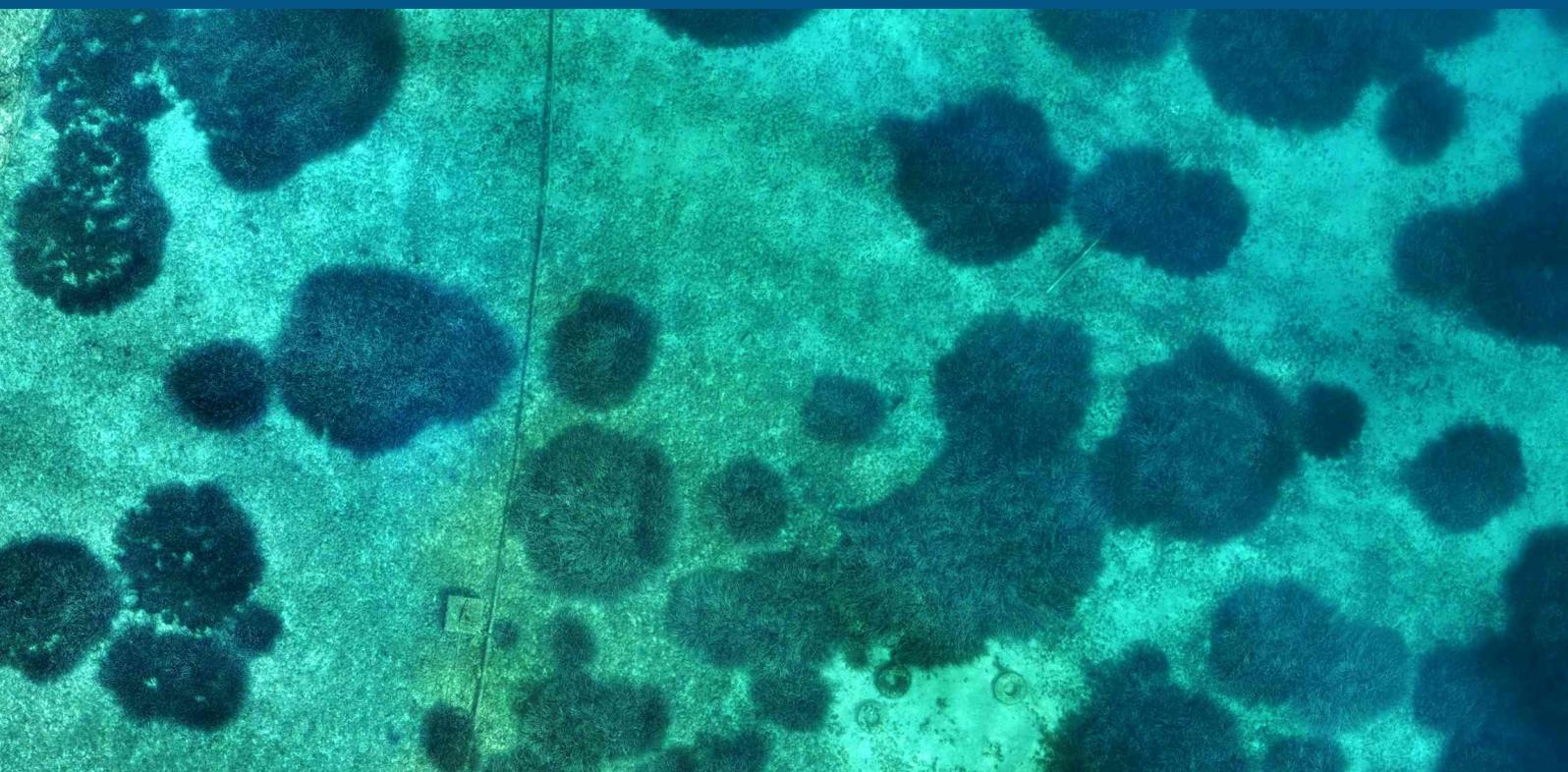

La photogrammétrie sous-marine



Applications au suivi des
herbiers de posidonie

Contributeurs

Rédaction : Arnaud ABADIE, Christophe VIALA, Guilhem MARRE

Validation technique et relecture : Christophe VIALA, Guilhem MARRE, Pierre BOISSERY

Expertise milieu marin : Pierre BOISSERY

Édition : Arnaud ABADIE

Les personnes suivantes ont contribué à ce travail en participant à l'acquisition et au traitement des données qui ont permis d'illustrer ce document : Alice NICOLAS, Bastien CERRI, Léo ROCQUES, Marie LAMOURET, Guilhem MARRE

Partenaires

Ce document a été rédigé dans le cadre du programme *Posidogrammétrie* de la société Seaviews. Il a fait l'objet d'un financement par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, et la direction interrégionale de la mer Méditerranée (DIRMM). Posidogrammétrie est un projet du Plan d'action pour le milieu marin (PAMM) Recherche. La société Andromède Océanologie a apporté ses connaissances techniques et a contribué à la rédaction ainsi qu'à la relecture de ce document.



Citation

Abadie A., Viala C., Marre G., Boissery P. (2022) La photogrammétrie sous-marine. Application au suivi des herbiers de posidonie. Seaviews Publ.108p

Résumé

Depuis des décennies, la photogrammétrie est utilisée en milieu terrestre pour réaliser des mesures topographiques et générer des modèles 3D réalistes de monuments historiques. Il y a quelques années, cette technique d'analyse photographique a percé la surface des mers pour être employée en archéologie sous-marine, dans un premier temps, et désormais pour cartographier les habitats marins. En permettant d'obtenir des mosaïques photographiques du fond marin et des modèles 3D photoréalistes, la photogrammétrie ouvre de nouveaux champs d'étude et de suivi des biocénoses avec une résolution inédite. De nombreuses techniques d'acquisition ont été développées au cours des dix dernières années afin de réaliser des levés toujours plus profonds. De même, le positionnement des produits photogrammétriques n'a cessé d'évoluer afin d'utiliser les données obtenues dans un but cartographique. Les innovations des dernières années permettent désormais de disposer d'outils matures de cartographie des fonds marins à haute résolution, employables par les gestionnaires en charge d'espaces côtiers. La photogrammétrie sous-marine est particulièrement adaptée à l'étude et au suivi des herbiers à *Posidonia oceanica* (la posidonie) qui constituent un enjeu de conservation important à l'échelle de la Méditerranée. De nombreuses thématiques d'étude des herbiers peuvent être abordées de la sorte (évolution de leur limite, impact des activités humaines, approche écosystémique). Ce guide méthodologique propose ainsi un tour d'horizon des techniques de photogrammétrie sous-marine à la disposition des scientifiques et des gestionnaires pour étudier l'évolution des herbiers de posidonie.

Avant-propos

Depuis quelques années, la photogrammétrie sous-marine s'est peu à peu fait une place parmi les outils de suivi à disposition des scientifiques et des gestionnaires. Son emploi de plus en plus répandu pour étudier l'évolution des herbiers de posidonies dans divers pays du pourtour méditerranéen nécessite d'en connaître les avantages et les limites afin d'utiliser cette technique de pointe de façon pertinente. Cependant, comme toute technique cartographique, de nombreux paramètres sont à prendre en compte pour utiliser la méthode la plus appropriée en fonction des objectifs et des caractéristiques du site d'étude.

La photogrammétrie sous-marine ne se résume donc pas à la simple réalisation de photographies en plongée traitées automatiquement dans un logiciel dédié. Les approches pour acquérir les photographies et les données de positionnement sont multiples. Il en va de même pour le traitement et l'analyse des produits photogrammétriques. Face à ce large éventail de moyens techniques et technologiques il semblait important de regrouper, décrire, synthétiser et comparer les possibilités offertes par cette technique d'analyse d'image en pleine expansion au sein d'un guide méthodologique le plus complet possible.

Pourquoi se focaliser sur le suivi des herbiers de posidonie ?

Tout simplement du fait de leur importance écologique et économique ainsi que des impacts anthropiques auxquels ils sont soumis. La photogrammétrie est également particulièrement adaptée à leur étude du fait de la gamme de profondeur à laquelle ils se développent et de la haute résolution fournie par les produits photogrammétriques, permettant l'étude fine de l'évolution de leur structure. Cependant, ce guide ne parle pas uniquement de la posidonie mais s'applique à présenter les aspects techniques dans le cadre le plus large possible, ceux-ci étant transversaux à l'étude d'autres écosystèmes et habitats.

Ce document de synthèse s'adresse ainsi d'une façon large aux scientifiques et opérateurs techniques désirant acquérir une meilleure compréhension de la photogrammétrie sous-marine afin de pouvoir l'employer eux-mêmes dans le cadre de leurs projets. Il s'agit également ici de fournir aux gestionnaires une bonne connaissance de cet outil cartographique, de ses capacités, de son efficacité et de son coût mais aussi de ses limites afin de pouvoir l'employer de façon pertinente et d'exploiter au maximum le potentiel d'information des produits photogrammétriques.

Il est important de garder à l'esprit que la photogrammétrie sous-marine est une technique en pleine évolution et que ce guide représente une vue d'ensemble (la plus exhaustive possible) au moment de sa rédaction.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 LA PHOTOGRAMMÉTRIE.....	7
1.1. Une courte histoire de la photogrammétrie.....	8
1.2. Principe.....	8
1.3. Productions photogrammétriques.....	9
1.4. Applications.....	9
1.4.1. Milieu terrestre.....	9
1.4.2. Milieu marin.....	11
CHAPITRE 2 ACQUISITION DES DONNÉES.....	18
2.1. Matériel de prise de vue.....	19
2.1.1. Système photographique.....	19
2.1.2. Éclairage.....	20
2.2. Méthodes d'acquisition.....	21
2.2.1. Généralités.....	21
2.2.2. Avec un drone aérien.....	22
2.2.3. Depuis la surface.....	22
2.2.4. Avec un dispositif tracté.....	25
2.2.5. En plongée sous-marine.....	26
2.2.6. Avec un ROV ou un AUV.....	27
2.2.7. Comparatif des techniques d'acquisition.....	29
2.3. Positionnement et géoréférencement.....	30
2.3.1. Positionnement relatif.....	30
2.3.1.1. Mise à l'échelle.....	30
2.3.1.2. Utilisation de repères fixes.....	31
2.3.2. Géoréférencement direct.....	32
2.3.3. Géoréférencement indirect.....	32
2.3.3.1. Superposition de nuages de points.....	33
2.3.3.2. Utilisation de cibles acoustiques.....	33
2.3.4. Positionnement acoustique.....	34
2.3.5. Comparatif des techniques de positionnement.....	35
CHAPITRE 3 TRAITEMENT DES DONNÉES.....	36
3.1. Données de positionnement.....	37
3.2. Chaîne de traitement des images.....	38
3.2.1. Points remarquables.....	38
3.2.2. Points homologues.....	39
3.2.3. Le nuage de points et sa densification.....	40
3.2.4. MNT et modèle 3D.....	41
3.2.5. Mosaïque d'orthophotographies.....	42
3.3. Logiciels de photogrammétrie.....	43
3.3.1. VisualSFM/Meshlab.....	43
3.3.2. MicMac.....	44
3.3.3. Metashape.....	45
3.3.4. Autres logiciels.....	45
3.4. Export des produits photogrammétriques.....	46
3.4.1. Nuages de points et modèles 3D.....	46
3.4.2. Orthophotographie.....	47
3.4.2.1. Raster.....	47
3.4.2.2. Tuiles.....	47
3.5. Taille et stockage des produits photogrammétriques.....	48

CHAPITRE 4 VISUALISATION ET ANALYSE DES PRODUITS PHOTOGRAMMÉTRIQUES.....	50
4.1. Lecture des produits photogrammétriques.....	51
4.1.1. Nuages de points et modèles 3D.....	51
4.1.2. Orthophotographie.....	52
4.2. Analyse des données.....	52
4.2.1. Cartographie des biocénoses marines.....	52
4.2.1.1. Classification manuelle.....	53
4.2.1.2. Classification à partir du nuage de points.....	54
4.2.1.3. Classification automatisée.....	55
4.2.2. Détection de points d'intérêt.....	57
4.2.3. Analyses topographiques et paysagères.....	58
CHAPITRE 5 LA PHOTOGRAMMÉTRIE SOUS-MARINE APPLIQUÉE AUX HERBIERS DE POSIDONIE.....	60
5.1. La posidonie : <i>Posidonia oceanica</i>	61
5.1.1. Des prairies sous-marines à la morphologie particulière.....	61
5.1.2. L'écosystème le plus riche de Méditerranée.....	62
5.1.3. Services écosystémiques et économiques.....	62
5.2. Besoins actuels de gestion.....	64
5.2.1. Une origine anthropique de la régression des herbiers.....	64
5.2.2. Suivre la dynamique des herbiers.....	66
5.3. L'apport de la photogrammétrie au suivi des herbiers.....	66
5.3.1. Suivi de la limite de l'herbier.....	66
5.3.2. Cartographie des herbiers sur roche.....	69
5.3.3. Étude de l'impact de l'ancrage.....	69
5.3.4. Recensement des systèmes de mouillage.....	72
5.3.5. Détection des macrodéchets.....	74
5.3.6. Suivi des émissaires de STEP.....	75
5.3.7. Évaluation des pertes en carbone bleu.....	76
5.3.8. Structure tridimensionnelle des herbiers.....	78
5.3.9. Approche écosystémique.....	80
CHAPITRE 6 COMPARAISON ET INTERACTIONS AVEC D'AUTRES MÉTHODES DE SUIVI.....	82
6.1. Comparaison des techniques de cartographie.....	83
6.2. Télémétrie acoustique et photogrammétrie.....	85
6.3. Couplage avec des méthodes de cartographie acoustique.....	87
6.3.1. Avec l'acoustique active.....	87
6.3.2. Avec l'acoustique passive.....	88
6.4. Apport aux techniques de suivi en plongée sous-marine.....	88
PORTFOLIO D'ORTHOPHOTOGRAPHIES SOUS-MARINES.....	89
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	101

Chapitre 1

La photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique relativement ancienne qui est couramment utilisée en milieu terrestre depuis plusieurs décennies. Son utilisation en milieu marin est beaucoup plus récente et remonte à seulement une quinzaine d'années.

1.1. Une courte histoire de la photogrammétrie

La naissance de la photogrammétrie a suivi de près celle de la photographie au milieu du XIX^{ème} siècle (Kalantari et Kasser, 2008). La première personne à utiliser des photos prises sous différents angles pour réaliser des mesures de terrain sur une scène de paysage est Aimé Laussedat (officier de l'armée française) en 1849. Il nomme cette nouvelle science la « métrophotographie » (Figure 1). Quelques dizaines d'années plus tard, les premières vues aériennes sont réalisées en ballon par Félix Tournachon (encore un français). Les premières applications sont militaires comme la reconnaissance du terrain afin d'ajuster les tirs d'artillerie. Les prises de vue étaient ainsi majoritairement aériennes.

A partir du milieu du XX^{ème} siècle, c'est dans le domaine de l'archéologie que la photogrammétrie prend son essor en permettant notamment d'archiver photographiquement la configuration d'un site de fouilles (Seguin, 2019). Quelques dizaines d'années plus tard, les outils informatiques accélèrent le traitement des données et démultiplient les thématiques abordées (topographie, architecture, environnement, travaux de construction, modélisation d'objets). Les premières utilisations de la photogrammétrie en milieu marin datent des années 1970 pour la fouille d'épaves (Drap et Long, 2005).

1.2. Principe

La photogrammétrie est une technique de mesure utilisant la parallaxe entre différentes photographies pour reconstituer le relief de la scène photographiée (par exemple un paysage, un monument, une sculpture) (Figure 2). En effet, la photogrammétrie fonctionne sur le même principe que notre vision stéréoscopique : nous sommes capables de reproduire le relief d'un paysage grâce aux deux images produites par chacun de nos yeux. Pour reproduire avec des photos ce que notre cerveau réalise de façon automatique avec notre vue, des calculs géométriques

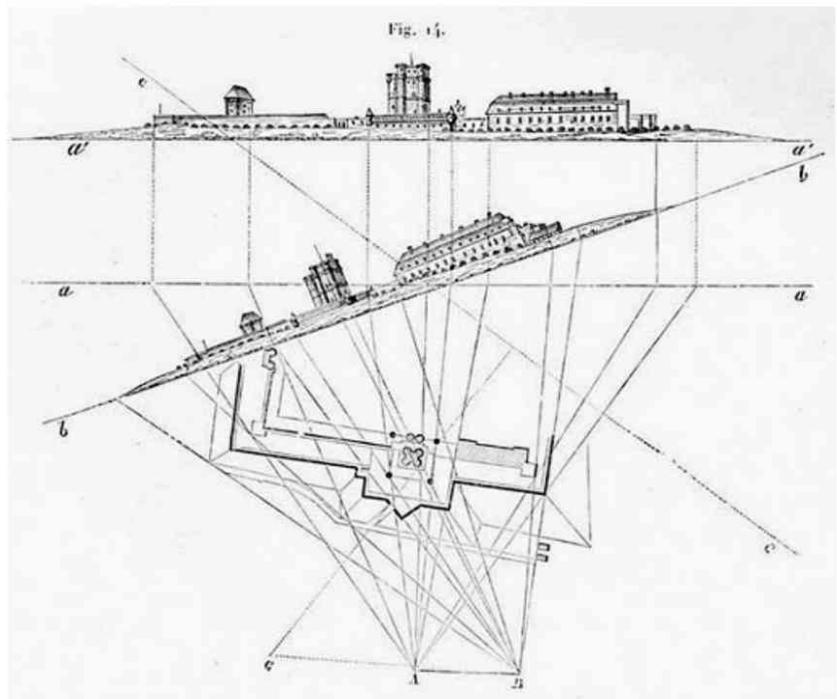
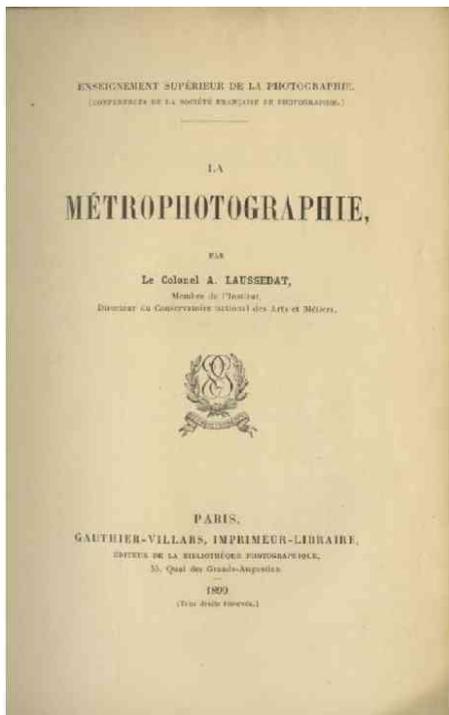


Figure 1 : Couverture de l'ouvrage de Aimé Laussedat sur la métrophotographie, l'ancêtre de la photogrammétrie.

(dont certains sont très complexes) sont nécessaires. Pour faire simple, les calculs photogrammétriques se basent sur l'identification de points homologues entre deux images et une suite de calculs vectoriels permettant de replacer les points homologues dans l'espace (Abadie, 2020). Pour réaliser cet ensemble d'opérations il n'est ainsi pas nécessaire de connaître les paramètres géométriques d'acquisition de chaque image (distance focale, distorsion de l'optique, etc.). Ce sont des programmes informatiques, compilant un ensemble d'algorithmes, qui calculent ces paramètres et positionnent chaque point dans l'espace en analysant les photographies au format numérique.

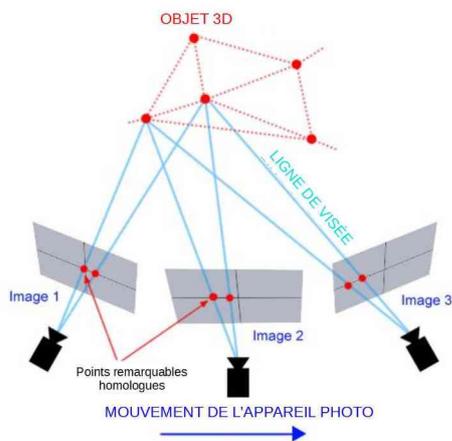


Figure 2 : Principe de la reconstruction d'un objet 3D par photogrammétrie.

1.3. Productions photogrammétriques

A l'issue de ce processus, un nuage de points remarquables en 3D est obtenu et permet de générer trois types de produits : un modèle numérique de terrain (MNT), une orthophotographie et un modèle 3D photo-texturé (Figure 3). Le MNT, couramment utilisé en topographie terrestre, correspond à une carte topographique en deux dimensions représentant l'altitude en tout point de la carte. Une orthophotographie est une image en vue verticale (le plus souvent aérienne ou satellitaire) qui intègre des corrections géométriques et radiométriques (contraste, luminosité, couleur, etc.). Dans le cas de la photogrammétrie, la correction géométrique est fournie par le maillage (*mesh* en

anglais). Ce type de photographie est très utilisé pour l'étude spatiale et la gestion du territoire par les collectivités locales et les agences gouvernementales de l'aménagement et de l'environnement. Enfin, le modèle 3D est obtenu à partir du nuage de points (qu'il soit éparsé ou densifié) qui une fois reliés forme des polygones. Le modèle 3D est ensuite texturé avec les photographies, comme un autocollant sur un objet, fournissant ainsi un aspect photoréaliste au modèle. Ce type de représentation est couramment utilisé en archéologie (sculpture, monuments) pour reconstituer un site en 3D dans un but pédagogique ou touristique.

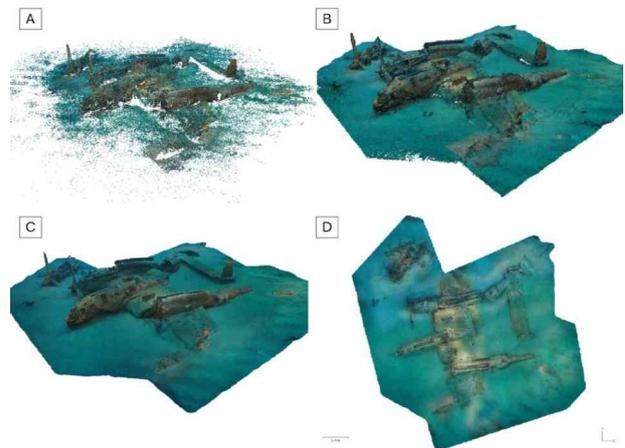


Figure 3 : Les différents rendus photogrammétriques avec l'exemple de l'épave du P38 de La Ciotat. A) Le nuage de points homologues. B) Le nuage de points dense. C) Le modèle 3D photo-texturé. D) L'orthophotographie. Source : Seaviews.

1.4. Applications

1.4.1. Milieu terrestre

Les applications de la photogrammétrie en milieu terrestre sont très nombreuses. En voici un aperçu non-exhaustif dans des domaines très variés.

Les fonds de carte photographiques que nous utilisons tous les jours (Google Maps, Géoportail, etc.) sont le fruit de levés photogrammétriques. En effet, les orthophotographies les composant sont générées à partir des photographies prises lors de levés aériens et qui permettent de créer un MNT pour ensuite y calquer les clichés (Figure 4).

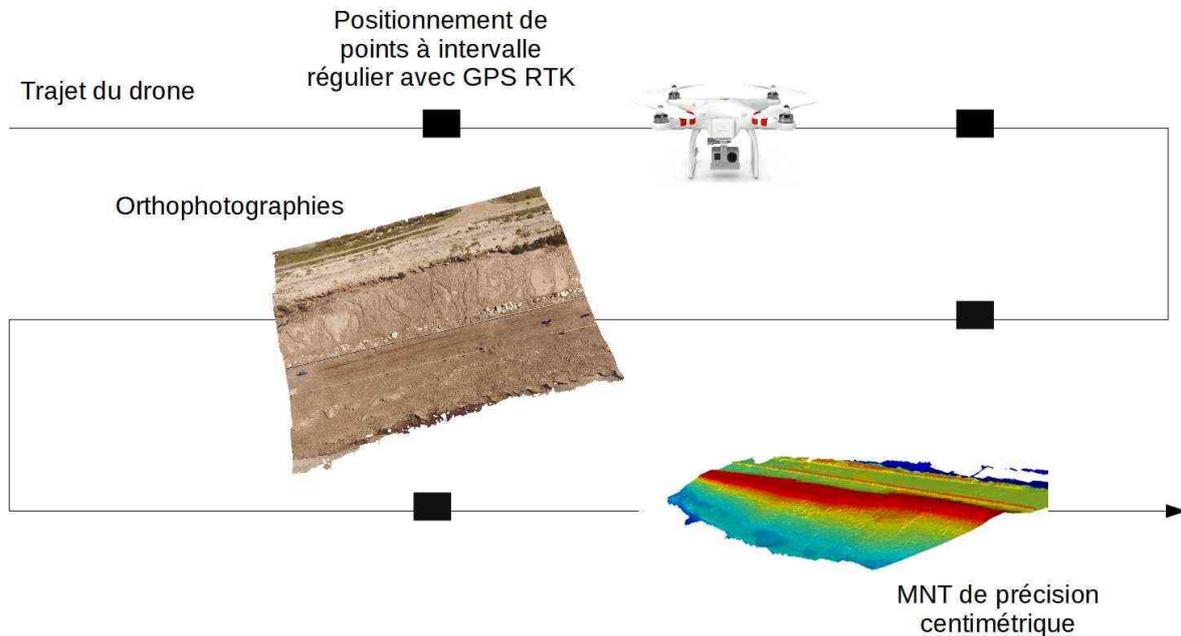


Figure 4 : Processus de réalisation d'un MNT d'une plage par photogrammétrie à partir de photographies aériennes géoréférencées.

L'utilisation la plus courante de la photogrammétrie est la réalisation de mesures topographiques à partir des acquisitions photographiques. Les mesures topographiques sont nécessaires dans un large panel de suivis terrestres : les travaux publics (routes, bâtiments, ouvrages d'art), l'évolution de structures sédimentaires (carrières, talus, plages), ainsi que l'étude du relief naturel. A noter que les levés topographiques par photogrammétrie présentent de nombreuses similarités avec les levés au lidar (système laser permettant de mesurer la distance entre deux points) quant au résultat obtenu (un nuage de point géoréférencé).

La photogrammétrie est également très employée dans le domaine de l'archéologie (Figure 5). Elle permet notamment de reconstituer un site archéologique afin d'en archiver la disposition des bâtiments et des objets. Après les fouilles, la photogrammétrie est utilisée pour modéliser en trois dimensions les objets et les monuments (dans leur totalité ou en partie) et permettre des analyses détaillées sans manipulation intrusive. Les exemples les plus connus de reconstitution par photogrammétrie en archéologie concernent les grottes avec des peintures rupestres, comme la grotte de Lascaux et la grotte

Cosquer, et les sites antiques comme les ruines de Pompei (McClinton, 2019).

D'autres utilisations concernent le tourisme avec la modélisation de sites et de monuments touristiques pour proposer des visites virtuelles. La photogrammétrie peut être également utilisée pour modéliser des objets mis en vente en ligne pour que les clients puissent les visualiser sous toutes les coutures. Dans un futur proche, la reconstitution en temps réel de l'environnement fera certainement partie de l'attirail de données utilisées par les véhicules autonomes pour se déplacer en toute sécurité au même titre que le lidar.



Figure 5 : Reconstitution 3D par photogrammétrie du péristyle de la Villa de Diomède sur le site de Pompeï en avril 2012. Source : ENS (<http://www.archeo.ens.fr/Pompei-la-Villa-di-Diomedede.html>).

1.4.2. Milieu marin

Si le principe de la photogrammétrie sous-marine a été étudié dès les années 1960 (Pollio, 1968), sa diversification et sa généralisation restent assez récentes et liées à l'essor de la photographie numérique et l'explosion de la puissance de calcul par ordinateur. L'une des premières applications sous-marines de la photogrammétrie est l'étude des sites archéologiques subaquatiques, pour les mêmes raisons qu'en milieu terrestre. En effet, la reconstitution du site de fouilles est primordiale du fait de l'intrusivité des techniques de fouilles (récupération des objets par succion du sédiment) et de la possible dégradation des structures - comme celle d'une épave antique en bois - qui peuvent être rapidement détruites par leur exposition à l'oxygène ou aux courants marins. En archéologie sous-marine, les orthophotographies issues de la photogrammétrie permettent d'obtenir une carte précise du site de fouilles (Balletti et al., 2015), tandis que le modèle 3D permet d'appréhender plus facilement la complexité des assemblages d'objets et la configuration spatiale des structures (Figure 6 et Figure 7). Certaines épaves étant particulièrement profondes, les levés photogrammétriques sont souvent réalisés par des robots pilotés à distance (Drap et Long, 2005).

Des utilisations plus « industrielles » de la photogrammétrie existent également dans le domaine de l'inspection sous-marine (Guilloux, 2015). C'est notamment le cas pour le contrôle de conduites sous-

marines profondes comme celles situées à proximité des plateformes pétrolières, de canalisations (*pipe*) transportant du gaz et du pétrole, et des câbles téléphoniques. A l'instar de l'archéologie sous-marine, la photogrammétrie permet d'obtenir une vision réaliste d'un site et de pouvoir réaliser des mesures précises. Des levés photogrammétriques sont également réalisés pour localiser les nodules polymétalliques sur les plaines abyssales par plusieurs milliers de mètres de profondeur (Kwasnitschka et al., 2016). Du fait de l'importante profondeur (plusieurs centaines voir plusieurs milliers de mètres de profondeur), ces mesures sont réalisées par des ROV (des petits robots filoguidés), lorsque la zone de mesure est restreinte, et par des engins tractés ou des drones sous-marins pour de larges surfaces à cartographier.



Figure 6 : Représentation d'amphores d'un site sous-marin de fouilles archéologiques au large des côtes de Malte à environ 100 m de profondeur. Les photographies ont été réalisées avec un sous-marin Rémora 2000 de la COMEX. Source : projet GROPLAN (<http://www.lsis.org/groplan/>).

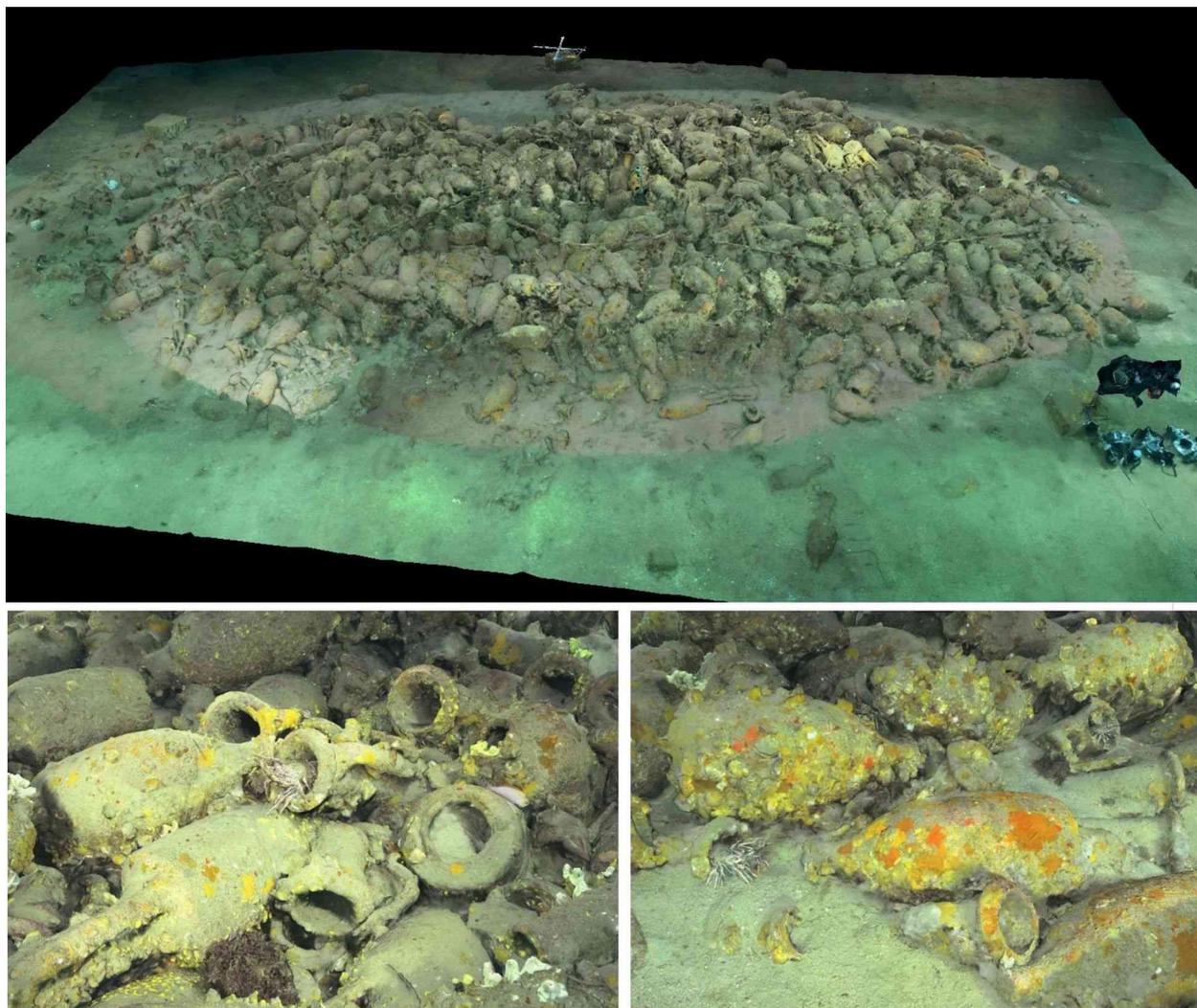


Figure 7 : Épave antique du Titanic et ses langoustes. Source : Andromède Océanologie.

La photogrammétrie sous-marine a également été utilisée dans le cadre du naufrage du Costa Concordia en 2012 afin d'évaluer l'état de la coque du navire échoué (Nocerino et Menna, 2020). Cette étude consistait notamment à réaliser un modèle mixte fusionnant les parties aériennes et subaquatiques du navire. Il est en effet possible de mixer des acquisitions terrestres et sous-marines pour obtenir un modèle unique, permettant par exemple de suivre l'état d'un ouvrage immergé (Figure 8).

Tout comme pour l'archéologie et le tourisme terrestre, les modèles 3D sous-marins sont utilisés dans un but de pédagogie et de sensibilisation du public au patrimoine subaquatique. Les principaux sujets de cette application sont les ruines et les épaves (Figure 9 et Figure 10).



Figure 8 : Modèle 3D fusionnant des photographies terrestres et sous-marines de la digue du port de plaisance de La Ciotat. Ce type de représentation permet d'étudier l'évolution des blocs composant la digue ainsi que les habitats marins à proximité (ici un herbier de posidonies). Source : Seaviews.



Figure 9 : Modèle 3D de l'épave du sous-marin le Rubis dans le Var qui repose par 40 mètres de fond. Source : Turtle Prod/Seaviews.

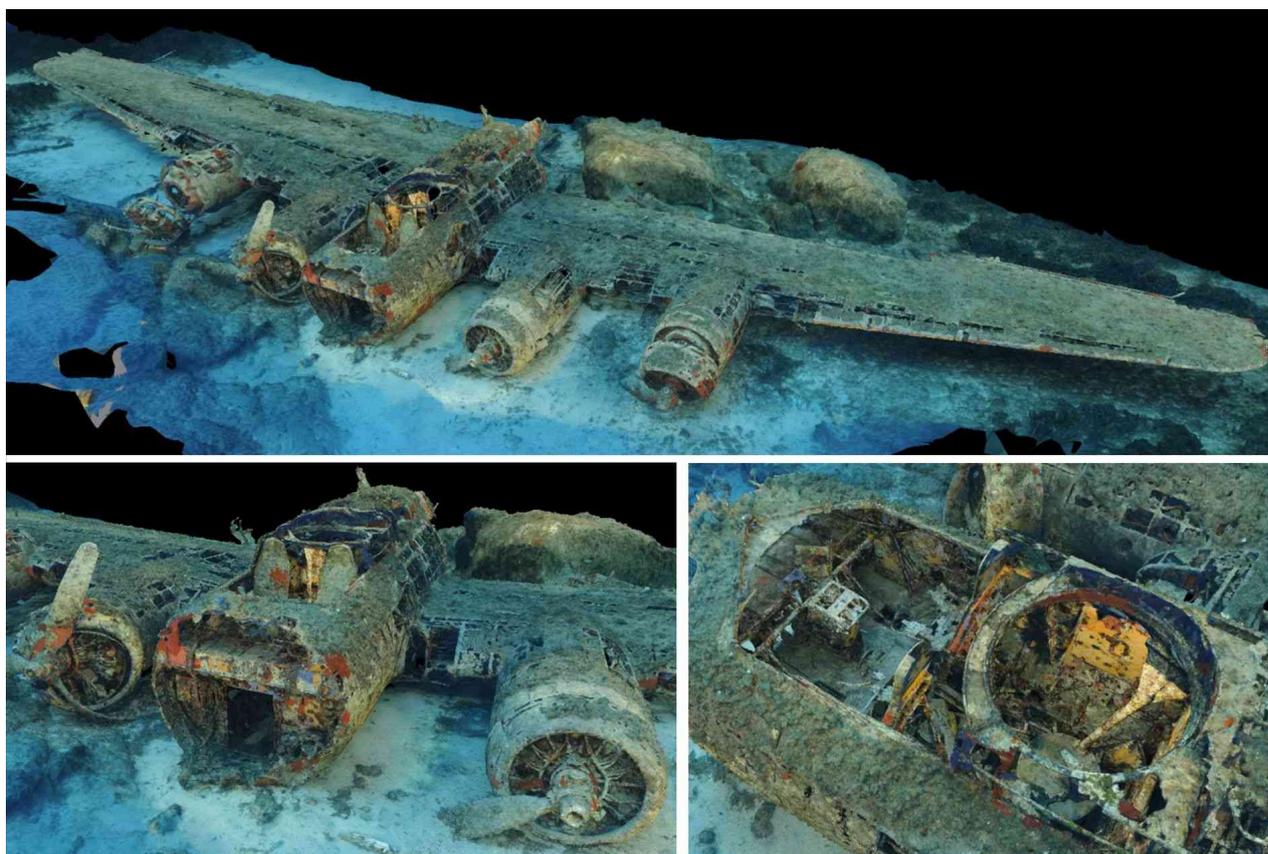


Figure 10 : Epave du B17 à Calvi (Corse). Source : Andromède Océanologie.

Enfin, l'une des utilisations les plus courantes de la photogrammétrie sous-marine est la cartographie des habitats et l'étude de la distribution des organismes marins. Les orthophotographies sous-marines, tout particulièrement, permettent de cartographier la limite des biocénoses marine avec précision et d'identifier certains habitats impossibles à détecter avec les techniques classiques (acoustique, photo aériennes). La photogrammétrie est actuellement principalement utilisée pour le suivi des prairies sous-marines, que ce soit celles de Méditerranée comme la posidonie ([Figure](#)

[11](#)) et la cymodocée ou celles des eaux tropicales (Abadie et Viala, 2020; Rende et al., 2015).

La photogrammétrie permet également de suivre et d'étudier les récifs tempérés (Drap et al., 2014; Marre et al., 2020) et les récifs coralliens, souvent peu profonds et dans des eaux claires (Burns et al., 2015).



Figure 11 : Orthophotographie sous-marine d'un herbier de posidonie fragmenté dans la baie de La Ciotat. Source : Seaviews.

La limite des habitats marins n'est pas la seule information extraite des orthophotographies sous-marines. Leur résolution millimétrique permet de détecter et d'identifier les organismes vivants sur le fond (par exemple les holothuries, les oursins, diverses algues) (Abadie et al., 2020; Ternon et al., 2020). Les traces des impacts anthropiques (c'est-à-dire des activités humaines) sont également visibles comme les déchets et les traces de destruction mécanique des herbiers sous-marins ou des récifs coralliens. Les modèles 3D, quant à eux, sont employés pour étudier les espèces marines présentant une structuration spatiale complexe comme les gorgones, le corail rouge ou certaines espèces de coraux tropicaux (Urbina-Barreto et al., 2020) (Figure 12, Figure 13 et Figure 14).

Bien que la photogrammétrie n'ait réellement percé la surface des océans que depuis une quinzaine d'années, elle connaît déjà un grand nombre d'applications, et tout indique que son utilisation va encore se diversifier dans les prochaines années. Dans le cadre de ce guide nous nous intéressons à l'utilisation de la photogrammétrie sous-marine (et terrestre, dans une moindre mesure) dans une optique d'étude et de suivi des herbiers sous-marins avec un focus sur les prairies de posidonie (*Posidonia oceanica*) qui sont au cœur d'enjeux de gestion clés en Méditerranée (Figure 15). Le Tableau 1 liste des exemples de rendus photogrammétriques avec différentes applications.

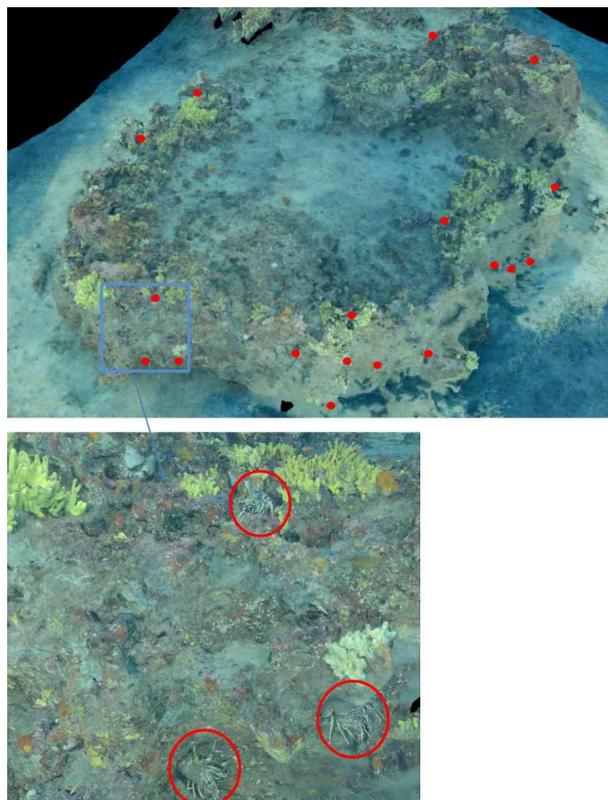


Figure 13 : Dénombrement des langoustes visible sur le modèle 3D de PNMCCA_8 (Corse) en 2020. [1] Vue du massif principal et localisation de 18 individus observés ; [2] Zoom sur trois langoustes. Source : Andromède Océanologie.



Figure 12 : Modèle 3D d'un récif corallien de Guadeloupe (éponges et coraux) généré par photogrammétrie sous-marine. Source : Seaviews.

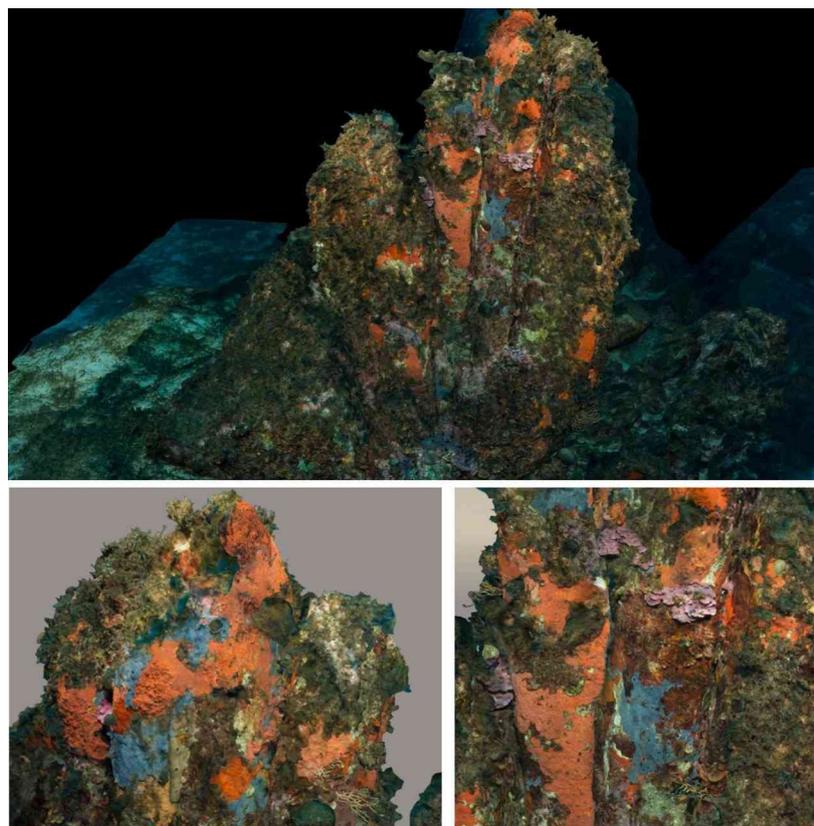


Figure 14 : Roche colonisée (Cap Carbonara, Sardaigne). Source : Andromède Océanologie.

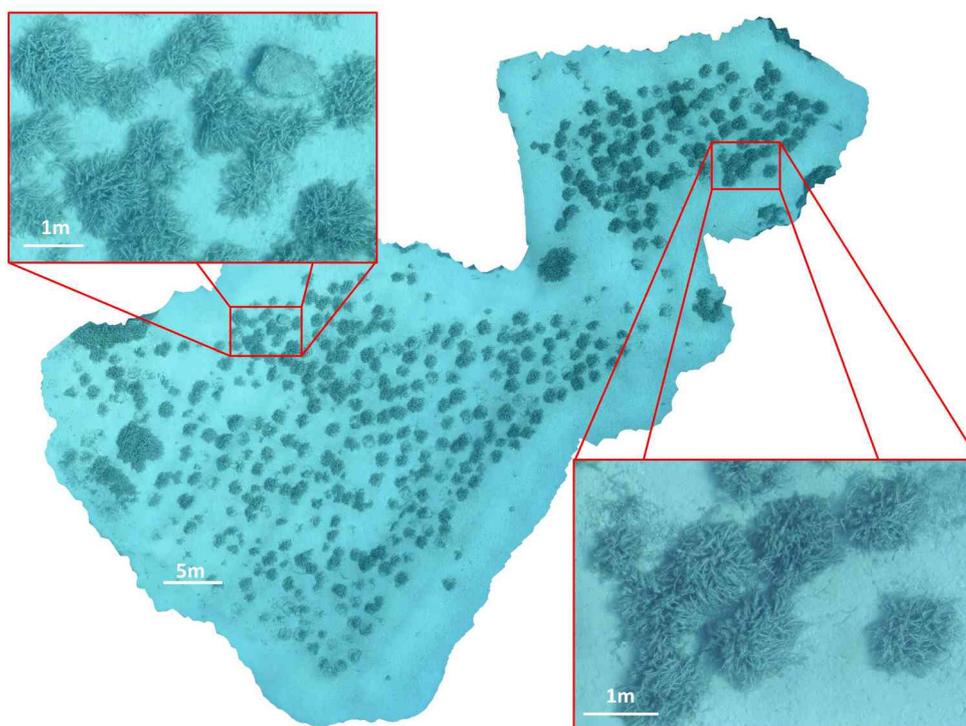


Figure 15 : Cartographie 2021 de l'herbier transplanté au Larvotto en 2017, Monaco (surface du modèle 2200 m²). Source : Andromède Océanologie.

Tableau 1 : Exemples de rendus photogrammétriques (orthophotographies et modèles 3D) visualisables en ligne.

Nom	Ortho.	3D	Localisation	Prof.	Lien
Calanque du Mugel	X	X	La Ciotat (13)	4 à 16 m	https://cartosub.fr/la_ciotat/le_mugel.htm
Colonie de cladocores		X	Saint-Florent (2B)	4 m	https://www.andromede-ocean3d.com/CLADOCORA/2021CC17_18_19/App
Corail transplanté	X	X	Nouvelle-Calédonie (988)	3 m	https://cartosub.fr/nouvelle_caledonie/transplantation_corail.htm
Dépôt de quais en béton	X	X	Macinaghju (2B)	2 à 5 m	https://cartosub.fr/corse/ponton_macinaggio2.htm
Digue et herbier de posidonie (terre/mer)	X	X	La Ciotat (13)	0 à 7m	https://cartosub.fr/la_ciotat/digue.htm
Épave du Donator		X	Hyères (83)	51 m	https://septentrion.lis-lab.fr/3D/Donator
Épave antique du Titanic		X	Marseille (13)	103 m	https://www.andromede-ocean3d.com/GOMBESSA/V/Titanic/App
Épave du P38 (avion)	X	X	La Ciotat (13)	38 m	https://cartosub.fr/la_ciotat/le_p38.htm
Épave du B17 (bombardier)		X	Calvi (2B)	28 m	https://www.andromede-ocean3d.com/EPAVES/B17/App
Épave du sous-marin Le Rubis		X	Cavalaire (83)	40 m	https://cartosub.fr/port-cros_porquerolles/le_rubis.htm
Émissaire de station d'épuration	X		Cargèse (2A)	0 à 22 m	https://cartosub.fr/corse/cargese_emissaire.htm
Grande nacre		X	Porto-Vecchio (2A)	3 m	https://cartosub.fr/corse/pv_grande_nacre_1.htm
Herbier de posidonie en atolls	X	X	La Ciotat (13)	3 à 15 m	https://cartosub.fr/la_ciotat/canalisation.htm
Herbier de posidonie		X	Port-Vendres (66)	14 m	https://www.andromede-ocean3d.com/TEMPO/2016/Paulilles/App
Nettoyage de récif coralligène		X	Saint-Jean-Cap-Ferrat (06)	36 à 40 m	https://www.andromede-ocean3d.com/RESCOR/2018_09/Apres_Travaux/App
Récifs artificiels de Cortiou		X	Marseille (13)	25 m	https://www.andromede-ocean3d.com/REXCOR/2019_06/D1/App
Récif coralligène		X	Bonifacio (2A)	50 m	https://www.andromede-ocean3d.com/RECOR/2020/Vacca_45/App
Récifs à éponges baril de rhum		X	Guadeloupe (971)	10 m	https://cartosub.fr/guadeloupe/pointe_ferry.htm
Système de mouillage forain	X	X	Saint-Florent (2B)	4 à 6 m	https://cartosub.fr/corse/fornali.htm
Tombant de l'impérial du large		X	Marseille (13)		https://septentrion.lis-lab.fr/3D/ImperialDuLarge/
Trace d'ancrage dans la matte morte	X		La Ciotat (13)	26 m	https://cartosub.fr/la_ciotat/trace_de_mouillage.htm

Chapitre 2

Acquisition des données

La qualité des données acquises, que ce soit les photographies ou le positionnement, est le facteur primordial qui définira la précision et la résolution des produits photogrammétriques (nuage de points, MNT, orthomosaïque, modèle 3D), et par extension, la précision et la quantité d'informations qui pourront être extraites (position de la limite de l'herbier, identification des espèces sessiles, détection des macrodéchets, etc.). Ce chapitre a donc pour but de fournir un aperçu du matériel et des différentes techniques permettant de réaliser des levés photogrammétriques sous-marins de qualité.

2.1. Matériel de prise de vue

Les performances du matériel de prise de vue (appareil photo et éclairage) ont un impact important sur la qualité des rendus photogrammétriques. Deux choses sont indispensables pour la réalisation de levés photogrammétriques sous-marins : le système photographique (boîtier, optique et caisson) et l'éclairage (phare, flash ou lumière naturelle).

2.1.1. Système photographique

De nombreux Appareils Photos Numériques (APN) de gammes différentes proposent aujourd'hui des caractéristiques permettant de réaliser des photographies sous-marines de qualité pour une utilisation photogrammétrique. Il ne s'agit pas ici de conseiller des modèles spécifiques d'APN, mais plutôt de définir les caractéristiques indispensables pour faire un levé optimal. Voici une liste des spécificités minimales requises :

- disposer d'un mode manuel complet permettant de régler la vitesse d'obturation et l'ouverture ;
- avoir un capteur de forte sensibilité pour atteindre de hauts niveaux d'ISO (au moins 2000) sans phénomène de bruit chromatique intense limitant l'exploitation des images ;
- posséder une optique intégrée ou amovible de qualité avec une focale courte (entre 10 et 20 mm au format 24x36) pour compenser le

manque de recul par rapport au sujet (lié à la visibilité réduite en milieu sous-marin). Si l'utilisation d'un objectif de type *fish-eye* est possible, elle peut cependant induire des distorsions trop importantes pour être corrigées par les logiciels de traitements photogrammétriques ;

- disposer d'un mode *time-lapse* photo paramétrable (prise de vue régulière à un pas de temps donné). Le *time-lapse* vidéo est à éviter car les fichiers sont beaucoup plus lourds, et le logiciel utilisera *in fine* les clips vidéos pour en extraire un *time-lapse* photo.

La résolution des APN actuels, même chez les compacts d'entrée de gamme, est largement suffisante pour obtenir une résolution centimétrique voire millimétrique des orthomosaïques. Parmi les types d'APN, ceux dits hybrides sont particulièrement adaptés à la photogrammétrie sous-marine du fait de leur faible encombrement de la possibilité d'utiliser des optiques amovibles de bonne qualité. Des caméras d'action de type GoPro peuvent également être employées pour des levés photogrammétriques mais la capacité de réglage limitée ainsi que la petite taille de leur capteur optique peuvent réduire la précision des productions finales. De plus, pour une utilisation optimale de ces caméras à l'optique très grand angle, une calibration optique avant chaque utilisation est recommandée pour réduire les effets de distorsion (Balletti et al., 2014).

La calibration optique de l'objectif d'un APN ou d'une caméra est réalisée à l'aide de mires à l'air libre ou sous l'eau, cette dernière solution étant obligatoire en milieu marin (Shortis, 2015). Cette calibration peut être faite en amont du levé dans une piscine ou in situ juste avant la prise des clichés.



Figure 16 : Un appareil photo hybride avec une optique de focale courte dans un caisson muni d'un dôme. Source : Seaviews.

S'il est possible de réaliser une acquisition photogrammétrique avec n'importe quel appareil photo numérique, il est préférable d'utiliser ceux ayant un capteur plein format (36 x 24 mm) car ils ont une qualité d'image supérieure à sensibilité égale (et donc plus sensibles à qualité égale). L'optique doit permettre de compenser la réfraction du caisson (passage de la lumière de l'eau à l'air réduit le champ de vision) et conserver un champ de vision suffisamment large pour assurer un recouvrement important entre les images, sans déformation majeure comme c'est le cas avec un grand angle type « fisheye » (Figure 17).



Figure 17 : Appareils photos numériques Nikon D5 dans leur caisson Seacam avec flashes déportés.
Source : Andromède Océanologie.

Le caisson étanche est également un élément important : la matière dans laquelle il est construit (métal ou plastique) et le niveau de finition conditionneront sa solidité et donc sa profondeur maximale d'utilisation. (Figure 16). La partie du caisson impactant la qualité des prises de vues est le hublot protégeant l'objectif. Si peu

de choix s'offre aux APN de type compact (généralement des optiques amovibles dites "humides", qui se fixent à l'extérieur du caisson sur le hublot plan), les caissons pour APN hybrides et DSLR (reflex) permettent de changer le hublot du caisson par un large choix, dépendant de l'objectif utilisé. Pour les optiques de focale courte recommandées précédemment, un dôme hémisphérique de 6 ou 8 pouces de diamètre est le plus adapté en photogrammétrie sous-marine plutôt qu'un hublot plan (Menna et al., 2016).

Plusieurs APN dans des caissons distincts peuvent être synchronisés entre eux pour disposer d'une plus grande surface couverte à chaque déclenchement (Figure 19). Ce système peut cependant être complexe à développer et difficile à manier sous l'eau en plongée.

2.1.2. Éclairage

L'éclairage des photographies sous-marines peut avoir deux origines : naturelle ou artificielle (Figure 18). L'éclairage naturel, c'est à dire sans autre source que la lumière du soleil, est adapté pour les levés par petits fonds. Il peut également être utilisé plus profondément (plusieurs dizaines de mètres) si la luminosité le permet. Il est important de noter que sans modification de la balance des blancs ou de certains post-traitements, les photographies faites en lumière naturelle auront une dominance vert/bleu des couleurs, cette coloration se répercutant sur les produits photogrammétriques.



Figure 18 : Prise de photographie d'un récif artificiel A) en lumière naturelle sans éclairage d'appoint et B) avec un flash déporté. Source : Seaviews.



Figure 19 : Dispositif de prises de vues en plongée avec deux APN synchronisés et un phare. Source : Seaviews.

Deux types d'éclairages artificiels sont employés en photographie sous-marine : le flash et le phare. Dans les deux cas, l'utilisation d'une source de lumière artificielle limite la distance d'éloignement par rapport au sujet. Cette distance variera en fonction de la puissance de l'éclairage et sera au maximum de l'ordre de deux mètres avec du matériel de moyenne gamme. Le flash et le phare disposent de caractéristiques propres qui détermineront le choix de l'un ou de l'autre dans le système de prise de vue pour la photogrammétrie sous-marine.

Le flash (Figure 20) fournit un éclairage puissant et instantané (éclair). Son déclenchement est synchronisé avec celui de l'APN. Le flash nécessite un temps de rechargement après chaque éclair qui varie selon la puissance du flash et sa qualité (entre 0,25 et 2 secondes), ce qui peut ralentir l'acquisition de photos. L'autonomie du flash est de quelques centaines d'éclaires, ce qui peut être limitant dans le cadre de levés photogrammétriques de plusieurs milliers de déclenchements/éclair.



Figure 20 : Flash externe de photographie sous-marine. Photo : Arnaud Abadie.

Le phare de plongée (Figure 21), le plus souvent à LED, fournit un éclairage continu et homogène. Cette source de lumière permet des levés de plusieurs milliers de photos grâce à une autonomie comprise entre une et deux heures. Son autonomie peut être augmentée à l'aide batteries externes. Le phare apparaît plus adapté que le flash en terme d'autonomie pour les levés photogrammétriques bien que l'emploi de ce dernier reste tout à fait pertinent, sa puissance étant plus importante et les images réalisées de meilleure qualité.



Figure 21 : Phare de plongée pour photo/vidéo avec un éclairage puissant et un faisceau homogène. Photo : Seaviews.

2.2. Méthodes d'acquisition

2.2.1. Généralités

Le choix de la méthode d'acquisition de données photogrammétriques (photographies et données de positionnement) dépend des conditions environnementales du sujet sous-marin : profondeur, visibilité, taille de la zone d'étude, éloignement. Quelle que soit la méthode utilisée, plusieurs paramètres sont communs à tout levé photogrammétrique :

- un fort recouvrement est nécessaire entre les photographies, idéalement 80 % longitudinalement et 60 % latéralement, pour avoir le plus de points homologues possibles lors des traitement informatiques. Ce taux de recouvrement peut être diminué pour s'adapter aux contraintes de l'acquisition (grande surface à modéliser, temps d'acquisition restreint en plongée, etc.) mais ne doit pas être inférieur à 60 % pour permettre un bon alignement des

images entre elles et obtenir des productions complètes et de qualité ;

- il est préférable que la mise au point soit fixe durant la totalité du levé afin d'éviter un possible patinage de l'autofocus conduisant à des clichés flous. La technique de l'hyperfocale avec une mise au point à l'infini est le plus souvent employée, même en milieu marin, car elle permet d'assurer des photographies nettes sur l'ensemble de l'acquisition ;
- l'autonomie des batteries de l'APN et du système d'éclairage détermine le nombre maximal d'images et donc la surface couverte lors du levé ;
- le déroulement du levé (temps, trajectoires, distance par rapport au sujet) doit être préparé consciencieusement au préalable pour assurer son succès.

2.2.2. Avec un drone aérien

Bien qu'a priori inadapté aux levés sous-marins, le drone aérien peut s'avérer un outil efficace pour les acquisitions photogrammétriques de petits fonds en eaux claires (herbiers côtiers ([Figure 22](#)) ou petits fonds rocheux (Ventura et al., 2018)). C'est notamment le cas du récif-barrière de posidonies, une importante structure verticale de matre avec à son sommet un herbier feuillu affleurant à la surface (Tomasello et al., 2020).

En volant à plusieurs dizaines de mètres d'altitude, le drone permet de cartographier des zones relativement étendues (plusieurs hectares). Par exemple une acquisition à environ 50 m d'altitude permet d'assurer une résolution cartographique de l'ordre du centimètre.

La taille du pixel projeté au sol ou Ground Sampling Distance (GSD) s'exprime en m/pixel et permet notamment de déterminer l'altitude de vol en fonction de la résolution souhaitée. La GSD se calcule de la façon suivante :

$$GSD = \frac{\text{Largeur capteur (mm)} \times \text{Altitude survol (m)}}{\text{Distance focale réelle (mm)} \times \text{Largeur image (pix)}}$$

Le levé peut être réalisé avec un drone d'entrée de gamme disposant d'un système photo haute définition. Il est important cependant de noter qu'un

drone professionnel disposant d'un GNSS RTK fournira une précision de positionnement centimétrique des orthophotographies, tandis que le GPS standard implique une précision métrique.

Les principales limites du levé au drone pour cartographier les fonds marins, sont la faible profondeur des zones cartographiées (quelques mètres, selon la turbidité de la colonne d'eau) et la sensibilité aux conditions météorologiques et de mer qui doivent être parfaites (pas de houle ni de vent fort). De plus certains habitats, tels que la matre morte, la roche et les herbiers feuillus restent difficiles à discriminer sur des clichés aériens. Cette technique requiert donc un effort de vérité terrain complémentaire pour obtenir une cartographie fiable des biocénoses marines.



Figure 22 : Exemple d'une orthophotographie acquise en drone au Pilon (Saint-Tropez) et cartographie des habitats associée. Source : Andromède, 2019.

2.2.3. Depuis la surface

L'acquisition de photographies depuis la surface peut être réalisée par un nageur équipé d'un APN dans un caisson. Cette méthode est la plus simple et la moins coûteuse à mettre en place. Elle empêche cependant tout géoréférencement direct des photographies (voir [Géoréférencement direct](#)).

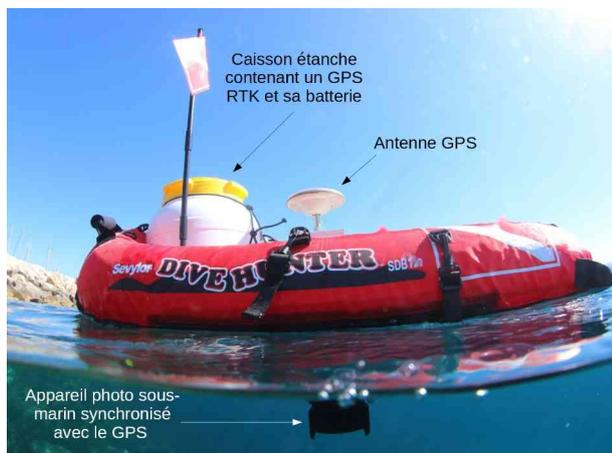


Figure 24 : Plateforme flottante de prises de vues sous-marines géoréférencées depuis la surface. Source : Seaviews.



Figure 23 : Appareil d'acquisition photogrammétrique de surface motorisé. Source : Andromède Océanologie.

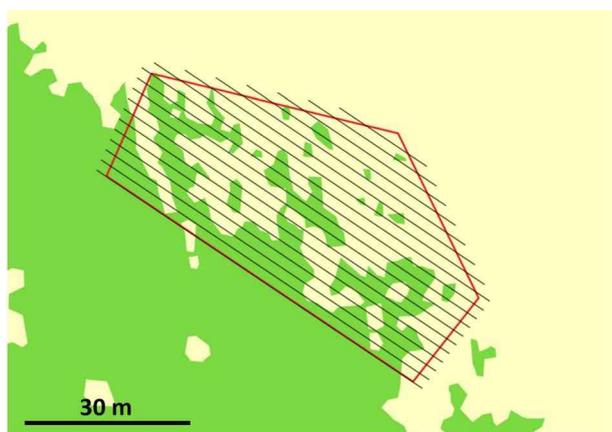


Figure 25 : Plan prévisionnel pour une acquisition photogrammétrique de surface en vue de cartographie la limite supérieure de l'herbier de posidonie. Source : Andromède Océanologie.

Afin de remédier à ce problème, des systèmes flottants peuvent être employés pour réaliser des prises de vues sous-marines géoréférencées directement grâce à la synchronisation de l'APN avec un GNSS RTK placé sur le support de surface. Ce système de surface peut être soit une bouée opérée par un nageur (Figure 24), soit une petite embarcation motorisée avec un très faible tirant d'eau (Figure 23). Une tablette connectée au GNSS peut être ajoutée afin de faciliter le suivi de trajectoires de mesure (Figure 25), de visualiser la zone à cartographier et de contrôler l'APN à distance (réglages, fréquence de prise de vue). La synchronisation avec le GPS permet soit l'envoi d'un flux de données de positionnement à l'appareil photo qui les enregistre dans les métadonnées de chaque image, soit l'enregistrement de la position de l'APN à chaque déclenchement dans un fichier séparé.

L'acquisition photogrammétrique depuis la surface permet ainsi de lever des zones importantes avec comme seule limite la batterie de l'APN et du GPS (Abadie et al., 2018a).

Tout comme les drones aériens il est possible de calculer la GSD pour déterminer la «fauchée» de l'appareil photo et la quantité de transects de mesure à réaliser. Par exemple, dans le cas d'un capteur plein format (36 mm x 24 mm), une longueur focale de 20 mm et une résolution des images 5568 x 3712 pixels, pour une profondeur moyenne de 10 m, nous obtiendrons une GSD moyenne de 2.4 mm/pixel (voir la formule du chapitre 2.2.2). Cette résolution au sol, supérieure à celle obtenue par drone aérien (qui est beaucoup plus distant du sujet), permet de cartographier et reconnaître avec une plus grande précision les habitats sous-marins, avec une résolution maximale de l'orthomosaïque du même ordre de grandeur (< 3 mm dans l'exemple précédent). L'espacement des transects parallèles avec l'embarcation doit permettre de maintenir un recouvrement longitudinal et latéral suffisants entre les images et assurer leur bon alignement (respectivement supérieurs à 80 % et 60 %). L'empreinte au sol de chaque image peut être estimée en multipliant sa résolution (nombre de pixels) par la GSD pour déterminer l'espacement des transects. Avec la configuration détaillée ci-dessus (Nikon D5, optique 20 mm et 10 m de profondeur), chaque image ayant une empreinte au sol d'environ 13.4 m x 8.9 m (largeur x hauteur ; respectivement 5568 x 2.4 mm et 3712 x 2.4 mm), cela suggère de réaliser des transects espacés de maximum 5.4 m (60% de recouvrement latéral) et de prendre une photo tous les 1.8 m (80 % de recouvrement longitudinal).

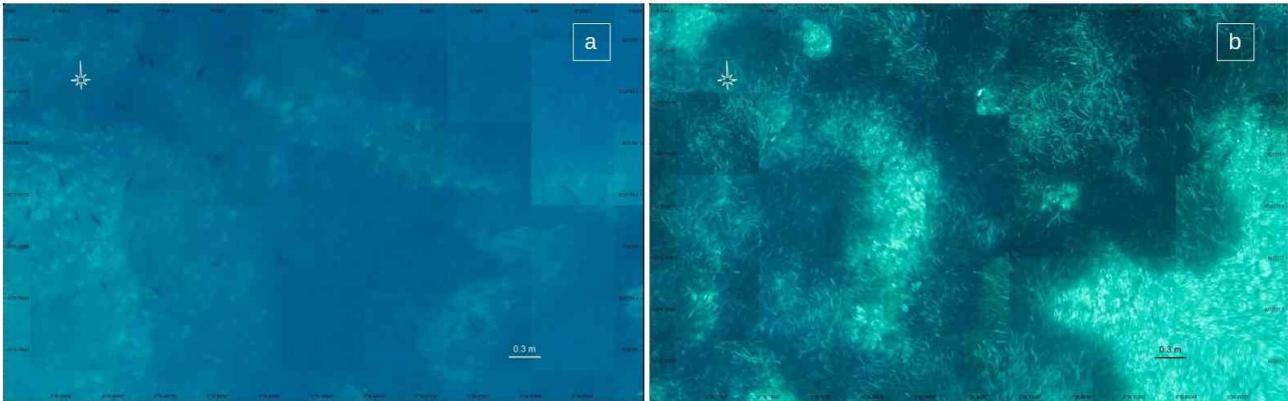


Figure 26 : Illustration du phénomène d'absorption de la lumière avec la comparaison d'une orthophotographie réalisée avec des clichés pris depuis la surface. A) 16 m de profondeur; B) 10 m de profondeur. Source : Abadie et al. (2018).

La principale limite de cette technique de levé est que la qualité des clichés dépend grandement de la turbidité de l'eau. Dans de bonnes conditions de visibilité, les photographies sont exploitables jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur. Au-delà, et ce quelle que soit la turbidité de l'eau, le phénomène d'absorption de la lumière (Figure 26) entraîne des problèmes d'interprétation des photographies par l'œil humain et par les logiciels d'analyse d'image (Bryson et al., 2016). De plus, une profondeur minimale est nécessaire afin de permettre un recouvrement suffisant entre chaque photographie. La gamme de profondeur optimale pour une acquisition depuis la surface est donc comprise entre 2 m et 10 m de profondeur.

Un second facteur peut limiter l'utilisation de photographies prises depuis la surface : les reflets lumineux sur le fond dus à la réfraction par les ondulations en surface (Figure 27).

Ce phénomène perturbe les algorithmes de traitement des images à cause des grandes différences de luminosités pour un même point entre deux images. L'algorithme qui associe les points homologues entre les différentes images sera ainsi perturbé et ne parviendra pas à associer certains points réellement homologues et trouvera davantage de fausses associations entre des points non homologues. Si ces perturbations sont importantes, cela peut diminuer la précision de l'alignement des images voir faire échouer tout ou partie de l'alignement, et donc rendre impossible toute production à partir du jeu de données.

Ce phénomène s'atténue avec la profondeur et dépend fortement de l'ensoleillement durant le levé. Un temps couvert assurera un éclairage homogène du fond sans reflets lumineux. De plus, il atténuera l'ombre du

support de surface sur le fond qui n'apparaîtra ainsi plus sur les images.

Enfin, le dernier aspect du levé depuis la surface à prendre en compte est l'angle des prises de vue. Tout comme un drone aérien, les photographies sont réalisées avec une vue verticale qui se limite à la partie supérieure et à celles inclinées des sujets en relief présents sur le fond (roche, herbier, épave). Tout comme avec un drone aérien, les photographies sont prises verticalement, ce qui ne permet pas de reconstruire les faces verticales qui ne sont pas représentées sur les images. Afin de pallier à ce problème, des photographies complémentaires de ces zones peuvent être réalisées en plongée et intégrées au traitement du jeu de données.



Figure 27 : Exemple de reflets lumineux sur le fond (ici sur un récif de Guadeloupe) limitant la qualité du levé photogrammétrique. Photo : Arnaud Abadie.

2.2.4. Avec un dispositif tracté

Afin d'augmenter la surface cartographiée par photogrammétrie sous-marine, un système photographique peut être tracté par une embarcation. Le dispositif tracté (ou « poisson ») est constitué d'un support rigide en forme d'aile, éventuellement lesté pour assurer une flottabilité négative, sur lequel est fixée une caméra et un APN (Figure 29). Le système est relié au navire par un câble incluant la connectique permettant un retour vidéo en surface. L'APN est paramétré en mode *time-lapse* puis tracté sous l'eau en adaptant la profondeur de « vol » en modifiant la vitesse et la longueur de câble déroulé. Le positionnement est assuré par le système GPS du navire tractant le dispositif en calculant la position du « poisson » avec sa profondeur d'immersion et la longueur de câble déroulé. Cette technique de positionnement indirecte induit une précision métrique du géoréférencement des transects photogrammétriques. Ces transects parallèles doivent être suffisamment resserrés pour assurer un bon recouvrement (voir calculs section 2.2.2). Une deuxième série de transects perpendiculaires aux premiers peut être réalisée afin de maximiser la qualité de l'alignement des images et donc des produits photogrammétriques.

Le principal avantage de ce mode d'acquisition est la taille des surfaces cartographiées qui sont bien plus importantes que celles couvertes en plongée ou depuis la surface. Il permet également de suivre des transects de mesure avec précision et d'assurer un quadrillage plus précis de la zone d'étude. La méthode est particulièrement adaptée aux fonds marins avec un relief peu marqué comme les herbiers sous-marins (Figure 28). Dans le cas des épaves, des fonds rocheux

ou des récifs coralliens, l'emploi d'un dispositif tracté est plus compliqué du fait des risques de collision avec le relief lié à la faible maniabilité verticale du système.

L'emploi d'un système tracté a cependant plusieurs limites dont la principale est d'assurer la stabilité du système à la profondeur souhaitée. En effet, plus la profondeur augmente, plus la traînée du système et son câble augmente et plus il a tendance à remonter dans la colonne d'eau. Il faut ajuster la longueur de câble et la vitesse pour maintenir le système à une profondeur constante. Une autre limite concerne les performances et les réglages de l'APN fixé au « poisson » qui doit permettre la réalisation de photos correctement exposées et nettes à vitesse d'obturation élevée pour éviter le flou de bouger lié au mouvement du système.



Figure 29 : Dispositif tracté constitué d'une aile en métal sur lequel est fixé un appareil photo. Source : Seaviews.



Figure 28 : Orthophotographie d'un herbier de posidonie fragmenté réalisée avec un dispositif tracté (Golfe de Saint Florent, Corse). Source : Seaviews.

2.2.5. En plongée sous-marine

La prise d'images en plongée permet de se mouvoir plus facilement autour d'un sujet, surtout lorsque ce dernier a une structuration 3D complexe (Figure 30) comme dans le cas d'une épave et de récifs rocheux ou coralliens (Marre, 2020). Elle permet également de s'approcher suffisamment d'un sujet de petite taille (par exemple une petite colonie de corail) pour en faire un modèle détaillé. Selon la profondeur et l'étendue de la zone d'étude, des moyens matériels et humains plus ou moins conséquents sont nécessaires.

Ainsi une petite épave d'avion à une trentaine de mètres de profondeurs ne nécessitera qu'une ou deux plongées de quelques dizaines de minutes avec un équipement standard de plongée en circuit ouvert, tandis que des récifs coralligènes profonds requerront plusieurs heures de plongée en scaphandre recycleur (voir ci-après). Le matériel photo joue également un rôle important, et l'autonomie de ses batteries (APN mais surtout l'éclairage) est un paramètre crucial à prendre en compte dans la stratégie d'acquisition des images.

Les acquisitions photogrammétriques en plongée peuvent être longues et physiquement exigeantes (palmage continu), et peuvent devenir rapidement contraignantes en plongée en circuit ouvert. Afin de pallier à ce problème il est possible de réaliser les acquisitions photogrammétriques avec des scaphandres recycleurs à gestion électronique (Figure

31) : ils permettent de réaliser les acquisitions en sécurité et sans autre limite que celle du temps de décompression.



Figure 31 : Scaphandres recycleurs à gestion électronique pour les plongées longues et profondes. Source : Andromède Océanologie.

La principale limite de la photogrammétrie sous-marine en plongée est la difficulté à géoréférencer les productions (voir [Positionnement et géoréférencement](#)). L'absence de signal GPS pour se positionner, et la visibilité, même lorsqu'elle est favorable, permet rarement de voir à plus de 15-20 m. Par ailleurs, la distance à la zone numérisée doit nécessairement être réduite à cause de l'absorption de la lumière par l'eau, obligeant le plongeur à «survoler» la zone à seulement quelques mètres (< 2 m si utilisation de lampes ou de flashes). Il devient donc difficile de

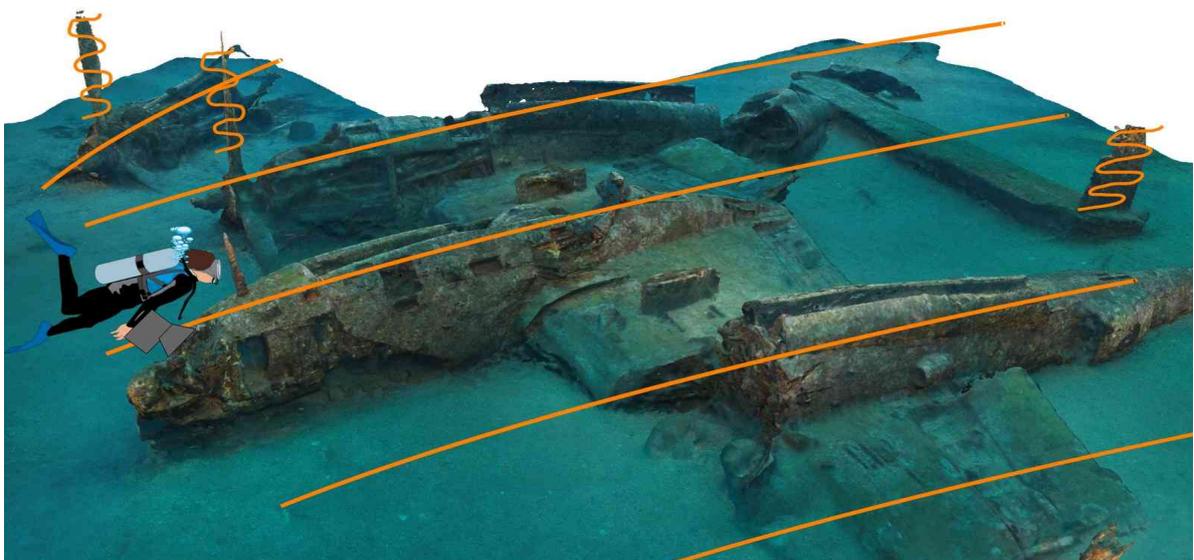


Figure 30 : La trajectoire des levés photographiques en plongée (en orange) dépend du relief du sujet d'étude, ici une épave d'avion avec un relief complexe.

planifier et réaliser précisément les transects d'acquisition photogrammétrique en plongée, et ceci est d'autant plus vrai que la surface à numériser est grande et morphologiquement complexe.

Afin de pallier à ces difficultés et de gérer au mieux l'acquisition photogrammétrique, notamment dans le cas de grandes surfaces à numériser, un appareil d'acquisition photogrammétrique permettant d'avoir un rendu visuel en temps réel de la position 3D des clichés et du plongeur a été développé (partenariat entre Andromède Océanologie et le laboratoire InToSea). Il permet ainsi d'assurer une couverture complète et suffisante des zones à modéliser (Figure 32).

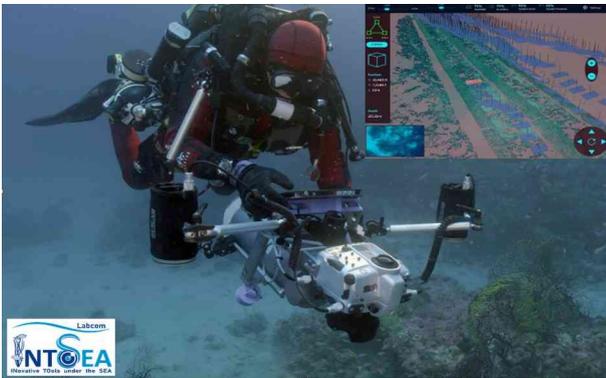


Figure 32 : Acquisition photogrammétrique avec l'appareil dédié développé par Andromède Oceanologie et le laboratoire InToSea (<https://labcomintosea.edu.umontpellier.fr/>). Source : Andromède Océanologie.

L'appareil développé par Andromède Océanologie et InToSea contient un APN reflex (capteur plein format) avec un objectif grand angle, deux flashes synchrones, un ordinateur embarqué et une tablette graphique pour l'affichage. En début d'acquisition, le plongeur règle l'appareil photo (vitesse d'obturation, sensibilité, ouverture et puissance des flashes) puis réalise une série de photos d'une mire photogrammétrique avec des marqueurs codés définissant les quatre cardinales du site, l'échelle et l'horizontale. La calibration de l'appareil consiste en la détection des marqueurs codés sur les images, l'alignement des images et le référencement de l'espace 3D grâce aux marqueurs. La calibration faite, l'espace 3D de l'appareil est correctement mis à l'échelle et orienté, et le plongeur peut alors démarrer l'acquisition. Chaque nouvelle image est alignée en temps réel aux précédentes et affichée sur la tablette, conjointement au nuage de

points épars formé par les points 3D homologues entre les images. Le plongeur peut ainsi déterminer sa position courante (dernière image alignée) et contrôler sa trajectoire et le bon recouvrement des images dans l'espace.

2.2.6. Avec un ROV ou un AUV

L'utilisation d'un ROV (*Remotely Operated Vehicle*) (Figure 33) dispose d'avantages et de limites similaires aux prises de vue en plongée. Si le ROV n'a pas la maniabilité et l'adaptabilité d'un plongeur, il dispose cependant d'un avantage d'importance : pouvoir intervenir à grande profondeur et sans contraintes de temps ou presque. A contrario, l'utilisation d'un ROV à grande profondeur peut nécessiter des ressources humaines et matérielles importantes. Le ROV est particulièrement adapté à la cartographie d'épaves et de sites de fouilles archéologiques profonds (Drap et al., 2008), les formations coralliennes profondes (Bennecke et al., 2016), ainsi qu'à l'inspection d'installations sous-marines comme les canalisations et les plateformes pétrolières (Guilloux, 2015).



Figure 33 : ROV équipé du système Orus3D de la Comex spécialement dédié à la photogrammétrique sous-marine. Source : Comex.

A la différence du ROV, l'AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) (Figure 34) n'est pas relié à un navire de surface et réalise le levé photogrammétrique de façon autonome. Son utilisation se limite à des fonds plats et s'apparente à celle d'un drone aérien. Les paramètres de navigation et de prise de vue sont définis

avant la mise à l'eau de l'AUV. Ces appareils sont d'une taille relativement importante (plusieurs mètres de long) et nécessitent donc un navire de support en conséquence. Du fait de son coût élevé, l'AUV est aujourd'hui principalement utilisé pour des missions de prospection océanographique par très grands fonds sur les plaines abyssales pour y détecter les champs de nodules polymétalliques (Kwasnitschka et al., 2016). Cependant, avec la miniaturisation de ce type de système, il sera certainement possible dans un futur proche d'utiliser des AUV en milieu côtier.

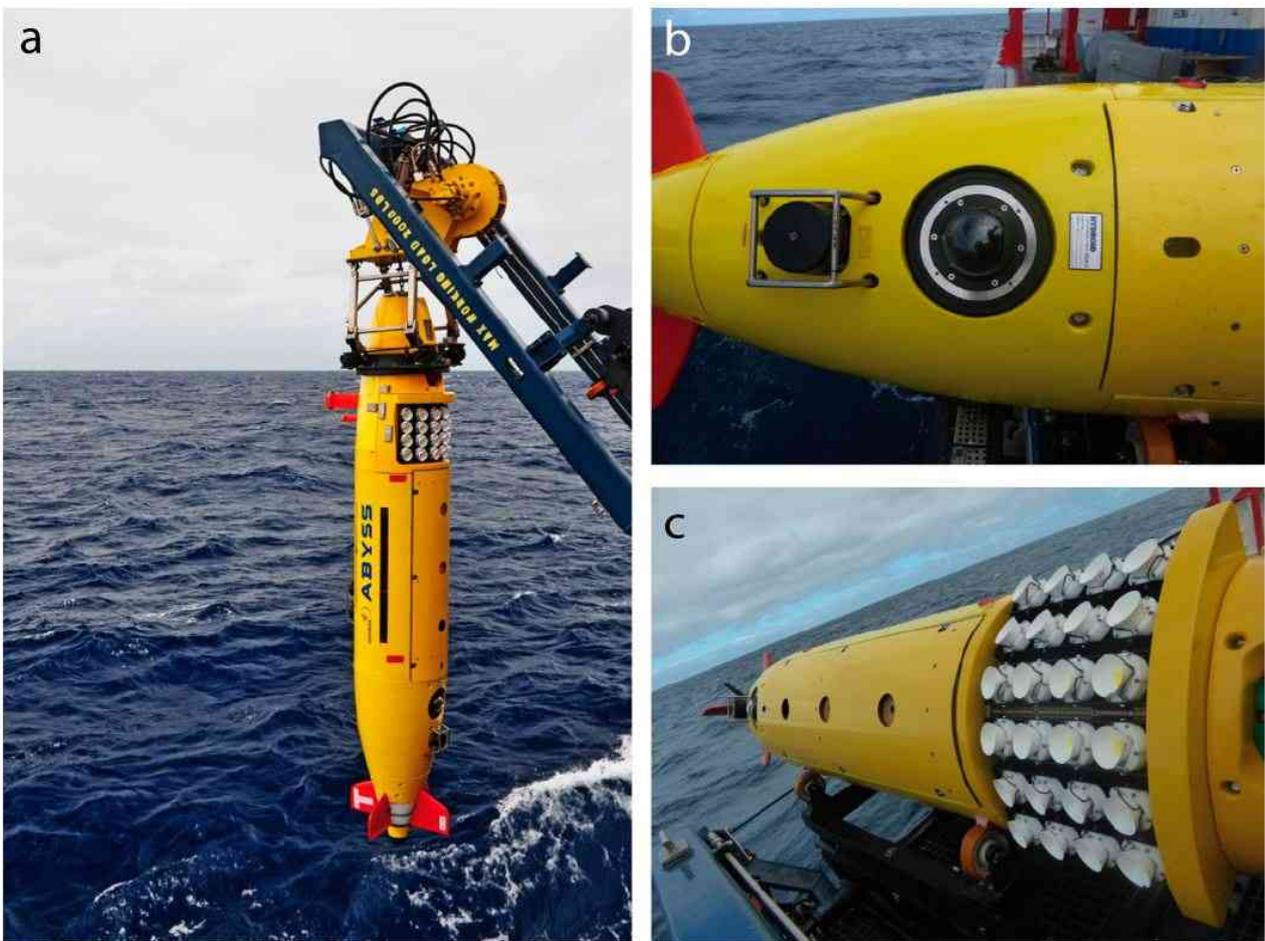


Figure 34 : AUV déployé pour la cartographie des plaines abyssales par photogrammétrie pour la détection de nodules polymétalliques. Source : Kwasnitschka et al., 2016.

2.2.7. Comparatif des techniques d'acquisition

Plusieurs critères sont pris en considération lorsqu'il s'agit de sélectionner une ou plusieurs techniques d'acquisition de données photogrammétriques (Tableau 2). En effet, ce choix dépend de plusieurs paramètres : la thématique abordée, la profondeur et l'étendue de la zone d'étude, le budget disponible et la précision requise concernant le géoréférencement (le cas échéant).

Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques des différentes techniques d'acquisition photogrammétriques. La surface cartographiée et le coût sont fournis à titre indicatif et sont susceptibles de varier fortement d'une étude à l'autre.

Technique	Thématiques	Prof. max	Surface cartographiée	Coût	Géoréférencement	Remarque
Drone aérien	Récifs coralliens Herbiers marins intertidaux Herbiers infralittoraux Infrastructures portuaires	5 m	De 1 ha à 500 ha	3 000 € à 50 000 €	Direct avec GNSS RTK	Technique fortement dépendante de la turbidité de l'eau
Depuis la surface	Récifs coralliens Herbiers infralittoraux Infrastructures portuaires Câbles sous-marins Épaves	15 m	De 100 m ² à 3 ha	2 000 € à 20 000 €	Direct avec GNSS RTK Positionnement relatif avec un repère fixe et mise à l'échelle	Technique fortement dépendante de la turbidité de l'eau
Dispositif tracté	Récifs coralliens Herbiers infralittoraux	Pas de limite	De 1 ha à 10 ha	2 000 € à 30 000 €	Indirect avec le système de positionnement du navire	La profondeur maximum dépend des moyens nautiques
Plongée sous-marine	Récifs coralliens Coralligène Herbiers infralittoraux Infrastructures portuaires Archéologie Épaves Récifs artificiels Câbles sous-marins Émissaires de STEP ¹	130 m	De 2 m ² à 300 m ²	2 000 € à 50 000 €	Indirect avec des données acoustiques Positionnement relatif avec des repères fixes et mise à l'échelle	La profondeur maximum dépend de la technique de plongée utilisée (circuit ouvert, recycler)
ROV	Coralligène Corail profond Herbiers infralittoraux Infrastructures portuaires Archéologie Épaves Câbles sous-marins	Entre 100 et > 1000 m	De 2 m ² à 300 m ²	4 000 € à 200 000 €	Indirect avec le système de positionnement du navire Indirect avec un système de positionnement acoustique Positionnement relatif avec des repères fixes et mise à l'échelle	Le ROV aborde les mêmes thématiques que le plongeur sans limite de profondeur
AUV	Nodules polymétalliques	Entre 1000 et 10000 m	10 ha	€€€€€€€€	Indirect avec un système de positionnement acoustique	Technique peu employée en routine et très coûteuse

1 Station d'épuration des eaux usées

2.3. Positionnement et géoréférencement

Le géoréférencement est l'étape permettant de positionner les données photogrammétriques dans l'espace (latitude, longitude et altitude). Selon l'objectif de l'étude, les acquisitions peuvent être réalisées sans aucun moyen de géoréférencement (le cas des modèles 3D récréatifs ou éducatifs), avec un positionnement relatif à des points fixes (le cas de suivis temporels permettant de mesurer une croissance d'un organisme sessile ou une progression/régression d'un herbier), ou avec un géoréférencement des données (le cas de cartographies de limites d'herbiers). La précision du géoréférencement dépend de la méthode employée : elle va d'une précision métrique pour un géoréférencement indirect acoustique ou par GPS classique, jusqu'à une précision centimétrique pour un positionnement par GNSS avec correction RTK.

2.3.1. Positionnement relatif

2.3.1.1. Mise à l'échelle

La mise à l'échelle a pour but de pouvoir réaliser des mesures de distances et de volumes sur les productions photogrammétriques. De façon pratique, elle nécessite, lors de la phase la réalisation des clichés, de

disposer sur la zone d'étude un objet dont la longueur est connue avec précision. Cet objet prend le plus souvent la forme d'une barre d'échelle graduée déposée sur le fond dans la zone cartographiée ou à proximité de l'objet photographié (Figure 35).

Dans le cas le plus simple d'une acquisition monoscopique (un seul appareil photo) sans positionnement GPS (en plongée) ni points de contrôle aux coordonnées géographiques connues, il est possible de mettre à l'échelle et orienter les modèles grâce à une mire photogrammétrique (Figure 35). Celle-ci est composée de quatre marqueurs codés matérialisant les quatre cardinales d'un repère local. La mire est équipée d'un compas et d'un niveau à bulle permettant de l'orienter et la mettre à l'horizontale.

Lors du traitement informatique des images, l'objet est identifié sur les images et sa longueur précise est renseignée. La distance entre les éléments composant le nuage de points est ainsi connue lors de la génération des orthophotographies et des modèles 3D. La précision de la mise à l'échelle est de l'ordre du millimètre. Le géoréférencement de la scène est cependant impossible de façon directe. Le positionnement géographique du site cartographié est le plus souvent reporté à l'aide d'un point ou d'une zone avec une précision de plusieurs mètres.

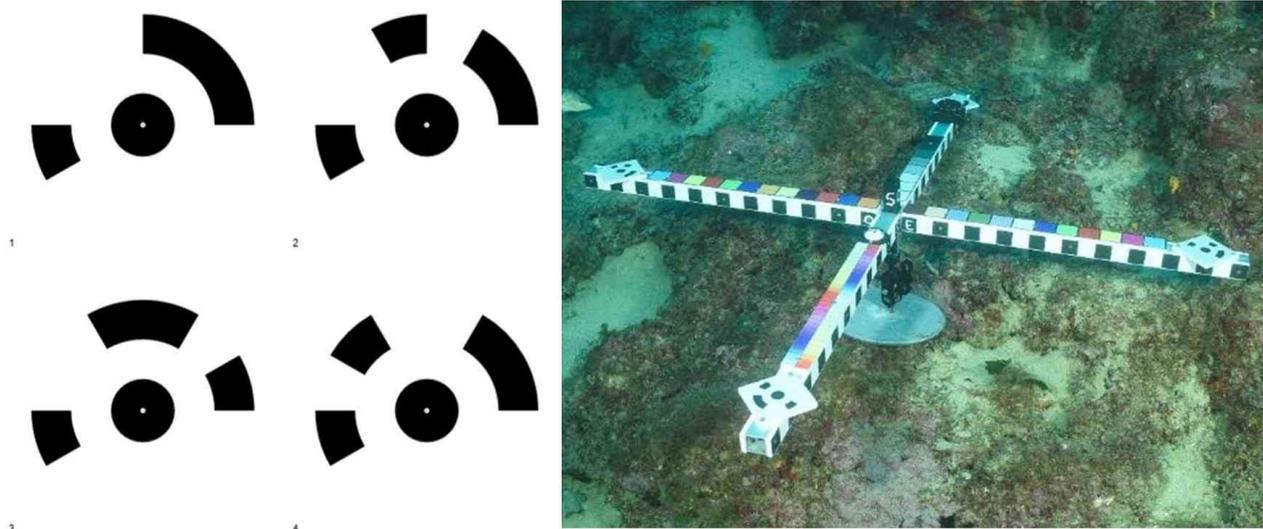


Figure 35 : Marqueurs codés (à gauche) et mire photogrammétrique (à droite) permettant de mettre à l'échelle (90cm entre les marqueurs Est-Ouest et Nord-Sud) et orienter les modèles. Source : Andromède Océanologie.

2.3.1.2. Utilisation de repères fixes

Dans le cadre d'un suivi de l'évolution des éléments d'intérêt de la zone cartographiée (biocénoses marines, déchets, érosion ou colonisation d'une structure artificielle), il peut ne pas être nécessaire de géoréférencer les données acquises, mais simplement d'être en mesure de positionner précisément différentes acquisitions entre elles : on parle de positionnement relatif. Le principe est de disposer d'un réseau de balises permanentes sur le fond (au moins trois), servant de repères fixes pour aligner les différents modèles entre eux. Les repères n'ont pas la nécessité d'être de grande taille, un balisage de type borne de géomètre est suffisant. Ces balises seront ensuite pointées sur les images lors du traitement informatique, et permettront d'aligner très précisément les productions entre elles.

Plusieurs techniques existent pour géoréférencer le positionnement de chaque balise. La précision varie entre plusieurs mètres et quelques dizaines de centimètres selon la technique et le matériel employé (voir [Géoréférencement indirect](#)).

Le positionnement relatif sans géoréférencement précis nécessite peu de moyens matériels spécifiques et est adapté pour des suivis se concentrant sur l'évolution de limites (comme dans le cas des herbiers marins) ou sur l'aspect et les volumes d'une structure (inspection d'infrastructures sous-marines, modélisation de petites colonies de corail). En revanche, le positionnement relatif sans géoréférencement ne permet pas de déterminer la position absolue des éléments numérisés dans l'espace et n'est donc pas adaptée à la cartographie des biocénoses par exemple.

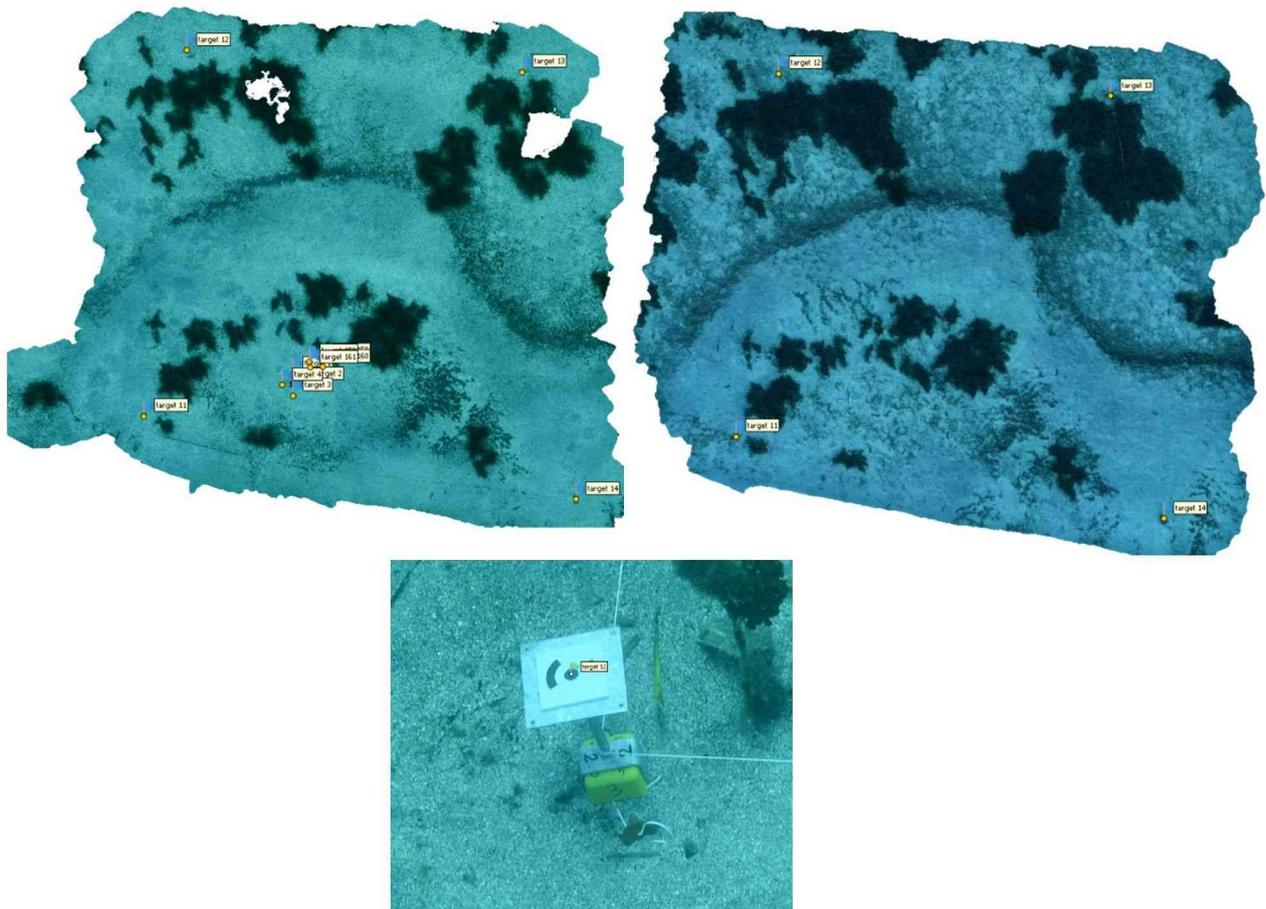


Figure 36 : Modèles de la limite inférieure d'herbier sur le site de Cap Sicié Ouest (TEMPO, Andromède Océanologie) en 2018 (à gauche) et 2021 (à droite), alignés grâce aux quatre bornes coiffées d'un marqueur codé unique (en bas).
Source : Andromède Océanologie.

2.3.2. Géoréférencement direct

Le géoréférencement direct désigne l'ensemble des techniques permettant d'enregistrer les coordonnées géographiques de chaque prise de vue en temps réel. C'est typiquement le cas lors d'acquisitions photogrammétriques réalisées avec un drone aérien : la position GPS du drone est enregistrée directement dans les métadonnées de chaque image au moment du déclenchement. En photogrammétrie sous-marine, cette technique ne peut être employée que lors d'acquisitions photographiques depuis la surface (voir [Depuis la surface](#)). Le principe de fonctionnement est alors le même que celui du drone aérien : un GPS, placé sur la partie en surface du système flottant, est relié et synchronisé avec un APN en caisson ([Figure 37](#)) fixé sur la partie immergée de la plateforme (Abadie et al., 2018a).

La précision de cette méthode de géoréférencement dépend majoritairement de l'équipement de positionnement utilisé. Un GPS classique fournira une précision métrique, tandis qu'un GNSS RTK muni d'une base fixe à terre procurera une

précision centimétrique au géoréférencement des photographies. Cette technique est actuellement celle qui bénéficie de la meilleure précision de géoréférencement des produits photogrammétriques. Le géoréférencement direct est la solution la plus efficace et la plus précise dans le cadre de levés photogrammétriques à grande échelle à faible profondeur.

2.3.3. Géoréférencement indirect

Le géoréférencement indirect consiste à positionner les photographies et les produits photogrammétriques en utilisant d'autres types de données disposant d'un géoréférencement direct. Deux solutions utilisant l'acoustique sous-marine active existent actuellement :

- la superposition de nuages de points photogrammétrique avec un second issu de données bathymétriques acquises avec un sondeur multifaisceaux ;

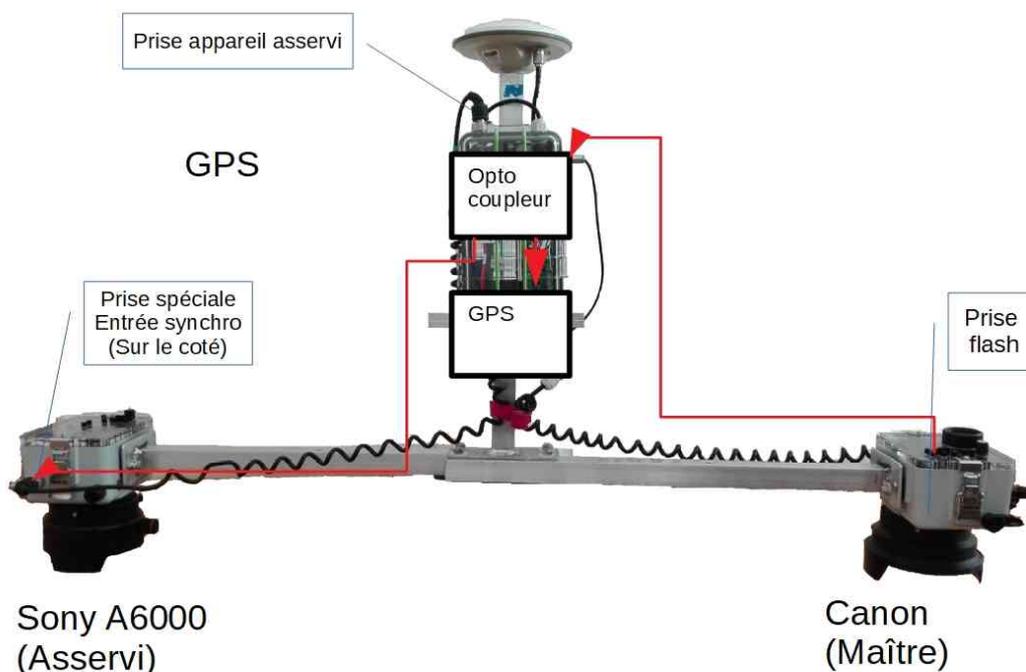


Figure 37 : Exemple de support de l'antenne GPS, du GNSS RTK et des deux appareils photo synchronisés fixés à une plateforme flottante en surface. Source : Seaviews.

- le géoréférencement de cibles acoustiques dans la colonne d'eau à l'aide d'un sondeur multifaisceaux et qui sont visibles sur la photogrammétrie.

Une autre technique de géoréférencement indirect consiste à relever les coordonnées de cibles physiques placées sur la zone d'étude avec une canne topographique munie d'un GNSS RTK (Balletti et al., 2015). Le levé photogrammétrique est réalisé par un drone aérien disposant d'un moyen de géoréférencement direct des photographies. L'utilisation de cette méthode se limite cependant à des sites à très faible profondeur (moins de 2 m) comme les récifs-barrière de posidonie.

2.3.3.1. Superposition de nuages de points

Cette méthode nécessite au préalable l'acquisition de données bathymétriques sur la zone d'étude avec un sondeur multifaisceaux permettant un levé exhaustif du fond. L'emploi d'un sondeur multifaisceaux assure notamment une importante densité de points et une précision de positionnement centimétrique. Un nuage de points géoréférencé est ainsi obtenu à l'issue de ce levé permettant de générer un MNT de la zone d'étude. Ce MNT sert de référence pour géoréférencer le nuage de points de la même zone issu de la photogrammétrie. Pour ce faire, il est possible

d'utiliser un algorithme permettant de superposer les deux nuages de points en minimisant les déformations géométriques (Abadie et al., 2018a). Un nuage de points photogrammétrique géoréférencé est ainsi obtenu (Figure 38), permettant de géoréférencer les autres productions comme le modèle 3D, le MNT et l'orthophotographie. La précision de géoréférencement de cette méthode est de l'ordre du mètre au décimètre.

2.3.3.2. Utilisation de cibles acoustiques

Cette technique de géoréférencement utilise la capacité de certains sondeur multifaisceaux à fournir une imagerie acoustique de la colonne d'eau. Ainsi, les objets ou les organismes contenant du gaz constituent des cibles acoustiques détectables sur les images acoustiques. Dans le cadre de levés photogrammétriques, il est possible de placer des cibles acoustiques dans la colonne d'eau en utilisant des parachutes de plongée, ces derniers étant gonflés sous l'eau et reliés à un lest déposé sur le fond (Figure 39a). Grâce au positionnement des parachutes dans la colonne d'eau avec l'imagerie du sondeur multifaisceaux (Figure 39b) il est alors possible de géoréférencer chacun des lests. Ces derniers sont ensuite repérés sur les photographies lors du traitement photogrammétrique et leurs coordonnées géographiques sont renseignées, permettant de géoréférencer les productions (modèles 3D, MNT, orthophotographies). La précision de cette méthode de géoréférencement est de l'ordre du décimètre.

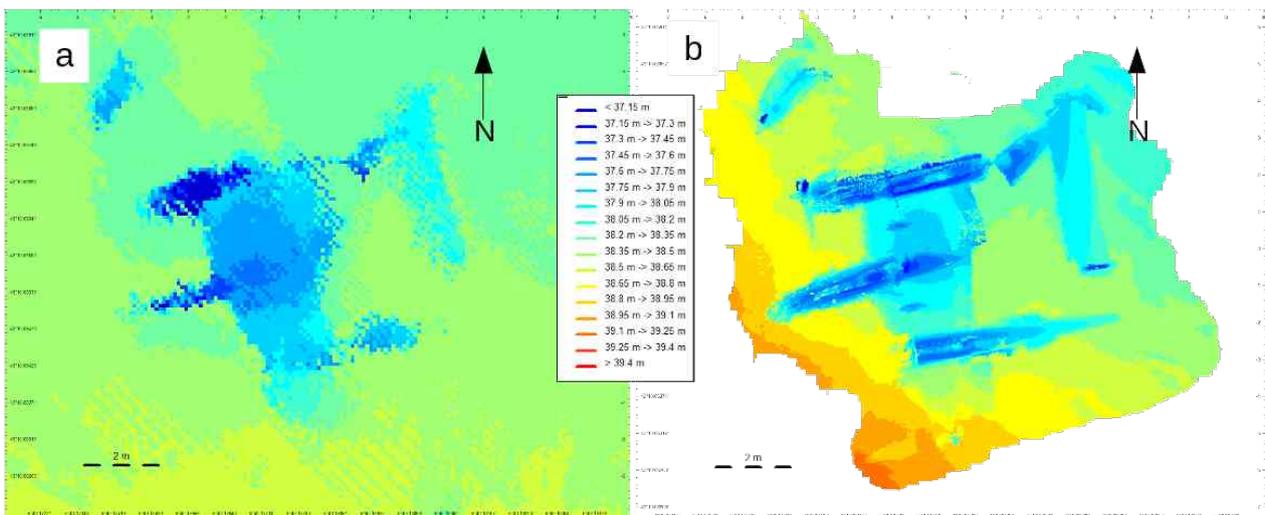
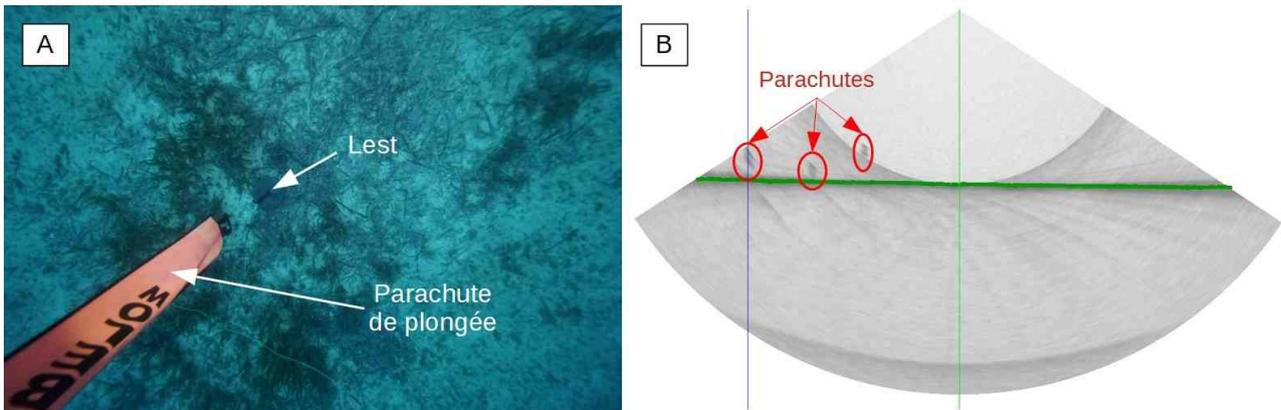


Figure 38 : Exemple de géoréférencement d'un MNT photogrammétrique d'une épave d'avion (à droite) à partir d'un MNT issu de données bathymétrique d'un sondeur multifaisceaux (à gauche). Source : Abadie et al. (2018).



2.3.4. Positionnement acoustique

Le positionnement acoustique permet de déterminer la position de l'appareil photo relativement à des repères en utilisant le temps de trajet d'ondes acoustiques entre le système mobile et les repères. Quatre systèmes reposant sur le même principe existent :

- **LBL (Long-baseline)** : des transpondeurs acoustiques sont placés sur le fond aux quatre coins de la zone d'étude (*baseline stations* en anglais) tandis qu'un plongeur ou un ROV est équipé d'un interrogateur qui émet un signal acoustique qui est perçu par les transducteurs. La position relative de l'objet en mouvement est ainsi calculée à partir de la position statique des bases et du temps de parcours de l'onde acoustique. Pour disposer de coordonnées géographiques dans un système global, il est nécessaire de géoréférencer chaque transducteur au moment de leur déploiement. La précision de positionnement relatif est de l'ordre du mètre à celui du décimètre. La précision finale du géoréférencement dépendra de la qualité du matériel GPS employé.
- **SBL (Short-baseline)** : ce système est constitué d'au moins trois transpondeurs acoustiques reliés physiquement par un câble et fixés sur un navire de surface. Ce système permet de connaître la position d'un engin équipé d'un interrogateur par rapport au navire par triangulation. Il est le plus souvent utilisé pour des ROV ou des sous-marins. La précision de

positionnement relatif est similaire à celle du système LBL, c'est à dire au mieux décimétrique. La précision finale du géoréférencement dépendra de la qualité du matériel GPS utilisé pour positionner le navire.

- **USBL (Ultra-short-baseline)** : un unique transducteur est fixé à un navire en surface. Contrairement aux systèmes LBL et SBL, le calcul de la position est réalisé sur une unique distance en prenant en compte la direction du signal. Ce système est beaucoup moins précis que le LBL et le SBL, avec une précision métrique.
- **GIB (GPS intelligent buoys)** : ce système fonctionne sur le même principe que le LBL, à la différence près que les références sont ici des bouées de surface. Ces dernières maintiennent leur position de manière précise grâce à un système GPS performant et des propulseurs (positionnement dynamique) La position de l'objet en mouvement est calculée en surface par les bouées avec une précision décimétrique.

Parmi ces systèmes, seul le USBL est actuellement utilisée en photogrammétrie par ROV sur des sites archéologiques (Drap et al., 2008). Les autres systèmes, plus récent et plus onéreux, peuvent cependant être utilisés pour positionner un ROV ou un AUV.

2.3.5. Comparatif des techniques de positionnement

Les techniques de positionnement et de géoréférencement des données photogrammétriques ne sont pas équivalentes en termes de précision, de coût, de matériel employé et de la portée (Tableau 3). Le principal facteur limitant la précision de positionnement est la profondeur du site d'étude. Plus ce dernier sera profond, moins le positionnement sera précis et plus il sera coûteux.

Tableau 3 : Caractéristiques des différentes techniques de géoréférencement des données photogrammétriques.

	Technique	Précision de géoréférencement	Prof. max	Coût
Positionnement relatif	Mise à l'échelle	-	Pas de limite	Négligeable
	Utilisation de repères fixes	-	Pas de limite	€
	Géoréférencement direct	Centimétrique	Environ 15 m	€
Géoréférencement indirect	Superposition de nuages de points	De décimétrique à métrique	Environ 100 m	€€
	Utilisation de cibles acoustiques	Décimétrique	Environ 100 m	€€
Positionnement acoustique	LBL	De décimétrique à métrique	Pas de limite	€€€€
	SBL	De décimétrique à métrique	Pas de limite	€€€
	USBL	Métrique	Pas de limite	€€€
	GIB	Métrique	Pas de limite	€€€

Chapitre 3

Traitement des données

Une fois les données de positionnement et les photographies obtenues, l'étape suivante consiste à suivre une chaîne de traitements menant à la génération des produits photogrammétriques. Chaque étape du processus est primordiale mais aucun traitement ne permettra de «sauver» une mauvaise acquisition des données.

3.1. Données de positionnement

Le type et la quantité de traitement des données de positionnement varie selon la technique et le matériel de géoréférencement utilisé :

- aucun traitement n'est nécessaire lorsqu'il n'y a pas de géoréférencement ;
- aucun traitement n'est possible lorsqu'un GPS dit classique (sans enregistrement des observations satellitaires) est employé ;
- aucun traitement n'est nécessaire lorsqu'un système de positionnement RTK est employé car, par nature, sa position est corrigée grâce à l'analyse en temps réel de l'erreur de positionnement d'un réseau de balises fixes de position absolue précisément connue ;
- un post-traitement des données est nécessaire lorsque le système de positionnement ne dispose pas de corrections transmises en temps réel (Figure 41). Il est alors nécessaire de disposer de données d'une base fixe à terre (grâce au système RGP de l'IGN par exemple)

pour recalculer la position du système en déplacement (rover). Ce post-traitement permet d'améliorer la qualité des données et d'obtenir une précision de positionnement centimétrique.

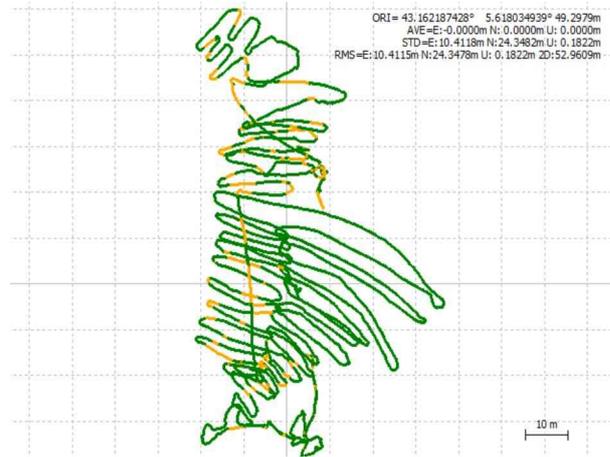


Figure 41 : Visualisation du résultat du post-traitement de données GPS. Les points en vert ont une précision de positionnement maximale tandis que ceux en en jaune indiquent une moins bonne qualité. Ici plus de 85 % des données ont une précision de positionnement optimale.

Lorsqu'un GPS est synchronisé avec un APN, les données de positionnement doivent être attribuées à chaque photographie. Pour cela les données GPS et les clichés sont appariés en utilisant l'heure. Cette technique de fusion des données requiert bien évidemment un réglage précis de l'heure sur l'APN afin de correspondre au temps GPS. De plus, la précision de mesure du temps de l'APN jouera fortement sur la facilité à synchroniser les deux jeux de données. Lorsqu'un décalage de temps est constaté entre les photos et le GPS il est alors nécessaire d'appliquer un offset aux heures des clichés pour les synchroniser avec

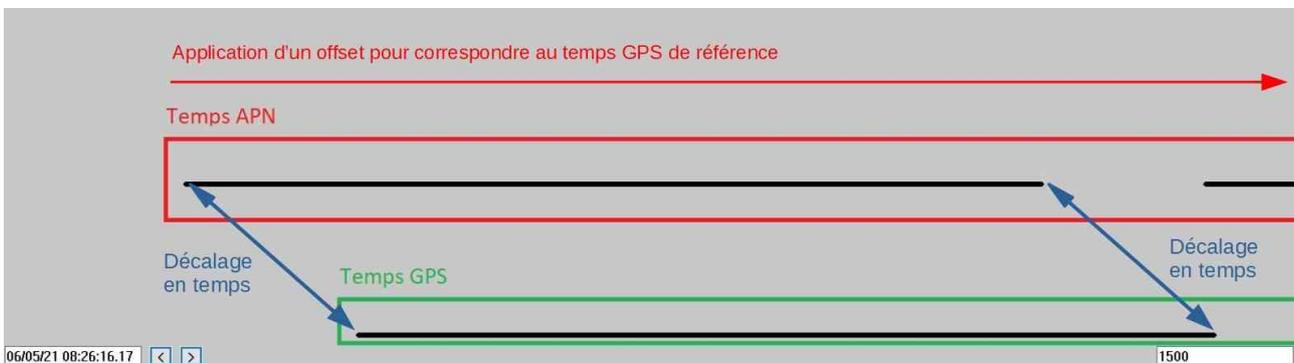


Figure 40 : Principe de synchronisation des photographies (APN) et des données de positionnement (GPS) en utilisant l'heure. Source : Seaviews.

le temps GPS (Figure 40). Une fois les positions attribuées aux clichés, les données de positionnement peuvent être directement enregistrées dans les EXIF des photographies pour être lues par les logiciels de traitements photogrammétriques.

5. Construction du maillage ;
6. Application d'une texture.

3.2. Chaîne de traitement des images

La chaîne de traitement photogrammétrique des images ne varie pas quel que soit le logiciel employé. L'ensemble du processus photogrammétrique suit un enchaînement de traitements numériques pour passer des images 2D au modèle 3D. Ce processus se déroule en six étapes (Figure 42) :

1. Détection des points remarquables (*keypoints*) ;
2. Détection des points homologues (*tie points*) ;
3. Génération du nuage de points par aéro-triangulation ;
4. Densification du nuage de points ;

3.2.1. Points remarquables

La photogrammétrie se base sur la reconnaissance de points remarquables sur les photographies (Figure 43). Ces points remarquables (*keypoints* en anglais) correspondent à des ensembles de pixels ayant des caractéristiques uniques comme un fort contraste (changement de couleur important) ou une texture particulière. Les caractéristiques de chaque point remarquable doivent en faire un élément unique reconnaissable d'une photographie à une autre.

L'ensemble des images est d'abord traité à l'aide d'un filtre afin de détecter un grand nombre de points d'intérêt sur l'image, i.e. des candidats susceptibles d'être reconnus entre deux images. Ces points clés se distinguent du reste de l'image par leur singularité : ils doivent être différents de leur voisinage, leur détection doit être robuste à de légères variations de luminosité et de contraste, ils doivent être invariants à

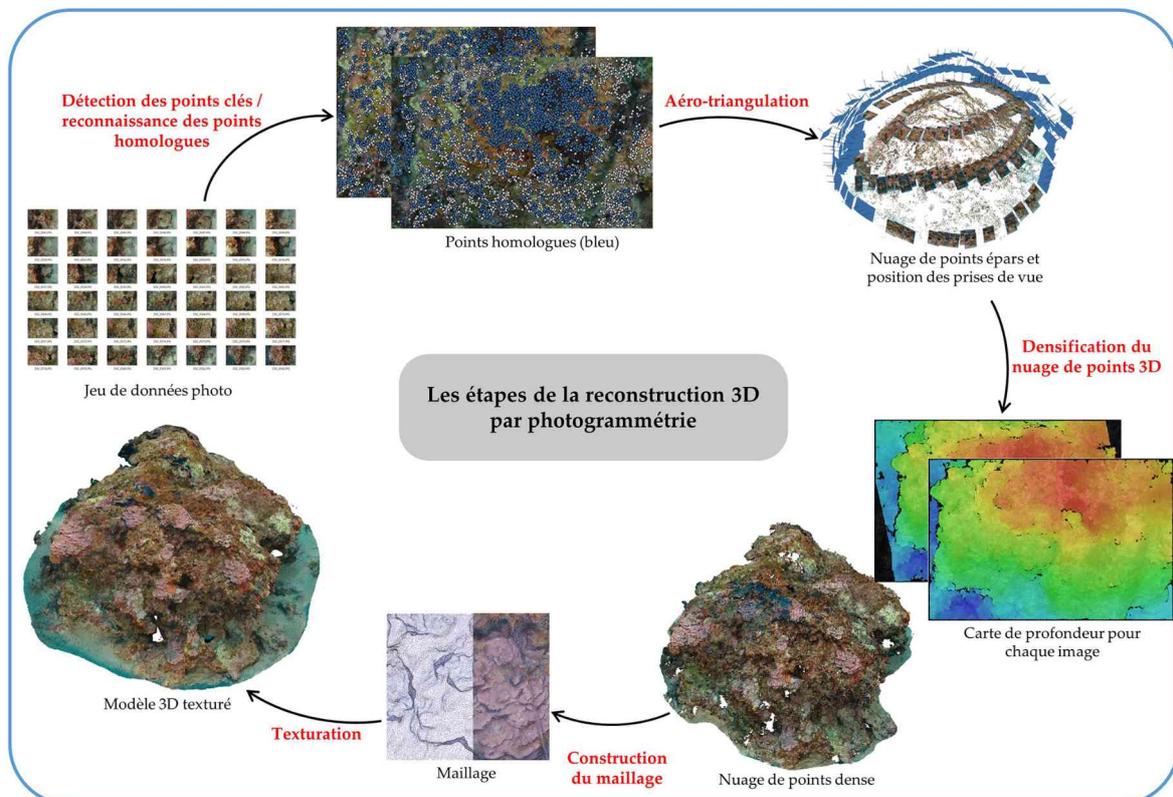


Figure 42 : Les étapes de la reconstruction 3D par photogrammétrie. Source : Marre et al., 2020.

de petites déformations géométriques, et leur détection doit être précise en X et en Y.

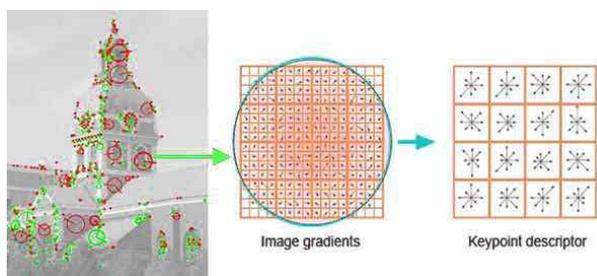


Figure 43 : Principe de détection des points remarquables sur une photographie. Source : <https://elecceleator.com/>.

La première étape consiste donc à utiliser un algorithme de détection de ces points sur chaque photographie. L'algorithme le plus utilisé est le SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) développé par David Lowe (Lowe, 1999) et se démarque des autres par sa robustesse lorsque le jeu d'images comprend des rotations ainsi que des variations d'échelle et de perspective. Un certain nombre de points clés sont détectés sur chaque image, en fonction de la texture de l'image (un mur blanc ne contiendra pas ou peu de points, une surface avec une texture riche et nette en

contiendra davantage) avec chacun leur vecteur de descripteurs locaux associés.

3.2.2. Points homologues

La seconde étape concerne la détection des points homologues sur les photographies. Les caractéristiques propres à chaque point sont recherchées sur les images par des algorithmes. Les points remarquables se retrouvant sur au moins deux photographies sont appelés points homologues ou points de liaison (*tie points* en anglais) (Figure 44).

Il s'agit de réussir à associer les points homologues entre les images en commettant le moins d'erreurs possible, car la précision de la reconstruction 3D en dépend. Pour ce faire, l'algorithme calcule les différences entre les vecteurs de descripteurs de l'ensemble des images (d'où le temps d'alignement exponentiel avec le nombre d'images) et associe les points dont les descripteurs sont les plus semblables (ceux dont la différence est faible).

C'est la phase la plus longue du processus de traitement photogrammétrique. Sa durée varie grandement en fonction de la présence ou de l'absence de données de positionnement. La position relative de

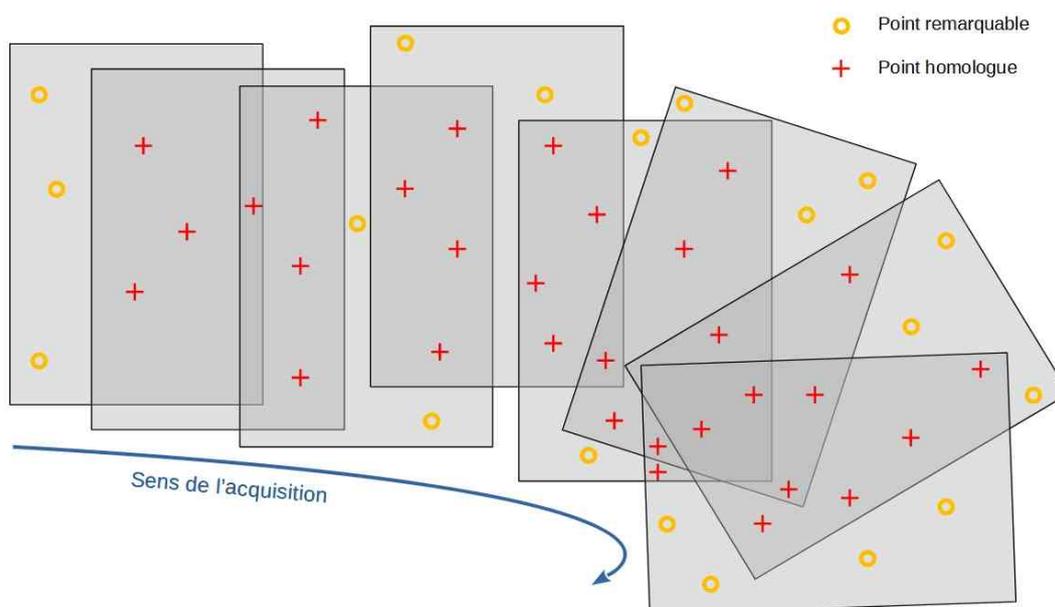


Figure 44 : Principe de superposition des photographies et des points homologues.

chaque photographie permet ainsi de comparer les images entre elles seulement si elles sont situées à proximité. Dans le cas où aucune indication sur la position des clichés n'est disponible, chaque photo sera comparée à l'ensemble du jeu d'images. Le temps de traitement augmente ainsi de façon exponentielle avec le nombre de photographies.

A titre indicatif, pour un jeu de 5 000 photographies sans données de positionnement, la phase de détection des points homologues prendra plusieurs jours. La vitesse de traitement dépend fortement de la puissance de calcul de l'ordinateur utilisé.

3.2.3. Le nuage de points et sa densification

L'aérotriangulation correspond au problème de positionnement des points 3D visibles sur une séquence d'images, et à l'estimation des paramètres internes (paramètres de calibration optique de l'appareil photo) et externes (positionnement et rotation des prises de vue). Dans le cas d'une reconstruction à partir de plusieurs images (généralement un grand nombre d'images N), la méthode utilisée est le « *bundle adjustment* ». Cette méthode permet de simultanément estimer la position et rotation des images ainsi que les positions 3D des points observés, en minimisant l'erreur de reprojection de l'ensemble des points 3D et des images par une approche des moindres carrés (Förstner & Wrobel, 2016). Les inconnues de cette équation sont :

- la localisations XYZ des points 3D ($3 \times K$ (points) paramètres) ;
- le facteur d'échelle (1 paramètre) ;
- les paramètres externes de chaque image (coordonnées XYZ + 3 angles de rotation = 6 paramètres) ;
- les paramètres internes linéaires de l'appareil photo (appareil photo et réglages identiques pour tout le jeu de données) :
 - F : distance focale réelle du système optique ;
 - c_x, c_y : coordonnées d'intersection de l'axe optique principal avec le centre du capteur ;

- b_1, b_2 : coefficients d'affinité et de cisaillement (i.e. correction de la non-uniformité des échelles sur les axes X et Y) ;
- les paramètres internes non linéaires (généralement négligés dans un premier temps) :
 - k_1, k_2, k_3, k_4 : coefficients de distorsion radiale ;
 - p_1, p_2, p_3, p_4 : coefficients de distorsion tangentielle.

A ce stade de la reconstruction, le nuage de points 3D produit par la reconnaissance de points homologues et le *bundle adjustment* est très peu dense (*sparse point cloud* en anglais), car seuls les points saillants qui se distinguent de leur voisinage sur les images ont été détectés comme points d'intérêt et associés entre les images. Pour produire un nuage de points dense, capturant un maximum de détail de la scène 3D reconstruite, il est nécessaire d'associer autant que faire se peut chaque pixel d'une image à un pixel d'une autre image (ou de plusieurs images) pour déterminer la position du point 3D correspondant.

Afin de réduire l'espace de recherche des points homologues pour chaque pixel, les algorithmes utilisent la « contrainte épipolaire » (Förstner & Wrobel, 2016) : à partir de la position relative de deux images, il est possible de définir pour chaque pixel d'une image la ligne épipolaire contenant les seules positions possibles du pixel homologue sur l'autre image. Cela permet de réduire l'espace de recherche à une seule dimension et accélère grandement les calculs. L'association des pixels homologues est faite sur la base de descripteurs locaux, de manière similaire à la détection des points homologues durant la phase initiale de la reconstruction.

Pour chaque pixel de chaque image, la distance à l'objet est calculée à partir des associations précédemment faites et de l'orientation relative des images. Il en résulte une carte de profondeur (distance à l'objet en chaque pixel) pour chaque image (Figure 45), à partir desquelles il est possible de déterminer les coordonnées 3D de l'ensemble des pixels pour construire le nuage de points dense (Figure 46). Le résultat est généralement bruité par de mauvaises associations ou de légères erreurs de positionnement, mais des algorithmes permettent de filtrer les points isolés ayant de grandes chances d'être des artefacts de reconstruction.

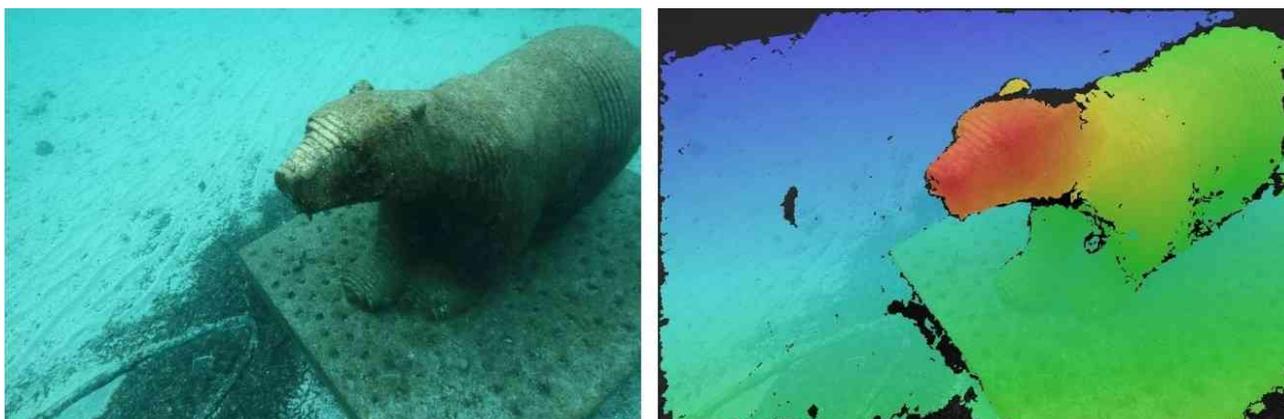


Figure 45 : Carte de profondeur sur une photo de sculpture sous-marine. Les zones les plus proches de l'objectif sont en rouge tandis que les plus éloignées sont en bleu. Source : Sea(e)scape/Arnaud Abadie.

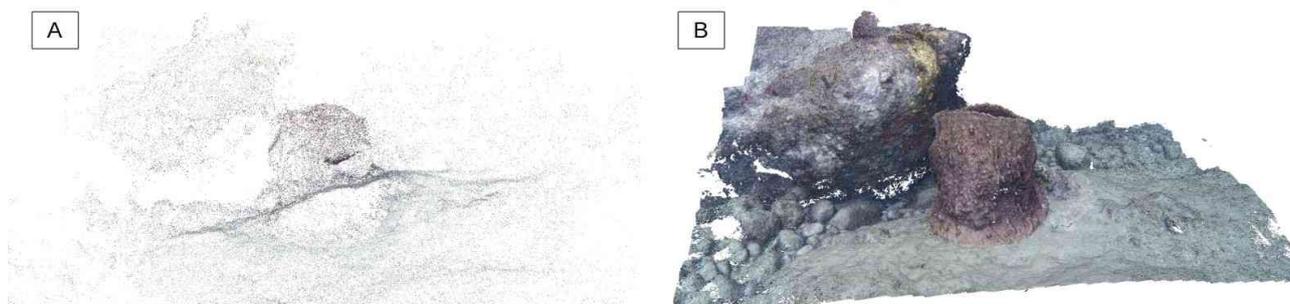


Figure 46 : Comparaison entre le A) le nuage épars (73 000 points) et B) le nuage dense (25 600 000 points) d'une éponge en Guadeloupe. Source : Seaviews.

3.2.4. MNT et modèle 3D

Le modèle numérique de terrain (MNT ou *Digital Elevation Model*, DEM en anglais) peut être généré à partir du nuage de points épars, du nuage dense, des cartes de profondeurs ou encore du modèle



Figure 47 : Exemple de MNT haute résolution d'une portion d'herbier de posidonies au pied d'une digue portuaire.

3D (Figure 47). La résolution du MNT (taille d'un pixel de la carte produite) dépend du niveau de détail de l'information en entrée : il sera très détaillé à partir du nuage dense ou des cartes de profondeurs, et sera beaucoup moins résolu à partir du nuage épars. Lorsque le nuage de points (épars ou dense) dispose de coordonnées géographiques et d'élévation (X,Y,Z), il est possible d'obtenir un MNT géoréférencé.

Le modèle 3D est créé à partir du nuage de points dense afin d'obtenir les plus de détails possibles. Il est drapé par une surface 3D (i.e. maillage ou « mesh ») sur laquelle pourra être projetée la texture issue des images. L'objectif est de définir une surface 3D continue qui passe au plus proche de l'ensemble des points du nuage de points dense, en reproduisant le plus fidèlement les détails de la scène sans conserver les petits artefacts de reconstruction du nuage de points dense. Plusieurs algorithmes existent, mais le plus connu et utilisé est certainement l'algorithme de reconstruction de surface de Poisson (Kazhdan et al., 2006). Le maillage ainsi produit est constitué de faces et

de sommets qui interconnectent les faces entre elles. Les faces sont généralement triangulaires mais il est aussi possible de définir des faces quadratiques (parallélépipèdes).

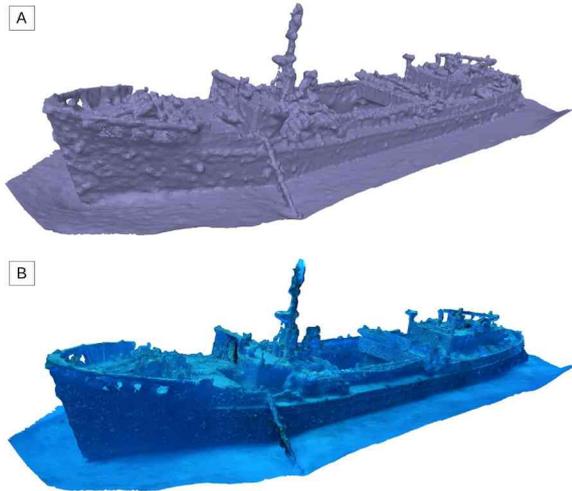


Figure 48 : Modèle 3D de l'épave du Franjack en Guadeloupe A) sans textures ; B) photo-texturé.
Source : Seaviews.

Le maillage se présente à l'origine sans textures ni couleurs mais il est possible d'extraire la couleur moyenne pour chaque sommet. Pour « habiller » le modèle 3D ce sont les photographies qui sont

utilisées pour draper chaque surface. Le modèle 3D est alors dit « photo-texturé » (Figure 48). La texture correspond aux motifs observés sur une surface et due aux variations de structure et de couleur dans un voisinage restreint. Cette apparence de l'objet est le résultat des propriétés de réflexion du matériau ainsi que des caractéristiques géométriques locales de la surface. Si cette étape n'est pas indispensable au processus de reconstruction 3D, l'application d'une texture au maillage permet de donner une apparence réaliste aux reconstructions 3D et de mieux visualiser l'objet reconstruit. Il existe plusieurs manières de procéder, mais bien souvent la texture associée à chaque face du maillage est extraite de l'image qui la représente le mieux (i.e. l'image la plus orthogonale à la face, la plus proche, la mieux exposée, etc.).

3.2.5. Mosaïque d'orthophotographies

Une orthophotographie est une image unique de l'ensemble de la zone numérisée, rectifiée géométriquement et égalisée radiométriquement (Figure 49). L'égalisation radiométrique est en général à destination de photographies satellitaires que les caractéristiques de l'atmosphère traversée par la lumière peuvent déformer.

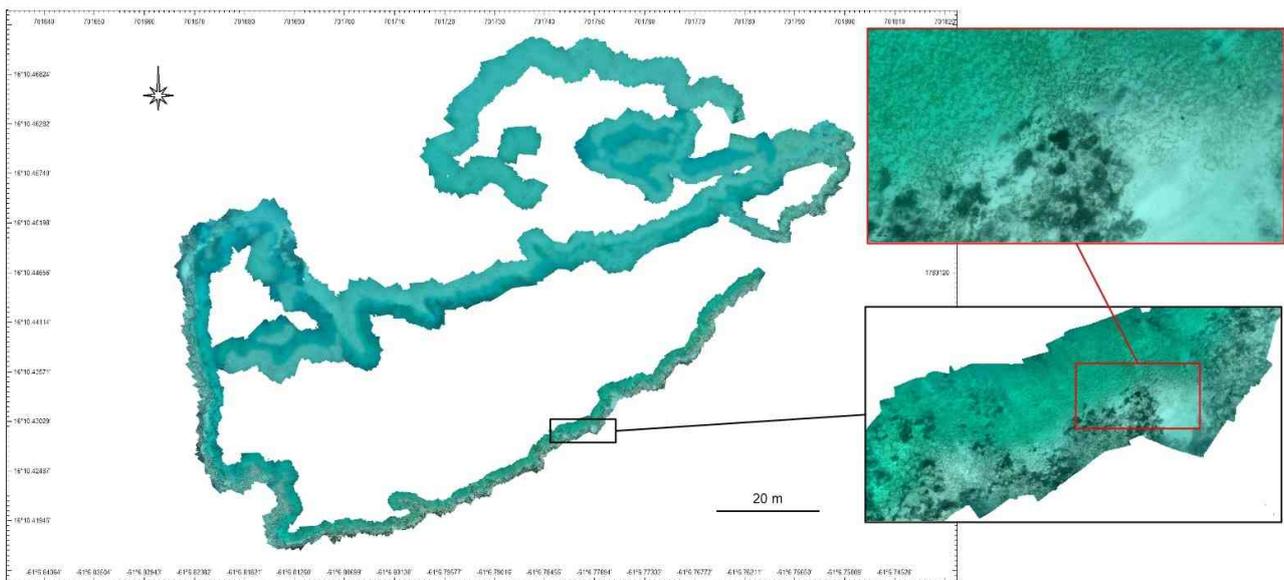


Figure 49 : Exemple d'une orthophotographie d'herbiers tropicaux en Guadeloupe avec différents niveaux de zoom.
Source : Seaviews.

En photogrammétrie sous-marine, ce qui s'apparente à des corrections radiométriques est le fait d'égaliser l'exposition et le contraste entre toutes les photographies pour obtenir un rendu homogène de l'orthophotographie.

L'orthophotographie est produite à partir du modèle 3D dont la structure en trois dimensions permet de calculer les corrections géométriques à appliquer aux images brutes. Si les données photogrammétriques sont géoréférencées, l'orthophotographie peut alors être directement importée dans un SIG pour cartographier la zone d'étude.

3.3. Logiciels de photogrammétrie

Une multitude de logiciels de photogrammétrie *open source* et sous licence existent avec des performances et des facilités d'utilisations variées. Il ne s'agit pas ici de dresser une liste exhaustive de ces logiciels mais plutôt de voir quel type de solutions existent et quels sont les avantages et les inconvénients de chacune. Il est également important de garder à l'esprit que la chaîne de traitement des images décrite

précédemment reste la même, bien que les algorithmes employés à chaque étape puissent varier.

3.3.1. VisualSFM/Meshlab

Il s'agit ici d'un tandem de logiciels gratuits : VisualSFM permet d'obtenir un nuage de points denses tandis que Meshlab est utilisé pour générer des modèles 3D et les texturer.

VisualSFM est un logiciel opensource développé par Changchang Wu, un ingénieur informatique de Google (Wu, 2011). Sa dernière mise à jour date de 2012. L'interface de VisualSFM permet de lancer rapidement les différentes étapes de la photogrammétrie (recherche de points remarquables et de points homologues, densification du nuage de points). Il utilise l'algorithme SIFT pour la reconnaissance de points homologues. Le nuage dense quant à lui est construit en utilisant l'algorithme CMVS (*Clustering Views for Multi-view Stereo*) développé par Yasutaka Furukawa. Une fois le nuage dense obtenu il est possible de l'exporter vers un second logiciel permettant de générer des rendus en trois dimensions.

Le second logiciel employé est Meshlab, un logiciel *open source* de traitement de maillages 3D

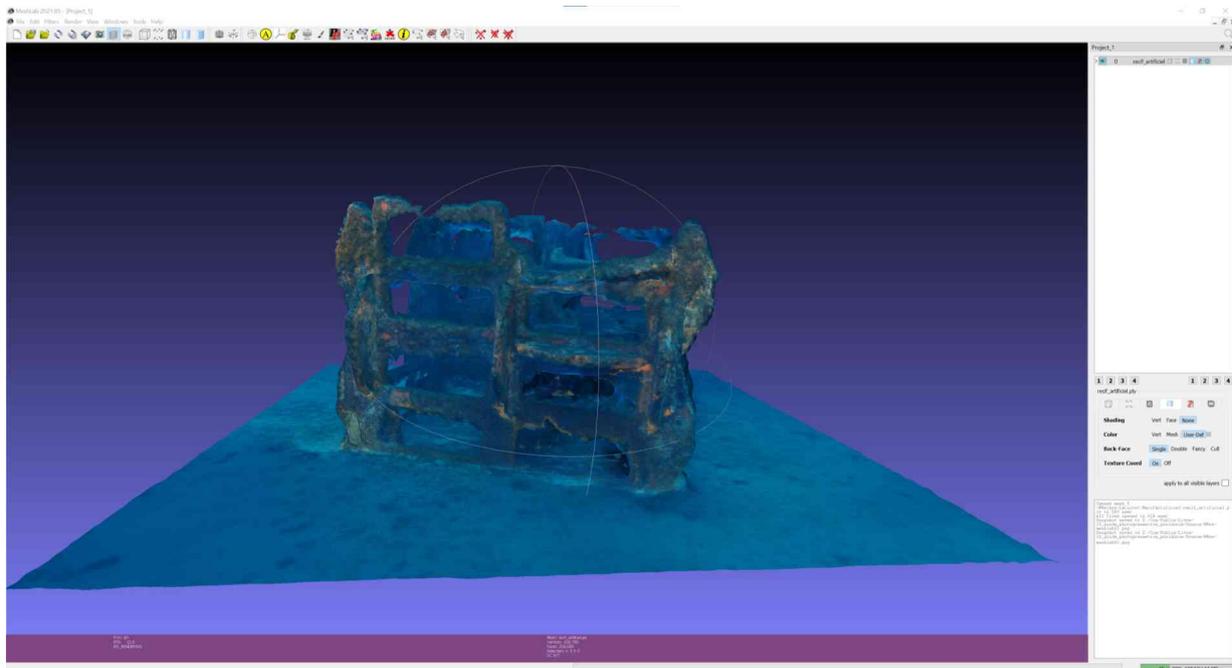


Figure 50 : L'interface de Meshlab permet de créer des modèles 3D à partir du nuage de points obtenu dans VisualSFM et de le photo-texturer avec les photographies de l'acquisition.

développé en 2005 par l'ISTI et le CNR. Il est régulièrement mis à jour depuis sa création, sa dernière version datant de mai 2021. Les différents traitements que Meshlab propose permettent de générer un modèle 3D photo-texturé (Figure 50).

Le tandem VisualSFM / Meshlab ne permet pas in-fine de générer une orthophotographie, mais le nuage de points obtenu peut être exporté et exploité par d'autres logiciels pour la générer

très spécifiques selon les thématiques abordées (urbanisme, archéologie, environnement, topographie).

MicMac dispose d'une interface graphique sommaire. La totalité des fonctions n'est accessible que par des lignes de commande. MicMac requiert également d'importantes capacité de stockage de données car les photographies sont copiées et modifiées à chaque étape de la chaîne de traitement. De plus, il est important de savoir que le traitement sera automatiquement stoppé si une photo n'est pas d'une qualité suffisante pour permettre la poursuite de l'analyse (p. ex. manque de points homologues).

3.3.2. MicMac

MicMac est une suite logicielle *open source* gratuite développée par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) et l'ENSG (Ecole Nationale des Sciences Géographiques) (Rupnik et al., 2017). Cette suite permet de réaliser l'ensemble des traitements photogrammétriques et de générer des modèles 3D photo-texturés ainsi que des orthophotographies (Figure 51). MicMac est l'un des logiciels les plus complet disponible à l'heure actuelle et dispose de nombreux modules répondant à des besoins

Initialement développé pour des levés photogrammétriques terrestres par drone, MicMac est moins adapté aux levés subaquatiques qui nécessitent un nombre beaucoup plus important d'images. L'utilisation du logiciel est plus adaptée à des experts en photogrammétrie cherchant à développer des traitements poussés qu'à des besoins de production par du personnel moins expérimenté.

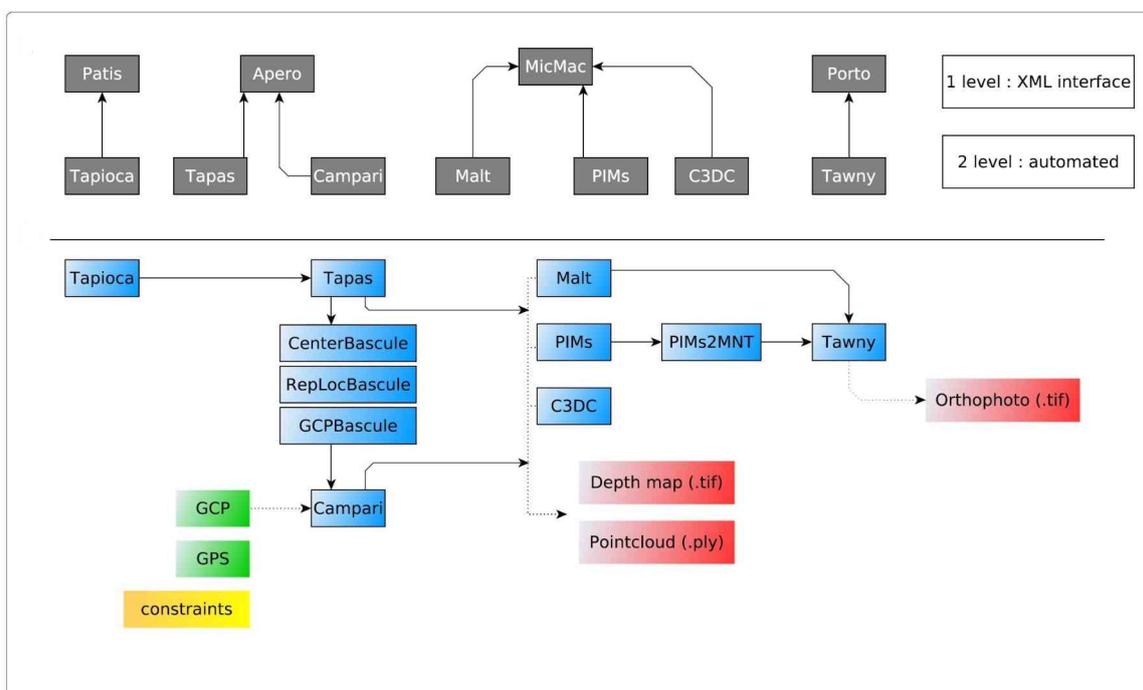


Figure 51 : Liste des principaux composants de la suite logicielle MicMac et enchaînement de leur utilisation. Source : Rupnik et al. (2017).

3.3.3. Metashape

Metashape (anciennement PhotoScan) est un logiciel payant développé par Agisoft et entièrement dédié à la photogrammétrie. Depuis sa création en 2006, le logiciel est devenu l'un des plus utilisés par les professionnels des levés photogrammétriques terrestres comme marins. Il permet de réaliser la totalité de la chaîne de traitement photogrammétrique et d'éditer les produits (orthomosaïques, modèles 3D). Une interface complète donne accès à toutes les fonctions sans avoir besoin de rentrer de lignes de commandes ([Figure 52](#)). Il est cependant possible d'accéder à l'ensemble des

Metashape poursuit la recherche de points homologues malgré les problèmes rencontrés mais fournira un nuage incomplet voire dans de rares cas erroné.

Une fois les produits photogrammétriques générés, il est possible de les exporter dans une large gamme de formats et de projections.

Metashape est particulièrement adapté au traitement des levés photogrammétriques sous-marins en permettant une analyse rapide d'une grande quantité de photographies (plusieurs centaines à plusieurs milliers). Son interface est simple et son utilisation ne nécessite pas d'expertise particulière

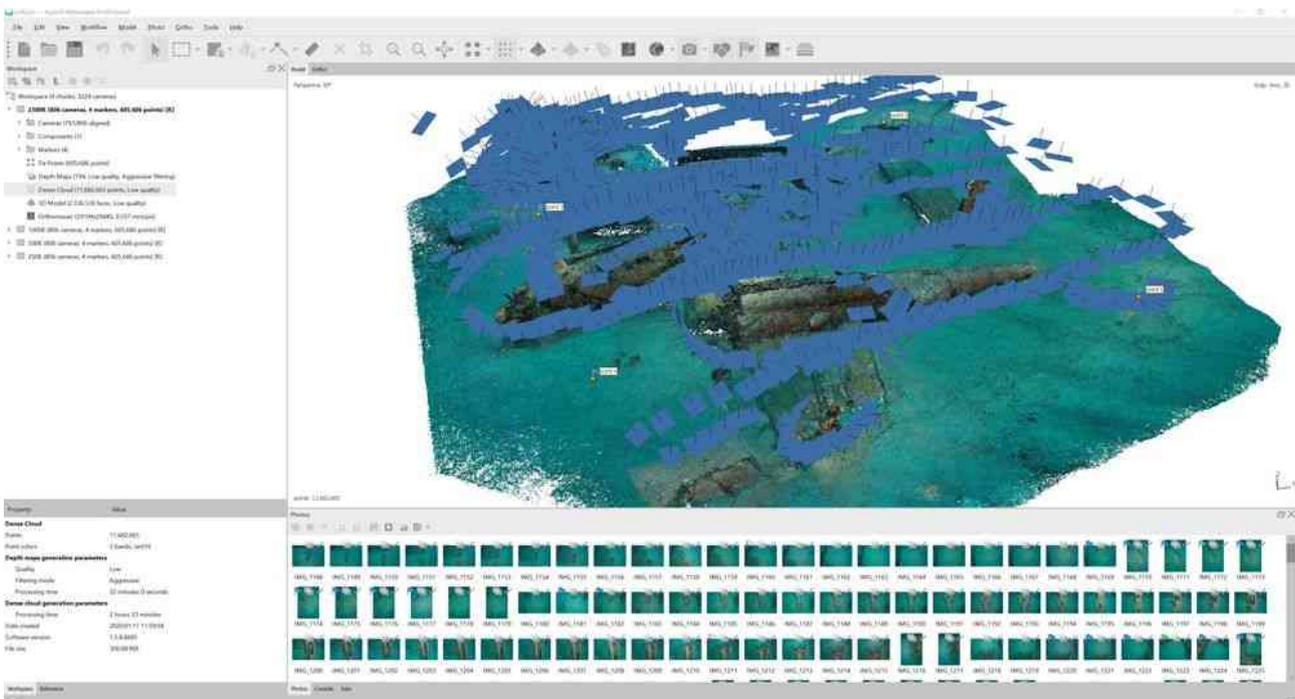


Figure 52 : L'interface de Metashape est relativement intuitive et permet à des non spécialistes de réaliser des traitements photogrammétriques et d'éditer les produits.

fonctions de Metashape en ligne de commandes grâce à une console Python incluse dans l'interface.

Metashape gère notamment l'utilisation du processeur graphique (GPU ou *Graphics Processing Unit* en anglais) de l'ordinateur et les calculs peuvent être partagés sur un réseau afin d'améliorer grandement la vitesse de calculs. Contrairement à VisualSFM qui produit plusieurs modèles en cas de discontinuité du recouvrement des photos, et à MicMac qui interrompt le calcul en cas d'irrégularité des images,

3.3.4. Autres logiciels

Si les solutions logicielles présentées précédemment sont les plus couramment utilisées en milieu marin, il existe un grand nombre d'autres logiciels gratuits ou payants dont voici une liste non exhaustive :

- Pix4D : une suite logicielle payante au mode de fonctionnement et d'interface similaire à Metashape. A la différence de ce dernier, les nombreux éléments de la suite Pix4D

permettent une analyse poussée des productions (orthomosaïques et modèles 3D) ;

- Meshroom : un logiciel opensource gratuit développé par AliceVision et permettant de générer des modèles 3D par traitement photogrammétrique. Il n'est pas possible de générer des orthomosaïques avec ce logiciel ;
- 3DF Zephyr : un logiciel payant similaire à Metashape permettant la réalisation de l'ensemble de la chaîne de traitement photogrammétrique et de générer des orthomosaïques ainsi que des modèles 3D. Une version gratuite (3DF Zephyr Free) existe à destination des débutants ou pour une utilisation personnelle qui limite à 50 le nombre de photos par projet.
- ContextCapture : un logiciel payant qui permet de reconstruire des modèles 3D à partir d'images 2D avec ou sans positionnement des prises de vue. ContextCapture a la particularité de produire des modèles pyramidaux particulièrement fluides à la visualisation, et propose également un format web pour mettre en ligne les modèles, alors accessibles depuis un simple navigateur internet.

3.4. Export des produits photogrammétriques

Chaque produit photogrammétrique dispose de plusieurs formats d'export. Le choix de ces formats dépendra des analyses et des rendus attendus. Il dépendra également des capacités d'export du ou des logiciels employés pour les traitements photogrammétriques. Les formats décrits dans ce chapitre ne sont pas les seuls utilisés mais sont les plus courants en photogrammétrie sous-marine.

3.4.1. Nuages de points et modèles 3D

Le nuage de point (qu'il soit éparsé ou dense) est principalement exporté pour générer un modèle 3D dans un autre logiciel, pour une analyse topographique lorsque les données sont géoréférencées ou bien pour

des mesures de complexité structurale (sans besoin de géoréférencement). Les formats utilisés pour exporter les nuages de points sont souvent similaires à ceux des modèles 3D. Selon l'utilisation du nuage ou du modèle 3D plusieurs formats peuvent ainsi être utilisés dont notamment :

- Wavefront OBJ (.obj) : format de fichier ouvert contenant une description géométrique 3D. Il est adopté par de nombreux logiciels 3D. Il comprend notamment les coordonnées du fichier de textures photographiques et il est accompagné par un fichier de texture au format image (p. ex. png, jpeg, tiff) ;
- Stanford Triangle Format (.ply) : fichier de stockage de données tri-dimensionnelles similaire au format Wavefront OBJ avec cependant un poids plus réduit. Le Stanford Triangle Format peut également s'accompagner d'un fichier de texture au format image dans le cas des modèles 3D ;
- XYZ Point Cloud (.xyz) : format d'export de nuages de points uniquement. Il s'agit d'un fichier texte de type ASCII sans norme spécifique avec une colonne pour chaque coordonnée spatiale. D'autres informations peuvent être ajoutées sous la forme de colonnes supplémentaires. C'est un format couramment utilisé pour la topographie et la bathymétrie ;
- Autodesk Drawing eXchange Format (.dxf) : fichier de géométrie 3D d'échange entre différents logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur). De la même manière que le format XYZ Point Cloud, le DXF se présente comme un fichier ASCII où chaque colonne représente un attribut du nuage de point ou de l'objet 3D ;
- Stéréolithographie (.stl) : fichier décrivant la géométrie des surfaces d'un objet 3D (x,y,z). Ce format est défini comme le standard pour l'impression en trois dimensions.
- Format 3MX (.3mx) : format web de ContextCapture, qui permet d'afficher des gros modèles en ligne grâce à son procédé de tuilage des modèles (résolution variable en fonction du niveau de zoom : plus l'utilisateur zoome, plus la résolution s'affine sur la zone affichée à l'écran). L'application web permettant de lire ce format peut être déployée sur n'importe quel serveur.

3.4.2. Orthophotographie

L'orthophotographie sous-marine est un produit assez délicat à exporter. En effet, le résultat des traitements photogrammétriques est une mosaïque photo du fond marin qui peut faire plusieurs centaines de milliers de pixels de côté. Se pose alors le problème du format d'export permettant de supporter une image de plusieurs dizaines de gigabits. De plus, l'orthophotographie est le plus souvent un produit géoréférencé qui nécessite une projection spécifique. Deux options d'export sont disponibles : le raster et les tuiles.

3.4.2.1. Raster

Un raster est une image géoréférencée (tiff, png, jpeg, etc.). Le géoréférencement peut figurer directement dans le fichier d'image (comme dans le cas des GeoTIFF) ou bien être fourni dans un fichier ASCII de type World (pwg, jwg, etc.). Dans le cas d'images trop lourdes pour être facilement exploitables dans un

SIG, ou dans le cas de ressources informatiques limitées, il est possible d'exporter l'orthophotographie en plusieurs fichiers pour faciliter son utilisation (Figure 53). Dans ce cas, chaque portion d'image sera accompagnée de son propre fichier de géoréférencement.

3.4.2.2. Tuiles

Afin de pallier au problème de la taille des images et de permettre un affichage rapide tout en gardant une résolution suffisante (millimétrique si nécessaire, mais centimétrique peut éventuellement suffire), il est possible d'utiliser les tuiles cartographiques. Le système des tuiles définit en amont les différents niveaux de zoom. À partir du niveau de zoom de base, l'image est fragmentée en quatre sous zones, chacune conservant la même résolution que le niveau de zoom précédent (Figure 54). Il est ainsi possible de zoomer d'une zone de plusieurs dizaines de mètres de côté à une zone de quelques centimètres de côté en gardant le même nombre de pixels affichés et sans temps de calcul superflu. En d'autres termes, les portions de l'images qui

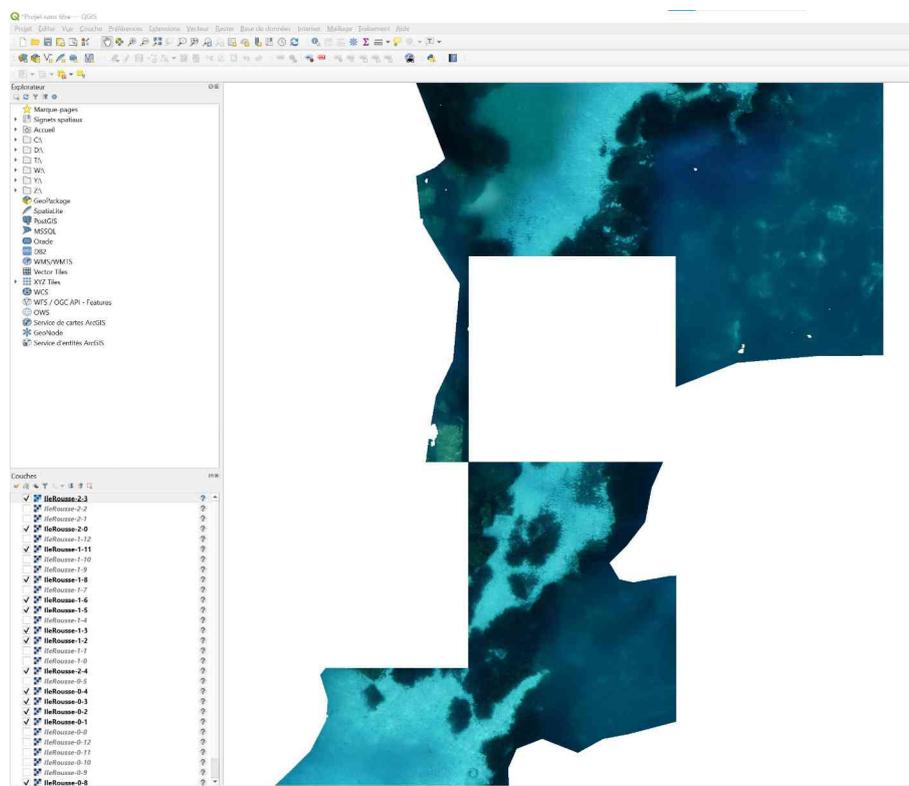


Figure 53 : Exemple d'une orthophotographie sous-marine partitionnée au format raster visualisée dans le SIG QGIS.

ne figurent pas sur l'écran ne sont pas chargées. De façon plus synthétique, le système de tuiles correspond à un niveau de précision dynamique qui dépend du niveau de zoom : plus le niveau de zoom est élevé et plus il y a de détail.

format, ainsi que de leur résolution et de la surface cartographiée (Tableau 4). Cette information doit obligatoirement être prise en compte dès lors qu'il s'agit de stocker ou d'envoyer les produits photogrammétriques et les images source.

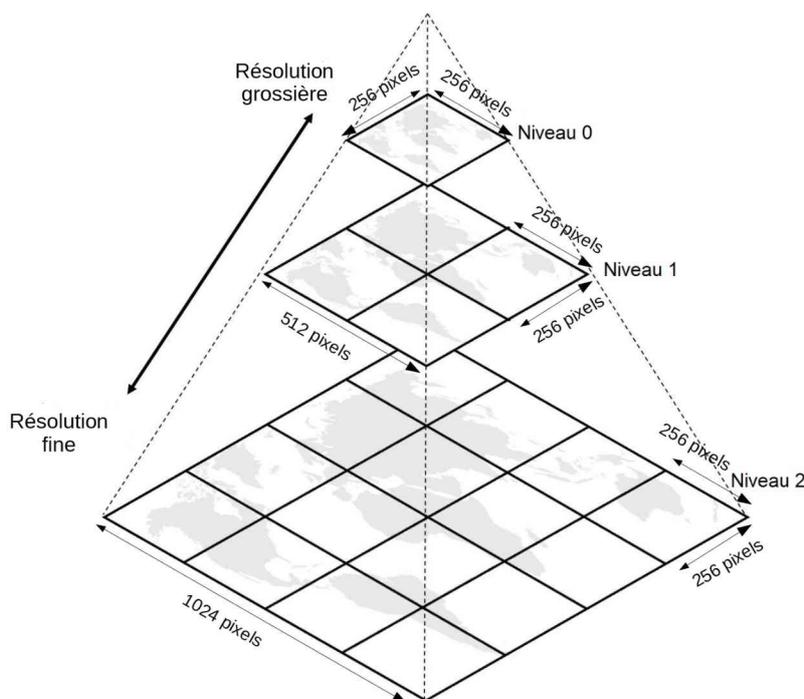


Figure 54 : Principe de fonctionnement de la pyramide des tuiles en fonction des différents niveaux de zoom et de la résolution des photos.

Les tuiles se présentent sous la forme de petits fichiers image regroupés dans des dossiers par niveau de zoom. Concrètement, pour des surfaces dépassant plusieurs milliers de mètres carrés (ou pour des images dépassant telle résolution), environ 10 à 20 niveaux de zoom sont nécessaires pour afficher une résolution millimétrique sans problèmes. Il n'existe pas de format de tuile standard, les tuiles n'étant pas un format de fichier à proprement parlé mais un groupement de fichiers organisés en dossiers qui sont parcourus selon un protocole de lecture.

Un nuage de points de résolution millimétrique avec plusieurs dizaines de millions de points peut peser plusieurs gigaoctets. La taille des fichiers peut atteindre plusieurs dizaines de gigaoctets pour les orthomosaïques les plus importantes. Les modèles 3D photo-texturés avec plusieurs millions de faces peuvent également avoir une taille de l'ordre de plusieurs gigaoctets.

Il est important de noter que la compression des fichiers pour un envoi en ligne ou sur support physique numérique (clé USB, disque dur) n'est pas pertinent lorsqu'il s'agit de fichier image au format .jpeg qui est déjà un format compressé (dans le cas des orthomosaïques et des textures de modèle 3D). Les fichiers photographiques de base quant à eux peuvent constituer plusieurs milliers de photographies ayant une taille de plusieurs mégaoctets à quelques dizaines de mégaoctets chacune. Les jeux de données sources peuvent donc avoir une taille de plusieurs centaines de gigaoctets.

3.5. Taille et stockage des produits photogrammétriques

La taille des fichiers exportés dépendra de la nature des produits photogrammétriques et de leur

Tableau 4 : Taille des fichiers des produits photogrammétriques en fonction de leur type, de leur format, de leur résolution et de la surface cartographiée. La résolution des modèles 3D est mentionnée à titre indicatif de même que la surface cartographiée. La taille des fichiers correspond à une estimation.

Type	Format	Résolution	Surface	Taille du fichier	
MNT	Raster	Centimétrique	100 m ²	100 Ko	
			1 ha	10 Mo	
		Millimétrique	100 m ²	20 Mo	
			1 ha	2 Go	
		Centimétrique	100 m ²	500 Ko	
			1 ha	50 Mo	
	.xyz	Millimétrique	100 m ²	300 Mo	
			1 ha	30 Go	
		Centimétrique	100 m ²	3 Mo	
			1 ha	300 Mo	
		Raster	Millimétrique	100 m ²	150 Mo
				1 ha	15 Go
Orthomosaïque	Tuiles	Centimétrique	100 m ²	2 Mo	
			1 ha	200 Mo	
		Millimétrique	100 m ²	130 Mo	
	.ply + texture	300 000 polygones	1 ha	13 Go	
			na	15 Mo	
		3 000 000 de polygones	na	150 Mo	
Modèle 3D photo-texturé	.obj + texture	300 000 polygones	na	30 Mo	
		3 000 000 de polygones	na	250 Mo	

Chapitre 4

Visualisation et analyse

des produits

photogrammétriques

Une fois les produits photogrammétriques générés et exportés au format requis, il est nécessaire de disposer des outils informatiques afin de pouvoir les visualiser et les analyser. Il n'est pas toujours évident de connaître l'outil adéquat pour réaliser ces différentes tâches qui requièrent parfois l'utilisation successive de plusieurs logiciels.

4.1. Lecture des produits photogrammétriques

4.1.1. Nuages de points et modèles 3D

La lecture des nuages de points et des modèles 3D se fait principalement avec des logiciels dédiés à la visualisation 3D. Certains sont gratuits (comme Meshlab, Cloudcompare, Blender et FreeCAD), tandis que d'autres sont payants (comme AutoCAD et SolidWorks). Dans les deux cas, ces logiciels permettent au minimum de visualiser les nuages de points et les modèles 3D. Certains logiciels fournissent des outils pour les éditer de façon plus ou moins poussée. Le visualiseur 3D de Windows (3Dbuilder) peut quant à lui ouvrir des modèles 3D mais, étant principalement développé pour l'impression 3D, les textures des formats OBJ et PLY ne s'affichent pas toujours correctement. Il est également possible d'utiliser le format PDF pour exporter un modèle ou un nuage de points de petite taille. Cela permet de visualiser très facilement les données avec un simple lecteur pdf. Certains fichiers de nuage de points comme le format XYZ peuvent être ouverts dans des logiciels de type SIG.

Voici une liste non exhaustive de logiciels et de plateformes de visualisation de nuages de points et de modèles 3D :

- [CloudCompare](#) : un logiciel open source permettant de visualiser et traiter des données 3D sous forme de nuages de points et de maillages 3D. Il dispose d'une palette d'outils permettant de calculer et d'extraire des informations d'un ou plusieurs nuages de points (distances point par point entre deux nuages de points, calcul de rugosité, etc.) ;

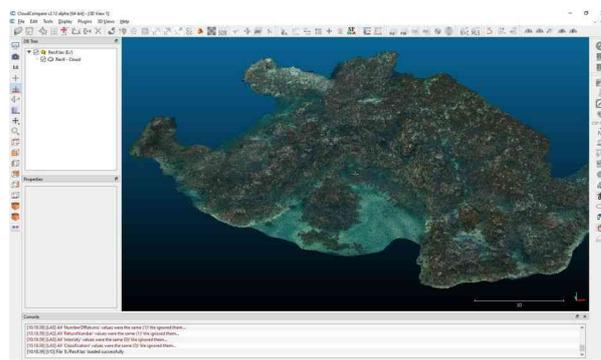


Figure 55 : Exemple de nuage de points d'un récif coralligène ouvert avec Cloud Compare. Source : Andromède Océanologie.

- [Meshlab](#) : un logiciel open source d'édition et de traitement de maillages 3D. Il permet de retoucher un maillage 3D et de corriger les aberrations géométriques pour optimiser l'affichage du modèle (voir [3.3.1 VisualSFM/Meshlab](#)) ;
- [Potree](#) : un visualiseur web de nuages de points open source, qui fonctionne sur le même principe de tuilage de résolution pour afficher dynamiquement des gros nuages de points avec une résolution dépendante du niveau de zoom. Avec des compétences informatiques en javascript / html, Potree a l'avantage de pouvoir afficher localement d'autres types de données comme des maillages 3D, des images géoréférencées, des annotations avec des liens externes, des illustrations, etc ;
- [Sketchfab](#) : la plus connue des plateformes web qui permet l'affichage et la publication de modèles 3D et nuages de points sur internet. Il est possible de charger son modèle sur la plateforme et d'y accéder par un lien URL. En revanche il faut noter que les plateformes web sont généralement payantes et limitées à des modèles de petite taille.

Dans le cas des MNT. Ces derniers peuvent être exportés sous forme de fichier raster pour une lecture plus aisée dans un SIG ([Figure 56](#)). Ce type d'export autorise les analyses du MNT grâce aux outils intégrés aux logiciels de géomatique dédiés à l'analyse d'images.

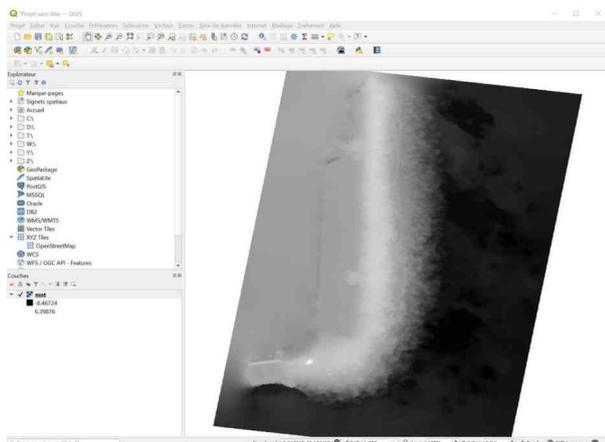


Figure 56 : Exemple de lecture du MNT au format tif de la partie submergée et terrestre d'une digue portuaire dans le logiciel QGIS. Source : Seaviews.

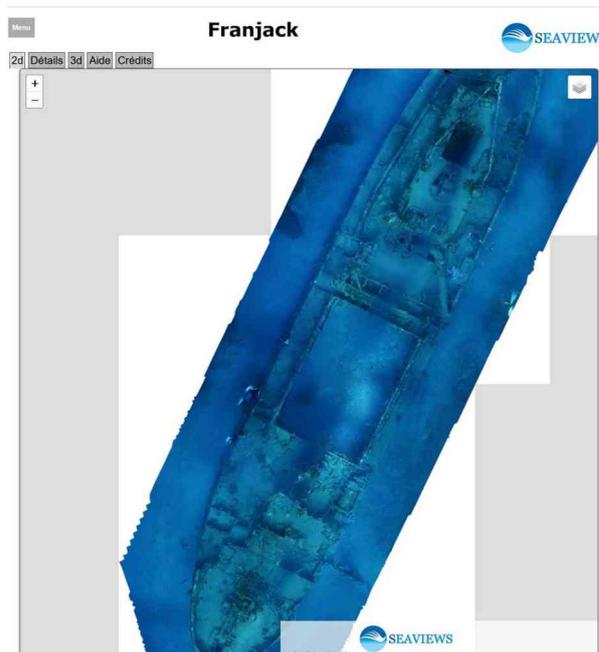


Figure 57 : Visualisation sur le site CartoSub de l'orthomosaïque sous-marine d'une épave en Guadeloupe grâce à un serveur de tuiles. Source : <https://cartosub.fr>

4.1.2. Orthophotographie

Selon le type d'export retenu pour les orthophotographies (raster ou tuiles) différentes options de visualisation sont disponibles. Les fichiers rasters peuvent être ouverts comme n'importe quelle image. Afin de bénéficier des informations de géoréférencement contenues dans le fichier de type World il est nécessaire d'utiliser un SIG comme QGIS (gratuit) ou ArcGIS (payant). Il sera alors possible d'ajouter cette couche d'informations à d'autres de nature différentes (comme des fichiers vectoriels, des images aériennes, etc.).

La visualisation des tuiles passe par l'utilisation d'un serveur dédié. Différents protocoles permettent d'accéder aux serveurs en fonction du type de tuile à afficher (raster, vecteur, 3D). Les plus connus sont XYZ, TMS (*Tile Map Service*), WMST (*Web Map Tile Service*) et WCS (*Web Coverage Service*). Il est possible d'accéder à ces serveurs en naviguant sur des sites cartographiques dédiés (Figure 57) comme Géoportail, Google Maps ou Data SHOM, ou bien encore en utilisant un SIG. Lorsque les tuiles sont visualisées dans un SIG, il est nécessaire de configurer les protocoles afin d'accéder au serveur. Le paramétrage est plus ou moins complexe en fonction du protocole utilisé.

Il est possible de visualiser des tuiles en local sans passer par un serveur distant, mais cela nécessite l'emploi de logiciels spécifiques. Le logiciel QGIS est capable de lire en local plusieurs types de protocoles.

4.2. Analyse des données

Si certains produits photogrammétriques fournissent immédiatement des informations qualitatives lors de leur visualisation (présence/absence d'une espèce ou d'un objet, structure tridimensionnelle), une analyse quantitative est également possible en utilisant les outils d'analyse informatique adéquats. Certaines techniques sont manuelles et nécessitent un temps de traitement important ainsi que du personnel expérimenté, tandis que d'autres sont automatisées. Les analyses décrites ici concernent principalement les habitats marins, leur structure tridimensionnelle et les espèces sessiles observables sur les orthophotographies.

4.2.1. Cartographie des biocénoses marines

La résolution centimétrique, voire millimétrique, des orthophotographies sous-marines permet un niveau

de reconnaissance des habitats marins qu'aucune autre technique de cartographie actuelle ne permet de fournir. Afin de réaliser une analyse surfacique fine des biocénoses marines à partir des produits photogrammétriques, il est nécessaire de pouvoir délimiter les habitats. Plusieurs techniques existent et nécessitent toutes un logiciel SIG. Ces outils sont le plus souvent similaires à ceux employés en cartographie par moyens acoustiques et font tous appel à des SIG. Plusieurs techniques sont ainsi disponibles. Il sera ici question de présenter brièvement trois techniques particulières :

- le tracé manuel de la limite des biocénoses benthiques avec des outils de dessin dans un SIG ;
- l'utilisation d'images du nuage de points pour en déduire la limite des habitats (actuellement utilisé uniquement pour les herbiers de posidonies) ;
- l'analyse automatisée des orthomosaïques en utilisant un algorithme permettant une classification du fond marin pixel par pixel.

Il est important de noter qu'une analyse surfacique des habitats marins nécessite au minimum une mise à l'échelle du modèle photogrammétrique, voire un géoréférencement précis dans une optique de gestion.

4.2.1.1. Classification manuelle

Le tracé manuel de la limite des biocénoses marines sur une orthophotographie nécessite l'emploi d'un SIG disposant d'outils permettant d'éditer manuellement des polygones (tel que QGIS). Cette opération nécessite de pouvoir zoomer et dézoomer régulièrement sur la mosaïque photo. L'utilisation de rasters peut donc être contraignante en termes de ressources informatiques. Il est donc préférable de réaliser cette opération en utilisant des tuiles (voir [Orthophotographie](#)).

Le tracé de polygones peut être très long (plusieurs heures voire plusieurs jours de travail) en fonction de la taille de la zone à cartographier et du nombre d'habitats à identifier ([Figure 58](#)). Cette méthode a cependant l'avantage d'éviter les erreurs d'interprétation lorsqu'elle est utilisée par un opérateur ayant une bonne connaissance des biocénoses marines à délimiter. Un des autres avantages de cette technique

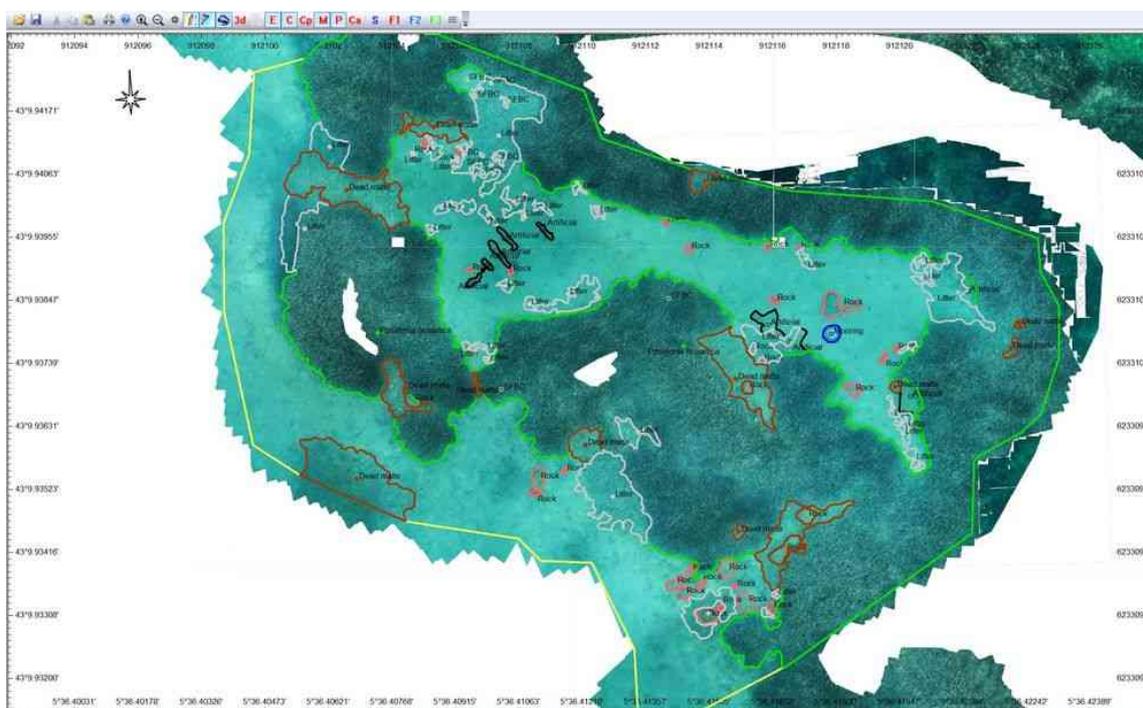


Figure 58 : Tracé manuel de la limite des biocénoses marines sur une orthomosaïque sous-marine dans le SIG ViewMap. Source : Seaviews.

est d'obtenir non seulement la cartographie des surfaces couvertes par les herbiers mais également celles occupées par d'autres biocénoses benthiques comme la matte morte de posidonie ou la litière de feuilles mortes.

Dans le cas où l'opérateur souhaiterait suivre finement plusieurs quadrats permanents, il est possible d'exporter des orthomosaïques locales (une petite portion du modèle) avec exactement la même prise de vue à chaque suivi. Cela permet de réaliser des micro-cartographies des biocénoses et de produire des indicateurs surfaciques d'évolution des habitats/communautés benthiques (Figure 59).

discriminer les herbiers de posidonie des autres habitats benthiques. Une autre approche développée par Marre et al. en 2020 consiste à exploiter le nuage de points épars afin de mettre en évidence le relief de l'herbier. Le nuage de point en trois dimensions est ainsi converti en une image en deux dimensions pour isoler les surfaces correspondant à l'herbier (Figure 60).

Cette méthode de cartographie permet d'obtenir de façon rapide une couche SIG avec des polygones d'herbiers. Les couches issues de ce processus peuvent être employées pour suivre de façon fine l'évolution des surfaces couvertes par la posidonie

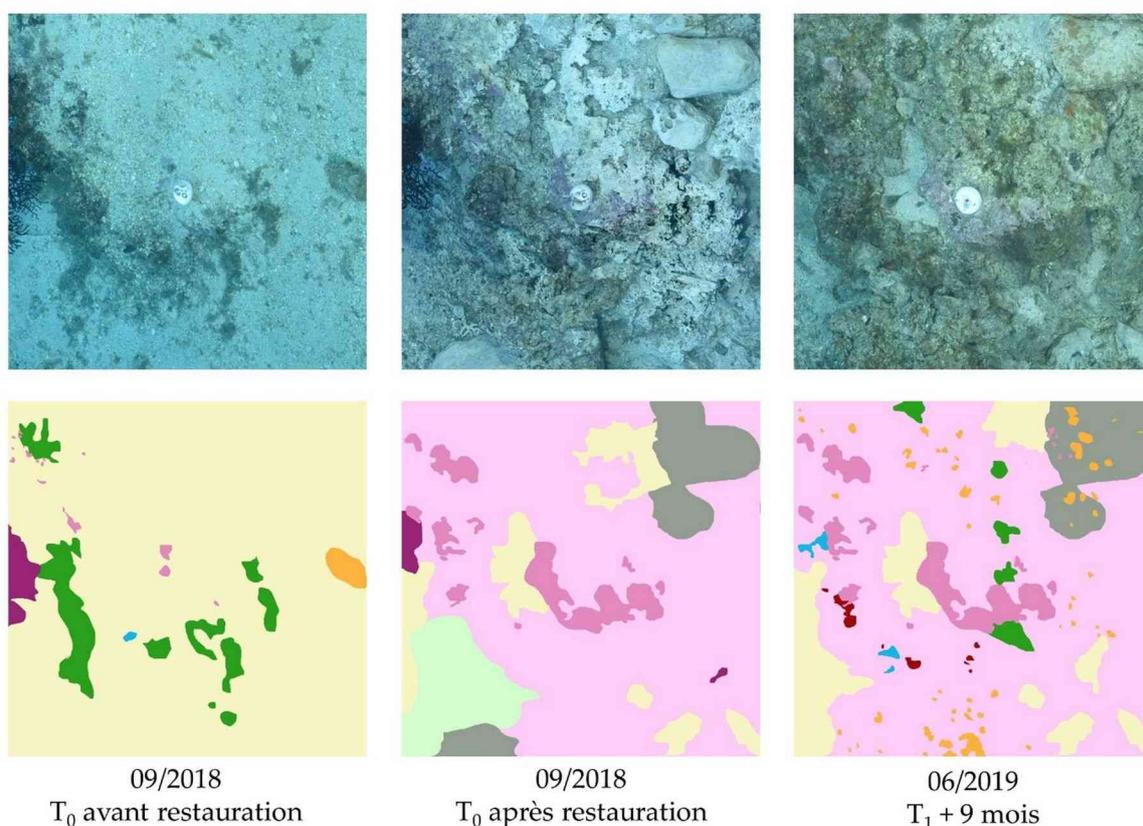


Figure 59 : Micro-cartographie des groupes taxonomiques avant et après désensvelissement et nettoyage du récif coralligène de Saint Jean Cap Ferrat par production d'orthomosaïques locales identiques. Source : Andromède Océanologie.

4.2.1.2. Classification à partir du nuage de points

La plupart des techniques de cartographie des fonds marins s'emploient à utiliser les orthophotographies, issues de la photogrammétrie pour

sous réserve que l'acquisition des données permette un positionnement précis des produits photogrammétriques.

Une de ses principales limites concerne son développement spécifique pour la cartographie des limites d'herbier de posidonie sur substrat meuble qui n'autorise pas son emploi pour classification de fonds marins plus complexes avec plusieurs classes d'habitats qui se côtoient.

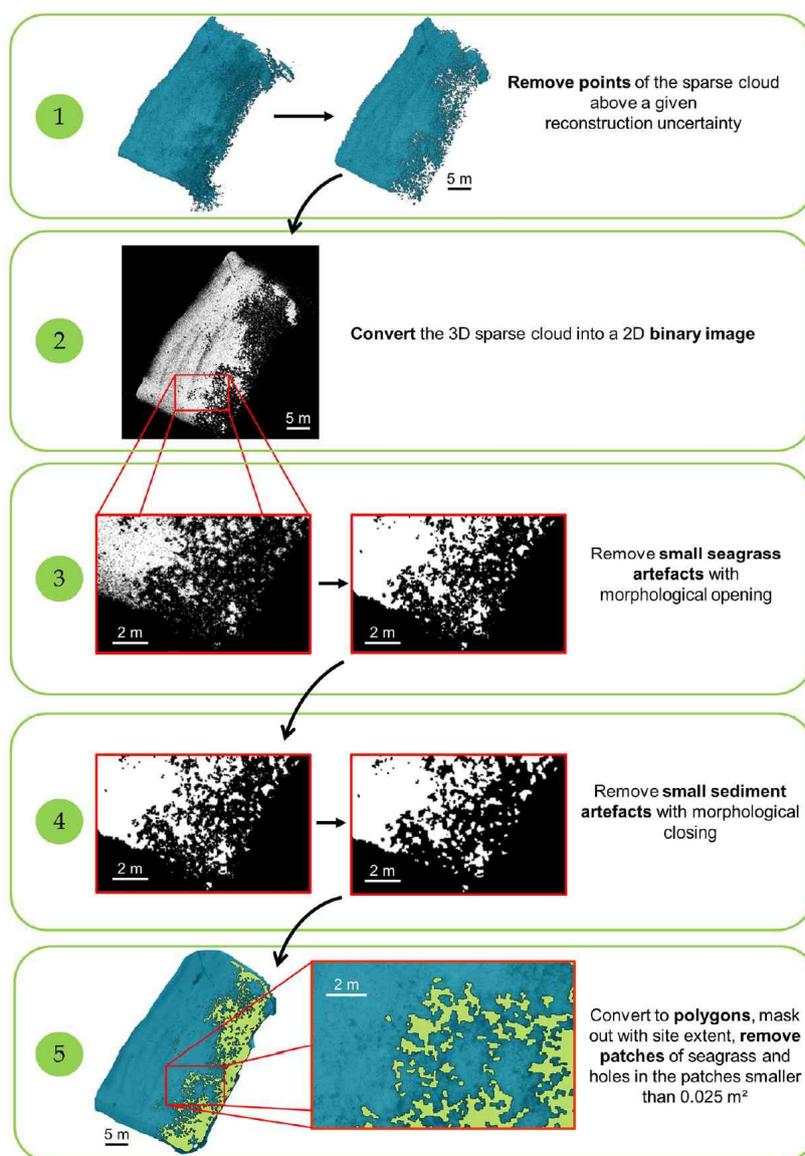


Figure 60 : Processus de cartographie des surfaces occupées par l'herbier de posidonie à partir du nuage de points éparses issu de la photogrammétrie.
Source : Marre et al. (2020).

4.2.1.3. Classification automatisée

La technique de classification automatique se base sur l'utilisation des orthophotographies et de leurs caractéristiques des couleurs (Nicolas, 2021). Elle s'appuie sur une fonctionnalité d'OpenCV qui permet d'appliquer des masques de couleurs à une image. A

cela s'ajoute une interface qui permet de faire un ajustement en direct de la classification.

Les orthophotographies (qu'elles soient aériennes ou sous-marines) sont maillées en groupes de pixels selon la résolution de cartographie souhaitée. Chaque maille peut être considérée comme un pixel comportant quatre caractéristiques : rouge, vert, bleu et niveau de gris (avec une intensité allant de 0 à 255).

La première étape est une sélection manuelle de pixels pour chaque classe, par exemple : sable, posidonie et matte. Ensuite, un masque de couleur est appliqué pour chaque classe sur les pixels dont les valeurs RGB sont comprises entre les valeurs minimales et maximales parmi tous les pixels sélectionnés. Ces plages de valeurs minimales/maximales peuvent être

L'utilisation des curseurs dynamiques permettant de gérer la taille des classes et l'intensité du filtrage apporte également plus de liberté sur le résultat des classifications contrairement aux autres méthodes (Figure 62). Son utilisation reste cependant limitée plutôt à de petites zones où les habitats marins ont des couleurs facilement différenciables. Il faut également

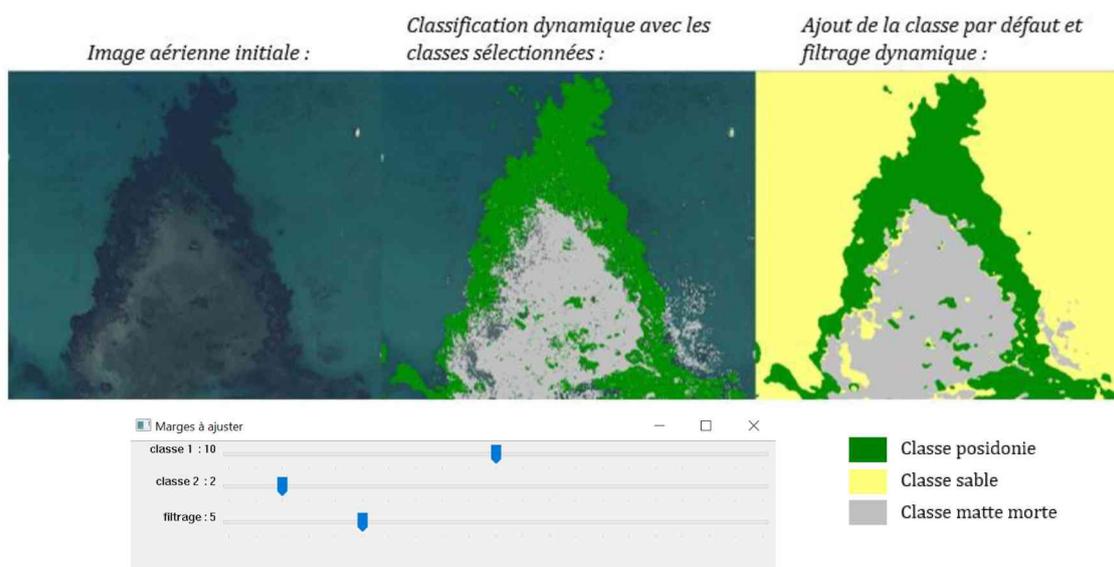


Figure 61 : Classification automatisée sur une orthomosaïque aérienne du récif barrière formé par la posidonie dans le golfe de Saint-Florent (Corse). Source : Nicolas (2021).

élargies dynamiquement avec un curseur (Figure 61). Puis un filtre médian de noyau variable (à choisir également avec un curseur) est appliqué pour chaque pixel afin de supprimer les pixels ou petits groupes de pixels isolés, qui constituent un artefact de classification.

garder à l'esprit qu'un phénomène de réflexion du soleil sur la surface de l'eau sur les orthophotographies aériennes de grandes zones peut empêcher de faire une bonne classification des biocénoses marines avec cette méthode.

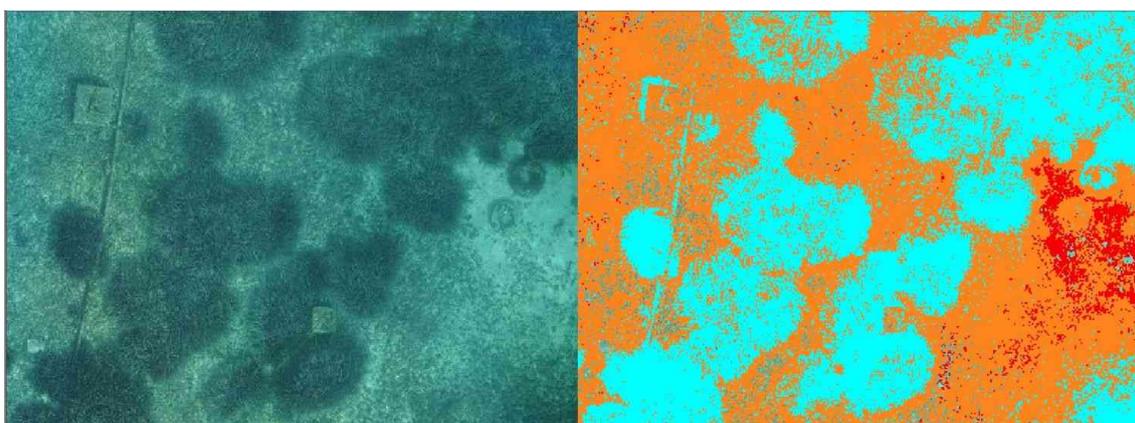


Figure 62 : Exemple de classification automatique pixel par pixel d'un zone d'herbier de posidonie sur matte morte avec quelques zones de sédiments. Source : Seaviews.

Le principal avantage de cette technique est d'obtenir très rapidement (en quelques minutes) une première classification relativement fiable (autour de 75%) grâce aux ajustements dynamiques des valeurs RGB minimales/maximales. Cette première classification est ensuite validée et modifiée manuellement le cas échéant par un opérateur disposant d'une expertise dans le domaine des biocénoses marines.

Le module d'outils GRASS de QGIS comprend des éléments d'analyse de fichiers raster permettant ce type de classification à partir des orthomosaïques et des MNT. Ses algorithmes permettent notamment de disposer de cartes de rugosité générées à partir du MNT.

4.2.2. Détection de points d'intérêt

La résolution centimétrique, voire millimétrique des orthophotographies permet la détection de nombreux points d'intérêt. Ces derniers peuvent être de nature très variée comme des organismes vivants benthiques sessiles (faune et flore), des déchets ou des structures artificielles de petite taille (objets archéologiques, restes enfouis d'épaves ou de bâtiments). La détection des espèces benthiques autorise notamment une approche écosystémique de l'étude des fonds marins (voir [Approche écosystémique](#)).

La technique de détection est manuelle et consiste à « pointer » dans un SIG les individus détectés sur les images du fond et à renseigner les caractéristiques de l'observation dans les attributs de la couche géographique (Figure 64). L'utilisation de tuiles est fortement recommandée pour cette opération (voir [Tuiles](#)) du fait de la nécessité d'utiliser constamment différents niveaux de zooms pour identifier la nature de l'objet ou de l'organisme vivant détecté.

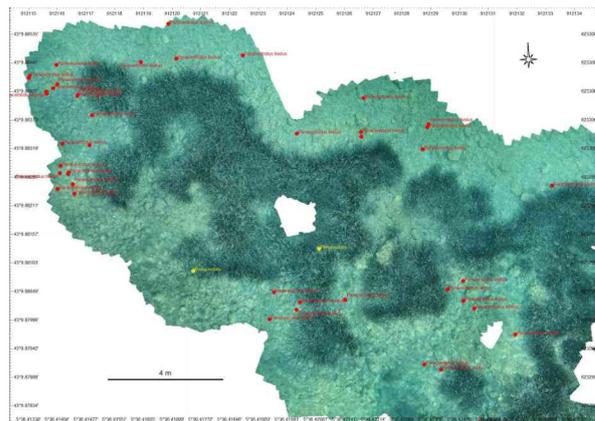


Figure 64 : Détection manuelle dans un SIG de grandes naces (*Pinna nobilis*) et d'oursins violets (*Paracentrotus lividus*) sur une orthophotographie sous-marine. Source : Seaviews.

Cette digitalisation peut également être réalisée en 3D sur le modèle (création de marqueurs 3D dans le

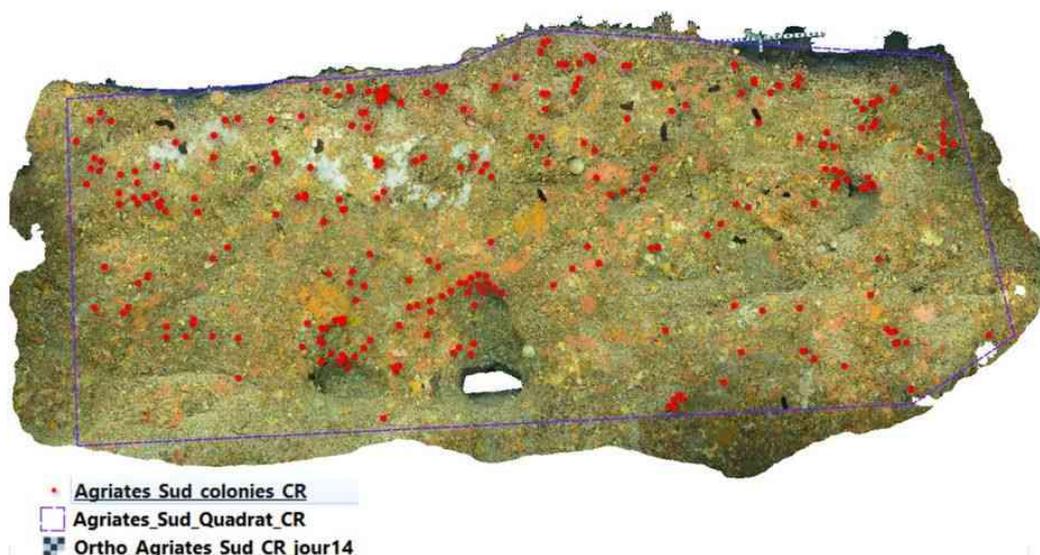


Figure 63 : Dénombrement des colonies de corail rouge (étoiles rouges) sur un tombant du site Agriates Sud (Corse) en 2020. Sur une surface totale de 19,8 m² (en violet), il y a une densité moyenne de colonies de 13,5 colonies/m². Source : Andromède Océanologie.

logiciel de photogrammétrie). Il est ainsi possible de mesurer le nombre total et par extension la densité de certaines espèces sur une surface donnée, par exemple le nombre de colonies de corail rouge sur un tombant coralligène (Figure 63). Par ailleurs, il est fréquent de réaliser plusieurs protocoles sur un même site de suivi, et il peut être intéressant/pertinent de localiser les zones faisant l'objet de protocoles/analyses particuliers sur le modèle 3D.

4.2.3. Analyses topographiques et paysagères

Les indices topographiques (rugosité, pente, chenaux) permettent une analyse physique des MNT des fonds marins. Ces indices mettent notamment en valeur la morphologie du fond et le relief, un facteur important conditionnant la répartition des habitats benthiques et la distribution des espèces.

De nombreux logiciels de cartographie permettent de réaliser une analyse topographique sur les MNT photogrammétriques au format raster. Par exemple, les modules SAGA et GRASS du SIG open source QGIS permettent d'obtenir rapidement une carte de la rugosité du fond (Figure 65). Ce type de représentation permet notamment d'affiner ou de valider la cartographie des habitats marins benthiques (voir [Cartographie des biocénoses marines](#)).

En complément des mesures topologiques réalisées sur le MNT, une analyse paysagère sur les

habitats peut également être conduite. Les métriques paysagères sont souvent très utiles pour analyser de façon quantitative un paysage sous-marin ou terrestre et comprendre comment l'agencement spatial en deux dimension des habitats influence la distribution des organismes vivants.

Le logiciel open source GRASS GIS intègre de nombreuses métriques paysagères classiques (nombre et taille des patches, longueur de bordure, etc.) qui sont calculées sur des couches SIG de type raster (Figure 66). Le résultat des métriques paysagères peut enfin être exporté au format TXT pour faire l'objet d'analyses statistiques plus poussées dans un tableur ou avec des logiciels de statistiques.

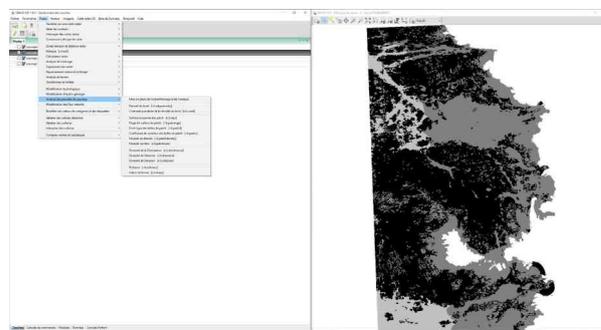


Figure 66 : Utilisation des outils d'analyse paysagère dans le logiciel GRASS GIS.

Les rasters en deux dimensions peuvent également faire l'objet de visualisation et de mesures en trois dimensions dans des SIG pour en obtenir des

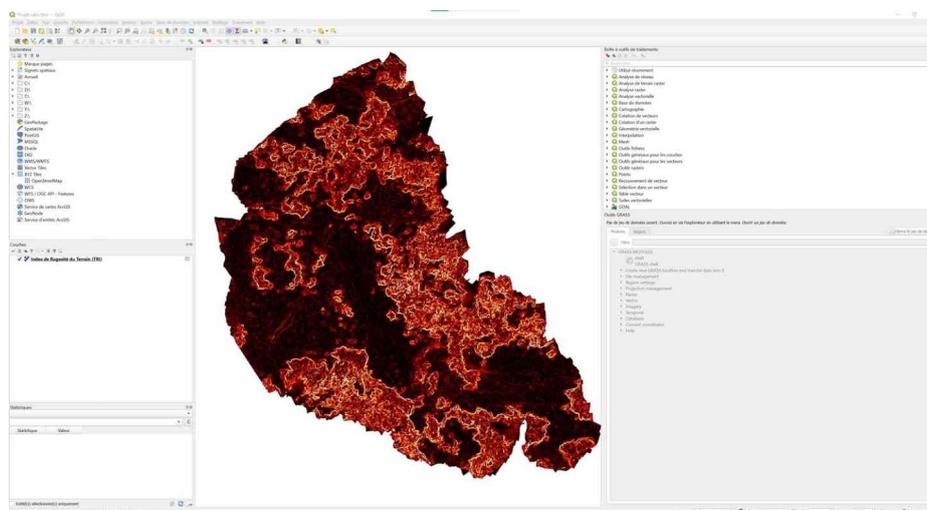


Figure 65 : Réalisation d'une carte du relief sous-marin à partir d'un MNT photogrammétrique en utilisant le module SAGA dans le SIG QGIS.

informations quantitatives volumiques et surfaciques. Le SIG le plus complet pour ce type d'opération est le logiciel open source GRASS GIS. Il utilise le MNT issu de la photogrammétrie au format raster (le plus souvent des GeoTIFF) pour ensuite générer un raster 3D sur lequel les mesures surfaciques et volumiques seront réalisées. Le logiciel permet également de visualiser le MNT et d'y faire des mesures directement ou par calcul (Figure 67).

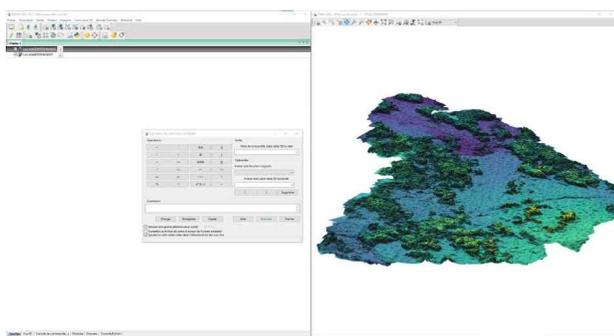


Figure 67 : Visualisation et outils de calculs d'un raster 3D issu de la photogrammétrie dans GRASS GIS .

Il est important de noter que ce logiciel n'est pas destiné à visionner les produits photogrammétriques 3D tels que les fichiers OBJ ou PLY. D'autres logiciels payant de cartographie en 3D permettent de faire de telles mesures comme AutoCAD ou ArcGIS.

La caractérisation morphologique des habitats numérisés par photogrammétrie peut se faire en calculant différents indices à partir du nuage de points ou des modèle 3D. La notion de complexité structurale est difficile à résumer en un seul indicateur, cependant elle est souvent étudiée à travers la dimension fractale ou la rugosité.

Dimension fractale : grandeur traduisant la manière dont un nuage de points occupe l'espace 3D. Plus le nuage de points est dispersé et représente une surface avec de nombreux sommets locaux, dépressions, circonvolutions, etc., plus la valeur sera élevée. En trois dimensions, on utilise généralement l'algorithme de « box counting » pour estimer la valeur de la dimension fractale ;

Rugosité : caractéristique de l'état de surface de l'habitat. En trois dimensions, la rugosité se calcule généralement à l'échelle du modèle en calculant le ratio surface 3D/surface 2D projetée. Cependant, il est également possible d'étudier la rugosité locale en chaque point d'un nuage de points, et ce à différentes échelles (Figure 68).

L'information de rugosité calculée pour chaque point peut alors être synthétisée à l'échelle du modèle en calculant différents descripteurs statistiques (moyenne, écart-type, etc.). Il est également possible d'utiliser l'information locale pour isoler certaines parties du modèle (points dont la rugosité à 0.5 m est supérieure à une certaine valeur par exemple).

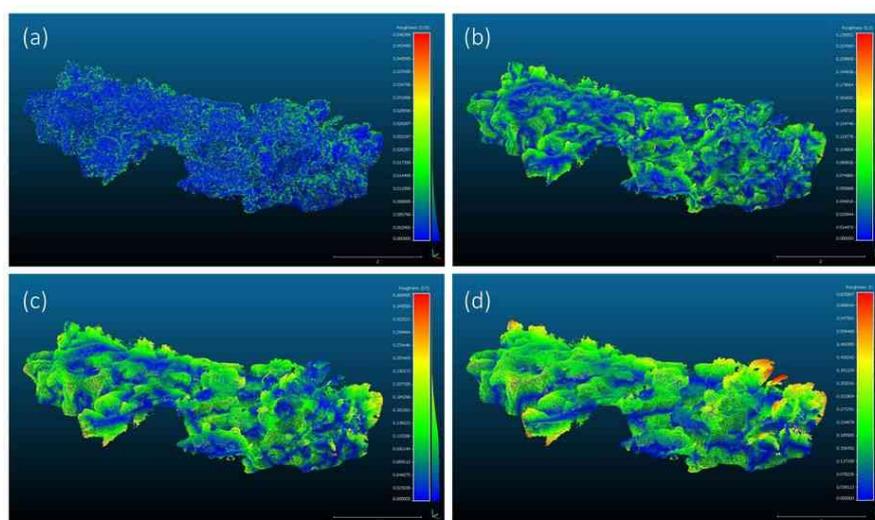


Figure 68 : Calcul de la rugosité locale d'un récif coralligène avec le logiciel CloudCompare. Calcul avec noyaux de (a) 0.05 m, (b) 0.3 m, (c) 0.5 m et (d) 1 m.

Chapitre 5

La photogrammétrie sous-marine appliquée aux herbiers de posidonie

5.1. La posidonie : *Posidonia oceanica*

5.1.1. Des prairies sous-marines à la morphologie particulière

La posidonie, *Posidonia oceanica* (L.) Delile de son nom scientifique, est une plante à fleurs (ou Magnoliophyte) endémique de la Méditerranée (Abadie et Gobert, 2019). C'est un ingénieur d'écosystème autogène, c'est-à-dire que cette espèce modifie les caractéristiques physico-chimiques de son environnement au travers de sa structure physique. Concrètement, cela se traduit dans son cas par la production d'oxygène au niveau de ses feuilles grâce à la photosynthèse et aux échanges chimiques entre le sédiment et ses racines (Boudouresque et al., 2012). En se reproduisant de façon sexuée (par dissémination de fruits) et asexuée (clonage), la posidonie forme de vastes herbiers de 0 à 40 m de profondeur sur une grande partie du pourtour méditerranéen (Figure 69). Elle couvre une surface comprise entre 25 000 et 50 000 km² (Telesca et al., 2015). Le rhizome de la posidonie (l'équivalent de la tige d'une plante terrestre) ne croît

horizontalement que de quelques centimètres par an et les herbiers actuels résultent donc de plusieurs milliers d'années de croissance.

Grâce à ses feuilles qui piègent la matière en suspension, un phénomène d'accumulation de sédiments se produit au niveau de ses rhizomes (Pergent, 1990). Afin de compenser cette importante sédimentation et d'éviter l'ensablement, les rhizomes de la posidonie croissent verticalement d'environ un centimètre par an (Boudouresque et al., 1983). Les rhizomes et les racines mortes de la plante se retrouvent alors ensevelis dans le sédiment. L'ensemble des rhizomes et racines morts et vivants agglomérés par le sédiment forme ainsi la matte. Cette accumulation de matière organique se décompose très lentement dans le sédiment anoxique et l'élévation de la matte peut se dérouler pendant plusieurs milliers d'année. Les herbiers de posidonies possèdent une structure complexe avec des trouées de sable et de matte sans feuilles (matte morte), ainsi que des différences d'élévation dues à la morphologie du substrat sur lequel ils se développent (sable, roche). Cet ensemble de traits structurels définissent le paysage (au sens scientifique du terme) que forment les herbiers de posidonie (Abadie et al., 2015b). La structure du paysage sous-marin formé par la posidonie conditionne le fonctionnement de tout un écosystème (Abadie et al., 2018b).



Figure 69 : Une prairie de posidonies entourant des roches sous-marines dans la baie de Calvi (Corse). Photo : Arnaud Abadie.

5.1.2. L'écosystème le plus riche de Méditerranée

Les herbiers de posidonies sont à la base d'un écosystème d'une richesse spécifique sans comparaison en Méditerranée. Ils accueilleraient ainsi de 20 à 25 % du nombre d'espèces marines de Méditerranée (Boudouresque et al., 2015b). La véritable canopée formée par ses longues feuilles est un abri pour de nombreuses espèces sous-marines (Figure 70) que ce soit des poissons (serrans, labres, rascasses) ou bien d'autres organismes tels que les céphalopodes (poulpes, seiches) ou certains arthropodes (petits crabes, araignées de mer). Parmi les individus qui trouvent un refuge dans les herbiers, nombre d'entre eux sont au stade juvénile. Les prairies de posidonie sont pour toutes ces espèces tant un lieu de nourrissage

5.1.3. Services écosystémiques et économiques

Les herbiers à *P. oceanica* sont des viviers à vie marine et assurent ainsi la fonction d'abris pour de nombreuses espèces à leur stade juvénile. A cette période de leur vie, la plupart des organismes marins sont très vulnérables aux prédateurs. Même les plus gros poissons trouvent refuge dans les herbiers lorsqu'ils sont jeunes. Certaines espèces passeront toute leur vie dans les herbiers ou à proximité tandis que d'autres s'en iront vers d'autres habitats dès que leur taille le leur permettra. La canopée n'a pas seulement une fonction de frayère. Les feuilles de posidonie piègent le sédiment et participe à la stabilisation des fonds marins. Cette masse végétale atténue

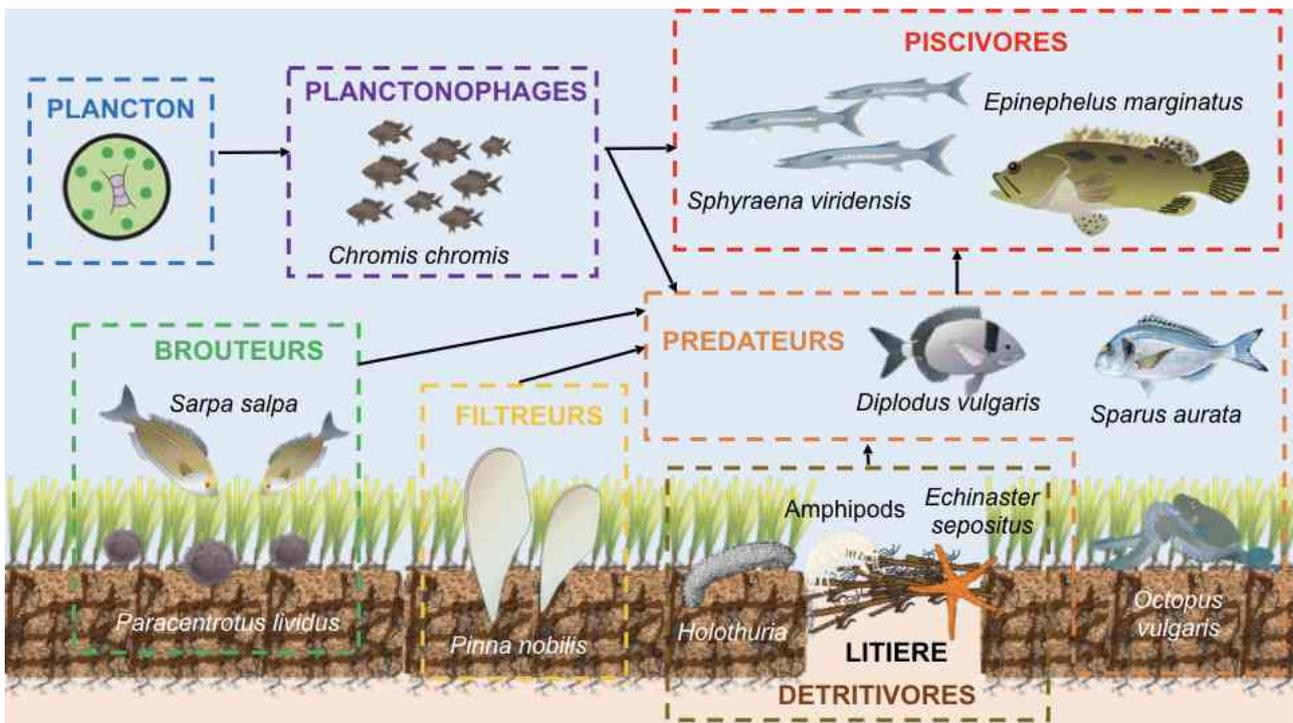


Figure 70 : Représentation simplifiée du réseau trophique de l'écosystème des herbiers à *P. oceanica*. Source : Abadie et Gobert (2019).

qu'un havre de paix les préservant des attaques de nombreux prédateurs. Elles sont également l'habitat d'une autre espèce patrimoniale endémique de Méditerranée, la grande nacre (*Pinna nobilis*), qui s'installe aussi bien à l'intérieur qu'en bordure des herbiers.

également la puissance des vagues. La diminution de la force de la houle permet ainsi de réduire son pouvoir érosif lorsqu'elle déferle sur les plages. Cependant ce n'est pas la seule action de protection de l'érosion du littoral assurée par la posidonie.

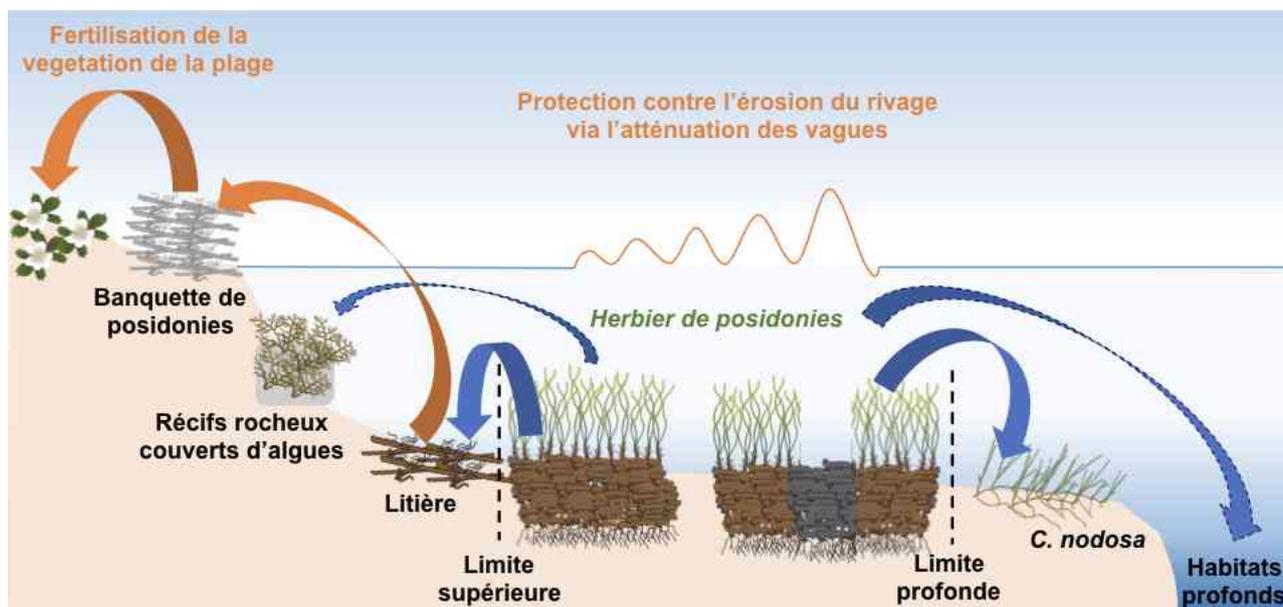


Figure 71 : Export de la production primaire des herbiers de posidonie vers les zones terrestres (flèches oranges) et marines (flèches bleues). Source : Abadie et Gobert (2019).

L'écosystème des herbiers de posidonie est l'un des plus productifs de la planète. Il produit notamment une biomasse végétale considérable que ce soit au niveau des feuilles (et des organismes qui vivent dessus) ou celui des rhizomes et des racines. La biomasse au niveau de la matre est d'ailleurs environ six fois plus importante que la biomasse foliaire. Pour rappel, la posidonie est une espèce photosynthétique et produit donc de l'oxygène en consommant du CO₂ dans la colonne d'eau grâce à ses feuilles. Environ 27 % du carbone fixé par la posidonie est ainsi stocké à long terme dans la matre. Les herbiers constituent d'importants puits de carbone stockant jusqu'à plus de 40 % des émissions de CO₂ des pays méditerranéenne depuis le XIX^{ème} siècle (Pergent et al., 2012).

Lors des tempêtes automnales et hivernales une partie des feuilles et des rhizomes est arrachée. La biomasse foliaire est ainsi exportée vers d'autres habitats marins (étendues sableuses, herbiers de cymodocées, habitats profonds, etc.), mais également vers des habitats terrestres littoraux (Figure 71). Pour l'ensemble de ces biocénoses cet apport est une source de nourriture pour les organismes détritvovres qui les peuplent. Au niveau des plages se forment après les premières tempêtes automnales de gros amas de feuilles de posidonies appelés « banquettes ». Ces banquettes, qui peuvent être hautes de plusieurs mètres, protègent les plages de l'érosion. C'est ainsi ce stock de feuilles mortes qui est grignoté par les vagues et non le sédiment de la plage.

D'une façon très simplifiée, le devenir de la production primaire des herbiers de posidonies peut être synthétisé de la façon suivante : 1/3 est consommé par des herbivores et des détritvovres, 1/3 est exporté et le dernier 1/3 est stocké dans la matre (Boudouresque et al., 2015a).

Des fonctions écologiques qui viennent d'être décrites découlent des services qui sont qualifiés « d'écosystémiques » (Figure 72). Par extension, certains de ces services fournissent à l'espèce humaine des services économiques non négligeables tant à l'échelle locale qu'à l'échelle globale (Vassallo et al., 2013). Le rôle de nurserie fournie ainsi un important vivier pour la pêche artisanale et la pêche de loisir. Certaines espèces ciblées par les pêcheurs professionnelles, telles que le denti (*Dentex dentex*) ou le chapon (*Scorpaena scrofa*), se nourrissent ainsi en chassant dans ou à proximité des herbiers. Sans prairies sous-marines pour alimenter cette ressource économique de pêche, une bonne partie de la pêche artisanale en Méditerranée aurait quasiment disparue. Il est important de noter qu'en France, et dans la plupart des pays de Méditerranée, la pêche aux arts traînants (chaluts) est interdite dans les herbiers de posidonie. Il est malheureusement difficile de contrôler le respect de cette loi. Les herbiers de posidonie sont également un lieu très prisé des pêcheurs à la canne qu'ils soient des touristes estivaux ou bien des locaux. Certains chasseurs en apnée utilisent également les herbiers ou les habitats à proximité comme terrain de chasse.

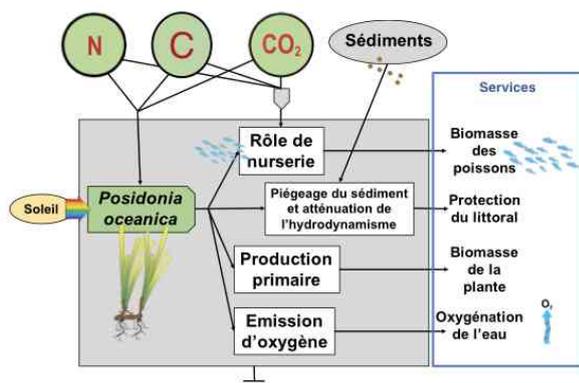


Figure 72 : Les services écosystémiques et économiques fournis par la posidonie. Source : Abadie et Gobert (2019).

Les feuilles de posidonie sont exportées vers les plages où elles forment des banquettes qui protègent le littoral de l'érosion (Mateo et al., 2003). De ce fait, leur enlèvement par les communes littorales est fortement réglementé car la loi interdit de détruire toute partie vivante ou morte de la plante. Si l'odeur de la matière organique en décomposition peut rebuter les touristes, les banquettes de posidonies permettent cependant aux collectivités locales de faire d'importantes économies sur les coûts de réensablement des plages. Sans la protection du littoral par les posidonies, de nombreuses plages très prisées des touristes sur la côte méditerranéenne sont tout simplement vouées à disparaître ce qui entraînerait de graves conséquences économiques pour l'ensemble du littoral.

Le second service économique fourni par les herbiers de posidonies, en lien avec l'activité touristique, découle de l'oxygénation des eaux côtières. La production excédentaire d'oxygène de la plante grâce à la photosynthèse permet une bonne oxygénation de la colonne d'eau à proximité des herbiers. Ce phénomène favorise le développement des organismes marins inféodés à l'écosystème. De plus, le piégeage des sédiments par la canopée contribue à la clarté de l'eau en zones côtières. Ces deux actions combinées favorisent les activités touristiques balnéaires et nautiques. Il est clair que les touristes préféreront se baigner dans une eau transparente pleine de poissons que dans une mer sombre et vide de toute vie.

5.2. Besoins actuels de gestion

5.2.1. Une origine anthropique de la régression des herbiers

Malgré leur importance écosystémique et les services économiques qu'ils nous fournissent, les herbiers à *P. oceanica* sont soumis à de nombreuses pressions anthropiques (Boudouresque et al., 2009). Ainsi, l'impact physique de certaines activités humaines, i.e. des perturbations, sont responsables de la régression des herbiers de *P. oceanica* (Montefalcone et al., 2010). Certaines activités continues, i.e. stress, mènent à la création de zones de matte morte. D'autres entraînent une destruction mécanique directe de la strate foliaire (Figure 73).

Le développement côtier est l'une des principales causes de la régression de la strate foliaire des herbiers à *P. oceanica* (Giakoumi et al., 2015). Il est ainsi source de pollution notamment par le déversement d'eaux usées (matière en suspension et éléments traces) qui entraînent une diminution de la croissance des rhizomes et un changement dans la structure foliaire.

L'expansion des zones urbaines littorales peut également provoquer d'importantes régressions des herbiers de posidonies. La construction de ports et le rechargement en sable des plages provoquent une atténuation de la lumière et une sédimentation de matière en suspension supérieure à la vitesse de croissance verticale de la plante, menant ainsi à la régression de la plante sur de larges zones (Montefalcone et al., 2007). Les effluents d'aquacultures sont, au même titre, responsables de la disparition de larges portions de l'herbier. De cette façon, en diminuant la pénétration des rayons solaires et en rejetant de grandes quantités de matière organique, les cages d'aquaculture provoquent l'anoxie du sédiment dans lequel se développe *P. oceanica*. Ces conditions favorisent l'apparition de composés toxiques tel que le sulfure d'hydrogène et la régression de l'herbier de posidonies (Holmer and Frederiksen, 2007).

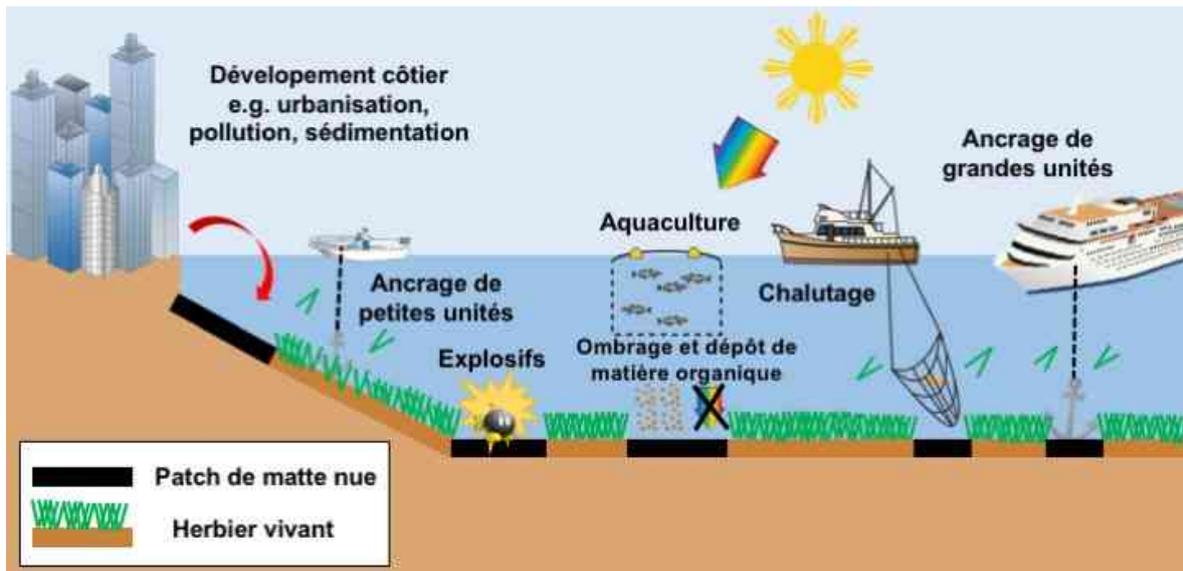


Figure 73 : Impact des activités anthropiques générant des intermattes au sein des paysages sous-marins à *P. oceanica*. Source : Abadie (2016).

En parallèle des impacts mentionnés précédemment, certaines activités provoquent des dommages mécaniques immédiats générant instantanément des intermattes anthropiques (Abadie et al., 2015a). Parmi ces impacts directs, le chalutage (illégal ou non selon le pays) est l'une des activités provoquant les dégâts les plus importants (Pergent et al., 2013). Leurs panneaux créent de longues "cicatrices" de matte morte qui seront très difficilement recolonisées par la plante. D'une façon similaire aux dommages causés par le chalutage, l'ancre est une source de création de zones de matte morte (Montefalcone et al., 2006). Cependant, à la différence

du chalutage, l'intensité de destruction dépend de la taille et du type d'ancre, et par extension de la taille de l'embarcation. Cette destruction mécanique de la strate foliaire augmente ainsi avec la taille des embarcations, menant à la génération de zones de matte nue (Figure 74) caractérisée par des sillons d'ancre (Okudan et al., 2010).

Une autre source de régression des herbiers à *P. oceanica* est le réchauffement climatique avec la montée du niveau de la mer qu'il induit (Pergent et al., 2015). Concrètement, la montée du niveau de l'eau entraîne un déplacement latéral vers la côte de la zone



Figure 74 : A) Ancre d'une embarcation de petite taille (environ 10 m) dans un herbier de posidonies ; B) matte morte générée par le mouillage de grandes unités présentant des sillons d'ancre. Photos : Arnaud Abadie.

bathymétrie favorable au développement de la posidonie (en raison de la disponibilité en énergie lumineuse). Cela mène donc à une régression de l'herbier depuis sa limite profonde, la faible croissance de la plante ne permettant de coloniser suffisamment rapidement les profondeurs plus faibles.

5.2.2. Suivre la dynamique des herbiers

Afin de mettre en place des mesures de gestion permettant de protéger les herbiers à *P. oceanica* des pressions anthropiques mentionnées plus haut, il est nécessaire de disposer de données précises sur leur état écologique et leur évolution. Divers outils sont ainsi disponibles selon le sujet (espèces inféodées à l'herbier, cartographie de ses limites, analyse du sédiment, analyse des polluants, bioacoustique, etc.) et l'échelle spatiale de l'étude (une plage, une commune, une baie, l'ensemble d'une façade maritime).

Parmi ces outils, la cartographie des herbiers est l'un des plus utilisés lorsqu'il s'agit d'évaluer les surfaces couvertes par la plante et de suivre son évolution dans le temps. Selon l'échelle spatiale et temporelle de suivi, une grande variété de techniques sont disponibles dont notamment celles employant de l'équipement acoustique tels que les sondeurs monofaisceau et multifaisceaux, le sonar à balayage latéral et le pointeur acoustique sous-marins. D'autres, à une échelle très réduite, sont réalisées en plongée sous-marine. La photogrammétrie sous-marine vient compléter la liste et se positionne en complément, voir en remplaçant, de certaines techniques.

5.3. L'apport de la photogrammétrie au suivi des herbiers

La photogrammétrie sous-marine appliquée aux herbiers à *P. oceanica* permet d'acquérir d'une part des données plus précises en termes d'évolution surfacique, et d'autre part d'obtenir des informations inédites concernant notamment les espèces associées, certains impacts anthropiques et la complexité des biocénoses (litière, matte morte). Nous proposons ici plusieurs exemples d'utilisation de la photogrammétrie

sous-marine appliquée aux herbiers de posidonies. Il est important de noter que cette liste est non exhaustive. Un chapitre complet (cf. [Comparaison et interactions avec d'autres méthodes de suivi](#)) est dédié à la comparaison de la photogrammétrie avec les méthodes de suivi plus classiques.

A noter que l'ensemble des applications proposées dans le présent chapitre peut être exécuté avec une acquisition photogrammétrique unique et que des analyses complémentaires peuvent être réalisées à posteriori.

5.3.1. Suivi de la limite de l'herbier

Le suivi de la limite de l'herbier à *P. oceanica* permet de faire état de régression ou de colonisation et de relier ce phénomène à d'éventuelles facteurs naturels et/ou anthropiques. Il concerne le plus souvent la limite supérieure (la plus proche du littoral) et la limite profonde de l'herbier. Classiquement, ce suivi est réalisé en plongée sous-marine avec un balisage fixe et pérenne le long de la limite (Figure 75), chaque balise étant photographiée avec un guide gradué permettant de mesurer la distance de colonisation/érosion (Charbonnel et al., 2000). Il est également possible d'utiliser un pointeur acoustique sous-marin communiquant avec une base placée à proximité sur le fond (Descamp et al., 2005). Le pointeur est déplacé le long de la limite de l'herbier afin d'obtenir plusieurs centaines à plusieurs milliers de points définissant la position de sa bordure.



Figure 75 : Exemple de balisage de la limite d'un herbier dans la baie de Calvi (Corse). Photo : Arnaud Abadie.

Pour ce type de suivi, la photogrammétrie sous-marine permet d'obtenir une orthophotographie à très haute résolution (Figure 76) de la bordure de l'herbier ainsi que de l'espace l'environnant (Astruch et al., 2017). L'acquisition des photographies est réalisée en plongée pour la limite profonde tandis que la limite supérieure peut être cartographiée depuis la surface avec une plateforme flottante ou bien par drone lorsque l'herbier est proche de la surface (dans le cas des récifs barrière par exemple) (Abadie and Viala, 2020a; Rende et al., 2020). La résolution millimétrique des clichés permet de délimiter avec précision la position de la limite. L'orthophotographie permet également d'identifier la nature des biocénoses adjacentes (matte morte, sédiment, litière de feuilles mortes). De plus, elle constitue une archive visuelle de la zone qui peut fournir à posteriori des informations supplémentaires (traces de dégradations, déchets, espèces sessiles).

Le point crucial de ce type de suivi est le positionnement de la limite qui peut-être relatif ou géoréférencé (cf. [Positionnement et géoréférencement](#)). De la qualité du positionnement dépendra la précision des mesures de colonisation/régression des herbiers.

A titre d'exemple, le suivi de la limite profonde de l'herbier de posidonie, limite profonde au-delà de laquelle l'herbier ne pousse plus principalement à cause du manque de lumière, est considéré comme un indicateur de la qualité de l'eau. C'est ainsi que, soutenu par l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, le réseau TEMPO a été créé en 2011. Il s'étend sur l'ensemble de la façade méditerranéenne française bordée par les trois régions Corse, Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) et Occitanie. TEMPO a pour missions de promouvoir l'habitat des herbiers de posidonie et de surveiller à long terme l'évolution de son état. La dynamique des herbiers est suivie sur 53 sites par la mesure de densités et de déchaussement de faisceaux

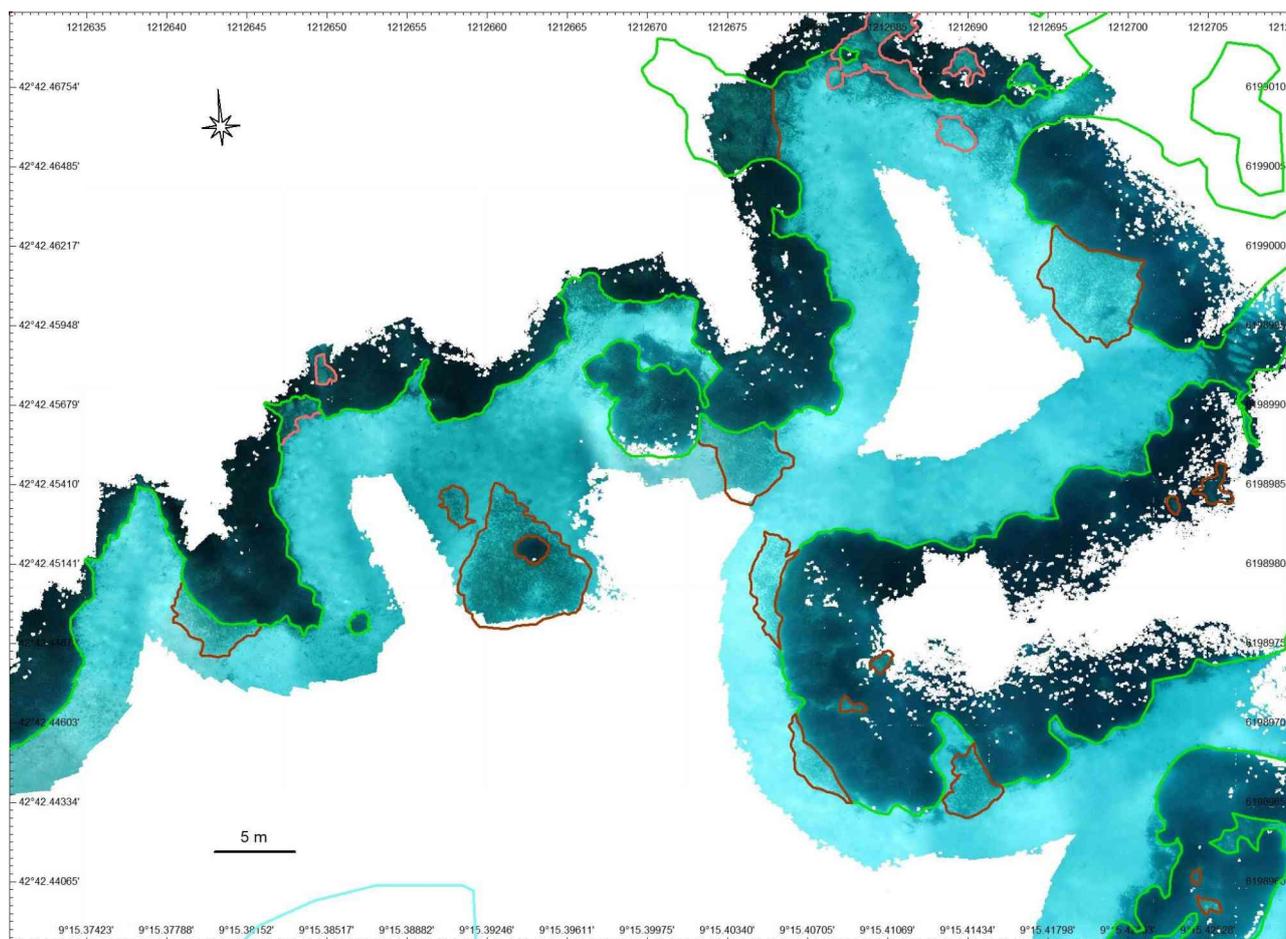


Figure 76 : Cartographie d'une limite d'herbier avec une orthophotographie sous-marine dans le golfe de Saint-Florent (Corse). Source : OFB/Seaviews.

ajoutée à une cartographie de la limite inférieure par photogrammétrie (Figure 77).

Une cartographie par photogrammétrie est réalisée tous les trois ans sur chaque site, permettant de produire des orthomosaïques alignées entre elles grâce

à l'utilisation de repères fixe et digitaliser les zones d'herbier dans un SIG. La comparaison des résultats permet de quantifier de manière surfacique les zones en progression ou en régression (Figure 78).

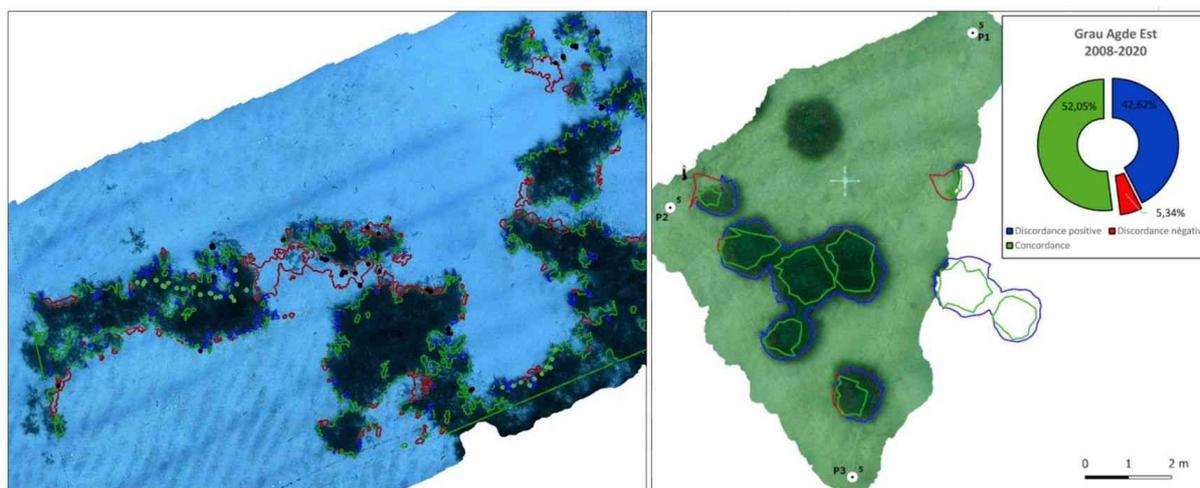


Figure 77 : Photogrammetries réalisées sur deux sites d'herbier et présentant sa dynamique évolutive sur trois ans. Source : Andromède Océanologie.

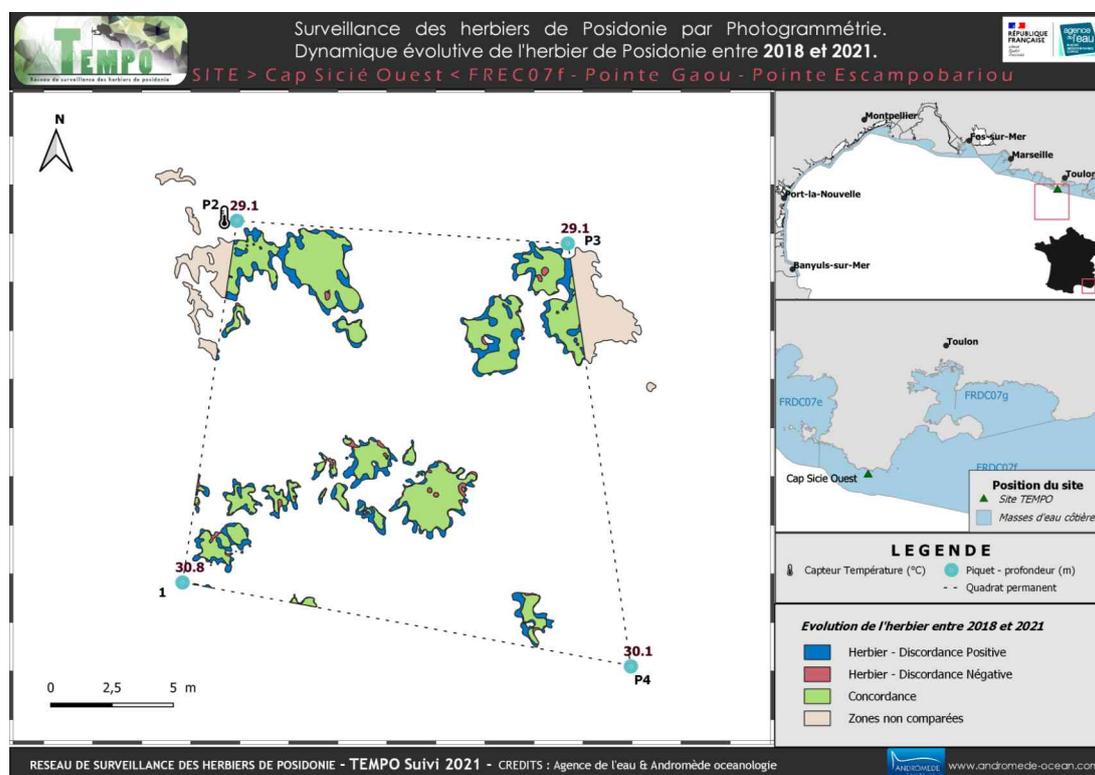


Figure 78 : Evolution de la limite de l'herbier en limite inférieure du site Cap Sicié Ouest entre 2018 et 2021. Source : TEMPO, Andromède Océanologie.

5.3.2. Cartographie des herbiers sur roche

Bien que se développant majoritairement sur des substrats de nature sédimentaire, les herbiers de posidonie se développent également sur la roche (Figure 80). Les herbiers sur roche sont très difficiles à cartographier avec les méthodes acoustiques classiques (sondeur multifaisceaux, sonar à balayage latéral) et nécessitent un effort important d'observations de terrain pour discriminer le relief rocheux de la canopée de l'herbier. Ainsi, la surface réellement occupée par ce type d'herbier est mal connue, d'autant plus que leur structuration spatiale est souvent très hétérogène.

En fournissant une vision photographique du fond, les orthophotographies issues de la photogrammétrie sous-marine permettent de discriminer avec certitude le fond rocheux et les herbiers à *P. oceanica* (Figure 79). Les substrats durs formant un relief très marqué, le modèle 3D permet également de rendre compte de la topographie du site mais également d'inventorier les espèces colonisant les roches (Abadie et Viala, 2017).



Figure 80 : Un herbier de posidonie sur roche à 25 m de profondeur dans la baie de La Ciotat. Photo : Arnaud Abadie.

5.3.3. Étude de l'impact de l'ancrage

Parmi les impacts mécaniques dans les herbiers de posidonies, l'ancrage est une source importante de leur fragmentation et de leur régression (Figure 81). Plus les navires jetant l'ancre sont longs, plus la profondeur de mouillage est grande et plus les dégâts seront importants (Ganteaume et al., 2005). L'ancrage intensif produit ainsi des cicatrices de matre morte qui peuvent avoir une largeur de plusieurs mètres et une centaine de mètres de longueur (Abadie et al.,

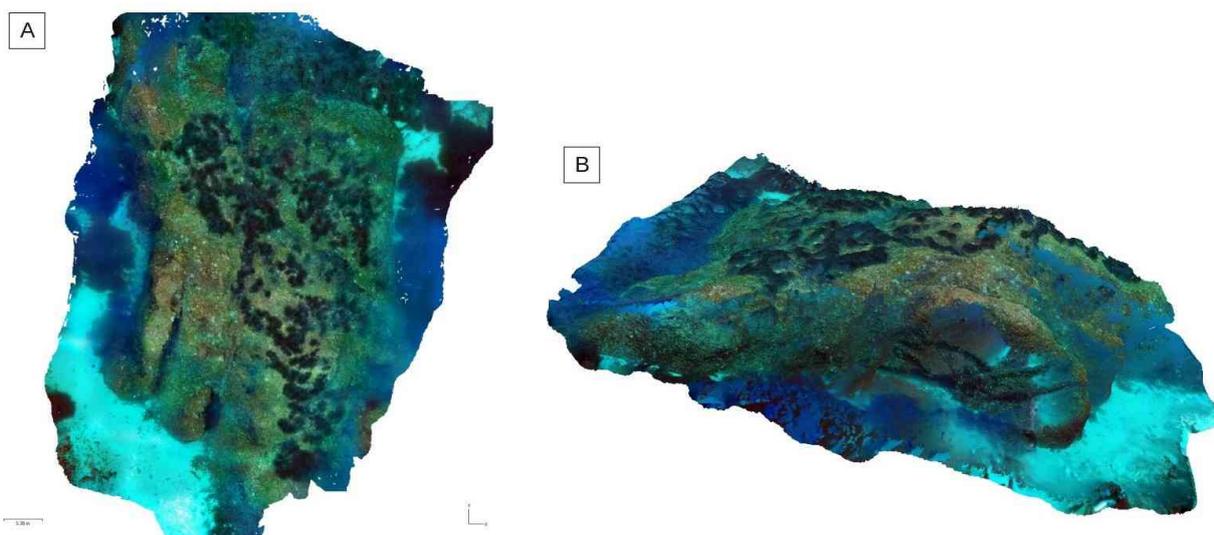


Figure 79 : A) Orthophotographie d'un herbier à *P. oceanica* sur roche. B) Modèle 3D de la zone rocheuse. Source : Seaviews.

2015b). A l'endroit de l'herbier où se pose l'ancre, une zone de matte morte plus étendue peut être générée du fait des mouvements de la chaîne lorsque le navire change de position sous l'action du vent. L'étude de la dynamique des traces d'ancrage au sein des herbiers sous-marins fait partie des informations permettant d'évaluer l'efficacité des mesures de gestion mise en place afin de favoriser la recolonisation des herbiers à *P. oceanica*.



Figure 81 : Traces d'ancrage dans un herbier de posidonies à 20 m de profondeur. Photo : Arnaud Abadie.

Les traces d'ancrage dans les herbiers à *P. oceanica* sont classiquement cartographiées à grande

échelle en utilisant des moyens acoustiques (Figure 82). Cependant, cette méthode ne dispose pas d'une résolution suffisante pour permettre un suivi précis de leur évolution surfacique. Une étude à plus petite échelle est donc nécessaire. Leur dynamique est étudiée de la même façon que la limite d'extension de l'herbier : à l'aide d'un balisage et de mesures en plongée (Abadie et al., 2019).

Comme dans le cadre du suivi d'une limite d'herbier, ce sont les orthophotographies issues de la photogrammétrie qui sont employées pour cartographier l'évolution de la bordure des traces d'ancrage. Les photographies sont acquises principalement en plongée sous-marine du fait de la profondeur (bien souvent 20-40 m) des impacts visibles de l'ancrage dans les herbiers de posidonies (Figure 83). Pour d'autres types d'herbiers ayant une structure moins robuste (comme la cymodocée) et se développant à des profondeurs bien moindres, les photographies peuvent être réalisées depuis la surface. Du fait de la taille des traces d'ancrage, seules des surfaces restreintes seront cartographiées pour obtenir une cartographie à haute résolution. Il est donc préférable de privilégier un suivi ciblé de certaines traces ou de certaines zones. Un système de balisage fixe est installé avant la réalisation des clichés afin de pouvoir positionner les orthophotographies les unes par rapport aux autres.

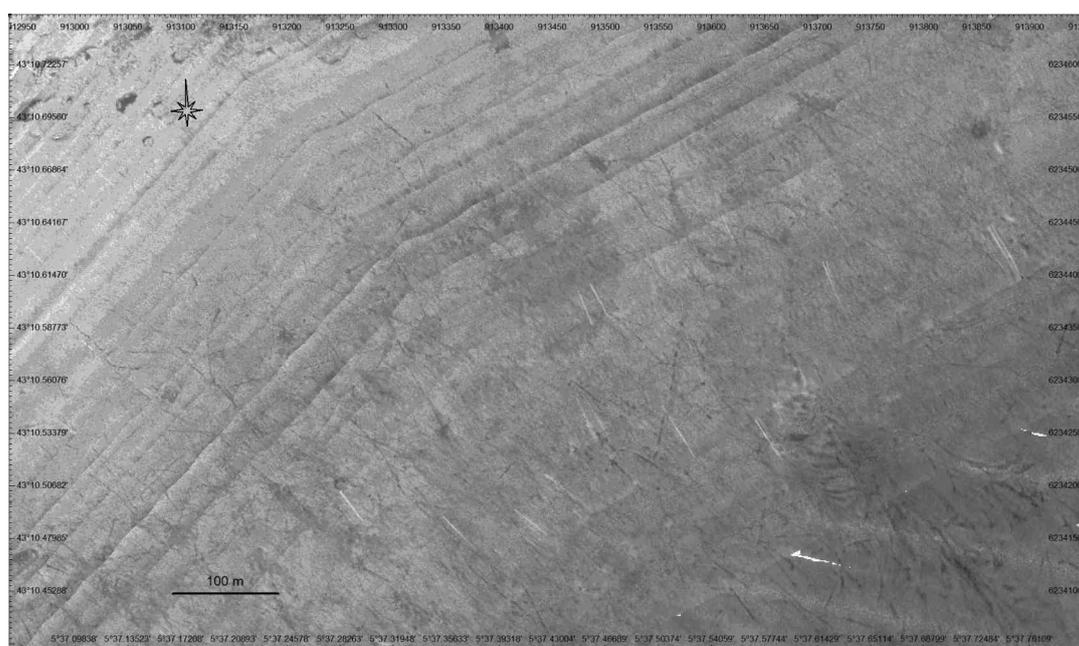


Figure 82 : Imagerie acoustique (sondeur multifaisceaux) d'un herbier de posidonie avec des traces d'ancrage dans la baie de La Ciotat. Source : Seaviews.

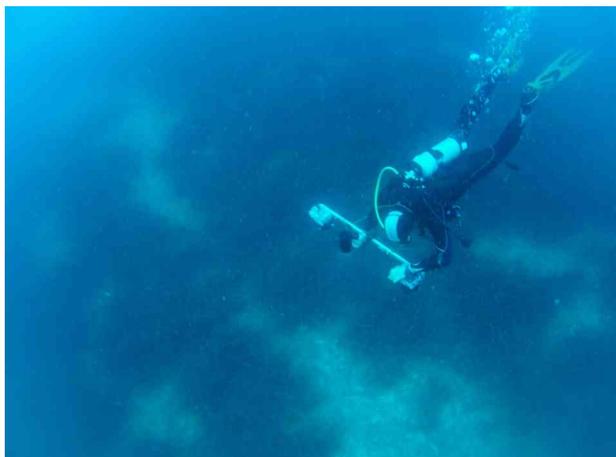


Figure 83 : Le photogrammétrie en plongée sur des traces d'ancrage à 25 m de profondeur. Photo : Christophe Viala/Seaviews.

La plus-value de la photogrammétrie par rapport aux méthodes classiques est un niveau de précision du suivi de la position de la limite de l'herbier permettant de mesurer des évolutions de l'ordre du centimètre. Ce degré de précision est indispensable au vu de la vitesse de croissance horizontale de la posidonie (quelques centimètres par an). L'orthophotographie (Figure 84 et Figure 85) apporte notamment de nombreuses informations sur l'hétérogénéité des communautés et des habitats (matte morte, caulerpe, sédiment) liée à la génération de traces d'ancrage dans les herbiers à *P. oceanica* ainsi que leur variabilité saisonnière (litière de feuilles mortes). Les macro-déchets s'accumulant dans ces zones (souvent creusées par les systèmes de mouillage) sont également détectables sur les orthophotographies.

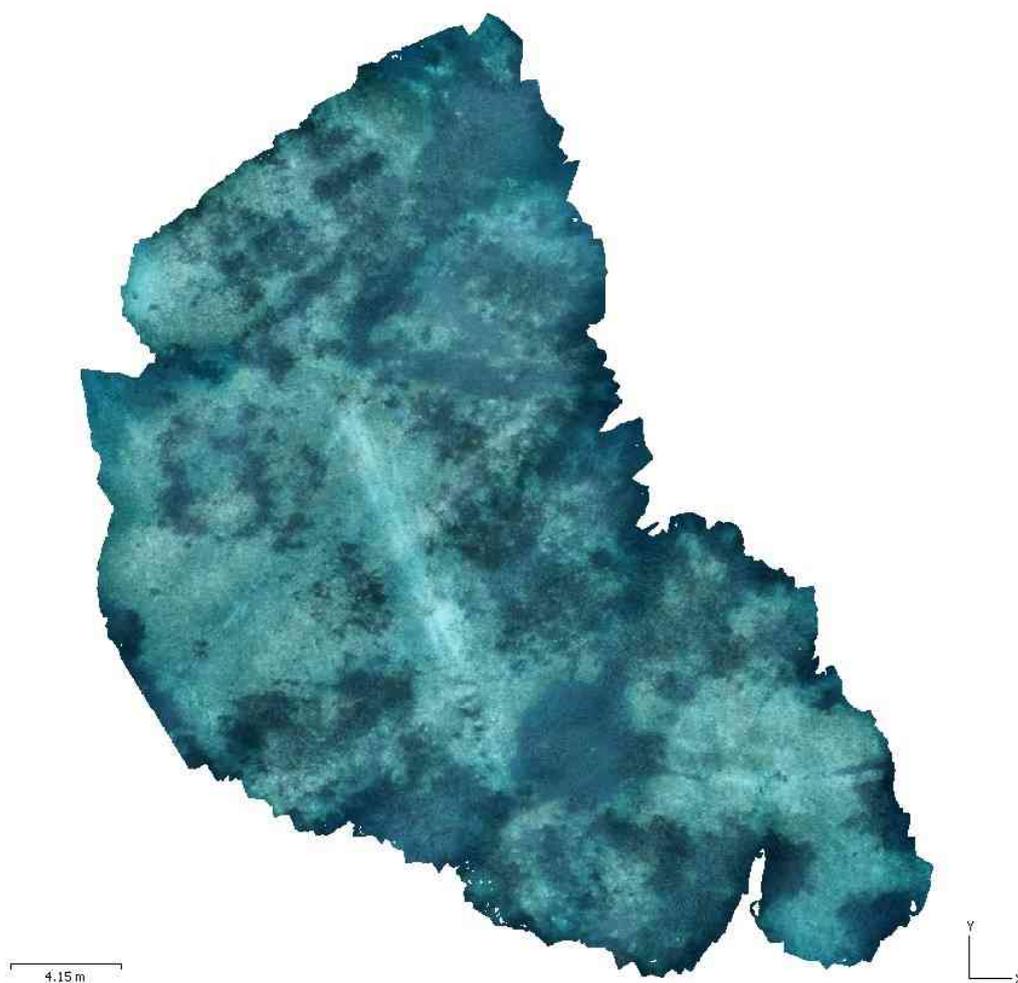


Figure 84 : Orthophotographie de traces d'ancrage dans un herbier de posidonies à 24 m de profondeur.

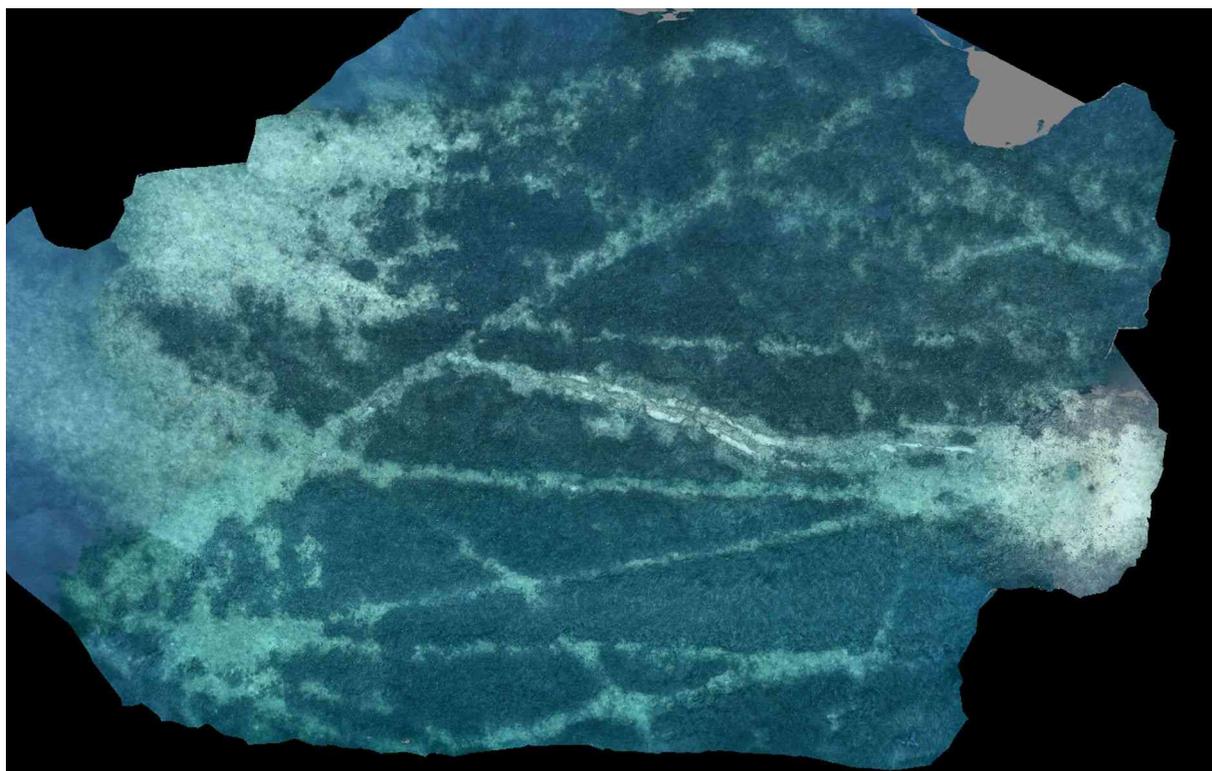


Figure 85 : Multiples traces de mouillage dans le Golfe de Santa Manza, Corse, 2018. Source : Andromède Océanologie.

5.3.4. Recensement des systèmes de mouillage

En parallèle de la problématique de l'ancrage dans les herbiers de posidonie se pose celle de l'installation de systèmes de mouillage (ou corps-morts) directement dans les prairies sous-marines (posidonie, cymodocées) ou dans les zones adjacentes (Montefalcone et al., 2008). Ce phénomène concerne principalement les zones de petits fonds, les dispositifs mis en place étant prévus pour des embarcations privées de petite taille. Les corps-morts sont le plus souvent constitués d'un lest, d'un bout et/ou d'une chaîne reliée à un flotteur en surface (Figure 86). La nature du lest est variable et est souvent apparentée à des déchets (pneus, radiateurs en fonte). L'action du lest sur les habitats sur lequel il est déposé entraîne un « étouffement » des herbiers présents en bloquant l'apport en énergie lumineuse. Les dégâts les plus importants sont causés par la chaîne qui se déplace avec les mouvements d'eau (courants, houle) et fauche les feuilles des plante marines (Demers et al., 2013).



Figure 86 : Dispositif de mouillage illégal installé dans un herbier à *P. oceanica* au large d'Erbalunga (Corse). Photo : Seaviews.

La détection et l'étude de l'impact des corps-morts non-déclarés est une thématique de gestion importante dans le cadre de la réduction de la pression de l'ancrage sur les herbiers de posidonies. La quantité et la localisation de ces dispositifs est très souvent inconnue. Afin d'obtenir ces informations, un effort

important d'observations visuelles est indispensable, les moyens acoustiques n'étant pas adaptés à la détection des corps-morts du fait de leurs caractéristiques (taille, ensablement, matière) et de la faible profondeur à laquelle ils sont généralement implantés.

La description des dispositifs de mouillage et de leur environnement repose sur des observations en plongée ou depuis la surface accompagnée d'un positionnement par GPS et de photographies (Abadie et Viala, 2020b).

La photogrammétrie apparaît comme un complément des techniques classiques en permettant

d'obtenir une évaluation plus pointue des caractéristiques des corps-morts et de leur environnement. Les orthophotographies sous-marines fournissent une classification fine des biocénoses et du substrat sur lesquelles les corps-morts sont implantés et permettent d'en estimer l'impact grâce à leur résolution centimétrique (Figure 90a).

La modélisation 3D (Figure 90b) permet, quant à elle, de mesurer le lest des mouillages et d'appréhender la structuration verticale du système entier de corps-morts qui peut comporter plusieurs lests et tout un système de chaînes. Cette notion de verticalité

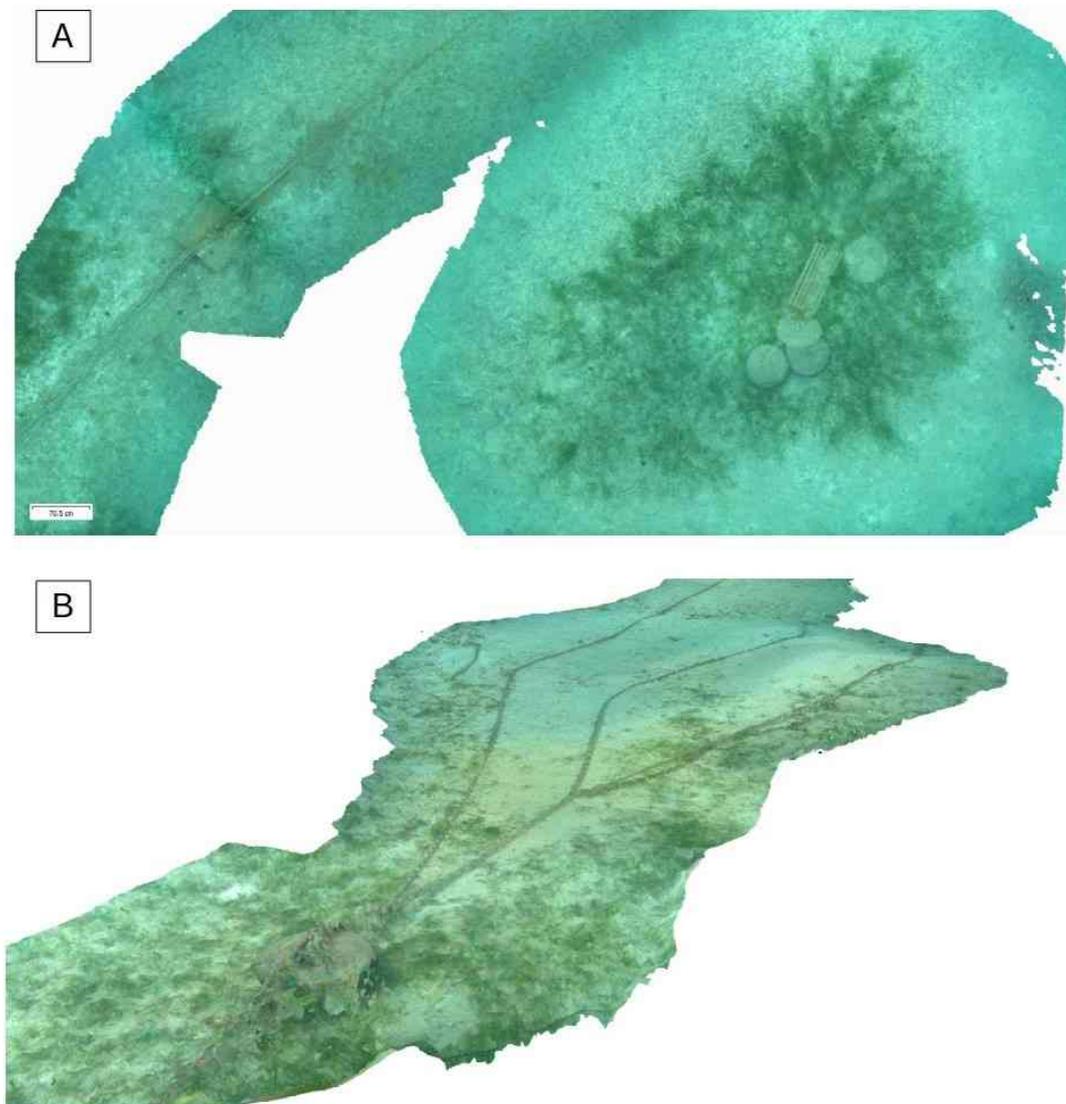


Figure 87 : A) Orthophotographie de plusieurs systèmes de corps-morts installés sur des herbiers à *Cymodocea nodosa*. B) Vue 3D d'un corps-mort et de son système de chaînes dans un herbier de cymodocées. Source : Seaviews.

est aussi importante pour estimer l'impact du mouillage sur le substrat sur lequel il repose en induisant des variations du transport sédimentaire. Il est important de noter que l'utilisation de la photogrammétrie est plus intéressante pour l'étude de systèmes de mouillages permanents complexes (plusieurs lests, système de chaînes, grande surface occupée sur le fond) que pour des petits dispositifs avec un lest unique de taille réduite.

5.3.5. Détection des macrodéchets

Depuis quelques années, la thématique de la pollution des herbiers sous-marins par les macro et micro-déchets plastiques (Figure 89) est de plus en plus présente au cœur des enjeux de conservation des écosystèmes marin (Bonanno et Orlando-Bonaca, 2020). En se fragmentant à proximité ou dans les herbiers de posidonies, ils impactent la totalité du réseau trophique en étant consommés par les organismes à la base de la chaîne alimentaire présents dans la colonne d'eau ou sur le fond. Les autres déchets (déchets

métalliques, les cartons imprimés, les déchets peints) entraînent une pollution du sédiment et des habitats environnants, le plus souvent sur des dizaines voir des centaines d'années.



Figure 89 : Déchets plastiques à proximité d'un herbier à *P. oceanica*. Ces derniers se retrouvent le plus souvent dans la litière de feuilles mortes. Photo : Arnaud Abadie.



Figure 88 : Les orthophotographies permettent la détection des accumulations de déchets dans les herbiers de posidonie. Source : Seaviews.

Actuellement, trois approches permettent de cartographier les macrodéchets : la collecte par chalutage, les méthodes optiques et les techniques acoustiques (Madrucardo et al., 2020). Peu d'études scientifiques sont disponibles concernant la nature, la taille et la distribution des macrodéchets dans les herbiers marins, malgré qu'ils se situent dans la zone littorale qui est la plus impactée. Ce manque de données est principalement lié au manque d'outils pour cartographier cette pollution avec précision. La résolution et la nature des outils acoustiques ne permettant pas de discriminer les macrodéchets de petite taille (< 1 m) des herbiers de posidonie et de la litière de feuilles mortes, tandis que la collecte par chalutage est exclue pour cet habitat. Parmi les méthodes optiques, les mieux adaptées aux herbiers sous-marins semblent être les transect photo/vidéo et la photogrammétrie sous-marine.

Dans le cas des macrodéchets, le principal avantage de la photogrammétrie est d'être une technique d'observation non destructive (par opposition au chalutage) fournissant une résolution d'observation centimétrique avec les orthophotographies (Figure 88). Grâce à cette haute résolution, la discrimination entre les déchets et les biotopes (canopée, matée morte, litière de feuilles, sédiment) est alors possible et chaque débris est ainsi détecté. Au-delà de la détection et du dénombrement des déchets, des informations sont disponibles sur leur nature (bouteille plastique, cannettes, bouteilles en verre, bois peint, etc.), leur état de décomposition et leur distribution par rapport aux

différents biotopes. Lorsque l'orthophotographie est géoréférencée, la position des plus gros déchets les moins mobiles peut être relevée pour les collecter ultérieurement.

5.3.6. Suivi des émissaires de STEP

Les stations d'épuration des villes côtières de Méditerranée rejettent très souvent leurs eaux traitées en mer à des profondeurs où les herbiers de posidonie sont présents. La forte teneur en matière organique et l'augmentation de la turbidité de l'eau au niveau des émissaires peut entraîner une régression des herbiers à proximité des bouches de rejet. Un suivi de l'évolution de la limite de l'herbier est donc indispensable pour évaluer l'impact de ces installations sur le milieu marin (Figure 90).

L'acquisition des données photogrammétriques se fait le plus souvent en plongée sous-marine du fait de la profondeur de ces installations (souvent au-delà de 20 m de profondeur). Lorsque le parcours de la canalisation est visible depuis la surface, il est cependant possible de le géoréférencer grâce à des techniques photogrammétriques de surface. L'assemblage de la photogrammétrie depuis la surface et de celle réalisée en plongée permet d'obtenir une géoréférencement de la totalité des produits photogrammétriques (Figure 91).

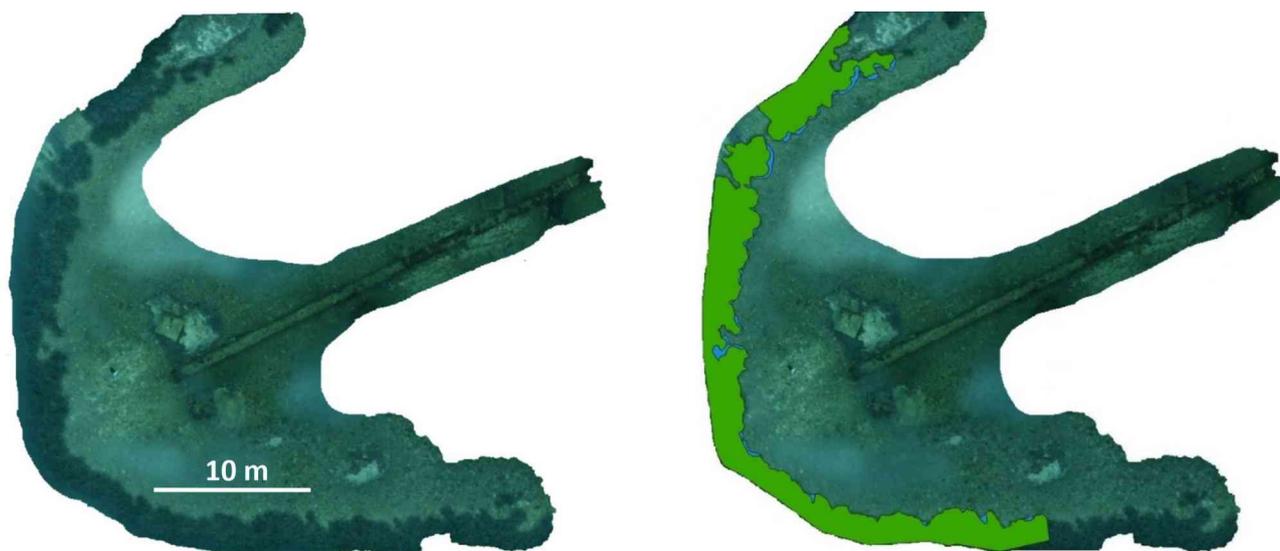


Figure 90 : Orthomosaïque de l'herbier limitrophe à un rejet de STEP en 2017 (à gauche) et cartographie de l'évolution en 2020 (à droite ; en vert l'herbier stable ; en bleu l'herbier en progression). Source : Andromède Océanologie.

L'utilisation de la photogrammétrie pour le suivi de l'impact des émissaires de STEP sur l'herbier de posidonie présente plusieurs avantages. Elle permet non seulement de disposer d'un support de cartographie haute résolution pour suivre l'évolution de la limite de l'herbier, mais également d'avoir une observation exhaustive photographique de l'état de l'installation.

(Figure 92) avec l'analyse de carottes de matre prélevées en plongée (Leduc et al., 2021), la mesure de la quantité de substrat soustrait par l'ancrage et le chalutage est plus difficile. En effet, bien que les techniques acoustiques permettent de détecter et cartographier les sillons dans l'herbier, la résolution des données (au mieux décimétrique) ne permet pas de mesurer la profondeur de ces sillons.

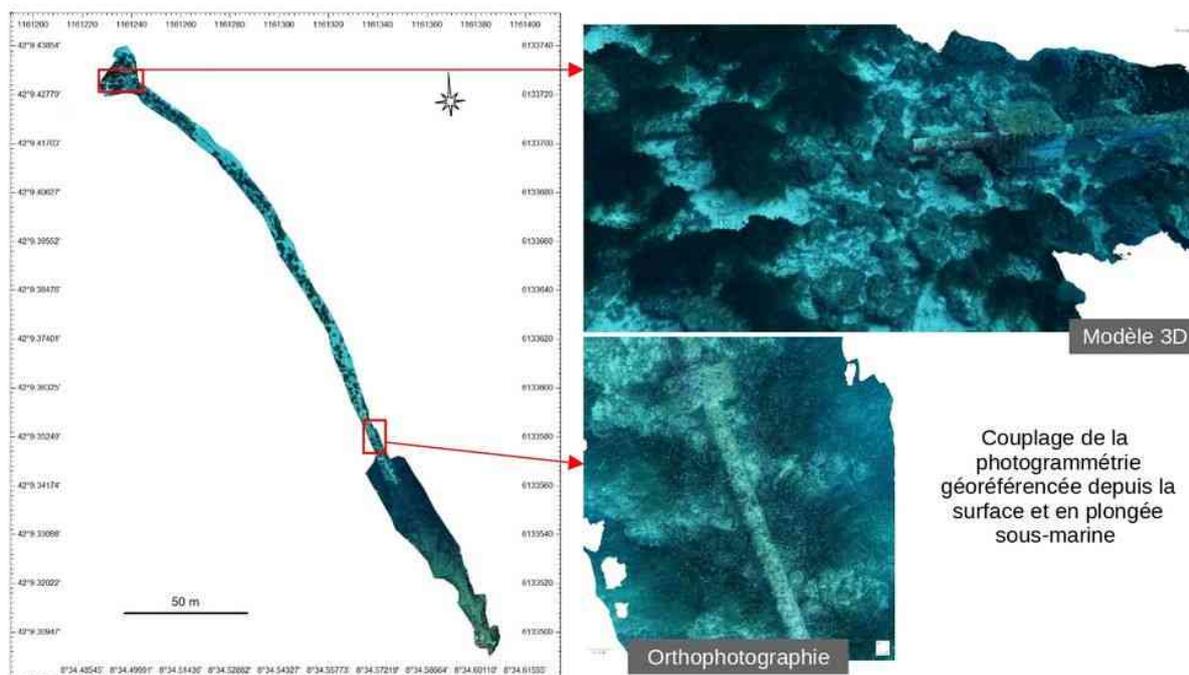


Figure 91 : Orthomosaïque du pipe sous-marin et de l'émissaire d'une STEP en Corse. Source : Seaviews.

5.3.7. Évaluation des pertes en carbone bleu

Certaines activités humaines (ancrage, chalutage) entraînant des destructions mécaniques sur les herbiers sont à l'origine de sillons de plusieurs dizaines de centimètres de profondeur sur plusieurs mètres de large dans la matre. La matre étant un lieu important de stockage du carbone sur plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'années, ces impacts anthropiques sont à l'origine de la réduction de la capacité de l'herbier à capter et à séquestrer une partie du CO₂ atmosphérique d'origine humaine.

S'il est possible d'évaluer la quantité de carbone stocké dans la matre de la posidonie, en couplant des levés acoustiques au sondeur à sédiment

Grâce à la résolution centimétrique des MNT issus de la photogrammétrie sous-marine, il est possible d'analyser avec précision les caractéristiques des sillons

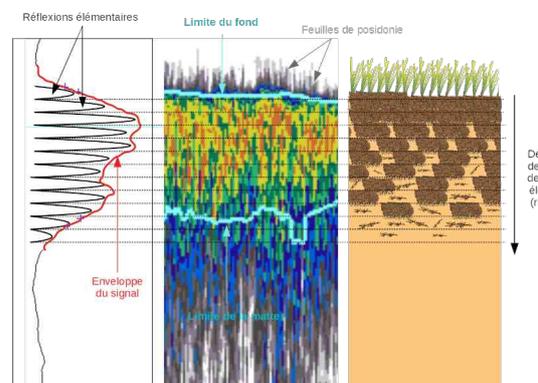


Figure 92 : Principe de mesure par acoustique active de l'épaisseur de la matre de posidonie. Source : Abadie et al. (2019).

de destruction mécanique dans la matte (Figure 93). Le MNT est analysé dans un SIG afin de calculer le volume de matte arraché en définissant un plan théorique à partir des surfaces d'herbier non détériorées à proximité. Ce type d'analyse est similaire à celui utilisé dans le cadre de mesures bathymétriques pour déterminer la quantité de matière du fond à draguer. Il est important de noter qu'une mise à l'échelle voir un géoréférencement précis est nécessaire pour réaliser de telles mesures (voir [Positionnement et géoréférencement](#)).

Le volume de matte perdu peut constituer un indicateur de la dégradation des herbiers mais n'est pas suffisant en soi pour analyser les pertes en carbone bleu. Il est impératif de mener une campagne d'échantillonnage de la matte par carottage en plongée et de mesurer en laboratoire la quantité de carbone

présente (voir [Apport aux techniques de suivi en plongée sous-marine](#)). En effet, cette dernière varie en fonction de la localisation géographique des herbiers et de l'épaisseur de la matte. De plus, les mesures photogrammétriques à l'échelle d'un ou plusieurs sillons peuvent être couplées à un levé acoustique à plus grande échelle (comme par exemple une baie ou une zone de mouillage) pour en déduire le volume de matte détruit et la quantité de carbone libérée sur l'ensemble de la zone d'étude (voir [Couplage avec des méthodes de cartographie acoustique](#)).

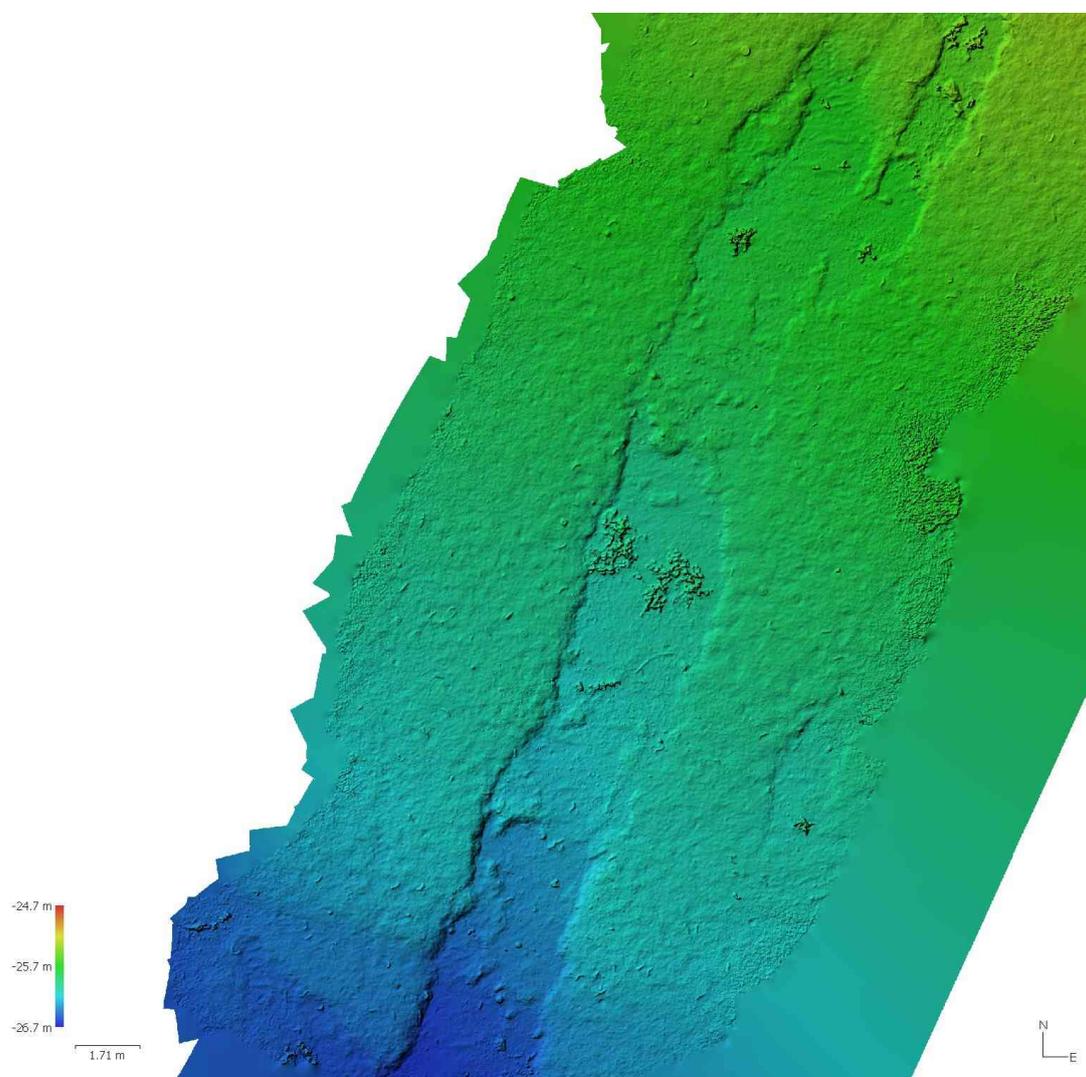


Figure 93 : Identification d'une trace d'ancre dans la matte de posidonie sur un MNT photogrammétrique. Source : Seaviews (2021).

5.3.8. Structure tridimensionnelle des herbiers

La cartographie des herbiers de posidonie et des autres biocénoses marines est le plus souvent représentée en deux dimensions pour des études par une approche surfacique et/ou paysagère. Cependant, les structures formées par la posidonie (tombants de matre, canopée, matre morte) ont une importante composante verticale qui forme un paysage en trois dimensions à la forme complexe (Figure 94). Sa représentation en deux dimensions induit donc une simplification d'analyse et par extension une perte d'information importante quant à la fonction et à la réponse de cette biocénose à des perturbations (Abadie, 2016).

Les modèles 3D issus de la photogrammétrie sous-marine offrent un fort potentiel pour le développement d'outils paysagers de gestion. L'effet de bordure prend alors une dimension verticale avec notamment l'écotone entre la canopée de l'herbier et la colonne d'eau (Figure 95). De même les tombants de matre ne sont plus de simples passages du substrat végétalisé au sédiment nu mais un véritable mur limitant le déplacement de certains organismes marins.

D'une façon concrète, quelles sont les métriques pertinentes lorsque l'on souhaite étudier une cartographie en trois dimensions d'un herbier à *P. oceanica* ? Dans un premier temps il est logique de transposer les indices paysagers classiques utilisés pour des cartographies en deux dimensions (Hoechstetter et al. 2008, Wu et al. 2012). Ainsi, le nombre d'intermatres, la longueur et leur distance l'une par rapport à l'autre de

même que leur classification seront toujours des métriques pertinentes. Il est ensuite nécessaire d'identifier les paramètres «verticaux» d'un herbier à *P. oceanica* fournissant une information utile à la gestion du paysage (Tableau 5). L'étape suivante nécessite d'automatiser le calcul de ces indices en développant des outils d'information géographique spécifiques. Il est ensuite primordial de tester la pertinence de ces métriques à grande échelle sur des sites géographiquement espacés le long des côtes de Méditerranée.



Figure 95 : Les modèles 3D offrent de nombreuses possibilités d'analyse. La canopée des herbiers de posidonie peut ainsi faire l'objet d'analyses volumique afin d'évaluer sa capacité à assurer sa fonction d'habitat.

Il est intéressant de noter que l'analyse de métriques tridimensionnelles s'appliquent également à des alternances d'habitats complexes dont font parfois partie les herbiers de posidonie. C'est notamment le cas des herbiers sur roche qui sont souvent très morcelés et qui côtoient parfois des substrats sédimentaires.

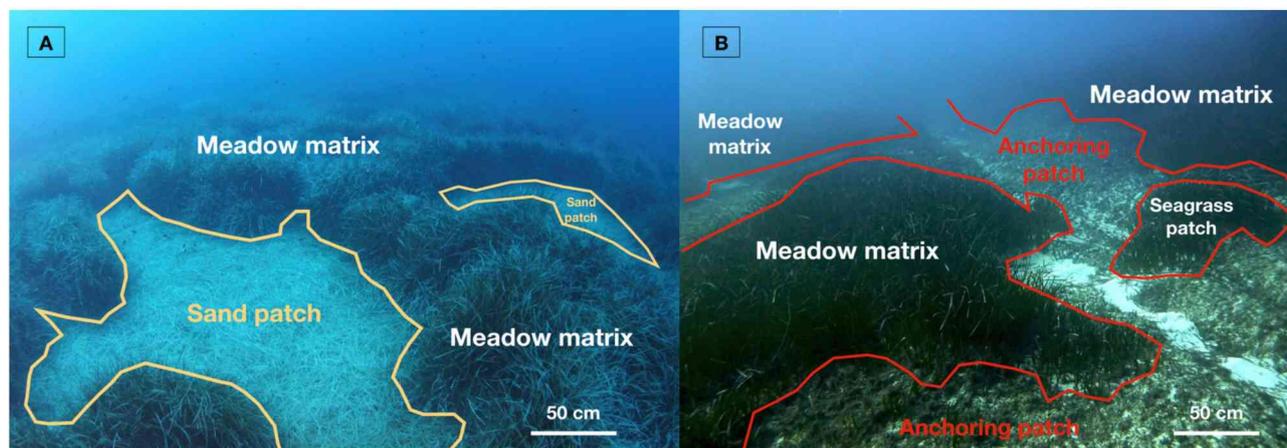


Figure 94 : Deux paysages à *P. oceanica* avec des structures 3D contrastées. A) un paysage naturel avec des taches de sable d'origine naturelle ; B) un paysage impacté par l'ancrage intensif générant des surfaces de matre morte. Source : Abadie et al. 2019).

Tableau 5 : Exemples de métriques tridimensionnelles descriptives de l'état d'un herbier de posidonie.

Nom de la métrique	Unité	Description	Intérêt pour la conservation
Hauteur de la canopée	cm	Hauteur des patchs formés par la plante. Cette mesure ne correspond pas à la longueur réelle des feuilles du fait de leur courbure et de leur mouvement dû à l'hydrodynamisme. Elle varie significativement de façon saisonnière.	La hauteur de la canopée détermine la capacité d'un herbier à jouer son rôle de nurserie. Une faible valeur ou sa diminution peu indiquer l'influence d'un phénomène naturel ou anthropique sur la plante au niveau physiologique
Hauteur du tombant de matre	cm	Hauteur de la partie érodée des intermattes naturelles formant une bordure abrupte et verticale. La hauteur du tombant n'est pas homogène sur l'ensemble de la bordure.	Les tombants de matre sont des formations biologiques anciennes parfois âgées de plusieurs centaines d'années permettant d'étudier des couches de stockage de carbone autrement inaccessibles.
Hauteur totale de la bordure	cm	Hauteur de la canopée additionnée à la hauteur du tombant de matre.	Une bordure d'herbier est constituée de plusieurs compartiments de natures différentes abritant des communautés contrastées d'organismes.
Hauteur moyenne de la bordure	cm	La hauteur moyenne de la bordure comprend la hauteur de la canopée et la hauteur du tombant de matre. Une hauteur moyenne est calculée pour chaque patch ou type de patch.	La hauteur de la bordure influence le déplacement de nombreux organismes benthique. Elle peut représenter un obstacle ou un abris selon que ces derniers sont des proies ou des prédateurs.
Surface de la bordure	m ²	La surface de la bordure comprend sa hauteur et sa longueur totale. La longueur de la bordure au niveau du substrat et celle du sommet de la canopée sont considérées comme égales.	La bordure est le lieu de contact entre deux habitats distincts. Plus cette surface de contact est grande, plus le nombre d'interactions entre les organismes marins est important.
Volume de l'intermatte	m ³	Le volume de l'intermatte intègre la surface du substrat et la hauteur totale de la bordure.	Les phénomènes verticaux se déroulant au sein des intermattes (e.g. flux de particules) en font un espace particulier donc l'importance du volume détermine la distribution des espèces benthiques et pélagiques tels que les juvéniles de téléostéens.
Volume de la canopée	m ³	Le volume de la canopée intègre la surface de l'herbier vivace avec la hauteur de la canopée.	La canopée est une structure de refuge et de protection pour de nombreuses espèces adultes et juvéniles. La capacité de la canopée à remplir cette fonction est directement liée à son volume.
Volume des traces anthropiques	m ³	Le volume des traces de destruction d'origine humaine clairement identifiées (ancrage, chalutage) et des déchets de très structures humaines de grandes tailles.	Cette métrique permet de quantifier les portions d'herbier impactées par les activités humaines et d'informer sur la proportion du substrat qui est artificialisée.

l'évolution des techniques d'analyse des produits photogrammétriques (orthophotographies et modèles 3D) devrait fournir dans un futur proche des informations

sur un plus grand nombre de compartiments fonctionnels des écosystèmes de Méditerranée.

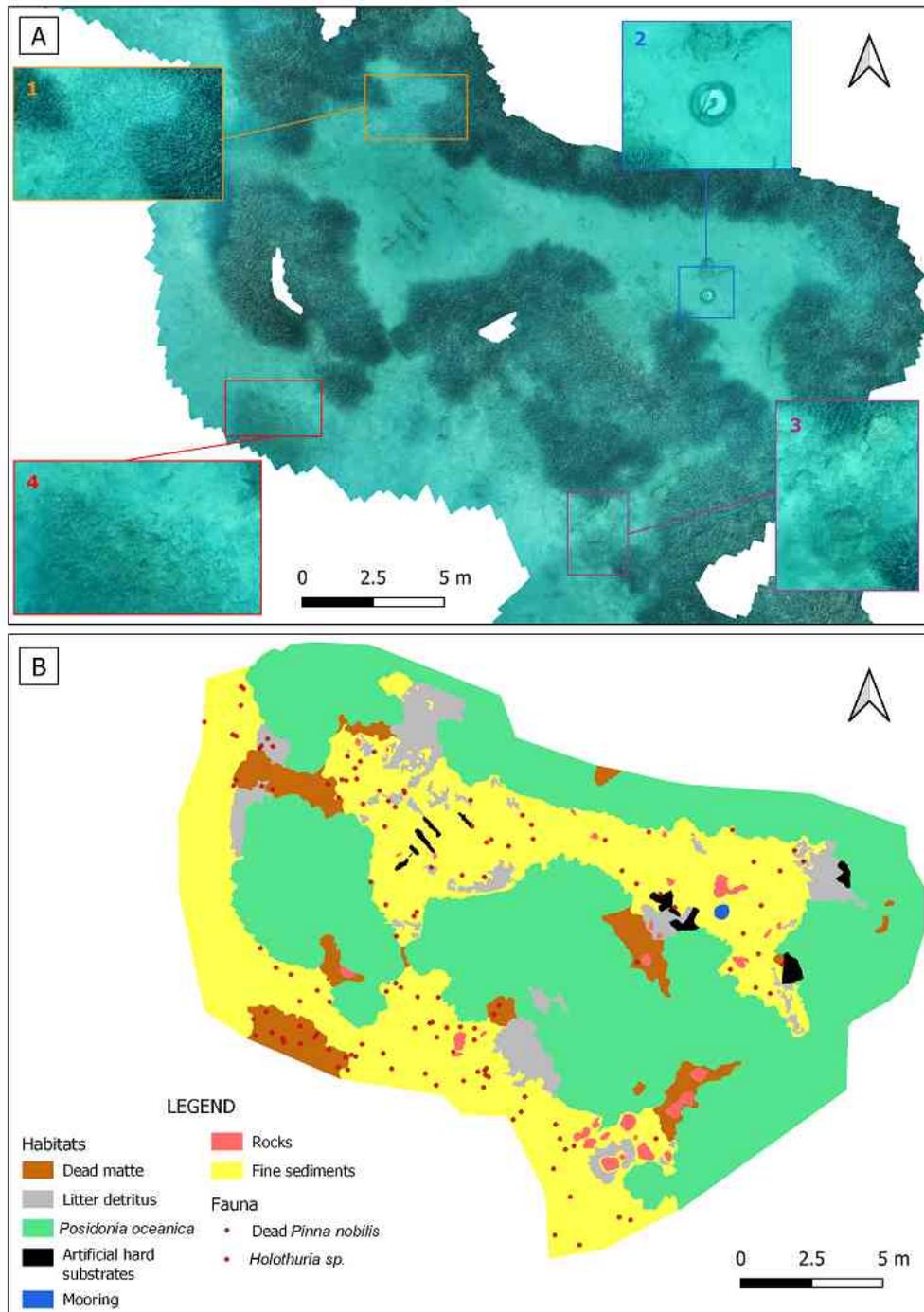


Figure 97 : A) Orthophotographie d'un herbier à *P. oceanica* et détection des différents habitats (1 : litière de feuilles mortes ; 2 : corps-mort ; 3 : roche ; 4 : matre morte). B) Cartographie des habitats marins et localisation des holothuries et des grandes nacrés détectées. Source : Abadie et al. (2020).

Chapitre 6

Comparaison et

interactions avec d'autres

méthodes de suivi

La photogrammétrie sous-marine peut être employée seule pour le suivi des herbiers de posidonie. Cependant, elle constitue également un outil complémentaire à des techniques d'observation et de cartographie plus classiques comme la plongée sous-marine et l'acoustique (active ou passive). Il est question dans ce chapitre de comparer les différentes techniques existantes de suivi des herbiers et d'y positionner la photogrammétrie sous-marine qui est une technique relativement neuve au regard des autres méthodes plus classiques. Le couplage avec d'autres techniques est également abordé.

6.1. Comparaison des techniques de cartographie

Un large choix de techniques de cartographie sont aujourd'hui disponibles pour réaliser des suivis d'herbiers de posidonie. Selon les besoins plusieurs caractéristiques sont à prendre en compte ([Tableau 6](#)) :

- La précision de positionnement requise : dans le cadre de suivi de l'évolution de la position de la limite des herbiers une grande précision de positionnement (de l'ordre du centimètre) est nécessaire au vue de la faible croissance horizontale de la plante (quelques centimètres par an). Certaines techniques comme le sonar à balayage latéral tracté ne sont ainsi pas adaptées à ce type de suivi ;
- La profondeur du site d'étude : les herbiers de posidonie ne se développant pas au-delà d'une quarantaine de mètres dans de bonnes conditions, il n'est pas nécessaire d'employer des moyens d'observation lourds pour les cartographier. En revanche, les données optiques de type image aérienne ou satellitaire ne permettent généralement pas de détecter clairement la limite des herbiers au-delà d'une vingtaine de mètres dans de bonnes conditions ;
- La résolution de la cartographie : selon l'étendue de la zone d'étude et le degré de finesse d'analyse requise de l'évolution de la limite des herbiers, il n'est pas toujours pertinent de requérir une résolution centimétrique des cartographies, cette dernière se traduisant souvent par des fichier de grande

taille difficiles à échanger et à exploiter. Une résolution importante permet cependant de détecter des processus (comme la fragmentation des herbiers) ou des espèces fixées non-visible à des résolutions moindres. Une forte résolution est appropriée pour des zones d'étude de petite taille (de l'ordre de quelques hectares) ;

- Le « rendement cartographique » ou la surface d'acquisition de données levée en un jour : elle dépendra fortement pour les techniques acoustiques de la profondeur et de la morphologie du site d'étude tandis que pour les images aériennes et satellitaires cela n'aura aucune incidence. En photogrammétrie cela dépendra de plusieurs facteurs dont notamment la profondeur du site et la technique employée pour acquérir les photographies (plateforme de surface, en plongée sous-marine) ;
- Le coût journalier de l'acquisition des données : le prix varie énormément d'une technique à l'autre du fait des moyens à mettre en œuvre pour acquérir les données. Certaines nécessitent l'emploi de véhicules (navires, avions) requérant du personnel qualifié (pilote, opérateur sonar, opérateur drone) et du matériel de pointe onéreux (sondeur multifaisceaux, système de positionnement). Du prix journalier dépendra également la surface totale cartographiée ainsi que la fréquence des levés de données durant le suivi.

La photogrammétrie sous-marine se présente comme étant la technique de cartographie la plus résolue avec un coût journalier relativement bas ([Tableau 6](#)). La plage de profondeur dans laquelle se développent les herbiers de posidonie (de 0 m à 40 m) autorise l'emploi de plusieurs techniques d'acquisition d'images. Sa principale limite réside dans la taille réduite des zones cartographiées.

Tableau 6 : Comparatif des caractéristiques des techniques de cartographie des herbiers de posidonie. Les coûts sont mentionnés à titre d'ordre de grandeur et varient fortement pour chaque technique en fonction des moyens employés et des caractéristiques du site d'étude.

Technique	Type de données	Précision de positionnement	Profondeur max.	Résolution	Surface journalière cartographiée	Coût journalier
Photogrammétrie sous-marine	Optique	De centimétrique à métrique	Pas de limite dans le cas des herbiers de posidonie	De millimétrique à centimétrique	De l'ordre de l'hectare	De 1 000 à 3 000 € (dépend de la technique d'acquisition des photos)
Images aériennes par drone	Optique	Centimétrique	20 m (dépend de la turbidité de l'eau)	Centimétrique	De l'ordre du kilomètre carré	De 1 000 à 2 000 €
Images aériennes par avion	Optique	De centimétrique à métrique	20 m (dépend de la turbidité de l'eau)	De centimétrique à décimétrique	Plusieurs dizaines de kilomètres carrés	De l'ordre de 10 000 €
Images satellitaires	Optique	De centimétrique à métrique	20 m (dépend de la turbidité de l'eau)	De décimétrique à décamétrique	Plusieurs centaines de kilomètres carrés	Dépend de la source de données
Sondeur multifaisceaux	Acoustique	Centimétrique	Pas de limite	Décimétrique	Plusieurs kilomètres carrés	4 000 €
Sonar à balayage latéral tracté	Acoustique	Décamétrique	Pas de limite dans le cas des herbiers de posidonie	Décimétrique	Plusieurs kilomètres carrés	2 500 €

6.2. Télémétrie acoustique et photogrammétrie

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

La comparaison des deux méthodes sur quatre années de suivi (2016-2019), dont une année avec un retour sur les mêmes sites (2016/2019), montre que la télémétrie acoustique et la photogrammétrie sont deux méthodes qui permettent de cartographier les herbiers et de suivre l'évolution de la limite inférieure dans le temps. Chacune d'entre elles présente des avantages et des inconvénients en termes d'acquisitions et de rendus, qui sont résumés dans le [Tableau 7](#).

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

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

Tableau 7 : Avantages et inconvénients en termes d'acquisitions et de rendus pour les méthodes de télémétrie acoustique et de photogrammétrie pour la cartographie des herbiers de posidonie.

	Avantages	Inconvénients
Télémétrie acoustique	<p>Cartographie au droit des faisceaux par le pointeur acoustique</p> <p>Temps court pour télécharger les données et produire la cartographie sous SIG</p> <p>Stockage facilité par un poids des données réduit</p>	<p>Installation et acquisition longues</p> <p>Résolution de la cartographie dépend du plongeur</p> <p>Risques d'interférences avec l'émission d'autres bruits sous-marins</p> <p>Cartographie non exhaustive sur les faisceaux isolés et petites taches</p> <p>Soumis à Interprétation</p> <p>Résultat en 2 dimensions</p>
Photogrammétrie	<p>Acquisition courte « Photographie » à un instant t de l'herbier, limitant l'interprétation de la donnée</p> <p>Cartographie exhaustive d'un herbier morcelé, de faisceaux isolés et petites taches</p> <p>Possibilité d'acquisition sur une grande surface</p> <p>Modèle en 3 dimensions</p>	<p>Limite moins précise en cas de longues feuilles car difficultés à distinguer la base des faisceaux</p> <p>Ne permet pas de cartographier l'intérieur d'un herbier continu (Manque de points d'accroche pour reconstruire le modèle dans l'herbier dense)</p> <p>Temps de calcul</p> <p>Matériel d'acquisition coûteux</p>

Le [Tableau 8](#) fournit la et les méthodes de suivi qui semble(nt) la (les) plus adaptée(s) en fonction de la morphologie du site.

Tableau 8 : Méthode préconisée entre télémétrie acoustique et photogrammétrie pour la cartographie des herbiers.

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

6.3. Couplage avec des méthodes de cartographie acoustique

6.3.1. Avec l'acoustique active

La photogrammétrie ne permettant pas actuellement de cartographier les fonds marins à grande échelle (plusieurs kilomètres carrés), il est impératif d'employer des méthodes de cartographie par acoustique active (sondeur multifaisceaux, sonar à balayage latéral) pour réaliser cet objectif. Cependant, ce que perd la photogrammétrie en termes de surface couverte, elle le gagne en termes de résolution et de qualité des données, permettant notamment de lever l'incertitude sur la nature des fonds. Les deux

techniques peuvent donc être couplées afin d'obtenir une cartographie globale à grande échelle des fonds marins d'une résolution décimétrique tout en disposant sur des petites zones d'intérêt de données d'une résolution centimétrique.

Les applications sont nombreuses et notamment dans le domaine du suivi des herbiers sous-marins couvrant de larges surfaces comme la posidonie. Cette fusion de données est particulièrement adaptée à l'étude de l'évolution de la limite des herbiers que ce soit sur des structures naturelles (intermatte sableuses, limite profonde et supérieure) ou sur des intermatte d'origine humaine (ancrage, chalutage, aquaculture, émissaire de station d'épuration).

Par exemple, dans le cadre du suivi de l'évolution surfacique et volumique des traces d'ancrage et de l'évaluation des pertes en carbone stocké dans la matte (voir [Étude de l'impact de l'ancrage](#) et [Évaluation des pertes en carbone bleu](#)), il est possible d'obtenir une vision à grande échelle en couplant la photogrammétrie à un levé acoustique. Il est intéressant de noter que,

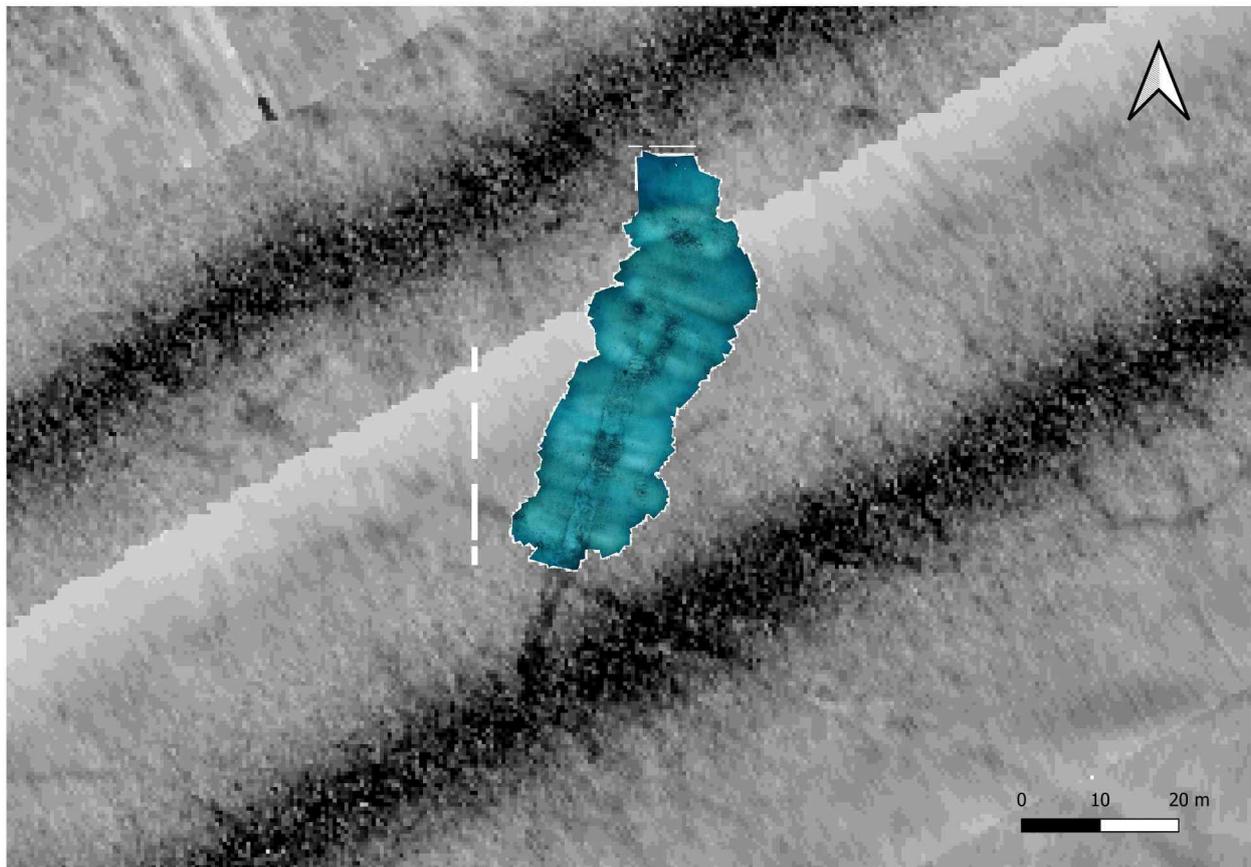


Figure 98 : Fusion de l'imagerie de réflectivité du fond d'un sondeur multifaisceaux avec l'orthophotographie d'une trace d'ancrage dans de la matte de posidonie.

lorsque des techniques de positionnement précises sont employées (voir [Positionnement et géoréférencement](#)), les produits acoustiques et photogrammétriques se superposent parfaitement ([Figure 98](#)) ce qui améliore fortement la qualité des informations spatiales extraites. Lorsqu'elles sont prises séparément ces deux techniques ne permettent pas une telle échelle et une telle précision d'évaluation de l'état de santé de l'herbier.

La fusion des données issues de la photogrammétrie et de l'acoustique active est également utile pour étudier d'autres biocénoses marines en deux dimensions et plus particulièrement les zones d'interface entre différents habitats comme les surfaces d'alternance par petits fonds entre la posidonie, le sable, et la roche ou encore les zones littorales artificialisées comme les digues portuaires qui côtoient souvent des habitats benthiques naturels.

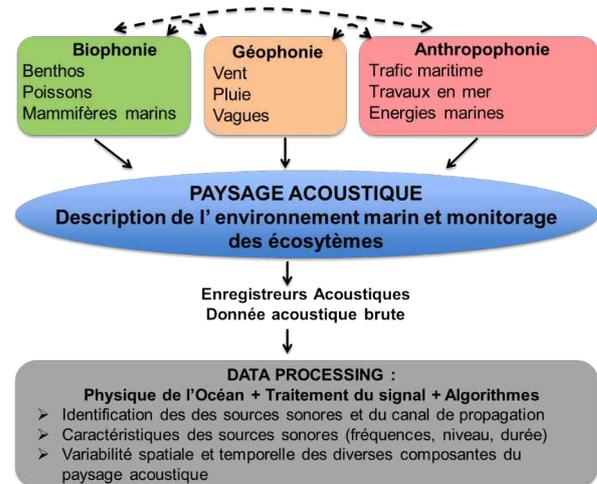


Figure 99 : Les différentes composantes du paysage acoustique sous-marin et leur traitement. Source : TBM Environnement.

6.3.2. Avec l'acoustique passive

Le suivi des habitats marins par acoustique passive permet d'obtenir des informations sur la biodiversité et leur localisation en étudiant la signature acoustique des organismes présents (biophonie). Il est également possible de détecter les activités humaines émettrices de bruit (anthropophonie) et d'en étudier l'impact sur la vie marine, ainsi que de prendre en compte les émissions sonores des éléments climatiques (géophonie). L'ensemble de ces paramètres forment un paysage acoustique qui peut être étudié de façon spatiale et temporelle pour déterminer l'état écologique d'une zone d'étude ([Figure 99](#)).

La localisation spatiale des données issues de l'acoustique passive permet une bonne complémentarité avec l'information structurale en trois dimensions obtenue à l'aide de la modélisation par photogrammétrie. La fusion des deux types de données permet ainsi de prendre en compte la complexité tridimensionnelle des habitats marins lors de suivis de la biodiversité benthique et pélagique. Cela permet également de faire correspondre la signature acoustique d'une espèce donnée à un habitat sans doute sur sa nature et son état grâce au photoréalisme des textures des modèles 3D issus de la photogrammétrie.

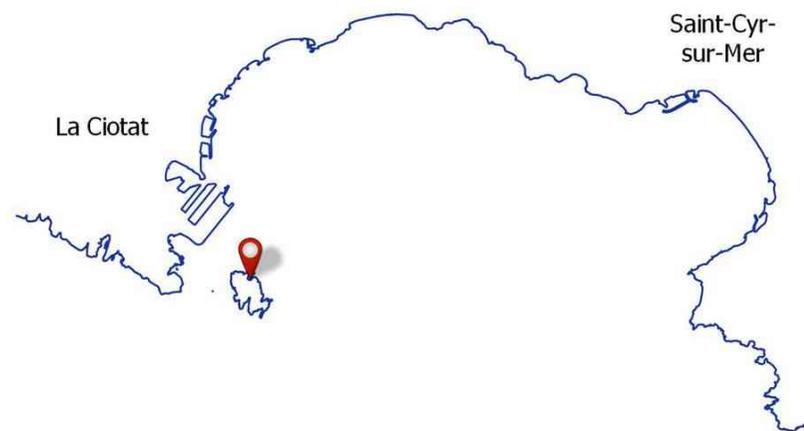
6.4. Apport aux techniques de suivi en plongée sous-marine

Comme mentionné plus haut, la photogrammétrie sous-marine dispose d'une importante capacité de détection des habitats marins, de certaines espèces sessiles et des traces d'impact anthropiques sur les fonds marins. Cependant, cette capacité d'investigation spatialisée haute définition ne remplace pas des observations sous-marines réalisées par des plongeurs ou des ROV. Au contraire, les deux approches sont parfaitement complémentaires.

Si la photogrammétrie apporte une structuration bidimensionnelle et tridimensionnelle d'une aire d'étude, elle apporte une information quantitative et qualitative réduite quant à la biodiversité présente au sein des habitats marins. La plongée scientifique permet notamment de combler ce vide de données en fournissant des informations quantitatives précises sur les poissons évoluant sur site ainsi que sur la faune et la flore benthique. Les données sous-marines récoltées en plongées manquent néanmoins fréquemment de spatialisation. C'est précisément ce point que la photogrammétrie vient améliorer en fournissant un support cartographique haute définition sur lequel positionner ses observations.

Portfolio
d'orthophotographies
sous-marines

Ile Verte La Ciotat



Site : Ile Verte - Baie de la Ciotat (13)

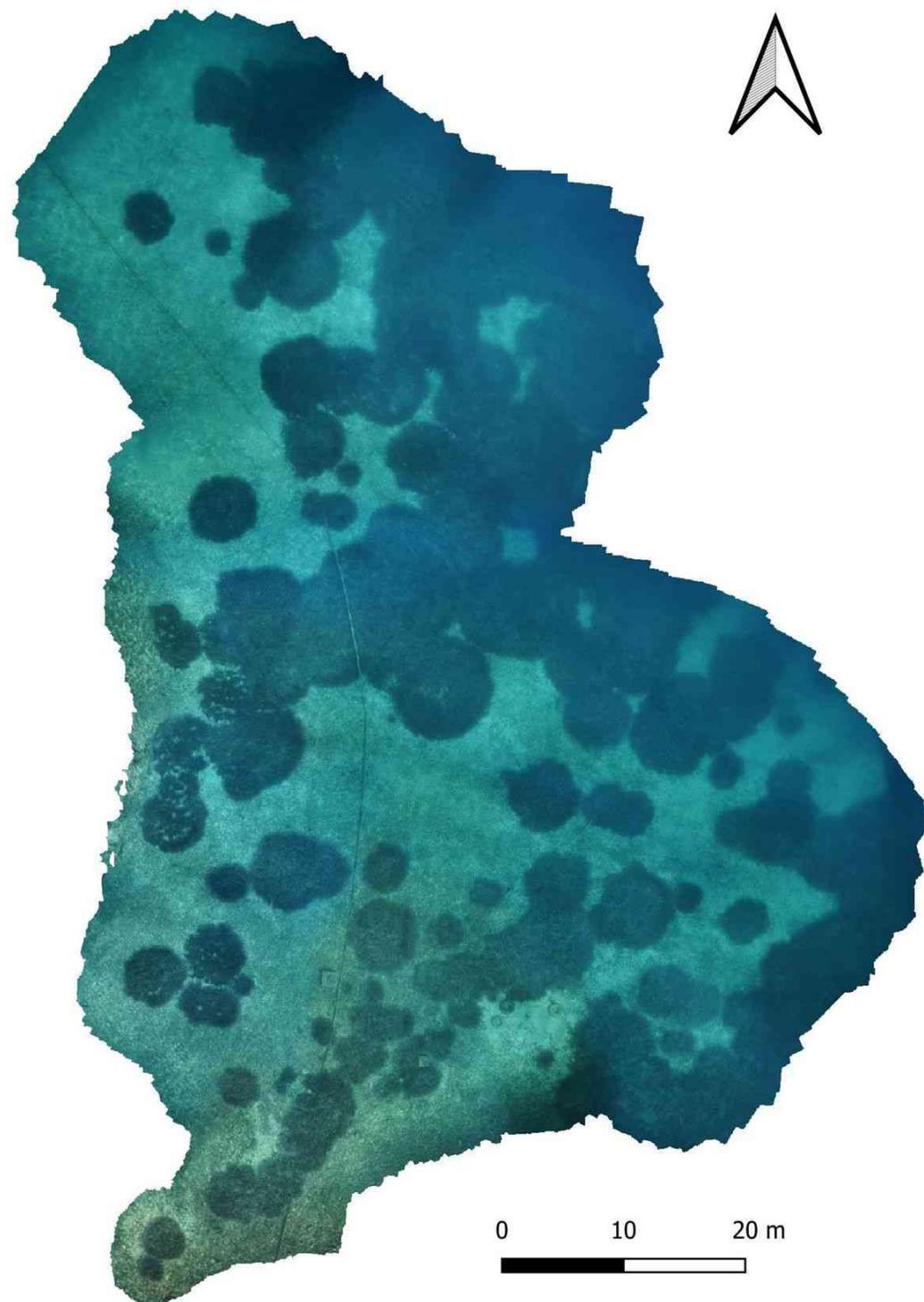
Date d'acquisition des données : octobre 2020

Technique d'acquisition : prise de vues avec une plateforme de surface et géoréférencement direct avec un GNSS RTK

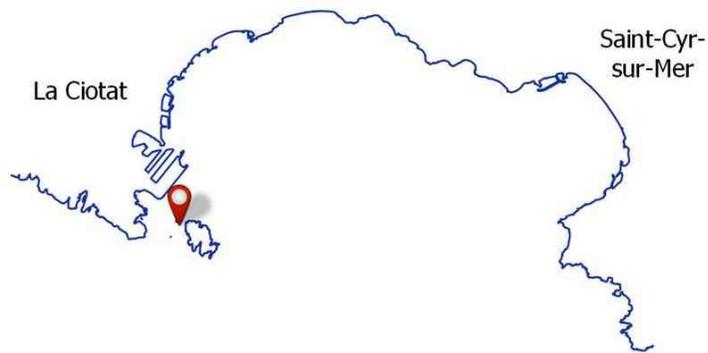
Surface cartographiée : 4 805 m²

Profondeur : de 2 m à 11 m

Particularité : une canalisation traverse des herbiers de posidonie dont certains ont une structure en atoll. Des corps-morts sont également présents



Cannonier Nord La Ciotat



Site : Canonnier du Nord - Baie de la Ciotat (13)

Date d'acquisition des données :
septembre 2018

Technique d'acquisition : prise de
vues avec une plateforme de surface
et géoréférencement direct avec un
GNSS RTK

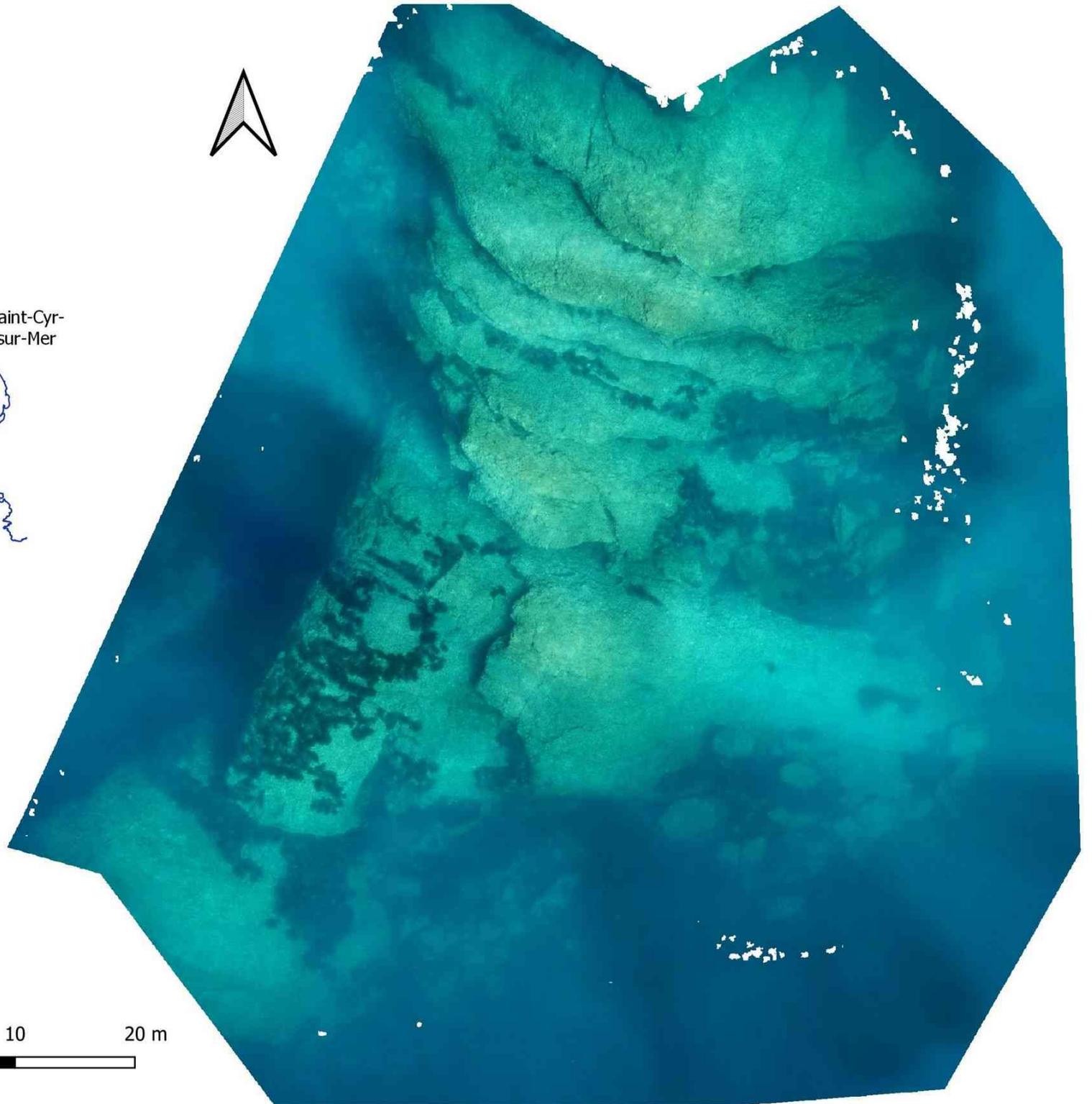
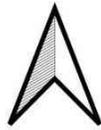
Surface cartographiée : 6 225 m²

Profondeur : de 4 m à 18 m

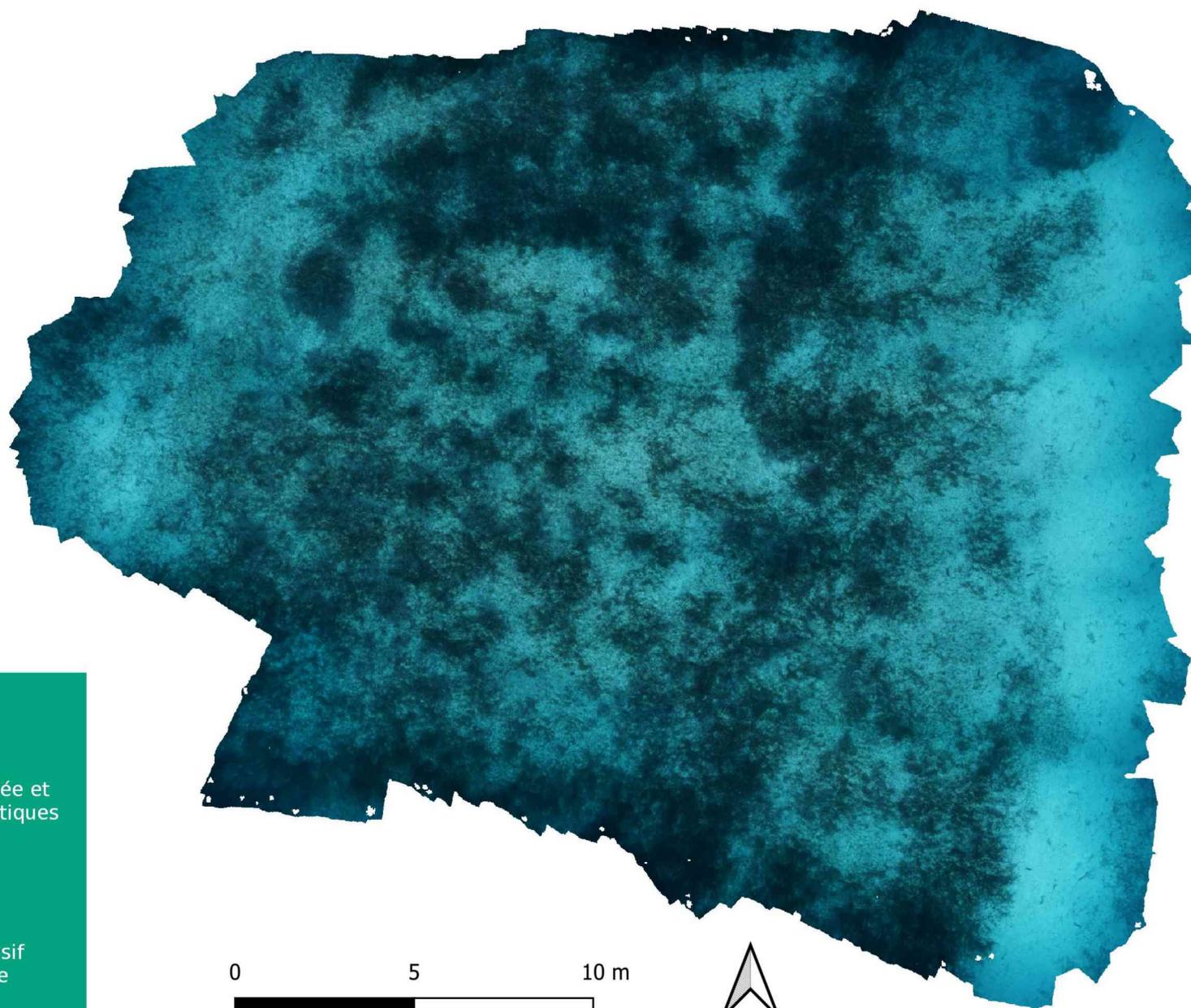
Particularité : présence d'herbiers de
posidonie sur roche

0 10 20 m

A horizontal scale bar with three segments. The first segment is black and labeled '0'. The second segment is white with a black border and labeled '10'. The third segment is white with a black border and labeled '20 m'.



Site d'ancrage intensif Calvi



Site : Baie de Calvi- Corse (2B)

Date d'acquisition des données : mars 2021

Technique d'acquisition : prise de vues en plongée et géoréférencement indirect avec des cibles acoustiques

Surface cartographiée : 696 m²

Profondeur : de 27 m à 29 m

Particularité : ce site est un lieu d'ancrage intensif dans les herbiers de posidonie par les navires de grande plaisance

0 5 10 m



Trace d'ancrage La Ciotat



Site : Baie de la Ciotat (13)

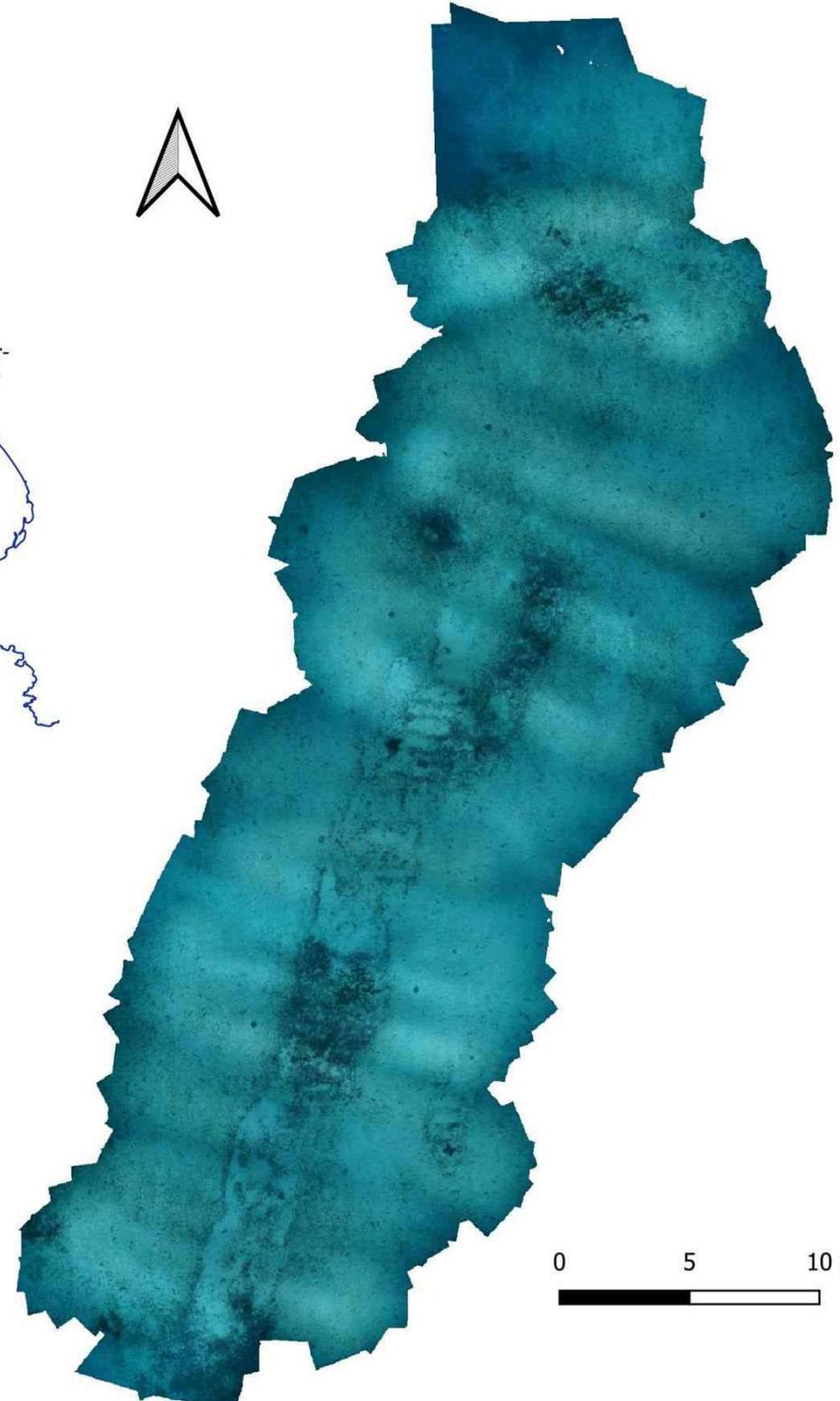
Date d'acquisition des données : mars 2021

Technique d'acquisition : prise de vues en plongée et géoréférencement indirect avec des cibles acoustiques

Surface cartographiée : 847 m²

Profondeur : de 25 m à 27 m

Particularité : ce site est un ancien lieu d'ancrage intensif de navire de grande taille dans les herbiers de posidonie. Ici il n'y a plus de canopée mais seulement de la matte morte



Trace d'ancrage La Ciotat



Site : Baie de la Ciotat (13)

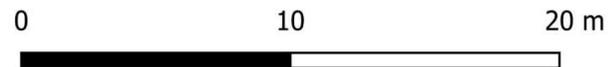
Date d'acquisition des données : juillet 2020

Technique d'acquisition : prise de vues en plongée et géoréférencement indirect avec des cibles acoustiques

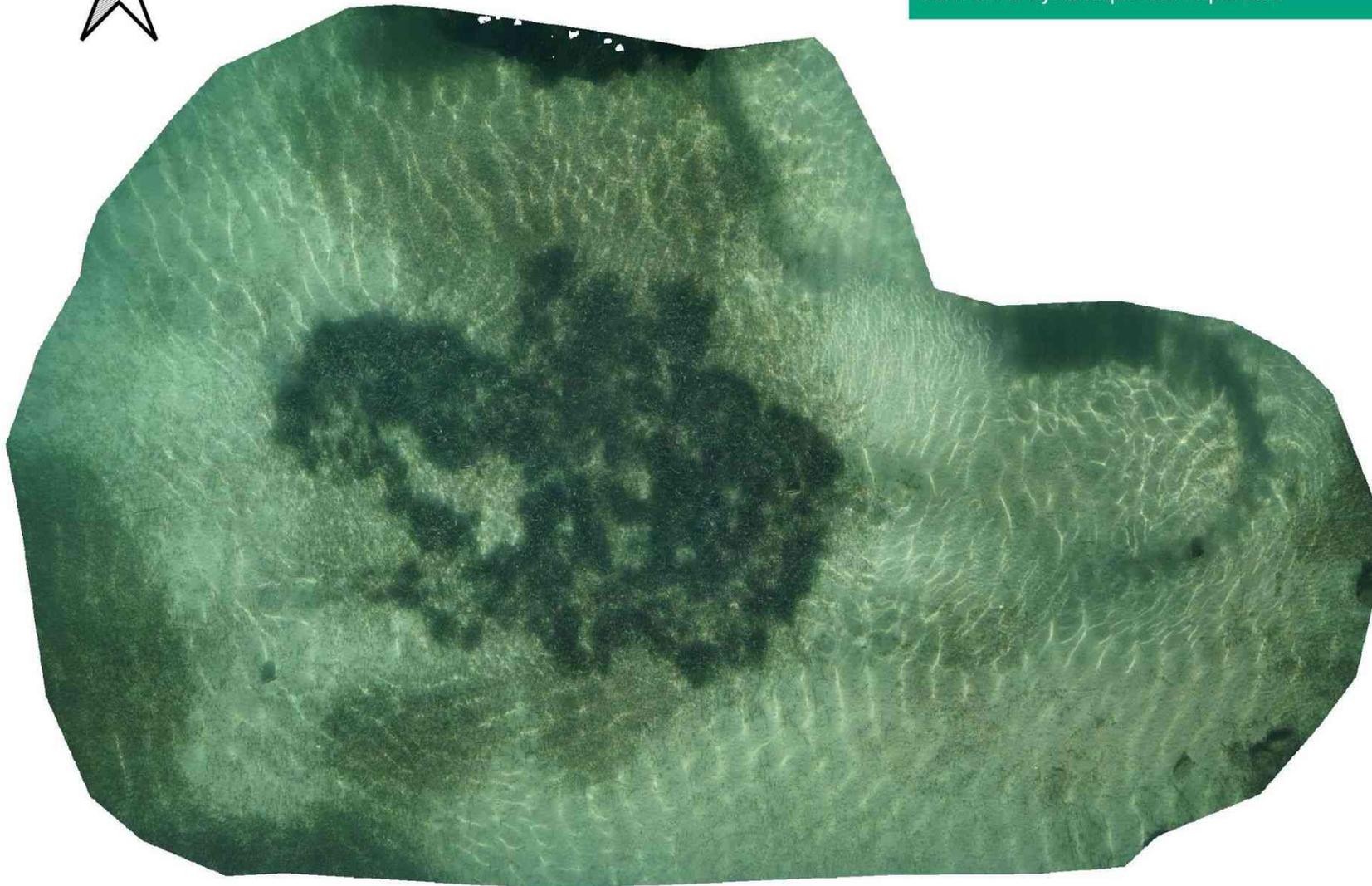
Surface cartographiée : 971 m²

Profondeur : de 23 m à 25 m

Particularité : ce site est un ancien lieu d'ancrage intensif de navire de grande taille dans les herbiers de posidonie



Atoll de posidonie Porto-Vecchio



Site : Golfe de Porto-Vecchio - Corse (2A)

Date d'acquisition des données : janvier 2022

Technique d'acquisition : prise de vues avec une plateforme de surface et géoréférencement direct avec un GNSS RTK

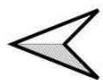
Surface cartographiée : 173 m²

Profondeur : de 1.5 m à 2 m

Particularité : les atolls de posidonie sont des structures très particulières dont le suivi de la dynamique est important



Digue portuaire La Ciotat



0 10 20 m



Site : Digue du port de plaisance - Baie de la Ciotat (13)

Date d'acquisition des données : septembre 2017

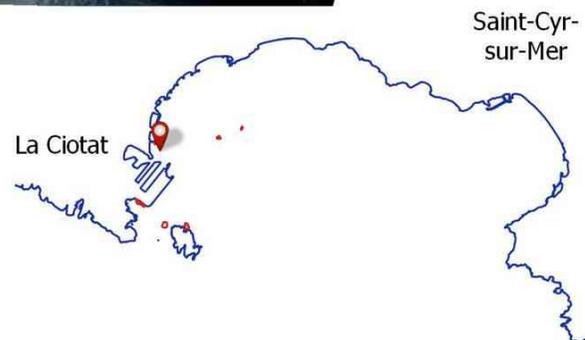
Technique d'acquisition : prise de vues sous-marines avec une plateforme de surface et géoréférencement direct avec un GNSS RTK. Partie terrestre acquise avec un drone aérien

Surface cartographiée : 7 746 m²

Profondeur : de 0 m à 9 m

Altitude : de 0 à 8 m

Particularité : des herbiers de posidonie sont souvent présents à proximité des digues portuaires en Méditerranée



Limite d'herbier Ile Rousse

Site : Ile Rousse - Corse (2B)

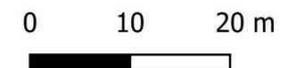
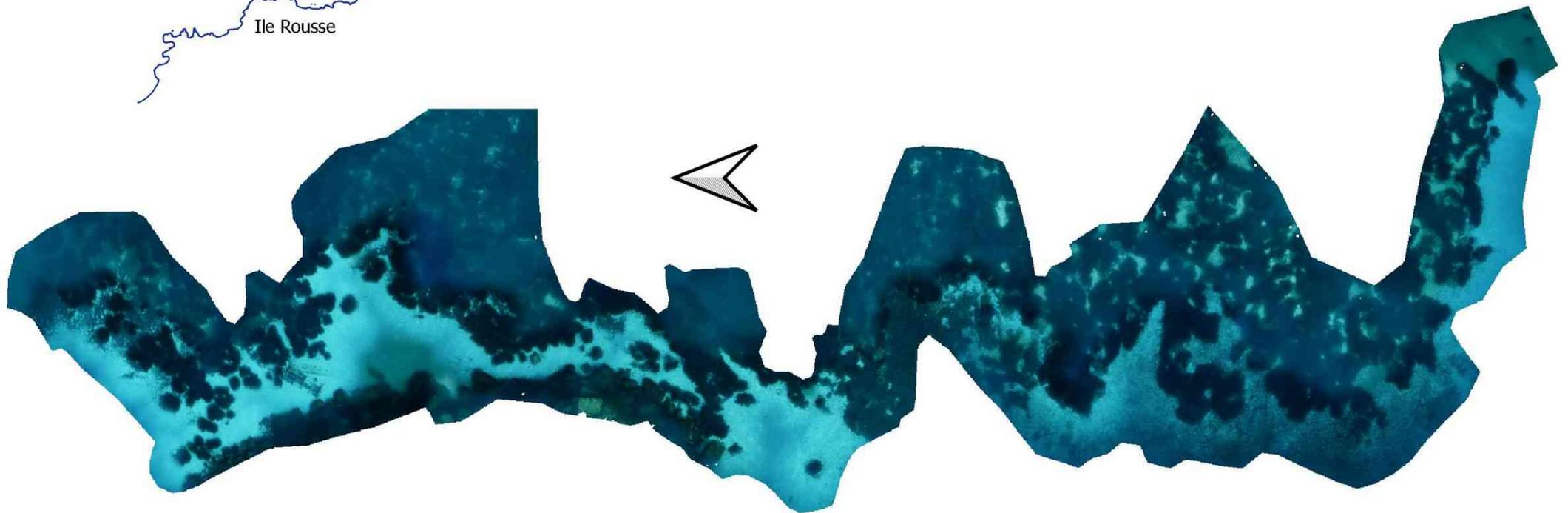
Date d'acquisition des données : mars 2021

Technique d'acquisition : prise de vues avec une plateforme de surface et géoréférencement direct avec un GNSS RTK et complément de photographies en plongée sous-marine

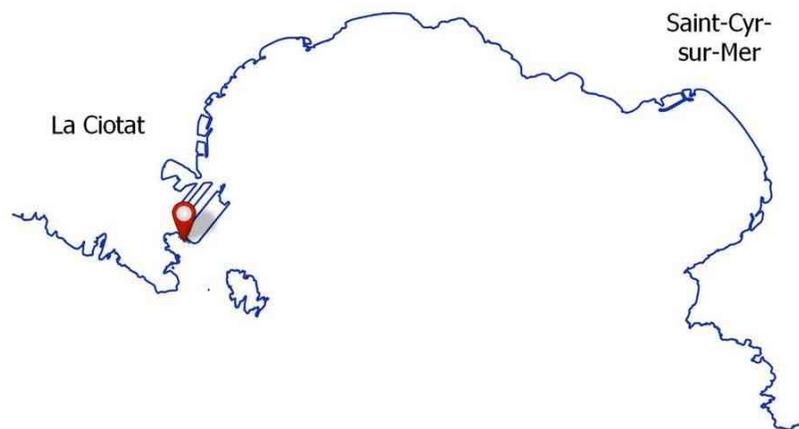
Surface cartographiée : 6 497 m²

Profondeur : de 6 m à 17 m

Particularité : cet herbier de posidonie est situé à proximité immédiate du port de commerce de l'Ile Rousse



Limite d'herbier La Ciotat



Site : calanque du Mugel - Baie de la Ciotat (13)

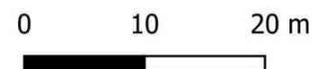
Date d'acquisition des données : mai 2021

Technique d'acquisition : prise de vues avec une plateforme de surface et géoréférencement direct avec un GNSS RTK

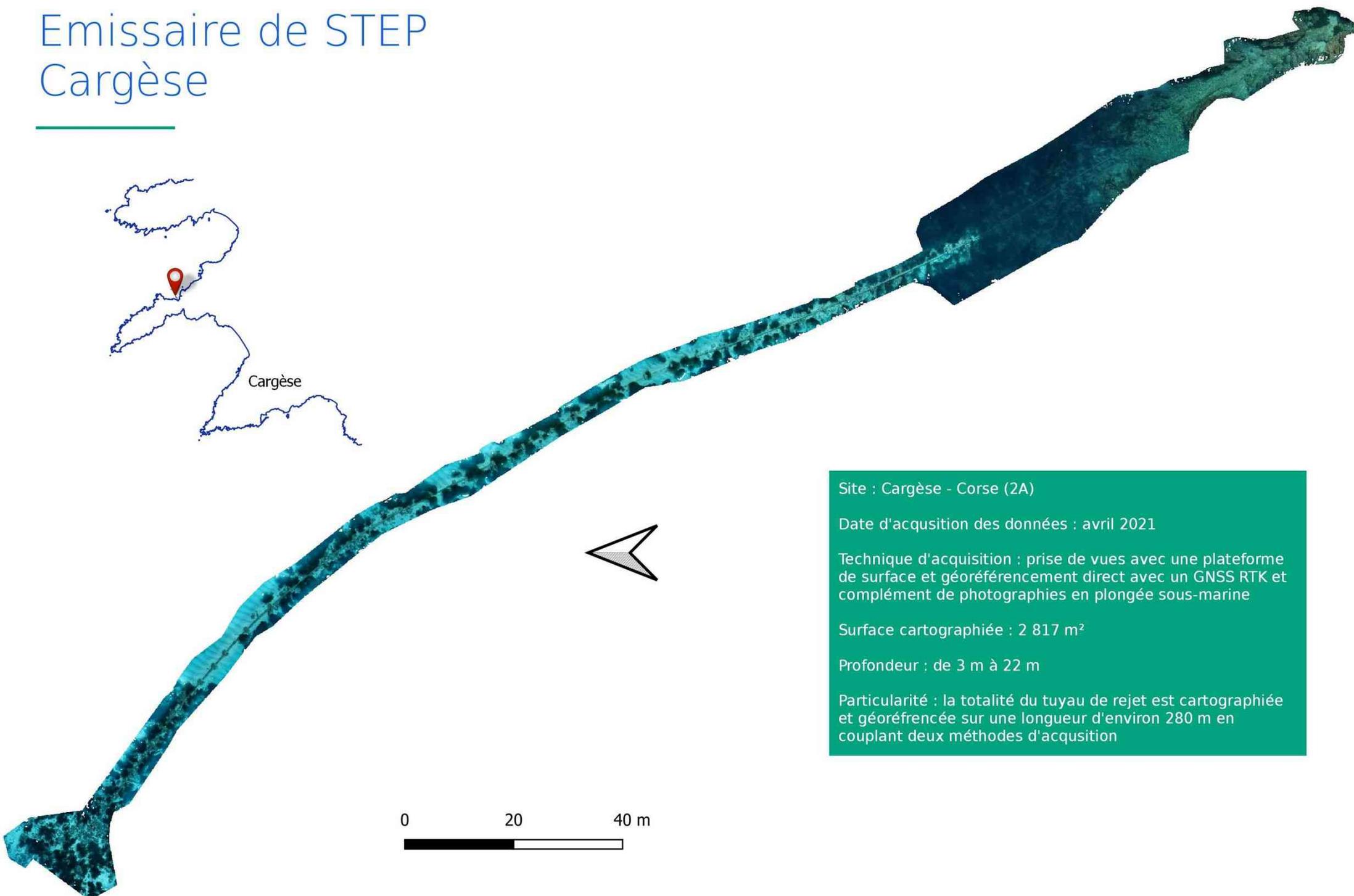
Surface cartographiée : 5 537 m²

Profondeur : de 3 m à 11 m

Particularité : ce site naturel est situé à proximité de la digue d'un chantier naval



Emissaire de STEP Cargèse



Site : Cargèse - Corse (2A)

Date d'acquisition des données : avril 2021

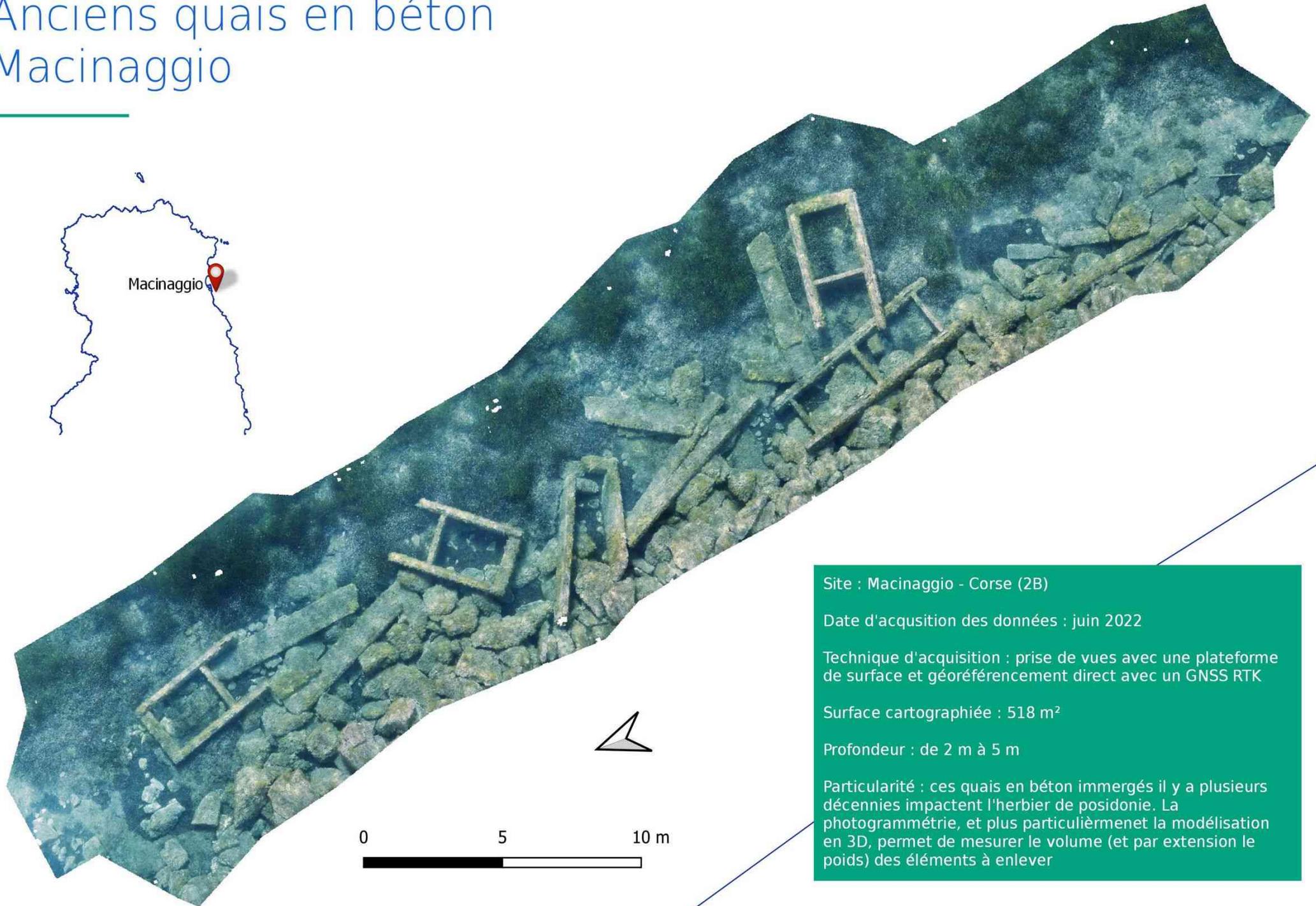
Technique d'acquisition : prise de vues avec une plateforme de surface et géoréférencement direct avec un GNSS RTK et complément de photographies en plongée sous-marine

Surface cartographiée : 2 817 m²

Profondeur : de 3 m à 22 m

Particularité : la totalité du tuyau de rejet est cartographiée et géoréférencée sur une longueur d'environ 280 m en couplant deux méthodes d'acquisition

Anciens quais en béton Macinaggio



Site : Macinaggio - Corse (2B)

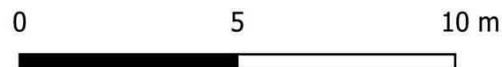
Date d'acquisition des données : juin 2022

Technique d'acquisition : prise de vues avec une plateforme de surface et géoréférencement direct avec un GNSS RTK

Surface cartographiée : 518 m²

Profondeur : de 2 m à 5 m

Particularité : ces quais en béton immergés il y a plusieurs décennies impactent l'herbier de posidonie. La photogrammétrie, et plus particulièrement la modélisation en 3D, permet de mesurer le volume (et par extension le poids) des éléments à enlever



Références

bibliographiques

- Abadie A 2016. Étude des intermattes des herbiers à *Posidonia oceanica*. Analyse à différentes échelles spatiales de la structure des paysages sous-marins. Université de Liège, Université de Corse. 342p
- Abadie A 2020. La photogrammétrie sous-marine. *Sea(e)scape* 2, 66–77.
- Abadie A, Boissery P, Viala C 2020. Study of the *Posidonia oceanica* meadow's upper limit with georeferenced photogrammetry. *Life and Environment*, 70(3–4).
- Abadie A, Boissery P, Viala C. 2018a. Georeferenced underwater photogrammetry to map marine habitats and artificial structures. *Photogramm. Rec.* 33, 448–469.
- Abadie A, Bonacorsi M, Gobert S, Lejeune P, Pergent G, Pergent-Martini C 2015a. Patch types in *Posidonia oceanica* meadows around Corsica: How can we use them in seascape ecology? <https://doi.org/https://doi.org/10.7287/peerj.preprint.s.1139v1>
- Abadie A, Gobert S 2019. La plante de la mer du milieu : la posidonie. Le livre en papier.
- Abadie A, Gobert S, Bonacorsi M, Lejeune P, Pergent G, Pergent-Martini C 2015b. Marine space ecology and seagrasses. Does patch type matter in *Posidonia oceanica* seascapes? *Ecol. Indic.* 57, 435–446. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.020>
- Abadie A, Lamouret M, Viala C 2019. Cartographie de l'épaisseur de mat de herbiers à *Posidonia oceanica* en baie de Calvi. Rapport d'études. Contrat STARESO/Seaviews.
- Abadie A, Pace M, Gobert S, Borg JA 2018b. Seascape ecology in *Posidonia oceanica* seagrass meadows: Linking structure and ecological processes for management. *Ecol. Indic.* 87, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.029>
- Abadie A, Richir J, Lejeune P, Leduc M, Gobert S 2019. Structural changes of seagrass seascapes driven by natural and anthropogenic factors: A multidisciplinary approach. *Front. Ecol. Evol.* 7. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.190>
- Abadie A, Viala C 2020a. Application de la photogrammétrie subaquatique géoréférencée à l'étude des herbiers sous-marins, in: MERIGEO 2020. pp. 177–178.
- Abadie A, Viala C 2020b. Caractérisation des biocénoses benthiques à l'aide d'une cartographie fine dans la Baie de San Fiorenzu dans le Parc Naturel Marin di u Capicorsu è di l'Agriate. Rapport d'étude. Contrat OFB/Seaviews.
- Abadie A, Viala C 2017. Cartographie très haute résolution couleur par couplage photogrammétrie - SMF. Rapport d'études pour l'Agence de l'Eau RMC.
- Andromède, 2019. Surveillance de l'herbier de posidonie. Contrat Andromède Océanologie / Communautés de communes du Golfe de Saint-Tropez. 56 p.
- Astruch P, Goujard A, Belloni B, Lyonnet A, Boudouresque C 2017. Suivi des deux balisages (Nordet Sud) de la limite inférieure de l'herbier de posidonie de l'île de Port-Cros, Année 2017.
- Balletti C, Beltrame C, Costa E, Guerra F, Vernier P 2015. Underwater photogrammetry and 3D reconstruction of marble cargos shipwreck. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 40, 7.
- Balletti C, Guerra F, Tsioukas V, Vernier P 2014. Calibration of action cameras for photogrammetric purposes. *Sensors* 14, 17471–17490.
- Bennecke S, Kwasnitschka T, Metaxas A, Dullo W-C 2016. In situ growth rates of deep-water octocorals determined from 3D photogrammetric reconstructions. *Coral Reefs* 35, 1227–1239.
- Bonanno G, Orlando-Bonaca M 2020. Marine plastics: What risks and policies exist for seagrass ecosystems in the Plasticene? *Mar. Pollut. Bull.* 158, 111425.
- Boudouresque CF, Bernard G, Bonhomme P, Charbonnel E, Diviacco G, Meinesz A, Pergent G, Pergent-Martini C, Ruitton S, Tunesi L 2012. Protection and conservation of *Posidonia oceanica* meadows. RAMOGE pub., Tunis.
- Boudouresque CF, Bernard G, Pergent G, Shili A, Verlaque M 2009. Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review. *Bot. Mar.* 52, 395–418.
- Boudouresque CF, Jeudy De Grissac A, Meinesz A 1983. Relations entre la sédimentation et l'allongement des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica* dans la baie d'Elbu (Corse), in: Boudouresque CF, Jeudy De Grissac A, Olivier

- J (Eds.), International Workshop on *Posidonia oceanica* Beds. G.I.S. Posidonie, Marseille, pp. 185–191.
- Boudouresque CF, Pergent G, Pergent-Martini C, Ruitton S, Thibaut T, Verlaque M 2015a. The necromass of the *Posidonia oceanica* seagrass meadow: fate, role, ecosystem services and vulnerability. *Hydrobiologia* 781, 25–42. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2333-y>
- Boudouresque CF, Personnic S, Astruch P, Ballesteros E, Bellan-Santini D, Bonhomme P, Botha D, Feunteun E, Harmelin-Vivien M, Pergent G, Pastor J, Poggiale JC, Renaud F, Thibaut T, Ruitton S 2015b. Ecosystem-Based Versus Species-Based Approach for Assessment of the Human Impact on the Mediterranean Seagrass *Posidonia oceanica*, in: Ceccaldi, H.-J., Hénocque, Y., Koike, Y., Komatsu, T., Stora, G., Tusseau-Vuillemin, M.-H. (Eds.), *Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-Ecosystems*. Springer International Publishing, pp. 235–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13878-7_25
- Bryson M, Johnson-Roberson M, Pizarro O, Williams SB 2016. True color correction of autonomous underwater vehicle imagery. *J. F. Robot.* 33, 853–874.
- Burns JHR, Delparte D, Gates RD, Takabayashi M 2015. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ* 3, e1077.
- Charbonnel E, Boudouresque CF, Meinesz A, Bernard G, Bonhomme P, Patrone J, Kruczek R, Cottalorda JM, Bertrand MC, Foret P, Ragazzi M, Le Direach L, publ. GISP 2000. Le Réseau de Surveillance Posidonie de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Première partie: Présentation et guide méthodologique. Année 2000. Région PACA/Agence de l'Eau RMC/GIS Posidonie/CQEL 13/CQEL 83/Conseil Général 6, Marseille, France.
- Demers MCA, Davis AR, Knott NA 2013. A comparison of the impact of 'seagrass-friendly' boat mooring systems on *Posidonia australis*. *Mar. Environ. Res.* 83, 54–62. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.10.010>
- Descamp P, Ballesta L, Foulquié M 2005. Underwater acoustic positioning systems as tool for *Posidonia oceanica* beds survey. *Compte Rendus Biol.* 328, 75–80.
- Drap P, Long L 2005. Photogrammétrie et archéologie sous-marine profonde. Le cas de l'épave étrusque Grand Ribaud F. *XYZ* 103, 19–26.
- Drap P, Merad D, Mahiddine A, Seinturier J, Gerenton P, Peloso D, Boï J-M, Bianchimani O, Garrabou J 2014. In situ underwater measurements of red coral: Non-intrusive approach based on coded targets and photogrammetry. *Int. J. Herit. Digit. Era* 3, 123–139.
- Drap P, Seinturier J, Conte G, Caiti A, Scaradozzi D, Zanolli SM, Gambogi P 2008. Underwater cartography for archaeology in the VENUS project. *Geomatica* 62, 419–427.
- Fischler MA. and Bolles RC (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*.
- Förstner W, Wrobel BP (2016). *Photogrammetric computer vision*. Springer International Publishing Switzerland.
- Ganteaume A, Bonhomme P, Emery E, Hervé G, Boudouresque CF 2005. Impact sur la prairie à *Posidonia oceanica* de l'amarrage des bateaux de croisière, au large du port de Porquerolles (Provence, France, Méditerranée). *Sci. Reports Port-Cros Natl. Park* 21, 163–173.
- Giakoumi S, Halpern BS, Michel LN, Gobert S, Sini M, Boudouresque CF, Gambi MC, Katsanevakis S, Lejeune P, Montefalcone M, Pergent G, Pergent-Martini C, Sanchez-Jerez P, Velimirov B, Vizzini S, Abadie A, Coll M, Guidetti P, Micheli F, Possingham HP 2015. Towards a framework for assessment and management of cumulative human impacts on marine food webs. *Conserv. Biol.* 29, 1228–1234. <https://doi.org/10.1111/cobi.12468>
- Guilloux E 2015. Une nouvelle solution pour les métrologies sous-marines. *XYZ* 143, 40–44.
- Hoechstetter S, Walz U, Thinh NX 2008. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure-A proposal to modify the existing set of landscape metrics. *Landscape Online*, 3, 1–14.
- Holmer M, Frederiksen MS 2007. Stimulation of sulfate reduction rates in Mediterranean fish farm

- sediments inhabited by the seagrass *Posidonia oceanica*. *Biogeochem.* 85, 169–184.
- Kalantari M, Kasser M 2008. Photogrammétrie et vision par ordinateur. *XYZ* 117, 49–54.
- Kazhdan M, Bolitho, M, and Hoppe H (2006). Poisson Surface Reconstruction. page 10. The Eurographics Association.
- Kwasnitschka T, Köser K, Sticklus J, Rothenbeck M, Weiß T, Wenzlaff E, Schoening T, Triebe L, Steinführer A, Devey C 2016. DeepSurveyCam—a deep ocean optical mapping system. *Sensors* 16, 164.
- Leduc M, Fontaine Q, Gobert S, Pergent G, Abadie A, Lejeune P. 2021. *Posidonia oceanica* meadows: A unique blue carbon sink. 52nd International Liège Colloquium on Ocean Dynamics.
- Lowe DG 1999. Object recognition from local scale-invariant features, in: *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE, pp. 1150–1157.
- Madricardo F, Ghezzi M, Nesto N, Kiver M, Joseph W, Fausson GC, Fiorin R, Riccato F, Mackelworth PC, Basta J 2020. How to deal with seafloor marine litter: an overview of the state-of-the-art and future perspectives. *Front. Mar. Sci.* 7, 830.
- Marre G 2020. Développement de la photogrammétrie et d'analyses d'images pour l'étude et le suivi d'habitats marins.
- Marre G, Braga CDA, Ienco D, Luque S, Holon F, Deter J 2020. Deep convolutional neural networks to monitor coralligenous reefs: Operationalizing biodiversity and ecological assessment. *Ecol. Inform.* 101110.
- Marre G, Deter J, Holon F, Boissery P, Luque S 2020. Fine-scale automatic mapping of living *Posidonia oceanica* seagrass beds with underwater photogrammetry. *Marine Ecology Progress Series*, 643, 63–74.
- Marre G, Holon F, Luque S, Boissery P, Deter J 2019. Monitoring marine habitats with photogrammetry: a cost-effective, accurate, precise and high-resolution reconstruction method. *Frontiers in Marine Science*, 6, 276.
- Mateo M-Á, Sanchez-Lizaso J-L, Romero J 2003. *Posidonia oceanica* 'banquettes': a preliminary assessment of the relevance for meadow carbon and nutrients budget. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56, 85–90.
- McClinton KE 2019. Applications of Photogrammetric Modeling to Roman Wall Painting: A Case Study in the House of Marcus Lucretius, in: *Arts. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, p. 89.
- Menna F, Nocerino E, Fassi F, Remondino F 2016. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. *Sensors* 16, 48.
- Nicolas A 2021. Automatisation de la classification des fonds marins à partir de données multiples (sondeur multifaisceaux, lidar, données d'opportunité). Rapport de stage de 3ème année d'école d'ingénieurs, SeaTech. 36p
- Montefalcone M, Albertelli G, Morri C, Bianchi CN 2007. Urban seagrass: Status of *Posidonia oceanica* facing the Genoa city waterfront (Italy) and implications for management. *Mar. Pollut. Bull.* 54, 206–213.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.10.005>
- Montefalcone M, Chiantore M, Lanzone A, Morri C, Albertelli G, Bianchi CN 2008. BACI design reveals the decline of the seagrass *Posidonia oceanica* induced by anchoring. *Mar. Pollut. Bull.* 56, 1637–1645.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.05.013>
- Montefalcone M, Lasagna R, Bianchi CN, Morri C, Albertelli G 2006. Anchoring damage on *Posidonia oceanica* meadow cover: A case study in Prelo cove (Ligurian Sea, NW Mediterranean). *Chem. Ecol.* 22, S207–S217.
<https://doi.org/10.1080/02757540600571976>
- Montefalcone M, Parravicini V, Vacchi M, Albertelli G, Ferrari M, Morri C, Bianchi CN 2010. Human influence on seagrass habitat fragmentation in NW Mediterranean Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 86, 292–298.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2009.11.018>
- Nocerino E, Menna F 2020. Photogrammetry: Linking the World Across the Water Surface. *J. Mar. Sci. Eng.* 8, 128.
- Okudan ES, Demir V, Kalkan E, Karhan SU 2010. Anchoring damage on seagrass meadows (*Posidonia oceanica* (L.) Delile) in Fethiye-Gocek specially protected area (Eastern Mediterranean Sea, Turkey). *J. Coast. Res.* 417.

- Pergent G 1990. Lepidochronological analysis of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile: a standardized approach. *Aquat. Bot.* 37, 39–54.
- Pergent G, Bazairi H, Bianchi CN, Boudouresque CF, Buia MC, Clabaut P, Harmelin-Vivien M, Mateo MA, Montefalcone M, Morri C, Orfanidis S, Pergent-Martini C, Semroud R, Serrano O, Verlaque M 2012. Mediterranean Seagrass Meadows: Resilience and Contribution to Climate Change Mitigation, A Short Summary / Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée: résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques, Résumé. IUCN, Gland, Switzerland and Málaga, Spain.
- Pergent G, Pergent-Martini C, Bein A, Dedeken M, Oberti P, Orsini A, Santucci JF, Short FT 2015. Dynamic of *Posidonia oceanica* seagrass meadows in the northwestern Mediterranean: Could climate change be to blame? *C. R. Biol.* 338, 484–493. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2015.04.011>
- Pergent G, Pergent-Martini C, Boudouresque CF 2013. Trawling impacts on Mediterranean seagrass. *Seagrass-Watch* 26–30.
- Personnic S, Boudouresque CF, Astruch P, Ballesteros E, Blouet S, Bellan-Santini D, Bonhomme P, Thibault-Botha D, Feunteun E, Harmelin-Vivien M, Pergent G, Pergent-Martini C, Pastor J, Poggiale JC, Renaud F, Thibaut T, Ruitton S 2014. An ecosystem-based approach to assess the status of a mediterranean ecosystem, the *Posidonia oceanica* seagrass meadow. *PLoS One* 9, e98994. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098994>
- Pollio J 1968. Applications of underwater photogrammetry. Naval Oceanographic Office NSTL Station MS.
- Rende FS, Irving AD, Bacci T, Parlagreco L, Bruno F, De Filippo F, Montefalcone M, Penna M, Trabucco B, Di Mento R 2015. Advances in micro-cartography: A two-dimensional photo mosaicing technique for seagrass monitoring. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 167, 475–486.
- Rende SF, Bosman A, Di Mento R, Bruno F, Lagudi A, Irving AD, Dattola L, Giambattista L Di, Lanera P, Proietti R 2020. Ultra-High-Resolution Mapping of *Posidonia oceanica* (L.) Delile Meadows through Acoustic, Optical Data and Object-based Image Classification. *J. Mar. Sci. Eng.* 8, 647.
- Rupnik E, Daakir M, Deseilligny MP 2017. MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(1), 1–9.
- Seaviews 2021. Posidogrammétrie. Évaluation par photogrammétrie de l'efficacité des mesures de gestion des herbiers de posidonies. Convention de recherche Agence de l'Eau RMC/DIRMM/Région Sud PACA/Seaviews. 38p
- Seguin M 2019. La photogrammétrie: un outil pour les archéologues. *Cult. Rech.* 139, 47.
- Shortis M (2015). Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems. *Sensors*, 15(12), 30810–30826.
- Telesca L, Belluscio A, Criscoli A, Ardizzone G, Apostolaki ET, Frascchetti S, Gristina M, Knittweis L, Martin CS, Pergent G, Alagna A, Badalamenti F, Garofalo G, Gerakaris V, Louise Pace M, Pergent-Martini C, Salomidi M 2015. Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Sci. Rep.* 5, 12505.
- Ternon Q, Thiriet P, Ysnel F, Collin A, Danet V, Guillaume M, Bianchimani O, Feunteun E 2020. La photogrammétrie comme outil descriptif des écosystèmes rocheux subtidiaux tempérés. Mieux décrire pour mieux prédire et gérer., in: MERIGEO 2020. pp. 183–185.
- Tomasello A, Savona A, Pampalone P, Casseti Federica P, Signa G, Pirrotta M, Andolina C, Aleo Adele E, Tramati C, Vizzini S, Mazzola A, Calvo S, Muzirafuti A, Lanza S, Barreca G, Crupi A, Gregorio F, Cascio M, Fontana M, Randazzo G 2020. The use of very high resolution images for mapping of *Posidonia oceanica* reef, in: GECOMARS 2020.
- Urbina-Barreto I, Chiroleu F, Pinel R, Fréchon L, Mahamadaly V, Elise S, Kulbicki M, Quod J-P, Dutrieux E, Garnier R 2020. Quantifying the shelter capacity of coral reefs using photogrammetric 3d modeling: From colonies to reefscales. *Ecol. Indic.* 121, 107151.
- Vassallo P, Paoli C, Rovere A, Montefalcone M, Morri C, Bianchi CN 2013. The value of the seagrass *Posidonia oceanica*: A natural capital assessment. *Mar. Pollut. Bull.* 75, 157–167.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.044>

Ventura D, Bonifazi A, Gravina MF, Belluscio A, Ardizzone G 2018. Mapping and classification of ecologically sensitive marine habitats using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery and object-based image analysis (OBIA). *Remote Sens.* 10, 1331.

Wu C 2011. *Visual/SFM: A visual structure from motion system.*

Wu Z, Wei L, Lv Z 2012. Landscape Pattern Metrics: An Empirical Study from 2-D to 3-D. *Physical Geography*, 33(4), 383–402.
<https://doi.org/10.2747/0272-3646.33.4.383>

Glossaire

APN : appareil photo numérique.

AUV : *Autonomous Underwater Vehicle*, drone sous-marin autonome principalement utilisé à très grande profondeur.

CAO : conception assistée par ordinateur. Se réfère le plus souvent à un logiciel.

Fichier ASCII : fichier texte qui permet à un document d'être reconnu et d'être lu facilement par n'importe quelle plateforme ou système d'exploitation. Il est essentiellement le fichier le plus accessible sans aucune restriction et utilise couramment extension de fichier ASC. ASCII est l'acronyme de *American Standard Code for Information Interchange*.

Géoréférencement : le processus dans lequel on applique à une entité cartographique un emplacement spatial en lui donnant des coordonnées géographiques et en appliquant une transformation.

GNSS : *Global Navigation Satellite Systems*. Ensemble de composants reposant sur une constellation de satellites artificiels permettant de fournir à un utilisateur par l'intermédiaire d'un récepteur portable de petite taille sa position 3D, sa vitesse 3D et l'heure.

GPS : *Global Positioning System*. système de positionnement par satellites appartenant au gouvernement fédéral des États-Unis.

GPU : processeur graphique (GPU ou *Graphics Processing Unit* en anglais)

GSD : la taille du pixel projeté au sol exprimée en m/pixel (*Ground Sampling Distance* en anglais)

Lidar : *Laser Imaging Detection And Ranging*. Technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur

MNT : Modèle numérique de terrain. Une représentation de la topographie d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un calculateur numérique.

OpenCV : une bibliothèque graphique libre, initialement développée par Intel, spécialisée dans le traitement d'images en temps réel

Raster : Une image matricielle, ou « carte de points ». Une image constituée d'une matrice de points colorés. C'est-à-dire, constituée d'un tableau, d'une grille, où chaque case possède une couleur qui lui est propre et est considérée comme un point.

RGB (=RVB) : Renvoi aux couleurs rouge, vert et bleu. Système des couleurs primaires en informatique chacune des trois variant entre 0 et 255.

ROV : *Remote Operated Vehicule*, petit robot sous-marin le plus souvent relié par un câble à un navire en surface et opéré à distance.

RTK : *Real Time Kinematic*. Une technique de positionnement par satellite basée sur l'utilisation de mesures de la phase des ondes porteuses des signaux émis par les systèmes GPS, GLONASS ou Galileo. Une station de référence fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre.

SIG : système d'information géographique. Logiciel permettant la visualisation et l'édition de données géoréférencées.

Transducteur acoustique : appareil transformant des ondes acoustiques en signal électrique.

