

RAPPORT

Modélisation d'un récif corallien à *Acropora palmata* par photogrammétrie

Rapport

Mars 2024

AGENCE TERRITORIALE DE L'ENVIRONNEMENT (ATE)



CLIENT : AGENCE TERRITORIALE DE L'ENVIRONNEMENT (ATE)

COORDONNÉES	Rue de la République, 97133 Gustavia – ST-Barthélemy
INTERLOCUTEUR	Monsieur Sébastien GREAUX Tél. : 05.90.27.88.18 E-mail : sebastien.greaux@agencedelenvironnement.fr

CREOCEAN

COORDONNÉES	CREOCEAN ANTILLES-GUYANE 1 Lotissement les Mussendas - Plaisance - 97122 Baie-Mahault Tél. : 05 90 41 16 88 / Fax : 05 90 26 57 82 E-mail : caraibes@creocean.fr
INTERLOCUTEUR	Florian LABADIE Tél. : 06 90 15 78 24 E-mail : florianlabadie@hotmail.com

RAPPORT

TITRE	Modélisation d'un récif corallien à Acropora palmata par photogrammétrie Rapport
N° DE COMMANDE	2023000112
NOMBRE DE PAGES TOTAL	33
NOMBRE D'ANNEXES	-

VERSION

RÉFÉRENCE	VERSION	DATE	RÉDACTEURS	CONTRÔLE QUALITÉ
230266	V0	01/03/2024	FLA	CVMA

Sommaire

Contexte 8

1. Préambule sur la photogrammétrie 9

2. Méthodologie 10

2.1. Définition 10

2.2. Acquisition de données 10

2.2.1. Principe d'acquisition des données 10

2.2.2. Méthodologie 12

2.2.3. Matériel..... 13

2.3. Traitement des données 13

2.3.1. Méthodologie 13

2.3.2. Mise à l'échelle et géoréférencement..... 15

2.3.3. Matériel..... 16

2.4. Secteur d'étude..... 17

2.5. Déroulement de mission 19

3. Résultats 20

3.1. Orthophotographies 20

3.2. Modèle Numérique de Surface (MNS) 24

3.3. Illustrations de modèles 3D maillés 26

3.3.1. Illustration de 2 colonies d'*Acropora palmata*..... 26

4. Évolution temporelle de descripteurs physiques potentiels (non inclus à cette prestation) 30

4.1.1. Descripteurs physiques 30

4.1.2. Pente 30

4.1.3. Rugosité linéaire et surfacique..... 31

Liste des Figures

<i>Figure 1. Principe de reconstruction 3D à partir de photographies</i>	<i>10</i>
<i>Figure 2. Relation entre distance et focale sur la couverture photographique au sol.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3. Exemple théorique de plan d'acquisition</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4. Exemple pratique de plan d'acquisition</i>	<i>11</i>
<i>Figure 5. Colonies coralliennes - Modèle 3D – Orthophotographie – Modèle Numérique de Surface.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 6. Paysage corallien - Modèle 3D – Orthophotographie – Modèle Numérique de Surface</i>	<i>15</i>
<i>Figure 7. Étalons de mise à l'échelle (source : CREOCEAN, 2023)</i>	<i>15</i>
<i>Figure 8. GCP – Points de contrôle positionnés sur le site d'étude</i>	<i>16</i>
<i>Figure 9 : Vue aérienne de la sortie de la baie du Grand Cul-de-Sac (rectangle rouge : zone approximative d'étude, CREOCEAN, 2023)</i>	<i>17</i>
<i>Figure 10. Vue panoramique de la zone n°1 (source : CREOCEAN, 2023).....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 11 : Kayak de l'ATE servant de base de support (source : CREOCEAN, 2023)</i>	<i>19</i>
<i>Figure 12 : Illustration du modèle de points après la première journée du 26/11/2023</i>	<i>19</i>
<i>Figure 13 : Modélisation 3D d'une colonie d'Acropora palmata</i>	<i>28</i>
<i>Figure 13 : 2° Modélisation 3D d'une colonie d'Acropora palmata</i>	<i>29</i>
<i>Figure 16. Orthophotographie et MNS d'un récif coralligène</i>	<i>30</i>
<i>Figure 17. MNS et pourcentages de pente sur un récif coralligène.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 18. Indice de rugosité linéaire.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 19. Indice de rugosité surfacique</i>	<i>32</i>

Liste des tableaux

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

Contexte

La Réserve Naturelle de St-Barthélemy, gérée par l'Agence Territoriale de l'Environnement (ATE), comprend une partie marine de 1200 hectares, scindée en 5 zones, dont la baie du Grand Cul-de-Sac. Les fonds marins de cette aire protégée abritent un patrimoine d'une richesse exceptionnelle avec la présence de communautés coralliennes et d'herbiers de phanérogames colonisés par une faune et une flore particulièrement diversifiée.

Afin de gérer de manière intégrée et durable ces écosystèmes marins fragiles et vulnérables aux menaces anthropiques, l'amélioration des connaissances sur l'ensemble du périmètre de la Réserve est nécessaire.

Une cartographie des biocénoses marines a été réalisée en 2023 (CREOCEAN), sur un très large secteur, comprenant la tranche bathymétrique entre 0 et 18m sur le pourtour de toutes les îles de Saint-Barthélemy.

Les cartes d'habitats fournissent en effet des informations essentielles à la planification spatiale et stratégique, et constituent un support indispensable à tout gestionnaire de l'environnement. Elles permettent d'obtenir des données fiables, précises et chiffrées sur les écosystèmes, et leurs potentielles évolutions.

L'Agence Territoriale de l'environnement de Saint-Barthélemy souhaite disposer d'une cartographie 3D d'un massif corallien unique d'*Acropora palmata* du Grand Cul-de-Sac.

Elle permettra, entre autres, d'avoir une représentation extrêmement précise de ce dernier et pourra s'en servir comme support de communication auprès du grand public, mais également comme support d'analyse lors de missions ultérieures pour voir son évolution temporelle (superficie, rugosité, croissance, complexité structurelle, etc.)

Le présent document constitue le rapport technique présentant les opérations réalisées en vue de la photogrammétrie du récif, ainsi que les principaux résultats visuels obtenus.

En complément de ce rapport, seront fournis différents supports de visualisation du travail réalisé (orthophotographie géoréférencée, modèle numérique de terrain, objet 3D).

1. Préambule sur la photogrammétrie

Visualiser, mesurer et analyser une reproduction fidèle de la réalité, c'est ce que nous offre la photogrammétrie.

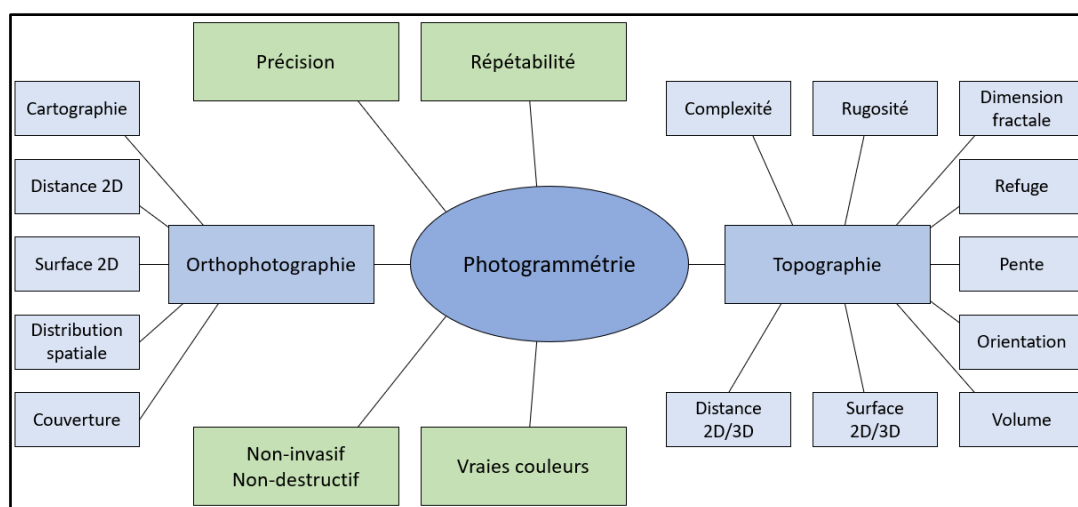
Au cours de la dernière décennie, la photogrammétrie s'est considérablement développée grâce aux progrès techniques dans le domaine de la photographie numérique et à l'évolution des performances de calculs informatiques. Populaire dans les applications terrestres avec le développement de l'acquisition par drone, la photogrammétrie permet d'accéder à des reconstructions détaillées, des mesures précises et des comparaisons temporelles sur une large gamme de supports visuels et cartographiques 2D et 3D, géolocalisés et à l'échelle.

De nos jours, la photogrammétrie représente un défi particulier dans le domaine sous-marin sur les thématiques de suivis environnementaux, de cartographie et d'étude des habitats et écosystèmes, des inspections maritimes et en archéologie. Le recours à cette technique offre aujourd'hui des outils de qualité permettant d'accéder à de nouveaux protocoles scientifiques, et, en tant qu'outils de gestion environnementale, pouvant s'avérer précieux pour l'avenir.

CREOCEAN, dans une démarche stratégique à long terme, est engagée dans la recherche et le développement de nouveaux protocoles de suivi et d'outils opérationnels, permettant d'engager une réflexion sur les méthodes de demain. La photogrammétrie, depuis 2015, est l'un de ces axes de développement.

La photogrammétrie sous-marine vient compléter les techniques traditionnelles de suivis environnementaux en proposant des rendus visuels photoréalistes faciles à interpréter et des supports fiables. Ces supports permettent l'accès à une diversité de descripteurs physiques et topographiques, précis et géoréférencés, à exploiter pour analyses et calculs, et, propices à l'étude, l'évaluation et le suivi des écosystèmes.

En comparaison des méthodes traditionnellement utilisées, cette technique offre également un suivi non destructif et non invasif, répétable, et dans le domaine cartographique, des analyses plus robustes sur de plus grandes surfaces d'étude, le tout réalisable par un opérateur formé. Elle offre une reproduction fidèle de la réalité à l'instant t, permettant de réduire la logistique et les coûts terrain lors de l'acquisition de données et offrant la possibilité de multiples traitements et analyses au sec, sur les supports 2D et 3D, par des biologistes marins. La bancarisation de données quantitatives en l'absence de biais observateur *in situ* est également un avantage non négligeable.



2. Méthodologie

2.1. Définition

La photogrammétrie est une technique qui consiste à **reconstituer la réalité en 3 dimensions à partir de photographies réalisées sous différents points de vue**. Le recours à cette technique et aux outils adaptés permet d'obtenir des **supports détaillés et précis, à l'échelle et géoréférencés en 2D ou 3D**, facilement exploitables dans des logiciels tiers de SIG, DAO ou 3D pour visualisations ou analyses ultérieures.

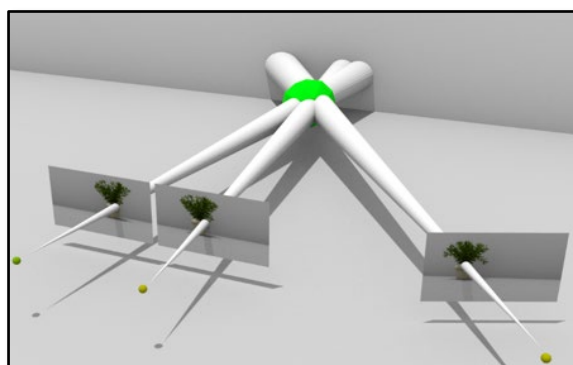


Figure 1. Principe de reconstruction 3D à partir de photographies

2.2. Acquisition de données

2.2.1. Principe d'acquisition des données

L'acquisition des images nécessaires à la création des reconstructions 3D est réalisée à partir d'un ou plusieurs appareils photographiques dont **la résolution et la distance influent sur la précision, et la focale et la distance sur la couverture photographique**.

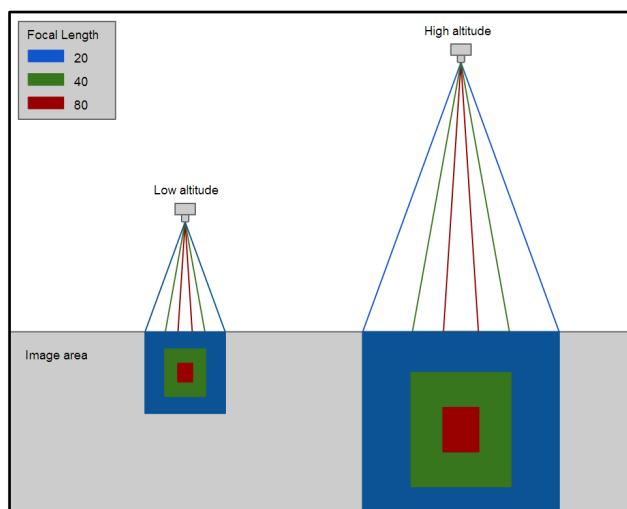


Figure 2. Relation entre distance et focale sur la couverture photographique au sol

Afin d'obtenir un résultat optimal, un recouvrement entre chaque image consécutive, à une distance constante, est effectué sur le secteur d'étude. Chaque photographie doit donc **posséder un pourcentage de contenu commun** avec la photographie précédente et suivante, mais aussi avec la photographie adjacente. Le principe d'acquisition ne repose donc pas sur une densité de clichés (au m² par exemple), mais plutôt **sur un positionnement optimal des clichés** afin d'en assurer une bonne juxtaposition et donc un bon recouvrement.

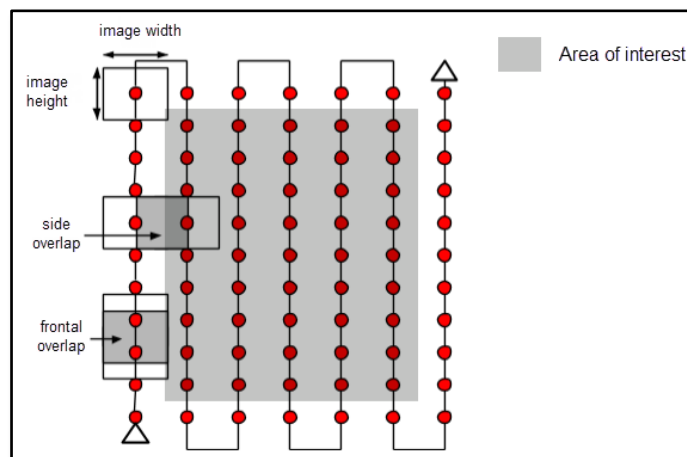


Figure 3. Exemple théorique de plan d'acquisition

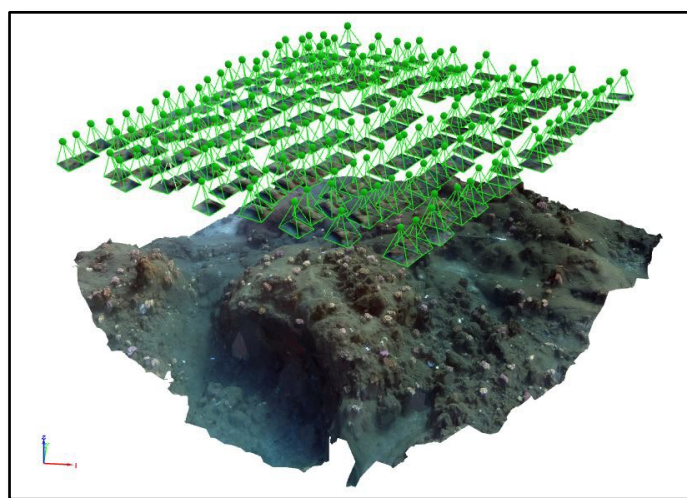


Figure 4. Exemple pratique de plan d'acquisition

Puisque le succès de la reconstruction photogrammétrique est une question d'angles et de recouvrement entre les images, les logiciels de traitement courants recommandent un recouvrement minimum entre les images de 75 à 80% en longitudinal (frontal) et 60% en latéral (côté) dans les cas généraux. **La distance du secteur d'étude affecte la précision, appelée GSD (Ground Sampling Distance) et la couverture de chaque cliché** comme suit :

$$GSD = (SW \cdot D \cdot 100) / (F \cdot PW)$$

- GSD = Distance d'échantillonnage au sol (cm/pixel)
- SW = Largeur du capteur (mm)

- D = Distance du sujet (m)
- F = Longueur focale sous-marine (mm)
- PW = Nombre de pixels de l'image (en largeur)

$$WC = GSD \cdot PW / 100$$

- WC = Couverture de l'image - largeur (m)
- GSD = Distance d'échantillonnage au sol (cm/pixel)
- PW = Nombre de pixels de l'image (en largeur)

Ainsi, pour acquérir un sujet d'étude donné, **une distance proche implique un plus grand nombre d'images et une meilleure précision, alors qu'une distance plus éloignée implique un nombre d'images et une précision moindre.**

Dans notre cas, le récif à *Acropora palmata* étant très peu profond (<2m) et la distance entre le haut du récif et la surface étant encore plus réduite (40-50 cm par endroits), un très grand nombre de photos a du être réalisé : plus de 29 000 photos ont été nécessaires pour couvrir les 2 secteurs d'étude.

2.2.2. Méthodologie

Lorsqu'un équipement photographique est immergé, l'acquisition de clichés subit des modifications dues à différents paramètres tels que : le hublot (plan ou dôme) du caisson sous-marin, l'interface air/eau et la réfraction de la lumière. Toutes ces altérations modifient la manière dont le capteur va figer chaque photographie.

Des tests de calibration ont été effectués pour quantifier les changements causés par l'eau, théoriquement, avec des calculs sur les formules de Descartes et *in situ*, en (I) utilisant des objets sur un damier et en comparant les mesures de distance, de surface et de volume des reconstructions 2D et 3D par rapport à la réalité puis (II) en testant différents ensembles de données pour améliorer les paramètres de calibration. **Ces paramètres, en particulier pour les valeurs de distance focale et de distorsions, ont été intégrés à notre protocole d'acquisition photographique et à notre flux de travail de reconstruction.**

Sur le terrain, avec un temps de plongée imparti (fonction de la profondeur) et un cout logistique élevé, des contraintes environnementales variables (clarté de l'eau, courant, houle) et aucune information de positionnement, **nous avons développé des protocoles qui assurent un nombre minimum de photos prises à bonne distance du sujet** dans un temps limité.

Nos protocoles, inspirés de six années d'expérience opérationnelle, permettent de positionner le photographe dans un espace 3D (l'eau), de manière très précise et prendre des photos exactement au bon endroit afin d'assurer une grille de recouvrement longitudinal et latéral de 75%, à une distance constante du fond afin de maintenir la même précision en tout temps.

Deux protocoles d'acquisition photographique ont été ainsi conçus puis optimisés à partir des résultats des tests de reconstruction 2D et 3D :

- ▶ Le protocole 1 a été créé pour acquérir des objets de moyenne taille, de différentes morphologies 3D, avec uniquement des prises de vue obliques et sphériques autour du sujet à une distance approximative de 50cm à 2m (capteur pointant avec un angle vers le sujet).

- ▶ Le protocole 2 a été créé pour des paysages, permettant de couvrir des zones de grande échelle avec des structures 3D, basé sur des prises de vue nadirales (capteur pointant verticalement vers le sol) et obliques (capteur pointant avec un angle vers le sujet), en réalisant des transects parallèles entre 2 et 3m de distance du fond.

C'est ce deuxième protocole qui a été initié dans le cadre de cette mission.

2.2.3. Matériel

Deux kits photographiques principaux ont été déployés : Nikon D500 et Canon G7x mark III.

- ▶ La première configuration se compose d'un Nikon D500 (capteur APS-C de 20 megas pixels) avec un objectif Nikkor 16mm, montés dans un caisson sous-marin Nauticam NA-D500 avec un dôme Nauticam.
- ▶ La deuxième configuration se compose d'un Canon compact G7X mark III avec un objectif standard F 8.8-37 mm, monté dans un caisson étanche Fantasea.

Les appareils photo sont réglés en mode manuel M, en ISO auto avec une limitation de 100-1600, une vitesse d'obturation ajustable (par le photographe), mais minimale de 1/160sec pour éviter le flou de mouvement. L'ouverture est ajustée par le photographe afin que l'ensemble du sujet soit net. La mise au point est réglée sur AF-S auto en mode large pour avoir plusieurs points d'autofocus sur le secteur d'étude. Tous les clichés sont pris au format RAW puis étalonnés.

Ces configurations particulières d'appareil photo nous permettent de **maximiser la couverture du secteur d'étude avec l'utilisation d'un grand angle, tout en gardant une grande précision** (taille réelle d'un pixel) **grâce à la résolution du capteur photographique, sans avoir trop de distorsion** (3% approximativement pour le Sony en 16mm) **et de courbure** sur les bords de chaque cliché.

Les objectifs possédant un plus grand angle ou fisheye, avec une distorsion lenticulaire plus importante entraînent généralement des problèmes de projection, d'artéfact ou une reconstruction courbe lors du traitement. De plus, sur les bords de l'image, la netteté est amoindrie puisque la distance est plus grande (hors du champ de netteté) qu'au centre. Les pixels de bordures sont donc dans ce cas-là moins ou pas utilisables.

2.3. Traitement des données

2.3.1. Méthodologie

Pour chaque jeu de données, **nous pouvons utiliser au préalable un nuancier de couleurs placé sur le site d'étude afin d'étalonner** (ajuster la lumière, le contraste, la netteté, les couleurs) **les photos** dans Adobe Lightroom due aux modifications qu'entraîne la colonne d'eau (filtre les couleurs) en fonction de la profondeur.

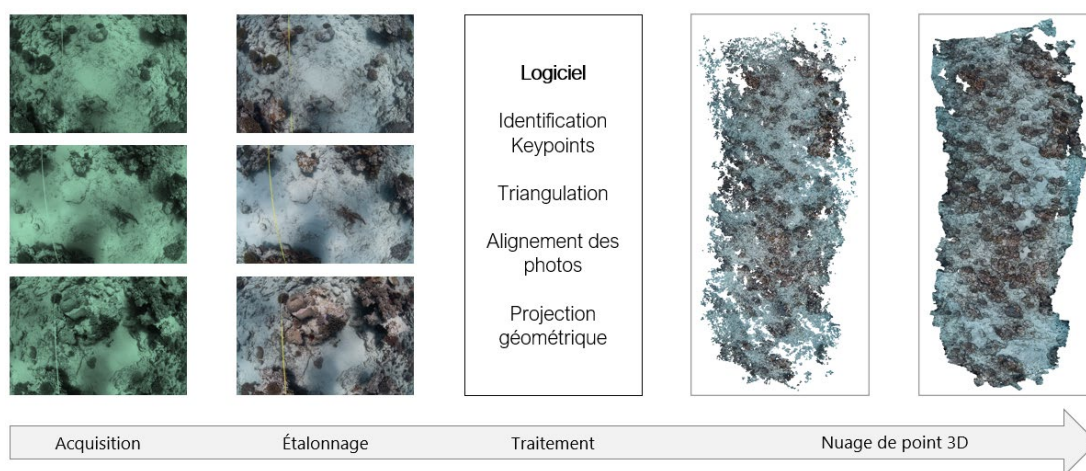
Les supports sont obtenus à l'aide du procédé de photogrammétrie, qui consiste à **reconstituer un nuage de points (pixels dans un espace en 3 dimensions) à partir des images**. Pour cela, un logiciel de traitement est utilisé. Ce logiciel opère une calibration des photographies pour corriger les déformations, puis, plusieurs milliers de points caractéristiques sont identifiés dans chacune des images et sont corrélés entre photographies adjacentes. **Le logiciel calcule, par triangulation de toutes les images, sur base de leur contenu, la position de l'appareil photo au moment de la prise de vue, puis projette les pixels par géométrie afin de créer un nuage de points 3D**. Ce nuage de points est la représentation tridimensionnelle de la zone d'étude depuis laquelle les autres supports peuvent être calculés.

Les jeux de données sont traités au besoin comme suit : estimation de la qualité des images, alignement des images, optimisation, construction d'un nuage de point clairsemé, mise à l'échelle, géoréférencement, construction d'un nuage dense, construction d'un modèle maillé

(mesh), construction de la texture, construction du MNS (Modèle Numérique de Surface), construction de l'orthophotographie, export des supports. Plusieurs outils sont également utilisés régulièrement en fonction du besoin : calcul de l'indice de confiance, fermeture des trous ...

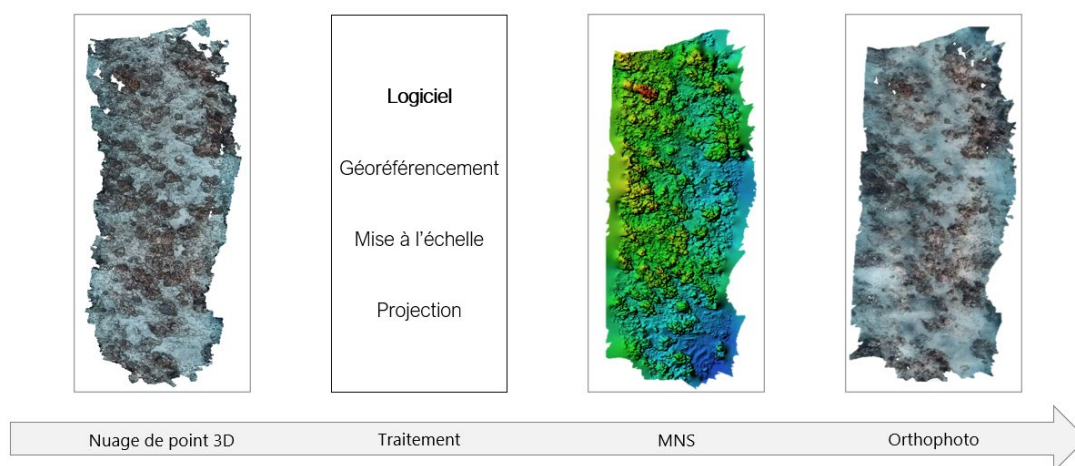
À partir de ces supports (nuage de point 3D, maillage 3D, Modèle Numérique de Surface (MNS) et orthophotographie), **il est possible d'extraire plusieurs caractéristiques et de réaliser des comparaisons temporelles, en 2 et 3 dimensions :**

- ▶ Métriques et physiques, comme des distances, des surfaces et volumes
- ▶ Morphostructurelles, comme la rugosité, la pente ...
- ▶ Biologiques sur des LIT, PIT, quadrats virtuels



WORKFLOW

Passage d'images 2D à des reconstructions 3D



WORKFLOW

Passage des reconstructions 3D au Modèle Numérique de Surface et Orthophotographie



Figure 5. Colonies coralliennes - Modèle 3D – Orthophotographie – Modèle Numérique de Surface



Figure 6. Paysage corallien - Modèle 3D – Orthophotographie – Modèle Numérique de Surface

2.3.2. Mise à l'échelle et géoréférencement

Préalablement à l'acquisition photographique, des étalons (trois étalons, au minimum, de dimensions connues) sont positionnés sur le secteur d'étude. Un étalon est placé au milieu, et les deux autres aux extrémités opposées afin d'éviter toute déviation de la reconstruction sur les bordures des supports. Ces étalons, photographiés lors de l'acquisition, sont utilisés après la reconstruction du nuage de point. **La taille des étalons est renseignée dans le logiciel de traitement qui opère une mise à l'échelle.**



Figure 7. Étalons de mise à l'échelle (source : CREOCEAN, 2023)

Dans le cadre de cette étude, un seul étalon était suffisant ; il a été positionné entre les deux principaux massifs coralliens.

De la même manière, des **GCP** (Ground Control Points) sont disposés sur le secteur d'étude.

Les GCP sont constitués de petits carrés métalliques en aluminium peints d'un motif en damier ou d'un code-barre et utilisés pour géoréférencer le secteur d'étude. Les étalons sont constitués de barres d'aluminium peintes d'un motif en damier ou d'un code-barre de chaque côté, dont l'espacement est connu, et utilisés pour mettre le sujet à l'échelle.

Ces GCP sont positionnés de manière homogène en termes de couverture, surface et profondeur (minimum et maximum), un sur chaque bord extrême (total de quatre) et au moins quatre autres sur le site d'étude. **Ces points de localisation sont utilisés après la reconstruction afin de géoréférencer le modèle.**



Figure 8. GCP – Points de contrôle positionnés sur le site d'étude

Les coordonnées XY sont prises à partir d'un GPS à l'emplacement de chaque GCP à la fin de l'acquisition photographique. La coordonnée Z, profondeur, est prise à partir du profondimètre du même ordinateur de plongée, deux fois : une avant et une après l'acquisition photographique pour faire une moyenne, en raison des conditions de mer qui peuvent évoluer. **Les données sont renseignées dans le logiciel de traitement, qui positionne le nuage de point dans son système de coordonnées géographiques.** La profondeur permet également la bonne orientation de la reconstruction.

Tous les étalons et les GCP sont photographiés et utilisés dans la reconstruction des jeux de données.

Dans le cadre de cette étude, **6 GCP** ont été positionnés autour de chacun des 2 massifs coralliens. Dont les coordonnées géographiques sont présentées ci-dessous :

GCP1	17°54.786	062°48.078
GCP2	17°54.778	062°48.081
GCP3	17°54.787	062°48.092
GCP4	17°54.777	062°48.091
GCP5	17°54.772	062°48.077
GCP6	17°54.777	062°48.077

2.3.3. Matériel

Le **logiciel de traitement principalement utilisé est Agisoft Metashape Professional** afin de standardiser un flux de travail sur le traitement des données. Il s'agit d'un logiciel commercial, convivial, avec un très bon algorithme d'alignement pour les prises de vue, une bonne qualité de reconstruction, un temps de traitement plutôt réduit et des outils dédiés appropriés.

2.4. Secteur d'étude

La cartographie des biocénoses marines de Saint-Barthélemy a été réalisée fin 2023 sur les fonds marins. Elle a permis, entre autres, de repérer et localiser les massifs denses d'*Acropora palmata* dans la baie du Grand Cul-de-Sac.

En complément de ce travail en cours par CREOCEAN, une analyse spécifique est menée dans le Grand Cul-de-Sac, à proximité de la barrière externe fermant la baie.

La zone investiguée est située à proximité du chenal d'entrée de la baie, légèrement à l'Ouest. Elle est située à faible profondeur (< 2 mètres) et couvre une superficie d'environ 1000 m² ;



Figure 9 : Vue aérienne de la sortie de la baie du Grand Cul-de-Sac (rectangle rouge : zone approximative d'étude, CREOCEAN, 2023)

Le secteur d'étude a été divisé en 2 zones de travail :

- ▶ **Zone n°1** : secteur Ouest le plus dense et la plus grande, d'une superficie d'environ 450 m² ;
- ▶ **Zone n°2** : secteur Est, plus clairsemé, écarté de la première d'environ 5-6 mètres, d'une superficie de 300 m².

MODÉLISATION D'UN RÉCIF CORALLIEN À ACROPORA PALMATA PAR PHOTOGRAMMÉTRIE
Saint-Barthélemy - Grand Cul de Sac - Site d'étude



Figure 10. Vue panoramique de la zone n°1 (source : CREOCCEAN, 2023)

2.5. Déroulement de mission

La mission s'est déroulée du **26 novembre 2023 jusqu'au mercredi 29 novembre**, en présence de 2 ingénieurs CREOCEAN.

Pour des raisons logistiques et organisationnelles, la mission s'est déroulée en snorkeling, avec en soutien, un kayak et un radeau de chasse, fournis par l'ATE.

En effet, du fait de l'emplacement, des faibles profondeurs et des conditions environnementales relativement agitées les 2 premiers jours, il n'était pas possible d'organiser une mission en plongée bouteilles avec un navire en support surface.

Le kayak a servi uniquement au transport du matériel (appareils photos, GPS, GCP, eau, etc...) et de moyen de sécurité pour prévenir les navires entrant/sortant de la baie.



Figure 11 : Kayak de l'ATE servant de base de support
(source : CREOCEAN, 2023)

Lors du premier jour, il a été fait un repérage des 2 zones de travail (distance, profondeur, étendue), de délimiter au GPS leur périmètre extérieur, de positionner 4 repères GCP en périphérie de la zone n°1 la plus dense et de prendre leur point GPS.

Le courant ne permettant pas la mise en place de transects permanents, des photographies en « timelapse » ont été réalisées par les 2 ingénieurs.

Chaque jour, les photos prises (entre 4 000 et 6 000 photos quotidiennes) sont exportées (plus de 100 Go de données) et sauvegardées sur double back-up. Les photos sont post-traitées sur **Adobe Lightroom** afin d'améliorer le contraste, la luminosité, les couleurs et la balance des blancs, mais également d'homogénéiser la colorimétrie entre les 2 appareils. Ensuite, les photos étaient exportées vers le logiciel **Agisoft Metashape** qui effectue l'alignement des photos pendant la nuit (7-8h de traitement sont nécessaires), afin d'avoir une vision complète de l'avancement de la journée effectuée.

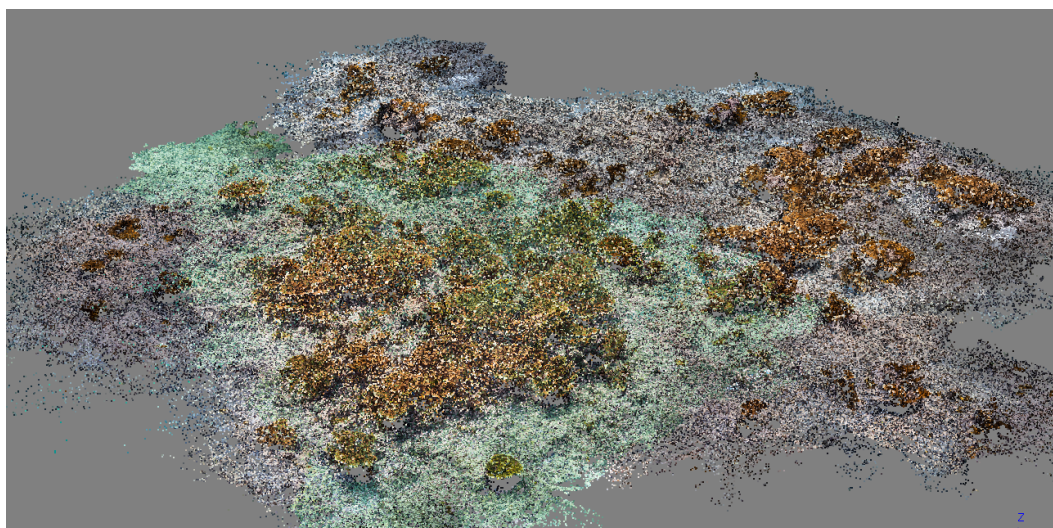


Figure 12 : Illustration du modèle de points après la première journée du 26/11/2023

Le dernier jour, des essais photogrammétriques sur quelques colonies spécifiques ont été faits pour la réalisation d'un modèle 3D à échelle plus restreinte.

3. Résultats

Les éléments ci-dessous sont uniquement des illustrations des modèles réalisés ; ces derniers seront fournis séparément, chacun dans 3 formats distincts, pour chacune des 2 zones et pour chacune colonie d'*Acropora palmata* modélisée :

- ▶ Une orthophotographie ;
- ▶ Un modèle Numérique de Surface ;
- ▶ Un objet 3D.

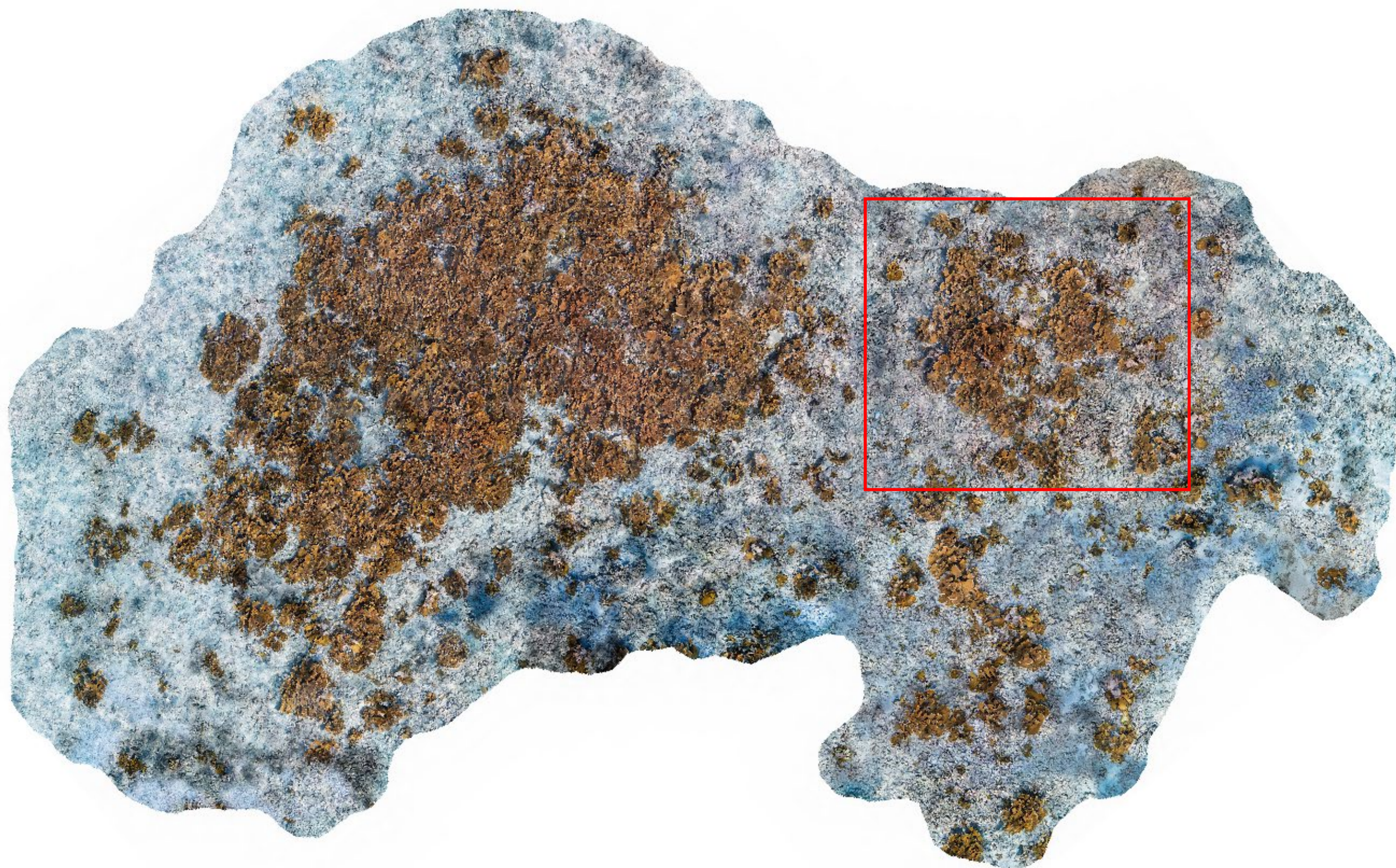
3.1. Orthophotographies

Une **orthophotographie** est une mosaïque de photographies (aérienne, satellitale ou sous-marine) qui a été corrigée géométriquement en supprimant les déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vue et à la distorsion de l'objectif de l'appareil photo.

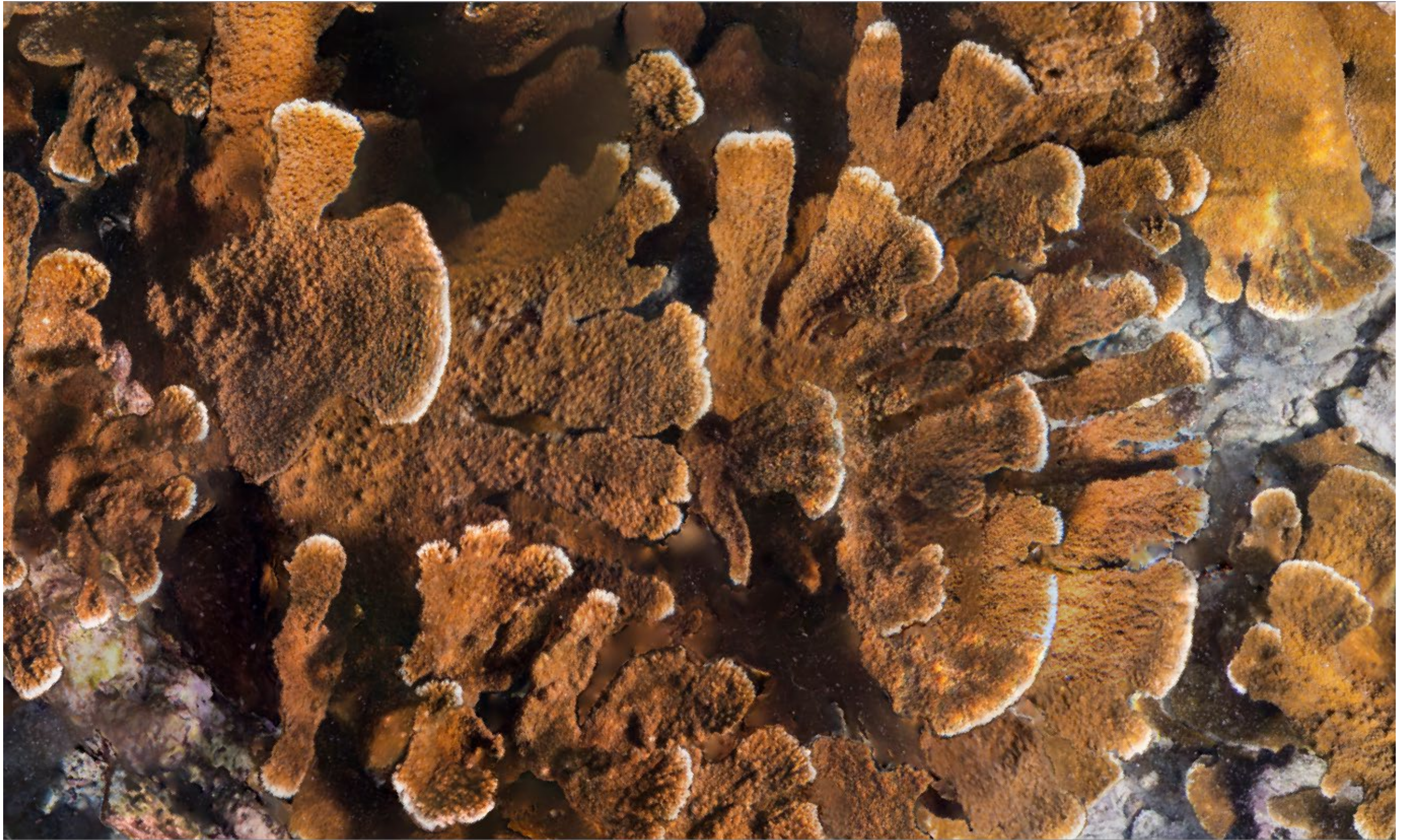
Une orthophotographie est donc un produit géoréférencé, superposable à une carte et facilement intégrable dans un Système d'Information Géographique (SIG). Elle permet de mesurer des longueurs ou des surfaces de tout objet du sol.

Sont présentées ci-dessous l'orthophotographie de la zone d'étude avec différentes échelles de zoom afin d'illustrer la qualité des rendus.

L'orthophotographie est géoréférencée et fournie au format kmz (lisible sous Google Earth) et au format shp (lisible sous QGIS).







3.2. Modèle Numérique de Surface (MNS)

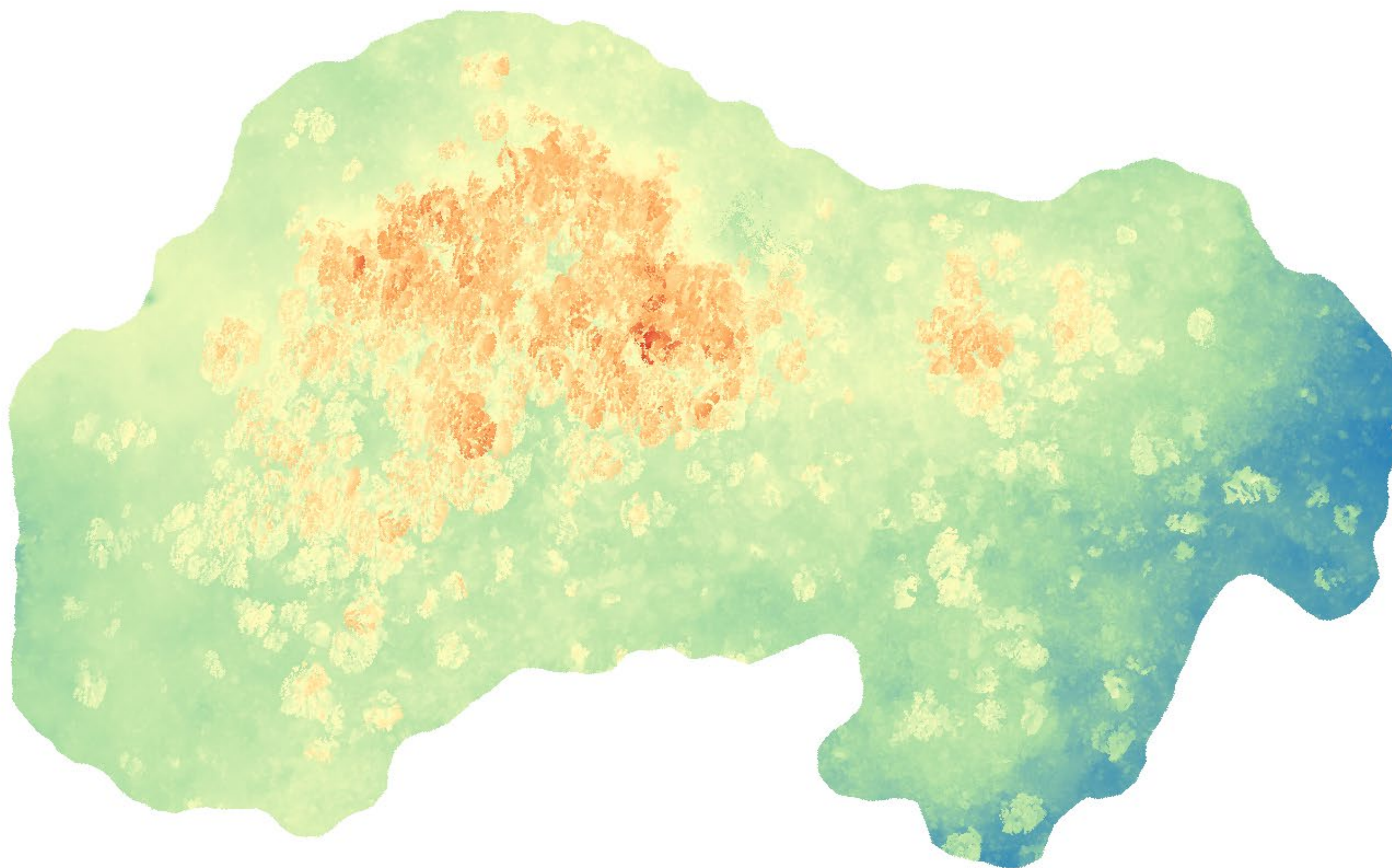
Un modèle numérique de surface ou d'élévation (MNS/MNE) est une description altimétrique/bathymétrique du sol et de ses structures, c'est-à-dire les objets qui occupent le sol, du fait de l'homme ou non (végétation, bâtiments...).

Pour produire ces modèles, il faut une donnée source. Plusieurs données et types d'acquisitions peuvent être utilisées pour la produire. Suivant les méthodes et les capteurs, on va obtenir une précision différente. Parmi celles les plus utilisées jusqu'à présent, on citera :

- ▶ Acquisition avec un capteur RADAR ;
- ▶ Corrélation d'images (stéréoscopie)
- ▶ Acquisition avec un capteur laser (LIDAR) aéroporté.

Dans le cas de nos acquisitions, on produit une donnée brute nommée nuage de point. C'est une modélisation en 3D de la zone acquise réalisée à partir des points projetés depuis les photos. La densité du nuage va dépendre de divers paramètres au moment de l'acquisition (capteur photo, distance à l'objet, etc.). Plus la densité de points est grande, plus on pourra réaliser un modèle de précision. Le nuage de points est ensuite projeté en 2D à plat pour créer un MNS/MNE et est classifié selon un code couleur basé sur la profondeur de chaque point.

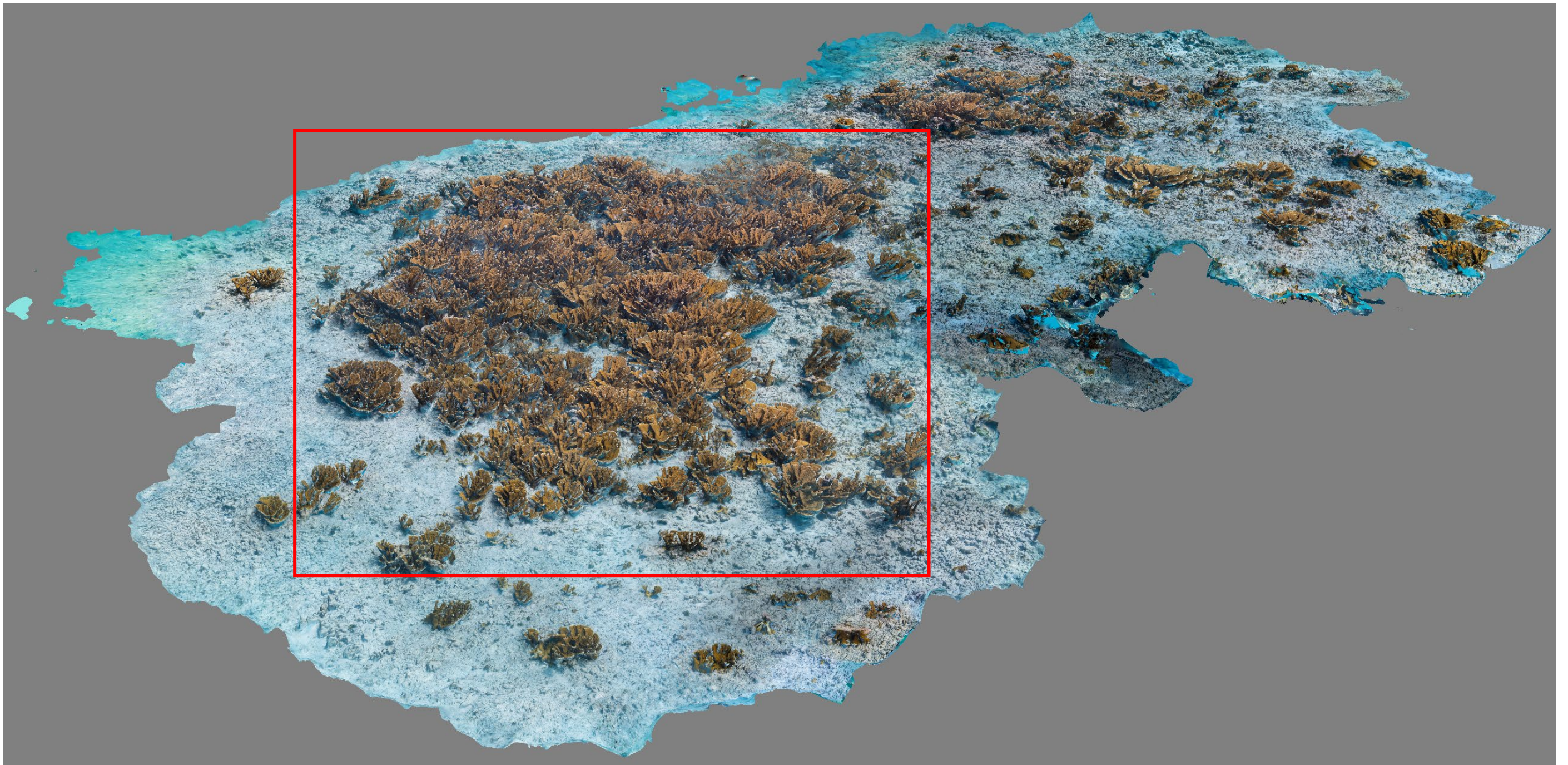
Le modèle transmis est lisible sous GLOBAL MAPPER et QGIS.

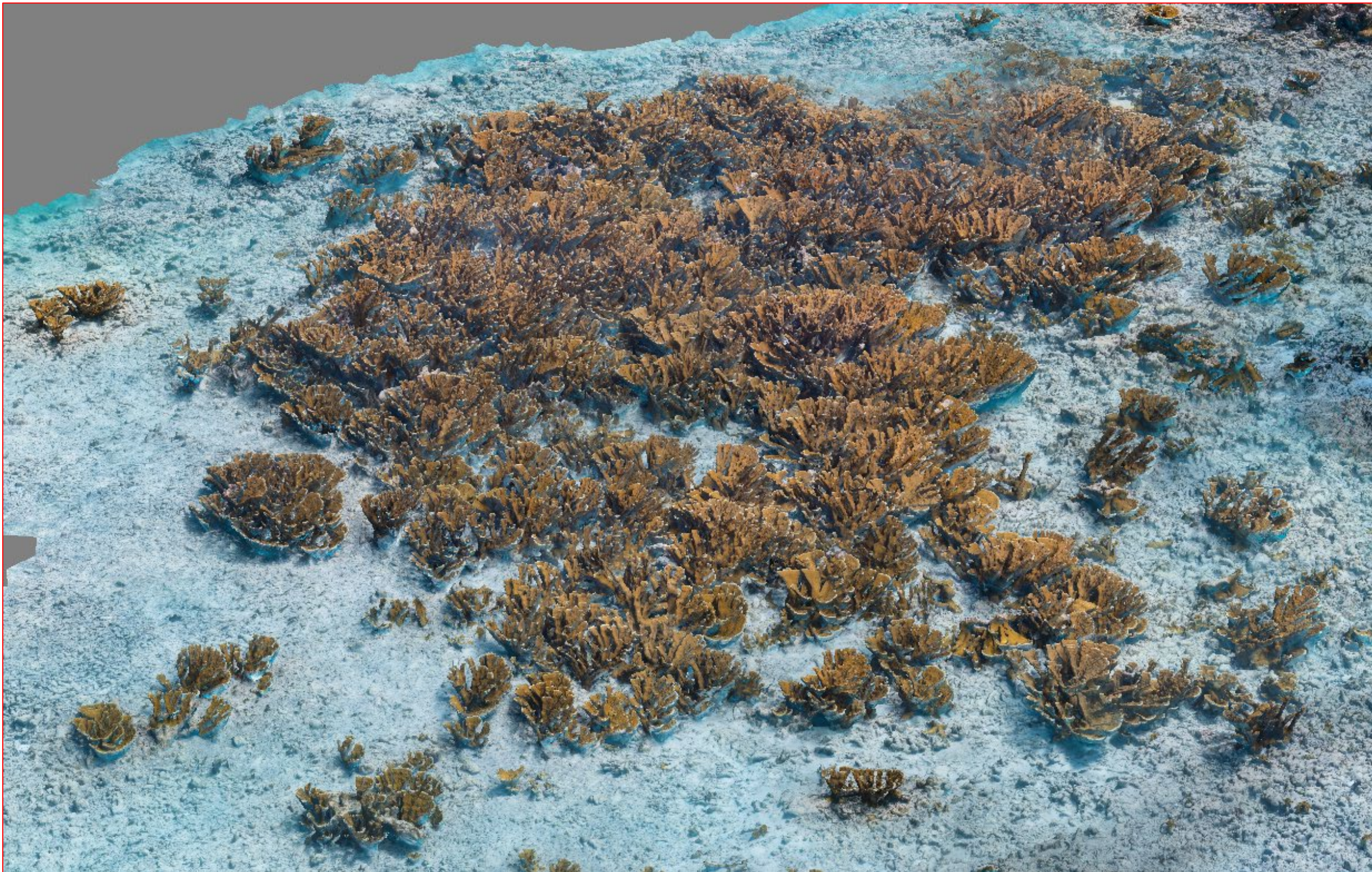


3.3. Illustrations de modèles 3D maillés

3.3.1. Illustration du massif corallien dans sa globalité

Ci-dessous des captures d'écran du massif corallien vu dans sa globalité d'après le logiciel de modélisation Metashape©. Afin de percevoir finement le niveau de précision, il convient de regarder l'objet 3D fourni à ce titre la semaine prochaine, permettant de se déplacer / zoomer à l'intérieur du massif corallien.





3.3.2. Illustration de 2 colonies d'*Acropora palmata*



Figure 13 : 1ere Modélisation 3D d'une colonie d'*Acropora palmata*



Figure 14 : 2^e Modélisation 3D d'une colonie d'Acropora palmata

4. Évolution temporelle de descripteurs physiques potentiels (non inclus à cette prestation)

Le principal objectif des travaux réalisés sur les récifs coralliens concerne **l'extraction de descripteurs physiques et indices morphostructurels**.

Les analyses se basent sur trois supports : les modèles 3D maillés (mesh), les Modèles Numériques de Surface (MNS) et orthophotographies projetés en 2D. Elles portent sur **l'extraction de métriques physiques (distance, surface et volume) et le calcul d'indices morphostructurels (rugosité, pente, complexité et refuge)**.

Une fois les supports créés, **plusieurs protocoles d'analyse de données ont été testés puis standardisés, sur les logiciels QGIS, Global Mapper, Cloud Compare, Blender et 3D Reshaper**.

4.1.1. Descripteurs physiques

Les descripteurs physiques comme les mesures de distance, surface et volume sont réalisés en 3D sur le nuage de point, ou en 2D projetée sur les Modèles Numériques de Surface (MNS) ou orthophotographies.

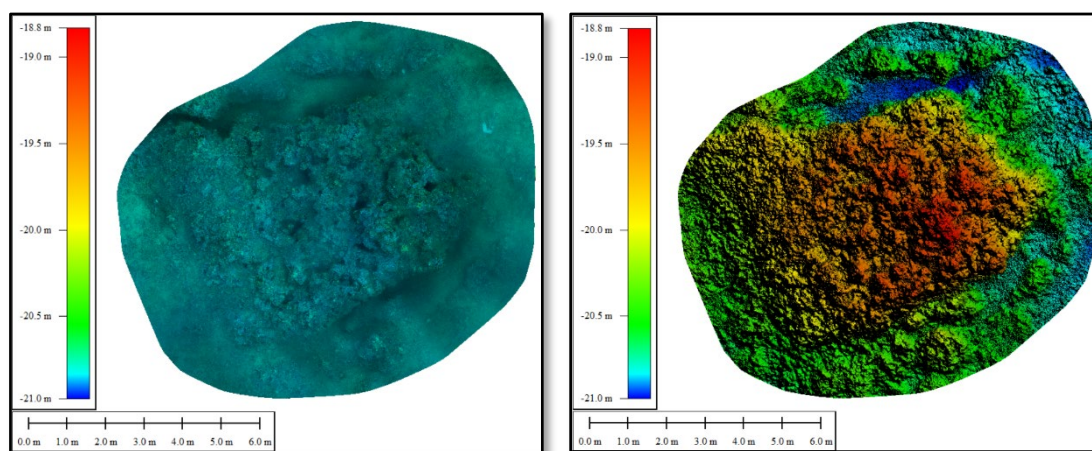


Figure 15. Orthophotographie et MNS d'un récif coralligène

Les comparaisons temporelles, et plus spécifiquement volumétriques pourraient permettre **d'évaluer la croissance, la régression ou la dégradation physique des récifs coralligènes** (notamment due à leur lente évolution). Par ailleurs, celles-ci permettent **d'appréhender les conditions hydrodynamiques** locales, particulières ou exceptionnelles par l'évaluation du recouvrement (volume du dépôt sédimentaire) des récifs par un substrat meuble (sable par exemple).

4.1.2. Pente

En topographie, lorsque l'on parle de l'inclinaison d'un terrain, on utilise la notion de pente exprimée en pourcentage (%) plutôt que d'angle exprimé en degrés. La pente exprime **l'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontale**. Elle est le rapport entre le dénivelé (hauteur) et la distance horizontale (longueur) comme suit :

$$P (\%) = 100 \cdot (H/D)$$

■ P = Pente (%)

- H = Hauteur (m)
- D = Longueur (m)

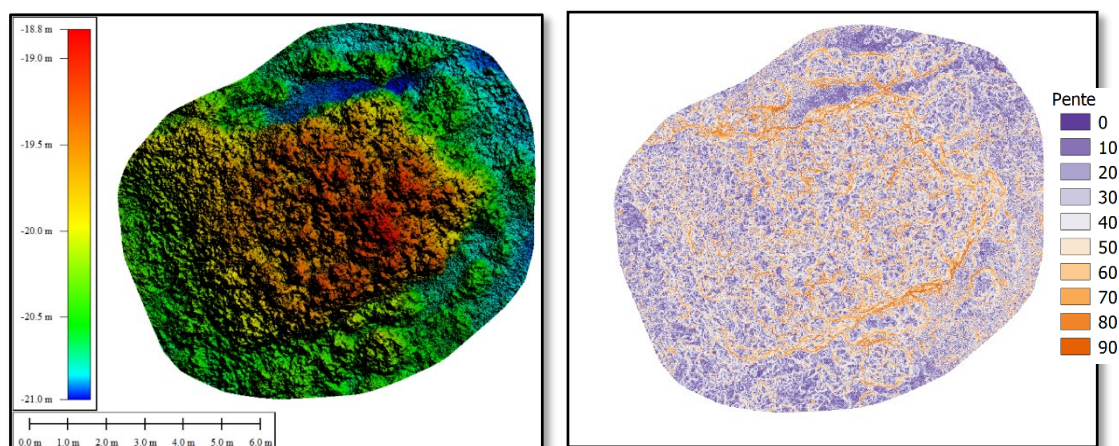


Figure 16. MNS et pourcentages de pente sur un récif coralligène

La cartographie des pentes permet **une identification rapide des zones les plus pentues/escarpées** du sujet d'étude. Cette information (couplée à l'orientation de la paroi) informe indirectement **sur les conditions de luminosité, d'hydrodynamisme et de sédimentation** et par conséquent renseigne sur **la présence potentielle de certaines espèces** (espèces sciaphiles, espèces photophiles, filtreurs actifs et passifs...).

4.1.3. Rugosité linéaire et surfacique

L'indice de rugosité linéaire est réalisé le long d'un transect, il est le rapport entre la distance 3D (qui épouse le relief) et la distance 2D (à plat, en rouge sur **Figure 17**) comme suit :

$$RL = D3D/D2D$$

- RL = Rugosité linéaire
- D3D = Distance 3D (m)
- D2D = Distance 2D (m)

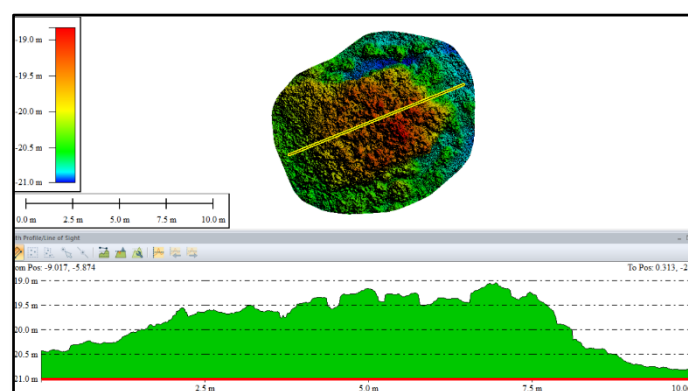


Figure 17. Indice de rugosité linéaire

Le calcul est le suivant pour **Figure 17** :

- Ligne 3D : 13.34m
- Ligne 2D : 9.15m
- Rugosité linéaire : $13.34/9.15 = 1.457$

L'indice de rugosité surfacique est réalisé sur toute la surface d'étude, il est le rapport entre la surface 3D (qui épouse le relief dans la surface en pointillé) et la surface 2D (à plat, en pointillé sur **Figure 18**) comme suit :

RS = S3D/S2D

- RS = Rugosité surfacique
- S3D = Surface 3D (m²)
- S2D = Surface 2D (m²)

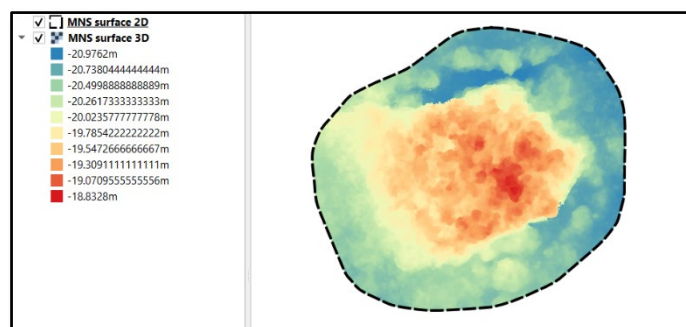


Figure 18. Indice de rugosité surfacique

Le calcul est le suivant pour **Figure 18** :

- Surface 3D : 148.86m²
- Surface 2D : 105.97m²
- Rugosité surfacique : $148.86/105.97 = 1.404$

L'indice de **rugosité** renseigne sur la texture, la macrostructure, la porosité d'un site d'étude, **déterminants à l'accroche et au développement des espèces**, dès les premiers stades de colonisation d'un substrat. Il peut renseigner sur la nature géologique du substrat ou donner des **indications sur la capacité de fixation des organismes benthiques**. Il est également utilisé pour réaliser des comparaisons intersites en y liant leur diversité d'espèces associées. Cependant, l'indice de rugosité linéaire est fortement tributaire de sa position sur le sujet d'étude, il est principalement utilisé sur des transects permanents censés être représentatifs du site d'étude. La rugosité surfacique, quant à elle, permet de s'abstraire de transects, puisqu'elle prend le site d'étude dans son entièreté et est donc plus généralisée et « réaliste ».

