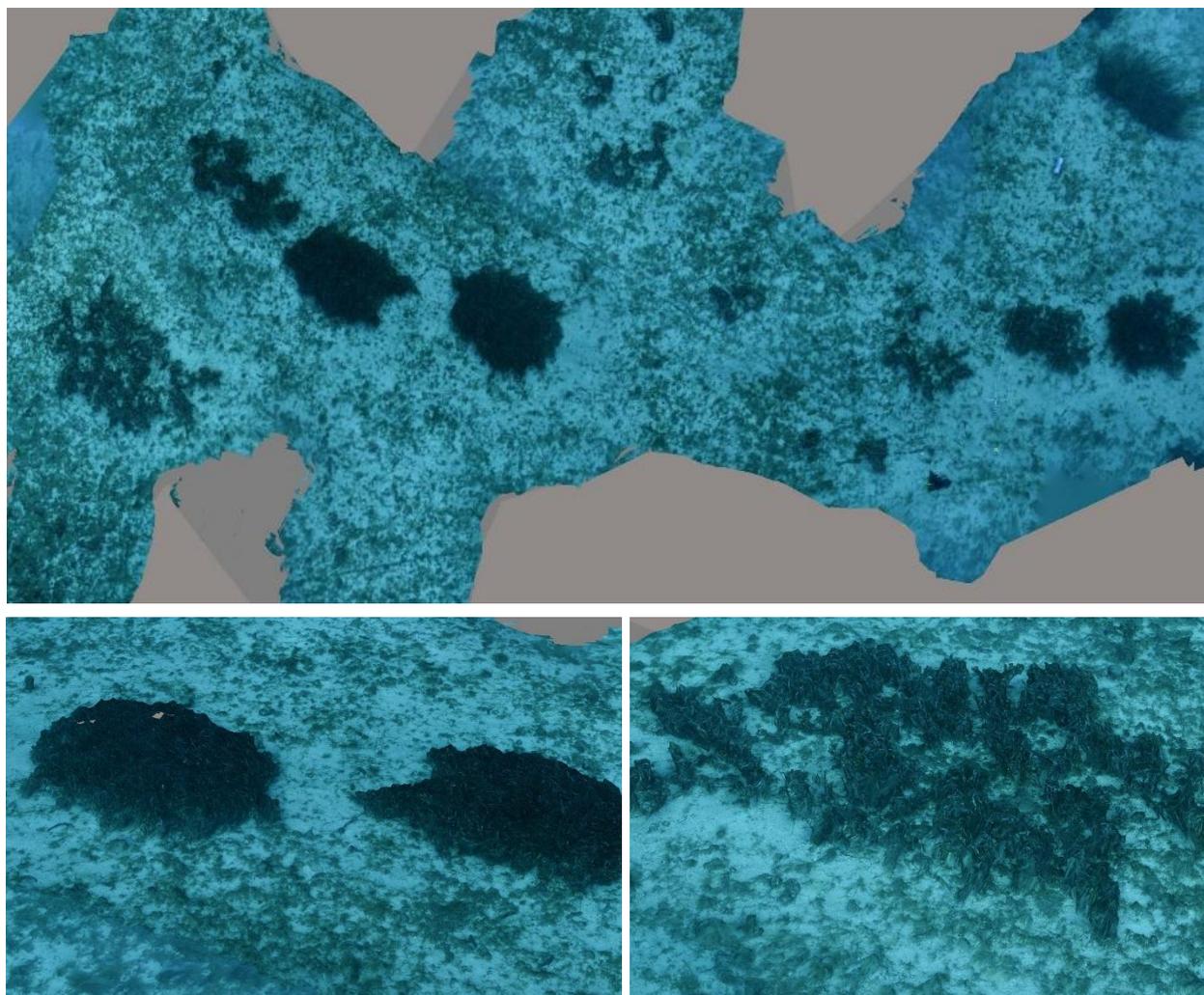


Figure 58 : Modèle du site TEMPO « Cap Roux »



### II.A.9. Lion de Mer

Le modèle 3D du site TEMPO « Lion de Mer » a été construit à partir de 1824 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

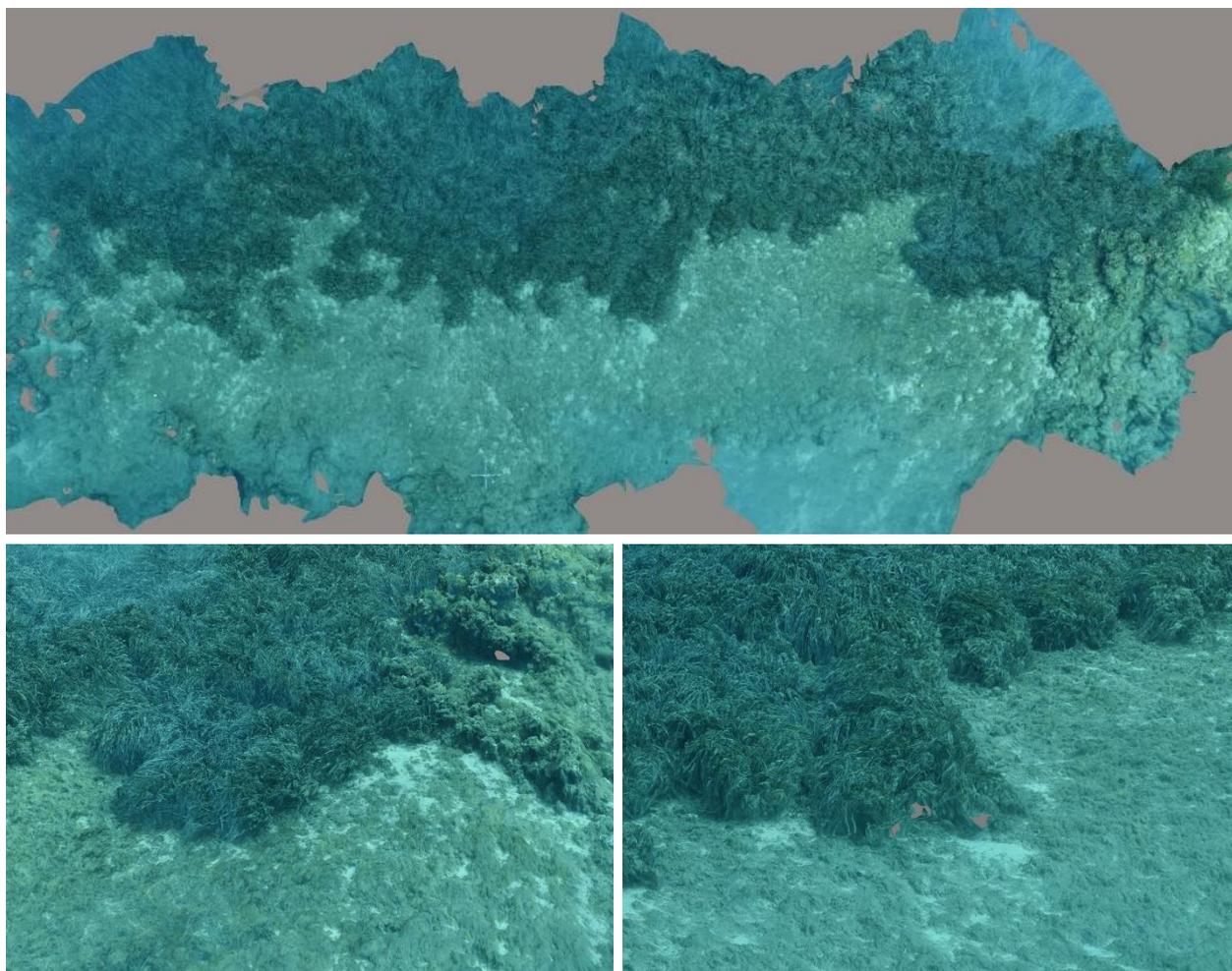


Figure 59 : Modèle du site TEMPO « Lion de Mer »

## II.A.10. Mer d'Eze

Le modèle 3D du site TEMPO « Mer d'Eze » a été construit à partir de 1341 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

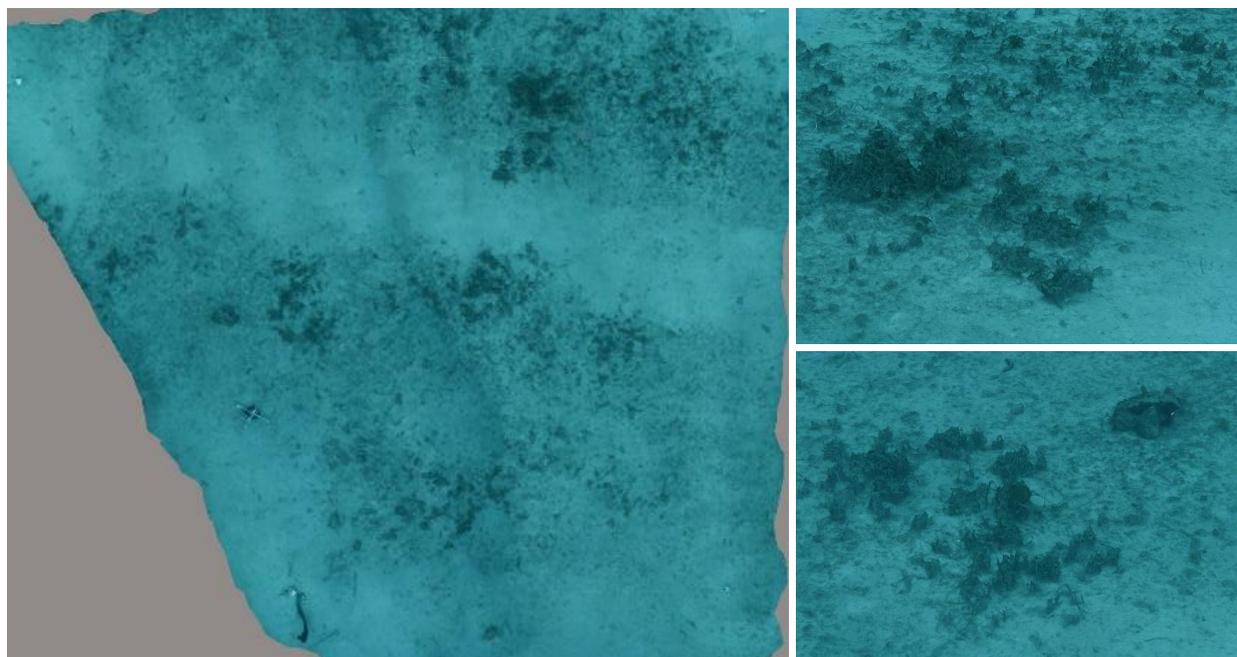


Figure 60 : Modèle du site TEMPO « Mer d'Eze »



### II.A.11. Plage Suveret

Le modèle 3D du site TEMPO « Plage Suveret » a été construit à partir de 650 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

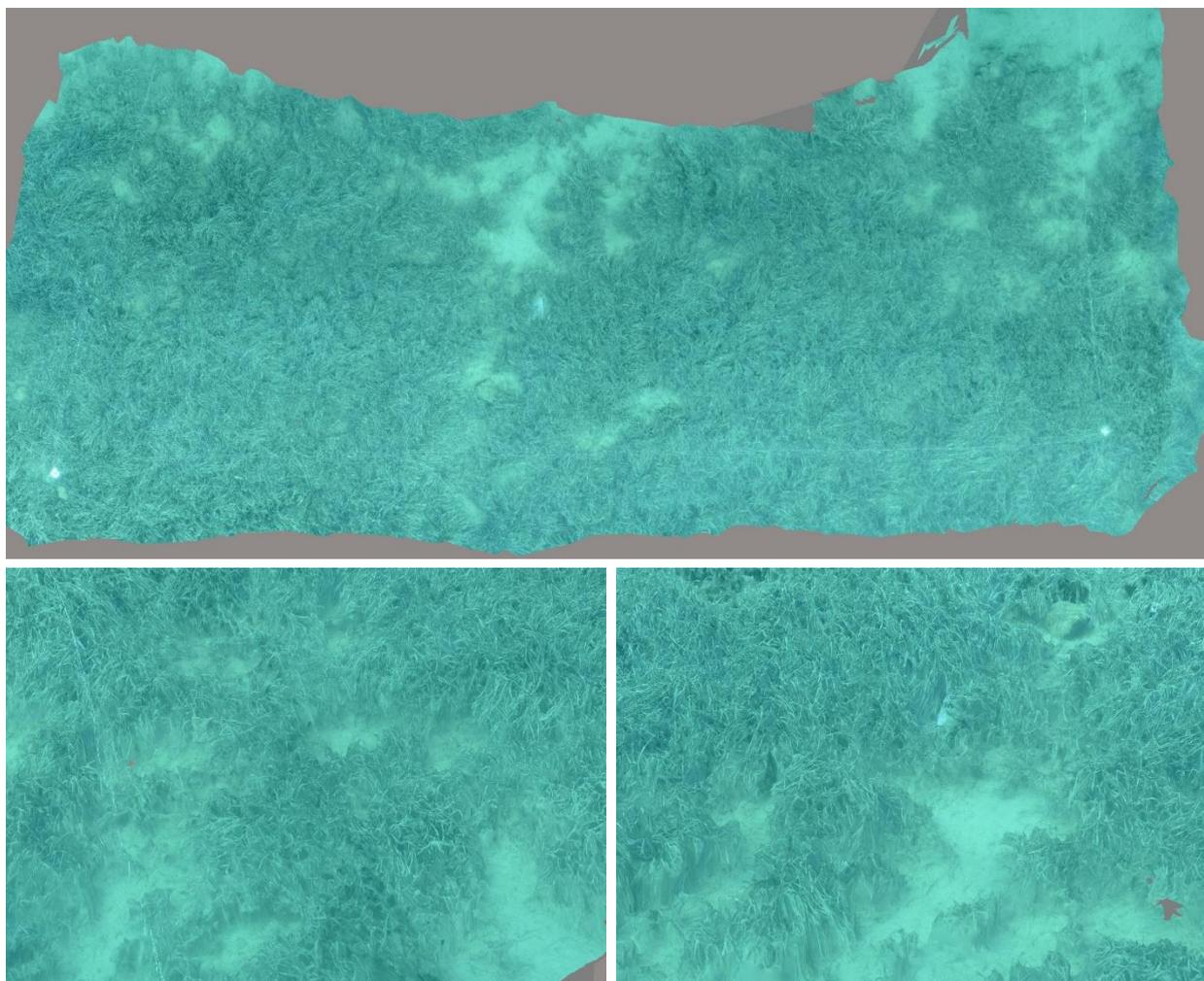


Figure 61 : Modèle du site TEMPO « Plage Suveret »

## II.A.12. Pointe Andati

Le modèle 3D du site TEMPO « Pointe Andati » a été construit à partir de 855 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

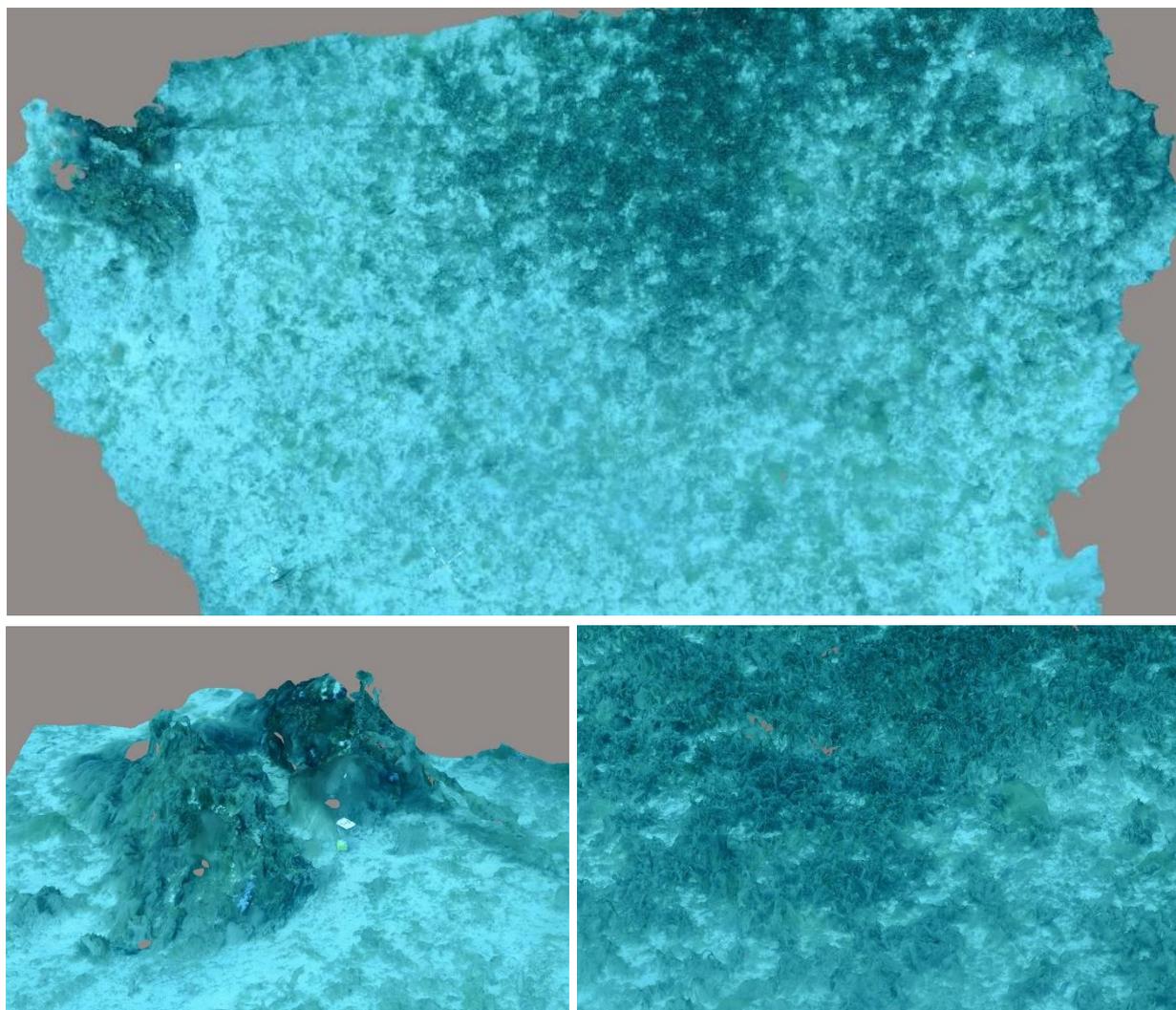


Figure 62 : Modèle du site TEMPO « Pointe Andati »



### II.A.13. Pointe Bacon

Le modèle 3D du site TEMPO « Pointe Bacon » a été construit à partir de 1221 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

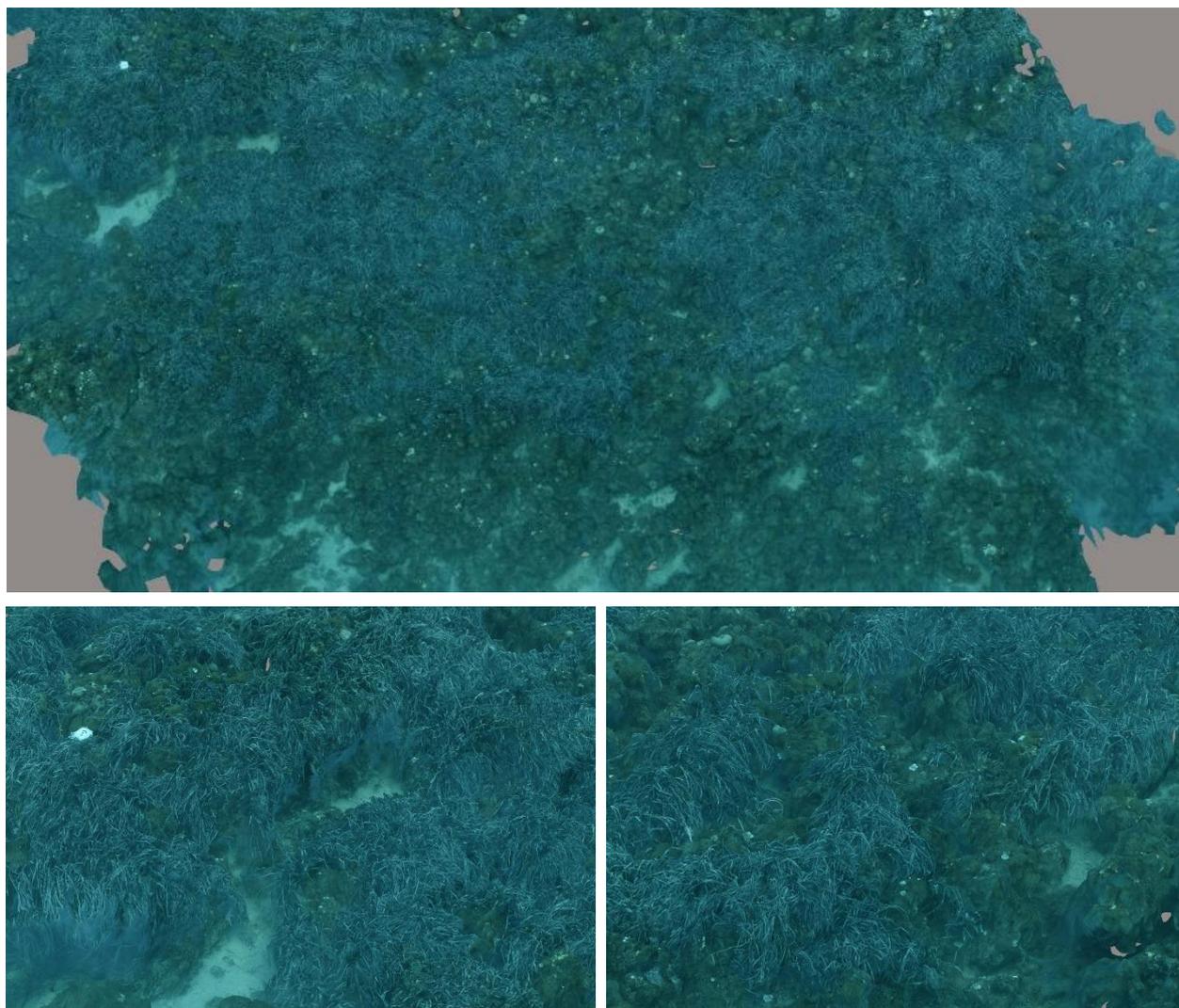


Figure 63 : Modèle du site TEMPO « Pointe Bacon »

## II.A.14. Pointe de la Calle

Le modèle 3D du site TEMPO « Pointe de la Calle » a été construit à partir de 1545 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

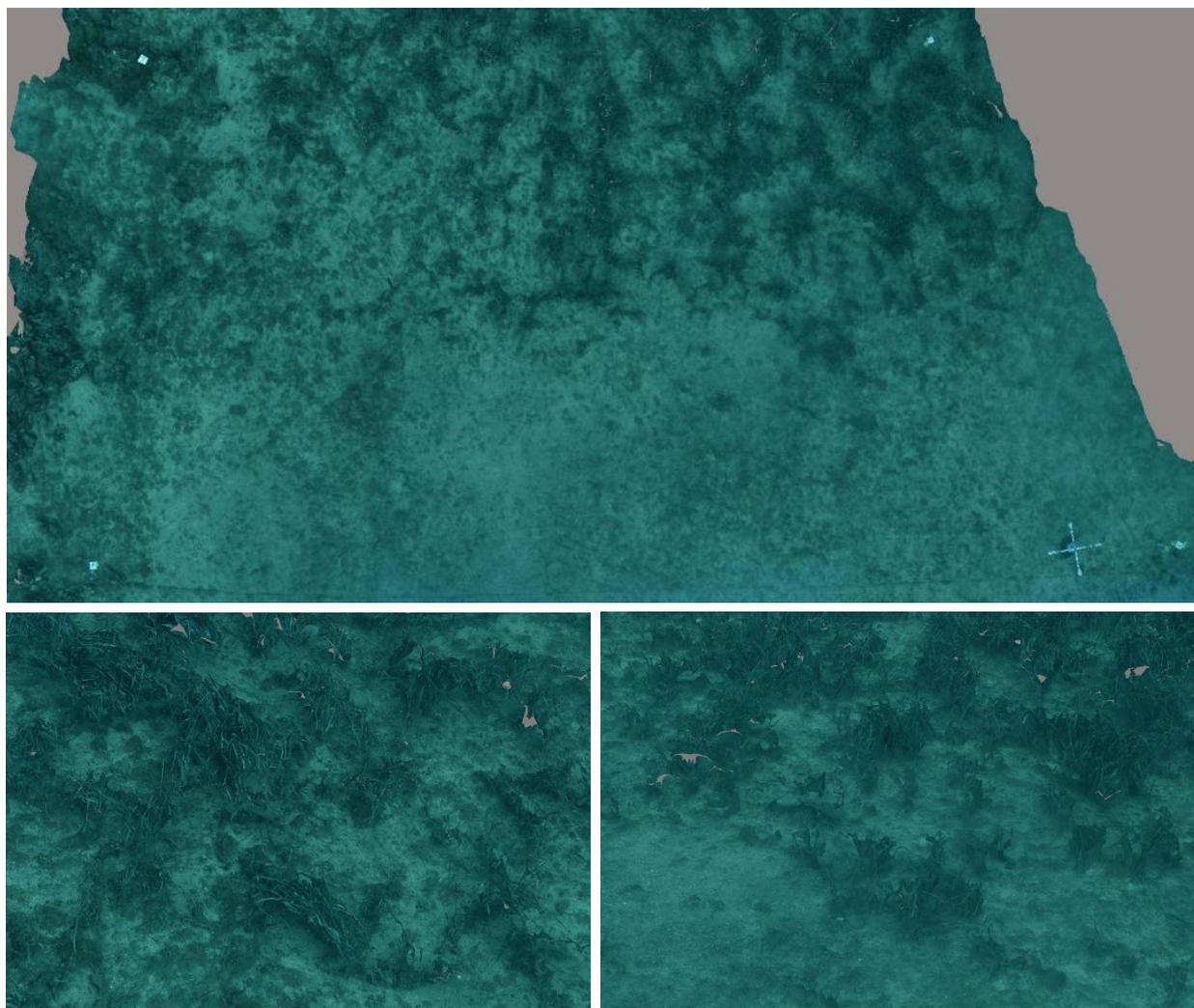


Figure 64 : Modèle du site TEMPO « Pointe de la Calle »



### II.A.15. Pointe Esquillette

Le modèle 3D du site TEMPO « Pointe Esquillette » a été construit à partir de 1376 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

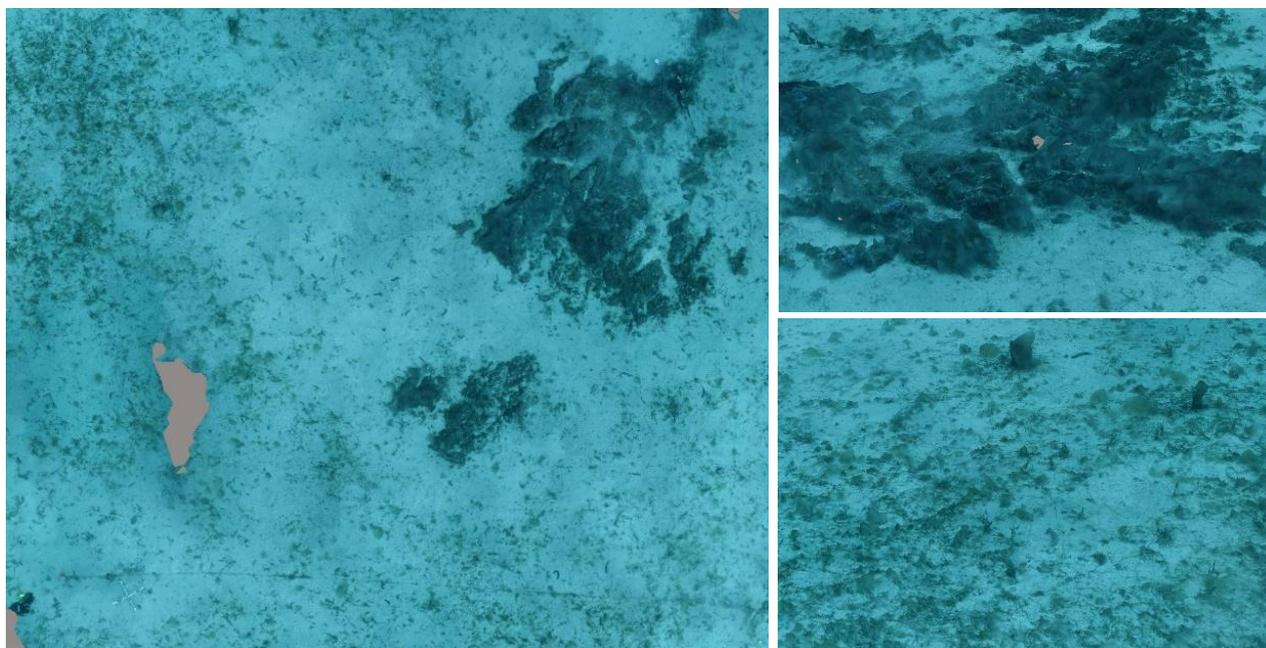


Figure 65 : Modèle du site TEMPO « Pointe Esquillette »

## II.A.16. Pointe Rube

Le modèle 3D du site TEMPO « Pointe Rube » a été construit à partir de 1945 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

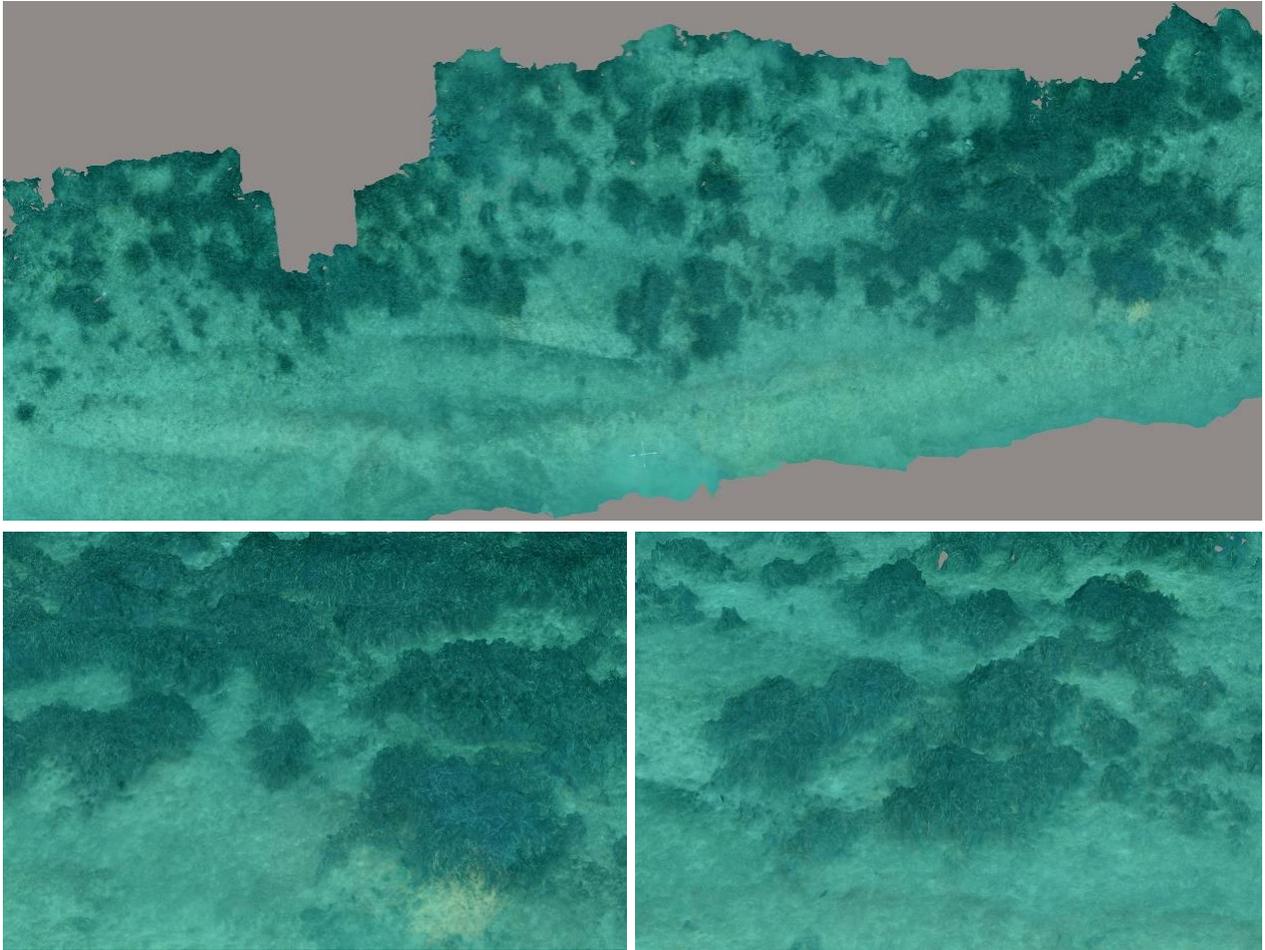


Figure 66 : Modèle du site TEMPO « Pointe Rube »



### II.A.17. Pointe Sardinaux

Le modèle 3D du site TEMPO « Pointe Sardinaux » a été construit à partir de 422 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

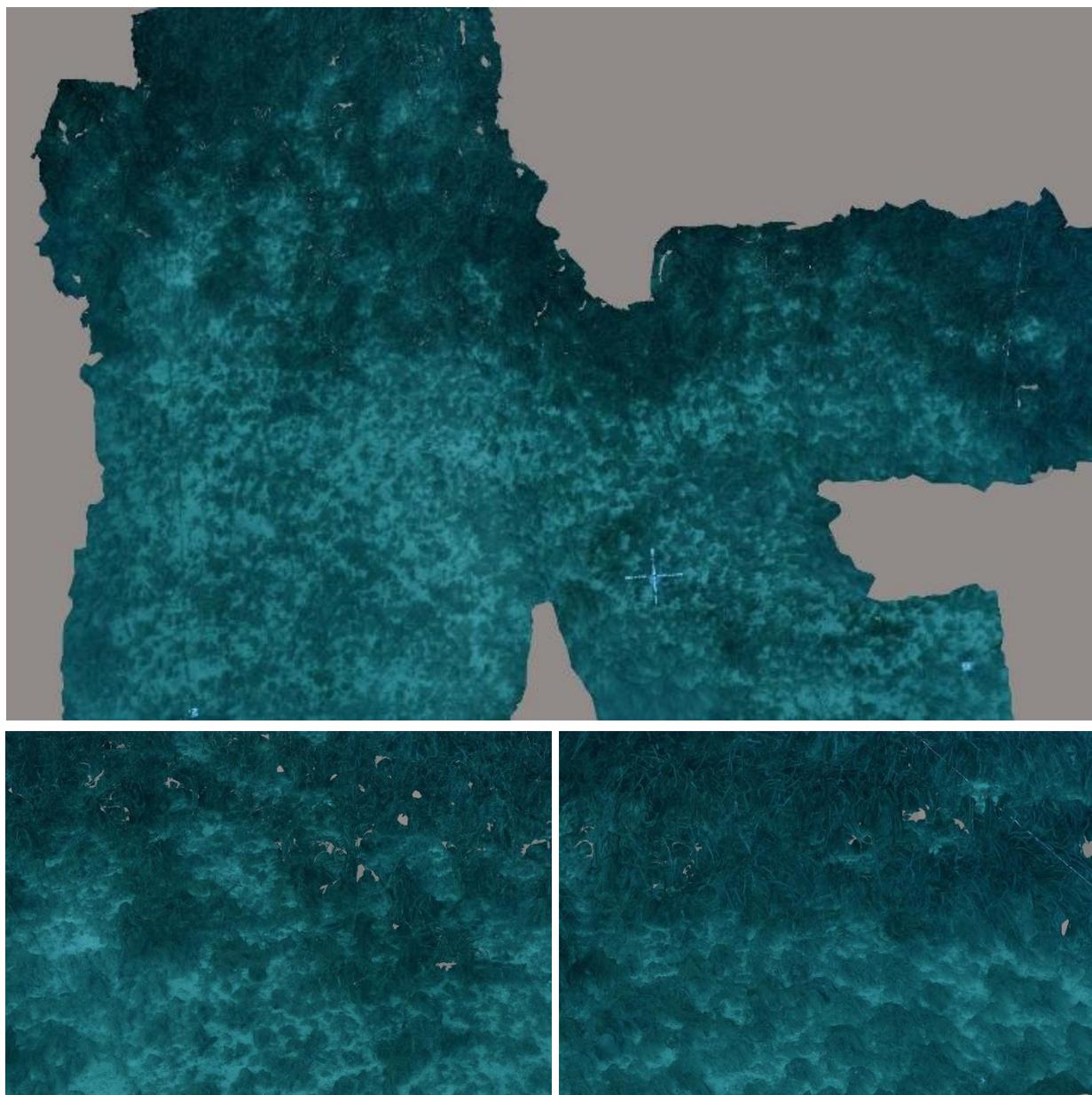


Figure 67 : Modèle du site TEMPO « Pointe Sardinaux »

## II.A.18. Pointe Veille Est

Le modèle 3D du site TEMPO « Pointe Veille Est » a été construit à partir de 1518 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

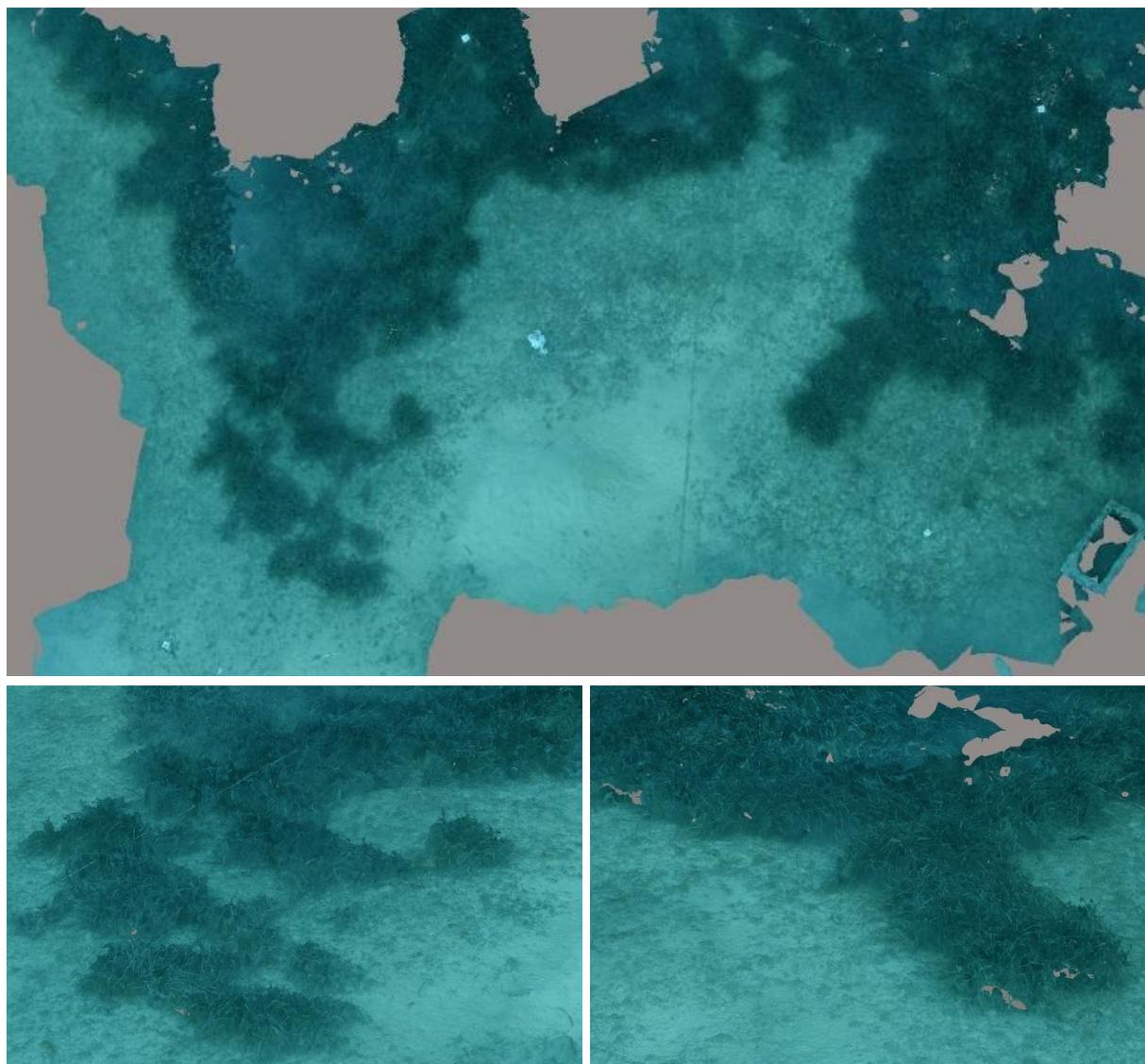


Figure 68 : Modèle du site TEMPO « Pointe Veille Est »



### II.A.19. Presqu'île de Giens

Le modèle 3D du site TEMPO « Presqu'île de Giens » a été construit à partir de 2083 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

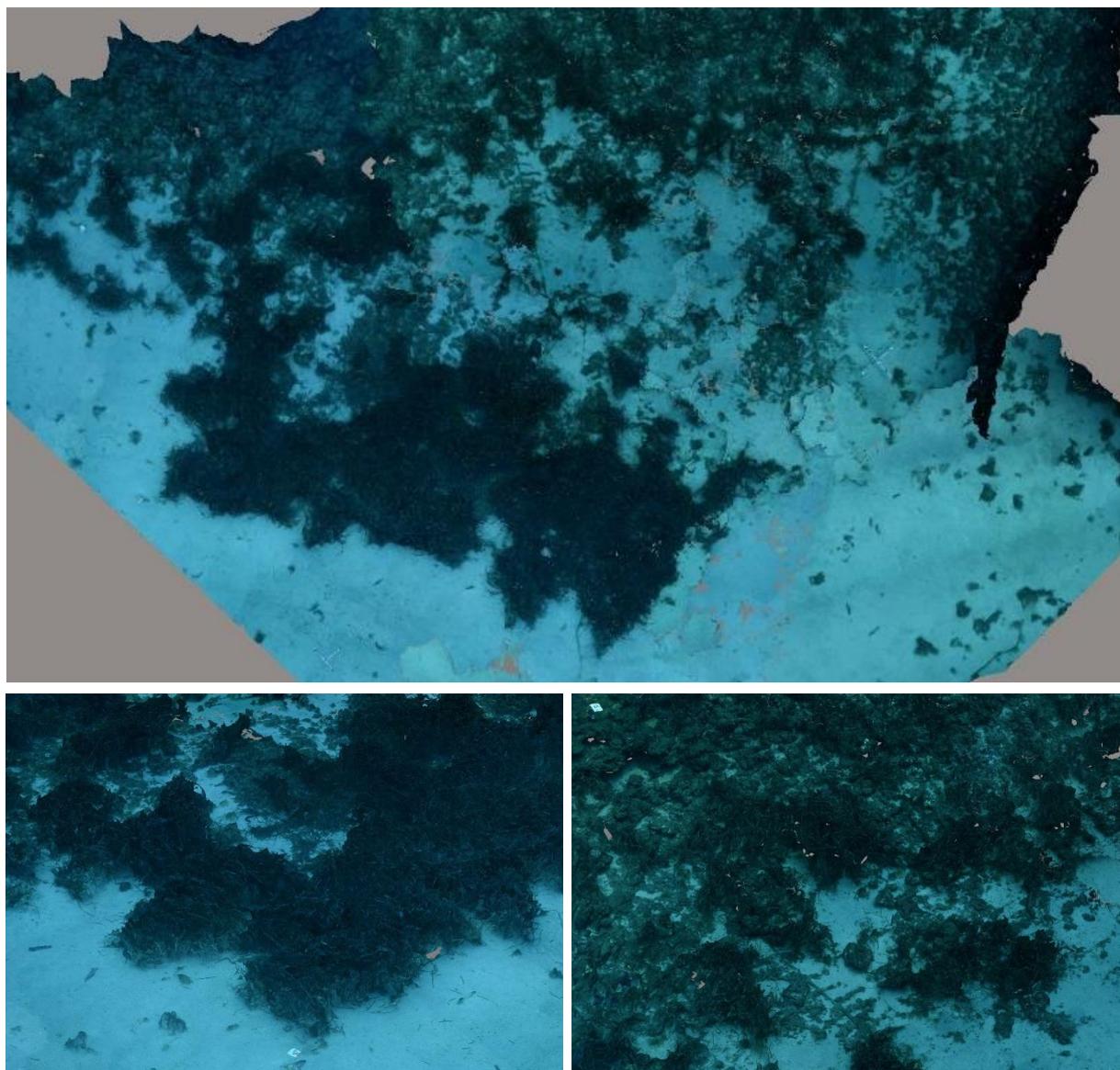


Figure 69 : Modèle du site TEMPO « Presqu'île de Giens »

## II.B. RECOR

### II.B.1. Agay

Le modèle 3D du site RECOR « Agay » a été construit à partir de 622 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

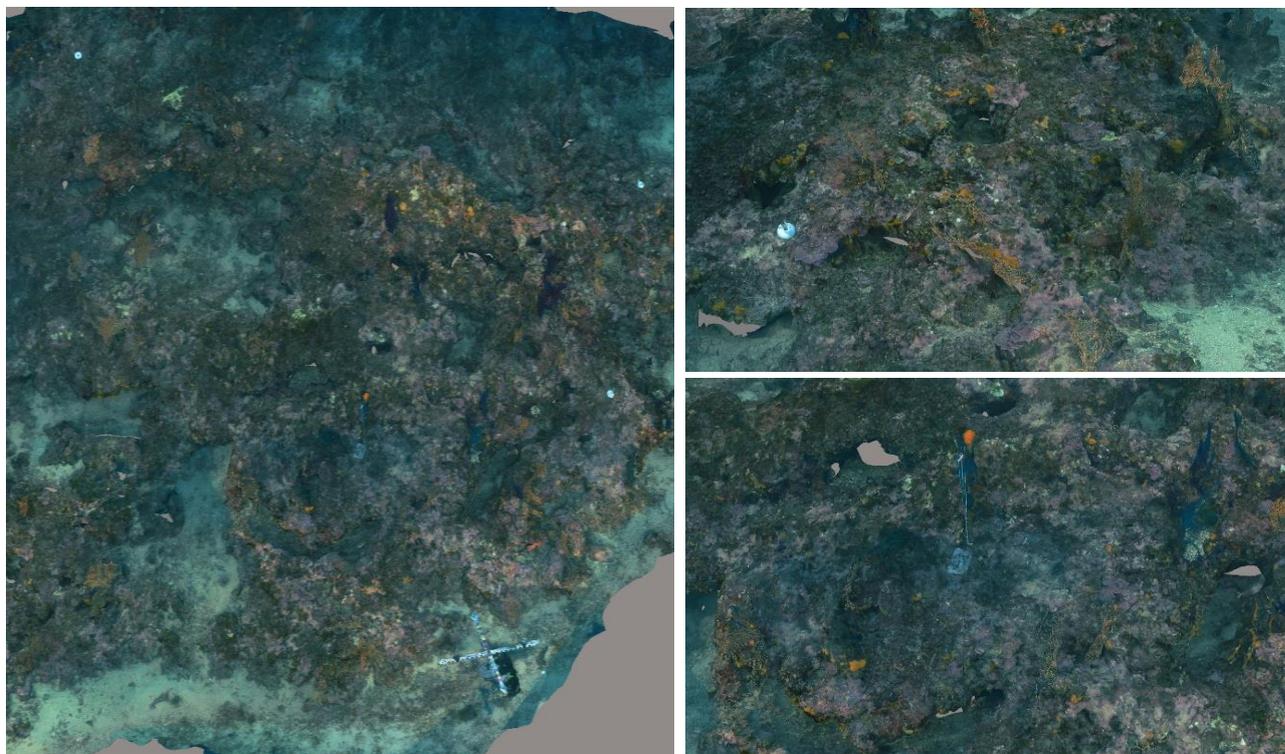


Figure 70 : Modèle du site RECOR « Agay »

## II.B.2. Balise Levant

Le modèle 3D du site RECOR « Balise Levant » a été construit à partir de 516 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

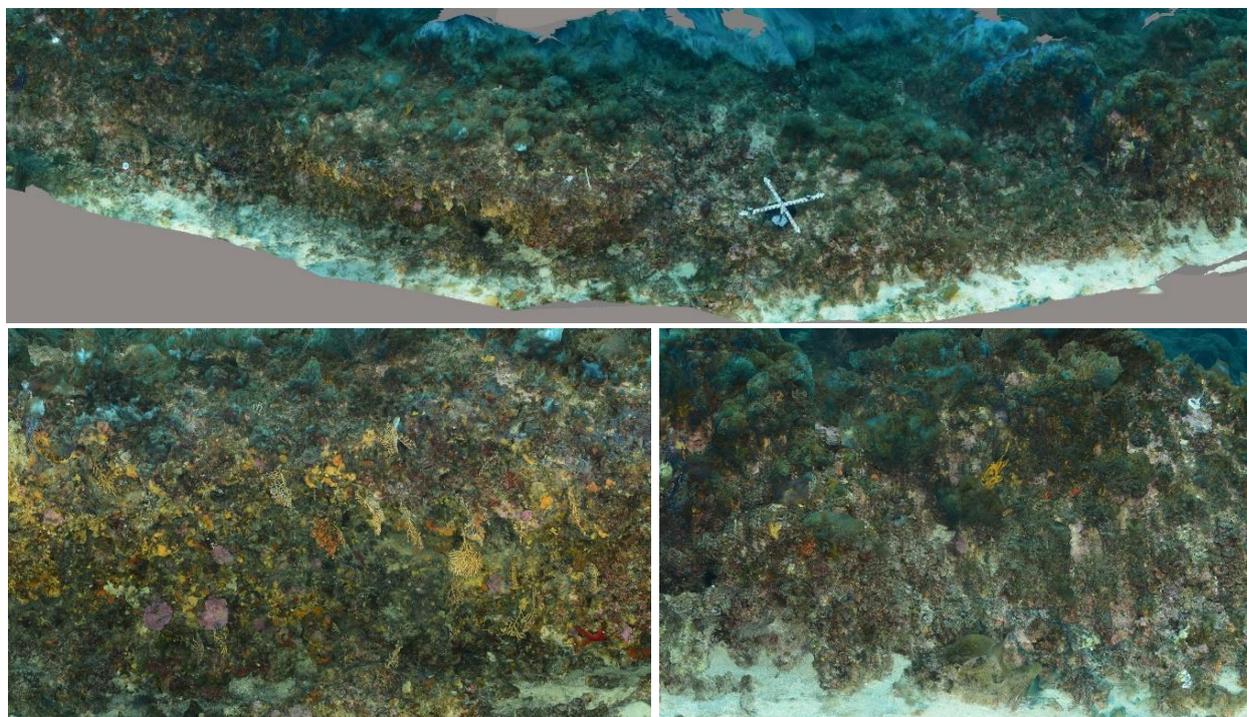


Figure 71 : Modèle du site RECOR « Balise Levant »

### II.B.3. Balise Rabiou

Le modèle 3D du site RECOR « Balise Rabiou » a été construit à partir de 514 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

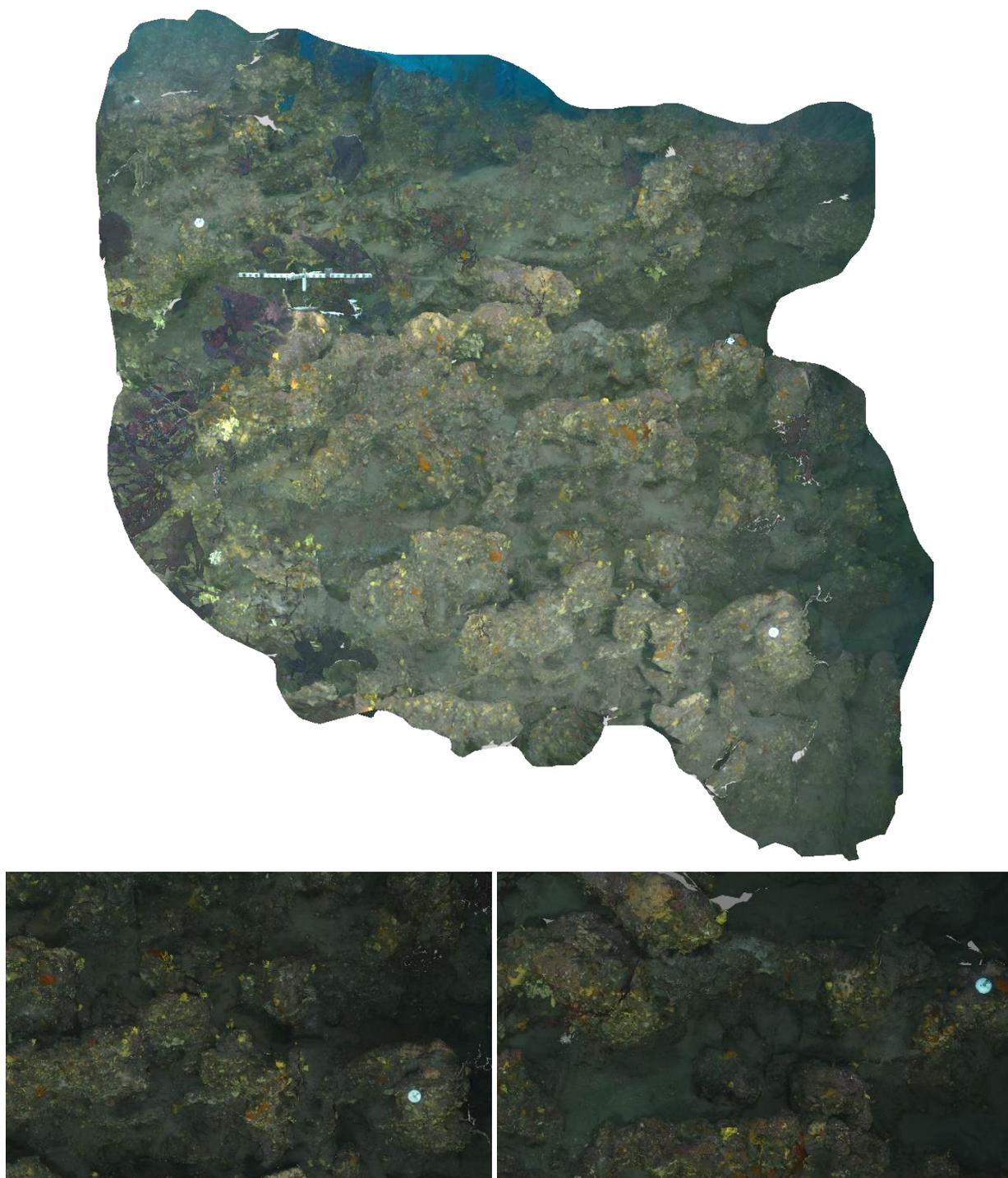


Figure 72 : Modèle du site RECOR « Balise Rabiou »

#### II.B.4. Banc de Vieilles

Le modèle 3D du site RECOR « Banc de Vieilles » a été construit à partir de 979 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

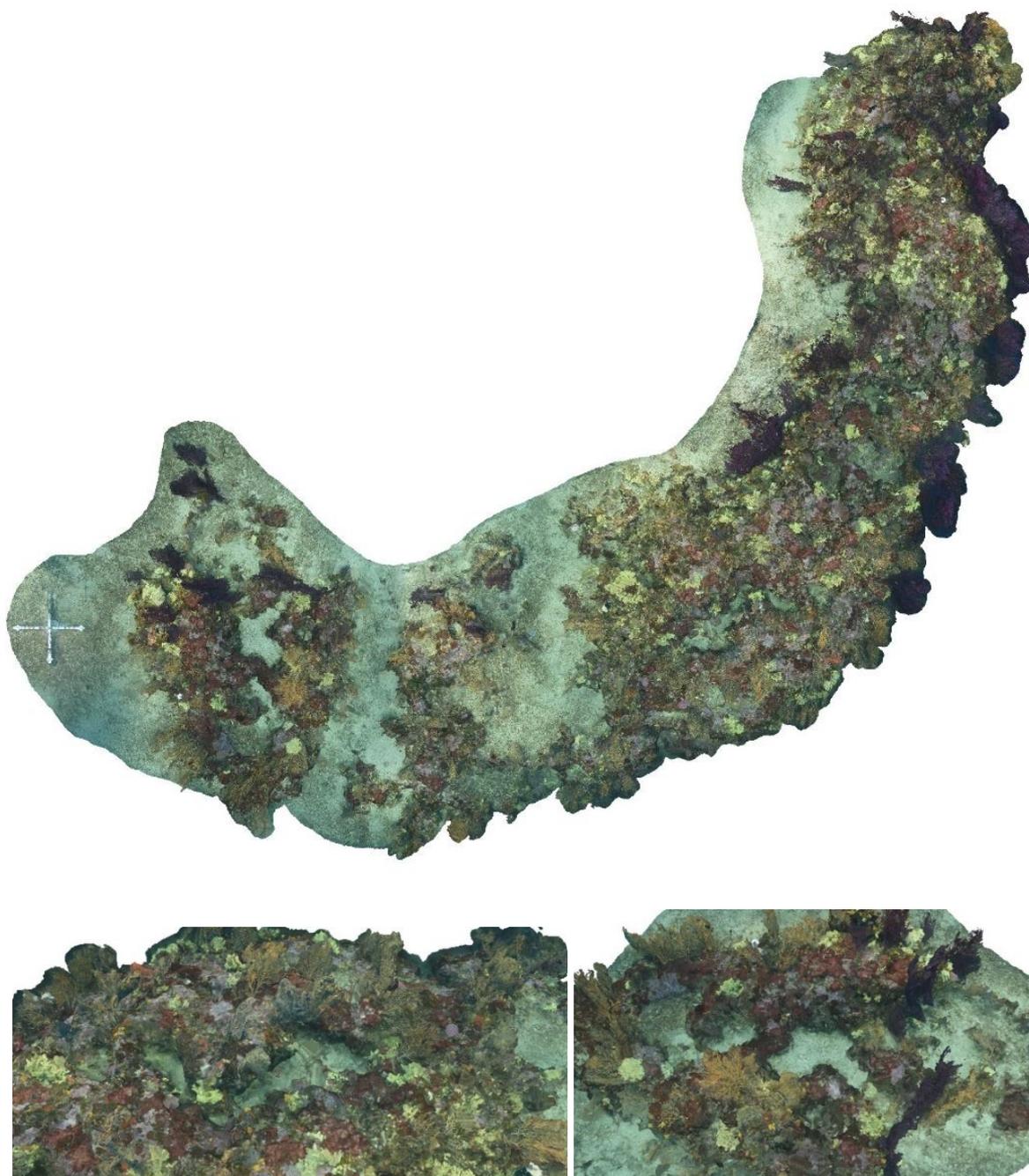


Figure 73 : Modèle du site RECOR « Banc de Vieilles »

## II.B.5. Bonneau

Le modèle 3D du site RECOR « Bonneau » a été construit à partir de 1151 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

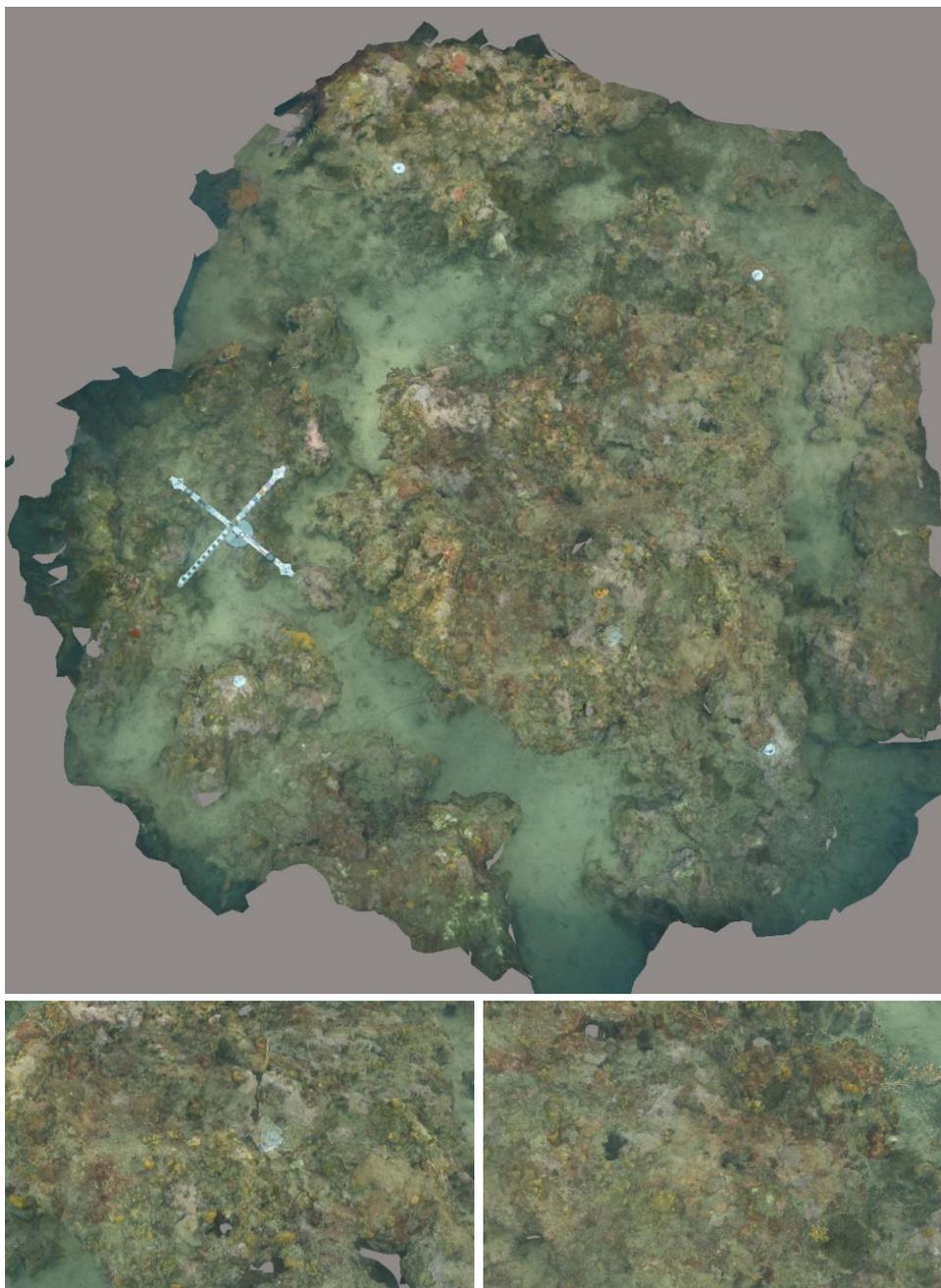


Figure 74 : Modèle du site RECOR « Bonneau »

### II.B.6. Cap d'Ail

Le modèle 3D du site RECOR « Cap d'Ail » a été construit à partir de 379 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que trois zooms sur une portion du modèle.

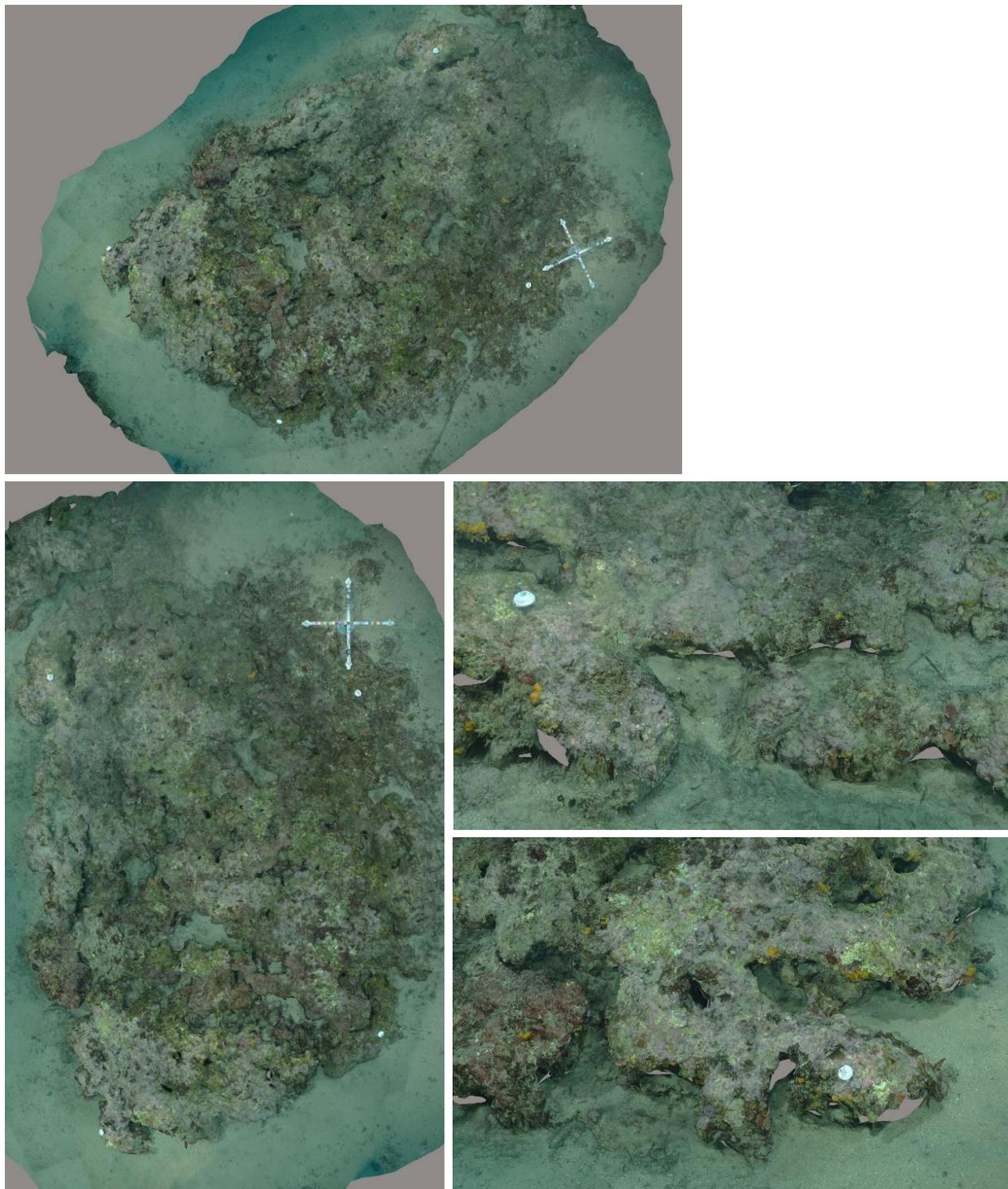


Figure 75 : Modèle du site RECOR « Cap d'Ail »

## II.B.7. Cap Lardier

Le modèle 3D du site RECOR « Cap Lardier » a été construit à partir de 243 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que trois zooms sur une portion du modèle.

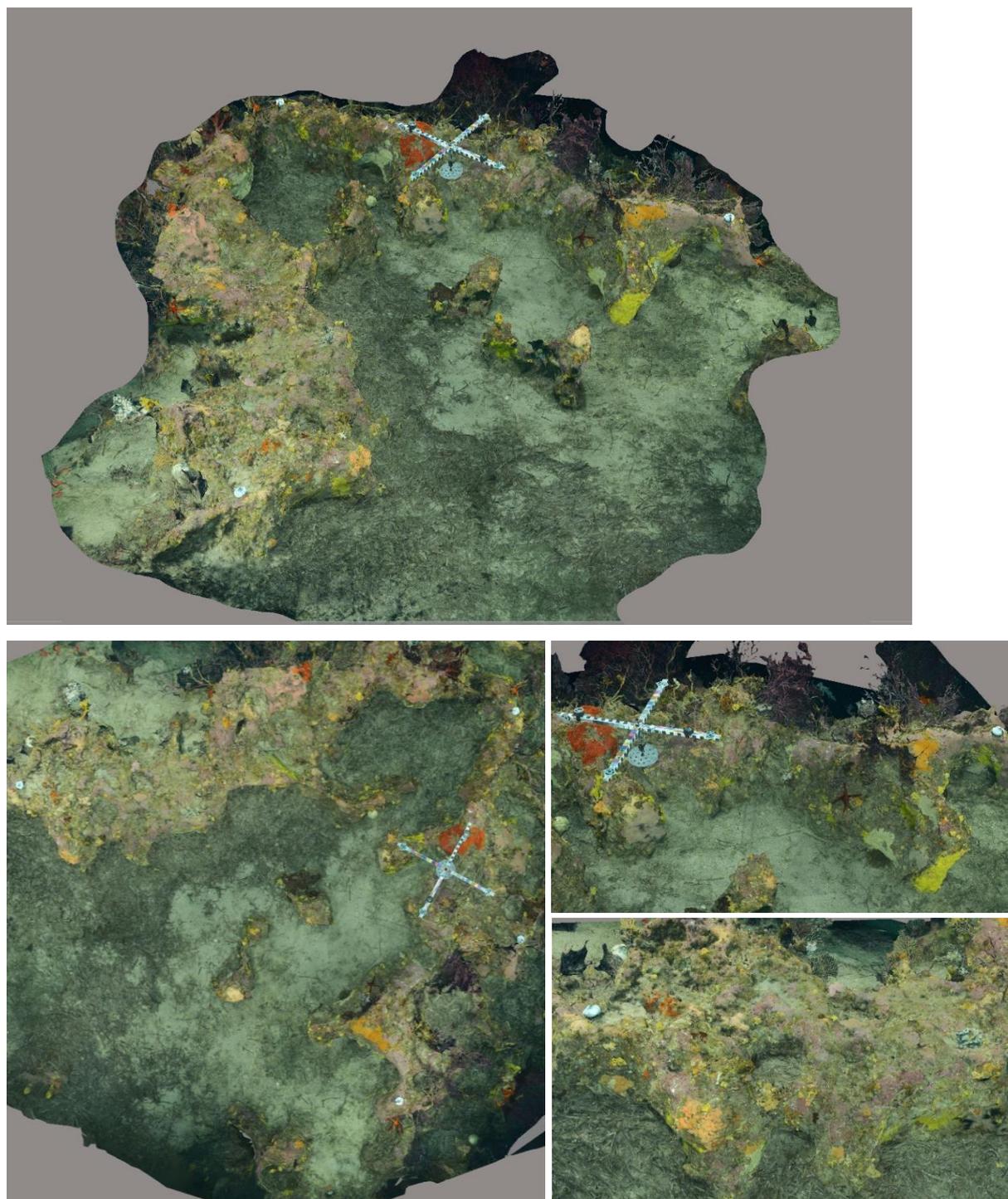


Figure 76 : Modèle du site RECOR « Cap Lardier »

### II.B.8. Cap Martin Est

Le modèle 3D du site RECOR « Cap Martin Est » a été construit à partir de 330 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

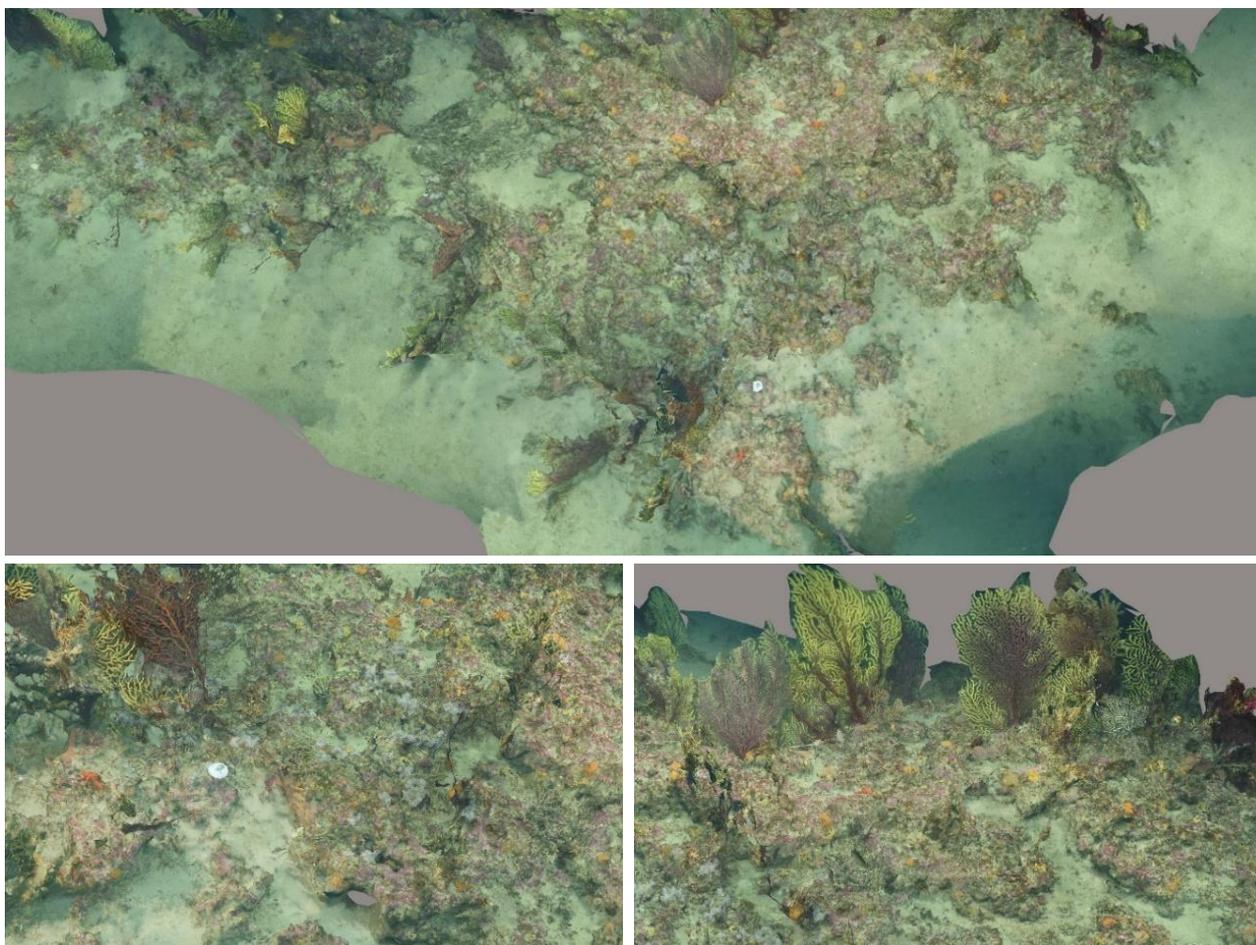


Figure 77 : Modèle du site RECOR « Cap Martin Est »

## II.B.9. Cap Martin Ouest

Le modèle 3D du site RECOR « Cap Martin Ouest » a été construit à partir de 172 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

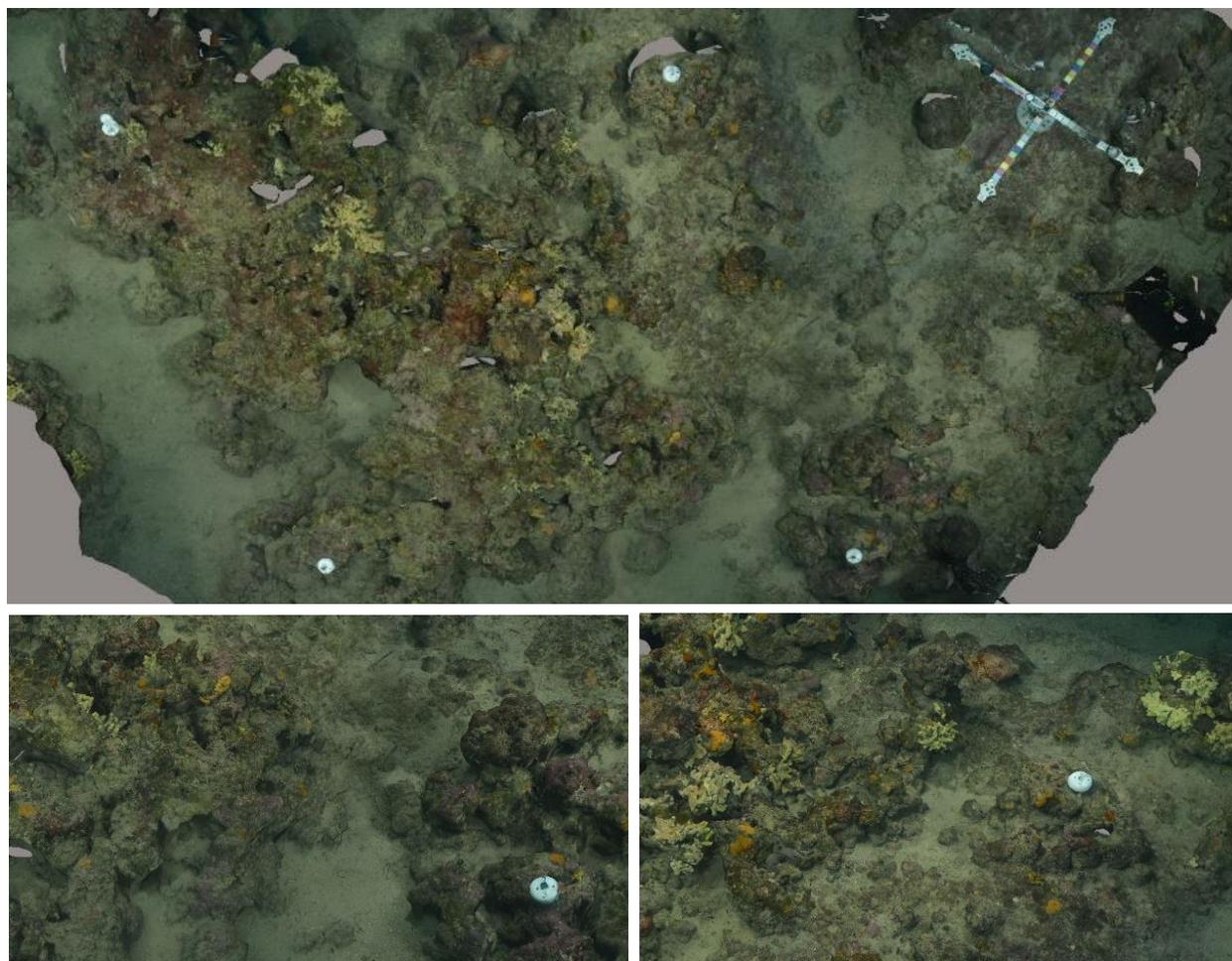


Figure 78 : Modèle du site RECOR « Cap Martin Ouest »

### II.B.10. Chrétienne

Le modèle 3D du site RECOR « Chrétienne » a été construit à partir de 1047 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

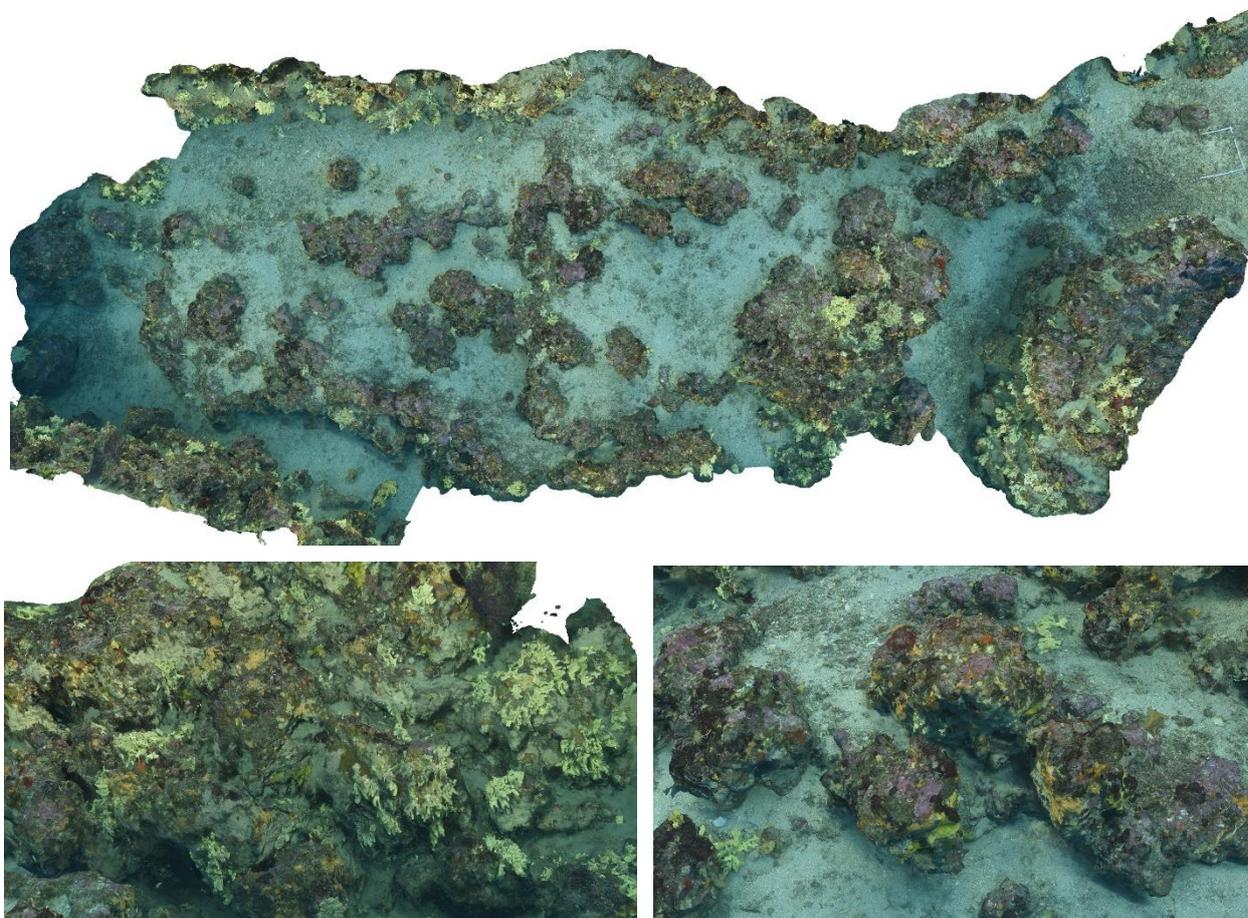


Figure 79 : Modèle du site RECOR « Chrétienne »

## II.B.11. Emissaire Saint-Tropez 1

Le modèle 3D du site RECOR « Emissaire Saint-Tropez 1 » a été construit à partir de 686 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

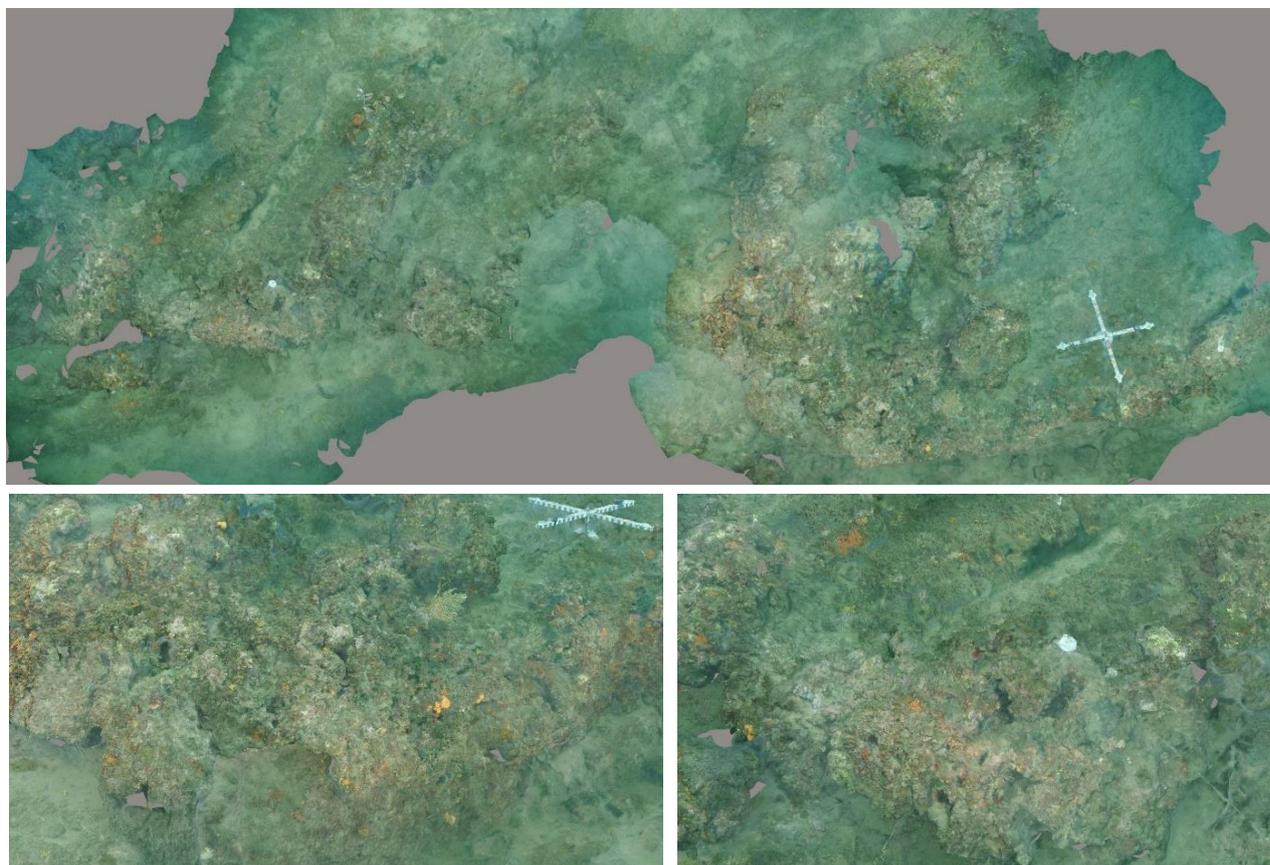


Figure 80 : Modèle du site RECOR « Emissaire Saint-Tropez 1 »

## II.B.12. Emissaire Saint-Tropez 2

Le modèle 3D du site RECOR « Emissaire Saint-Tropez 2 » a été construit à partir de 1378 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

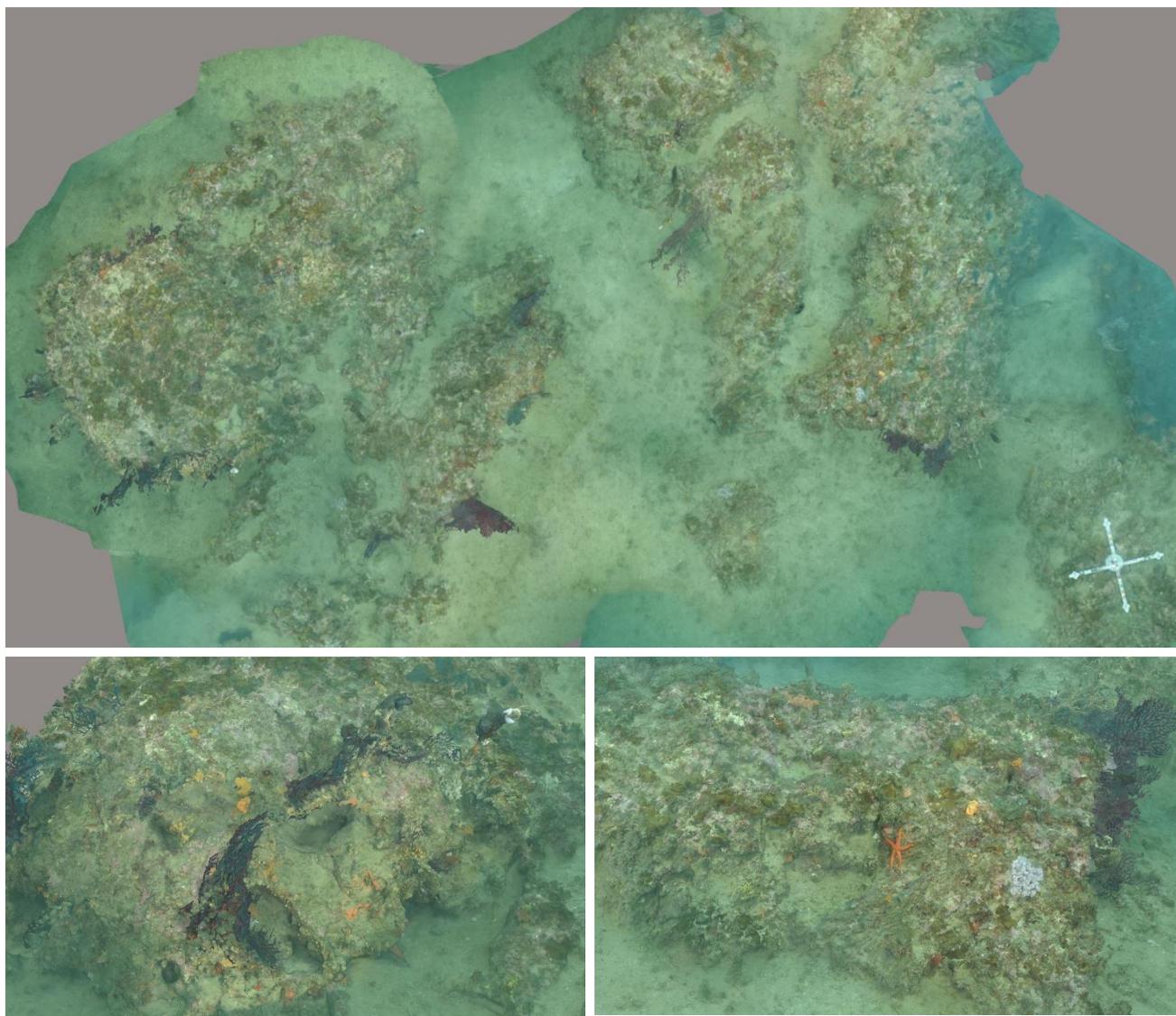


Figure 81 : Modèle du site RECOR « Emissaire Saint-Tropez 2 »

## II.B.13. Epave

Le modèle 3D du site RECOR « Epave » a été construit à partir de 615 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

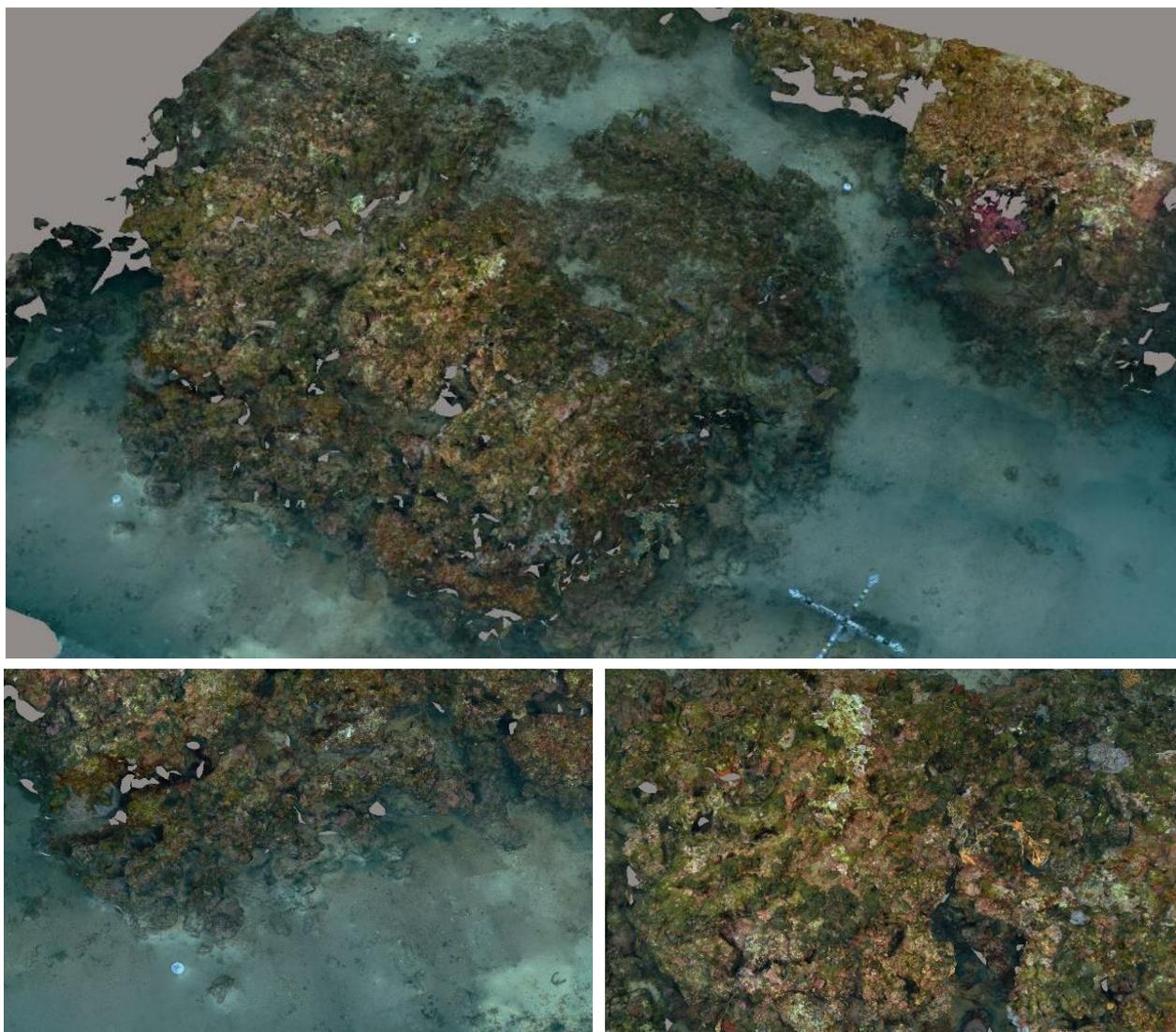


Figure 82 : Modèle du site RECOR « Epave »

### II.B.14. Gabinière

Le modèle 3D du site RECOR « Gabinière » a été construit à partir de 652 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

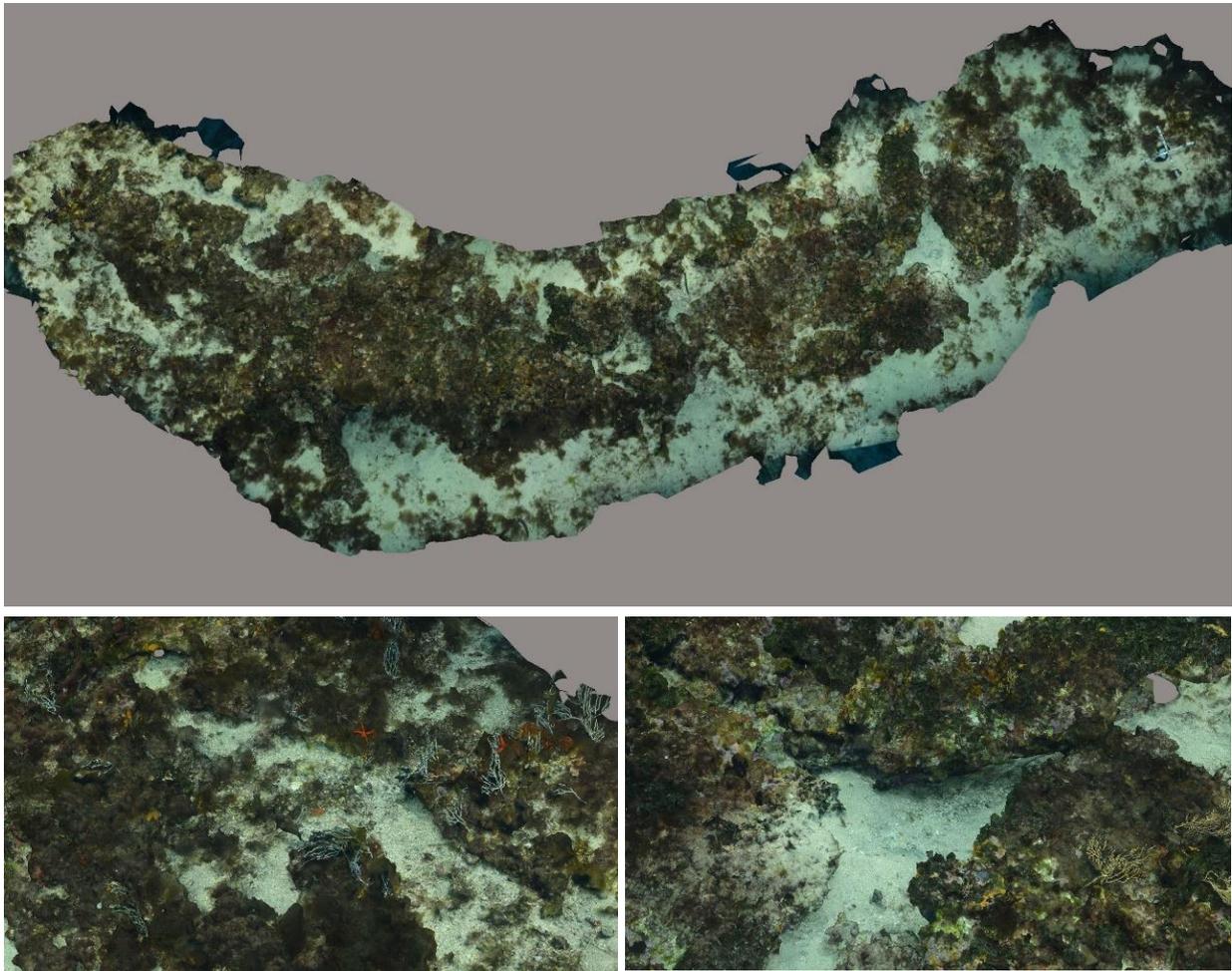


Figure 83 : Modèle du site RECOR « Gabinière »

## II.B.15. La Sèche Saint Pierre

Le modèle 3D du site RECOR « La Sèche Saint Pierre » a été construit à partir de 1075 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

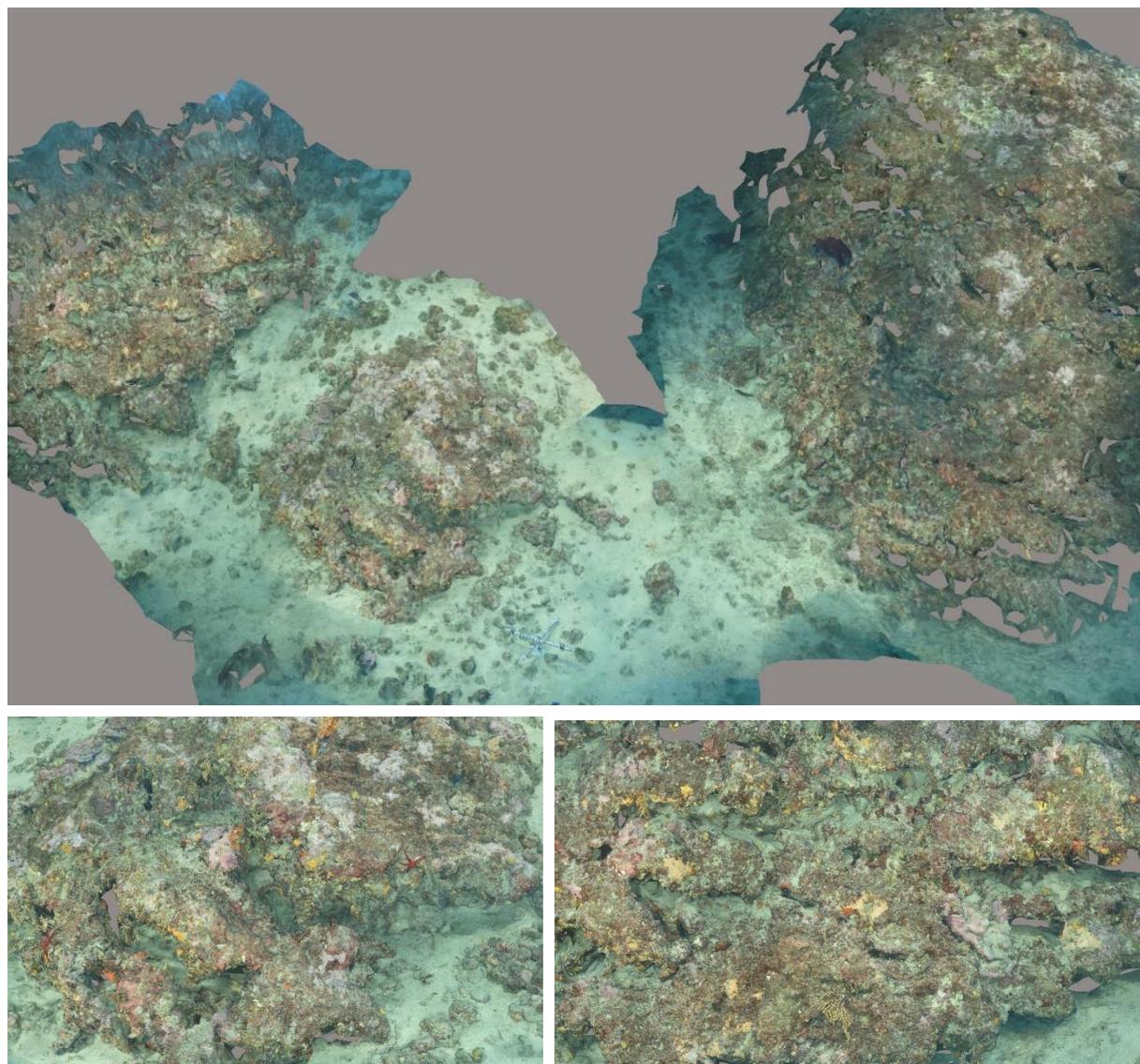


Figure 84 : Modèle du site RECOR « La Sèche Saint Pierre »

## II.B.16. Large Cap Roux

Le modèle 3D du site RECOR « Large Cap Roux » a été construit à partir de 667 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

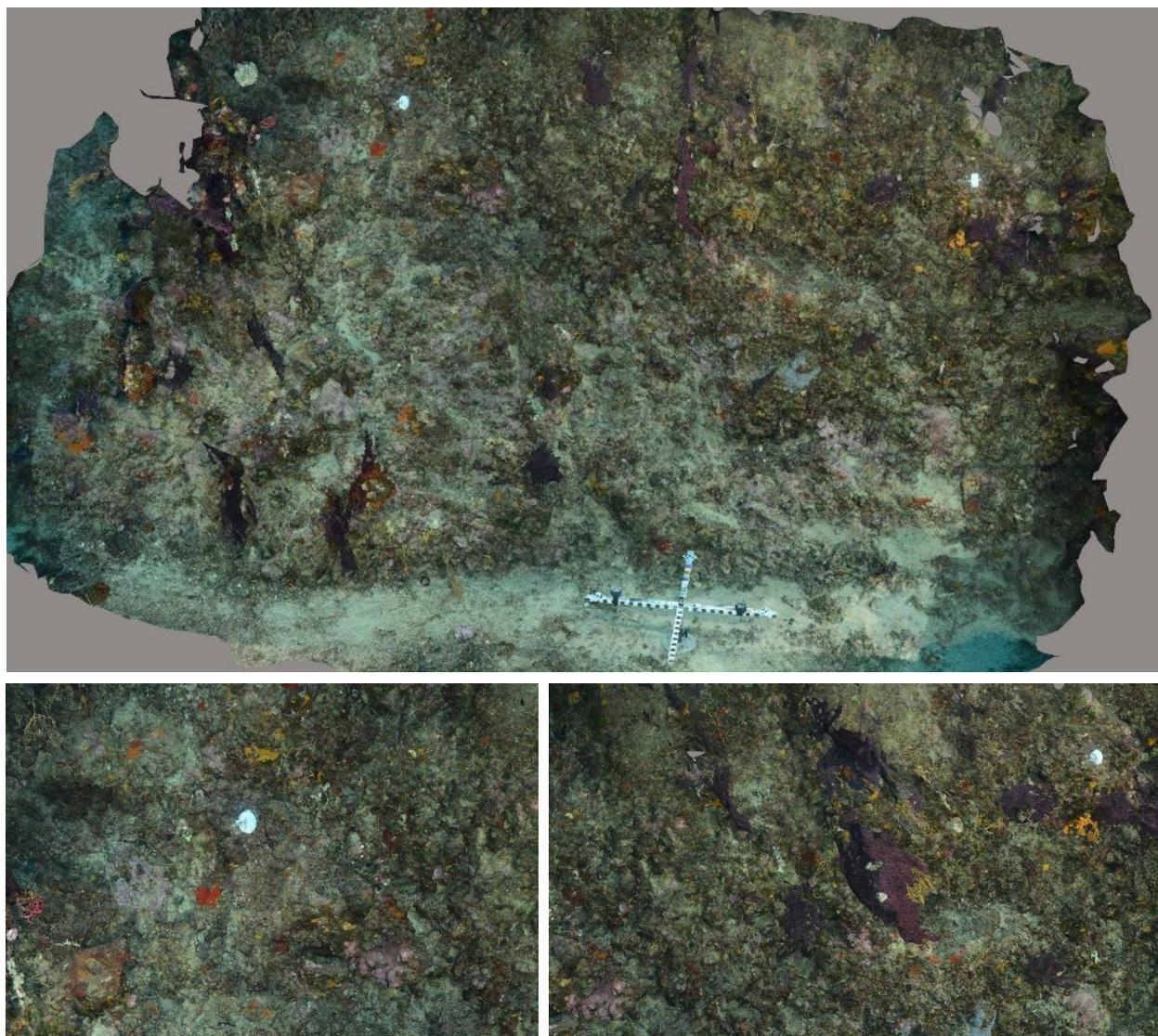


Figure 85 : Modèle du site RECOR « Large Cap Roux »

## II.B.17. Les Ancres

Le modèle 3D du site RECOR « Les Ancres » a été construit à partir de 309 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

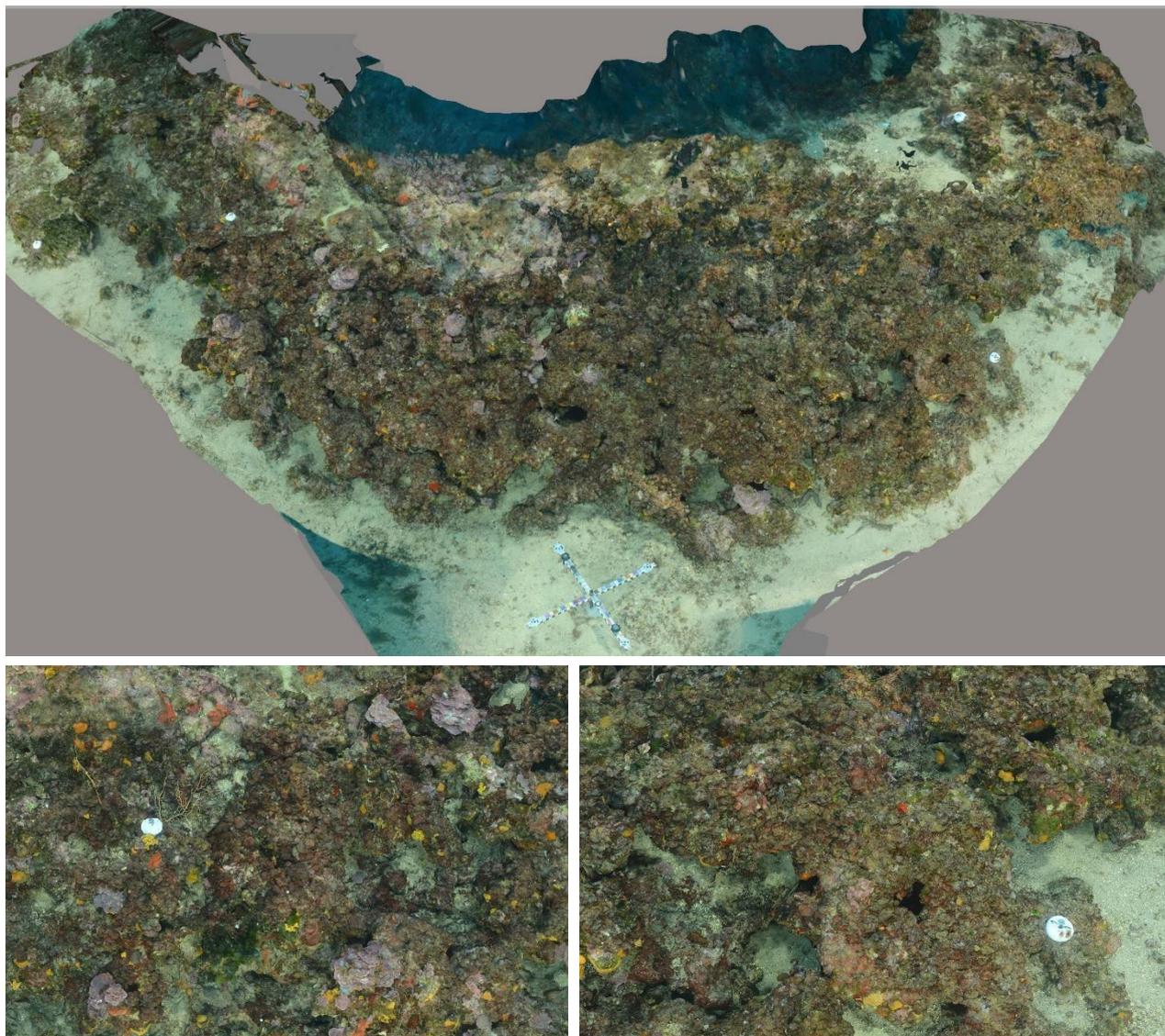


Figure 86 : Modèle du site RECOR « Les Ancres »



## II.B.18. Lion de Mer

Le modèle 3D du site RECOR « Lion de Mer » a été construit à partir de 806 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

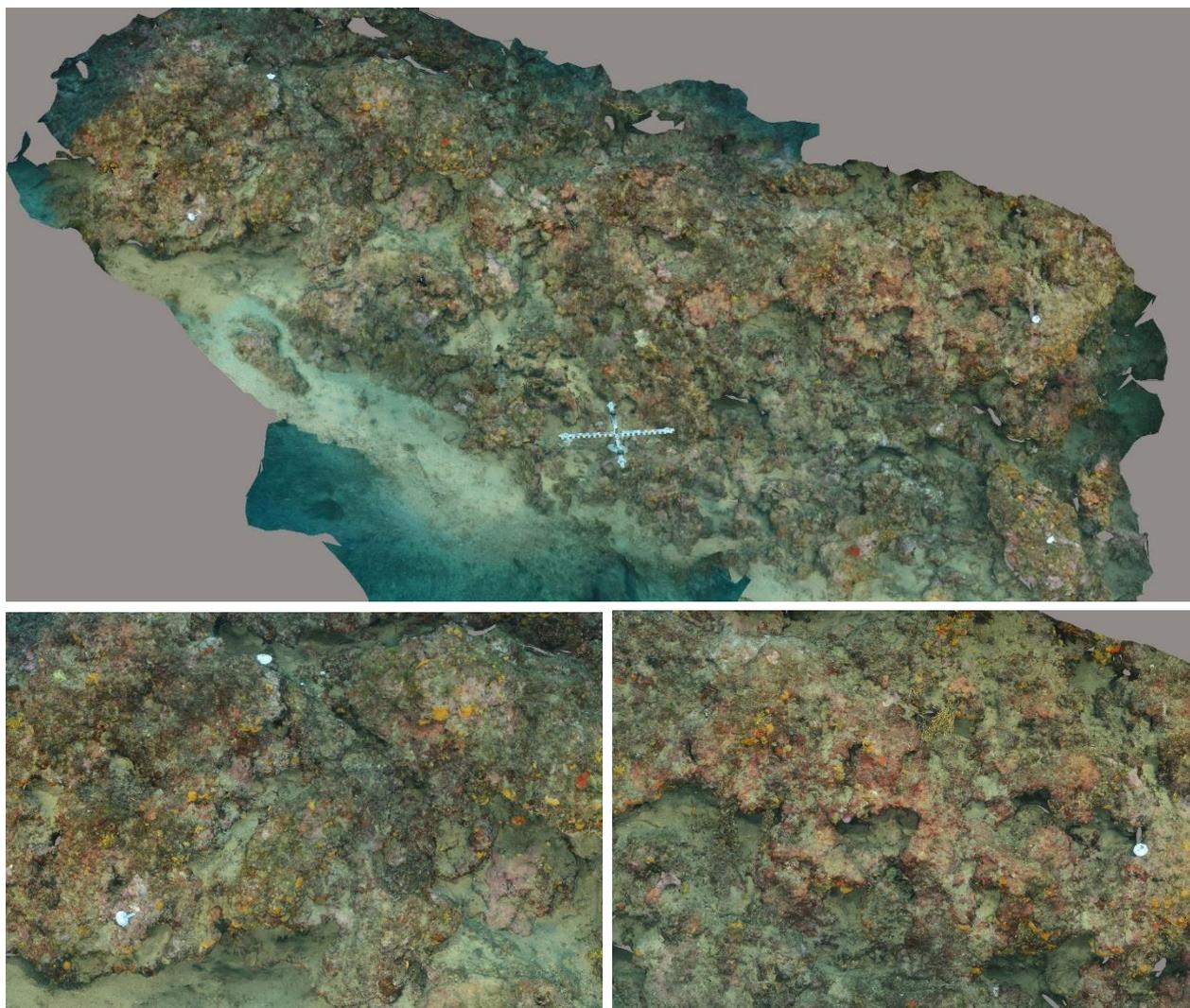


Figure 87 : Modèle du site RECOR « Lion de Mer »

## II.B.19. Pampelonne Profonde

Le modèle 3D du site RECOR « Pampelonne Profonde » a été construit à partir de 1090 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

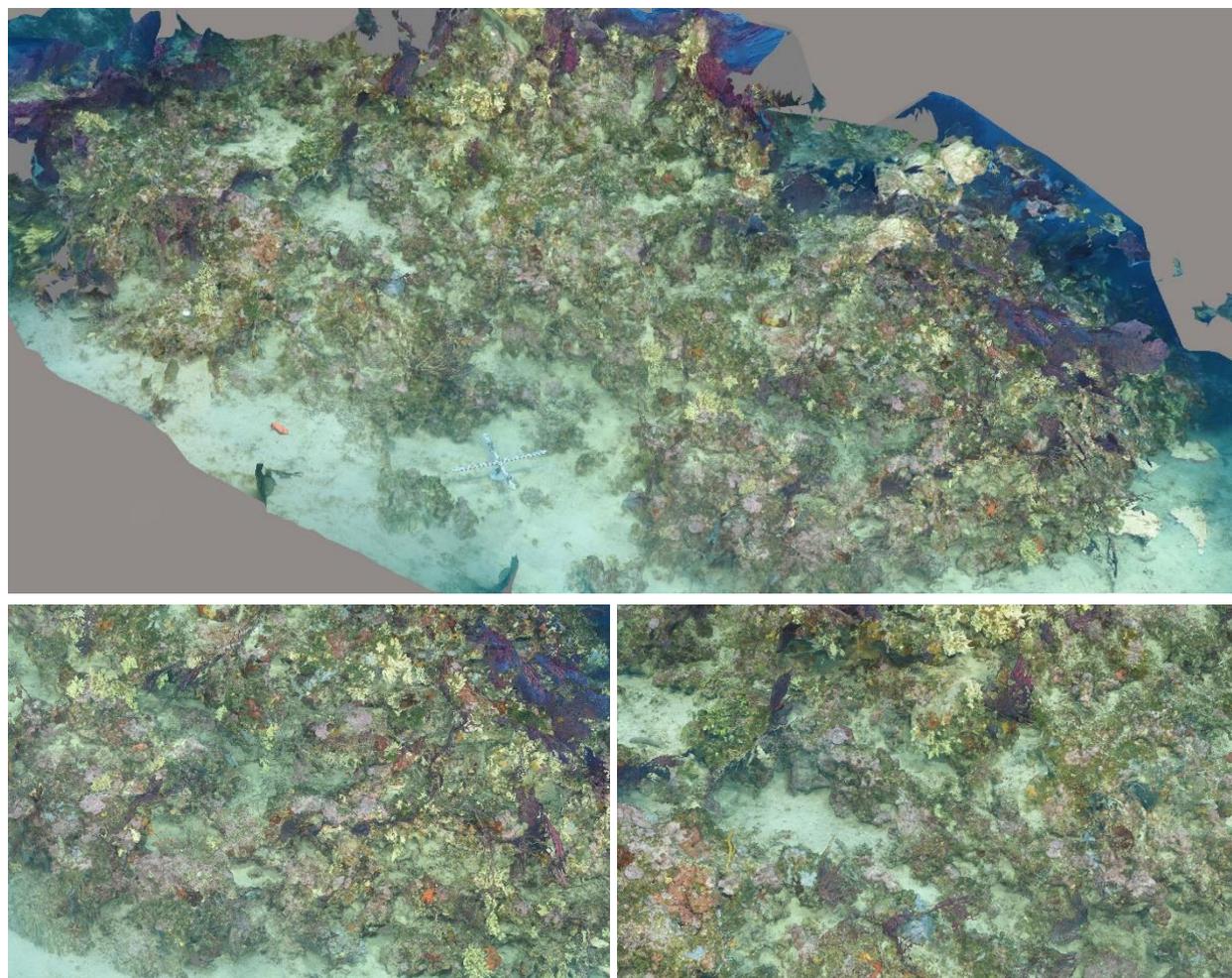


Figure 88 : Modèle du site RECOR « Pampelonne Profonde »



## II.B.20. Pointe Bacon

Le modèle 3D du site RECOR « Pointe Bacon » a été construit à partir de 601 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

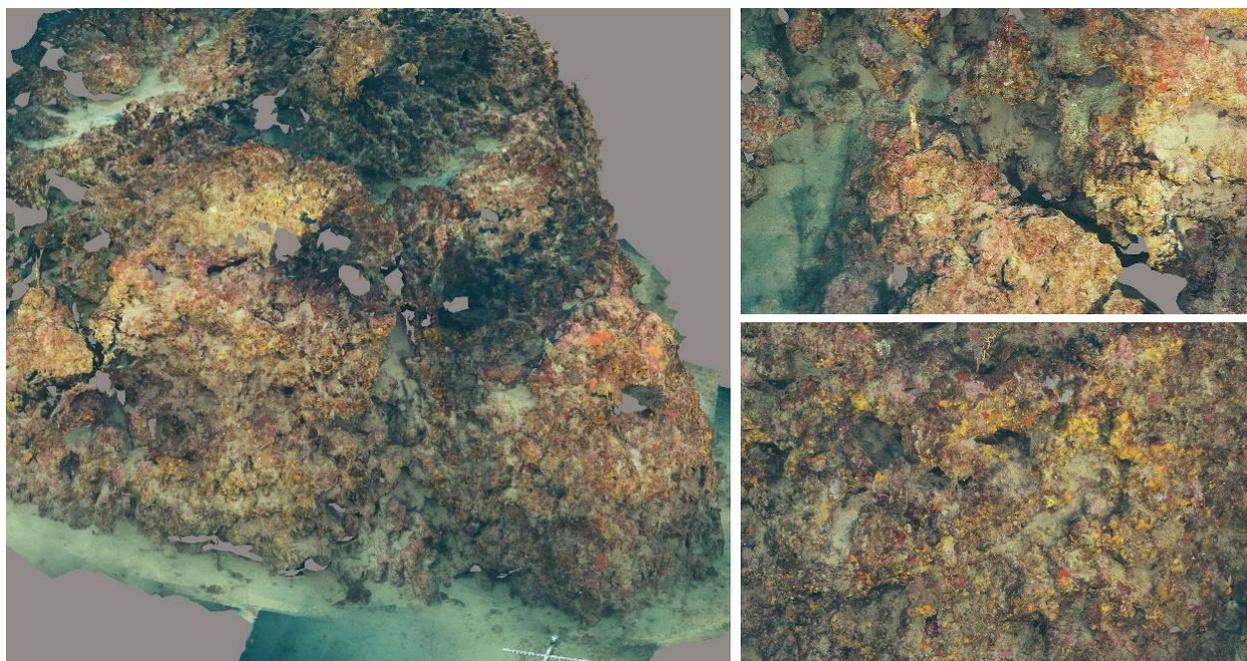


Figure 89 : Modèle du site RECOR « Pointe Bacon »

## II.B.21. Pointe Langoustier

Le modèle 3D du site RECOR « Pointe Langoustier » a été construit à partir de 296 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

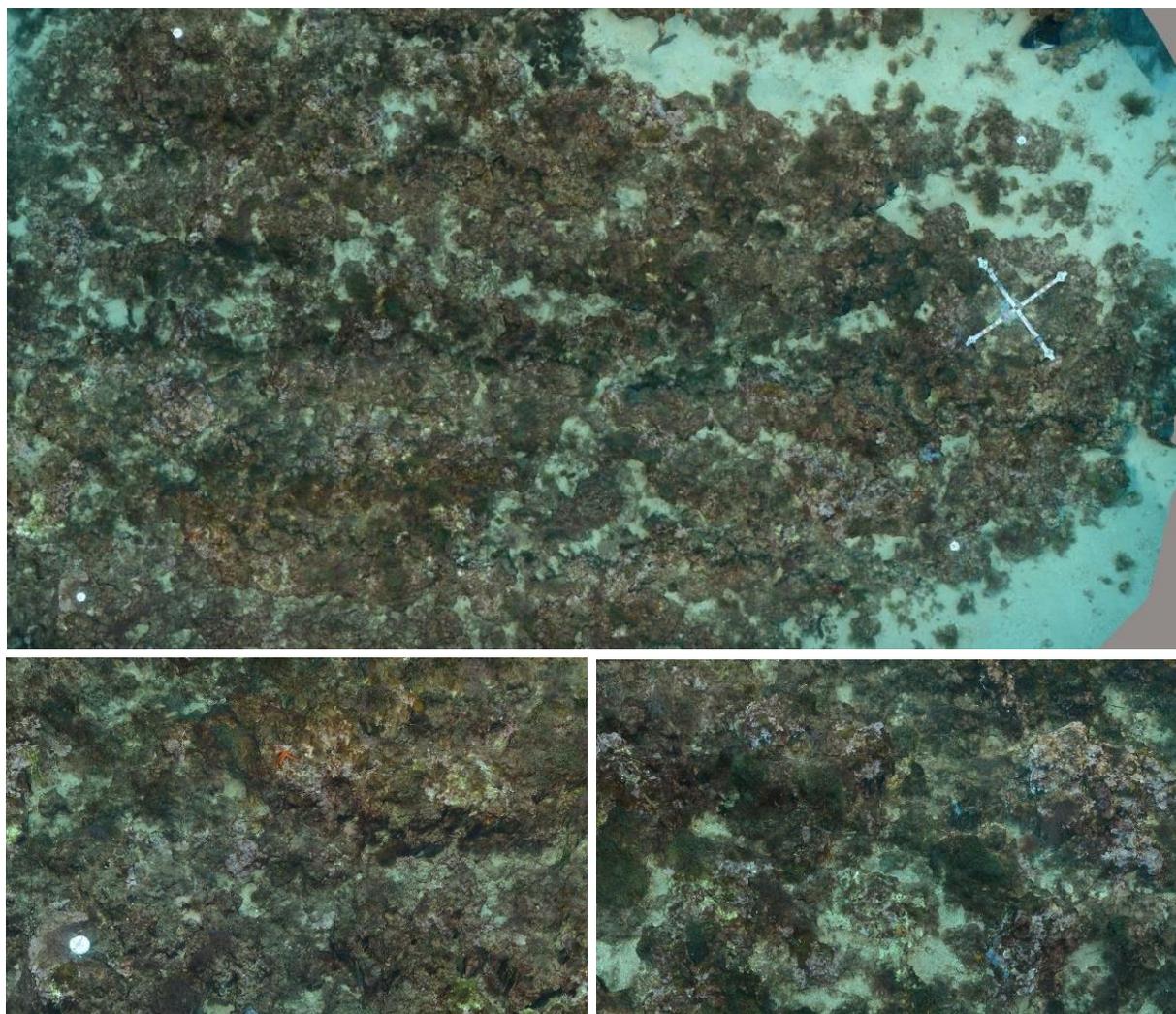


Figure 90 : Modèle du site RECOR « Pointe Langoustier »

### II.B.22. Port de Nice

Le modèle 3D du site RECOR « Port de Nice » a été construit à partir de 485 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

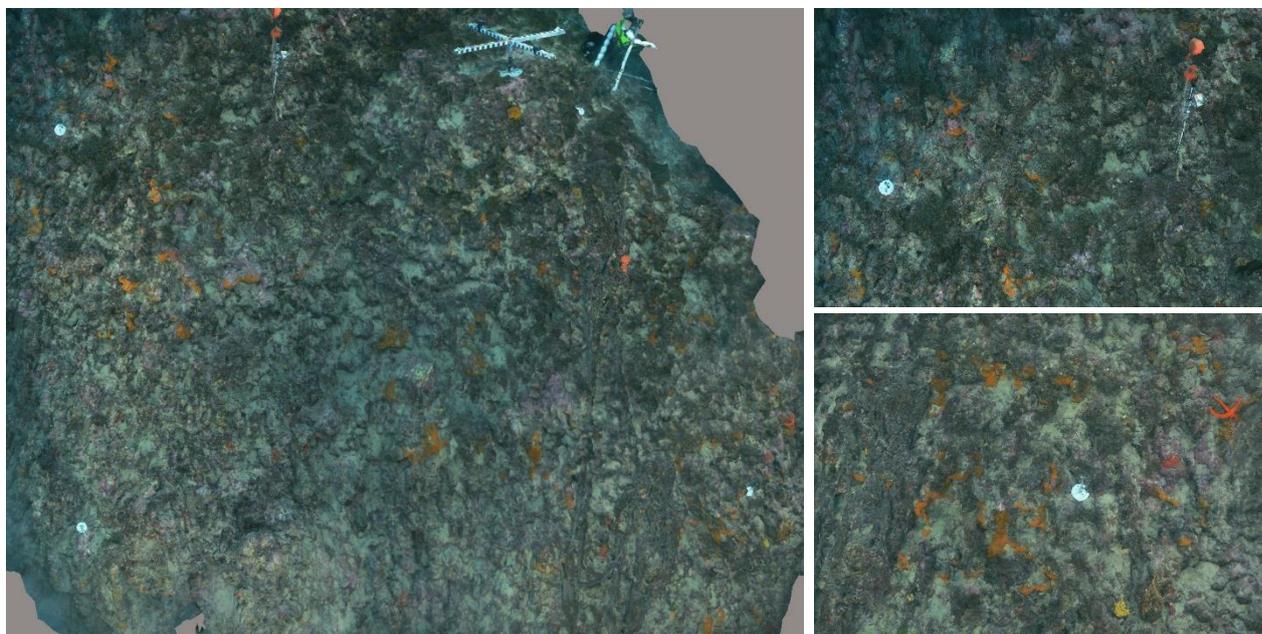


Figure 91 : Modèle du site RECOR « Port de Nice »

### II.B.23. Rade de Cannes

Le modèle 3D du site RECOR « Rade de Cannes » a été construit à partir de 661 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

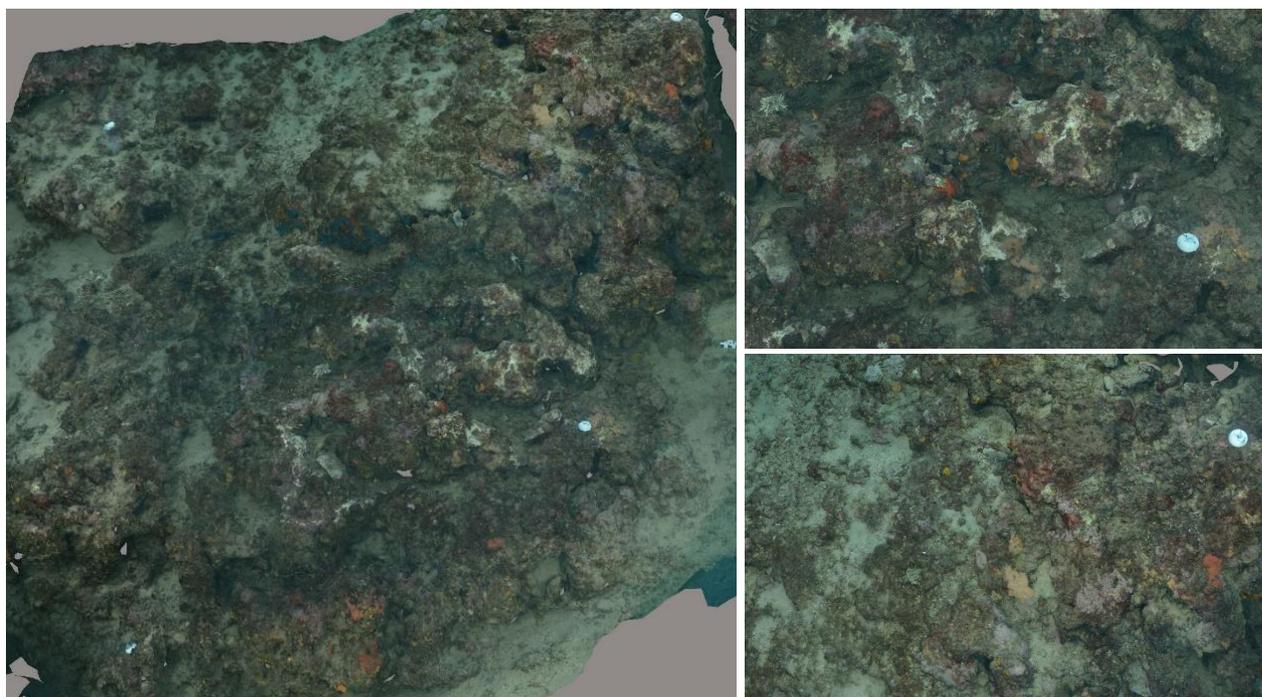


Figure 92 : Modèle du site RECOR « Rade de Cannes »

## II.B.24. Rade de Bormes

Le modèle 3D du site RECOR « Rade de Bormes » a été construit à partir de 491 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

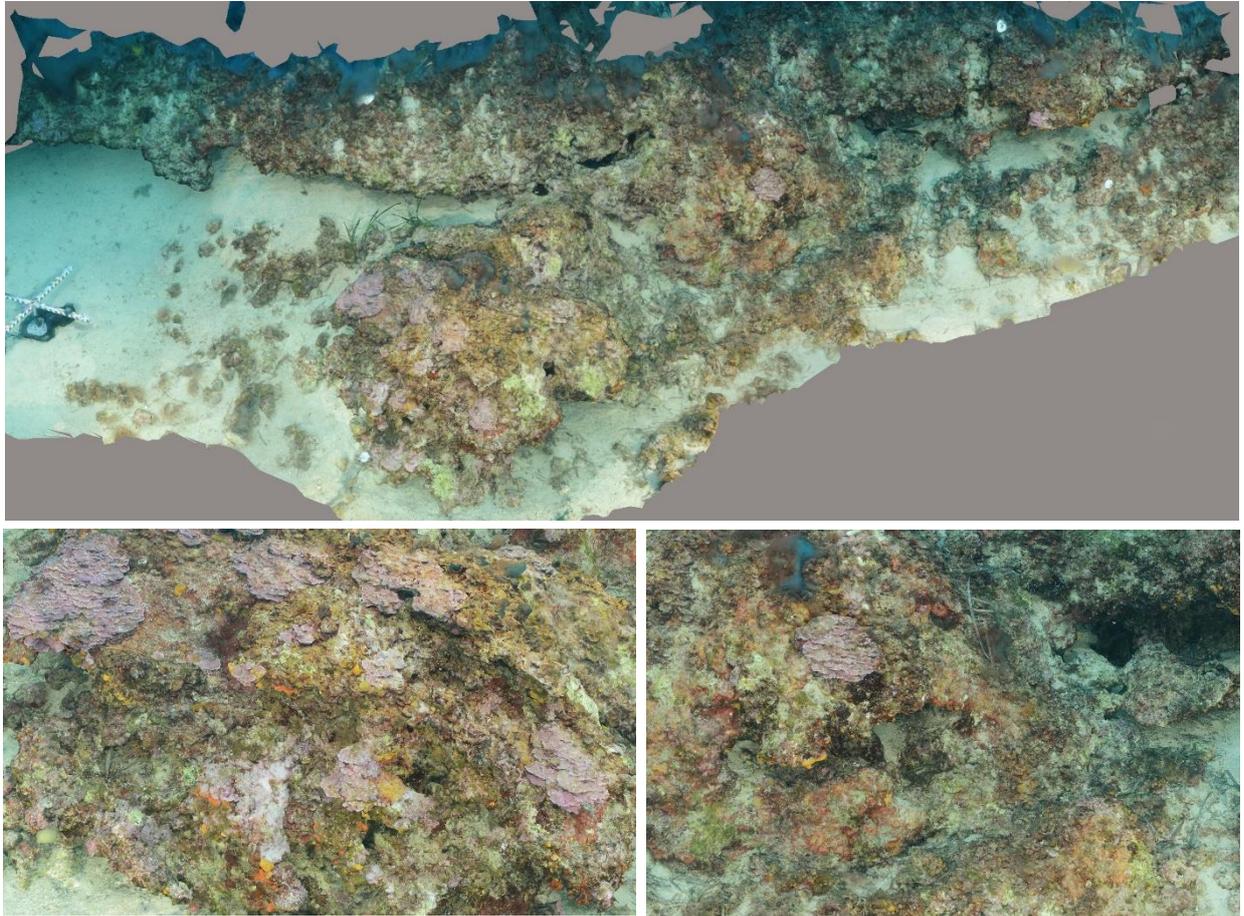


Figure 93 : Modèle du site RECOR « Rade de Bormes »



### II.B.25. Rade de Villefranche

Le modèle 3D du site RECOR « Rade de Villefranche » a été construit à partir de 226 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.



Figure 94 : Modèle du site RECOR « Rade de Villefranche »

## II.B.26. Sec Sarranier

Le modèle 3D du site RECOR « Sec Sarranier » a été construit à partir de 846 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

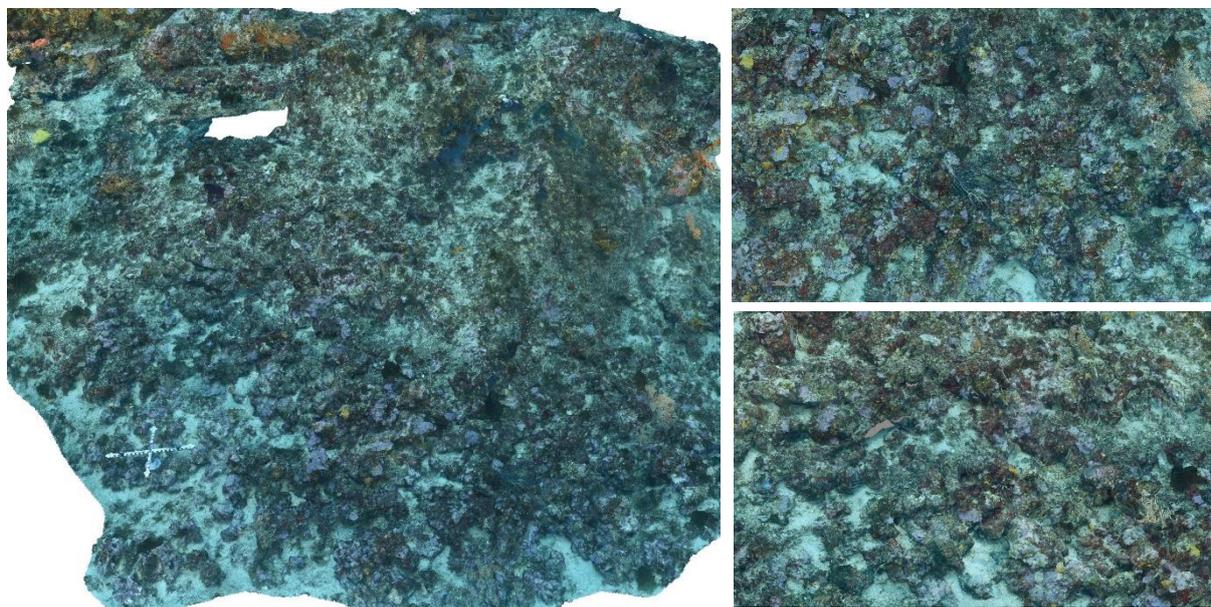


Figure 95 : Modèle du site RECOR « Sec Sarranier »



## II.B.27. Tombant des américains Ouest

Le modèle 3D du site RECOR « Tombant des américains Ouest » a été construit à partir de 464 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

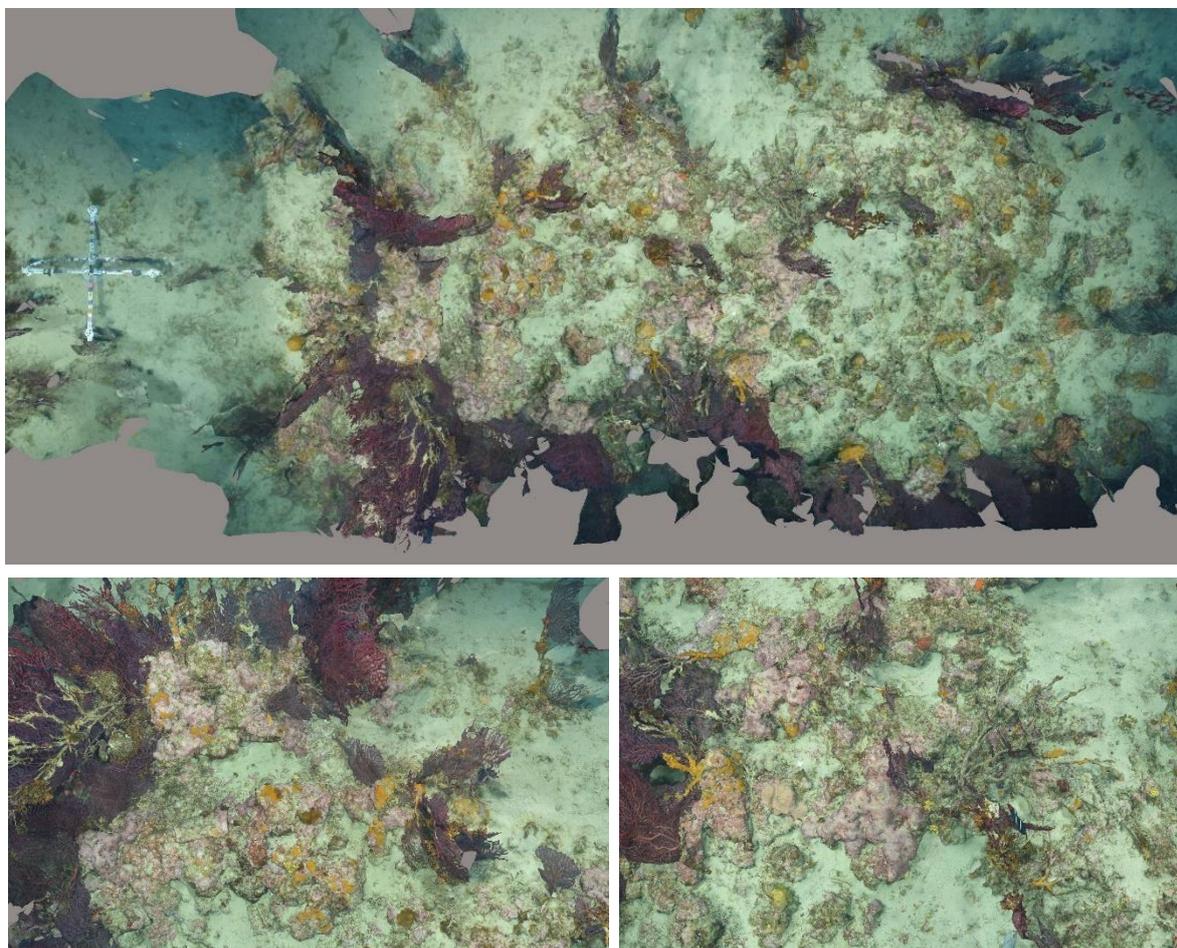


Figure 96 : Modèle du site RECOR « Tombant des américains Ouest »

Tous les modèles RECOR et TEMPO 2018 - 2019 sont produits aux formats « .obj » et « .3mx ». Le premier est un format standard lisible par tous les logiciels d'édition 3D, et le deuxième permet un affichage fluide et dynamique dans un navigateur internet grâce à une application web autoportée.

Ces modèles 3D sont en ligne sur la plateforme cartographique Medtrix (<https://plateforme.medtrix.fr/>) et intégrés à la fenêtre d'information de chaque site RECOR et TEMPO. Il sera ainsi possible pour chaque utilisateur de naviguer facilement dans le modèle 3D depuis son navigateur internet, sans installer aucun visualiseur.

L'utilisateur peut également retrouver la totalité des modèles 3D existants dans le projet « MODEL », dédié à surveillance des habitats sous-marin par photogrammétrie.



**NB :** L'ensemble de ces modèles, TEMPO et RECOR, constituent la matière première indispensable au développement d'algorithmes et d'indicateurs innovants pour le suivi des herbiers de posidonie et des récifs coralligènes.



# Chapitre 4

## Acquisitions sur les récifs artificiels du Parc Marin de la Côte Bleue



Les récifs artificiels du Parc Marin de la Côte Bleue (PMCB) sont organisés sous forme d'un village de récifs éloignés de 10 à 20 mètres les uns des autres. Des acquisitions photogrammétriques ont été réalisés en juin 2018 sur les modules SB8, SB6 et SS2 et sont présentés dans ce chapitre.

# Chapitre 4 : Acquisitions sur les récifs artificiels du Parc Marin de la Côte Bleue

## I. Plan d'ensemble

Les récifs artificiels du Parc Marin de la Côte Bleue (PMCB) sont organisés sous forme d'un village de récifs éloignés de 10 à 20 mètres les uns des autres.

La figure suivante illustre schématiquement l'implantation des récifs dans le parc :

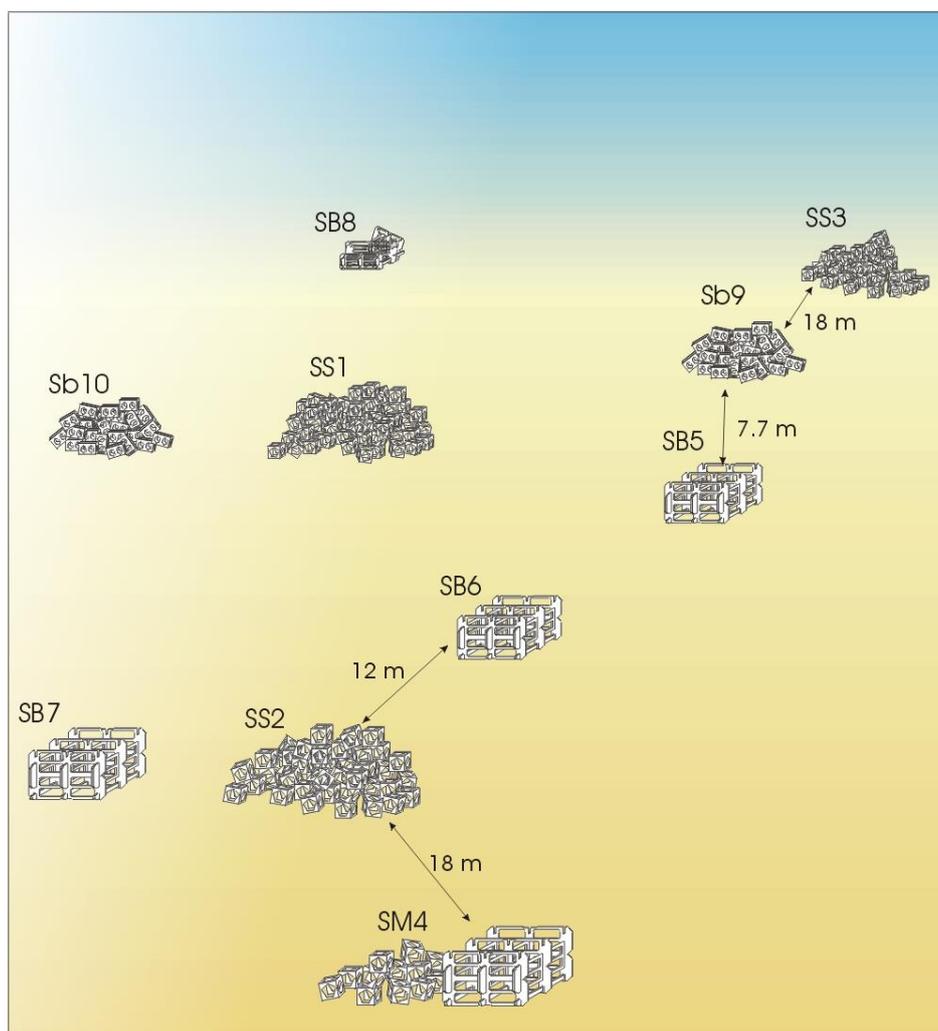


Figure 97 : Plan d'ensemble des récifs artificiels du Parc Marin de la côte Bleue



## II. Acquisitions photogrammétriques

Plusieurs acquisitions photogrammétriques sur les récifs artificiels du PMCB ont été réalisées lors de la campagne TEMPO-RECOR de juin 2018. Les acquisitions réalisées n'ont pas permis de reconstruire entièrement tous les modules en 3D, la morphologie singulière de certains récifs nécessitant un recouvrement supérieur à ce qui a été fait en pratique. Seuls les modules SB8, SB6 et SS2 ont été produits en entier par photogrammétrie.

### II.A. Module SB8

Le modèle 3D du module « SB8 » a été construit à partir de 860 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

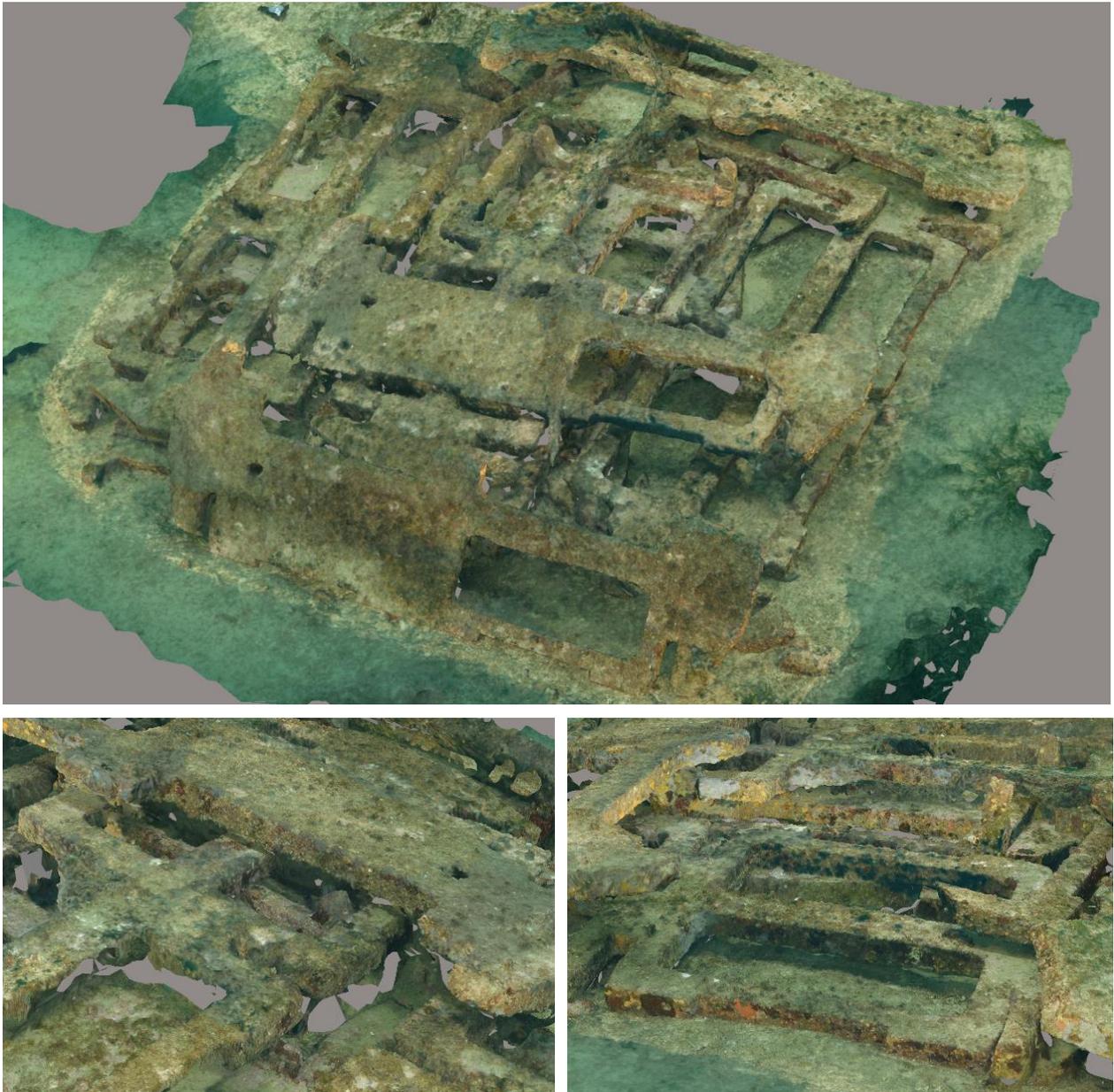


Figure 98 : Module SB8.

## II.B. Module SB6

Le modèle 3D du module « SB6 » a été construit à partir de 1932 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

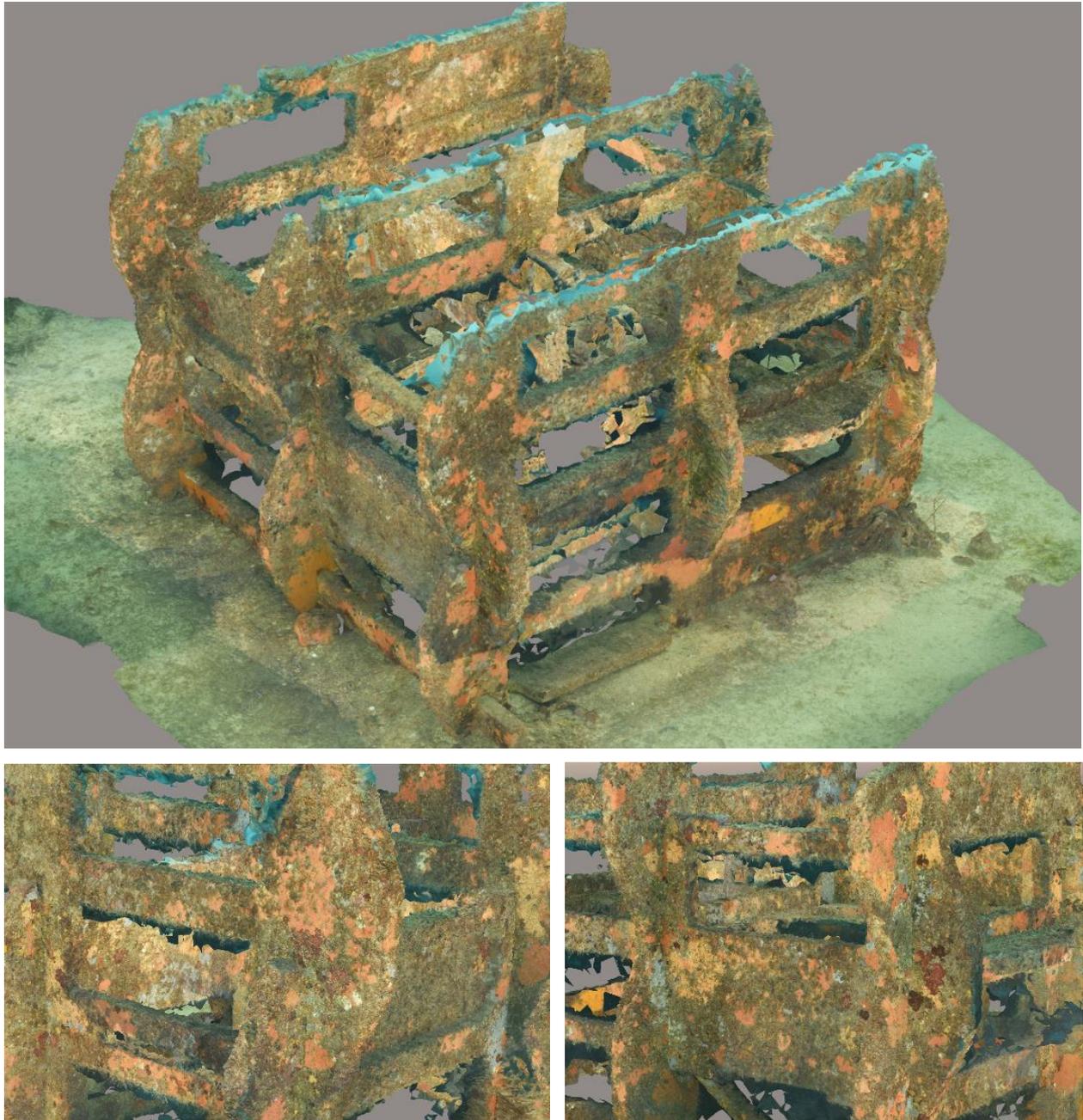


Figure 99: Module SB6.



## II.C. Module SS2

Le modèle 3D du module « SS2 » a été construit à partir de 1906 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

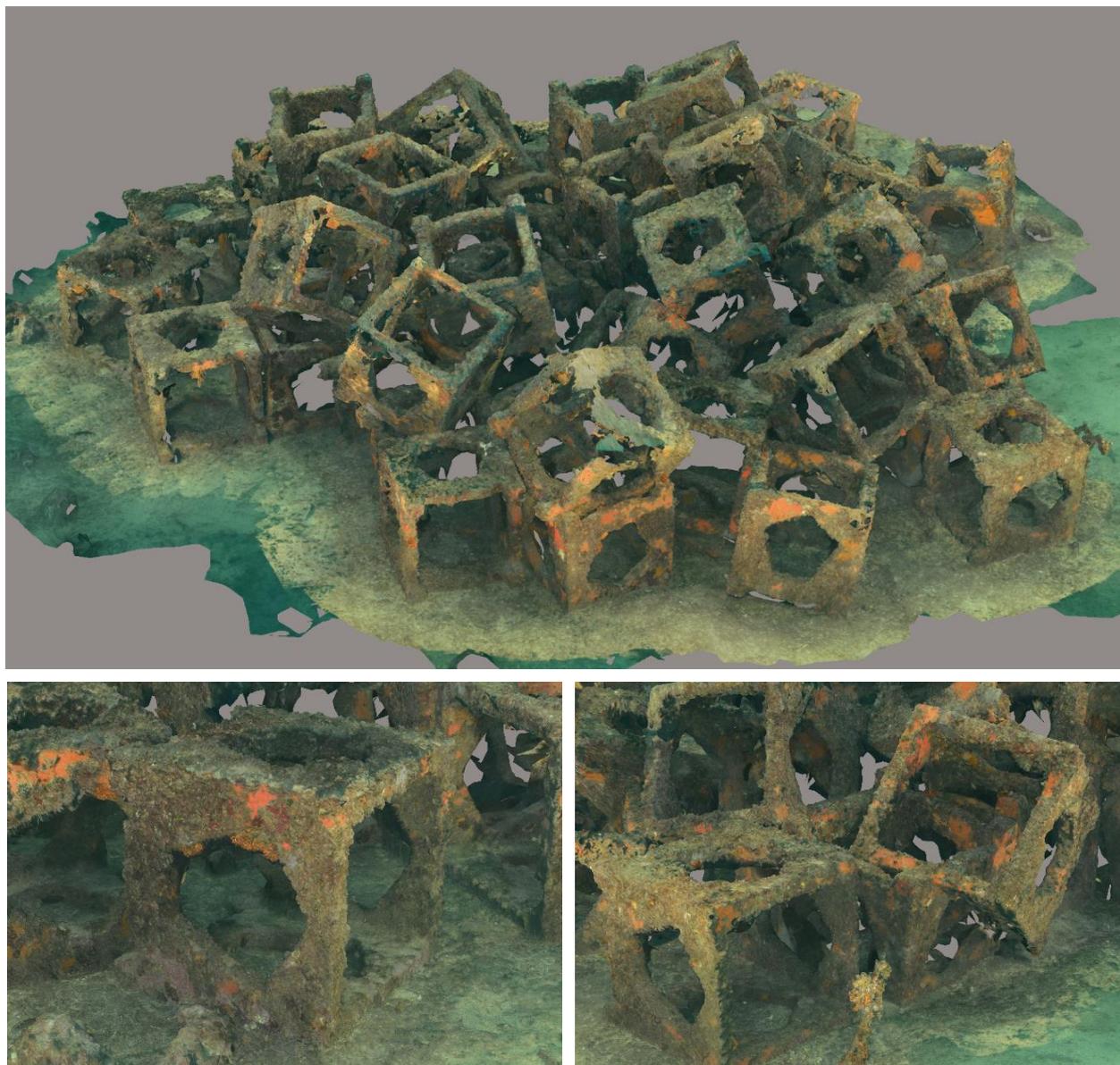
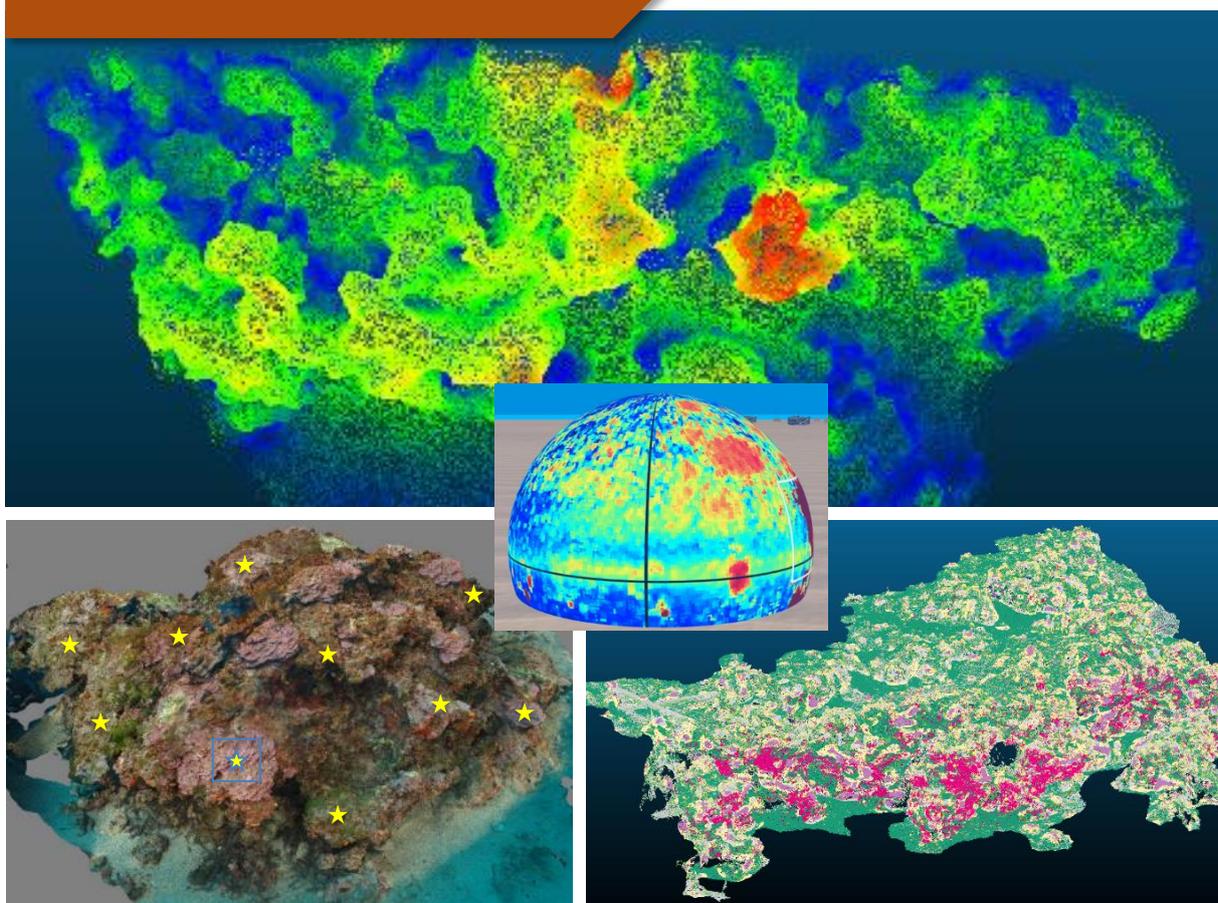


Figure 100 : Module SS2.

# Chapitre 5

## Avancées et perspectives sur l'analyse des modèles RECOR



Ce chapitre fait état de l'avancement des développements engagés sur l'analyse des modèles des récifs coralligènes réalisés dans le cadre du réseau RECOR, et sur les perspectives de développement.



# Chapitre 5 : Avancées et perspectives sur l'analyse des modèles RECOR

L'ensemble des données photogrammétriques acquises dans le cadre du réseau de suivi des récifs coralligènes RECOR est utilisé pour développer et tester des méthodes d'analyses des modèles 3D afin de :

- Automatiser au maximum l'évaluation de l'état écologique des récifs coralligènes ;
- Affiner l'évaluation de cet état écologique ;
- Prendre en compte le compartiment structurel dans l'évaluation de l'état et/ou du potentiel écologique des récifs coralligènes.

Ce chapitre fait état de l'avancement des développements déjà engagés sur l'analyse des modèles RECOR, et sur les perspectives de développement pour les mois à venir.

## I. Etat actuel des avancées et développements

### I.A. Qualification de la structure du coralligène

La structure des récifs, tempérés comme tropicaux, est reconnue pour avoir un rôle primordial dans le fonctionnement de ces écosystèmes : capacité de stockage carbone, niches pour les espèces mobiles... Pourtant, peu d'études et d'indicateurs prennent en compte ce paramètre. En effet, la complexité structurale des récifs a de nombreuses facettes et il est difficile de définir un indicateur structurel unique, reflétant à lui seul l'architecture du récif.

#### I.A.1. Indicateurs structurels utilisés

Les indicateurs couramment utilisés pour qualifier la structure sont :

- **Rugosité** : à l'échelle du point 3D, c'est la distance entre ce point et le plan moyen calculé sur son voisinage. A l'échelle d'un nuage de points, c'est la valeur moyenne de cette distance ;
- **Courbure** : à l'échelle du point 3D, c'est la courbure locale définie par la fonction quadratique la plus proche de la forme du voisinage ;
- **Vecteur normal** : vecteur donnant la direction de la normale à la surface locale. Le taux de variation de l'angle entre vecteurs normaux adjacents peut également servir à calculer la courbure ;
- **Dimension fractale** : à l'échelle d'un nuage de points, cette valeur traduit la façon qu'à un nuage de points de remplir un espace, à toutes les échelles.

Pour la rugosité et la courbure, l'indicateur est calculé pour chaque point en prenant en compte un voisinage défini par une distance maximale au point (ex : tous les points 3D dans un rayon de 20 cm).

La figure suivante illustre le calcul de rugosité sur un site RECOR avec plusieurs voisinages différents :

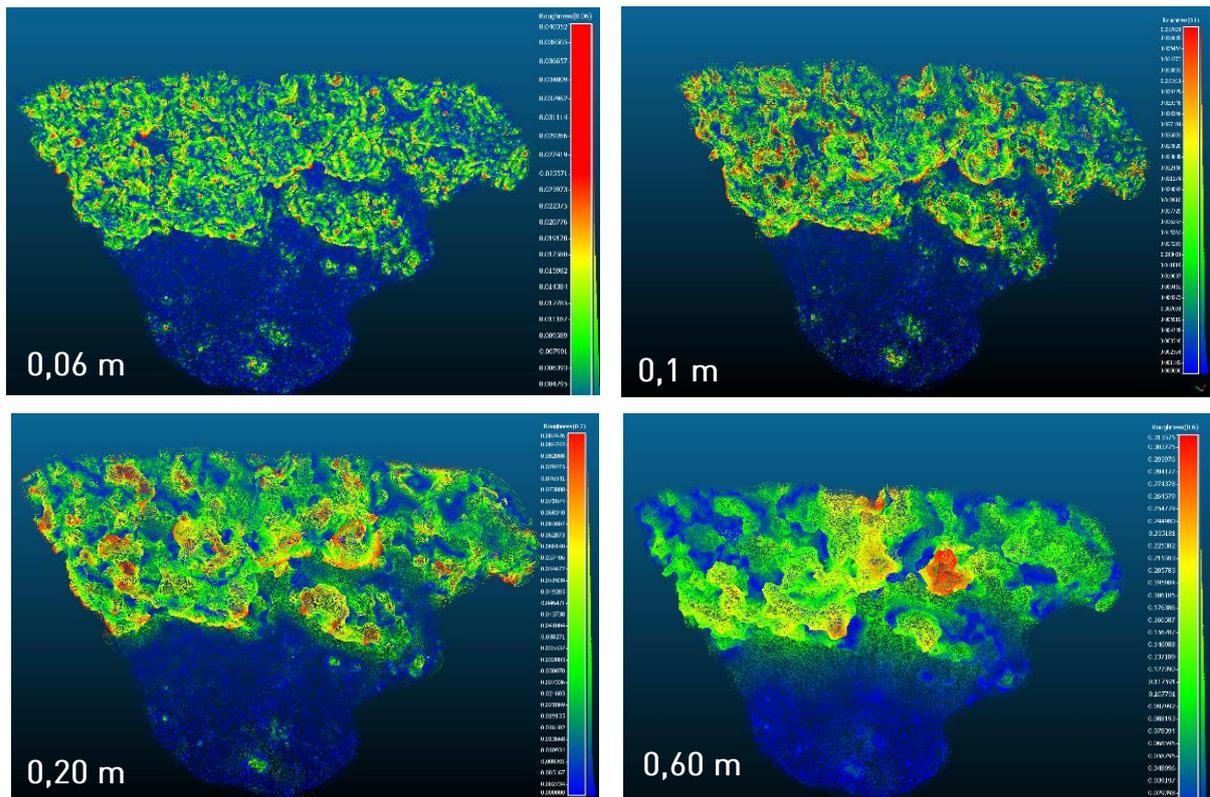


Figure 101 : Illustration du calcul de rugosité à différentes échelles sur un récif coralligène

Ce type d'indicateur est calculable en tout point de tout site RECOR, mais la définition d'un indicateur structural unique reflétant la diversité structurale de chaque site nécessite d'intégrer toutes ces informations à l'échelle du site, et de voir s'il existe des liens entre cet indicateur structural et la biodiversité (taxonomique et fonctionnelle), l'état écologique et les conditions environnementales qui caractérisent ce site.

### I.A.2. Intégration de la complexité structurale à l'échelle du site

Une première ébauche d'indicateur structural que nous avons développé se base sur la méthode développée par Jean baptiste Féret pour évaluer la biodiversité des forêts tropicales par imagerie satellite hyperspectrale (Féret et al, 2014<sup>3</sup>). Dans cette étude, les auteurs ont regroupé les pixels d'images satellites par « similarité spectrale » pour définir des « espèces spectrales », i.e ils sont partis du principe que les pixels ayant des valeurs très proches dans les différentes bandes de couleurs faisaient partie de la même espèce. Ils ont ensuite cartographié la biodiversité en mesurant l'indice de Shannon sur ces « espèces spectrales » au sein de carrés géographiques. Ils ont montré qu'il existait une forte corrélation entre ce « Shannon spectral » et le Shannon réel mesuré sur certaines parcelles échantillonnées par des naturalistes, et donc que leur méthode était robuste pour la cartographie du niveau de biodiversité à partir d'images hyperspectrales.

<sup>3</sup> Féret, J.B., Asner, G. « Mapping tropical forest canopy diversity using high-fidelity imaging spectroscopy », 2014. Ecological Applications

La figure suivante illustre la méthodologie qu'ils ont employée :

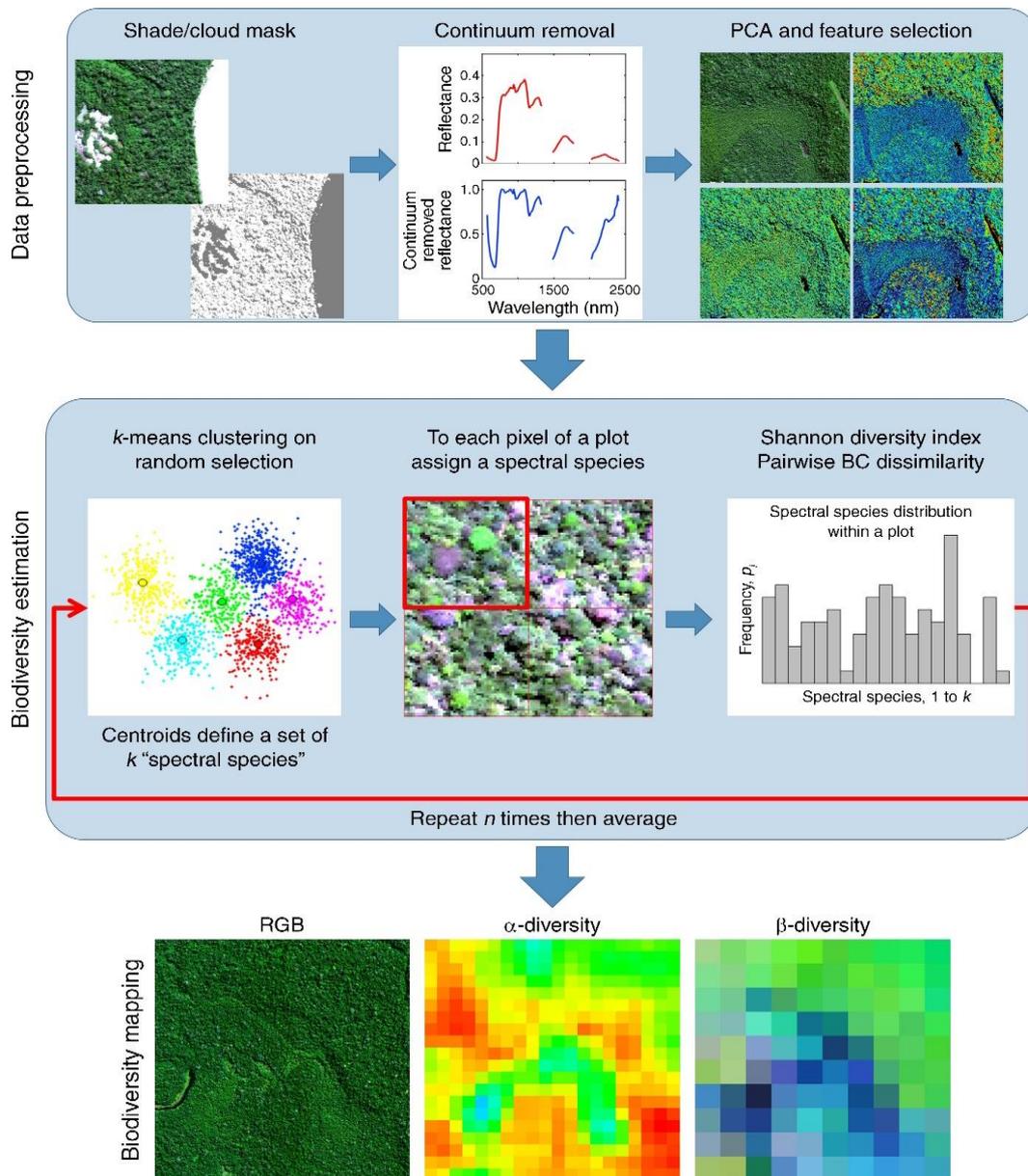


Figure 102 : Cartographie des diversités  $\alpha$  et  $\beta$  de la forêt tropicale par imagerie hyperspectrale (Féret et al, 2014).

L'idée est donc de s'inspirer de cette méthode pour l'analyse de la structure 3D des récifs coralligènes. Dans notre cas, nous ne disposons pas de données hyperspectrales, mais nous avons pour chaque point 3D l'ensemble des indicateurs structurels cités ci-dessus et calculés à différents niveaux de voisinage. L'objectif est ici de définir des groupes de points 3D ayant des propriétés structurelles similaires : tâche de sable, vase de faible pente, pointe isolée orientée vers le bas, bloc de taille moyenne isolé...

La figure suivante illustre des tests effectués sur le modèle des Agriates, avec un nombre de « groupes structurels » variant de 10 à 30 :

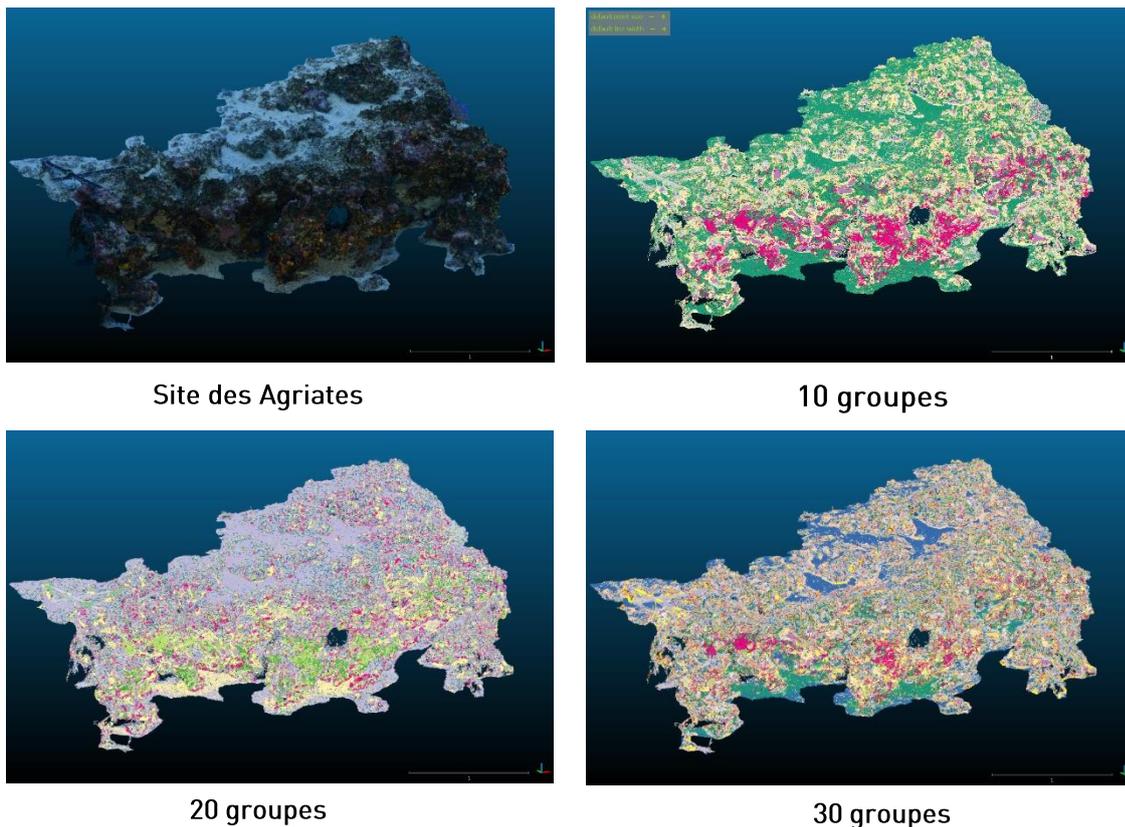


Figure 103 : Segmentation du nuage de points d'un récif coralligène sur la base de similitudes morphologiques.

De la même manière, il est possible d'affecter chacun des points 3D de chaque site à un groupe, et de calculer un « Shannon structurel » pour chaque site. Les premiers résultats ne montrent pas de corrélation forte avec la biodiversité fixée, mais le nombre de sites échantillonnés était alors encore trop faible pour détecter un signal. Par ailleurs, les développements suggérés en deuxième partie de ce chapitre pourraient permettre d'affiner les analyses à une échelle « intra-site », ce qui permettrait de multiplier les échantillons et de détecter des relations qui pourraient être lissées à l'échelle du site.

## I.B. Reconnaissance automatique d'espèces du coralligène

### I.B.1. Base de données et objectifs

Les récifs coralligènes sont d'une grande complexité, et les contraintes physiologiques de la plongée profonde limitent considérablement le temps passé à collecter de la donnée in-situ. C'est pour cela que la méthode RECOR se base sur l'analyse de quadrats photographiques : un plongeur réalise l'acquisition sous l'eau, et un expert taxonomiste analyse les quadrats au bureau et identifie les espèces qu'il observe.

La figure suivante illustre l'acquisition et le traitement des quadrats photographiques :





Figure 104 : Illustration de l'acquisition et traitement des quadrats photographiques RECOR

Pour chaque station analysée, 1920 points aléatoirement distribués sur 30 quadrats photographiques sont identifiés par un taxonomiste expert. A ce jour, la base de données RECOR contient plus de 700 000 annotations manuelles réalisées depuis 2010.

Compte tenu du temps nécessaire à ces identifications, et au vu de la base de données aujourd'hui disponible, nous avons souhaité entraîner un algorithme de reconnaissance d'images basé sur des réseaux de neurones convolutifs afin d'automatiser au maximum cette tâche.

### I.B.2. Méthode

Chaque identification correspond à un couple de coordonnées XY sur une image donnée avec le label de l'espèce identifiée. Il est donc possible d'extraire de la base de données RECOR un grand nombre de vignettes correspondant à chaque espèce.

La figure suivante montre quelques exemples de vignettes annotées dans la base de données RECOR :

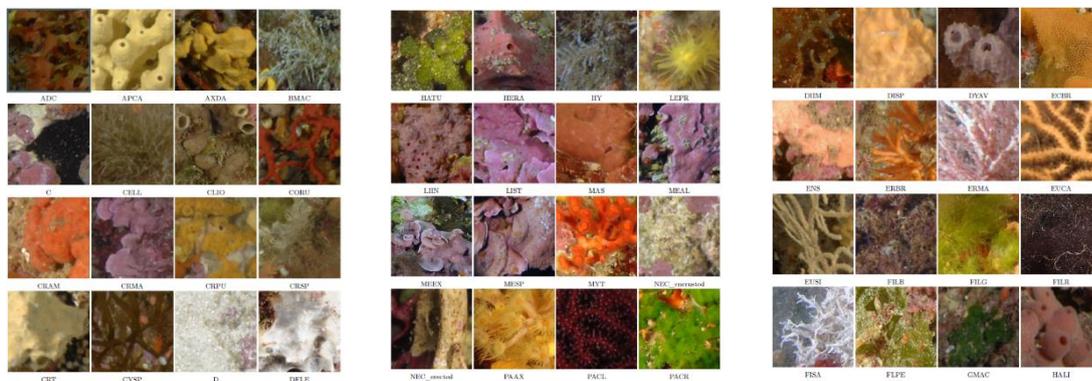


Figure 105 : Exemples de vignettes annotées disponibles dans la base de données RECOR

Nous avons entraîné un réseau de neurones convolutif à partir des vignettes extraites de la base de données RECOR, pour toutes les classes avec minimum 500 observations. Au final, cela représente 61 classes sur lesquelles nous avons entraîné un ensemble de réseaux basés sur l'architecture ResNet<sup>4</sup>.

**NB :** un réseau de neurones convolutif analyse des images et extrait des descripteurs pertinents pour la classification de ces images. L'entraînement est un processus itératif : on fournit une portion du jeu de données au réseau de neurones, qui fait ses prédictions, les compare à la réalité et corrige automatiquement les millions de paramètres qui le caractérisent pour améliorer sa prédiction.

<sup>4</sup> He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. « Deep Residual Learning for Image Recognition », 2015. Computer Vision Foundation Conference.

L'ensemble du jeu de données est ainsi fourni plusieurs fois au réseau, sous formes de petits échantillons d'images. A chaque pas de temps, les performances du réseau augmentent jusqu'à atteindre un plateau : le réseau a alors terminé son apprentissage et n'atteindra pas de meilleures performances avec le jeu de données à disposition.

### I.B.3. Résultats

Les performances finales du réseau de neurones atteignent environ 73 % de bonnes classifications sur les 61 classes apprises, et montent à 84 % en simplifiant le problème aux 15 catégories majeures (Ascidies, Bryozoaires encroûtant, Bryozoaires érigés, Macroalgues brunes, Macroalgues vertes, Macroalgues rouges encroûtantes, Macroalgues rouges érigées, Gorgones, Hydrozoaires, Nécroses, Scléractiniaires, Vers sédentaires, Eponges, Zoanthaires, Sédiment).

La figure suivante montre la matrice de confusion pour le problème à 15 classes. Pour chaque catégorie de vignettes (à gauche), la matrice donne le pourcentage de classifications dans les 15 classes (en bas) :

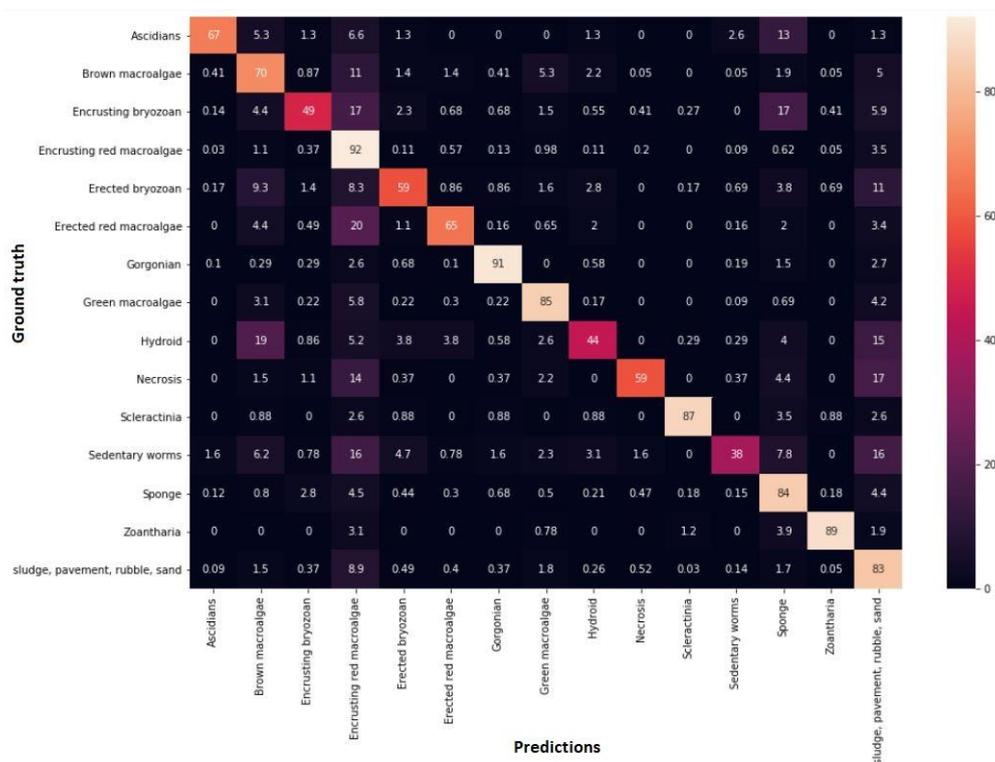


Figure 106 : Matrice de confusion entre les différentes classes apprises par l'algorithme

Par exemple, les Ascidies sont bien classées dans 67 % des cas, mais sont reconnues comme des éponges dans 13 % des cas, et comme des Macroalgues rouges encroûtantes dans 6.6 % des cas. Sur l'ensemble des vignettes correspondant à des nécroses, 59 % sont correctement classées tandis que 14 % sont classées comme Macroalgues rouges encroûtantes et 17 % comme sédiment.

Si les performances sont encore loin de ce qui se fait de mieux en classification d'images sur des jeux de données libres (challenge ImageNet entre autres), le problème est autrement plus complexe. D'ailleurs, une étude a quantifié la précision de taxonomistes experts sur un jeu de données en milieu corallien avec 20 classes, et les experts ont obtenu un taux de bonnes classifications allant de 65 à 80 % seulement. Au vu des résultats de cette étude, les performances de notre algorithme semblent similaires à la précision humaine, même légèrement supérieures dans le cas du problème à 15 classes.

Par ailleurs, le taux de bonnes classifications est fortement corrélé au nombre de vignettes disponibles pour l'entraînement. Il est donc fort à parier que notre algorithme pourra bénéficier de futures annotations expertes pour continuer son entraînement et affiner ses prédictions.

Enfin, notre algorithme tel qu'il est conçu ne sait reconnaître que les classes qu'il a apprises. Mais des méthodes permettent d'évaluer le niveau de certitude de l'algorithme dans sa classification et de rejeter les classifications douteuses. En jouant sur ce niveau de certitude, il est possible de classer toutes les vignettes que l'algorithme reconnaît facilement, et laisser les identifications plus douteuses à un expert taxonomiste. En revanche, l'algorithme est entraîné avec un type d'images assez standardisées (quadrats photographiques toujours pris à la même distance du récif) et pourrait largement perdre en performances s'il était appliqué à d'autres types d'images (par exemple celles de la photogrammétrie) sans adaptation préalable.

## II. Perspectives de développements

Suite à ces premiers travaux de recherche en analyses d'images et modèles 3D sur le coralligène, nous souhaitons continuer les efforts de R&D pour améliorer notre compréhension de cet habitat complexe et automatiser le plus possible les suivis. Notamment, nous souhaiterions :

- **Adapter le réseau de neurones** actuel aux données photographiques acquises pour les reconstructions photogrammétriques ;
- **Développer un outil de sciences participatives** pour collecter des images du coralligène prises par des plongeurs amateurs et identifier automatiquement les espèces sur les images avec le réseau de neurones ;
- **Développer une méthode de suivi dans le temps des récifs coralligènes** : adapter la méthode RECOR à un suivi localisé pour quantifier l'évolution des assemblages dans le temps ;
- **Caractériser la distribution des récifs coralligènes dans l'espace** : comprendre quels sont les liens entre la diversité des récifs, l'activité des espèces mobiles, leur structure, les conditions environnementales et les pressions anthropiques, afin de mieux anticiper les effets du changement climatique et des pressions anthropiques et d'adapter éventuellement les mesures de gestion.
- 

### II.A. Reconnaissance d'espèces sur les modèles 3D

#### II.A.1. Amélioration des performances du réseau de neurones actuel

Les premiers entraînements du réseau de neurones ont été faits avec l'ensemble des données RECOR jusqu'à l'année 2018 incluse. L'objectif est d'intégrer toutes les analyses RECOR 2019 et de développer une manière routinière d'intégrer les nouvelles données à chaque campagne pour ajuster et affiner l'entraînement du réseau de neurones. Par ailleurs, un outil de classification semi-automatique sera développé pour annoter massivement les vignettes les plus courantes et laisser à un taxonomiste le soin d'annoter les images pour lesquelles le taux de confiance du réseau de neurones n'est pas suffisant.

## II.A.2. Adaptation du réseau de neurones aux images servant aux reconstructions photogrammétriques

Utiliser le réseau de neurones sur les images prises pour les reconstructions photogrammétriques permettrait d'annoter automatiquement et massivement les modèles 3D du coralligène. Ceci permettrait d'ouvrir deux nouveaux aspects de notre compréhension de ces récifs :

- Capacité à suivre finement le devenir d'un point donné sur le récif dans le temps (ex : devenir d'une zone de nécrose), évaluer les successions des assemblages ;
- Avoir une cartographie intra-site de la biodiversité fixée, à mettre en lien avec la structure locale du récif et éventuellement développer un indicateur structurel qui ait un sens écologique.

Le problème est que le réseau actuel est entraîné avec des images de la base de données RECOR. Ces quadrats photographiques sont pris dans des conditions standardisées et à distance réduite du récif (< 50 cm), or les images prises pour les reconstructions photogrammétriques sont généralement prises à plus grande distance (1.2 à 1.8 m) ce qui change la taille des objets à reconnaître ainsi que leur coloration. Utiliser le réseau de neurones ainsi entraîné sur les images de la photogrammétrie sans ajustements préalables conduirait nécessairement à une baisse considérable de performances. Pour adapter le réseau de neurones aux données photogrammétriques, il faudrait :

- Extraire de nombreuses vignettes des images de la photogrammétrie et procéder à un sur-apprentissage du réseau de neurones par méthode « d'adaptation de domaine » (méthode non supervisée, i.e les vignettes n'ont pas besoin d'être labellisées) ;
- Annoter un grand nombre de points 3D à la main par un expert naturaliste, pour constituer un jeu de données d'entraînement et de validation de la méthode de classification sur les images (entraînement supervisé, avec les labels des vignettes) ;
- Développer une architecture plus complexe pouvant prendre en entrée plusieurs images d'un même objet à classer : en effet la photogrammétrie permet de récupérer pour un point 3D donné l'ensemble des images 2D sur lesquelles il apparaît. Ce genre de classification « multi-vues » a déjà fait ses preuves sur un jeu de données 3D avec des objets simples du quotidien (chaises, bureau...) et pourrait permettre de compenser la perte de performances attendue de l'algorithme en passant sur les images « dégradées » de la photogrammétrie (car distance de prise de vue supérieure, donc résolution moindre).

## II.A.3. Suivi temporel des récifs coralligènes à fine échelle spatiale

Une fois le réseau de neurones adapté aux images de la photogrammétrie, il sera donc possible d'annoter un modèle 3D d'un récif coralligène pour un grand nombre de points 3D définis manuellement ou aléatoirement sur la surface du modèle. L'objectif suivant consiste à développer une méthode permettant de suivre l'évolution de ces points dans le temps, afin d'avoir une évaluation plus précise de l'évolution temporelle des assemblages coralligènes. Pour ce faire, il sera nécessaire de développer une méthode permettant de :

- Aligner les modèles 3D du même récif à deux pas de temps ( $T_0$  et  $T_1$ ) ;
- Projeter des points 3D sur la surface du modèle de référence (modèle  $T_0$ ) ;
- Extraire les coordonnées XY sur les photos où chaque point apparaît, découper des vignettes centrées sur ces coordonnées et utiliser le réseau de neurones pour identifier la nature de chaque point ;
- Transférer l'ensemble des points 3D sur le modèle à  $T_1$  :



- Effectuer une rotation automatique du modèle de référence de sorte à faire face à la surface localement (utiliser une analyse en composantes principales pour déterminer le plan moyen local et y faire face) ;
  - Aligner le modèle  $T_1$  sur le modèle  $T_0$  dans ce nouveau repère XYZ ;
  - A partir des coordonnées XY du point 3D à transférer, projeter le point sur la nouvelle surface en trouvant le point d'impact d'un « tir virtuel » provenant de l'infini et impactant le modèle aux mêmes coordonnées XY ;
- Extraire les vignettes correspondantes aux points 3D sur le modèle à  $T_1$  et identifier la nature des points avec le réseau de neurones ;
  - Etudier l'évolution de l'ensemble des points 3D pour quantifier et qualifier les assemblages coralligènes entre  $T_0$  et  $T_1$ .

## II.B. Développement d'un outil de sciences participatives coralligène

Aujourd'hui, l'évaluation de l'état de santé des récifs coralligènes de Méditerranée française est limitée aux quelques experts taxonomistes capables d'analyser ces images. En revanche, l'acquisition est à la portée de tout bon plongeur amateur équipé d'un appareil photo décent qui souhaiterait contribuer à la préservation de cet habitat. Il serait tout à fait envisageable de développer une interface web de sciences participatives, expliquant comment réaliser les clichés, et permettant de charger ses photos en précisant la localisation, date et profondeur d'acquisition. Le réseau de neurones hébergé sur le serveur se chargerait de l'analyse des quadrats, et l'utilisateur pourrait éventuellement confirmer les classifications à partir d'une banque de données de vignettes types par espèce, comme c'est le cas pour PlantNet<sup>5</sup>.

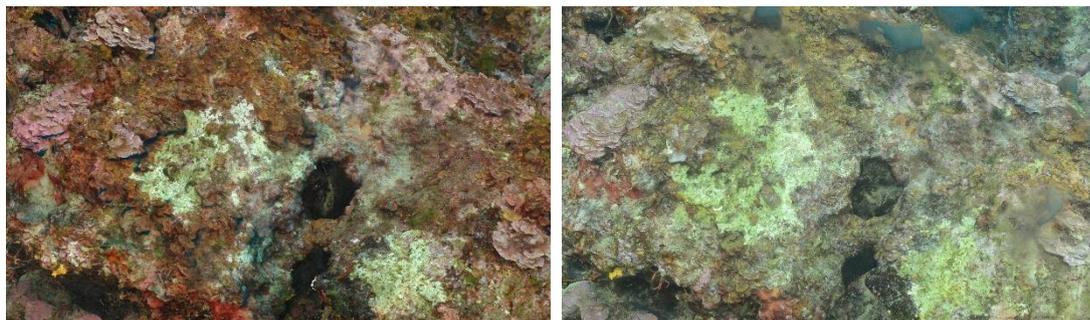
## II.C. Suivi temporel des récifs coralligènes

La campagne RECOR 2019 a permis d'avoir un premier jeu de données 3D à deux dates différentes (2016 et 2019) pour une dizaine de sites. Les modèles ont été alignés deux par deux, et il est donc possible d'explorer les deux modèles superposés, à la manière d'un SIG en trois dimensions. La comparaison de structure, notamment pour des mesures de croissance ou d'érosion, semble compromise au vu des premiers résultats. En effet, la résolution des modèles 3D est directement dépendante de la distance d'acquisition, et les photos 2019 ont été prises à plus grande distance du récif. Par ailleurs, la présence de plus en plus fréquente d'algues filamenteuses sur les récifs crée des artefacts de reconstruction et fausse la structure du récif parfois de plusieurs centimètres d'épaisseur (cf en haut à droite de la figure suivante, pour l'année 2019).

Si la comparaison structurelle des récifs dans le temps semble compromise par la qualité variable des reconstructions et la présence possible d'algues filamenteuses, la méthode pourrait permettre de suivre finement l'évolution de nombreux points 3D définis sur le premier modèle et projetés sur le suivant. Aussi, dans le cas d'éléments remarquables comme par exemple des macro-nécroses, il est possible de produire des orthomosaïques locales identiques suivi après suivi pour quantifier précisément la progression ou la régression de la nécrose. L'objectif est de développer des méthodes automatisées d'analyse de l'évolution de ces points 3D ou de ces surfaces sur les orthomosaïques.

<sup>5</sup> <https://plantnet.org/>

La figure suivante illustre la progression d'une macronécrose sur le site de « Rade de Bormes » entre 2016 et 2019 :



*Figure 107 : Evolution d'une nécrose sur le site « Rade de Bormes » entre 2016 (gauche) et 2019 (droite)*



## II.D.Caractérisation spatiale des assemblages coralligènes

L'objectif général de cet axe de développement est de prendre en compte la structure 3D du récif et de la mettre en lien avec la diversité fixée et mobile, ainsi que les conditions environnementales et les pressions anthropiques, afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes complexes et compléter les indicateurs écologiques actuellement utilisés (Shannon, CAI...) par une composante structurelle.

### II.D.1. Caractérisation très fine échelle (intra-site) des assemblages coralligènes

En collaboration avec l'équipe CHORUS de Grenoble, qui travaille en acoustique sous-marine, nous avons réalisé des acquisitions conjointes photogrammétrie et acoustique sur quelques récifs tests. En effet, le réseau d'hydrophones déployé par CHORUS face à un récif permet d'écouter et de quantifier l'intensité acoustique provenant de toutes les directions et de projeter les résultats sur la surface du récif pour constituer une cartographie acoustique. Par ailleurs, la structure fine 3D obtenue par photogrammétrie permet de calculer différents indicateurs structuraux comme cela a déjà été mentionné plus haut. Enfin, le réseau de neurones préalablement ajusté pour être capable d'analyser les images de la photogrammétrie permettrait de cartographier en 3D les espèces fixées sur le récif.

L'analyse de ces trois sources de données conjointement permettrait d'étudier les liens qui existent entre architecture du récif, espèces fixées et espèces benthiques mobiles acoustiquement actives. La figure suivante illustre les sources de données et les liens à explorer entre elles :

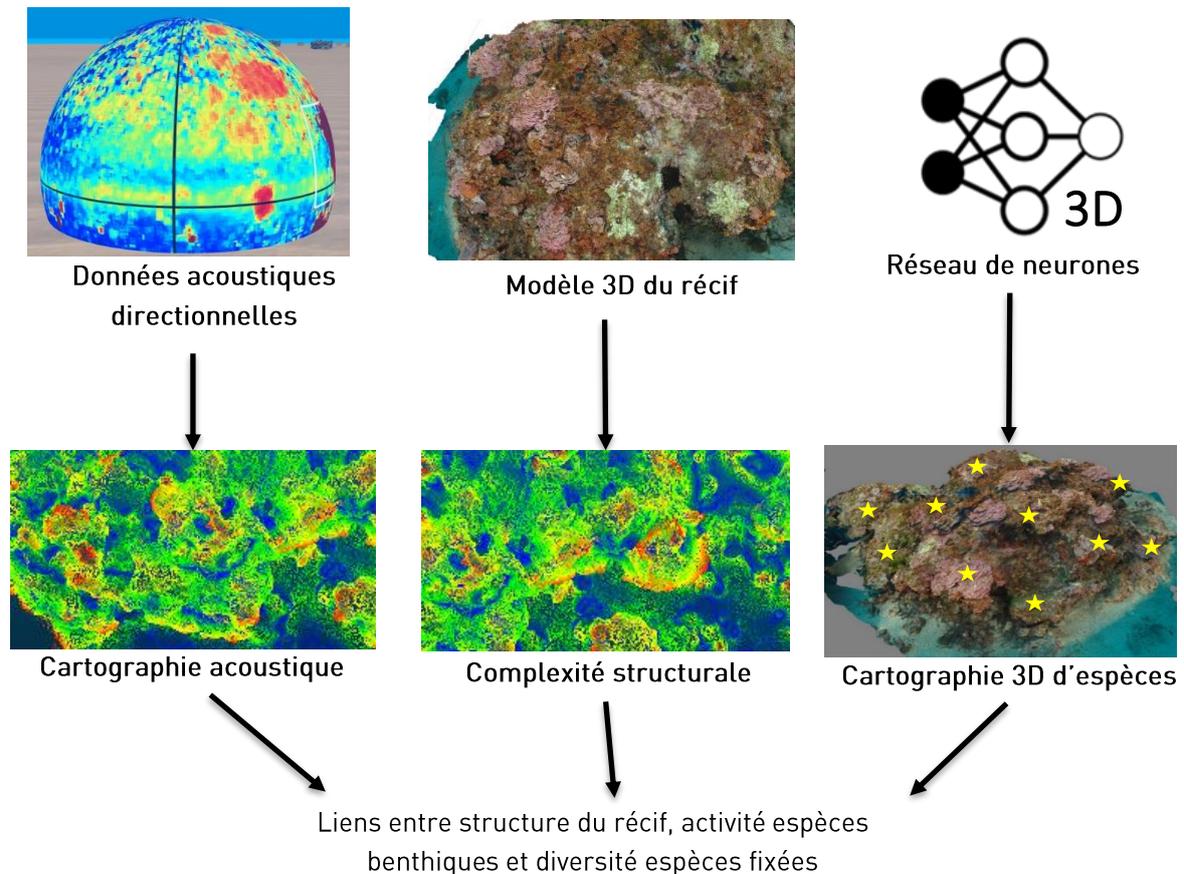


Figure 108 : Vue schématique de la caractérisation spatiale des liens entre structure, activité des espèces benthiques et diversité des espèces fixées

## II.D.2. Biogéographie des assemblages coralligènes en Méditerranée

L'objectif de cette partie est de définir une typologie d'assemblages et d'étudier les liens avec la structure des récifs et leur distribution dans l'espace à l'échelle de la Méditerranée Française. Plus précisément, ces analyses feraient appel à la théorie des graphes pour définir des groupements d'espèces (typologie d'assemblages) et à la modélisation de niche environnementales pour définir les liens avec les conditions environnementales. S'il existe des liens entre typologie d'assemblages et structure des récifs, il serait même envisageable de cartographier la complexité structurale et d'estimer la surface de coralligène, en lien direct avec la capacité de stockage carbone.

La figure suivante illustre cette caractérisation biogéographique des assemblages coralligènes :

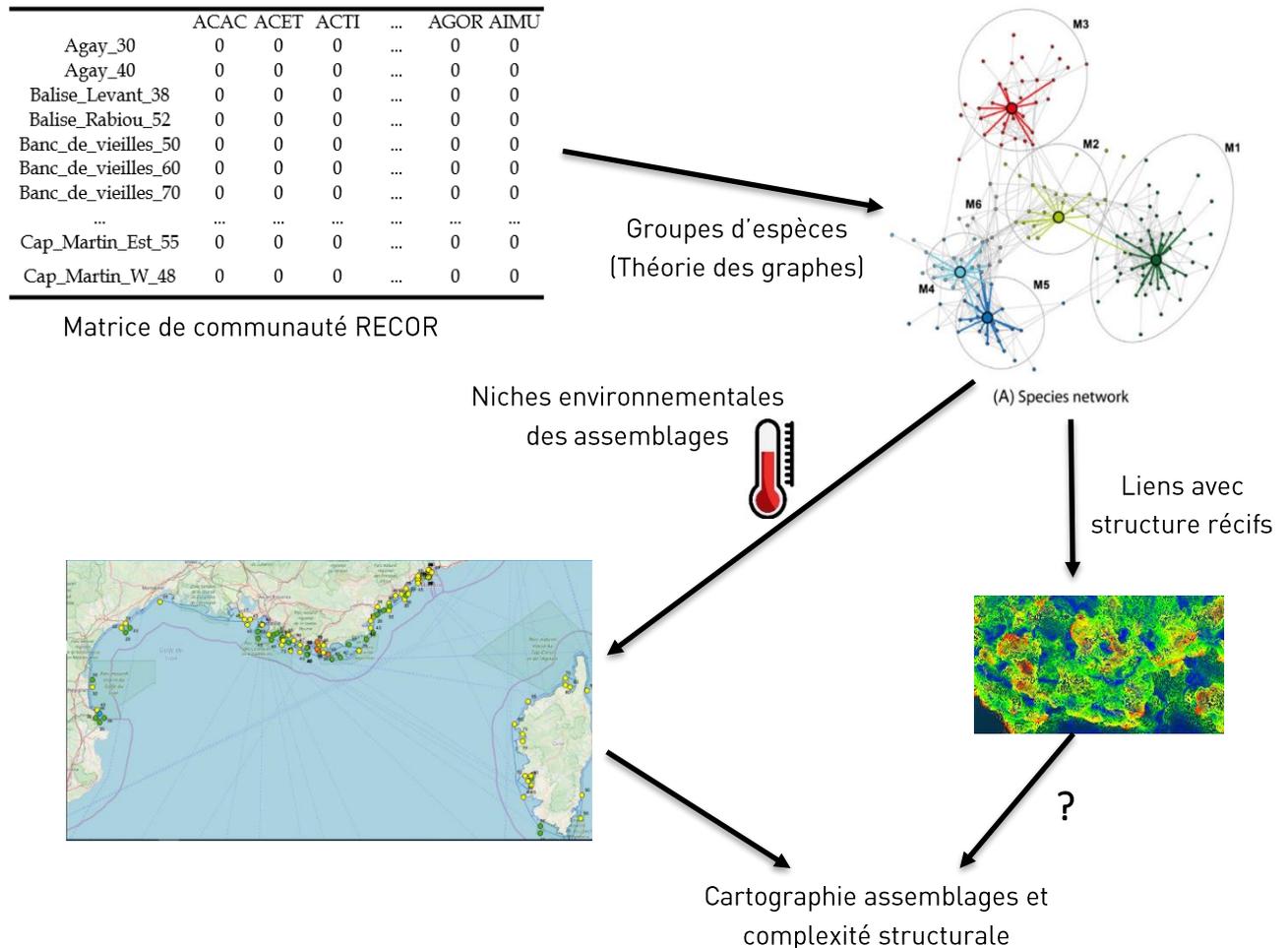


Figure 109 : Vue schématique de la caractérisation biogéographique des assemblages coralligènes

Plus précisément, la méthode viserait à :

- Tisser les liens de co-occurrences entre espèces du coralligène en appliquant la théorie des graphes à une matrice de communauté comprenant l'ensemble des stations RECOR. Une fois ce « réseau social » des espèces du coralligène, il serait éventuellement possible de définir des groupes distincts correspondant à différentes typologies d'assemblages, et affecter à chaque station échantillonnée la typologie la plus proche ;
- Modéliser la niche environnementale de chaque typologie d'assemblage, en utilisant les données de température mesurées dans le cadre du réseau CALOR, mais aussi les données de salinité, turbidité, courantologie... issues des modèles de circulation 3D de Previmer (Ifremer). Différents modèles statistiques plus ou moins complexes permettent de déterminer quelles conditions environnementales sont les plus favorables à la présence de chaque typologie d'assemblage, et donc de prédire quel est l'assemblage coralligène le plus probable en un lieu donné non échantillonné à partir des conditions environnementales connues. L'avantage de procéder à cette modélisation à l'échelle de l'assemblage, est que cela prend en compte les interactions entre espèces (co-occurrences), qui ne sont pas prises en compte en modélisation de niche environnementale classique ;
- Evaluer les liens entre les différentes typologies d'assemblages et la structure du récif ;
- Si les résultats sont concluants, il serait possible de cartographier les assemblages coralligènes de manière exhaustive sur le littoral méditerranéen, en croisant la cartographie des biocénoses et les conditions environnementales. De même, si un lien existait entre typologie d'assemblages et structure du récif, il serait possible de prédire le niveau de complexité structurale partout en Méditerranée française, et éventuellement d'estimer la surface 3D de coralligène, directement en lien avec sa capacité de stockage carbone.

# Contact

7, place Cassan – Carnon Plage  
34 130 Maugio - France

Tél. : 04.67.66.32.48 - [contact@andromede-ocean.com](mailto:contact@andromede-ocean.com)

[www.andromede-ocean.com](http://www.andromede-ocean.com)

