

Cartographie des herbiers de zostères

Recommandations méthodologiques



Contributions

| Coordination Ifremer

Touria Bajjouk (Ifremer/Dyneco/Lebco)

| Correspondants de la convention AQUAREF

Maïa Akopian (AFB)

Christian Chauvin (Irstea - Centre de Bordeaux)

| Rédaction

Touria Bajjouk, Céline Cordier, Isabelle Auby, Pierre-Olivier Liabot, Fanny Kerninon, Naig Le Bouffant, Gilles Trut, & Hélène Oger-Jeanneret

| Contribution

Anouar Hamdi/Auto-entrepreneur (Interprétation de la roche à partir du MNT LIDAR)

Denis Croize-Fillon/Ifremer-IRSI-RIC (Soutien à la mise en œuvre des traitements sous le calculateur Datarmor)

Cyril Chailloux/Altran (Convention R&D Ifremer-Altran sur l'approche Deep Learning)

Eric Houlgate/Auto-entrepreneur (Interprétation des données acoustique de sonar latéral)

Laurent Berger/Ifremer-NSE-ASTI (Soutien aux traitements des données d'échosondeur)

Stéphane Lesbats/Ifremer-COMDIR-AUDIOVISUEL (Acquisition des données Drone)

Christian Marget/Genavir (Information sur la précision du GPS)

Loïc Rigouin/Ifremer-LER-Arcachon-Anglet (Contribution à la relecture du document)

| Groupe de Travail Surfacing Herbiers

Ifremer/DYNECO/LEBCO : Touria Bajjouk, Céline Cordier, Fernando Tempera

Ifremer/Ifremer/NSE/ASTI : Naig Le Bouffant

Ifremer/LER Arcachon - Anglet (site d'Anglet) : Marie-Noëlle De Casamajor, Muriel Lissardy, Florence Sanchez

Ifremer/LER Arcachon – Anglet (Site d'Arcachon) : Isabelle Auby, Helene Oger-Jeanneret, Gilles Trut, Loïc Rigouin,

Ifremer/LER Bretagne-Nord : Claire Rollet, Aurélie Foveau, Aurore Le Jolivet

CEVA : Pierre-Olivier Liabot

BioLittoral : Anne-Laure Barillé

I-Sea : Benoit Beguet, Virginie Lafon, Cécile Curti

MNHN : Lise Latry, Sébastien Aubin

AFB : Karine Dedieu

UBO/LEMAR : Fanny Kerninon, Jacques Grall

AESN : Yann Joncourt

| Crédits Photos

I. Auby, T. Bajjouk, X. Caisey, C. Cordier, O. Dugornay, S. Lesbats

Partenaires financiers



| Citation du document

Bajjouk T., Cordier C., Auby I., Liabot P.O, Kerninon F., Le Bouffant N., Trut G. & Oger-Jeanneret H., 2019. Cartographie des herbiers de zostères - Guide technique. Convention Ifremer-AQUAREF Thème Formation et outils 2016-2018. Edition IFREMER. REF. DYNECO/LEBCO/19-01/TB. 105 p.

Remerciements

Nous tenons à remercier :

l'AQUAREF & l'AFB,
pour le soutien apporté à l'élaboration de ce guide et sa relecture ;

la DREAL Bretagne, la Région Bretagne et le FEDER,
pour leur soutien à l'acquisition des données sur le site pilote ;

l'ONCFS, et principalement Lionel Picard, ainsi que le PNRGM,
pour le soutien logistique apporté lors des missions d'acquisitions et de prospection terrain ;

les participants au groupe de travail "Surfacique Herbiers",
pour les pertinents échanges qui ont enrichi nos réflexions pour élaborer ce guide.

PREAMBULE	1
1. INTRODUCTION	5
1.1. CONTEXTE	5
1.2. OBJECTIF DU DOCUMENT	6
1.3. DOCUMENTS DE REFERENCE	7
1.4. ORGANISATION DU DOCUMENT	7
2. LES INDICES D'OBSERVATION ET DE SUIVI DES HERBIERS DE PHANEROGAMES MARINES	8
2.1. ETAT DE L'ART	8
2.2. INTERETS ET LIMITES POUR L'APPROCHE SPATIALE.....	9
3. OUTILS ET METHODES DE CARTOGRAPHIE DES PHANEROGAMES MARINES	12
3.1. GPS ET POSITIONNEMENT	12
3.2. CARTOGRAPHIE PAR CONTOUR GPS	13
3.3. TELEDETECTION OPTIQUE SATELLITAIRE	14
3.4. L'IMAGERIE AEROPORTEE	18
3.4.1. Photographie aérienne	18
3.4.2. Imagerie hyperspectrale.....	19
3.4.3. LIDAR	20
3.4.4. Les vecteurs Drones.....	21
3.5. TELEDETECTION ACOUSTIQUE	22
3.5.1. Echosondeur monofaisceau	22
3.5.2. Sonar latéral	23
3.6. LES ACQUISITIONS DES DONNEES IN SITU.....	25
4. ANALYSE COMPARATIVE DES CAPACITES DES CAPTEURS	27
4.1. CAS D'UTILISATION	27
4.1.1. Photographie aérienne.....	28
4.1.2. Imagerie Pléiades	32
4.1.3. Imagerie Hyperspectrale	35
4.1.4. Imagerie sonar latéral.....	38
4.1.5. Echosondeur	42
4.1.6. LIDAR	47
4.2. COMPARAISON DES CAPTEURS.....	49
5. STRATEGIE ET RECOMMANDATIONS	52
5.1. PROCESSUS CARTOGRAPHIQUE	52
5.2. STRATEGIE DE CARTOGRAPHIE	53
5.3. RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE DE LA CARTOGRAPHIE DES HERBIERS	56
5.3.1. La réalisation des levés	56
5.3.2. Les traitements.....	57
5.3.3. La validation.....	59
5.3.4. Comparaison temporelle des emprises d'herbiers.....	60
5.4. ECHANTILLONNAGE IN SITU.....	61
5.4.1. Rappel des besoins en données d'observation	61
5.4.2. Stratégie d'échantillonnage sur le terrain	62
5.4.3. La planification des observations in situ.....	63

5.4.4. Optimisation de l'effort d'échantillonnage	63
5.4.5. Collecte d'informations contextuelles.....	64
5.4.6. Positionnement des stations et contour GPS	65
5.4.7. Prise de photographies.....	67
5.4.8. Echantillonnage en zone intertidale.....	68
5.4.9. Echantillonnage en zone subtidale (Zostera marina)	71
5.4.10. Radiométrie	72
5.4.11. Vidéo sous-marine.....	74
6. CONTROLE QUALITE ET BANCARISATION	76
6.1. CONTROLE QUALITE DES DONNEES	76
6.1.1. Topologie.....	76
6.1.2. Thématique	77
6.2. LIVRABLES ET FORMATS.....	77
6.2.1. Données optiques et acoustiques	77
6.2.2. Couche de cartographie des herbiers.....	78
6.2.3. Couches d'observations in situ	80
6.2.4. Le système de projection.....	83
6.2.5. Les métadonnées.....	83
6.2.6. Rapports technique et de synthèse.....	85
6.3. LE SYSTEME D'INFORMATION DE REFERENCE	85
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	86
8. GLOSSAIRE	93
9. ANNEXES	99
9.1. COMPARAISON DES PREFERENCES D'HABITATS DES ZOSTERES NAIN ET MARINE	99
9.2. UTILISATION DU LOGICIEL IMAGEJ	101

CARTOGRAPHIE DES HERBIERS DE ZOSTERES

Guide technique

| AVERTISSEMENT

Le présent document est un guide technique pour la cartographie des herbiers de zostères qui complète les protocoles de suivi stationnel existants dans le cadre de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau).

Il pourra également être utilisé pour répondre aux objectifs des autres directives : Directive Habitats Faune et Flore (DHFF) et Directive Strategie milieu Marin (DCSMM).

Pour une meilleure compréhension de la terminologie et des sigles utilisés dans le présent guide, le lecteur est invité à consulter le glossaire à la fin du document.

| PREAMBULE

Les zostères sont des phanérogames marines qui se développent sur les sédiments sableux et sablo-vaseux intertidaux et infralittoraux (cf. Fiche habitat dans Bajjouk *et al.*, 2016). Elles forment des herbiers, parfois denses, comparables aux prairies terrestres. Ayant les mêmes organes et tissus que toutes les plantes à fleurs terrestres, elles possèdent un faisceau de feuilles (généralement de 3 à 7) fixé sur un rhizome assez rigide au niveau d'un nœud matérialisant la transition entre la partie aérienne et la partie souterraine de la plante. Le long des côtes françaises, deux espèces se rencontrent sur les estrans et petits fonds côtiers et lagunaires : la zostère marine (*Zostera marina*) et la zostère naine (*Zostera noltei*) (Figure 1). Les principales caractéristiques et préférences écologiques de ces deux espèces sont indiquées dans l'annexe 1 (Cf. § 9.1).



Figure 1.
Zostera noltei en zone intertidale (à gauche) et *Zostera marina* en zone subtidale (à droite).

En effet, la zostère marine (*Zostera marina*) est signalée dans des zones qui s'étendent du cercle polaire au sud de l'Espagne. Elle est également présente au Japon et en Corée, dans le nord de l'Adriatique et en Mer Egée. En France, on la trouve principalement sur les façades Atlantique et Manche/Mer du Nord, mais également dans certaines lagunes saumâtres de Méditerranée (lagune de Thau notamment) et à Saint-Pierre-et-Miquelon.

Dans les zones à marée, elle se développe entre le bas de l'étage intertidal et le fond des chenaux, jusqu'à une profondeur variant selon les sites.

La zostère naine (*Zostera noltei*) est largement distribuée entre le sud de la Norvège et la Mauritanie. En France, elle colonise l'étage intertidal des zones abritées sur les façades Atlantique et Manche/Mer du Nord, et en Méditerranée quelques étangs littoraux (notamment Salses-Leucate, Bages-Sigean, Thau et Vaccarès), dans lesquels elle est immergée en permanence.

Le rôle écologique des herbiers de zostères revêt des aspects très divers et explique l'intérêt tout particulier porté à cet habitat dans le cadre de la gestion et de la conservation de l'environnement côtier :

- la présence d'herbiers favorise la diversité et l'abondance de la faune aquatique (abri contre les prédateurs, accroissement de l'hétérogénéité spatiale de l'habitat, oxygénation de la rhizosphère) et d'une microflore épiphyte composée de microalgues et de bactéries phototrophes. Ces épiphytes utilisent le limbe des feuilles comme substrat physique et profitent des substances carbonées et azotées excrétées par les plantes ;
- les zostères constituent une ressource nutritionnelle non négligeable, voire essentielle pour plusieurs espèces d'oiseaux migrateurs (bernaches, cygnes, canards siffleurs, ...) au cours de leur hivernage ;
- en réduisant les contraintes hydrodynamiques qui s'appliquent au niveau des sédiments qu'ils colonisent, les herbiers interviennent également en tant que stabilisateurs de leur substrat, limitant les effets de l'agitation de l'eau sur le taux de remise en suspension des particules fines. La présence de phanérogames favorise ainsi indirectement la transparence de l'eau et, de ce fait, la production primaire des baies et lagunes côtières ;
- du point de vue du cycle des nutriments, les phanérogames jouent un rôle de tampon dans les lagunes. D'une part, ces plantes pérennes sont capables de puiser l'azote et le phosphore à la fois dans l'eau et dans les sédiments, d'accumuler ces éléments dans leurs tissus lorsqu'ils sont disponibles dans le milieu, et d'utiliser ces réserves postérieurement, pendant leur période de croissance.

D'autre part, parce que les processus de décomposition sont à la fois plus lents et plus étalés dans le temps chez ces végétaux que chez les macroalgues, le recyclage de ce type de matière organique n'induit généralement pas de crises dystrophiques telles qu'on en observe lors du déclin des macroalgues opportunistes qui se développent également dans les lagunes.

Enfin, notamment par le biais de leurs relations avec les populations bactériennes lagunaires, les phanérogames interviennent sur le stock de nutriments (favorisation des processus de fixation d'azote moléculaire et de dénitrification), sur sa biodisponibilité (activation de la solubilisation du phosphore particulaire sédimentaire), et sur les transferts entre les compartiments sédimentaire et aquatique (Deborde et al., 2008 ; Jensen et al., 2007 ; Welsh et al., 1997 ; Welsh et al., 2000).

Les herbiers de zostères sont soumis à des pressions d'origines anthropiques et naturelles qui peuvent affecter leur survie et/ou leur productivité (voir **Tableau 1**).

Tableau 1. Types de pressions s'exerçant sur les herbiers et pouvant limiter leur extension, leur survie ou leur croissance (Auby *et al.*, 2018)

Facteur / Pression	Causes anthropiques	Causes naturelles
Anomalie de température	Rejets d'eau chaude	Canicules, hivers rigoureux
Anomalie de salinité	Rejets d'eau douce, retenue des apports d'eau douce	Anomalies d'origine climatique du débit des cours d'eau alimentant les zones côtières
Modifications bathymétriques et/ou sédimentaires	Dragages, réensablement, artificialisation, destruction d'habitats structurants connexes	Comblement ou érosion naturels
Destruction mécanique	Pêche à pied, Pêche à la drague, drague. Ancrages et hélices des bateaux Accélération des courants dus à une évolution bathymétrique d'origine anthropique	Accélération des courants dus à une évolution bathymétrique naturelle Tempêtes Broutage par les oiseaux herbivores
Eutrophisation favorisant des blooms de microalgues et/ou macroalgues opportunistes) et générant des anoxies ou une diminution de l'éclairement au fond	Épandages d'engrais sur le bassin versant, rejet d'eaux usées	
Augmentation de la turbidité par remise en suspension de particules fines et générant des anoxies ou une diminution de l'éclairement au fond	Remise en suspension des particules fines par dragages ou piétinements des herbiers sur sols vaseux Agitation de l'eau due à la navigation	Très fortes dessalures (crues des fleuves côtiers) Tempêtes
Teneurs en herbicides préjudiciables à la survie/croissance	Épandages sur le bassin versant (agricoles et non agricoles) Peintures anti-salissures	

Hormis la température, (*Zostera marina* supportant moins bien les valeurs élevées que *Zostera noltei*), les deux espèces sont sensibles aux mêmes forçages environnementaux : lumière, teneur en nutriments, facteurs hydrodynamiques tels que les courants et les vagues. Dans les zones soumises à la marée, la diminution d'éclairement due à l'augmentation de la turbidité ou à la prolifération de macroalgues (liée à de plus fortes teneurs en nutriments) a un impact plus important sur *Z. marina*, à cause de sa situation plutôt infratidale. L'augmentation des teneurs en nutriments dans la colonne d'eau peut également provoquer la prolifération d'épiphytes, charge qui sera plus ou moins bien tolérée selon l'importance du microbroutage par des organismes présents. Enfin l'impact négatif des oiseaux hivernants (principalement bernaches, mais également cygnes, canards siffleurs, ...) sur l'état des herbiers de zostères est généralement considéré comme négligeable, comme mis en évidence dans les Pertuis Charentais et le Bassin d'Arcachon (Auby *et al.*, 2011).

Initialement pris en considération par la Convention **RAMSAR**, relative aux zones humides d'importance internationale entrée en vigueur en 1975, les herbiers ont également été pris en compte depuis le 5 juin 1994 par la **Directive Habitats Faune et Flore (DHFF)** qui a pour objet d'assurer le maintien de la diversité biologique par la conservation des habitats naturels, ainsi

que de la faune et de la flore sauvages en créant notamment des zones spéciales de conservation (ZSC).

En 2000, la **Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE (DCE)** a établi un cadre visant à une meilleure gestion des milieux aquatiques, s'appliquant à l'ensemble des pays membres de l'Union Européenne. Elle fixait comme objectif général l'atteinte d'un bon état écologique et chimique des masses d'eau souterraine et de surface, incluant les eaux côtières (MEC) et de transition (MET). Les herbiers de zostères y sont retenus comme élément de qualité devant être pris en compte pour évaluer la qualité écologique des masses d'eau littorale.

L'importance de l'habitat Herbiers a, par la suite, été renforcée en 2008 par l'Accord **OSPAR 2008-6**, convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est, qui a inscrit les herbiers de *Zostera* sur la liste d'espèces et habitats menacés et/ou en déclin avec 2 sous types : « Herbiers à *Zostera marina* » et « Herbiers à *Zostera noltei* ».

Plus récemment, la **Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/CE/56, DCSMM)**, publiée le 25 juin 2008, poursuit la prise en compte des herbiers dans ce sens en les intégrant au sein des items « habitats particuliers » des biocénoses du médio- et de l'infralittoral.

La caractérisation des conditions environnementales basée sur les angiospermes marines nécessite par conséquent l'emploi de méthodes d'évaluation quantitatives et qualitatives et la mesure de paramètres biologiques qui participent à l'évaluation de l'état écologique ou de l'état de conservation.

Ainsi les phanérogames marines sont devenues ces dernières années des "espèces phares". Habitat à forte valeur écologique et patrimoniale, les herbiers bénéficient de mesures de gestion et de protection à différentes échelles : locale, nationale et internationale. Il y a donc, à l'échelle de l'Europe, un contexte favorable pour que les connaissances sur les herbiers progressent et que leur dynamique spatio-temporelle soit surveillée à une échelle globale.

INTRODUCTION

CONTEXTE & OBJECTIFS



1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

En environnement marin, la végétation constitue un élément important d'évaluation et de suivi de l'état écologique en raison de :

- sa position dans le proche littoral, particulièrement exposée aux pollutions continentales ;
- sa réactivité importante aux évolutions de la qualité des eaux côtières ;
- sa sensibilité aussi bien aux perturbations accidentelles du milieu qu'aux évolutions à long terme du climat.

Concernant les angiospermes, la décision de retenir le suivi des herbiers comme bio-indicateur pour la qualification des masses d'eau côtières (DCE) a conduit à retenir trois métriques jugées pertinentes pour l'indicateur français (Auby *et al.*, 2010) :

- évolution de la composition taxinomique ;
- évolution de l'abondance (densité des pieds et/ou biomasse et/ou recouvrement) ;
- évolution de l'extension spatiale.

A l'échelle du littoral Manche Atlantique, il existe un déficit de cartographies récentes des herbiers de zostères, en particulier en Bretagne. Parfois, on dispose d'une seule donnée cartographique (cas de la plupart des masses d'eau bretonnes), ce qui ne permet pas de calculer l'indice « extension », basé sur l'évolution par rapport à une situation « de référence ». Il apparaît donc aujourd'hui un réel besoin d'acquisition d'informations surfaciques afin de renseigner l'état écologique tel qu'exigé par les différentes directives.

Depuis quelques années, et en lien avec les exigences des directives européennes, les habitats ont servi de support pour le développement et la valorisation des outils et techniques de télédétection pour la planification d'une gestion et d'une stratégie de surveillance efficace (Boström *et al.*, 2014). En France, Les méthodes pour évaluer les paramètres relatifs à leur distribution sont diverses. L'imagerie optique (orthophotographie littorale, images satellites, imagerie aéroportée hyperspectrale) est souvent utilisée pour cartographier les herbiers en zone intertidale (Alloncle, 2005 ; Godet *et al.*, 2008 ; Barillé *et al.*, 2009 ; Lafon, 2013). En zone subtidale, la technologie acoustique peut être proposée en complément pour accéder aux herbiers submergés (Noël *et al.*, 2009).

Cependant, les résultats peuvent varier en fonction des techniques de cartographie utilisées (GPS, imagerie optique ou acoustique, etc.), des méthodes de délimitation (traitement automatique ou photo-interprétation), des seuils retenus par les opérateurs pour délimiter les herbiers (indice spectraux), et de la nature des objets mesurés (surface végétalisée ou enveloppe de l'herbier, degré de fragmentation, etc.).

Afin d'assurer l'homogénéité des rendus et permettre l'élaboration des bilans à l'échelle nationale, les efforts doivent converger vers une standardisation du protocole de cartographie des herbiers afin de suivre leur dynamique.

1.2. Objectif du document

(Thème B3-Formations et outils)

Ce document a été élaboré dans le cadre de la convention Ifremer-AQUAREF-AFB 2016-2018 (B3 - Formations et outils). Il est destiné aux gestionnaires de la DCE ainsi qu'aux opérateurs en charge de l'actualisation de l'information sur les emprises concernées par les différentes directives (DHFF et DCSMM). Le **Tableau 2** résume les besoins exprimés par chacune des trois directives (DCSMM, DCE, DHFF) pour évaluer la qualité écologique ou l'état de conservation des herbiers de zostères.

Tableau 2 . Eléments d'évaluation des différentes directives européennes concernant l'extension des herbiers de zostères			
	DCSMM	DCE	DHFF
Eléments d'évaluation	<ul style="list-style-type: none"> - Etendue de la perte d'habitat résultant de pressions anthropiques - Etendue des effets néfastes liés aux pressions anthropiques sur l'état de l'habitat - Altération de la structure biotique/abiotique et des fonctions de l'habitat 	<ul style="list-style-type: none"> - Variation de l'emprise des herbiers par rapport à l'emprise maximale - Qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Aire de répartition naturelle - Superficie - Structure et fonction spécifiques nécessaires au maintien de l'état de conservation
Source	Décision (UE) 2017/848, 17 mai 2017	Directive 2000/60/CE, 23 oct. 2000	Directive 92/43/CEE, 21 mai 92

Basé sur les retours d'expérience relatifs aux possibilités offertes par les outils d'imagerie optique et acoustique, le présent document a pour objectif de fournir des éléments techniques pour obtenir les données sur l'extension des herbiers de zostères, métrique d'importance notamment pour le calcul de l'indicateur DCE « angiospermes ».

Il décrit les capacités techniques de l'outil imagerie (optique et acoustique) à produire des informations sur la métrique « extension de l'herbier », à savoir :

- l'enveloppe globale qui renseigne sur l'extension de l'herbier ;
- la superficie réelle qui correspond à la superficie réellement occupée par l'herbier au sein de l'enveloppe en tenant compte du degré de fragmentation et du taux de recouvrement des herbiers ;
- la limite inférieure, qui est un indicateur de la turbidité (limite de pénétration de lumière suffisante pour le développement des zostères).

Ce document constitue un guide méthodologique permettant d'établir un cahier des charges pour une collecte standardisée des données surfaciques relatives aux herbiers de zostères (*Z. marina* et *Z. noltei*).

1.3. Documents de référence

Le travail réalisé s'appuie en partie sur les documents référencés dans le **Tableau 3** :

Tableau 3. Documents de référence	
Source	Référence
DCE national	Auby <i>et al.</i> , 2018. Protocoles de suivi stationnel des herbiers à zostères pour la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) <i>Zostera marina</i> - <i>Zostera noltei</i> . Version 3 (Auby <i>et al.</i> , 2018). Classement des masses d'eau du littoral Manche-Atlantique sur la base de l'indicateur DCE «Angiospermes» (données 2012-2016)
AFNOR/CEN	CEN/TC 230, 2018. Quality - Guidance on mapping of seagrasses and macroalgae in the eulittoral zone (TC 230 WI 00230362)
Séminaire GT-Surfacique	Projet ZOSTERA, Compte rendu du Groupe de Travail « Surfacique Herbier » du 31 janvier 2018 - Ifremer Brest
CDC Natura 2000	Bajjouk, 2009. Soutien aux actions NATURA 2000 de la région Bretagne - Cahier des charges pour la cartographie d'habitats des sites Natura 2000 littoraux : Guide méthodologique. Réf. RST/IFREMER/DYNECO/AG/09-01/TB/NATURA2000. 107p + annexes
Guide Semantic Posidonie	Noël <i>et al.</i> , 2012. Cahier Technique du Gestionnaire : Analyse comparée des méthodes de surveillance des herbiers de posidonies. 96 p CartOcean, Agence de l'eau RMC, Dreal PACA, Région PACA

1.4. Organisation du document

Après une première partie consacrée à l'introduction du contexte d'élaboration de ce guide et de ses objectifs, la suite du présent document est structurée en plusieurs parties :

- la partie 2 concerne une revue de paramètres pour l'observation et le suivi des herbiers de phanérogames marines ;
- la partie 3 est consacrée à la description des outils de cartographie pouvant être utilisés pour l'habitat herbiers, ainsi qu'aux différentes méthodes pour collecter *in situ* des informations caractérisant les herbiers ;
- la partie 4 est dédiée à une analyse comparative des capacités des capteurs optiques et acoustiques pour extraire des informations relatives à l'extension des herbiers ;
- la partie 5 se focalise sur des propositions de stratégie et recommandations pour la réalisation de la cartographie des herbiers ;
- la partie 6 traite du contrôle qualité et de la bancarisation des données associées aux inventaires cartographiques des herbiers ;
- enfin, les annexes qui apportent quelques précisions sur le cadre méthodologique préconisé pour la standardisation des protocoles de cartographie des herbiers de zostères. Elles font intégralement partie des spécifications techniques.

OBSERVATION & SUIVI DES HERBIERS

ETAT DE L'ART DES INDICES



2. Les indices d'observation et de suivi des herbiers de phanérogames marines

2.1. Etat de l'art

Depuis une quinzaine d'années sont publiés des documents qui font le bilan des principaux descripteurs et indicateurs utilisés dans le cadre de différents programmes de suivi des herbiers à des échelles régionales (Pergent-Martini *et al.*, 2005) ou à l'échelle européenne (Martínez-Crego *et al.*, 2008 ; Lopez y Royo *et al.*, 2010). Ces indicateurs concernent différents niveaux de l'organisation des herbiers (Kerninon, 2014). Ils sont pour la plupart basés sur des niveaux physiologiques et biochimiques, de la plante (morphologie), de la population (structure) ou de la communauté (Martínez-Crego *et al.*, 2008 ; Roca *et al.*, 2014).

Environ 59 indicateurs sont développés à l'heure actuelle pour les angiospermes (Borum *et al.*, 2004; Fürhaupter *et al.*, 2014; Marbà *et al.*, 2013; Martínez-Crego *et al.*, 2008). Les métriques, indices ou indicateurs utilisés pour l'observation et le suivi des herbiers concernent leur composition spécifique (apparition ou disparition d'espèces), la superficie de l'habitat, l'abondance des plantes, le niveau bathymétrique des limites hautes et basses ainsi que les types de limites. Les paramètres pouvant être pertinents pour le suivi surfacique des herbiers de zostères sont décrits ci-dessous :

| Extension horizontale L'étendue de l'herbier correspond à la surface de son enveloppe. Son unité est une surface (m², km², etc.). C'est un indice global qui révèle l'augmentation ou la perte de surface d'herbier au niveau de ses limites. Il présente l'avantage de fournir des aperçus à grande échelle (populations entières) utiles pour les gestionnaires. À l'échelle paysagère, les surfaces de l'enveloppe sont donc les indicateurs les plus communément utilisés pour le suivi des herbiers (Borum *et al.*, 2004; Krause-Jensen *et al.*, 2003). En Europe dans le cadre de la DCE, la tendance de l'évolution de l'étendue des herbiers est évaluée par rapport à son extension maximale, définie comme la plus grande extension mesurée au cours du temps (Auby *et al.*, 2010).

| Extension verticale L'évolution des niveaux bathymétriques colonisés par les herbiers dans un écosystème reflète l'effet de pressions différentes, selon qu'il s'agit des limites supérieures ou inférieures. La régression des herbiers en limite supérieure peut traduire plus spécifiquement l'impact de certaines activités humaines en bordure de littoral (aménagement portuaires par exemple). L'évolution temporelle de la limite inférieure des herbiers subtidiaux renseigne sur les modifications de la transparence des eaux et son évolution temporelle.

| Fragmentation

Encore peu utilisée dans les programmes de suivi, la fragmentation est définie par la surface relative du substrat non colonisé par l'herbier par rapport à la surface totale de l'herbier. C'est un paramètre particulièrement intéressant pour suivre l'évolution et la dynamique des herbiers et leurs effets sur les espèces inféodées à cet habitat (Boström *et al.*, 2006). Elle peut être mesurée à travers de nombreux indices tels que le nombre et la surface des patches, ou les indices de proximité et de connectance, etc. La modification de la taille des patches, leur forme et leur disposition dans l'herbier pourra indiquer la présence d'une perturbation et son caractère local ou diffus.

**| Taux de
| Recouvrement**

Le taux de recouvrement se définit comme la proportion de la surface couverte par les herbiers au sein des patches par rapport à une unité de surface.

| Densité

La densité des herbiers est le nombre de faisceaux ou de pieds vivants par unité de surface. Une part de la variabilité de ce paramètre peut être expliquée par la profondeur (qui intègre notamment la pénétration de la lumière). Les mesures de densité doivent donc être rattachées à la mesure de la profondeur de l'eau.

| Biomasse

La biomasse est la masse totale de matière vivante dans une surface (m^2). Cette métrique peut être d'intérêt pour caractériser la structure des herbiers.

2.2. Intérêts et limites pour l'approche spatiale

Le **Tableau 4** synthétise les avantages et inconvénients, pour le suivi surfacique, des principales métriques de suivi des herbiers utilisées dans la littérature.

Tableau 4. Intérêts et limites des métriques de suivi des herbiers de phanérogames marines

Métrique	Avantages	Inconvénients
Extension horizontale	C'est l'indice le plus simple pour des études à petite comme à grande échelle. Il donne des indications sur les perturbations anthropiques (eutrophisation, activités aquatiques, dragages et ré ensablements, cultures marines, etc.) ainsi que les perturbations naturelles (tempêtes, évolution des courants, canicules, etc.).	L'extension horizontale ne prend pas en compte les pertes et gains visibles à l'intérieur de ces limites (par exemple modification de la densité ou de la fragmentation au sein de l'herbier).
Extension verticale	La limite bathymétrique inférieure de distribution des herbiers subtidaux est un bon proxy de la clarté de l'eau, présentant l'avantage d'être immédiatement compréhensible et facile à présenter. Elle peut également être prédite à partir de modèles empiriques qui font le lien entre les limites de profondeur et la transparence de l'eau.	La mesure de cette limite de profondeur nécessite de préciser au préalable à partir de quelle densité minimale de pieds on estime être en présence d'un herbier.
Fragmentation	Elle prend en compte les changements de la structure à l'intérieur des limites (distribution spatiale de la population).	Difficile à appréhender <i>in situ</i> en raison de la difficulté à apprécier visuellement le caractère continu ou discontinu de l'herbier.
Taux de Recouvrement	Métrique facilement mesurable <i>in situ</i> et qui peut être estimée spatialement à partir de l'imagerie par calcul d'indices.	La mesure du taux de recouvrement diffère selon la configuration de l'herbier : couché (intertidal) et dressé (subtidal).
Densité	Métrique facile à mesurer (au moins pour <i>Zostera marina</i>) et qui donne une information identique quelle que soit la configuration de l'herbier : couché (intertidal) et dressé (subtidal).	Métrique plus difficile à mesurer pour <i>Zostera noltei</i> .
Biomasse	Métrique largement utilisée pour caractériser la structure de l'herbier. Elle peut être estimée spatialement à partir de l'imagerie par application d'une relation biométrique entre le taux de recouvrement et la biomasse (Figure 2).	Elle nécessite un effort d'échantillonnage plus important que le taux de recouvrement (traitement au laboratoire des échantillons).

Lorsqu'on fait appel à la télédétection pour cartographier des herbiers, certaines métriques peuvent être calculées directement pour chaque pixel de l'image par l'application de modèles spécifiques ou d'indices spectraux (ex. taux de recouvrement). D'autres peuvent être estimées indirectement grâce à des relations mesurées *in situ* entre deux métriques. C'est le cas par exemple de la biomasse épigée des zostères intertidales qui montre une relation linéaire significative avec le taux de recouvrement (Figure 2) et permet donc d'extrapoler son estimation à l'échelle du site d'étude en utilisant les valeurs de recouvrement calculées par traitement d'image.

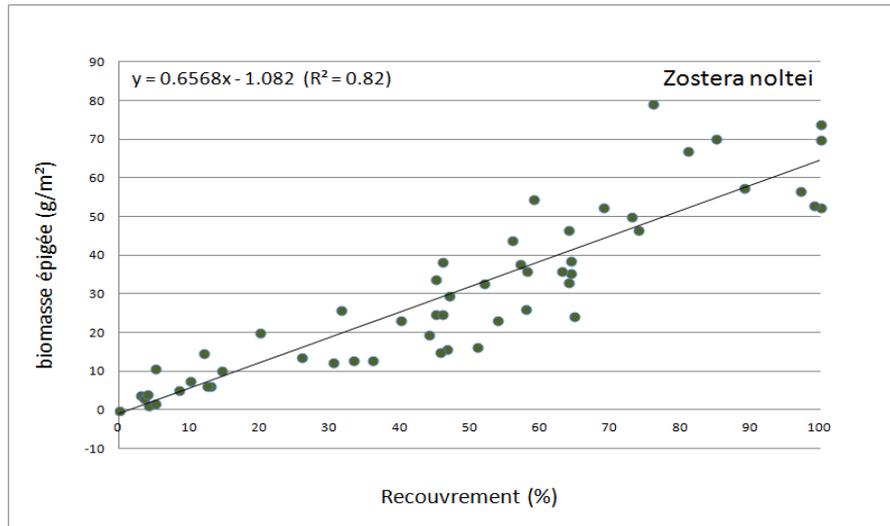
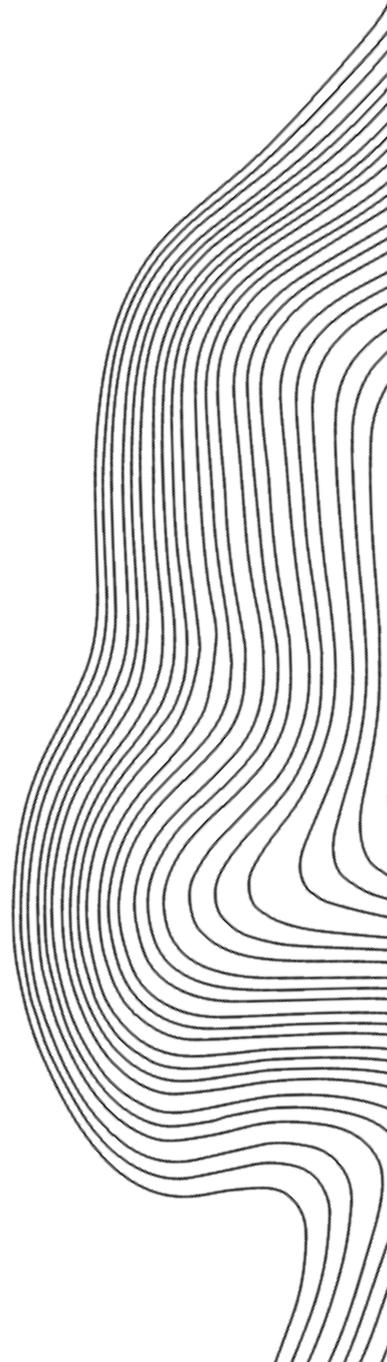


Figure 2.

Relation entre la biomasse épigée (feuilles + gaines) et le taux de recouvrement des herbiers de *Zostera noltei* mesurés *in situ* sur trois sites : Bourgneuf, Arcachon, St Jacut (Auby *et al.*, 2014)

CARTOGRAPHIE DES HERBIERS

OUTILS & METHODES



3. Outils et méthodes de cartographie des phanérogames marines

L'inventaire cartographique des herbiers de zostères peut être réalisé en grande partie en s'appuyant sur des techniques de télédétection. Les supports les plus utilisés sont les orthophotographies littorales. Mais les herbiers de phanérogames peuvent aussi être détectés à partir d'images satellites comme celles réalisées par SPOT ou par imagerie acoustique lorsque la hauteur d'eau est trop importante pour une observation aérienne. Toutefois, des signatures d'autres peuplements notamment d'algues vertes peuvent porter à confusion. La validation de terrain tient donc une part importante dans le processus d'inventaire cartographique. L'ensemble de ces méthodes est applicable à différentes échelles et présente des degrés variables de précision et de coûts de mise en œuvre.

3.1. GPS et positionnement

Quel que soit le capteur utilisé, la précision d'une cartographie dépendra toujours de la précision avec laquelle la position du capteur a été déterminée. Il est donc primordial de localiser les données avec soin lors de la réalisation d'une cartographie.

Le GPS (Global Positioning System ou Système mondial de positionnement) est un système de positionnement par satellites mis en place par le département de la Défense des Etats-Unis. Il est aujourd'hui devenu un outil incontournable pour la localisation des données d'observation. Le système comprend 24 satellites placés en orbite autour de la terre et répartis de manière à ce qu'au moins 4 d'entre eux soient visibles à n'importe quel endroit du globe terrestre. Chacun des satellites émet un signal électromagnétique contenant des informations sur sa position et sur l'heure à laquelle il a émis le signal. Pour se localiser, le récepteur GPS mesure le temps de parcours de ce signal et l'utilise pour déterminer la distance le séparant du satellite. En recevant les signaux d'au moins 4 satellites, le récepteur GPS est capable de calculer sa position géographique par triangulation (**Figure 3 - A**).

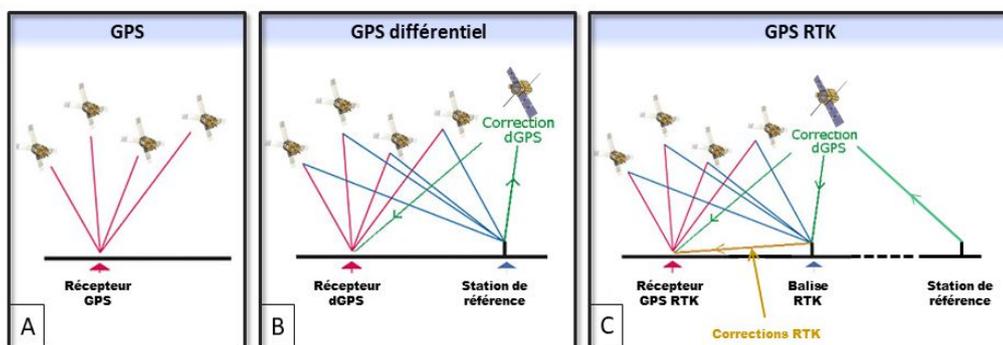


Figure 3.

Principe de fonctionnement du GPS (modifié d'après <https://www.asavpa45.org>)

La précision du GPS est de 1 à 20 mètres. Elle dépend de nombreux paramètres comme la constellation de satellites visibles, les perturbations ionosphériques, la qualité du récepteur GPS et des traitements qu'il effectue. Actuellement la **précision du GPS est en générale inférieure à 10 m** voire proche de la précision du GPS différentiel.

Le DGPS ou **GPS différentiel** permet d'améliorer la précision du positionnement. Son principe est basé sur l'utilisation d'un réseau de stations fixes de référence réparties sur le globe terrestre. Chacune de ces stations calcule en permanence l'écart entre sa position calculée grâce aux satellites et sa position réelle. Le récepteur GPS utilise alors l'erreur calculée pour corriger sa propre position (**Figure 3 - B**). La **précision** du positionnement est donc excellente quand on est proche de la station de référence et se dégrade lorsqu'on s'en éloigne. Elle est en général **inférieure à 2 m**.

Le **GPS différentiel RTK** (DGPS RTK) s'appuie sur le même principe que le GPS différentiel. La station de référence est dans ce cas proche du site d'étude (**Figure 3 - C**). Elle peut être soit une station mobile placée sur le site par l'utilisateur soit appartenir à un réseau de stations fixes. Il existe plusieurs réseaux de stations public (RGP) ou privés (Orphéon, Teria, SatInfo) (Lahaye and Ladet, n.d.). Les corrections seront transmises au récepteur par liaison radio dans le premier cas ou en utilisant le réseau GSM dans le second cas. La **précision** du positionnement est comprise **entre 1 et 10 cm**. En plus d'un positionnement en latitude et longitude, le GPS RTK fournit une valeur d'altitude assez précise pour être utilisée en bathymétrie pour le calcul des corrections de marée.

3.2. Cartographie par contour GPS

Généralement, l'extension d'un herbier peut être déterminée à partir des images aériennes ou satellites. Lorsque ces limites sont difficilement identifiables sur ce support, le GPS peut également être utilisé pour leur cartographie (par cheminement autour de l'enveloppe). Le GPS peut également être utilisé seul pour cartographier les herbiers sans support d'imagerie (**Figure 4**).

En zone intertidale, ces informations sont relativement faciles à collecter lorsque les herbiers sont de petite taille. Ces données s'avèrent beaucoup plus compliquées à recueillir dans les grands herbiers, surtout lorsqu'ils sont colonisés par des macroalgues. De même, pour les herbiers fragmentés, il est souvent difficile de distinguer une tache d'herbier de l'enveloppe globale de l'herbier. Cette approche n'est pas toujours réalisable, notamment lorsque l'accès aux herbiers représente un risque pour l'opérateur.



Figure 4.
Détourage par GPS d'herbier de zostère en zone intertidale

3.3. Télédétection optique satellitaire

La télédétection optique est l'ensemble des connaissances et outils utilisés pour déterminer à distance les propriétés d'objets présents à la surface de la terre, à partir du rayonnement émis ou réfléchi dans chaque longueur d'onde (Figure 5) et sans contact direct avec ces derniers. En effet, chaque objet possède des caractéristiques de rayonnement électromagnétique spécifiques en fonction de ses propriétés intrinsèques et les conditions environnementales.

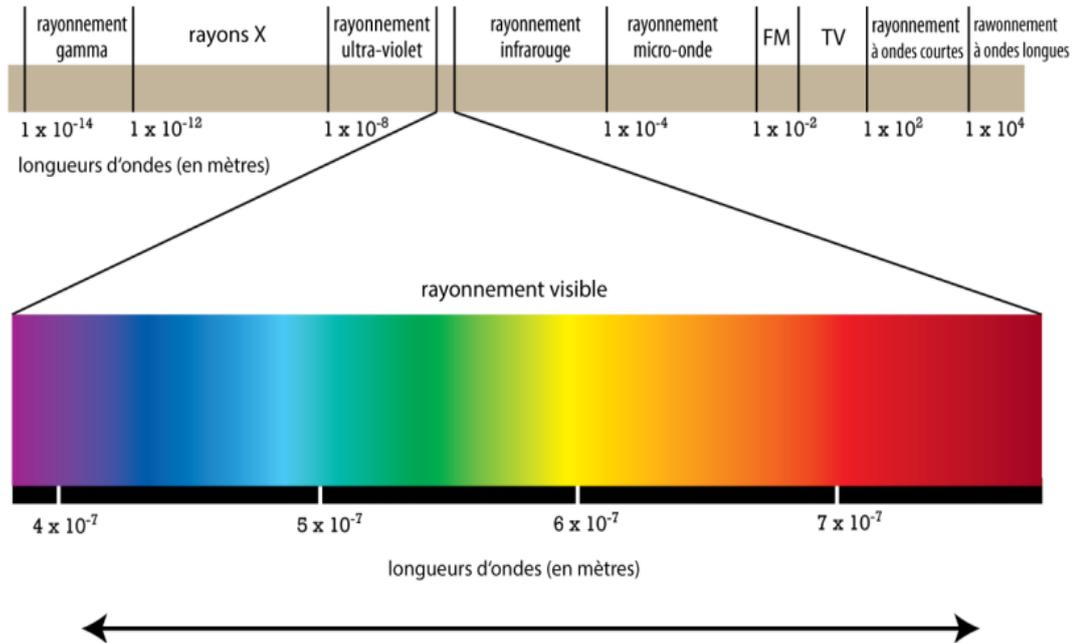


Figure 5.
Gamme de longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique

En télédétection, on distingue deux principaux types de capteurs : passifs et actifs. Les capteurs passifs mesurent le rayonnement naturel émis ou réfléchi par les cibles tandis que les capteurs actifs produisent leur propre énergie pour illuminer la cible.

Les outils de télédétection passive permettent d'acquérir trois types d'images qui se distinguent par le nombre de bandes spectrales utilisées :

- les images panchromatiques enregistrées sous forme d'une image en 255 niveaux de gris. Le rayonnement électromagnétique mesuré par le capteur se trouve dans un unique intervalle situé dans le domaine du visible, c'est à dire entre 0,4 et 0,7 μm . Ces images ont une faible résolution spectrale mais sont riches par leur résolution spatiale ;
- les images multispectrales obtenues à partir des enregistrements simultanés d'une même scène avec un ensemble de bandes spectrales de longueurs d'onde différentes et isolées (Figure 6) ;
- les images hyperspectrales contenant des centaines voire des milliers de bandes spectrales.

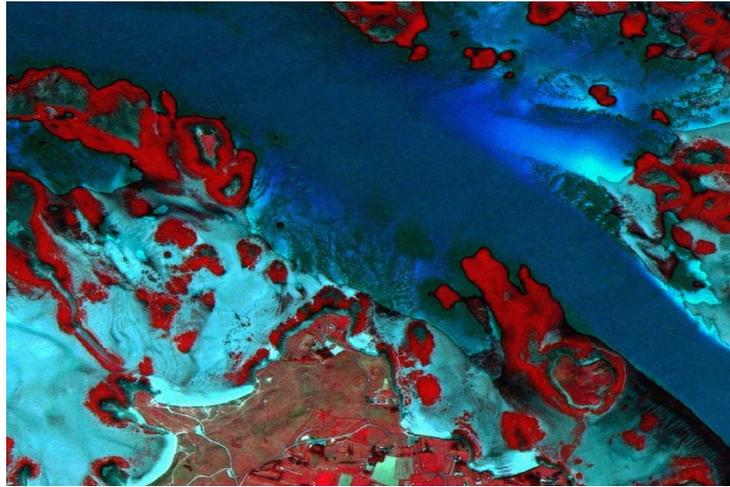


Figure 6.

Image Spot de l'embouchure de l'aber Wrac'h rehaussée avec fusion du canal panchromatique à 2,5 m et les 3 canaux vert, rouge et infrarouge à 10 m

Notons que l'information issue de capteurs optiques est une mesure géophysique pouvant être traitée de façon automatique au moyen de protocoles reproductibles pour obtenir l'extension et le taux de recouvrement des végétaux. Des études de cartographie des herbiers ont été réalisées à partir d'imagerie satellitaire (Guillaumont, 1991; Harin *et al.*, 2015; Lafon, 2013). L'intérêt majeur de l'imagerie optique satellitaire est sa capacité à couvrir de grandes étendues. Le **Tableau 5** ci-après présente les caractéristiques des principaux satellites exploitables pour la cartographie des herbiers. Leur résolution spatiale varie de 31 cm à 1 km.

Tableau 5.
Les caractéristiques des principaux satellites exploitables pour la cartographie des herbiers.

Programme	Nombre de canaux	Longueurs d'onde				Résolution spatiale	Largeur de fauchée	Temps de revisite	
		Sentinel-2A		Sentinel-2B					
		Numéro de la bande	Longueur d'onde (nm)	Largeur de bande (nm)	Longueur d'onde (nm)	Largeur de bande (nm)			
Sentinel-2	13 bandes pour chaque satellite (2A et 2B) Visible et proche infrarouge : bandes 2, 3, 4 et 8 Red edge et infrarouge : bandes 5, 6, 7, 8a, 11 et 12 Corrections atmosphériques : bandes 1, 9, et 10						290 km	5 jours à l'équateur	
		2	496.6	98	492.1	98	10 m		
		3	560.0	45	559	46			
		4	664.5	38	665	39			
		8	835.1	145	833	133			
			5	703.9	19	703.8	20		20 m
			6	740.2	18	739.1	18		
			7	782.5	28	779.7	28		
			8a	864.8	33	864	32		
			11	1613.7	143	1610.4	141		60 m
			12	2202.4	242	2185.7	238		
			1	443.9	27	442.3	45		
		9	945.0	26	943.2	27			
		10	1373.5	75	1376.9	76			
SPOT 5	HRG : 5 canaux	P : 480 - 710 mm B1 : 500 - 590 mm B2 : 610 - 680 mm B3 : 780 - 890 mm B4 : 1580 - 1750 mm				5 m 10 m 10 m 10 m 20 m	60 km	1 jour	
	Végétation : 4 canaux	B1 : 500 - 590 mm B2 : 610 - 680 mm B3 : 780 - 890 mm B4 : 1580 - 1750 mm				1 km			2200 km
	HRS : 1 canal	P : 0,48 - 0,71 mm				10 m			120 km
Pleiades	Multispectral : 4 canaux	B0 : 430 - 550 nm B1 : 490 - 610 nm B2 : 600 - 720 nm B3 : 750 - 950 nm				2,8 m (rééchantillonné à 50 cm)	20 km	Inférieur à 1 jour	
	Panchromatique	P : 480 - 830 nm				70 cm (rééchantillonné à 50 cm)			

Programme	Nombre de canaux	Longueurs d'onde	Résolution spatiale	Largeur de fauchée	Temps de revisite
FormoSat-2	Multispectral : 4 canaux	B1 : 450 - 520 nm B2 : 520 - 600 nm B3 : 630 - 690 nm B4 : 760 - 900 nm	8 m	24 km	1 jour
	Panchromatique	450 - 900 nm	2 m		
Worldview-3	Panchromatique	Pan : 450 - 800 nm	31 cm	13,1 km au nadir	Inférieur à 1 jour
	Multispectral : 8 canaux	Coastal : 450 - 450 nm Blue : 450 - 510 nm Green : 510 - 580 nm Yellow : 585 - 625 nm Red : 630 - 690 nm Red Edge : 705 - 745 nm Near-IR1 : 770 - 895 nm Near-IR2 : 860 - 1040 nm	1,24 m		
	SWIR : 8 canaux	SWIR-1 : 1195 - 1225 nm SWIR-2 : 1550 - 1590 nm SWIR-3 : 1640 - 1680 nm SWIR-4 : 1710 - 1750 nm SWIR-5 : 2145 - 2185 nm SWIR-6 : 2185 - 2225 nm SWIR-7 : 2235 - 2285 nm SWIR-8 : 2295 - 2365 nm	3,7 m		
	CAVIS : 12 canaux	Desert Clouds : 405 - 420 nm Aerosol-1 : 459 - 509 nm Green : 525 - 585 nm Aerosol-2 : 620 - 670 nm Water-1 : 845 - 885 nm Water-2 : 897 - 927 nm Water-3 : 930 - 965 nm NDVI-SWIR : 1220 - 1252 nm Cirrus : 1350 - 1410 nm Snow : 1620 - 1680 nm Aerosol-3 : 2105 - 2245 nm Aerosol-3 : 2105 - 2245 nm	30 m		

3.4. L'imagerie aéroportée

3.4.1. Photographie aérienne

Les orthophotographies littorales sont des photographies aériennes ayant subi une orthorectification (**Figure 7**). Ce procédé permet de corriger les déformations de l'image dues à la prise de vue et au relief de la zone photographiée et de la géoréférencer.

Les orthophotographies littorales ont été retenues :

- en tant que référentiel géographique pour le RGL (Référentiel Géographique Littoral) en raison de leur précision géométrique ;
- en tant que référence thématique de visualisation et de délimitation d'un nombre important d'habitats (Rollet, 2004).

L'inventaire cartographique des zones colonisées est un élément important pour le suivi et la gestion des herbiers de zostères notamment pour établir les mesures de conservation appropriées. En France, de nombreux travaux ont été réalisés dans ce sens à partir de photographies aériennes (Bernard and Chauvaud, 2002; Fournier, 2002; Grillas *et al.*, 2000; Hily, 1997; Levêque, 2004; Peuziat *et al.*, 2004; Plus *et al.*, 2010). À l'échelle internationale, la photographie aérienne a également été utilisée au Royaume-Uni dans les travaux de (Wyn, 2000).

L'interprétation visuelle de la photographie aérienne reste l'approche la plus largement adoptée pour cartographier l'étendue des herbiers marins, y compris le long de la côte méditerranéenne des États-Unis (Carraway *et al.*, 1983; Finkbeiner *et al.*, 2001 ; Young *et al.*, 2010 ; Costello and Kenworthy, 2011). Cette photo-interprétation des clichés aériens est réalisée avec des méthodes différentes, ce qui rend difficile la comparaison des résultats.

Notons qu'aujourd'hui, l'imagerie infrarouge peut être acquise conjointement avec la photographie aérienne RVB. Ceci permet d'améliorer significativement l'interprétation.

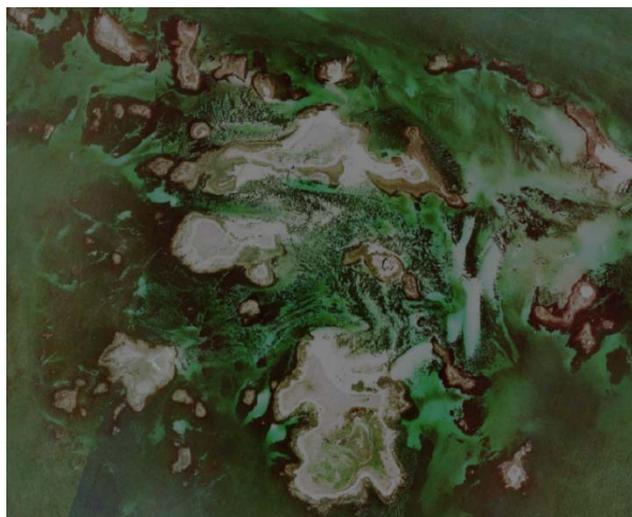


Figure 7.
Exemple d'orthophotographie littorale acquise sur le site des Glénan

3.4.2. Imagerie hyperspectrale

L'imagerie hyperspectrale se distingue de l'imagerie multispectrale principalement par le nombre de bandes spectrales acquises et leur largeur. Elle permet l'acquisition d'un « cube de données » contenant des centaines voire des milliers de bandes spectrales de quelques nanomètres (Figure 8). Les longueurs d'onde retenues pour la détection de la végétation sont généralement comprises entre 400 et 1 100 nm soit allant de la lumière visible bleue au proche infrarouge.

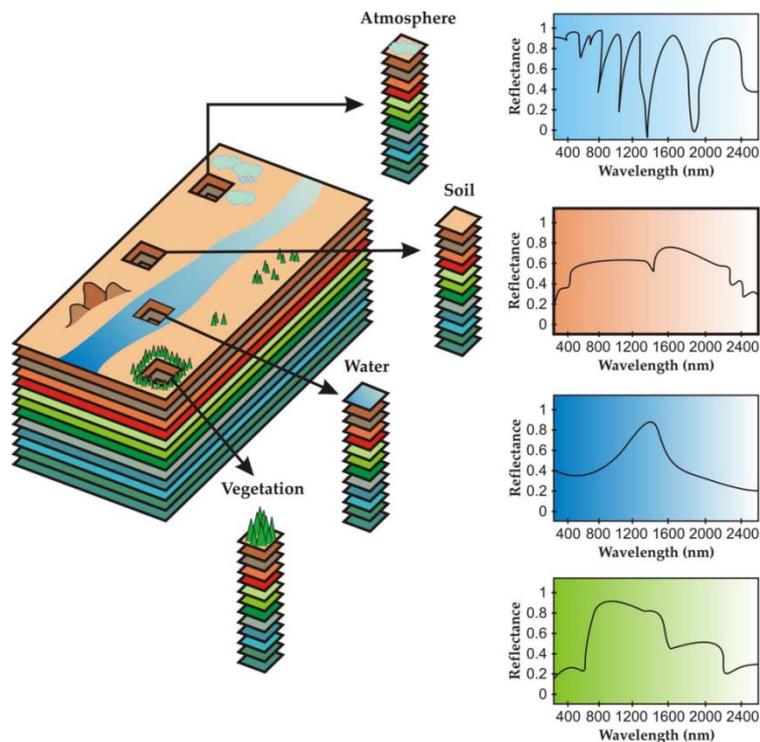


Figure 8.

Principe de mesure des capteurs hyperspectraux (d'après Bioucas-Dias *et al.*, 2012)

L'imagerie hyperspectrale offre donc une information plus riche que celle proposée aujourd'hui par les images satellites. Cette richesse a permis l'émergence de nouvelles applications dans les domaines de la surveillance agricole, les diagnostics médicaux précis, la surveillance environnementale (comme la surveillance des déversements de pétrole et la dispersion des polluants) ainsi que d'autres projets de recherche en géologie, en sciences marines et en foresterie.

Conçue à l'origine pour les satellites militaires dans les années 80, cette technologie a été limitée par son coût élevé et par la difficulté à traiter les grands volumes de données qu'elle produit. Ces barrières s'estompent peu à peu avec les innovations technologiques qui travaillent à la réduction de son coût, la facilitation de sa mise en œuvre par la miniaturisation des composants et enfin, les améliorations en capacité de traitement des données.

Dekker *et al.* (2001) ont démontré l'efficacité de l'imagerie hyperspectrale pour la gestion des systèmes côtiers et des lacs à différentes échelles. Les réflectances spectrales issues d'images hyperspectrales acquises sur les eaux côtières et continentales à haute résolution spatiale sont essentielles pour estimer les propriétés biophysiques nécessaires au suivi de ces

écosystèmes. L'imagerie hyperspectrale aéroportée (CASI, Phyllis, HyMap, MIVIS, etc.) a été utilisée avec efficacité pour caractériser différents types de fonds marins (Lee *et al.*, 1999; Minghelli-Roman *et al.*, 2002; Mobley *et al.*, 2002; Petit *et al.*, 2017). Des études ont ainsi montré la faisabilité d'une cartographie des herbiers par imagerie hyperspectrale (Bargain, 2012 ; Bajjouk *et al.*, 2019).

3.4.3. LIDAR

Le LIDAR (LIght Detection And Ranging) est un système de mesure utilisant des ondes électromagnétiques situées dans le domaine optique (Populus, 2002). C'est une technique de télédétection active basée sur l'émission d'un faisceau laser (Figure 9). Elle se distingue ainsi des méthodes dites passives basées sur le rayonnement naturel telles que la photographie aérienne.

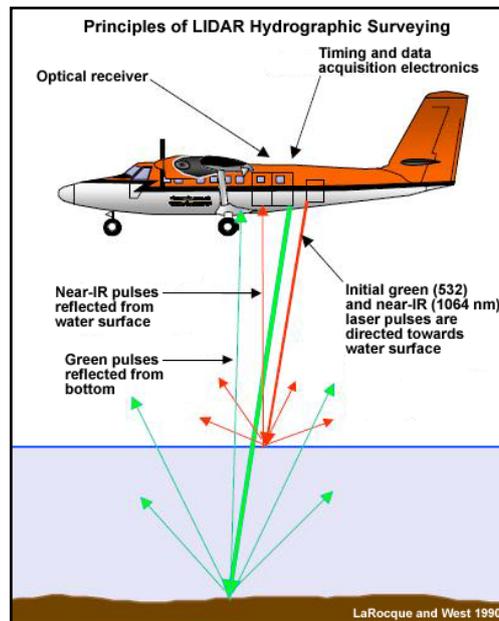


Figure 9.
Principe de fonctionnement du LIDAR bathymétrique.

Le concept du LIDAR est très proche de celui du radar, la seule différence étant la gamme de longueur d'onde utilisée. Au contraire du radar qui fonctionne en hyperfréquences, le LIDAR travaille à plus haute fréquence, dans le domaine optique, de l'ultraviolet au proche infrarouge avec des longueurs d'onde typiquement de l'ordre du micromètre.

De multiples systèmes LIDAR ont jusqu'à présent été développés mais tous consistent en l'association de trois instruments : un système à impulsion laser, un récepteur ou détecteur optique et un système d'acquisition. Le principe de fonctionnement en lui-même est simple (Figure 9) : l'appareil laser génère, à intervalles réguliers, une série d'impulsions lumineuses intenses (plusieurs mégawatts), modulées à une fréquence choisie en fonction de l'information recherchée. Ces impulsions sont émises en direction de l'objet d'étude, lequel peut être une surface solide, liquide ou gazeuse (sol nu, sol recouvert de végétation, glace, couche atmosphérique, mer, etc.). La cible est tout objet susceptible de réfléchir le signal.

L'utilisation du LIDAR pour l'étude du signal bathymétrique dans les milieux marins peu profonds a connu un grand développement. Il est capable de sonder à distance et sans perturbation les paramètres physiques du milieu, tels que la densité, la température, ainsi que la concentration d'un certain nombre de constituants, comme les algues. Plus récemment, le LIDAR a également été utilisé pour caractériser la distribution des herbiers soit en utilisant la topographie pour améliorer l'exploitation des levés optiques (Ex. orthorectification, correction de l'effet de l'eau) (Ishiguro *et al.*, 2016) ou encore en exploitant directement le signal forme d'onde pour identifier la présence des herbiers. Pan *et al.* (2014) ont montré qu'il existe une forte corrélation entre la présence de l'herbier et l'intensité du signal LIDAR.

3.4.4. Les vecteurs Drones

On trouve encore assez peu de publications mentionnant l'utilisation de drones légers pour la cartographie des herbiers de zostères mais leur intérêt a été démontré notamment pour la cartographie de la limite supérieure des herbiers de posidonies en Méditerranée et la détection des zones de perturbation anthropique au sein de ces herbiers (Ventura *et al.*, 2017). Outre la délimitation de l'herbier, la haute résolution des images permet également d'observer son hétérogénéité, sa fragmentation, et rend possible la détection de macroalgues ou de macrofaune (bivalves, monticules formés par les arénicoles) au sein de l'herbier (Duffy *et al.*, 2018).

Equipé d'une caméra et d'un GPS, le drone offre la possibilité de réaliser en quelques minutes un levé photographique très haute résolution sur des herbiers de quelques km² en zone intertidale ou de faible profondeur. Les photos sont ensuite orthorectifiées, géoréférencées et assemblées grâce à un logiciel dédié, pour créer une ortho-mosaïque (Figure 10).



Figure 10.

Extrait d'ortho-mosaïque (à gauche) sur un herbier de *Zostera noltei* dans le Golfe du Morbihan (Drone Phantom 4 Pro, altitude de vol : 5 m, durée de vol : 3 minutes). L'image de fond à gauche correspond à l'orthophotographie littorale et permet d'apprécier la différence de résolution entre les deux équipements. L'image de droite illustre une des photos de la mosaïque.

Aujourd'hui, les évolutions technologiques dans le domaine de la miniaturisation permettent de mettre en œuvre sur drone différents capteurs optiques aussi bien multi et hyperspectraux que du Lidar.

3.5. Télédétection acoustique

3.5.1. Echosondeur monofaisceau

Le sondeur monofaisceau est un sondeur acoustique qui permet à la fois de mesurer la hauteur d'eau et de détecter des cibles dans la colonne d'eau. Les sondeurs dits « split-beam » permettent en outre d'étalonner le niveau des échos reçus et d'effectuer des mesures quantitatives.

Largement exploité en halieutique pour la reconnaissance des bancs de poissons et l'évaluation des stocks (Certain *et al.*, 2011 ; Doray *et al.*, 2007 ; Simmonds *et al.*, 2005), son utilisation s'étend également à d'autres domaines : caractérisation du type de fond (Jordan *et al.*, 2005; Pouliquen and Lurton, 1994), détection du plancton (Lebourges-Dhaussy, 1996 ; Wiebe *et al.*, 1996), de panaches de bulles (Ostrovsky *et al.*, 2008) ou de la végétation (Noël *et al.*, 2009 ; Talec, 1999).

Son principe est le suivant : le sondeur émet une onde acoustique (ou ping) dans un cône à la verticale du navire (Figure 11). Chaque cible rencontrée (fond, poisson, herbier, etc.) située dans ce cône réfléchit une partie du signal acoustique vers le sondeur (Lurton, 1998). L'intensité du signal réfléchi dépend directement de la proportion d'intensité acoustique que la cible rétro-diffuse par rapport à celle qu'elle a reçue (index de réflexion ou Target Strength) et diffère suivant le réflecteur. La distance entre le sondeur et la cible est déterminée en utilisant le temps de trajet aller-retour de l'onde acoustique.

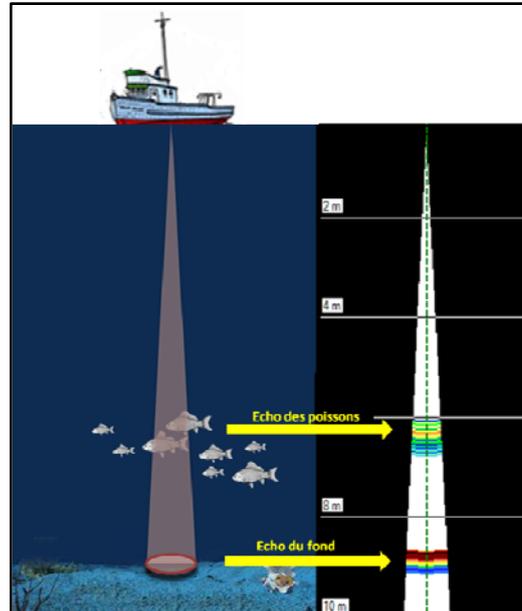


Figure 11.
Principe de fonctionnement du sondeur monofaisceau et réponse acoustique associée

En juxtaposant les signaux rétrodiffusés à chaque émission acoustique, on obtient une coupe du profil du fond et de la colonne d'eau appelée échogramme. L'intensité de l'écho y est représentée par un dégradé de couleur, de bleu pour un signal faible à rouge pour un signal fort (Figure 12).

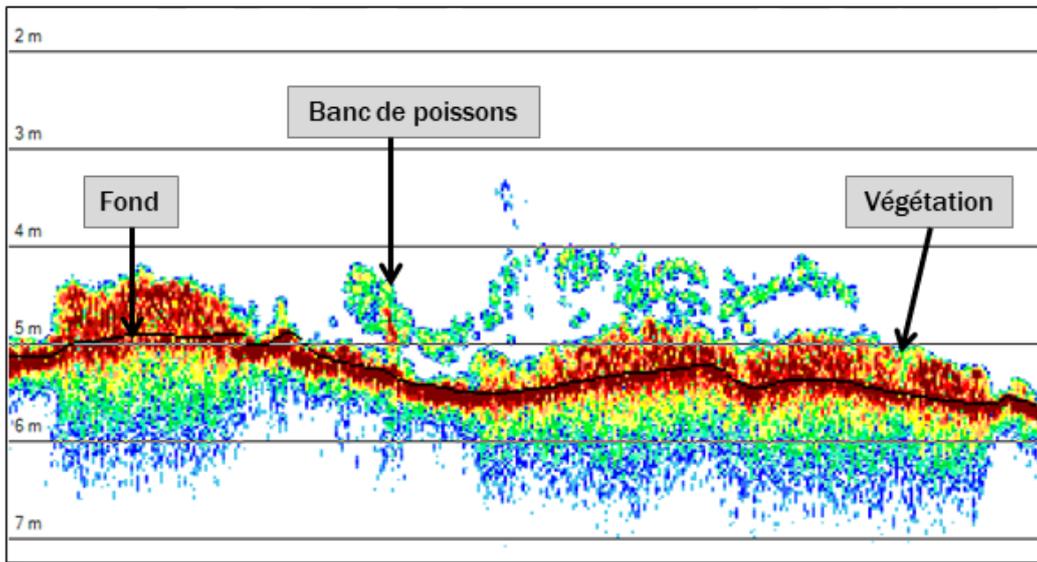


Figure 12.
Exemple d'échogramme obtenu avec un sondeur monofaisceau

La résolution du sondeur dépend de son ouverture angulaire et de la durée d'impulsion du signal acoustique. Une ouverture angulaire plus faible (donc une empreinte sur le fond plus faible) et une impulsion plus courte augmenteront la résolution du sondeur mais réduiront sa portée.

Si l'on souhaite exploiter quantitativement la mesure acoustique (le niveau de l'écho réfléchi, c'est-à-dire l'index de réflexion de la cible) le sondeur monofaisceau doit être étalonné dans les conditions d'environnement de la campagne avec une sphère étalon (Demer *et al.*, 2015).

Le sondeur monofaisceau peut être couplé à un Système Acoustique de Classification Automatique des Fonds (SACLAF). Ces systèmes analysent les caractéristiques du signal acoustique pour classifier la nature du fond. Plusieurs d'entre eux ont prouvé leur efficacité pour la cartographie de la végétation : Roxann (Chevillon, 2001; Mielck *et al.*, 2014), QTC View (Hutin *et al.*, 2005 ; Riegl *et al.*, 2005), Diva (Noël *et al.*, 2009).

3.5.2. Sonar latéral

Le sonar latéral permet d'obtenir une image acoustique des fonds marins. D'abord utilisé à des fins militaires (détection de mines, etc.), son utilisation s'est progressivement développée en sédimentologie puis pour la cartographie des biocénoses telles que les herbiers de posidonies (Piazzini *et al.*, 2000) ou de zostères (Lefebvre *et al.*, 2009; Trut *et al.*, 2018), les bancs de crépidules (Blanchard *et al.*, 2006; Sauriau *et al.*, 1998). Il a également été utilisé pour la cartographie d'habitats notamment dans le cadre du REBENT (Ehrhold *et al.*, 2007).

Son principe est le suivant : le sonar émet une onde acoustique brève dans un faisceau très fin longitudinalement et large transversalement (Figure 13). La surface insonifiée couvre une bande qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres de part et d'autre du sonar.

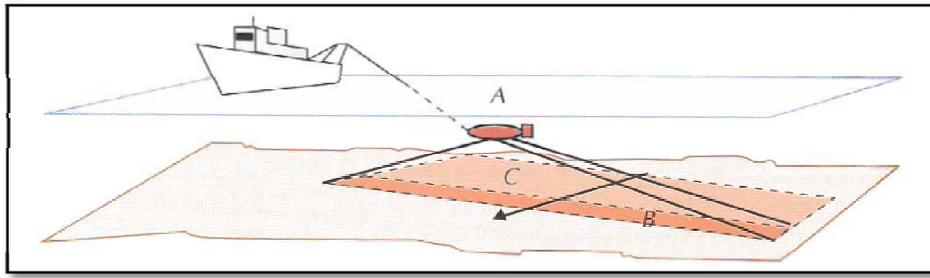


Figure 13.

Mise en œuvre du sonar latéral – A : sondeur remorqué – B : surface insonifiée instantanée – C : surface couverte par les émissions précédentes (Lurton, 1998)

Le signal acoustique émis se déplace d'abord dans l'eau (Figure 14-A) puis atteint le fond. On observe alors un écho très intense (Figure 14-B). L'onde acoustique continue sa propagation progressivement sur toute la portée du sonar. Le niveau du signal dépendra alors de la nature du substrat, des irrégularités du fond (rides, etc.) ou des obstacles rencontrés (Figure 14-C à G).

Les signaux enregistrés sont juxtaposés ligne après ligne pour obtenir une image acoustique appelée sonogramme, représentant en niveau de gris l'énergie rétrodiffusée par le fond. Ces images seront ensuite géoréférencées et assemblées pour constituer une mosaïque sonar (Figure 15).

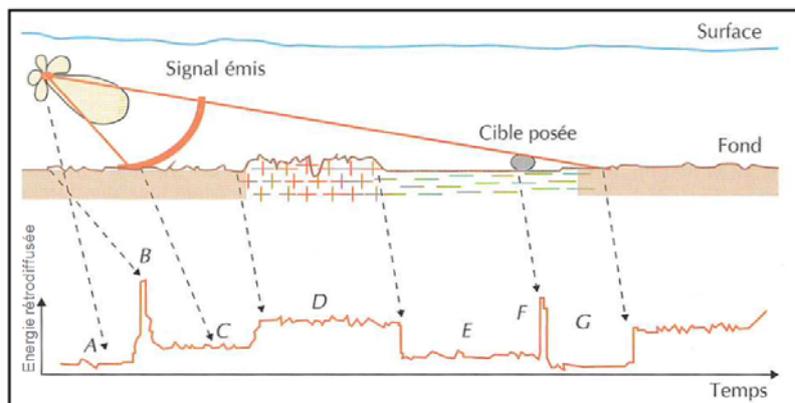


Figure 14.

Génération de l'écho d'un sonar latéral – A : bruit et réverbération dans l'eau – B : premier écho de fond – C : zone de sable – D : roche – E : vase – F : écho de cible – G : ombre portée par la cible (modifiée d'après Lurton, 1998)

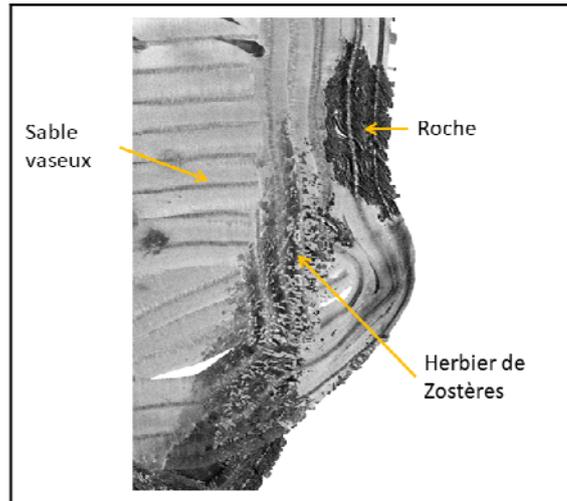


Figure 15.
Extrait de mosaïque sonar dans la baie de Camaret , Finistère (Pluquet and Ehrhold, 2009)

Le sonar est en général remorqué près du fond ce qui lui procure une meilleure stabilité, un bruit moindre et permet d'obtenir des images de qualité supérieure due à une incidence plus rasante de l'onde acoustique. Il existe également des modèles encastrés dans la coque du navire. Dans ce cas, le positionnement des données sera plus précis et la navigation sera facilitée en particulier dans les zones de très petits fonds où la navigation avec un engin remorqué peut s'avérer délicate.

3.6. Les acquisitions des données *in situ*

Les chapitres précédents ont montré qu'il est possible de cartographier par télédétection les herbiers de Zostères. La collecte de données *in situ* reste cependant un élément indispensable à la calibration et à la validation des traitements appliqués.

Les techniques de mesure *in situ* sont variées et doivent être adaptées aux moyens disponibles ainsi qu'à la configuration de l'herbier, notamment à sa localisation en zone intertidale ou subtidale. Les moyens d'acquisition peuvent être déployés (i) à terre (avec des prélèvements ou mesures sur quadrat réalisés à pied), (ii) en mer (plongée, lunette de Calfat, vidéo tractée ou photo sous-marine) ou par observations aéroportées (vol drone à basse altitude) tel que décrit ci-dessous :

|Quadrats



L'utilisation des quadrats permet de fournir des éléments quantitatifs sur l'abondance des espèces.

Certains paramètres biologiques peuvent être mesurés *in situ* (taux de recouvrement, densité des zostères marines) ; d'autres ne pourront être mesurés qu'au laboratoire (densité des zostères naines, longueur et largeur des feuilles, biomasse).



En intertidal, ces mesures ou prélèvements sont effectués à pied lors des marées basses de vives-eaux. En zone subtidale, ces opérations sont effectuées par des plongeurs autonomes.

| Vidéo



Les données sont en général acquises par un système tracté léger avec de préférence un retour vidéo en surface. A défaut, des dispositifs avec caméra fixée sur une perche peuvent également être envisagés si la profondeur n'est pas trop importante.

| Lunette de Calfat



La « lunette de Calfat » est utilisée depuis la surface, pour regarder sous l'eau en éliminant les reflets et la réfraction de la lumière sur l'interface eau/air. C'est un outil très pratique et performant dans les eaux claires notamment pour valider la présence ou l'absence de l'herbier.

| Radiométrie



Les mesures radiométriques sont réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre portable. Associé à un spectralon pour l'étalonnage, ce matériel permet d'acquérir les signatures spectrales en réflectance de différentes cibles d'intérêt (zostères seules, en mélange, immergées, etc.). Outre la normalisation des données radiométriques, le spectralon permet également de s'assurer de la qualité des conditions lumineuses lors de la mesure. Les données de radiométrie *in situ* peuvent également être acquises en zone subtidale grâce à des spectro-radiomètres submersibles.

| Drone

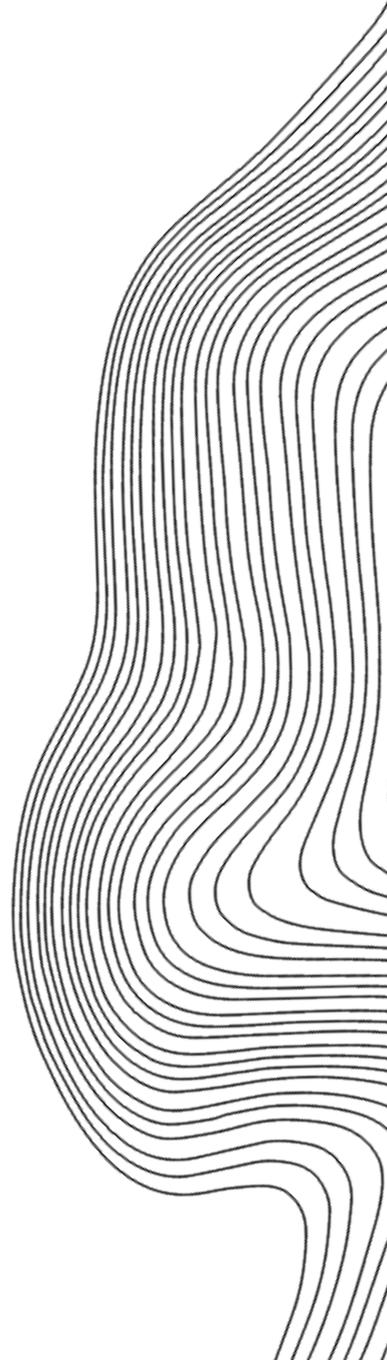


Le drone permet de confirmer la présence ou l'absence d'herbier sur des zones intertidales difficilement accessibles à pied (vasières) ou sur les zones de faible profondeur.

A très fine résolution, il est également possible de distinguer des espèces et estimer la densité et la fragmentation de l'herbier.

CAPTEURS OPTIQUES & ACOUSTIQUES

ANALYSE COMPARATIVE



4. Analyse comparative des capacités des capteurs

4.1. Cas d'utilisation

Pour illustrer le potentiel des différents capteurs utilisés pour la cartographie des herbiers et l'extraction de métriques relatives à « extension de l'herbier », une étude comparative de la capacité technique de l'outil imagerie (optique et acoustique) a été entreprise. Cette démarche apparaît d'importance pour guider les choix technologiques relatifs aux prochaines cartographies et ceci dans un cadre opérationnel.

En effet, l'Ifremer dispose d'un jeu de données multi-capteurs, ainsi que des données d'observations *in situ*, acquis sur la masse d'eau Golfe du Morbihan dans le cadre du Rebet Bretagne (**Figure 16**). Il s'agit :

- de levés optiques (orthophoto, image Pleiade multi spectrale et hyperspectrale) et acoustique (sonar lateral et sondeur monofaisceau) ;
- des observations *in situ* (vidéo, radiométrie, et échantillonnage *in situ* de taux de recouvrement/densité des herbiers) ;

Pour les besoins d'analyse comparative, les traitements ont été prioritairement appliqués au secteur est du golfe du Morbihan, zone dans laquelle les deux espèces de zostères (*Z. noltei* et *Z. marina*) sont abondantes, dans différentes configurations intertidale et subtidale. La **Figure 16** montre la localisation des zones utilisées pour illustrer les résultats d'analyse.

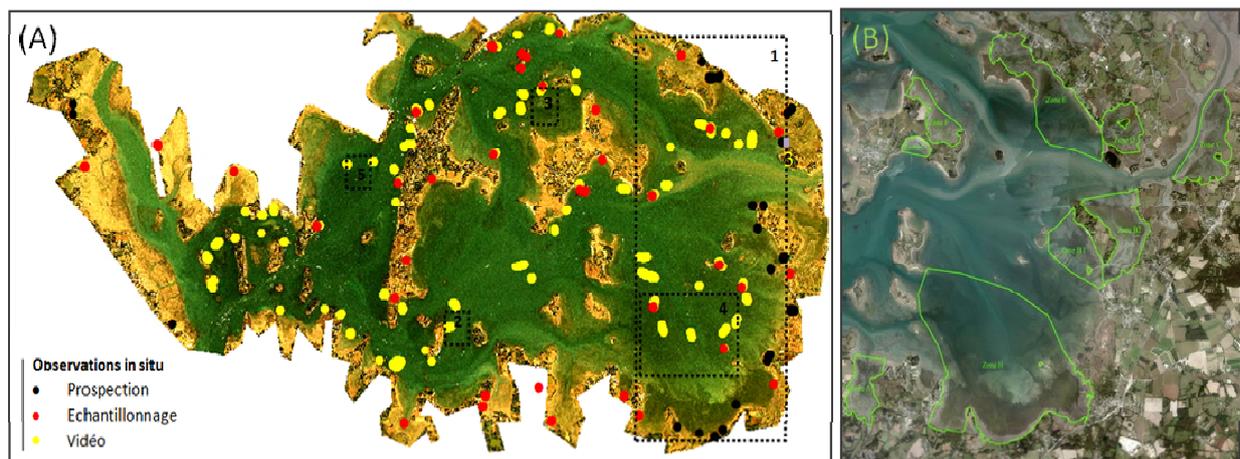


Figure 16.

Localisation de la zone d'étude (Golfe du Morbihan). Les emprises définissent les zooms utilisés pour illustrer les différents résultats de traitement pour les données hyperspectrales et acoustiques (A) et pour les photographies aériennes (B).

Les données d'observation ont été utilisées pour valider la présence ou l'absence des herbiers. Pour *Z. marina*, des matrices de confusion ont pu être générées grâce à un nombre de points suffisant (environ 900 en zone subtidale grâce au déploiement de la vidéo). En zone intertidale, seule une validation qualitative, basée sur les connaissances du site et la comparaison visuelle avec les quelques points d'observation disponibles sur la zone traitée, a pu être réalisée. En effet, les 15 points d'observation intertidale sur la zone 1 de la **Figure 16** (9 stations de présence et 6 d'absence d'herbiers) ne permettent pas une validation statistique robuste pour *Z. noltei*.

4.1.1. Photographie aérienne

| Acquisition de données

Dans le cadre de la constitution des Ortholittorales V2, menée par le Ministère en charge de l'environnement avec l'appui du Cerema¹, le survol du Golfe a eu lieu le 29 septembre 2011. Les mosaïques géoréférencées produites sont disponibles gratuitement en RVB et IRC à la résolution spatiale de 50 cm.

Les valeurs des pixels de ces images n'ont pas été normalisées. Ainsi, les variations des conditions environnementales d'une image à l'autre se traduisent par des discontinuités spectrales bien visibles sur la mosaïque (**Figure 17**).

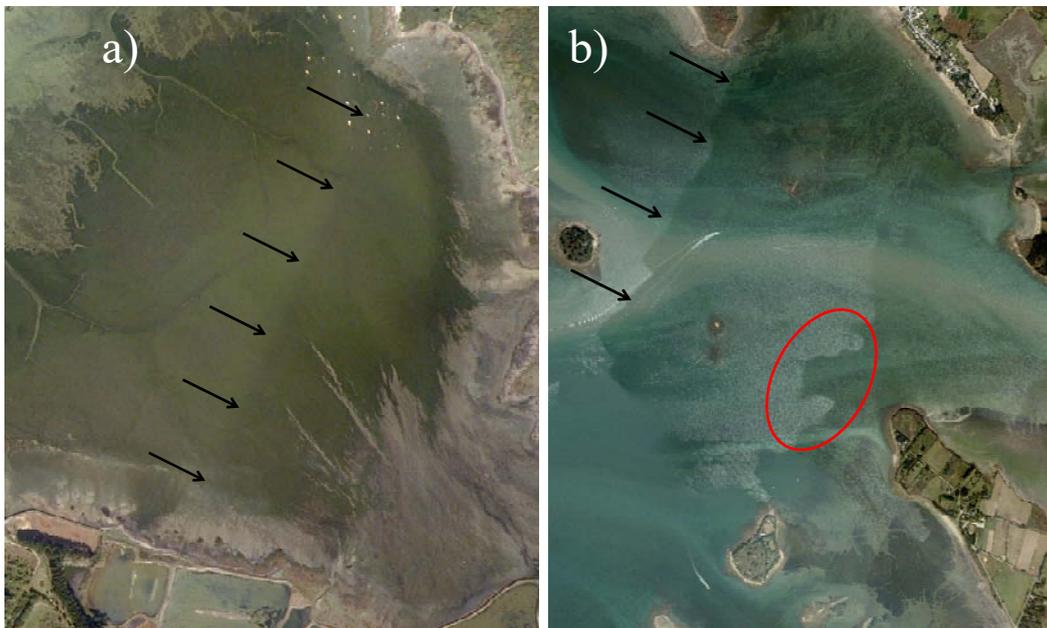


Figure 17. Ortholittorales V2 dans la zone du Golfe du Morbihan. A) et B), discontinuité spectrale à la frontière entre deux images à l'extrémité des flèches noires. B) présence/absence de réflexions spéculaires dans le cercle rouge à la frontière entre deux images. Fond de carte : Ortho Littorale V2 – MEDDE.

¹ <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/orthophotographie-du-littoral-r181.html>

| Principe de traitement

Le traitement s'est appuyé sur une méthode développée par le Centre d'Étude et de Valorisation des Algues (CEVA) pour la cartographie des schorres à partir des Ortholittorales V2 (Liabot, 2019). Les essais d'adaptation de cette méthode au contexte des herbiers ont été réalisés à travers l'étude de 9 sites (voir localisation en [Figure 16](#)). Peu d'observation *in situ* étant disponibles à une date proche de celle des acquisitions des images, l'étude s'est essentiellement basée sur de la photo interprétation.

La méthode proposée permet de visualiser les mosaïques dans une interface graphique qui propose à l'utilisateur un jeu de curseurs faisant varier des seuils sur différents indicateurs de végétation. Le choix de seuils entraîne une classification de l'image dont le résultat apparaît quasi instantanément à l'écran. L'utilisateur fait varier les seuils jusqu'à l'obtention de résultats convaincants. Cette méthode est donc une assistance à la photo interprétation.

| Principaux résultats

Seul le traitement de l'herbier sud-est (zone 1) est détaillé ici car représentatif de l'ensemble des difficultés rencontrées dans l'étude. Au sud, l'herbier est émergé et colonisé ou non par des algues vertes (observations du CEVA). Au nord, les herbiers sont immergés. La présence éventuelle d'autres algues sur l'ensemble de la zone n'est pas connue.

La méthode utilisée n'étant pas prévue pour gérer les discontinuités spectrales, un redécoupage de la zone en sous-zones d'aspect homogène a été nécessaire. Les dix sous-zones délimitées ont ensuite été traitées séparément (voir résultats en [Figure 18](#)). Pour la portion la plus au sud de l'herbier, la qualité du traitement est évaluée par photo interprétation et la connaissance générale du site. Pour la portion immergée au nord, des mesures acoustiques sont disponibles (voir partie 4.1.4).

Au sud, la discrimination de l'herbier avec les algues vertes semble globalement bonne à l'instar de la zone D. En revanche, à l'est en zone C, la photo interprétation des images et la connaissance du terrain laissent penser que les zostères sont absentes en sortie du cours d'eau venant du sud-est alors que des herbiers y sont détectés. Il s'agit donc probablement d'une sur-détection relativement importante par rapport à la taille de l'herbier.

La discrimination de *Z. marina* en zone immergée semble plus hasardeuse que celle de *Z. noltei* située plus haut sur l'estran. En comparant les résultats obtenus avec la cartographie issue du traitement des données acoustiques, il ressort des sur-détections mais aussi des sous-détections des zostères. C'est, par exemple, le cas en B où l'herbier a été largement sous-estimé et à l'inverse, en A où il a été surestimé. L'exemple de la zone A souligne également l'incapacité de la méthode utilisée à obtenir des résultats homogènes sur deux zones contiguës traitées séparément. Ainsi, une nette discontinuité dans les résultats apparaît en A entre les sous-zones est et ouest.

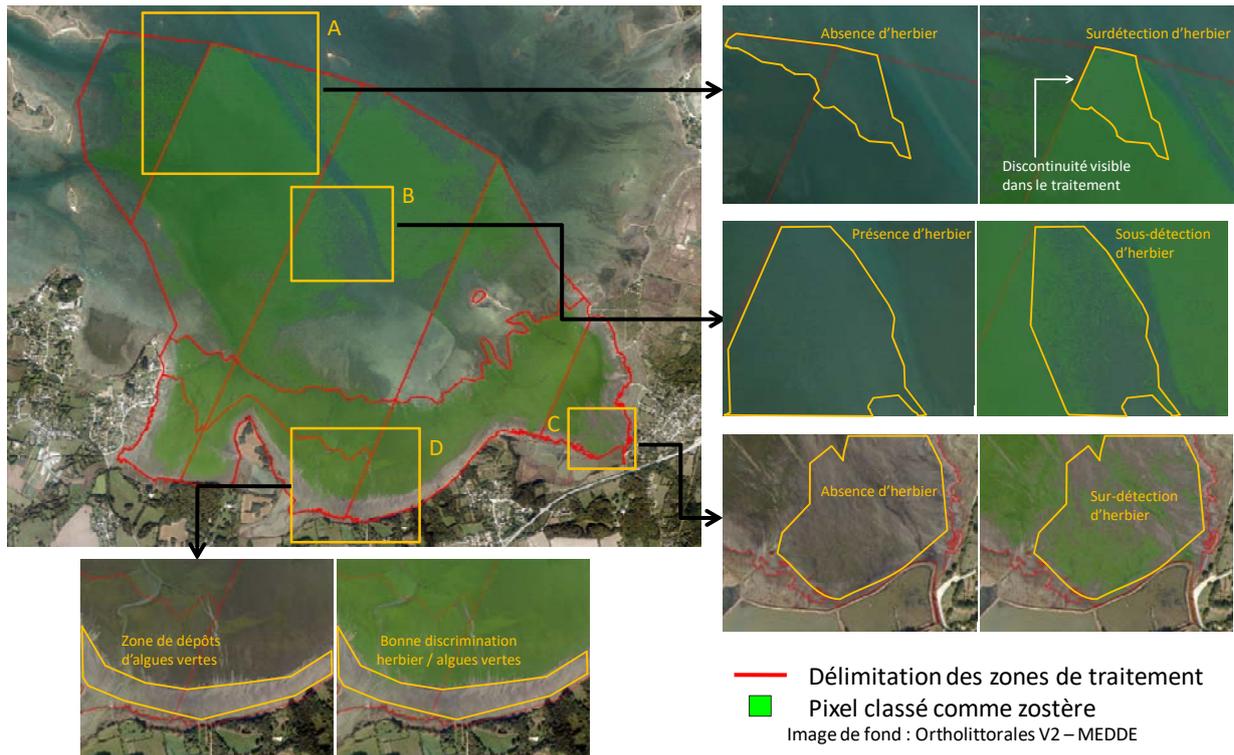


Figure 18.

Résultats obtenus pour le traitement de la zone H et détail des zones A, B, C et D. Pour chaque zoom, les polygone jaunes sur les imagettes de gauche correspondent à la vérité terrain et à droite les résultats des traitements.

| Intérêt et limites

Les Ortholittorales V2 présentent l'avantage d'être disponibles gratuitement sur l'ensemble du littoral français et avec une importante résolution spatiale. Toutefois, l'acquisition de cette donnée est programmée sur un cycle supérieur à celui de l'évaluation DCE (6 ans). Les ortholittorales ne permettent donc pas de répondre efficacement à cette directive.

L'acquisition des données *in situ* nécessaires à la validation des traitements paraît difficile à mettre en place puisque les dates des vols ne sont pas décidées par les organismes en charge des observations.

La qualité des traitements reposant essentiellement sur de la photo-interprétation, la reproductibilité des résultats est moins bonne que celle qui pourrait être attendue pour des traitements automatisés.

La nature hétérogène de la donnée (assemblage d'images prises dans différentes conditions environnementales et valeurs des canaux RVB et PIR non normalisées) requière de traiter séparément les différentes régions de l'image. Ce procédé conduit à des discontinuités parfois importantes dans les résultats obtenus. Par ailleurs, la présence éventuelle de nuages et de matières en suspension participe à limiter la précision des résultats.

Le travail sur les neuf zones d'étude a montré les limites de la photo-interprétation en particulier pour les herbiers peu denses et en mélange (algues vertes, gracilaires, etc.). Cette difficulté est caractéristique du Golfe du Morbihan qui est un site riche en diversité algale.

Cela ne remet pas en cause le potentiel des images aériennes pour la cartographie des herbiers pour des sites moins complexes. Par exemple, Beguet *et al.*, (2018) ont obtenu des résultats prometteurs sur les herbiers du Cotentin avec une approche de type machine learning basée sur l'apprentissage de données obtenues par photo interprétation. La reconnaissance des herbiers ainsi que la finesse de leur détourage (supérieure à la saisie manuelle) sont particulièrement probantes (Figure 19).

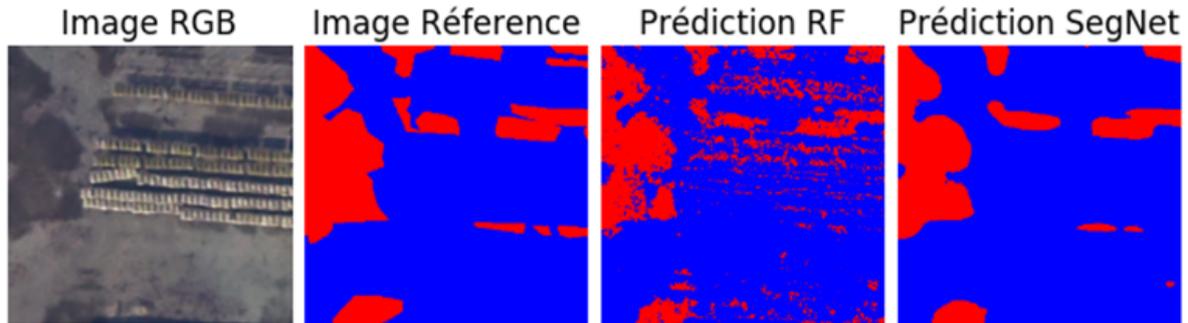


Figure 19.

Comparaison des résultats de classification, de gauche à droite : image RGB, classification de référence obtenue par photo-interprétation, résultat de la prédiction par RandomForest et enfin, le résultat de la prédiction SegNet (algorithme de deep learning) d'après Beguet *et al.*, 2018.

Il est à noter qu'au sein d'un même jeu d'Ortholittorales, la difficulté à interpréter la présence d'herbiers s'apprécie différemment d'un site à l'autre. C'est ce qu'illustre la Figure 20 pour les Ortholittorales V2 où, pour une échelle d'observation donnée, les herbiers paraissent plus facilement interprétables pour le site des Glénan que pour le site du Golfe du Morbihan. C'est d'autant plus visible pour les herbiers les plus profonds (au nord sur la photo du Golfe). Au-delà de l'épaisseur de la colonne d'eau, la difficulté de la photo interprétation s'explique notamment par la nature du fond (clair ou sombre), la transparence de l'eau et les conditions d'acquisition.



Figure 20.

Extraits des Ortholittorales V2 aux Glénan (à gauche) et dans le Golfe du Morbihan (à droite) à une même échelle de représentation. Les images n'ont pas fait l'objet d'ajustement du contraste ou de la luminosité.

4.1.2. Imagerie Pléiades

|Acquisition de données

La zone du Golfe du Morbihan a été imagée par le satellite Pléiades 1B le 22 septembre 2013. Avant la livraison des données à l'utilisateur, un affinage panchromatique a été réalisé. L'image présentée en **Figure 21** ci-après possède les quatre canaux R, V, B et PIR et une résolution spatiale de 50 cm. Dans la présente étude, seule la portion est de la zone du Golfe a été exploitée (zone 1).

L'heure de l'acquisition correspond à l'horaire de basse mer dans la partie Ouest du Golfe. L'onde de marée nécessitant environ 2 heures pour traverser le site, le niveau d'eau à l'est est en avance sur la basse mer. Il est à noter la présence de matières en suspension et de réflexions spéculaires.

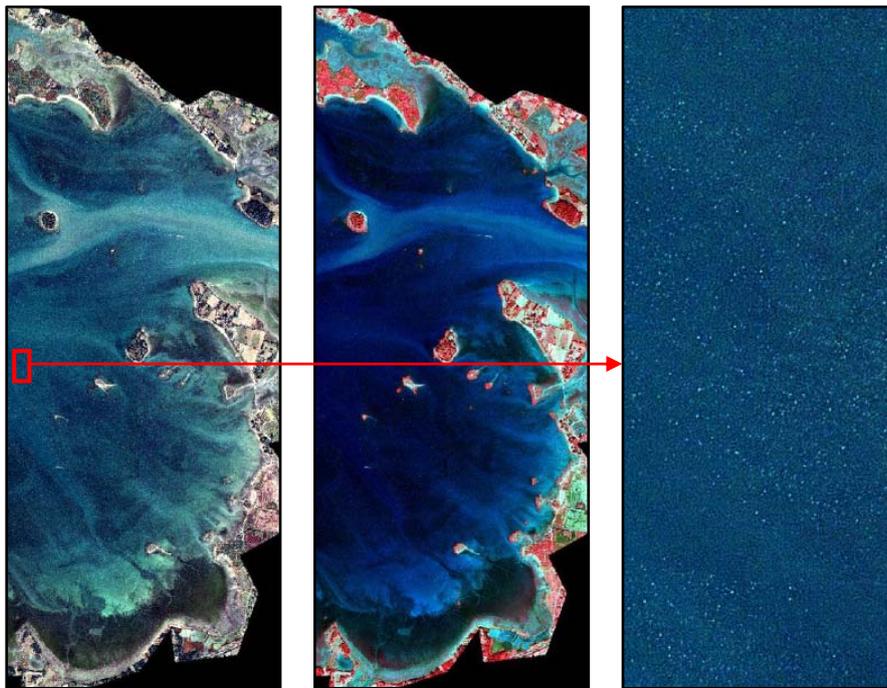


Figure 21.

Visualisation de l'image Pléiades sur la zone est du Golfe du Morbihan en couleurs vraies à gauche et en composition colorée (PIR, R, V) au centre. L'image de droite est une vue détaillée de l'image en couleurs vraies. Elle illustre la présence de réflexions spéculaires (points blancs).

|Principe de traitement

L'image a été traitée par une méthode de deep learning basée sur une régression logistique multinomiale (softmax regression²) et une descente de gradient. Les données d'entrées du modèle concernent (i) les 4 canaux de l'image convertis en réflectance au sommet de

² http://ufldl.stanford.edu/wiki/index.php/Softmax_Regression

l'atmosphère, (ii) un indicateur de végétation NDVI³ et (iii) la bathymétrie (produit Litto3d⁴ à 50 cm de résolution spatiale) et ses dérivées (rugosité et pente). La base d'apprentissage exploitée a été établie en fonction des connaissances disponibles (observations de terrain, connaissance générale du site et traitement des données acoustique sous-marines) et à partir de la photo interprétation de l'image.

| Principaux résultats

La classification obtenue est présentée en **Figure 23** ci-après. En zone subtidale, la qualité du traitement a été évaluée sur les observations présentées en **Figure 16**. La matrice de confusion (**Figure 22**), indique que 69 % des pixels de *Z. marina* ont été correctement classés.

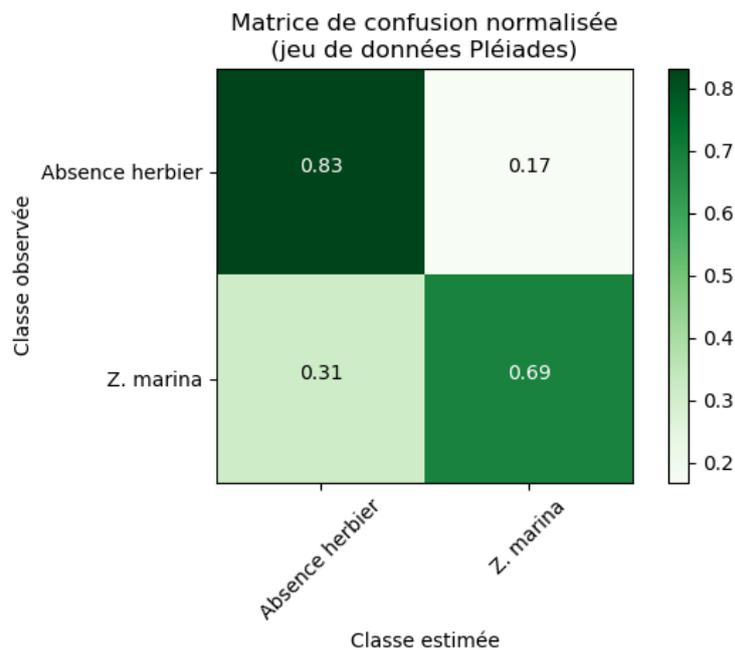


Figure 22.

Matrice de confusion normalisée pour l'évaluation du traitement de l'image Pléiades

Les observations de *Z. noltei* en zone intertidale au nombre 9 ne permettent pas une évaluation similaire. Cependant, les résultats de classification semblent très cohérents avec la connaissance générale du site, ce qui laisse à penser que l'algorithme utilisé serait plus précis en milieu intertidal qu'en milieu subtidal. Cette différence peut s'expliquer notamment par la moindre énergie du signal reçu pour *Z. marina* qui se situe à des profondeurs plus importantes que *Z. noltei* et parfois dans des zones de turbidité plus élevée.

Cette dernière observation est toutefois à nuancer par une faiblesse du modèle au pourtour des zones de fucales où des herbiers semblent sur-détectés. C'est aussi le cas pour quelques chenaux et extrémités de zones de schorres au nord-est du Golfe.

³ <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/fr/dossiers/eau/vegetation.html>

⁴ <https://diffusion.shom.fr/pro/risques/l3d-mar-morbihan-2015.html>

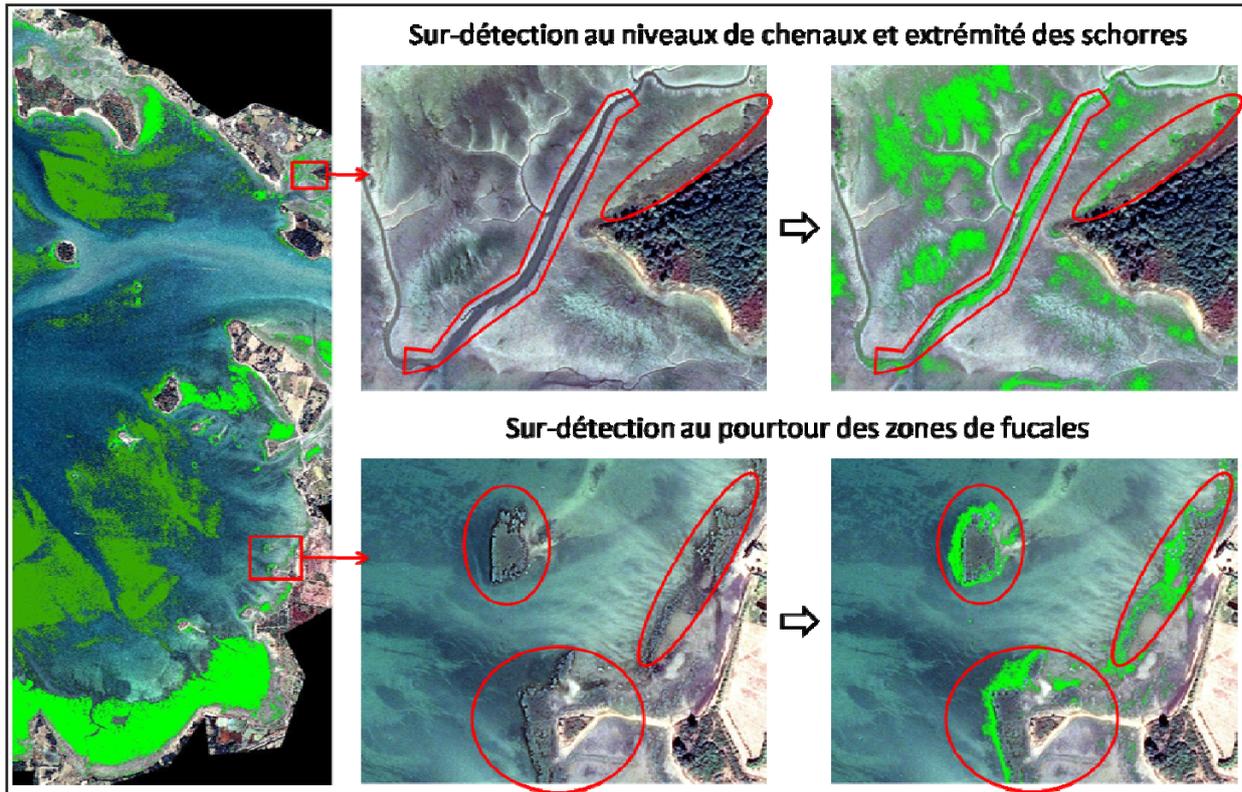


Figure 23.

Résultat du traitement de l'image Pléiades et détail de zones de sur-détection du modèle non prises en compte par la validation

| Intérêt et limites

Les satellites de la constellation Pléiades permettent d'imager de grandes étendues avec une bonne résolution spatiale et un coût nul pour les utilisateurs institutionnels (scientifiques, collectivités, etc.). Par ailleurs, grâce à sa capacité de dépointage (possibilité de modifier l'orientation de l'axe de prise de vue) et à sa fréquence de revisite élevée, ce capteur offre une certaine flexibilité par rapport à d'autres satellites, ce qui minimise les contraintes d'acquisition (liées à la météorologie et au niveau de marée notamment).

L'approche testée montre un fort potentiel de détection des herbiers les plus hauts sur l'estran, même si ceux-ci sont partiellement immergés, et cela sur une zone pourtant complexe du point de vue de la diversité algale. L'algorithme employé exploite par ailleurs une base d'apprentissage qui pourrait être mise à jour lors de l'acquisition de nouvelles données. Son potentiel de classification pourrait donc s'améliorer.

Si le décalage de marée ne permet pas d'acquérir, au cours du même passage, toutes les images avec une hauteur d'eau optimale (cas spécifique du Golfe du Morbihan), plusieurs acquisitions décalées dans le temps permettraient de contourner cette difficulté.

4.1.3. Imagerie Hyperspectrale

| Acquisition de données

Une campagne d'acquisition aéroportée des images hyperspectrales a été réalisée sur le Golfe du Morbihan le 20 août 2013 couvrant une superficie totale de 111,7 km². Le capteur hyperspectral utilisé est le AISA Eagle 1K qui a permis d'enregistrer des informations spectrales sur la plage [400nm ; 970nm], avec une résolution spatiale de 80 cm et une résolution spectrale de 5 nm avec au total 126 canaux (Figure 24.).

Le plan de vol a été élaboré en retenant un chevauchement maximal de 35 %. 38 axes ont été programmés en suivant la progression de la basse mer d'ouest en est pour tenir compte de l'écart de marée important sur ce site (environ 2 heures entre l'est et l'ouest).



Figure 24.

Visualisation en couleurs vraies (à gauche) et composition colorée PIR, R, V (à droite) des images hyperspectrales acquises sur le site du Golfe du Morbihan

| Principe de traitement

Plusieurs opérations ont été nécessaires préalablement à l'utilisation des images pour les différents traitements développés en vue de l'extraction des informations sur la distribution des herbiers. Il s'agit principalement d'orthorectification générant des images géolocalisées dans le référentiel Lambert 93. Des corrections des effets de l'atmosphère ont par la suite été

appliquées en utilisant le logiciel ATCOR à chaque ligne de vol dans le but d'obtenir des images en réflectance au-dessus de la surface de l'eau. Les levés étant réalisés dans des conditions environnementales favorisant un état de surface plat (vent très faible), il n'a pas été jugé nécessaire d'appliquer une correction des réflexions spéculaires.

Les images hyperspectrales ont également été corrigées des perturbations du signal dues à la présence de l'eau. Ce traitement est basé sur l'équation d'atténuation du signal simplifiée du modèle de Lee (Lee *et al.*, 1998).

Plusieurs méthodes de classification ont été testées pour délimiter automatiquement des herbiers de zostères à partir de l'image hyperspectrale. Les approches de type « Deep learning » ont montré de meilleurs résultats que les autres méthodes de classification (Figure 25. gauche) L'outil de classification appliqué peut évoluer en s'enrichissant de nouvelles données d'entrée qui viendront parfaire les connaissances et optimiser les résultats de classification des herbiers.

L'application d'un modèle de mélange linéaire combinée à une librairie spectrale des principales composantes du fond, a permis de produire des cartes d'abondance des deux espèces d'herbiers de zostères, *Z. marina* et *Z. noltei* (Figure 25. droite).

| Principaux résultats

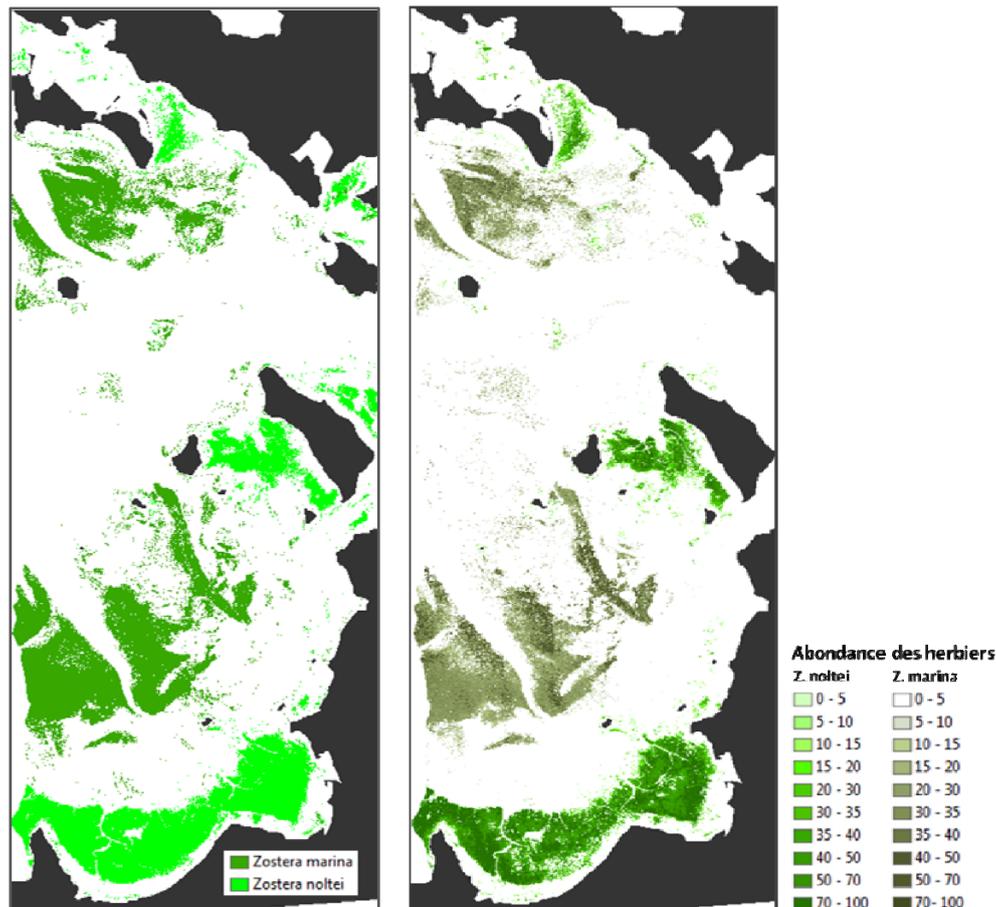


Figure 25.

Résultats de traitement des images hyperspectrales (Figure 16 Zone 1) acquises sur le site du Golfe du Morbihan en zone intertidale : classification (à gauche) et abondance des herbiers (à droite)

La qualité du traitement a été évaluée sur le jeu de données de validation présenté en partie 4.1. La matrice de confusion obtenue est présentée en figure ci-dessous.

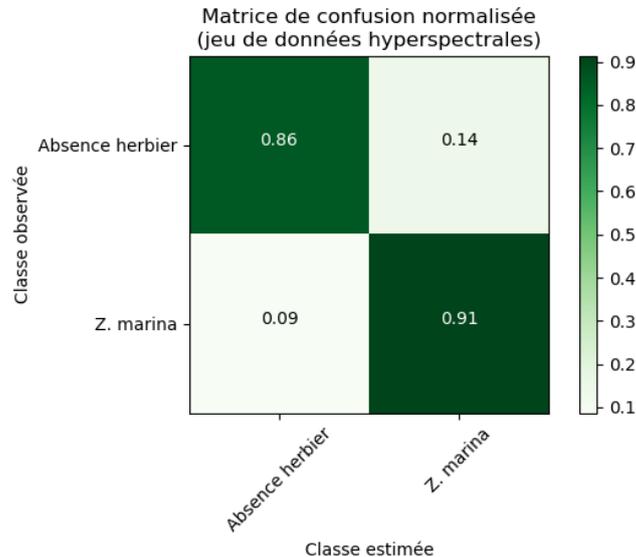


Figure 26.

Matrice de confusion normalisée pour l'évaluation du traitement de l'image hyperspectrale établie pour la zone 1 de la Figure 16.

Les herbiers de zostère marine montrent une précision de détection sur ce secteur de 91 %. Le nombre de points de validation utilisés en zone subtidale (924 points vidéo) est bien représentatif et confirme la détection très performante des herbiers de zostères marine en zone submergée par le capteur hyperspectral, malgré la présence de l'eau.

Pour la zostère naine en zone intertidale, les 9 points de présence et 6 points d'absence relevés sur le terrain, ne sont pas suffisants pour une validation statistique robuste. Ils donnent toutefois des indications sur la cohérence des résultats obtenus. Seulement 2 points de présence n'ont pas été détectés. Les informations collectées *in situ* montrent toutefois qu'il s'agit d'un herbier couvert par une couche de macroalgues. C'est ce qui explique sa non identification par l'algorithme de classification utilisé.

| Intérêt et limites

Les résultats obtenus pour le site du Morbihan confirment que cette technique présente moins d'erreurs que Pléiades pour la détection des deux espèces de zostères, zostère naine et zostère marine y compris en zone immergée. Ceci s'explique par sa grande résolution spectrale (nombre et largeur des bandes) qui permet d'améliorer la discrimination entre les différentes espèces de végétation marine. Il a également été montré le potentiel de ce type de capteur à produire des cartes de distribution de l'abondance des phanérogames pour les deux espèces de zostères.

On peut également souligner les possibilités qu'offrent ces capteurs aéroportés pour le choix de la configuration d'acquisition (résolution spatiale et spectrale) en fonction de l'objectif de l'étude.

L'usage des capteurs hyperspectraux présente cependant certaines difficultés pour un usage opérationnel. Au-delà des contraintes d'acquisition connues pour les capteurs optiques et qui sont liées à la présence des nuages, à la réflexion des rayons lumineux à la surface de l'eau et à la pénétration du signal pour des eaux turbides et profondes (3-20 m), l'imagerie hyperspectrale a également un coût d'acquisition au km² plus cher que d'autres capteurs optiques et notamment pour couvrir de grandes zones d'étude. La complexité et le volume de données ainsi que l'absence d'outils d'exploitation opérationnels utilisables par les non spécialistes, présente aujourd'hui le principal frein pour son utilisation en mode à large échelle.

4.1.4. Imagerie sonar latéral

| Acquisition de données

La campagne d'acquisition nommée Zostera-Acoustique s'est déroulée du 27 août au 10 septembre 2013 (11 jours d'acquisition) sur la vedette océanographique HALIOTIS (Ifremer). Seule une partie de cette campagne a été dédiée à la cartographie des herbiers. La seconde partie a été consacrée à l'acquisition de données bathymétriques dans des zones plus profondes où la présence d'herbier est peu probable.

Le sonar mis en œuvre est un sonar interférométrique de coque Geoswath (Kongsberg Geoacoustics) d'une fréquence de 250 kHz.

L'utilisation de l'interférométrie permet au sonar de fournir à la fois des mesures d'imagerie (réflectivité) et de bathymétrie (profondeur). La portée exploitable raisonnablement pour ce sonar est de 10 fois la profondeur pour l'imagerie contre 6 fois la profondeur pour la bathymétrie (Genavir, 2017).

Dans la mesure du possible, les herbiers ont été cartographiés avec une couverture exhaustive en imagerie sonar sauf pour les herbiers situés à l'Est du Golfe. Leur superficie importante aurait entraîné un trop gros effort en temps d'acquisition. L'acquisition a été faite à une vitesse moyenne de 5 nœuds pour une surface totale couverte d'environ 20 km² (Figure 27).

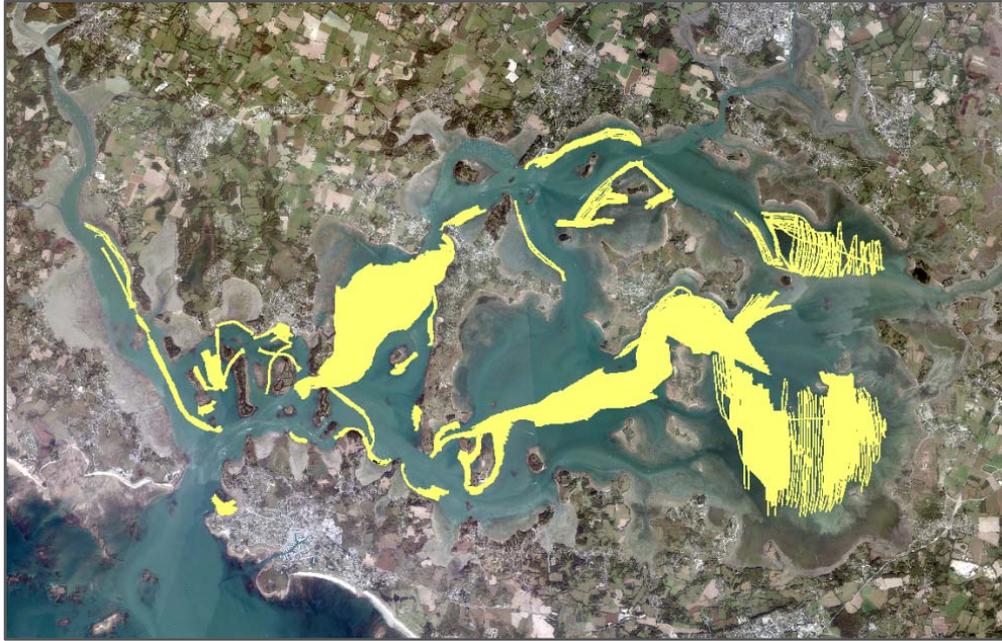


Figure 27.
Couverture du levé acoustique (en jaune) sur fond d'orthophotos littorale -
Campagne Zostera-Acoustique

| Principe de traitement

L'imagerie sonar a été traitée avec le logiciel Sonarscope (©IFREMER). Les données brutes sont filtrées de manière semi-automatique puis subissent des corrections visant à réduire les artefacts propres à la mesure (variation du niveau moyen due à la réponse angulaire du fond, influence du diagramme de directivité des antennes). Les données de réflectivité en sortent uniformisées sur toute la largeur de la fauchée du sonar.

La résolution des mosaïques sonar créées est de 20 cm.

La segmentation des images et la classification ont été faites manuellement sous SIG et seules les zones de présence d'herbiers ont été contournées.

Les données de bathymétrie ont été traitées avec le logiciel Caraibes (©IFREMER). Les sondes sont filtrées afin d'aboutir à la création d'un modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 20 cm.

La présence d'herbier entraîne de mauvaises détections du fond par le sonar. L'objectif de l'étude étant la cartographie des herbiers, ces sondes considérées comme erronées en hydrographie, n'ont pas été supprimées lors du filtrage. En effet, l'aspect rugueux qu'elles donnent au MNT bathymétrique (Figure 28) facilite la délimitation des herbiers.

Les corrections de marée sont calculées grâce aux données du GPS RTK. Les sondes ont été rapportées au niveau IGN 69.

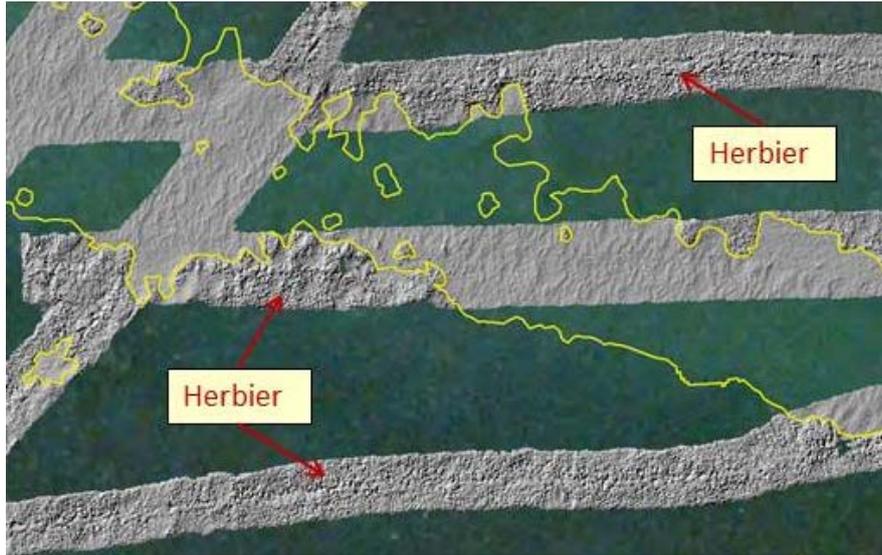


Figure 28.
Bathymétrie ombrée montrant l'aspect rugueux donné par un herbier à *Zostera marina* (zone 3)

| Principaux résultats

Les herbiers de zostères sont clairement visibles sur les mosaïques sonar. La **Figure 29** montre la signature acoustique de deux herbiers de *Zostera marina* sur les zones 2 (**Figure 29 - A**) et 5 (**Figure 29 - B**). La haute résolution des mosaïques et une numérisation précise du contour de l'herbier permet d'évaluer sa fragmentation (**Figure 29 - B**).

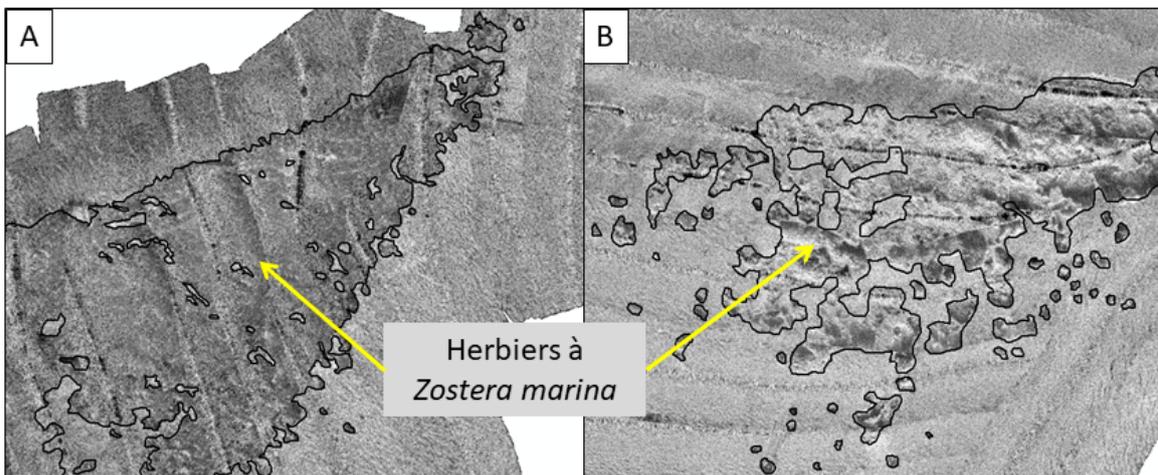


Figure 29.
Signature acoustique de 2 herbiers de *Zostera marina* du Golfe du Morbihan

Les données terrain ayant toutes été utilisées pour aider à l'interprétation, il n'a pas été possible de réaliser une validation statistique des résultats obtenus. Cependant, la comparaison avec les données vidéo montre que le sonar identifie non seulement les herbiers les plus denses mais aussi les herbiers de faible densité. La résolution des capteurs ne permet par contre pas de distinguer des pieds isolés.

L'utilisation de cette méthode a permis d'acquérir des données récentes sur la répartition des herbiers à *Zostera marina* du Golfe du Morbihan, comprenant notamment leur limite inférieure (Figure 30). Toutefois, les herbiers n'ont pas pu être cartographiés dans leur intégralité, la faible profondeur et l'abondance des structures ostréicoles rendant impossible l'accès en navire sur certaines zones. Dans les petits fonds, les données optiques doivent être utilisées pour cartographier cette espèce et déterminer sa limite supérieure.



Figure 30.
Délimitation des herbiers de *Zostera marina* du Golfe du Morbihan (Zone 4) à partir de données sonar latéral.

| Intérêt et limites

L'un des atouts du sonar est de fournir des données surfaciques sur une largeur qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres lorsque la hauteur d'eau est suffisante. Durant cette étude, et afin d'assurer un recouvrement avec les données aéroportées, des levés acoustiques ont été réalisés à marée haute sur de très petits fonds jusqu'à atteindre la zone intertidale. La couverture sonar s'avère alors faible latéralement (30 m environ) et un levé exhaustif sur de grandes surfaces à ces profondeurs n'est pas réalisable (temps de travail et coût trop élevés).

Malgré une couverture plus faible que les capteurs optiques, le sonar reste encore à l'heure actuelle un outil indispensable pour la cartographie des herbiers subtidaux situés à des profondeurs que les capteurs optiques ne peuvent atteindre (profondeur > 5 à 10 m voire plus faible dans les zones de forte turbidité).

Dans le Golfe du Morbihan certaines grandes algues présentent une signature acoustique proche de celles des herbiers à *Zostera marina* sur les mosaïques sonars. L'acquisition de données de vérité terrain reste donc indispensable à la validation des données sonar.

La délimitation manuelle des contours des herbiers sur de grandes zones est coûteuse en temps, particulièrement sur des herbiers fragmentés. Elle dépend également du niveau d'expertise de la personne qui la réalise. Afin de réduire le coût de traitement et

l'interprétation personnelle, des méthodes de segmentation automatique d'image sonar ont été testées. Le principe de traitement est basé sur un algorithme de segmentation de l'image sonar en objets homogènes suivi de leur classification en présence/absence d'herbier selon leurs propriétés spectrales (Figure 31 - A, B, et C). La comparaison du résultat de cette délimitation automatique (Figure 31 - C) avec la délimitation par photo-interprétation manuelle (Figure 31 - D) montrent une grande similitude des enveloppes de l'herbier obtenues par ces deux méthodes, et par conséquent la faisabilité technique de cartographie automatique à partir de l'imagerie acoustique. L'application de traitements automatiques des images acoustiques pour la cartographie opérationnelle des herbiers nécessite cependant d'être validée sur de plus grandes zones car la texture des herbiers sur les images acoustiques peut varier de manière importante entre sites mais également au sein d'un même site.

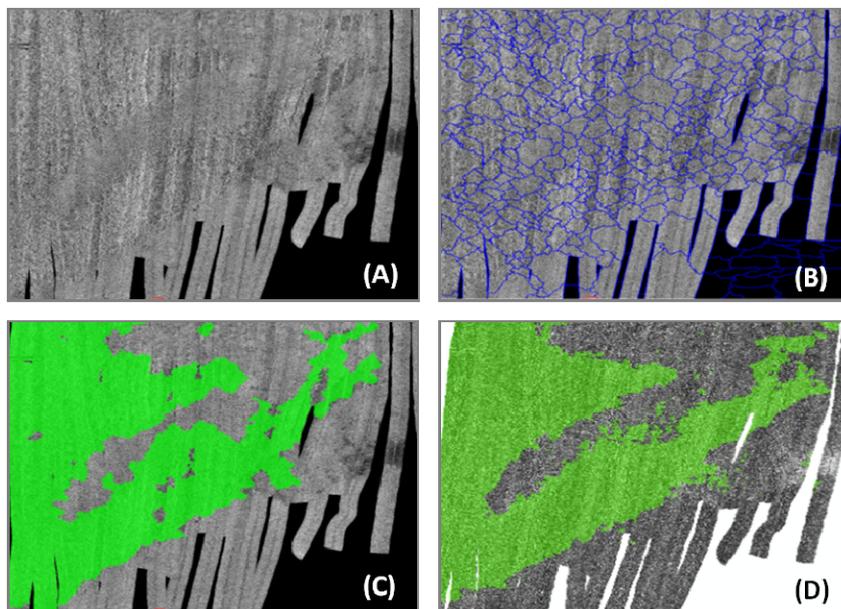


Figure 31.
Délimitation automatique d'un herbier de zostères (zone 4, Figure 16) par segmentation : image brute (A), Image segmentée (B), résultat de la classification (C) et délimitation manuelle par photo-interprétation (D).

4.1.5. Echosondeur

| Acquisition des données

L'acquisition au sondeur monofaisceau a été réalisée du 27 août au 10 septembre 2013 en parallèle de l'acquisition sonar. Elle n'a donc pas engendré de coût d'acquisition supplémentaire.

Le sondeur monofaisceau utilisé sur la V/O Haliotis est un modèle Simrad EK60 qui fonctionne à la fréquence de 120 kHz. Son ouverture angulaire est de 7°. La taille de l'empreinte sur le fond est donc d'environ 0,36 m² pour des fonds de 5 m, et 1,4 m² pour des fonds de 10 m.

La durée d'impulsion est de 128 μ s et la cadence d'émission varie en fonction de la profondeur (entre 5 et 14 pings par seconde). L'acquisition des données EK60 se faisant en même temps que l'acquisition sonar, l'écartement entre les profils est conditionné à la fauchée du sonar et la vitesse du levé est de 5 nœuds. L'EK60 peut fournir des données de bonne qualité à une vitesse plus élevée, les données ont donc également été enregistrées pendant les transits. 1100 km de données sondeur monofaisceau ont été acquises pendant la campagne.

| Principe de traitement

Les données du sondeur monofaisceau sont analysées par écho-intégration à l'aide du logiciel Movies 3D (©IFREMER).

Selon Diner et Marchand (1995), le principe de l'écho-intégration est « basé sur le fait que l'intensité réfléchi par une cible est proportionnelle à son indice de réflexion, mais aussi qu'un ensemble de « n » cibles, aux propriétés acoustiques identiques, produit une intensité de signal « n » fois supérieures ».

Elle consiste à additionner les densités acoustiques enregistrées dans différentes couches au-dessus du fond sur une distance ou une durée prédéfinies correspondant à plusieurs pings successifs. On obtient ainsi un échantillonnage géographique de la densité acoustique par tranche de profondeur.

Dans notre cas, chaque ping a été traité indépendamment afin de conserver une résolution spatiale maximale. L'écho-intégration a été réalisée sur des couches de 20 cm jusqu'à une hauteur de 3 m au-dessus du fond.

Une localisation rigoureuse du fond est donc une condition fondamentale. Celle faite en temps réel par le logiciel d'acquisition sur des fonds particuliers comme les herbiers n'était pas satisfaisante. En effet, les herbiers les plus denses présentent un niveau d'écho équivalent à celui du fond, ce qui perturbe sa détection. Si le logiciel localise le fond au-dessus ou à l'intérieur de la canopée, l'herbier ne sera pas détecté ou sera sous-estimé lors des traitements d'écho-intégration. La détection du fond a donc été reprise au préalable avec Movies 3D qui propose des traitements alternatifs pour ces cas particuliers.

Les résultats de l'écho intégration ont ensuite été analysés avec le logiciel de statistiques R selon les étapes suivantes : filtrage des données, calcul de la profondeur et de la hauteur de canopée, affectation d'un type de végétation et d'un indice de fiabilité.

Il faut souligner que la hauteur de la canopée mesurée de la sorte ne reflète pas obligatoirement la longueur des pieds qui peuvent être plus ou moins couchés sur le fond par l'effet des courants.

| Principaux résultats

L'analyse des échogrammes du sondeur a permis d'identifier différents types de fonds et de végétation dont quelques exemples sont présentés sur la **Figure 32**.

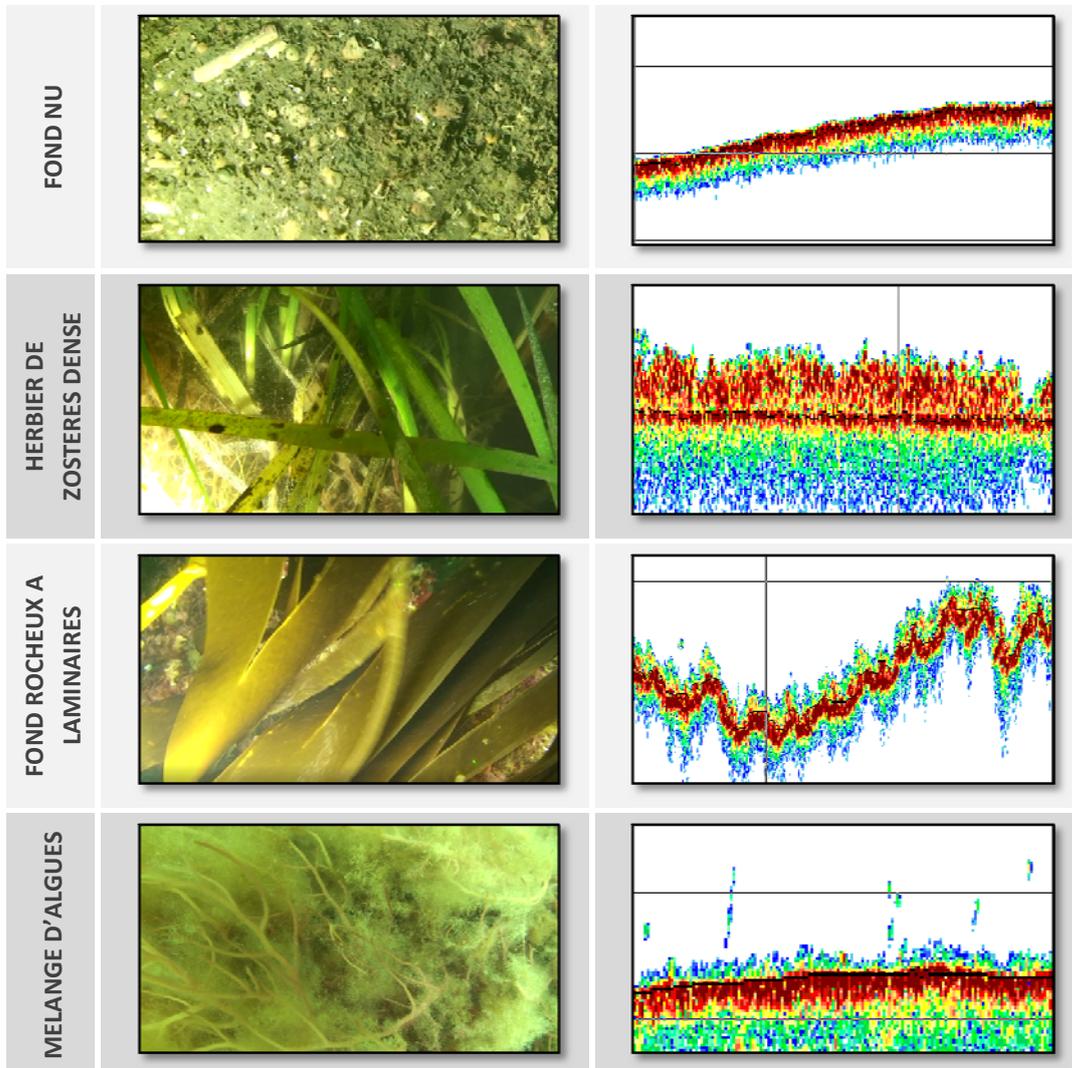


Figure 32.

Exemple de différents types de fonds rencontrés dans le Golfe du Morbihan et échogrammes associés. Le fond est représenté par un trait noir.

La comparaison des résultats de l'écho-intégration avec les données de validation terrain obtenues par vidéo (**Figure 33**) ainsi qu'avec les images obtenues lors des campagnes aéroportées (**Figure 34**.) montre une bonne détection des zones d'absence et présence d'herbiers.

Sur les zones d'herbiers denses, un espacement réduit entre les profils (de 20 à 50 mètres) permet d'avoir une bonne idée du contour de l'herbier (**Figure 33**).

L'acquisition des données lors des transits et la reconnaissance de zones potentiellement colonisables par les zostères ont permis d'identifier des herbiers qui n'avaient jusqu'alors pas été référencés sur les cartes réalisées par photo-interprétation. Leur présence a été confirmée par l'analyse des données sonar latéral.

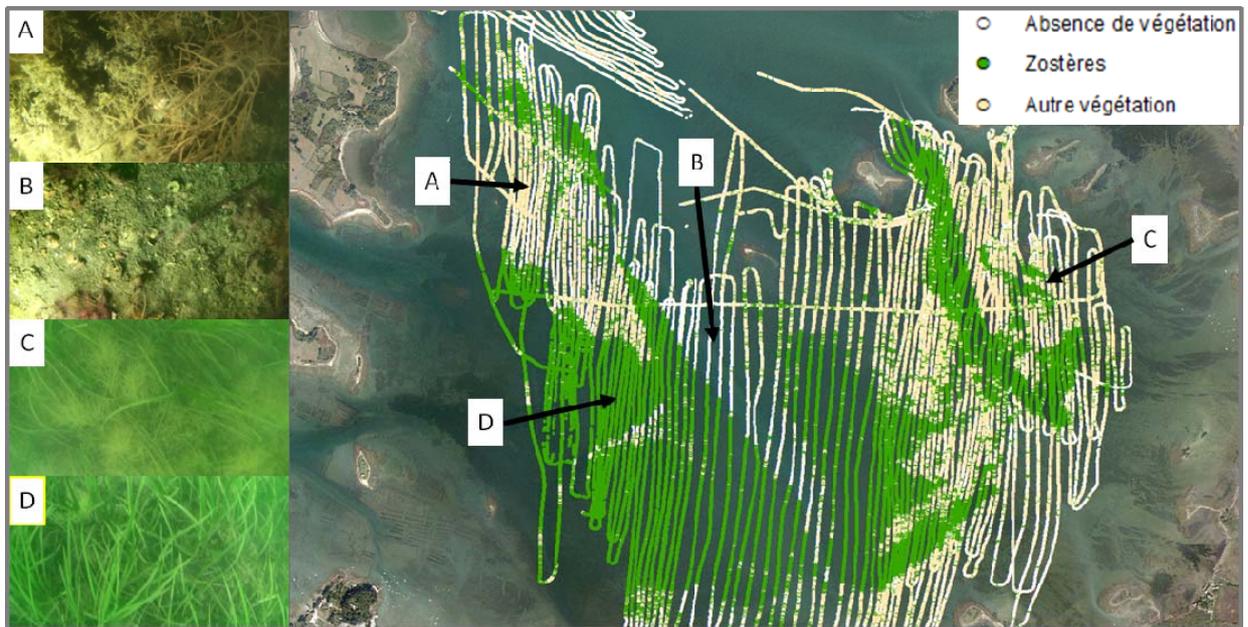


Figure 33.
 Résultat d'écho-intégration de données de sondeur monofaisceau sur un herbier de *Zostera marina* dans le Golfe du Morbihan (zone 4)

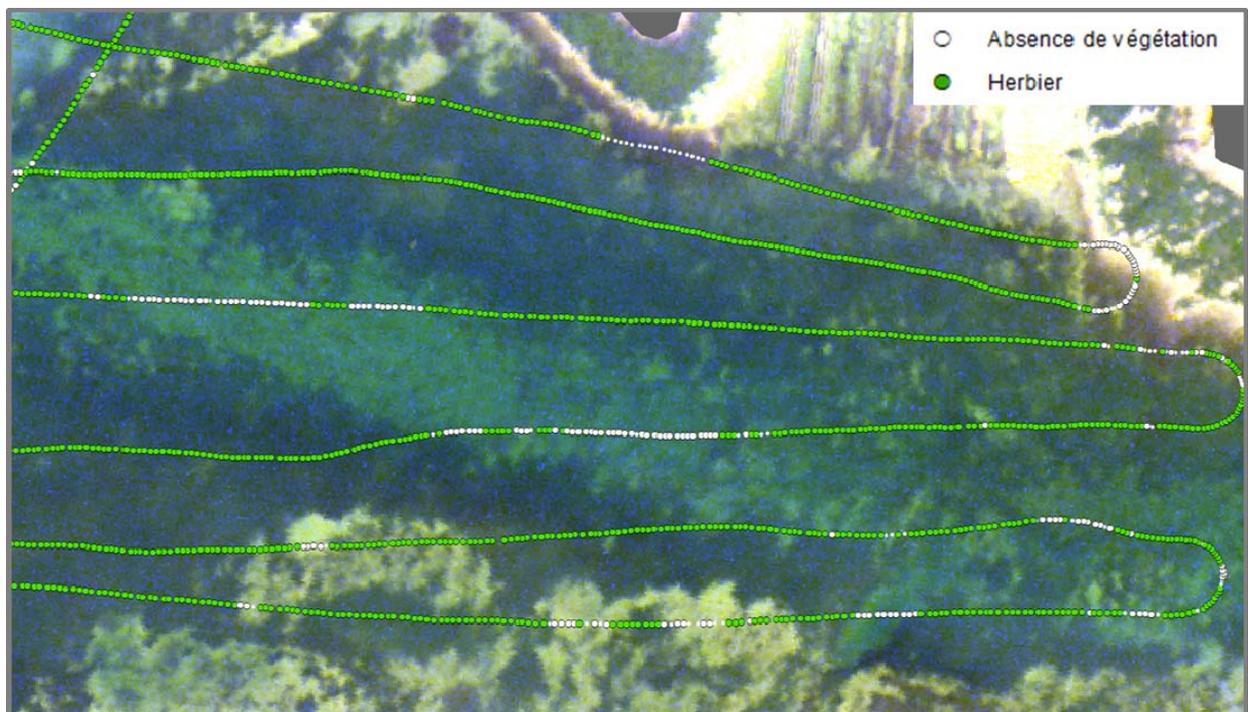


Figure 34.
 Résultats d'écho-intégration sur fond d'imagerie aéroportée (zone 3)

| Intérêt et limites

Cette première approche de l'utilisation de l'écho intégration dans le Golfe du Morbihan nous a permis de discriminer différents types de végétation (herbiers de zostères, laminaires, végétation rase). Les premiers traitements effectués manquent encore de fiabilité pour distinguer des espèces ayant des signatures acoustiques assez proches.

Les mesures du sondeur monofaisceau sont des mesures ponctuelles à la verticale du sondeur. L'échantillonnage est dense dans le sens d'avancement du navire mais dépend latéralement de l'espacement entre les profils. Cela n'en fait pas un outil idéal pour une cartographie surfacique sur des zones étendues.

Il est par contre très intéressant comme aide à la validation en complément d'autres capteurs (sonar latéral, capteurs optiques). Les données sont nombreuses (100 km par jour environ) et bien géoréférencées. Il permet également de limiter et cibler plus précisément les acquisitions vidéo ou plongeur.

Le sondeur monofaisceau permet d'acquérir des informations sur les caractéristiques de l'herbier (hauteur de la canopée, densité) et du milieu (bathymétrie).

Le coût d'acquisition est peu élevé et il peut être mis en œuvre avec des moyens nautiques légers. Pour plus de facilité dans le traitement des données, on peut associer un SACLAF (Système Acoustique de Classification Automatique des Fonds) au sondeur monofaisceau. Les données fournies seront alors de faible volume et interprétables par des non spécialistes

| Perspectives

L'utilisation de l'acoustique est beaucoup plus développée en halieutique que pour la cartographie de la végétation. Il est donc indispensable de s'inspirer des évolutions dans ce domaine.

Pour rappel, Diner et Marchand (1995) expliquent « qu'un ensemble de « n » cibles, aux propriétés acoustiques identiques, produit une intensité de signal « n » fois supérieures ». C'est ce principe qui est utilisé en halieutique pour l'estimation des stocks de poissons.

(Talec, 1999) a utilisé cette méthode pour calculer la biomasse de laminaires au large de Pleubian (Côtes d'Armor). L'application de cette méthode au calcul de la biomasse des zostères reste à étudier. Pour cela il faudrait établir une relation entre la biomasse de l'herbier et la quantité d'énergie acoustique rétrodiffusée.

Deux avancées technologiques pourraient être expérimentées pour la cartographie des herbiers :

- l'utilisation des sondeurs monofaisceau large bande se développe actuellement en acoustique halieutique. Ceux-ci n'émettent plus un signal acoustique de fréquence pure mais un signal plus long et de fréquence variable appelé signal chirp. Le sondeur extrait ensuite les échos pour chaque fréquence émise. Ces sondeurs augmentent la capacité à discriminer des cibles et donnent une représentation beaucoup plus fine du milieu. Le passage au sondeur large bande augmente par contre le volume des données et la complexité des traitements ;
- l'utilisation de l'imagerie de drones acoustiques de surface pourrait permettre quant à elle de limiter le coût des levés et d'atteindre des zones de plus faible profondeur.

4.1.6. LIDAR

|Principe de traitement

Pour le capteur Lidar, seules les sondes issues des campagnes d'acquisition Ifremer et du programme Litto 3D ont pu être utilisées. Les produits de topographie, classiquement utilisés pour délimiter les zones d'estran ou encore pour suivre l'évolution du trait de côte, permettent également de cartographier les zones non favorables au développement des herbiers, à savoir les substrats rocheux. Cette information peut être utilisée par la suite comme masque avant les traitements.

La méthode appliquée pour l'extraction de substrats rocheux à partir d'un modèle numérique de terrain est basée sur de l'interprétation visuelle. Elle a pour but de produire une cartographie, la plus fine possible, du substrat dur présent dans les sites en utilisant notamment les produits dérivés du MNT LIDAR (Figure 35).

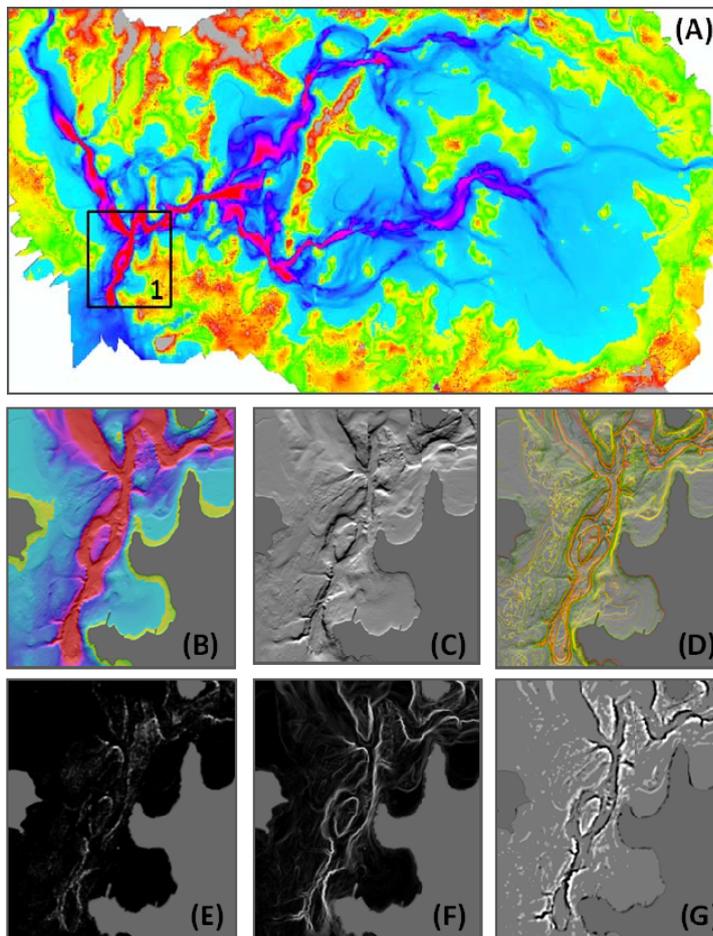


Figure 35.

MNT Lidar du Golfe du Morbihan (A) et illustration des produits dérivés : bathymétrie (B), Ombrage (C), Isobathes (D), Rugosité (E), Pente (F) et BPI (Benthic Position Index) (G) sur la zone 1

Les produits dérivés du MNT, tels que l'ombrage et la pente, sont utilisés en priorité pour différencier les substrats durs des substrats meubles. Leurs signatures permettent également de différencier les formes géomorphologiques complexes du fond meuble. Elles permettent aussi d'affiner les limites des contours des polygones. Par exemple, sur la figure 31 :

- la couche de l'ombrage a permis de voir les formes géomorphologiques du fond telles que les dunes hydrauliques, les méga-rides, les cordons dunaires et les herbiers ;
- les couches de la pente, rugosité et courbature ont permis de tracer les contours des massifs rocheux.

Les opérations de géo-traitement et numérisation des données ont été effectuées sous le logiciel ArcGIS. La production des données dérivées à partir du modèle numérique de terrain a été effectuée en utilisant l'extension « Spatial Analyst » du logiciel Arcgis.

| Principaux résultats

À partir du modèle numérique de terrain, il a été possible d'identifier les zones de substrat dur et par conséquent de délimiter les zones de substrat meuble potentiellement colonisables par les herbiers (Figure 36).

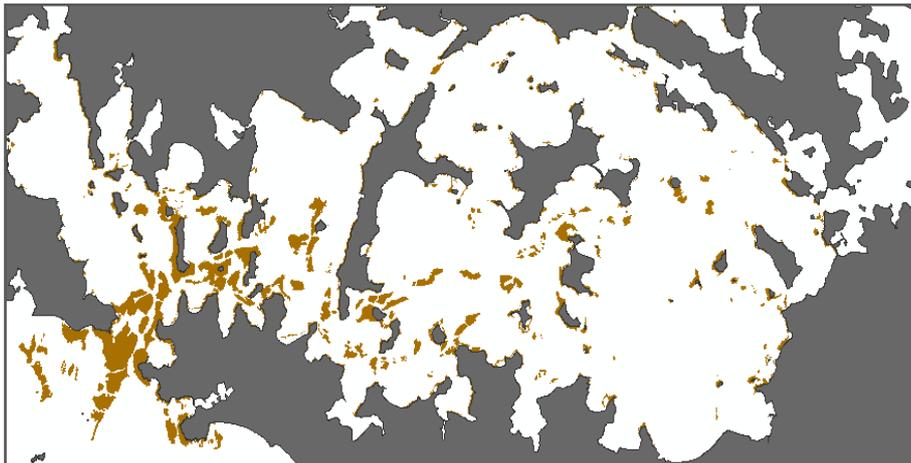


Figure 36.

Zones de roches du site du Golfe du Morbihan délimitées à partir de l'interprétation des données Lidar

| Intérêt et limites

Si l'analyse de la forme d'onde peut permettre d'identifier la présence d'herbiers marins ou même de classer les différents types d'herbiers, il n'existe pas encore d'outils opérationnels pour l'exploitation de ce signal qui se limite encore au domaine de la recherche. La répartition des herbiers et en particulier de certaines espèces de phanérogames, est fortement conditionnée par la nature du substrat, le niveau marégraphique et le degré d'exposition. La connaissance fine du relief de la zone intertidale et de ses dérivés (pente, orientation) est utilisée en complément de la photo-interprétation d'orthophotographies littorales, du traitement d'images satellites ou aéroportées et d'observation *in situ* de limites d'étagement pour la discrimination des ceintures végétales. La couche roche peut ainsi être utilisée comme donnée de validation des résultats de classification, les herbiers ne pouvant pas se développer sur un substrat dur.

4.2. Comparaison des capteurs

Les résultats du traitement des données optiques et acoustiques du Golfe du Morbihan permettent de dégager des éléments de comparaison concernant le potentiel des différents capteurs à détecter et à discriminer les deux espèces de zostères, marine et naine (**Tableau 6**).

Les traitements appliqués aux ortholittorales reposent essentiellement sur de la photo-interprétation et ne permettent pas de discriminer les deux espèces de zostère. Trop peu de données de validation sont disponibles pour estimer statistiquement la précision de classification. Cependant, les connaissances terrain et les cartes existantes ont permis de conclure que les attributs spectraux retenus représentent mal la présence d'herbier, surtout en zone subtidale. Les discontinuités spectrales créent par ailleurs des artefacts visibles sur le produit cartographique.

S'agissant de l'image Pléiades, l'information spectrale associée à un algorithme de deep learning a permis de détecter et distinguer les deux espèces de zostères. La précision de détection de *Z. marina* est de 69 %. Pour *Z. noltei*, le nombre de points de terrain est insuffisant pour une estimation statistique robuste. Des fausses détections de *Z. noltei* sont localement notées autour des îlots en présence de macroalgues.

Il a également été possible d'identifier et de discriminer les deux espèces de zostères par imagerie hyperspectrale. La précision de détection de *Z. marina* en zone subtidale (91 %) est nettement supérieure à celle obtenue pour Pléiades. Pour *Z. noltei*, le nombre de points de terrain est insuffisant pour une estimation statistique robuste. Cependant ce capteur, avec la possibilité de corriger le signal de l'effet de l'eau, semble produire les meilleurs résultats en traitement automatique des données optiques. En particulier, le traitement ne produit pas les sur-détections de zostères en présence de macroalgues comme c'est le cas pour Pléiades.

S'agissant de l'imagerie acoustique, ce capteur est inadapté pour cartographier les herbiers à *Z. noltei* présents en zone intertidale. Pour *Z. marina*, les données terrain ayant toutes été utilisées pour aider à l'interprétation des images acoustiques, il n'a pas été possible de réaliser une validation statistique de la classification réalisée. Par ailleurs, la délimitation manuelle ne permet pas de rendre compte du degré de fragmentation au sein de l'herbier et, notamment, lorsque la couverture n'est pas exhaustive et qu'une interpolation est indispensable à l'élaboration de la carte finale.

Des trois types d'images optiques exploitées, l'imagerie hyperspectrale est celle qui semble donner les meilleurs résultats de détection et de discrimination des herbiers de zostères. Elle nécessite cependant un coût de mise en œuvre plus important et implique une complexité de traitement et un niveau d'expertise plus élevés pour son exploitation. L'imagerie Pleiades, en présentant le meilleur compromis coût/résultats, conforte la recommandation du groupe de travail de l'utilisation de ce capteur comme support de cartographie des herbiers de zostères. Des améliorations des algorithmes des traitements (e.g. meilleure construction de la base de référence pour l'apprentissage) sont cependant envisageables pour améliorer la précision de discrimination des deux espèces d'herbiers. Les résultats de traitement de l'imagerie optique du Golfe semblent très prometteurs mais restent à confirmer pour les sites les plus turbides. Pour ces derniers, l'acoustique pourrait être incontournable. L'importance des données *in situ* pour une validation robuste doit être soulignée.

Le **Tableau 7** présente une vue synthétique générale sur les capacités et limites des principaux capteurs optiques et acoustiques pouvant être mis en œuvre pour la cartographie de l'herbier, en termes de résolution, de métriques et de coût.

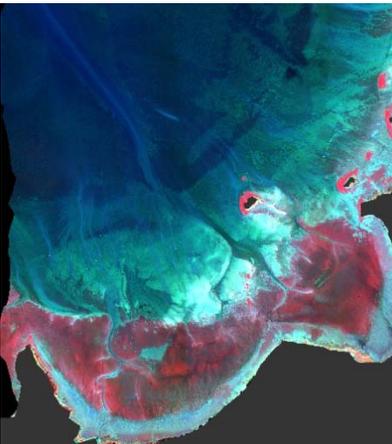
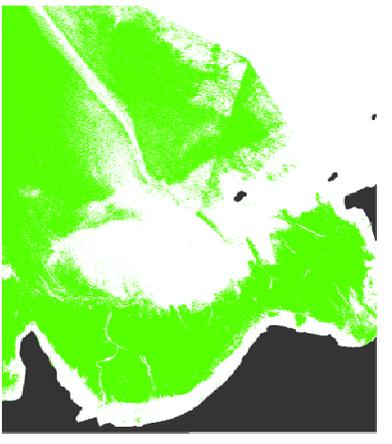
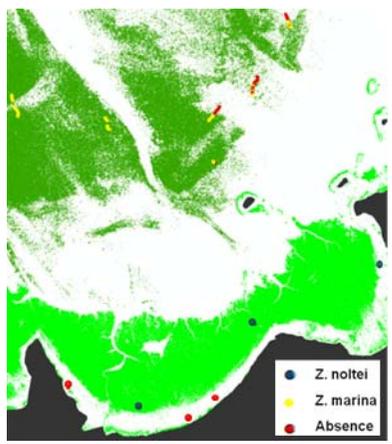
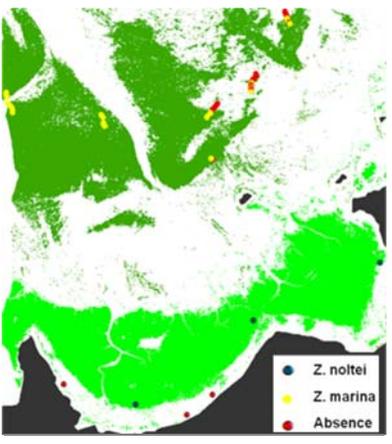
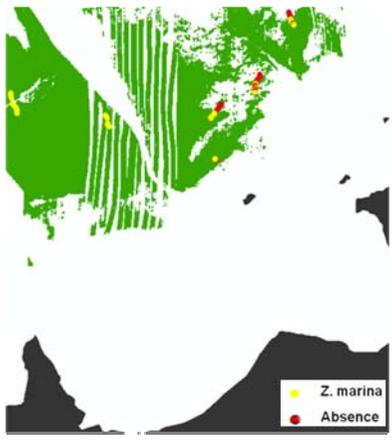
Tableau 6. Synthèse de la comparaison des traitements réalisés pour différents capteurs pour la cartographie des herbiers du secteur Sud-Est du Golfe du Morbihan				
	Ortholittorales V2 (50 cm) (Septembre 2011)	Image Pléiades (50 cm) (Septembre 2013)	Image Hyperspectrale (80 cm) (Août 2013)	Image Acoustique (20 cm) (Aout-Septembre 2013)
Extrait de l'image prétraitée				
Résultat de cartographie des herbiers				

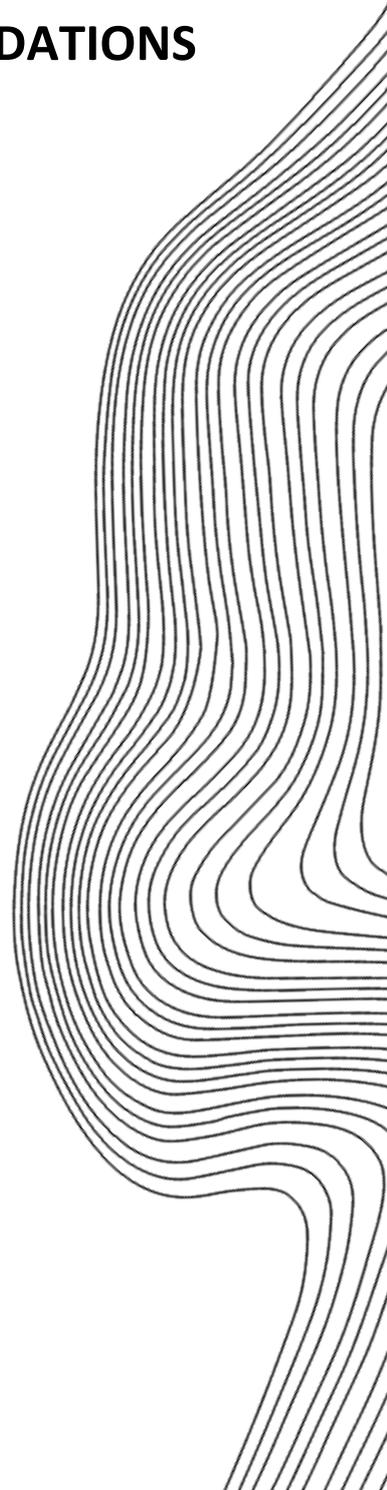
Tableau 7.
Comparaison des capteurs pour la cartographie des herbiers de zostères

	Ortholittorale	Pléiades	Hyperspectral	Sonar latéral	Echosondeur	LIDAR
Exploitation	Extension Fragmentation	Extension Fragmentation	Extension Fragmentation Limite inférieure (selon transparence de l'eau) Abondance (valeur continue) Biomasse (estimation indirecte)	Extension Fragmentation Limite inférieure	Présence/ Absence Limite inférieure Abondance (valeur discrète) Hauteur de canopée Bathymétrie	Donnée d'entrée pour améliorer la classification des herbiers Potentiel de détection par le signal « forme d'onde »
Résolution spatiale	50 cm	50 cm après affinage panchromatique	Possibilité < 50 cm selon l'altitude du vol et résolution spectrale	Possibilité < 25 cm selon le type de sonar	Dépend de la profondeur et des caractéristiques du sondeur	MNT à 1m de résolution
Profondeur de détection	Limite de détection en zone subtidale qui dépend de la turbidité de l'eau	Limité par la profondeur (5 m)	2 à 3 fois la profondeur Secchi dans les régions côtières	Pas de profondeur maximale	Pas de profondeur maximale Adapter la fréquence du capteur en fonction de la profondeur	30 m à 50 m en eaux claires
Avantages	- Résolution spatiale - Ne nécessite pas une grande expertise technique - Intérêt historique pour étudier la dynamique	Adaptée pour des cartographies à large échelle (du local au régional) Moins cher par km ² Méthode hautement répétable pour observer de grands changements Disponibilité de séries temporelles permettant d'étudier la dynamique depuis le lancement du satellite	Choix de la résolution spatiale et spectrale en fonction de l'objectif de l'étude Acquisition flexible Meilleure discrimination des types de végétation Possibilité de corriger le signal de l'effet de l'eau	Couverture surfacique Haute résolution Précision du positionnement (si sonar de coque)	Précision du positionnement Discrimination des types de végétations Fournit une mesure de bathymétrie Peu coûteux	Plus efficace en termes de couverture sur les petits fonds et zone difficilement navigables Produit Litto 3D gratuit
Inconvénients	Confusion de certains habitats avec le sédiment Difficulté à identifier les herbiers de faible densité Nécessite de nombreuses vérités-terrain Faible fréquence de mise à jour	Confusion potentielle entre phanérogames et macroalgues L'exactitude diminue avec l'augmentation de la complexité du milieu (nombre de classes)	Revient plus cher au km ² surtout pour l'étude de grandes zones Nécessité de matériels lourds et coûteux (matériels, logiciels, spécialistes, etc.)	Couverture faible dans les très petits fonds Matériel lourd et coûteux Haut niveau d'expertise requis pour l'acquisition et le traitement	Pas d'information surfacique	Le produit Mnt ne permet pas une cartographie directe des herbiers L'exploitation du signal forme d'onde est loin d'être opérationnelle
Coût d'acquisition*	Gratuite	L'accès gratuit pour les institutionnels sous réserve d'acceptation de leur demande. Le volume d'images acceptées peut être complété par un volume supplémentaire aux (1,40€/km ² pour les archives et 1,80€/km ² pour la programmation de nouvelles images)	1 à 1,2 K€/km ² (résolution de 50 cm)	1,2 à k€/km ² selon la fréquence et la profondeur	180 €/km Pas de coût supplémentaire si acquisition simultanée au sonar	cf. programme Litto3D
Coût de traitement*	o Env. 11,5 k€ HT pour 1 km ² o Légèrement inférieur à 18 k€ HT pour 5 km ² o Env. 23,5 k€ HT pour 10 km ²	O Env. 10 k€ HT pour 5 à 50 km ² O Env. 15 k€ HT pour 50 à 150 km ² O Env. 20 k€ HT pour 150 km ² à 300 km ²	30 à 50 k€ pour 110 km ² selon le type de traitement	8 à 10 k€ pour 20 km ² (délimitation par photo-interprétation)	2 k€ pour 34 km	4 à 5 k€ pour 100 km ²

*Valeurs à titre indicatif, les coûts sont variables selon les prestataires avec une part incompressible, liée au coût de mobilisation, quelle que soit la taille du site

PROCESSUS DE CARTOGRAPHIE

STRATEGIE & RECOMMANDATIONS



5. Stratégie et recommandations

5.1. Processus cartographique

Un découpage du projet de cartographie en plusieurs phases est préconisé afin d'optimiser les efforts et maîtriser les coûts de réalisation. La **Figure 37**. synthétise les grandes phases proposées.

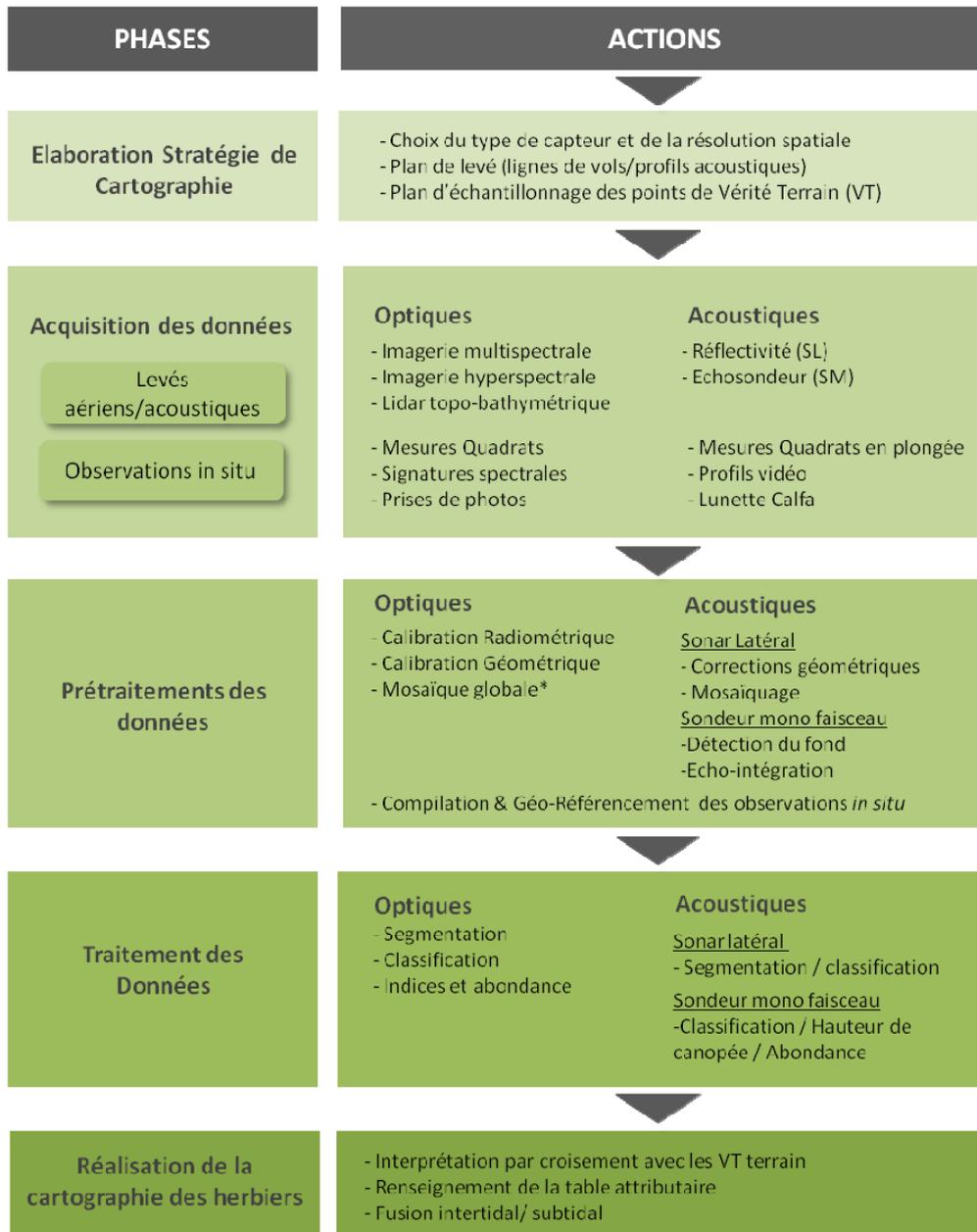


Figure 37.

Schéma général du processus de cartographie des herbiers. (*) pour des raisons de volume de données, la mosaïque ne peut être envisagée qu'avec une résolution spatiale et/ou spectrale réduite ou par découpage en tuiles.

|Elaboration de la stratégie d'acquisition

Cette phase consiste à choisir de manière optimale les techniques à mettre en œuvre pour la réalisation des levés ainsi que les bonnes méthodes d'échantillonnage. Ce dernier est à orienter afin d'obtenir des échantillons représentatifs de l'ensemble des types de terrain présents sur le site à cartographier. Le choix des sites d'échantillonnage doit donc être guidé par le bilan des connaissances existantes, ainsi que par les nouveaux levés de télédétection.

|Acquisition des données

Elle vise à acquérir des données par de nouveaux levés et des campagnes d'échantillonnage des deux espèces de zostères en vue de leur caractérisation spatiale (extension, abondance, fragmentation, ...)

|Prétraitement des données

Phase nécessaire dans la chaîne de traitement, qui conditionne la qualité des résultats issues des données de levés. Elle permet de supprimer tous les biais liés aux capteurs et aux conditions environnementales. Il existe plusieurs techniques de prétraitement selon le type de données, les outils de traitement et le niveau d'expertise dont on dispose.

|Réalisation de la cartographie

Consacrée aux traitements et à l'analyse des données pour produire la carte de distribution des herbiers. Deux approches sont possibles :

- délimitation des zones d'herbiers par contourage manuel. La qualité de la carte va dépendre de l'expertise du photo-interprète et de la qualité radiométrique de l'image support utilisée ;
- délimitation automatique des zones d'herbiers par application d'algorithmes de classification et calculs d'indices spectraux.

|Contrôle qualité et bancarisation

Tâche obligatoire préalablement à l'intégration des données produites dans le système d'archivage de référence. Elle garantit une utilisation adéquate de l'information bancarisée.

5.2. Stratégie de cartographie

|Principe général

La télédétection est une méthode d'acquisition synoptique permettant une couverture à 100% des sites. Les techniques qui s'y rapportent se subdivisent en une variété d'outils. Le **Tableau 8** ci-après mentionne les principaux outils utilisables en cartographie des herbiers. Il constitue une aide pour mieux orienter l'effort à prévoir pour les nouvelles acquisitions en fonction des besoins d'information mis en lumière par l'analyse de l'existant et des objectifs fixés pour la cartographie des herbiers du site d'étude.

Tableau 8.
Aide pour l'élaboration de la stratégie de cartographie des herbiers de zostères

		Méthodes Directes	Méthodes de télédétection						Validation Terrain		
Surface d'étude (km ²)	Profondeur Herbier (m)	Contour GPS	Photographies aériennes	LIDAR	Satellite multispectral	Aéroporté hyperspectral	Sonar latéral	Sondeur monofaisceau	Plongée	Vidéo tractée	à marée basse
> 50 km ²	Intertidal		x	x	Pléiades	x			+	++	++
	0-5 m		x	x	Pléiades	x	x**	x**	+	++	
	5-10 m			x		x*	x	x	+	++	
	> 10 m						x	x	+	++	
5-50 km ²	Intertidal			x	Pléiades	x			++	++	++
	0-5 m			x	Pléiades	x	x**	x**	++	+	
	5-10 m			x		x	x	x	++	++	
	> 10 m						x	x	+	++	
< 5 km ²	Intertidal	x	Solutions drone en développement x	Solutions drone en développement	x	Solutions drone en développement			++	+	++
	0-5m	x	Solutions drone en développement x	Solutions drone en développement	x	Solutions drone en développement	x	x	++	++	
	5-10m						x	x	++	++	
	> 10m						x	x	+	++	

* Fonction de la turbidité du site

** Exhaustivité de la couverture à définir en fonction de la surface à cartographier

+ Adapté ++ Très adapté

Le choix de la méthode dépend de la taille du site, de la répartition des herbiers (intertidale/subtidale) et de leur profondeur maximale :

- en zone intertidale et dans les très petits fonds (< 2 m), la stratégie à rechercher est celle d'une couverture totale à 100 %. Les capteurs optiques aériens et satellites sont les plus performants en termes d'optimum coût/précision/résolution/étendue spatiale, dans la mesure où les levés sont réalisés dans de bonne condition de visibilité ;
- entre 0 et 5 m, l'acoustique sous-marine peut être utilisée en complément des capteurs optiques, avec une couverture non exhaustive (profils espacés) afin de consolider/valider les traitements de ces derniers. Des transects traversant la zone d'herbier peuvent être envisagés pour rendre compte des changements de densité ou détecter les limites. Dans ce cas, l'effort en levés acoustiques doit privilégier les limites inférieures de l'herbier et les zones que l'optique ne peut pas atteindre ;
- lorsque la performance des capteurs optiques devient limitée par la présence d'une colonne d'eau importante ou en zone turbide, il est nécessaire d'utiliser les outils acoustiques. Il est suggéré d'utiliser, autant que possible, un sonar qui permet d'obtenir des images continues du fond et d'y associer un sondeur monofaisceau qui apporte des données ponctuelles complémentaires. Lorsque le budget est limité, un compromis entre la profondeur et la couverture du sonar est à rechercher. Il est possible d'avoir une idée de la taille de l'herbier même si la couverture sonar n'est pas exhaustive. La réalisation de quelques profils au sein de l'herbier permettra également de déterminer son état de fragmentation. Le cas échéant, on peut se limiter à une acquisition au sondeur monofaisceau/SACLAF.

| Capteur & résolution

Afin de répondre à l'exigence d'une couverture spatiale importante au coût le plus faible possible, des recommandations peuvent être avancées :

- (i) **pour les herbiers intertidaux et de très petits fonds** : Les acquisitions aéroportées semblent trop coûteuses. Le suivi **Pléiades** serait le plus adapté avec des canaux visibles et proche infrarouge qui offrent une résolution spatiale suffisante (50 cm après un affinage panchromatique) tout en permettant un temps de revisite intéressant. La gratuité des images Pleiades pour les institutionnels plaide également en faveur de leur utilisation dans un cadre opérationnel. Toutefois, il est nécessaire de vérifier **la disponibilité des images aux heures de basse mer**. Certains sites pourraient nécessiter des **acquisitions aéroportées** spécifiques (résolution minimale de 50 cm). Il est dans ce cas recommandé d'utiliser un **capteur hyperspectral** permettant une meilleure discrimination des herbiers de zostères tout en offrant la possibilité de simuler les résolutions spatiales et spectrales d'une scène Pléiades. Notons que l'acquisition de données « drone » permettrait de couvrir de faibles étendues plus facilement.
- (ii) **pour les herbiers immergés**, l'acoustique semble nécessaire. Il est donc proposé de maintenir l'acoustique (**sonar latéral, échosondeur**) sur les sites avec des herbiers subtidaux profonds et/ou à forte turbidité.

| Fréquence de mise à jour

Les différentes directives exigent l'actualisation de l'étendue des herbiers 1 fois par cycle de gestion (tous les 6 ans). Une articulation est à mettre en place entre la DCE et les autres directives (DHFF et DCSMM) afin de mutualiser les coûts.

| Période d'acquisition

Les acquisitions pour le suivi surfacique sont à réaliser pendant la période de développement maximal des herbiers autour de l'été (de juin à septembre). Les dates d'acquisition sont à programmer selon les conditions météorologiques et de marées spécifiques à chaque site (cf. Recommandations de mise en œuvre § 5.3.1).

5.3. Recommandations pour la mise en œuvre de la cartographie des herbiers

5.3.1. La réalisation des levés

Quel que soit le capteur utilisé, la précision d'une cartographie dépendra toujours de la précision avec laquelle la position du capteur a été déterminée. Il est donc primordial de localiser les données avec soin lors de la réalisation des levés.

| Les levés optiques satellites et aéroportés

Les levés optiques, aériens (hyperspectral, multispectral ou photographie classique) et satellites (multispectral), sont associés à des capteurs passifs. La qualité du rapport signal sur bruit de la donnée image dépend donc des conditions lumineuses lors de l'acquisition. Le moment de réalisation des levés est important pour garantir l'interprétation des images avec la plus grande exactitude possible.

Pour tout levé, le prestataire devra s'assurer d'une luminosité suffisante (absence de voile nuageux, élévation du soleil et résolutions spatiale et spectrale du capteur adaptées) et homogène sur la zone d'étude pendant la durée de l'acquisition. Les levés doivent être réalisés dans des conditions de prise de vue optimales (météo, clarté de l'eau, angle de visée, état de surface de la mer, vent, etc.).

La planification des levés devra tenir compte du niveau de marée. Il est donc recommandé de programmer les acquisitions en périodes de grands coefficients de marée (idéalement >100).

Les images produites devant être géoréférencées, le prestataire devra veiller à ce que l'appareillage utilisé le permette (par exemple, système GPS et centrale inertielle).

L'accès aux images Pléiades est gratuit pour les institutionnels français sous réserve de l'acceptation de leur demande :

- demande de conseils pour affiner ses besoins : isis-pleiades@cnes.fr ;
- formulaire de demande d'acquisition Pléiades dans le cadre du programme ISIS, destiné aux scientifiques : <http://www.satelliteimageaccess.teledetection.fr/>.

Pour maximiser les surfaces émergées lors des prises de vue satellite, les acquisitions sont à programmer lors de basses mers de vives eaux. En fonction de la topographie des lieux et du marnage, les surfaces découvrantes sont variables et certains sites requièrent un minutage précis des acquisitions et une flexibilité sur les angles d'acquisition. En considérant un angle d'acquisition de 20°, le temps de revisite est de 3 à 4 jours. La constellation Pléiades comptant 2 satellites, ce temps est réduit à 24h à condition d'accepter un angle de 30°.

| Les levés acoustiques

Les capteurs acoustiques, et en particulier leur fréquence, sont à choisir en fonction de la profondeur de la zone à étudier et de la résolution spatiale désirée.

Sur les zones soumises à la marée, les acquisitions seront réalisées pendant les périodes de mortes-eaux de préférence afin de limiter le courant.

Dans les zones de très petits fonds, on privilégiera l'usage d'un sonar de coque par rapport à un sonar remorqué pour faciliter la navigation. L'acquisition se fera autour de la marée haute afin d'avoir une hauteur d'eau plus importante sous le navire et donc une couverture sonar maximale. La vitesse d'acquisition standard pour un levé sonar latéral est de 4 à 6 nœuds. Pour un levé sondeur monofaisceau, on pourra augmenter la vitesse jusqu'à 7 ou 8 nœuds.

La qualité des données acoustiques pouvant être affectée par les mouvements du bateau et la présence de bulles en surface, l'acquisition se fera dans des conditions météorologiques favorables (vent inférieur à 3 Beaufort, houle faible).

La réalisation de profils traversiers permettra de contrôler la qualité des données acoustiques et du positionnement.

Comme vu précédemment, le résultat final dépendant également du géoréférencement des données, l'utilisation d'un système de positionnement précis (GPS RTK si possible) associé à une centrale inertielle est préconisé.

Si l'on souhaite exploiter quantitativement la mesure acoustique du sondeur monofaisceau, celui-ci doit être étalonné dans les conditions d'environnement de la campagne avec une sphère étalon (Demer *et al.*, 2015).

5.3.2. Les traitements

| Prétraitements des données

Lorsqu'une acquisition de données de télédétection optique ou acoustique est livrée par un prestataire, il est important de s'assurer du niveau de qualité des prétraitements des données avant leur utilisation. Il convient que les corrections radiométriques, atmosphériques et géométriques soient réalisées par des personnes qualifiées.

Pour la qualité géométrique, une ortholittorale a une grande fiabilité de référence spatiale en comparaison avec une photographie simplement géoréférencée. Elle peut être utilisée pour valider la qualité de géoréférencement en se référant à des points amers qui n'évoluent pas dans le temps. Notons que pour les données optiques, les résultats d'une correction atmosphérique peuvent diverger selon la méthode ou logiciel utilisé (6S, FLAASH, etc.). Une

analyse de la signature spectrale d'objet de référence permet d'évaluer la qualité de ces corrections.

Pour les données bathymétriques (LIDAR & acoustiques), il est important de s'assurer du système de référence vertical (IGN69 ou Zéro Hydrographique) utilisé pour la fourniture des données.

| Méthode de délimitation des herbiers

Jusqu'à présent, la cartographie des zones de zostères était majoritairement réalisée par une digitalisation manuelle, sur écran, basée sur de la photo-interprétation. Cette technique s'avère limitante compte-tenu de sa dépendance à l'expertise et la perception des opérateurs. Pour réaliser cette étape, qui sera réitérée au cours du temps lors des cartographies successives, il semble donc préférable d'utiliser des traitements automatiques affectés d'une erreur identique au cours du temps. De plus, la classification automatique présente l'avantage d'être moins coûteuse en temps nécessaire à l'interprétation. Elle permet par ailleurs de s'affranchir de tous les problèmes de topologie.

Cependant, les recommandations pour des traitements automatiques concernent principalement les images optiques pour lesquelles des algorithmes éprouvés par la communauté scientifique existent. Pour les images acoustiques, des avancées restent encore à accomplir pour que des traitements automatiques délimitant les herbiers soient appliqués de manière systématique.

| Algorithmes de traitement

Des logiciels perfectionnés offrent une gamme d'outils évolués qui couvrent tous les aspects du traitement des données. Des retours d'expériences soulignent toutefois les difficultés suivantes :

- o confusion potentielle entre herbier et macroalgues (notamment algues vertes) ;
- o difficulté d'identification des herbiers peu denses.

Les nouvelles approches de classification (ex. deep learning) semblent présenter une voie d'amélioration des résultats des traitements automatiques. Elles nécessitent cependant la construction d'une solide base de données de référence pour l'apprentissage et la validation du modèle.

Par ailleurs, l'évolution des outils en termes de capteurs (résolutions spatiales et spectrales différentes) et méthodes de traitements (algorithmes différents) peut entraîner des différences en termes de produits cartographiques et notamment des erreurs dans le calcul du différentiel. Il est donc important d'opter pour des procédures de traitement minimisant les biais dans l'estimation de l'évolution de son extension.

5.3.3. La validation

Les données d'échantillonnage sont collectées pour deux usages :

1. d'une part pour la calibration des algorithmes utilisés pour le traitement du support cartographique (imagerie optique, données acoustiques) ;
2. d'autre part pour la validation de la cartographie afin de tester les résultats de la classification et la précision spatiale de la carte une fois que celle-ci est produite.

Le Guide MESH ("Guide de cartographie des habitats marins," 2008) suggère de réserver environ 30 % des échantillons pour la validation de la cartographie. Le choix de ces échantillons peut se faire de manière aléatoire, ou mieux encore de manière aléatoire stratifiée, pour que l'on puisse disposer d'un nombre suffisant d'échantillons de chaque type représenté sur la carte.

Règles d'acquisition des données d'échantillonnage pour la validation

Une partie de l'erreur vient de la donnée de référence elle-même. Ainsi, on peut recommander les choix suivants :

- avoir un ensemble d'échantillons représentatif de la variabilité du site à répartir en fonction des différentes configurations de l'herbier (homogène, présence de macroalgues, dense, peu dense, immergé, émergé, etc.) ;
- prévoir un effort d'échantillonnage qui intègre de manière significative les zones de faible densité et la présence de macroalgues ;
- se positionner au centre d'une zone homogène de rayon supérieur à un minimum de 3 fois la résolution de l'image pour pallier les imprécisions du positionnement GPS.

L'évaluation de la qualité de la carte est réalisée par le critère d'exactitude qui mesure le pourcentage de pixels correctement classifiés sur le jeu de données de validation. Elle est obtenue par une matrice de $N \times N$, dite matrice de confusion, où N est le nombre de classes. (Figure 38).

		Image classifiée	
		Herbier	Non herbier
Terrain	Herbier	A Vraie présence	B Fausse Absence
	Non herbier	C Fausse Présence	D Vraie absence
Exactitude de la carte (%)= $[(A+D) / (A+B+C+D)] * 100$			

Figure 38.

Exemple de matrice de confusion pour l'évaluation de la qualité de la carte de distribution des herbiers

Les cellules de la diagonale principale correspondent aux prédictions correctes (celles qui coïncident avec la réalité), et les autres cellules aux prédictions erronées. **L'exactitude globale de la carte** est obtenue par la somme des cellules de la diagonale principale, divisée par le nombre total, le tout multiplié par 100.

5.3.4. Comparaison temporelle des emprises d'herbiers

Afin de disposer de données comparables au cours du temps, il convient de normaliser la collecte et le traitement des données, quels que soient le capteur et la plateforme utilisés. Les critères suivants sont à prendre en considération :

- même trajectoire de vol ;
- hauteur du vol similaire ;
- angle de visée similaire ;
- levés à la même période ;
- niveau de la marée similaire ;
- même système de classification et de classes de taux de recouvrement ;
- même chaîne de traitement.

Une grande vigilance est cependant à observer sur la qualité de géoréférencement qui conditionne la qualité de détection des changements qui s'opèrent. Une comparaison avec une donnée de référence, par exemple l'ortholittorale, sur des points amers n'évoluant pas dans le temps peut aider à s'assurer de la qualité du géoréférencement.

Il est aujourd'hui possible de réaliser des levés à l'aide d'un drone qui offre une grande souplesse de mise en œuvre. La **Figure 39** montre un exemple de mosaïque d'image obtenue par drone sur une zone de présence d'herbier et de macroalgues (Duffy *et al.*, 2018). Associée à un logiciel de planification de mission, la navigation GPS du drone permet en effet de générer un plan de vol qui peut être répété à l'identique à intervalles réguliers. Cela en fait un outil très intéressant pour le suivi de la dynamique de l'herbier à haute fréquence temporelle. Toutefois, cet outil n'est envisageable que sur de faibles étendues, par exemple sur des zones très dynamiques et à enjeux en terme de conservation et de gestion.

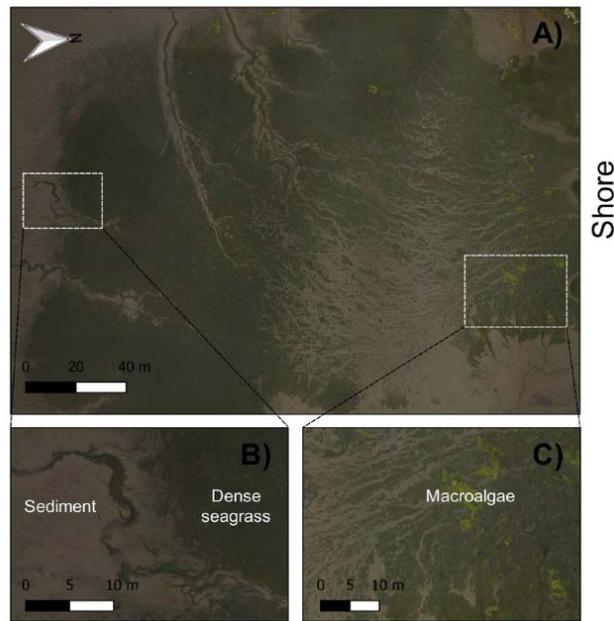


Figure 39.

Orthomosaïque d'un herbier de *Zostera noltei* à Garron Pill (Pays de Galles) d'après (Duffy *et al.*, 2018)

Recommandations pour la comparaison temporelle des emprises :

- (i) en cas d'évolution des algorithmes de traitement, il est important de retraiter le jeu de données précédent avec la nouvelle chaîne de traitement pour éviter d'introduire un biais lié à la méthode ;
- (ii) si au cours du programme de suivi un changement de capteur est opéré, une étude comparative avec l'ancien capteur est préconisée avec des levés sur une même zone et à la même période pour évaluer le biais lié au nouveau capteur.

5.4. Echantillonnage *in situ*

5.4.1. Rappel des besoins en données d'observation

Pour les besoins de calibration et de validation des traitements de données issues des levés cartographiques, mais également pour fournir une aide à l'interprétation et à l'exploitation pertinentes des résultats obtenus par les différentes directives (DCE, DHFF et DCSMM), le groupe de travail « GT Surfacing herbiers » a formulé la recommandation de collecter un certain nombre de données d'observations *in situ* à associer aux levés surfaciques. Il s'agit :

- du taux de recouvrement (zostères intertidales) ou la densité des pieds (zostères subtidales) ;
- de la biomasse foliaire sur un ensemble de stations représentatives de la gamme de taux de recouvrement (zostères intertidales) rencontrés sur le site ;
- du degré de fragmentation de l'herbier.

Pour compléter les données *in situ*, il est également souhaitable de recueillir des informations supplémentaires sur la nature et l'intensité des pressions s'appliquant sur les herbiers. Les sections qui suivent présentent des recommandations pour la collecte de ces données.

5.4.2. Stratégie d'échantillonnage sur le terrain

Le nombre optimal de stations dépend de la variabilité des herbiers dans le site d'étude. De plus, le nombre de mesures (taux de recouvrement, densité, etc.) par station doit être suffisant pour une estimation statistique des valeurs moyennes.

Les stations d'échantillonnage sont à répartir en fonction de la typologie des herbiers présents sur le site selon les critères illustrés par la **Figure 40** :

- la densité : herbier clairsemé, herbier moyennement dense, herbier dense ;
- la fragmentation : herbier homogène (grande tache uniforme sans interruption), herbier fragmenté (taches avec une proportion de sable inférieure à celle de l'herbier au sein de l'enveloppe globale) et herbier très fragmenté (taches avec une proportion de sable plus importante que l'herbier au sein de l'enveloppe globale).

Si la zone d'échantillonnage présente des gradients, par exemple un gradient de pression, un plan d'échantillonnage stratifié peut aider à réduire la variabilité des résultats d'échantillonnage. De même, il peut être avantageux de procéder à un échantillonnage des herbiers en fonction de la bathymétrie car des paramètres peuvent changer de manière marquée en fonction de la profondeur (densité des zostères marines).

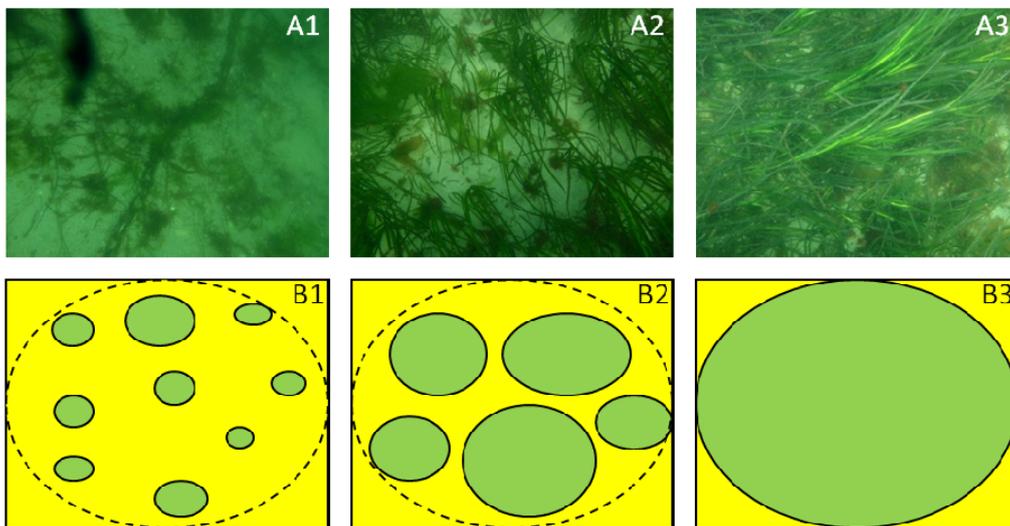


Figure 40.

Illustration de la typologie assignée aux herbiers en fonction de la densité (Herbier clairsemé-A1, Herbier moyennement dense-A2, Herbier dense-A3) et de la fragmentation (Herbier très fragmenté-B1, fragmenté-B2 et homogène-B3). D'après Lejart et Larzillière (2012).

Une prospection du site, préalable à l'initialisation du projet de cartographie peut être d'un grand intérêt pour élaborer une stratégie d'échantillonnage optimale et adaptée au site d'étude.

5.4.3. La planification des observations *in situ*

Les campagnes d'acquisition des données *in situ* doivent être planifiées en avance pour que l'opérateur de terrain puisse acquérir des observations représentatives de l'ensemble du site étudié.

Pour la planification du travail sur le terrain, le recours aux cartographies précédentes (lorsqu'elles existent), aux images satellites, aux Ortholittorales V2 ou aux images du Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr>) peut s'avérer très utile. De même, des données de bathymétrie ou à défaut une carte marine sont d'un grand intérêt pour rechercher les gradients de profondeur.

Idéalement, les campagnes de mesure de radiométrie sont programmées pour le même jour et la même heure que l'acquisition des images aériennes ou satellite. En pratique, ce n'est pas toujours possible, notamment dans le cas des images satellite où l'opérateur est averti de leur acquisition *a posteriori*.

Les mesures d'abondance (taux de recouvrement, densité, biomasse) nécessitent quant à elles d'importants moyens humains, notamment pour les grands sites. Elles peuvent s'étaler sur plusieurs semaines tout en veillant à ce qu'elles ne soient pas trop éloignées de la date de réalisation des levés. Il faudra alors noter tout événement majeur non observé le jour des levés aériens (développement important de macroalgues, tempêtes, etc.).

Recommandations pour le plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage prévisionnel (PEP) peut être modifié ou complété sur le terrain afin de l'ajuster à la configuration du site et à la période de réalisation des levés optiques et acoustiques.

Dans la mesure du possible, les positions des stations d'échantillonnage prévues par le PEP doivent être ajustées sur le terrain pour une localisation au centre de zones homogènes, afin de pallier le problème potentiel de précision du GPS.

Il est également recommandé de prévoir un effort d'échantillonnage plus important pour les zones de faibles taux de recouvrement ou de présence d'herbiers en mélange avec les macroalgues.

5.4.4. Optimisation de l'effort d'échantillonnage

Quel que soit le capteur utilisé, il est indispensable de disposer de données *in situ* en nombre suffisant pour permettre une validation statistique robuste des traitements appliqués.

En zone subtidale, l'utilisation de profils vidéo permet d'acquérir un nombre important d'observations *in situ*. En revanche, en zone intertidale, l'acquisition des données de terrain peut s'avérer difficile, notamment dans les secteurs vaseux. Le drone présente alors une alternative intéressante pour multiplier le nombre d'observations.

En effet, les images acquises par drones offrent des capacités de photo-interprétation pouvant aller jusqu'à l'espèce (Figure 41). Pour ce faire, il est recommandé d'effectuer un vol à faible hauteur (< 5m).

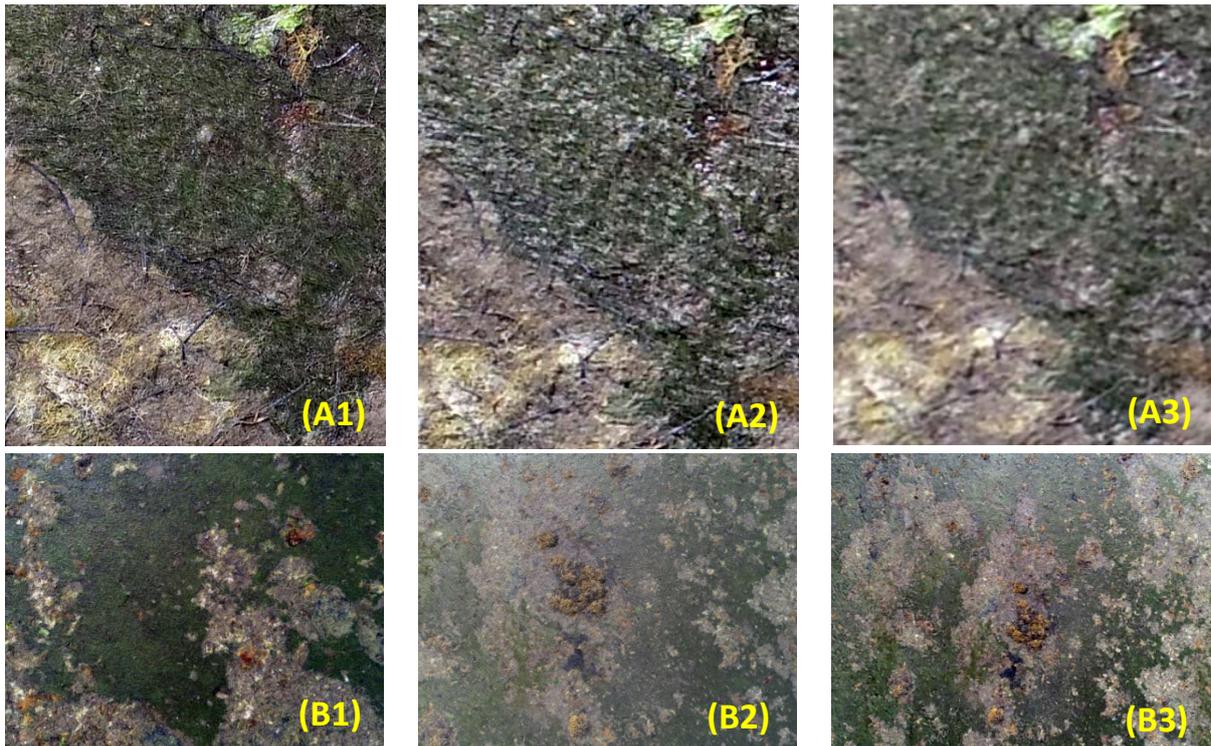


Figure 41.

Herbier de *Zostera noltei* (A) et macroalgues (B) photographiés par un drone Phantom 4 Pro équipé d'une caméra 20 mp à différentes altitudes (1 : 5 m, 2 : 10 m, 3 : 15 m)

5.4.5. Collecte d'informations contextuelles

Afin de caractériser l'ensemble du site d'étude et de disposer d'éléments de diagnostic utiles pour le suivi de l'évolution de l'extension des herbiers, il est recommandé, dans la mesure du possible, de collecter certaines informations complémentaires relatives aux pressions. En fonction des besoins des différentes directives et des moyens disponibles, les données suivantes pourront être recueillies (Tableau 9.) :

1. Données relatives aux perturbations naturelles :

- (i) **Le relief de l'herbier** dépend principalement de l'érosion du sédiment sous l'action de la houle et des courants qui peut former des microfalaises visibles au sein et entre les patches d'herbiers (donnée locale).
- (ii) **La bioturbation apparente**, qui se manifeste en surface par la présence de monticules de sédiment de tailles variables et qui correspond à l'activité de l'endofaune (donnée locale). Elle est susceptible d'avoir des effets négatifs sur les zostères (recouvrement éventuel par les sédiments).
- (iii) **La présence et l'abondance des oiseaux** herbivores consommant les zostères (données à l'échelle d'un site).

2. **Données relatives aux pressions anthropiques** : Les herbiers de zostères sont très sensibles aux différentes perturbations, notamment anthropiques, qui modifient leur environnement. Les extractions portuaires et dragages de sédiments remettent

notamment en suspension les sédiments fins, diminuant ainsi l'éclairement subaquatique. De même, les activités humaines liées à la pêche et au tourisme (mouillages de corps-morts, pêche à pied et au filet, activités touristiques, etc.) ont un possible impact négatif sur ces herbiers. Collecter des informations sur les pressions présentes sur le site d'étude constitue donc une information d'importance pour le suivi des herbiers (données à l'échelle d'un site).

A l'échelle locale, il est recommandé de réaliser des prises de vue générales sur chacun des sites lors de leur échantillonnage, en associant à chaque photo un point GPS et une direction. Ceci permettra de renseigner la physiographie, le degré d'hétérogénéité des herbiers et la présence de macroalgues.

5.4.6. Positionnement des stations et contour GPS

Le GPS (Global Positioning System) est devenu un outil incontournable pour la localisation des données d'observation. Des recommandations ont été formulées dans le cadre du Rebut pour l'usage de cet outil (Rollet, 2005).

Il est nécessaire de :

- s'assurer de la précision d'acquisition pour garantir une précision métrique (ex. une précision métrique nécessite 5 décimales si la mesure est en dd mm.mmmmm) ;
- s'assurer du système de positionnement (WGS84). La sélection d'un mauvais système géodésique peut provoquer d'importantes erreurs de positionnement ;
- s'assurer d'une bonne configuration des satellites (pour une bonne précision, le GPS doit réceptionner au minimum le signal de 4 satellites) ;
- préférer un DGPS à un GPS.

Si le relevé des contours est réalisé à des fins de validation de la segmentation de l'image, il convient de confirmer prioritairement les limites d'étendues spécifiques, par exemple des herbiers dont la bordure n'est pas bien distincte sur l'image.

Tableau 9. Types et exemples d'informations contextuelles pouvant être collectées sur le site d'étude			
Type	Source	Catégorie	Exemples d'information
Prises de vue d'ensemble		Informations générales	<ul style="list-style-type: none"> - Présence ou absence de macroalgues - Degré d'hétérogénéité des herbiers - Structure physiographique (présence de coursière, zone d'écoulement d'eau, etc.)
Perturbations naturelles	Kerninon et Bernard, 2015	Bioturbation apparente	<ul style="list-style-type: none"> - Absente : aucun monticule de sédiment lié à l'activité de l'endofaune n'est observé à la surface de la zone d'herbier. - Occasionnelle : la zone d'herbier présente quelques monticules de sédiment liés à l'activité de l'endofaune qui sont espacés les uns des autres, ceux-ci n'affectent pas le recouvrement de l'herbier. - Elevée : la zone d'herbier est fortement impactée par les monticules de sédiment liés à l'activité de l'endofaune. Le recouvrement par du sédiment est alors égal, voir supérieur au recouvrement en zostères naines ou marines.
		Présence d'oiseaux brouteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Des informations sur le nombre de Bernaches cravants (<i>Branta bernicla</i>) et autres oiseaux brouteurs d'herbiers (canards, cygnes, etc.) pourraient être recherchées à partir des comptages collectifs et réguliers de pêcheurs à pied de loisir ou encore lors de comptages ornithologiques (Réseau National Bernaches, LPO, Bretagne vivante, recensements Wetlands, etc.)
		Relief	<ul style="list-style-type: none"> - Herbier plat. - Présence de relief visible sous forme de microfalaises, petites cuvettes et/ou monticules.
Pressions anthropiques	Lepareur, 2011	Perturbations physiques	<ul style="list-style-type: none"> - Degré d'artificialisation : (présence/absence de structures artificialisées (endiguements, enrochements, bétonnage, épis, canalisations, installations portuaires ...)) - Intensité du mouillage (nombre de bateaux) - Remaniement du sédiment par pêche à pied, chalutage, clapage, etc. - Pêche à pied (nombre de pêcheurs) - Marques de piétinement
		Pollution	<ul style="list-style-type: none"> - Sources potentielles de nuisances proches (émissaires, ports, rejets de dragages) - Présence d'algues vertes opportunistes (<i>Ulva</i>, <i>Enteromorpha</i>, <i>Cladophora</i>) - Présence de macrodéchets, filets et autres engins de pêche, mouillages perdus, corps morts - Présence de traces d'hydrocarbures, etc.

5.4.7. Prise de photographies

Les photographies constituent un élément important des données collectées sur le terrain car elles représentent la mémoire des observations effectuées (biocénose rencontrée, nature du substrat, etc). Elles doivent être prises systématiquement pour chaque observation, prélèvement afin de pouvoir valider l'interprétation et de contrôler la bonne évaluation des taux de recouvrement des herbiers.

La quantité de photos pouvant être importante, une gestion rigoureuse s'impose afin d'éviter les éventuels problèmes d'intégration dans le système de bancarisation final. Ainsi il est nécessaire :

- d'associer un point de localisation GPS à chaque photo ;
- noter éventuellement l'orientation de la prise de vue (NE, S, etc.) ;
- d'attribuer à chaque photo un nom unique pour l'ensemble du site ;
- de respecter la nomenclature des fichiers proposée dans les spécifications techniques de format de données.

La prise d'une ou plusieurs photos doit être réalisée à la verticale en plein cadre (**Figure 42**), en prenant garde à ce que l'ombre soit répartie sur toute la photo (parasol ou opérateur). Poser sur le côté du quadrat **une étiquette permettant d'identifier de façon unique la station**. Eviter toute configuration pouvant fausser l'estimation automatique du taux de recouvrement. Des exemples sont illustrés par la **Figure 42**.

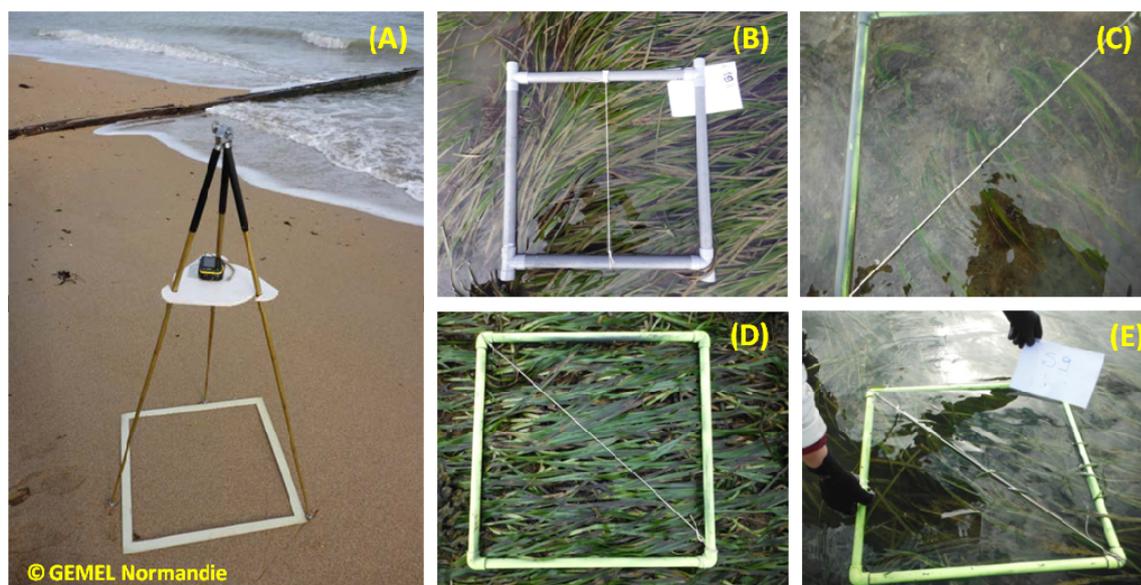


Figure 42.

Support utilisé par le GEMEL Normandie. © GEMEL Normandie (A) et exemple de configurations à éviter pour les prises de photos : ombre + eau en surface + étiquette non lisible + étiquette qui déborde sur le quadrat (B) ; quadrat complètement coupé, ombre très présente, pas d'étiquette (C) ; belle photo mais oublié d'étiquette (D) ; quadrat vu de biais, beaucoup d'eau, beaucoup d'ombre (E).

5.4.8. Echantillonnage en zone intertidale

Afin de garantir la cohérence avec le suivi stationnel, les recommandations contenues dans ce paragraphe et le suivant sont en grande partie extraites de la dernière version du protocole d'échantillonnage des herbiers de zostères de Manche-Atlantique (Auby *et al.*, 2018), complétées par des informations pertinentes pour le suivi surfacique.

| Matériel

Pour l'estimation des taux de recouvrement :

- 1 quadrat plat 50 X 50 cm soit 0,25 m², éventuellement muni d'un support permettant de fixer l'appareil photo ;
- 1 appareil photo numérique préalablement configuré de sorte que les photos soient de bonne qualité et que la taille de stockage reste raisonnable (une résolution de 1600*1200 pixels environ est suffisante). En l'absence de support, prévoir un pied d'appareil photo ;
- Poches en plastique préalablement numérotées avec le nom de la station et l'année. Le numéro du quadrat sera ajouté sur le terrain au fur et à mesure des prélèvements ;
- 1 GPS configuré en WGS84, d'une précision inférieure à 2 mètres, avec éventuellement les coordonnées des points ont été préalablement saisies si la planification de terrain a été possible à partir des informations disponibles ;
- 1 plaque en formica ou une feuille pour écriture en milieu humide ;
- 1 plaquette formica avec marqueur effaçable pour indiquer le code des points ;
- 1 parasol si le temps est ensoleillé (ou placer un préleveur de manière à faire une ombre uniforme sur le quadrat).

| A faire sur le terrain

Mesures du taux de recouvrement des herbiers

Dans chaque zone homogène, on réalise trois répliquats (quadrats)

Une observation sur un quadrat comporte :

- la pose du quadrat de 50 X 50 cm ;
- la prise d'une ou plusieurs photos à la verticale, en plein cadre, et en s'assurant de l'homogénéité de la lumière (parasol si nécessaire) ;
- l'estimation visuelle des taux de recouvrement des zostères avec report sur la feuille terrain de la valeur estimée. Cette estimation sera validée au laboratoire à l'aide du logiciel ImageJ (*cf.* annexe § 9.2) ;
- l'évaluation du taux de recouvrement des herbiers par les dépôts de macroalgues est notée pour chaque quadrat. En cas de présence, noter le type (algues rouges, vertes, brunes) ;
- l'évaluation de l'abondance de l'épibiose des herbiers (algues calcaires ou filamenteuses, spirorbes ou film biosédimentaire) surtout visible pour *Zostera marina* (**Figure 43 gauche**) ;
- l'observation des signes de la maladie du dépérissement pour *Zostera marina* (Burdick *et al.*, 1993) (**Figure 43 droite**).



Figure 43.

Épibiontes sur des limbes de *Zostera marina* (à gauche) et signes d'atteinte par la maladie du dépérissement (à droite).

Mesure de la densité des herbiers

Cette mesure ne s'applique qu'aux herbiers de zostères marines. En effet, les densités de zostères naines sont trop élevées pour permettre leur dénombrement sur le terrain.

Dans chacune des zones homogènes retenues, le nombre total de pieds de zostères marines est évalué *in situ* à partir de 2 ou 3 quadrats de 0,1 m² :

- dans les herbiers à forte densité (> 200 pieds/m²) deux quadrats de 0,1 m² ;
- dans les herbiers à faible densité (< 200 pieds/m²) trois quadrats de 0,1 m².

Si la mesure *in situ* n'est pas possible en totalité, les comptages restants s'effectueront au laboratoire sur les plants de zostères marines prélevés pour les mesures de biomasses. Pour chaque quadrat, la valeur de densité est ensuite ramenée au m².

Prélèvements pour l'estimation de la biomasse des herbiers

La surface d'échantillonnage est délimitée au moyen d'un quadrat de 0,1 m² et la matre contenue dans ce quadrat est prélevée de préférence à la main (et à défaut au moyen d'une truelle), après avoir pris soin de rabattre les feuilles de zostères à l'intérieur du quadrat pour ne pas les couper. Trois réplicats seront échantillonnés pour chaque station.

Cette mesure ne s'applique qu'aux herbiers de zostères marines. En effet, la relation entre biomasse épigée et recouvrement a déjà été établie pour *Zostera noltei* (cf. **Figure 2**), ce qui rend inutile l'acquisition de ce paramètre.

Mesure de la fragmentation

L'hétérogénéité et le dynamisme des herbiers se traduisent par une alternance de zones végétalisées et de substrat plus ou moins nu au sein de l'enveloppe. Une zone d'herbier peut être considérée comme « fragmentée » lorsqu'elle présente des patchs de substrat non végétalisé supérieurs à 2 mètres, échelle couramment utilisée et cohérente au niveau fonctionnel ainsi que pour la cartographie. Cette fragmentation peut être naturelle (hydrodynamisme, bioturbation) ou résulter d'activités anthropiques (piétinement, mouillage).

L'évaluation de la fragmentation de l'herbier peut par exemple être réalisée à l'échelle stationnelle par des relevés *in situ* le long de transects gradués ou géoréférencés d'au moins 50 m (McKenzie *et al.*, 2001; Short *et al.*, 2006). Ils sont disposés sur la zone d'herbier à étudier, en intertidal ou subtidal (surface en gris sur la **Figure 44**). Pour chaque transect, les

entrées et sorties de patches de zostères sont notées (graduation du transect). Les zones de sédiment nu sont caractérisées selon que le substrat est colonisable (sédiment fin à grossier) ou non (bloc, roche ou support artificiel). Ceci permet *a posteriori* de localiser les patches végétalisés et de caractériser la fragmentation de la zone (**Tableau 10**).

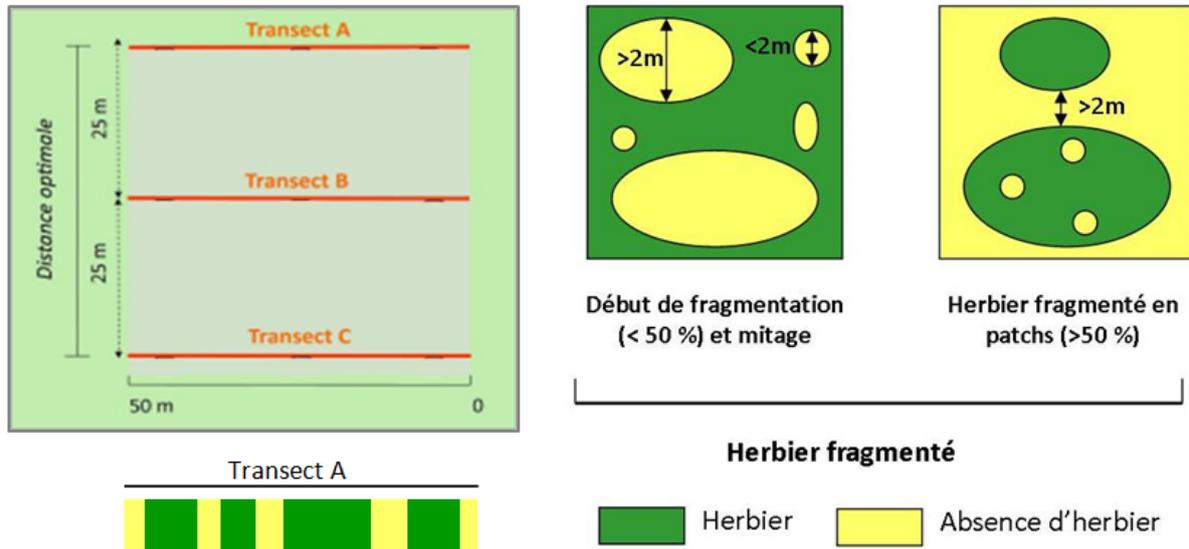


Figure 44.

Représentation schématique du positionnement des transects et de la fragmentation d'un herbier (d'après Kerninon 2012)

Tableau 10. Exemple de paramètres caractérisant la fragmentation à l'échelle d'un transect	
Paramètres	Description
Nombre de patches	Nombre de patches de zostères par transect
Taille des patches d'herbiers	Longueur des patches d'herbiers
Taux de fragmentation	Pourcentage de zone de substrat nu d'une longueur supérieure à 2 mètres par transect
Substrat nu	Colonisable (sédiment fin à grossier) Non colonisable (bloc, roche ou support artificiel)

| A faire au laboratoire

Estimation du taux de recouvrement des herbiers

Il s'agit de conforter le taux de recouvrement donné par l'observation visuelle sur le terrain et de minimiser les biais liés à l'opérateur.

- Dès le retour au laboratoire, renommer les fichiers photo (clichés sans macroalgues) par leur code de point : Code site_Code station – Date Numéro chrono ;
- Pour les classes extrêmes (0 et 100 %), l'estimation visuelle sur le terrain suffit. Pour les autres classes de recouvrement, il est possible de standardiser la mesure par estimation automatique du taux de recouvrement en utilisant le logiciel Image J (cf. Annexe § 9.2). Le potentiel biais lié à l'opérateur peut ainsi être écarté.

Biomasses

Pour chaque échantillon, on pèse séparément les limbes, les gaines et les parties souterraines (rhizomes + racines). La pesée se fait à 0,1 g (résolution de la balance 0,01 g minimum).

Avant la pesée, à la sortie de l'étuve ou du four, l'échantillon doit être placé dans un dessiccateur (boîte étanche avec gel de silice) afin d'éviter une reprise d'humidité pendant son refroidissement.

- mesurer le poids sec PS (après 48 h minimum à l'étuve à 60 °C) de l'ensemble des limbes depuis le haut de la gaine jusqu'en haut de la feuille) ;
- mesurer le PS (après 48 h minimum à l'étuve à 60 °C) de l'ensemble des gaines (depuis le nœud basal jusqu'au sommet de la gaine) ;
- mesurer le PS (après 48 h minimum à l'étuve à 60 °C) des rhizomes et des racines.

5.4.9. Echantillonnage en zone subtidale (*Zostera marina*)

| Matériel

- GPS configuré en WGS84, d'une précision inférieure à 2m ;
- truelle ;
- cadres ou carottiers 0,04 m² (cadre : 20 cm de côté) ou 0,1 m² (cadre : 31,6 cm de côté) ;
- sacs plastique pour les végétaux ;
- appareil photo étanche ;
- profondimètre ;
- filet pour prêtertamiser le sédiment (maille de 2 mm) ;
- bout de 10 m de long marqué tous les mètres, avec système de fixation dans le sédiment à chaque extrémité.

| Sur le terrain

En subtidal, les quadrats de la même station sont disposés par les plongeurs sur un même niveau bathymétrique notifié sur la fiche de terrain. Sur chaque quadrat, les opérations sont les suivantes :

- Comptage du nombre de pieds de zostères *in situ* ;
 - dans les herbiers à forte densité (> 200 pieds/m²) deux quadrats de 0,1 m² ;
 - dans les herbiers à faible densité (< 200 pieds/m²) trois quadrats de 0,1 m² ;
- Prélèvement de l'ensemble de la matre (pieds de zostères avec rhizomes), dans trois quadrats de 0,1 m², 10 au moyen d'un carottier de surface adéquate enfoncé dans le sédiment ; le bord du carottier doit être suffisamment haut et fin pour couper les rhizomes. A défaut, un couteau et/ou une truelle pourront être utilisés pour couper les rhizomes autour du carottier.

Quel que soit l'outil de prélèvement, il faudra veiller à ne pas sectionner les feuilles de zostères.

L'ensemble de la matre est ensuite tamisé sur le terrain (maille de 2 mm), pour éliminer l'essentiel du sédiment. Cette opération doit être réalisée avec précaution pour ne pas abimer les pieds de zostères. Chaque prélèvement est mis en sacs : un sac par quadrat/carottier si la surface prélevée est de 0,1 m².

| Au laboratoire

Les prélèvements destinés à la biométrie et aux biomasses peuvent subir le même traitement ou être congelés à -20 °C. Dans ce dernier cas, au moment du traitement de l'échantillon de matre, il faudra veiller à bien séparer les macroalgues des zostères avant l'analyse de biomasse.

Densité des zostères sur l'échantillon de matre prélevé

Pour chacun des échantillons, dénombrer les pieds.

Biomasses

Pour chaque échantillon, on pèse séparément les limbes, les gaines et les parties souterraines (rhizomes + racines). La pesée se fait à 0,1 g (résolution de la balance 0,01 g minimum) de la manière suivante :

- avant la pesée, à la sortie de l'étuve ou du four, l'échantillon doit être placé dans un dessiccateur (boîte étanche avec gel de silice) afin d'éviter une reprise d'humidité pendant son refroidissement ;
- mesurer le poids sec PS (après 48 h minimum à l'étuve à 60°C) de l'ensemble des limbes (depuis le haut de la gaine jusqu'en haut de la feuille) ;
- mesurer le PS (après 48 h minimum à l'étuve à 60°C) de l'ensemble des gaines (depuis le nœud basal jusqu'au sommet de la gaine) ;
- mesurer le PS (après 48 h minimum à l'étuve à 60°C) des rhizomes + racines.

5.4.10. Radiométrie

| Matériel

Le matériel requis est le suivant :

- spectroradiomètre de terrain couplé à un spectralon pour des mesures en réflectance (l'empreinte au sol de la superficie acquise par le spectroradiomètre doit être connue) ;
- GPS de terrain ;
- quadrat adapté à la résolution de l'image acquise (par exemple, quadrat de 50 cm x 50 cm pour une image Pléiades) ;
- matériel de prise de notes ;
- appareil photo ;
- boussole pour noter l'orientation de la prise de photo.

|Sélection des stations d'observation

Pour pallier les différences des précisions de positionnement des observations et de l'imagerie, il est recommandé, dans la mesure du possible, de choisir des stations d'observations homogènes sur la plus grande surface possible.

Afin que les observations représentent au mieux l'ensemble du site étudié, tous les éléments caractéristiques de la zone doivent être observés :

- les herbiers de *Z. marina* et ou *Z. noltei* ;
- les macroalgues rouges, vertes ou brunes ;
- les substrats : roche, sable, vase, galets, etc. ;
- les cibles doivent être recherchées pures (taux de recouvrement de 100 %) et à différents taux de mélange, d'humidité voire d'immersion.

|Observation et mesures radiométriques

Il est recommandé de procéder comme suit :

- positionnement du quadrat sur la cible ;
- prise d'une première photographie verticale qui ne représente que le quadrat. Elle est réalisable à hauteur d'homme ;
- prise d'une seconde photographie de l'environnement proche à hauteur d'homme (photo oblique). L'orientation de cette prise doit être renseignée sur la fiche de terrain ;
- géolocalisation du centre du quadrat avec un GPS de terrain ;
- estimation visuelle des taux de couverture des espèces/substrats en présence. La somme de tous les constituants devant atteindre 100% ;
- relevé d'informations complémentaires éventuelles (par exemple : « quadrat immergé sous 10 à 15 cm d'eau ») ;
- le quadrat est retiré pour permettre la mesure de réflectance. Celle-ci doit être verticale et à une hauteur permettant d'avoir une empreinte au sol similaire à celle du quadrat. Lors de la mesure, l'opérateur doit veiller à se positionner de manière à éviter toute ombre sur la cible.

Pour chaque cible, plusieurs mesures de réflectance (au moins 3, si possible) au spectroradiomètre de terrain sont effectuées. Si la zone environnante est homogène, ces 3 spectres sont pris aléatoirement autour du point GPS. Si la zone n'est pas suffisamment homogène, les spectres sont pris au même endroit. La gamme spectrale échantillonnée doit couvrir celle du capteur aérien ou satellitaire.

En cas d'acquisition de signatures spectrales en zone submergée, il faut veiller à positionner le spectroradiomètre à hauteur constante de la cible et du spectralon.

5.4.11. Vidéo sous-marine

Le principe est de réaliser des transects vidéo en remorquant, à partir d'une embarcation légère équipée d'une potence, un système de vidéo tracté équipé d'une caméra filmant en direction du fond.

Les équipements existants sont variés (Figure 45), l'idéal étant un système avec retour vidéo temps réel pour s'assurer de la bonne qualité des images. A défaut, des validations ponctuelles d'absence/présence sur des zones de faible profondeur peuvent être réalisées à l'aide d'une perche équipée d'une GoPro.

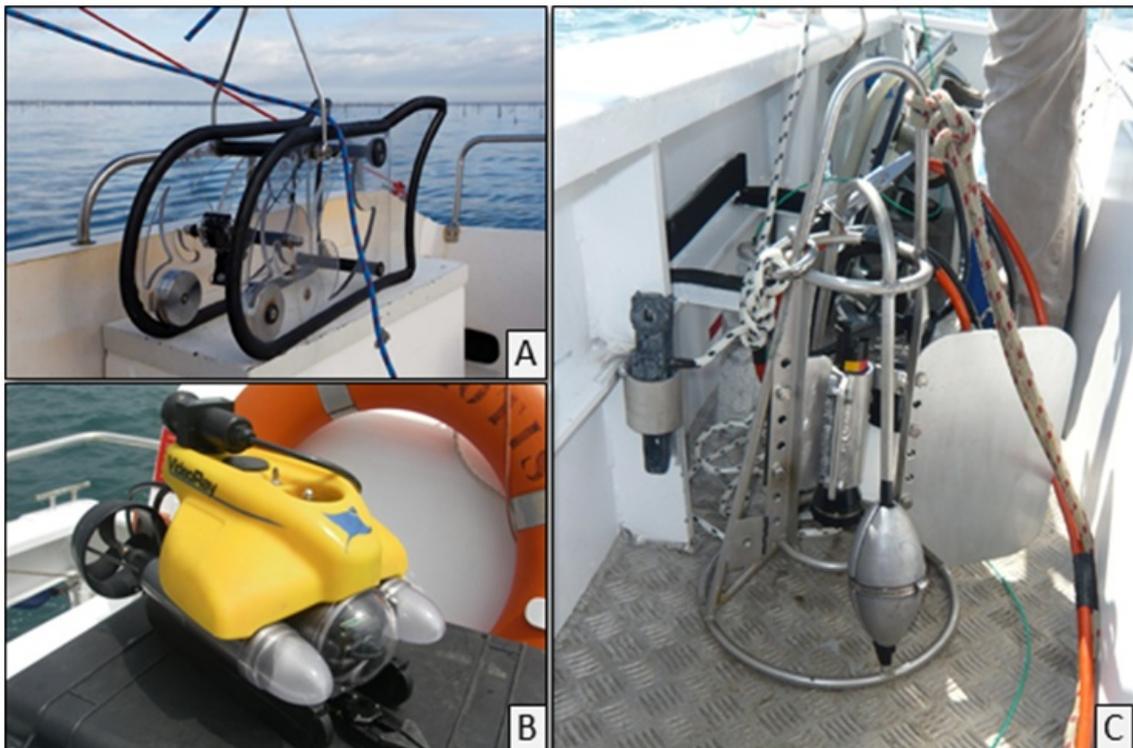


Figure 45.

Exemple de systèmes vidéos (A : poisson remorqué Moogli équipé d'une GoPro, B : mini-ROV Video Ray, C : bâti vidéo léger)

Des données de positionnement GPS doivent être enregistrées en parallèle des données vidéo (un point GPS toutes le 10 secondes au minimum) soit en configurant directement l'enregistrement de Waypoints par le GPS, soit en y connectant un PC muni d'un logiciel SIG. Dans les deux cas, il est indispensable de synchroniser au préalable l'heure de la caméra avec l'heure GPS afin de repositionner correctement les profils.

Avant la mise à l'eau du système vidéo, on filme à bord pendant quelques secondes une étiquette précisant le nom du site, la date et le numéro du transect (Figure 46). Elle permettra d'identifier rapidement le profil, de faciliter le renommage des fichiers vidéo et de positionner le profil en cas de panne GPS.

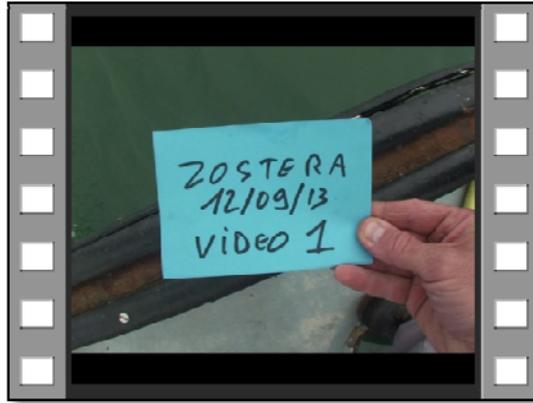


Figure 46.

Enregistrement de l'étiquette indiquant la date et le numéro du profil vidéo

Afin de produire des données vidéo exploitables et comparables entre elles, dans la mesure du possible on maintiendra pendant les transects une altitude constante et une vitesse faible de 0,4 à 0,8 nœuds (embarcation en marche ou en dérive). Les périodes d'étale sont donc à privilégier pour les acquisitions vidéo afin d'avoir un courant le plus faible possible.

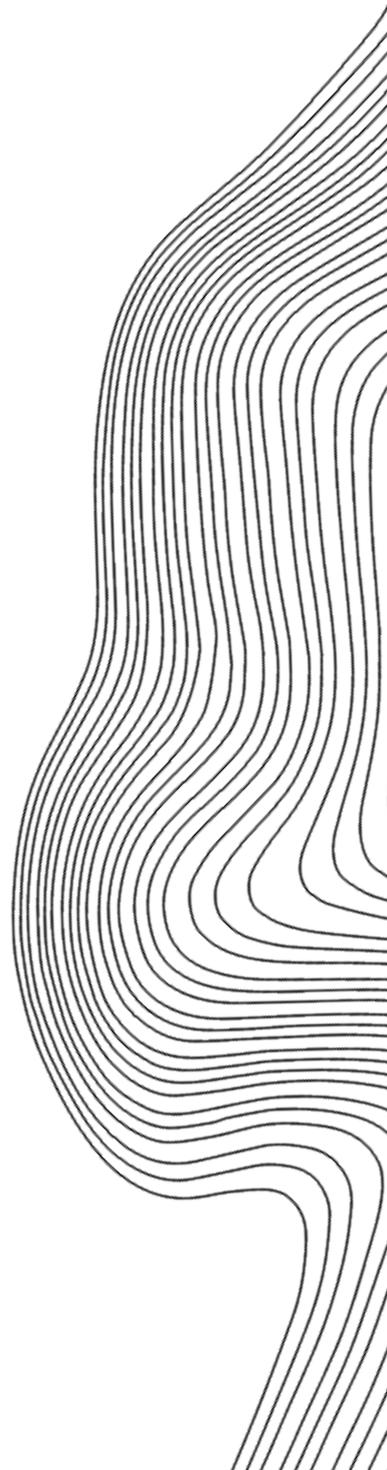
Il est recommandé de standardiser le nommage des fichiers vidéo selon la nomenclature suivante :

SSS_AAAA_V_NNN (SSS = trigramme nom du site ; AAAA pour année, V=Vidéo et NNN numero de la station, (Ex. ARC_2018_V_003)

L'analyse de vidéos fournira des informations en termes d'absence ou présence d'herbier, de recouvrement et d'état de fragmentation.

BANCARISATION

PROCESSUS QUALITE & LIVRABLES



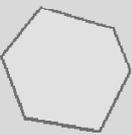
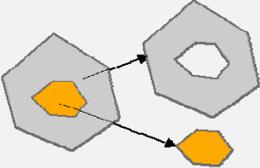
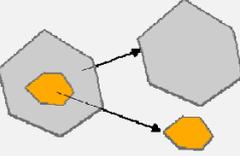
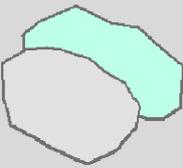
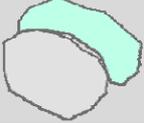
6. Contrôle qualité et bancarisation

6.1. Contrôle qualité des données

6.1.1. Topologie

La topologie se rapporte aux relations qui existent entre structures adjacentes. Elle peut sembler très éloignée des préoccupations de la cartographie des habitats, mais il est essentiel d'en tenir compte lorsque l'on crée des données cartographiques numériques, au même titre que les informations attributaires et les métadonnées.

En effet, certains géotraitements ne se déroulent correctement que si les couches de données vectorielles contiennent des structures topologiquement correctes. De même, l'intégration de ces couches dans des systèmes de bancarisation de référence, qui exigent de répondre aux standards internationaux, devient impossible sans la correction de ces erreurs topologiques. Le **Tableau 11** résume les contraintes topologiques à respecter impérativement lors de la génération de la couche de cartographie des herbiers :

Tableau 11. Règles topologiques à appliquer pour la création des couches de cartographie des herbiers			
Topologie valide		Topologie non valide	
	Un polygone doit avoir une structure topologique simple et conforme.		Polygone non fermé (les points de départ et d'arrivée sont distincts).
			Polygone comportant une intersection (nœud papillon).
			Polygone comportant un segment libre .
	Un polygone englobant doit être soustrait de la zone d'intersection avec le polygone englobé : polygone à trou.		Le polygone englobant n'est pas un polygone à trou.
	Deux polygones contigus doivent partager la même limite.		Un vide existe entre deux polygones contigus qui doivent partager la même limite.
	Chaque point de l'espace ne sera inclus que dans une seule zone.		Un chevauchement existe entre deux polygones.

6.1.2. Thématique

Le contrôle thématique est étroitement associé à la phase de validation des traitements appliqués pour cartographier les herbiers (cf. § 5.3.3). Une attention toute particulière doit être accordée aux étendues dont les limites sont particulièrement difficiles à capturer par des approches de télédétection : zone de très faible taux de recouvrement (< 10 %) et herbiers totalement recouverts par des macroalgues. Ces cas rappellent l'importance d'associer des observations de terrain aux levés optiques et acoustiques.

6.2. Livrables et formats

Suite au travail de cartographie, le prestataire fournira l'ensemble des données acquises et produites dans le cadre de l'étude du site. Les documents de synthèse doivent pouvoir être compréhensibles par tous (acteurs locaux, décisionnaires, public, etc.) tout en conservant une précision d'information suffisante.

Les données spatialisées acquises ou produites lors de l'inventaire cartographique concernent :

1. les données optiques et/ou acoustiques brutes et les données de navigation associées ;
2. les données optiques et/ou acoustiques prétraitées ;
3. les mosaïques d'images optiques et/ou acoustiques ;
4. la couche de cartographie des herbiers ;
5. les couches de données d'observation *in situ* (taux de recouvrement, biomasse, densité, fragmentation et radiales vidéo) ;
6. l'intégralité des fichiers relatifs aux observations *in situ* : photos, vidéos, etc. ;
7. les métadonnées spécifiques à chaque couche cartographique produite.

Le prestataire fournira également les rapports techniques de réalisation des levés optiques et acoustiques et le rapport d'étude final.

6.2.1. Données optiques et acoustiques

En plus des données prétraitées, toutes les données brutes doivent être livrées par le prestataire, de telle sorte qu'elles puissent être retraitées en cas d'amélioration des algorithmes et chaînes de traitements. Le **Tableau 12** liste l'ensemble de ces données ainsi que leurs formats.

Tableau 12.
Liste des livrables concernant les données de levés optiques et acoustiques

Type de levé	Description des données à fournir	Format
Levés optiques	- Images satellite ou aéroportées brutes	Géotiff, ENVI
	- Images satellite ou aéroportées prétraitées (corrections géométriques et radiométriques)	Géotiff, ENVI
	- Mosaïque RVB pour les images aéroportées	Géotiff, ENVI
	- Rapport technique d'acquisition	Docx, Odt, PDF
Levés acoustiques	- Sondeur monofaisceau (données brutes)	HAC
	- Sondeur monofaisceau (données prétraitées)	HAC, ascii
	- Sondeur monofaisceau (données traitées)	Shp, kmz
	- SACLAF	ascii
	- Sonar (données brutes)	XTF (le cas échéant, format constructeur)
	- Sonar (données prétraitées)	Géotiff
	- Mosaïque sonar	Géotiff
	- Rapport technique d'acquisition	Docx, Odt, PDF

6.2.2. Couche de cartographie des herbiers

Il s'agit de la couche cartographique de **type polygones** montrant les limites d'extension des herbiers pour les deux espèces, *Z. noltei* et *Z. marina*, présentes sur le site d'étude.

Il est recommandé d'utiliser une nomenclature permettant d'identifier le site concerné, l'année d'acquisition des données et la version du fichier. Par exemple : GDM_2018_zosteres_extension_V1r3.shp :

- GDM, trigramme correspondant au nom du site ;
- 2018 est l'année d'acquisition de la donnée ;
- les chiffres suivant V1 indiquent le numéro de version du fichier.

La table attributaire de cette couche doit contenir à minima les informations présentées dans le **Tableau 13** suivant :

Tableau 13. Attributs de la couche de cartographie des herbiers			
Champ	Format	Description	Typologie
ID	Numérique (Entier)	Identifiant du polygone	
CODE_SITE	Texte	Code européen du site	
SITE	Texte	Nom du site d'étude (Ex. masse d'eau DCE)	
SUPPORT	Texte	Type de support de délimitation des contours d'herbiers	<ul style="list-style-type: none"> - Photographies aériennes - Orthophotographies - Imagerie multispectrale - Imagerie hyperspectrale - Imagerie acoustique - Multi-Capteurs
DATE_SUPP	Date	Date du support de numérisation (jj/mm/aaaa)	jj/mm/aaaa
CAPTEUR	Texte	Nom du capteur utilisé	Si plusieurs supports, séparer par un « / » (ex. Pleiades/Sonar Latéral)
METHODE	Texte		<ul style="list-style-type: none"> - Contour GPS/DGPS - Photo-interprétation - Classification automatique - Autre
NOM_AUT	Texte	Nom de l'auteur du polygone	
PRENOM_AUT	Texte	Prénom de l'auteur du polygone	
ORG_AUT	Texte	Organisme de l'auteur du polygone	
COM_NUM	Texte	Commentaires divers sur la numérisation du polygone	
VALIDATION	Texte	Précise si oui ou non le polygone a été validé	<ul style="list-style-type: none"> - OUI - NON
METHOD_VAL	Texte	Précise la méthode utilisée pour la validation	<ul style="list-style-type: none"> - Observation terrain - Croisement d'informations - Signatures caractéristiques
DATE_VAL	Date	Date de la validation	jj/mm/aaaa
NOM_VAL	Texte	Nom du valideur du polygone	
PRENOM_VAL	Texte	Prénom du valideur du polygone	
ORG_VAL	Texte	Organisme du valideur du polygone	
COM_VAL	Texte	Commentaires divers sur la validation	
ESPECE	Texte		<ul style="list-style-type: none"> - <i>Zostera noltei</i> - <i>Zostera marina</i> - <i>Zostera sp.</i>
SURFACE_HA	Numérique (décimal)	Surface du polygone (en hectares)	
COMMENT	Texte	Permet la saisie de toute information complémentaire à celles contenues dans les autres attributs de la table.	

6.2.3. Couches d'observations *in situ*

Il s'agit d'une couche géographique de données ponctuelles qui contient les positions de localisation des stations d'observation, de prises des photos ou de prélèvements sur le terrain ainsi que l'ensemble des informations associées à savoir le taux de recouvrement, la biomasse, la densité, etc.

Tableau 14.
Liste des livrables pour les données d'observations *in situ*

Type de levé	Description des données à fournir	Format
Couches d'observations	- Points de mesures des paramètres taux de recouvrement, biomasse, densité et longueur des feuilles qu'elles soient réalisées en plongée ou à pied	Shp, kmz
	- Stations de mesures de la fragmentation	Shp, kmz
	- Radiales d'observations par vidéo	Shp, kmz
Fichiers Photos	- L'intégralité des photos prises <i>in situ</i>	JPG
Fichiers Vidéos	- L'intégralité des vidéos enregistrées <i>in situ</i>	MP4

Il est recommandé d'utiliser une nomenclature permettant d'identifier le site concerné, l'année d'acquisition des données et la version du fichier. Par exemple : GDM_2018_zosteres_observation_V1.shp.

Ces mêmes règles de nomenclature seront utilisées pour les fichiers photos et vidéo. Le **Tableau 15** présente la liste des champs que doit contenir la table attributaire des couche d'observations *in situ*.

Tableau 15.
Attributs de la couche d'observation *in situ*

Champ	Format	Description	Types d'observation		
			Quadrat/Transect	Vidéo	Radiométrie
ID	Numérique	Identifiant unique du point d'observation	x	x	x
COD_SITE	Texte	Code site si existe (DCE, Natura, etc.)	x	x	x
SITE	Texte	Nom du site d'étude (Ex. masse d'eau DCE)	x	x	x
TYPE_OBS	Texte	Précise le type d'observation : - quadrat - transect - vidéo - radiométrie	x	x	x
STATION	Texte	Identifiant unique de la station de l'observation.	x	x	x
QUADRAT	Texte	Référence du quadrat	x		x
COORD_X	Numérique en degré décimaux (dd.ddddd)	Longitude du point d'observation. Pour les transects et profils vidéo, il faut renseigner la coordonnée du début et de la fin.	x	x	x
COORD_Y	Numérique en degré décimaux (dd.ddddd)	Latitude du point d'observation. Pour les transects et profils vidéo, il faut renseigner la coordonnée du début et de la fin.	x	x	x
DATE_OBS	Date (JJ/MM/AAAA)	Date de l'observation en JJ/MM/AAAA	x	x	x
HEURE_OBS	HH:MM:SS	Heure de l'observation en HH:MM:SS	x	x	x
PROF_OBS	Numérique	Profondeur de l'observation	x		x
NOM_OP	Texte	Nom de l'opérateur sur le terrain	x	x	x
PRENOM_OP	Texte	Prénom de l'opérateur sur le terrain	x	x	x
ORG_OP	Texte	Nom de l'organisme d'appartenance de l'opérateur sur le terrain	x	x	x
NOM_PHOTO	Texte	Nom de la photo (Fichier *.jpg). Si plusieurs photos, séparer les noms de photos par un « / » (Ex. nomPhoto1.jpg/nomPhoto2.jpg)	x		x
DIR_PHOTO	Texte	Indique la direction de la photo	x		x
NOM_VIDEO	Texte	Nom du profil vidéo		x	
PRES_HERB	Texte	Indique la présence ou l'absence d'herbier à la surface de la canopée (OUI/NON)	x	x	x
ESP_ZOSTER	Texte	Indique le nom de l'espèce présente : <i>Zostera noltei</i> , <i>Zostera marina</i> ou <i>Zostera sp.</i>	x	x	x

Tableau 15 (suite)

Attributs de la couche d'observation *in situ*

Champ	Format	Description	Types d'observation		
			Quadrat/Transect	Vidéo	Radiométrie
TX_REC_ZOS	Numérique	Indique le taux de recouvrement de l'herbier estimé en %	X		X
BIOMASSE	Numérique	Indique la biomasse de la matière sèche en g/m ²	X		
DENSITE	Numérique	Indique la densité estimée (nombre d'individu/m ²)	X		
IND_FRAG	Numérique	Indique l'indice de fragmentation estimé en %	X		
PRES_WD	Texte	Indique la présence de la maladie Wasting Disease sur les feuilles d'herbier (OUI/NON)	X		X
PRES_EPIPH	Texte	Indique la présence d'épiphytes (OUI/NON)	X		X
TX_AR	Numérique	Indique le taux de recouvrement des algues rouges en %	X		X
TX_AV	Numérique	Indique le taux de recouvrement des algues vertes en %	X		X
TX_AB	Numérique	Indique le taux de recouvrement des algues brunes en %	X		X
TYPE_SUBST	Texte	Indique le type de substrat	X	X	X
TX_VASE	Numérique	Indique le taux de recouvrement de la vase en %	X		X
TX_SABLE	Numérique	Indique le taux de recouvrement du sable en %	X		X
TX_SED_GRO	Numérique	Indique le taux de recouvrement du sédiment grossier en %	X		X
TX_ROCHE	Numérique	Indique le taux de recouvrement de la roche en %	X		X
FAUNE	Texte	Description générale de l'observation terrain concernant la faune présente	X	X	
FLORE	Texte	Description générale de l'observation terrain concernant la flore présente	X	X	X
PRESSIONS	Texte	Description de l'observation terrain autre que la biocénose ou le substrat (ex. menaces, présence d'huîtres ou de moules, traces d'activités humaines, présence d'espèces non-indigènes, etc.)	X	X	
COMMENT	Texte	Commentaire général	X	X	X

6.2.4. Le système de projection

L'usage exclusif du système Lambert 93 est rendu obligatoire en France métropolitaine (Décret no 2006-272 du 3 mars 2006, publié au JO du 10 mars 2006). Les livraisons des couches finales sont par conséquent obligatoirement requises en Lambert 93 (**Tableau 16**).

Les données acoustiques brutes et les couches d'observation *in situ* doivent également être fournies avec le système de projection natif du GPS, à savoir le WGS84.

Code	Nom	EPSG	Caractéristiques
RGF93/ Lambert 93	Réseau Géodésique Français 1993	2154	- Unité: mètre - Geodetic CRS*: RGF93 - Datum : Reseau Geodesique Francais 1993 - Ellipsoïde : GRS 1980 - 1 ^{er} méridien : Greenwich
WGS84	World Geodetic System 1984 (utilisé pour le GPS)	4326	- Unité: degré - Geodetic CRS*: WGS 84 - Datum: World Geodetic System 1984 - Ellipsoïde: WGS 84 - 1 ^{er} méridien : Greenwich

CRS*: Coordinate reference system

6.2.5. Les métadonnées

Il s'agit d'un ensemble d'informations décrivant une couche de données géographiques (son producteur, son contenu, son type, sa qualité, sa disponibilité...).

L'existence des métadonnées et de l'information sur la qualité de la donnée permet une gestion et une utilisation judicieuse et pertinente des données :

- en permettant un accès facile à l'information décrivant la ressource (formalisation des caractéristiques descriptives, présentation standardisée, etc.) et à la ressource elle-même ;
- en assurant une traçabilité de la ressource à long terme (origine, protocole de création, modifications successives effectuées, etc.) ;
- en garantissant une meilleure connaissance des limites d'utilisation et de valorisation de la ressource (contenu, fiabilité, fréquence de mise à jour, domaines d'utilisation, etc.).

Il est demandé au prestataire de rédiger, pour l'ensemble des couches nouvellement produites, des fiches de métadonnées associées. Une structure contenant le minimum d'informations requises est proposée (**Tableau 17**). Elle tient compte des standards internationaux dans le domaine de l'information géographique utilisés et du système de bancarisation prévu pour la gestion des données surfaciques relatives aux herbiers.

Tableau 17.
Métadonnées recommandées pour la bancarisation des fichiers vecteurs

Rubriques	Description
Contact métadonnées	Nom du contact référent Prénom du contact référent Organisme du contact référent Rôle du contact référent Courriel du contact référent
Contact(s) sur la donnée	Nom(s) du(es) contact(s) du(es) référent(s) sur la donnée Prénom(s) du(es) contact(s) du(es) référent(s) sur la donnée Organisme(s) du(es) contact(s) référent(s) Rôle(s) du(es) contact(s) du(es) référent(s) sur la donnée Courriel(s) du(es) contact(s) du(es) référent(s) sur la donnée
Titre	Titre de la donnée
Citation	Référence à employer pour citer la donnée
Résumé	Descriptif du cadre projet dans lequel s'inscrit la création du fichier Résumé des principales étapes ayant conduit à la création du fichier
Source des données	Citations des sources de la donnée
Informations complémentaires	Informations complémentaires éventuelles et description des champs de la table attributaire
Référence temporelle	Date de création du fichier Date de début d'acquisition de la donnée Date de fin d'acquisition de la donnée
Contraintes d'accès et d'utilisation	Limitation d'utilisation Contraintes d'accès Contraintes d'utilisation Autres contraintes (par exemple citation)
Mots clés	Mots clés liés par exemple à la localisation, nature et thème de la donnée
Système de coordonnées	Définition du système de coordonnées
Emprise géographique	Définition des limites géographiques des entités du fichier : 3. latitude nord 4. latitude sud 5. longitude est 6. longitude ouest
Type de géométrie des objets	Par exemple «Polygones»
Nombre d'entités de la couche	Par exemple, le nombre de polygones d'herbiers

Le producteur de la donnée est la personne la mieux placée pour renseigner les métadonnées. C'est pourquoi il est impératif d'exiger la livraison des métadonnées par le prestataire auquel l'étude a été confiée.

6.2.6. Rapports technique et de synthèse

Le rapport technique devra décrire précisément la stratégie de réalisation des levés, les équipements, leur configuration (positions des capteurs sur le vecteur...) et les paramètres d'acquisition (fréquence, cadence d'émission, élévation solaire, attitude du vol,...) ainsi que les conditions environnementales d'acquisition (état de la mer, couvert nuageux, turbidité de l'eau, etc.).

Le rapport d'étude comprendra plusieurs éléments obligatoires :

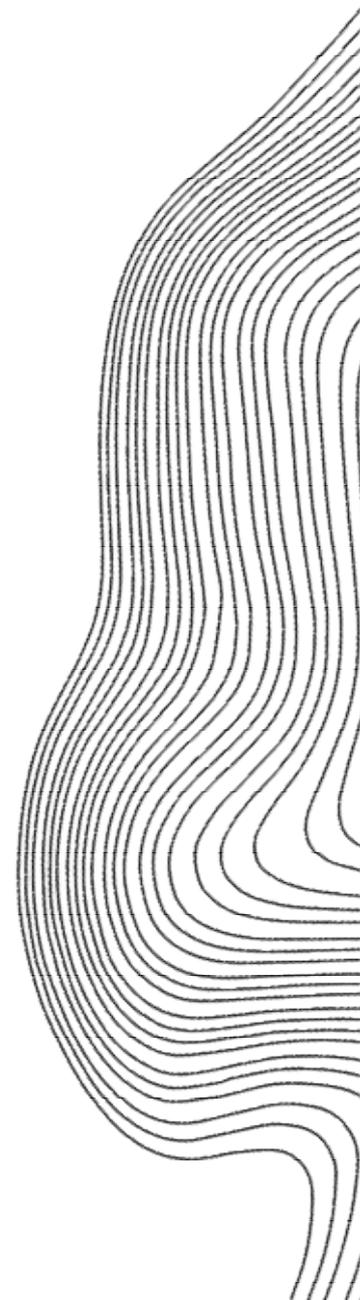
- une présentation générale du site étudié et de ses particularités ;
- l'état des connaissances de la distribution des herbiers sur le site d'étude ;
- une description détaillée de la méthode de cartographie utilisée ;
- une description détaillée de la méthode de validation des résultats ;
- le résultat de la cartographie et l'analyse des évolutions observées, dans le cas d'une mise à jour, en lien avec les informations contextuelles collectées dans le cadre de l'étude (cf. § 5.4.5) et en accord avec le périmètre officiel du site.

6.3. Le système d'information de référence

A ce jour, aucune décision n'est encore prise pour désigner les systèmes d'information de référence pour accueillir les données de suivi cartographiques des herbiers. Un groupe de travail, piloté par l'AFB, est en cours de constitution pour définir le cadre national de la bancarisation des données surfaciques des habitats marins de manière général, y compris les herbiers de zostères. Ce système doit veiller à la mise en cohérence, le partage et la mise à disposition de données environnementales issues de systèmes d'information thématiques, le SIMM et le SIB en lien avec les différentes directives (DCE, DCSMM, DHFF) et autres initiatives à l'échelle nationale (Projet Life MARHA, Ifrecor, etc.).

En attendant la définition de ce cadre national de bancarisation, toutes les données brutes doivent être stockées électroniquement, de telle sorte qu'elles puissent être récupérées, compilées et intégrées de manière appropriée dans le système d'information qui va être désigné pour la bancarisation des données surfaciques à l'échelle nationale. Les informations doivent être structurées dans un format adapté, permettant des analyses statistiques, par exemple pour les calculs d'évolution de l'extension, de densité ou de biomasse. Les couches de données cartographiques de l'extension doivent être reliées aux informations d'observation *in situ* et aux métadonnées du levé. Il est également fortement recommandé de veiller à la réception et au contrôle qualité des données de l'ensemble des informations tel que préconisé par le chapitre dédié au contrôle qualité et à la bancarisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



7. Références bibliographiques

- Auby, I., Bost, C.-A., Budzinski, H., Dalloyau, S., Desternes, A., Belles, A., Trut, G., Plus, M., Pere, C., Couzi, L., Feigne, C., Steinmetz, J., 2011. Régression des herbiers de zostères dans le Bassin d'Arcachon : état des lieux et recherche des causes. RST/ODE/LER/AR/11.007. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00054/16507/>
- Auby, I., Oger-Jeanneret, H., Gouillieux, B., Grall, J., Janson, A.L., Maguer, M., Rigouin, L., Rollet, C., Sauriau, P.G., Trut, G., 2018. Protocoles de suivi stationnel des herbiers à zostères pour la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). *Zostera marina* - *Zostera noltei*. Rapport Ifremer/ODE/UL/LER/AR/18.017. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00471/58250/>
- Auby I., Oger-Jeanneret H., Trut G., Ganthy F., Rigouin L., De Casamajor M.N., Sanchez F., Lissardy M., Fortune M., Manach S., Bizzozero L., Rollet C., Lejolivet A., Desroy N., Foveau A., Le Mao P., Sauriau P.G., Aubert A., Cajeri P., Curti C., Duvar A., Latry L., Lachaussee N., Pineau P., Plumejeaud-Perreau C., Aubin S., Droual G., Fournier J., Garcia A, Guillaudeau J., Hubert C., Humbert S., Janson A.L., Masse C., Panizza A.C., Grall J., Maguer M., Hily C., Hacquebart P., Joncourt Y., Baffreau A., Timsit O. (2018). Classement des masses d'eau du littoral Manche-Atlantique sur la base de l'indicateur DCE «Angiospermes» (2012-2016) . ODE/UL/LER/AR/18.002 . <https://archimer.ifremer.fr/doc/00427/53868/>
- Auby, I., Oger-Jeanneret, H., Sauriau, P.-G., Hily, C., Barille, L., 2010. Angiospermes des côtes françaises Manche-Atlantique. Propositions pour un indicateur DCE et premières estimations de la qualité. RST/LER/AR/14.01. <https://doi.org/10.13155/29685>
- Auby, I., Sauriau, P.-G., Oger-Jeanneret, H., Hily, C., Dalloyau, S., Rollet, C., Trut, G., Fortune, M., Plus, M., Rigouin, L., 2014. Protocoles de suivi stationnel des herbiers à zostères pour la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) *Zostera marina* - *Zostera noltei*. Version 2. RST/LER/AR/14.01. <https://doi.org/10.13155/29685>
- Bajjouk, T., 2009. Soutien aux actions NATURA 2000 de la région Bretagne - Cahier des charges pour la cartographie d'habitats des sites Natura 2000 littoraux : Guide méthodologique (No. RST/IFREMER/DYNECO/AG/09-01/TB/NATURA2000)
- Bajjouk, T., Duchene, J., Guillaumont, B., Maud, B., Blanchard, M., Derrien-Courtel, S., Dubois, S., Grall, J., Hamon, D., Hily, C., Le Gal, A., Rigolet, C., Rossi, N., Ledard, M., 2016. Les fonds marins de Bretagne, un patrimoine remarquable : Connaître pour mieux agir. Ifremer-DREAL Bretagne. <https://doi.org/10.13155/42243>
- Bajjouk, T., Mouquet, P., Ropert, M., Quod, J.-P., Hoarau, L., Bigot, L., Le Dantec, N., Delacourt, C., Populus, J., 2019. Detection of changes in shallow coral reefs status: Towards a spatial approach using hyperspectral and multispectral data. Ecol. Indic. 96, 174–191. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.052>
- Bargain, A., 2012. Etude de la structure et de la dynamique des herbiers de *Zostera noltii* par télédétection multi et hyperspectrale (phdthesis). Université de Nantes
- Barillé, L., Robin, M., Harin, N., Bargain, A., Launeau, P., 2009. Increase in seagrass distribution at Bourgneuf Bay (France) detected by spatial remote sensing. Aquat. Bot. 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2009.11.006>

- Beguet, B., Curti, C., Lafon, V., 2018. Travaux de R&D sur les réseaux de neurones convolutifs réalisés dans le cadre du projet Biocoast. Programme Investissement d'Avenir (PIAVE) - Axe usages et services valorisant les informations issues du spatial. Com. Pers.
- Bernard, N., Chauvaud, S., 2002. Cartographie des habitats d'intérêt européen du golfe du Morbihan et de la rivière de Penef. TBM - DIREN Bretagne.
- Bioucas-Dias, J.M., Plaza, A., Dobigeon, N., Parente, M., Du, Q., Gader, P., Chanussot, J., 2012. Hyperspectral Unmixing Overview: Geometrical, Statistical, and Sparse Regression-Based Approaches. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 5, 354–379. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2194696>
- Blanchard, M., Clabaut, P., Abernot-Le Gac, C., Blanchard, M., Clabaut, P., Abernot-Le Gac, C., 2006. Cartographie et évaluation du stock de crépidules en baie du Mont Saint-Michel, en 2004
- Borum, J., Duarte, C.M., Krause-Jensen, D., Greve, T.M. (Eds.), 2004. European seagrasses: an introduction to monitoring and management. The M&MS project, S. I.
- Boström, C., Baden, S., Bockelmann, A.-C., Dromph, K., Fredriksen, S., Gustafsson, C., Krause-Jensen, D., Möller, T., Nielsen, S.L., Olesen, B., Olsen, J., Pihl, L., Rinde, E., 2014. Distribution, structure and function of Nordic eelgrass (*Zostera marina*) ecosystems: implications for coastal management and conservation: DISTRIBUTION, STRUCTURE AND FUNCTION OF NORDIC SEAGRASS ECOSYSTEMS. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 24, 410–434. <https://doi.org/10.1002/aqc.2424>
- Boström, C., Jackson, E.L., Simenstad, C.A., 2006. Seagrass landscapes and their effects on associated fauna: A review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 68, 383–403. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.01.026>
- Burdick, D.M., Short, F.T., Wolf, J., 1993. An index to assess and monitor the progression of wasting disease in eelgrass *Zostera marina*. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* 83–90.
- Carraway, R.J., Priddy, L.J., Carolina, N., 1983. Mapping of submerged grass beds in Core and Bogue Sounds, Carteret County, North Carolina by conventional aerial photography. N.C. Coastal Energy Impact Program, Office of Coastal Management, N.C. Dept. of Natural Resources and Community Development, [Raleigh]
- Certain, G., Masse, J., Van Canneyt, O., Petitgas, P., Doremus, G., Santos, M., Ridoux, V., 2011. Investigating the coupling between small pelagic fish and marine top predators using data collected from ecosystem-based surveys. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 422, 23–39. <https://doi.org/10.3354/meps08932>
- Chevillon, C., 2001. Caractérisation des types de fond et habitats benthiques par classification hydro-acoustique dans le Lagon Sud-Ouest de Nouvelle Calédonie. IRD
- Costello, C.T., Kenworthy, W.J., 2011. Twelve-Year Mapping and Change Analysis of Eelgrass (*Zostera marina*) Areal Abundance in Massachusetts (USA) Identifies Statewide Declines. *Estuaries Coasts* 34, 232–242. <https://doi.org/10.1007/s12237-010-9371-5>
- Deborde, J., Abril, G., Mouret, A., Jézéquel, D., Thouzeau, G., Clavier, J., ... & Anschutz, P. (2008). Effects of seasonal dynamics in a *Zostera noltii* meadow on phosphorus and iron cycles in a tidal mudflat (Arcachon Bay, France). *Marine Ecology Progress Series*, 355, 59-71

- Dekker, A.G., Vos, R.J., Peters, S.W.M., 2001. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes. *Sci. Total Environ.* 268, 197–214. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00679-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00679-3)
- Demer, D., Berger, L., Bernasconi, M., Bethke, E., Boswell, K., Chu, D., Domokos, R., Dunford, A., Fässler, S., Gauthier, S., T. Hufnagle, L., Michale Jech, J., Bouffant, N., Lebourges-Dhaussy, A., Lurton, X., Macaulay, G., Perrot, Y., Ryan, T., Parker-Stetter, S., Williamson, N., 2015. Calibration of acoustic instruments (ICES Cooperative Research report No. 326)
- Diner, N., Marchand, P., 1995. Acoustique et pêche maritime. IFREMER, Plouzané
- Doray, M., Josse, E., Gervain, P., Reynal, L., Chantrel, J., 2007. Joint use of echosounding, fishing and video techniques to assess the structure of fish aggregations around moored Fish Aggregating Devices in Martinique (Lesser Antilles). *Aquat. Living Resour.* 20, 357–366. <https://doi.org/10.1051/alr:2008004>
- Duffy, J.P., Pratt, L., Anderson, K., Land, P.E., Shutler, J.D., 2018. Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 200, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.11.001>
- Ehrhold, A., Blanchet, A., Hamon, D., Chevalier, C., Gaffet, J.-D., Alix, A.-S., 2007. Réseau de surveillance benthique - Région Bretagne. Approche sectorielle subtidale: Identification et caractérisation des habitats benthiques du secteur de Concarneau (No. IFREMER/DYNECO/EB/07-01/REBENT)
- Finkbeiner, M., Stevenson, B., Seaman, R., 2001. Guidance for benthic habitat mapping: an aerial photographic approach (Monographie ou série No. NOAA/CSC/20117-PUB). U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Coastal Services Center, Charleston, South Carolina
- Fournier, J., 2002. Cartographie des herbiers de phanérogames marines de l'archipel des Chausey. CNRS-EPHE / DIREN Basse Normandie.
- Fürhaupter, K., Berg, T., Meyer, T., 2014. Seagrass indicators - useful for assessing the Good Environmental Status for the Marine Strategy Framework Directive? Presented at the Workshop COST Action 2010-2014: Seagrass productivity - from genes to ecosystem management, Faro, Portugal
- Genavir, 2017. Sonar interférométrique Geoswath (Fiche DINES)
- Godet, L., Fournier, J., Katwijk, M., Olivier, F., Le Mao, P., Retière, C., 2008. Before and after wasting disease in common eelgrass *Zostera marina* along the French Atlantic coasts: A general overview and first accurate mapping. *Dis. Aquat. Organ.* 79, 249–55. <https://doi.org/10.3354/dao01897>
- Grillas, P., Charpentier, A., Auby, I., Lescuyer, F., Coulet, E., 2000. Spatial dynamics of *Zostera noltii* over a 5-year period of fluctuating salinity in the Vaccarès lagoon, France. Presented at the ASLO 2000, Aquatic sciences meeting of the American Society of Limnology and Oceanography, June 5-9, 2000, Copenhagen, Denmark
- Guide de cartographie des habitats marins, 2008

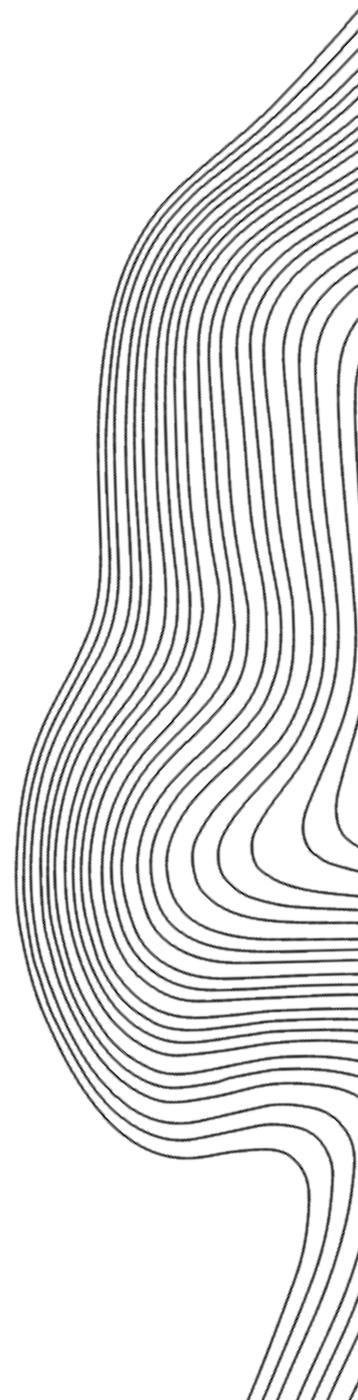
- Guillaumont, B., 1991. Utilisation de l'imagerie satellitaire pour les comparaisons spatiales et temporelles en zone intertidale, in: Estuaries and Coasts: Spatial and Temporal Intercomparisons. Presented at the ECSA19 Symposium, Olsen & Olsen, Can, France, pp. 63–68
- Harin, N., Barillé, A.L., Truhaus, N., Oriot, M., 2015. Caractérisation des herbiers de zostères et de leur évolution sur les secteurs Sept-Ile, Archipel de Glénan et Roches de Penmarc'h.
- Hily, C., 1997. Les herbiers de zostères de Bretagne. DIREN Bretagne / IUEM.
- Hutin, E., Simard, Y., Archambault, P., 2005. Acoustic detection of a scallop bed from a single-beam echosounder in the St. Lawrence. ICES J. Mar. Sci. 62, 966–983. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.03.007>
- Ishiguro, S., Yamada, K., Yamakita, T., Yamano, H., Oguma, H., Matsunaga, T., 2016. Classification of Seagrass Beds by Coupling Airborne LiDAR Bathymetry Data and Digital Aerial Photographs, in: Nakano, S., Yahara, T., Nakashizuka, T. (Eds.), Aquatic Biodiversity Conservation and Ecosystem Services. Springer Singapore, Singapore, pp. 59–70. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0780-4_5
- Jensen, S. I., Kühl, M., & Priemé, A. (2007). Different bacterial communities associated with the roots and bulk sediment of the seagrass *Zostera marina*. *FEMS microbiology ecology*, 62(1), 108-117
- Jordan, A., Lawler, M., Halley, V., Barrett, N., 2005. Seabed habitat mapping in the Kent Group of islands and its role in Marine protected area planning. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 15, 51–70. <https://doi.org/10.1002/aqc.657>
- Kerninon, F., 2014. Synthèse bibliographique sur la végétation sous-marine: facteurs de distribution et indicateurs spatiaux d'observation et de suivi. Ifremer/ DYNECO/AG.
- Kerninon, F., 2012. Premières actions de mise en place d'un réseau d'observation des herbiers de l'Outre-mer (Rapport de stage de Master 2 SML). IUEM
- Kerninon, F., Bernard, M., 2015. Rapport méthodologique des actions herbiers de zostères (actions B5 et C3) du programme LIFE+ « Expérimentation pour une gestion durable et concertée de la pêche à pied récréative en France ». Protocole de suivi stationnel des herbiers de zostères naines et marines. Année 2015. 25 pages + Annexes
- Krause-Jensen, D., Pedersen, M.F., Jensen, C., 2003. Regulation of eelgrass (*Zostera marina*) cover along depth gradients in Danish coastal waters. *Estuaries* 26, 866–877. <https://doi.org/10.1007/BF02803345>
- Lafon, V., 2013. Cartographie de l'herbier à *Zostera noltii* du Bassin d'Arcachon par télédétection spatiale. Rapport final
- Lahaye, R., Ladet, S., n.d. Les réseaux de correction différentielle. Institut de Développement de la Géomatique, INRA
- Lebourges-Dhaussy, A., 1996. Caractérisation des populations planctoniques par acoustique multifréquence. *Océanis* 22, 71–92

- Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., Patch, J.S., 1999. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Appl. Opt.* 38, 3831–3843. <https://doi.org/10.1364/AO.38.003831>
- Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., Steward, R.G., Patch, J.S., 1998. Hyperspectral remote sensing for shallow waters I A semianalytical model. *Appl. Opt.* 37, 6329. <https://doi.org/10.1364/AO.37.006329>
- Lefebvre, A., Thompson, C.E.L., Collins, K.J., Amos, C.L., 2009. Use of a high-resolution profiling sonar and a towed video camera to map a *Zostera marina* bed, Solent, UK. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 82, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.01.027>
- Lepareur, F., 2011. Evaluation de l'état de conservation des habitats naturels marins à l'échelle d'un site Natura 2000 – Guide méthodologique - Version 1. Février 2011. Rapport SPN 2011 / 3, MNHN, Paris, 55 pages
- Levêque, L., 2004. Contribution à l'inventaire et la cartographie des herbiers de zostères en Bretagne. IFREMER / DEL/AO
- Liabot, P.-O., 2019. Aide à la définition d'une méthodologie standardisée de cartographie des herbiers de zostères par traitement semi-automatique de l'image Ortho Littorale V2 dans le cadre du suivi DCE (En cours)
- Lopez y Royo, C., Pergent, G., Pergent-Martini, C., Casazza, G., 2010. Seagrass (*Posidonia oceanica*) monitoring in western Mediterranean: implications for management and conservation. *Environ. Monit. Assess.* 171, 365–380. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1284-z>
- Lurton, X., 1998. Acoustique sous-marine. Présentation et applications, Ifremer. ed.
- Marbà, N., Krause-Jensen, D., Alcoverro, T., Birk, S., Pedersen, A., Neto, J.M., Orfanidis, S., Garmendia, J.M., Muxika, I., Borja, A., Dencheva, K., Duarte, C.M., 2013. Diversity of European seagrass indicators: patterns within and across regions. *Hydrobiologia* 704, 265–278. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1403-7>
- Martínez-Crego, B., Vergés, A., Alcoverro, T., Romero, J., 2008. Selection of multiple seagrass indicators for environmental biomonitoring. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 361, 93–109. <https://doi.org/10.3354/meps07358>
- McKenzie, L.J., Campbell, S.J., Roder, C.A., 2001. eagrass-Watch: manual for mapping and monitoring seagrass resources by community (citizen) volunteers. Queensland Department of Primary Industries, Cairns, 94 pages
- Mielck, F., Bartsch, I., Hass, H.C., Wölfl, A.-C., Bürk, D., Betzler, C., 2014. Predicting spatial kelp abundance in shallow coastal waters using the acoustic ground discrimination system RoxAnn. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 143, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.03.016>
- Minghelli-Roman, A., Chisholm, J.R., Marchioretti, M., Jaubert, J.M., 2002. Discrimination of coral reflectance spectra in the Red Sea. *Coral Reefs* 21, 307–314. <https://doi.org/10.1007/s00338-002-0249-2>
- Mobley, C.D., Sundman, L.K., Boss, E., 2002. Phase function effects on oceanic light fields. *Appl. Opt.* 41, 1035–1050. <https://doi.org/10.1364/AO.41.001035>

- Noël, C., Boissery, P., Quelin, N., Raimondino, V., 2012. Cahier technique du gestionnaire: Analyse compare des méthodes de surveillance des herbiers de posidonies. CartOcean, Agence de l'eau RMC, Dreal PACA, Région PACA
- Noël, C., Viala, C., Coquet, M., Marchetti, S., Bauer, E., Emery, E., Sauzade, D., Kantin, R., Coudray, S., Trut, G., 2009. Comparaison de méthodes de cartographie des végétations sous-marines côtières. *Rev. Paralia* 2, 5.1-5.12. <https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2009.005>
- Ostrovsky, I., McGinnis, D.F., Lapidus, L., Eckert, W., 2008. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake. *Limnol. Oceanogr. Methods* 6, 105–118. <https://doi.org/10.4319/lom.2008.6.105>
- Pan, Z., Fernandez-Diaz, J.C., Glennie, C.L., Starek, M., 2014. Shallow water seagrass observed by high resolution full waveform bathymetric LiDAR, in: 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Presented at the IGARSS 2014 - 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Quebec City, QC, pp. 1341–1344. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946682>
- Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pasqualini, V., Ardizzone, G.D., Balestri, E., Bedini, R., Belluscio, A., Belsher, T., Borg, J., Boudouresque, C.F., Boumaza, S., Bouquegneau, J.M., Buia, M.C., Calvo, S., Cebrian, J., Charbonnel, E., Cinelli, F., Cossu, A., Maida, G.D., Dural, B., Francour, P., Gobert, S., Lepoint, G., Meinesz, A., Molenaar, H., Mansour, H.M., Panayotidis, P., Peirano, A., Pergent, G., Piazzzi, L., Pirrotta, M., Relini, G., Romero, J., Sanchez-Lizaso, J.L., Semroud, R., Shembri, P., Shili, A., Tomasello, A., Velimirov, B., 2005. Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows: Use and application. *Ecol. Indic.* 5, 213–230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.02.004>
- Petit, T., Bajjouk, T., Mouquet, P., Rochette, S., Vozel, B., Delacourt, C., 2017. Hyperspectral remote sensing of coral reefs by semi-analytical model inversion – Comparison of different inversion setups. *Remote Sens. Environ.* 190, 348–365. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.004>
- Peuziat, I.I., Brigand, L.L., Hily, C., 2004. Gestion des usages récréatifs liés au nautisme dans les îles et les archipels du Ponant. Ministère de l'écologie et du développement durable / UBO.
- Piazzzi, L., Acunto, S., Cinelli, F., 2000. Mapping of *Posidonia oceanica* beds around Elba Island (western Mediterranean) with integration of direct and indirect methods. *Oceanol. Acta* 23, 339–346. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)00132-8)
- Pluquet, F., Ehrhold, A., 2009. Une nouvelle stratégie d'étude des habitats marins littoraux au moyen de la vedette acoustique V/O Haliotis (No. DYNECO/EB/09-02). Ifremer.
- Plus, M., Sébastien, D., Gilles, T., Isabelle, A., de Montaudouin, X., Emery, É., Claire, N., Christophe, V., 2010. Long-term evolution (1988–2008) of *Zostera* spp. meadows in Arcachon Bay (Bay of Biscay). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 87, 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.016>
- Populus, J., 2002. Altimétrie par Lidar aéroporté et Modèles Numériques de Terrain (No. RST.DEL/AO/BREST 02-09). IFREMER
- Pouliquen, E., Lurton, X., 1994. Identification de la nature du fond de la mer à l'aide de signaux d'écho-sondeurs: I. Modélisation d'échos réverbérés par le fond. *Acta Acust.* 2, 113–126.

- Riegl, B., P. Moyer, R., Morris, L., Virnstein, R., Purkis, S., 2005. Distribution and seasonal biomass of drift macroalgae in the Indian River Lagoon (Florida, USA) estimated with acoustic seafloor classification (QTCView, Echoplus). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 326, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.05.009>
- Rollet, C., 2005. Géoréférencement en zone intertidale par GPS.; Fiche technique Rebent FT13-FO02-2005-01. 13p.
- Sauriau, P.-G., Pichocki-Seyfried, C., Walker, P., De Montaudouin, X., Palud, C., Heral, M., 1998. *Crepidula fornicata* L. (mollusque, gastéropode) en baie de Marennes-Oléron : cartographie des fonds par sonar à balayage latéral et estimation du stock. *Oceanol. Acta* 21, 353–362. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(98\)80022-4](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(98)80022-4)
- Short, F.T., McKenzie, L.J., Coles, R.G., Vidler, K.P., Gaeckle, J.L., 2006. *SeagrassNet. Manual for Scientific Monitoring of Seagrass Habitat, Worldwide Edition.* University of New Hampshire Publication, 75 pages
- Simmonds, E.J., MacLennan, D.N., MacLennan, D.N., 2005. *Fisheries acoustics: theory and practice*, 2nd ed. ed, Fish and aquatic resources series. Blackwell Science, Oxford ; Ames, Iowa.
- Talec, P., 1999. *Cartographie des champs d'algues immergés à l'aide des techniques acoustiques.* Université de Bretagne Occidentale
- Trut, G., Auby, I., Rigouin, L., Oger-Jeanerret, H., Ganthy, F., 2018. Directive Cadre sur l'Eau : Cartographie des herbiers de *Zostera marina* du Bassin d'Arcachon (No. ODE/UL/LER/AR/18.008)
- Ventura, D., Bonifazi, A., Gravina, M.F., Domenico Ardizzone, G., 2017. Unmanned Aerial Systems (UASs) for Environmental Monitoring: A Review with Applications in Coastal Habitats. pp. 165–184. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69598>
- Welsh, D. T., Bartoli, M., Nizzoli, D., Castaldelli, G., Riou, S. A., & Viaroli, P. (2000). Denitrification, nitrogen fixation, community primary productivity and inorganic-N and oxygen fluxes in an intertidal *Zostera noltii* meadow. *Marine Ecology Progress Series*, 208, 65-77.
- Welsh, D. T., Bourgues, S., de Wit, R., & Auby, I. (1997). Effect of plant photosynthesis, carbon sources and ammonium availability on nitrogen fixation rates in the rhizosphere of *Zostera noltii*. *Aquatic Microbial Ecology*, 12(3), 285-290
- Wiebe, P.H., Mountain, D.G., Stanton, T.K., Greene, C.H., Lough, G., Kaartvedt, S., Dawson, J., Copley, N., 1996. Acoustical study of the spatial distribution of plankton on Georges Bank and the relationship between volume backscattering strength and the taxonomic composition of the plankton. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 43, 1971–2001. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(96\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(96)00039-2)
- Wyn, G., 2000. *CCW Handbook for Marine Intertidal Phase 1 Survey and Mapping.* Countryside Council for Wales.
- Young, D., Clinton, P., Specht, D., 2010. Mapping intertidal eelgrass (*Zostera marina* L.) in three coastal estuaries of the Pacific Northwest USA using false colour near-infrared aerial photography. *Int. J. Remote Sens.* 31, 1699–1715. <https://doi.org/10.1080/01431160902926590>

GLOSSAIRE



8. Glossaire

Affinage panchromatique

Opération de fusion d'une image panchromatique de résolution spatiale élevée et d'une image multispectrale de résolution plus faible pour augmenter la résolution spatiale de l'image multispectrale.

Attribut

Caractéristique d'un objet cartographié.

Carte

Représentation simplifiée d'un territoire qui met en évidence les relations spatiales entre les objets qu'il contient.

Carte d'habitats

Représentation de la meilleure estimation de la répartition des habitats à un moment donné, compte tenu des connaissances disponibles à ce moment.

Cartographie

Processus de création d'une carte donnant de manière claire et concise de l'information à partir de données, à une échelle adaptée à son objet.

Chirp

Signal acoustique modulé en fréquence.

Classe

Catégorie affectée à un ensemble d'attributs, à des fins de représentation sur une carte.

Classification

Processus d'affectation de classes à un ensemble de données.

Classification supervisée

Processus d'intégration des données de terrain et des données de télédétection, qui établit le lien entre les données acquises et les catégories d'une typologie donnée, en vue d'étendre ce lien à l'ensemble du territoire couvert par une carte.

Confiance

Appréciation par l'utilisateur de la fiabilité d'une carte relativement à son objet.

Couche

Dans le contexte d'une carte numérique, ensemble de données géographiques du même type. Par exemple, dans le cas d'une carte topographique, les routes, le relief, les parcs nationaux, les frontières politiques et les cours d'eau peuvent donner lieu à cinq couches distinctes.

Couche cartographique

Dans le contexte de la cartographie des habitats, ensemble de données primaires de même type réalisant une couverture quasi-exhaustive d'une zone donnée.

Deep learning (en français apprentissage profond)

Technologie d'intelligence artificielle exploitant l'utilisation de réseaux de neurones. Le deep learning est un sous-ensemble du machine learning (en français, apprentissage automatique).

Données d'observation – « vérité terrain »

Données, acquises sur le terrain par des observations et des prélèvements, qui permettent

d'interpréter des images acquises par télédétection.

Echelle d'une carte

Rapport entre une distance sur une carte et la distance réelle correspondante sur le terrain. Si l'échelle est petite, la carte représente un grand territoire, mais avec peu de détails. On dit alors que la carte est à échelle globale. Si l'échelle est grande, la carte est détaillée, mais représente un petit territoire. On dit alors que la carte est à échelle fine.

Echelle globale

Échelle d'une carte qui représente un grand territoire par unité de surface, avec peu de détails. Synonyme : petite échelle.

Erreur

Différence entre une mesure et la réalité qu'elle décrit. L'erreur peut être de nature qualitative (inexactitude) ou quantitative (imprécision).

Erreur spatiale

Différence entre la position mesurée d'un objet et sa position réelle.

Estran

Partie du littoral alternativement couverte et découverte par la mer. On parle aussi de zone de balancement de marées, zone des marées, ou zone intertidale.

Etage

Espace vertical du domaine benthique marin où les conditions écologiques, fonction de sa situation par rapport au niveau de la mer, sont sensiblement constantes ou varient régulièrement entre les deux niveaux « critiques » marquant les limites de l'étage.

Exactitude

Conformité d'une valeur mesurée (grandeur ou attribut) avec la réalité. L'exactitude indique jusqu'à quel point une donnée est correcte. Ne pas confondre avec la précision, qui se rapporte au degré d'erreur du résultat d'une mesure.

Fiabilité

Qualité d'une carte qui représente fidèlement la réalité. L'exactitude et la précision d'une carte sont deux aspects de sa fiabilité.

Fichier de formes ESRI

Dans le SIG ArcGIS de la société ESRI, lieu de stockage de l'emplacement, de la forme et des attributs de caractéristiques géographiques. Un fichier de formes ESRI est constitué d'un ensemble de fichiers reliés entre eux et portant sur une même classe d'entités.

Géoréférencement

Alignement de données géographiques sur un système convenu de coordonnées, en vue de leur visualisation, de leur analyse et de leur interrogation dans un système de référence commun.

Habitat

Lieu reconnaissable à ses caractéristiques physiques et sa biocénose, et qui évolue à un rythme donné dans l'espace et dans le temps.

Hétérogénéité

Degré de diversité de différents attributs dans un territoire donné. L'hétérogénéité a des conséquences pratiques sur la cartographie des habitats. Si une plus petite unité cartographique est hétérogène, il faut la représenter à l'aide d'une classe mixte ou d'une certaine mesure de la diversité, ou encore simplifier en montrant la classe prédominante. Par ailleurs, si de nombreux petits polygones de classes différentes sont regroupés sur une carte, la fiabilité de la position exacte de chaque classe risque d'être réduite.

Homogénéité

Degré de similitude de divers attributs dans un territoire donné. À l'intérieur d'un polygone donné d'une carte, les attributs de la classe d'habitat correspondante ont une valeur unique, même s'il y a une hétérogénéité mesurable.

HTML

Abréviation de HyperText Markup Language ou langage de balisage hypertexte. Langage de balisage utilisé pour la création de pages Web. Un langage de balisage combine contenu textuel et données supplémentaires de présentation de ce contenu.

IGN69

Réseau de référence altimétrique français.

Incertitude

Degré de manque de fiabilité d'une carte. L'inexactitude et l'imprécision sont deux aspects de l'incertitude.

Information

Données auxquelles une interprétation confère une signification.

Interprétation

Attribution d'une signification à des données par une analyse orientée. En cartographie des habitats, application systématique de signatures, de typologies, de modèles et de règles à des données spatiales en vue de représenter une prédiction de la répartition d'attributs.

IRC

Infra Red Color ou proche infrarouge (PIR) en français.

Dans le cas des Ortholittorales V2, IRC désigne également le nom du jeu de données contenant le canal du proche infra rouge. Ce jeu possédant également des informations dans les canaux rouge et vert, il a une redondance partielle avec le jeu de données RVB.

LIDAR

De l'anglais Light Detecting And Ranging. Technique de levé qui mesure l'altitude en utilisant le temps de trajet d'un rayon laser. La lumière infrarouge est adaptée à la détection du sol, alors que la lumière verte, en raison de sa capacité de pénétration dans l'eau, permet de faire des levés bathymétriques.

Matrice de confusion

La matrice de confusion ou matrice de contingence sert à évaluer la qualité d'une classification. Elle compare les données classées avec des données de référence. Les lignes correspondent aux classes réelles et les colonnes aux classes prédites.

Métadonnées

Information décrivant des données, par exemple leurs caractéristiques et leur provenance. Les métadonnées de base donnent suffisamment d'information pour répondre aux questions fondamentales (quelles données ? par qui ? où ? quand ? comment ? pourquoi ?) à propos des données. Les normes de métadonnées consistent en un ensemble de métadonnées conforme à des règles précises, généralement définies par des organismes officiels internationaux de normalisation.

MNT

Abréviation de Modèle Numérique de Terrain. Il s'agit de la représentation des valeurs d'élévation sur un territoire, par rapport à un niveau de référence.

NDVI

Normalized Difference Vegetation Index. Il s'agit d'un indice de végétation exploitant les canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR) d'une image. Soit R_i la réflectance d'un pixel donné dans le canal i ,

$$NDVI = \frac{R_{PIR} - R_R}{R_{PIR} + R_R}$$

Phanérogames

Se dit des plantes dont les phénomènes de la reproduction se traduisent par des structures facilement observables (fleurs).

Photo-interprétation

Techniques d'interprétation assistée par ordinateur et de classification numérique permettant d'effectuer une analyse thématique de données géographiques à partir de photographies aériennes ou d'images satellites.

Ping

Impulsion acoustique monochromatique

PIR

Proche InfraRouge (longueurs d'onde comprises entre 700 et 1600 nm environ)

Pixel

De l'anglais "picture element". Plus petite unité d'information sur une image ou une carte maillée. Un pixel est généralement carré ou rectangulaire. En télédétection, unité de base de l'acquisition de données.

Plus petite unité cartographique

Taille de la plus petite structure représentée sur une carte, à ne pas confondre avec la taille minimale d'un habitat. La taille au sol de la plus petite unité cartographique change avec l'échelle de la carte.

Plus petite unité interprétable

Taille de la plus petite structure à laquelle on peut attribuer une signification (compte-tenu de l'échelle de travail), par exemple une classe d'habitat.

Polygone

Sur une carte, figure fermée définie par un ensemble de paires de coordonnées (x,y), la première et la dernière paires étant identiques et toutes les autres étant différentes. Dans le contexte d'une carte d'habitats, un polygone est réputé représenter une zone homogène.

Précision

Variabilité des mesures d'une même grandeur. La précision indique jusqu'à quel point une mesure se rapproche de la grandeur réelle. Ne pas confondre avec l'exactitude, qui se rapporte à la conformité d'une valeur mesurée avec la réalité.

Précision spatiale

Capacité d'un dispositif à mesurer la position réelle d'un objet. La précision est souvent donnée par l'écart maximal possible entre la position mesurée et la position réelle.

Prédiction

Dans le contexte d'une carte d'habitats, action d'annoncer la classe d'habitat ou la valeur d'un paramètre en un lieu donné.

Probabilité

Rapport entre le nombre de cas favorables à l'occurrence d'un événement et le nombre total de cas possibles. La probabilité d'un événement impossible est de 0, et celle d'un événement certain de 1.

Projection cartographique

Transition d'une forme quasi-sphérique (la terre en 3 dimensions) à une surface plane (la carte en 2 dimensions). La projection cartographique est un ensemble de techniques géodésiques permettant de représenter la surface de la Terre dans son ensemble ou en partie sur la surface plane d'une carte. Le choix d'un système de projection se fait de façon à minimiser les altérations selon la situation du pays,

la position à la surface du globe, la proximité d'un pôle, de l'équateur, de l'étendue du pays (île de faible surface ou pays continent).

Réflectance d'un matériau

C'est le ratio entre le flux lumineux incident sur un matériau donné et le flux lumineux réfléchi par ce matériau. Dans le contexte de ce guide, la réflectance est une donnée normalisée qui est considérée comme la signature d'un objet (herbier, sable, vase, etc.). La réflectance dépend de la longueur d'onde et du matériau considérés.

Réflexion spéculaire

Réflexion directe du rayon solaire dans la direction du capteur. Ce phénomène s'observe notamment à la surface de l'eau en fonction de son orientation.

Résolution

En informatique, nombre de pixels par unité de surface ou nombre total de pixels d'une image. La résolution s'exprime par deux nombres, qui donnent respectivement le nombre de pixels dans le sens horizontal et dans le sens vertical (p. ex. 1024 × 768). Noter que le mot anglais resolution et par voie de conséquence le mot français résolution sont souvent employés pour désigner les deux concepts différents de pouvoir de résolution et de limite de résolution, ce qui peut être source de confusion.

RVB

Rouge, Vert et Bleu

SACLAF

Système acoustique de classification automatique des fonds

Schorre

Partie haute des faciès littoraux vaseux recouverte seulement au moment des très fortes marées (terme d'origine flamande synonyme de pré salé).

SIG

Abréviation de Système d'Information Géographique. Ensemble intégré de logiciels et de données servant à visualiser et à gérer de l'information sur des lieux géographiques, à analyser des relations spatiales et à modéliser des processus spatiaux. Un système d'information géographique constitue un cadre pour l'acquisition et l'organisation de données spatiales et de l'information connexe, en vue de leur analyse et de leur représentation.

Slikke

Partie basse des faciès littoraux vaseux recouverte en tout temps par toutes les marées (terme flamand synonyme de vase salée).

Spectralon

Surface ayant une très forte capacité de réflexion lambertienne. Le spectralon est utilisé comme étalon pour des mesures radiométriques.

Station d'échantillonnage

Lieu géoréférencé où se fait le prélèvement d'un échantillon ou l'acquisition de données. Il peut y avoir plusieurs stations d'échantillonnage dans un même site.

Table attributaire

Tableau contenant des données sur un ensemble de caractéristiques géographiques. Dans un SIG, une table d'attributs est souvent liée à une couche de données spatiales.

Temps de revisite d'un satellite

Temps nécessaire pour qu'un satellite (ou une constellation de satellites) puisse imager deux fois la même zone.

Topologie

Dans une base de données géographiques, la topologie permet de définir et d'appliquer des règles d'intégrité des données. On peut par exemple définir la règle suivante : Il ne peut y avoir aucun chevauchement de deux polygones.

Validation sur le terrain

Ensemble d'observations effectuées sur le terrain pour tester la valeur prédictive d'une carte d'habitats.

Vectorel

Se dit d'une image définie par des éléments géométriques tels que des points, des segments, des courbes, des polygones, etc., décrits par des équations mathématiques. Contrairement à une image matricielle, dont la qualité est déterminée entre autres par le nombre de pixels par unité de surface, une image vectorielle s'adapte facilement par changement d'échelle à la limite de résolution du dispositif d'affichage utilisé.

Zone d'apprentissage

Site dont les attributs sont connus et que l'on utilise pour identifier la signature caractéristique de ces attributs pour un instrument de télédétection.

ANNEXES



9. Annexes

9.1. Comparaison des préférences d'habitats des zostères naine et marine

Caractéristique	<i>Zostera marina</i>	<i>Zostera noltei</i>
Description générale	<p>Phanérogame marine aux feuilles vertes, longues et étroites, en forme de ruban, de 2 à 12 mm de large, atteignant 120 cm (exceptionnellement 200 cm), à extrémités arrondies. Rhizome robuste et rampant de 2 à 5 cm de large.</p> <p><i>Zostera marina</i> présente deux écotypes : une forme subtidale à feuilles longues et larges (magnozostéride) et une forme intertidale dont les feuilles sont plus courtes et plus étroites (parvozostéride).</p>	<p>Phanérogame marine aux feuilles vertes, longues et étroites, en forme de ruban, d'une longueur de 6 à 22 cm et d'une largeur de 0,5 à 1,5 mm, avec 3 nervures espacées irrégulièrement. Les extrémités des feuilles sont entaillées, souvent asymétriques et deviennent dentelées dans les feuilles les plus anciennes.</p> <p>Les feuilles jaillissent d'un rhizome rampant qui lie le sédiment. Les feuilles poussent par groupes de 2 à 5, enfermées dans une gaine courte longue d'environ 0,50 cm.</p>
Amplitude bathymétrique	Zone infralittorale, depuis la partie exondable aux basses mers jusqu'aux profondeurs de 3 à 4 m (exceptionnellement 10 m) sous le zéro des cartes.	Zone Intertidale <i>Z. noltei</i> se développe au milieu de la zone médiolittorale à des taux d'émersion de 40 à 70 % en moyenne.
Température	<p>La température optimale pour la photosynthèse et la production de nouvelles pousses est de 10°C alors que cet optimum est un peu plus élevé (15-20°C) pour la production de nouvelles feuilles et leur croissance (mesurée par marquage).</p> <p>L'occurrence de hautes températures (>25°C) leur est préjudiciable, tant en terme de mortalité que de croissance et de multiplication végétative.</p>	<i>Zostera noltei</i> supporte mieux les fortes températures (>25°C) que <i>Zostera marin</i> . Des valeurs extrêmes (> 37°C), même appliquées pendant un temps très court s'avérant néanmoins très préjudiciables à leur survie.
Salinité	Tolérance à une assez large gamme de conditions halines.	Tolérance à une assez large gamme de conditions halines.

Caractéristique	<i>Z. marina</i>	<i>Z. noltei</i>
Physiographie	Estuaire, lagune, côte fermée, baie. La zostère marine colonise les cuvettes intertidales et les bords des chenaux, jusqu'à une profondeur variant selon les sites.	Détroit, Ria, estuaire, lagune, côte fermée, baie.
Zone biologique	Frange sublittorale, infralittoral supérieur	Eulittoral supérieur, moyen et inférieur, Frange sublittorale
Substrat	Tous substrats meubles	Tous substrats meubles
Courant de marée	< 0,5 m / s	< 0,5 m / s
Exposition	Abrité, très abritée	Extrêmement abrité, abrité, très abrité
Sensibilité aux changements des conditions environnementales	Vulnérabilité à l'accroissement des courants de fond (arrachement, déchaussement) ou à leur diminution (ensevelissement). Forte vulnérabilité à l'augmentation de la turbidité (en raison de sa position subtidale). Forte vulnérabilité aux canicules. L'augmentation des sels nutritifs dans la colonne d'eau peut provoquer la prolifération d'épiphytes, charge qui sera plus ou moins bien tolérée selon l'importance du microbrouillage par des organismes présents, ou au développement de macroalgues opportunistes générant un ombrage ou des crises dystrophiques (anoxie, relargage de sulfures).	Vulnérabilité à l'accroissement des courants de fond (arrachement, déchaussement) ou à leur diminution (ensevelissement). Vulnérabilité à l'augmentation de la turbidité (moins en intertidal qu'en lagune sans marée). Moindre vulnérabilité aux canicules que <i>Zostera marina</i> . L'augmentation des sels nutritifs dans la colonne d'eau peut provoquer la prolifération d'épiphytes, charge qui sera plus ou moins bien tolérée selon l'importance du microbrouillage par des organismes présents, ou au développement de macroalgues opportunistes générant un ombrage ou des crises dystrophiques (anoxie, relargage de sulfures). Sensibilité au brouillage par les oiseaux herbivores pendant l'hiver (période de plus faible biomasse).

(Sources : Auby et al. 2011, Bajjouk et al. 2015, MarLIN)

9.2. Utilisation du logiciel ImageJ

9.2.1. Téléchargement

Le logiciel ImageJ est téléchargeable à l'adresse <http://rsb.info.nih.gov/ij/download.html>. Choisir la version adaptée à votre plateforme.

Le présent document (Auby *et al.*, 2018) explique l'utilisation de la version 144 pour Windows mais une version plus récente existe. La version présentée est téléchargeable avec ou sans Java via les liens suivants :

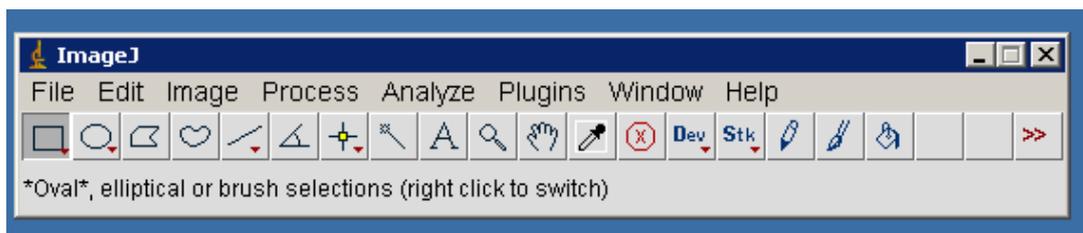
<http://rsb.info.nih.gov/ij/download/win32/ij144-jdk6-setup.exe> (avec Java)

<http://rsb.info.nih.gov/ij/download/win32/ij144-nojre-setup.exe> (sans Java)

Par défaut, prendre la version sans Java.

9.2.2. Installation

Installer et valider les deux premiers écrans d'installation. Le logiciel s'ouvre et fournit la fenêtre du menu suivant :



9.2.3. Utilisation

| Ouverture d'un fichier

Dans le menu « ImageJ », cliquer sur **File > Open**, choisir le fichier image à traiter (ici une image des Doux, Oléron) et cliquer sur **Ouvrir**.

| Choix de la surface à traiter

Si nécessaire, **redresser la photo** en cliquant sur : **Image > Transform > Rotate....** Dans la case **Angle (degrees)** renseigner l'angle de rotation (valeur positive ou négative) puis cliquer sur **OK**.

Recadrer la photo : dans le menu, cliquer sur  (outil de sélection rectangle) et dessiner à l'intérieur du quadra un rectangle dont les bords épousent le plus près possible le pourtour interne du quadra. Relâcher la souris.



Effectuer le recadrage en cliquant sur **Image > Crop**. Le **nombre de pixels de l'image recadrée** s'affiche au-dessus de l'image. Il servira pour le calcul du taux de recouvrement.

Dans cet exemple, le nombre de pixels retenus est de $2\,732 \times 2\,108 = 5\,759\,056$.

Nombre de pixels



| Délimitation de la surface occupée par les zostères

Cliquer sur **Image > Adjust > Colour threshold...**. Le but de l'opération est de colorer sur l'image tout ce qui est de la zostère. Si le logiciel ne les choisit pas par défaut, sélectionner les paramètres suivants :

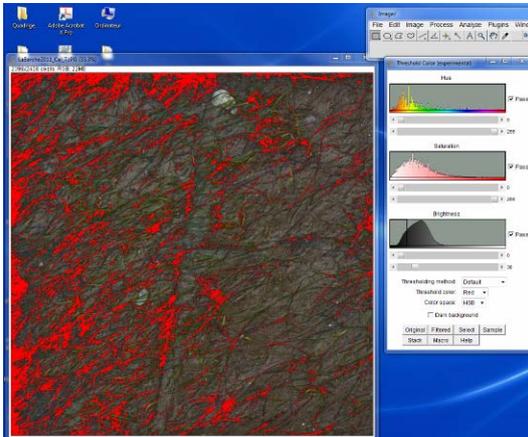
« **Thresholding method** » : **Default**

« **Threshold color** » : **Red**

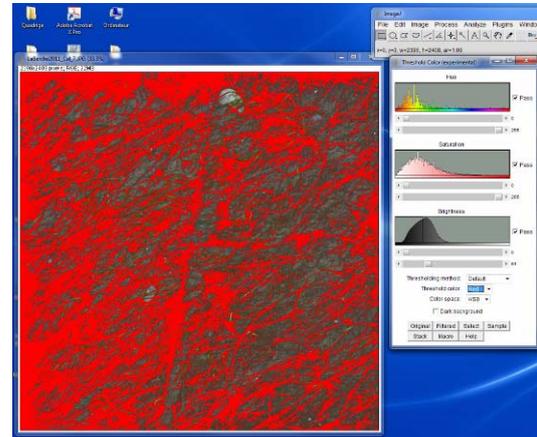
« **Color space** » : **HSB**

Décocher « **Dark background** ».

Pour colorer les zostères en rouge, ajuster les paramètres « **Hue** », « **Saturation** » et « **Brightness** » à l'aide des curseurs.



Brightness 38

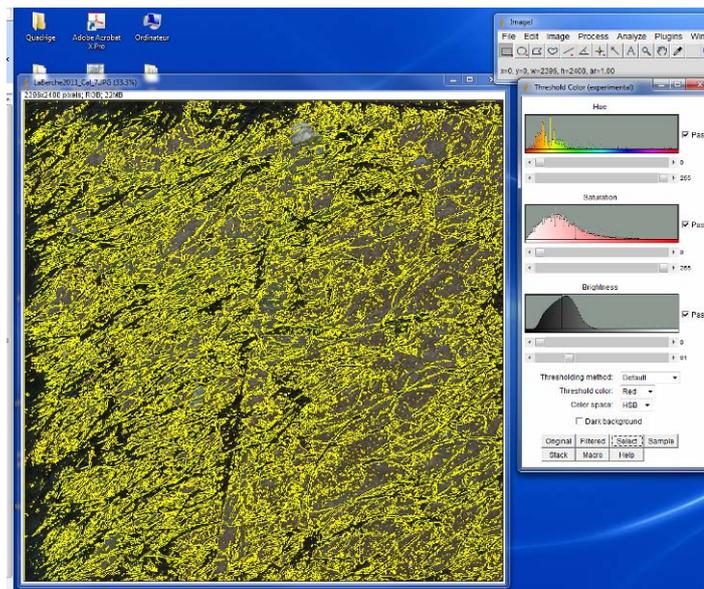


Brightness 61

Il est possible à tout moment de comparer l'image colorée en rouge avec l'image originale en cliquant sur le bouton **Original**.

En revenant à l'image filtrée (bouton **Filtered**), il est possible que l'image soit en noir et blanc. Dans ce cas, actionner à nouveau « **Threshold color** » : **Red**.

Lorsque la sélection est proche de l'original, cliquer sur **Select**. Les zones à exclure sont alors entourées en jaune.

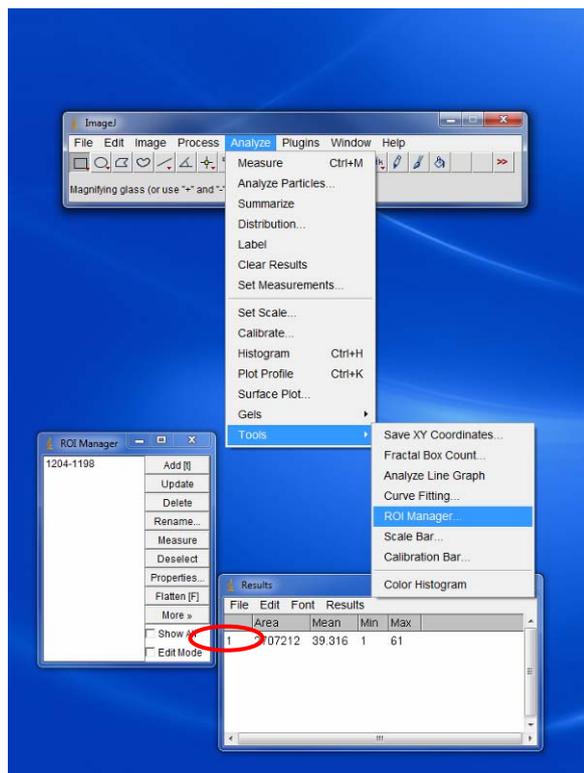


| Calcul du taux de recouvrement

Dans le menu, cliquer sur **Analyze > Tools > ROI Manager...** puis **Add(t)** et **Measure**.

La fenêtre « **Results** » s'ouvre alors et dans la colonne « **Area** » est indiqué le **nombre de pixels correspondant aux zostères**.

Dans cet exemple, ce nombre est égal à 2 707 212.



Calculer le **taux de recouvrement** en divisant le nombre de pixels correspondant aux zostères par le nombre de pixels de l'image recadrée. Dans cet exemple, le taux de recouvrement est égal à : $2\,707\,212 / 5\,759\,056 = 47\%$.

| Exemples de taux de recouvrement

Classe de taux de recouvrement (%)	Recouvrement estimé par ImageJ (%)	Photo
1-25	25	
26-50	42	
51-75	61	
76-99	89	



Conseil
scientifique
et technique

BRGM, FREMER,
INERIS, Irstea et LNE

