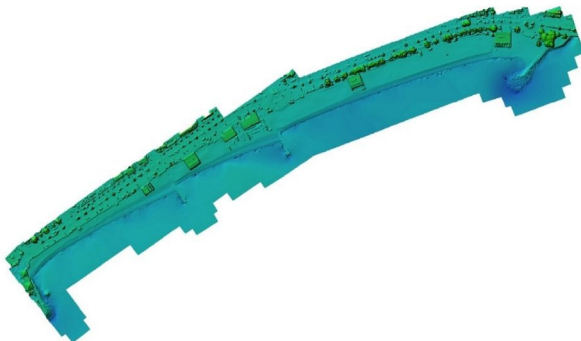




RAPPORT DE MISSION

ACTUALISATION DES DONNÉES TOPO- BATHYMÉTRIQUES ET BIOGÉOLOGIQUES DU GOLFE DE FRÉJUS



Suivi des modifications

Version	Révisions	Date	Rédacteur(s)	Vérification	Document n°
0	Création	31/05/2022	Arnaud ABADIE	Christophe VIALA	R/22/009
1	Mise à jour des cartes	09/09/2022	Arnaud ABADIE	Christophe VIALA	R/22/009
2	Ajout dates de mesures	20/06/2022	Christophe VIALA	Christophe VIALA	R/22/009

Contacts :

Nom	Fonction	Téléphone	E-mail
Christophe VIALA	Président	+33 (0)6 22 86 01 94	viala@seaviews.fr



Ce document peut être cité de la façon suivante : Seaviews (2022) Actualisation des données topo-bathymétriques et biocénologiques du golfe de Fréjus. Rapport de mission. Contrat Estérel Côte d'Azur Agglomération/Seaviews. 23p

ACTUALISATION DES DONNÉES TOPO- BATHYMÉTRIQUES ET BIOCÉNOTIQUES DU GOLFE DE FRÉJUS

Maître d'ouvrage

Estérel Côte d'Azur Agglomération
624, chemin Aurélien
CS 50133
83707 SAINT-RAPHAËL CEDEX

Coordination pour Estérel Côte d'Azur Agglomération

Thibault Devanne, Chargé de mission risques littoraux

Maître d'œuvre

Seaviews
603 chemin des Severiers Nord
13600 LA CIOTAT

Ont participé à cette étude : Christophe VIALA, Marie LAMOURET, Arnaud ABADIE, Léo ROCQUES, Maëlle LUCAS

SOMMAIRE

1. OBJET DE L'ÉTUDE.....	6
1.1. Contexte.....	6
1.2. Objectifs.....	6
2. MÉTHODE.....	7
2.1. Zone de mesure.....	7
2.2. Principe général.....	7
2.3. Techniques de mesure.....	8
2.3.1. Topographie au lidar.....	8
2.3.2. Photogrammétrie par drone aérien.....	9
2.3.3. Bathymétrie au sondeur monofaisceau.....	10
2.3.4. Levé au sondeur multifaisceaux.....	10
2.3.5. Traitement des données.....	12
2.3.6. Vérités terrain.....	14
2.4. Génération de la carte des biocénoses marines.....	15
3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS.....	16
3.1. Topo-bathymétrie.....	16
3.2. Orthophoto aérienne.....	17
3.3. Mosaïque sonar.....	18
3.4. Biocénoses marines.....	19
4. CONCLUSIONS.....	21
5. LIVRABLES.....	22

Glossaire

GNSS : « Global Navigation Satellite System ». Il s'agit des systèmes modernes de positionnement par satellite qui n'utilisent plus uniquement les satellites américains (GPS), mais l'ensemble des constellations disponible (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU). Cela permet d'accroître considérablement la disponibilité, et la précision du positionnement.

IGN : l'Institut national de l'information géographique.

Isobathe : Une ligne joignant des points d'égale profondeur, c'est donc une courbe de niveau, indiquant la profondeur d'une surface.

MNHN : Muséum national d'histoire naturelle.

MNT : Modèle numérique de terrain.

RGP : Le réseau GNSS permanent (RGP) est un réseau de plusieurs dizaines de stations GNSS qui enregistrent en continu les informations envoyées par les satellites des différentes constellations (GPS, GLONASS, et bientôt GALILEO) permettant de se localiser en tout point de la surface terrestre.

SACLAF : système acoustique de classification des fonds.

SMF : Sondeur multifaisceaux.

TVG : « Time varying gain », c'est une courbe de correction du gain d'un sonar qui permet d'améliorer le contraste des images sonar.

1. OBJET DE L'ÉTUDE

1.1. Contexte

Dans ce contexte de changement climatique et d'évolution d'occupation ou d'utilisation du littoral, il est nécessaire de repenser le front de mer. C'est le travail que souhaite réaliser Estérel Côte d'Azur Agglomération.

Cependant, préalablement à toute réflexion sur les scénarios d'aménagement côtier à mettre en œuvre, il est nécessaire d'actualiser la connaissance du milieu.

Actuellement, le service Hydraulique – Cours d'Eau de la communauté d'agglomération dispose de levés monofaisceaux et de bathymétries dérivées d'imagerie satellitaire. Toutefois, la résolution de ces données ne soutient pas la comparaison avec le Litto3D® PACA 2015. Par ailleurs, elles ne couvrent que partiellement les plages du golfe de Fréjus, celles de Saint-Raphaël n'y figurant pas. En outre, le levé LiDAR topo-bathymétrique constituant le Litto3D® PACA 2015 date de 2012 : la donnée a donc 10 ans d'ancienneté.

En ce qui concerne les biocénoses, les données actuelles, diffusées à travers la plateforme MEDTRIX, sont issues de travaux à l'échelle départementale, réalisés par Andromède et Egis Eau en 2009, pour le compte du CD83, dans le cadre du Schéma Départemental de la Mer et du Littoral - Volet Environnemental. Dans l'approche méthodologique retenue pour la cartographie des biocénoses marines, les herbiers dans les petits fonds sont délimités par interprétation d'orthophotographies aériennes. Puis, des observations in-situ (plongeur, sonar latéral, interféromètre) permettent d'affiner la classification des fonds. Les données de la plateforme MEDTRIX sont mises à jour, soit par l'intégration de données actualisées par des maîtres d'ouvrage, soit par l'interprétation d'orthophotographies aériennes récentes. Toutefois, des actualisations localisées, réalisées notamment à Saint-Raphaël, ont révélé la présence d'herbier de cymodocées, absents des données MEDTRIX.

À la lumière de ces constats, il est donc nécessaire d'actualiser les informations existantes sur la topo-bathymétrie d'une part, et la nature des fonds d'autre part.

1.2. Objectifs

L'objectif de cette étude était de fournir pour la zone d'intérêt un MNT topo-bathymétrique continu ainsi qu'une cartographie des biocénoses marines.

2. MÉTHODE

2.1. Zone de mesure

La zone de mesure s'étend de 0 m à 15 m de profondeur sur une surface d'environ 300 ha (Figure 1).



Figure 1 : Zone de mesure de l'étude (en rouge).

2.2. Principe général

Au vu des caractéristiques de la zone d'étude, la méthodologie globale suivante a été retenue :

- Des mesures acoustiques ont été réalisées à l'aide d'un sondeur multifaisceaux (SMF) avec enregistrement de la réflectivité acoustique. L'espacement entre les lignes de mesure était faible afin de permettre une excellente précision bathymétrique nécessaire pour une classification sur la morphologie du fond (rugosité, pente, etc.) ;
- Pour la topographie, un lidar monté sur le navire a été employé simultanément. Ce matériel est particulièrement adapté aux plages jouxtant le littoral et aux petites digues. Le levé Lidar a été complété par de la photogrammétrie par drone aérien plus adapté au cordon dunaire et aux zones masquées ;
- La zone comprise entre le Lidar et le SMF devait être très limitée compte tenu de l'ouverture importante du R2Sonic 2022 (80 ° de chaque côté), du faible tirant d'eau du « Seaviews One », et de la possibilité de faire gîter celui d'environ 10 °. Cependant, si celle-ci s'étant avérée trop importante par endroits (en cas de grande étendue de fonds inférieur à 80 cm), les mesures ont été complétées par un levé avec un monofaisceau monté sous un kayak autorisant des mesures jusqu'à 15 cm d'eau ;
- Des vérités terrain ont été réalisées à la fois sur les points pertinents déduits de la cartographie acoustique, mais aussi de façon exhaustive (transect avec la caméra tractée) afin de s'assurer qu'il n'y a pas d'herbiers de cymodocée à faible densité dont la signature est généralement peu marquée.

2.3. Techniques de mesure

2.3.1. Topographie au lidar

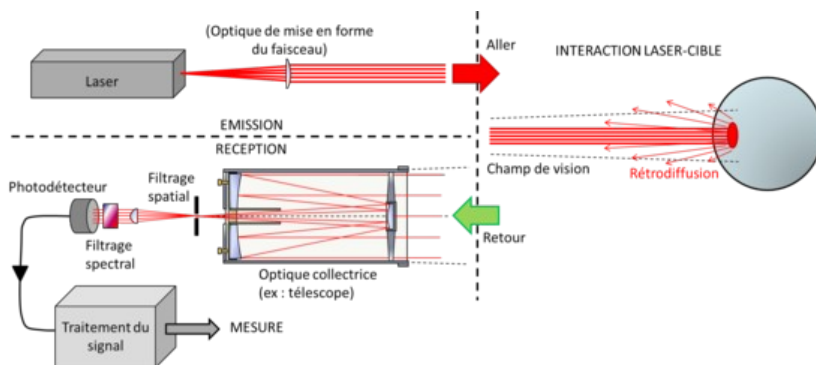


Figure 2 : Principe de fonctionnement du lidar.

Le lidar (light detection and ranging) consiste en un faisceau laser émis vers une cible et dont le temps de retour est mesuré afin de connaître la distance entre la source d'émission et la cible (voir figure ci-dessous). Le lidar est principalement employé en télémétrie pour mesurer la distance d'un objet (comme sur les véhicules routiers). Depuis quelques années il est également beaucoup utilisé pour réaliser des mesures topographiques en le couplant à un GNSS RTK et une centrale d'attitude.

Le lidar est monté sur la cabine de la vedette de mesure bathymétrique de Seaviews, le *Seaviews One* (Figure 3). Ce type de montage permet d'obtenir des mesures topographiques des structures environnantes (comme les quais d'un port) simultanément au levé bathymétrique. Le scanner est couplé à une centrale d'attitude permettant de mesurer les variations d'angle dues aux mouvements du navire tandis qu'un GNSS RTK permet d'en connaître la position avec une précision centimétrique.



Figure 3 : Montage du lidar sur la cabine du *Seaviews One*.

Les données brutes du lidar sont traitées de la même manière que les données acoustiques du SMF en utilisant le logiciel ViewSMF développé par Seaviews qui permet de filtrer les mesures aberrantes et de générer un MNT de la zone cartographiée. Les données sont ensuite transférées aux SIG ViewMap (également développé par Seaviews) qui permet d'exporter le MNT au format DXF pour des représentations en 2D par CAO, ou au format PLY ou OBJ pour obtenir un modèle 3D interactif.



Figure 4 : Le lidar Hesai Pandar XT.

Le lidar Hesai Pandar XT fonctionne par rotation mécanique permettant de scanner une large surface lors de chaque passage. Ses caractéristiques sont :

- une portée de 0,3 m à 80 m ;
- une précision de 2 cm ;
- un FOV (champs de vue) de 360° en horizontal et 31° en vertical ;
- une cadence modulable de 5, 10 ou 20 Hz.

Sa petite taille (10 cm de diamètre et 8 cm de hauteur) et son poids réduit (0,8 kg) permettent de l'utiliser sur divers type d'embarcations et de véhicules terrestres légers.

2.3.2. Photogrammétrie par drone aérien



Figure 5 : Le drone Autel Evo 2 Pro 6K.

Le drone Autel Evo 2 Pro 6K est un appareil compact et léger disposant d'une caméra haute résolution et d'un GNSS RTK permettant une précision de positionnement centimétrique. Ses principales caractéristiques sont :

- une caméra HDR 20 MP avec capteur CMOS 1" ;
- une plage ISO de 100-12.800 ;
- d'une grande autonomie avec 40 minutes de temps de vol ;
- un GNSS RTK pour un positionnement centimétrique des photographies utilisées pour la photogrammétrie ;
- d'un encombrement et d'un poids réduit (environ 1 kg) qui permet de le transporter facilement en avion.

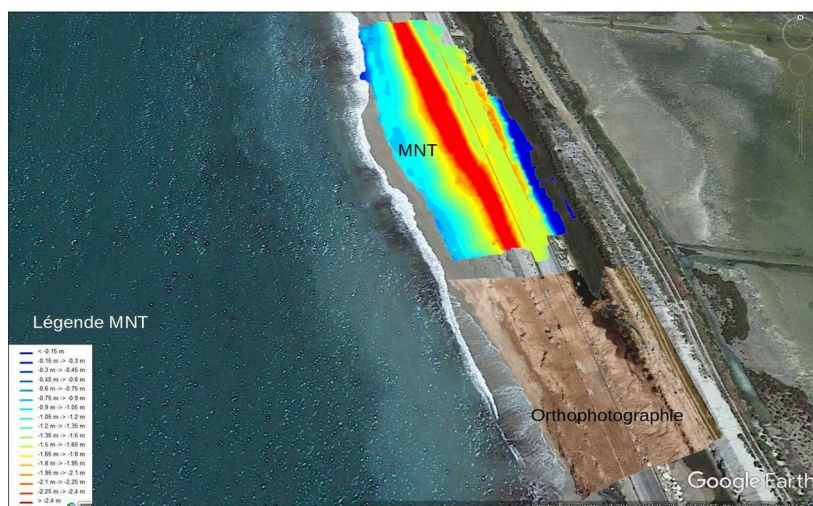


Figure 6 : Visualisation des orthophotographies et des MNT dans Google Earth.

Le survol des personnes étant interdit lors des prises de vues, la mission a dû être interrompue à chaque fois que des personnes se sont trouvées sous le drone. Cela a augmenté sensiblement le temps total de la mission. Les zones levées se trouvant à proximité des plages en zone peuplée avec un possible survol de tiers, la mission s'est déroulée en scénario S3. En scénario S3 le télépilote doit toujours garder l'aéronef en vue durant la totalité du vol. La hauteur de vol maximum est de 150 m, la distance horizontale maximale séparant le télépilote de l'aéronef ne doit pas excéder 100 m. Une autorisation de survol a été déposée 5 jours avant la mission.

Le positionnement du drone et des photos est réalisé grâce au système GNSS RTK. L'altitude d'acquisition a été définie lors de la préparation de la

mission afin d'obtenir une résolution décimétrique des images. Les photographies sont ensuite traitées dans le logiciel de photogrammétrie Agisoft Metashape afin d'obtenir une mosaïque d'orthophotographies. Le positionnement de chaque photographie est renseigné dans ce logiciel afin de géoréférencer la mosaïque de photos obtenue.

Les données de géoréférencement du GNSS RTK sont post-traitées à l'aide du logiciel RTKLIB afin de corriger d'éventuelles erreurs de positionnement. Les photos et les coordonnées GPS sont ensuite synchronisées dans le logiciel ViewMap (développé par Seaviews) pour qu'à chaque photo corresponde une coordonnée géographique. Ces données de géoréférencement sont ensuite « écrites » dans les EXIF de chaque photographie toujours en utilisant ViewMap.

Les photographies géoréférencées sont ensuite importées dans le logiciel Metashape d'Agisoft pour réaliser l'ensemble des traitements photogrammétriques. Un nuage de point est généré dans un premier temps à partir des points remarquables et des points de liaison identifiés par le logiciel. À partir de ce nuage de point est créé un modèle numérique de terrain (MNT). Enfin, une mosaïque d'orthophotographies est produite en utilisant le MNT (Figure 6). En plus de l'orthophotographie, un modèle 3D photo-texturé peut également être généré.

2.3.3. Bathymétrie au sondeur monofaisceau

Le sondeur monofaisceau a été utilisé pour des mesures bathymétriques entre les données lidar et celles du sondeur multifaisceaux.



Le sondeur monofaisceau ISA500 de Impact SubSea (Figure 7) est un capteur compact et robuste facilement adaptable sur un navire d'opportunité ou une petite embarcation. Son faible encombrement lui permet notamment de réaliser des mesures par petits fonds (profondeur < 50 cm). Ses caractéristiques sont :

- une fréquence de 500 kHz ;
- une portée de 0.1 à 100 m ;
- un angle d'ouverture de 3°.

Figure 7 : Le sondeur ISA 500.

Durant cette étude le ISA 500 était monté sur un kayak de mer (Figure 8) permettant de réaliser des mesures par très petits fonds pour assurer la continuité des données acoustiques acquises avec le sondeur multifaisceaux. Le levé au sondeur monofaisceau a été réalisé mai 2022 (1 jour de levé).



Figure 8 : Réalisation des levés au sondeur monofaisceau avec un kayak de mer.

2.3.4. Levé au sondeur multifaisceaux

Le fonctionnement du sondeur multifaisceaux (SMF) repose sur le principe des faisceaux croisés. Généralement, l'émission de l'onde acoustique se fait dans un faisceau large transversalement et étroit longitudinalement. La réception quant à elle est réalisée, grâce à un algorithme de formation de voies, dans un lobe étroit transversalement et large longitudinalement (Abadie et Viala, 2018). L'intersection entre le faisceau d'émission et le faisceau de réception est appelée « pied de faisceau » et correspond à la zone du fond insonifiée (Figure 9). La mesure est ainsi réalisée sur une multitude de points répartis le long d'une ligne perpendiculaire à la trajectoire du navire.

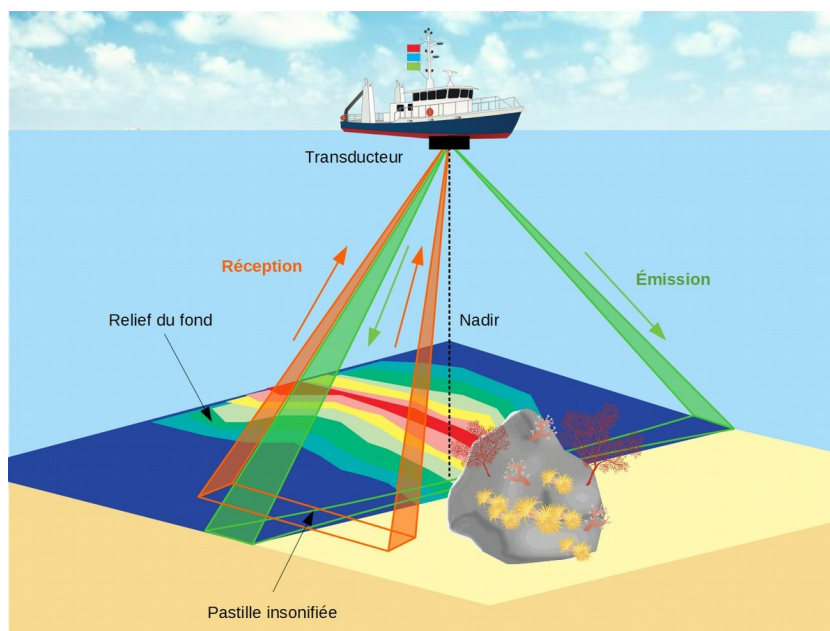


Figure 9 : Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux.

L'acquisition des données acoustiques SMF a été réalisée en avril-mai 2022 (6 jours environ 160 km de levé).



Figure 10 : Le Seaviews One.

Les données ont été acquises à l'aide du Seaviews One (Figure 10), un navire spécialement développé pour les mesures bathymétriques et sonars en milieu côtier. Il est caractérisé par un très faible encombrement (taille de 6 m, poids <400 kg) qui lui permet d'être déployé rapidement, ainsi qu'une grande manœuvrabilité en raison de sa petite taille. Le Seaviews One dispose d'une source d'énergie intégrée pour alimenter les instruments. Un puits central (40 cm * 30 cm) permet d'intégrer les instruments sans perturber ni sa stabilité ni sa manœuvrabilité. Afin de pallier aux problèmes de trajectoire des levés, un pilote automatique asservi aux trajectoires informatisées a été équipé autorisant une navigation d'une grande précision (< 0,5 m).

Lors de l'acquisition des données acoustiques, le logiciel ViewMap a été utilisé notamment pour le suivi des trajectoires de levé. Les caractéristiques principales sont la gestion automatique des trajectoires, la lecture des cartes marines existantes ainsi que des données SIG, la visualisation et la comparaison des profils de célérité, l'acquisition et la visualisation des paramètres de navigation (position, hauteur d'eau, célérité de surface, etc.). Il fournit également le tracé temps réel de la couverture SMF.

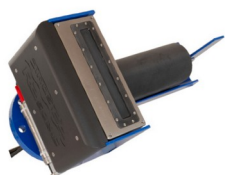


Figure 11 : Le R2SONIC 2022.

Le SMF employé lors des levés acoustiques est un R2Sonic 2022 (Figure 11). Il possède une large plage de fréquences de mesure allant de 200 kHz à 450 kHz pour une ouverture angulaire par faisceau de $1^\circ \times 1^\circ$. La largeur de fauchée maximale est de 160° pour des levés bathymétriques. La portée maximale du R2Sonic 2022 est de 400 m. Il permet également d'obtenir simultanément une imagerie acoustique de la réflectivité des fonds (similaire aux images sonar) et dispose d'un mode « Full Water column » pour l'imagerie de la colonne d'eau. Son horodatage très précis des données sur le temps GPS assure une synchronisation parfaite des données d'attitude, de position et d'acoustique.



Figure 12 : Centrale d'attitude Applanix I2NS.

Afin de corriger les erreurs de positionnement induites par le roulis, le tangage et le pilonnement du navire, une centrale d'attitude Applanix I2NS (Figure 12) a été utilisée. Elle a notamment été développée en collaboration avec R2Sonic pour être couplée avec leurs sondeurs, en particulier au niveau de la synchronisation. La centrale dispose d'un mode GNSS complet (GPS, GLONASS, GALILEO) lui permettant de maintenir le positionnement malgré un masquage partiel. Elle fournit une précision en position de 1 cm en XY et de 1,5 cm en Z. Sa précision en roulis et en tangage est de $0,015^\circ$ avec une précision en cap de $0,02^\circ$. Enfin, son capteur entièrement étanche est monté sur le même support que la sonde acoustique. Ceci garantit qu'il n'y a pas de déformation du support, cet aspect n'est pas à négliger lorsque des mesures au centième de degré sont réalisées.

Durant cette étude, une base GNSS a été positionnée à proximité de la zone d'étude afin d'obtenir une précision centimétrique sur le GNSS mobile.

Lors de levés au SMF, il est impératif d'apporter des corrections en fonction de la réfraction des ondes acoustiques. En effet, la trajectoire de l'onde sonore dépendra de la célérité du son dans l'eau et pourra être déviée dans le cas de profils de célérité particuliers (thermocline, arrivée d'eau douce). Chaque mesure bathymétrique s'accompagne donc obligatoirement d'un contrôle de la célérité en continu à proximité du sondeur et de la réalisation régulière de profils de célérités en fonction de la profondeur. Ces mesures permettent ainsi de corriger la réfraction et d'éviter les artefacts induits par la mauvaise correction de la célérité.



Figure 13 : Célérimètre Valeport miniSVS.

Tout au long des mesures, deux célérimètres Valeport miniSVS (Figure 13) ont été utilisés. Un premier célérimètre mesure en permanence la célérité de surface à proximité de la sonde. Sa donnée est indispensable à la bonne exploitation des mesures acoustiques. Un deuxième célérimètre est utilisé pour mesurer le profil de célérité. Pour cela, il est nécessaire de ralentir le navire et d'immerger le célérimètre jusqu'au fond. La courbe donnant la célérité en fonction de la profondeur est alors mesurée. Cette donnée sera utilisée au dépouillement pour corriger la réfraction des rayons sonores. De

plus, les données du célérimètre de surface sont tracées en temps réel, afin de nous aider à repérer d'éventuelles zones où le profil de célérité est inhomogène.

2.3.5. Traitement des données

Les données bathymétriques du sondeur multifaisceaux ont été traitées avec le logiciel ViewSMF développé par Seaviews. Les faux échos sont filtrés de façon semi-automatisée en utilisant des filtres d'exclusion et d'inclusion (Figure 14). Une carte bathymétrique a ensuite été réalisée systématiquement avec un maillage de 1 m (pour permettre une manipulation plus aisée des données) dans le SIG ViewMap.

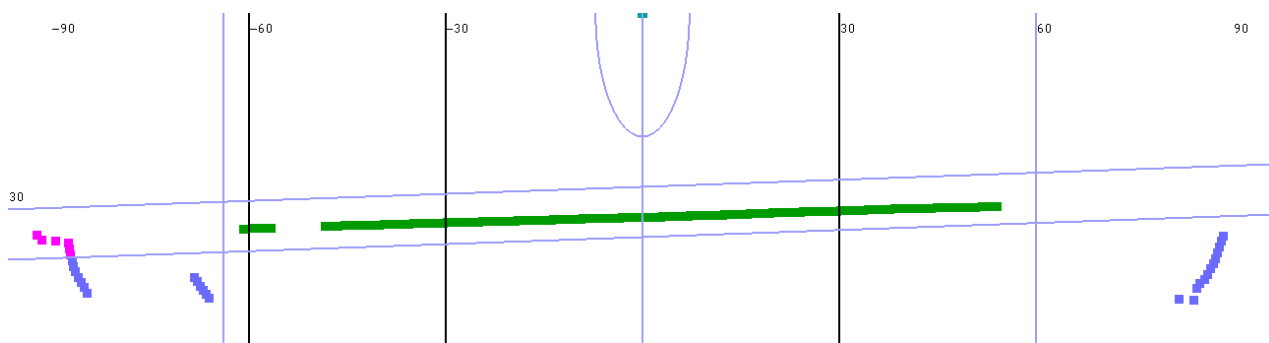


Figure 14 : Filtrage des faux échos dans le logiciel ViewSMF de Seaviews.

L'imagerie acoustique correspond à l'amplitude du signal réfléchi. L'amplitude du signal réfléchi dépend de la nature du fond. En traçant une carte des échos, les variations du fond sont visibles. Les données de réflectivité du SMF ont été traitées dans le logiciel ViewSMF avec l'option « snippets » afin d'obtenir une image de la meilleure qualité possible (Figure 15). Une bande bruitée est visible au nadir du fait de la verticalité de l'angle d'incidence de l'onde acoustique émise.

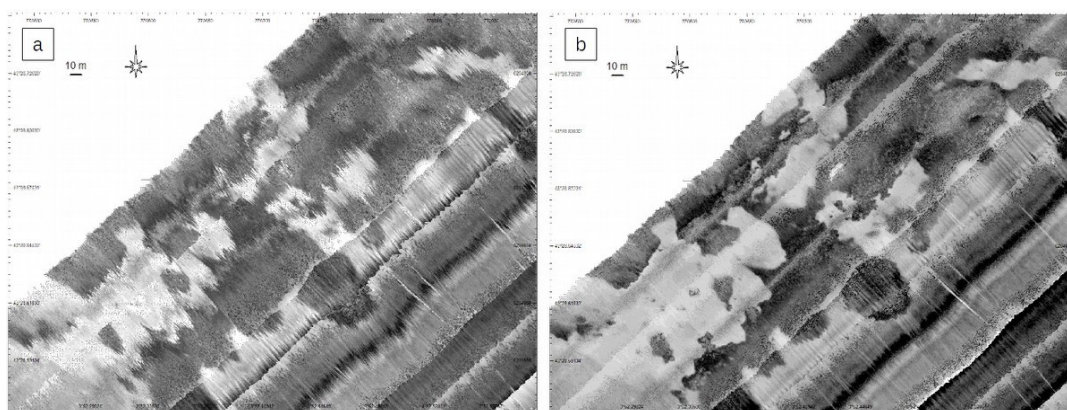


Figure 15 : Exemple de la différence de qualité entre a) une image sans traitement et b) une image avec traitement « snippets ».

La microrugosité correspond aux déformations des structures bathymétriques au voisinage d'un écho. Seaviews a développé une méthode innovante pour extraire cette information : BATCLAS, bathymetric automated treatment for the classification of the seafloor (Viala et al., 2021). BATCLAS fournit une valeur en mètres de la rugosité du fond marin, ce qui permet une interprétation facilitée des échelles des couleurs présentes sur les cartes. Cet indice donne d'excellents résultats pour la détection des herbiers sous-marins et des roches (Figure 16) avec en particulier une classification surfacique. Cette nouvelle technique présente clairement un avantage par rapport aux méthodes précédentes, ces dernières présentant l'énorme inconvénient d'être uniquement ponctuelles. Cette méthode donne aussi de très bons résultats pour la détection d'objets (épave, récifs, affleurement rocheux). Dans la présente étude, l'indice BATCLAS a été calculé automatiquement suite au traitement des faux échos dans le logiciel ViewSMF.

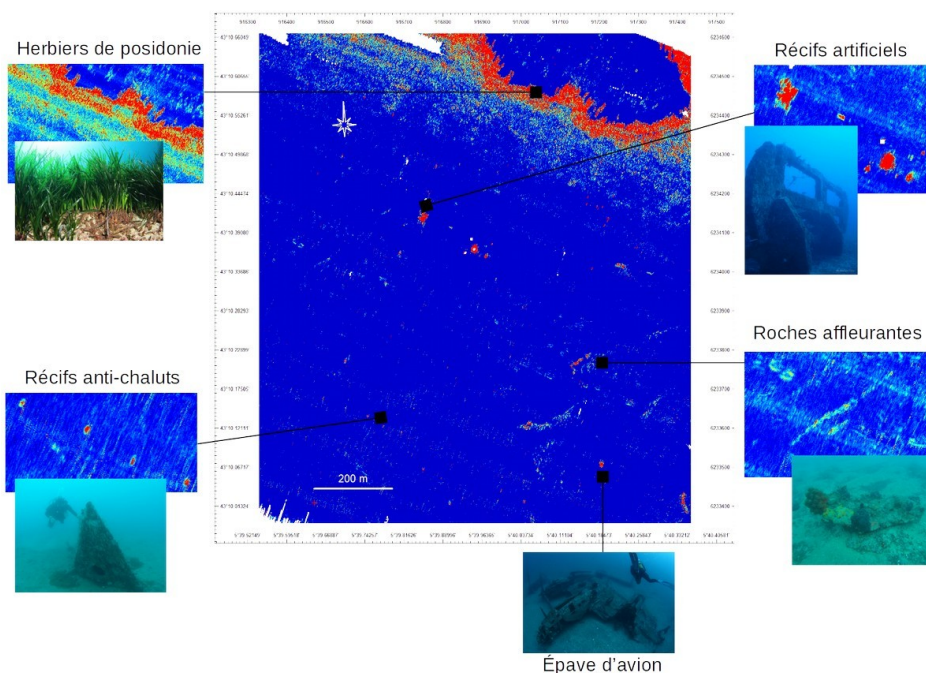


Figure 16 : Exemple de détection d'herbiers sous-marins, de roches et de récifs artificiels dans la baie de La Ciotat avec l'indice BATCLAS.

La pente est un autre indicateur dérivé du traitement des données bathymétriques. Comme son nom l'indique, cet indice fournit une visualisation du relief des fonds marins en en fournissant une valeur métrique facilement interprétable. La pente permet notamment de détecter facilement les faciès au relief très marqué comme les roches et les herbiers. Bien que proche de la rugosité BATCLAS en termes de calcul et de rendu, ces deux indices sont complémentaires et permettent chacun de mieux détecter certains habitats tels que les herbiers de cymodocées pour BATCLAS et les traces d'ancrage ou de chalutage pour la pente. Dans le cadre de cette étude, ces indices ont notamment permis la détection des traces de chalut et d'ancrage dans les sédiments. Ces indices ont également permis de cartographier les récifs anti-chalut de type «searock» présents dans la zone d'étude.

2.3.6. Vérités terrain

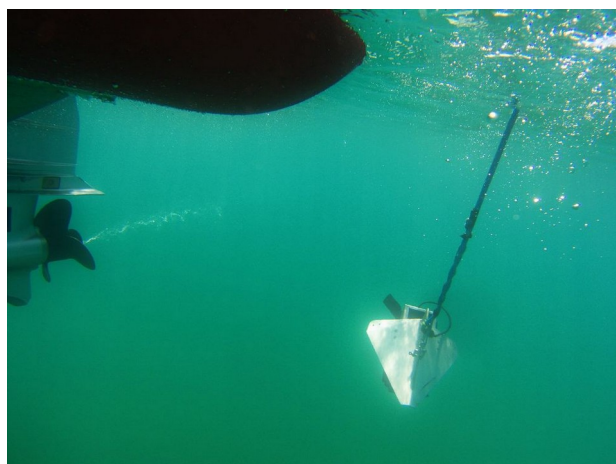


Figure 17 : L'aile métallique sous-marine de Seaviews équipée d'une caméra pour valider la cartographie par vidéo tractée.

Afin de valider les observations faites sur les données acoustiques, une campagne de vérités terrain a été réalisée en mai 2022. Les vérités terrain portaient notamment sur la détection des herbiers à *Cymodocea nodosa* et de la limite inférieure des herbiers à *P. oceanica*. Pour atteindre cet objectif un dispositif vidéo tractée avec retour surface a été employé.

Le système de vidéo tracté utilisé par Seaviews est composé d'un dépresseur en aluminium (aile sous-marine) équipé d'une caméra avec retour vidéo en surface (Figure 17). Ce « poisson » est tracté par le Seaviews One équipé d'un GNSS centimétrique permettant un géoréférencement métrique des transects vidéo.

2.4. Dates de mesures

Les mesures ont été réalisées au cours des mois d'avril et mai 2022. La répartition exacte des jours de mesure en fonction du type de mesure est donnée dans le tableau suivant.

	SMF	Lidar	Photos ariennes (drone)	Mono faisceau kayak
26/04/2022	X			
27/04/2022	X	X		
28/04/2022	X	X		
10/05/2022	X		X	
11/05/2022	X		X	
12/05/2022	X		X	
13/05/2022			X	
14/05/2022			X	
31/05/2022				X

2.5. Interpolations

Afin de permettre la comparaison des données avec d'autres modèles, une interpolation linéaire est réalisée en prenant les points les plus proches.

En particulier cette interpolation est nécessaire sur les très petits fonds qui ont été levés au mono faisceau, et entre la limite Lidar → sondeurs.

La livraison n2 présente des rasters des zones avant et après interpolation afin de permettre de retrouver rapidement si une donnée est mesurée ou interpolée.

2.6. Génération de la carte des biocénoses marines

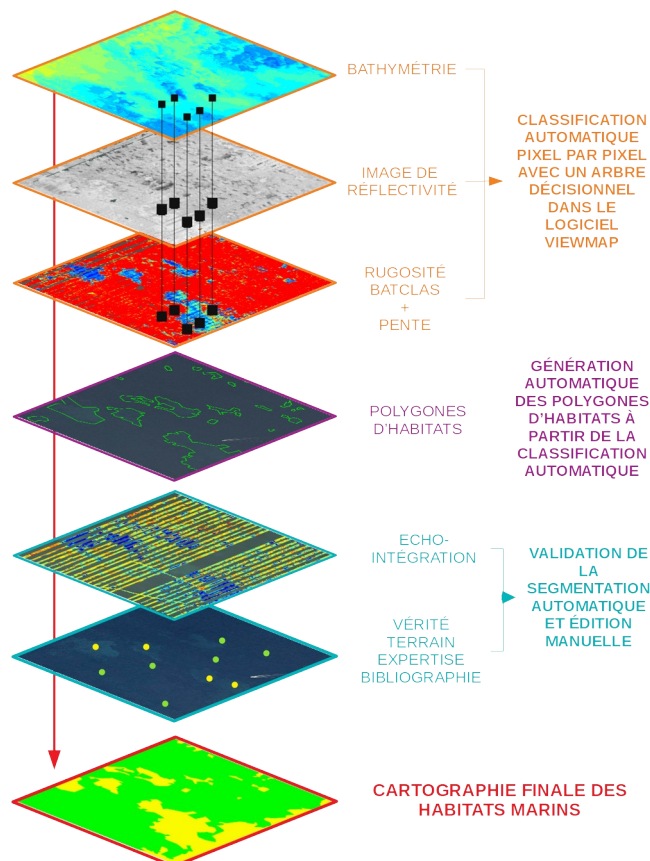


Figure 18 : Synthèse de la méthode de génération des cartes d'habitats marins à partir de la fusion des données.

La segmentation (délimitation) des biocénoses marines a été réalisée en faisant la synthèse des orthophotographies aériennes, des données bathymétriques, de l'imagerie acoustique, de la carte de rugosité BATCLAS, de la carte de la pente, des vérités terrain et des données bibliographiques. Ces couches de données ont été confrontées dans le logiciel SIG ViewMap (Figure 18) qui permet notamment la création et l'édition de données géoréférencées vectorielles. La création des polygones des biocénoses marines s'est déroulée en trois étapes :

1. Un algorithme classification conditionnel permettant d'attribuer à chaque pixel du MNT un habitat élémentaire en fonction de la valeur des indices cartographiques a été utilisé. Cette première étape a fourni une carte initiale des habitats marins ne prenant en compte que l'indice de rugosité ou la pente (selon l'habitat) et la profondeur (données bathymétriques) ;
2. Validation et modification de la carte initiale en la confrontant à l'imagerie acoustique et aux données bibliographiques. Cette étape a été réalisée manuellement en réajustant localement les paramètres de l'algorithme pour être en adéquation avec les données de terrain validées. Dans le cadre de cette étude, les données bibliographiques sont constituées de la cartographie disponible sur la plateforme MEDTRIX.
3. Enfin, les contours définitifs des habitats ont été automatiquement générés, toujours sous ViewMap, et exportés sous des formats exploitables (.kml, .shp) par les SIG les plus couramment utilisés (ArcGIS, QGIS).

La typologie des habitats marins employée pour les cartographies de cette étude est celle proposée par le MNHN comme précisée dans le Cahier d'habitats – Tome 2 Habitats côtiers (Bensettiti et al., 2004) et actualisés par Michez et al. (2014). Chaque biocénose a été définie selon la classification de l'INPN (La Rivière et al., 2021). Les tables attributaires des cartographies d'habitats ont été remplies selon la nomenclature de Natura 2000.

3. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1. Topo-bathymétrie

Les résultats des levés topographiques (lidar et photogrammétrie) et bathymétriques (sondeur multifaisceaux et sondeur monofaisceau) sont présentés dans la Figure 19.

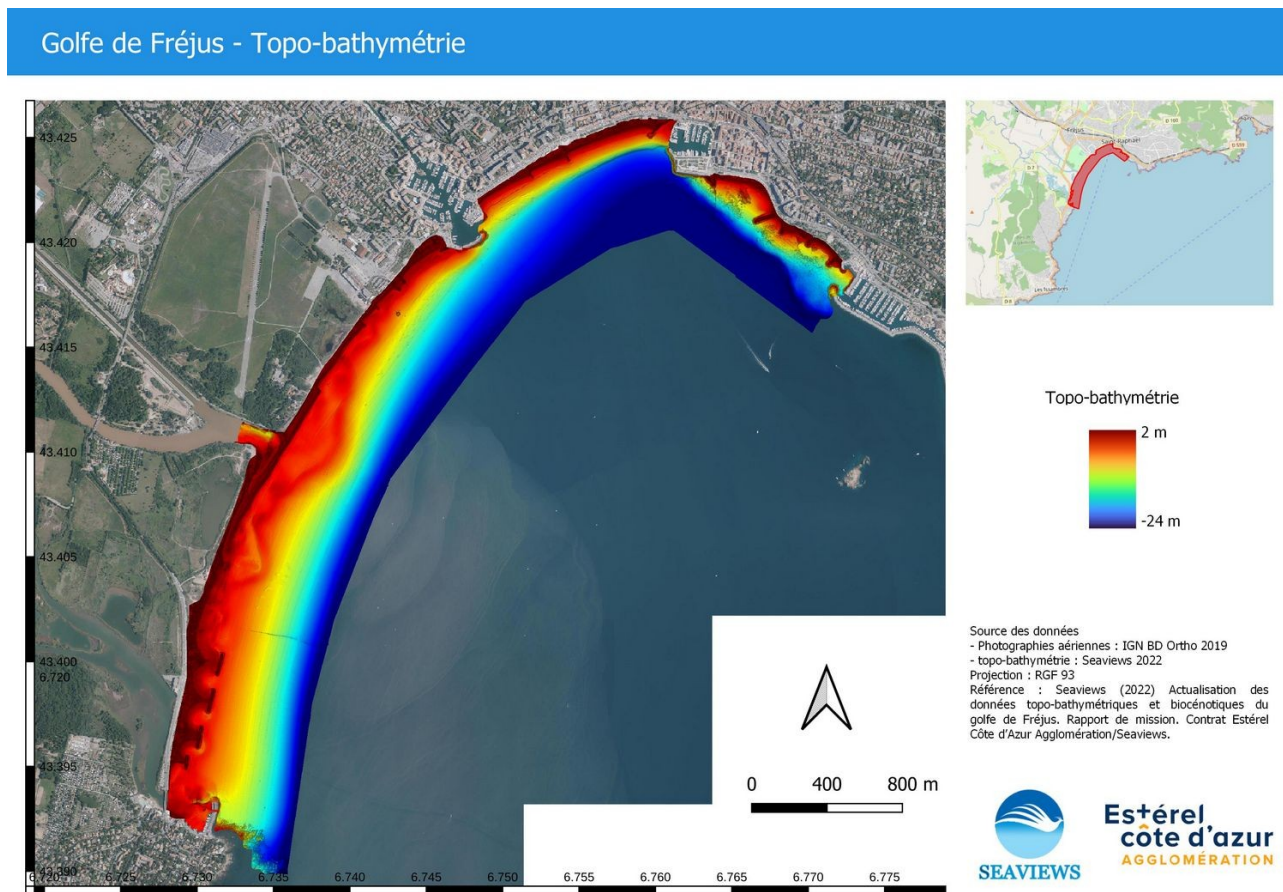


Figure 19 : Topo-bathymétrie de la zone d'étude dans le golfe de Fréjus.

3.2. Orthophoto aérienne

L'orthophotographie obtenue par des levés photogrammétriques par drone aérien couvre la totalité du littoral depuis le port de Saint-Aygulf au sud-ouest de la zone d'étude jusqu'à celui de Saint-Raphaël au nord-est (Figure 20). La haute résolution des photographies et les bonnes conditions durant le vol du drone aérien permettent d'identifier clairement les biocénoses benthiques à faible profondeur (herbier de posidonie, matte morte, roche) au nord-est de la zone (Figure 21).

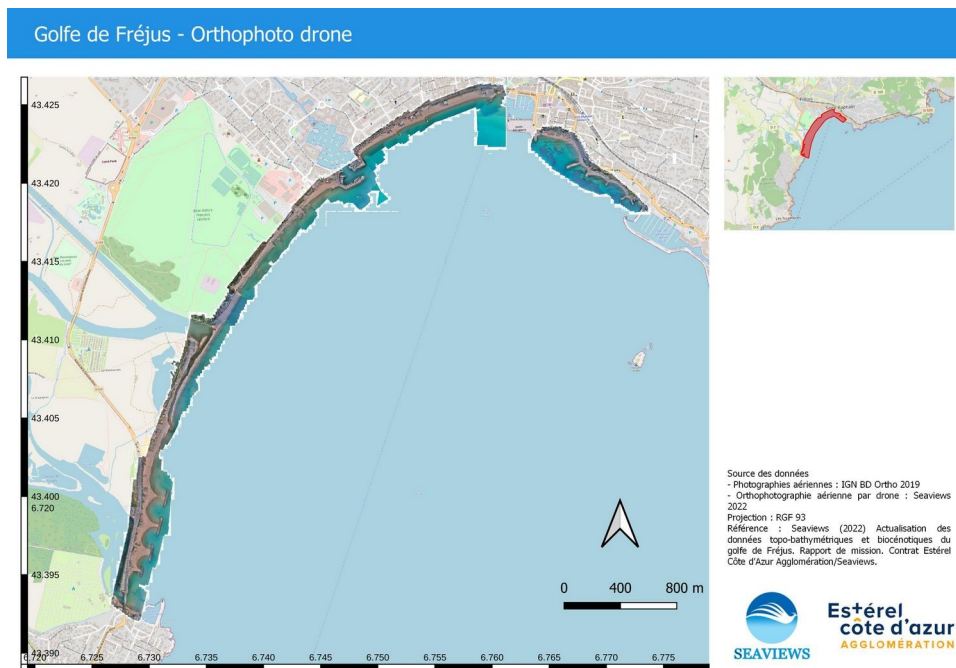


Figure 20 : Mosaïque d'orthophotographies aériennes acquises avec le drone.

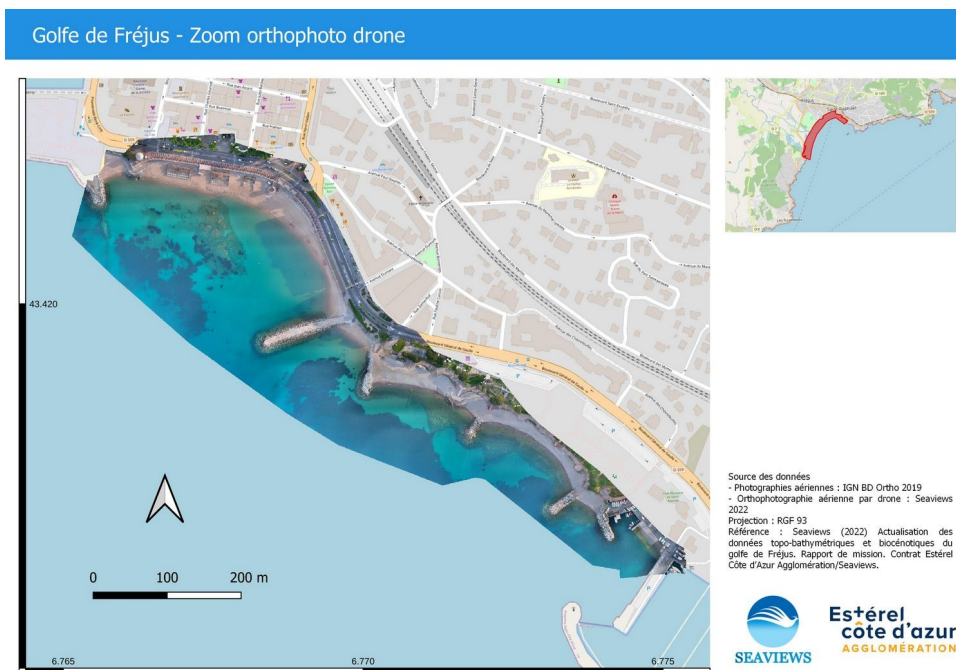


Figure 21 : Zoome sur l'orthophotographie aérienne de la partie nord-est de la zone d'étude.

3.3. Mosaïque sonar

L'image de la réflectivité acoustique du fond montre une variation de faciès sédimentaire au niveau de l'embouchure de l'Argens (Figure 22). Les herbiers formés par les plantes marines (*Cymodocea nodosa* et *Posidonia oceanica*) sont également clairement détectables sur l'imagerie acoustique.

Golfe de Fréjus - Réflectivité acoustique du fond

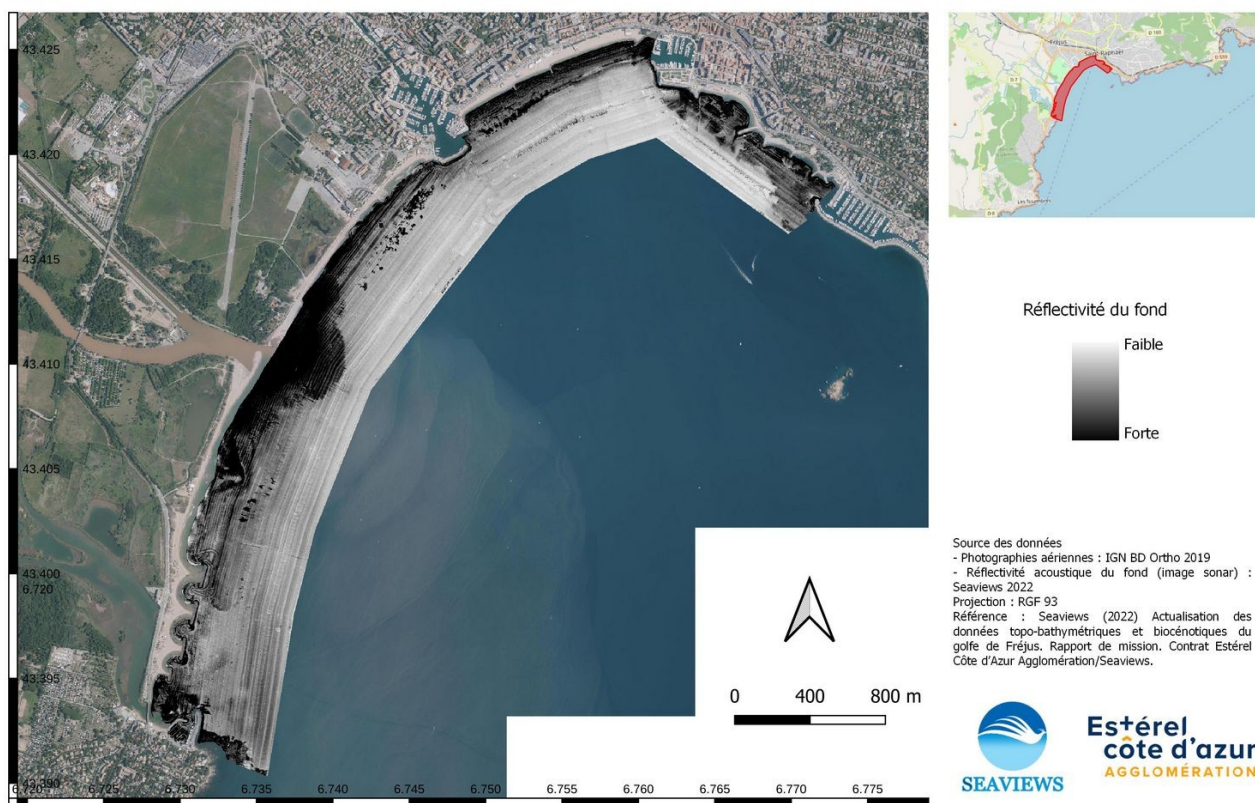


Figure 22 : Mosaïque de l'image de réflectivité du fond (image sonar) de la zone d'étude dans le golfe de Fréjus.

3.4. Biocénoses marines

Sept biocénoses benthiques ont été identifiées dans la zone d'étude (Figure 23). La principale biocénose en termes de superficie est celle des sables fins bien calibrés (SFBC) avec une couverture de 247,476 ha (Tableau 1). A l'embouchure de l'Argens, au centre de la zone d'étude, la biocénose des vases terrigènes côtières (VTC) couvre une surface de 34,153 ha. Les substrats durs sont relativement rares. La biocénose des roches infralittorales à algues photophiles occupe une superficie de 5,013 ha (principalement au sud-ouest et au nord-est de la zone d'étude), tandis que les substrats artificiels couvrent une surface de 3,342 ha.

Les herbiers à Magnoliophytes marines (*P. oceanica* et *C. nodosa*) sont observés dans des parties très localisées du golfe (Figure 23). Les herbiers de posidonie couvrent 7,644 ha dans la partie nord-est de la zone. La matte morte, localisée dans la même partie du site, occupe quant à elle 2,839 ha (Tableau 1). Les herbiers à *C. nodosa* sont principalement localisés de part et d'autre de Port-Fréjus devant les plages à environ 5 m de profondeur (Figure 23). Les herbiers de cymodocée sont très denses (Figure 24A et B) et présentent par endroit une structure « en étoile » caractéristique d'une forte colonisation (Figure 24C et D). Ils couvrent une surface de 1,592 ha.

Golfe de Fréjus - Biocénoses benthiques

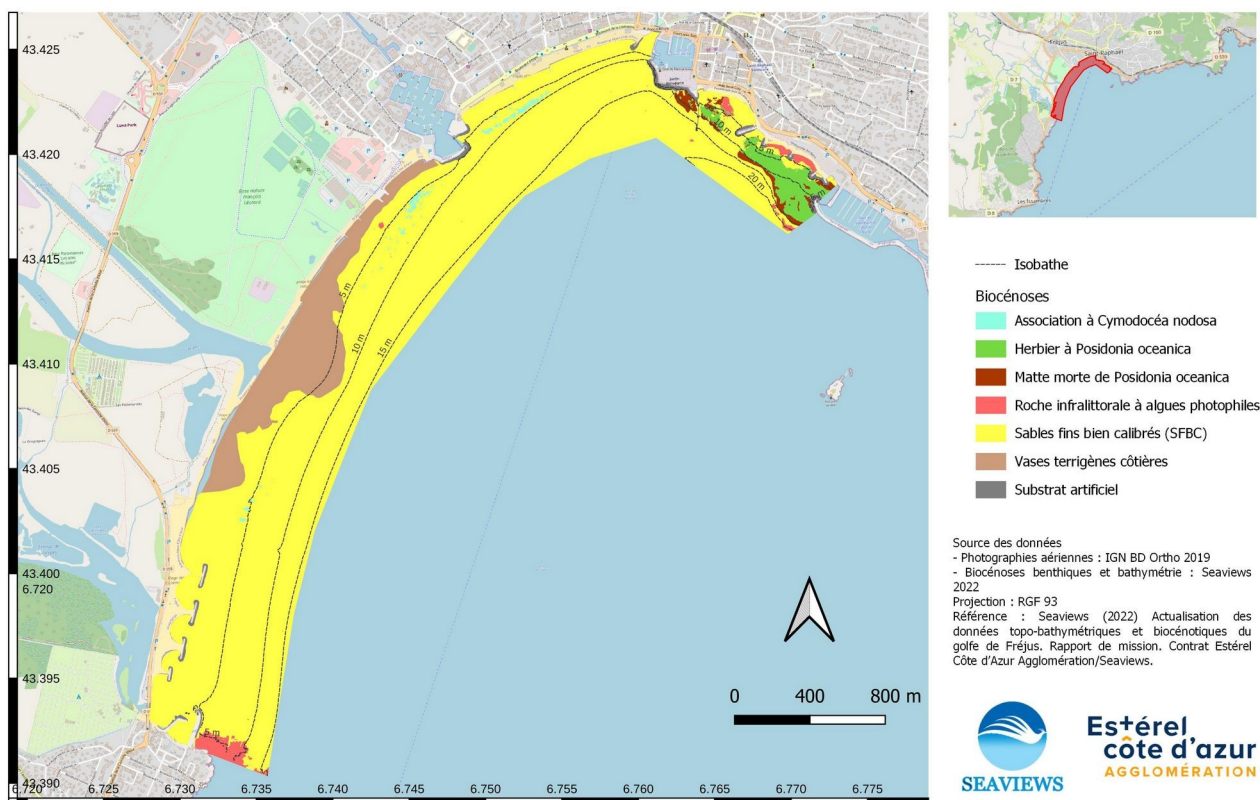


Figure 23 : Carte des biocénoses marines de la zone d'étude dans le golfe de Fréjus.

Tableau 1 : Surface des biocénoses benthiques cartographiées durant cette étude.

Biocénose	Surface (ha)
Sables fins bien calibrés (SFBC)	247,476
Vases terrigènes côtières (VTC)	34,153
Herbier à <i>Posidonia oceanica</i>	7,644
Matte morte de <i>Posidonia oceanica</i>	2,839
Association à <i>Cymodocea nodosa</i>	1,592
Roche infralittorale à algues photophiles	5,013
Substrat artificiel	3,342

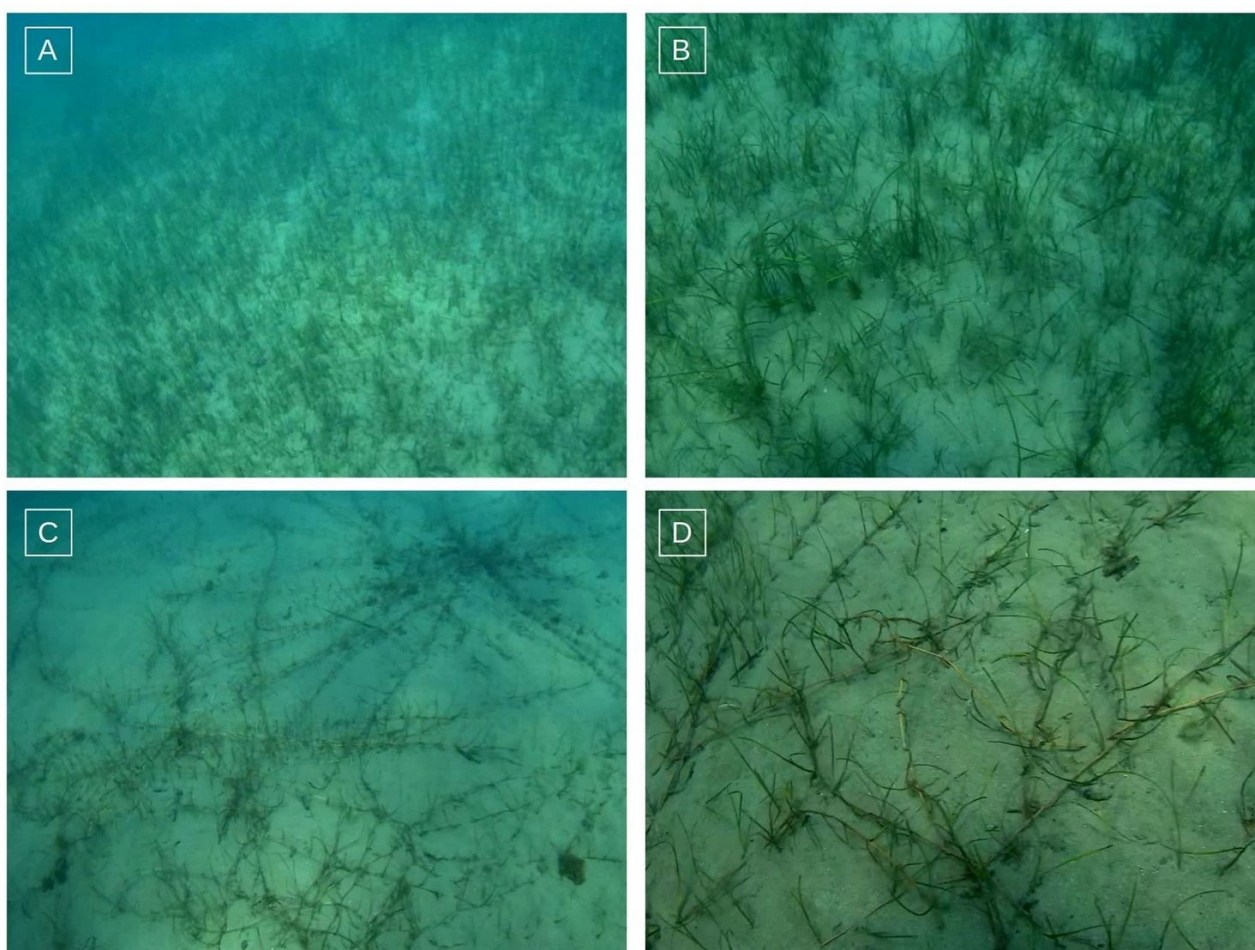


Figure 24 : Vérité terrain des herbiers de cymodocée avec une caméra tractée : A) et B) Herbier dense ; C) Formation "en étoile" d'un herbier en pleine expansion ; D) Zoom sur les rhizomes plagiotropes.

4. CONCLUSIONS

Cette étude a permis de dresser un état initial de la topographie et de la bathymétrie du littoral du golfe de Fréjus dans le but de suivre la dynamique de la côte en lien avec la problématique de la submersion.

La mise en œuvre de techniques de mesures complémentaires (drone aérien, lidar, sondeur monofaisceau, sondeur multifaisceaux) a fourni des données exhaustives sur la totalité de la zone d'étude avec une résolution élevée et une haute précision. La qualité de ces levés permettra dans le futur la réalisation d'un suivi de l'évolution topographique et bathymétrique. Au vu des données obtenues durant cette étude, les mouvements sédimentaires importants se déroulant à l'embouchure de l'Argens ainsi qu'au niveau des digues des plages et des ports façonnent constamment et rapidement la morphologie du littoral relativement rapidement avec certaines variations visibles d'une année sur l'autre.

La cartographie des biocénoses marine met en évidence deux aspects importants de la nature des fonds du golfe :

- l'apport en vases terrigène par l'Argens crée une biocénose sédimentaire particulière à l'embouchure du fleuve côtier (celle des vases terrigènes côtières) différente de l'habitat sableux principal (sables fins bien calibrés). Cette variation de biocénoses implique notamment des différences en termes de communautés benthiques et de biodiversité ;
- les herbiers à *C. nodosa*, cartographiés pour la première fois durant cette étude, couvrent une surface de 1,5 ha et forment un habitat benthique important pour de nombreuses espèces marines. Leur forte densité et leur importante dynamique de colonisation du substrat sableux en font l'une des biocénoses marines les plus importantes avec les herbiers à *P. oceanica*. Cette plante faisant l'objet de mesures légales de protection importantes, leur suivi et leur protection sont un fort enjeu de gestion.

5. LIVRABLES

Le Tableau 2 détail les fichiers livrés avec le présent rapport de mission.

Tableau 2 : Détail des livrables.

Nom	Contenu	Format
Dwg/Frejus_2022.dwg	Document autocad synthétique lié aux fichiers suivants <ul style="list-style-type: none"> Logo_eca.png Logo_logo_seaviews.png PhotosAeriennes.png biocenose.png SMF_Mono_Lidar_L93_1m.png 	dwg
Frejus_2022.pdf	Document pdf synthétique reprenant le contenu du document dwg	pdf
Geotif/SMF_mono_L93_1m.tif	Image raster de la bathymétrie combinant le sondeur multifaisceaux et le sondeur monofaisceau nécessite les fichiers suivants pour ouvrir dans un SIG <ul style="list-style-type: none"> SMF_mono_Lbr93_1m.tfw (ArcGis) SMF_mono_Lbr93_1m.TAB (MapInfo) SMF_mono_Lbr93_1m.src (Draftsight) la légende des couleurs du raster <ul style="list-style-type: none"> SMF_mono_Lbr93_1m_legende.tif 	tif
Geotif/Lidar_Photo_1m.tif	Image raster du MNT topographique mixant lidar et photogrammétrie nécessite les fichiers suivants pour ouvrir dans un SIG <ul style="list-style-type: none"> Lidar_Photo_1m.pgw (ArcGis) Lidar_Photo_1m.TAB (MapInfo) Lidar_Photo_1m.SRC (Draftsight) la légende des couleurs du raster <ul style="list-style-type: none"> Lidar_Photo_1m_legende.tfw 	tif
Geotif/SMF_Mono_Lidar.tif	Image raster du MNT topographique et bathymétrie mixant lidar, photogrammétrie, multifaisceaux et monofaisceaux nécessite les fichiers suivants pour ouvrir dans un SIG <ul style="list-style-type: none"> SMF_Mono_Lidar.tfw (ArcGis) SMF_Mono_Lidar.TAB (MapInfo) SMF_Mono_Lidar.SRC (Draftsight) la légende des couleurs du raster <ul style="list-style-type: none"> SMF_Mono_Lidar_legende.png 	tif
Geotif/biocenose.tif	Image raster des biocénoses marines nécessite les fichiers suivants pour ouvrir dans un SIG <ul style="list-style-type: none"> biocenose.tfw (ArcGis) biocenose.TAB (MapInfo) biocenose.SRC (Draftsight) la légende des couleurs du raster <ul style="list-style-type: none"> biocenose_legende.tif 	tif
Geotif/PhotosAeriennes.tif	Image raster des orthophotographies aériennes par drone nécessite les fichiers suivants pour ouvrir dans un SIG <ul style="list-style-type: none"> PhotosAeriennes.tfw (ArcGis) PhotosAeriennes.tab (MapInfo) PhotosAeriennes.scr (Draftsight) 	tif
xyz/SMF_mono_Lbr93_1m.xyz	MNT bathymétrique combinant le sondeur multifaisceaux et le sondeur monofaisceau	xyz
xyz/Lidar_Photo_1m.xyz	MNT topographique mixant lidar et photogrammétrie	xyz

xyz/SMF_Mono_Lidar.xyz	MNT bathymétrique combinant le sondeur multifaisceaux et le sondeur monofaisceau ainsi que les données lidar	xyz
Shapefile/ Frejus_2022_biocénoses_Lb93_pol.shp	Contour des biocénoses au format «shapefile» nécessite les fichiers suivants pour ouvrir dans un SIG <ul style="list-style-type: none"> • Frejus_2022_biocénoses_Lb93_pol.shx • Frejus_2022_biocénoses_Lb93_pol.qmd • Frejus_2022_biocénoses_Lb93_pol.prj • Frejus_2022_biocénoses_Lb93_pol.dbf • Frejus_2022_biocénoses_Lb93_pol.cpg 	shp
Frejus_2022_isobathes_Lb93_pol.shp	Les isobathes au format shapefile nécessite les fichiers suivants pour ouvrir dans un SIG <ul style="list-style-type: none"> • Frejus_2022_isobathes_Lb93_pol.cpg • Frejus_2022_isobathes_Lb93_pol.dbf • Frejus_2022_isobathes_Lb93_pol.prj • Frejus_2022_isobathes_Lb93_pol.qmd • Frejus_2022_isobathes_Lb93_pol.shx 	shp
isobathe.kml	Les isobathe au format kml (Googleearth)	kml
Dossier «Orthophotos»	Les orthophotos réalisées (en pleine résolution). !! documents très volumineux, peut être lourd à charger	tif

5.1. Livrable de la livraison: L_22_013

Tableau 3 : Détail des livrables.

Nom	Contenu	Format
Dwg/comparaisons.dwg	Document autocad synthétique avec les différentes couches de levé (SMF, monofaisceau, Lidar et interpolations) lié aux fichiers suivants <ul style="list-style-type: none"> • Logo_ecaa.png • Logo_logo_seaviews.png • Tous les rasters des différentes couches. 	dwg
comparaisons.pdf	Document pdf synthétique reprenant le contenu du document dwg	pdf
SMF_Mono_Lidar.xyz	MNT topographique mixant lidar et photogrammétrie	xyz