

Ifremer – ODE UL
Laboratoire Environnement Ressources d'Arcachon

Gilles TRUT
Loïc RIGOUIN
Isabelle AUBY
Hélène OGER-JEANNERET
Florian GANTHY
Mathis COGNAT

Société SEMANTIC TS
Claire NOEL
Simon MARCHETTI
Eric BAUER

Juin 2018 - ODE/UL/LER/AR/18.008

Directive Cadre sur l'Eau : Cartographie des herbiers de *Zostera marina* du Bassin d'Arcachon



© LER Arcachon



Agence de l'Eau
Adour Garonne

**Directive Cadre sur l'Eau :
Cartographie des herbiers de *Zostera marina*
du Bassin d'Arcachon**

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : ODE/UL/LER/AR/18.008	Date de publication : Juin 2018
Diffusion : libre : x restreinte: <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>	Nombre de pages : 55
Validé par : Touria BAJJOUK, Claire ROLLET	Bibliographie : oui
	Illustration(s) : oui
	Langue du rapport : Français
Titre et sous-titre du rapport :	
Directive Cadre sur l'Eau : Cartographie des herbiers de <i>Zostera marina</i> du Bassin d'Arcachon	
Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/>	Rapport définitif x
Auteur(s) principal(aux) :	Organisme / Direction / Service, laboratoire
Gilles TRUT Isabelle AUBY Loïc RIGOUIN Hélène OGER-JEANNERET Florian GANTHY Mathis COGNAT	Ifremer/Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes/ Unité LITTORAL/Laboratoire Environnement Ressources d'Arcachon
Claire NOEL Simon MARCHETTI Eric BAUER	Société SEMANTIC TS, Bureau d'Etudes Environnement Océanographie Acoustique 83110 SANARY SUR MER
Collaborateur(s) : nom, prénom	
Cadre de l'étude : Surveillance DCE, suivi surfacique herbiers en Adour Garonne, convention 16/5210601/F	

Sommaire

1. Introduction	7
2. Contexte de l'étude et objectifs.....	9
2.1. L'approche "Zones homogènes" de la DCE	9
2.2. Le site d'étude : Le bassin d'Arcachon.....	10
2.3. Rappel sur les zostères	10
2.4. Rappel des objectifs de l'étude	11
3. Cartographie des herbiers de <i>Zostera marina</i>	12
3.1. Matériel et méthodes	12
3.1.1. Carte de 1988	12
3.1.2. Observations de 2001	12
3.1.3. Carte de 2008	13
3.1.4. Carte de 2016	14
3.2. Extension de <i>Zostera marina</i>	26
3.2.1. Carte établie en 1988	26
3.2.2. Carte établie en 2001	28
3.2.3. Carte établie en 2008	29
3.2.4. Carte établie en 2016	30
3.3. Évolution temporelle de l'emprise des herbiers de <i>Zostera marina</i>	42
3.3.1. Évolution au cours de la période 1988 – 2008.....	43
3.3.2. Évolution au cours de la période 2008 – 2016.....	45
3.3.3. Évolution cumulée au cours de la période 1988 – 2016.....	47
3.4. Calcul de l'indice « extension » de l'indicateur « angiospermes » DCE	48
4. Conclusion et perspectives.....	50
Bibliographie	53

1. Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) 2000/60/CE établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Elle fixe comme objectif général pour les Etats Membres, l'atteinte, à l'horizon 2021, d'un bon état écologique et chimique des masses d'eau souterraines et de surface, ces dernières incluant les eaux côtières et de transition.

Pour cela, un découpage des eaux en unités géographiques homogènes dénommées Masses d'Eau a été défini. La masse d'eau représente l'unité de classification et de gestion de la DCE et se trouve rattachée à un bassin hydro-géographique. Ainsi, un réseau de sites pérennes, réparti sur l'ensemble du territoire national a été mis en place, de façon à disposer d'un suivi des eaux littorales effectif sur le long terme.

Afin d'évaluer l'état écologique d'une masse d'eau, la DCE introduit la notion d'écart par rapport à une situation de référence. Les valeurs de référence, que l'on peut considérer comme niveau étalon du très bon état écologique, doivent être établies par type de masse d'eau et par élément de qualité biologique : phytoplancton, macrophytes (macroalgues et angiospermes marines), macro-invertébrés benthiques (et poissons, uniquement pour les masses d'eau de transition).

Pour les herbiers de zostères, il a été décidé que la situation de référence serait définie, pour chaque masse d'eau, par le meilleur état connu des herbiers au cours de la période historique pour laquelle on dispose d'information. En effet, les herbiers des différentes zones géographiques sont naturellement variables en extension, densité, biomasse et composition, et ces métriques dépendent de différents facteurs : géographique, nature du substrat, régime hydrodynamique.

L'indicateur DCE « angiospermes » est calculé, sur les côtes françaises de Manche-Atlantique pour les herbiers de zostères marines (*Zostera marina*) et naines (*Zostera noltei*), à partir de trois indices dans chaque masse d'eau (Auby *et al.*, 2010) :

- Composition taxinomique : évolution du nombre d'espèces de zostères observées ;
- Abondance : évolution de la densité des pieds pour *Zostera marina* et du pourcentage de recouvrement pour *Zostera noltei* ;
- Extension : évolution des emprises maximales recouvertes par les herbiers de zostères.

La masse d'eau FRFC06 « Arcachon amont » présente, sur toute son emprise, des herbiers de zostères marines (*Zostera marina*) et de zostères naines (*Zostera noltei*) : dont le rôle fonctionnel est essentiel. Ces herbiers interviennent en effet de façon déterminante dans le cycle des nutriments, le bilan érosion-dépôt des sédiments, la production primaire benthique, la diversité et l'abondance de la faune invertébrée, des poissons et de l'avifaune (habitat, nourriture). Cet habitat remarquable, qui occupait en 1988 environ 50 % de la surface totale de la masse d'eau « Arcachon amont » est aujourd'hui en régression (Plus *et al.*, 2010).

Dans le bassin d'Arcachon, la **composition taxinomique** et l'**abondance** des zostères font l'objet d'un suivi annuel depuis 2006 (*Zostera noltei*) et 2007 (*Zostera marina*) selon le protocole décrit dans Auby *et al.* (2014). Les résultats acquis sont présentés dans des rapports annuels mis à disposition sur Archimer (Archive Institutionnelle de l'Ifremer) (Auby *et al.*, 2009 à Auby *et al.*, 2017).

Le **suivi surfacique** des herbiers, qui doit être effectué une fois par plan de gestion (soit tous les 6 ans), a été réalisé en 2007 et 2012 pour *Zostera noltei*, en 2008 et 2016 pour *Zostera marina*.

Ce document présente les résultats du suivi surfacique des herbiers infralittoraux de zostères marines du bassin d'Arcachon opéré en juin 2016.

Comme en 2008 (Dalloyau *et al.*, 2009), la méthode utilisée, dite DIVA (Détection & Inspection Verticale Acoustique), permet de générer une information de présence/absence, par superposition de signaux issus d'un sonar latéral GEOSWATH et d'un sondeur acoustique mono-faisceau de

grande précision. Ces données sont couplées à des observations de terrain obtenues à l'aide de caméras vidéo sous-marines GoPro, reliées à un système de positionnement sub-métrique. Les opérations de terrain ont été réalisées en juin 2016.

En outre, ce rapport traite de l'évolution temporelle de la surface occupée par les herbiers de zostères marines depuis les trente dernières années, en s'appuyant sur les données de 1988 et de 2008, déjà intégrées dans le Système d'Information Géographique (SIG) du Laboratoire Environnement Ressources d'Arcachon (Dalloyau *et al.*, 2009).

2. Contexte de l'étude et objectifs

2.1. L'approche "Zones homogènes" de la DCE

Au sens de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), une « masse d'eau » est définie comme une entité fonctionnelle et homogène du point de vue physique (hydrodynamique, nature du substrat marin) et biologique (faune et flore). La délimitation des « masses d'eau » consiste donc à scinder le domaine d'étude en unités géographiques cohérentes dont les caractéristiques sont identiques ou très proches. Pour les habitats marins, deux groupes de masses d'eau ont été distingués :

- Les masses d'eau côtières (MEC), qui regroupent les habitats littoraux compris entre la ligne de base à terre servant pour la délimitation des eaux territoriales et sa projection à un mille marin vers le large ;
- Les masses d'eau de transition (MET), qui englobent les habitats présents aux embouchures des rivières et des fleuves ; elles sont partiellement salines en raison de leur proximité des eaux côtières mais restent fondamentalement influencées par des courants d'eau douce.

Le bassin d'Arcachon a été découpé en deux masses d'eau côtières (Figure 1) : « Arcachon amont » (FRFC06) d'une superficie de 148,5 km², et « Arcachon aval » (FRFC07) d'une surface de 66,1 km².

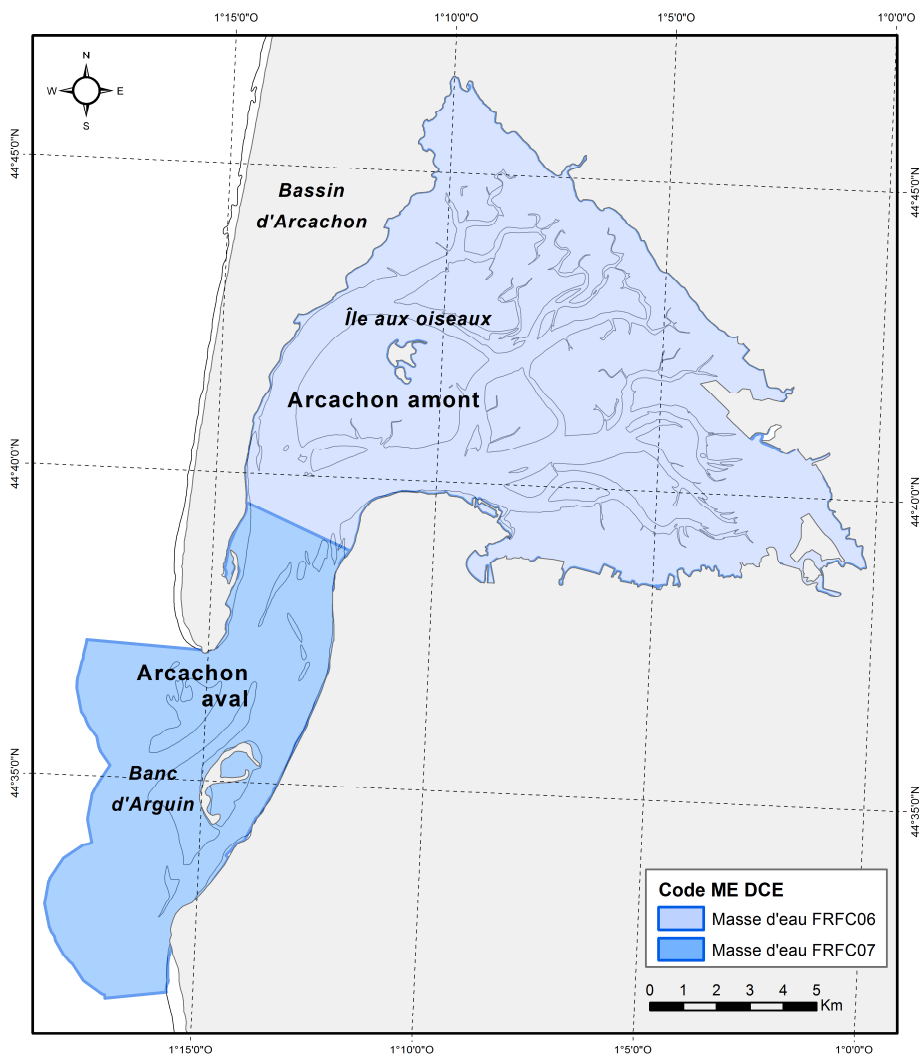


Figure 1 : Délimitation des masses d'eau dans le bassin d'Arcachon

2.2. Le site d'étude : Le bassin d'Arcachon

Le bassin d'Arcachon est une lagune côtière mésotidale, de forme triangulaire, située sur le littoral aquitain en bordure du Golfe de Gascogne par 44°40' Nord de latitude et 1°10' Ouest de longitude (Figure 1), et qui communique avec l'Océan Atlantique par l'intermédiaire de deux passes étroites, au nord et au sud du banc d'Arguin.

La superficie totale de la lagune (limite : méridien du phare du Cap Ferret) est de 174 km² dont environ 1/3 est occupé par les chenaux et 2/3 par la zone intertidale.

Les chenaux principaux, les plus profonds, sont prolongés par un réseau de chenaux secondaires appelés localement « esteys ».

La zone intertidale est constituée d'estrans sableux à sablo-vaseux, le plus souvent peuplés par des herbiers de zostères naines (*Zostera noltei*) qui découvrent régulièrement à chaque marée. Dans la continuité immédiate de ces herbiers, et bordant les chenaux, les zostères marines (*Zostera marina*) colonisent le secteur subtidal.

2.3. Rappel sur les zostères

Les zostères sont des angiospermes marines ou phanérogames marines qui se développent sur les sédiments sableux et sablo-vaseux des côtes de la Manche et de l'Atlantique, et dans les lagunes méditerranéennes. Elles forment des herbiers parfois denses, comparables aux prairies terrestres. Ces herbiers peuvent être constitués de deux espèces de tailles différentes : la plus grande, *Zostera marina* se développe en zone subtidale (forme magnozostéride) et en limite inférieure de la zone intertidale (forme parvozostéride, à limbes plus étroits et moins longs), alors que *Zostera noltei*, de taille inférieure, est présente en zone intertidale.



Zostères naines @LER Arcachon



Zostères marines @LER Arcachon

Les herbiers de zostères présentent un fort intérêt écologique, patrimonial et économique, en constituant des écosystèmes remarquables (Larkum *et al.*, 2006). Ces herbiers abritent une biodiversité importante, et jouent un rôle majeur dans la reproduction et l'alimentation d'un grand nombre d'espèces (poissons, crustacés, oiseaux) dont certaines (avifaune migratrice) bénéficient d'un statut de protection (REBENT, 2004).

Les herbiers contribuent en outre à la stabilisation du substrat en piégeant les particules sédimentaires par la réduction des contraintes d'érosion. Les parties endogées (réseaux de rhizomes et de racines) modifient de plus les propriétés biogéochimiques des sédiments colonisés.

Les herbiers de zostères bénéficient de statuts de protection en tant qu'« habitats » et « habitats d'espèces » (EUNIS, Directive Habitat 92/43, Loi Littoral 86-2). Ils sont aussi répertoriés par OSPAR (2004) parmi les habitats menacés. En outre, *Zostera marina* est incluse dans la liste des espèces protégées en Nouvelle Aquitaine (arrêté du 8 mars 2002).

Soumis à de nombreuses pressions anthropiques, les herbiers s'avèrent de bons indicateurs biologiques des changements de conditions liés aux pressions qui s'exercent sur les écosystèmes, tant à l'échelle locale (pêche à pied, activités nautiques, broutage par l'avifaune etc...), que régionale (eutrophisation) ou encore globale (modifications climatiques) (Larkum, 2006; Marten *et al.*, 2008).

2.4. Rappel des objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail est de mettre à jour la carte d'emprise maximale des herbiers infratidaux de zostères marines présents sur les masses d'eau côtières « Arcachon amont » et « Arcachon aval » du bassin d'Arcachon et de comparer l'emprise 2016 à celles de 1988 et 2008.

Dans le cadre du contrôle de surveillance défini par la DCE, cette cartographie correspond à la mise à jour qui doit être opérée au cours du second plan de gestion (2013-2018).

L'acquisition de ces nouvelles données surfaciques permettra d'actualiser le classement du bassin d'Arcachon pour l'indicateur « angiospermes ».

3. Cartographie des herbiers de *Zostera marina*

3.1. Matériel et méthodes

Trois cartographies complètes des herbiers de *Zostera marina* du bassin d'Arcachon pour les masses d'eau « Arcachon amont » et « Arcachon aval » ont été réalisées en 1988, 2008 et 2016.

Entre les deux premières acquisitions, en 2001, des observations ponctuelles ont été effectuées dans certains herbiers.

Les méthodes utilisées pour réaliser ces études sont détaillées dans les paragraphes suivants.

Les analyses spatiales relatives à la cartographie *stricto sensu* ont été effectuées par géotraitement sous logiciel SIG ArcGis© 10.3. L'ensemble des graphiques a été réalisé à l'aide du logiciel SigmaPlot© 9 Systat Software.

Les cartes présentées dans ce rapport sont géo-référencées dans le référentiel géographique national Datum NTF en Lambert 93. Pour un maximum de précision, les données vidéo acquises dans le système Datum GCS WGS84 ont été exploitées dans leur système d'origine (méridien d'origine : Greenwich) en degrés minutes décimales, puis transformées par la suite en Lambert 93.

3.1.1. Carte de 1988

La carte des herbiers de *Zostera marina* de 1988 a été établie par J.-M. Bouchet (Station Marine d'Arcachon, CNRS) à partir de l'interprétation d'orthophotographies pour les zones peu profondes et de prélèvements à la benne pour les zones plus profondes ou turbides.

Ces données ont été numérisées dans les années 1990 sous ArcView© 3.2 (Manaud *et al.*, 1997), puis transformées pour les besoins de la présente étude sous ArcGis© 10.3.

3.1.2. Observations de 2001

En 2001, une équipe de la Station Marine d'Arcachon, dirigée par Xavier de Montaudouïn (Université de Bordeaux) a exploré en plongée les bordures de certains chenaux du Bassin (Figure 2) afin d'y repérer les zostères marines. Les plongeurs/observateurs signalaient régulièrement la présence ou l'absence d'herbier à une personne embarquée qui notait ce paramètre ainsi que la localisation du point obtenue à partir d'un GPS.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une étude d'impact préalable au dragage de l'axe Piquey-Arès et des chenaux co-latéraux (de Montaudouïn et Lebleu, 2002).

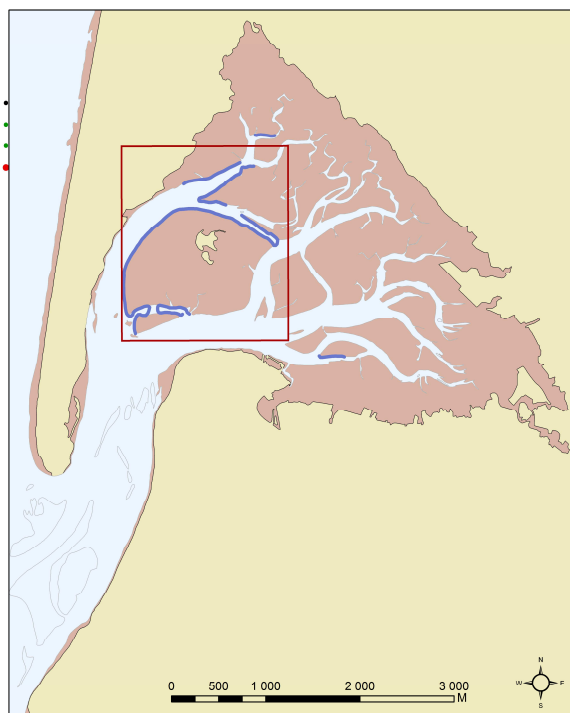


Figure 2 : Localisation des observations réalisées en 2001.

Les données obtenues consistent en une série de points géo-référencés affectés des attributs "présence" ou "absence" de zostères.

Ces données, bien que partielles, apportent des informations intéressantes pour interpréter l'évolution observée entre les deux cartographies complètes.

3.1.3. Carte de 2008

En 2008, plusieurs méthodes ont été associées pour cartographier les herbiers de *Zostera marina* du Bassin, certaines mises en œuvre par la société SEMANTIC TS, d'autres par l'Ifremer.

La société SEMANTIC TS, spécialisée en détection acoustique des fonds marins, mène depuis 2004 des travaux de recherche dans le domaine de la cartographie acoustique des herbiers de posidonie (*Posidonia oceanica*), pour lesquels elle a développé une méthode de détection acoustique à la verticale du navire. Cette méthode est appelée DIVA (Détection & Inspection Verticale Acoustique). Afin de disposer d'informations complémentaires, SEMANTIC TS met en œuvre différents capteurs acoustiques : sonars latéraux, sondeurs bathymétriques multi-faisceaux, et échosondeur.

Ces méthodes sont décrites précisément dans le paragraphe 3.1.4.

Ces techniques ont été utilisées au cours de l'été 2008 par la société SEMANTIC sur tous les secteurs de la masse d'eau « Arcachon amont » dans lesquels les zostères marines étaient présentes en 1988.

Les données acoustiques ainsi obtenues ont été validées par comparaison avec les informations recueillies par l'Ifremer à l'aide du système vidéo remorqué Moogli (cf. chap. 3.1.4.3 Fig. 10), sur un certain nombre de secteurs, notamment ceux sur lesquels les résultats de l'acoustique étaient incertains.

Pour la masse d'eau « Arcachon amont », la couverture finale des herbiers de zostères marines en 2008 résulte du croisement entre les résultats issus de ces différentes approches.

Du fait de sa faible superficie, l'herbier de zostères marines de la masse d'eau « Arcachon aval », sur le banc d'Arguin, a été cartographié par contourage direct à l'aide d'un DGPS Trimble (Dalloyau *et al.*, 2009).

3.1.4. Carte de 2016

En 2016, les travaux d'acquisition de données ont de nouveau été confiés à la société SEMANTIC TS.

Comme en 2008, pour établir la cartographie des zostères du bassin d'Arcachon, SEMANTIC TS a mis en œuvre une méthode d'acquisition de données multi-capteurs (Figure 3) et utilisé simultanément les moyens suivants :

- **Le navire océanographique SEMANTIC**, dédié à la reconnaissance des fonds marins et présentant un très faible tirant d'eau, équipé d'un **DGPS RTK** et d'une **centrale d'attitude**, ainsi que des **fonctionnalités de navigation**.
- **Le sonar latéral interféromètre GEOSWATH** qui permet d'établir l'imagerie sonar latérale en même temps que la bathymétrie.
- **La méthode de classification acoustique des fonds marins** opérée à partir d'un **sondeur mono-faisceau scientifique SIMRAD ES60**.



Figure 3 : Méthode d'acquisition multi-capteurs opérée dans le bassin d'Arcachon en 2008 et 2016

Le matériel, les différentes étapes d'acquisition et de traitement des données sont détaillées dans les paragraphes suivants.

3.1.4.1. Bathymétrie et imagerie acoustique

Le levé bathymétrique nécessite la mise en œuvre des équipements suivants :

- Un **sondeur bathymétrique** multi-faisceaux: KONGSBERG NG+ et son capteur de célérité
- Un **système de mesure de la position et de l'attitude du navire** : Centrale inertielle couplée à 2 GPS RTK CODA OCTOPUS FS 185+
- Un **profileur de célérité** : Mini SVS Valeport P

Le **positionnement** du bateau doit être connu avec une précision importante. Pour obtenir ces données, deux types de matériels sont utilisés :

- Une centrale inertielle haut de gamme, Coda Octopus FS 185+, qui permet de caractériser l'attitude des instruments (angles de rotation) de façon très fine (résolution constructeur $\sim 0.05^\circ$ pour le cap ; $< 0.025^\circ$ pour le roulis et le tangage).
- Deux DGPS RTK dont le fonctionnement est schématisé sur la figure ci-après.

Le positionnement est réalisé par un DGPS RTK dont le principe est schématisé sur la figure ci-après.

Le GPS différentiel (Differential Global Positioning System : DGPS) permet d'améliorer la précision du GPS en réduisant la marge d'erreur du système. Il utilise un réseau de stations fixes de référence qui transmet l'écart entre les positions indiquées par les satellites et leurs positions réelles connues. Le récepteur peut ainsi déterminer l'erreur du système et l'appliquer à ses mesures de position afin de les corriger. La transmission des corrections au récepteur mobile peut se faire de deux manières : DGPS et RTK.

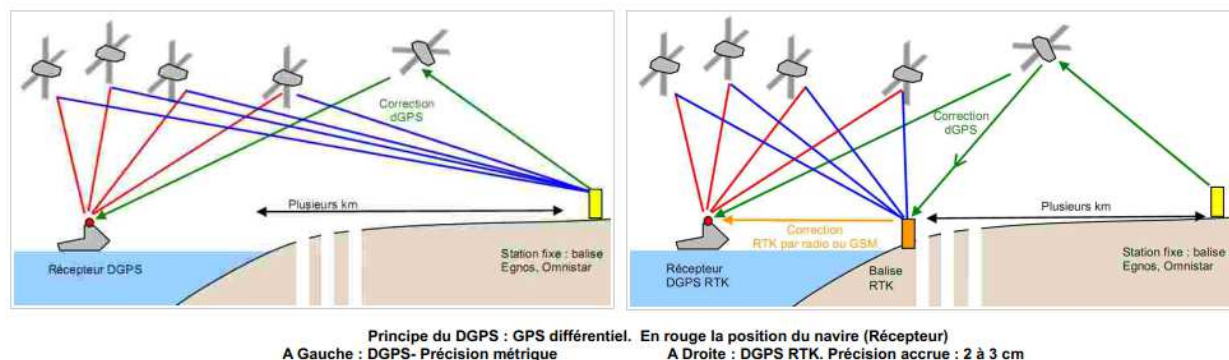


Figure 4 : Principe de fonctionnement des DGPS et DGPS RTK

L'utilisation d'un DGPS RTK couplé à une centrale inertielle positionnée à terre, permet d'obtenir une localisation très précise (centimétrique) du bateau et de ces appareils de mesures :

- précision constructeur ~ 1 cm en X et Y
- précision constructeur ~ 2 cm en Z

Le parcours du navire est obtenu par fusion des données issues de la centrale inertielle et de la double antenne GPS RTK, assurant un positionnement centimétrique (précision constructeur : ~ 1 cm en X et Y, 2 cm en Z) en temps réel (technologie RTK).

L'utilisation de la centrale inertielle CODA OCTOPUS FS185+ combiné au sondeur KONGSBERG NG+ permet de s'affranchir de toute latence dans le système de mesure.

L'acquisition des **données acoustiques** destinées à établir les **bathymétries** et à mesurer la **réflectivité des fonds** est réalisée à l'aide d'un sonar latéral (Figure 5).

Cet appareil réalise, à l'aide d'ondes sonores, des images acoustiques détaillées de la réflectivité des fonds marins. Ces images sont obtenues à l'aide d'un faisceau sonore étroit, avec lequel on balaie le fond avec une incidence rasante. L'écho recueilli au cours du temps

fournit une représentation de la réflectivité du fond et traduit surtout la présence d'irrégularités ou de petits obstacles. Ce signal enregistré latéralement à la direction d'avancée du sonar (d'où son nom : side scan sonar) constitue ligne après ligne une image acoustique du fond.

Le sonar latéral utilisé en 2016, KONGSBERG NG+, est un sondeur multi-faisceaux interférométrique de nouvelle génération (2012). Il présente une récurrence d'émission deux fois plus grande que le sonar utilisé au cours de la cartographie de 2008 (GEOSWATH).

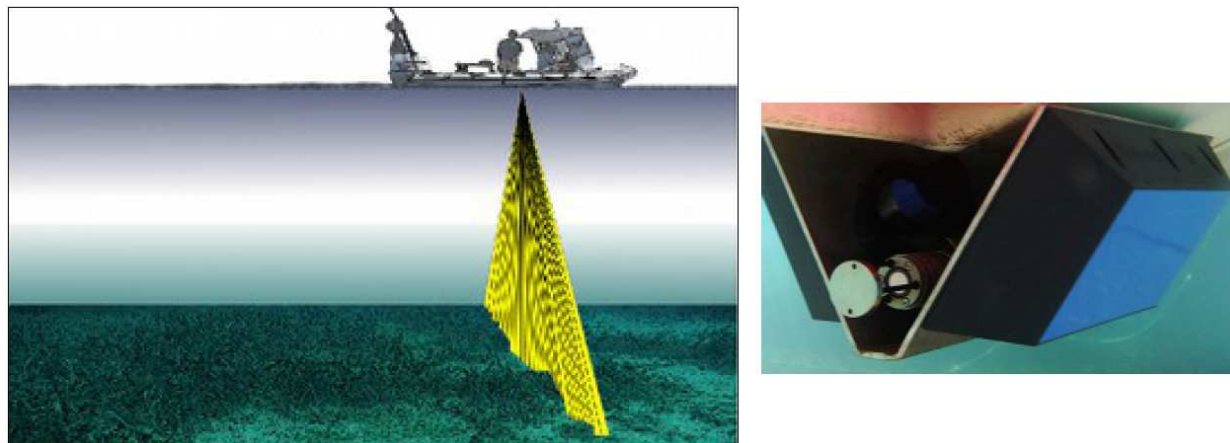


Figure 5 : A gauche : Principe d'acquisition d'un sondeur multi-faisceaux,
A droite : sonde en « V » du sondeur KONGSBERG NG+.

Le sondeur KONGSBERG NG+ installé sous la coque du navire est à la fois un sondeur multi-faisceaux et un sonar latéral. Il permet ainsi la réalisation d'un levé bathymétrique précis (précision constructeur ~ 3 cm), perpendiculairement à la route du navire.

La largeur de la bande couverte à chaque émission varie entre 6 fois et jusqu'à plus de 10 fois la hauteur d'eau.

Cette disposition permet la réalisation de vraies images de réflectivité avec l'avantage d'un géo-référencement aussi précis que celui de la bathymétrie, c'est-à-dire centimétrique avec le GPS RTK.

Afin de bien détecter la végétation, le sonar latéral du KONGSBERG NG+ doit fonctionner à une fréquence au moins supérieure à 200 kHz. Le matériel utilisé travaille à une fréquence de 250 kHz et produit de vraies images de réflectivité du fond ce qui permet une bonne identification des contours de végétation sous-marine.

Les variations de température et de salinité influent fortement sur la vitesse et le trajet de la propagation des ondes acoustiques en milieu sous-marin. La connaissance de la célérité en fonction de la profondeur en différents points de la zone à cartographier est importante pour ne pas dégrader la qualité et la précision des mesures. A cet effet, les profils verticaux de célérité sont mesurés à l'aide d'un profileur Mini SVS VALEPORT P.

Un second type de matériel couplé à un outil de classification automatique est destiné à acquérir des données acoustiques supplémentaires.

Le sondeur mono-faisceau utilisé est le SIMRAD ES60 associé à la céramique 38/200kHz. C'est un sondeur scientifique de précision qui permet l'enregistrement de la réponse impulsionnelle du signal acoustique retour.

Ce sondeur peut émettre à deux fréquences séparées de plusieurs octaves (38 kHz et 200 kHz), ce qui est fondamental pour obtenir des informations de caractérisation (les différentes fréquences signant les phénomènes environnementaux en fonction de la taille de leur longueur d'onde).

3.1.4.2.Méthode DIVA (Détection & Inspection Verticale Acoustique)

La méthode DIVA est une méthode d'analyse des signaux de type SACLAF-Végétation permettant une reconnaissance acoustique des végétations sous-marines.

Ce **S**ystème **A**coustique de **C**lassification **A**utomatique des natures des **F**onds (SACLAF), est couplé au sondeur acoustique mono-faisceau SIMRAD ES60 fixé sous la coque du navire. Ce dernier émet une onde acoustique qui se réfléchit au fond et revient vers la surface. Cette onde subit une déformation qui est fonction de la nature du fond. Le signal reçu est enregistré par le sondeur et sa comparaison avec le signal émis permet au SACLAF de classer les fonds.

Pour la cartographie des herbiers du Bassin d'Arcachon, la méthode DIVA a été mise en œuvre simultanément à l'acquisition des données du sonar latéral multi-faisceaux.

Le principe de la méthode DIVA est le suivant :

- Le navire instrumenté se déplace sur la zone à lever. Un ordinateur, installé à bord, récupère toutes les informations en provenance des instruments de mesure : position (latitude, longitude et élévation de la mer) indiquée par un GPS différentiel, réponse impulsionnelle du signal sonore réverbéré par le fond fournie par le sondeur mono-faisceau ;
- Le système analyse et traite la réponse impulsionnelle et en déduit les caractéristiques de la végétation fixée sur le fond sous-marin ;
- L'ordinateur traite l'ensemble des informations collectées et associe à une latitude et une longitude aux caractéristiques de la végétation.

Lors du traitement, la première étape consiste à extraire du signal reçu par le sondeur mono-faisceau le premier écho du fond.

Ensuite, une méthode d'analyse discriminante permet d'affecter à cet écho une classe de biocénose préexistante (roche, sable, végétation, ...).

Les modalités d'affectation utilisées par l'algorithme de traitement sont définies lors de la phase d'apprentissage. Cette phase a eu lieu lors des essais de calibration, réalisés sur un secteur pour lequel la vérité terrain était connue.

Enfin, le résultat de la classification de l'écho est associé à la latitude et la longitude fournies par le GPS, ce qui en assure le géoréférencement.

Lorsque le navire traverse la prairie marine, le signal acoustique du sondeur mono-faisceau (Figure 6 - milieu) présente de nombreux échos sur la canopée de l'herbier ; ce n'est plus le cas lorsque le navire est en dehors de la prairie, sur le chenal ou sur le plateau.

La méthode DIVA interprète de façon automatique ce signal (Figure 6 - bas) et fournit une information géoréférencée de présence/absence de végétation.

Il est à noter que la signature acoustique de la zostère marine est particulièrement forte en comparaison de celle de la posidonie et des laminaires.

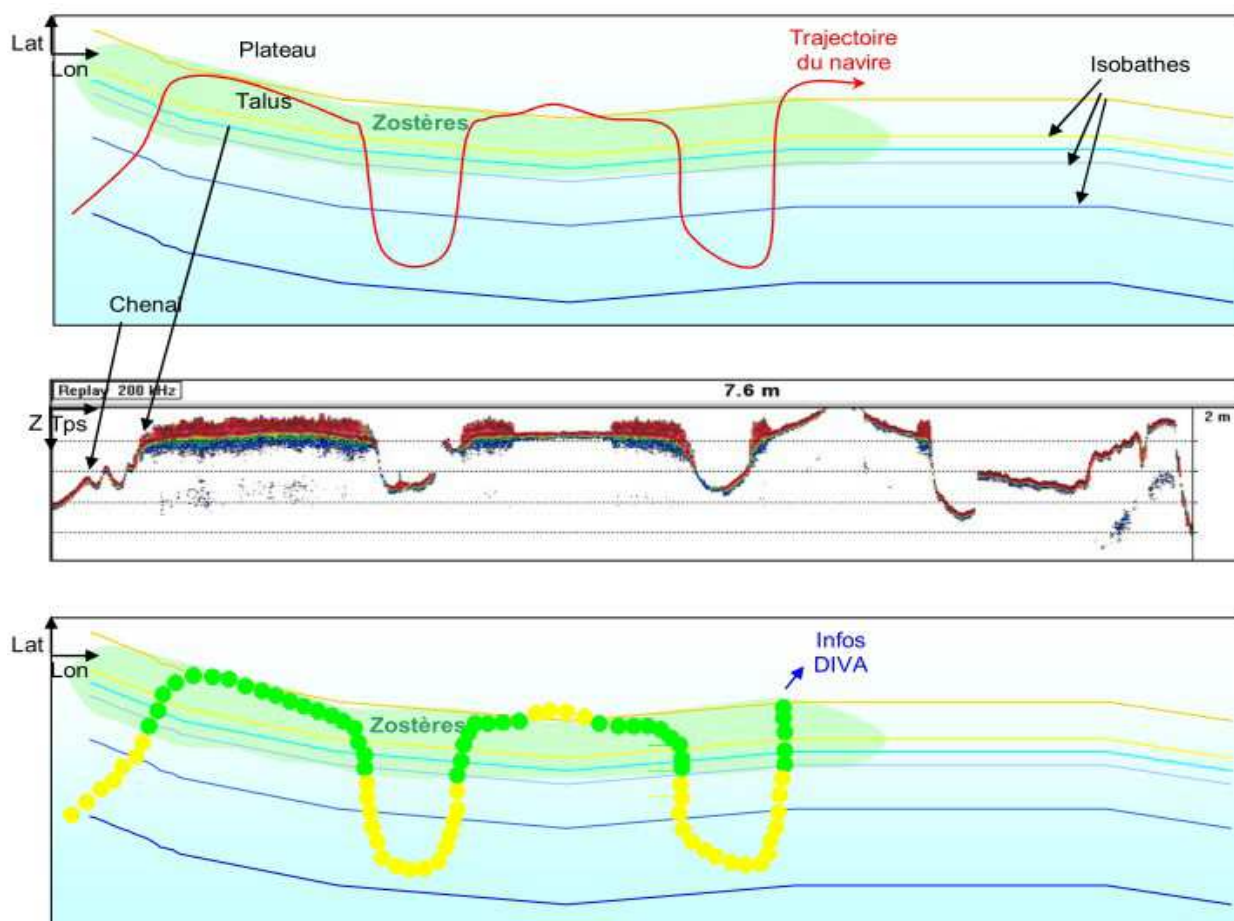


Figure 6 : Exemple d'interprétation DIVA de l'image sonar fournie par le sondeur mono-faisceau.
 En haut : Vue de dessus du chenal avec la trajectoire du navire
 Au milieu : Profil vertical : Données acoustiques acquises au sondeur mono-faisceau
 En bas : Vue de dessus. Résultats de la méthode DIVA

3.1.4.3. Acquisition des données vidéo de validation terrain

➤ Une première série de données vidéo a été acquise, en juin 2016, par la société SEMANTIC TS.

Cette première campagne a été effectuée à l'aide d'une caméra GoPro équipée d'un caisson étanche sur lequel un récepteur Wi-Fi a été fixé. L'antenne Wi-Fi permet d'obtenir une image en temps réel visible directement sur l'ordinateur portable situé à côté du poste de pilotage.

Deux méthodes ont été utilisées pour acquérir les images sous-marines :

La première consiste à fixer la caméra sur un dépresseur (lest profilé) de façon à filmer le fond au cours d'un déplacement (figure 7).



Figure 7 : Caméra vidéo fixée sur le dépresseur profilé

La seconde consiste à descendre la caméra à l'aide d'un lest afin d'obtenir par sondage direct, une image rapide du fond en un point donné (Figure 8).



Figure 8 : Caméra fixée sur une perche, technique par sondage

Pour les deux méthodes, la caméra GoPro est synchronisée sur l'heure GPS ce qui permet ensuite de géoréférencer les séquences vidéo image par image.

➤ L'interprétation des données de validation terrain acquises par la société SEMANTIC TS en juin 2016 ayant mis en évidence un nombre insuffisant d'images localisées dans les polygones classifiés « probabilité moyenne de présence d'herbiers discontinus - classe 2 », « faible probabilité de présence d'herbiers – classe 3 » et « très faible probabilité de présence d'herbiers - classe 4 », (Cf chapitre 3.1.4.5, figure 14), l'Ifremer a opéré, une campagne de validation terrain supplémentaire en octobre-novembre 2017 principalement sur ces 3 classes.

Les nouvelles images ont été acquises avec le poisson remorqué Moogli (figure 9) utilisé en 2009 (Dalloyau *et al.*, 2009), équipé d'une caméra GoPro.



Figure 9 : Caméra Gopro fixée sur le poisson remorqué « Moogli »

3.1.4.4. Données obtenues

Le traitement des données issues des deux sondeurs (mono-faisceau et multi-faisceaux) a été effectué au moyen du logiciel POSEIDON développé par SEMANTIC TS. Ce logiciel permet la réalisation de la « mosaïque sonar » avec une résolution de 50 cm.

Toutes les données ont été acquises dans le système géodésique WGS84 puis projetées en Lambert 93.

La référence altimétrique des données bathymétriques est le NGF IGN69 qui selon le RAM (références altimétriques maritimes) équivaut sur le secteur d'Arcachon à + 1.98 m par rapport au zéro hydrographique qui est le niveau de référence des cartes marines et des annuaires de marée.

A. Les données sonar latéral (sondeur multi-faisceau KONSBERG NG+)

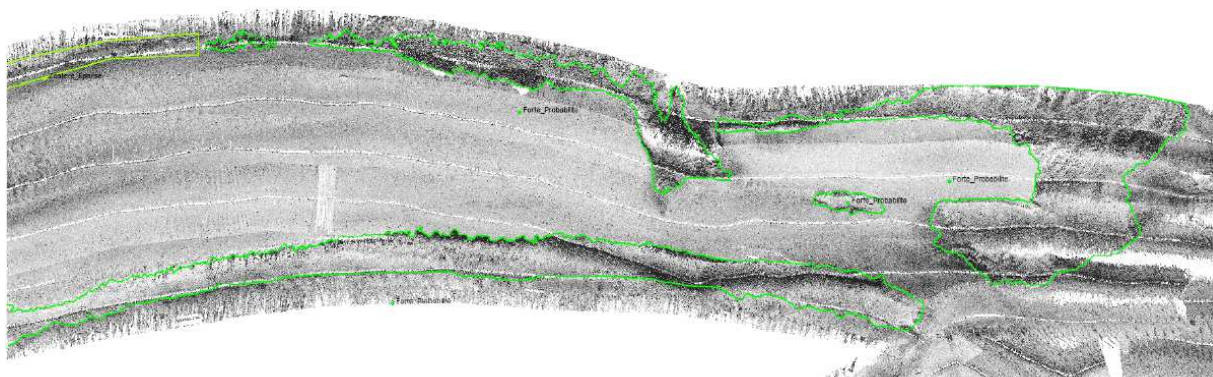


Figure 10 : Exemple de mosaïque sonar. En vert contour des zones à forte probabilité de présence de végétation sous-marine

Sur cet exemple on observe, au travers des différents niveaux de gris de l'image, que le fond marin présente des signatures acoustiques variables. Ces signatures permettent de définir des zones de comportement acoustique homogène mais la difficulté réside dans l'interprétation de ces zones, c'est-à-dire dans l'association à un niveau de gris donné, de la nature du fond correspondante (végétation, sable, vase...).

B. Les données DIVA

Les données issues du sondeur mono-faisceau SIMRAD ES60 sont traitées par la méthode DIVA qui permet de classifier avec robustesse les herbiers et/ou les sables plus ou moins vaseux.

La figure 11, ci-dessous, présente le résultat de la classification obtenue par DIVA.

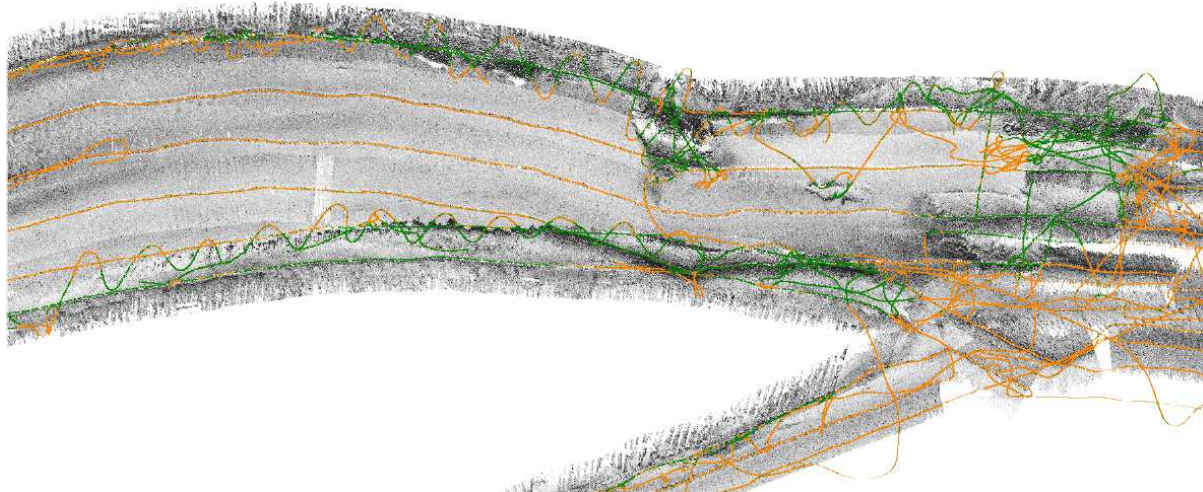


Figure 11 : Résultats de la méthode DIVA (point orange : sable - point vert : végétation)

C. Données Bathymétriques

Le matériel utilisé (sondeur interférométrique KONGSBERG NG+) permet d'établir une carte bathymétrique de la zone couverte.

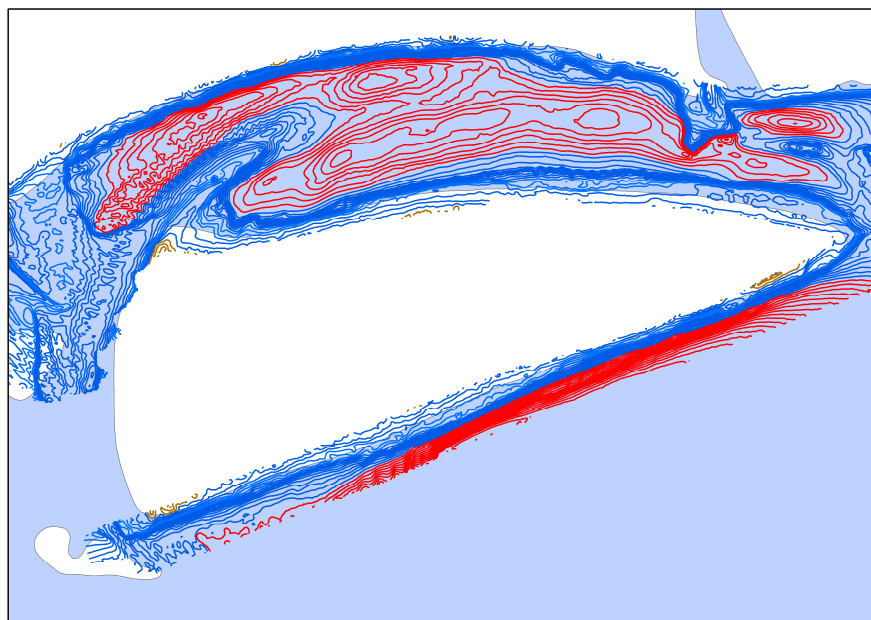


Figure 12 : Données bathymétriques obtenues

La connaissance des isobathes est une aide précieuse à la définition des limites inférieures et supérieures des herbiers de zostères marines.

3.1.4.5.Méthodologie adoptée pour construire la carte des herbiers en 2016

La campagne de terrain destinée à acquérir les données écho-acoustiques (Action SEMANTIC) a eu lieu au mois de juin 2016.

Les informations obtenues ont été traduites en polygones classifiés (Figure 13) en fusionnant les données suivantes :

- bathymétrie,
- imagerie sonar latéral,
- information de présence ou d'absence de végétation fournie par la méthode DIVA.

Ces polygones classifiés sont associés à une table attributaire qui contient les informations de confiance sur la donnée produite.

Les polygones classifiés ont ensuite été croisés avec les données vidéo de validation terrain de juin 2016 et octobre-novembre 2017.

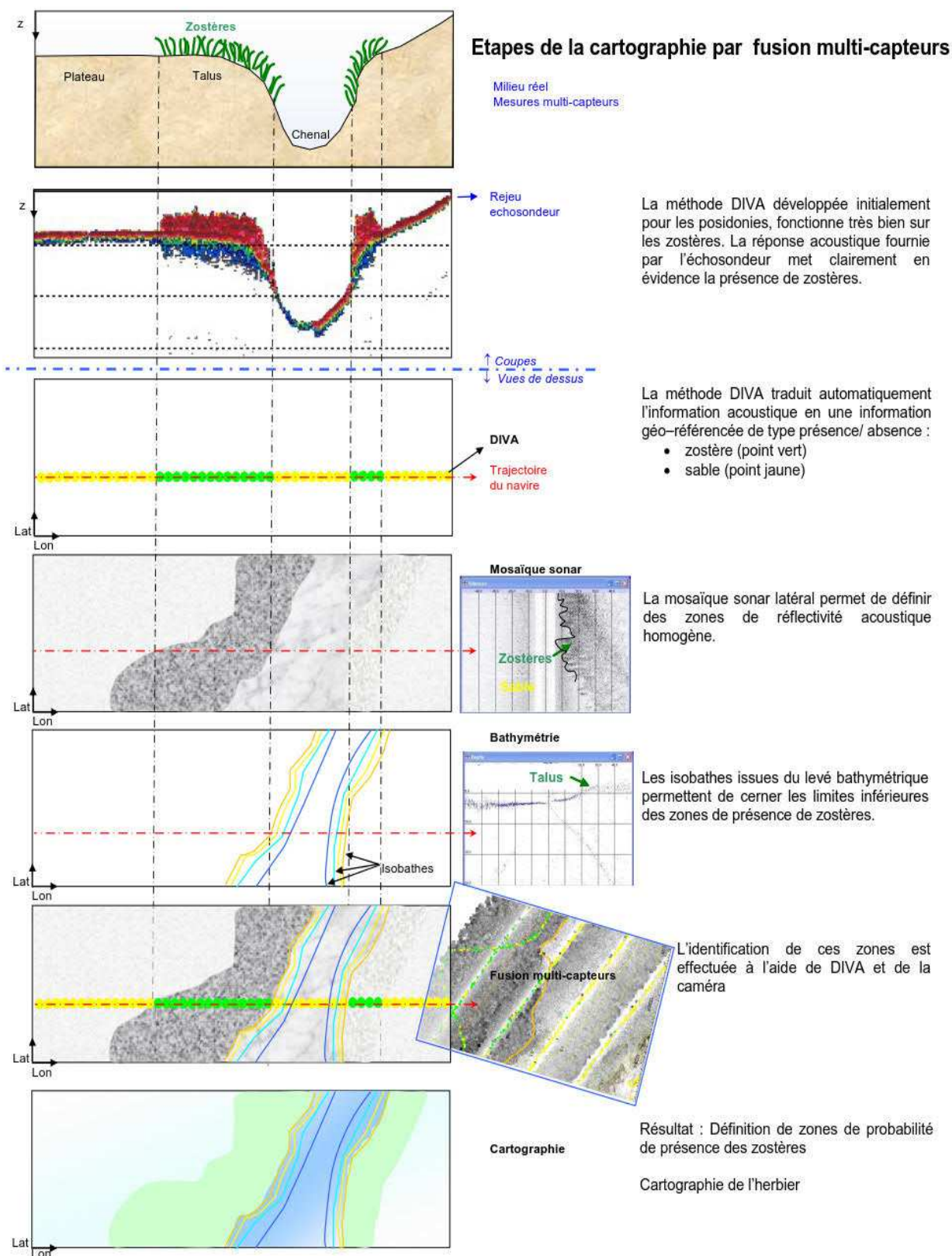


Figure 13 : Description des étapes successives permettant la construction des polygones classifiés de présence d'herbier.

Détermination de la classe de confiance

Les deux classes de confiance "Absence" et "Présence" de la classification finale des polygones sont les suivantes :

Classe 0 : Zone de forte probabilité d'absence d'herbier

- la méthode DIVA ne détecte pas d'herbier
- les limites ne sont pas visibles au sonar latéral multi-faisceaux
- les profondeurs ne correspondent pas à la gamme habituelle de présence des zostères

Classe 1 : Zone de forte probabilité de présence d'herbiers continus

- la méthode DIVA détecte un herbier systématiquement
- les limites sont franchement visibles au sonar latéral
- les profondeurs correspondent à la gamme habituelle de présence des zostères.

Pour les secteurs présentant des caractéristiques moins marquées, trois classes de confiance supplémentaires ont été créées :

Classe 2 : Zone de probabilité moyenne de présence d'herbiers discontinus

- la méthode DIVA détecte un herbier de temps en temps
- les limites sont visibles au sonar latéral, mais correspondent à des petites taches non continues
- les profondeurs correspondent à la gamme habituelle de présence des zostères.

Classe 3 : Zone de faible probabilité de présence d'herbiers

- la méthode DIVA détecte un herbier de temps en temps
- les limites ne sont pas franchement visibles au sonar latéral mais on observe des faibles changements de contraste
- les profondeurs ne correspondent pas à la gamme habituelle de présence des zostères.

Classe 4 : Zone de très faible probabilité de présence d'herbiers

Les deux méthodes ne s'accordent pas.

- la méthode DIVA ne détecte rien
- le sonar latéral met en évidence des zones de contraste mais qui pourraient aussi correspondre à des substrats de natures différentes.

Tableau 1 : Relations entre les classes de confiance, les résultats des mesures et la probabilité de présence d'herbiers.

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Analyse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	Aucun des critères de présence de végétation n'est satisfait.
Classe 1	Oui	Oui	Oui	Présence	Tous les critères de présence de végétation sont satisfaits.
Classe 2	Oui/Non	Oui Petites taches	Oui	Si présentes les zostères ne peuvent être qu'éparses. Présence discontinue possible, moyenne probabilité	La méthode DIVA "clignote", la gamme de profondeur est bonne, le sonar présente des tâches. Il peut aussi s'agir d'un substrat différent posé sur le fond, type "crépîdules" ou blocs présentant une certaine élévation (hauteur par rapport au fond).
Classe 3	Oui/Non	Faible	Non	Faible probabilité	La gamme de profondeur n'étant pas la bonne, la probabilité qu'il s'agisse de zostères est faible. Probablement un substrat différent posé sur le fond, type "crépîdules" ou blocs, présentant une certaine élévation (hauteur par rapport au fond).
Classe 4	Non	Oui		Très faible densité possible mais très faiblement probable	DIVA ne détecte pas de structure posée sur le fond : la probabilité qu'il s'agisse de zostères est très faible. Si présentes, les zostères seraient en très faible densité. Ou alors, il peut s'agir de substrats différents, pas forcément élevés (sédiments de rugosité différente).

Un exemple de représentation des polygones en fonction de la classe de probabilité qui leur est affectée est présenté figure 14.

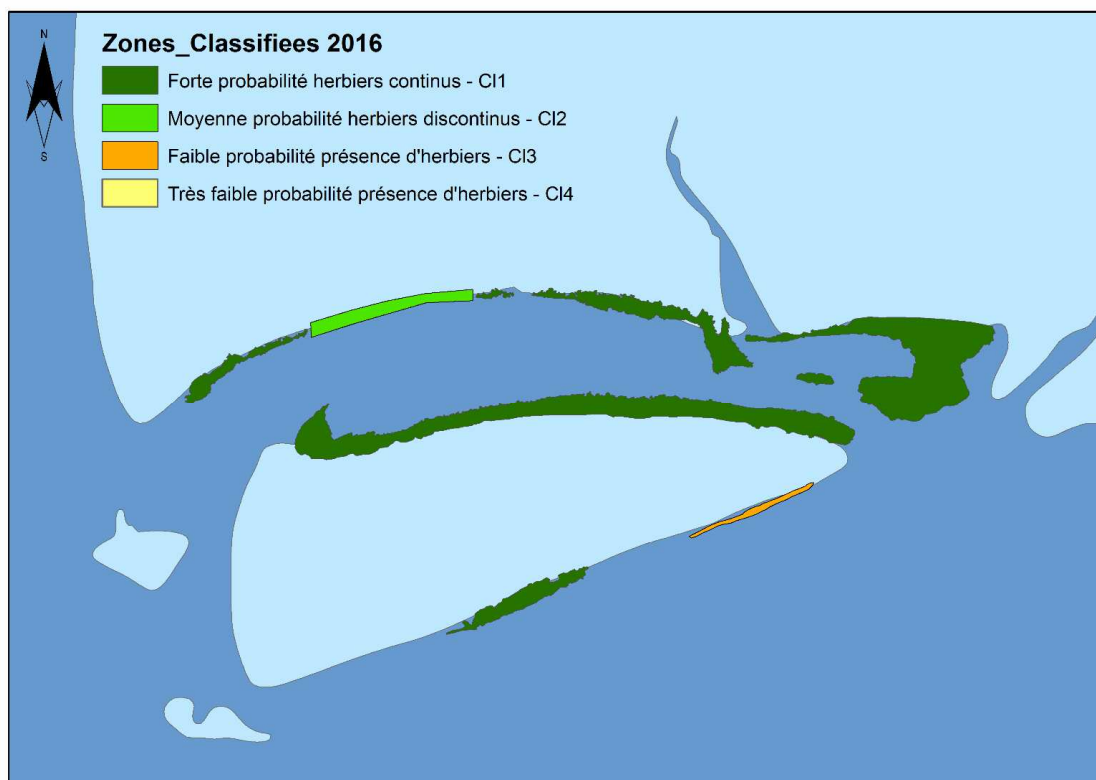


Figure 14 : Exemple de polygones affectés de leur classe de confiance.

3.2. Extension de *Zostera marina*

3.2.1. Carte établie en 1988

1988 (Arcachon amont)

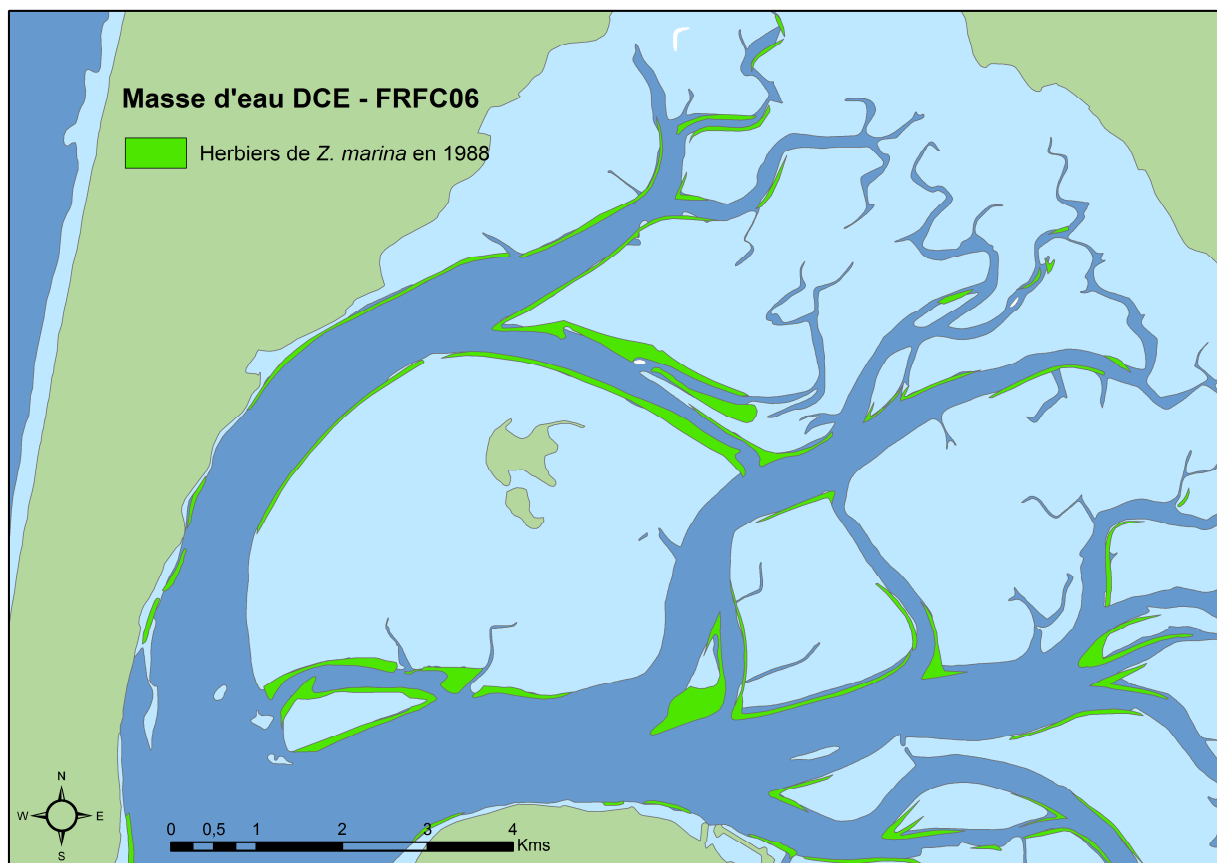


Figure 15 : Extension des herbiers de *Zostera marina* dans la masse d'eau "Arcachon amont" en 1988

En 1988, les herbiers de *Zostera marina* étaient répartis dans l'ensemble de la masse d'eau "Arcachon amont", en bordure de nombreux chenaux y compris dans la partie orientale de la lagune et recouvraient au total une superficie de 373,50 Ha.

La zone d'herbier continu la plus étendue occupait 42,64 Ha.

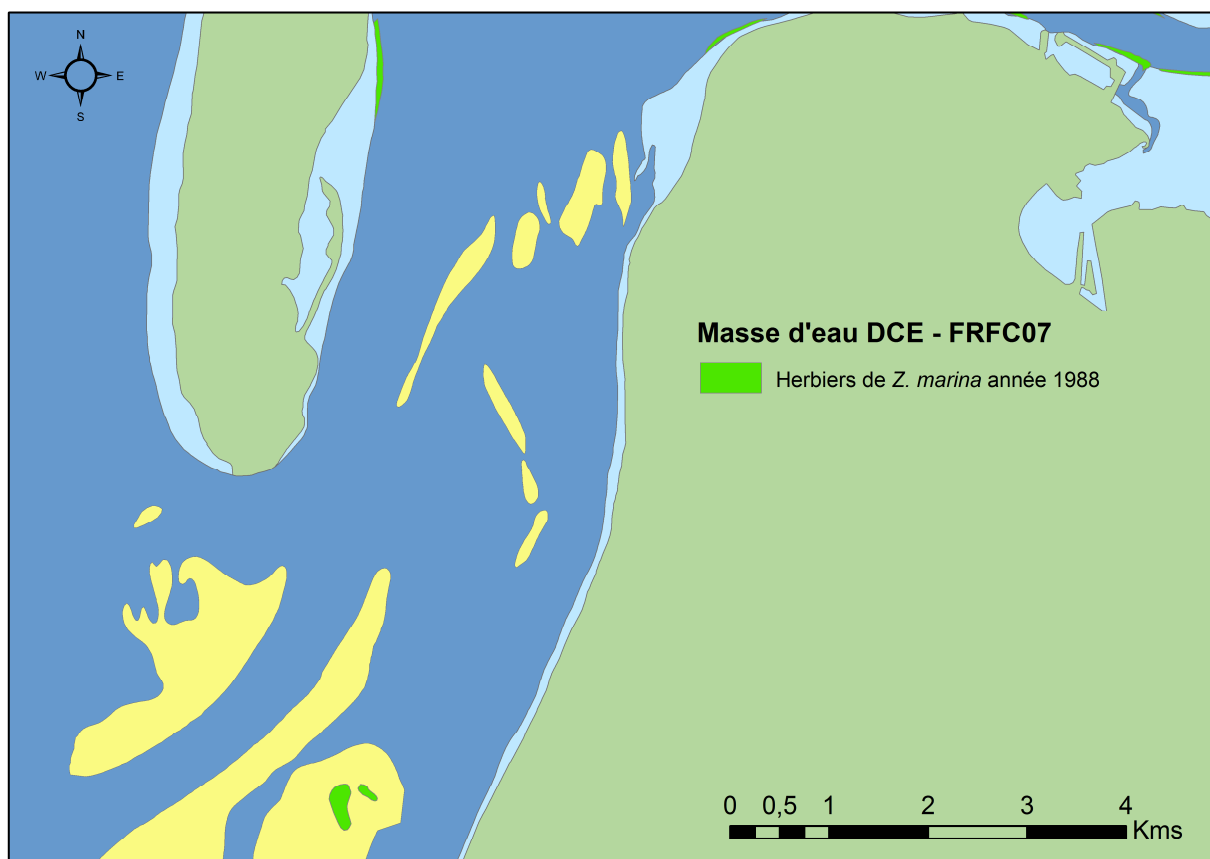
1988 (Arcachon aval)

Figure 16 : Extension des herbiers de *Zostera marina* dans la masse d'eau "Arcachon aval" en 1988.

En 1988, les deux herbiers de *Zostera marina* du Banc d'Arguin recouvraient 8,50 Ha.

3.2.2. Carte établie en 2001

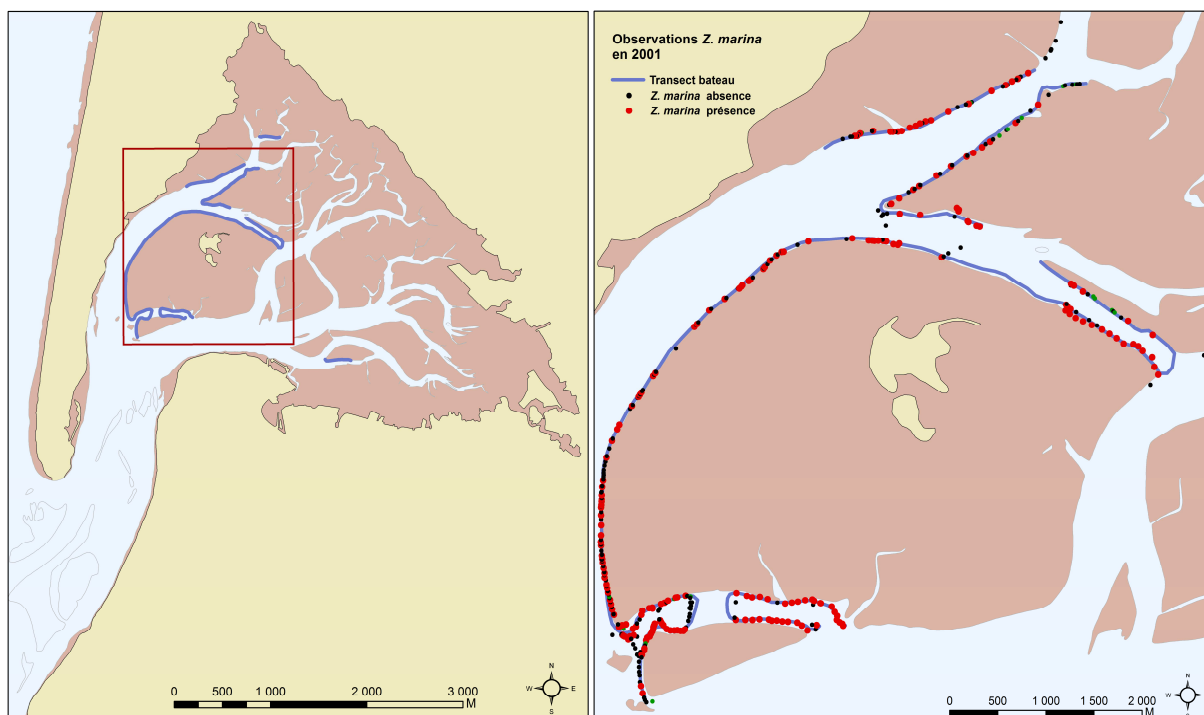


Figure 17 : Présence-absence de *Zostera marina* sur une portion de la masse d'eau « Arcachon amont » en 2001.

Les observations ponctuelles réalisées au cours de cette campagne montrent que les herbiers de zostères marines observés en 1988 dans cette partie du Bassin étaient encore présents en 2001 dans la majorité des zones explorées, à l'exception des herbiers situés le plus au nord (extrémité nord du chenal d'Arès).

3.2.3. Carte établie en 2008

2008 – Arcachon amont

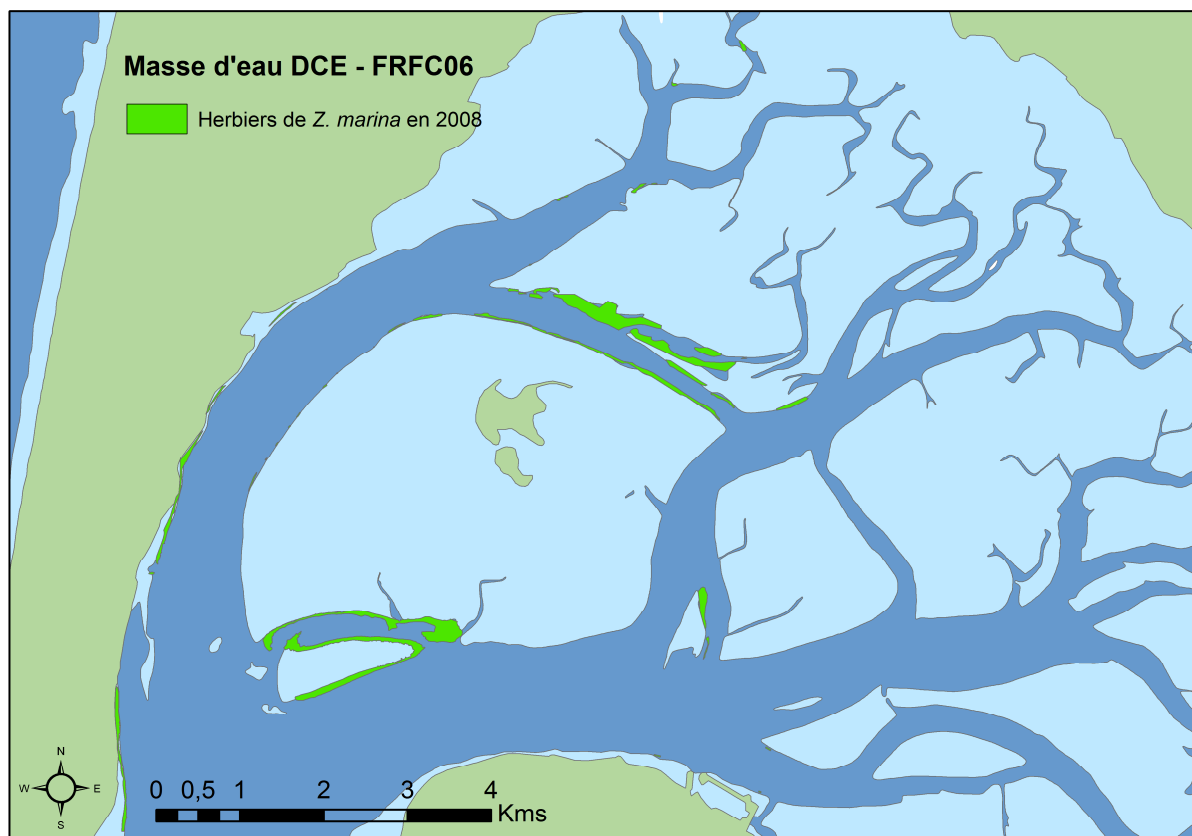


Figure 18 : Extension des herbiers de *Zostera marina* dans la masse d'eau "Arcachon amont" en 2008

En 2008 dans la masse d'eau "Arcachon amont", les herbiers de *Zostera marina* recouvraient une surface de 103,62 Ha (Figure 18).

Hormis quelques zones localisées au nord et au sud de l'île aux Oiseaux, la quasi-totalité des secteurs affichait un fractionnement notable de l'habitat. La plus grande surface d'herbier continu n'était plus que de 19,00 Ha.

2008 – Arcachon aval

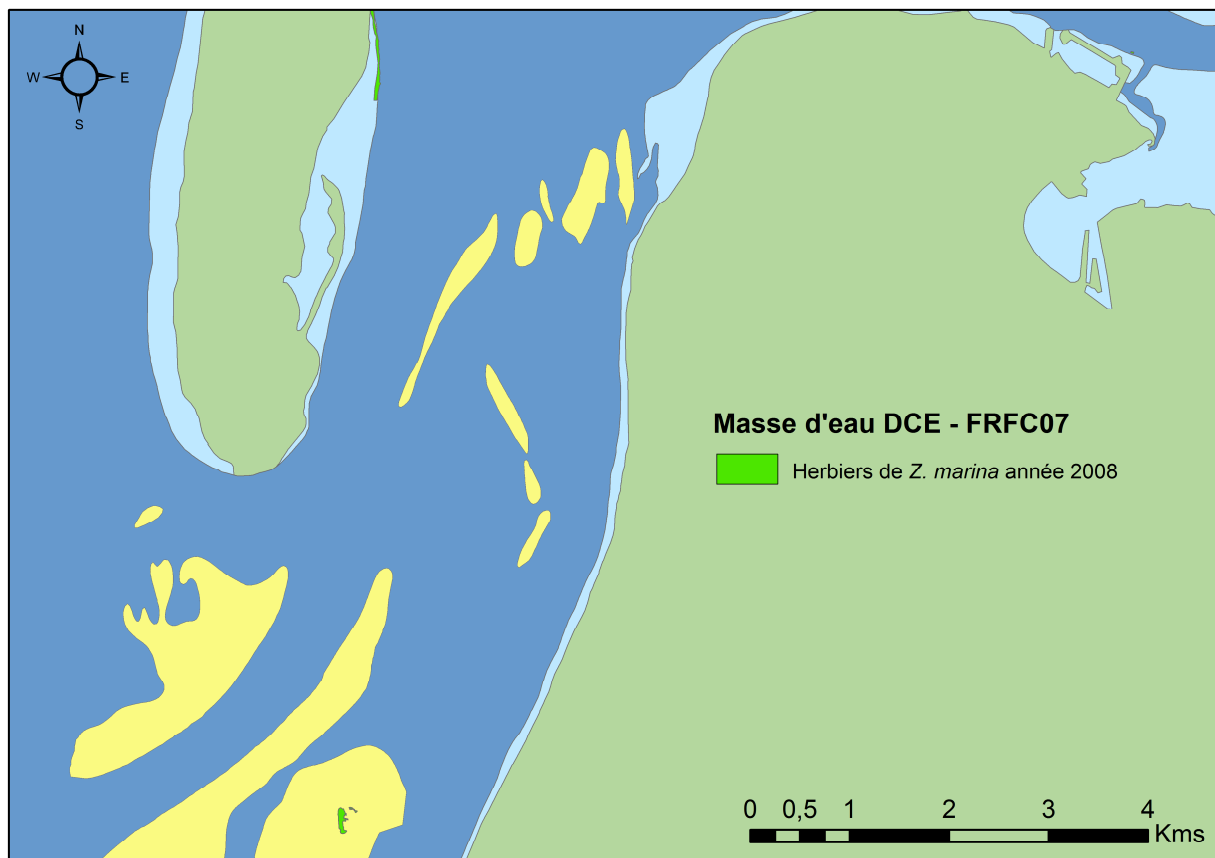


Figure 19 : Extension des herbiers de *Z. marina* dans la masse d'eau "Arcachon aval" en 2008

Sur le Banc d'Arguin, l'herbier de *Zostera marina* présentait une superficie de 1,50 Ha (Figure 19). *A priori*, il semble que les deux zones d'herbiers observées sont des reliques de l'emprise du plus grand herbier cartographié en 1988.

3.2.4. Carte établie en 2016

Les polygones classifiés cartographiés par SEMANTIC TS ont fait l'objet de deux séries de validations terrain par imagerie vidéo sous-marine, ce qui a permis à la fois d'estimer la robustesse de la méthode appliquée par SEMANTIC TS et d'aboutir à une carte d'emprise la plus fiable possible.

Cette démarche a été conduite de la manière suivante :

Les images vidéo interprétables ont été superposées aux zones classifiées et les concordances ou non concordances entre polygones classifiés et images ont été relevées. Ces informations ont été ajoutées dans les tables attributaires des couches de positionnement des images vidéo.

La première étape de validation a été effectuée à partir des vidéos acquises en juin 2016 ; elle porte sur 10 468 images interprétables. Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 2 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en juin 2016 (SEMANTIC TS)

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	7585	7009	92,4 %
Classe 1	Oui	Oui	Oui	Présence	2343	1921	82,0 %
Classe 2	Oui/Non	Oui Petites taches	Oui	Si présentes les zostères ne peuvent être qu'éparses. Présence discontinue possible, moyenne probabilité	306	0	0 %
Classe 3	Oui	Faible	Non	Faiblement probable	155	30	19,4 %
Classe 4	Non	Oui		Très faible densité possible mais très faiblement probable	79	0	0 %

Ces résultats montrent une bonne fiabilité sur les deux classes principales et des résultats peu convaincants pour les trois classes complémentaires, qui ont fait l'objet d'un moindre effort d'acquisition d'images.

Les polygones de « Forte probabilité d'absence d'herbier » (classe 0) sont très bien représentés dans la série d'images vidéo de validation (7 585 images) et la fiabilité de cette classe est très élevée.

Les non concordances observées principalement en limites de polygones traduisent sans doute une petite imprécision au niveau des limites et en particulier de la limite basse des herbiers.

Les polygones de classe 1 (forte probabilité d'herbiers continus) sont très bien représentés dans le lot d'images de validation, avec 2 343 images superposées. La fiabilité de cette classe est également importante. L'analyse des non concordances affectant cette classe montre que 76 % de ces non concordances se situent en limite de polygone et sont également réparties entre limites basses (45 %) et hautes (55 %) des herbiers.

Pour les polygones de classe 2, 3 et 4, le nombre d'images disponibles est trop faible pour conclure. Néanmoins, on observe que la grande majorité des non concordances est localisée à l'intérieur des polygones, excluant ici l'effet d'imprécision sur les bordures.

La seconde étape de validation a été effectuée à partir des vidéos acquises en octobre – novembre 2017 et porte sur 5 193 images interprétables.

Les résultats détaillés sont présentés par secteur géographique.

Secteur du Grand Banc :

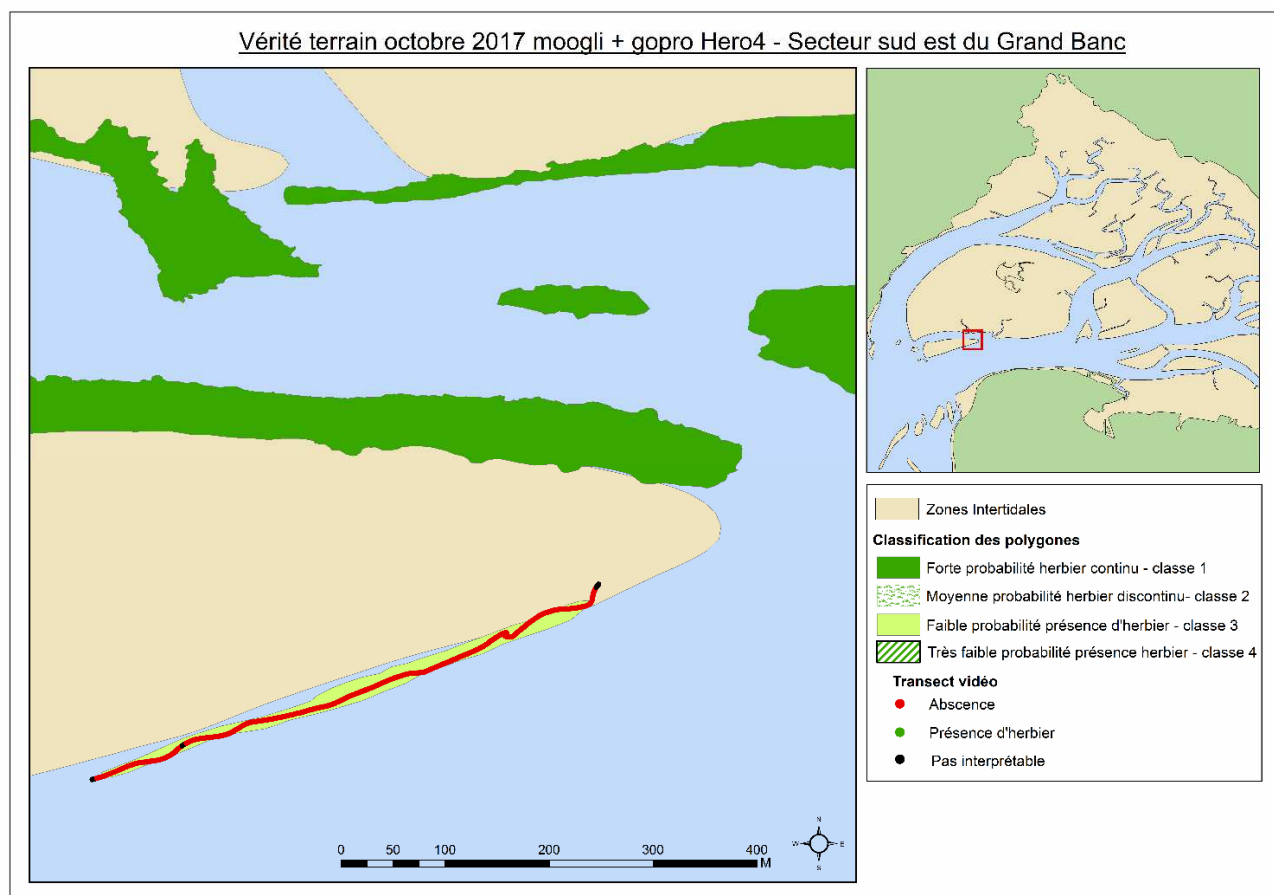


Figure 20 : Concordance classification vs images vidéo, secteur du Grand Banc

Sur le polygone vérifié (classe 3), 433 images ne montrent pas d'herbier, mais un assemblage de débris ostréicoles et de blocs rocheux. En dehors des limites de ce polygone, 58 images interprétables confirment l'absence d'herbier.

Tableau 3 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en octobre 2017 (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	58	58	100 %
Classe 3	Oui	Faible	Non	Faiblement probable	433	0	0 %

Secteur de Pirailan :

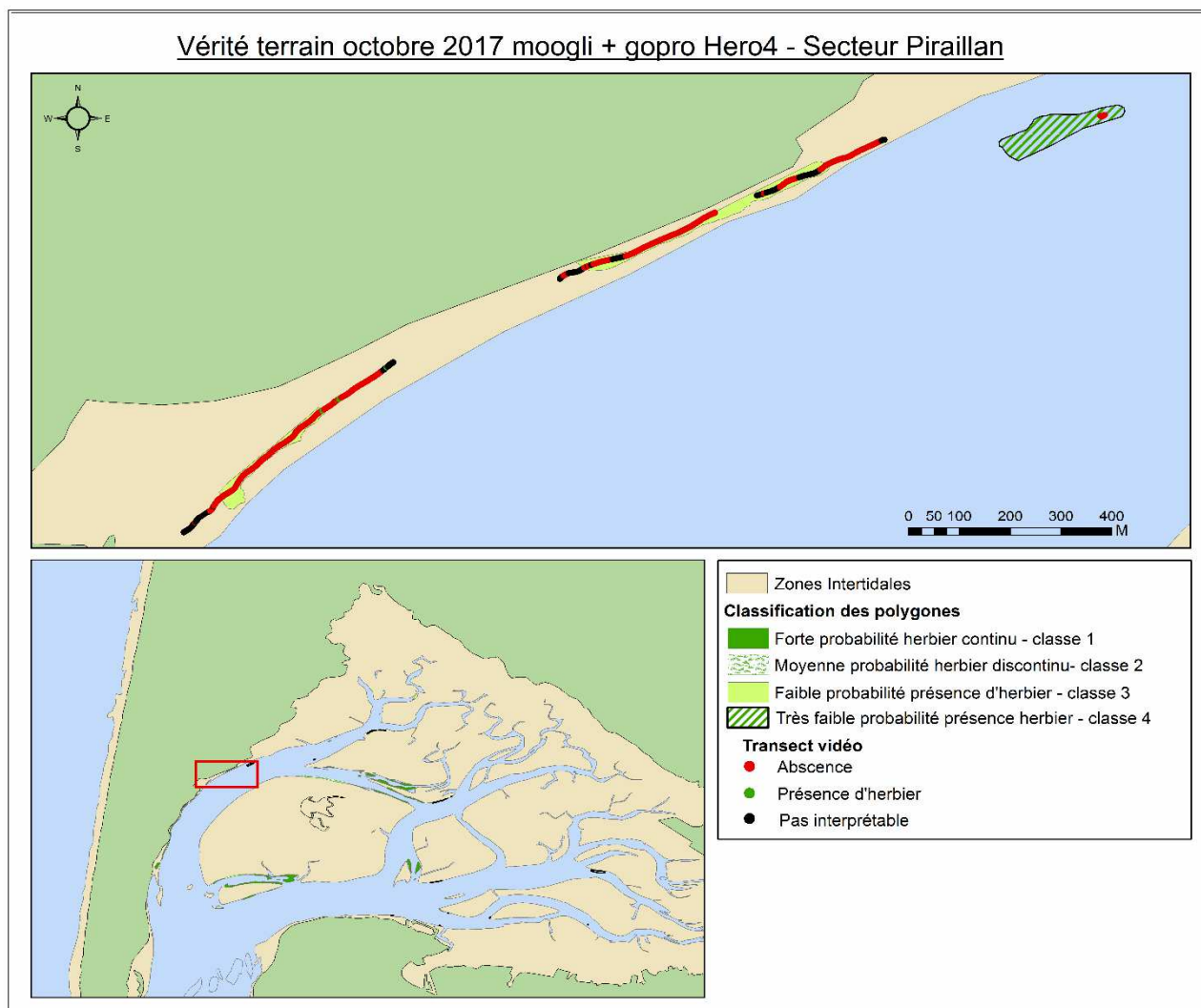


Figure 21 : Concordance classification vs images vidéo, secteur de Pirailan

Sur les 3 polygones (classes 3 et 4) que comporte cette zone, 905 images associées sont interprétables.

Tableau 4 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en octobre 2017 (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	304	295	97 %
Classe 3	Oui	Faible	Non	Faiblement probable	573	4	0,7 %
Classe 4	Non	Oui		Très faible densité possible mais très faiblement probable	28	0	0 %

Dans ce secteur, on note une bonne fiabilité de la classe 0, tandis que les deux classes de faible et très faible probabilités ne présentent quasiment pas d'herbier.

Secteur de Hautebelle :

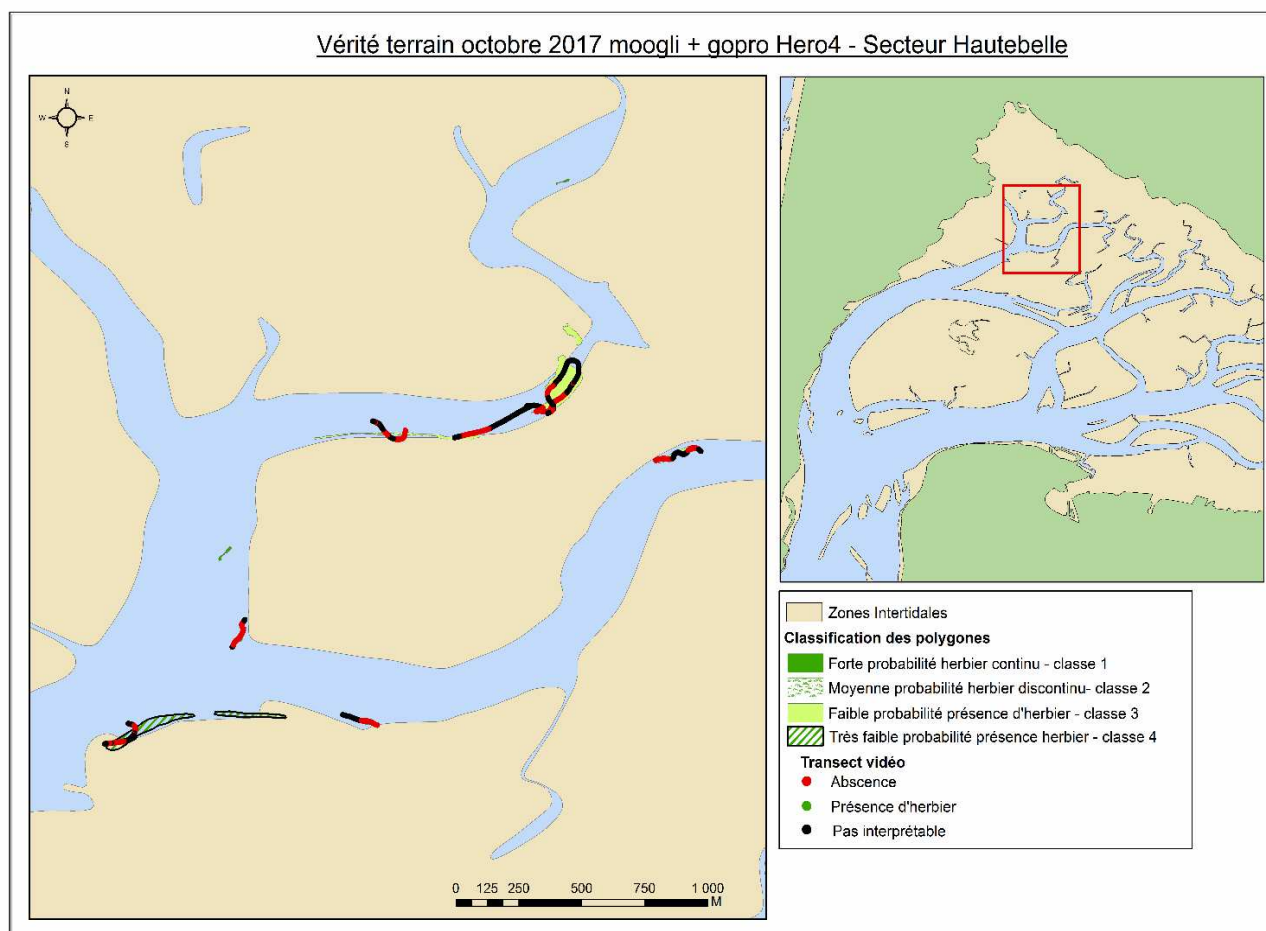


Figure 22 : Concordance classification vs images vidéo, secteur de Hautebelle

Sur ce secteur, 6 polygones ont été vérifiés, ce qui représente 824 images.

Tableau 5 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en octobre 2017 (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	317	317	100 %
Classe 1	Oui	Oui	Oui	Présence	87	0	0 %
Classe 3	Oui	Faible	Non	Faiblement probable	318	0	0 %
Classe 4	Non	Oui		Très faible densité possible mais très faiblement probable	102	0	0 %

Il est à noter qu'aucune des 824 images obtenues n'a montré la présence d'herbier sur le secteur de Hautebelle y compris sur des polygones classifiés en « Forte probabilité de présence d'herbiers continus ». On peut suspecter que le critère bathymétrique utilisé, commun à toutes les zones du bassin, devrait varier en fonction des secteurs qui présentent des turbidités différentes. En l'occurrence, les chenaux de cette zone sont plus turbides que ceux de la partie plus océanique.

Secteur sud-ouest chenal du nord de l'île aux oiseaux :

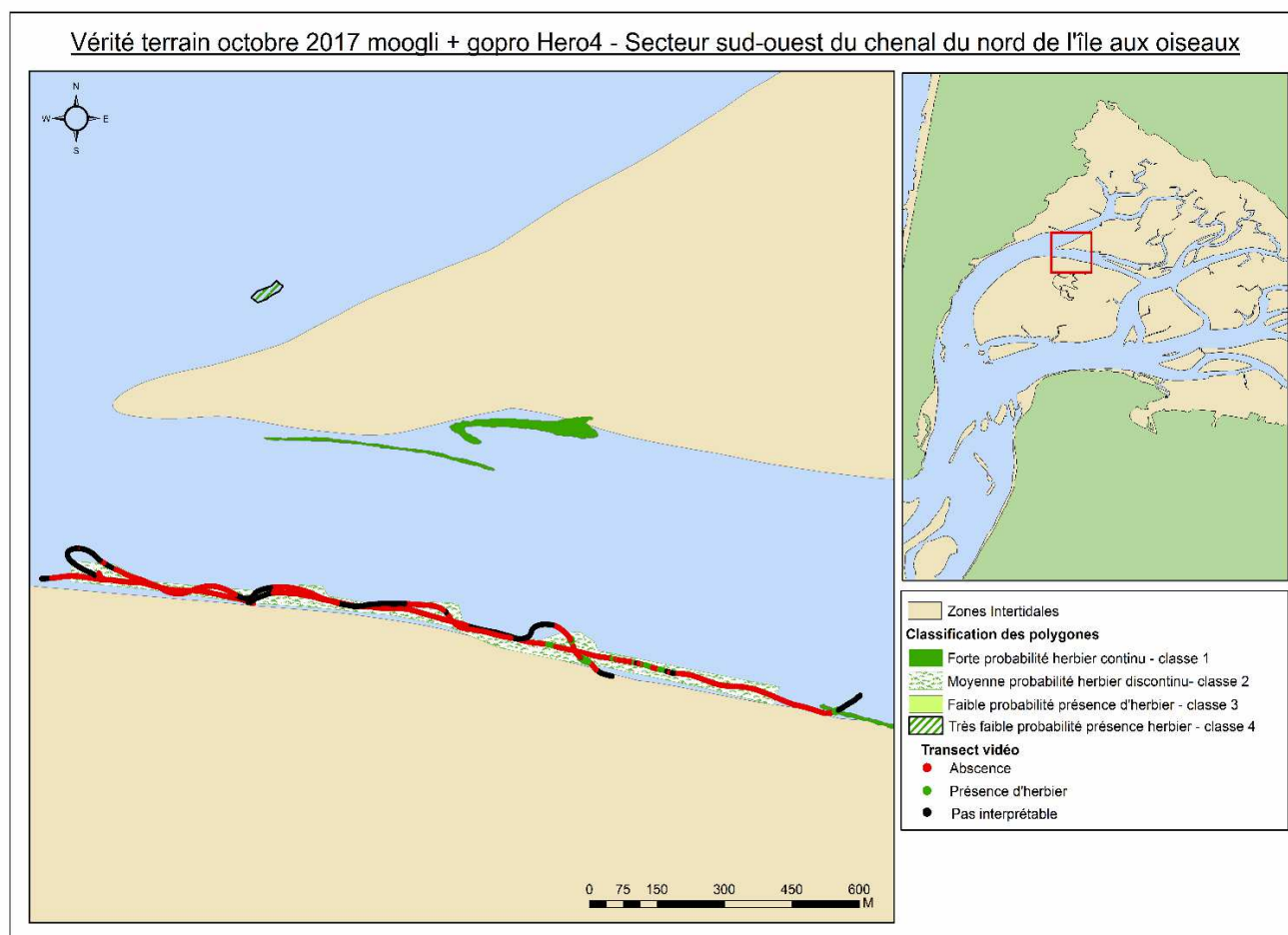


Figure 23 : Concordance classification vs images vidéo, secteur sud-ouest du chenal de l'île aux Oiseaux

Sur cette zone, un polygone très étendu, classifié en « probabilité moyenne de présence d'herbiers discontinus » a été vérifié, ce qui représente 1 808 images interprétables.

Tableau 6 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en octobre 2017 (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	281	281	100 %
Classe 1	Oui	Oui	Oui	Présence	10	6	60 %
Classe 2	Oui/Non	Oui Petites taches	Oui	Si présentes les zostères ne peuvent être qu'éparses. Présence discontinue possible, moyenne probabilité	1 517	62	4 %

Les quelques pieds de zostères discontinus ont été observés seulement dans l'extrémité Est du polygone classifié. Étonnamment, sur le reste du polygone, les images vidéo montrent un substrat de sable coquillier plutôt uniforme sans déchets ostréicoles ni blocs rocheux ou gisement de crépidules qui auraient pu tromper l'algorithme de traitement.

Secteur de Lahillon :

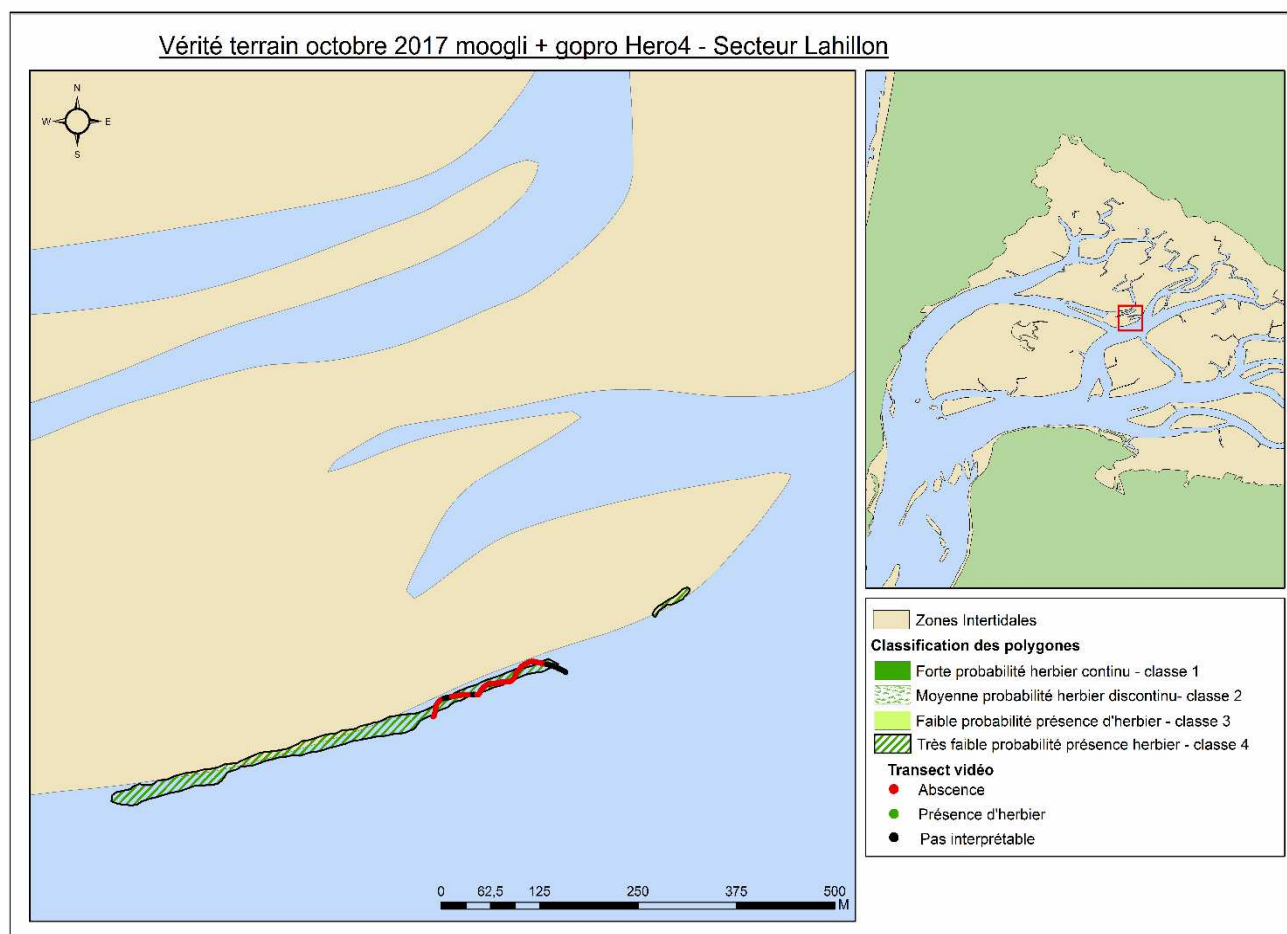


Figure 24 : Concordance classification vs images vidéo, secteur de Lahillon

Le polygone classifié en « Très faible probabilité de présence d'herbiers » vérifié dans cette zone comporte 259 images interprétables.

Tableau 7 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en octobre 2017 (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	98	98	100 %
Classe 4	Non	Oui		Très faible densité possible mais très faiblement probable	161	0	0 %

Aucun herbier n'a été observé sur cette zone.

Secteur de Mapouchet ouest :

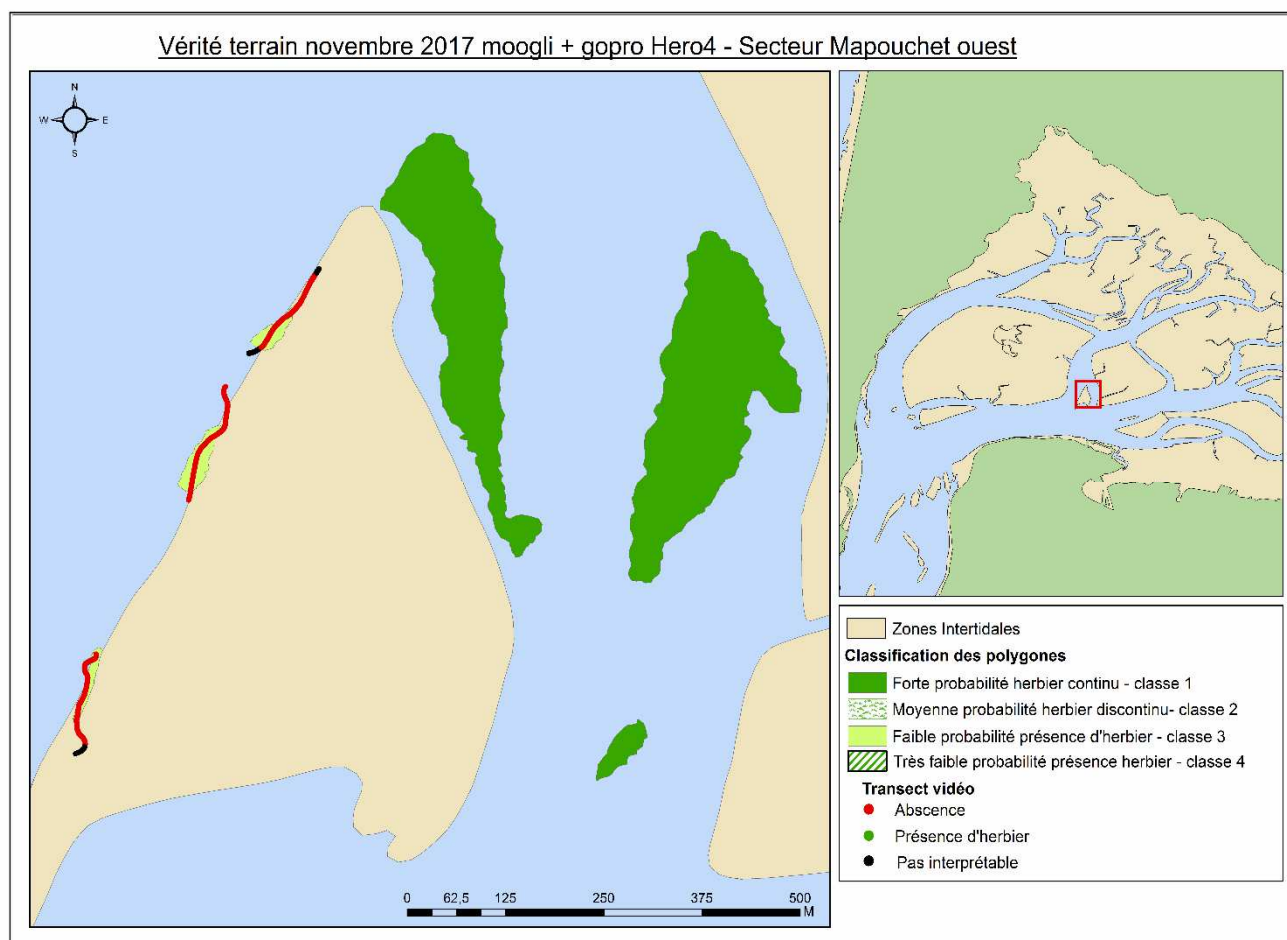


Figure 25 : Concordance classification vs images vidéo, secteur de Mapouchet ouest

Sur cette zone, trois polygones classifiés en « Faible probabilité de présence d'herbiers » ont été vérifiés ce qui représente 455 images interprétables.

Tableau 8 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en novembre (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	239	239	100 %
Classe 3	Oui	Faible	Non	Faiblement probable	216	0	0 %

Les images ne révèlent la présence d'aucun herbier, mais montrent un substrat composé de sable coquillier avec fragments grossiers de coquilles. On note également la présence de nombreux déchets ostréicoles (ferrailles, morceaux de pochons ...) qui auraient pu tromper l'algorithme de traitement.

Secteur de La Matelle :

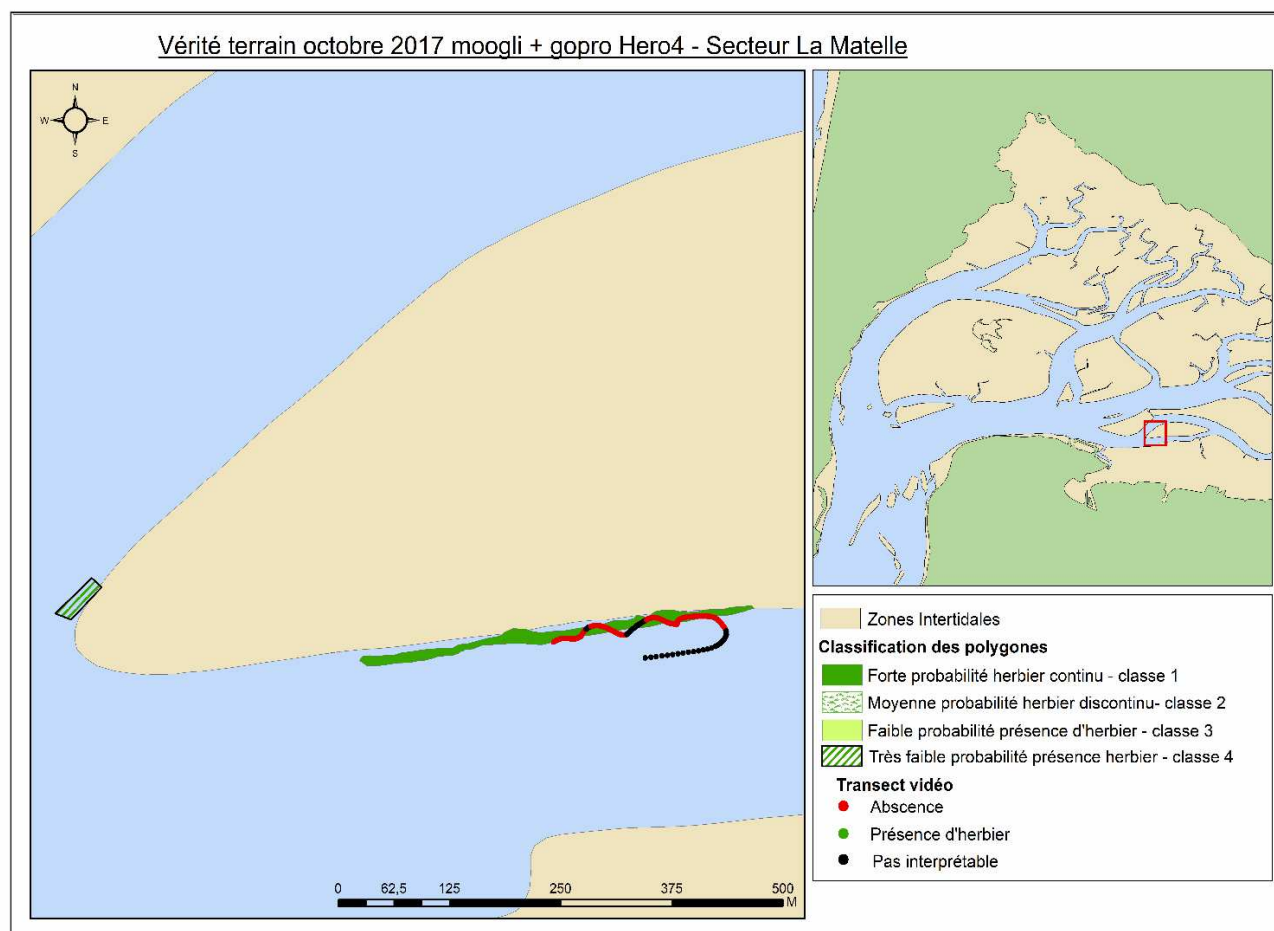


Figure 26 : Concordance classification vs images vidéo, secteur de La Matelle

Sur cette zone, le polygone vérifié classifié en « Forte probabilité de présence d'herbiers continus » comporte 296 images interprétables.

Tableau 9 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en octobre 2017 (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	112	112	100 %
Classe 1	Oui	Oui	Oui	Présence	184	0	0 %

Aucun herbier n'est observé sur cette zone. Les images montrent la présence d'un important gisement de crépidules sur la 1ère minute de la vidéo, ce qui pourrait expliquer que l'algorithme utilisé ait été induit en erreur. Par contre, les onze minutes suivantes mettent en évidence un sable coquillier avec présence de débris grossiers voire de valves d'huîtres entières.

Secteur Arcachon, Eyrac est :

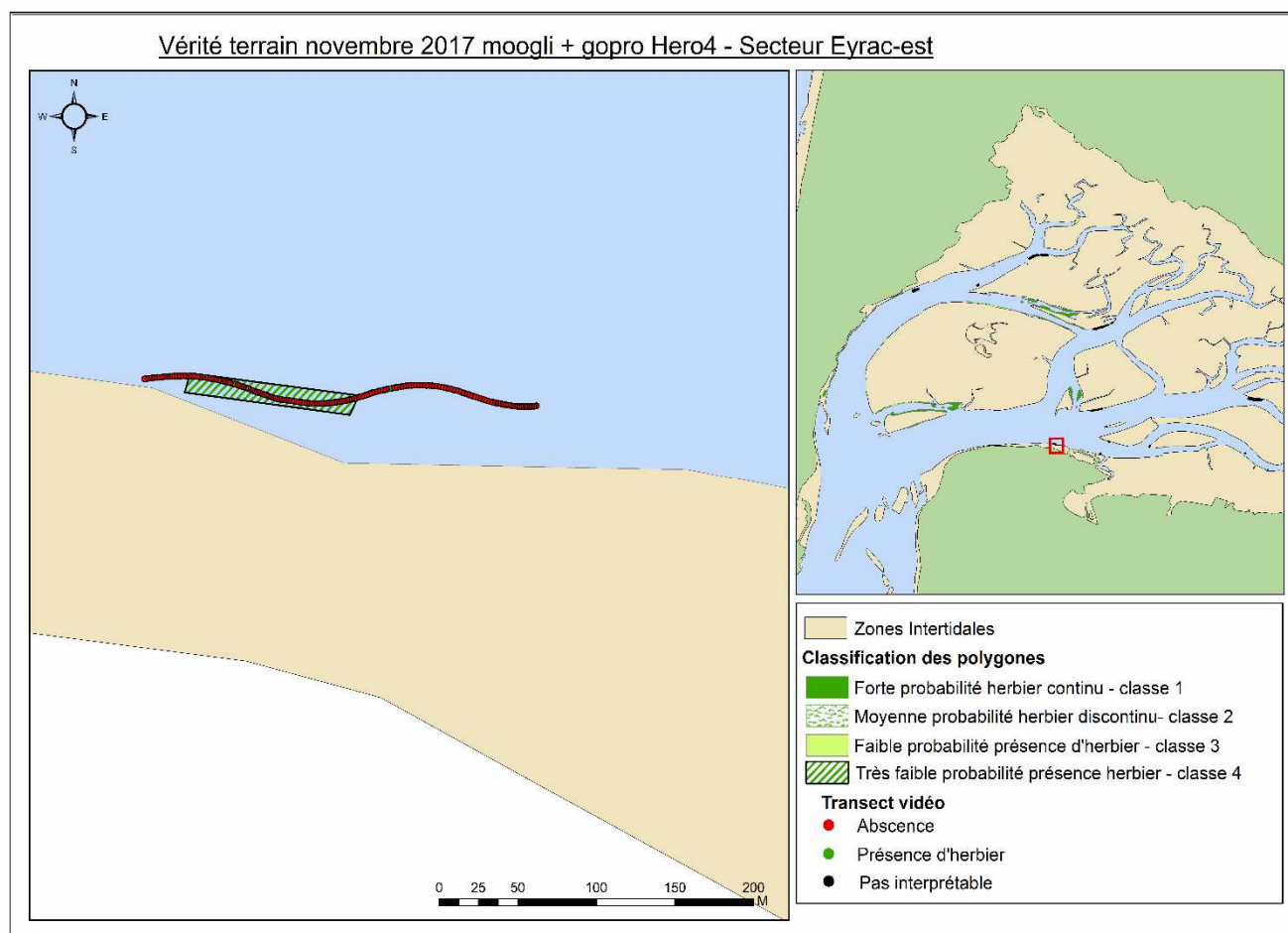


Figure 27 : Concordance classification vs images vidéo, secteur Arcachon Eyrac-est

Sur cette zone, située à l'est de la jetée d'Eyrac, le fichier d'images destiné à valider le polygone classifié en « Très faible probabilité de présence d'herbiers » comporte 155 images interprétables.

Tableau 10 : Synthèse des résultats obtenus et tableau de confusion établi à partir des images vidéo acquises en novembre (Ifremer laboratoire d'Arcachon).

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Validité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	84	83	98,8 %
Classe 4	Non	Oui		Très faible densité possible mais très faiblement probable	71	2	2,8 %

Sur deux images vidéo, on observe des pieds de zostères, ce qui laisse à penser que ce petit herbier, déjà cartographié par le passé, existe toujours mais il est très peu étendu et présente un faible recouvrement.

Résultats de la validation 2016-2017 :

Tableau 11 : Synthèse de l'ensemble des résultats de validation (2016-2017) et tableau de confusion.

Classes	DIVA	Contraste Sonal	Profondeur	Hypothèse / Végétation	Nombre images	Nombre images concordantes	Fiabilité de l'hypothèse
Classe 0	Non	Non	Non	Absence	9078	8492	93,5 %
Classe 1	Oui	Oui	Oui	Présence	2624	1927	73,4%
Classe 2	Oui/Non	Oui Petites taches	Oui	Si présentes les zostères ne peuvent être qu'éparses. Présence discontinue possible, moyenne probabilité	1823	62	3,4 %
Classe 3	Oui	Faible	Non	Faiblement probable	1695	34	2,0 %
Classe 4	Non	Oui		Très faible densité possible mais très faiblement probable	441	2	0,5 %

L'analyse des résultats présentés dans le tableau 11 confirme que seules les classes principales (0 et 1) présentent une fiabilité suffisante pour être retenues dans la carte d'emprise 2016 des herbiers de *Zostera marina* du bassin d'Arcachon.

L'algorithme de traitement des images acoustiques n'apparaît donc vraiment discriminant que dans les situations d'herbiers étendus et denses ou d'absence d'herbiers.

Comme déjà évoqué, cet algorithme repose sur la fusion des données multi-capteurs :

Lorsque que les 3 signatures sont observées simultanément (signature DIVA, fort contraste au sonar latéral, gamme de profondeur caractéristique de la présence de zostère) l'algorithme de traitement conduit à la classification de présence d'herbiers continus, ce qui est validé à 73,4 % par les vérités terrain.

Inversement, lorsque ces 3 signatures sont absentes (pas de signature DIVA, pas de contraste au sonar latéral, mauvaise gamme de profondeur), l'algorithme conclut à l'absence d'herbiers, ce qui est validé à 93,5 % par les vérités terrain.

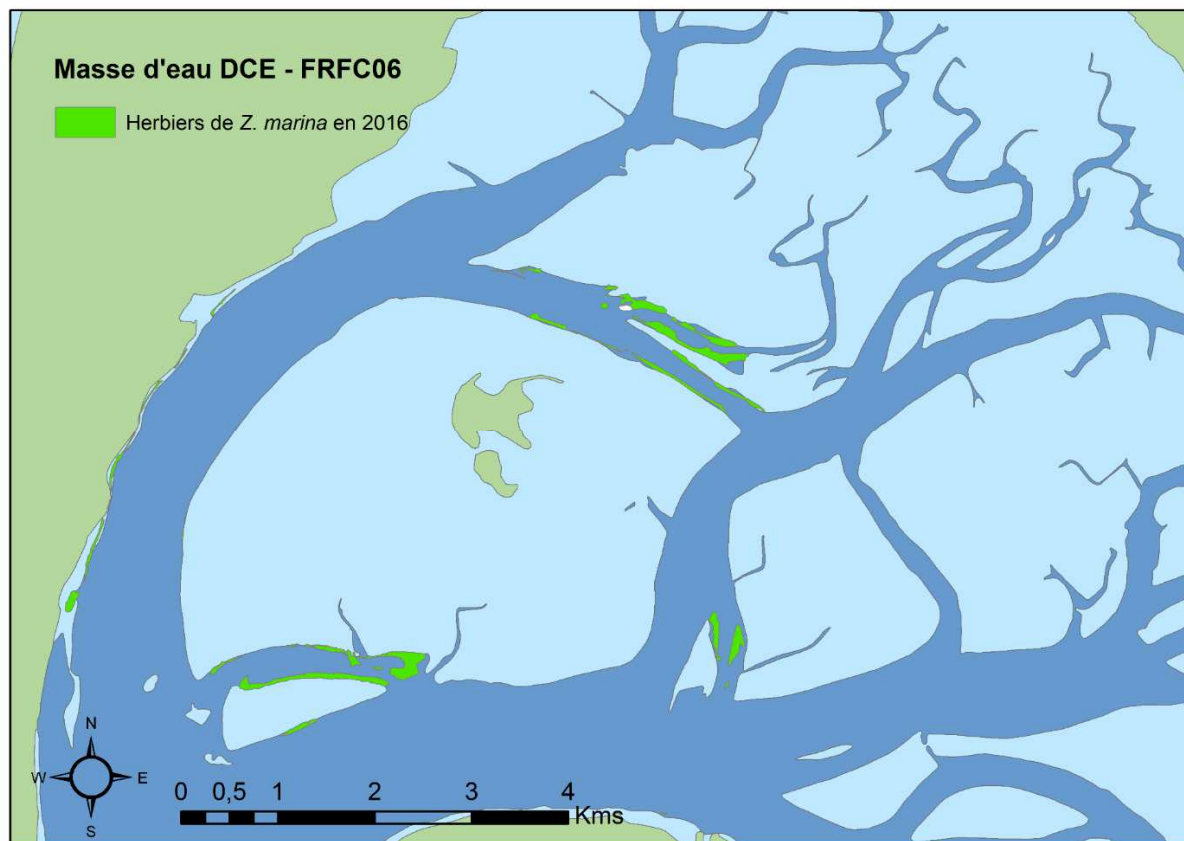
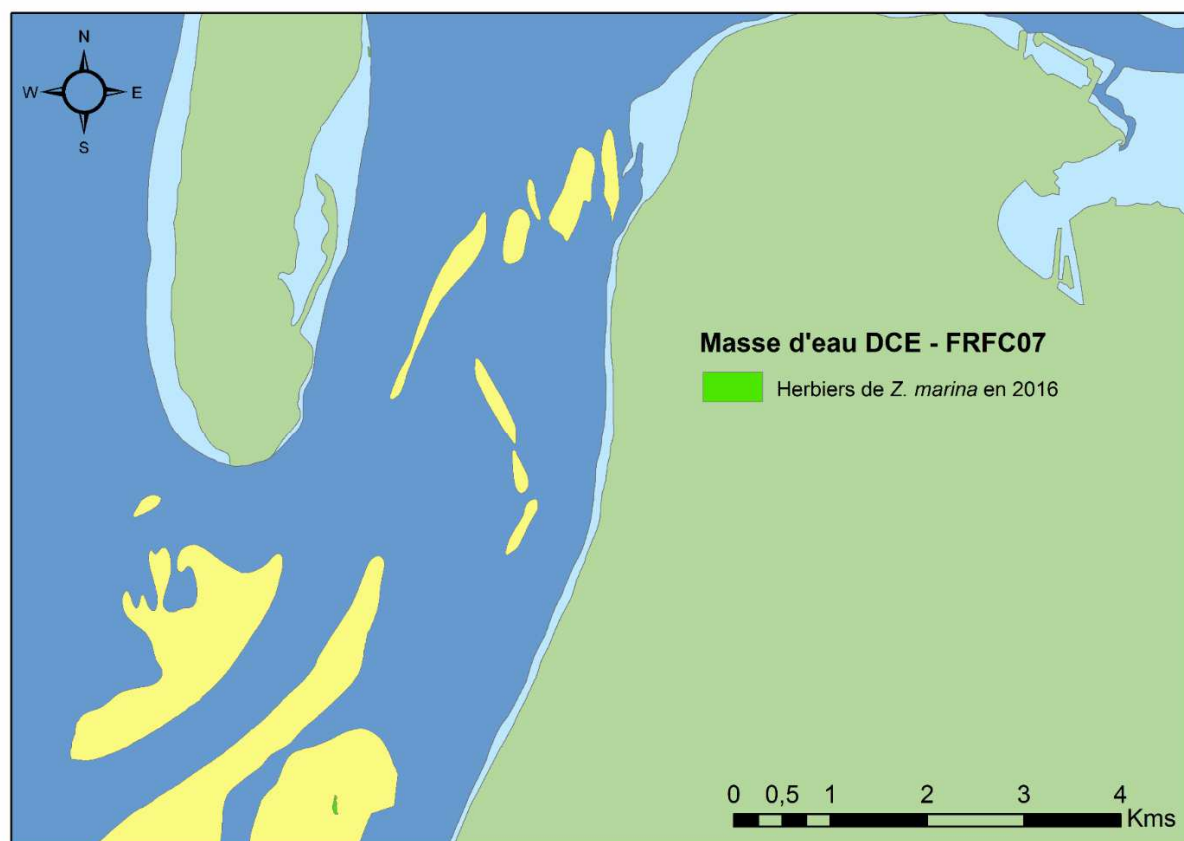
Dans les cas intermédiaires (classes complémentaires 2, 3 et 4), l'algorithme ne peut conclure, mais il permet de mettre en évidence des secteurs pour lesquels le fond est différent d'un herbier dense ou d'une absence totale d'objets posés au fond.

Les vérités terrain ont généralement montré sur ces secteurs la présence de gisements de coquillages (huîtres, moules, crépidules) ou de blocs rocheux ou de débris ostréicoles, responsable des signatures acoustiques observées.

En conséquence, la carte finale (Figure 28 et Figure 29) ne comporte qu'une seule classe de présence qui est renommée « Forte probabilité de présence d'herbier ».

La classe « Forte probabilité de présence d'herbier » regroupe donc les polygones initialement classifiés par SEMANTIC TS en « Forte probabilité de présence d'herbiers continus », auxquels viennent s'ajouter quelques polygones des autres classes (2, 3 et 4) ayant été requalifiés à partir des vidéos de terrain d'octobre/novembre 2017.

Compte-tenu de ces corrections, la fiabilité de la carte finale est un peu améliorée par rapport aux 73 % du tableau 11.

Emprise maximale de 2016 après validation SEMANTIC/Ifremer**Figure 28** : Extension des herbiers de *Z. marina* dans la masse d'eau « Arcachon amont » en 2016**Figure 29** : Extension des herbiers de *Z. marina* dans la masse d'eau « Arcachon aval » en 2016.

3.3. Évolution temporelle de l'emprise des herbiers de *Zostera marina*

La synthèse des données rapportées dans les paragraphes précédents permet de mettre en évidence une forte régression des herbiers de zostères marines dans la masse d'eau Arcachon amont entre 1988 et 2016 (Tableau 12).

Tableau 12 : Superficie des herbiers de *Zostera marina* dans les deux masses d'eau côtières du Bassin d'Arcachon à différentes périodes.

	1988	2008	2016
Arcachon amont	373,50 Ha	103,62 Ha	58,45 Ha
Arcachon aval	8,50 Ha	1,50 Ha	0,71 Ha
Total	382,00 Ha	105,12 Ha	59,16 Ha

Entre 1988 et 2008 (soit 20 ans), la superficie des herbiers à *Zostera marina* a régressé de 73 %. Cette régression s'est poursuivie quasiment au même rythme au cours de la période suivante (2008-2016) puisque l'extension maximale de ces herbiers a diminué de 43,6 % en 8 ans. On voit que l'intensité de la régression est à peu près similaire sur les deux masses d'eaux « Arcachon amont » et « Arcachon aval ».

Sur l'ensemble de la période étudiée (1988 – 2016), la perte de surface cumulée s'élève à 84,50 % de la surface initiale.

Afin de spatialiser cette régression, la démarche suivante a été adoptée :

- ✧ Croisement des couches SIG de l'extension des herbiers aux trois dates avec mise en évidence des secteurs stables, en progression et en régression,
- ✧ Analyse spatiale de l'évolution temporelle de la superficie des herbiers après découpage par unités géographiques.

Pour réaliser cette analyse spatiale, les herbiers de *Zostera marina* du bassin d'Arcachon ont été découpés en 16 secteurs représentés sur la figure 30.

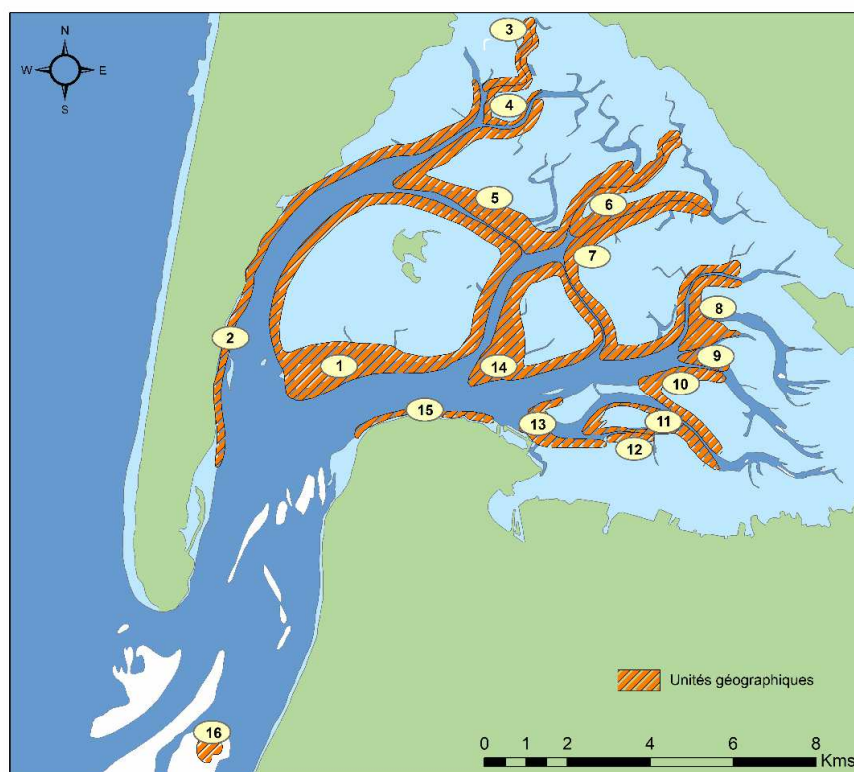


Figure 30 : Délimitation des 16 unités géographiques d'herbiers de *Z. marina*.

3.3.1. Évolution au cours de la période 1988 – 2008

Les résultats des analyses spatiales sur l'extension des herbiers de *Zostera marina* pour les années 1988 et 2008 sont rapportés sur les figures 31 et 32.

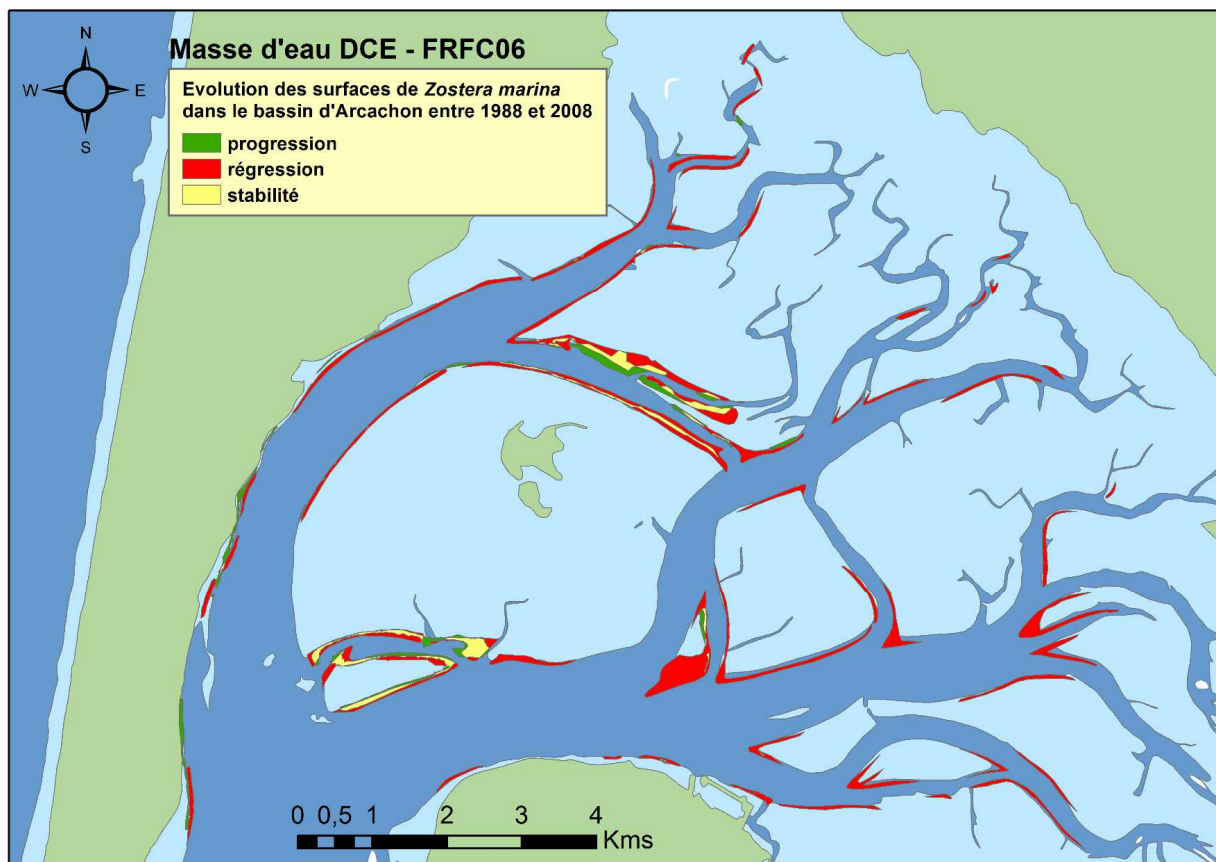


Figure 31 : Evolution de l'extension des herbiers de zostères marines entre 1988 et 2008

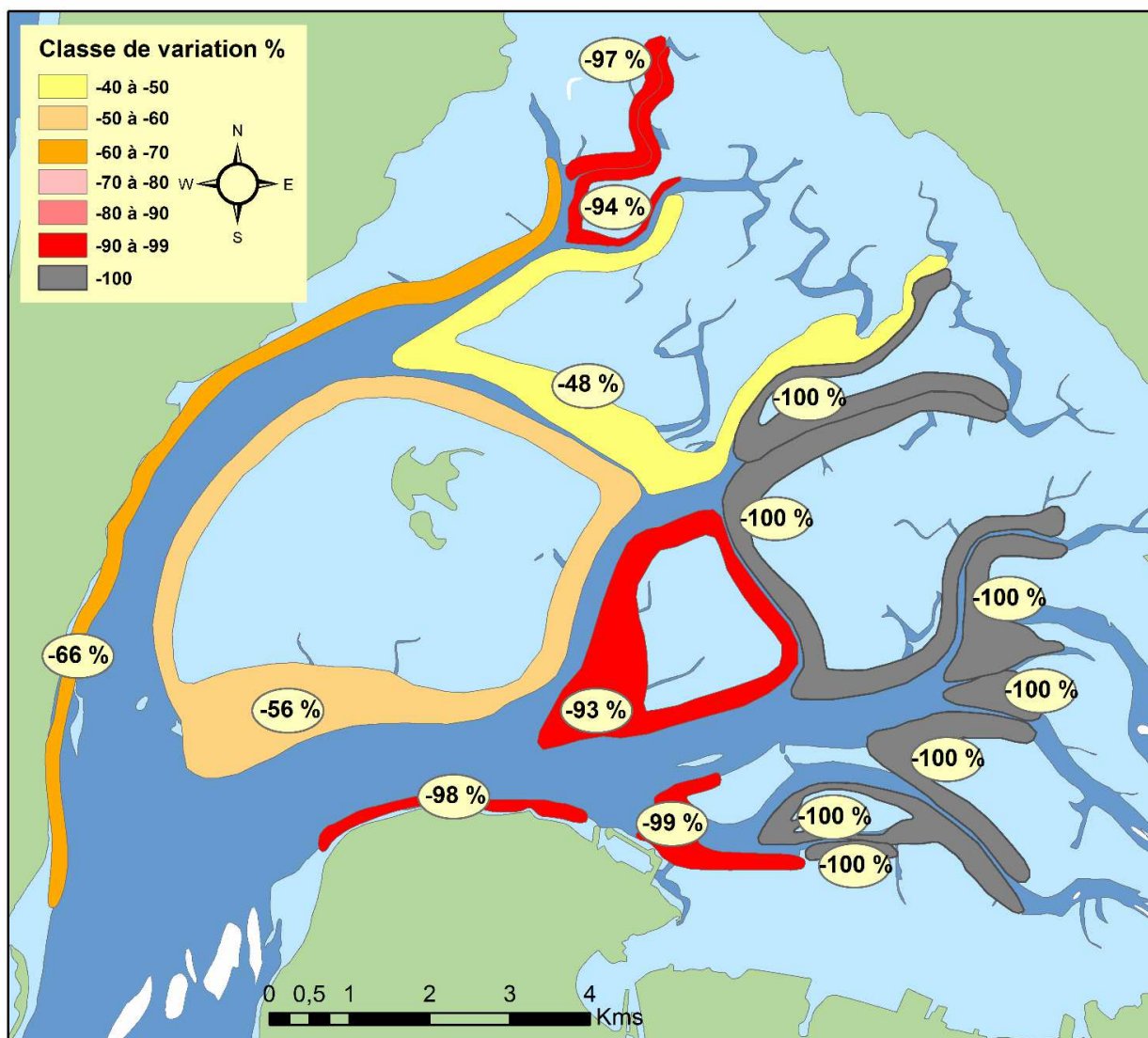


Figure 32 : Evolution par secteur de l'extension des herbiers de zostères marines entre 1988 et 2008

La régression observée entre 1988 à 2008 présente une forte hétérogénéité spatiale.

Trois zones sont affectées par un **taux de régression très élevé**.

- La première, très étendue, concerne la partie sud-est du Bassin d'Arcachon où les herbiers de *Z. marina* ont totalement disparu entre 1988 et 2008 (zones 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12).
- La seconde, qui regroupe les zones 3 et 4 situées à l'extrémité nord de la lagune au débouché du "canal des Etangs" présente des fortes réductions comprises entre 94 et 97 %.
- La troisième, qui concerne les zones 13, 14 et 15, situées au sud du bassin devant les plages d'Arcachon, englobant les bordures de chenaux du « Tès » et de « Mapouchet », présente également une forte réduction de l'emprise de l'herbier de *Z. marina* (de 93 à 99 %). Néanmoins, pour la zone 14 (estrans de Mapouchet et La Humeyre), ces résultats doivent être nuancés par la persistance d'un herbier homogène au nord-ouest du banc de Mapouchet.

En conséquence, si l'on exclut la zone 14 (-93%), on peut dire les herbiers de *Zostera marina* ont totalement disparu de ces trois zones où ils étaient présents en 1988 et même, pour certains, en 2001 (De Montaudouin et Lebleu, 2002).

L'ensemble de la côte nord-ouest, depuis les Jacquets jusqu'au Cap-Ferret, est affecté par une **assez forte régression** (66 %) des surfaces colonisées par les zostères marines. Toutefois, on peut considérer que les pertes maximales concernent surtout la partie nord du secteur qui se situe entre Piquey et Arès.

Les plus **faibles réductions de surface**, atteignant tout de même environ 50 %, ont été mises en évidence d'une part sur les bords de chenaux du pourtour de l'île aux Oiseaux et d'autre part, sur la zone Lahillon-chenal de Carret-Grauères située au nord de cette île.

Bien que parcellaires, les observations effectuées par X. de Montaudouin montrent que la régression avait déjà débuté en 2001 sur le secteur nord du bassin d'Arcachon, au débouché du Canal des Etangs. Par contre, à cette date, les herbiers de *Z. marina* situés sur la côte nord-ouest (de Piquey aux Jacquets), existants en 1988, étaient encore bien développés.

Comme observé pour *Zostera noltei* (Dalloyau *et al.*, 2009), il est possible que la réduction de l'herbier à zostères marines se soit accélérée au cours de la période 2005-2008.

3.3.2.Évolution au cours de la période 2008 – 2016

Les résultats des analyses spatiales sur l'évolution de l'extension des herbiers de *Zostera marina* entre les années 2008 et 2016 sont rapportés sur les figures 33 et 34.

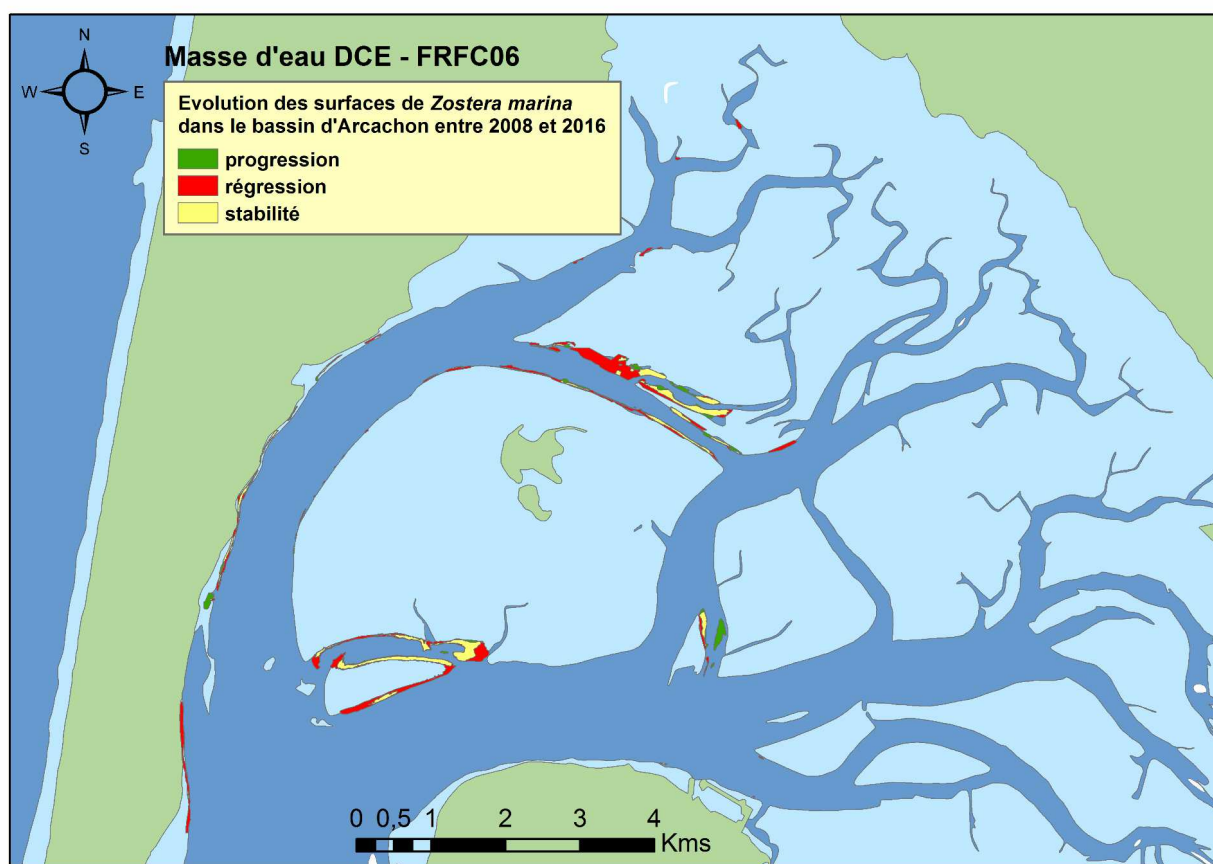


Figure 33 : Evolution de l'extension des herbiers de zostères marines entre 2008 et 2016

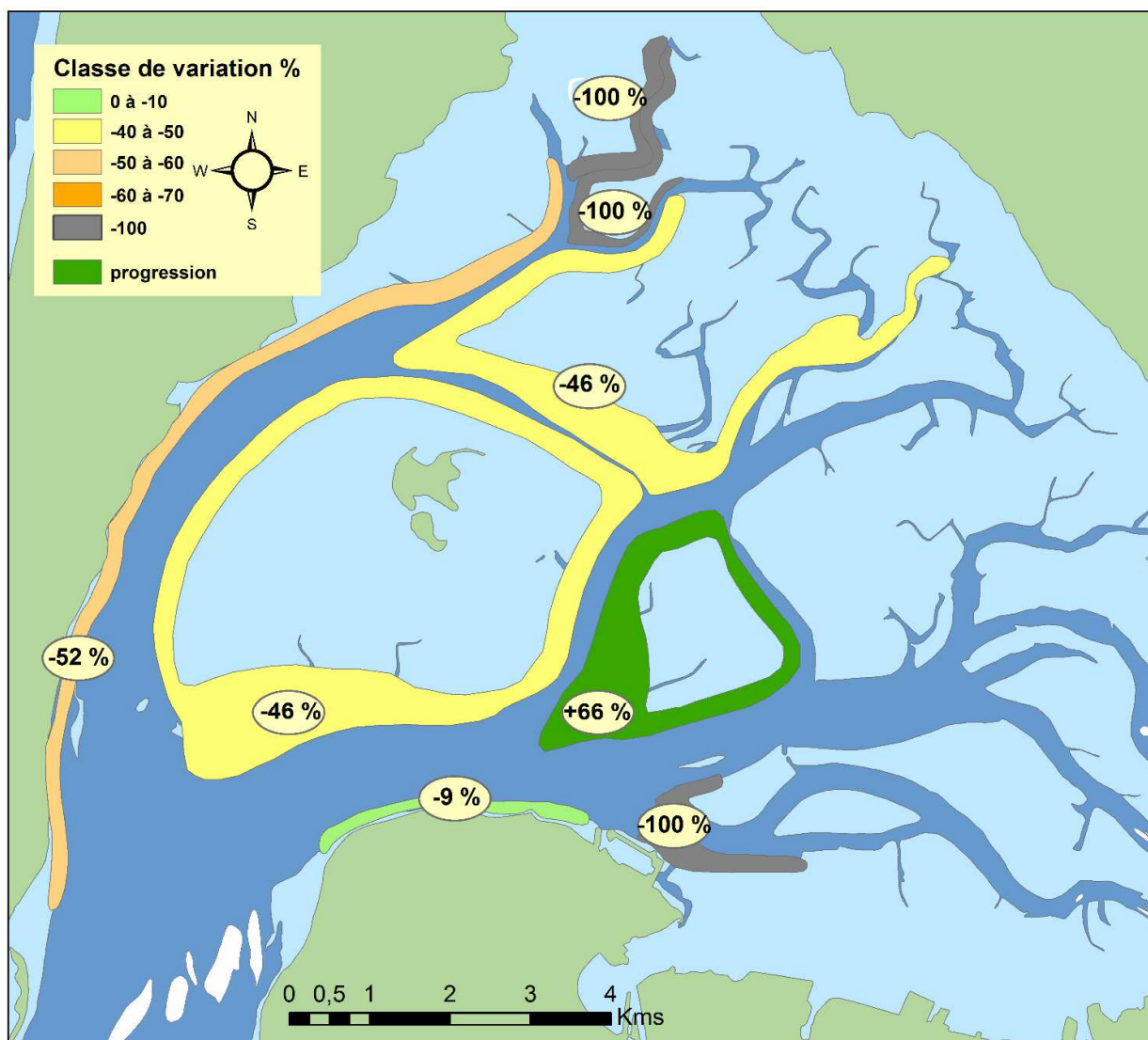


Figure 34 : Evolution par secteur de l'extension des herbiers de zostères marines 2008 et 2016

Au cours de la période récente (2008 - 2016), la **disparition complète** des herbiers de *Zostera marina* est confirmée pour les zones 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 (angle sud-est du Bassin) et s'est étendue également à la zone 13 (Pointe du Tès et nord du port d'Arcachon). Les herbiers ont aujourd'hui totalement disparu de la partie orientale de la lagune.

Sur les zones 1, 2 et 5 (Figure 30), qui regroupent l'île aux Oiseaux, le chenal du Courbey, le sud du Grand Banc, le chenal du nord de l'île ainsi que les bordures ouest et est du chenal de Piquey, les herbiers de *Z. marina* sont toujours présents mais la perte d'extension se poursuit à un rythme soutenu. En effet, on y observe entre 2008 et 2016 une régression comprise entre 46 % et 52 % à comparer aux 48 % à 66 % relevés sur la période précédente (1988-2008), plus de 2 fois plus longue. Il est à noter cependant que les observations ponctuelles de 2001 laissent penser que la régression au cours de la période 1988 – 2008 aurait pu débuter seulement après 2001.

L'information nouvelle qui se dégage de l'analyse spatiale effectuée sur la période la plus récente (2008 - 2016) est l'accroissement de 66 % de l'emprise des zostères sur la zone 14, essentiellement dû à l'expansion des herbiers du chenal est de Mapouchet situé entre le banc de Mapouchet et l'estran des Grahudes.

Il est à noter toutefois que les polygones sont aujourd'hui construits à partir des résultats obtenus à l'aide des algorithmes de classification, complétés par une bathymétrie fine (centimétrique), levée simultanément. Le contour des polygones, beaucoup plus détaillé en 2016, peut à lui seul induire une diminution des surfaces cartographiées qu'il n'est

raisonnablement pas possible d'estimer. En outre, il est important de rappeler une fois de plus que les vérifications de terrain sont déterminantes dans le sens où elles fiabilisent considérablement la carte finale obtenue. Par exemple, les images vidéo acquises en 2017 ont permis d'exclure de la carte d'emprise des herbiers un polygone dans lequel les images acoustiques interprétées comme révélant la présence de zostères résultaient en fait de la présence de débris ostréicoles et de blocs rocheux. Cette zone n'ayant pas été vérifiée par vidéo en 2008, on peut se demander si la même confusion n'existait pas déjà pour cette zone.

La comparabilité des résultats nécessaire à l'analyse des évolutions temporelles pose évidemment le problème de la stabilité des méthodes de cartographie. Au niveau national, la réflexion en cours sur les méthodes de cartographie des habitats (projet MarHa) permettra notamment de stabiliser les méthodes d'évaluation de l'emprise des herbiers marins.

3.3.3. Évolution cumulée au cours de la période 1988 – 2016

Au cours de la période 1988 à 2016, la régression des herbiers de *Zostera marina* a été très importante avec une perte d'extension maximale de plus de 80 % sur la masse d'eau Arcachon amont et supérieure à 90 % pour la masse d'eau Arcachon aval (Tableau 13).

Néanmoins, la régression observée sur la masse d'eau côtière « Arcachon amont » FRFC06 (Figure 35) présente une forte hétérogénéité spatiale selon les secteurs. Sur les 16 zones étudiées, 10 ne comportent plus aucun herbier de zostères marines. Sur les 6 autres zones, la régression cumulée varie entre - 72 % pour la zone 5 (Lahillon/chenal du nord de l'île aux Oiseaux) à - 98 % pour la zone située au sud du bassin entre le port de plaisance à l'est et la pointe d'Arcachon à l'ouest.

Tableau 13 : Evolution de la superficie des herbiers de *Zostera marina* dans les deux masses d'eau côtières du bassin d'Arcachon entre 1988 et 2016.

	1988	2016	Evolution
Arcachon amont FRFC06	373,50 Ha	58,45 Ha	-84%
Arcachon aval FRFC07	8,50 Ha	0,71 Ha	-92%

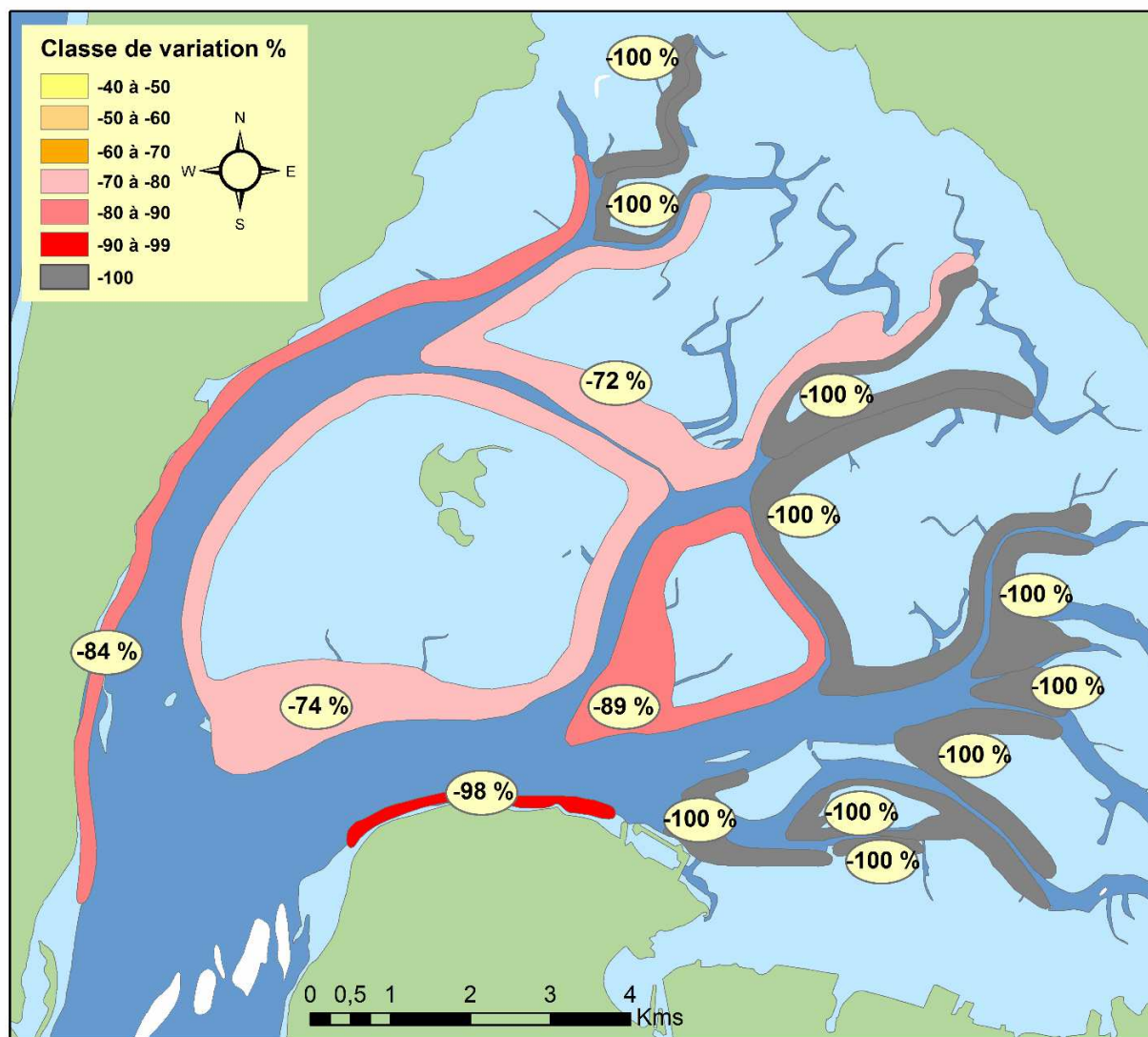


Figure 35 : Evolution par secteur de l'extension des herbiers de zostères marines 1988 et 2016

3.4. Calcul de l'indice « extension » de l'indicateur « angiospermes » DCE

Comme évoqué dans l'introduction de ce rapport, l'indicateur DCE « angiospermes » est calculé dans chaque masse d'eau à partir de trois indices :

- Composition taxinomique : évolution du nombre d'espèces de zostères observées;
- Abondance : évolution de la densité des pieds pour *Zostera marina* et du pourcentage de recouvrement pour *Zostera noltei* ;
- Extension : évolution des emprises maximales recouvertes par les herbiers de zostères.

Pour chaque métrique, la valeur des indices est calculée en traduisant le rapport entre les conditions actuelles et les conditions de référence (meilleur état connu par le passé, par exemple plus grande extension des herbiers), selon les règles présentées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Grille de correspondance entre les changements observés et la valeur du Ratio de Qualité Ecologique (RQE) pour la métrique « extension ».

Perturbation	Modification de l'extension par rapport aux conditions de référence et EQR
Amélioration ou pas de modification visible	0% perte = 1,0, 1% perte = 0,98, 2% perte = 0,96... 10% perte = 0,80
Faibles signes de perturbation	11% perte = 0,78, 12% perte = 0,76, 13% perte = 0,74... 17% perte = 0,66
Altérations modérées	18% perte = 0,64, 22% perte = 0,58, ... 30% perte = 0,50
Altérations majeures	31% perte = 0,49, 32% perte = 0,48, ... 50% perte = 0,30
Altérations sévères	51% perte = 0,295, 52% perte = 0,290, ... 100% perte = 0,00

Les données relatives à l'extension des herbiers de zostères marines du bassin d'Arcachon, à plusieurs périodes de l'histoire, sont présentées sur le tableau 15, l'emprise mesurée en 1988 correspondant aux conditions de référence pour cette métrique.

Tableau 15 : Evolution de l'extension des herbiers de zostères marines du bassin d'Arcachon au cours du temps.

Année	<i>Z. marina</i>	Source
1988	381 Ha	Auby (1991)
2008	104 Ha	Plus <i>et al.</i> (2010)
2016	59 Ha	Ce document
Evolution par rapport à la plus grande extension connue (1988)	- 85 %	

La situation actuelle des herbiers de zostères marines du bassin d'Arcachon, avec une régression de 85% de leur emprise, indique comme en 2008 une altération sévère de leur état, avec une diminution de la valeur de l'indice d'extension pour cette espèce depuis cette dernière date (0,125 contre 0,185).

Cette forte régression de l'emprise des deux espèces de zostères dans le bassin d'Arcachon confèrent à cet élément de qualité un état « moyen » au sens de la DCE (Auby *et al.*, 2017).

4. Conclusion et perspectives

Dans les masses d'eau DCE, la cartographie des herbiers répond aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau se rapportant au volet "Evaluation de la qualité biologique des Masses d'Eau". Cette cartographie, réalisée une fois par plan de gestion (tous les 6 ans) est indispensable puisqu'elle permet de calculer l'indice d'extension qui entre dans le calcul de l'indicateur angiosperme de la DCE.

Aujourd'hui, pour la lagune d'Arcachon, l'état des lieux relatif à la situation physique des herbiers de zostères (*Zostera noltei* et *Zostera marina*) est encore incomplet puisque les surfaces occupées par *Zostera noltei* n'ont pas été réactualisées en 2016 comme pour *Zostera marina*. Dès que les recommandations méthodologiques d'acquisition cartographique pour les herbiers de *Zostera noltei* seront disponibles, ce travail sera effectué en priorité.

En 2016, pour cartographier les herbiers de *Zostera marina*, présents sur les bordures des chenaux (en zone subtidale ne découvrant pas lors de la basse mer), la méthode déjà utilisée en 2008 a été améliorée par l'utilisation d'un sonar latéral/sondeur acoustique plus performant et par l'acquisition complémentaire d'une bathymétrie centimétrique qui aide à définir précisément les contours d'habitats les plus probables. Ces résultats ont été complétés, comme en 2008, par une validation terrain réalisée au moyen d'un système vidéo tracté sous-marin. Les données ainsi obtenues ont été comparées à la carte de 1988 établie par Bouchet ainsi qu'à la carte de 2008 établie par l'Ifremer (Dalloyau *et al.*, 2009) à partir des données collectés par la société SEMANTIC TS.

Compte tenu des évolutions apportées à la méthode DIVA mise en œuvre par la société SEMANTIC TS, les polygones sont aujourd'hui construits à partir des résultats obtenus à l'aide des algorithmes de classification, complétés par une bathymétrie fine (centimétrique), levée simultanément.

Le contour des polygones classifiés, beaucoup plus détaillé en 2016, peut à lui seul induire une diminution des surfaces cartographiées, qu'il n'est pas possible d'estimer.

Par ailleurs, la comparaison de la carte classifiée obtenue en 2016 à un important jeu de données acquises sur le terrain confirme que les méthodes automatiques ou semi-automatiques, peuvent générer de la donnée erronée et doivent faire l'objet d'une phase de validation terrain qui reste lourde à mettre en œuvre.

L'utilisation de ces jeux de données dans le cadre de comparaisons inter-annuelles pose aussi le problème de stabilité de la méthode utilisée, stabilité nécessaire à l'analyse des évolutions temporelles.

Pour *Zostera marina*, les analyses spatiales réalisées à l'aide d'un système d'informations géographiques confirment la régression très importante déjà mise en évidence au cours de la période précédente (1988-2008). Ainsi, au cours des trente dernières années, l'emprise des herbiers de zostères marines a régressé de 84% (de 72% à 100% selon les zones). Pour cette espèce, l'absence de données intermédiaires ne permet pas de définir avec précision la date à partir de laquelle cette régression aurait débuté. Néanmoins, les données parcellaires acquises en 2001 témoignent d'un début de disparition dans la partie nord du bassin (Arès) à cette époque. Aujourd'hui, il est avéré que ces herbiers infratidaux ont totalement disparu de la zone interne du bassin et qu'ils restent toujours présents dans la partie la plus océanique de la lagune d'Arcachon (Grand Banc, Courbey, Mapouchet, côte nord-ouest et chenal du nord de l'île) malgré une régression généralisée. La seule zone où les herbiers aient progressé se situe entre le Banc de Mapouchet et l'estran des Grahudes.

Il faut souligner que, si les causes de cette régression étaient identifiées et pouvaient être contrées, les herbiers de zostères du Bassin pourraient recouvrir leur superficie « optimale » observée par le passé. Les zostères ont en effet une importante capacité de recolonisation dès que les conditions environnementales leur redeviennent favorables, notamment grâce aux stocks

de graines contenus dans les sédiments. La réversibilité de leur régression a d'ailleurs été mise en évidence à plusieurs reprises par le passé.

Par exemple, dans le Bassin d'Arcachon, les herbiers de zostères marines ont été décimés par l'épidémie mondiale des années 1930. Sigalas (1935) rapporte leur disparition presque complète dans le Bassin entre 1932 et 1933, alors qu'elles colonisaient tous les chenaux avant cette période. Une vingtaine d'année plus tard (Lubet, 1956), les zostères marines avaient recolonisé l'ensemble de la baie.

Plus récemment, de fortes régressions des herbiers de zostères, suivies d'une recolonisation rapide ont été mises en évidence dans certaines lagunes méditerranéennes. A Thau, un herbier de zostères marines décimé par un épisode d'anoxie s'est reconstitué en quelques mois (Plus *et al.*, 2003). De même, les herbiers de zostères naines de l'Etang du Vaccarès, qui avaient quasiment disparu en raison d'un accroissement de la turbidité des eaux (lié à une forte chute de la salinité), ont recouvert leur superficie d'origine en quelques années lorsque la transparence de l'eau a augmenté (Charpentier *et al.*, 2005).

Les causes de la régression des deux espèces de zostères ont été étudiées dans le cadre d'une étude réalisée en 2010-2011 (Auby *et al.*, 2011). Les conclusions de ce travail ont permis « d'innocenter » les oiseaux herbivores (canards siffleurs, cygnes et bernaches). En revanche, parmi les facteurs suspectés, les hautes températures estivales semblent pouvoir être mises en cause. Il est en effet probable que les canicules de 2003 et 2006 aient eu un impact négatif sur ces herbiers, notamment sur *Zostera marina*, comme cela a été évoqué sur des populations plus méridionales de zostères et de posidonies. De plus, il semble que les contaminants présents dans les eaux jouent un rôle non négligeable sur la survie et la production des zostères. Cette piste a suscité l'implication de la communauté scientifique, notamment chimistes, généticiens et écotoxicologues de l'Université de Bordeaux (UMR EPOC). Les premiers résultats obtenus à ce sujet ont récemment été publiés (Gamain *et al.*, 2017).

D'autre part, les herbiers de zostères sont connus pour modifier de manière directe l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire : ils diminuent les courants, protègent le fond de l'érosion et fixent les sédiments fins (Ganthy *et al.*, 2013), diminuant ainsi la turbidité (Kombiadou *et al.*, 2014). Des travaux réalisés dans le cadre d'une thèse co-encadrée par l'Université de Bordeaux et l'Ifremer mettent en évidence que la majorité de la régression des zostères est localisée dans les zones les plus profondes, ainsi qu'au niveau des rebords de chenaux. De plus, la régression a conduit à une augmentation significative des vitesses de courants au niveau des chenaux autrefois colonisés par les zostères marines, ainsi que sur les estrans (Cognat *et al.*, 2018). Ainsi, l'augmentation significative des concentrations en matières en suspension dans les zones centrales et orientales du Bassin (Auby *et al.*, 2017) serait une conséquence directe de la régression des herbiers de zostères. La pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, directement affectée par ces changements, provoque une diminution de la production des herbiers (photosynthèse). La non-recolonisation des zones situées au sud-est du Bassin par les zostères marines semble pouvoir s'expliquer par des conditions d'éclairement insuffisantes (Paolin, 2012).

En ce qui concerne les zostères naines colonisant les zones intertidales, des résultats en cours de publication (Cognat *et al.*, en révision) mettent en évidence une faculté d'adaptation significative aux faibles conditions d'éclairement et un impact négatif des conditions hydrodynamiques (courants et vagues). Il semblerait donc que la régression de cette espèce, soit plutôt induite par les modifications directes de l'hydrodynamique (augmentation des courants) que par les modifications indirectes sur les concentrations de sédiments en suspension qui affectent plus les zostères marines. Ces différents résultats confirment l'existence de processus de rétrocontrôle positifs (van der Heide *et al.*, 2007, 2011) qui contribuent à entretenir, voire à amplifier la régression des herbiers de zostères dans le Bassin d'Arcachon.

Enfin, cette importante réduction de l'emprise surfacique de ce biotope a également des conséquences négatives d'un point de vue écologique (réduction de la biodiversité de la macrofaune invertébrée benthique et vagile, désaffectation du milieu pour la reproduction de certaines espèces, *Sepia officinalis* par exemple, altération du rôle fondamental de nourricerie pour différentes espèces de poissons).

Le parc naturel marin du bassin d'Arcachon, dans son plan de gestion a souhaité affirmer une ambition particulière concernant la conservation et la restauration des herbiers de zostères naines et marines du bassin. Ainsi, l'objectif de restauration à 15 ans retenu dans le plan de gestion 2017 - 2032 vise à revenir à une superficie et à une densité de *Zostera marina* et de *Zostera noltei* équivalente aux surfaces observées au début des années 2000.

Les efforts entrepris, notamment sous l'égide du Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon, pour limiter les apports au milieu de contaminants à propriété herbicide, pourraient permettre d'améliorer la condition de ces herbiers. Ils doivent toutefois être poursuivis en s'intéressant notamment aux substances contenues dans les peintures anti salissures des bateaux.

Des essais de replantation de zostères (graines ou plantules) pourraient également être mis en œuvre, en s'appuyant sur l'expérience acquise dans les autres régions également touchées par ce type de régression.

Bibliographie

- Alloncle, N., Guillaumont, L. & Levêque, L. (2005).** Cartographie des herbiers de zostères. Fiche technique – Projet REBENT. FT14-2005-01.doc.
- Auby, I. (1991)** Contribution à l'étude écologique des herbiers de *Zostera noltii* dans le Bassin d'Arcachon: dynamique, production et dégradation, macrofaune associée. Thèse, Université Bordeaux I
- Auby I., Trut G., Vignon A., Bujan S., (2009).** Suivi stationnel des herbiers de zostères (*Zostera noltii* et *Zostera marina*) de la Masse d'eau côtière FRFC06 – Arcachon amont - District Hydrographique Adour-Garonne - 2007. RST/LER/AR/09-001, 40 p.
- Auby I., Trut G., Plus M., Vignon A., Bujan S., (2010).** Suivi stationnel des herbiers de zostères (*Zostera noltii* et *Zostera marina*) de la Masse d'eau côtière FRFC06 - Arcachon amont - District Hydrographique Adour-Garonne - 2006-2007-2008. RST /LER/AR/10-002, 40 p .
- 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, 195 p.
- Auby I., Dalloyau S., Hily C., Oger-Jeanneret H., Plus M., Sauriau P.-G., Trut G. (2012).** Protocoles de suivi stationnel des herbiers à zostères pour la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), *Zostera marina*, *Zostera noltei*. Rapport RST/LER/MPL/12.03, 24 p.
- Auby I., Rigouin L. Trut G., Oger-Jeanneret H., Ganthy F., Cognat M., Gouriou L., Bujan S., Devaux L., Dalloyau S., Feigne C., Pere C., (2017).** Suivi stationnel (2006-2016) des herbiers de zostères (*Zostera noltei* et *Zostera marina*) et calcul de l'indicateur « Angiospermes » (2016) dans la masse d'eau côtière FRFC06 – Arcachon amont - - Bassin Hydrographique Adour-Garonne - . RST /ODE/UL/LER/AR/17-010, 54 p.
- Auby I., D'Amico F., Meteigner C., Ganthy F., Gouriou L., Rigouin L., Rumebe M., Tournaire M.P., Trut G., Oger-Jeanneret H., Guesdon S., Derrien A., Chabirand J.M., Genauzeau S., Schmidt A., Geairon P., Grizon J., Seugnet J.L., Thomas G., Bechemin C., Soudant D., Lamoureux A., Provost C., Beaugrand P., Nouveau B., Michel V., Dupin M., Bariou J., Landier P., Miguel V. (2017).** Suivi « hydrologie » et « phytoplancton » des masses d'eau du bassin hydrographique Adour-Garonne sur la période 2011-2016. RST/ODE/LITTORAL/LER/AR/17.011, 107 p.
- Blanchet H., Auby I., Trut G. (2006).** Mise en place d'un réseau de surveillance des organismes benthiques pour le District hydrographique Adour-Garonne. Proposition d'un réseau de surveillance pour l'application de la Directive Cadre Eau. Rapport Ifremer, RST/LER/AR/06-001, 102 p + annexes
- Charpentier A., Grillas P., Lescuyer F., Coulet E., Auby I. (2005).** Spatio-temporal dynamics of a *Zostera noltii* dominated community over a period of fluctuating salinity in a shallow lagoon, Southern France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **64**(2-3), 307-315.
- Cognat M., Ganthy F., Auby I., Rigouin L., Sottolichio A. (2018).** Spatio-temporal analysis of co-evolution between seagrass beds, their decline and hydro-morphological changes in Arcachon Bay (France). XVIth International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay (ISOBAY 16), 4-8 juin 2018,– Anglet, France.
- Cognat M., Ganthy F., Auby I., Barraquand F., Rigouin L., Sottolichio A. (en révision).** Environmental factors controlling biomass development of seagrass meadows of *Zostera noltei* after a drastic decline (Arcachon Bay, France). *Journal of Sea Research*.

Dalloyau S., Trut G., Plus M., Auby I., Emery E. (2009). Caractérisation de la qualité biologique des Masses d'Eau Côtières : Cartographie des herbiers de *Zostera noltei* et *Zostera marina* du Bassin d'Arcachon. Rapport Ifremer RST /LER/AR/09-003, 52 p.

De Montaudouin X., Lebleu P. (2002). Dragage de l'axe Piquey-Arès et des chenaux co-latéraux : état initial des communautés benthiques, impact. Rapport Station Marine d'Arcachon, Université Bordeaux 1, 51 p.

Fiche Technique REBENT n°4 (V2) : Suivi des Herbiers de Zostères (C. Hily, Déc. 2004). <http://www.ifremer.fr/rebent/>

Gamain P., Feurtet-Mazel A., Maury-Brachet R., Auby I., Pierron F., Belles A., Gonzalez P. (2017). Can pesticides, copper and seasonal water temperature explain the seagrass *Zostera noltei* decline in the Arcachon bay? *Marine pollution bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.024>

Ganthy F., Sottolichio A., Verney R. (2013). Seasonal modification of tidal flat sediment dynamics by seagrass meadows of *Zostera noltei* (Bassin d'Arcachon, France). *Journal of Marine Systems*, 109-110:S233-S240.

Kombiadou K., Ganthy F., Verney R., Plus M., Sottolichio A. (2014). Modelling the effects of *Zostera noltei* meadows on sediment dynamics: application to the Arcachon lagoon. *Ocean Dynamics*, 64(10):1499-1516.

Larkum, A., Orth, W.D., Robert J., Duarte, F., Carlos, M., 2006. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. 1st ed. 2nd printing, 2007, 691 p.

Liste **OSPAR** initiale 2004 des espèces et habitats menaces et/ou en déclin. Convention OSPAR pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est. Réunion de la Commission OSPAR, Reykjavik, 28 juin – 1^{er} juillet 2004.

Lubet P. (1956). Considérations écologiques sur les herbiers du Bassin d'Arcachon. *P.V. Soc. linn. Bordeaux*, 96, 95-103

Marten, A., Hemminga, C., Carlos, M., Duarte, F. (2008). Seagrass Ecology. Ed. Cambridge University Press, 310 pages.

Noel, C., Marchetti, S. (2016). Travaux de cartographie des herbiers de *Zostera marina* du bassin d'Arcachon. Document SEMANTIC TS, 25p.

Paolin Melina (2012). Etude des facteurs contrôlant l'atténuation lumineuse dans une lagune semi-fermée. Calibration d'un modèle bio-optique pour le Bassin d'Arcachon. Rapport de stage ENSAIA, 49 p.

Plus, M., Deslous-Paoli J.-M., Dagault, F. (2003). Seagrass (*Zostera marina* L.) bed recolonisation after anoxia-induced full mortality. *Aquatic Botany* 77, 121-134.

Plus M., Dalloyau S., Trut G., Auby I., Montaudouin de X., Emery C., Noël C., Viala C. (2010). Long-term evolution (1988–2008) of *Zostera* spp. meadows in Arcachon Bay (Bay of Biscay). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 87 (2010) 357–366.

Oheix, J. (2006). Enregistrement d'images vidéo géoréférencées par caméra remorquée dans les lagunes de Méditerranée - Expérimentations pilotes dans les étangs de Leucate (juin 2004), de Thau et d'Ingril (avril 2005). Rapport Ifremer, RST.DOP.LER/LERLR/06.01, 42 p.

Sigalas R. (1933). A propos de *Zostera marina*. *P.V. Soc. linn. Bordeaux*, 85, 49-50.

van der Heide T., van Nes E.H., Geerling G.W., Smolders A.J.P., Bouma T.J., van Katwijk M.M. (2007). Positive feedbacks in seagrass ecosystems: implications for success in conservation and restoration. *Ecosystems*, 10: 1311-1322.

van der Heide T., van Nes E.H., van Katwijk M.M., Olf H., Smolders A.J.P. (2011). Positive feedback in seagrass ecosystems - Evidence from large scale empirical data. *PLoS ONE*, 6(1): e16504.