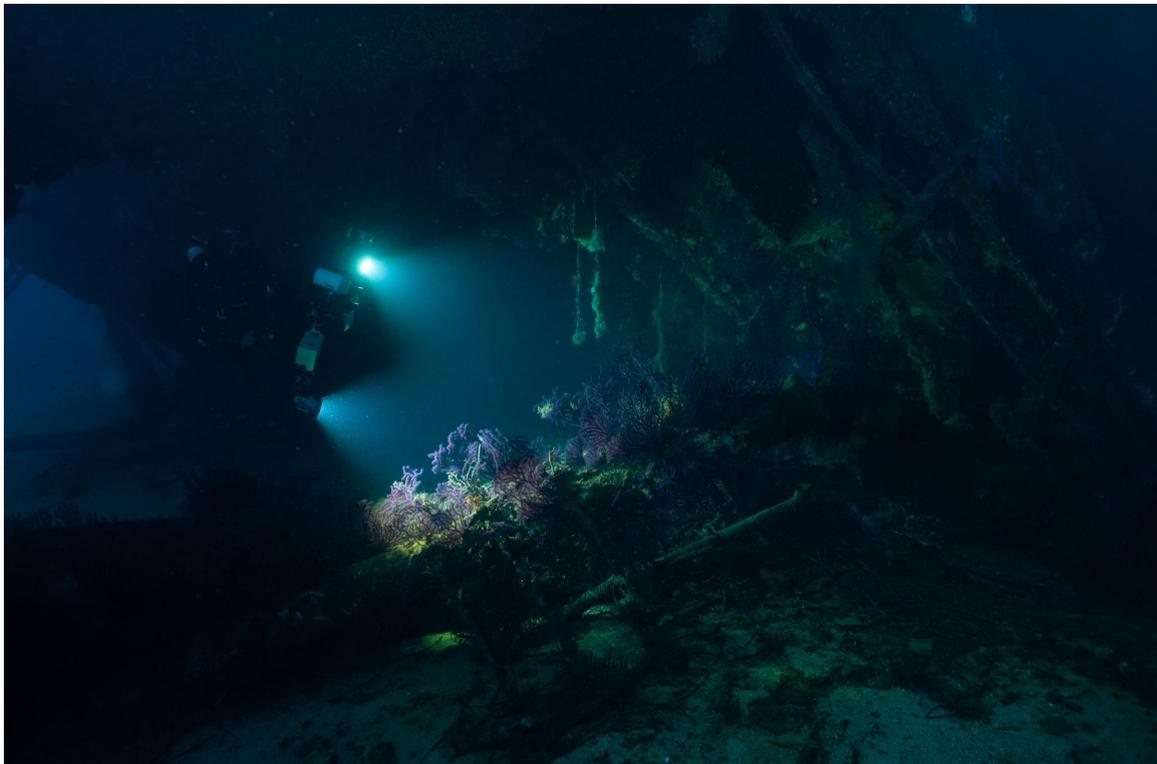




Project co-financed by the European  
Regional Development Fund

# SUIVI PAR PHOTOGRAMMÉTRIE POUR LE PARC NATIONAL DES CALANQUES – Rapport d'étude



SEPTENTRION ENVIRONNEMENT  
Janvier 2022

## PREAMBULE

**Contexte, financements et réalisation** : Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la prestation "Suivi par photogrammétrie" de Septentrion Environnement (SE) pour le compte du Parc national des Calanques (PNCa) financée par le projet Interreg Med MPA Engage. Ce rapport présente les actions entreprises durant la phase de terrain de novembre-décembre 2021.

**Principaux participants de SE** : Olivier Bianchimani, Justine Richaume, Tristan Estaque, Tiffany Monfort, Vincent Blondeaux, Giulia Gatti, Adrien Cheminée.

**Remerciements** : ce travail a bénéficié des conseils réguliers et des travaux réalisés en collaboration avec le Dr. Pierre Drap, Directeur de recherches au CNRS (LIS, UMR 7020).

**Citation, utilisation, reproduction** : Ce travail doit être cité comme suit (citation) ; l'utilisation et reproduction sont libres et gratuites, sous réserve de citer les auteurs et de mentionner les noms des organismes financeurs (Financements et réalisation).

**Citation** : « Bianchimani O., Richaume J., Estaque T., Monfort T., Blondeaux V., Gatti G., Cheminée A. 2022. Suivi par photogrammétrie pour le Parc national des Calanques – Rapport d'étude. Septentrion Env. publ. – 22 p. ».

Ce document est publié sous licence CC BY 4.0  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>)



## SOMMAIRE

<b>PREAMBULE</b>	<b>1</b>
<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS</b>	<b>2</b>
1.1. Le projet MPA-ENGAGE	3
1.2. Des habitats essentiels	3
1.2.1. Le coralligène	3
1.2.2. L'importance d'un suivi spatio-temporel de la structure 3D	4
1.2.3. Objectifs de la présente étude	4
<b>2. PRÉSENTATION DE L'ÉQUIPE DU PROJET : SEPTENTRION ENVIRONNEMENT</b>	<b>5</b>
2.1. Objet	5
2.2. Expériences	6
<b>3. MATERIEL ET METHODES</b>	<b>6</b>
3.1. Contexte	6
3.2. Le système KarKam	7
3.3 Stratégie d'échantillonnage	9
<b>4. RÉSULTATS: PLONGÉES RÉALISÉES, DONNÉES ACQUISES, ET MODÈLES GÉNÉRÉS</b>	<b>10</b>
4.1 Plongées réalisées et données acquises	10
4.2. Bilan des acquisitions	11
4.2.1 Planier	11
4.2.2 Impérial du large	12
4.2.3. Grand Congloué	14
4.3 Modèles générés	16
<b>5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>20</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>21</b>

## **1. CONTEXTE ET OBJECTIFS**

### **1.1. Le projet MPA-ENGAGE**

Le projet MPA-ENGAGE a pour but de soutenir les AMPs de Méditerranée afin de prévenir et de remédier aux effets du changement global qui pourraient, entre autres, avoir de grands impacts sur les communautés endémiques. Financé par le programme européen Interreg Med, ce projet mène des actions au sein de 7 pays méditerranéens grâce à l'engagement de nombreuses zones réglementées, dont le Parc national des Calanques (PNCa). A l'aide d'un budget de 3 millions d'euros et d'une approche participative, le suivi de ces espaces contribue à la mise en place de mesures de gestion et de conservation adéquates, en partenariat avec diverses instances et acteurs de la mer.

Plusieurs protocoles de suivis ont été élaborés afin de recenser l'évolution des températures, les mortalités de masses, mais aussi les connaissances écologiques locales afin de retracer les changements historiques et avoir un suivi périodique. Certains protocoles ciblent des catégories d'organismes tels que le protocole recensant visuellement les espèces de poissons indicatrices du changement climatique. Le Parc national des Calanques est un des sites pilotes privilégiés pour améliorer ces suivis mais aussi mener des actions de communication et promouvoir une gestion du milieu marin dans le but d'agir contre les effets du changement climatique, notamment *via* les sciences citoyennes et un dialogue politique méditerranéen entre acteurs.

### **1.2. Des habitats essentiels**

Dans le contexte de changement global actuel qui perturbe la biosphère, les écosystèmes marins côtiers comme le coralligène ou la roche infralittorale se trouvent en première ligne (Coll et al., 2010). En Méditerranée, les aires de répartition de certaines espèces endémiques ont évolué notamment à cause du réchauffement des eaux de surface (*sea surface temperature* : SST). De plus, des espèces non-indigènes (NIS) dont certaines invasives ont été recensées arrivant notamment de la mer Rouge et de l'Océan Indien. La structure des habitats et les assemblages d'espèces endémiques méditerranéennes sont d'ores et déjà influencés par leur présence (Sala et al., 2011). De plus, les pressions anthropiques, telles que l'urbanisation côtière et le changement climatique, sont connues pour affecter les habitats marins côtiers (Coll et al., 2010). Plusieurs habitats sont caractéristiques et même emblématiques de Méditerranée. En application des directives européennes (DHFF) ceux-ci font l'objet d'un inventaire (Michez et al., 2011). Plus particulièrement, la catégorie d'habitats "récifs" (numéro 1170) comprend tous les fonds rocheux depuis la frange littorale en surface jusqu'au circalittoral, avec cinq habitats élémentaires : la roche supralittorale (1170-10), la roche médiolittorale supérieure (1170-11) et inférieure (1170-12), la roche infralittorale à algues photophiles (1170-13), et le coralligène (1170-14). Ces habitats d'intérêt communautaire font l'objet d'une attention particulière de la part des gestionnaires.

#### **1.2.1. Le coralligène**

Les récifs coralligènes sont un hotspot de biodiversité marine méditerranéenne considérés comme d'importance communautaire (Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages, 1992). D'origine biogénique, les concrétions coralligènes sont principalement le résultat d'accumulation d'algues sciaphiles (Corallinacées, Peyssonneliacées) et d'organismes

bioconstructeurs (bryozoaires, serpulidés..) de l'étage circalittoral c'est-à-dire en condition de luminosité réduite entre 20 et 120 m de profondeur (Ballesteros, 2006, 1992; Gibson et al., 2006). Ces espèces d'algues calcaires et d'invertébrés sessiles structurent les assemblages benthiques associés et constituent des paysages marins remarquables caractéristiques de Méditerranée ayant une richesse, une biomasse et une productivité équivalentes à celles des assemblages de récifs coralliens tropicaux.

Le coralligène peut présenter divers faciès: coralligène de paroi, présentant une abondance d'invertébrés dressés sur des tombants ou surplombs (*Eunicella* spp., *Paramuricea clavata*...) ou coralligène de plateau formant des massifs biogènes (Ballesteros, 2006). De part leur complexité structurale, aux nombreux microhabitats, les fonds coralligènes abritent un grand nombre d'espèces dont certaines protégées au niveau national et international (*Spongia officinalis*, *Hippospongia communis*, *Axinella polypoides*, *Lithophaga lithophaga* ou encore *Scyllarides latus*). Le coralligène abrite aussi des espèces à fort intérêt commercial : grands crustacés décapodes (*Palinurus elephas*, *Maia squinado*, *Homarus gammarus*) ou encore le corail rouge (*Corallium rubrum*). Ainsi, le coralligène fournit des services écosystémiques majeurs, d'une part une production directe pour la pêche des espèces de haute valeur économique, et d'autre part une production indirecte par la valeur esthétique de l'habitat pour le tourisme sous-marin (Thierry de Ville d'Avray, 2018).

Cependant cet habitat fragile est soumis à de nombreuses pressions anthropiques liées aux activités de pêche et de plongée, aux émissaires de station d'épuration et aux effets du réchauffement climatique (Piazzi et al., 2012). En Méditerranée nord-occidentale, deux anomalies thermiques durant les étés 1999 et 2003 ont été particulièrement meurtrières pour les organismes composant la biocénose coralligène (Garrabou et al., 2009).

### 1.2.2. L'importance d'un suivi spatio-temporel de la structure 3D

La structure tridimensionnelle d'un habitat peut avoir un effet sur les assemblages necto-benthiques mais aussi sur le rôle de l'habitat (Cheminée et al., 2017; Cuadros et al., 2017; Ferrari et al., 2017; Monfort et al., 2021). Par conséquent, la transformation de la structure des habitats ainsi que les effets d'autres facteurs agissant en synergie peuvent alors compromettre l'équilibre des zones côtières où les habitats sont d'importance fonctionnelle. Les processus écosystémiques peuvent ainsi être influencés car la structure des habitats est donc susceptible d'agir sur la diversité fonctionnelle des assemblages. Des habitats essentiels à la séquestration du CO<sub>2</sub> pourraient alors être modifiés, réduits, voire détruits. De même, il est possible que des espèces à fortes valeurs socio-économiques soient menacées.

En conséquences, dans le but d'**optimiser les efforts de conservation**, il est essentiel de mettre en place des **suivis sur le long terme** de la composition et de la structure des habitats et communautés, notamment le coralligène, afin de détecter leurs possibles perturbations et de pouvoir **préconiser** avec anticipation les **mesures de gestion** adéquates. Le présent travail s'inscrit dans cette démarche.

### 1.2.3. Objectifs de la présente étude

La présente étude est effectuée dans le cadre du projet MPA Engage. Elle a pour objectif de décrire, sous forme de modèles issus de la photogrammétrie, l'état actuel des récifs coralligènes de certains sites du PNCaI, avec pour ambition de disposer ainsi à l'avenir d'un état de référence, pour pouvoir en effectuer un suivi, dans un contexte de changement global pouvant affecter le Parc national des Calanques ; ceci en prenant en compte à la fois le coralligène se trouvant sur les parois mais aussi le coralligène de plateau. L'utilisation de la

photogrammétrie a pour but de disposer de modèles permettant *a posteriori* l'étude de la structuration 3D et de la composition de cet habitat, et de donner ainsi les bases permettant à l'avenir d'estimer comment cette structuration et les fonctions écosystémiques liées seront potentiellement influencées par le changement climatique. Il est intéressant de connaître ces changements pour déterminer les possibles impacts sur les assemblages d'espèces propres à cet habitat (poissons et invertébrés). En effet, ils peuvent à leur tour être impactés si une altération de la structure 3D de leur habitat a lieu.

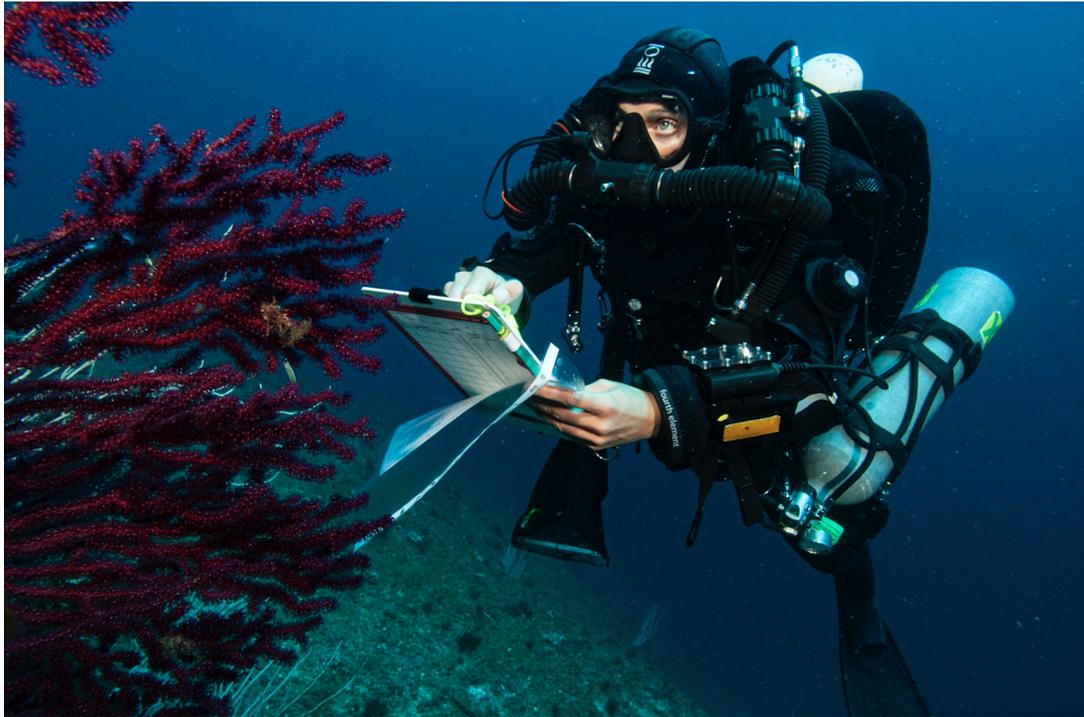
Les **objectifs opérationnels** de la présente étude incluent donc:

- l'acquisition d'images haute résolution en plongée selon un protocole standard,
- la construction de modèles 3D haute résolution (échelle sub-centimétrique) des habitats et sites étudiés,
- la rédaction d'un rapport bilan de l'action,
- la bancarisation des données.

## **2. PRÉSENTATION DE L'ÉQUIPE DU PROJET : SEPTENTRION ENVIRONNEMENT**

### **2.1. Objet**

L'association Septentrion Environnement a été créée en 2007 dans le but de contribuer à l'acquisition et au transfert de connaissances sur les écosystèmes marins et leurs transformations liées au changement global, ainsi que de participer à leur préservation au travers d'études environnementales visant à conseiller les gestionnaires, et enfin *via* des actions de communication. Son champ d'actions couvre plusieurs écosystèmes côtiers, incluant notamment les peuplements du coralligène ou encore les habitats essentiels des petits fonds ayant une importance fonctionnelle pour les peuplements de poissons. Sur le plan méthodologique, les outils utilisés par les membres de l'association incluent aussi bien des méthodes d'échantillonnage *via* l'instrumentation embarquée que celles réalisées en plongée sous-marine (Fig.1), et utilisent aussi bien les protocoles classiques que des méthodes faisant appel aux technologies comme la photogrammétrie sous-marine. Reconnue d'intérêt général, Septentrion Environnement s'intègre au sein d'un réseau d'acteurs locaux, nationaux et internationaux. En lien étroit avec les gestionnaires, elle apporte son expertise dans le cadre de la gestion intégrée des zones côtières.



**Fig.1.** Recensement visuel de la vitalité d'une colonie de *Paramuricea clavata*

## 2.2. Expériences

Depuis 15 ans, nous pilotons et réalisons des projets scientifiques et contribuons à des programmes pluri-partenaires en étroite collaboration avec des instituts de recherches tels que le MIO (Université Aix-Marseille / CNRS / IRD, France), l'IMBE (Université Aix-Marseille/CNRS, France), le CRIOBE, le MNHN (Muséum National d'Histoire Naturelle), Ifremer Sète, l'Institut de Cienciès del Mar (CSIC, Espagne), le LIS (CNRS, France). De plus, notre structure co-encadre ou prend part à des travaux de recherche de doctorat et post-doctorat, notamment en ce qui concerne les expérimentations de terrain (MNHN, etc.). En temps que formateurs nous co-animons et intervenons dans divers diplômes concernant l'écologie marine. D'autre part, nous réalisons des projets de médiation selon une approche pédagogique utilisant des supports numériques, reconstituant en 3D le patrimoine immergé tels que certains sites de plongée emblématiques (Grotte à corail, Goul du pont, les Pharillons, les épaves du Liban, Ker Bihan et Messerschmitt, etc.) notamment dans le cadre du Congrès mondial de l'UICN 2020-2021.

## 3. MATERIEL ET METHODES

### 3.1. Contexte

Plus de quinze années d'expérience en relevés sous-marins par photogrammétrie (Drap et al., 2014; Monfort et al., 2021; Richaume et al., 2021; Royer et al., 2018) nous ont conduit à mettre au point, en collaboration avec le CNRS (LIS, UMR 7020) une approche méthodologique et instrumentale originale destinée au relevé de grandes surfaces sous-marines. En effet lors de relevés 3D de grandes zones sous-marines plusieurs problèmes se posent et méritent une réponse claire et répétable. Tout d'abord il convient de s'assurer que sur l'ensemble du site

l'échelle reste dans le même ordre de grandeur de précision. Or si la mise à l'échelle est assurée par quelques petits (au regard de la dimension du site) étalon de longueur disposés sur le site, il est certain que d'importantes et non quantifiables ni même identifiables erreurs d'échelle parsèment le modèle résultant. Sur un site de grandes dimensions (plus de 10 m<sup>2</sup>) une autre approche que la traditionnelle mise à l'échelle sur étalons doit donc être mise en œuvre. Nous avons opté pour un système stéréo, composé de deux appareils photographiques reflex 24x36 px, Full Frame, montés sur une barre de fixation indéformable et synchronisés électroniquement. Ceci procure, après calibration du système stéréo, une base étalon pour chaque prise de vue : en effet la distance entre les appareils photographiques étant stable et calibrée au préalable elle est imposée au logiciel de calcul photogrammétrique et assure ainsi une échelle homogène et indiscutable sur l'ensemble du site relevé.

Par ailleurs, si la composante stéréo du système produit effectivement le double d'images à traiter, elle assure une parfaite orientation des images au sein de l'ensemble, et chaque couple étant déjà relativement orienté, le lien entre les couples voisins est plus solide. Nous avons aussi travaillé sur l'éclairage de la scène, les récents progrès de la technologie des LED nous ont permis de trouver sur le marché des phares sous-marins développant 66000 Lumens et permettant un éclairage homogène qui assure un meilleur rendu des couleurs. L'adjonction de 2 flashes subaquatiques permet également de boucher les ombres pour garantir un éclairage constant sur l'intégralité de la scène.

### **3.2. Le système KarKam**

Sur la base de ces concepts, le système "KarKam" (Fig. 2 et Fig. 3) que nous avons développé en partenariat avec le LIS est composé de deux Nikon D700 synchronisés, chacun dans un caisson Nauticam, montés sur une base fixe et indéformable, étalonnée au préalable et sur laquelle sont disposés deux phares de 66000 Lumens chacun. La gestion de la lumière assure ainsi une qualité quasi 'terrestre' aux clichés stéréo. Ce système original, développé pour les relevés photogrammétriques de grande envergure assure ainsi aux relevés produits une qualité métrique et chromatique quantifiable. Il a été conçu pour être embarquable facilement par un plongeur autonome et permet ainsi le relevé efficace et rapide de grandes étendues complexes.



**Fig.2.** Préparation du dispositif Karkam avant l'immersion pour effectuer le relevé photogrammétrique



**Fig.3.** Relevé photogrammétrique à l'aide du dispositif Karkam

### 3.3 Stratégie d'échantillonnage

Une stratégie d'échantillonnage a été arrêtée à l'issue de plusieurs réunions entre les instances du Parc national des Calanques et de Septentrion Environnement. Plus exactement, 3 sites en Zone de Non Prélèvement (ZNP) au sein du Parc national des Calanques ont été choisis : le Planier, le Grand Congloué et l'Impérial du Large. Ces trois sites ont fait l'objet de validation au préalable. En effet, ils rencontrent des récifs coralligènes à des profondeurs abordables en plongée (de 10 à 60 m) et sont assez éloignés entre eux et de la côte, étant ainsi représentatifs. Ils sont en effet ainsi assez peu impactés par le rejet des eaux usées de Cortiou et autres impacts liés à la côte. De plus, le niveau de fréquentation par les plongeurs de ces sites ne sont pas équivalents: le Grand Congloué est interdit à la plongée loisir ce qui en fait un site plus préservé. Étant situé dans une zone réglementaire spécifique en interdisant l'accès (Arrêté préfectoral N° 05/81 du 20 janvier 1981 et N° 158/2013 du 7 août 2013 revus par l'arrêté N° 255/2018), une dérogation a été nécessaire pour pouvoir accéder à la zone.

Le site situé sur le tombant du Planier se situe sur la face nord de l'île du même nom entre 10 et 40 m (43.19938 N; 5.22916 E). Il est situé à l'intérieur de la Zone de Non Prélèvement du Planier. Le site de l'Impérial du large est situé au sud de l'île Riou (43.16969 N; 5.39402 E). Le site du Grand Congloué ayant été modélisé est situé sur la face nord de l'îlot du Grand Congloué (43.176440 N ; 5.400340 E). L'échantillonnage a été effectué durant l'automne 2021 (novembre - décembre 2021). La méthode utilisée est la photogrammétrie, requérant un plongeur professionnel et le dispositif KarKam présenté ci-dessus (Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4).

A partir des images acquises *in-situ*, des modèles tridimensionnels ont été réalisés via le logiciel Agisoft Metashape Professional (v.1.7.1.) (Metashape Agisoft software, Agisoft LLC, Petersburg, Russia).

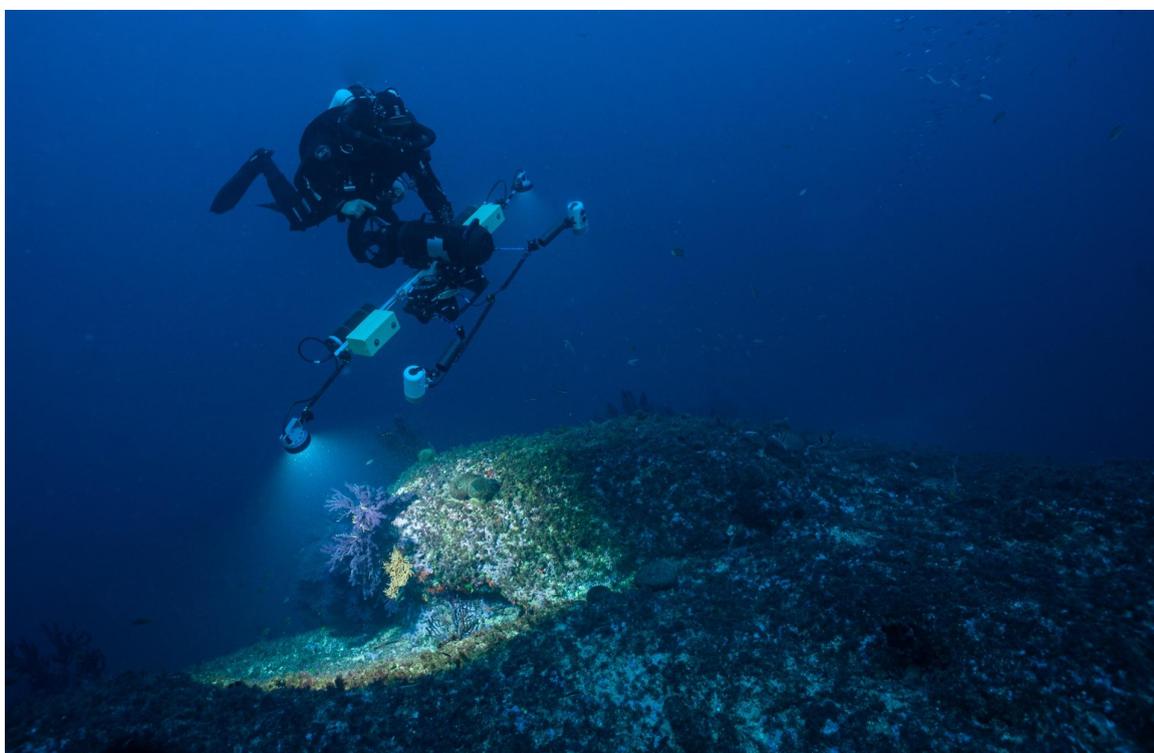


Fig.4. Relevé photogrammétrique sur le site du Grand Congloué

## 4. RÉSULTATS: PLONGÉES RÉALISÉES, DONNÉES ACQUISES, ET MODÈLES GÉNÉRÉS

### 4.1 Plongées réalisées et données acquises

La campagne d'acquisition de données s'est déroulée du 18 novembre 2021 au 17 décembre 2021, au sein du PNCal, sur les 3 sites visés (Planier, Grand Congloué, Impérial du large) (Tableau 1).

Tableau 1: Récapitulatif des plongées et du type d'acquisition effectués dans chaque site (Planier, Grand Congloué et Impérial du large).			
Sites	Planier	Grand Congloué	Impérial du large
Profondeur de travail	40 - 10 m	45 - 15 m	60 - 20 m
Plongée de prospection	22/11/2021 40 min Prospection sur la face nord du Planier, identification de la zone de relevé	18/11/2021 45 min Prospection sur la face nord, identification de la zone de travail: tombant de coralligène ainsi que quelques faciès à <i>P. clavata</i>	15/12/2021 60 min Prospection sur la face sud de 70 à 30 m, identification de la zone de relevé
Plongée d'acquisition 1	23/11/2021 60 min Acquisition d'images sur la zone 45-20 m  Nombre de photos : 2 342	18/11/2021 60 min Acquisition d'images sur la zone 45-25 m  Nombre de photos : 4 600	15/12/2021 70 min Acquisition d'images sur la zone 60-45 m  Nombre de photos : 3 244
Plongée d'acquisition 2	23/11/2021 60 min Densification du relevé sur la zone des 40m et acquisition sur la zone des 20-10 m  Nombre de photos : 7 591	19/11/2021 60 min Densification du relevé sur la zone des 40m et acquisition sur la zone des 20-10 m  Nombre de photos : 3 672	16/12/2021 60 min Acquisition d'images sur la zone des 45-20 m  Nombre de photos : 3 428
<b>BILAN (nombre total de photos)</b>	9 933	8 256	6 672

## 4.2. Bilan des acquisitions

### 4.2.1 Planier

Le site ayant fait l'objet du relevé est un tombant de coralligène montrant une association à Rhodophytes encroûtantes des genres *Mesophyllum* et *Lithophyllum* dans la zone des 20-30 m et un faciès à *Paramuricea clavata* dans la zone des 30-40 m. La présence d'éponges cavernicoles jaunes (*Aplysina cavernicola*) a également été notée dans la partie inférieure du tombant, ainsi qu'une population éparses de *Paramuricea clavata* (Fig. 5 et Fig. 6). La partie supérieure est par ailleurs caractérisée par certains surplombs de petite taille tapissés de *Parazoanthus axinellae* et de bryozoaires (Fig. 7).

Le modèle a été généré à partir de 9 933 photographies. L'alignement a été réalisé en qualité haute, la mise à l'échelle a été réalisée automatiquement grâce au couple stéréo (KarKam) et des mises à l'échelle de contrôle (règles de 3 m) ont également été installées au fond (40 m) et sur la partie supérieure (12 m).

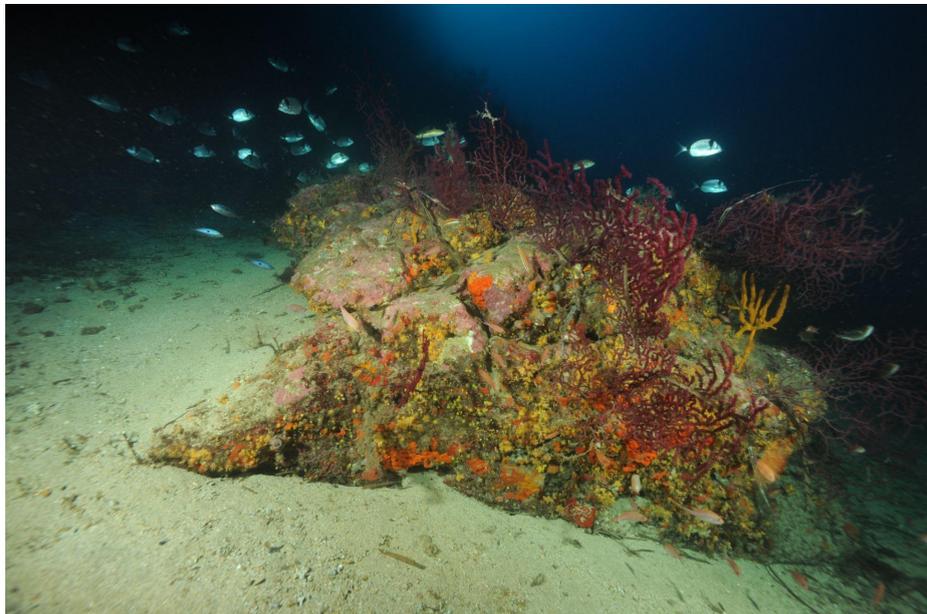
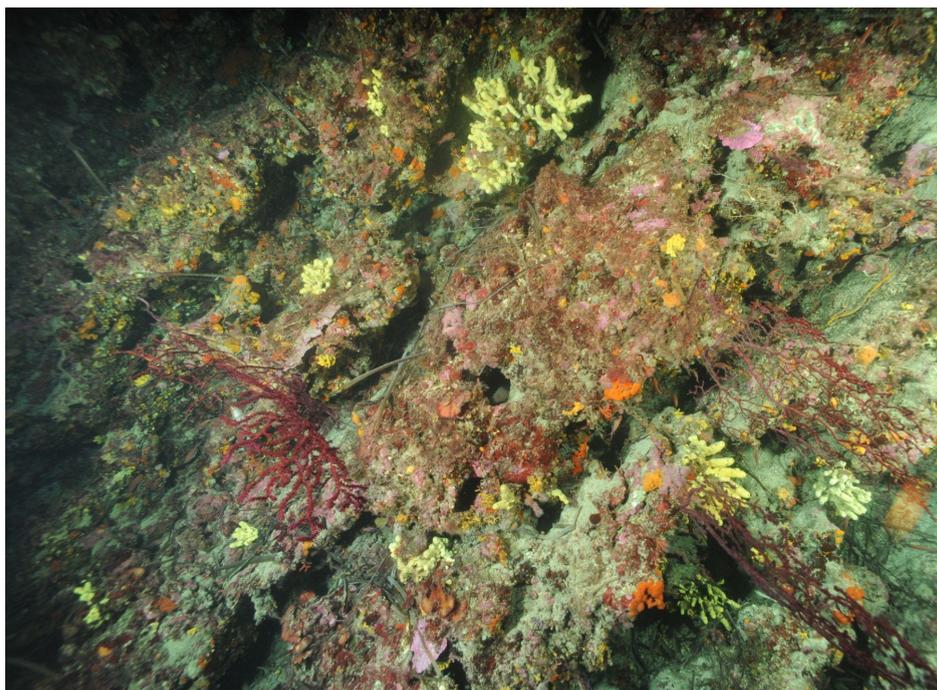
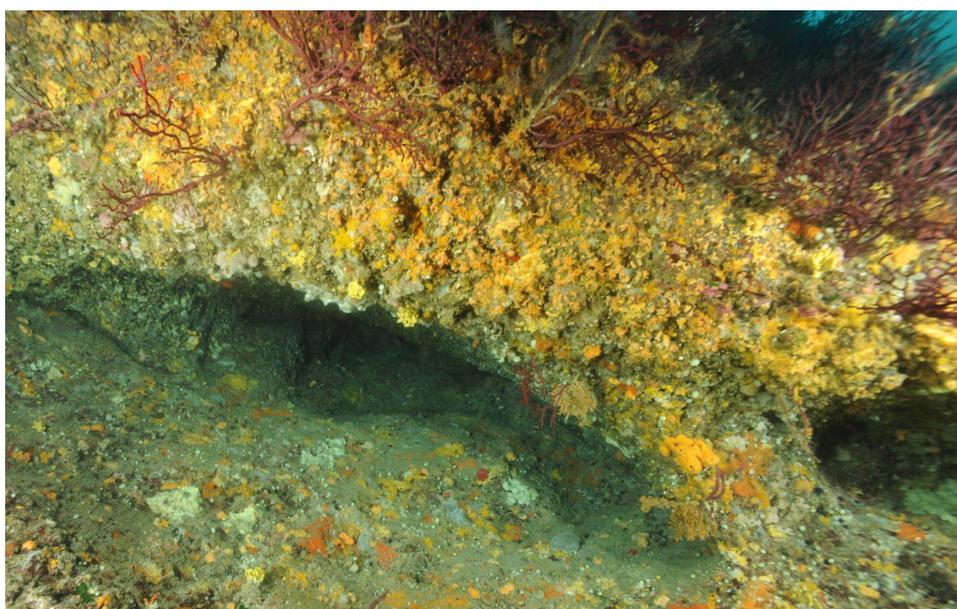


Fig. 5. Massif de coralligène en bas du tombant du Planier (p = 40 m).



**Fig. 6.** Détail du coralligène en bas du tombant du Planier (p = 40 m) révélant la présence de *Paramuricea clavata* et *Aplysina cavernicola*



**Fig. 7.** Détail d'un surplomb sur le tombant du Planier (p = 17 m)

#### 4.2.2 Impérial du large

Le relevé photogrammétrique a été effectué sur la face sud de l'Impérial du Large, caractérisée par des peuplements de *P. clavata*, *E. cavolini* ainsi que *C. rubrum* sur un massif coralligène composé principalement de *Lithophyllum* sp. et *Mesophyllum* sp. (Fig. 8 et Fig. 9). La partie profonde du site est notamment caractérisée par un faciès de *P. clavata* (Fig. 9 et Fig. 10).

Le modèle a été généré à partir de 6 672 photographies. L'alignement a été réalisé en qualité haute, la mise à l'échelle a été réalisée automatiquement grâce au couple stéréo (KarKam) et

des mises à l'échelle de contrôle (règles de 3 m) ont également été installées au fond (60m) et sur la partie supérieure (20 m).



**Fig. 8.** Roches à coralligène en bas du tombant de l'Impérial du large (p = 60 m)



**Fig. 9.** Détail du coralligène en bas du tombant de l'Impérial du Large (p = 55 m)

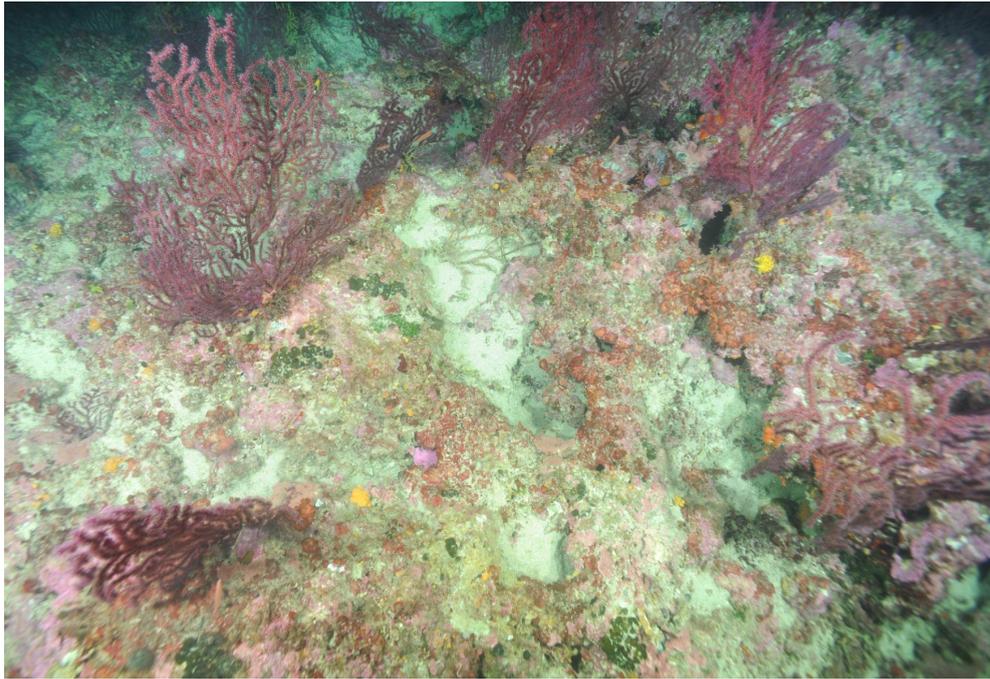


Fig. 10. Détail du coralligène en bas du tombant de l'Impérial du Large (p = 50 m)

#### 4.2.3. Grand Congloué

Le peuplement coralligène est constitué de faune fixée peu érigée sur sa partie superficielle malgré la présence éparse de colonies de gorgones rouges (*Paramuricea clavata*) (Fig. 11). Le bas du tombant (45 m) est caractérisé par un faciès à *P. clavata* montrant une population éparse (Fig. 12 et Fig. 13).

Le modèle a été généré à partir de 8 256 photographies. L'alignement a été réalisé en qualité haute, la mise à l'échelle a été réalisée automatiquement grâce au couple stéréo (KarKam) et des mises à l'échelle de contrôle (règles de 3 m) ont également été installées au fond (40 m) et sur la partie supérieure (15 m).



**Fig.11.** Relevé photogrammétrique sur le site du Grand Congloué



**Fig.12.** Relevé photogrammétrique sur le site du Grand Congloué

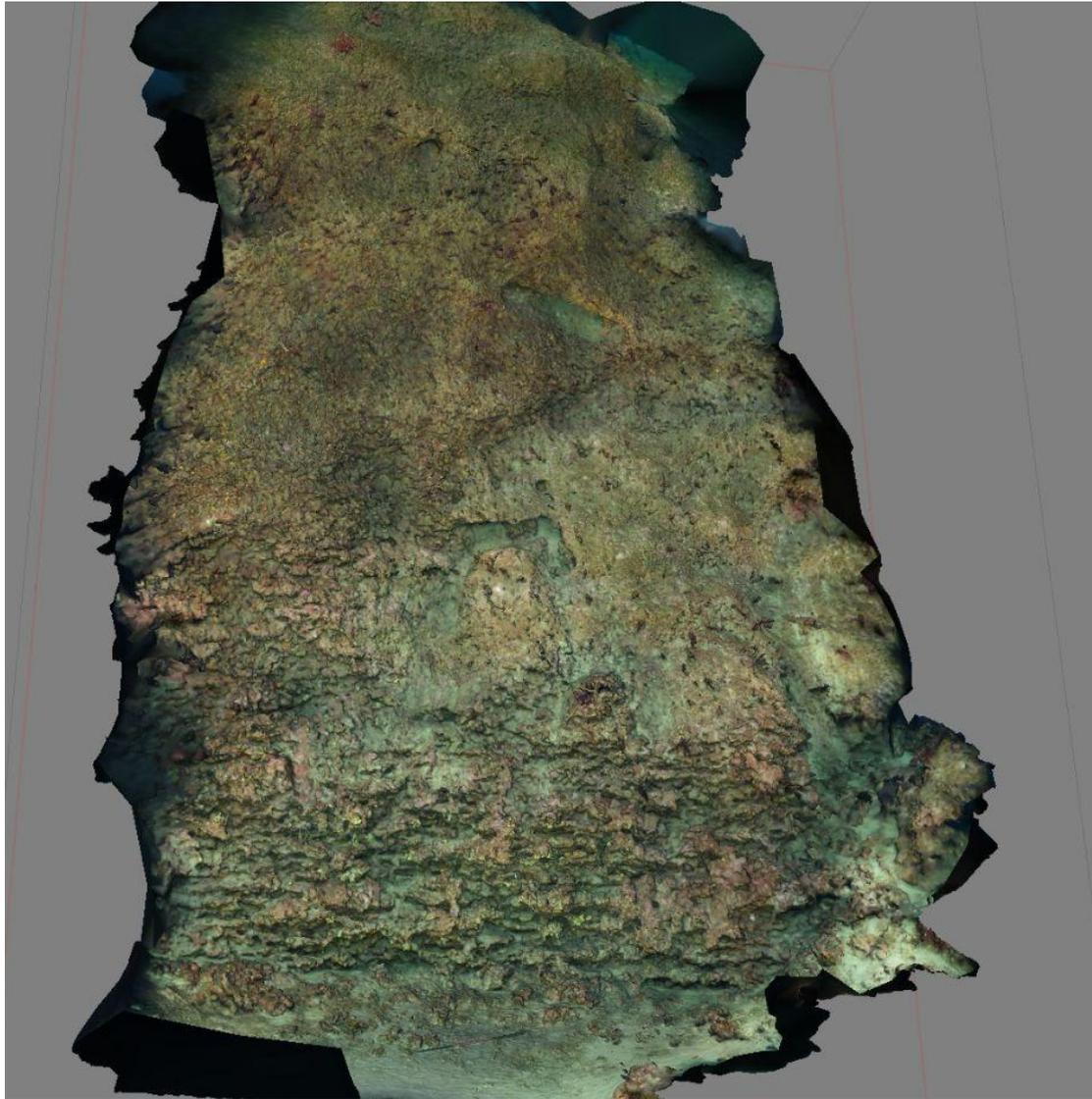


Fig 13. Massif coralligène, bas du tombant du Grand Congloué (p = 40 m)

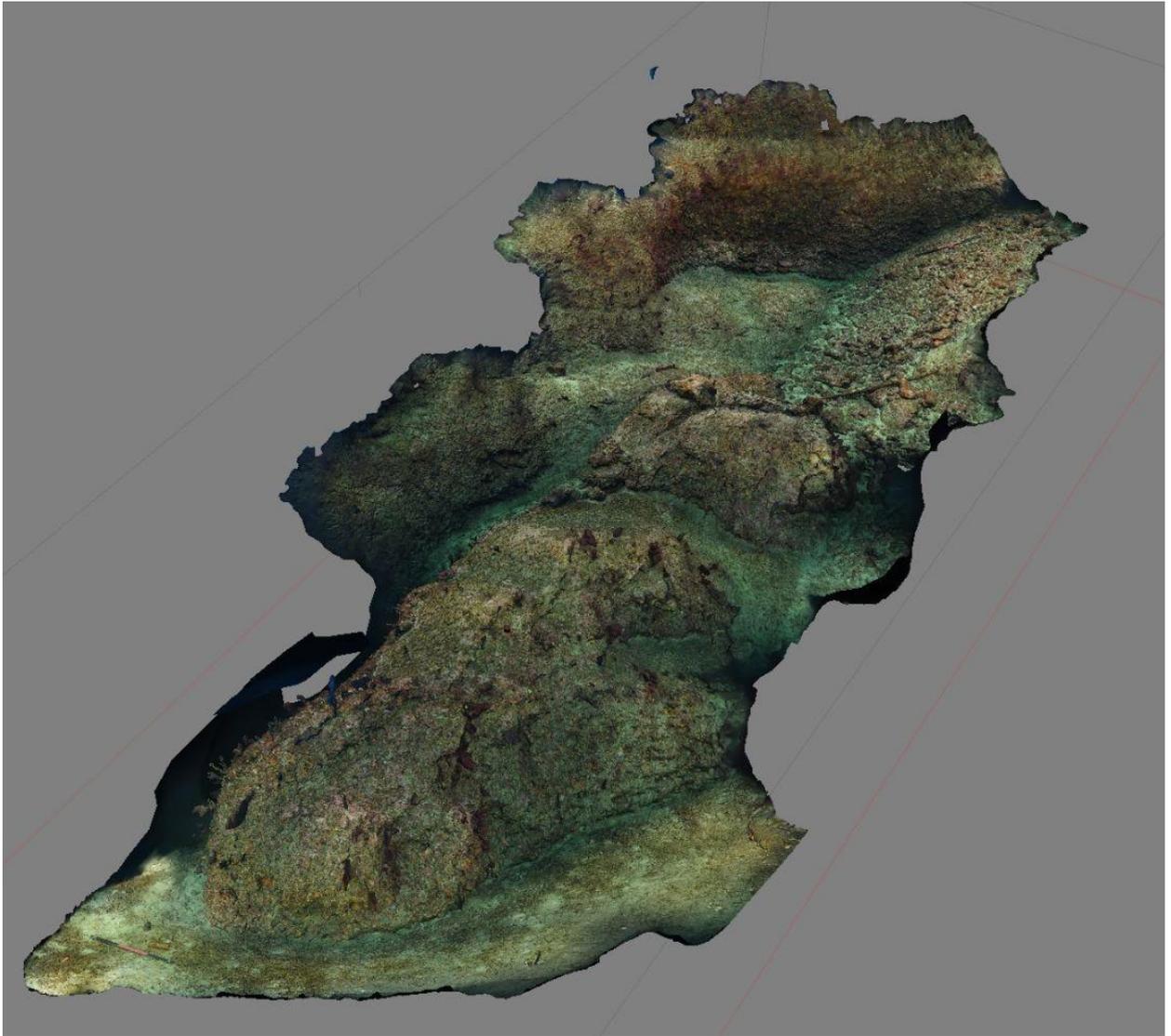
#### 4.3 Modèles générés

A partir des images acquises *in-situ*, l'alignement des photographies a été réalisé en qualité haute et par paires associées à l'aide d'un script python élaboré spécialement. Le maillage a également été réalisé en haute qualité. Enfin, la texture en haute qualité a ensuite été réalisée à partir de la carte de profondeur acquise suite à l'alignement des images (Fig. 14, Fig. 15 et Fig. 16). La mise à l'échelle a été réalisée automatiquement grâce à l'association des paires d'images stéréo. Ainsi, les modèles 3D fournis sont détaillés à une échelle quasi-identique. De plus, grâce au système KarKam, la prise de vue a été réalisée en stéréo, ce qui assure un rendu de meilleure qualité aux modèles générés. La lumière continue et les flashes utilisés ont permis d'obtenir un éclairage uniforme de la scène avec peu d'ombres. Cela a permis d'assurer un meilleur rendu des couleurs et de la complexité 3D. Aucune gamme d'étalonnage n'a donc été utilisée. Grâce au système de propulsion du KarKam, il a été possible de caractériser une grande zone (approximativement 500 à 700 m<sup>2</sup>).

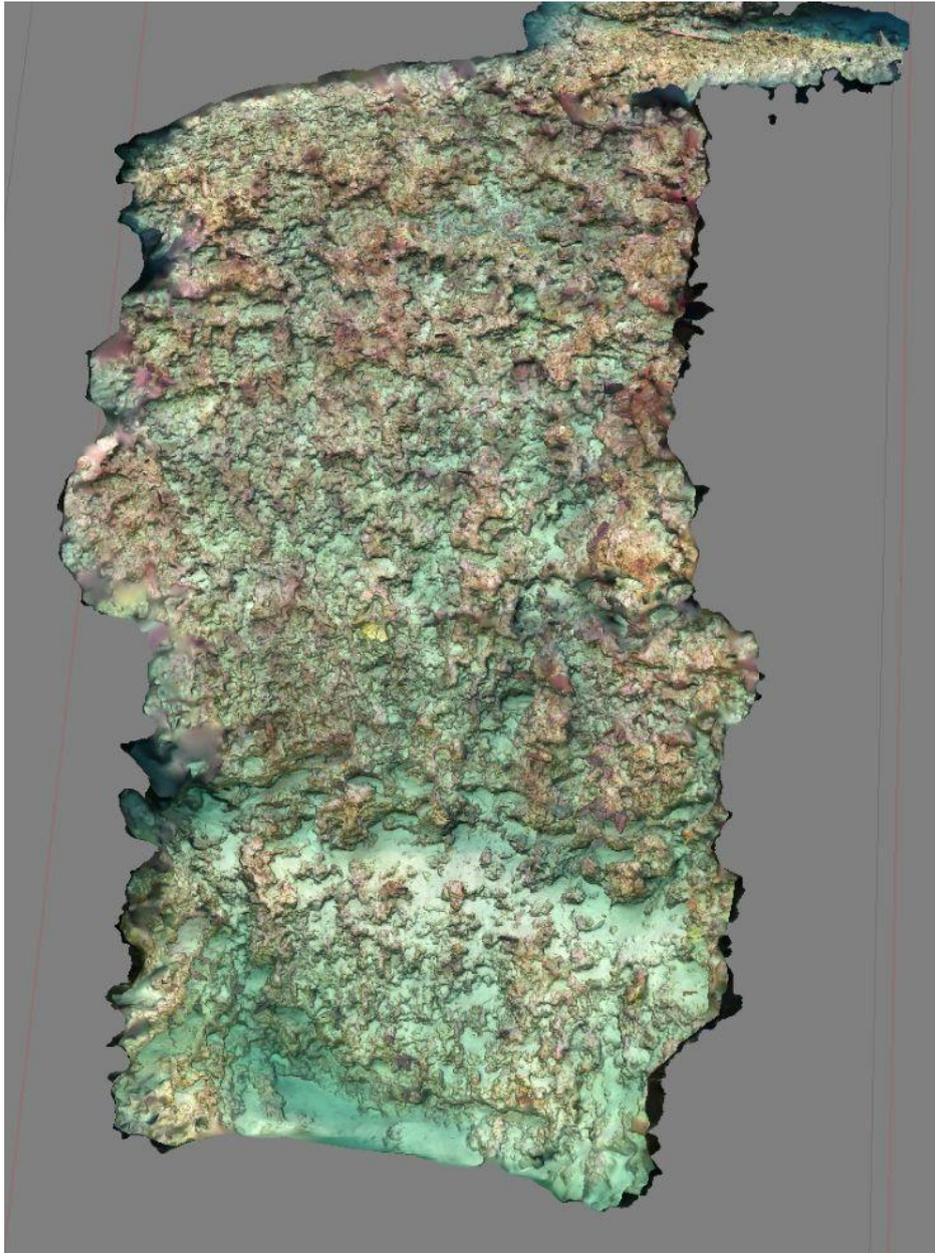
Les extraits JPEG (Fig 14, Fig 15, et Fig 16) illustrent les **modèles générés** : ceux-ci sont fournis en addition du présent rapport sous format portable (disque dur externe): ce volume contient ainsi les trois modèles générés sous Agisoft Metashape. Ces modèles y sont exportés sous format ".ply" lisible avec le logiciel Meshlab (opensource, [www.meshlab.net](http://www.meshlab.net)) également fourni sur le disque dur.



**Fig. 14.** Extraction JPEG illustrant une partie du modèle photogrammétrique du Tombant du Planier (7591 photos)



**Fig. 15.** Extraction JPEG illustrant une partie du modèle photogrammétrique du Grand Congloué (8 256 photos)



**Fig. 16.** Extraction JPEG illustrant une partie du modèle photogrammétrique de l'Impérial du large (3 244 photos)

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les avancées technologiques en termes de photogrammétrie et de puissances de calcul des ordinateurs permettent aujourd'hui la réalisation de relevés 3D sur de grandes surfaces (500 à 1000 m<sup>2</sup>) en un temps beaucoup plus raisonnable et à des profondeurs plus importantes. Ces avancées technologiques permettent également la réalisation de modèles plus précis et qualitatifs (rendu des couleurs, mise à l'échelle, etc.). L'utilisation de ces technologies en écologie marine permet aux scientifiques d'accéder à de nouvelles métriques (complexité et hétérogénéité 3D, dimension fractale) qui pourraient donner des indications sur l'état de santé du coralligène. L'étude de ces métriques sur le long terme permet de suivre et comprendre les effets du changement global et des pressions anthropiques sur les communautés benthiques associées à cet habitat.

Les suites et **perspectives** du présent rapport sont multiples:

- à **court terme**, sur l'année 2022, il est prévu que le présent travail soit complété par une étude réalisée dans le cadre d'un mémoire de Master 2 sous la co-direction du Parc national des Calanques, de Septentrion Environnement et du LIS. Ce travail inclura notamment une description et analyse des communautés de la biocénose du coralligène de chaque site par étude de photo-quadrats issus des modèles 3D;
- à **long terme** (+3, +6 ou +10 ans par exemple), sur les bases du présent travail, la réplication dans le temps sur ces mêmes sites de cette méthode (acquisition des images et construction des modèles), permettrait à l'avenir de détecter et de quantifier les éventuelles transformations des récifs coralligènes et donc d'anticiper et d'optimiser au mieux les mesures de gestion requises;
- de plus, à **moyen terme**, le mémoire de Master co-dirigée en 2022 vise à :
  - Alimenter une base de données en « deep-learning » visant à obtenir à terme une identification automatisée des principaux organismes composant les biocénoses du coralligène ;
  - Sonder la bibliographie scientifique sur les autres descripteurs existants de la structure 3D des habitats possiblement exploitables à partir des modèles 3D ;
  - Étayer des pistes de recherches futures (perspectives pour un projet de thèse) en termes de set d'indicateurs nouveaux à développer à partir des modèles 3D sur des logiciels adéquats ;
  - Faire des recommandations pour la mise en œuvre des futurs suivis par photogrammétrie et des analyses associées.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ballesteros, E., 2006. Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge, in: *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. CRC Press, pp. 123–195.
- Ballesteros, E., 1992. *Els vegetals i la zonació litoral: espècies, comunitats i factors que influeixen en la seva distribució*. (PhD). Barcelona.
- Cheminée, A., Pastor, J., Bianchimani, O., Thiriet, P., Sala, E., Cottalorda, J.-M., Dominici, J.-M., Lejeune, P., Francour, P., 2017. Juvenile fish assemblages in temperate rocky reefs are shaped by the presence of macro-algae canopy and its three-dimensional structure. *Sci. Rep.* 7, 14638. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15291-y>
- Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Kaschner, K., Ben Rais Lasram, F., Aguzzi, J., Ballesteros, E., Bianchi, C.N., Corbera, J., Dailianis, T., Danovaro, R., Estrada, M., Frogli, C., Galil, B.S., Gasol, J.M., Gertwagen, R., Gil, J., Guilhaumon, F., Kesner-Reyes, K., Kitsos, M.-S., Koukouras, A., Lampadariou, N., Laxamana, E., López-Fé de la Cuadra, C.M., Lotze, H.K., Martin, D., Mouillot, D., Oro, D., Raicevich, S., Rius-Barile, J., Saiz-Salinas, J.I., San Vicente, C., Somot, S., Templado, J., Turon, X., Vafidis, D., Villanueva, R., Voultsiadou, E., 2010. The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. *PLoS ONE* 5, e11842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842>
- Cuadros, A., Cheminée, A., Thiriet, P.D., Moranta, J., Vidal, E., Sintes Vila, J., Sagrista, N., Cardona, L., 2017. The three-dimensional structure of *Cymodocea nodosa* meadows shapes juvenile fish assemblages (Fornells Bay, Minorca Island). *Reg. Stud. Mar. Sci.*
- Drap, P., Merad, D., Boï, J.-M., Mahiddine, A., Peloso, D., Chemisky, B., Seguin, E., Alcalá, F., Bianchimani, O., 2014. Underwater Multimodal Survey: Merging Optical and Acoustic Data, in: *Underwater Seascapes*. Springer, pp. 221–238.
- Ferrari, R., Malcolm, H.A., Byrne, M., Friedman, A., Williams, S.B., Schultz, A., Jordan, A.R., Figueira, W.F., 2017. Habitat structural complexity metrics improve predictions of fish abundance and distribution. *Ecography* n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/ecog.02580>
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Cigliano, M., Diaz, D., Harmelin, J.G., Gambi, M.C., Kersting, D.K., Ledoux, J.B., Lejeune, C., Linares, C., Marschal, C., Pérez, T., Ribes, M., Romano, J.C., Serrano, E., Teixido, N., Torrents, O., Zabala, M., Zuberer, F., Cerrano, C., 2009. Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Glob. Change Biol.* 15, 1090–1103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>
- Gibson, R., Atkinson, R., Gordon, J., 2006. Mediterranean coralligenous assemblages: a synthesis of present knowledge. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 44, 123–195.
- Michez, N., Dirberg, G., Bellan-Santini, D., Verlaque, M., Bellan, G., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Labrune, C., Francour, P., Sartoretto, S., 2011. Typologie des biocénoses benthiques de Méditerranée, Liste de référence française et correspondances. *Rapp. SPN - MNHN Paris* 2011–13, 48 p.
- Monfort, T., Cheminée, A., Bianchimani, O., Drap, P., Puzenat, A., Thibaut, T., 2021. The Three-Dimensional Structure of Mediterranean Shallow Rocky Reefs: Use of Photogrammetry-Based Descriptors to Assess Its Influence on Associated Teleost Assemblages. *Front. Mar. Sci.* 8, 924. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.639309>
- Piazzì, L., Gennaro, P., Balata, D., 2012. Threats to macroalgal coralligenous assemblages in the Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 64, 2623–2629. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.027>
- Richaume, J., Cheminée, A., Drap, P., Bonhomme, P., Cadene, F., Ferrari, B., Hartmann, V., Michez, N., Bianchimani, O., 2021. 3D Photogrammetry Modeling Highlights Efficient Reserve Effect Apparition After 5 Years and Stillness After 40 for Red Coral (*Corallium rubrum*) Conservation in French MPAs. *Front. Mar. Sci.* 8, 1174. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.639334>

- Royer, J.-P., Nawaf, M.M., Merad, D., Saccone, M., Bianchimani, O., Garrabou, J., Ledoux, J.-B., Lopez-Sanz, A., Drap, P., 2018. Photogrammetric Surveys and Geometric Processes to Analyse and Monitor Red Coral Colonies. *J. Mar. Sci. Eng.* 6, 42. <https://doi.org/10.3390/jmse6020042>
- Sala, E., Kizilkaya, Z., Yildirim, D., Ballesteros, E., 2011. Alien marine fishes deplete algal biomass in the Eastern Mediterranean. *PLoS ONE* 6, e17356.
- Thierry de Ville d'Avray, L., 2018. Identification et évaluation des services écosystémiques rendus par les habitats coralligènes (These de doctorat). Aix-Marseille.