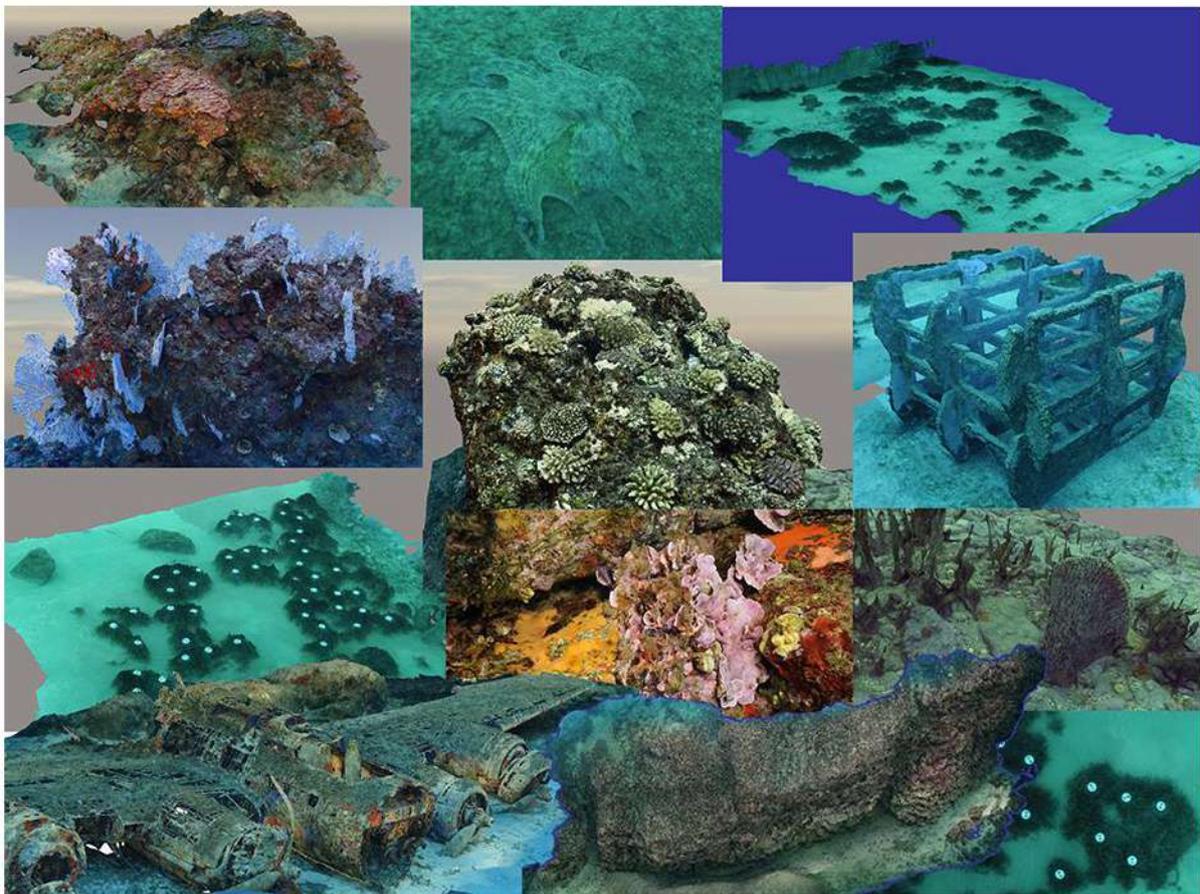


MODEL 2020

Acquisitions photogrammétriques sur les stations

TEMPO et RECOR 2020 en Corse



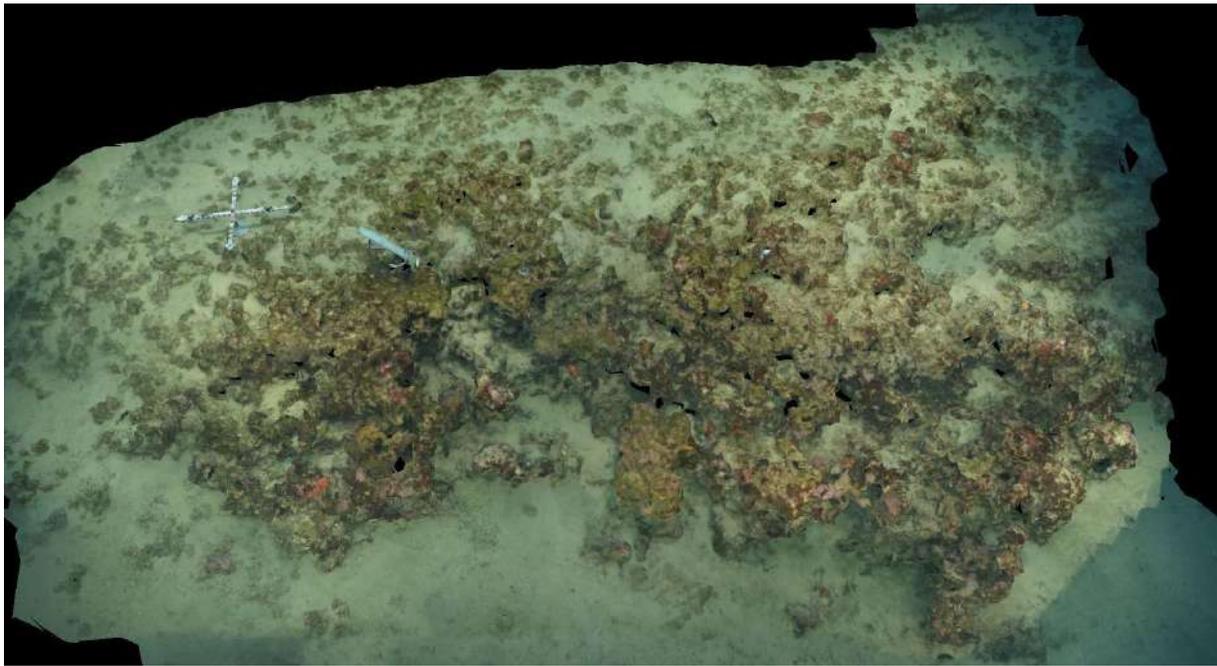
ANDROMÈDE
OCÉANOLOGIE

7, place Cassan - Quai des pêcheurs

34 280 Carnon - France

Tél. : 04.67.66.32.48

contact@andromede-ocean.com



Site RECOR « Bastia » modélisé par photogrammétrie.

Coordination Andromède :

HOLON Florian, florian.holon@andromede-ocean.com



Coordination Agence de l'Eau RMC :

BOISSERY Pierre, Pierre.BOISSERY@eaurmc.fr



Participants aux missions de terrain :

AGEL Noémie, BLANDIN Agathe, BOCKEL Thomas, DELARUELLE Gwenaëlle, DETER Julie, HOLON Florian, GUILBERT Antonin, GENTIL Yanick, MAURON Stephen, MARRE Guilhem, PAVY Thomas.

Traitement des données et rédaction :

MARRE Guilhem, DELARUELLE Gwenaëlle.

Ce document doit être cité sous la forme suivante :

ANDROMEDE Océanologie, 2021. MODEL 2020 : Caractérisation et suivi par photogrammétrie des sites de surveillance TEMPO (herbier de posidonie) et RECOR (récifs coralligènes) en 2020 en région Corse. Contrat Andromède Océanologie / Agence de l'eau. 74 pages.

Édito

Depuis l'entrée en vigueur de la Directive Européenne Cadre sur l'Eau 2000/60/CE (DCE), les États membres se sont engagés à atteindre un bon état écologique des masses d'eau d'ici 2020 (Parlement Européen, 2000).

La Directive cadre Stratégie pour le Milieu Marin 2008/56/CE (DCSMM) a renforcé cette volonté pour le milieu marin. Pour cela, il s'agit de suivre l'état des écosystèmes marins, mesurer les impacts liés aux pressions des activités humaines et mettre en œuvre une gestion intégrée permettant une utilisation durable des ressources.

C'est dans ce contexte réglementaire que la société Andromède Océanologie a développé depuis 2010, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, de nombreux réseaux de surveillance axés sur des thématiques variées tels que TEMPO (Herbier de posidonie), RECOR (Récifs coralligènes), CALME (bruit acoustique), CALOR (Température de fond), PISCIS (Poissons).

Ces réseaux permettent de suivre un grand nombre de mesures à différentes échelles (individus, populations, communautés, paysages) et mettent en commun leur logistique de terrain. Cette mutualisation des moyens permet de limiter les coûts et d'effectuer des suivis sur les mêmes sites afin de faciliter la mise en lien des données entre elles.

Ce document présente les résultats de la surveillance photogrammétrique (réseau MODEL) pour l'année 2020 en région Corse. Tous les résultats de ces réseaux de surveillance sont consultables sur la plateforme en ligne MEDTRIX (<http://plateforme.medtrix.fr>) dans les projets dédiés.



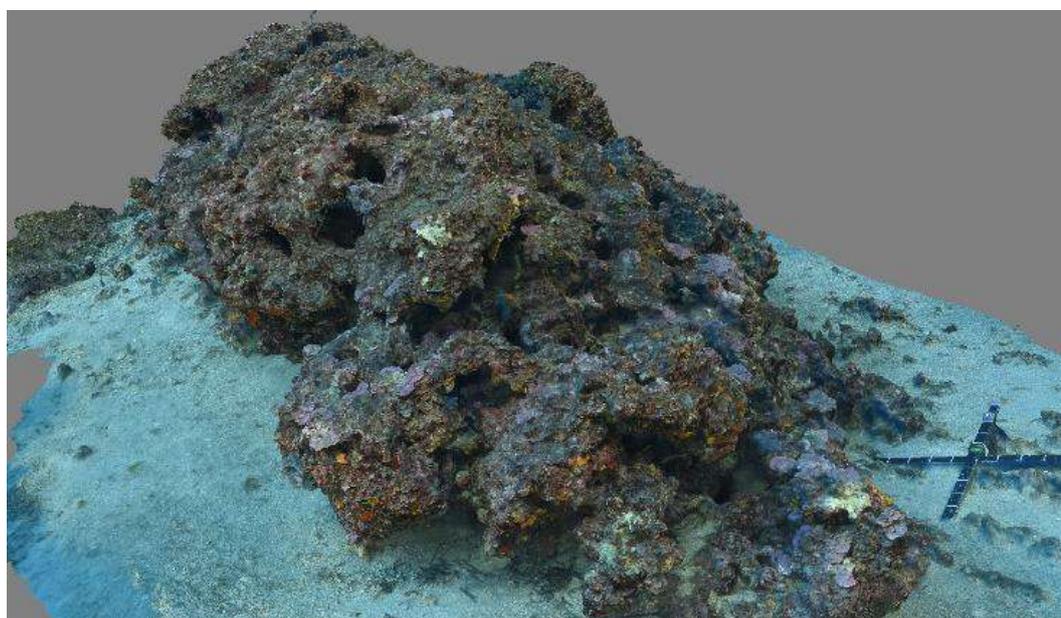
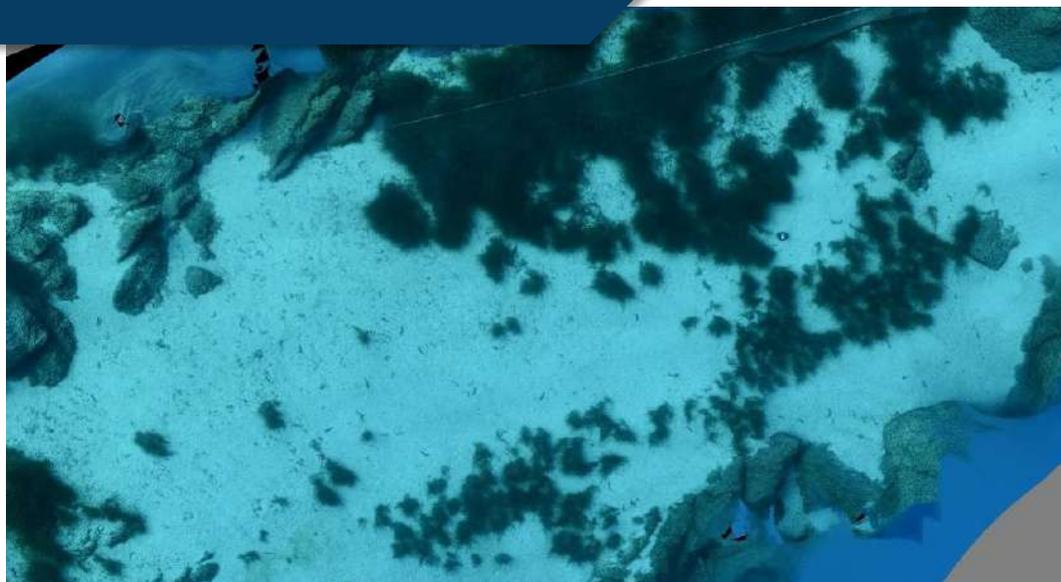
Sommaire

CHAPITRE 1 : MODELISATION DES SITES TEMPO ET RECOR – SURVEILLANCE 2020 EN CORSE.....	7
I. OBJECTIFS.....	7
II. SITES DE SURVEILLANCE DE L'HERBIER DE POSIDONIE – RESEAU TEMPO.....	13
II.A. Agriates.....	14
II.B. Anse Cola.....	15
II.C. Baie Tamarone Large.....	16
II.D. Capo Rosso.....	17
II.E. Côte Orientale.....	18
II.F. Fautea.....	19
II.G. Focolara.....	20
II.H. Giraglia.....	21
II.I. Girolata.....	22
II.J. Golfe Santa Manza.....	23
II.K. Isolella.....	24
II.L. Lupino.....	25
II.M. Mortoli.....	26
II.N. Plage Trottel.....	27
II.O. Punta Di Canella.....	28
II.P. Punta Mortella.....	29
II.Q. Punta Vaccaja.....	30
II.R. Rondinara.....	31
II.S. Sanguinaires.....	32
II.T. Stareso.....	33
III. SITES DE SURVEILLANCE DES RECIFS CORALLIGENES – RESEAU RECOR.....	34
III.A. Atoll 1 (PNMCCA).....	35
III.B. Agriates.....	36
III.C. Agriates Est (PNMCCA).....	37
III.D. Agriates Sud (PNMCCA).....	38
III.E. Bastia.....	39
III.F. Canari (PNMCCA).....	40
III.G. Cappu Rosso.....	41
III.H. Cargese.....	42
III.I. Centuri.....	43
III.J. Corailleurs.....	44
III.K. Lavezzi.....	45
III.L. Macinaggio.....	46
III.M. Mortoli.....	47
III.N. Morsiglia (PNMCCA).....	48
III.O. Parata.....	49
III.P. Revelatta.....	50
III.Q. Sanguinaires.....	51
III.R. Scandola-4.....	52
III.S. Senetosa.....	53
III.T. Saint Florent.....	54
III.U. Tarco.....	55
III.V. Vacca.....	56
CHAPITRE 2 : CARACTERISATION ET SUIVI DES RECIFS CORALLIGENES PAR PHOTOGRAMMETRIE.....	58
I. CARACTERISATION STRUCTURELLE DES RECIFS.....	58
I.A. Contexte et objectifs.....	58
I.B. Données.....	58
I.C. Méthodologie.....	61
I.D. Résultats.....	62

<i>I.E. Discussion</i>	65
II. SUIVIS TEMPORELS DE RECIFS CORALLIGENES	67
<i>II.A. Objectifs</i>	67
<i>II.B. Méthodologie</i>	67
<i>II.C. Résultats</i>	69
BIBLIOGRAPHIE	71

Chapitre 1

Modélisation des sites TEMPO et RECOR 2020



Ce chapitre présente les modèles réalisés en 2020 par photogrammétrie sur les sites **RECOR** (suivi des récifs coralligènes – **22 sites**) et **TEMPO** (suivi des herbiers de posidonie – **20 sites**). Ces 42 acquisitions photogrammétriques ont contribué à la **standardisation du protocole d’acquisition pour la modélisation 3D** des habitats herbier de posidonie et récifs coralligènes, à **cartographier la limite inférieure des herbiers de posidonie**, à **entraîner un algorithme de reconnaissance automatique des espèces** du coralligène, à **développer une méthode de suivi dans le temps** des récifs coralligènes, et à **caractériser leur distribution** dans l’espace.

Chapitre 1 : Modélisation des sites TEMPO et RECOR – Surveillance 2020 en Corse

I. Objectifs

L'objectif de ce chapitre est de poursuivre en **2020** l'étude menée sur les deux années précédentes en régions Occitanie / PACA Ouest (2018) et en région PACA Est (2019) sur les sites de surveillance biologique de la **région Corse** dans le cadre des marchés de surveillance biologique lots 1 et 2 (*Contrat Andromède Océanologie / Agence de l'eau*).

Les pages suivantes présentent des vues du modèle 3D de chaque site modélisé en 2020 dans le cadre 1) du réseau de surveillance des herbiers de posidonie TEMPO et 2) du réseau de suivi des assemblages coralligènes RECOR. Le nombre de photographies réalisées pour chaque modèle est indiqué, ainsi qu'une vue d'ensemble du site et deux zooms sur une portion du modèle.

Tous les modèles sont disponibles sur la plateforme [MEDTRIX](#) dans les projets RECOR, TEMPO et aussi MODEL.

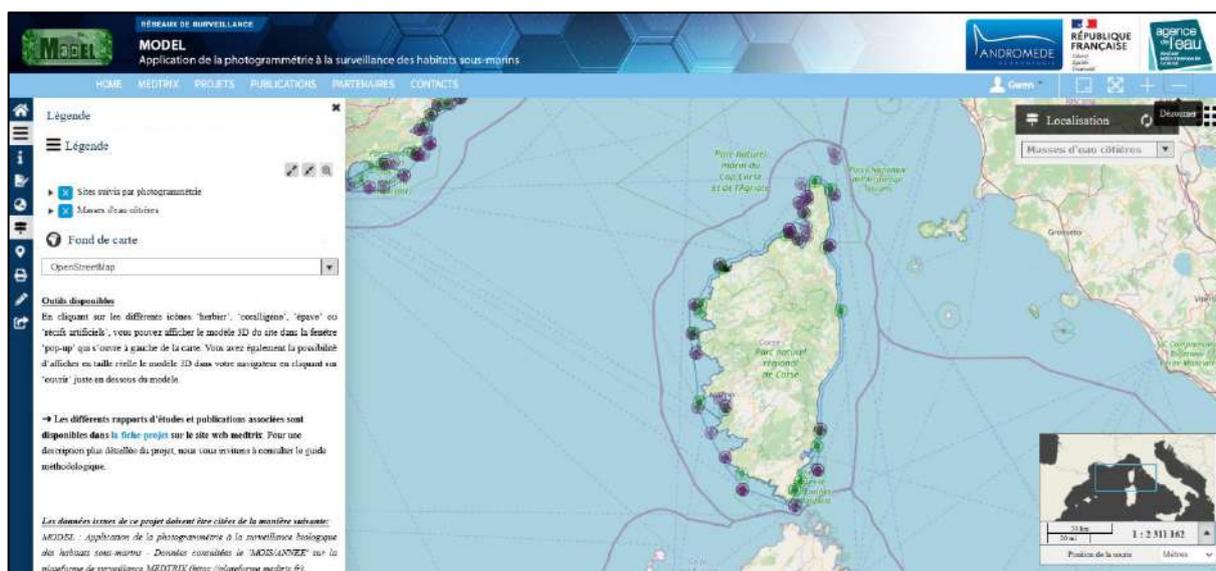


FIGURE 1 : TOUS LES MODELES PHOTOGRAMMETRIQUES REALISES EN 2020 EN REGION CORSE SONT INTEGRES SUR MEDTRIX DANS LE PROJET MODEL.

Les **42 acquisitions photogrammétriques** effectuées en 2020 en région Corse et présentées dans ce rapport contribuent à la **surveillance biologique** des herbiers de posidonie et des récifs coralligènes et ont permis de :

1/ **Standardiser le protocole d'acquisition pour la modélisation 3D** des herbiers de posidonie et des récifs coralligènes, **mesurer la résolution et la précision des modèles produits** (voir [publication](#) Marre et al., 2019 : « Monitoring marine habitats with photogrammetry : a cost-effective, accurate, precise and high-resolution reconstruction method », *Frontiers in Marine Science*) ;

2/ **Cartographier la limite inférieure des herbiers de posidonie** par photogrammétrie (voir [publication](#) Marre et al., 2020 : « Fine-scale automatic mapping of living Posidonia oceanica seagrass beds with underwater photogrammetry », *Marine Ecology Progress Series*).

A partir des modèles 3D réalisés en 2020 sur les sites TEMPO, la limite inférieure des herbiers de posidonie a été cartographiée et sa dynamique évolutive a été évaluée en comparant la cartographie de 2020 à celle effectuée en 2017 par photogrammétrie. Le [rapport](#) TEMPO 2020 présentant ces modèles photogrammétriques est accessible sur MEDTRIX. Ces acquisitions 3D complètent celles effectuées sur les sites TEMPO depuis 2016, et contribuent à quantifier les apports de la photogrammétrie et à évaluer son efficacité pour suivre la limite inférieure des herbiers. Grâce à ces cinq années d'acquisitions photogrammétriques sur les sites TEMPO (années 2016 à 2020), nous avons montré que 1) cette méthode permet, comme la télémétrie acoustique, de cartographier l'herbier à un instant t et également de comparer son évolution dans l'espace et dans le temps et 2) cette méthode est adaptée à quasiment toutes les typologies de limites inférieures, à toutes les natures de substrat et tailles de zone d'étude (Andromède Océanologie, 2020). Ces données ont orienté le choix de privilégier la méthode de photogrammétrie par rapport à la télémétrie acoustique pour la cartographie des limites inférieures d'herbiers dans le cadre du réseau de surveillance TEMPO à partir de 2021.

3/ **Développer une méthode de suivi dans le temps** des récifs coralligènes : produire des orthomosaïques locales identiques entre plusieurs modèles d'un même récif afin de réaliser un suivi surfacique dans le temps.

Grâce à des développements récents, nous sommes aujourd'hui en mesure de définir des « **quadrats permanents artificiels** » (sans balisage particulier) que l'on suit dans le temps par photogrammétrie. Cette méthode permet de reproduire exactement le **même point de vue sur le récif**, et exporter l'image **reconstruite à partir du modèle 3D**. L'image est ensuite « cartographiée », afin de rendre compte précisément de l'évolution surfacique de la colonisation du récif. Cette méthode de suivi temporel est notamment utilisée pour mesurer l'évolution des principales macronécroses sur les sites RECOR les plus touchés, en particulier en Corse. A partir des modèles 3D réalisés en 2020 sur les sites RECOR, les récifs coralligènes ont été illustrés et les images ont été comparées à celles effectuée en 2017 par photogrammétrie, notamment celles des macronécroses. Le [rapport](#) RECOR 2020 est accessible sur MEDTRIX

4/ Suivre et quantifier des pressions anthropiques dans le temps.

La photogrammétrie permet également de visualiser des pressions anthropiques comme les engins de pêche perdus, les gorgones arrachées, les macrodéchets et de suivre leur évolution dans le temps.

5/ Développer des indicateurs de surveillance de l'état écologique de l'herbier

Grâce aux données microsurfaciques issues de la photogrammétrie de l'herbier (et de données ponctuelles = mesures de vitalité) nous avons calculé pour chaque site TEMPO un **indicateur de dynamique évolutive de l'herbier en limite inférieure** qui prend en compte l'évolution de la densité de faisceaux (en %) et la dynamique microsurfacique de l'herbier (% de régression et/ou de progression) entre chaque suivi sur un même site. Cet indicateur a été développé en 2020 pour l'[atlas cartographique](#).

Les figures suivantes illustrent l'intérêt de la photogrammétrie pour cartographier et suivre un site d'herbier en limite inférieure.

2017 :

2020 :

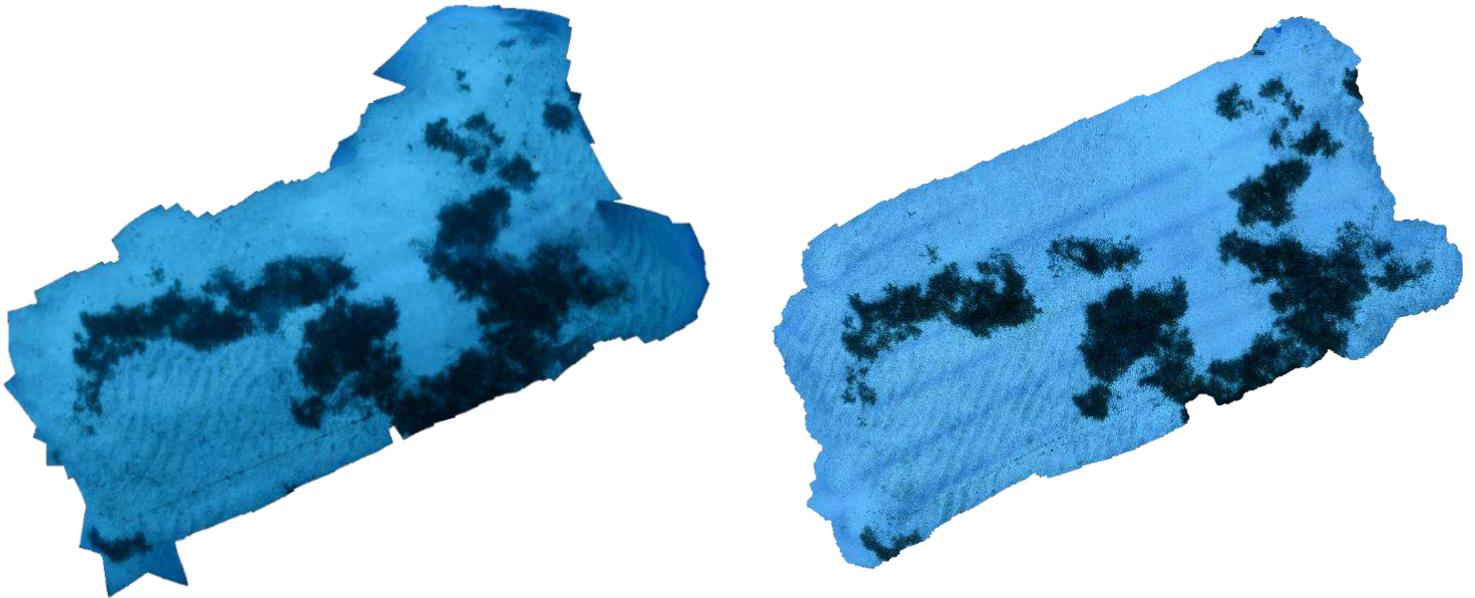


FIGURE 2 : VUE GLOBALE DU SITE « GIRAGLIA » RECONSTITUE EN 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE EN 2017 ET EN 2020.

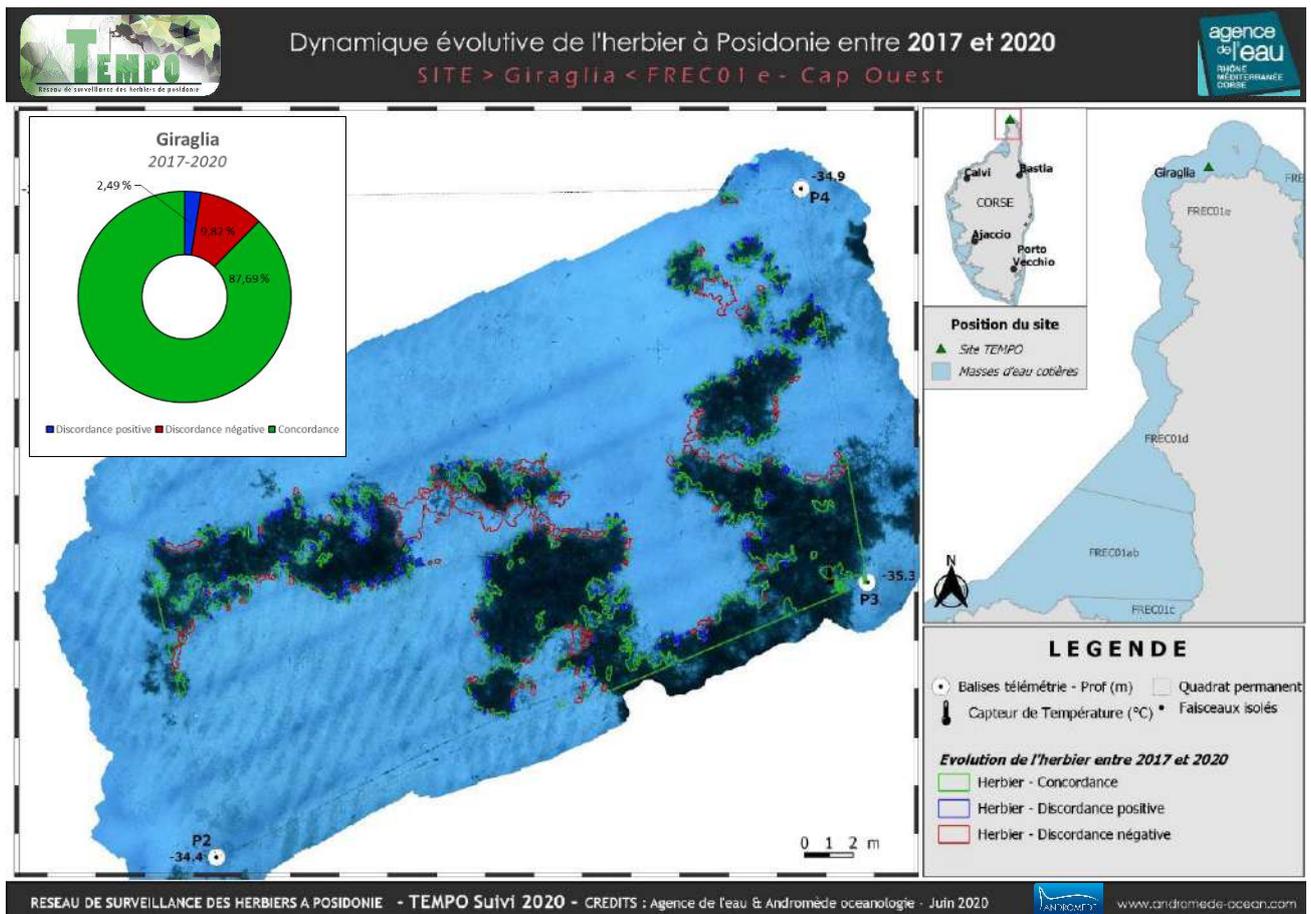


FIGURE 3 : DYNAMIQUE EVOLUTIVE DE L'HERBIER DU SITE « GIRAGLIA » ENTRE 2017 ET 2020.

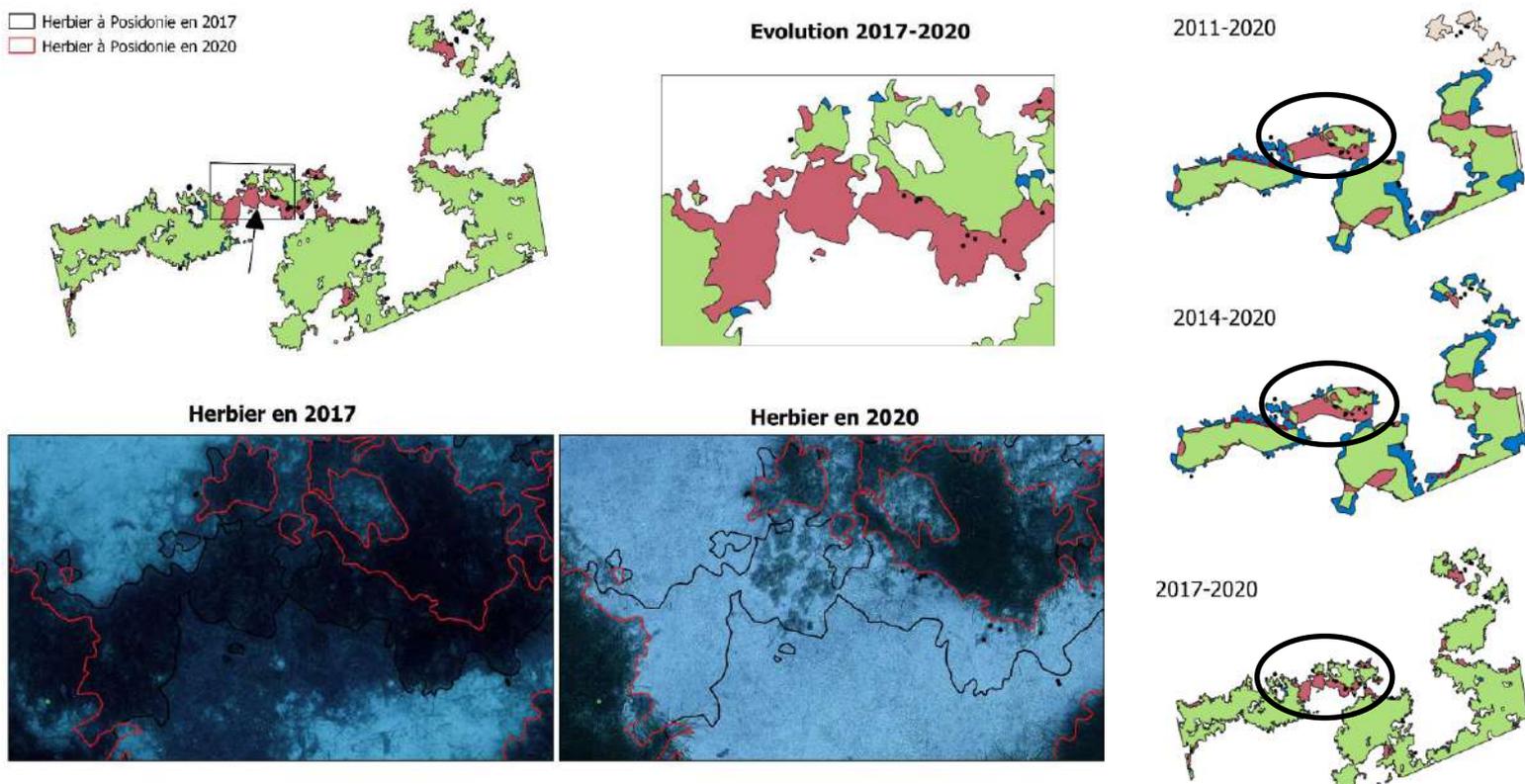


FIGURE 4 : SITE « GIRAGLIA ». ZOOM SUR UNE TACHE DE L'HERBIER ET COMPARAISON ENTRE LES CARTOGRAPHIES DE 2017 ET 2020 (A GAUCHE) ; ET (B) : DYNAMIQUE DE L'HERBIER ENTRE 2011 ET 2020, 2014 ET 2020 & 2017 ET 2020 (A DROITE).

Les figures suivantes illustrent l'intérêt de la photogrammétrie pour suivre et quantifier des pressions sur les récifs coralligènes (nécroses de gorgones, macronécroses des algues rouges bio constructrices, engins de pêche).



FIGURE 5 : ENGINES DE PECHE (ENTOURES EN ROUGE) SUR LE SITE RECOR ST FLORENT MODELISE EN 2020.

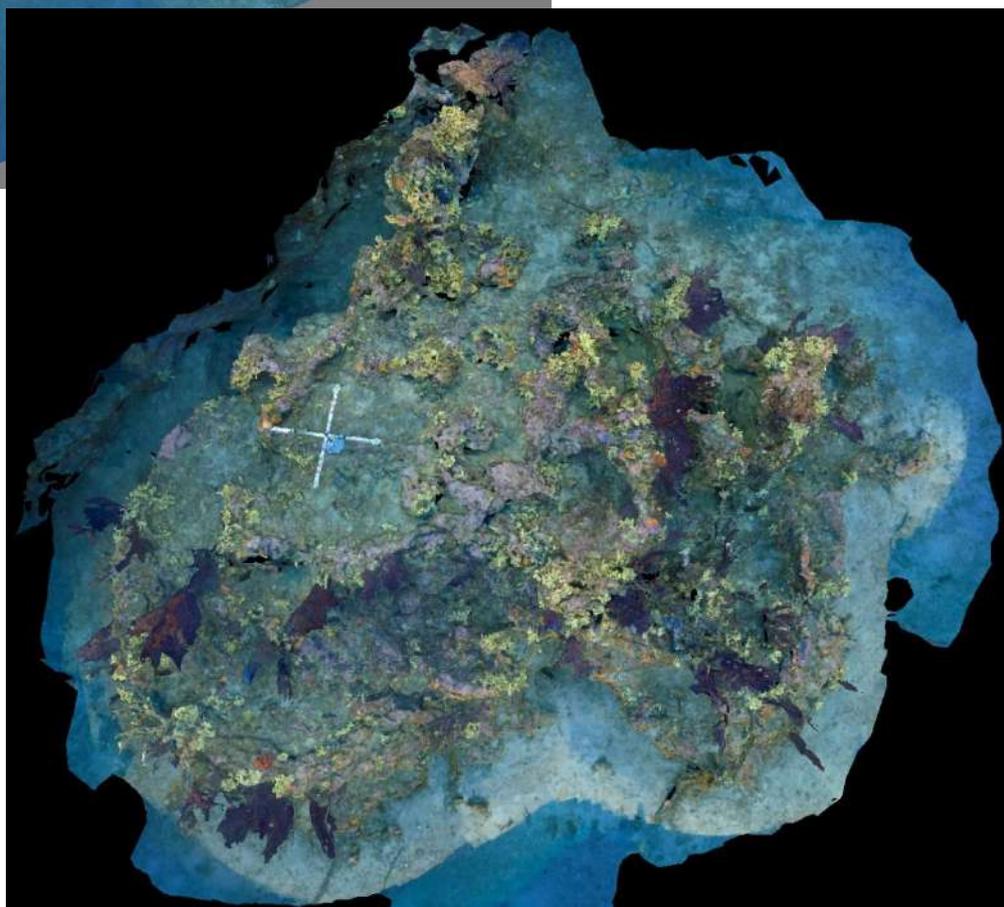
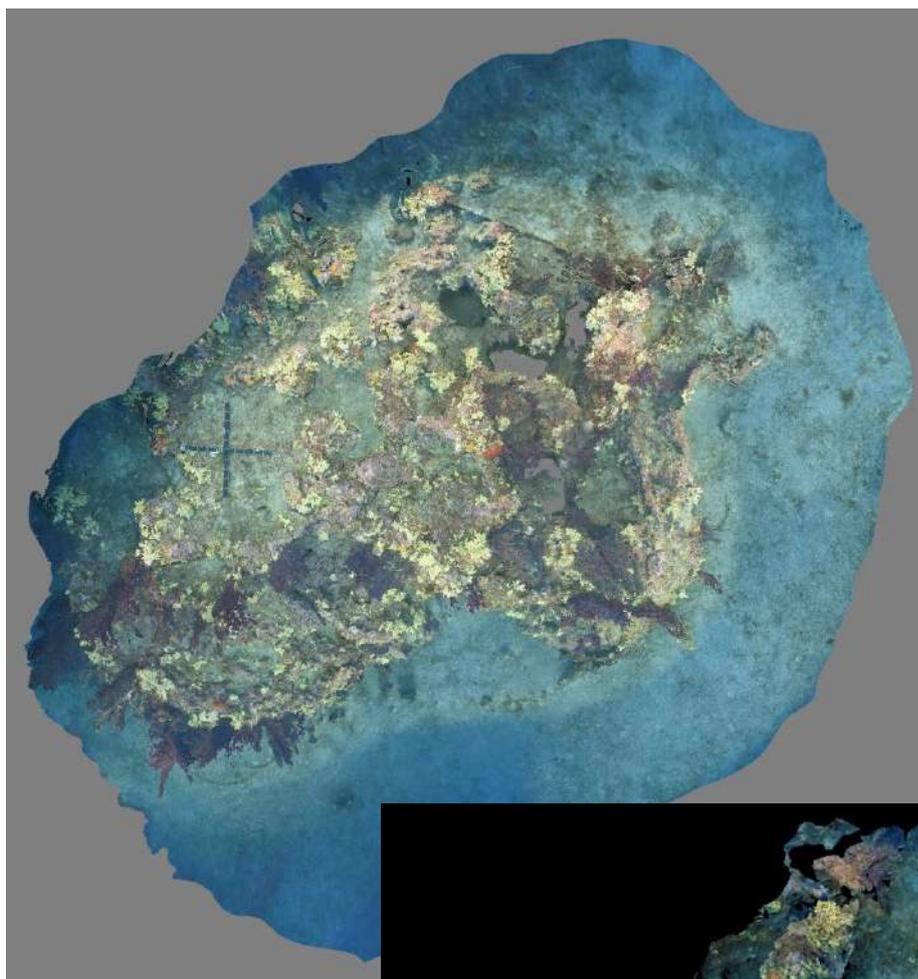


FIGURE 6 : VUE GLOBALE DU SITE ST FLORENT RECONSTITUE EN 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE EN 2017 (EN HAUT), EN 2020 (EN BAS).

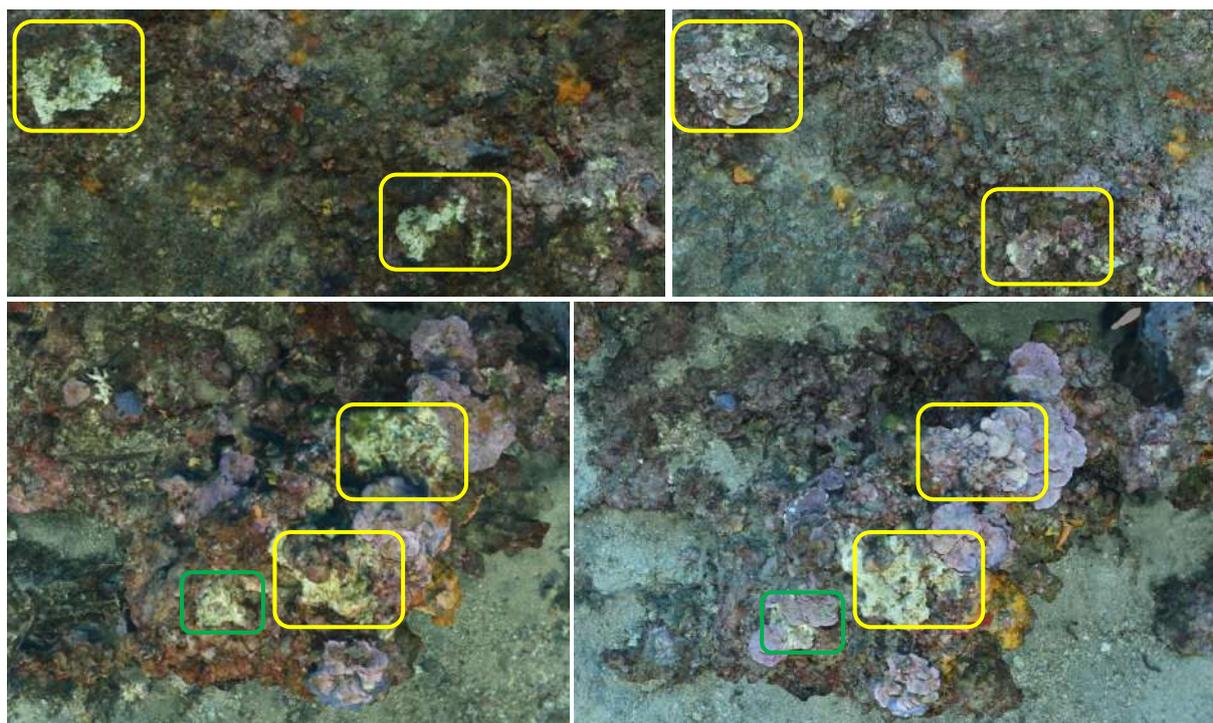


FIGURE 7 : LES MACRO-NECROSES DES *MESOPHYLLUM* SP. ET *LITHOPHYLLUM* SP. SUR LE SITE VACCA : ENTRE 2020 (A GAUCHE) PAR RAPPORT A 2017 (A DROITE) (RECTANGLES JAUNES) MAIS AUSSI UNE COLONISATION PAR LES *PEYSSONNELIA* SP. DE CES ANCIENS ENCREBELLEMENTS (RECTANGLES VERTS).

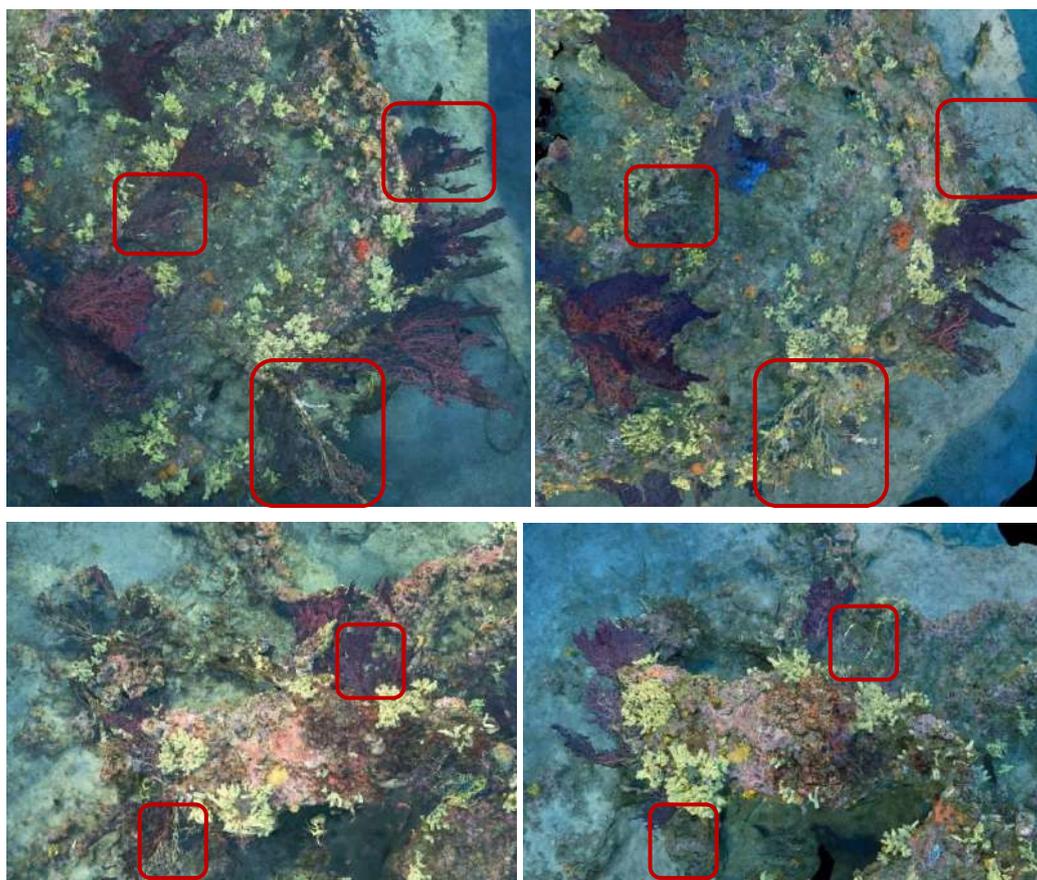


FIGURE 8 : COMPARAISON ENTRE LES MODELES DE 2017 (A GAUCHE) ET 2020 (A DROITE) MONTRANT LES GORGONES ROUGES NECROSEES (RECTANGLES ROUGES) – SITE RECOR ST FLORENT.

II. Sites de surveillance de l'herbier de posidonie – réseau TEMPO

Le tableau ci-dessous synthétise, pour chaque site **TEMPO** modélisé en 2020 (**20 sites**), l'adresse URL du modèle :

TABEAU 1 : ADRESSES URL DES MODELES 3D DES SITES TEMPO 2020.

Nom du site	URL
Agriates	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Agriates/App
Anse Cola	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Anse_Cola/App
Baie Tamarone Large	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Baie_Tamarone_Large/App
Capo Rosso	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Capo_Rosso/App
Côte Orientale	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Cote_Orientale/App
Fautea	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Fautea/App
Focolara	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Focolara/App
Giraglia	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Giraglia/App
Girolata	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Girolata/App
Golfe Santa Manza	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Golfe_Santa_Manza/App
Isolella	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Grau_Agde_Est/App
Lupino	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Lupino/App
Mortoli	<i>Indisponible au format web</i>
Plage Trottel	<i>Indisponible au format web</i>
Punta Di Canella	<i>Indisponible au format web</i>
Punta Mortella	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Punta_Mortella/App
Punta Vaccaja	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Punta_Vaccaja/App
Rondinara	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Rondinara/App
Sanguinaires	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Sanguinaires/App
Stareso	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2020/Stareso/App

II.A. Agriates

Le modèle 3D du site TEMPO « Agriates » a été construit à partir de 1058 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

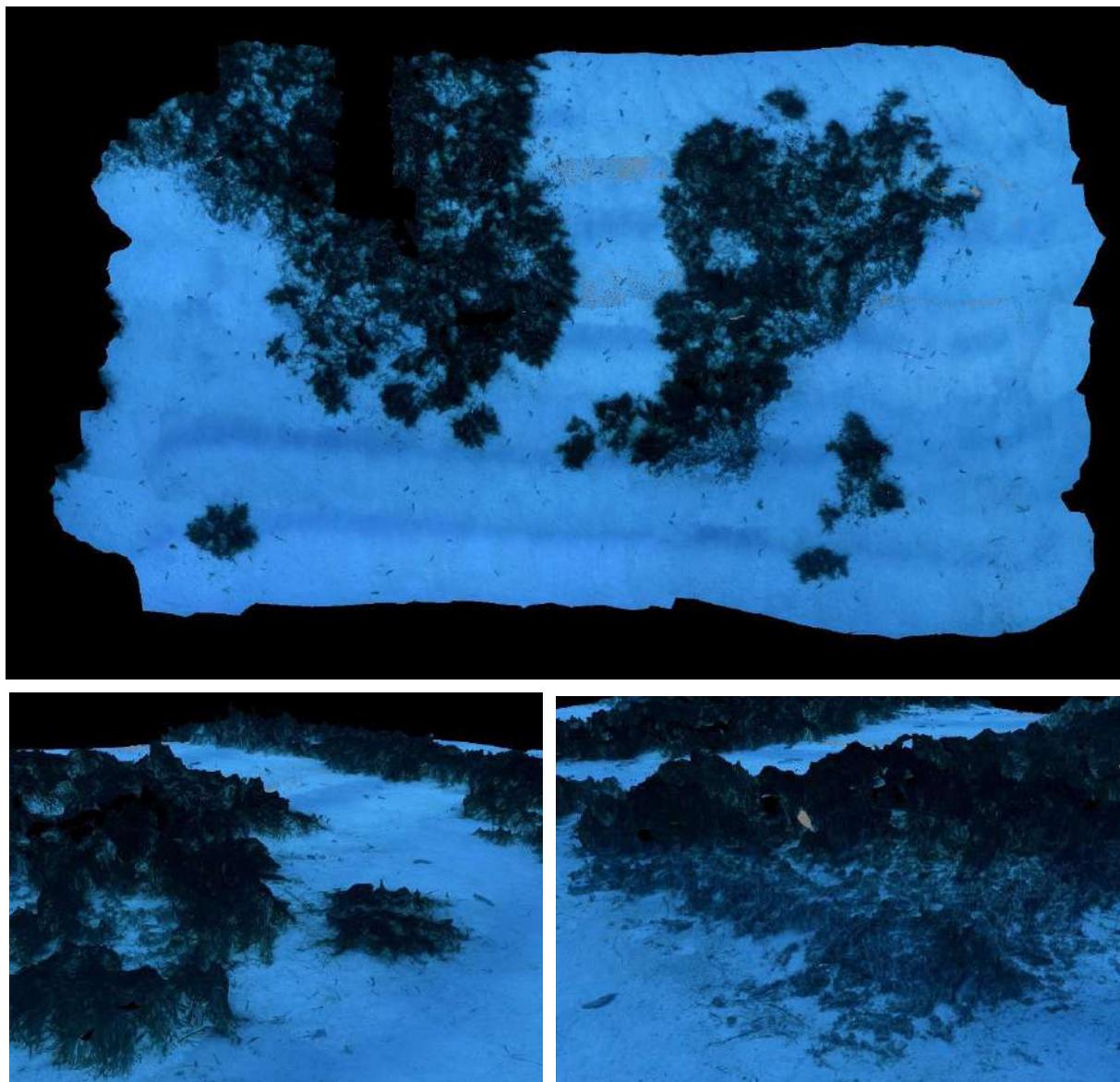


FIGURE 9: MODELE DU SITE TEMPO « AGRIATES »

II.B. Anse Cola

Le modèle 3D du site TEMPO « Anse Cola » a été construit à partir de 1138 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

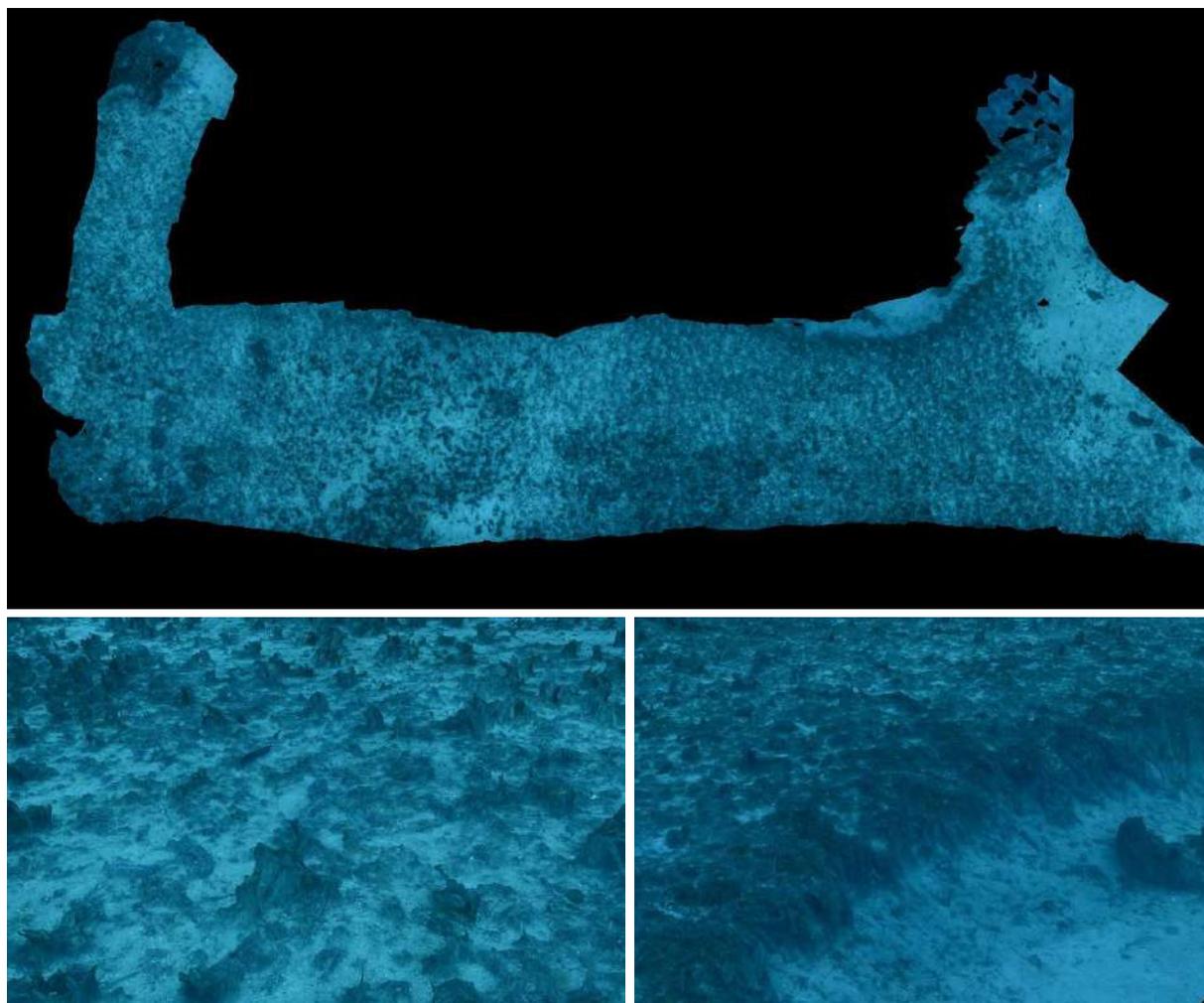


FIGURE 10 : MODELE DU SITE TEMPO « ANSE COLA »

II.C. Baie Tamarone Large

Le modèle 3D du site TEMPO « Baie Tamarone Large » a été construit à partir de 987 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

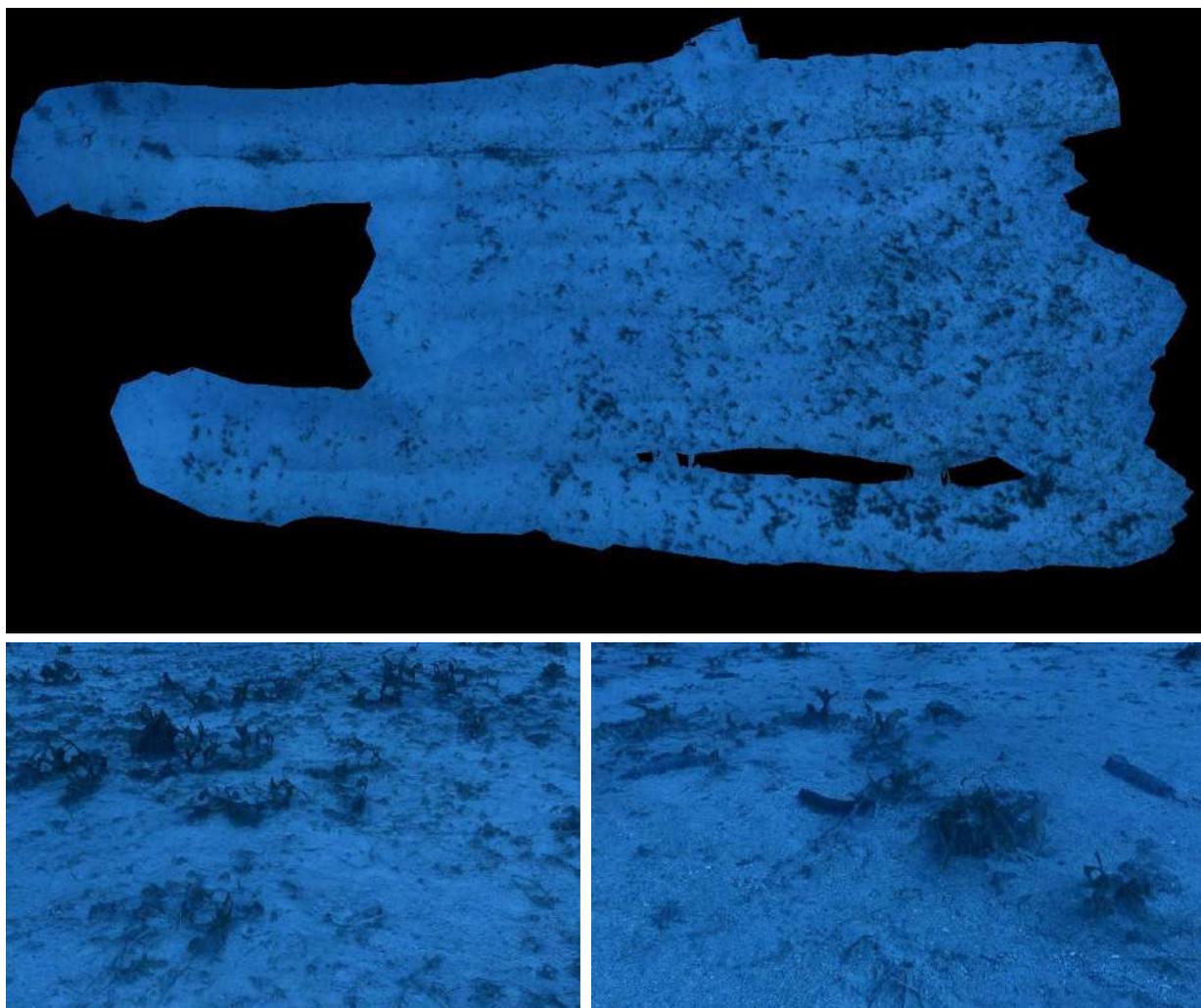


FIGURE 11 : MODELE DU SITE TEMPO « BAIE TAMARONE LARGE »

II.D. Capo Rosso

Le modèle 3D du site TEMPO « Capo Rosso » a été construit à partir de 1086 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

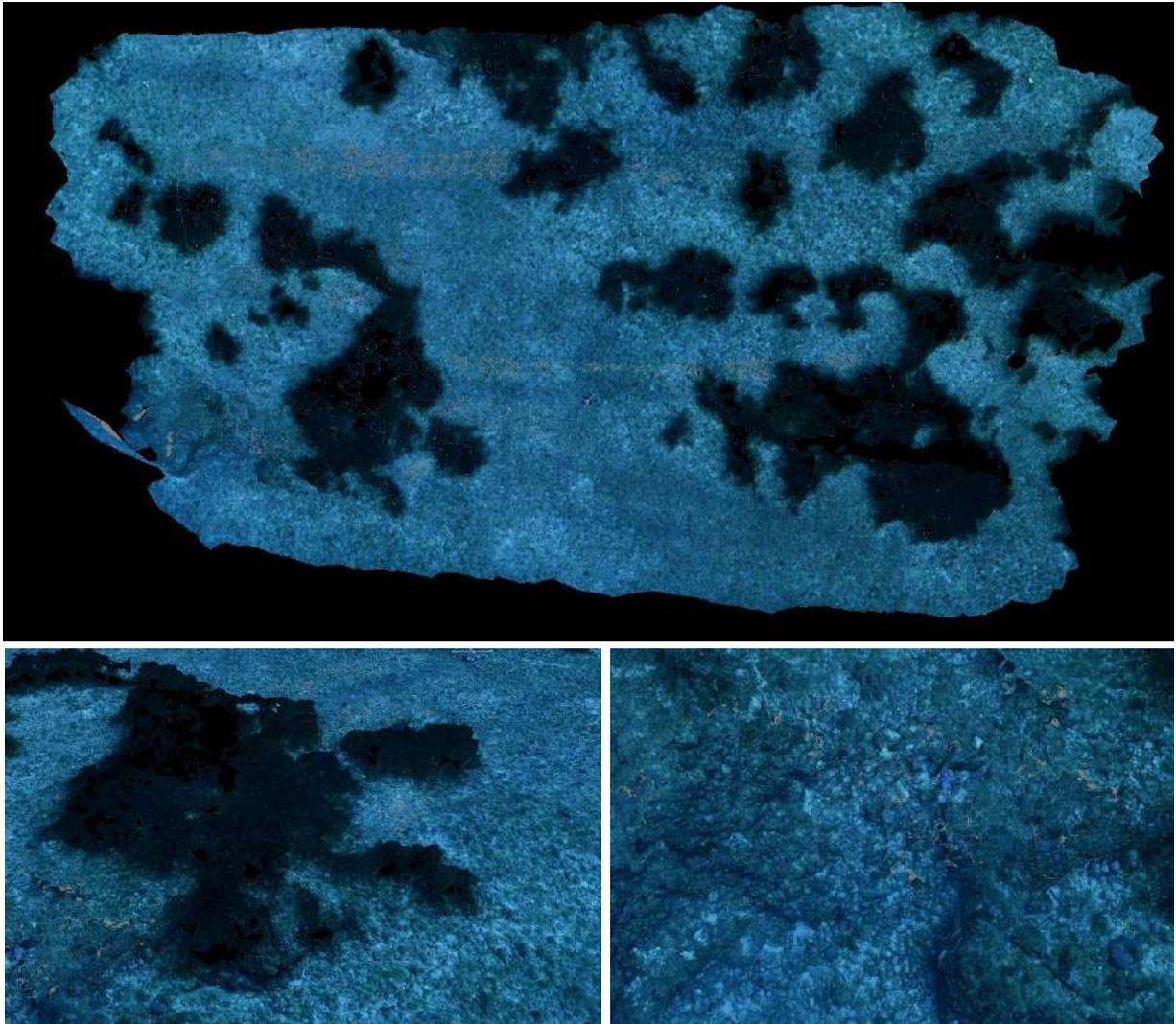


FIGURE 12 : MODELE DU SITE TEMPO « CAPO ROSSO »

II.E. Côte Orientale

Le modèle 3D du site TEMPO « Côte Orientale » a été construit à partir de 905 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

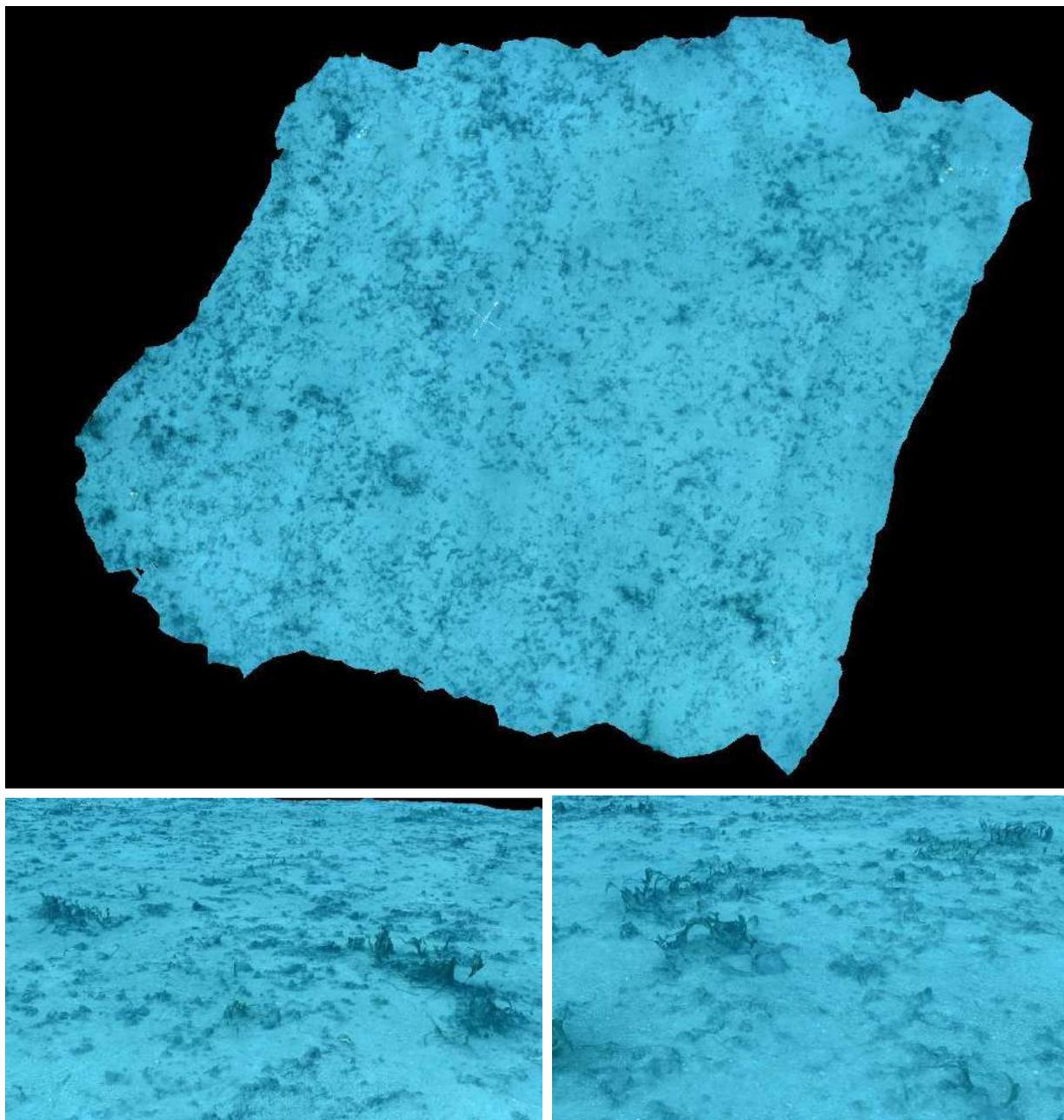


FIGURE 13 : MODELE DU SITE TEMPO « COTE ORIENTALE »

II.F. Fautea

Le modèle 3D du site TEMPO « Fautea » a été construit à partir de 1156 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

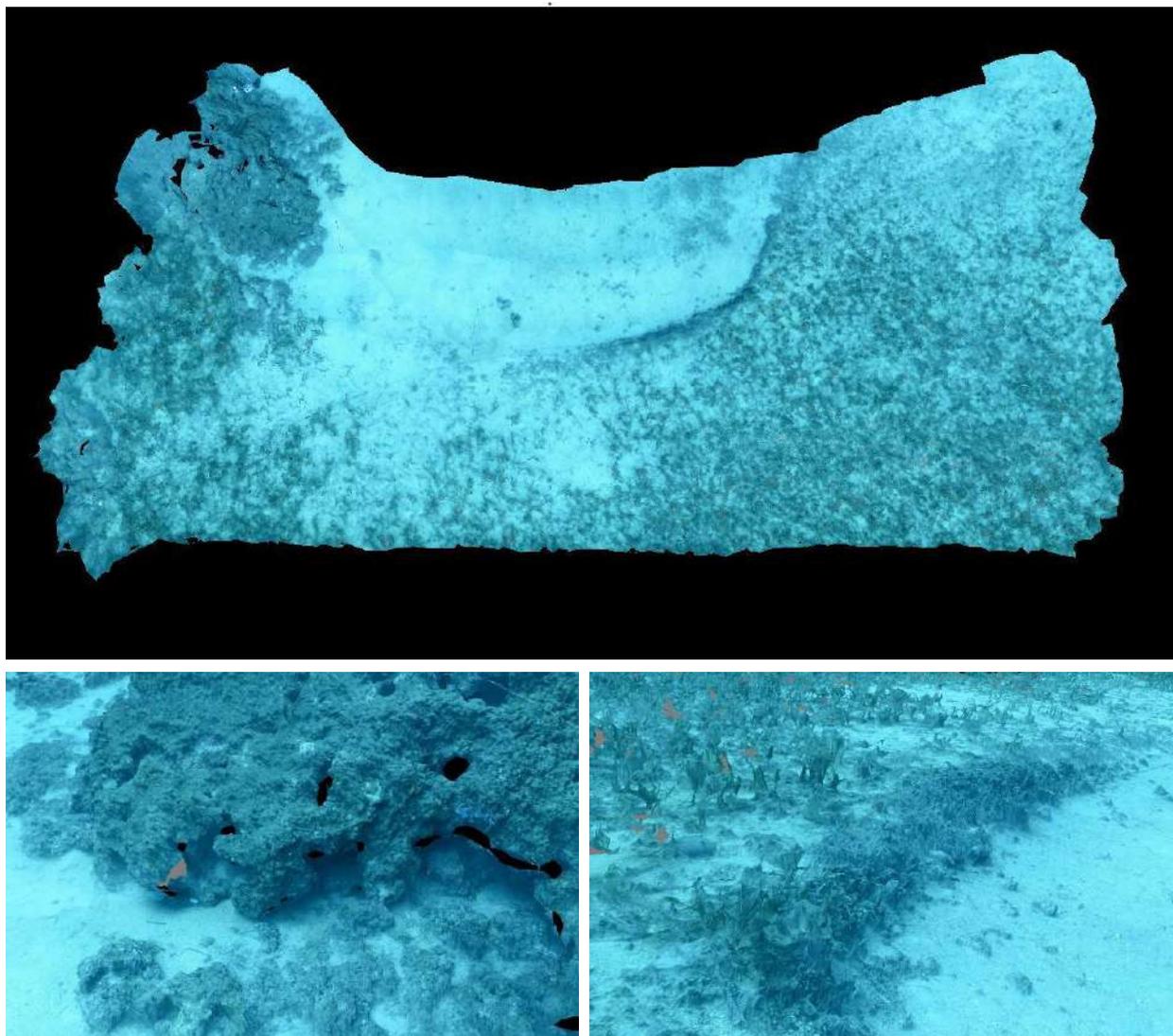


FIGURE 14 : MODELE DU SITE TEMPO « FAUTEA »

II.G. Focolara

Le modèle 3D du site TEMPO « Focolara » a été construit à partir de 1193 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

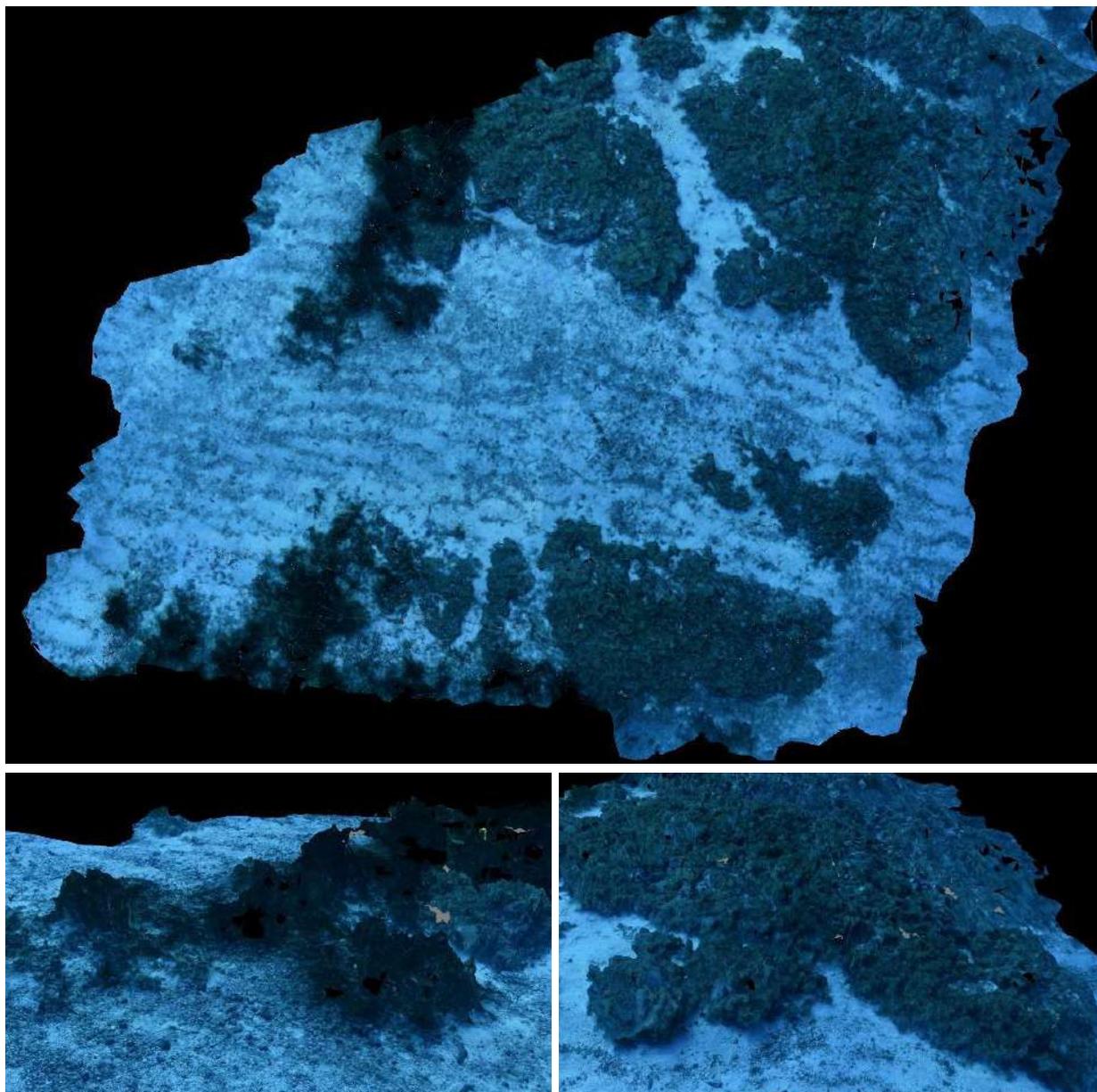


FIGURE 15 : MODELE DU SITE TEMPO « FOCOLARA »

II.H. Giraglia

Le modèle 3D du site TEMPO « Giraglia » a été construit à partir de 1598 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

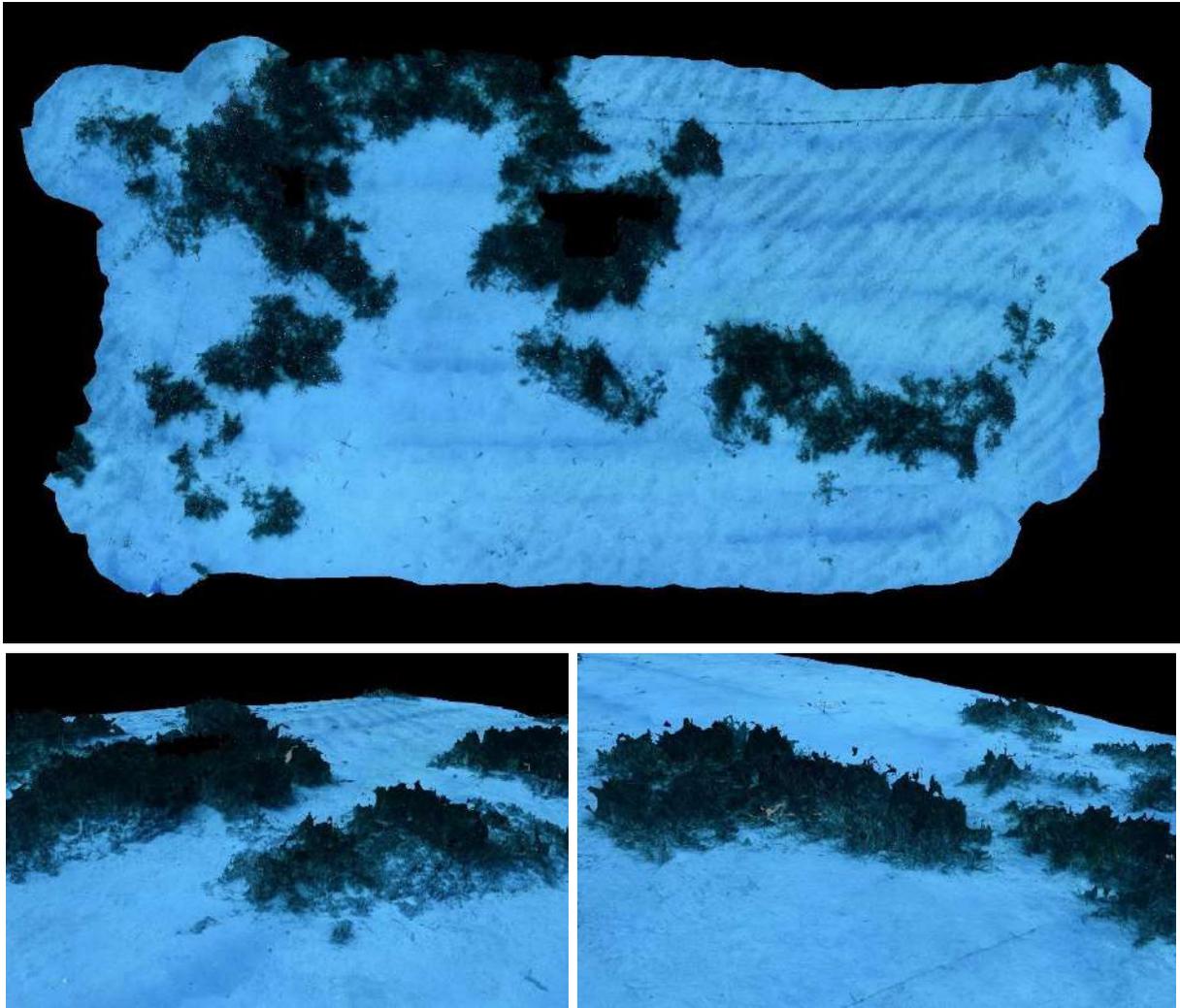


FIGURE 16 : MODELE DU SITE TEMPO « GIRAGLIA »

II.1. Girolata

Le modèle 3D du site TEMPO « Girolata » a été construit à partir de 2369 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

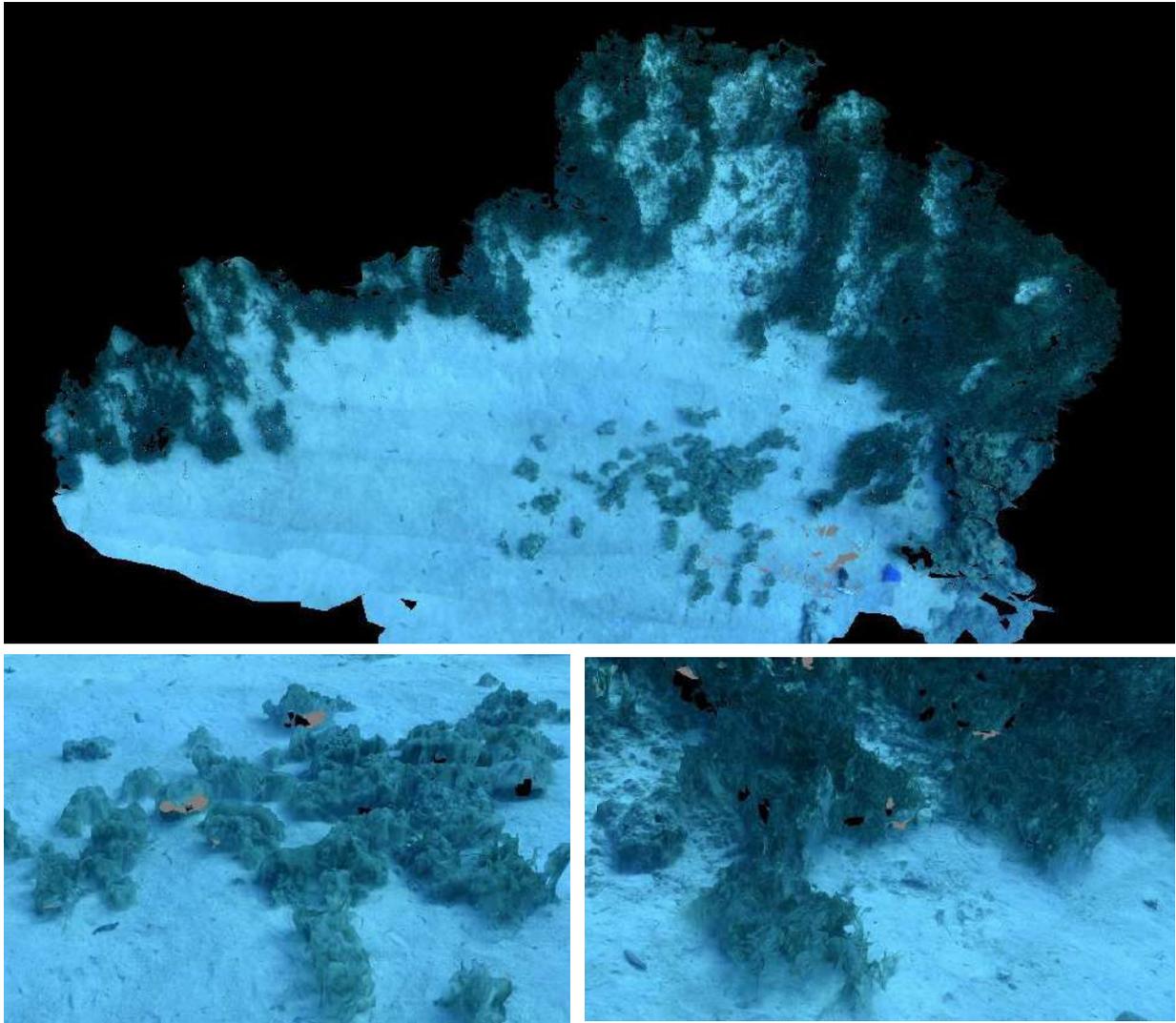


FIGURE 17 : MODELE DU SITE TEMPO « GIROLATA »

II.J. Golfe Santa Manza

Le modèle 3D du site TEMPO « Golfe Santa Manza » a été construit à partir de 1649 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

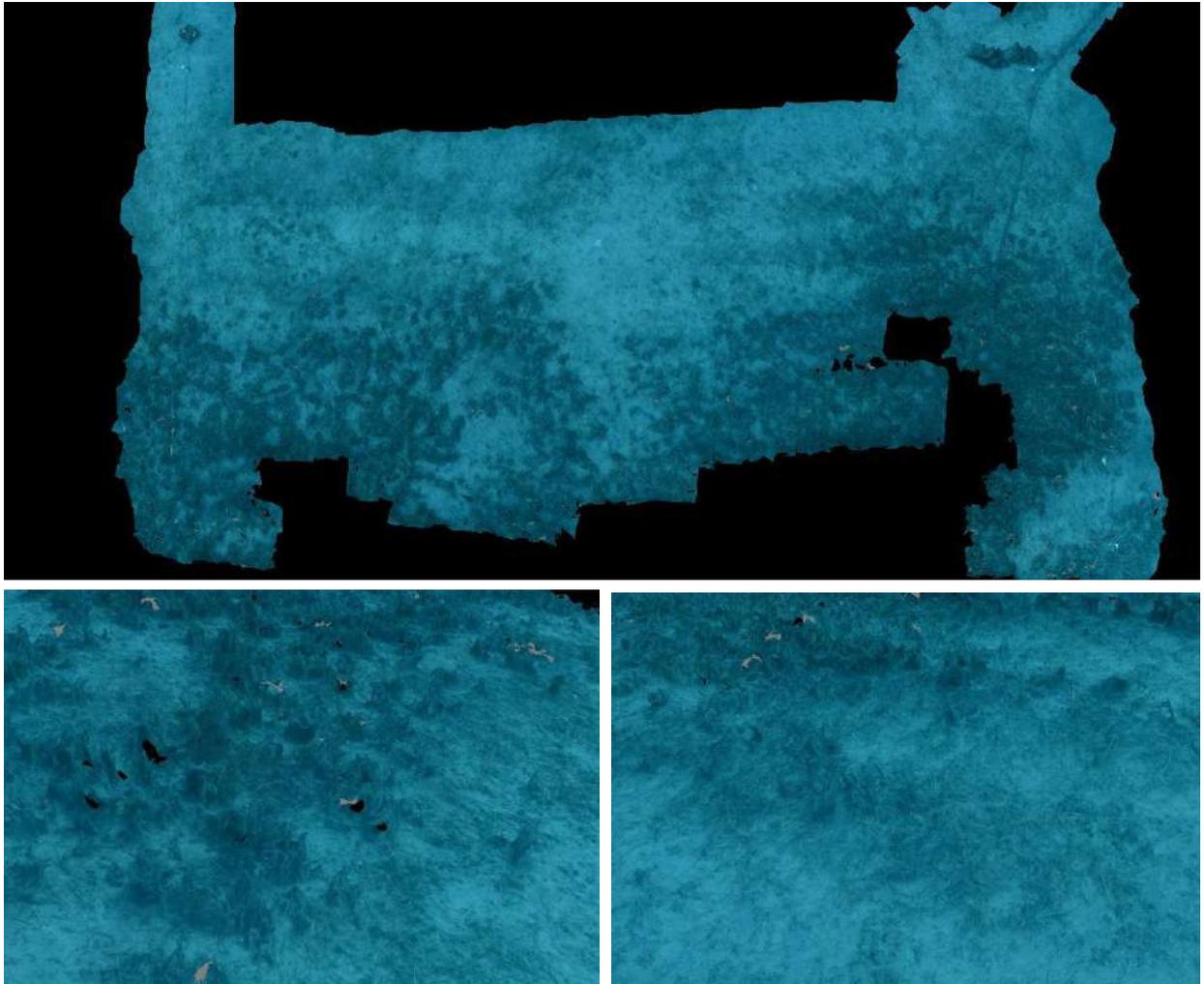


FIGURE 18 : MODELE DU SITE TEMPO « GOLFE SANTA MANZA »

II.K. Isolella

Le modèle 3D du site TEMPO « Isolella » a été construit à partir de 798 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

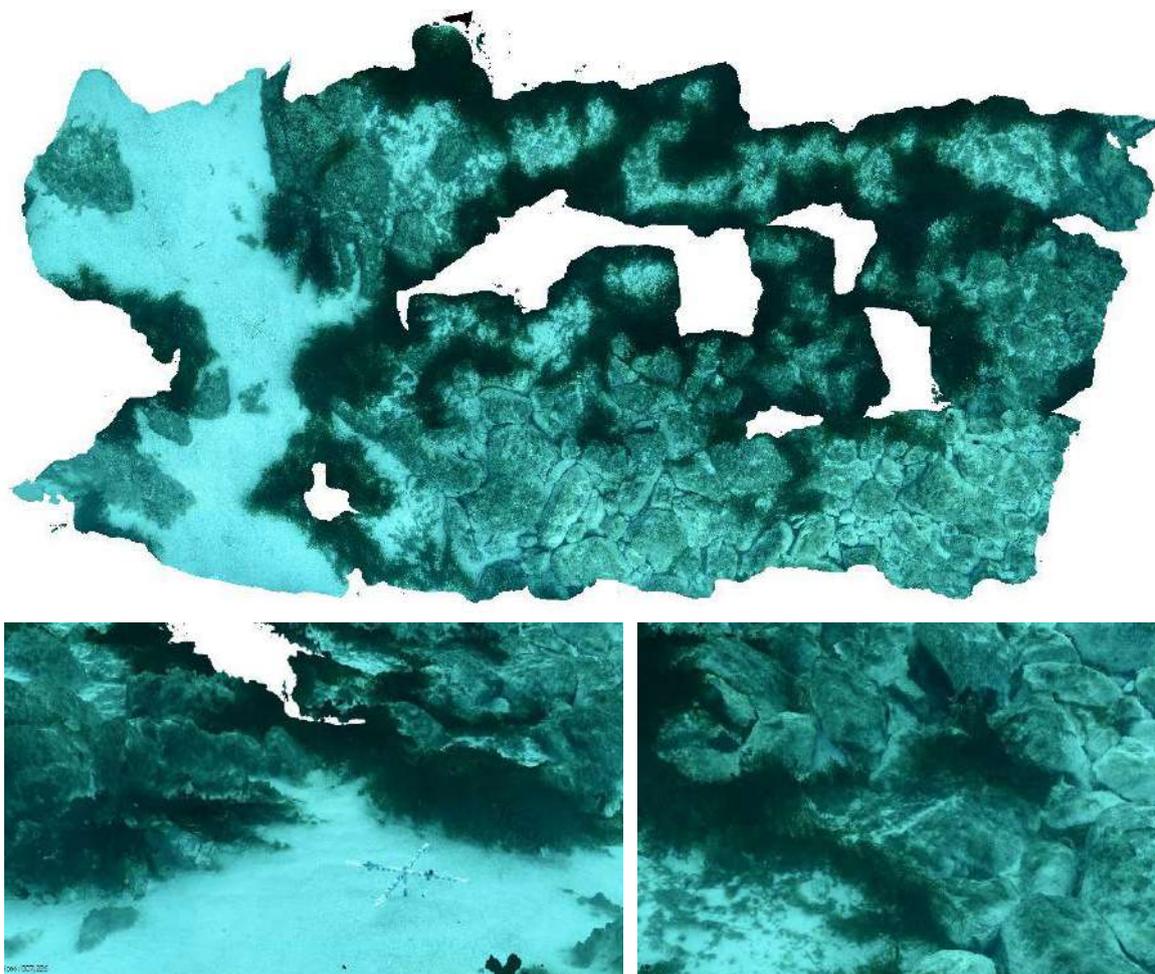


FIGURE 19 : MODELE DU SITE TEMPO « ISOLELLA »

II.L. Lupino

Le modèle 3D du site TEMPO « Lupino » a été construit à partir de 922 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

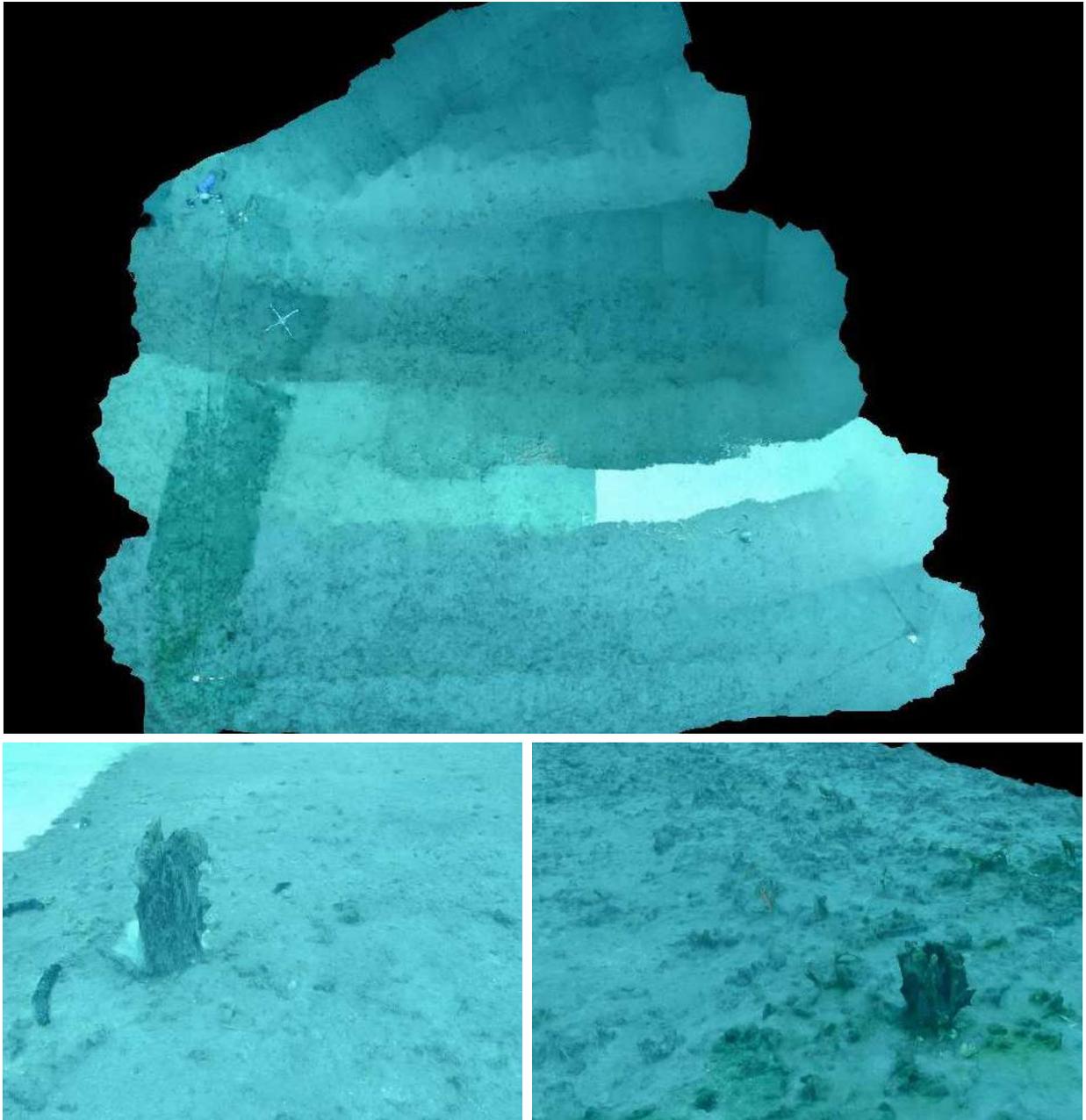


FIGURE 20 : MODELE DU SITE TEMPO « LUPINO »

II.M. Mortoli

Le modèle 3D du site TEMPO « Mortoli » a été construit à partir de 1248 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

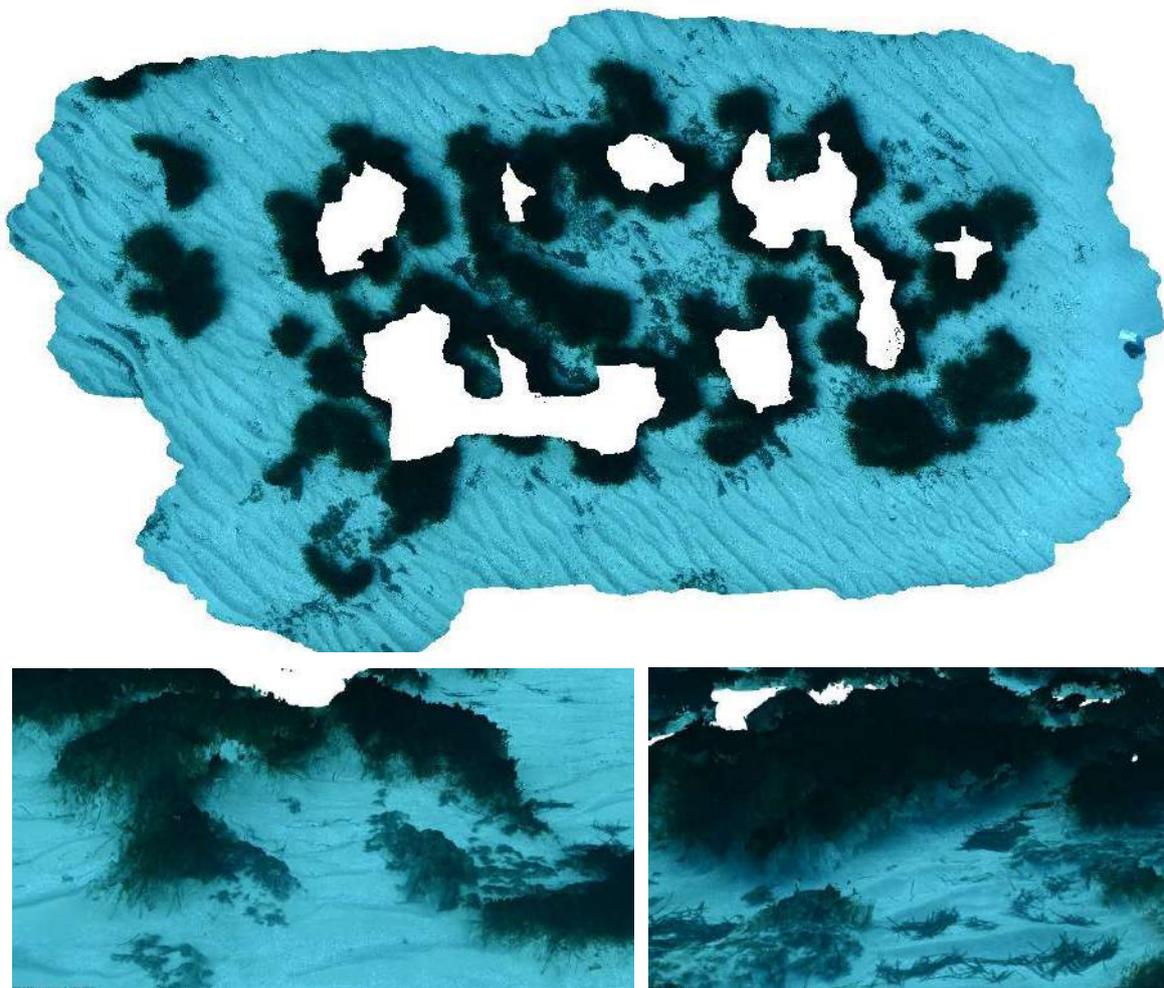


FIGURE 21 : MODELE DU SITE TEMPO « MORTOLI »

II.N. Plage Trottel

Le modèle 3D du site TEMPO « Plage Trottel » a été construit à partir de 1392 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

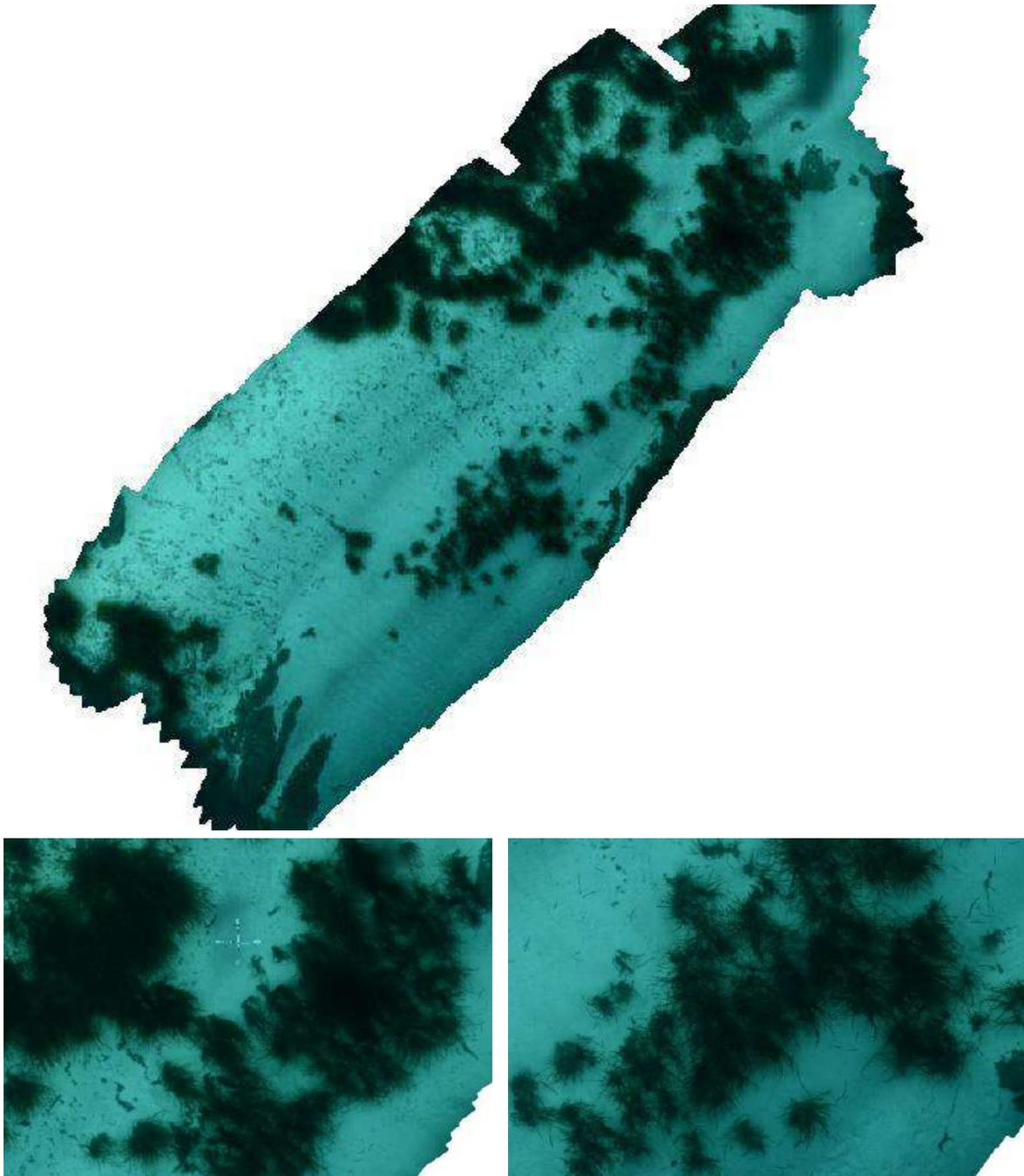


FIGURE 22 : MODELE DU SITE TEMPO « PLAGE TROTTTEL »

II.O. Punta Di Canella

Le modèle 3D du site TEMPO « Punta Di Canella » a été construit à partir de 813 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

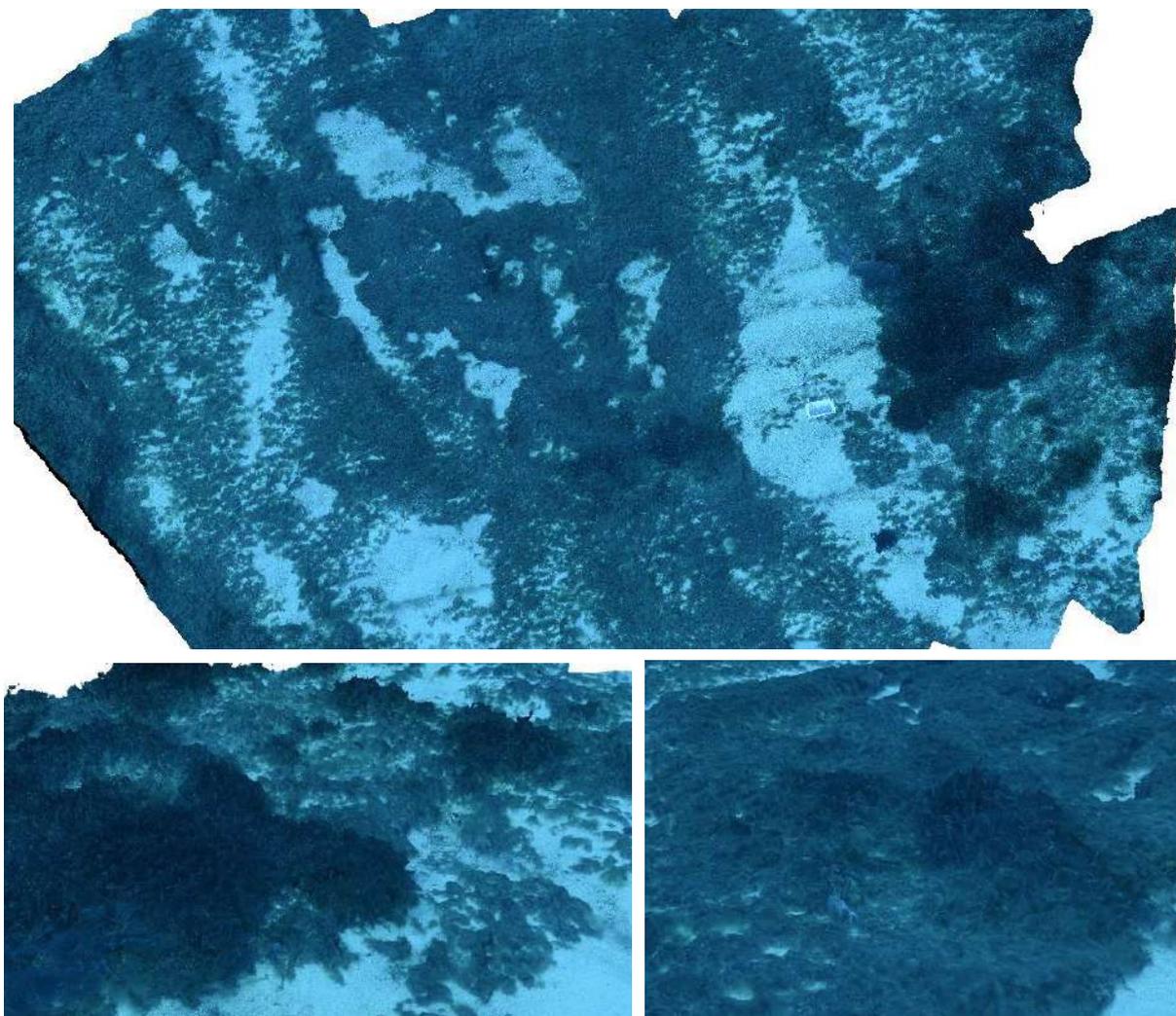


FIGURE 23 : MODELE DU SITE TEMPO « PUNTA DI CANELLA »

II.P. Punta Mortella

Le modèle 3D du site TEMPO « Punta Mortella » a été construit à partir de 1237 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

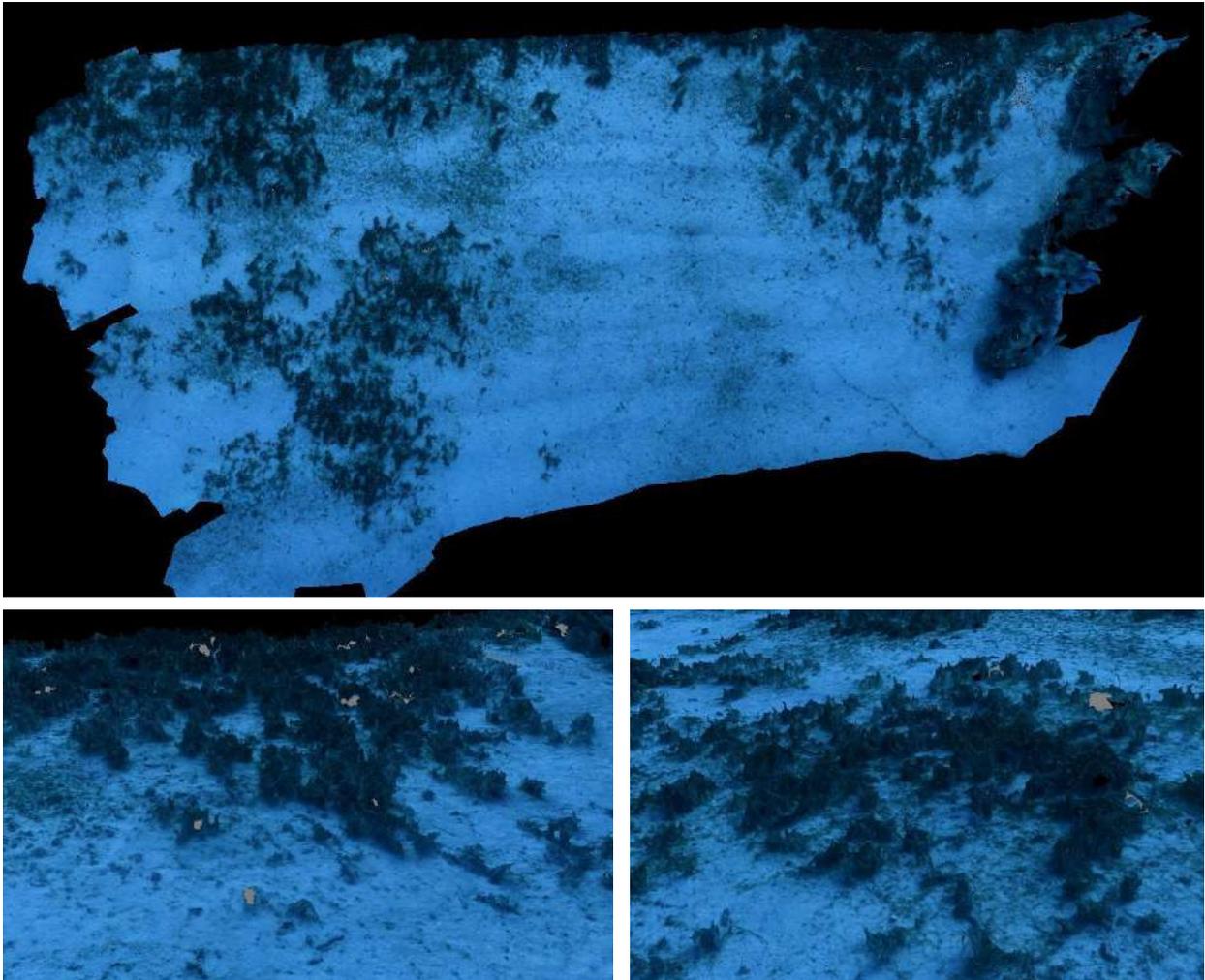


FIGURE 24 : MODELE DU SITE TEMPO « PUNTA MORTELLA »

II.Q. Punta Vaccaja

Le modèle 3D du site TEMPO « Punta Vaccaja » a été construit à partir de 1720 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

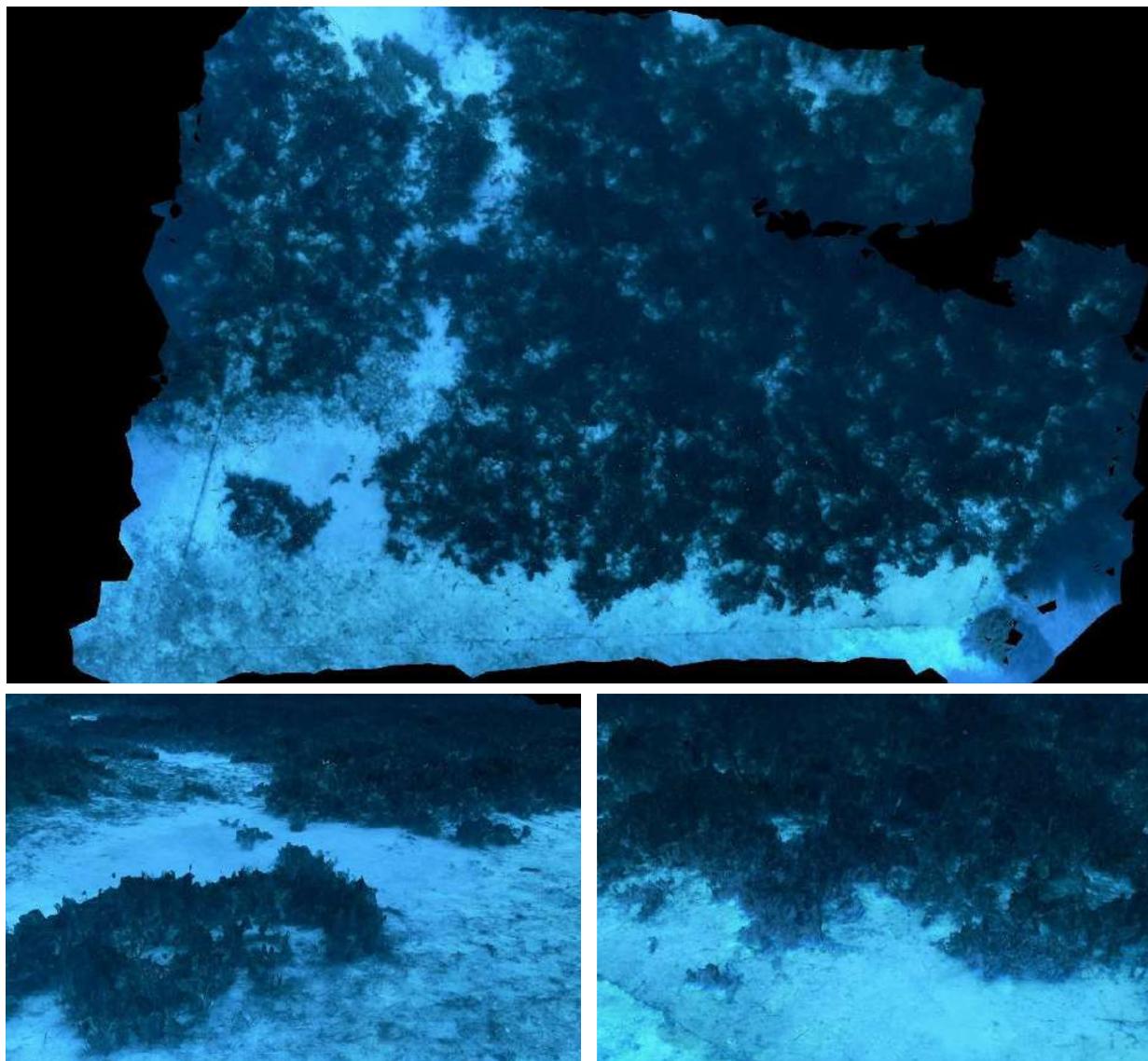


FIGURE 25 : MODELE DU SITE TEMPO « PUNTA VACCAJA »

II.R. Rondinara

Le modèle 3D du site TEMPO « Rondinara » a été construit à partir de 1175 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

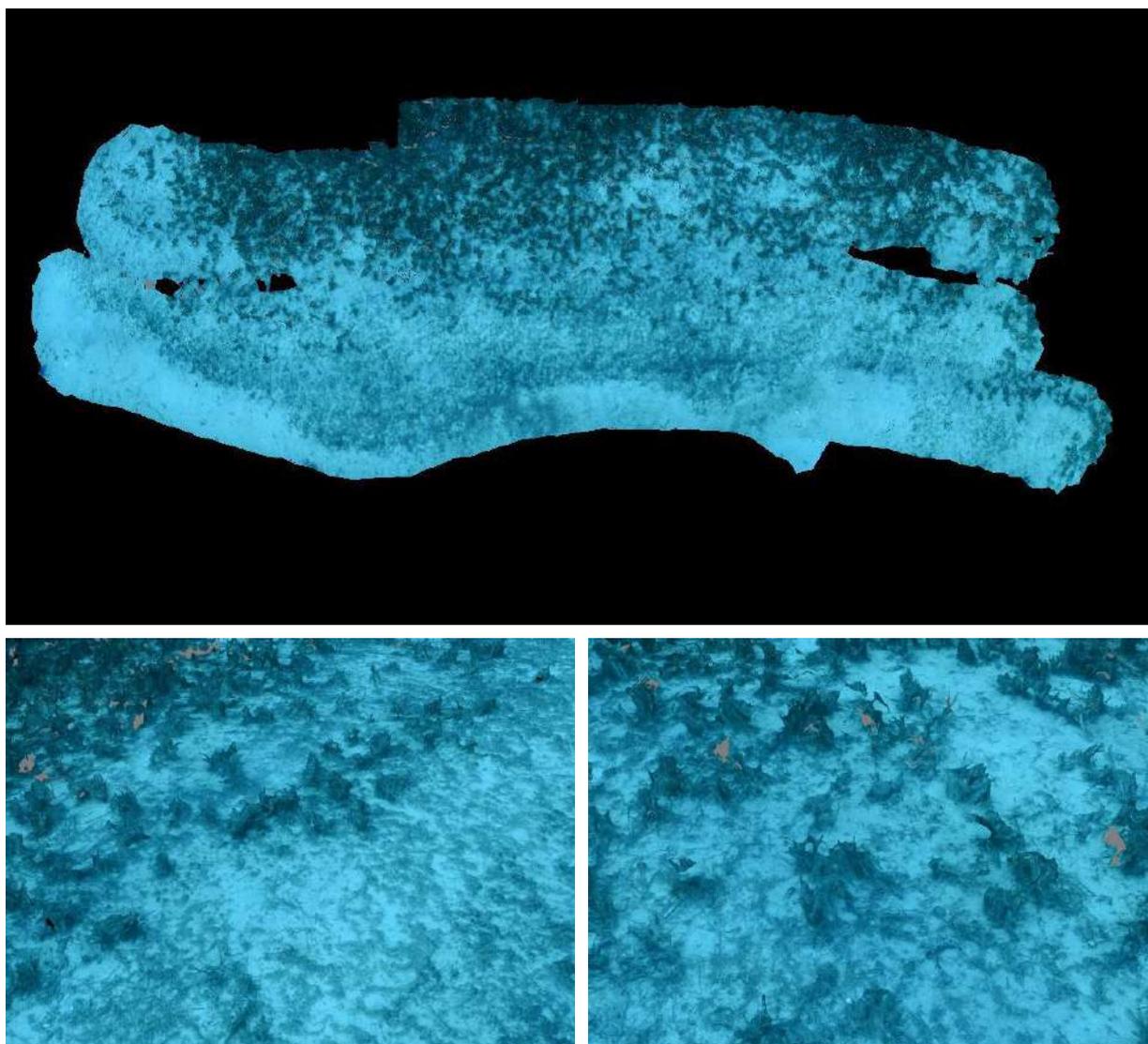


FIGURE 26 : MODELE DU SITE TEMPO « RONDINARA »

II.S. Sanguinaires

Le modèle 3D du site TEMPO « Sanguinaires » a été construit à partir de 591 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

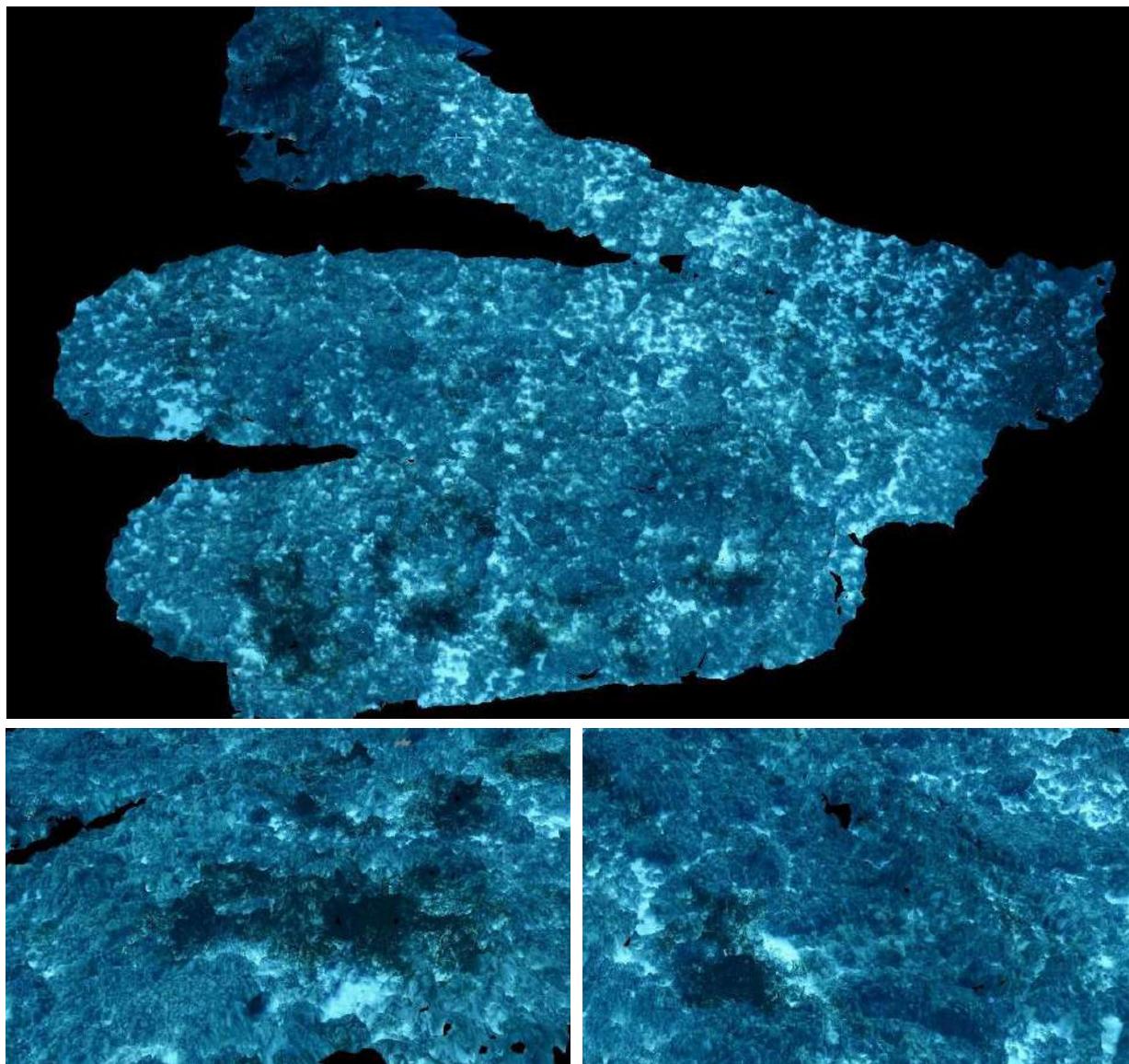


FIGURE 27 : MODELE DU SITE TEMPO « SANGUINAIRES »

II.T. Stareso

Le modèle 3D du site TEMPO « Stareso » a été construit à partir de 1009 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

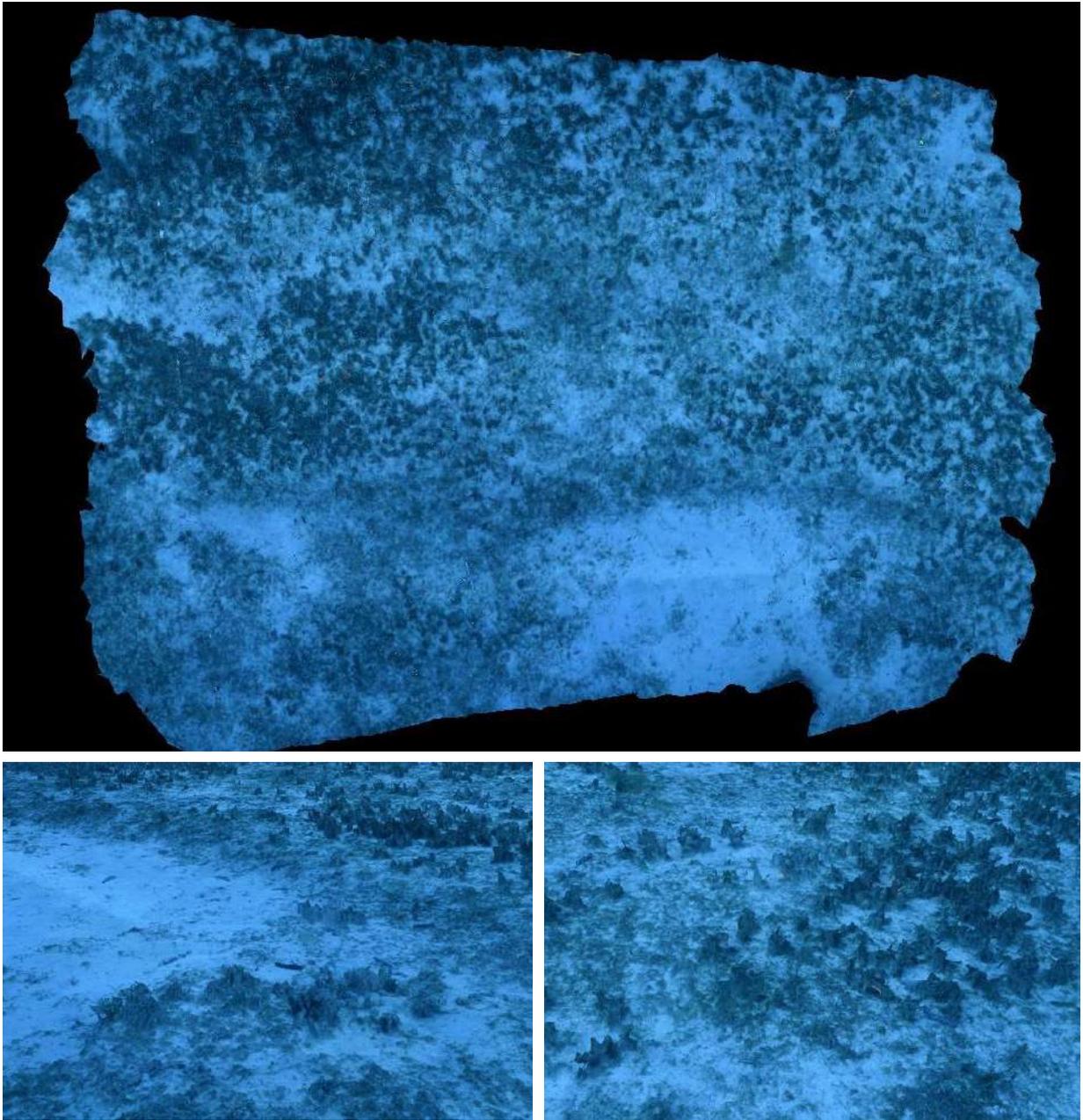


FIGURE 28 : MODELE DU SITE TEMPO « STARESO »

III. Sites de surveillance des récifs coralligènes – réseau RECOR

Le tableau ci-dessous synthétise, pour chaque site **RECOR** modélisé en 2020 (**22 sites**), l'adresse URL du modèle :

TABEAU 2 : ADRESSES URL DES MODELES 3D DES SITES RECOR 2020.

Nom du site	URL
Atoll 1 (PNMCCA)	https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Atoll_1/App
Agriates	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Agriates_60/App
Agriates Est (PNMCCA)	https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Agriates_Est/App
Agriates Sud (PNMCCA)	https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Agriates_Sud_CR_jour14/App
Bastia	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Bastia_60/App
Canari (PNMCCA)	https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Canari/App
Cappu Rosso	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Cappu-Rosso_65/App
Cargese	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Cargese_60/App
Centuri	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Centuri/App
Corailleurs	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Corailleurs_55/App
Lavezzi	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Lavezzi_50/App
Macinaggio	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Macinaggio_65/App
Mortoli	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Mortoli/App
Morsiglia (PNMCCA)	https://www.andromede-ocean3d.com/PNMCCA/2020/Morsiglia/App
Parata	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Parata_60/App
Revelatta	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Revelatta_55/App
Sanguinaires	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Sanguinaires_60/App
Scandola-4	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Scandola-4_60/App
Senetosa	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Senetosa_50/App
Saint Florent	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/St_Florent_60/App
Tarco	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Tarco_50/App
Vacca	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Vacca/App

La mention PNMCCA visibles sur les pages suivantes fait référence aux sites localisés dans le Parc naturel marin du Cap Corse et de l'Agriate.

III.A. Atoll 1 (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Atoll 1 » (PNMCCA) a été construit à partir de 142 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

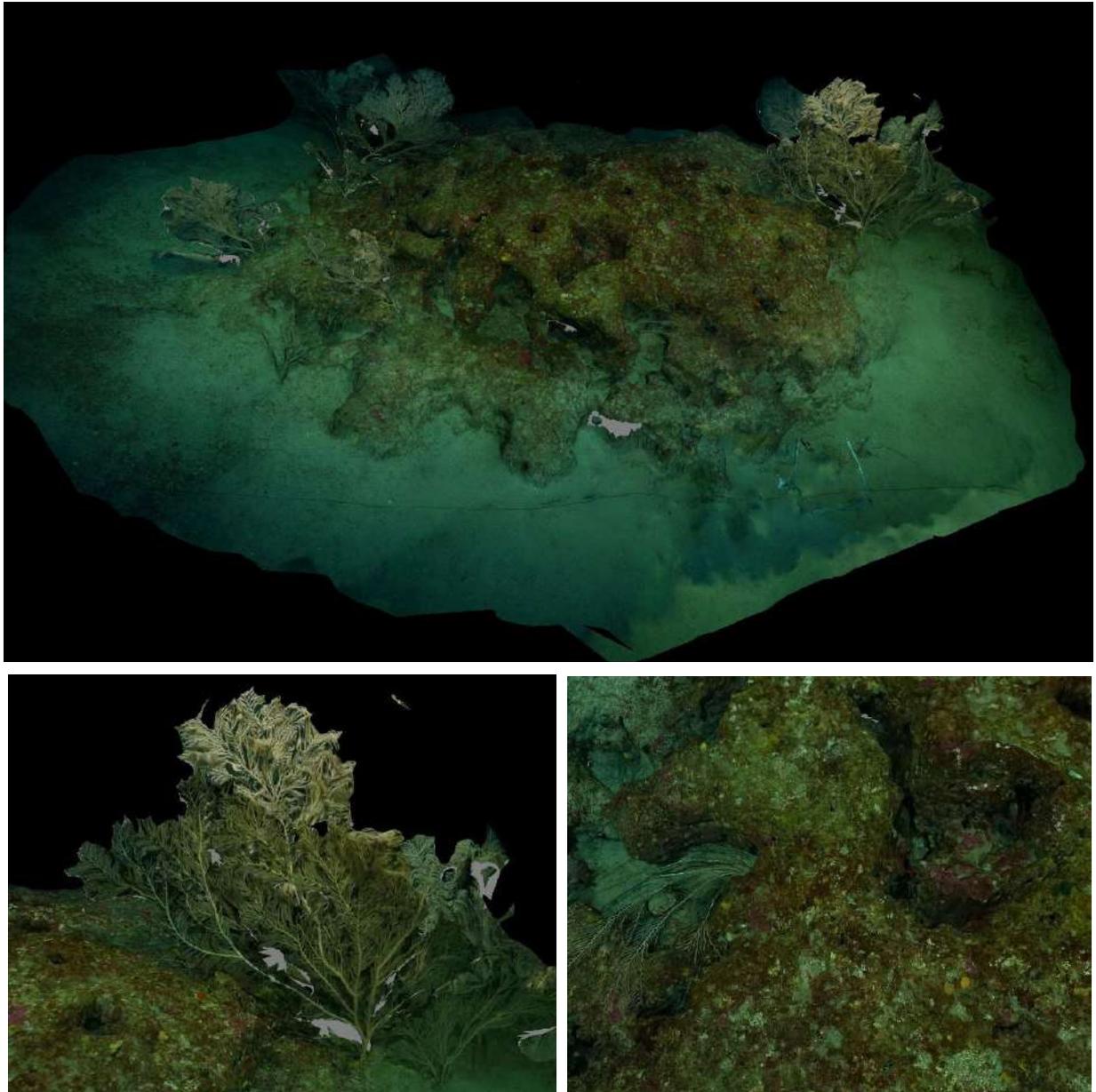


FIGURE 29 : MODELE DU SITE RECOR « ATOLL 1 »

III.B. Agriates

Le modèle 3D du site RECOR « Agriates » a été construit à partir de 823 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

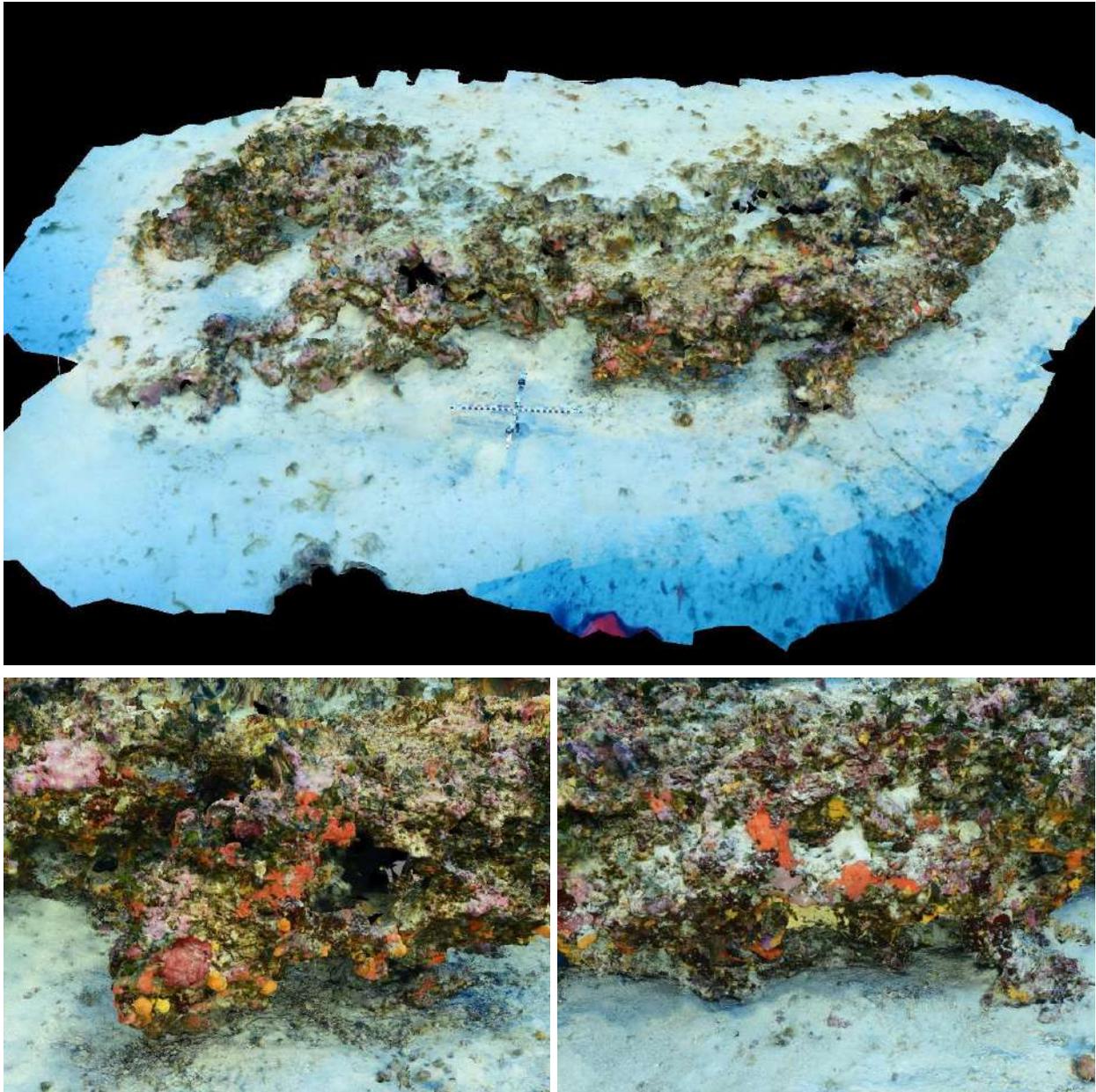


FIGURE 30 : MODELE DU SITE RECOR « AGRIATES »

III.C. Agriates Est (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Agriates Est » (PNMCCA) a été construit à partir de 575 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

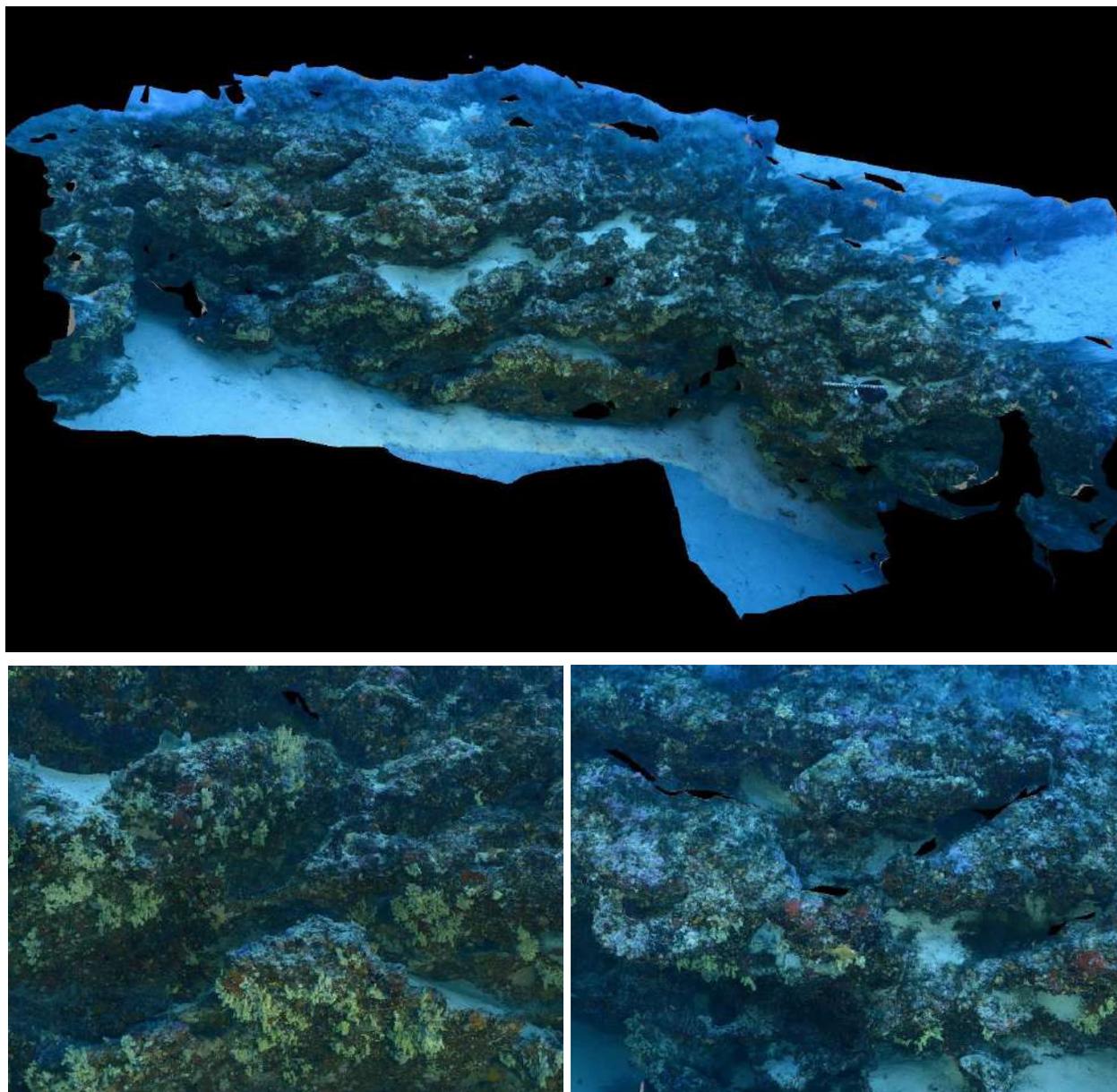


FIGURE 31 : MODELE DU SITE RECOR « AGRIATES EST »

III.D. Agriates Sud (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Agriates Sud » a été construit à partir de 819 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

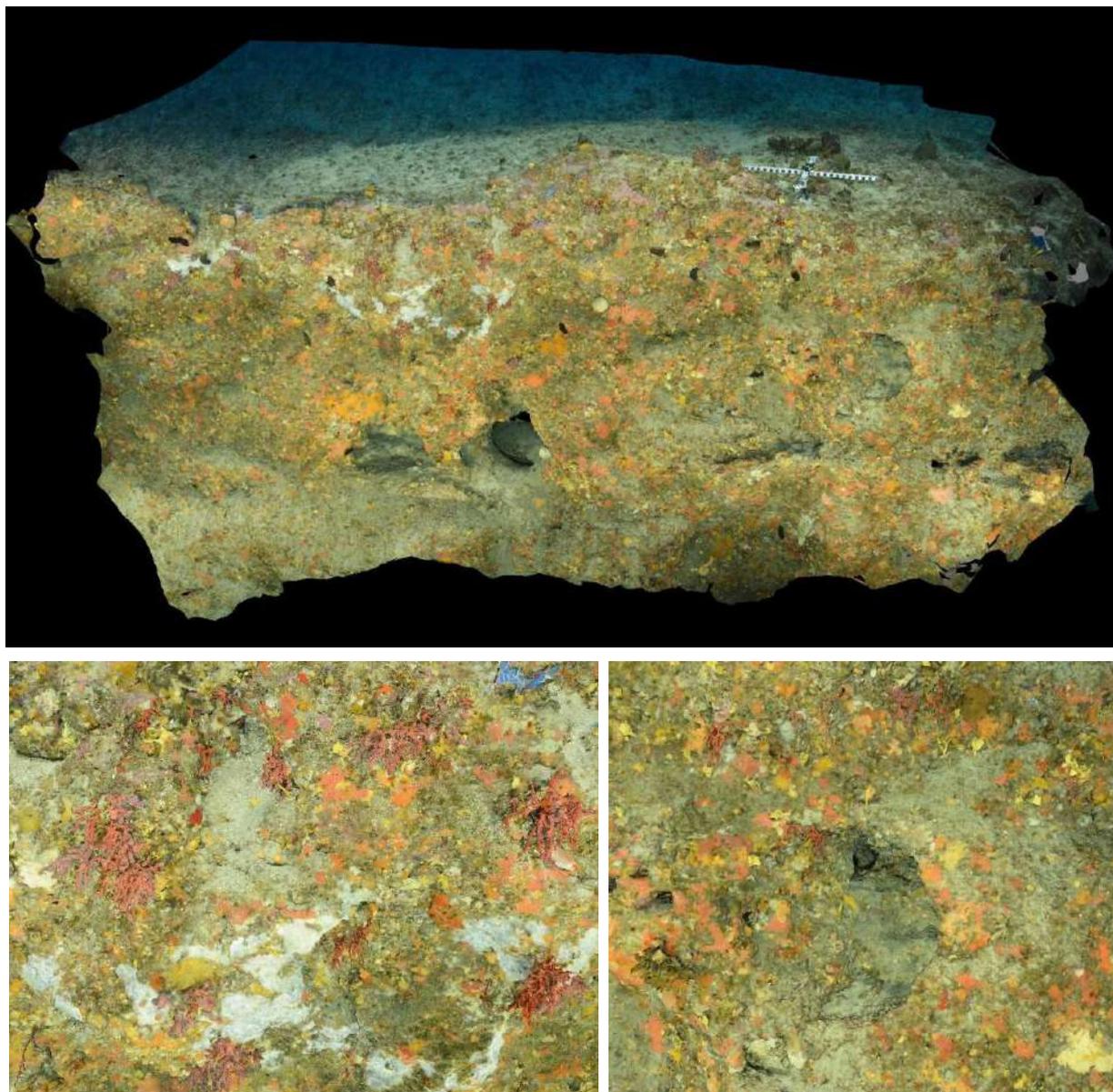


FIGURE 32 : MODELE DU SITE RECOR « AGRIATES SUD »

III.E. Bastia

Le modèle 3D du site RECOR « Bastia » a été construit à partir de 654 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

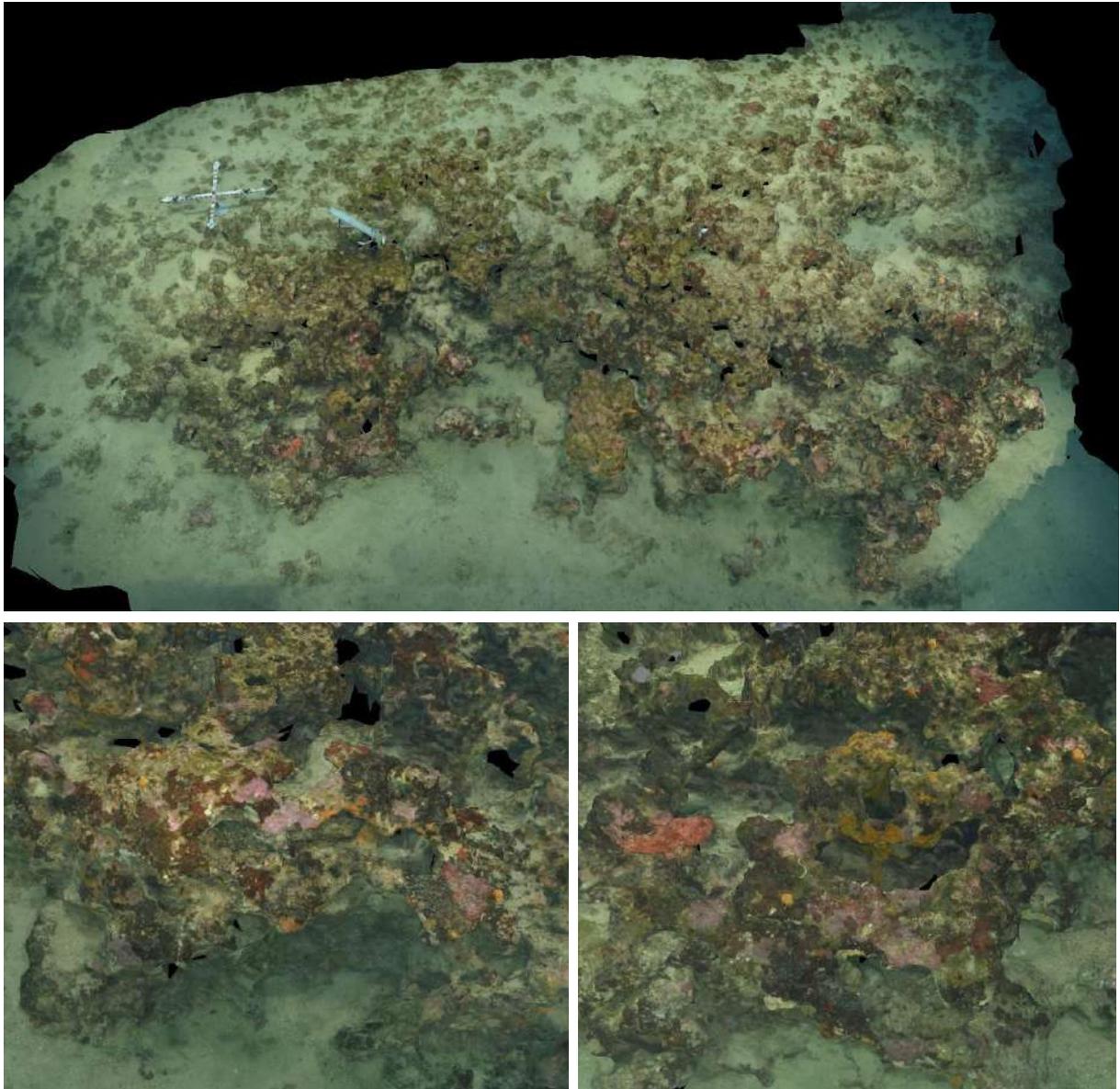


FIGURE 33 : MODELE DU SITE RECOR « BASTIA »

III.F. Canari (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Canari » (PNMCCA) a été construit à partir de 783 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

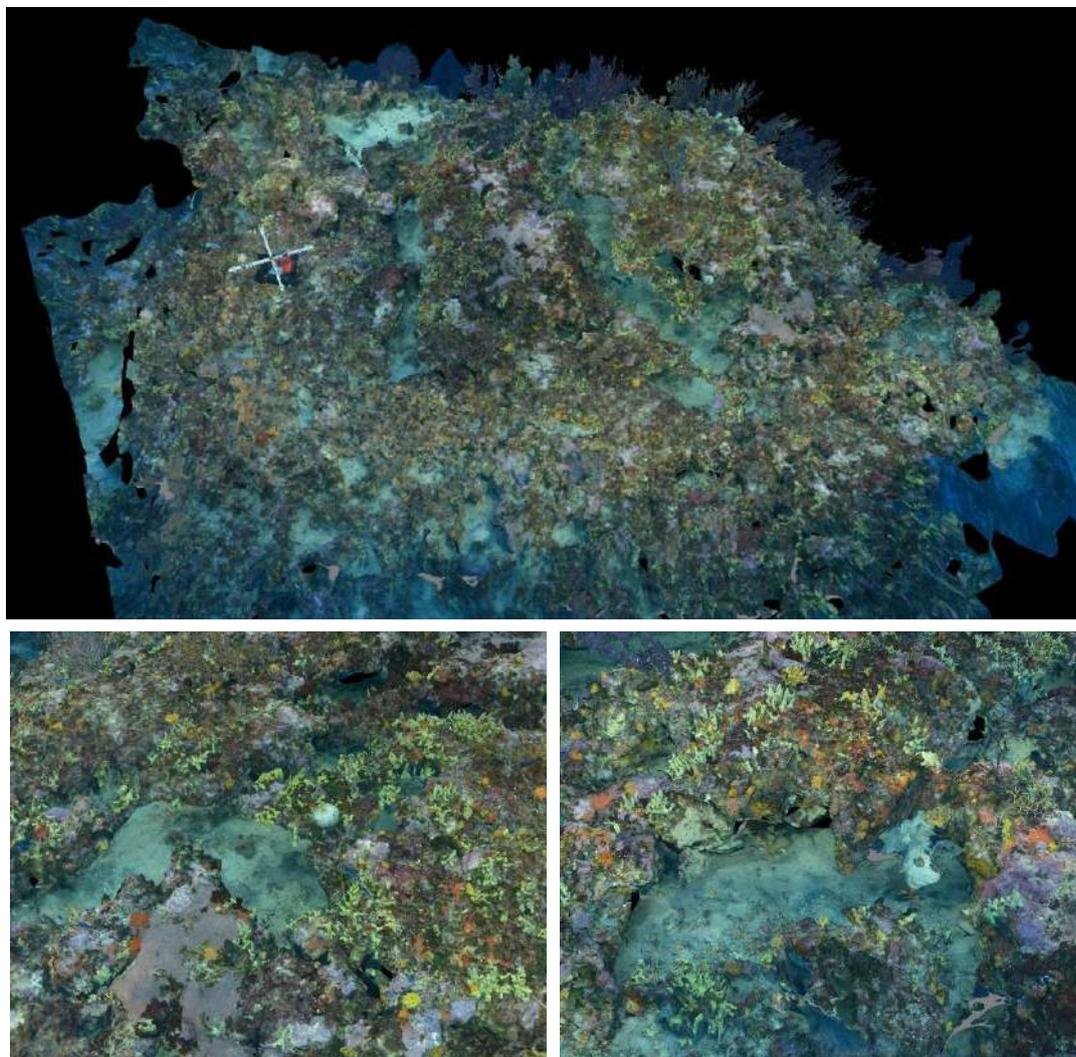


FIGURE 34 : MODELE DU SITE RECOR « CANARI »

III.G. Cappu Rosso

Le modèle 3D du site RECOR « Cappu Rosso » a été construit à partir de 543 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

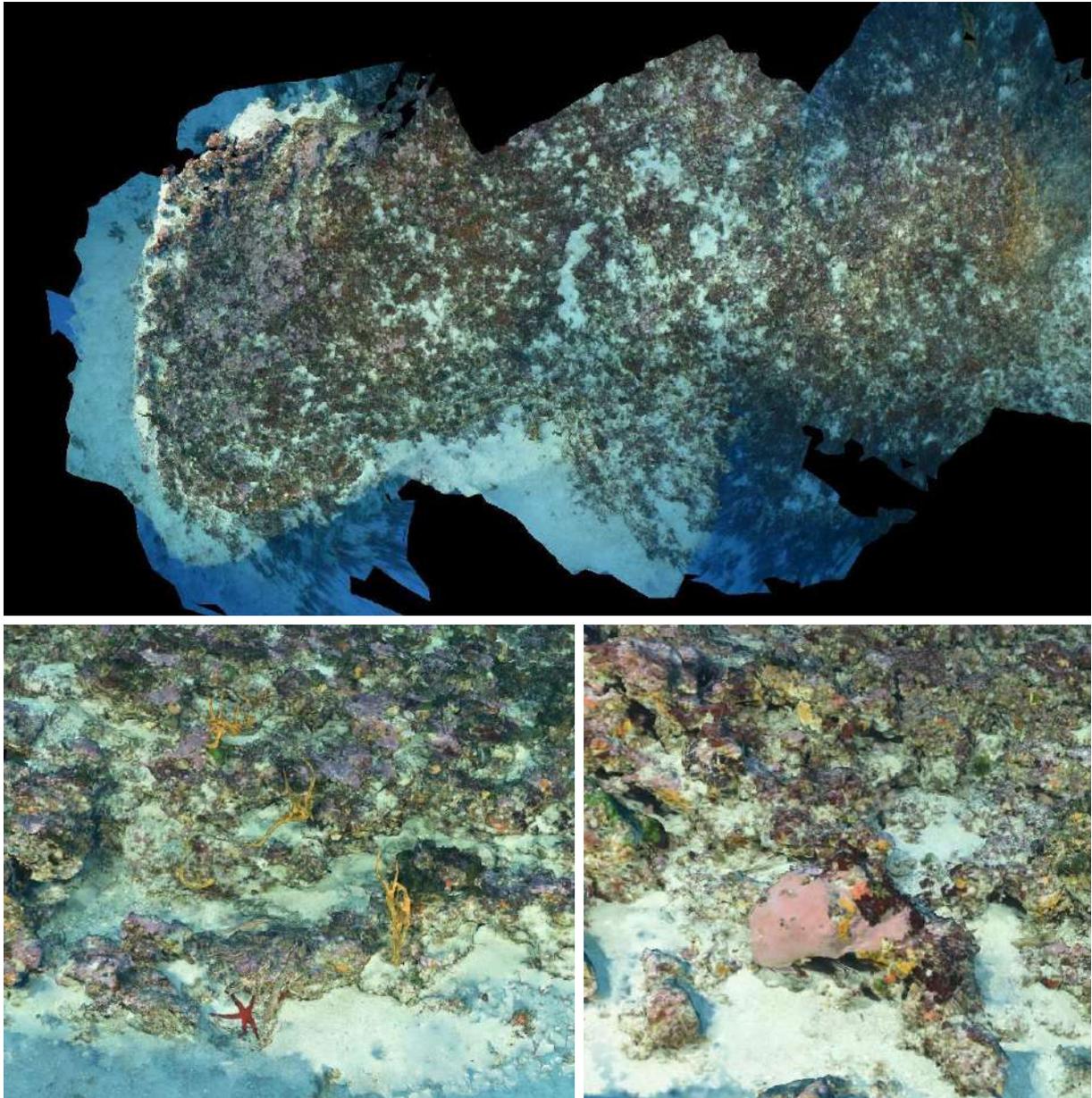


FIGURE 35 : MODELE DU SITE RECOR « CAPPU ROSSO »

III.H. Cargese

Le modèle 3D du site RECOR « Cargese » a été construit à partir de 378 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

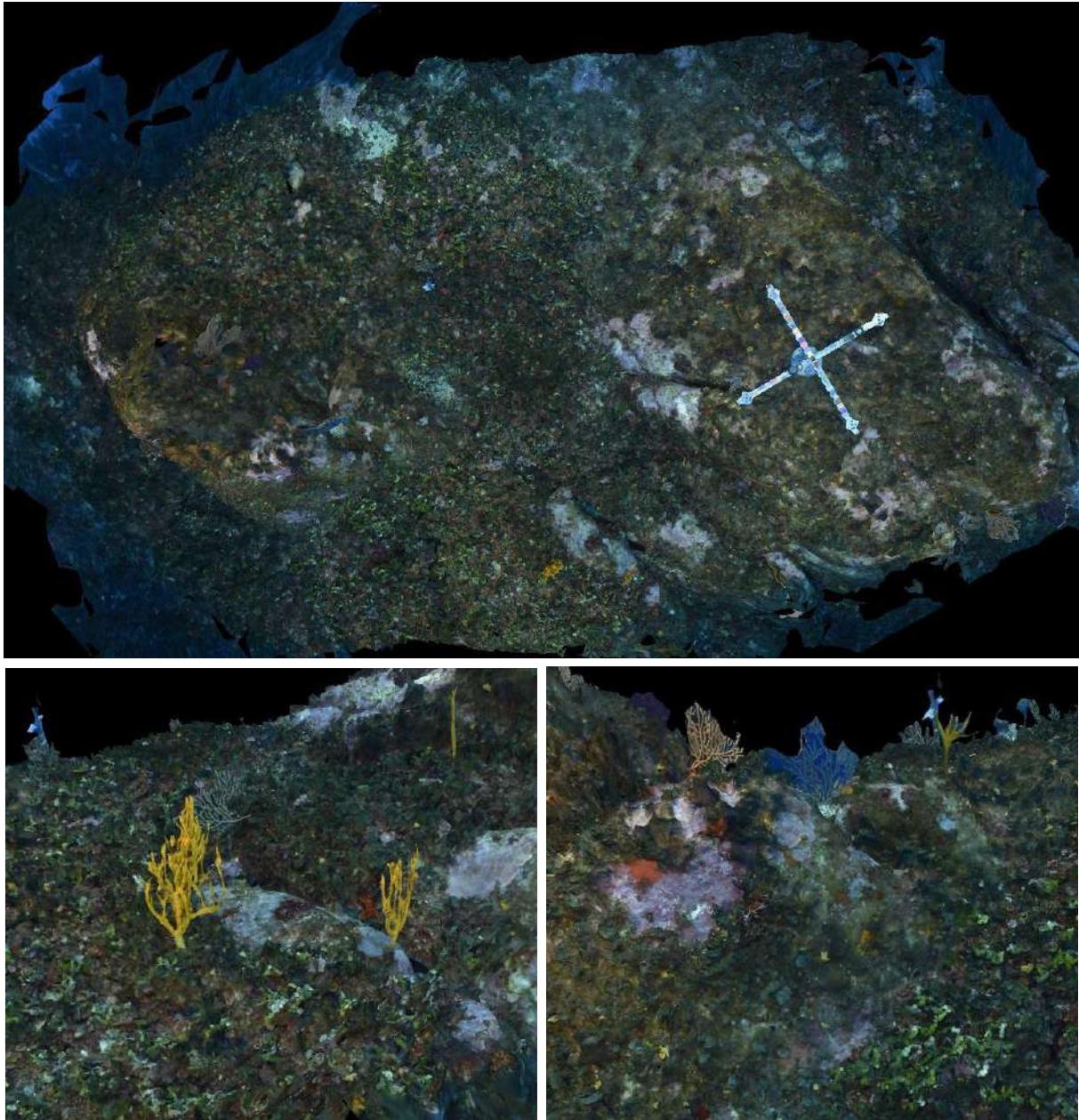


FIGURE 36 : MODELE DU SITE RECOR « CARGESE »

III.I. Centuri

Le modèle 3D du site RECOR « Centuri » a été construit à partir de 1101 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

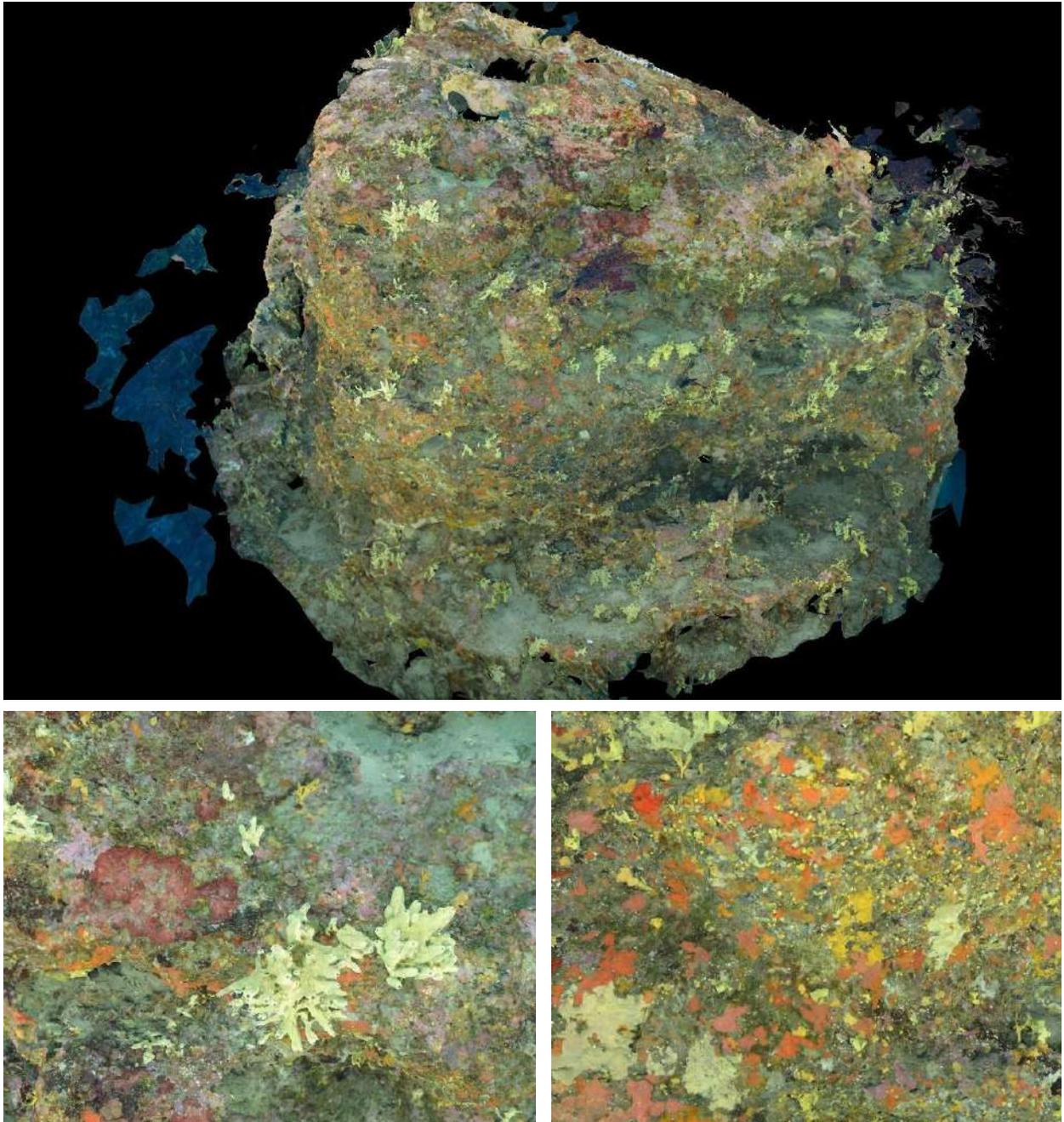


FIGURE 37 : MODELE DU SITE RECOR « CENTURI »

III.J. Corailleurs

Le modèle 3D du site RECOR « Corailleurs » a été construit à partir de 716 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

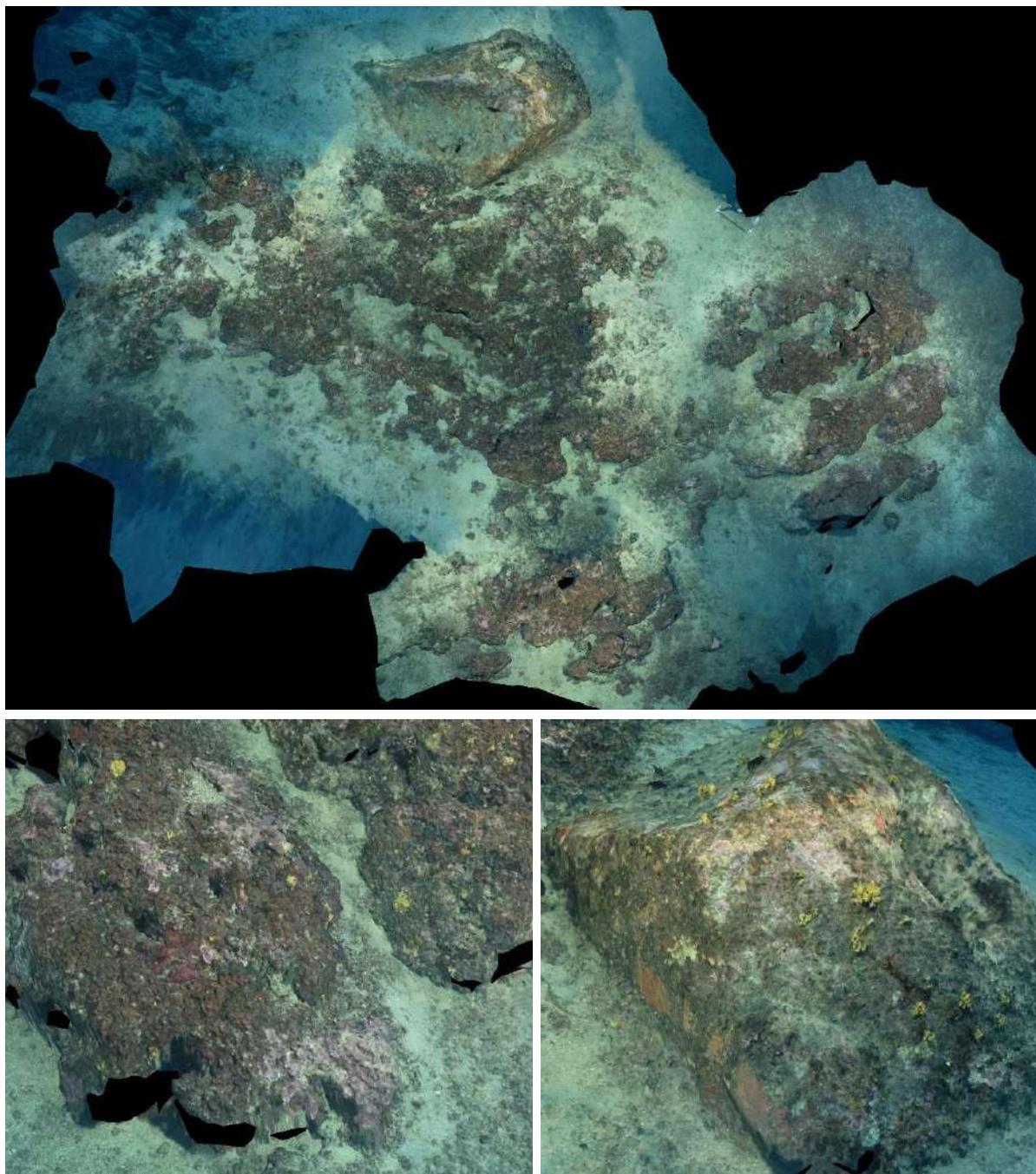


FIGURE 38 : MODELE DU SITE RECOR « CORAILLEURS »

III.K. Lavezzi

Le modèle 3D du site RECOR « Lavezzi » a été construit à partir de 1530 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

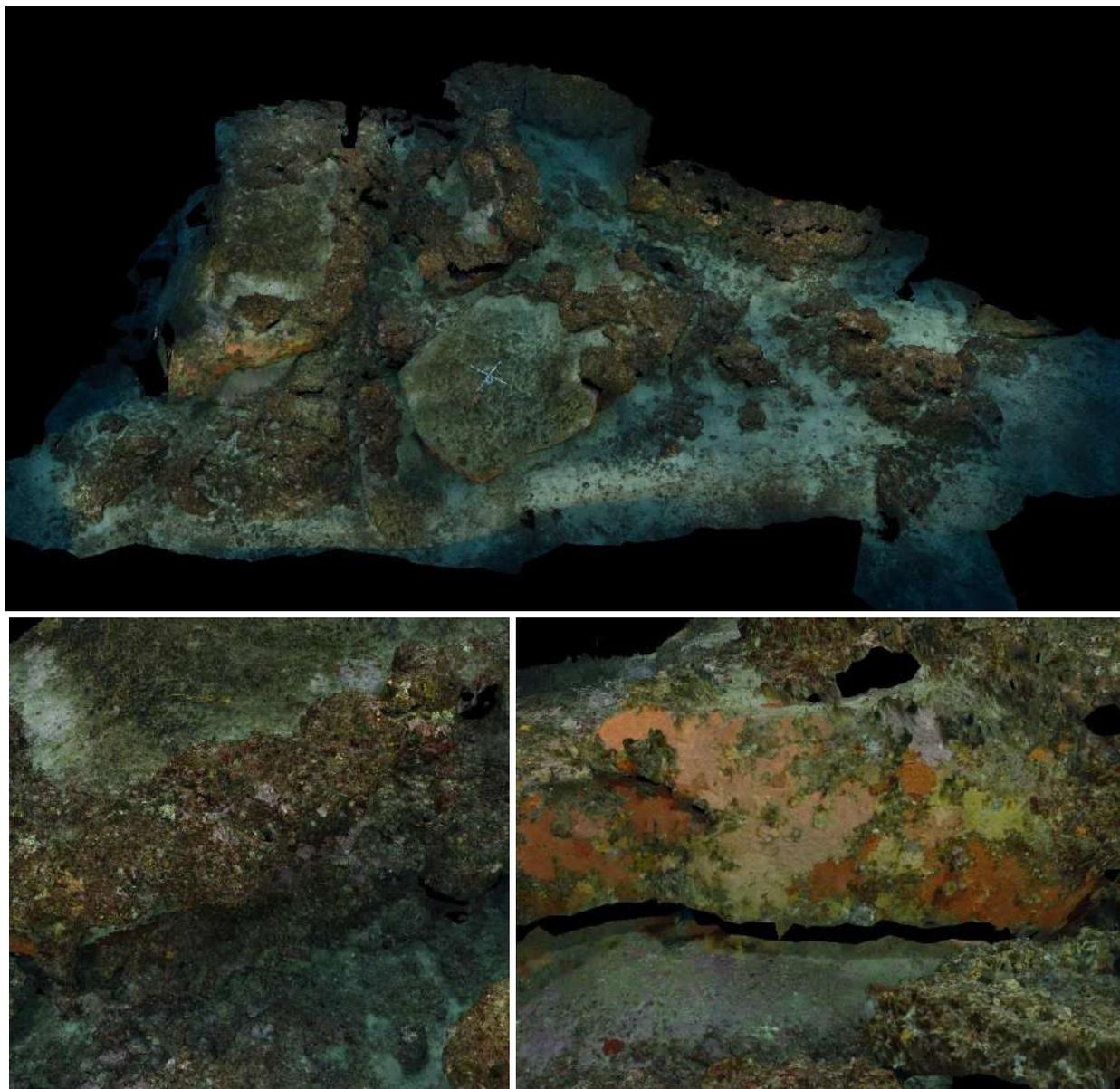


FIGURE 39 : MODELE DU SITE RECOR « LAVEZZI »

III.L. Macinaggio

Le modèle 3D du site RECOR « Macinaggio » a été construit à partir de 1010 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

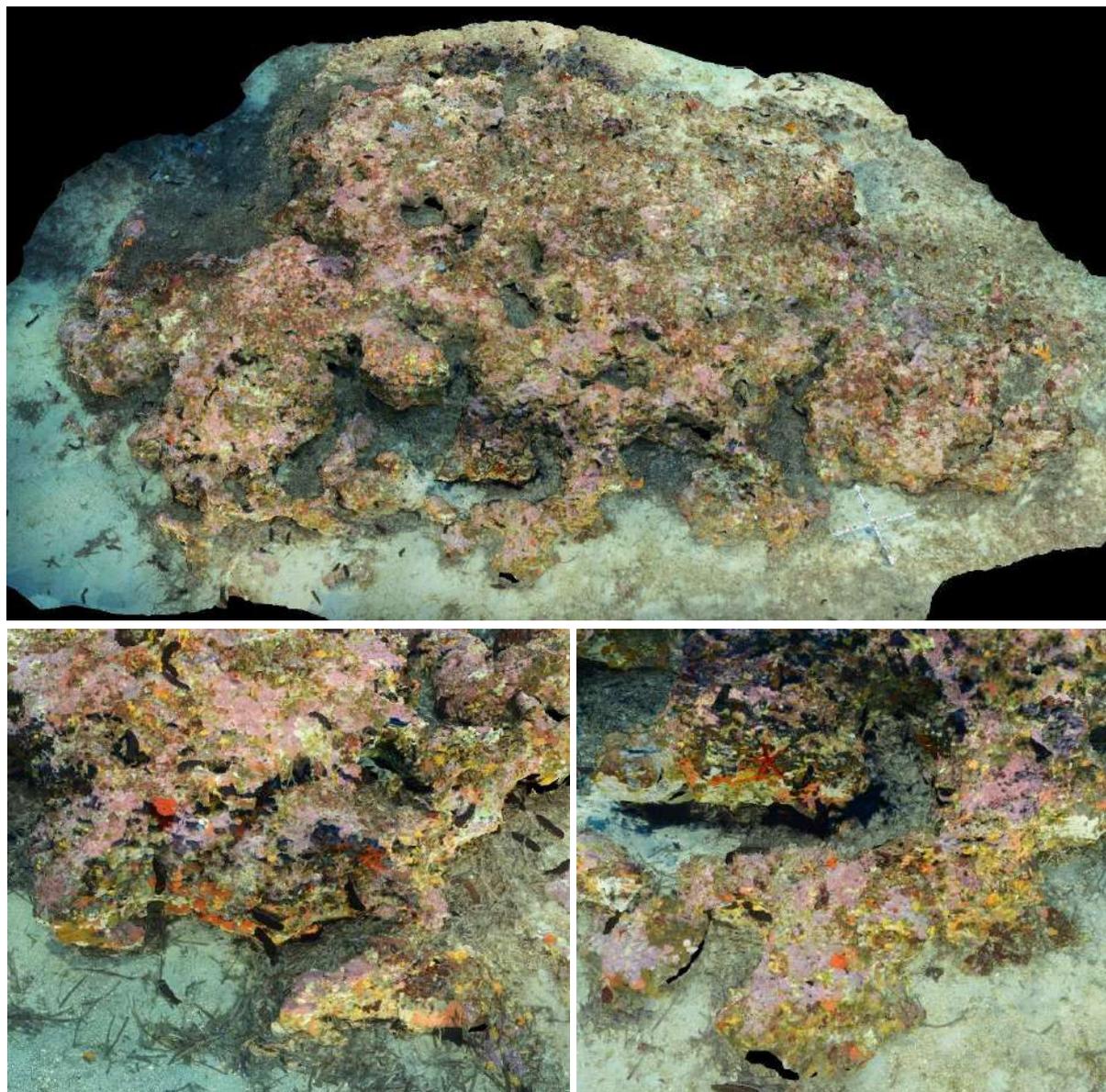


FIGURE 40 : MODELE DU SITE RECOR « MACINAGGIO »

III.M. Mortoli

Le modèle 3D du site RECOR « Mortoli » a été construit à partir de 1377 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

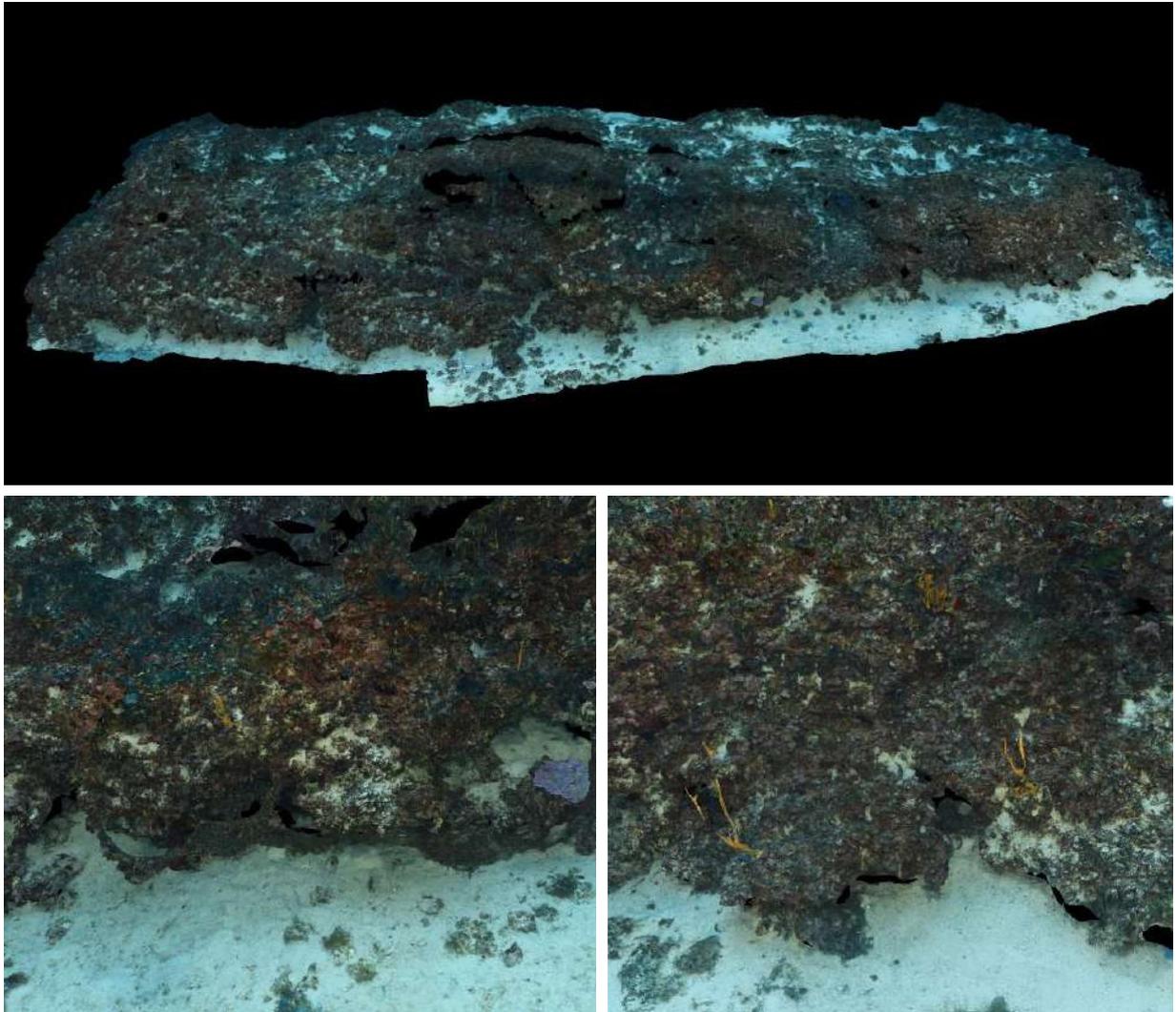


FIGURE 41 : MODELE DU SITE RECOR « MORTOLI »

III.N. Morsiglia (PNMCCA)

Le modèle 3D du site RECOR « Morsiglia » a été construit à partir de 608 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

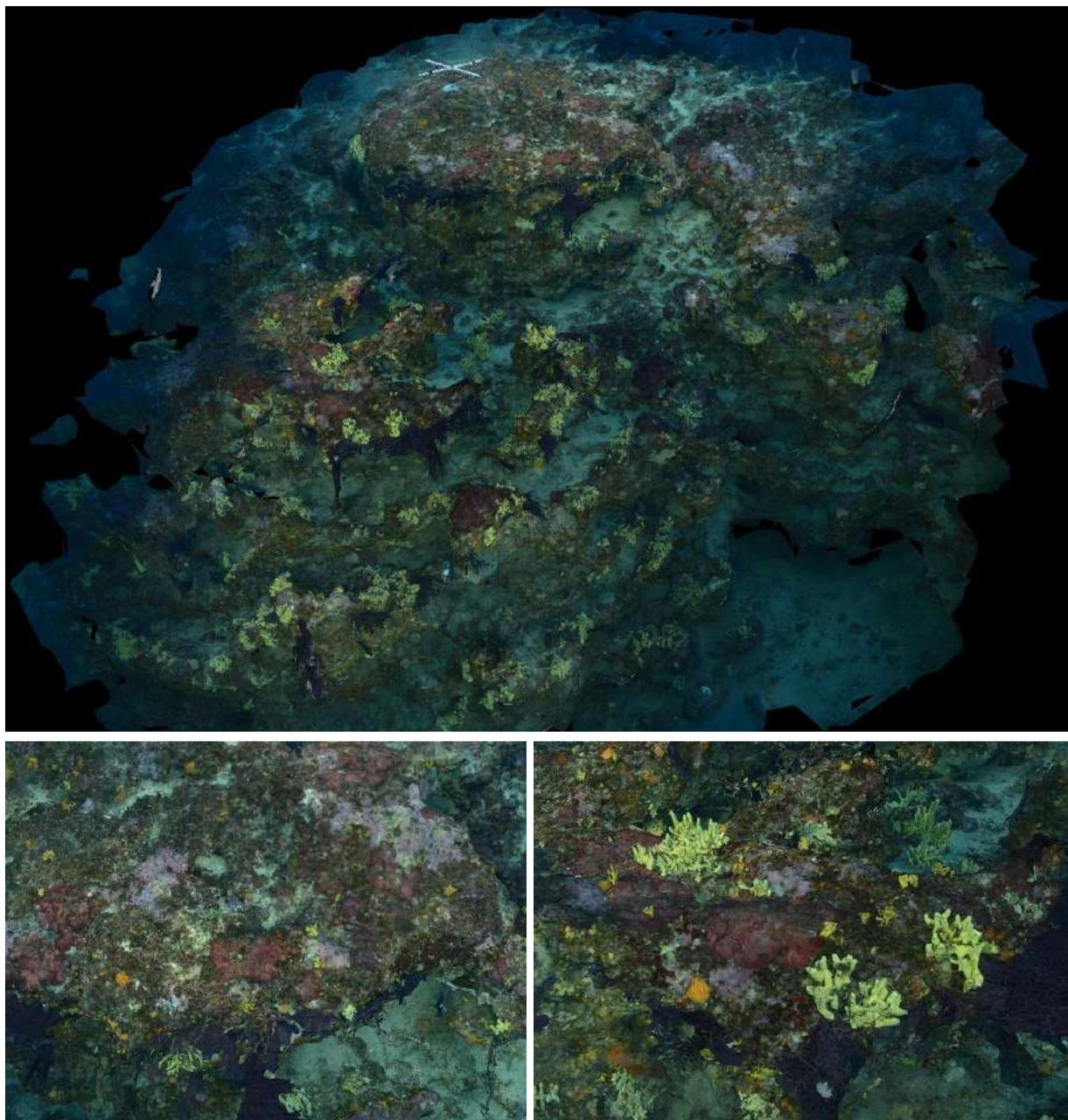


FIGURE 42 : MODELE DU SITE RECOR « MORSIGLIA »

III.O. Parata

Le modèle 3D du site RECOR « Parata » a été construit à partir de 613 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

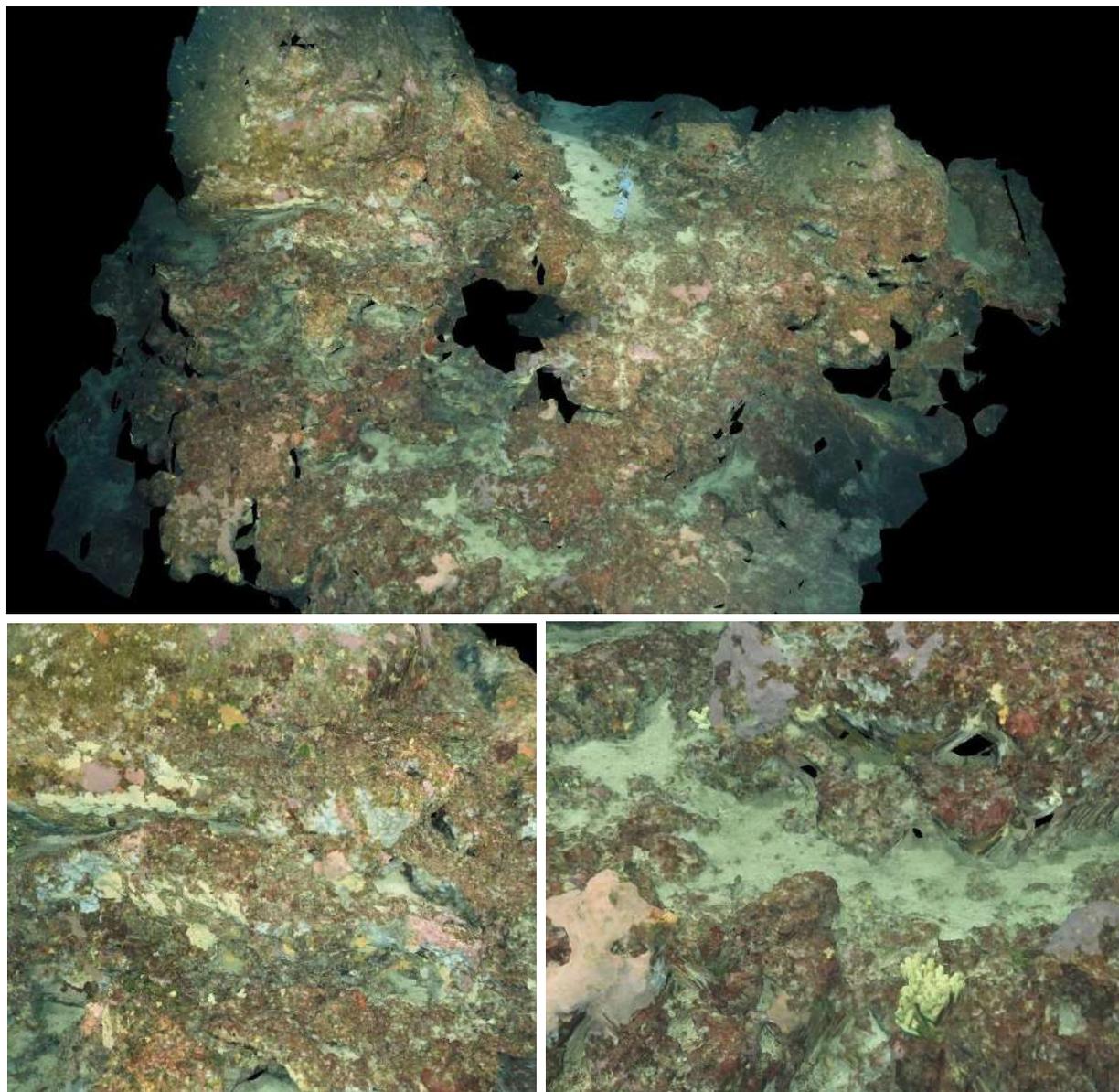


FIGURE 43 : MODELE DU SITE RECOR « PARATA »

III.P. Revelatta

Le modèle 3D du site RECOR « Revelatta » a été construit à partir de 864 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

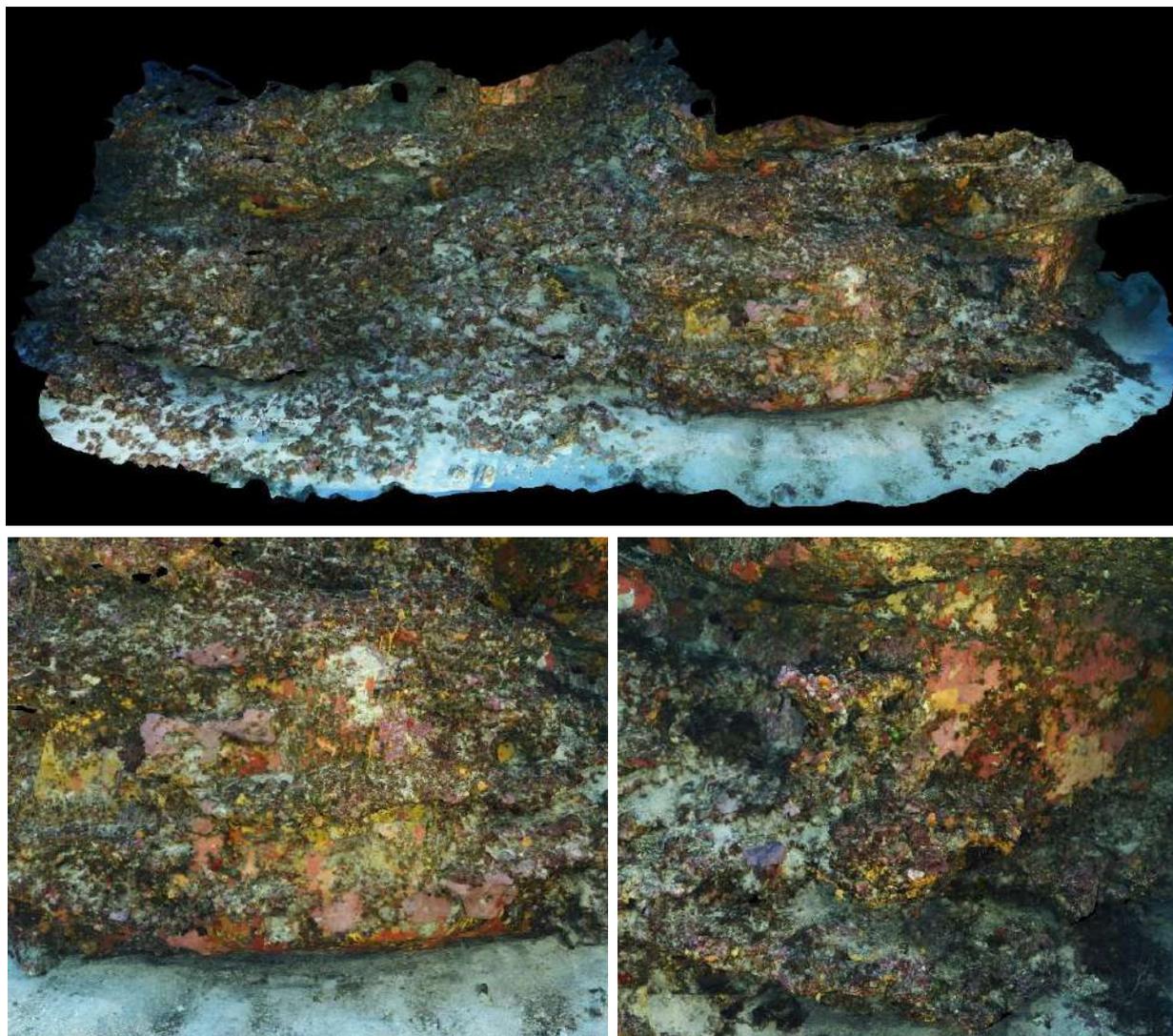


FIGURE 44 : MODELE DU SITE RECOR « REVELATTA »

III.Q. Sanguinaires

Le modèle 3D du site RECOR « Sanguinaires » a été construit à partir de 807 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

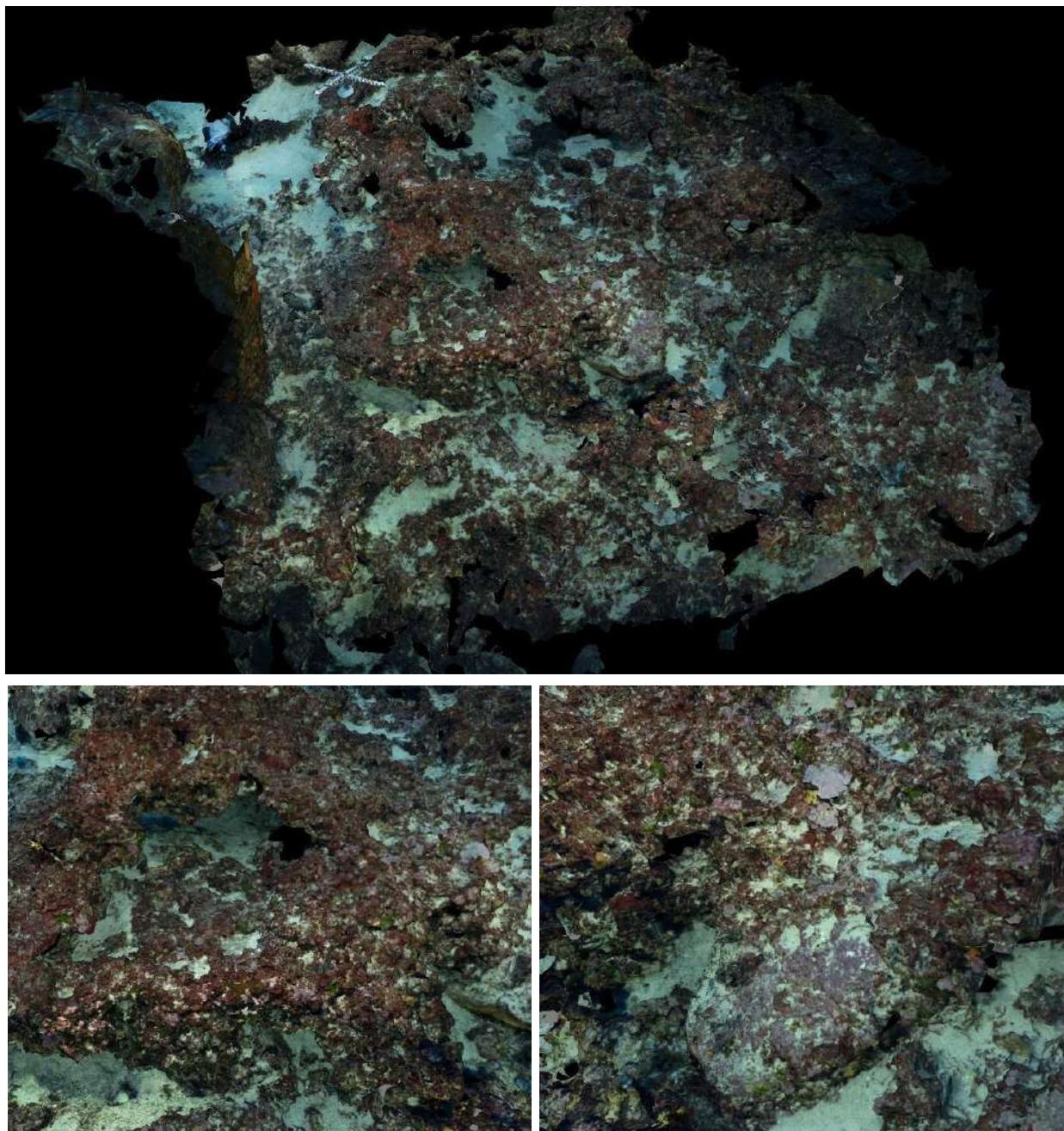


FIGURE 45 : MODELE DU SITE RECOR « SANGUINAIRES »

III.R. Scandola-4

Le modèle 3D du site RECOR « Scandola-4 » a été construit à partir de 1057 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

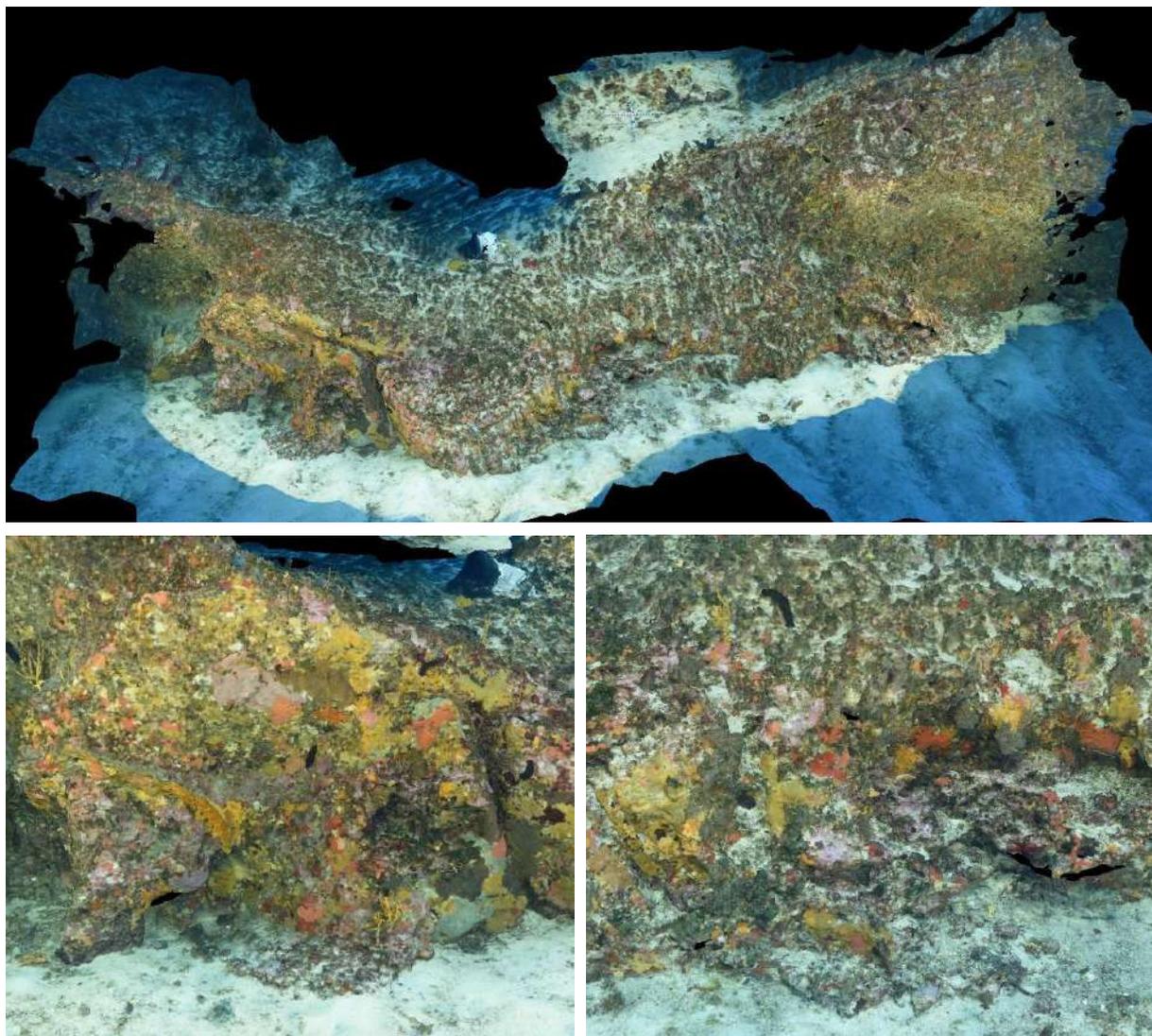


FIGURE 46 : MODELE DU SITE RECOR « SCANDOLA-4 »

III.S. Senetosa

Le modèle 3D du site RECOR « Senetosa » a été construit à partir de 876 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

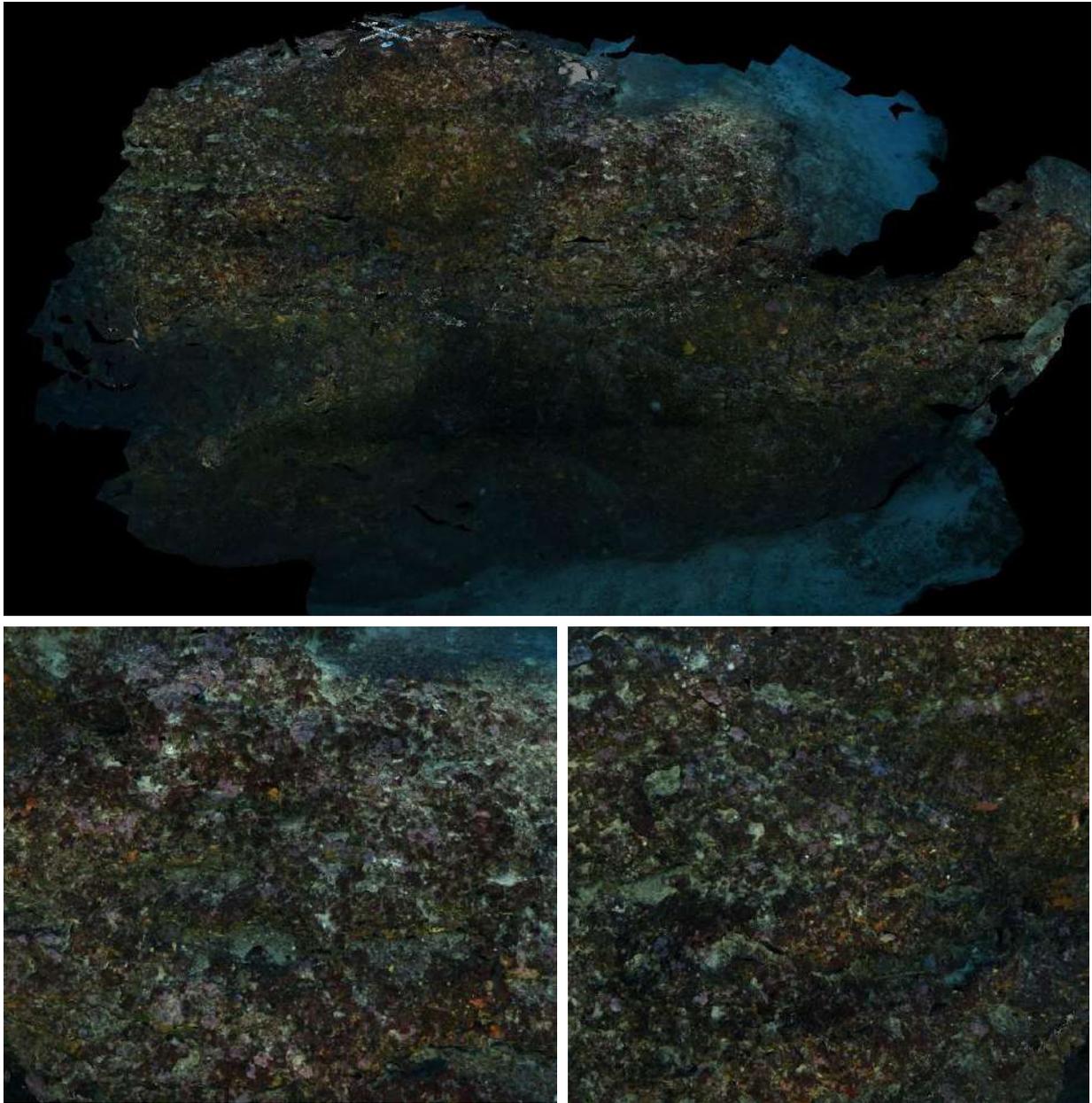


FIGURE 47 : MODELE DU SITE RECOR « SENETOSA »

III.T. Saint Florent

Le modèle 3D du site RECOR « Saint Florent » a été construit à partir de 1716 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

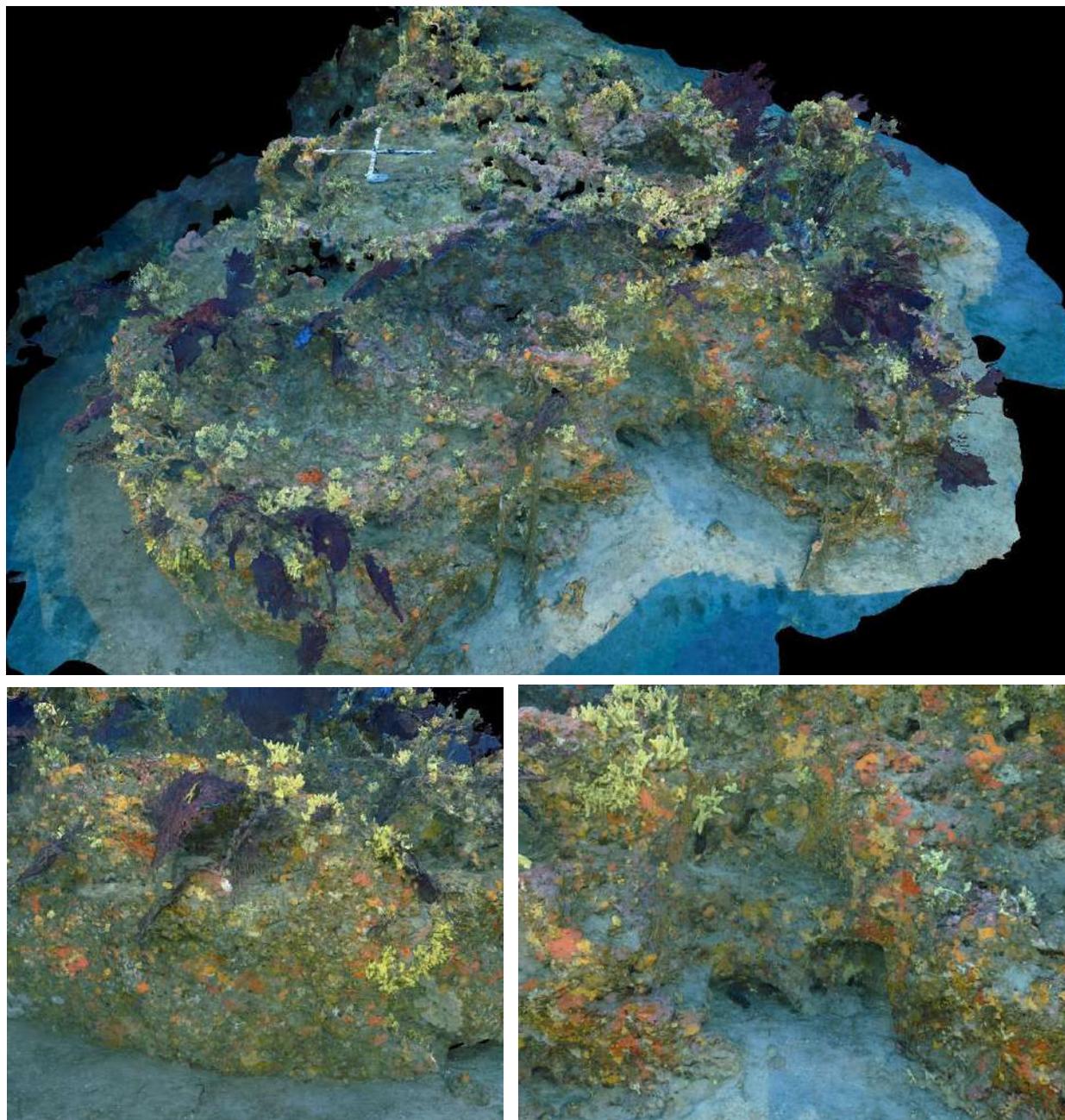


FIGURE 48 : MODELE DU SITE RECOR « SAINT FLORENT »

III.U. Tarco

Le modèle 3D du site RECOR « Tarco » a été construit à partir de 668 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

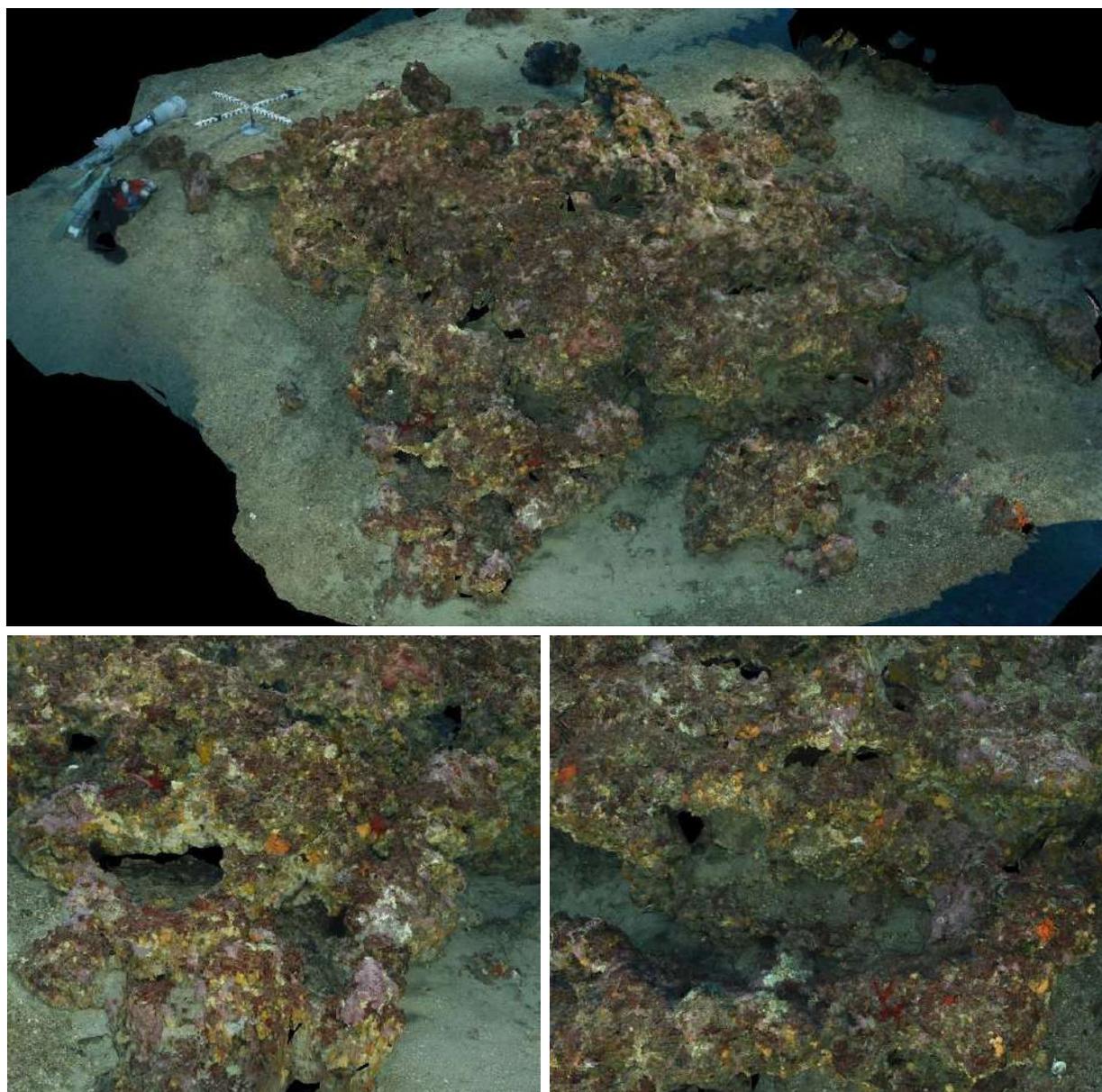


FIGURE 49 : MODELE DU SITE RECOR « TARCO »

III.V. Vacca

Le modèle 3D du site RECOR « Vacca » a été construit à partir de 1297 photos. La figure ci-après montre une vue d'ensemble du site ainsi que deux zooms sur une portion du modèle.

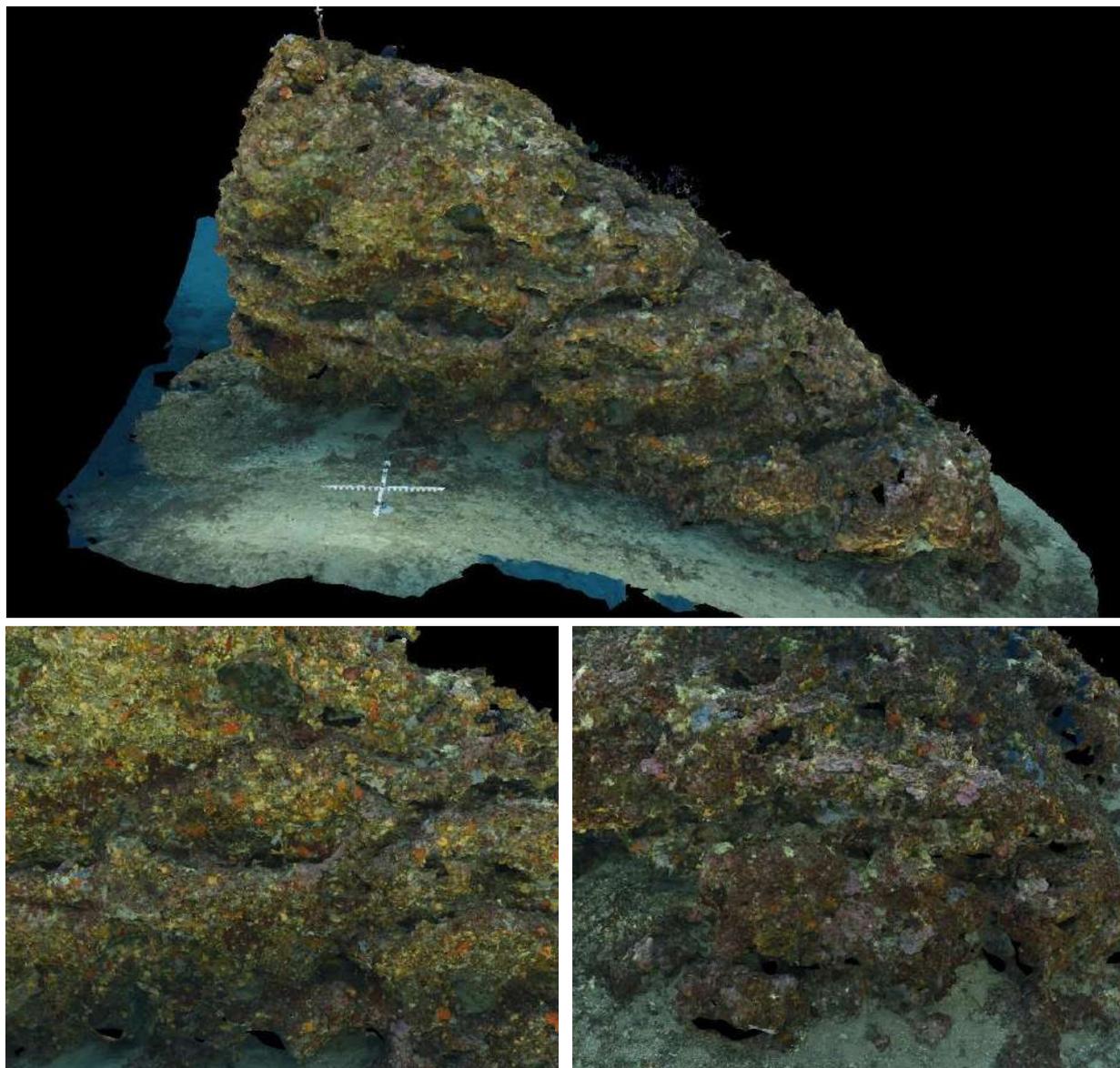


FIGURE 50 : MODELE DU SITE RECOR « VACCA »

Chapitre 2

Caractérisation et suivi des récifs coralligènes par photogrammétrie



Ce chapitre présente les développements méthodologiques concernant les suivis spatio-temporels de récifs coralligènes par photogrammétrie, notamment l'étude de leur structure en lien avec leur biodiversité. Les détails concernant l'étude de la structure des récifs coralligènes sont disponibles dans le 4^{ème} chapitre de la [thèse de Guilhem Marre](#) (Andromède Océanologie / UMR TETIS / UMR MARBEC).

Chapitre 2 : Caractérisation et suivi des récifs coralligènes par photogrammétrie

I. Caractérisation structurelle des récifs

I.A. Contexte et objectifs

Plusieurs études ont montré qu'il existait un lien entre la **complexité structurelle des récifs coralliens** et la **diversité / abondance des coraux et poissons** qu'ils abritent (Kovalenko et al., 2012; Graham and Nash, 2013; Darling et al., 2017). Inversement, il a été montré qu'une **perte de complexité structurelle** des récifs coralliens suite à une destruction de l'habitat engendrait une **perte de biodiversité** (Ferrari et al., 2016). Cousins des récifs coralliens, les **récifs coralligènes** présentent eux aussi des **architectures complexes**, une **très forte biodiversité** et des **conditions environnementales hétérogènes** garantissant de nombreuses niches écologiques (Johnson et al., 2003; Willis et al., 2005; Ballesteros, 2006; Kipson et al., 2011). Pourtant, aucune étude ne porte sur l'analyse des liens entre la structure de ces récifs et la diversité d'espèces qui le composent et qu'il abrite. Par ailleurs, les seules études à notre connaissance qui portent sur la complexité structurelle des récifs coralligènes ont estimé la structure à partir des assemblages d'espèces observées et non pas à partir de mesures 3D (Sartoretto et al., 2017; Valisano et al., 2019).

Les objectifs de cette étude sont de :

1. **Explorer les différentes facettes de la complexité structurelle** des récifs coralligènes en utilisant des métriques structurales calculées sur des modèles photogrammétriques ;
2. **Définir des morphotypes** objectifs à partir de ces métriques structurales ;
3. Explorer les liens entre la **structure** et les **assemblages coralligènes** ;
4. Explorer les liens entre la **structure** et les **conditions environnementales**.

I.B. Données

I.B.1. Structure

Nous avons utilisé les données RECOR de 39 stations suivies en juin 2018 et 2019, situées entre 17 et 77 m de profondeur (voir figure 51), pour lesquelles nous avons à disposition les modèles 3D correspondant à la zone couverte par les quadrats photographiques. La surface des modèles 3D, reproduits par photogrammétrie, s'échelonne entre 31 et 433 m².

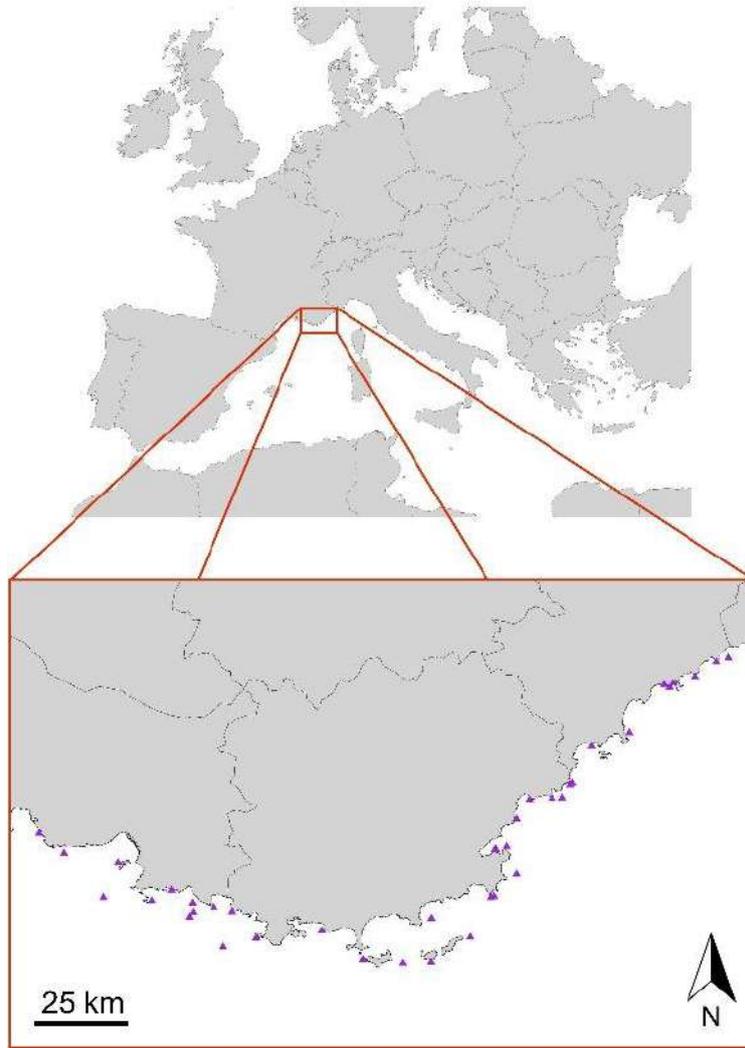


FIGURE 51 : LOCALISATION DES 39 SITES D'ETUDE

Pour chaque modèle, nous avons échantillonné 10 000 points / m² (soit environ 1 point / cm²) à l'aide du logiciel CloudCompare Version 2.10 (CloudCompare, GPL software, 2018). Nous avons ensuite calculé les paramètres structuraux suivants :

- **Indice de rugosité** pour tous les points de tous les modèles, avec CloudCompare, avec **différentes tailles de noyau** (voisinage) : 0,02 – 0,05 – 0,1 – 0,15 – 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,75 – 1m
- **Dimension fractale F** de chaque modèle, calculé sous R (R Core Team, 2020) avec une version adaptée du « box counting algorithm » (Liebovitch and Toth, 1989).

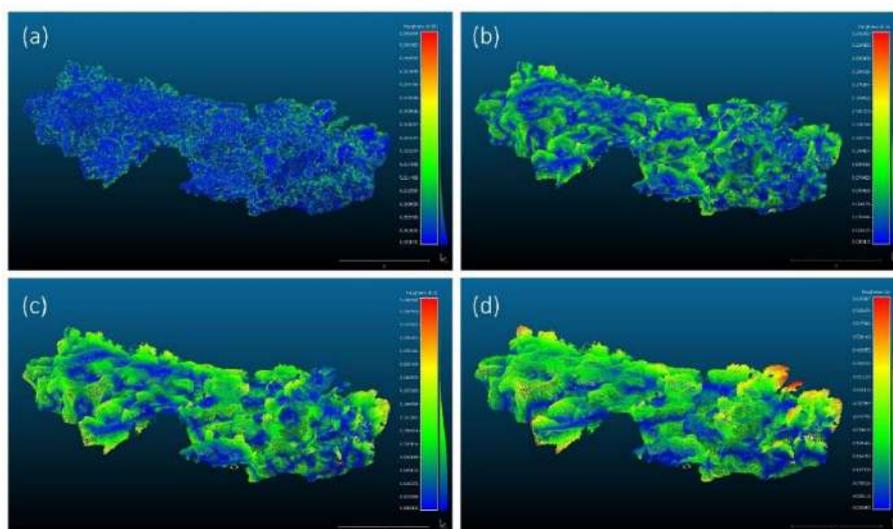


FIGURE 52 : RUGOSITE POUR LE SITE « MIMOSA » AVEC UN NOYAU DE TAILLE : (A) 0,05 M ; (B) 0,3 M ; (C) 0,5 M ; (D) 1 M

I.B.2. Ecologie

Nous avons utilisé les annotations RECOR correspondant à chaque station (1 920 identifications réalisées sur 30 quadrats photographiques), réalisées selon le protocole RECOR (Deter et al., 2012b). Les annotations n'étant pas toutes réalisées au niveau de l'espèce (certaines au niveau du genre, voir du phylum), nous parlerons par la suite de « classes ». Au total, 124 classes différentes ont été observées sur les 39 stations. Pour chaque station, nous avons calculé les indicateurs suivants :

- **Diversité Taxonomique** (« Taxonomic Diversity » / TD sur les graphiques) : nombre de classes différentes observées sur une station ;
- **Indice de Shannon** (« Shannon Index » / SI sur les graphiques) : prend en compte l'abondance des différentes classes pour donner plus ou moins de poids aux espèces les plus rares / abondantes (Magurran, 2004) :

$$S_j = - \sum_i p_{ij} \log(p_{ij})$$

Avec p_{ij} la prévalence de la classe i au sein de la station j

- **Diversité Fonctionnelle** (« Functional Diversity » / FD sur les graphiques) : facette de la biodiversité qui quantifie la valeur des traits fonctionnels des organismes, influençant leurs performances et par extension, le fonctionnement de l'écosystème (Diaz and Cabido, 2001). Nous avons utilisé un indice de diversité fonctionnelle basé sur un dendrogramme fonctionnel (Mouchet et al., 2008) et une base de traits fonctionnels compilée par Doxa et al. (2015).
- **Coralligenous Assemblage Index (CAI)** (Deter et al., 2012a) : statut écologique du coralligène basé sur la prévalence des bryozoaires, des espèces constructrices et de l'envasement d'un assemblage :

$$CAI_i = \frac{1}{3} \times \left(\frac{1 - vase_i}{1 - \min_i vase_i} + \frac{espèces\ constructrices_i}{\max_i espèces\ constructrices_i} + \frac{bryozoaires_i}{\max_i bryozoaires_i} \right)$$

- **INDEX-COR (IC)** (Sartoretto et al., 2017) : statut écologique du coralligène basé sur le nombre d'espèces observées, la sensibilité de l'assemblage à la matière organique et à la sédimentation, et un proxy de la complexité structurale :

$$IC = 0.62 \times TS + 0.6 \times OTR + 1.7 \times SC$$

Avec TS = Taxa Sensitivity : score de sensibilité de l'assemblage aux apports en matière organique et sédiments ; OTR = Observable Taxonomic Richness : égal à la diversité taxonomique ; SC = Structural Complexity : score de complexité structurale basé sur les différentes strates observées.

I.B.3. Environnement

Nous avons utilisé les données Previmer (MARS3D v10.10 (Ifremer, 2019)) correspondant à la température de fond, la salinité, les matières en suspension et la courantologie horizontale. Les données ont été téléchargées pour toute la période 2015 – 2019 sur une fréquence hebdomadaire. Pour chaque variable, les données ont été extraites des rasters originaux pour les positions géographiques des 39 stations à leurs profondeurs respectives, et nous avons calculé la valeur moyenne sur toute la période comme indicateur pour les analyses suivantes. La profondeur a également été prise en compte comme variable environnementale.

I.C. Méthodologie

I.C.1. Définition de morphotypes

Pour chaque taille de noyau (voisinage pour le calcul de la rugosité), nous avons calculé la moyenne, l'écart type et les quantiles Q₁₀, Q₂₅, Q₅₀, Q₇₅, et Q₉₀ de la distribution de rugosité pour chaque station. Pour chaque taille de noyau, nous avons supprimé toutes les variables fortement corrélées (coefficient de corrélation de spearman > 0,7) et nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur tous les descripteurs de rugosité retenus et la dimension fractale de chaque station. Le nombre de composantes permettant de décrire les morphotypes a été défini comme le nombre minimal de composantes capturant plus de 90 % de la variance du jeu de données. Les morphotypes ont été définis par K-means clustering (R package ClusterR v1.2.1) avec K = 4 clusters.

Etant donné le faible nombre d'observations (39 stations), nous avons utilisé le coefficient de corrélation de spearman et des modèles linéaires pour caractériser les liens entre les différents indicateurs structurels.

I.C.2. Liens entre la structure des récifs, leur biodiversité et les conditions environnementales

La normalité des distributions et l'égalité des variances ont été testées pour l'ensemble des variables écologiques et environnementales à l'aide du test de Shapiro-Wilkinson et du F-test. Si une variable satisfait les deux conditions, les moyennes des distributions entre les morphotypes sont comparées à l'aide d'un test de Student (t-test), autrement elles sont comparées à l'aide du test non paramétrique de Mann-Whitney-Wilcoxon (MWW).

Les données d'abondance ont été analysées à l'aide d'une PERMANOVA (Anderson, 2001) pour tester la réponse de la composition à l'appartenance à un morphotype. Par ailleurs, nous avons conduit une nMDS (non-metric multidimensional scaling) (Clarke and Gorley, 2006) pour visualiser les différents assemblages sur un graphique en 2D et apprécier visuellement les enveloppes formées par les quatre morphotypes.

Toutes les analyses et tests statistiques ont été réalisés avec le logiciel R v3.6.3 (R Core Team, 2020). Les analyses écologiques ont été faites grâce au package vegan v2.5.6.

I.D. Résultats

I.D.1. Complexité structurale et morphotypes

Pour tous les niveaux de voisinage, tous les descripteurs sont fortement corrélés (coefficient de corrélation de spearman > 0.8), donc nous n'avons gardé que la valeur moyenne de chaque niveau de rugosité. La dimension fractale s'échelonne entre 2.02 et 2.20 sur les 39 stations, et est moyennement corrélée à la rugosité avec des voisinages de 0,15, 0,20 et 0,30 m (coefficient de corrélation de spearman 0,62 – 0,65).

Les trois premiers axes de l'ACP sur les moyennes des rugosités et la dimension fractale représentent 93 % de la variance totale. Nous avons défini quatre morphotypes par K-means clustering dans cet espace à trois dimensions : morphotype 1 correspondant à un faible niveau de complexité structurale (6 sites), morphotype 2 correspondant à une complexité moyenne avec des petites structures (15 sites), morphotype 3 avec une complexité moyenne et des grandes structures (13 sites) et morphotype 4 correspondant à une importante complexité structurale avec des grandes structures (5 sites, voir figure 53).

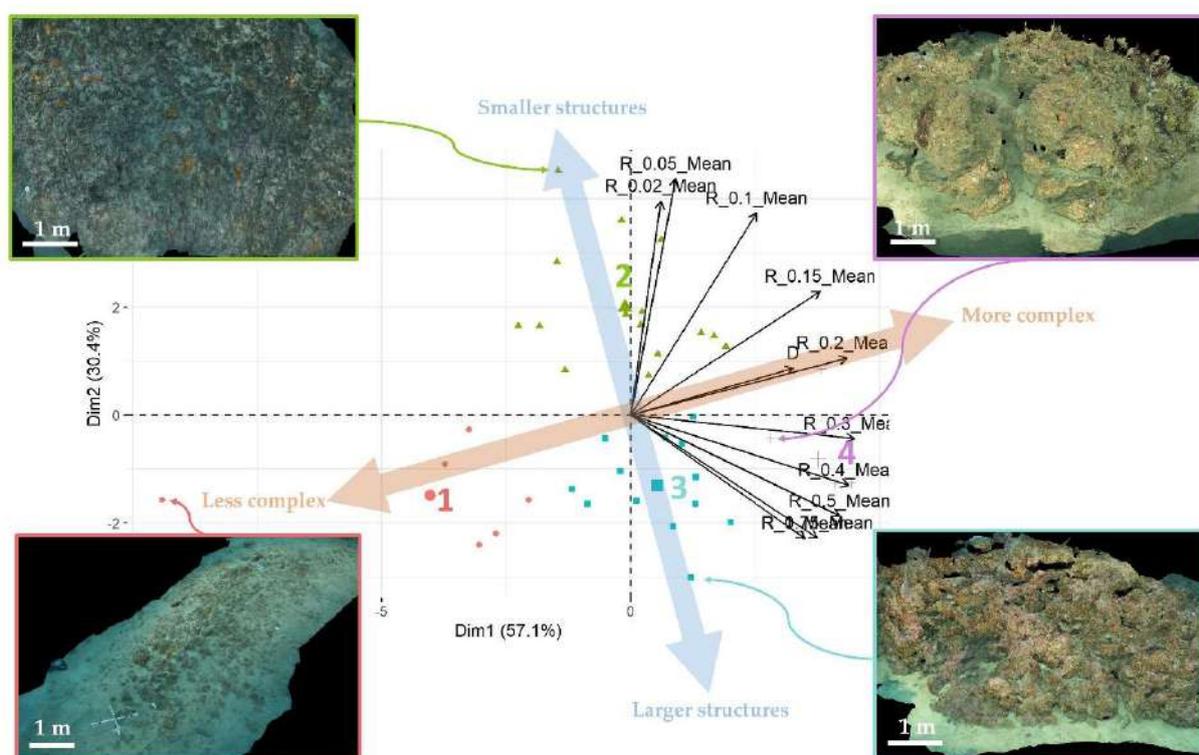


FIGURE 53 : BIPLLOT DE L'ACP SUR LES VARIABLES STRUCTURELLES, AVEC LES QUATRE MORPHOTYPES DEFINIS PAR K-MEANS CLUSTERING. FLECHES NOIRES : VARIABLES PROJETEES SUR LE PREMIER PLAN DE L'ACP ; R_X_MEAN = RUGOSITE MOYENNE POUR LE VOISINAGE X M ; D = DIMENSION FRACTALE. MORPHOTYPES : 1 (ROUGE) = FAIBLE COMPLEXITE ; 2 (VERT) = COMPLEXITE MOYENNE / PETITES STRUCTURES ; 3 (CYAN) = COMPLEXITE MOYENNE / GRANDES STRUCTURES ; 4 (VIOLET) = COMPLEXITE ELEVEE / GRANDE STRUCTURES. LES QUATRE IMAGES REPRESENTENT UN EXEMPLE DE CHAQUE MORPHOTYPE.

F n'est pas significativement différente entre les morphotypes 2 et 3 (voir figure 54 ; t-test ; p-value > 0.05) mais significativement différente entre les morphotypes 1 et 2-3 (t-test ; p-value < 0.001) et entre les morphotypes 2, 3 et 4 (t-test ; p-value < 0.01). Le pourcentage de cavités (observées sur les quadrats RECOR) est compris entre 0,6 et 16,4 %, et significativement supérieur pour le morphotype 4 que tous les autres morphotypes (MWW test ; p-value < 0.01).

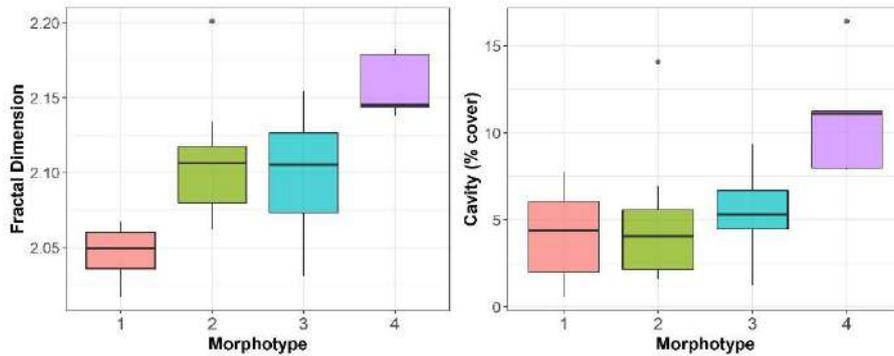


FIGURE 54 : DIMENSION FRACTALE ET POURCENTAGE DE CAVITES (% DE RECOUVREMENT) POUR LES 4 MORPHOTYPES

I.D.2. Composition écologique des morphotypes

TD s'échelonne entre 13 et 49 classes, FD entre 1,17 et 4,41, et SI entre 1,27 et 2,74 sur les 39 stations (voir figure 55). Nous n'avons observé aucune différence entre les différents morphotypes pour les trois indicateurs (MWW ; p-value > 0.05), à l'exception de l'indice de Shannon qui est significativement supérieur pour le morphotype 2 en comparaison au morphotype 3 (MWW ; p-value < 0.01).

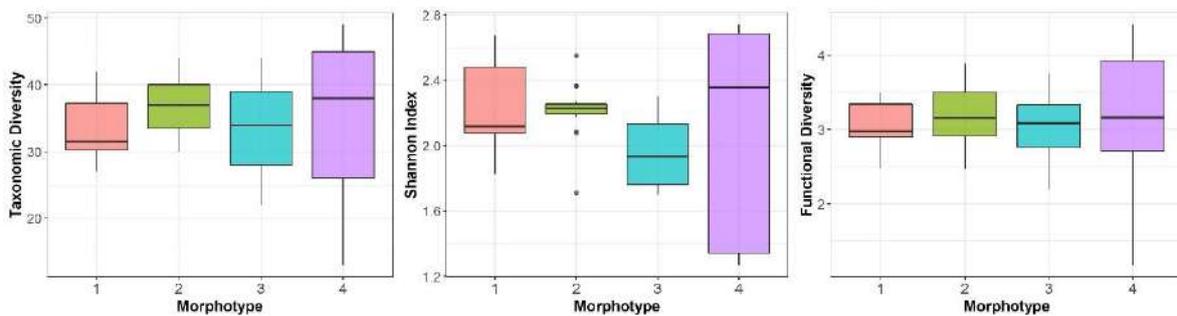


FIGURE 55 : DIVERSITE TAXONOMIQUE, INDICE DE SHANNON ET DIVERSITE FONCTIONNELLE PAR MORPHOTYPE

Le CAI s'échelonne entre 0,12 et 0,67, et l'INDEX-COR entre 25,7 et 82,7 (voir figure 56). Les deux indicateurs sont fortement corrélés (coefficient de corrélation de Spearman : 0,77), et nous n'avons observé aucune différence significative pour ces deux indicateurs entre les quatre morphotypes (MWW ; p-value > 0.05). Les rugosités moyennes à 0,15, 0,4 et 1 m expliquent 27 % de la variance de la composante structurelle SC de l'INDEX-COR. L'abondance relative de nécrose est significativement plus importante pour les morphotypes 1 et 3 que pour le morphotype 4 (MWW ; p-value < 0.01).

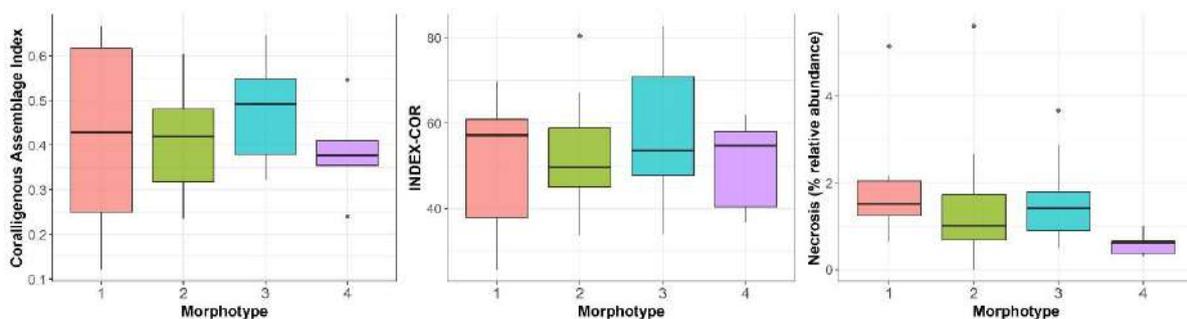


FIGURE 56 : CORALLIGENOUS ASSEMBLAGE INDEX, INDEX-COR ET ABONDANCE RELATIVE DE NECROSES, PAR MORPHOTYPE.

La PERMANOVA n’a pas montré d’effet significatif du type de morphotype sur la composition des assemblages (p -value > 0.05), résultat mis en évidence par les enveloppes convexes des quatre morphotypes qui se superposent dans l’espace bidimensionnel de la nMDS (voir figure 57).

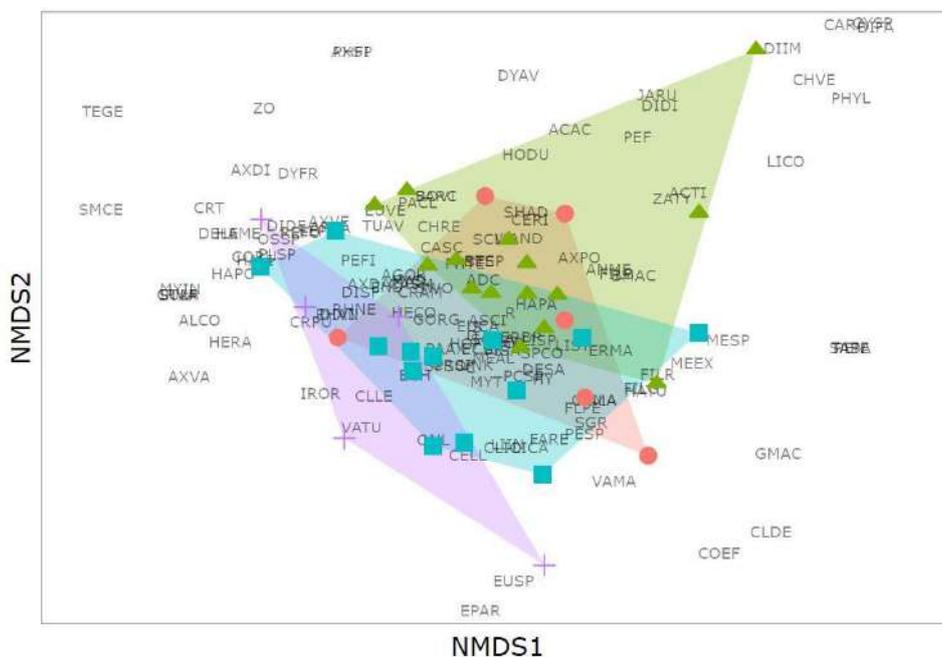


FIGURE 57 : REPRESENTATION BIDIMENSIONNELLE (NMDS) DES ASSEMBLAGES DES 39 SITES. LES POLYGOUES DE COULEUR REPRESENTENT L’ENVELOPPE CONVEXE DE CHAQUE MORPHOTYPE : MORPHOTYPE 1 EN ROUGE, MORPHOTYPE 2 EN VERT, MORPHOTYPE 3 EN CYAN ET MORPHOTYPE 4 EN VIOLET).

I.D.3. Liens entre environnement et morphotypes

L’ensemble des indicateurs structuraux sont peu corrélés aux variables environnementales (coefficient de corrélation de spearman < 0.3). La profondeur est significativement plus faible pour le morphotype 2 que le morphotype 3 (MWW ; p -value < 0.05), les matières en suspension sont significativement plus importantes pour le morphotype 2 que le morphotype 3 (MWW ; p -value < 0.05) ; le courant N-S est plus important pour les morphotypes 1 and 4 que le 2, et plus important pour le morphotype 1 que le 3 (MWW; p -value < 0.05).

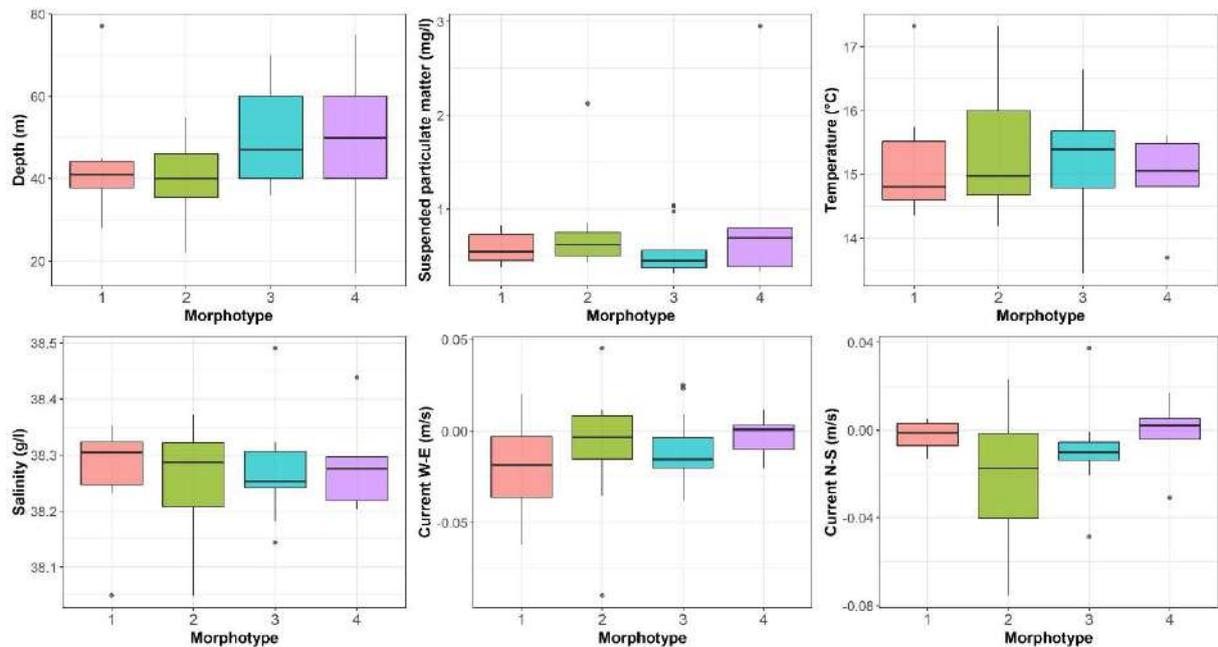


FIGURE 58 : DISTRIBUTION DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES EXTRAITES DE PREVIMER, PAR MORPHOTYPE. LES VALEURS CORRESPONDANT AUX MOYENNES OBSERVEES SUR LA PERIODE 2015 – 2019.

I.E. Discussion

Dans cette étude, nous avons exploré les **différentes facettes de la complexité structurale** des récifs coralligènes, à partir de **39 modèles 3D réalisés sur des stations de suivi RECOR entre 2018 et 2019**. Les récifs étudiés correspondent à des **morphologies très différentes**, depuis des sites relativement plats et peu complexes jusqu'à des sites caractérisés par des macrostructures complexes. A partir des indicateurs structurels (rugosité à différentes échelles et dimension fractale), nous avons défini **quatre morphotypes de récifs** : faible complexité, complexité moyenne avec des petites ou des grandes structures, et complexité forte avec des macro-structures. Nous nous sommes ensuite servis de ces quatre morphotypes pour explorer les liens entre la structure, la biodiversité des récifs et les conditions environnementales.

Etonnamment, nous n'avons **pas détecté de liens significatifs** entre les **indicateurs de biodiversité** et la **complexité structurale** à travers les quatre morphotypes, ce qui contraste avec des récentes études qui ont montré que les différentes facettes de la biodiversité des récifs coralliens sont les principaux facteurs expliquant la complexité structurale des récifs (Darling et al., 2017; Price et al., 2019). Par ailleurs, la PERMANOVA n'a **pas montré de différence significative** dans la **composition des assemblages** entre les **différents morphotypes**, comme suggéré par l'analyse nMDS (voir figure 57). L'abondance relative de nécroses inférieure pour le morphotype 4 semble être liée à la plus grande abondance d'éponges pour ce morphotype (espèces en haut à gauche de la figure 57). En effet, très peu de nécroses sont généralement observées chez les éponges.

Bien que certaines variables environnementales soient significativement différentes entre les morphotypes, nous n'avons **pas détecté de tendance générale pouvant expliquer les différences structurales**, notamment des conditions environnementales favorisant la croissance d'organismes contribuant particulièrement à la structure des récifs. Cependant, les variables environnementales correspondent à des résultats de modélisation pour seulement cinq années (2015 – 2019), qui ne reflètent pas nécessairement l'histoire de récifs qui peuvent mettre des milliers d'années à se former (Sartoretto et al., 1996). Par ailleurs, les données ont été extraites sur la grille Previmer de 10x10km, qui ne permet pas de prendre en compte la variabilité très importante des conditions environnementales en fonction de la profondeur et de la configuration du site (Willis et al., 2005; Kipson et al., 2011).

Nous avons émis **trois hypothèses** pouvant expliquer que les résultats de cette étude ne confirment pas ce qui a été déjà démontré en milieu corallien, à savoir qu'il existe un lien fort entre biodiversité / qualité écologique d'un récif et sa complexité structurale :

1. Les récifs coralligènes ont une **dynamique morphologique extrêmement faible** en comparaison avec les récifs coralliens : la croissance des organismes qui les composent est très faible, et leur situation globalement plus profonde les protègent de l'action mécanique de la houle et des tempêtes. En comparaison, un épisode de blanchiment en milieu tropical est rapidement suivi d'une recolonisation par des macro-algues ou d'une altération par les mouvements de l'eau (Graham et al., 2015). Cela suggère que, concernant les récifs coralligènes, leur **structure actuelle reflète davantage leur histoire évolutive que leur état actuel** (espèces, envasement...), on parle d'**héritage topographique**. Une station en particulier (Centrale, 17 m) est caractérisée par une complexité structurale importante et les plus faibles valeurs de diversité et état écologique, à cause de son exposition récente à des sédiments d'origine anthropique (Airoldi, 2003; Ballesteros, 2006). Si cette hypothèse se confirmait, **la complexité structurale des récifs pourrait alors être perçue comme un proxy du potentiel / climax écologique du récif**, permettant de définir son vrai état écologique compte tenu de la biodiversité actuelle. A l'inverse, un récif avec une faible complexité et faible diversité pourrait simplement refléter un jeune récif en cours de formation ;
2. **Il pourrait y avoir un biais dans l'échantillonnage des données**. En effet, contrairement à certaines études qui ont labellisé toutes les espèces observées sur les modèles 3D (Price et al., 2019), nous avons numérisé 39 récifs, sur lesquels ont été réalisés 30 quadrats aléatoirement distribués sur chaque récif. Cela peut avoir d'importantes conséquences, car dans le cas des modèles de surfaces importantes, la surface couverte par les 30 quadrats (~7,5 m²) est très faible par rapport à la surface totale numérisée, ce qui implique que nous étudions majoritairement le bruit du reste du modèle 3D. Par ailleurs, certains artefacts de reconstruction peuvent sous-estimer certains descripteurs, comme les gorgones qui sont généralement mal reconstruites dans le cas de sites soumis à un courant important ou dans le cas d'individus très grands ;
3. Les récifs coralligènes sont des assemblages extrêmement complexes, dont la composition est le fruit d'interactions entre une multitude de facteurs écologiques et environnementaux sur de longues périodes. Cette complexité engendre une variabilité très forte entre les récifs, y compris au sein même d'un récif, qui est encore mal appréhendée. **L'étude de relations complexes dans des environnements aussi variables nécessite des jeux de données bien plus conséquents** pour espérer évaluer correctement l'effet de certains facteurs.

En conclusion, cette étude prépare les bases de l'analyse écologique de la complexité structurale des récifs coralligènes. Les liens entre structure et diversité, en particulier, devront faire l'objet d'analyses plus approfondies avec davantage de données et en limitant le biais d'échantillonnage. En particulier, si nous parvenons à massivement **aligner les quadrats RECOR** sur les modèles 3D déjà réalisés, nous serions en mesure de **produire la surface 3D « observée » sur chaque quadrat** et calculer les mêmes indicateurs de complexité structurale. Cela permettrait de **corrélér bien plus finement les observations** écologiques avec la structure, et de passer de **39 stations à 1000 – 2000 modèles** 3D correspondant à tous les quadrats correctement alignés sur un des modèles de notre base de données.

II. Suivis temporels de récifs coralligènes

II.A. Objectifs

Si la photogrammétrie permet de qualifier et quantifier la structure des récifs à un instant t, elle permet aussi de réaliser des **suivis temporels localisés** des assemblages coralligènes. En effet, des modèles photogrammétriques réalisés à différentes dates sur un même récif peuvent être **alignés grâce à des repères fixes** (roche, piquet, balises...) et **comparés** pour mesurer certaines **évolutions** (voir figure 59).

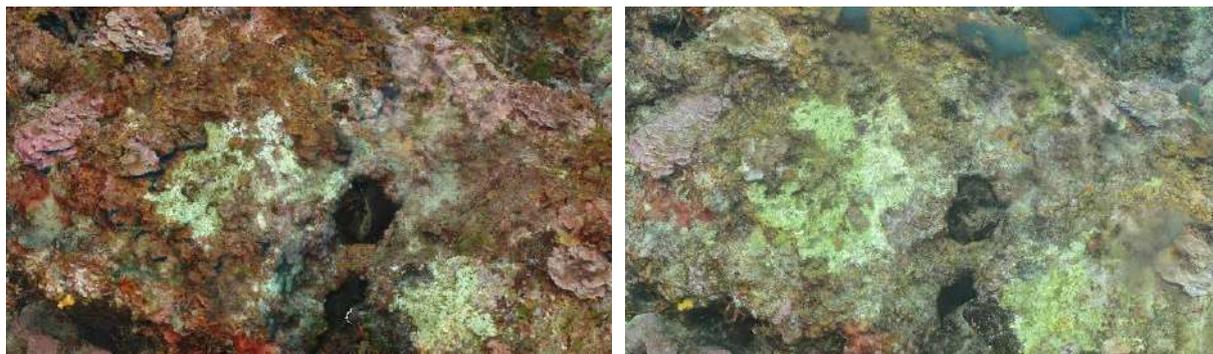


FIGURE 59 : EVOLUTION D'UNE NECROSE SUR LE SITE « RADE DE BORMES » ENTRE 2016 (GAUCHE) ET 2019 (DROITE)

L'objectif de cette partie est le développement d'une **méthode automatisée** de production d'**orthomosaïques locales** (i.e. photographies artificiellement reconstruites et ortho rectifiées d'une portion du récif) **identiques** sur plusieurs modèles réalisés à différents pas de temps, pour réaliser un suivi par « **quadrats permanents** » sur certains endroits singuliers d'un récif, comme une macro-nécrose.

II.B. Méthodologie

Nous avons développé la méthode sur le cas particulier d'un **récif de coralligène restauré à Saint Jean Cap Ferrat** (opération de nettoyage suite à un enfouissement par des travaux de génie civile – projet RESCOR, informations disponibles sur [RESTAUMED](#)), que nous avons suivi par photogrammétrie **avant** et **après** travaux de restauration en septembre 2018, puis régulièrement **tous les six mois** depuis cette date. Afin de qualifier et quantifier précisément la recolonisation du récif restauré, nous avons défini 14 quadrats permanents de 1 m² (voir figure 60).

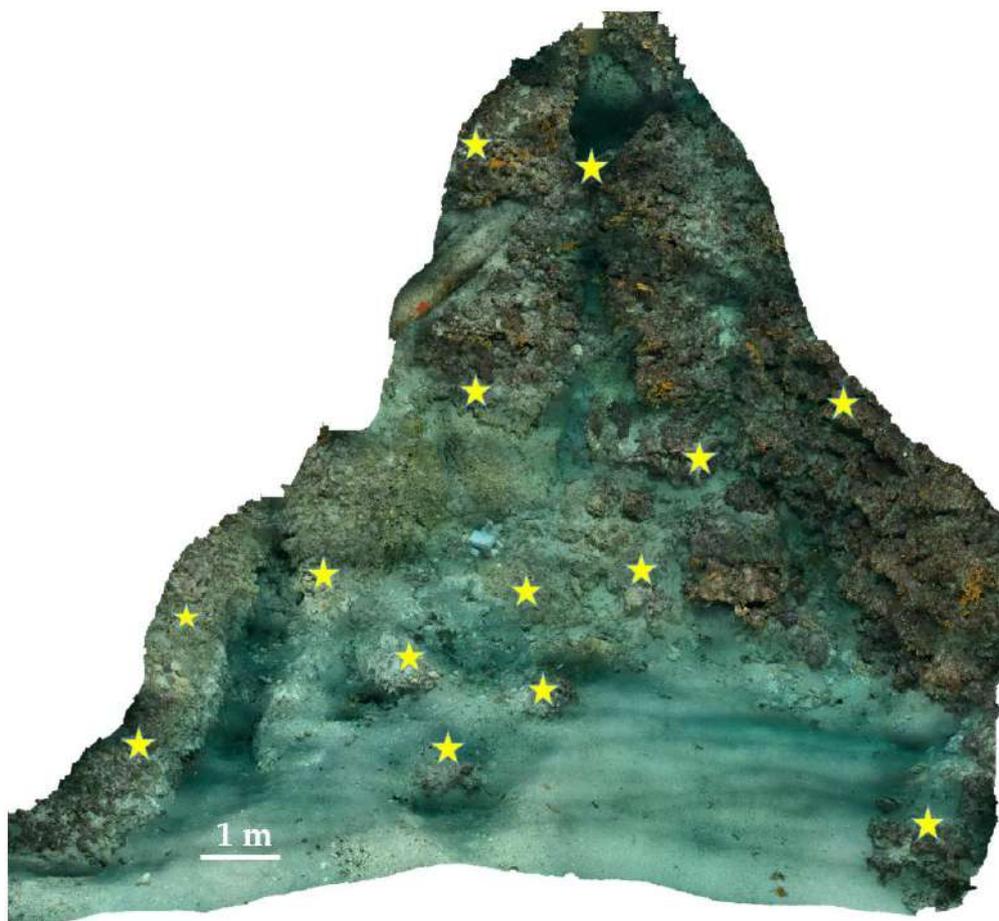


FIGURE 60 : POSITION DES 14 QUADRATS PERMANENTS SUR LE RECIF DE SAINT-JEAN-CAP-FERRAT

Pour définir les quadrats sur le premier modèle (t_0), il est nécessaire de réaliser deux étapes manuellement :

- Positionner **trois marqueurs en équerre** sur le récif, définissant respectivement le centre du quadrat, l'axe X et l'axe Y ;
- **Mesurer les distances** entre ces marqueurs pour déterminer les **coordonnées** des deux marqueurs définissant les axes X et Y dans le futur repère.

Une fois ces étapes manuelles réalisées pour chaque quadrat, il est ensuite possible de produire l'ensemble des orthomosaïques grâce à un script Python permettant de séquentiellement :

- Utiliser les trois marqueurs pour définir un **nouveau repère orthogonal** grâce à leurs coordonnées mesurées manuellement ;
- **Produire l'orthomosaïque** locale dans ce nouveau repère, avec comme limites géographiques -0,5 et + 0,5 m en X et en Y, pour produire un quadrat de $1 \times 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$, avec une résolution de 0,5 mm / pixel ;
- **Exporter l'orthomosaïque locale produite** avec un nom de fichier correspondant au nom du quadrat et à la date de suivi.

La définition des quadrats permanents (positionnement et mesure des coordonnées des trois marqueurs) et la production du script Python sont chronophages, mais ensuite à **chaque nouveau suivi**, il suffit de :

- **Produire le modèle 3D** ;
- **Positionner manuellement plusieurs marqueurs** permettant d'aligner parfaitement le nouveau modèle aux anciens ;
- **Exécuter le script** pour cette nouvelle date, produisant tous les nouveaux quadrats permanents.

Pour chaque quadrat permanent produit, il faut ensuite **analyser son contenu manuellement** comme dans le cas des quadrats aléatoires RECOR. Ici, nous souhaitons mesurer des **surfaces** pour quantifier **l'évolution précise de la recolonisation** des zones restaurées, c'est pourquoi nous avons à chaque suivi réalisé une segmentation sémantique des quadrats permanents, mais il serait également possible d'analyser les quadrats avec le logiciel CPCe en prenant toujours les mêmes coordonnées de points projetés pour suivre l'évolution de ces points dans le temps.

II.C. Résultats

Avec cette méthodologie, nous avons produit et analysé les 14 quadrats permanents pour le site de Saint Jean Cap Ferrat pour sept dates différentes (voir exemples figure 61).

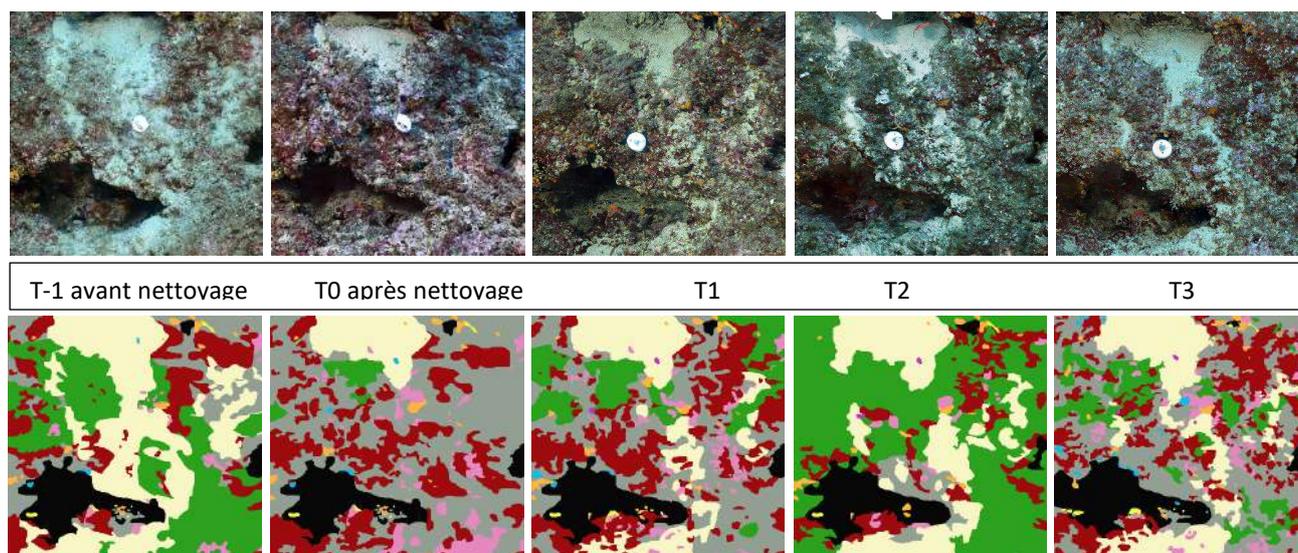


FIGURE 61 : SUIVI PHOTOGRAMMETRIQUE DE LA RECOLONISATION DU RECIF DE SAINT-JEAN-CAP- FERRAT APRES RESTAURATION. GRIS = SUBSTRAT ROCHEUX ; JAUNE PALE = SUBSTRAT MEUBLE ; VERT FONCE = ALGUES ; VERT CLAIR = DEBRIS BIOLOGIQUES ; ROSE PALE = CORALLIGENE NECROSE ; ROSE FONCE = CORALLINACEES ; ORANGE = BRYOZOAIRES ; BLEU = VIVANT NON IDENTIFIE ; VIOLET POURPRE = GORGONES.

Ce type d'analyses appliquées à certains récifs du réseau RECOR permettrait notamment de quantifier précisément **l'évolution de macro-nécroses** dans le temps. Cependant, la définition des quadrats et leur analyse restent des **étapes chronophages**, qui ne permettent pas leur généralisation à grande échelle (grand nombre de quadrats sur toutes les stations RECOR).

Selon les résultats obtenus pour l'adaptation du réseau de neurones, d'autres méthodes de suivis temporels sont imaginables, comme le suivi individuel de points sur le récif :

- **Projection / détermination** d'un certain nombre de points sur le récif à t_0 ;
- **Identification** de ces points par le réseau de neurones adapté aux images de la photogrammétrie :
- **A chaque nouveau suivi** :
 - **Alignement** du nouveau modèle aux anciens ;
 - **Projection** des points de références sur la surface du nouveau modèle ;
 - **Identification** des points par le réseau de neurones.

Bibliographie

- Airoidi, L. (2003). The effects of sedimentation on rocky coast assemblages. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review* 41, 161–236.
- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance: NON-PARAMETRIC MANOVA FOR ECOLOGY. *Austral Ecology* 26, 32–46. doi:10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x.
- Ballesteros, E. (2006). Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 44, 123–195.
- Beijbom, O., Edmunds, P. J., Kline, D. I., Mitchell, B. G., and Kriegman, D. (2012). Automated annotation of coral reef survey images. in 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (Providence, RI: IEEE), 1170–1177. doi:10.1109/CVPR.2012.6247798.
- Bouchereau, J.-L., Tomasini, J. A., Russ, C., and Jouvenel, J. Y. (1992). Inventaire des poissons peuplant la réserve naturelle des îles Lavezzi. *Travaux scientifiques du Parc naturel régional et des réserves naturelles de Corse*, 1–11.
- Bouchoucha, M., and Herve, G. (2013). Développement d'un indicateur poisson (DCSMM) : programmation 2012.
- Clarke, K. R., and Gorley, R. N. (2006). PRIMER v6: User Manual/Tutorial. Plymouth, UK: PRIMER-E.
- Darling, E. S., Graham, N. A. J., Januchowski-Hartley, F. A., Nash, K. L., Pratchett, M. S., and Wilson, S. K. (2017). Relationships between structural complexity, coral traits, and reef fish assemblages. *Coral Reefs* 36, 561–575. doi:10.1007/s00338-017-1539-z.
- Deter, J., Descamp, P., Ballesta, L., Boissery, P., and Holon, F. (2012a). A preliminary study toward an index based on coralligenous assemblages for the ecological status assessment of Mediterranean French coastal waters. *Ecological Indicators* 20, 345–352. doi:10.1016/j.ecolind.2012.03.001.
- Deter, J., Descamp, P., Boissery, P., Ballesta, L., and Holon, F. (2012b). A rapid photographic method detects depth gradient in coralligenous assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 418–419, 75–82. doi:10.1016/j.jembe.2012.03.006.
- Diaz, S., and Cabido, M. (2001). Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution* 16, 646–655. doi:10.1016/S0169-5347(01)02283-2.
- Dufour, F., Guidetti, P., and Francour, P. (2007). Comparaison des inventaires de poissons dans les aires marines protégées de Méditerranée: influence de la surface et de l'ancienneté. *Cybiurn* 31, 19–31.
- Ferrari, R., Bryson, M., Bridge, T., Hustache, J., Williams, S. B., Byrne, M., et al. (2016). Quantifying the response of structural complexity and community composition to environmental change in marine communities. *Global Change Biology* 22, 1965–1975. doi:10.1111/gcb.13197.
- Francour, P., and Finelli, F. (1991). Complément à l'inventaire des poissons marins de la réserve de Scandola (Corse, Méditerranée nord-occidentale). *Travaux scientifiques du Parc naturel régional et des réserves naturelles de Corse*, 35–53.
- Francour, P., and Harmelin, J. G. (1989). Inventaire de la faune ichthyologique marine de Port-Cros (Méditerranée occidentale). *Scientific Reports of the Port Cros National Park (France)*. no. 14.
- Froese, R. and Pauly, D. FishBase. World Wide Web electronic publication.
- George, C. J., and Athanassiou, V. (1967). A two year study of the fishes appearing in the seine fishery of St George Bay, Lebanon. *Annali Del Museo Civico Di Storia Naturale de Genova* 76, 237–294.



- Golani, D. (2000). First record of the bluespotted cornetfish from the Mediterranean Sea. *Zootaxa* 947 56, 1–90.
- Golani, D. (2005). Checklist of the Mediterranean fishes of Israel. *Zootaxa*, 1–90.
- Graham, N. A. J., Jennings, S., MacNeil, M. A., Mouillot, D., and Wilson, S. K. (2015). Predicting climate-driven regime shifts versus rebound potential in coral reefs. *Nature* 518, 94–97. doi:10.1038/nature14140.
- Graham, N. A. J., and Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 32, 315–326. doi:10.1007/s00338-012-0984-y.
- Harmelin, J.-G. (1987). Structure and variability of the ichthyofauna in a Mediterranean protected rocky area (National Park of Port-Cros, France). *Marine ecology. Berlin* 8, 263–284.
- Harmelin-Vivien, M. L., and Harmelin, J. G. (1975). Présentation d'une méthode d'évaluation in situ de la faune ichtyologique. *Travaux scientifiques du Parc national de Port-Cros* 1, 47–52.
- Ifremer (2019). MARS 3D: Model for Applications at Regional Scale. Available at: http://tds1.ifremer.fr/thredds/dodsC/MARC-MENOR1200-MARS3D_F2_SN-FOR_FULL_TIME_SERIE.html [Accessed October 28, 2019].
- Johnson, M. P., Frost, N. J., Mosley, M. W. J., Roberts, M. F., and Hawkins, S. J. (2003). The area-independent effects of habitat complexity on biodiversity vary between regions. *Ecol Letters* 6, 126–132. doi:10.1046/j.1461-0248.2003.00404.x.
- Kemker, R., McClure, M., Abitino, A., Hayes, T. L., and Kanan, C. (2018). Measuring Catastrophic Forgetting in Neural Networks. in *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 9.
- Kipson, S., Fourt, M., Teixidó, N., Cebrian, E., Casas, E., Ballesteros, E., et al. (2011). Rapid Biodiversity Assessment and Monitoring Method for Highly Diverse Benthic Communities: A Case Study of Mediterranean Coralligenous Outcrops. *PLoS ONE* 6, e27103. doi:10.1371/journal.pone.0027103.
- Kovalenko, K. E., Thomaz, S. M., and Warfe, D. M. (2012). Habitat complexity: approaches and future directions. *Hydrobiologia* 685, 1–17. doi:10.1007/s10750-011-0974-z.
- Lenfant, P., Dalias, N., Pastor, J., and Saragoni, G. (2008). Suivi temporel du peuplement ichtyque au sein et à proximité de la Réserve Naturelle Marine de Cerbère-Banyuls. *UMR 5244 CNRS-EPHE-UPVD*.
- Liebovitch, L. S., and Toth, T. (1989). A fast algorithm to determine fractal dimensions by box counting. *Physics Letters A* 141, 386–390. doi:10.1016/0375-9601(89)90854-2.
- Lobry, J., Lepage, M., and Girardin, M. (2006). L'échantillonnage de la diversité piscicole en estuaires: stratégie et représentativité dans le contexte de la Directive cadre européenne sur l'eau. *Ingénieries-EAT*, p-3.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Malden, Ma: Blackwell Pub.
- Malak, D. A., Livingstone, S. R., Pollard, D., Polidoro, B. A., Cuttelod, A., Bariche, M., et al. (2012). Aperçu du statut de conservation des poissons marins présents en mer Méditerranée. *IUCN Gland, Suisse et Málaga, Espagne*.
- Mouchet, M., Guilhaumon, F., Villéger, S., Mason, N. W. H., Tomasini, J.-A., and Mouillot, D. (2008). Towards a consensus for calculating dendrogram-based functional diversity indices. *Oikos* 117, 794–800. doi:10.1111/j.0030-1299.2008.16594.x.
- Mouillot, D., Albouy, C., Guilhaumon, F., Ben Rais Lasram, F., Coll, M., Devictor, V., et al. (2011). Protected and threatened components of fish biodiversity in the Mediterranean sea. *Current biology: CB* 21, 1044–50. doi:10.1016/j.cub.2011.05.005.
- Myers, N., Mittermeier, R. a., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. a. B., and Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. doi:10.1038/35002501.

Piazzì, L., Atzori, F., Cadoni, N., Cinti, M. F., Frau, F., and Ceccherelli, G. (2018). Benthic mucilage blooms threaten coralligenous reefs. *Marine Environmental Research* 140, 145–151. doi:10.1016/j.marenvres.2018.06.011.

Price, D. M., Robert, K., Callaway, A., Lo Iacono, C., Hall, R. A., and Huvenne, V. A. I. (2019). Using 3D photogrammetry from ROV video to quantify cold-water coral reef structural complexity and investigate its influence on biodiversity and community assemblage. *Coral Reefs* 38, 1007–1021. doi:10.1007/s00338-019-01827-3.

Quignard, J. P., and Tomasini, J. A. (2000). Mediterranean fish biodiversity. *Biol. Mar. Medit* 7, 1–66.

R Core Team (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Available at: <http://www.R-project.org/>.

Sale, P. F., and Douglas, W. A. (1981). Precision and accuracy of visual census technique for fish assemblages on coral patch reefs. *Environmental Biology of Fishes* 6, 333–339.

Sartoretto, S., Schohn, T., Bianchi, C. N., Morri, C., Garrabou, J., Ballesteros, E., et al. (2017). An integrated method to evaluate and monitor the conservation state of coralligenous habitats: The INDEX-COR approach. *Marine Pollution Bulletin* 120, 222–231. doi:10.1016/j.marpolbul.2017.05.020.

Sartoretto, S., Verlaque, M., and Laborel, J. (1996). Age of settlement and accumulation rate of submarine “coralligène” (-10 to -60m) of the northwestern Mediterranean Sea; relation to Holocene rise in sea level. *Marine Geology* 130, 317–331.

Seytre, C., and Francour, P. (2008). Is the Cape Roux marine protected area (Saint-Raphaël, Mediterranean Sea) an efficient tool to sustain artisanal fisheries? First indications from visual censuses and trammel net sampling. *Aquatic Living Resources* 21, 297–305.

Tzeng, E., Hoffman, J., Saenko, K., and Darrell, T. (2017). Adversarial Discriminative Domain Adaptation. in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (Honolulu, HI: IEEE), 2962–2971. doi:10.1109/CVPR.2017.316.

Valisano, L., Palma, M., Pantaleo, U., Calcinaï, B., and Cerrano, C. (2019). Characterization of North–Western Mediterranean coralligenous assemblages by video surveys and evaluation of their structural complexity. *Marine Pollution Bulletin* 148, 134–148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.012>.

Willis, S. C., Winemiller, K. O., and Lopez-Fernandez, H. (2005). Habitat structural complexity and morphological diversity of fish assemblages in a Neotropical floodplain river. *Oecologia* 142, 284–295. doi:10.1007/s00442-004-1723-z.

