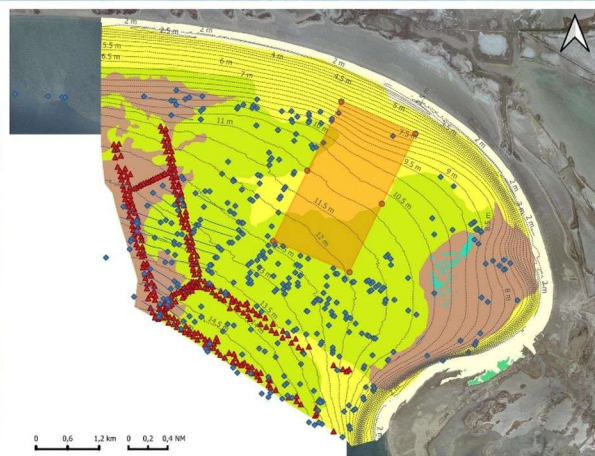
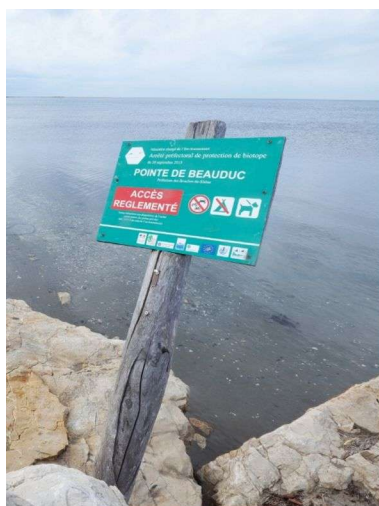


RAPPORT D'ÉTUDE

ACTUALISATION DE LA CARTOGRAPHIE DES FONDS MARINS DU GOLFE DE BEAUDUC ET DE L'ANSE DE CARTEAU DU SITE NATURA 2000 FR 9301592 « CAMARGUE »



Suivi des modifications

Référence	Version	Révisions	Date	Rédacteur(s)	Vérification
R/21/009	1	Création	01/12/2021	Arnaud Abadie	Christophe Viala
R/22/005	2	Modifications du texte et des illustrations après relecture par le PNRC, l'OFB et le GIS Posidonie	03/05/2022	Arnaud Abadie	Christophe Viala
R/22/008	Finale	Corrections mineures d'orthographe	30/05/2022	Arnaud Abadie	Christophe Viala

Contacts :

Nom	Fonction	E-mail
Arnaud Abadie	Ingénieur de recherche	abadie@seaviews.fr
Christophe Viala	Président	viala@seaviews.fr



Ce document doit être cité de la façon suivante : *Seaviews (2022) Actualisation de la cartographie des fonds marins du golfe de Beauduc et de l'anse de Carteau du site Natura 2000 FR 9301592 « Camargue ». Rapport final. Contrat PNRC/Seaviews. 59p + annexes*



Cartographie des fonds marins – Beauduc et Carteau

ACTUALISATION DE LA CARTOGRAPHIE DES FONDS MARINS DU GOLFE DE BEAUDUC ET DE L'ANSE DE CARTEAU DU SITE NATURA 2000 FR 9301592 « CAMARGUE »

Ce document constitue le rapport d'étude établi par la société SEAVIEWS relatif à l'actualisation de la cartographie des fonds marins du golfe de Beauduc et de l'anse de Carteau du site Natura 2000 FR 9301592 « Camargue ». **Cette étude a été réalisée en partenariat avec le projet européen Life Marha (LIFE16 IPE/FR001-MARHA).**

Maître d'ouvrage

Parc naturel régional de Camargue
Mas du Pont de Rousty
13200 Arles

Coordination pour le Parc naturel régional de Camargue

Delphine Marobin-Louche, Chargée de mission littoral et milieu marin

Maître d'œuvre

Seaviews
603 chemin des Severiers Nord
13600 LA CIOTAT

Coordination pour Seaviews

Christophe VIALA, président

Réalisation de l'acquisition et du traitement des données : Christophe VIALA, Arnaud ABADIE, Léo ROCQUES, Marie LAMOURET, Aimy PAYENCHET

Édition des livrables et rédaction du rapport : Arnaud ABADIE

SOMMAIRE

1. OBJET DE L'ÉTUDE.....	10
1.1. Contexte.....	10
1.1.1. Le Parc naturel régional de Camargue.....	10
1.1.2. Les biocénoses marines du site Natura 2000.....	11
1.1.3. Les activités humaines et l'environnement marin.....	13
1.2. Objectifs.....	14
1.3. Zones d'étude.....	15
1.3.1. Le golfe de Beauduc.....	15
1.3.2. L'anse de Carteau.....	16
2. PROTOCOLES DE MESURE.....	18
2.1. Cartographie des habitats marins.....	18
2.1.1. Principe général.....	18
2.1.2. Orthophotographies aériennes.....	19
2.1.2.1. Caractéristiques.....	19
2.1.2.2. Analyse des données.....	19
2.1.3. Données acoustiques.....	20
2.1.3.1. Le sondeur monofaisceau.....	20
2.1.3.2. Le sondeur multifaisceaux.....	21
2.1.3.3. Traitement des données.....	23
2.1.4. Vérités terrain.....	25
2.1.4.1. La vidéo tractée.....	25
2.1.4.2. La plateforme de surface.....	26
2.1.5. Génération d'un catalogue géoréférencé.....	27
2.1.6. Génération de la carte des biocénoses marines.....	28
2.1.7. Analyse de l'évolution de la bathymétrie.....	30
3. CARTOGRAPHIE DES HABITATS MARINS.....	31
3.1. Golfe de Beauduc.....	31
3.1.1. Bathymétrie.....	31
3.1.2. Mosaïque sonar.....	31
3.1.3. Biocénoses marines.....	34
3.1.4. Herbiers sous-marins.....	37
3.1.5. Traces d'activités humaines.....	40
3.2. Anse de Carteau.....	41
3.2.1. Bathymétrie.....	41
3.2.2. Mosaïque sonar.....	43
3.2.3. Biocénoses marines.....	43
3.2.4. Traces d'activités humaines.....	47
4. ÉVOLUTION DES BIOCÉNOSES ET IMPACT DES PRESSIONS.....	48



4.1. Golfe de Beauduc.....	48
4.1.1. Évolution du trait de côte et de la bathymétrie.....	48
4.1.2. Surface des biocénoses.....	50
4.1.3. Pression de pêche.....	53
4.1.4. Détection des searocks.....	54
4.2. Anse de Carteau.....	55
4.2.1. Surface des biocénoses.....	55
4.2.2. Pression de l'ancrage et du chalutage.....	57
5. CONCLUSION.....	58
6. BIBLIOGRAPHIE.....	59

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Périmètre classé PNRC et préimètre Natura 2000. Source : PNRC.....	10
Figure 2 : Aplysie fasciée (<i>Aplysia fasciata</i>) sur un fond sableux dans le golfe de Beauduc.....	11
Figure 3 : Localisation des épaves et des récifs artificiels dans le périmètre du PNRC et de la zone Natura 2000. Source : PNRC.....	11
Figure 4 : Une prairie de zostères naines (<i>Zostera noltei</i>) dans le golfe de Beauduc.....	12
Figure 5 : Une grande nacre (<i>Pinna nobilis</i>) dans un herbier de zostères dans le golfe de Beauduc.....	12
Figure 6 : Un filet de pêche par petits fonds dans le golfe de Beauduc.....	13
Figure 7 : Les tables de conchyliculture de l'anse de Carteau.....	13
Figure 8 : Passage d'un porte-conteneurs à proximité de l'anse de Carteau.....	14
Figure 9 : Limites de la zone d'étude dans le golfe de Beauduc.....	15
Figure 10 : Un grau cerné par des dunes végétalisées dans le golfe de Beauduc.....	16
Figure 11 : Un herbier à <i>Zostera noltei</i> dans le golfe de Beauduc.....	16
Figure 12 : Limites de la zone d'étude dans l'anse de Carteau.....	17
Figure 13 : L'herbier mixte à <i>Z. noltei</i> et <i>C. nodosa</i> dans l'anse de Carteau.....	17
Figure 14 : Couplage des différentes couches de données cartographiques pour générer une carte des biocénoses marines.....	18
Figure 15 : Déformation d'une photographie à cause du relief du terrain. 1) prise de vue inclinée. 2) prise de vue frontale. 3) projection orthophotographique.....	19
Figure 16 : Principe de fonctionnement des tuiles photographiques facilitant la visualisation de fichiers volumineux à très haute résolution.....	20
Figure 17 : Le sondeur ISA 500.....	20
Figure 18 : Réalisation des levés au sondeur monofaisceau dans l'anse de Carteau.....	21
Figure 19 : Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux.....	21
Figure 20 : Le Seaviews One.....	22
Figure 21 : Le R2SONIC 2022.....	22
Figure 22 : Centrale d'attitude Applanix I2NS.....	22
Figure 23 : Célérimètre Valeport miniSVS.....	23
Figure 24 : Filtrage des faux échos dans le logiciel ViewSMF de Seaviews.....	23
Figure 25 : Exemple de la différence de qualité entre a) une image sans traitement et b) une image avec traitement « snippets ».....	24
Figure 26 : Exemple de détection d'herbiers sous-marins, de roches et de récifs artificiels dans la baie de La Ciotat avec l'indice BATCLAS.....	24
Figure 27 : L'aile métallique sous-marine de Seaviews équipée d'une caméra pour valider la cartographie par vidéo tractée.....	26
Figure 28 : La plateforme de photogrammétrie sous-marine géoréférencée PHOTOCEAN.....	27
Figure 29 : Visualisation du catalogue géoréférencé de vérité terrain dans le logiciel Google Earth.....	28
Figure 30 : Synthèse de la méthode de génération des cartes d'habitats marins à partir de la fusion des données.....	29
Figure 31 : Génération de la carte des variations bathymétriques dans le logiciel ViewMap.....	30
Figure 32 : Identification des récifs anti-chalut et des filets de pêche sur l'imagerie acoustique dans le golfe de Beauduc.....	31
Figure 33 : Carte bathymétrique du golfe de Beauduc réalisée avec un sondeur multifaisceaux.....	32
Figure 34 : Carte de la réflectivité acoustique du fond (image sonar) dans le golfe de Beauduc.....	33
Figure 35 : Les fonds de vases terrigènes de la partie ouest du golfe de Beauduc.....	34
Figure 36 : Capture d'écran de la vidéo tractée sur l'herbier de <i>Magnoliophytes marines</i> en novembre 2021.....	35
Figure 37 : Carte des biocénoses marines benthiques du golfe de Beauduc.....	36

Figure 38 : Matte de zostère naine dans le golfe de Beauduc.....	37
Figure 39 : A) Partie dense du centre de l'herbier de zostères naines et B) sa bordure avec des rhizomes plagiotropes et des feuilles courtes.....	37
Figure 40 : Exemple de macrodéchets observés dans l'herbier à <i>Z. noltei</i> du golfe de Beauduc. À gauche un tuyau PVC concrétionné et à droite une bouteille en plastique.....	38
Figure 41 : Cartographie de 2021 des herbiers à <i>Zostera noltei</i> dans le golfe de Beauduc.....	38
Figure 42 : Aplysies fasciées (<i>Aplysia fasciata</i>) dans l'herbier de zostère du golfe de Beauduc A) en pleine reproduction et B) en train de se nourrir des feuilles de la plante.....	40
Figure 43 : Récif anti-chalut (searock) couché.....	40
Figure 44 : Carte des traces d'activités humaines et des biocénoses marines dans le golfe de Beauduc.....	41
Figure 45 : Carte bathymétrique de l'anse de Carteau issue de la fusion de données d'un sondeur multifaisceaux (entre 2 et 12 m) et d'un sondeur monofaisceau (entre 0 et 2 m).....	42
Figure 46 : Carte de la réflectivité acoustique du fond (image sonar) dans l'anse de Carteau.....	43
Figure 47 : Photographies des fonds marins de l'anse de Carteau. A) Un herbier mixte à <i>C. nodosa</i> et <i>Z. noltei</i> peu dense ; B) Un herbier moyennement dense ; C) Un herbier très dense ; D) Limite entre l'herbier et les sables vaseux ; E) Litière de feuilles mortes et de déchets ; F) Sables vaseux nus.....	45
Figure 48 : Carte des biocénoses marines benthiques de l'anse de Carteau.....	46
Figure 49 : Carte des traces d'activités humaines et des biocénoses marines dans l'anse de Carteau.....	47
Figure 50 : Fonctionnement des cellules sédimentaires sur le littoral de la Camargue. Source : Sabatier (2001).....	48
Figure 51 : Évolution de la position du trait de côte du golfe de Beauduc entre 1895 et 2000. Source : Sabatier & Suanez (2003).....	48
Figure 52 : Évolution du trait de côte entre 2010 et 2019 au niveau de la pointe de Beauduc.....	49
Figure 53 : Évolution de la bathymétrie entre 2008 et 2021 dans le golfe de Beauduc.....	50
Figure 54 : Évolution surfacique de l'herbier à <i>Z. noltei</i> du golfe de Beauduc entre 2011 et 2021. Source des données : de 2011 à 2018 PNR Camargue ; 2021 Seaviews.....	52
Figure 55 : Évolution morphologique de l'herbier à <i>Z. noltei</i> du golfe de Beauduc entre 2011 et 2021. Source des données : 2011 PNR Camargue ; 2021 Seaviews.....	52
Figure 56 : Plan d'implantation des récifs de type searocks dans le golfe de Beauduc. Source : Héloin, 2005.....	54
Figure 57 : Mise en évidence sur les photos aériennes de la formation d'un cordon lagunaire (en rouge) entre 2010 et 2019 dans l'anse de Carteau.....	56

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Surfaces des biocénoses benthiques cartographiées durant cette étude dans le golfe de Beauduc.....	34
Tableau 2 : Caractéristiques des grandes nacres (<i>Pinna nobilis</i>) observées durant la cartographie des herbiers à <i>Z. noltei</i> dans le golfe de Beauduc.....	39
Tableau 3 : Surfaces des biocénoses benthiques cartographiées durant cette étude dans l'anse de Carteau.....	44
Tableau 4 : Surface des biocénoses marines en 2008 et en 2021 dans le golfe de Beauduc.....	51
Tableau 5 : Caractérisation de la dynamique d'évolution des herbiers à <i>Z. noltei</i> du golfe de Beauduc entre 2011 et 2021. Source des données : de 2011 à 2018 PNR Camargue ; 2021 Seaviews.....	53
Tableau 6 : Surfaces des biocénoses marines en 2008 et en 2021 dans l'anse de Carteau.....	55

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.

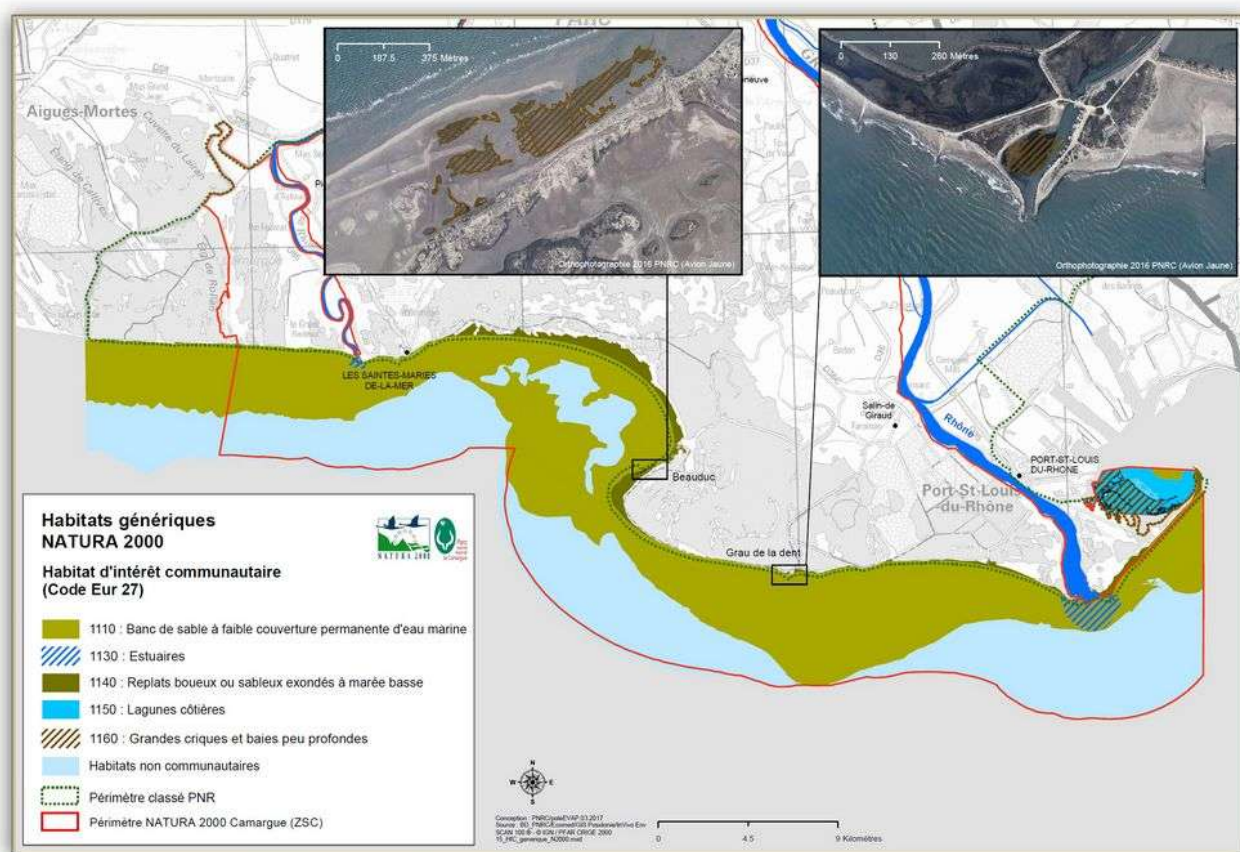
1. OBJET DE L'ÉTUDE

1.1. Contexte

1.1.1. Le Parc naturel régional de Camargue

Le Parc naturel régional de Camargue (PNRC) a été créé en 1970 afin de promouvoir le patrimoine naturel, culturel et humain des zones humides présentes au sein de son périmètre (Figure 1). Le PNRC couvre une superficie de plus de 100 000 ha et une façade maritime de 75 km dans le delta du Rhône. Bien que la densité d'habitants soit très faible (10 habitants/km²), ses paysages sont largement façonnés par l'être humain au travers d'activités agricoles (élevage bovin, riziculture, saliculture) dont certaines remontent à plus de 2 000 ans.

Le PNRC est également inclus dans le site Natura 2000 terrestre et marin FR9301592 «Camargue» du fait de ses habitats, de sa flore et de sa faune remarquables, qui s'étend jusqu'aux 3 milles marins et englobe notamment le golfe de Beauduc à l'est des Saintes-Maries-de-la-Mer, et l'anse de Carteau au sud de Port-Saint-Louis-du-Rhône (113 466 ha).



Parc naturel régional de Camargue - SIT des PNR PACA - www.pnrcpaca.org

Figure 1 : Périmètre classé PNRC et périmètre Natura 2000. Source : PNRC.

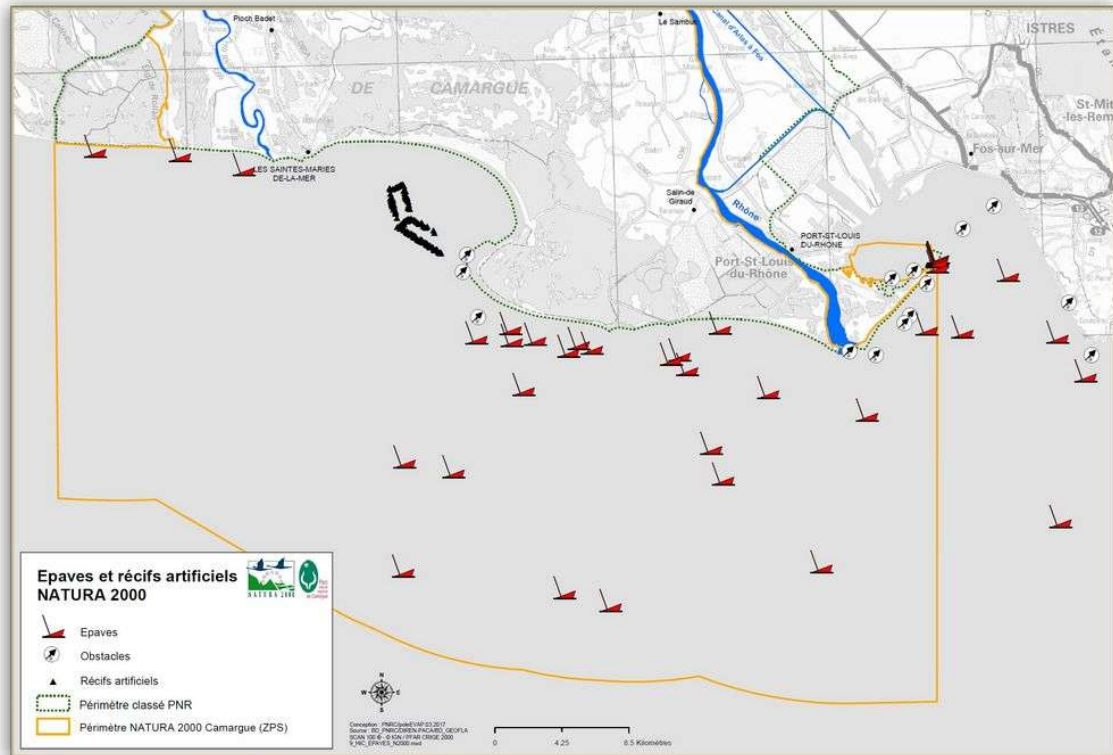
1.1.2. Les biocénoses marines du site Natura 2000



Figure 2 : Aplysie fasciée (*Aplysia fasciata*) sur un fond sableux dans le golfe de Beauduc.

Les fonds marins du site Natura 2000 sont principalement constitués par des biocénoses sableuses ou vaseuses variées soumises à un fort hydrodynamisme. Les fonds meubles abritent une importante biodiversité d'espèces benthiques mobiles comme les raies et les hippocampes (*Hippocampus spp.*) mais également des bivalves comme les tellines ou des mollusques gastéropodes comme les natices, les murex ou les aplysies (Figure 2).

Les épaves et autres récifs artificiels (Figure 3) constituent les rares substrats durs de la zone. Bien qu'occupant des surfaces très réduites, ils permettent l'installation de la faune fixée comme les anémones bijou (*Corynactis viridis*). Ils ont également le lieu de fortes accumulations de poissons comme le loup (*Dicentrarchus labrax*).



Parc naturel régional de Camargue – SIT des PNR PACA – www.pnrcpaca.org

Figure 3 : Localisation des épaves et des récifs artificiels dans le périmètre du PNRC et de la zone Natura 2000. Source : PNRC.

Des prairies marines plurispécifiques, composés par les plantes *Zostera marina* (zostère marine), *Zostera noltei* (zostère naine) et *Cymodocea nodosa* (cymodocée), sont présentes à faible profondeur dans les zones abritées de la houle et des courants (Figure 4). Elles jouent un rôle d'abri et de nurserie pour de nombreuses espèces marines. Ce type d'herbier constitue également l'un des derniers habitats refuges pour la grande nacre (*Pinna nobilis*), une espèce endémique ayant subi une importante chute de ses populations du fait d'un parasite (Figure 5).



Figure 4 : Une prairie de zostères naines (*Zostera noltei*) dans le golfe de Beauduc.



Figure 5 : Une grande nacre (*Pinna nobilis*) dans un herbier de zostères dans le golfe de Beauduc.

1.1.3. Les activités humaines et l'environnement marin

Les parties marines du site Natura 2000 sont le lieu de nombreuses activités humaines. Les eaux poissonneuses du golfe de Beauduc constituent un site privilégié pour le calage d'engins par les pêcheurs professionnels. Le chalutage étant interdit depuis 1990 en deçà de l'isobathe 100 mètres (par le décret n° 90-95 du 25 Janvier 1990 - article 8 - et par l'arrêté préfectoral n° 99-162 du 10 Juin 1999 - article 2 de la préfecture maritime de Méditerranée), ce sont des navires dits de «petits métiers» de pêche artisanale qui travaillent sur zone. Les principaux engins utilisés sont des filets de fonds (Figure 6) et des casiers. La pêche professionnelle cible également les tellines (*Donax trunculus*), un bivalve vivant enfoui dans le sable et qui est récolté en utilisant des dragues à bras.



Photo : A. Abadie/Seaviews

Figure 6 : Un filet de pêche par petits fonds dans le golfe de Beauduc.

Une activité traditionnelle de conchyliculture (huîtres et moules), qui regroupe une cinquantaine d'exploitants, se déroule également au centre de l'anse de Carteau avec une centaine de tables placées entre 4 et 7 m de profondeur (Figure 7).



Photo : A. Abadie

Figure 7 : Les tables de conchyliculture de l'anse de Carteau.

Les eaux côtières du site Natura 2000 sont également sujettes à la pêche récréative à la canne, le plus souvent depuis des petites embarcations motorisées, mais également à pieds depuis le bord ou dans les eaux peu profondes comme aux abords des herbiers dans le golfe de Beauduc. Parmi les autres activités nautiques de loisir se trouvent la navigation de plaisance, les sports de voile (kitesurf, planche à voile, dériveur) et les activités motorisés comme le scooter de mer. Ces activités se déroulent principalement durant la période estivale et sont principalement concentrées à proximité de la ville des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Enfin, l'anse de Carteau jouxte une zone d'intense trafic maritime avec le passage fréquent de navire de grande taille de transport de cargaisons comme des porte-conteneurs, des tankers ou des vraquiers (Figure 8). Le trafic maritime a pour principal impact de générer du bruit sous-marin pouvant perturber les mammifères marins. Les navires représentent également un risque de marée noire pour les habitats marins et les oiseaux de l'anse de Carteau.



Photo : A. Abadie

Figure 8 : Passage d'un porte-conteneurs à proximité de l'anse de Carteau.

1.2. Objectifs

Le but de cette étude était de réaliser une actualisation des données cartographiques du golfe de Beauduc afin d'étudier l'évolution des habitats marins et de leur état écologique depuis 2008 (date de la dernière cartographie des biocénoses benthiques). Ainsi, les données obtenues au cours de cette étude ont fourni des informations concernant :

- la bathymétrie ;
- la nature sédimentaire des fonds ;
- les herbiers sous-marins ;
- les pressions anthropiques.

Les données acquises dans l'anse de Carteau ont quant à elles permis d'actualiser l'estimation des surfaces occupées par les herbiers marins et les impacts anthropiques avant la mise en place des mesures de gestion du DOCOB.

1.3. Zones d'étude

Deux zones d'étude ont fait l'objet de prospections cartographiques au moyen de levés acoustiques et d'observations sous-marines : le golfe de Beauduc et l'anse de Carteau.

1.3.1. Le golfe de Beauduc

La zone d'étude du golfe de Beauduc est située à l'est de la ville des Saintes-Maries-de-la-Mer et s'étend entre les isobathes 15 m et 2 m pour une superficie de 47 km² (Figure 9). Au centre de la zone se trouve un cantonnement de pêche créé en 2013 d'une surface de 4,5 km² (Figure 9). Le littoral du golfe est caractérisé par des plages sableuses, des dunes végétalisées (Figure 10) et des étangs communicants avec la mer par des chenaux étroits (graus). Les fonds marins du golfe sont principalement de nature sableuse (Labadie et Evans, 2012). Un herbier de *Zostera noltei* est présent au nord de la pointe de Beauduc et se développe depuis les années 2000s à des profondeurs très faibles variant entre 1 m et 10 cm (Figure 11).

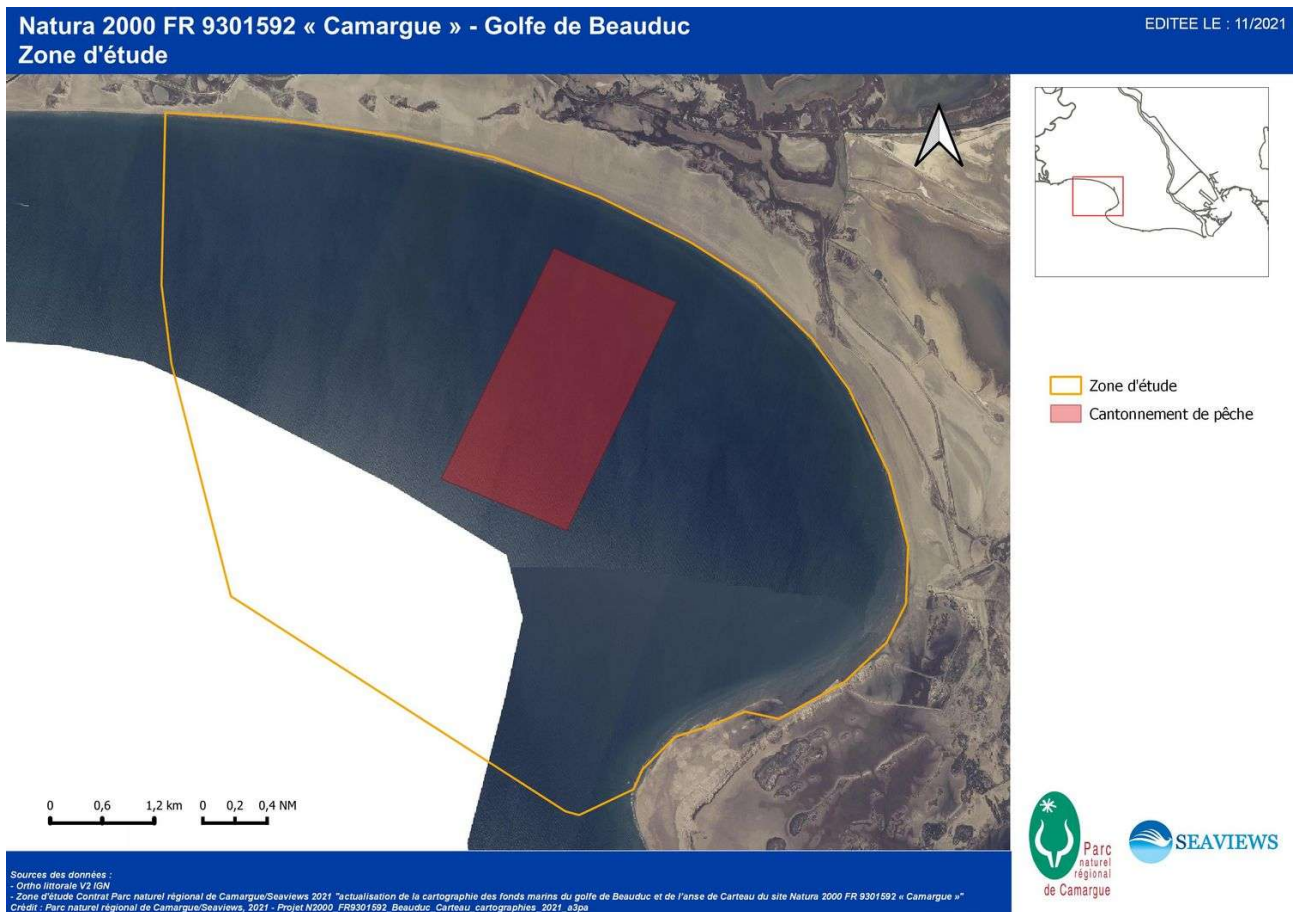


Figure 9 : Limites de la zone d'étude dans le golfe de Beauduc.



Photo : A. Abadie/Seaviews

Figure 10 : Un grau cerné par des dunes végétalisées dans le golfe de Beauduc.



Photo : A. Abadie/Seaviews

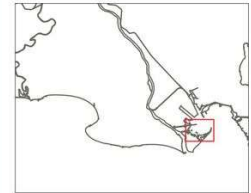
Figure 11 : Un herbier à *Zostera noltei* dans le golfe de Beauduc.

1.3.2. L'anse de Carteau

La zone d'étude de l'anse de Carteau est située au sud de Port-Saint-Louis-du-Rhône (Figure 12). Elle couvre une superficie d'environ 10 km. Au centre de la zone d'étude se trouve une centaine de tables de conchyliculture qui occupent une surface d'environ 80 ha (Figure 12). Les fonds marins de l'anse de Carteau sont principalement de nature sableuse dans sa moitié est, tandis que la partie ouest est colonisée par une prairie mixte de *Zostera noltei* et de *Cymodocea nodosa* (Ruitton et al., 2008 ; Figure 13).

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Anse de Carteau
Zone d'étude

EDITEE LE : 11/2021



Zone d'étude
Conchyliculture

Sources des données :
- Ortho littorale V2 IGN
- Zone d'étude Contrat Parc naturel régional de Camargue/Seaviews 2021 "actualisation de la cartographie des fonds marins du golfe de Beauduc et de l'anse de Carteau du site Natura 2000 FR 9301592 « Camargue »"
Crédit : Parc naturel régional de Camargue/Seaviews, 2021 - Projet N2000_FR9301592_Beauduc_Carteau_cartographies_2021_83pa

Figure 12 : Limites de la zone d'étude dans l'anse de Carteau.



Figure 13 : L'herbier mixte à *Z. noltei* et *C. nodosa* dans l'anse de Carteau.

2. PROTOCOLES DE MESURE

2.1. Cartographie des habitats marins

2.1.1. Principe général

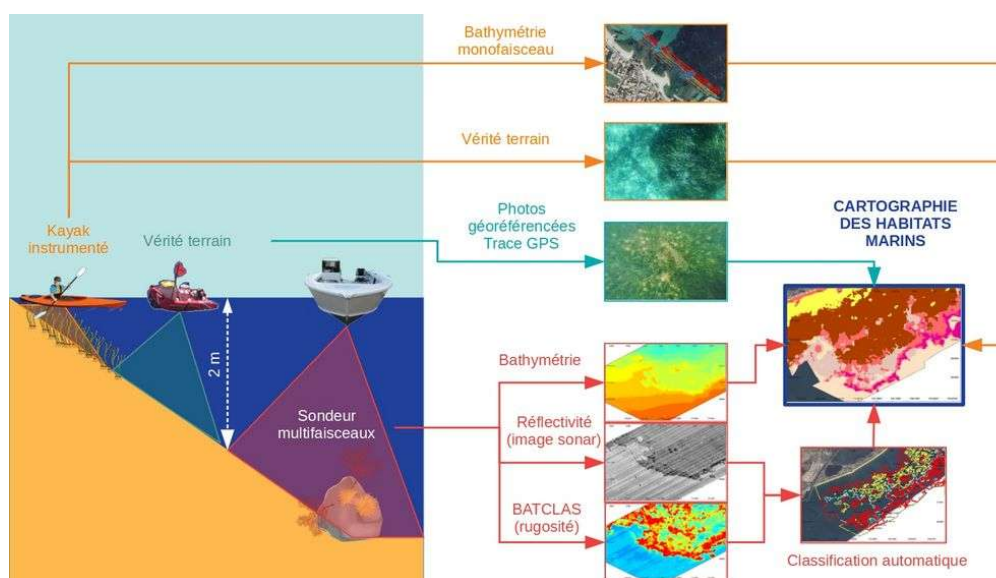


Figure 14 : Couplage des différentes couches de données cartographiques pour générer une carte des biocénoses marines.

Le principe général de la méthode de cartographie des habitats marins utilisée durant cette étude est résumé dans la Figure 14. Cette technique consiste en la superposition de plusieurs couches de données géoréférencées afin de générer une carte exhaustive des biocénoses marines. Ces données sont de différentes natures selon la profondeur des habitats cartographiés :

- des orthophotographies aériennes ont été utilisées de 0 à 2 m de profondeur uniquement dans l'anse de Carteau. Les données qui ont été utilisées pour cette étude sont issues de la BD Ortho de 2019 de l'Institut national de l'information géographique (IGN) et ont une résolution de 20 cm ;
- des données acoustiques ont été utilisées pour les profondeurs à partir de l'isobathe 2 m. L'acquisition a été réalisée dans l'anse de Carteau et dans le golfe de Beauduc avec un sondeur multifaisceaux permettant d'obtenir simultanément la bathymétrie et une image de la réflectivité du fond (image sonar). La précision de positionnement des données obtenues est centimétrique tandis que la résolution est de 1 m. Dans l'anse de Carteau des levés bathymétriques supplémentaires ont été effectués en kayak avec un sondeur monofaisceau avec un espacement de 100 m entre chaque ligne de mesure ;
- des observations de terrain géoréférencées obtenues notamment lors des levés acoustiques au sondeur monofaisceau en kayak dans l'anse de Carteau avec un appareil photo fixé sous la coque, ou lors de la cartographie de la limite des herbiers dans le golfe de Beauduc. Une campagne de vidéo tractée a été réalisée dans le golfe de Beauduc afin de vérifier la présence d'herbiers sous-marins profonds ainsi que certaines traces anthropiques sur le fond.

Ces données sont ensuite fusionnées afin de délimiter les biocénoses marines. Les données se superposent en plusieurs endroits permettant ainsi une plus grande fiabilité des cartes générées.

2.1.2. Orthophotographies aériennes

2.1.2.1. Caractéristiques

Les photographies aériennes ont été réalisées via la technique de l'orthophotographie. Ce procédé informatique permet de redresser une image selon le relief du terrain en utilisant un modèle mathématique de ce dernier (Figure 15). Ce modèle mathématique est appelé modèle numérique de terrain (MNT). Les orthophotographies sont réalisées par l'IGN par temps clair et par mer calme entre mai et septembre. Pour la cartographie des habitats sous-marins, leur utilisation est limitée à une profondeur d'environ 15 m dans les eaux peu turbides en raison de l'absorption de la lumière par la colonne d'eau.

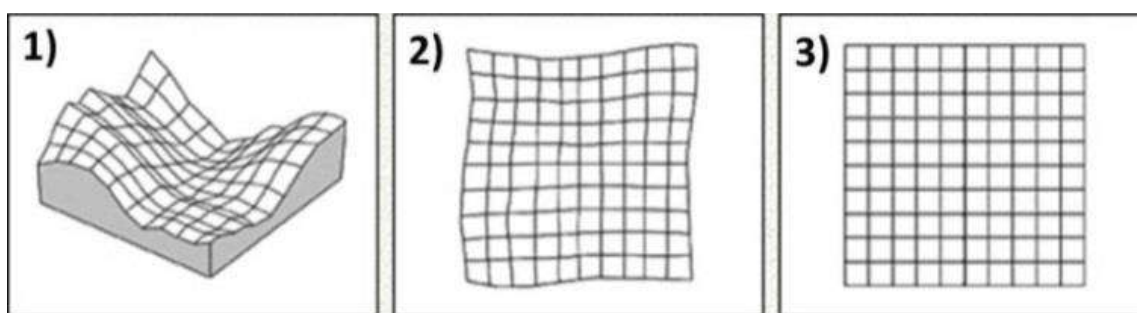


Figure 15 : Déformation d'une photographie à cause du relief du terrain. 1) prise de vue inclinée. 2) prise de vue frontale. 3) projection orthophotographique.

Les orthophotographies utilisées dans cette étude ont été acquises par l'IGN en 2019 et possèdent une résolution de 20 cm. Afin d'être facilement combinées aux autres données permettant la cartographie des habitats marins, les orthophotographies ont été transformées en tuiles photographiques (Figure 16) et intégrées au SIG ViewMap développé par Seaviews.

2.1.2.2. Analyse des données

Deux types de traitements des données sont réalisés sur les orthophotographies aériennes en utilisant le logiciel ViewMap :

- l'étude de l'évolution du trait de côte en traçant manuellement la position du littoral à partir de photographies aériennes d'années différentes. Ici ce sont des photographies de 2010 (Ortholitt V2), 2016 (BD Ortho) et 2019 (BD Ortho) qui ont été employées ;
- la classification automatisée des fonds marins (ici dans la partie peu profonde de l'anse de Carteau) en utilisant un algorithme d'analyse d'image basé sur la couleur des pixels (Nicolas, 2021).

Ces données sont ensuite exportées au format .shp pour être éditées dans le logiciel QGIS.

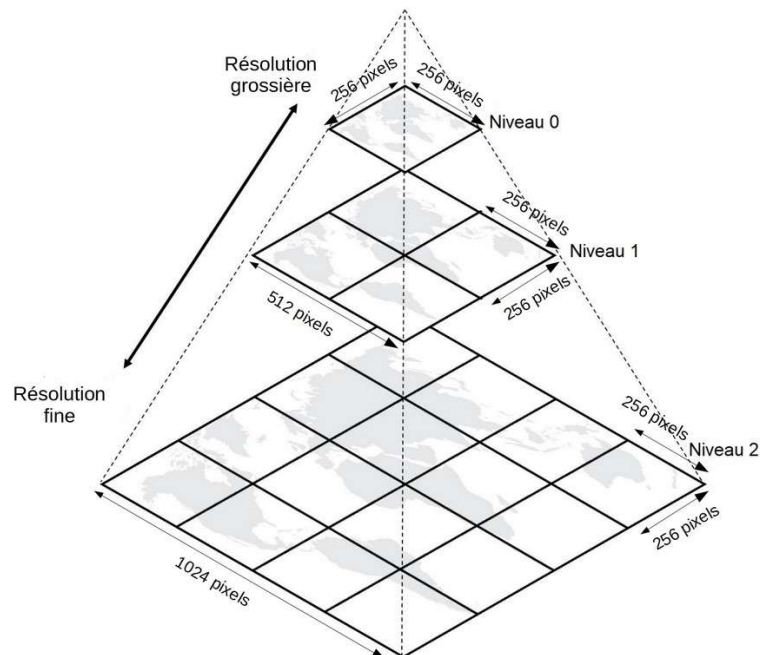


Figure 16 : Principe de fonctionnement des tuiles photographiques facilitant la visualisation de fichiers volumineux à très haute résolution.

2.1.3. Données acoustiques

2.1.3.1. Le sondeur monofaisceau

Le sondeur monofaisceau a été utilisé pour des mesures au-dessus de l'isobathe 2 m dans l'anse de Carteau.



Le sondeur monofaisceau ISA500 de Impact SubSea (Figure 17) 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 17 : Le sondeur ISA 500.

Durant cette étude le ISA 500 était monté sur un kayak de mer (Figure 18) 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 en juin-juillet 2021 (5 jours, environ 40 km de levé).



Figure 18 : Réalisation des levés au sondeur monofaisceau dans l'anse de Carteau.

2.1.3.2. Le 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 19). La mesure est ainsi réalisée sur une multitude de points répartis le long d'une ligne perpendiculaire à la trajectoire du navire.

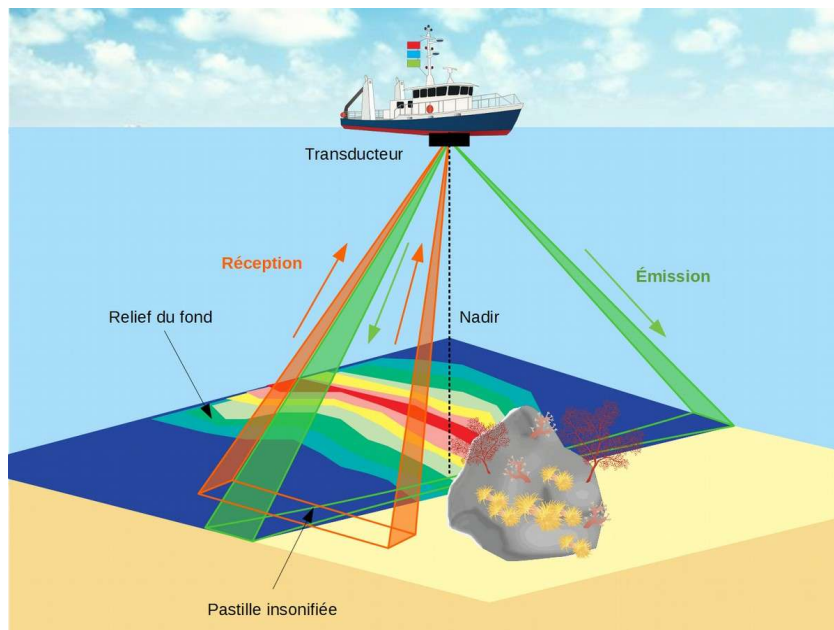


Figure 19 : Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux.

L'acquisition des données acoustiques SMF a été réalisée en juin-juillet 2021 dans l'anse de Carteau (5 jours environ 230 km de levé) et entre août et novembre 2021 dans le golfe de Beauduc (20 jours, environ 1 100 km de levé).



Photo : A. Abadie/Seaviews

Figure 20 : Le Seaviews One.

Les données ont été acquises à l'aide du Seaviews One (Figure 20), 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 21 : Le R2SONIC 2022.

Le SMF employé lors des levés acoustiques est un R2Sonic 2022 (Figure 21). 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 22 : 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 22) 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, le réseau de bases RGP de l'IGN a été utilisé afin de post-traiter les données de navigation et obtenir une précision centimétrique des levés acoustiques.

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 23 : Célérimètre Valeport miniSVS.

Tout au long des mesures, deux célérimètres Valeport miniSVS (Figure 23) 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.

2.1.3.3. 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 24). 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.

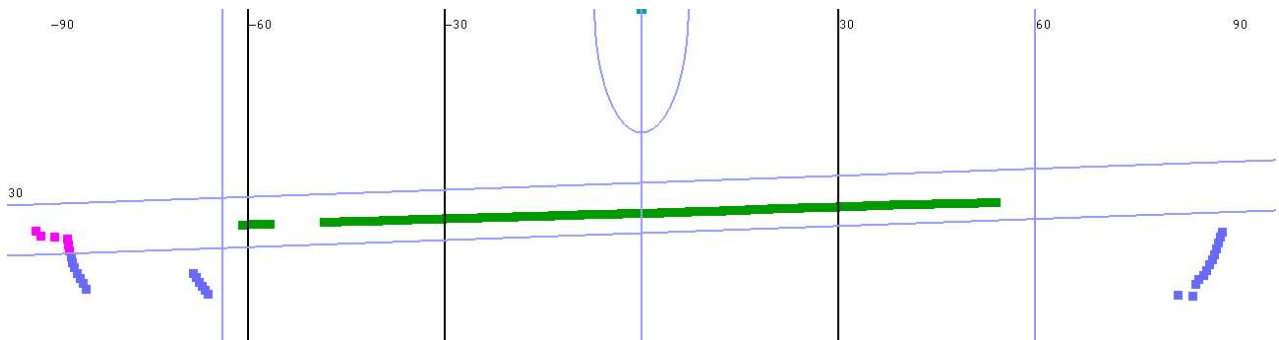


Figure 24 : Filtrage des faux échos dans le logiciel ViewSMF de Seaviews.

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 25). Une bande bruitée est visible au nadir du fait de la verticalité de l'angle d'incidence de l'onde acoustique émise.

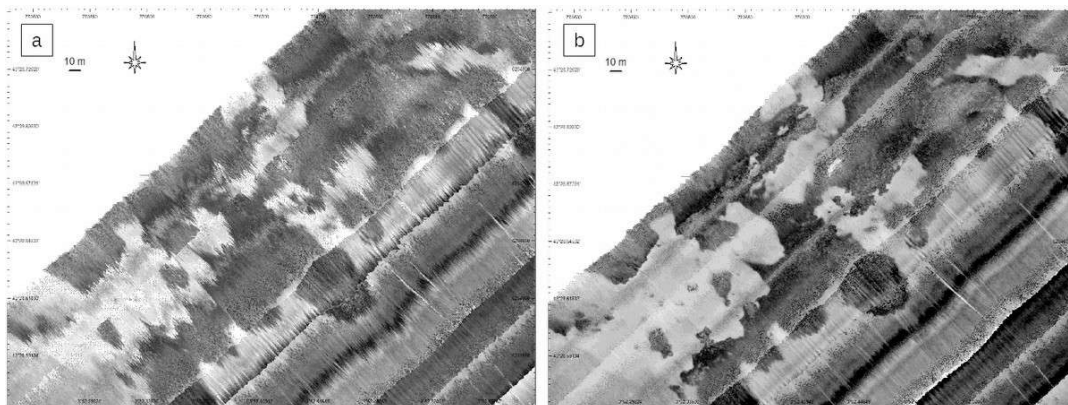


Figure 25 : Exemple de la différence de qualité entre a) une image sans traitement et b) une image avec traitement « snippets ».

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 26) 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.

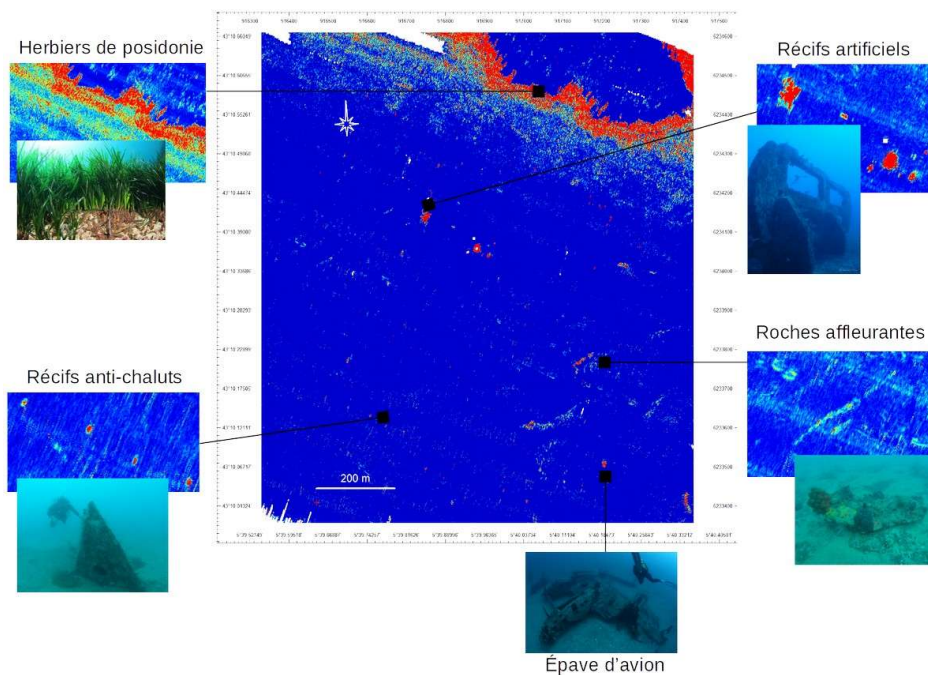


Figure 26 : Exemple de détection d'herbiers sous-marins, de roches et de récifs artificiels dans la baie de La Ciotat avec l'indice BATCLAS.

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 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.

2.1.4. Vérités terrain

Afin de valider les observations faites sur les données acoustiques et de télédétection aérienne, une campagne de vérités terrain a été réalisée en octobre/novembre 2021 dans le golfe de Beauduc et en juin/juillet 2021 dans l'anse de Carteau. Les vérités terrain portaient principalement sur deux aspects importants de la cartographie des biocénoses marines :

- la validation de la position de la limite des herbiers de *Z. noltei* à proximité de la pointe de Beauduc ;
- la position des autres herbiers à Magnoliophytes marines qui sont difficilement détectés sur les données acoustiques du SMF.

Pour atteindre ces deux objectifs, trois méthodes de vérification ont été employées : la vidéo tractée, la vidéo embarquée sous un kayak et les observations de surface géoréférencées.

En plus de ces observations sous-marines, la position des bouées de surface des engins de pêche a été relevée tout au long de la réalisation des levés acoustiques. Ces données ont été prises en compte dans l'inventaire des pressions présentes dans la zone d'étude.

2.1.4.1. La vidéo tractée

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 27). Ce « poisson » est tracté par le Seaviews One équipé d'un GNSS centimétrique permettant un géoréférencement métrique des transects vidéo. Ce système est principalement utilisé pour valider la position de la limite profonde des herbiers à *P. oceanica*. Il peut également être employé pour cartographier des zones par photogrammétrie en y fixant un appareil photo en mode time-lapse.

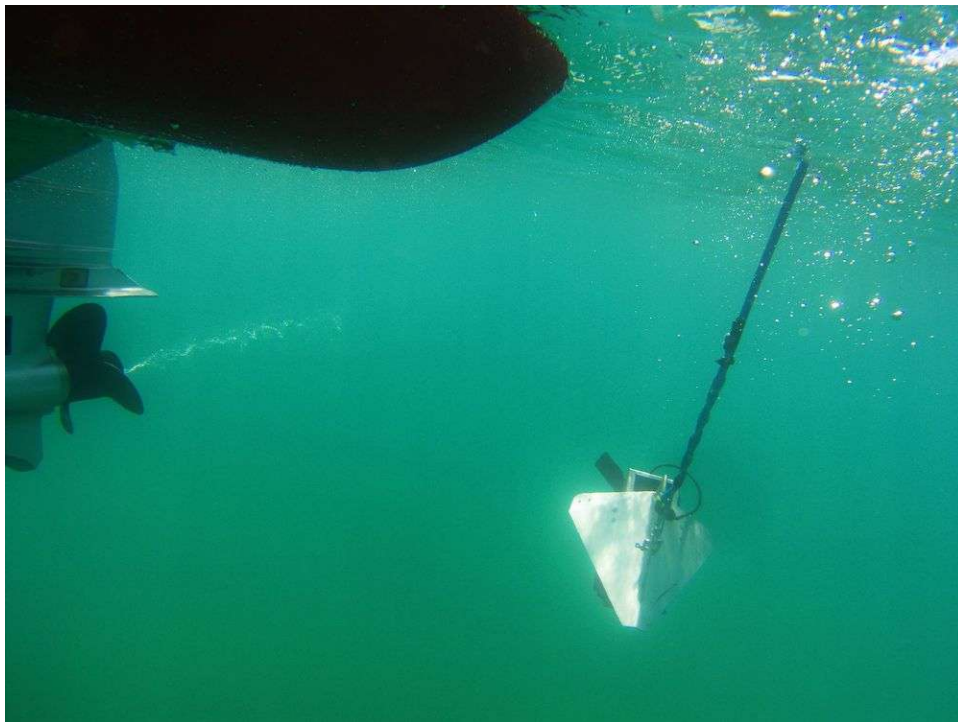


Figure 27 : L'aile métallique sous-marine de Seaviews équipée d'une caméra pour valider la cartographie par vidéo tractée.

2.1.4.2. La plateforme de surface

La plateforme flottante PHOTOCEAN (Figure 28) a été développée par Seaviews afin de réaliser des prises de vue subaquatique géoréférencées depuis la surface. Dans ce but, elle est composée :

- D'un système flottant léger et compact permettant de la déployer depuis le bord et de la transporter facilement ;
- D'un GNSS RTK North (précision centimétrique), de son antenne et de sa batterie permettant plusieurs heures d'acquisition sans charge ;
- D'une tablette étanche Caterpillar T20 disposant d'un GPS intégré. Cette tablette permet de naviguer grâce au logiciel ViewMap ;
- D'un appareil photo haute définition (24 Megapixels) Sony A6000 avec un objectif Sony 10-18 mm (grand angle) dans un caisson Ikelite monté sur un support rigide ;

Les appareils photo et le GNSS RTK sont synchronisés afin de fournir une position précise à chaque photographie.

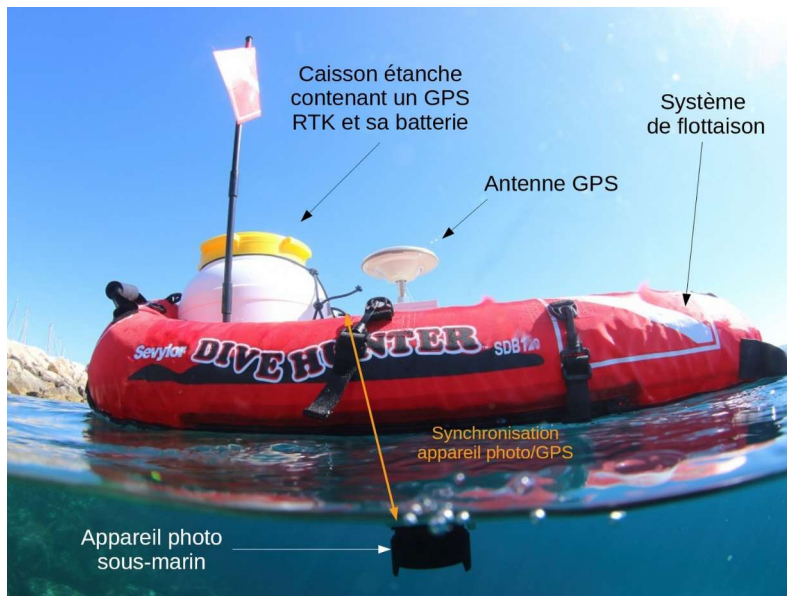


Figure 28 : La plateforme de photogrammétrie sous-marine géoréférencée PHOTOCEAN.

2.1.5. Génération d'un catalogue géoréférencé

Les données de géoréférencement du GPS ont été directement exportées et éditées dans le logiciel ViewMap, permettant ainsi d'obtenir une couche SIG de la localisation des points de vérité terrain. Les attributs suivants sont ensuite renseignés dans cette couche pour chaque observation :

- ses coordonnées GPS ;
- sa profondeur ;
- une courte description ;
- la nature de la biocénose ;
- le lien vers les photos correspondantes.

Enfin, la couche SIG est exportée au format .kml et .shp afin d'être facilement consultable et éditée (Figure 29). Les renseignements implémentés précédemment apparaissent sous la forme de fiches avec informations et photos.

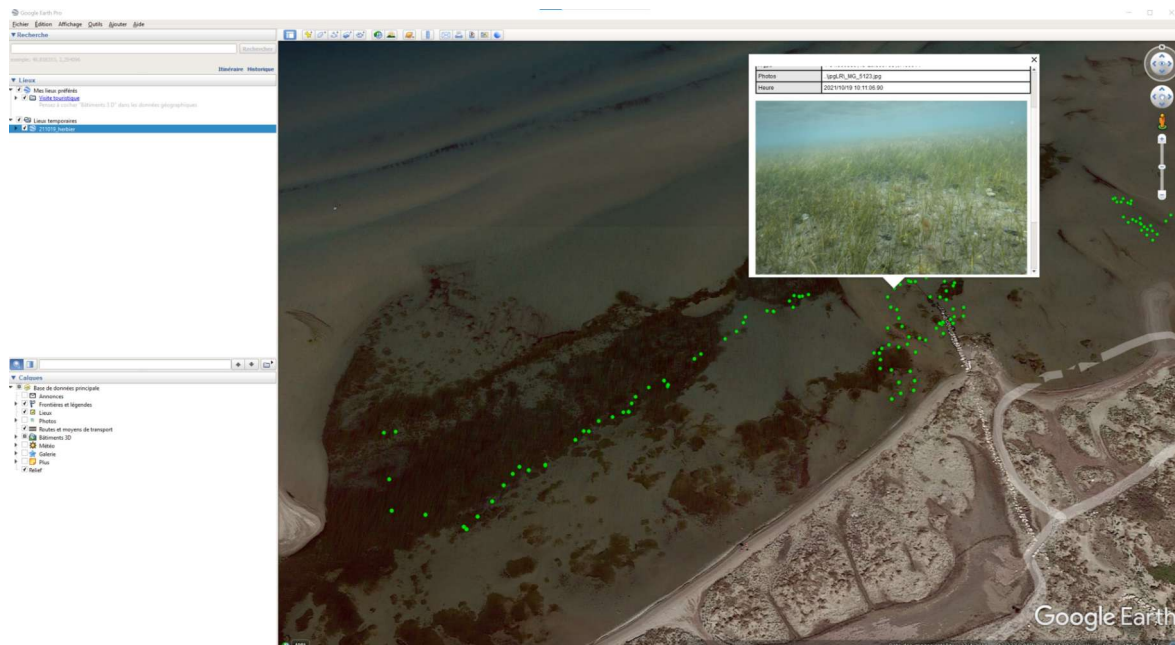


Figure 29 : Visualisation du catalogue géoréférencé de vérité terrain dans le logiciel Google Earth.

2.1.6. Génération de la carte des biocénoses marines

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 30) 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 les cartographies (Annexe 1 et 2) :
 - de 2008 dans le golfe de Beauduc réalisée par la société Semantic TS (Noel, 2008) ;
 - de 2008 dans l'anse de Carteau réalisée par le groupement GIS Posidonie, Copetech et HydroConsult (Ruitton et al., 2008) ;
 - de 2012 , synthèse cartographique réalisée par In Vivo Environnement dans le cadre des inventaires biologiques des habitats marins du site Natura 2000 (Labadie & Evans, 2012). Ces données ont notamment été utilisées pour définir les classes d'habitats sableux du golfe de Beauduc.
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).

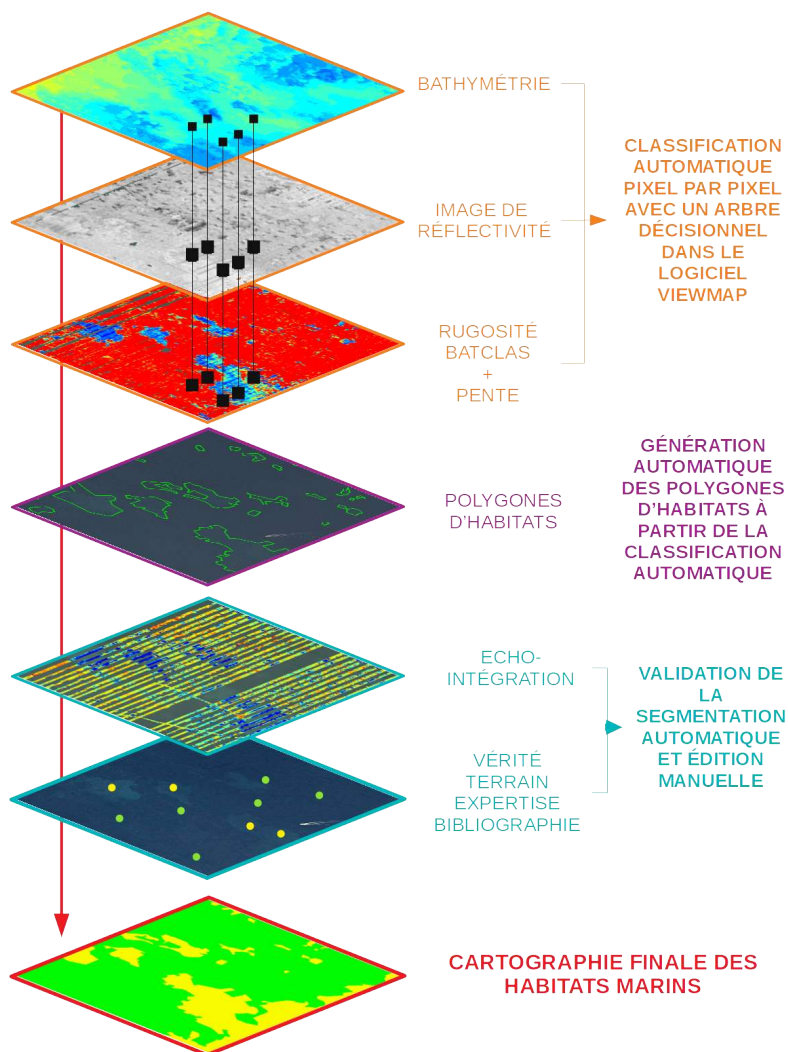


Figure 30 : Synthèse de la méthode de génération des cartes d'habitats marins à partir de la fusion des données.

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.

2.1.7. Analyse de l'évolution de la bathymétrie

L'analyse de l'évolution de la bathymétrie dans le golfe de Beauduc a été réalisée en comparant dans le logiciel ViewMap le MNT réalisé en 2008 avec celui obtenu durant cette étude (Figure 31). Les MNT sont maillés de façon identique (ici une résolution de 1 m) et les variations de bathymétrie sont mises en évidence grâce à un code couleur : rouge pour une augmentation de la profondeur, vert pour une diminution et gris lorsqu'il n'y a pas de variation. Le fichier obtenu est un MNT qui permet de connaître la valeur de la variation de profondeur en chaque point de la zone d'étude. La carte des différences bathymétriques est ensuite exportée au format raster pour être éditée dans le logiciel QGIS. Il est important de noter que seules des isobathes sont disponibles en 2008 et que le MNT qui en est issu est peu précis ce qui induit une comparaison moins fine qu'avec un MNT non interpolé.

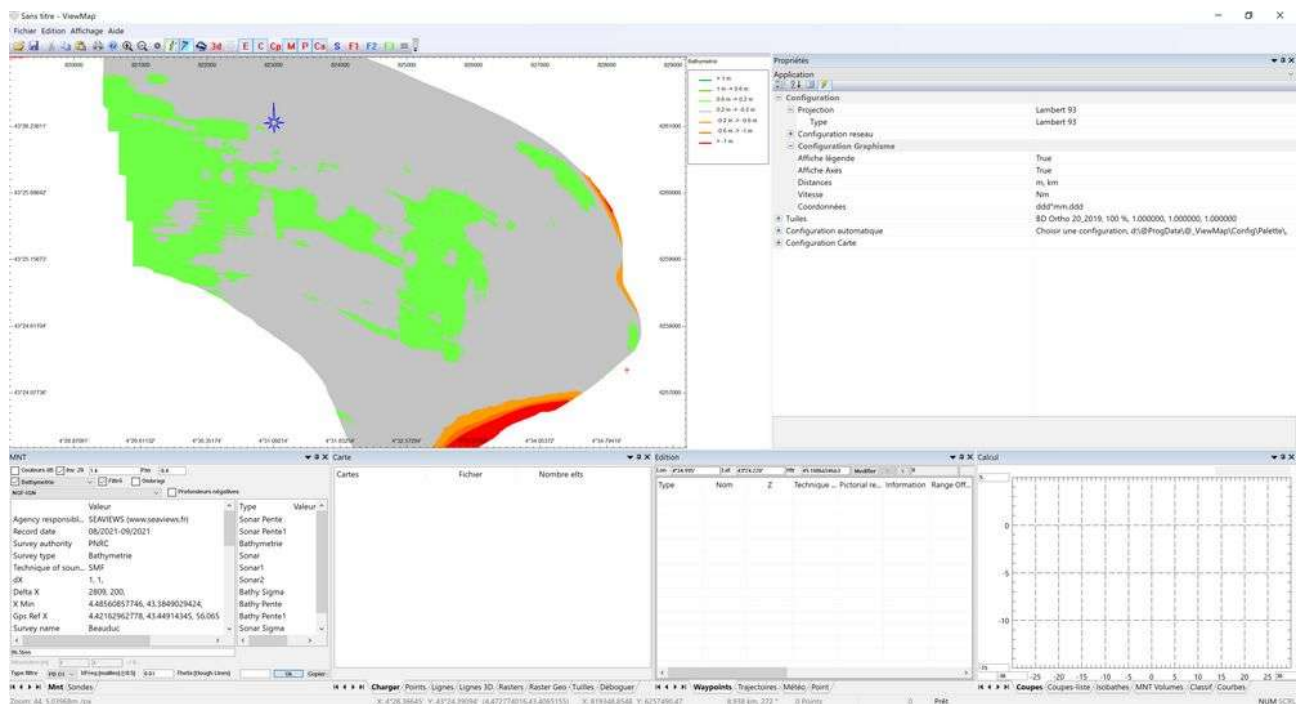


Figure 31 : Génération de la carte des variations bathymétriques dans le logiciel ViewMap.

3. CARTOGRAPHIE DES HABITATS MARINS

3.1. Golfe de Beauduc

3.1.1. Bathymétrie

La carte bathymétrique du golfe de Beauduc montre une augmentation progressive de la profondeur de l'isobathe 2 m jusqu'à celle de 15 m (Figure 33). Aucun relief naturel n'est visible sur cette carte exception faite à proximité du littoral où les fonds sableux forment des bancs avec des alternances de creux et de bosses (Figure 33).

3.1.2. Mosaïque sonar

La mosaïque sonar met en évidence des variations de faciès sédimentaires en lien avec la granulométrie (Figure 34). Les fortes réflectivités acoustiques, matérialisées par une nuance de gris sombre, correspondent à du sédiment à granulométrie fine de type vase. Les faibles réflectivités sont quant à elle mises en évidence par les nuances claires et reflètent un sédiment à la granulométrie plus grossière comme différents niveaux de sables.

Ainsi, la carte de réflectivité du fond (Figure 34) indique que les parties ouest et est de la zone d'étude sont occupées par un substrat à la granulométrie fine de nature vaseuse. Le centre du golfe est quant à lui couvert par un sédiment plus grossier de type intermédiaire entre le sable et la vase avec une réflectivité moyenne. La plus faible réflectivité est observée le long du littoral à des faibles profondeurs et renvoie à la présence d'un sédiment relativement grossier en comparaison des autres faciès de la zone.

Il est également possible de reconnaître sur la mosaïque sonar la présence des récifs anti-chalut de type «searock» ainsi que la présence de filet de pêche grâce à leurs flotteurs qui ont une forte signature acoustique (Figure 32). Les lests des bouées balisant les limites du cantonnement de pêche sont également visibles.

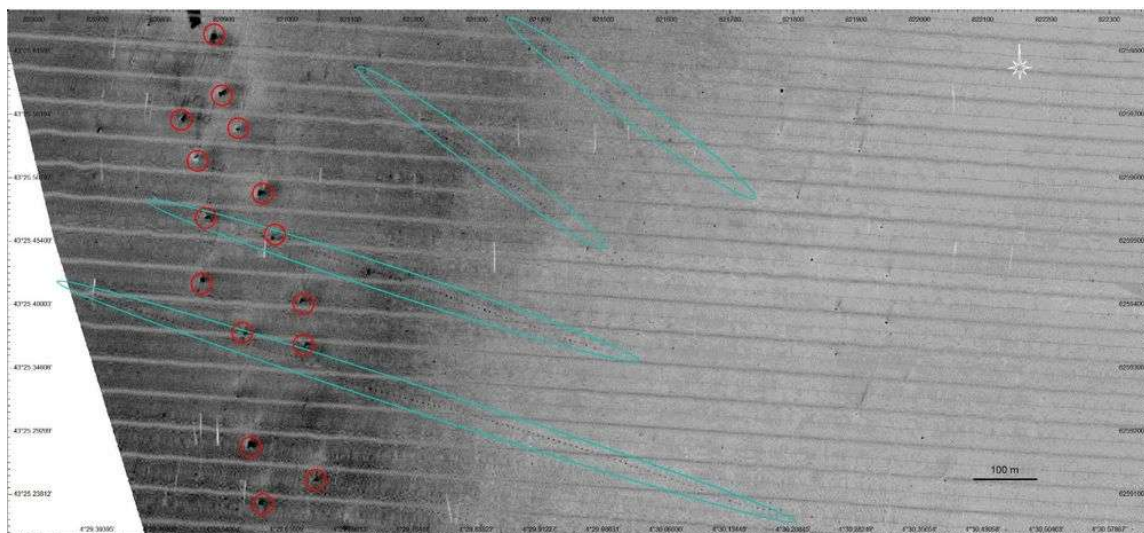


Figure 32 : Identification des récifs anti-chalut et des filets de pêche sur l'imagerie acoustique dans le golfe de Beauduc.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Golfe de Beauduc Bathymétrie

EDITEE LE : 01/2022

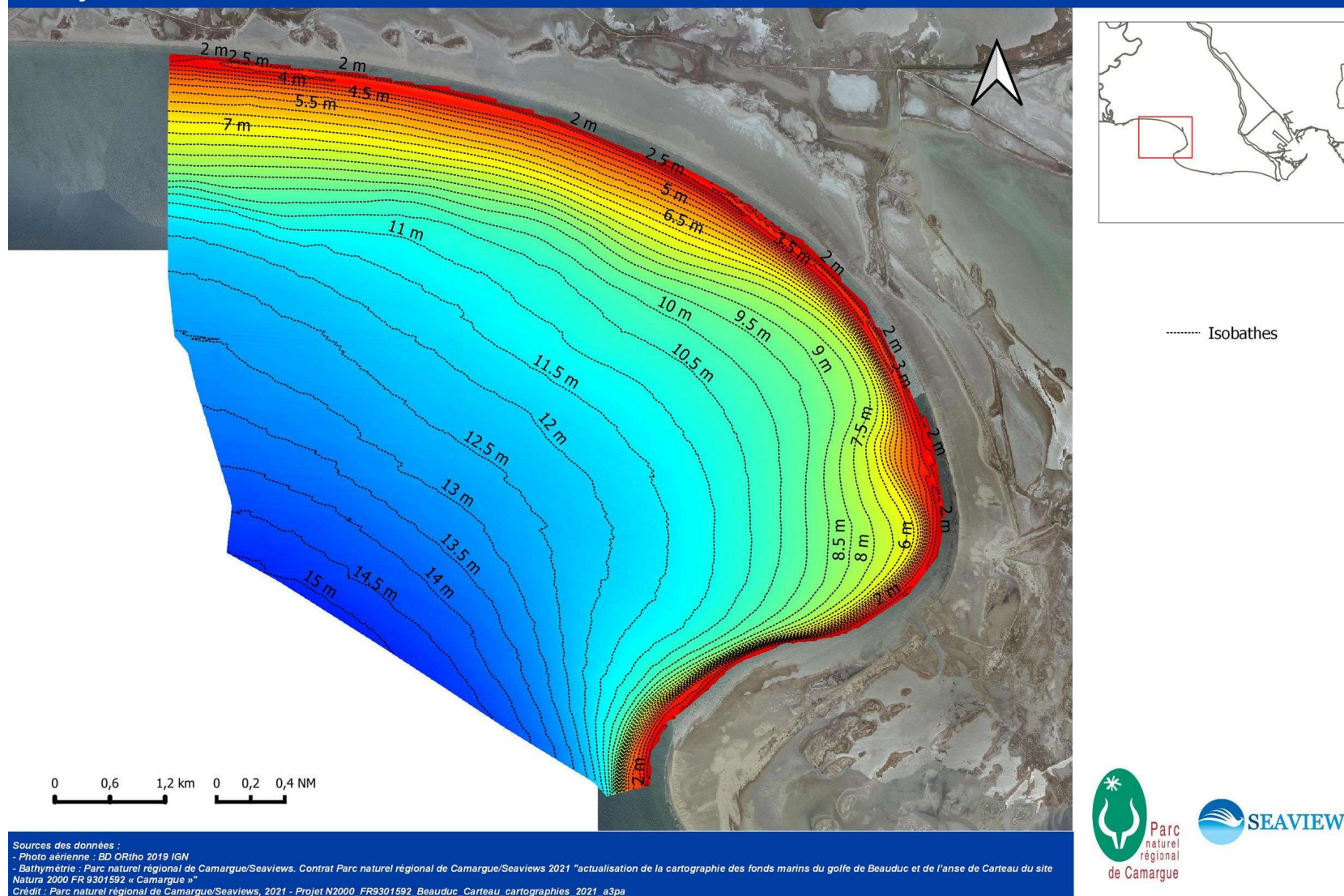
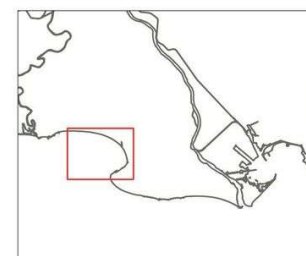
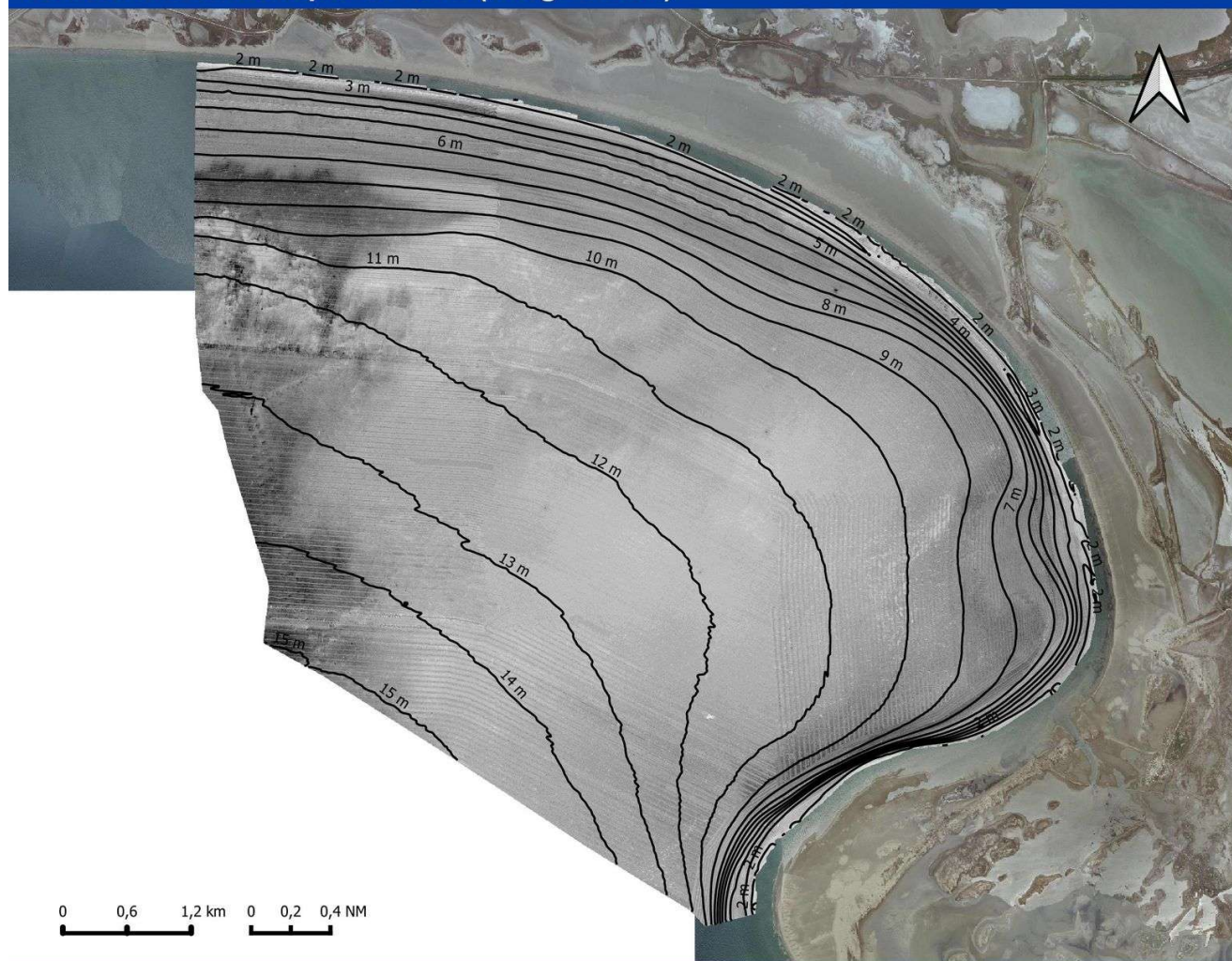


Figure 33 : Carte bathymétrique du golfe de Beauduc réalisée avec un sondeur multifaisceaux.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Golfe de Beauduc
Réflectivité acoustique du fond (image sonar)

EDITEE LE : 12/2021



— Isobathes

Sources des données :
- Photo aérienne : BD ORtho 2019 IGN
- Mosaïque sonar : Parc naturel régional de Camargue/Seaviews. Contrat Parc naturel régional de Camargue/Seaviews 2021 "actualisation de la cartographie des fonds marins du golfe de Beauduc et de l'anse de Carteau du site Natura 2000 FR 9301592 « Camargue »"
Crédit : Parc naturel régional de Camargue/Seaviews, 2021 - Projet N2000_FR9301592_Beauduc_Carteau_cartographies_2021_a3pa



Figure 34 : Carte de la réflectivité acoustique du fond (image sonar) dans le golfe de Beauduc.

3.1.3. Biocénoses marines

Les biocénoses benthiques du golfe de Beauduc sont principalement de nature sédimentaire. L'habitat majoritaire est un mixte sable-vase qui couvre une surface de 2201,96 ha au centre de la zone d'étude (Figure 37). Des vases terrigènes côtières sont présentes à l'est et à l'ouest du golfe avec une couverture totale de 888,84 ha (Tableau 1). De larges surfaces de sables fins bien calibrés (1293,89 ha) sont observables au dans la partie nord du golfe, tandis que la zone jouxtant le littoral est occupée par la biocénose des sables fins de haut niveau (Figure 37). L'habitat 'sable-vase' correspond à une transition entre les sables fins bien calibrés et les vases terrigènes côtières, la limite entre ces deux biocénoses étant difficile à préciser.

Tableau 1 : Surfaces des biocénoses benthiques cartographiées durant cette étude dans le golfe de Beauduc.

Biocénose	Surface (ha)
Sable-vase	2201,96
Sables fins bien calibrés (SFBC)	1293,89
Sables fins de haut niveau (SFHN)	368,84
Vases terrigènes côtières (VTC)	888,84
Association à <i>Zostera noltei</i>	9,01
Herbier à Magnoliophytes marines	17,08
TOTAL	4762,49

La nature et l'agencement des biocénoses sédimentaires du golfe de Beauduc sont liés aux apports fluviaux importants du Rhône et aux courants dominants (Figure 35). Les courants vont ainsi favoriser l'accumulation de sédiments de nature intermédiaire au centre du golfe. Les aires exposées à l'hydrodynamisme à proximité du littoral sont quant à elles couvertes par des biocénoses sableuses.



Figure 35 : Les fonds de vases terrigènes de la partie ouest du golfe de Beauduc.

La forte turbidité liée à la nature sédimentaire du fond et l'exposition aux courants issus de la houle limitent fortement le développement d'herbiers sous-marins à l'intérieur du golfe. La partie calme et abritée située au sud-est de la zone d'étude est propice à la colonisation des plantes marines avec notamment la présence d'une association à *Zostera noltei* comprenant également *Zostera marina*, *Ruppia* sp. et *Cymodocea nodosa* installée depuis 2005 et suivie par le Parc de Camargue. Cet herbier fait l'objet d'une protection au sein de la zone de protection de biotope de la pointe de Beauduc créée en septembre 2013 (terrestre et marine). Il y est interdit de mouiller, de kitesurfer et d'utiliser des engins pour la pêche à pied.

Il est également important de noter qu'un nouvel herbier à Magnoliophytes marines a été détecté sur les données acoustiques acquises en août 2021 et sa présence a été confirmée par des transects de vidéo tractée en novembre 2021. Du fait de la morphologie des herbiers liés à la saisonnalité, c'est un herbier très peu dense avec des feuilles courtes qui a été observé lors de la campagne de vérité terrain (Figure 36). Cet herbier, situé à l'est du cantonnement de pêche, couvre une surface de 17,08 ha (Tableau 1) entre 9 m et 10,5 m de profondeur. Il restera à déterminer les espèces présentes et la densité par des observations en plongées à des périodes plus appropriées (Printemps-été).

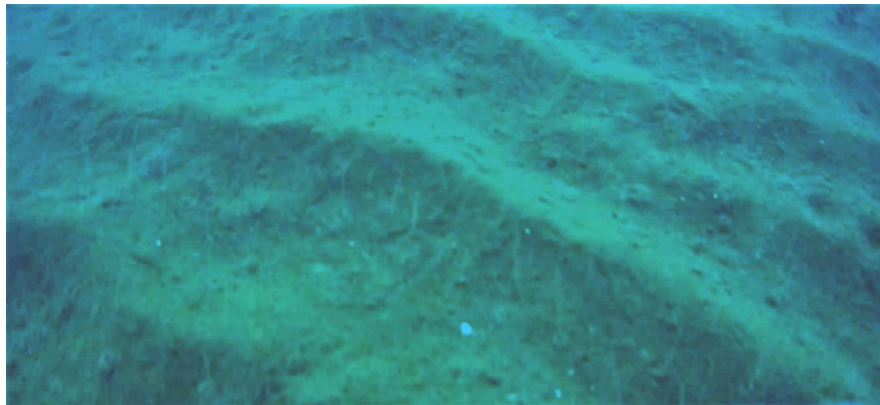


Figure 36 : Capture d'écran de la vidéo tractée sur l'herbier de Magnoliophytes marines en novembre 2021.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Golfe de Beauduc
Biocénoses marines

EDITEE LE : 05/2022

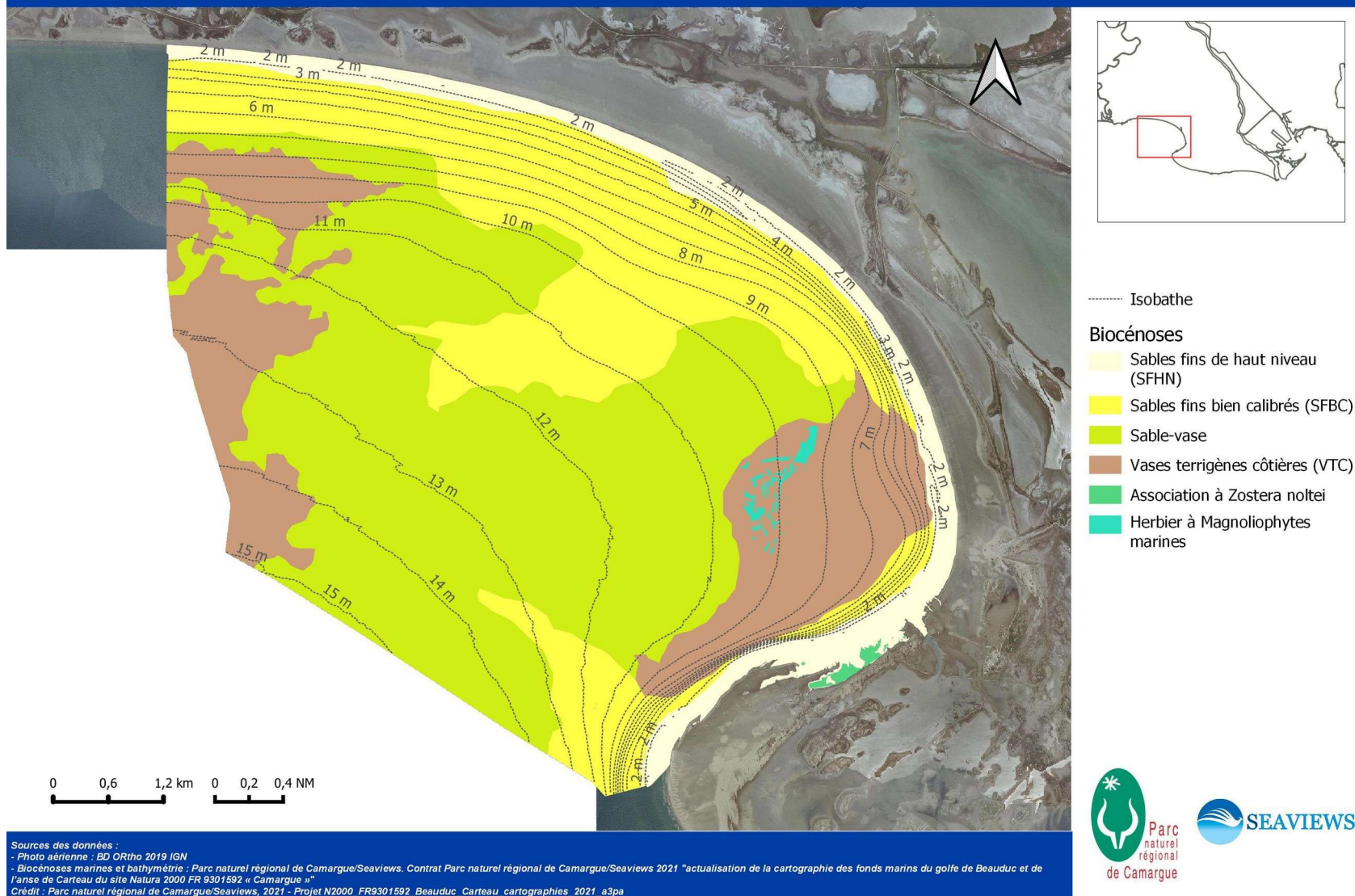


Figure 37 : Carte des biocénoses marines benthiques du golfe de Beauduc.

3.1.4. Herbiers sous-marins

L'herbier mixte marin composé en majorité de zostères naines (*Zostera noltei*), dont la carte précédente date de 2018¹, a été à nouveau cartographié durant l'étude (Figure 41). Il se situe à la base de la pointe de Beauduc et couvre une surface totale de 9 ha entre 0,1 m et 1,2 m de profondeur. Il faut cependant noter que la cartographie a été réalisée à l'automne 2021 (suite aux difficultés météorologiques), période où les herbiers ont déjà commencé à régresser, alors que le suivi réalisé par le Parc se fait en juillet au maximum de leur développement.

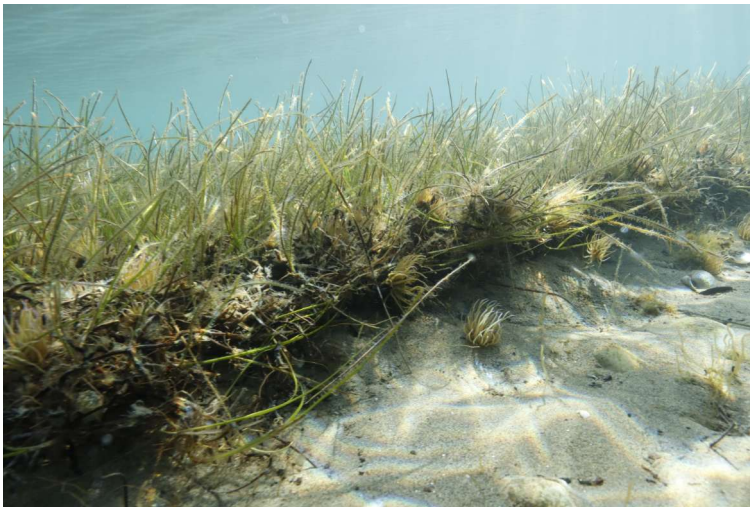


Figure 38 : Matte de zostère naine dans le golfe de Beauduc.

La limite de son aire de répartition semble très contrainte par les déplacements sédimentaires formant des bancs sableux ainsi que par l'hydrodynamisme de la zone. L'herbier présente des variations de densité importante avec un gradient visible en son centre, qui a une forte densité de faisceaux avec des feuilles longues (Figure 39A), et les bords plus clairsemés avec des feuilles plus courtes et des rhizomes plagiotropes (Figure 39B). Une structuration en mat (d'une dizaine de centimètres d'épaisseur) des rhizomes et des racines de la plante a également été remarquée en plusieurs endroits de la limite de l'herbier (Figure 38). Ce type de structure a notamment pour rôle le stockage du carbone sous forme organique et indique que l'herbier est âgé de plusieurs années.



Figure 39 : A) Partie dense du centre de l'herbier de zostères naines et B) sa bordure avec des rhizomes plagiotropes et des feuilles courtes.

Des traces d'origine anthropique ont également été observées dans l'herbier comme des macrodéchets de type bouteilles en plastique, tuyau PVC, verre, canettes, emballages alimentaires (Figure 40).

¹ Le Parc suit l'évolution de cet herbier depuis son apparition en 2005 et le cartographie en interne depuis 2011 suite à des relevés GPS en plongée libre couplé aux données d'orthophotographies littorales.



Figure 40 : Exemple de macrodéchets observés dans l'herbier à *Z. noltei* du golfe de Beauduc. À gauche un tuyau PVC concrétionné et à droite une bouteille en plastique.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Golfe de Beauduc
Herbiers à *Zostera noltei*

EDITEE LE : 11/2021



Figure 41 : Cartographie de 2021 des herbiers à *Zostera noltei* dans le golfe de Beauduc.

Durant l'acquisition des données cartographiques, trois grandes nacres (une morte et deux vivantes) ont été observées au cœur de l'herbier principal (Tableau 2). Il est important de noter que ces trois individus ont été repérés inopinément lors de traversées entre deux zones à cartographier. Le recensement exhaustif ne faisait pas partie des objectifs de cette étude. Les grandes nacres sont apparues en 2012 dans l'herbier et se concentrent dans la partie plus ancienne et stable de celui-ci. Le Parc en a réalisé un inventaire en 2015 et effectue un suivi annuel en interne en palmes masques tubas depuis 2016 sur des transects où les individus sont géolocalisés et mesurés.

Tableau 2 : Caractéristiques des grandes nacres (*Pinna nobilis*) observées durant la cartographie des herbiers à *Z. noltei* dans le golfe de Beauduc.

Photo	Statut	Coordonnées GPS (WGS 84)	Observations
	Vivante	4°34.752' E 43°23.825' N	Individu fortement colonisé par des anémones. Environ 15 cm de hauteur (visible).
	Morte	4°34.820' E 43°23.867' N	Individu fortement colonisé par des anémones. L'intérieur de la coquille est vide. Environ 25 cm de hauteur (visible).
	Vivante	4°34.767' E 43°23.834' N	Individu sans aucune colonisation de sa coquille Environ 20 cm de hauteur (visible).

Enfin, un rassemblement d'Aplysies fasciées (*Aplysia fasciata*) a été observé le 18 et 19 octobre 2021 lors de la campagne de cartographie de l'herbier de zostère. Des groupes d'individus en plein accouplement ou en train de se nourrir dans l'herbier ont été vus (Figure 42). Plusieurs dizaines d'individus morts échoués sur la plage ont également été recensés. En tout plusieurs centaines d'individus ont été observés sur les deux jours. D'après le Parc naturel régional de Camargue, l'herbier est apprécié des aplysies et la reproduction y est régulièrement observée. Par ailleurs, en 2021, les aplysies ont été très nombreuses dans toute la zone marine camarguaise, même en dehors de l'herbier, et les pêcheurs professionnels ont indiqué en avoir retrouvé régulièrement dans les filets.



Figure 42 : *Aplysia fasciata* dans l'herbier de zostère du golfe de Beauduc A) en pleine reproduction et B) en train de se nourrir des feuilles de la plante.

3.1.5. Traces d'activités humaines

Les traces d'activités humaines cartographiées dans le golfe de Beauduc sont toutes liées à l'activité de pêche professionnelle. La position des bouées de surface des engins de pêche calés a été relevée durant l'acquisition des données acoustiques du fond. Il s'agit donc ici du nombre cumulé de bouées observées sur 17 jours de mesures en mer. 398 bouées ont ainsi été recensées. Elles sont principalement localisées entre 12 et 16 m de profondeur dans la partie sud de la zone d'étude (Figure 44). Seules deux bouées ont été observées dans le périmètre du cantonnement de pêche. Il est important de noter qu'il est impossible de connaître la nature de l'engin de pêche (casier, filet, palangre, pots à poulpes) et que deux bouées peuvent indiquer un même engin.

En parallèle de ces informations obtenues en surface, les données acoustiques permettent quant à elle de détecter la présence de filets de fond dont les lests signent fortement sur les images de réflectivité du fond. Un total de 31 filets a été recensé de la sorte, tous situés dans le quart sud-ouest de la zone d'étude (Figure 44). Les données acoustiques du fond (rugosité et réflectivité) permettent aussi de cartographier les récifs anti-chalut (searocks ; Figure 43) déposés pour empêcher le chalutage dans le golfe. 296 de ces dispositifs ont été détectés dans la zone d'étude, bordant le golf à l'ouest et au sud sur deux lignes parallèles entre 11 et 16 m de profondeur (Figure 44). Aucune trace de chalut n'a été observée sur les données acoustiques acquises durant cette étude dans le golfe de Beauduc.



Figure 43 : Récif anti-chalut (searock) couché.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Golfe de Beauduc
Traces d'activités humaines

EDITEE LE : 05/2022

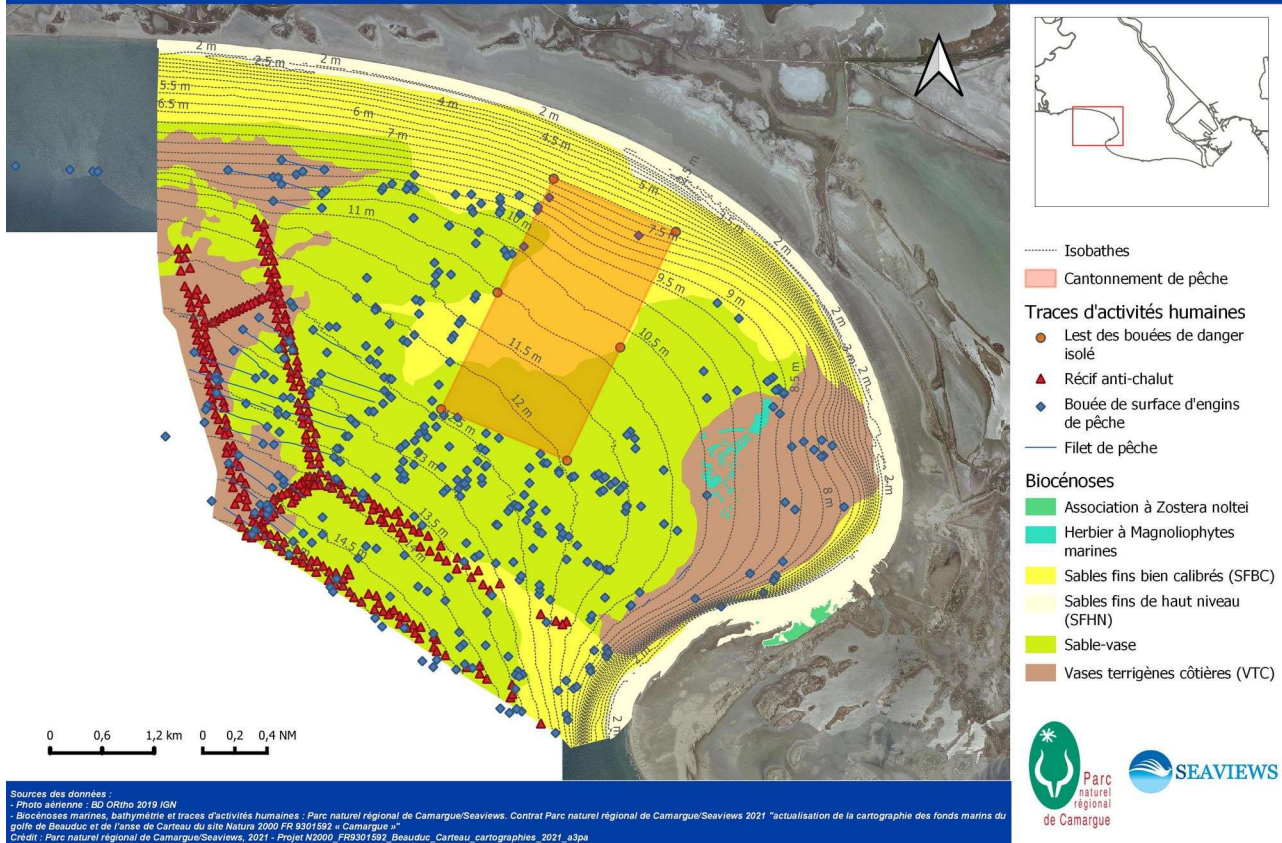


Figure 44 : Carte des traces d'activités humaines et des biocénoses marines dans le golfe de Beauduc.

3.2. Anse de Carteau

3.2.1. Bathymétrie

La fusion des données bathymétriques issues du sondeur multifaisceaux (entre 2 m et 12 m de profondeur) et celles du sondeur monofaisceau (entre 0 m et 2 m de profondeur) permet de se rendre compte de la morphologie particulière de la zone (Figure 45). Un gradient bathymétrique constant est observé du sud-ouest au nord-est de la zone d'étude avec une augmentation constante de la profondeur entre 1 m et 11 m de profondeur. La zone sud-ouest est particulièrement peu profonde avec des profondeurs maximales de 1 m. Un talus est présent dans la partie est de la zone avec une remontée rapide du fond de 8 m à 4 m. Ce talus de nature sableuse est très certainement le résultat d'une accumulation sédimentaire en lien avec les conditions de transports sédimentaires de l'anse.

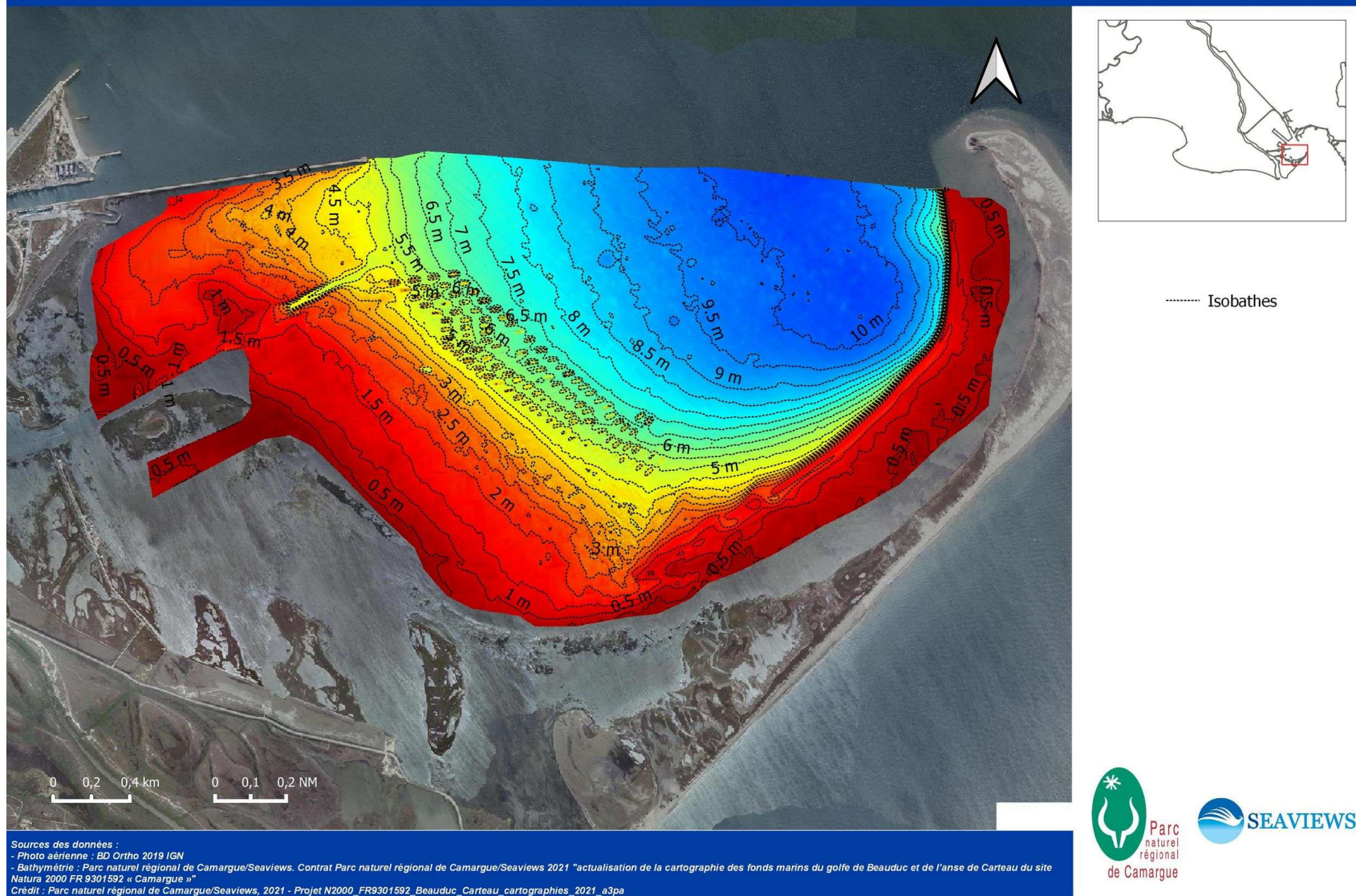


Figure 45 : Carte bathymétrique de l'anse de Carteau issue de la fusion de données d'un sondeur multifaisceaux (entre 2 et 12 m) et d'un sondeur monofaisceau (entre 0 et 2 m)

3.2.2. Mosaïque sonar

La mosaïque de réflectivité du fond obtenue avec le SMF (Figure 46) permet d'identifier clairement plusieurs aspects concernant les biocénoses marines et les activités humaines. Ainsi la limite profonde de l'herbier mixte de cymodocée et de zostères est très visible au centre de la zone d'étude. L'implantation de chaque table conchylicole est également facilement identifiable, de même que le chenal d'accès au port de plaisance qui traverse l'herbier. Des traces anthropiques de type arts-trainants ou ancrage sont observables dans l'herbier et dans le sédiment. D'un point de vue morphologique, le talus sédimentaire à l'est de la zone est également très visible sur l'imagerie acoustique. Cette dernière permet aussi de distinguer des variations sédimentaires.



Figure 46 : Carte de la réflectivité acoustique du fond (image sonar) dans l'anse de Carteau.

3.2.3. Biocénoses marines

Cinq biocénoses benthiques ont été cartographiées dans l'anse de Carteau (Figure 48) :

- l'herbier mixte à *Cymodocea nodosa* et *Zostera spp.* qui couvre une grande partie de la moitié ouest de la zone d'étude entre 0 m et 5 m de profondeur. Sa limite profonde est nette et se situe à proximité des installations conchylicoles. La morphologie de l'herbier évolue avec la profondeur. Il est ainsi plus morcelé à faible profondeur (plus particulièrement dans la partie ouest de la zone d'étude) tandis que ses parties profondes sont plus denses ;

- les vases terrigènes côtières (VTC) au nord de la zone ;
- les sables fins de haut niveau (SFHN) qui se trouvent à l'est de la zone le long du rivage ;
- les sables fins bien calibrés (SFBC) qui forment une zone de transition à l'est ;
- les sables vaseux superficiels de mode calme (SVMC) sur la totalité de la moitié est de la zone. Cette biocénose se retrouve également dans la même aire de répartition que l'herbier.

Le substrat majoritaire dans l'anse de Carteau est le sable. Aucun substrat rocheux, en dehors de la digue fermant la zone au nord, n'a été détecté.

La principale biocénose benthique de l'anse de Carteau est celle des sables vaseux superficiels de mode calme (SVMC) qui couvre une superficie de 596,663 ha (Tableau 3 ; Figure 47F). Cette biocénose a été identifiée en tant que lagunes méditerranéennes lors de la première cartographie en 2008. Cependant, au vu de la description topographique de cette dernière biocénose (cf. le Cahier d'habitats), celle-ci renvoie plutôt aux lagunes fermées comme celle de Thau. Ici les conditions de salinité et les caractéristiques morphologiques (une large ouverture sur la mer) semblent donc plus correspondre à la biocénose des sables vaseux superficiels de mode calme. Il est cependant important de noter qu'il y a deux associations à Magnoliophytes recensées dans l'anse de Carteau : soit sur SFBC, soit sur SVMC. Les observations de terrain montrent qu'elles sont le plus souvent sur des substrats sableux plutôt que vaseux. Les herbiers à Magnoliophytes couvrant la quasi totalité du substrat sédimentaire qu'ils occupent, il n'est pas possible de connaître la nature précise du sédiment sur lequel ils se développent à partir des données acoustiques.

Les herbiers mixtes à *C. nodosa* et *Z. spp.* occupent quant à eux une surface de 337,797 ha (Figure 47A, B, C et D). Les sables fins bien calibrés (SFBC) couvrent une aire de 12,0614 ha et forment une zone de transition entre sables vaseux superficiels de mode calme (SVMC) et les sables fins de haut niveau (SFHN), les derniers couvrant une surface de 117,462 ha. Enfin, les vases terrigènes côtières (VTC) au nord de la zone couvrent une surface de 210,225 ha et correspondent à la biocénose majoritaire du golfe de Fos.

Tableau 3 : Surfaces des biocénoses benthiques cartographiées durant cette étude dans l'anse de Carteau.

Biocénose	Surface (ha)
Herbier mixte à <i>Cymodocea nodosa</i> et <i>Zostera spp.</i>	337,797
Sables fins bien calibrés (SFBC)	12,614
Sables fins de haut niveau (SFHN)	117,462
Sables vaseux superficiels de mode calme (SVMC)	596,663
Vases terrigènes côtières (VTC)	210,225
TOTAL	1 085,578

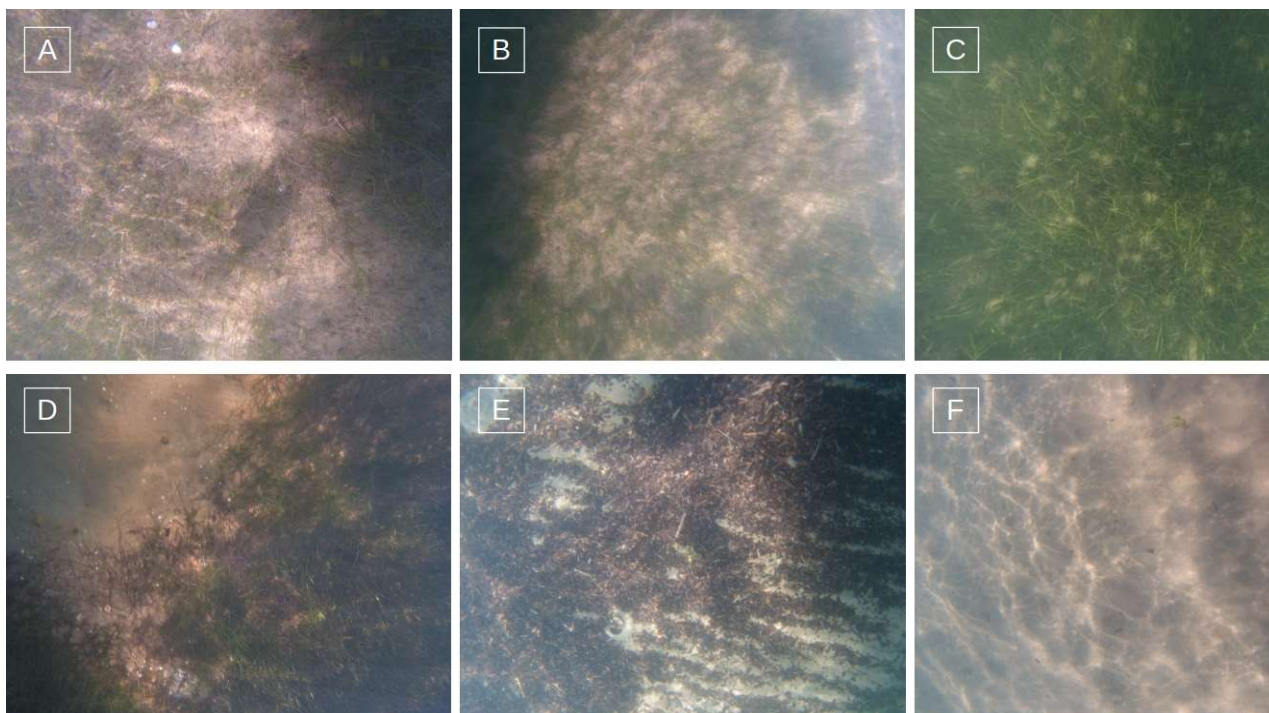


Figure 47 : Photographies des fonds marins de l'anse de Carteau. A) Un herbier mixte à *C. nodosa* et *Z. noltei* peu dense ; B) Un herbier moyennement dense ; C) Un herbier très dense ; D) Limite entre l'herbier et les sables vaseux ; E) Litière de feuilles mortes et de déchets ; F) Sables vaseux nus.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Anse de Carteau
Biocénoses marines

EDITEE LE : 05/2022

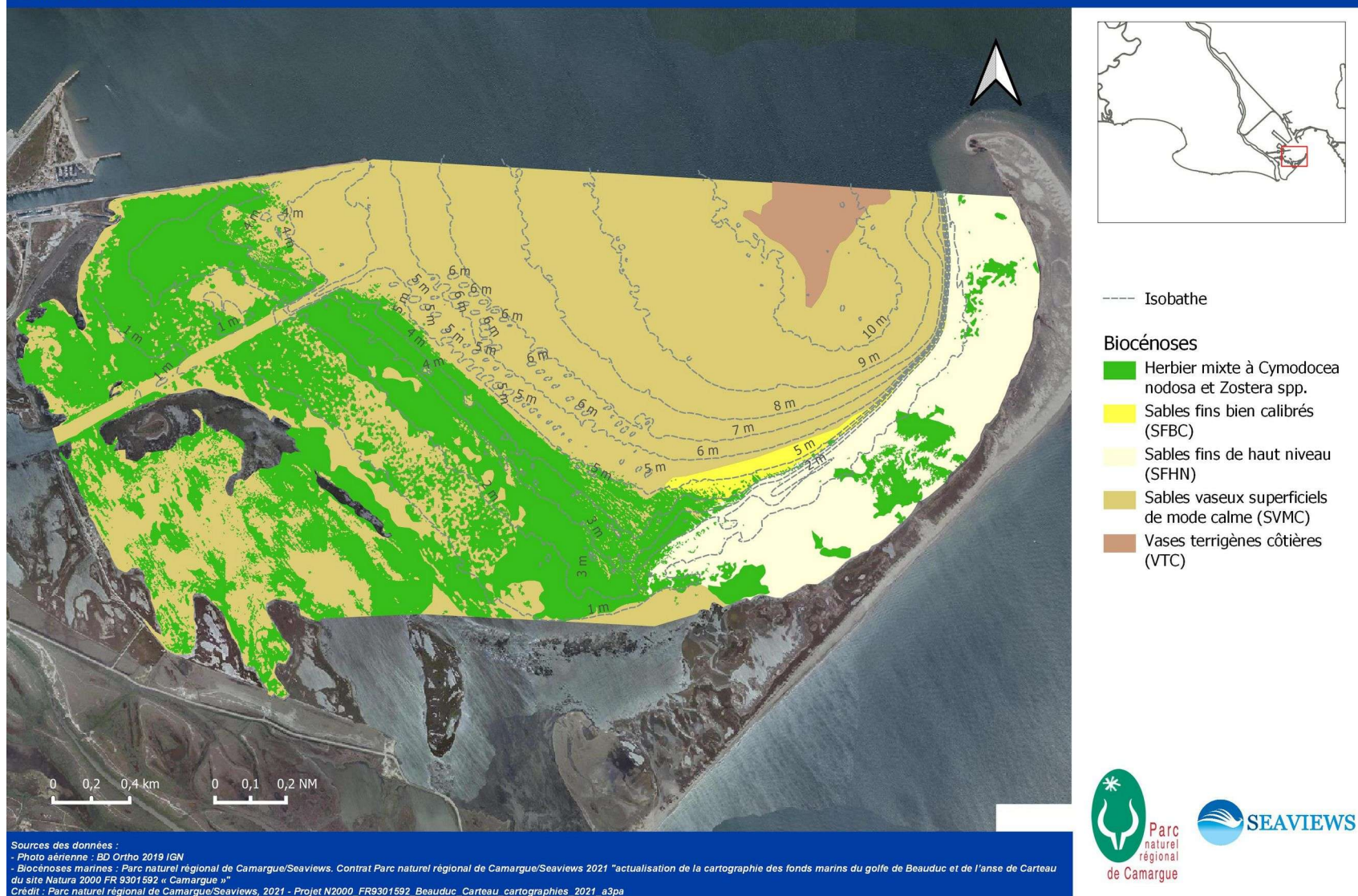


Figure 48 : Carte des biocénoses marines benthiques de l'anse de Carteau.

3.2.4. Traces d'activités humaines

Deux hotspots d'activités anthropiques ont été cartographiés en fonction des traces d'activités humaines détectées sur le fond marin (Figure 49) :

- les installations de conchyliculture au centre de la zone d'étude qui consiste en 104 tables d'une surface moyenne de 865 m² et une surface totale de 89 981 m². La totalité des installations est située sur la biocénose des sables vaseux superficiels de mode calme (SVMC). Cette dernière devrait être peu impactée par l'activité du fait de la faible surface d'implantation au fond (structure avec des pieux) et la faible pollution liée à des rejets en mer (élevage d'organismes filtreurs sans nourrissage) ;
- le nord-est de la zone qui présente un nombre important (78) de traces possiblement issues de l'ancrage et du chalutage. Ces traces se trouvent uniquement sur des biocénoses sableuses.

Quelques traces d'ancrage ont également été détectées dans l'herbier sous-marin mais leur nombre est très réduit (4).

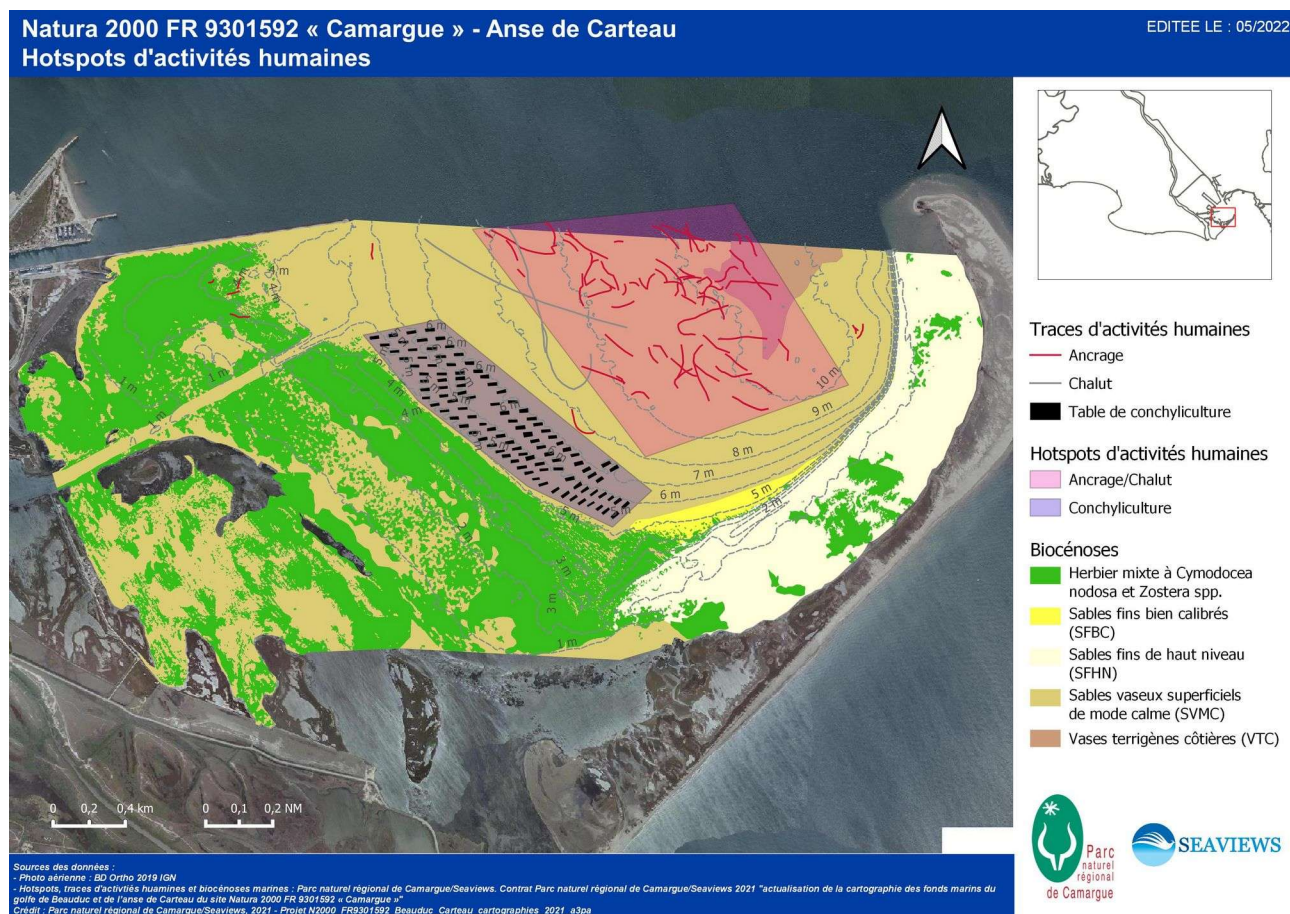


Figure 49 : Carte des traces d'activités humaines et des biocénoses marines dans l'anse de Carteau.

4. ÉVOLUTION DES BIOCÉNOCES ET IMPACT DES PRESSIONS

4.1. Golfe de Beauduc

4.1.1. Évolution du trait de côte et de la bathymétrie

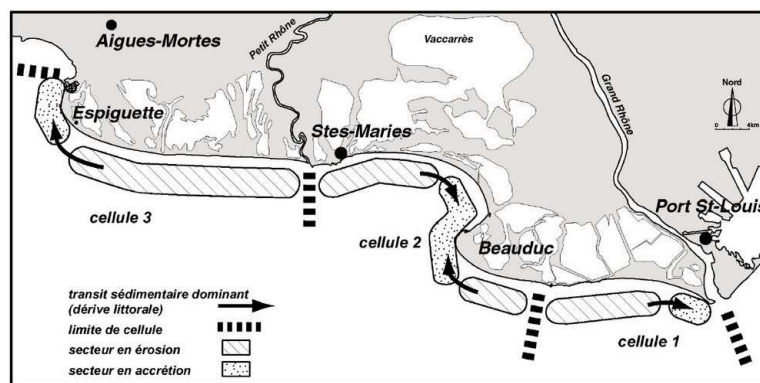


Figure 50 : Fonctionnement des cellules sédimentaires sur le littoral de la Camargue. Source : Sabatier (2001).

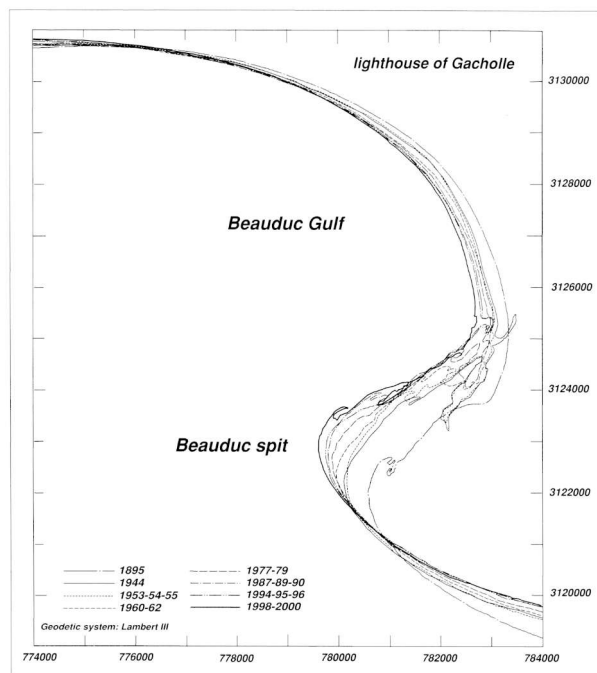


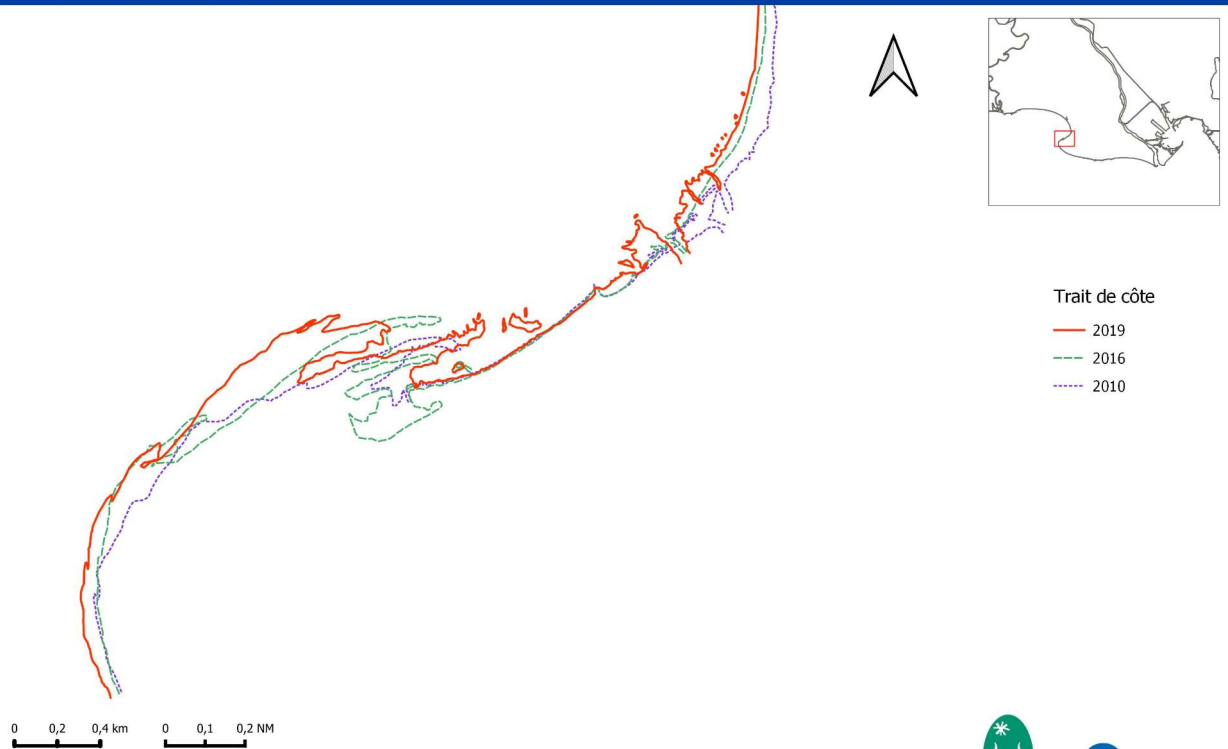
Figure 51 : Évolution de la position du trait de côte du golfe de Beauduc entre 1895 et 2000. Source : Sabatier & Suanez (2003).

La partie est du golfe de Beauduc est une zone d'accrétion qui reçoit des sédiments depuis les aires adjacentes via la dérive littorale (Figure 50). La pointe de Beauduc subit ainsi d'importants changements morphologiques chaque année avec un gain de surface du littoral sur la mer (Sabatier & Suanez, 2003). Sa morphologie évolue également avec la formation et le comblement d'étang en arrière-plage (Figure 51).

L'évolution du trait de côte dans le golfe de Beauduc a pu également être étudiée au cours de cette étude en analysant des images aériennes obtenues entre 2010 et 2019 (Figure 52). La pointe de Beauduc continue ainsi à changer de morphologie avec à son extrémité une avancée de plusieurs centaines de mètres en 10 ans. Une zone plus stable est observée dans le creux à l'est de la pointe tandis que le littoral au nord progresse de plusieurs dizaines de mètres entre 2010 et 2019 (Figure 52). Cette dynamique rapide influe fortement sur l'évolution des habitats lagunaires et marins de la zone avec notamment la formation et le comblement d'étangs. Elle influence également le développement des herbiers à *Z. noltei* qui ont une d'une vitesse de colonisation rapide en réponse à la morphologie changeante de la zone.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Golfe de Beauduc
Evolution du trait de côte

EDITEE LE : 01/2022



Trait de côte
— 2019
- - - 2016
... 2010

Sources des données :
- Trait de côte : Parc naturel régional de Camargue/Seaviews. Contrat Parc naturel régional de Camargue/Seaviews 2021 "actualisation de la cartographie des fonds marins du golfe de Beauduc et de l'anse de Carteau du site Natura 2000 FR 9301592 « Camargue »"
Crédit : Parc naturel régional de Camargue/Seaviews, 2021 - Projet N2000_FR9301592_Beauduc_Carteau_cartographies_2021_a3pa

Figure 52 : Évolution du trait de côte entre 2010 et 2019 au niveau de la pointe de Beauduc.

L'évolution de la profondeur dans le golfe de Beauduc montre des changements localisés. Le centre la zone est ainsi le lieu d'un creusement du fond avec une augmentation de la profondeur au cours des 13 dernières années (Figure 53). Ce creusement reste cependant modéré en étant de l'ordre de 0,2 à 0,6 m de profondeur. L'évolution la plus importante est observée au niveau de la pointe de Beauduc avec une diminution de la profondeur supérieure à 1 m correspondant à un phénomène d'engrassissement sédimentaire (Figure 53). Ce processus est en lien avec l'évolution du trait de côte dans cette zone (Figure 52) avec comme moteur les mouvements sédimentaires décrits plus haut.

Cette modification de la profondeur dans le golfe de Beauduc a des conséquences sur la nature des biocénoses benthiques avec notamment une évolution de la nature du sédiment et la modification des espaces propices à la colonisation par les herbiers.

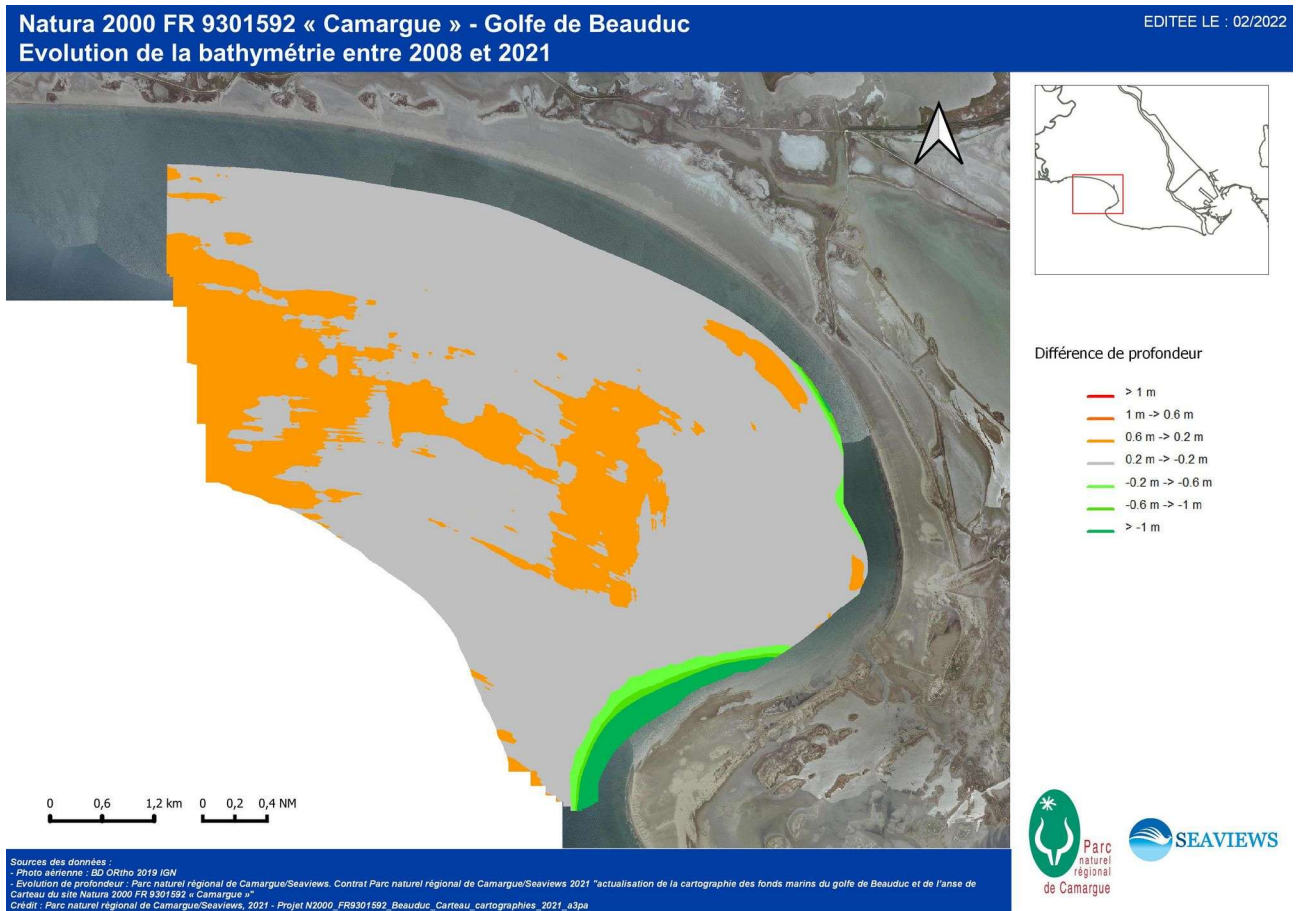


Figure 53 : Évolution de la bathymétrie entre 2008 et 2021 dans le golfe de Beauduc.

4.1.2. Surface des biocénoses

L'évolution des biocénoses entre 2008 et 2021 est contrastée. La biocénose des sables fins bien calibrés et celle des sables fins de haut niveau voient leur surface varier très peu (respectivement 4,1 % et 1,1 % de différence surfacique) (Tableau 4). À l'opposé, la biocénose du mixte sable-vase et celle des vases terrigènes côtières montre de fortes variations surfaciques avec une augmentation de 65,9 % pour la première, et une diminution de 50,9 % pour la seconde (Tableau 4). Cette évolution correspond majoritairement à un remplacement des vases par le sable-vase. La quantité de vases terrigène dépend principalement des transports sédimentaires liés aux apports des fleuves et aux courants dominants. Cette différence peut donc s'expliquer par une variation de la quantité de matière délivrée par le Rhône et le Petit Rhône.

Les variations surfaciques des biocénoses sédimentaires peuvent également s'expliquer notamment par l'arrêt des mouvements sédimentaires dus au chalutage illégal fréquent dans les années 1990/2000 (jusqu'à 8 fois par jour) dans le golfe de Beauduc, en partie grâce à la mise en place du cantonnement de pêche en 2013. Ce phénomène peut ainsi expliquer l'augmentation de la surface couverte par le sable-vase. (Tableau 4). Les données recueillies durant cette étude ne permettent cependant pas de conclure sur ce phénomène, un travail plus complet prenant en compte une comparaison avec des secteurs encore chalutés étant nécessaire.

Tableau 4 : Surface des biocénoses marines en 2008 et en 2021 dans le golfe de Beauduc.

Biocénose	Surface (ha)	
	2008	2021
Sable-vase	1317,38	2201,96
Sables fins bien calibrés (SFBC)	1242,45	1293,89
Sables fins de haut niveau (SFHN)	372,8	368,84
Vases terrigènes côtières (VTC)	1809,06	888,84
Association à <i>Zostera noltei</i>	0,1	9,01
Herbier à Phanérogames marines	0	17,08

En ce qui concerne l'évolution de la surface des herbiers marins, deux zones sont à considérer distinctement : le nouvel herbier à Phanérogames marine à l'est du cantonnement de pêche dans des fonds de 9 à 10 m (espèces restant à déterminer) et celui plurispécifique dans la partie sud-est du golfe, proche du rivage.

L'herbier à Phanérogames marines à l'est du cantonnement de pêche a été cartographié pour la première fois durant cette étude et il n'est donc pas possible de rendre compte de sa dynamique depuis la dernière campagne cartographique (il n'existait probablement pas en 2008). Ce type d'herbier disposant d'une forte variabilité saisonnière en termes de recouvrement, de densité et de morphologie de la plante, il est attendu que de futures cartographies mettent en évidence une évolution surfacique et morphologique de l'herbier très importante en termes de régression et de colonisation. De plus, le réchauffement de la Méditerranée favorise la dynamique de ce type d'herbier (Pergent et al. 2014). Des observations supplémentaires en plongée sont nécessaires afin de déterminer la ou les espèces composant ces herbiers, l'hypothèse la plus probable étant *Cymodocea nodosa* au vu de la profondeur et de la morphologie des feuilles repérées.

Le développement de ce nouvel herbier peut être relié à la mise en place du cantonnement de pêche en 2013 (réglementation et surveillance) qui a mené à l'arrêt des traits de chalut sur la totalité du golfe de Beauduc, les quelques infractions encore constatées ayant plutôt lieu en périphérie et entre 2 et 3 milles des côtes. La disparition de cette pression dans le golfe lui-même a notamment mené une amélioration de la fonctionnalité des écosystèmes benthiques comme le montre l'étude réalisée en 2018 sur l'ichtyofaune benthique (Le Direach et al. 2018). Cette absence de perturbation couplée aux mesures de protection de l'herbier situé au sud-est du golfe a certainement contribué au développement de ce nouvel herbier.

L'herbier à *Z. noltei* situé au sud-est du golfe de Beauduc a été détecté en 2005 (sous la forme d'une tache ronde de 1 m²) et a été cartographié pour la première fois en 2008 (Morancy et Jouvenel, 2008). Depuis 2011, le PNRC réalise régulièrement le suivi cartographique de la limite de l'herbier en juillet (Marobin-Louche et Lazin, 2014 ; Marobin-Louche, 2016). Il est donc possible d'obtenir une information sur son évolution depuis dix ans en y ajoutant la cartographie réalisée durant cette étude.

L'herbier montre ainsi une importante variation surfacique (Figure 54) et morphologique (Figure 55) entre 2011 et 2021². D'un point de vue surfacique, la superficie occupée par l'herbier n'a cessé de croître entre 2011 et 2018 passant ainsi de 3,61 ha en 2011 à 12,39 ha en 2018. Cet accroissement n'est pas linéaire, un important gain surfacique étant observé entre 2014 et 2015 (Figure 54). Une diminution de la surface couverte par l'herbier est constatée entre 2018 et 2021. Ce phénomène de diminution surfacique peut s'expliquer par la période à laquelle la cartographie de 2021 a été réalisée (octobre), qui correspond à la saison où la dynamique de l'herbier est moindre, entraînant une réduction naturelle de son couvert. A noter également que l'évolution des techniques cartographiques au cours des treize dernières années apporte une résolution plus fine aux cartographies de limite et ainsi à une moindre surévaluation de la surface de l'herbier.

² L'ensemble des données cartographiques obtenues entre 2011 et 2018 est le fruit des suivis réalisés par le personnel du Parc naturel régional de Camargue.

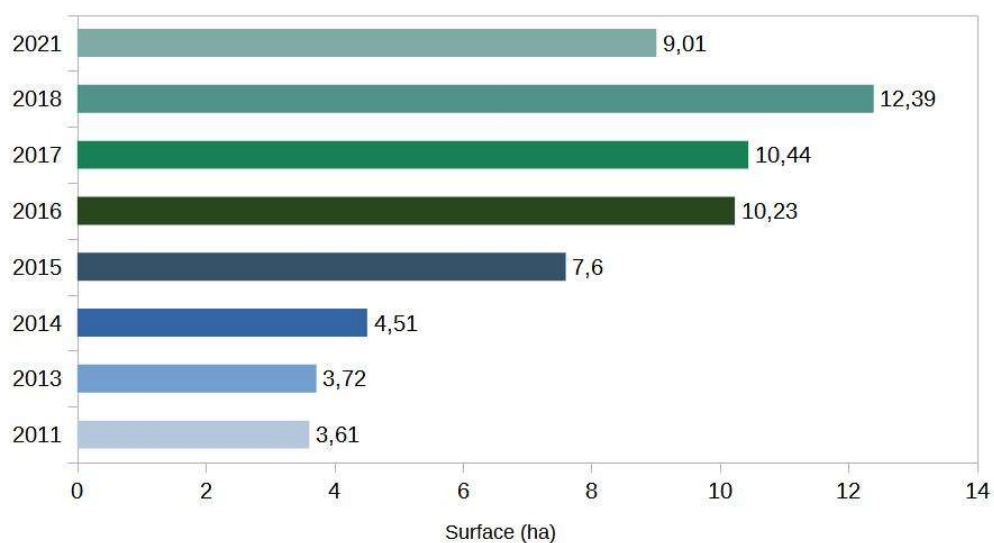


Figure 54 : Évolution surfacique de l'herbier à *Z. noltei* du golfe de Beauduc entre 2011 et 2021.
Source des données : de 2011 à 2018 PNR Camargue ; 2021 Seaviews.

Natura 2000 FR 9301592 « Camargue » - Golfe de Beauduc
Evolution de l'herbier à *Zostera noltei* entre 2011 et 2021

EDITEE LE : 02/2022



Figure 55 : Évolution morphologique de l'herbier à *Z. noltei* du golfe de Beauduc entre 2011 et 2021. Source des données : 2011 PNR Camargue ; 2021 Seaviews.

En ce qui concerne la dynamique de l'herbier au cours des dernières années, elle met en évidence un phénomène de forte progression couplé à une régression moins importante (Tableau 5). Cette tendance a été particulièrement observée entre 2013 et 2017 avec une progression 3 à 5 fois supérieure à la régression (d'un point de vue surfacique). Ce processus semble refléter des conditions naturelles (hydrodynamisme, ensoleillement) plus ou moins propices à l'expansion de l'herbier qui sont variables d'une année sur l'autre. L'évolution morphologique de l'herbier (Figure 55) indique également un déplacement de son aire de répartition vers la ligne de rivage, certainement en lien avec les déplacements sédimentaires et la modification du trait de côte qui changent constamment l'emplacement des zones protégées de la houle et des courants. Ce phénomène pourrait expliquer la diminution de la surface couverte entre 2018 et 2021 du fait que la progression de l'herbier est stoppée au sud par le rivage tandis que sa partie nord est en régression du fait de la formation d'un cordon sédimentaire. Ces contraintes d'espace entraînent la colonisation de nouvelles zones à proximité de l'herbier principal comme observé durant cette étude au nord-ouest et à l'extrémité nord-est (Figure 55).

La dynamique de l'herbier à *Z. noltei* du golfe de Beauduc est donc bien adaptée à l'évolution naturellement rapide du trait de côte et aux déplacements sédimentaires qui modifient chaque année son aire de répartition. Il devrait donc persister dans les années à venir si aucune perturbation naturelle ou anthropique significative ne vient modifier sa dynamique.

Tableau 5 : Caractérisation de la dynamique d'évolution des herbiers à *Z. noltei* du golfe de Beauduc entre 2011 et 2021. Source des données : de 2011 à 2018 PNR Camargue ; 2021 Seaviews.

Évolution	Surface (m²)						
	2011 → 2013	2013 → 2014	2014 → 2015	2015 → 2016	2016 → 2017	2017 → 2018	2018 → 2021
Pas d'évolution	23927	32774	38785	68647	101050	83893	69870
Progression	12182	12239	37225	33836	3242	41573	20259
Régression	13240	4394	6228	7069	1375	20383	55526

4.1.3. Pression de pêche

La quantification des traces d'activités humaines dans le golfe de Beauduc permet une visualisation spatiale de la pression de pêche de la relier aux caractéristiques des biocénoses benthiques pour en appréhender l'impact éventuel. Dans un premier temps il est important de garder à l'esprit que, bien que le nombre d'engins de pêche recensés durant l'étude semble relativement important (398), il est le fruit d'observations cumulées sur une vingtaine de jours de campagne en mer. De plus, ces observations ne concernent que la signalisation de surface des dispositifs. Le nombre d'observations est donc à diviser par deux voire par trois pour obtenir une estimation plus réaliste de la quantité d'engins de pêche. Ces données restent indicatives, elles mettent en évidence une pression induite par une activité difficile à quantifier.

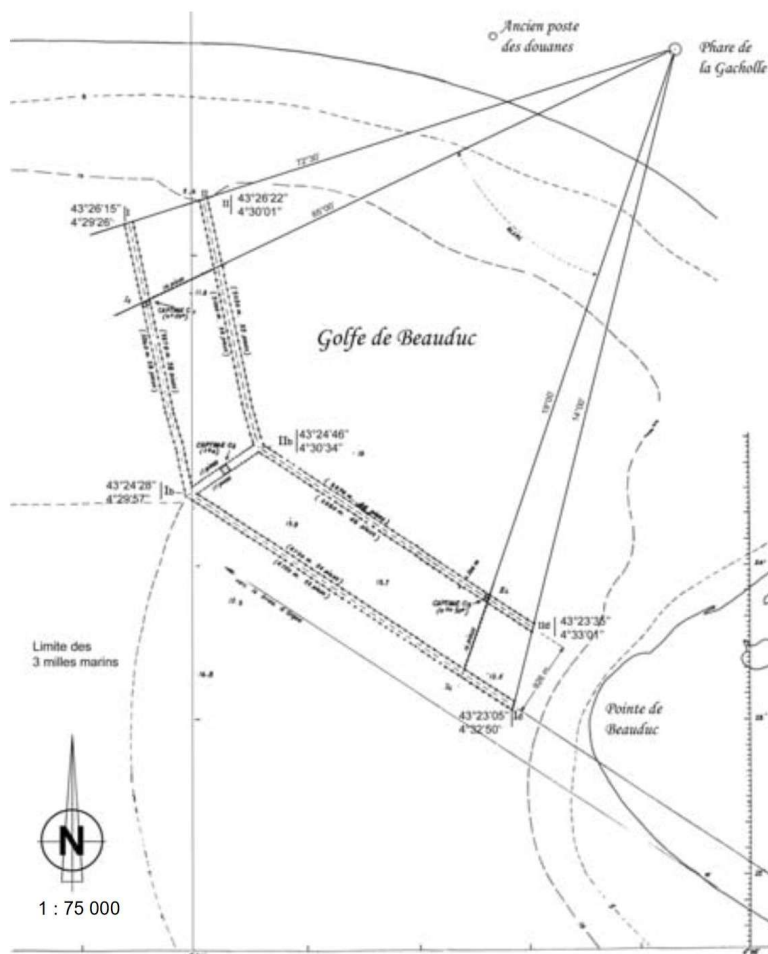
Au vu de la nature des engins de pêche utilisés dans le golfe de Beauduc (filets, casiers, lignes de pots à poulpes), l'impact de l'activité de pêche sur les biocénoses sédimentaires peut être qualifié de faible à modéré en considérant la grille d'analyse de La Rivière et al. (2016). Ce constat concerne les biocénoses des vases terrigènes côtières, du sable-vase et des sables fins bien calibrés dans le cas d'un phénomène de tassement ou d'abrasion superficielle par les engins de pêche. Il en va de même pour les sables fins de haut niveau malgré le fait que ces derniers puissent être soumis à la pêche aux tellines pratiquées avec une drague charriée à pied. Il est cependant important de ne pas minimiser l'impact de l'activité de pêche sur les différents compartiments fonctionnels des écosystèmes. En effet, bien que si les fonds meubles peuvent amortir une abrasion par la pêche plus facilement que des herbiers, l'impact sur la fonctionnalité est considérable (nursérie, assemblages de poissons, etc.).

Aucune des traces de chalut détectées dans la cartographie de 2008 (Noël, 2008) n'a été observée sur les données acoustiques de la présente étude. En considérant l'évolution des techniques et du matériel en 13 ans, et par extension la meilleure qualité des données obtenues, cela est certainement dû à la disparition des traces. Ce phénomène est sans doute lié au changement de pratique dans le golfe de Beauduc, initialement chaluté quasi quotidiennement de manière illégale, suite à la création du cantonnement de pêche en 2013, à la mise en place d'une surveillance associée et à la régression du nombre de chalutiers.

Toujours en ce référent à la grille d'analyse de La Riviere et al. (2016), le constat est différent en ce qui concerne les herbiers à phanérogame marine nouvellement cartographiés durant cette étude. En effet, ces derniers sont hautement sensibles aux phénomènes entraînant une abrasion, même superficielle, du substrat. Cependant, comme mentionnée précédemment, la disparition de la pression liée au chalutage illégal devrait permettre à cet herbier de maintenir sa couverture spatiale et de se développer à l'avenir.

4.1.4. Détection des searocks

Au total ce sont 409 récifs de production et de récifs anti-chalut de type searocks ont été immergés dans le golfe de Beauduc en 1988. Le schéma d'implantation originel montre que les récifs ont été installés selon deux lignes brisées parallèles avec une rangée de liaison dans la partie sud-ouest du golfe (Figure 56).



Lors de la cartographie des biocénoses réalisée en 2008 ce sont 135 de ces structures qui ont été détectées (Héloin, 2005). Durant la présente étude un nombre plus important de searocks (296) a été identifié sur les données acoustiques. Cette augmentation du nombre de searocks détectés entre 2008 et 2021 est principalement due à l'évolution du matériel acoustique qui permet d'obtenir des images du fonds à plus haute résolution ainsi que le développement d'outils de traitement des données bathymétriques qui permettent une meilleure analyse du relief du fond (Viala et al., 2021).

Cette différence peut également s'expliquer par les mouvements sédimentaires et notamment l'érosion de la partie ouest du golfe mise en évidence par la comparaison de la bathymétrie (voir 4.1.1 Évolution du trait de côte et de la bathymétrie). Ce phénomène pourrait en effet mener à l'apparition de structures précédemment enfouies dans le sédiment. À l'inverse, certains searocks pourraient être encore ensevelis et donc non détectables.

Figure 56 : Plan d'implantation des récifs de type searocks dans le golfe de Beauduc. Source : Héloin, 2005.

4.2. Anse de Carteau

4.2.1. Surface des biocénoses

La principale évolution surfacique dans l'anse de Carteau concerne la biocénose de l'herbier mixte à *Cymodocea nodosa* et *Zostera spp.* dont la couverture passe de 456,958 ha en 2008 à 337,797 ha en 2021 soit une régression de 26,1 % en 13 ans (Tableau 6). Cette différence est dans sa grande majorité le fruit de l'augmentation de la résolution des supports cartographiques et de l'amélioration des techniques de classification des fonds. Un phénomène de fragmentation localisé de l'herbier est également observé en son centre et au sud-ouest de la zone. L'origine de ce phénomène pourrait être l'évolution de la morphologie des fonds en lien avec les flux hydrosédimentaires de la zone qui mènent à la formation de nouvelles zones lagunaires closes et par extension à de nouveaux habitats lagunaires (Figure 57). La diminution de la profondeur due à l'accumulation de sédiments sur la partie orientée vers le large entraîne une plus grande exposition des herbiers à la houle qui vont ainsi se fragmenter. À l'opposé, les herbiers présents derrière cette nouvelle barrière sédimentaire devraient être plus protégés des éléments bien que se développant à des profondeurs très faibles. À noter que ces herbiers seront alors exposés à d'autres phénomènes pouvant modifier leur dynamique de développement, comme la consommation de ces plantes marines par des cygnes (ceci restant un phénomène limité).

Tableau 6 : Surfaces des biocénoses marines en 2008 et en 2021 dans l'anse de Carteau.

Biocénose	Surface (ha)	
	2008	2021
Herbier mixte à <i>Cymodocea nodosa</i> et <i>Zostera spp.</i>	456,958	337,797
Sables fins bien calibrés (SFBC)	701,076	12,614
Sables fins de haut niveau (SFHN)	0	117,462
Vases terrigènes côtières (VTC)	0	210,225
Lagunes méditerranéennes	551,526	0
Sables vaseux superficiels de mode calme (SVMC)	0	596,663
Structures artificielles	9,155	8,998



Figure 57 : Mise en évidence sur les photos aériennes de la formation d'un cordon lagunaire (en rouge) entre 2010 et 2019 dans l'anse de Carteau.

Comme mentionné précédemment (voir 3.2.3 Biocénoses marines), les surfaces identifiées comme appartenant à la biocénose des lagunes méditerranéennes lors de la première cartographie en 2008 ont été attribuées la biocénose à des sables vaseux superficiels de mode calme (SVMC). Ce choix explique donc les surfaces indiquées dans le Tableau 4. L'évolution de la surface couverte par la biocénose des SVMC (anciennement lagunes méditerranéennes) est principalement liée à celle des herbiers en remplaçant cette dernière. La variation de la surface des sables fins bien calibrés est quant à elle plus liée à la technique et à l'interprétation cartographique, cette biocénose étant proche de celle des sables vaseux superficiels de mode calme. La classification en sables fins de haut niveau de surfaces précédemment définie comme lagunes méditerranéennes est le fruit de nouvelles observations sur la zone d'étude. Enfin les structures artificielles (macrodéchets, installations conchylicoles) ne voient pas leur surface varier de façon significative avec une diminution de seulement 1,7 % en 13 ans.

4.2.2. Pression de l'ancrage et du chalutage

L'origine des traces observées sur le sédiment au nord de la zone n'est pas certaine mais est probablement le fruit de l'ancrage et/ou du dragage. Les biocénoses concernées (les sables vaseux superficiels de mode calme et les sables fins bien calibrés) sont peu sensibles à ce type d'impact physique (La Rivière et al., 2016). Cependant, à l'image de ce qui a été observé dans le golfe de Beauduc (voir 4.1.2 Surface des biocénoses), cette pression peut empêcher le développement d'herbiers à phanérogames marines entre 9 et 11 m de profondeur. Elle peut également modifier la composition des espèces benthiques et diminuer la fonctionnalité écologique de ces biocénoses sédimentaires.

Les traces d'ancrage peuvent avoir pour origine les navires de grande taille stationnant habituellement au large de l'anse mais cherchant un site moins exposé lors de conditions météo défavorables. À cela s'ajoute la présence régulière de pêcheurs de loisir tout au long de l'année avec des petites embarcations qui s'ancrent principalement sur les talus dans la partie est de l'anse de Carteau. À noter que la plupart de ces pêcheurs ne s'ancrent pas et pêchent à la traîne ou à la dérive.

La présence de traces assimilées à du chalutage ou à des dragues est plus surprenante du fait de son interdiction depuis plus de trente ans dans les 3 milles marins. Ces traces observées ayant une longueur supérieure à 1 000 m, il est peu probable qu'elles soient générées par l'ancrage. Cependant, bien que les traces d'ancrage et de chalutage soient situées sur un substrat meuble censé retrouver sa planéité antérieure, elles peuvent rester très marquées dans le temps lorsque leur profondeur est suffisamment importante. Il est à noter que l'acoustique sous-marine active permet de mettre en évidence des structures sédimentaires qui sont parfois indétectables lors d'une reconnaissance en plongée. À noter également que la résilience des zostères ou de la cymodocée peut être rapide avec une croissance horizontale de plusieurs centimètres à plusieurs mètres par an, très supérieure par exemple à la posidonie (1 à 3 cm de croissance horizontale par an en moyenne). Il est donc possible que des traces anciennes soient déjà recolonisées par les herbiers.

Peu d'impacts anthropiques ont été détectés dans l'herbier mixte à *C. nodosa* et *Z. noltei*. Cela s'explique principalement par la faible présence d'activité humaine dans leur aire de recouvrement. L'activité conchylicole se déroule au-delà de sa limite profonde tandis que les pêcheurs affectionnent plutôt les petits fonds à l'est de l'anse et les plus grands fonds au nord pour naviguer en toute sécurité. De plus, la croissance rapide de ces plantes marines entraîne le recouvrement d'éventuelles traces d'ancrage de petites embarcations en quelques mois ou années.

5. CONCLUSION

La cartographie des biocénoses benthiques du golfe de Beauduc et de l'anse de Carteau en 2021 et la comparaison avec les cartes de 2008 montre des évolutions. Si la nature des biocénoses n'a pas été modifiée dans les deux zones, leur surface a vu d'importantes évolutions. Ces modifications sont principalement dues à des changements rapides de la morphologie du littoral en lien avec les transports hydrosédimentaires avec notamment l'influence importante des apports du Rhône et du Petit Rhône. Ce constat concerne les biocénoses sédimentaires comme les herbiers sous-marins. Dans le golfe de Beauduc, la mise en place du cantonnement de pêche en 2013 et la surveillance accrue des pratiques de pêches sont certainement à l'origine de certaines évolutions observées comme l'évolution des surfaces couvertes par les biocénoses sableuses et l'apparition d'un herbier à phanérogames marines dans la partie est.

La mise en relation des traces d'activités humaines avec la cartographie des biocénoses marines fait état d'un constat différent entre les deux zones avec notamment la nature des activités qui varient. Ainsi dans l'anse de Carteau ce sont principalement l'ancrage et la conchyliculture dont les traces sont visibles sur la cartographie tandis que dans le golfe de Beauduc c'est l'activité de pêche professionnelle qui est la plus présente. Dans les deux cas, les biocénoses sédimentaires soumises à ces activités y sont peu sensibles. Cependant, les traces dans les sédiments forment des structures pouvant perdurer (plusieurs mois voire plusieurs années) et leur influence sur les communautés macro-benthiques reste inconnue.

Malgré ce manque de connaissances, les grandes étendues sédimentaires font l'objet de mesures de gestion en Camargue du fait de leur importance en tant qu'habitat pour de nombreuses espèces marines. Par exemple, l'analyse des risques liés à la pratique de la drague jusqu'à 3 milles des côtes au niveau de la pointe de l'Espiguette, a mis en évidence la forte sensibilité des écosystèmes marins benthiques à cette activité (Parc régional de Camargue, 2013).

Le cas des herbiers de phanérogames marines est différent concernant leur gestion, leur suivi et les connaissances sur leur fonctionnement et leur réponse aux pressions anthropiques. Le suivi sur le long terme de l'herbier à *Z. noltei* du golfe de Beauduc apporte des informations nouvelles sur leur capacité d'adaptation face au changement naturel rapide de la morphologie des fonds. Malgré leur résilience, ces herbiers sont très sensibles aux activités humaines et aux pressions qui y sont liées, d'où la nécessité de mettre en place des régimes de protection spécifiques à certaines zones dans le golfe (cf. l'arrêté préfectoral protection biotope de 2013).

L'évolution des pressions dans le golfe donne également des indices concernant les conditions nécessaires pour le développement de nouveaux herbiers comme dans le cas des phanérogames marines détectés pour la première fois durant cette étude. Bien que la, ou les espèces, composant cet herbier reste à déterminer (probablement *C. nodosa*), leur protection est un enjeu important du fait de la relative rareté de la présence de prairies sous-marines en mer ouverte en Camargue. Dans cette optique, cette étude a également mis en évidence le fait que l'absence de plantes marines sur une surface propice à leur développement peut indiquer un impact de pressions anthropiques. C'est le cas notamment des biocénoses sableuses au nord de l'anse de Carteau qui présente un nombre relativement important de traces d'objets traînés sur le fond. La question se pose en effet de l'éventuel développement d'herbiers dans cette zone en l'absence de pression.

L'actualisation des cartographies de biocénoses marines est donc un aspect important de la connaissance de l'état de la biodiversité du Parc naturel régional de Camargue et permet notamment d'obtenir une vision spatiale de certaines activités humaines et de leurs éventuels impacts sur les fonds. Si ce suivi doit être régulier, il n'est pas nécessaire qu'il soit réalisé à une fréquence importante à grande échelle du fait des changements lents des biocénoses sédimentaires. En revanche, certaines zones d'intérêt montrant de fortes variations surfaciques interannuelles (comme l'herbier à *Z. noltei* du golfe de Beauduc) et nécessitent la réalisation de mesures cartographiques plus fréquemment (une fois par an).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Abadie, A., & Viala, C. (2018). Le sondeur multifaisceaux en hydrographie : utilisations actuelles et futures. XYZ, 157, 17–27.
- Bensettiti, F., Bioret, F., Roland, J., & Lacoste, J.-P. (2004). "Cahiers d'habitats" Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire - Tome 2 Habitats côtiers (Éd. La Doc). MEDD/MAAPAR/MNHN. 399P
- Héloin, Y. (2005) Richesse biologique de la zone marine du Parc Naturel Régional de Camargue : Compilation de résultats obtenus entre 1955 et 2004 - Rapport Annexe à l'Etude de Faisabilité d'une Aire Marine Protégée dans la zone marine du Parc Naturel Régional de Camargue – Parc naturel régional de Camargue, 61 p
- Labadie, F., & Evans, T. (2012). Inventaires biologiques et analyse écologique des habitats marins patrimoniaux sur le lot Natura 2000 en mer FR 930 1592 « Camargue ». 192p
- La Rivière, M., Michez, N., Aish, A., Bellan-Santini, D., Bellan, G., Chevaldonné, P., Dauvin, J.-C., Derrien-Courtet, S., Grall, J., & Guérin, L. (2016). Évaluation de la sensibilité des habitats benthiques de Méditerranée aux pressions physiques. Rapport SPN 2015-70. MNHN. Paris, 101p
- Le Direach L., Charpentier M., Marobin D. (2018). Suivi du peuplement de poissons de la réserve marine du golfe de Beauduc 3 ans après l'état initial. Rapport de synthèse. Années 2017-2018. Partenariat Parc naturel régional de Camargue & GIS Posidonie publ., Fr. : 1-84.
- Marobin-Louche, D. (2016) Gestion des zones marines protégées dans le golfe de Beauduc. Cartographie de l'herbier et répartition des grandes nacres. Année 2015. Parc naturel régional de Camargue. 25P
- Marobin-Louche, D., Lazin, D. (2014). Gestion des zones marines protégées de Camargue : cartographie de l'herbier de la zone de protection de biotope de la pointe de Beauduc, année 2014. Parc naturel régional de Camargue. 12 p
- Michez, N., Fourt, M., Aish, A., Bellan, G., Bellan-Santini, D., Chevaldonné, P., Fabri, M. C., Goujard, A., Harmelin, J. G., Labruné, C., Pergent, G., Sartoretto, S., Vacelet, J., & Verlaque, M. (2014). Typologie des biocénoses benthiques de Méditerranée Version 2 . Rapport SPN 2014 - 33 , MNHN. 26p
- Morancy, R., Jouvenel, J.-Y. (2008) Plongées d'observations et inventaires qualitatifs sur des épaves, récifs artificiels et herbier de zostères naines. Fonds marins du delta du Rhône. Morancy Environnement/P2A/ Parc naturel régional de Camargue. 57p
- Nicolas A (2021). Automatisation de la classification des fonds marins à partir de données multiples (sondeur multifaisceaux, lidar, données d'opportunité). Mémoire de l'Université de Toulon/Seatech. 36p
- Noel, C. (2008). Cartographie des fonds marins du golfe de Beauduc. Rapport de synthèse. Semantic TS. 19P
- Parc naturel régional de Camargue (2013). Document d'Objectifs Natura 2000 – Bancs sableux de l'Espiguette – Tome 1 : Diagnostic, enjeux et objectifs de conservation. Parc naturel régional de Camargue, Comité Régional des Pêches Maritimes et des Élevages Marins du Languedoc-Roussillon, Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement région Languedoc-Roussillon, Préfecture Maritime de Méditerranée, 199 p
- Pergent, G., Bazairi, H., Bianchi, C. N., Boudouresque, C. F., Buia, M. C., Calvo, S., Clabaut, P., Harmelin-Vivien, M., Mateo, M. A., Montefalcone, M., Morri, C., Orfanidis, S., Pergent-Martini, C., Semroud, R., Serrano, O., Thibaut, T., Tomasello, A., & Verlaque, M. (2014). Climate change and Mediterranean seagrass meadows: a synopsis for environmental managers. *Mediterranean Marine Science*, 15(2), 462–473. <http://www.medit-mar-sc.net/index.php/marine/article/view/621>
- Ruitton, S., Siallelli, J., Astruch, P., Bonhomme, D., Donato, M., Fraieu, B., & Mayot, N. (2008). Étude et cartographie des biocénoses marines remarquables du golfe de Fos (Bouches-du-Rhône, France). Rapport final. Contrat Port Autonome de Marseille & GIS Posidonie – Copetech-SM -HydroConsult, GIS Posidonie publ. 185p
- Sabatier, F., & Suanez, S. (2003). Cinématique du littoral du delta du Rhône depuis la fin du XIXème siècle. Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement, 4, 283–300.
- Viala, C., Lamouret, M., & Abadie, A. (2021). Seafloor classification using a multibeam echo sounder: A new rugosity index coupled with a pixel-based process to map Mediterranean marine habitats. Applied Acoustics, 179, 108067.

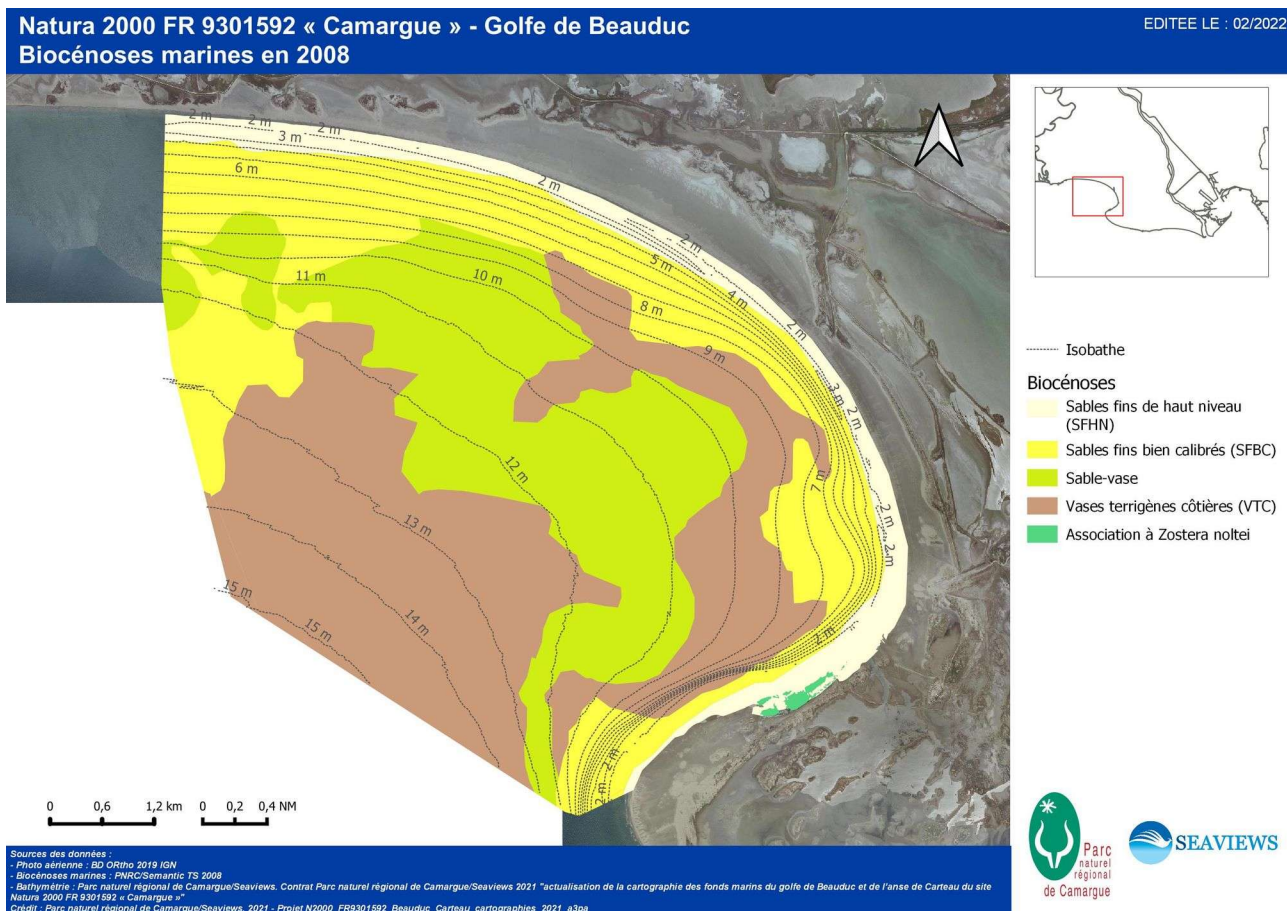


Cartographie des fonds marins – Beauduc et Carteau

ANNEXES

ANNEXE 1

Cartographie des biocénoses marines du golfe de Beauduc. D'après Noel, 2008.



ANNEXE 2

Cartographie des biocénoses marines de l'anse de Carteau. D'après Ruitton et al., 2008.

