

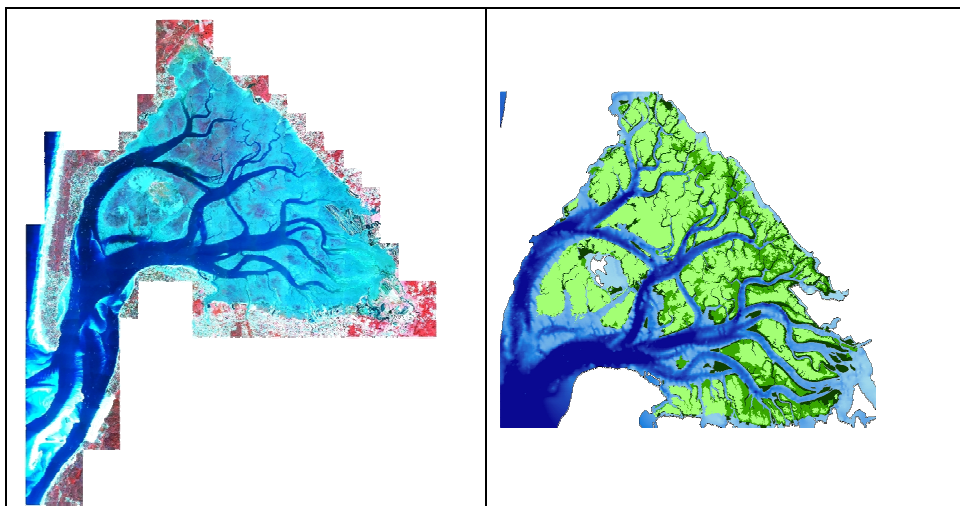
Ifremer
DOP LER
Laboratoire Environnement Ressources d'Arcachon

Sébastien DALLOYAU
Gilles TRUT
Martin PLUS
Isabelle AUBY

Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse
Eric EMERY

Juin 2009 - RST /LER/AR/09-003

Caractérisation de la qualité biologique des Masses d'Eau Côtières : Cartographie des herbiers de *Zostera noltii* et *Zostera marina* du Bassin d'Arcachon



Agence de l'Eau
Adour Garonne

**Caractérisation de la qualité biologique des
Masses d'Eau Côtères : Cartographie des herbiers
de *Zostera noltii* et *Zostera marina* du Bassin d'Arcachon**

Sommaire

1. Introduction.....	6
2. Contexte de l'étude et objectifs	8
2.1. L'approche "Zones homogènes" de la DCE.....	8
2.2. Le site d'étude : Le Bassin d'Arcachon.....	9
2.3. Rappel sur les zostères.....	10
2.4. Rappel des objectifs de l'étude.....	11
3. <i>Zostera noltii</i>.....	12
3.1. Matériel et méthodes.....	12
3.1.1. Carte de 1989.....	12
3.1.2. Carte de 2005.....	12
3.1.3. Carte de 2007.....	13
3.2. Résultats concernant <i>Zostera noltii</i>.....	19
3.2.1. Cartes des herbiers de <i>Zostera noltii</i> du Bassin d'Arcachon en 1989, 2005 et 2007.....	19
3.2.2. Évolution temporelle de l'emprise des herbiers de <i>Zostera noltii</i>	26
4. <i>Zostera marina</i>	35
4.1. Matériel et méthodes.....	35
4.1.1. Carte de 1989.....	35
4.1.2. Observations de 2001	35
4.1.3. Carte de 2008.....	36
4.2. Résultats concernant <i>Zostera marina</i>	44
4.2.1. Cartes de 1988	44
4.2.2. Observations de 2001	46
4.2.3. Carte de 2008.....	47
4.2.4. Évolution temporelle de l'emprise des herbiers de <i>Zostera marina</i>	48
5. Conclusion et perspectives	52
Bibliographie	54

1.Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE établit un nouveau 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 2015, 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 (ME) a été défini. La masse d'eau représente l'unité de classification et de gestion de la DCE et se trouve rattachée à un district hydro géographique (Agence de Bassin). 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 ME, 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 ME et par éléments de qualité biologique (macro-invertébrés, phytoplancton, macrophytes (et poissons, uniquement pour les masses d'eau de transition)).

La masse d'eau "Arcachon amont" présente, sur toute son emprise, de vastes herbiers de zostères dont le rôle fonctionnel est essentiel. Ces herbiers interviennent 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 1989 environ 50 % de la surface totale de la masse d'eau amont, semble aujourd'hui en régression.

Deux types d'actions ont été entreprises pour caractériser la qualité du compartiment biologique "herbiers marins à angiospermes" (*Zostera noltii* - Zostère naine) et *Zostera marina* - Zostère marine) dans le Bassin d'Arcachon : suivi stationnel et suivi surfacique.

Ces herbiers font l'objet d'un **suivi stationnel** annuel depuis 2006 (pour *Zostera noltii*) et 2007 (pour *Zostera marina*). Les résultats acquis sont présentés dans un rapport récemment publié (Auby *et al.*, 2009).

Le **suivi surfacique** des herbiers (emprise maximale colonisée par ces deux espèces), qui doit être effectué une fois par plan de gestion (soit tous les 6 ans), a été entrepris en 2007 (pour *Zostera noltii*) et 2008 (pour *Zostera marina*).

Pour *Zostera noltii*, cette cartographie a été réalisée par photo-interprétation d'une mosaïque d'images de résolution 1 mètre. Ces clichés IGN, orthorectifiés et géoréférencés ont été acquis en août et septembre 2007. Un important travail de validation terrain a permis d'attribuer des indices de fiabilité aux cartographies obtenues.

Pour *Zostera marina*, la méthode a consisté à coupler une information de présence/absence déterminée par superposition de signaux issus d'un sonar latéral et d'un sondeur acoustique à des observations terrain obtenues par une caméra vidéo tractée sous marine reliée à un système de positionnement sub-métrique. Ces données ont été acquises au cours de l'été 2008.

En outre, ce rapport contient des données concernant l'évolution temporelle de la surface occupée par les herbiers, s'appuyant sur des données datant de 1989, déjà intégrées dans le Système d'Information Géographique (SIG) et sur des données de 2005, concernant seulement l'espèce *Z. noltii*, issues du traitement d'une orthophotographie de résolution 20 cm, acquise en 2005 et mise à notre disposition par le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon.

L'ensemble de ces résultats a permis, par croisement des couches SIG, d'établir une première tendance d'évolution de l'emprise maximale en herbiers au cours des vingt dernières années (1989-2007).

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, une Masse d'Eau (ME) est définie comme une entité fonctionnelle et homogène des points 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 ME ont été distingués :

- Les Masses d'Eau Côtières (MEC), 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 qui sont partiellement salines en raison de leur proximité des eaux côtières mais qui restent fondamentalement influencées par des courants d'eau douce.

Le Bassin d'Arcachon a été découpé en deux masses d'eau côtières (Figure 1) : une masse d'eau amont (FRFC06), d'une superficie de 152,1 Km², et une masse d'eau aval (FRFC07), d'une surface de 66,1 Km².

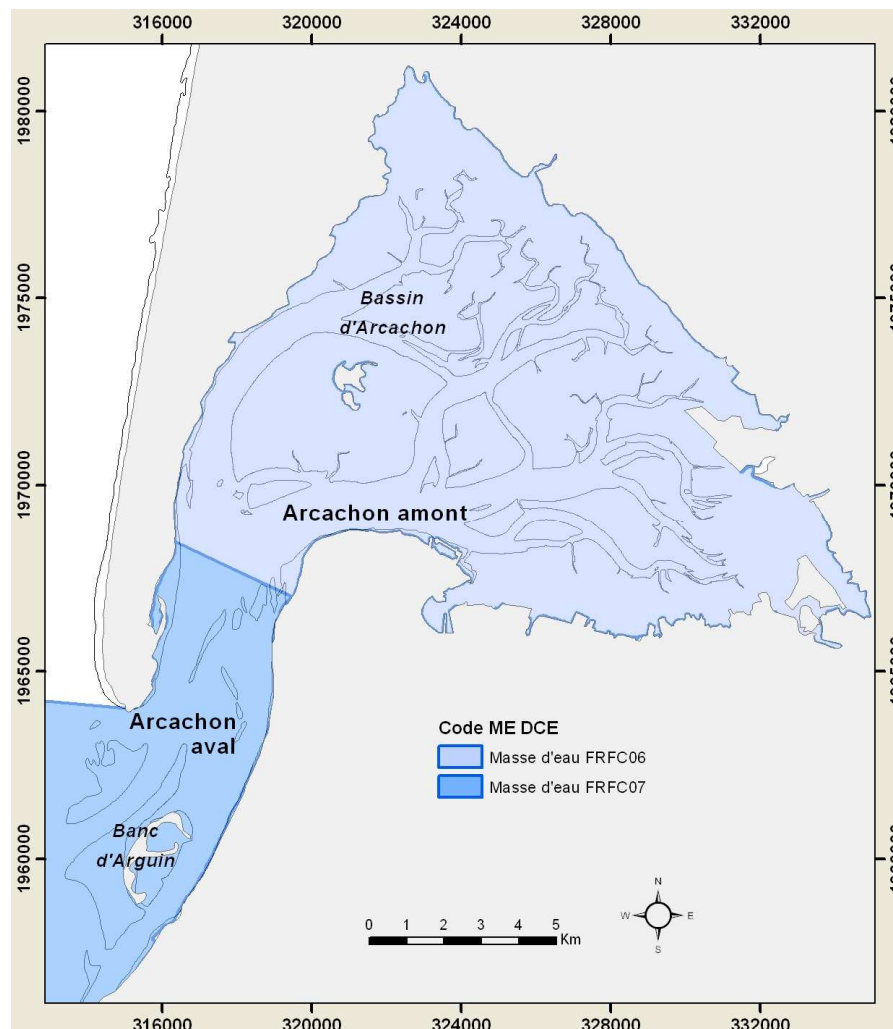


Figure 1 : Délimitation des masses d'eau dans le Bassin d'Arcachon

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

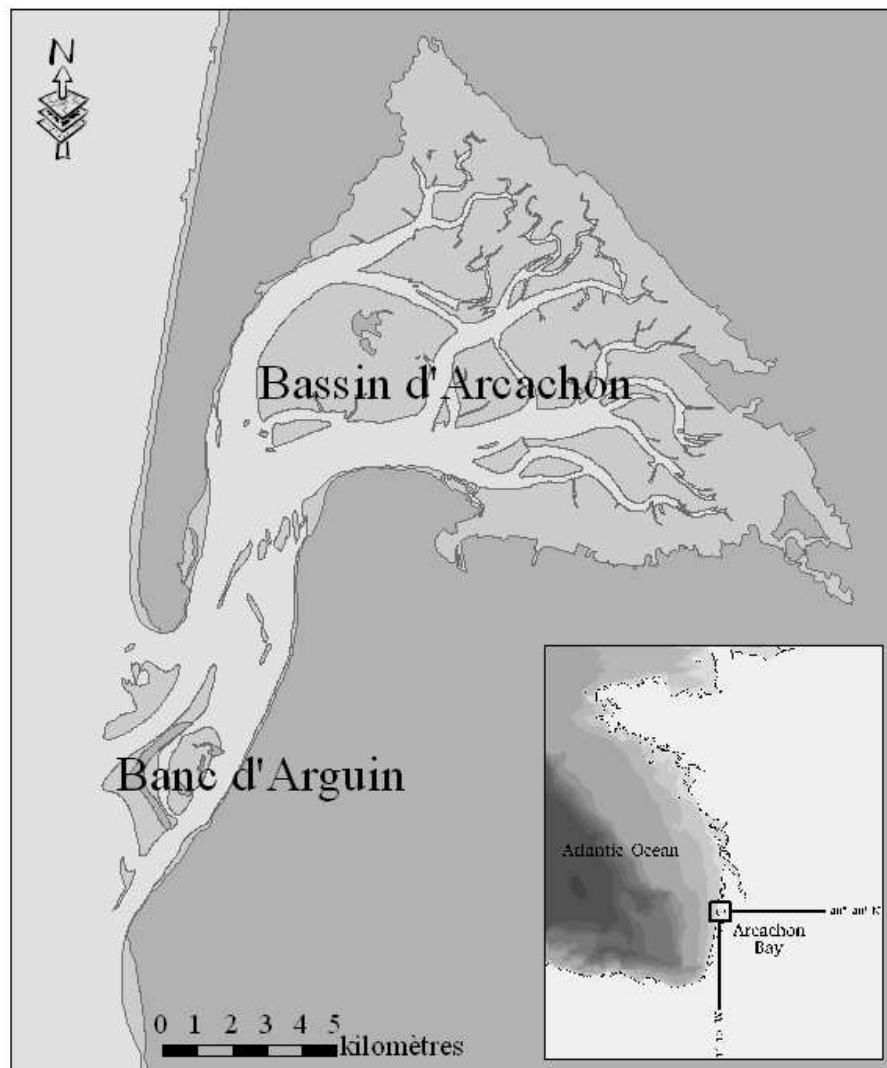


Figure 2 : Situation du Bassin d'Arcachon.

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 2), 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 désignés localement sous le terme d'"esteys".

La zone intertidale est constituée de plages sableuses à sablo-vaseuses. La plus grande partie de cet estran est peuplée par des herbiers de zostères naines (*Zostera noltii*) 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 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 principalement en limite inférieure d'estran (forme magnozostéride) ainsi qu'en zone subtidale peu profonde (forme parvozostéride, à limbes plus étroits et moins longs), alors que *Zostera noltii*, de taille inférieure, se rencontre surtout en haut de l'estran.



Zostères naines



Zostères marines

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 (Fich.Tech. 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 répertoriée en tant qu'espèce protégée.

Soumis à de nombreuses pressions anthropiques, les herbiers s'avèrent de bons indicateurs biologiques des changements de conditions des 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). Les herbiers s'avèrent d'excellents indicateurs biologiques des pressions s'exerçant sur l'écosystème, depuis l'échelle locale jusqu'à l'échelle globale (pêche à pied, activités nautiques, broutage par l'avifaune, eutrophisation, changement climatiques, ...).

2.4. Rappel des objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail était d'établir une cartographie actuelle des herbiers présents sur les MEC "Arcachon amont" et "Arcachon aval" du Bassin d'Arcachon et de les comparer aux cartes antérieures.

Les données acquises serviront également d'état initial pour le suivi de l'évolution de la végétation qui sera mis en œuvre dans le contrôle de surveillance tel que défini par la Directive Cadre européenne sur l'Eau, et qui prévoit une cartographie tous les 6 ans.

La première partie de ce travail concerne les herbiers intertidaux de *Zostera noltii* et la seconde les herbiers infratidaux de *Zostera marina*.

3. *Zostera noltii*

3.1. Matériel et méthodes

Pour toutes les dates (1989, 2005, 2007), la cartographie des herbiers intertidaux a été réalisée par interprétation d'orthophotographies puis numérisation de l'extension maximale.

Les analyses spatiales relatives à la cartographie *stricto sensu* ont été réalisées par géotraitement sous logiciel SIG ArcGis© 9.2.

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 Datum NTF en Lambert II étendu. Le cas échéant certaines données ont été exploitées dans le système Datum GCS WGS84 (méridien d'origine : Greenwich) en degrés minutes décimales, mais transformées par la suite en Lambert II étendu.

3.1.1. Carte de 1989

La première carte des herbiers intertidaux (1989) a été réalisée par stéréophoto-interprétation à partir d'orthophotographies couleur IGN acquises durant l'été 1989. Les surfaces ont été générées à l'aide d'un planigraphe, sans validation "terrain" des contours (Auby, 1991).

La couche SIG résultante a été numérisée dans les années 1990 sous ArcView© 3.2, puis transformée pour les besoins de la présente étude sous ArcGis© 9.2.

3.1.2. Carte de 2005

Le SIBA (Syndicat Mixte du Bassin d'Arcachon) a mis à notre disposition une orthophotographie haute résolution (20 cm x 20 cm), datant des 21-22 juillet et 18-19-20 septembre 2005 et constituée de 225 dalles numériques.

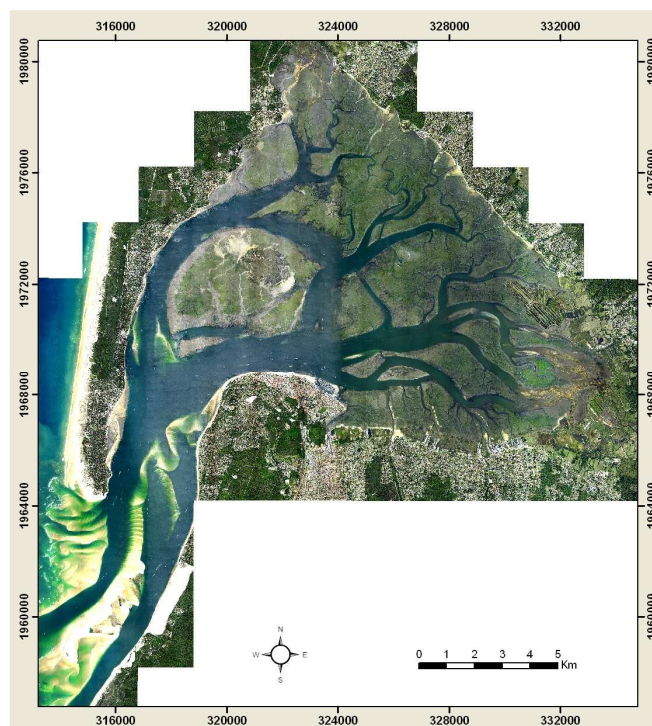


Figure 3 : Assemblage des dalles couvrant le Bassin d'Arcachon pour 2005

Pour que les images soient exploitables dans les meilleures conditions, l'acquisition des orthophotographies doit respecter plusieurs critères essentiels qui sont : coefficient de marée supérieur à 80, heure d'acquisition basse mer ± 1 heure, couverture nuageuse faible, et inclinaison solaire minimale afin d'éviter les phénomènes d'"ombres portées" (fenêtre propice 11h - 16h).

Or, dans le plan de vol 2005, certains transects ont été réalisés à marée descendante (présence d'eau sur les bas estrans), tandis que d'autres représentent réellement des secteurs à marée basse. Ce biais pose un problème d'interprétation, qui sera discuté dans le chapitre dédié aux résultats.

3.1.3. Carte de 2007

Orthophotographie

Pour la réalisation de la carte de 2007, l'Ifremer, en partenariat avec l'AEAG, a acquis une orthophotographie littorale auprès de l'IGN. Cette photographie, d'une résolution moyenne de 50 x 50 cm a été prise le 27 août 2007, en respectant les critères de qualité définis dans le chapitre 3.3.2.

L'image numérique fournie par l'IGN comportait deux types de fichiers, l'un au format RVB (Rouge Vert Bleu) (Figure 4), l'autre au format IRC (Infra Rouge Court) (Figure 5). Dans l'analyse et la détermination des surfaces couvertes par les herbiers, le proche infrarouge s'avère utile, car cette bande spectrale caractérise l'activité photosynthétique des végétaux, et notamment des herbiers. Ainsi, sur la carte, ces derniers apparaissent dans les tons rouges ce qui facilite souvent l'interprétation des dégradés de couleur, donc des niveaux de recouvrement.

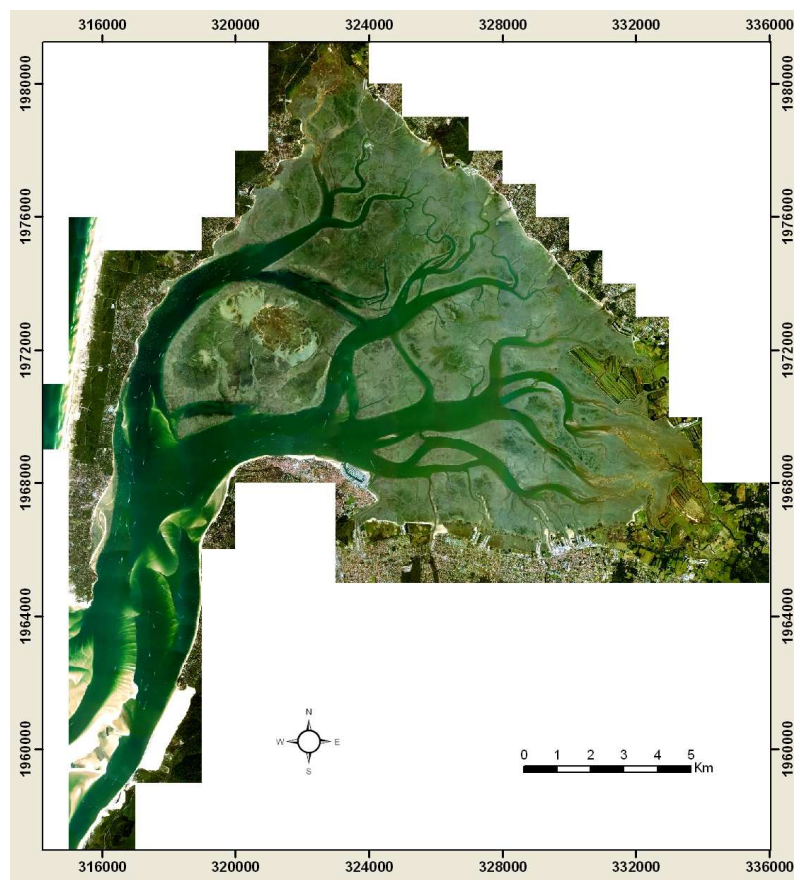


Figure 4 : Assemblage des dalles (format RVB) couvrant le Bassin d'Arcachon pour 2007

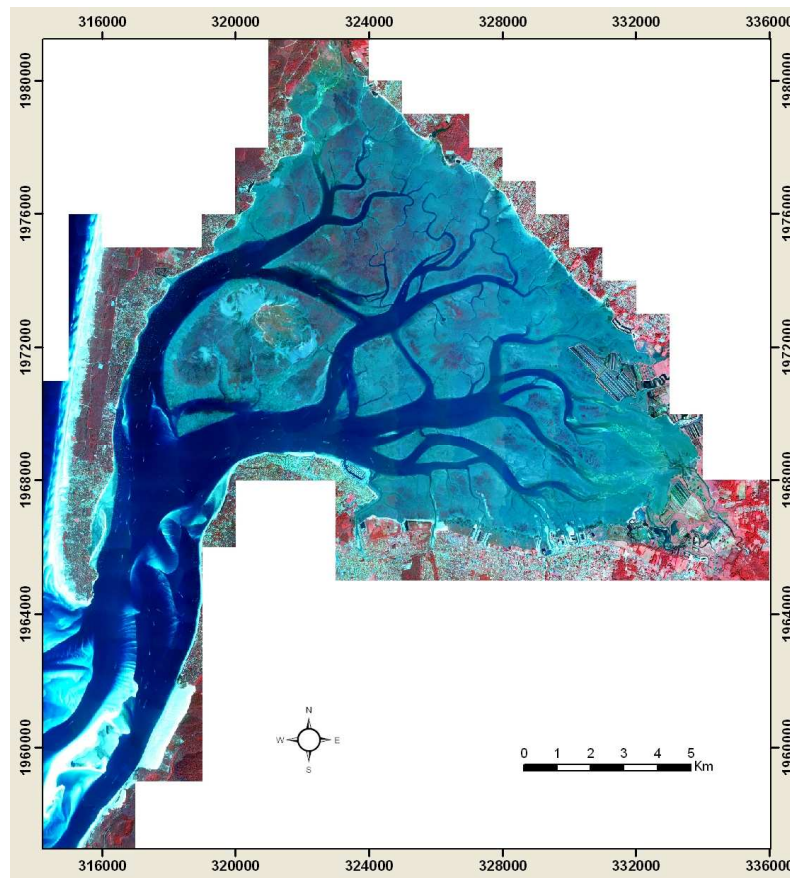


Figure 5 : Assemblage des dalles (format IRC) couvrant le Bassin d'Arcachon pour 2007

Validation terrain

La méthode présentée s'inspire des recommandations mises en œuvre pour la région Bretagne dans le cadre du REBENT (Réseau de surveillance des biocénoses benthiques) coordonné par l'Ifremer. Ces recommandations sont disponibles sur le site du REBENT (www.rebent.org), rubrique "Documentation", section "Fiches techniques et référentiels" (fiche FT14 : Cartographie des herbiers de zostères). Elle prend également en compte l'expérience "terrain" acquise dans le cadre du travail réalisé en Baie de St Malo (Gerla, 2004).

Cette validation "terrain" repose sur la numérisation des limites d'herbier à l'aide d'un DGPS (geoXT©Trimble 2005) par cheminement sur l'estran. Ce GPS de précision sub-métrique permet d'obtenir des relevés de terrain qui seront ajustés, en post-traitement, dans un référentiel de balises fixes, afin de réduire la marge d'erreur potentielle (i.e. Différentielle) et d'obtenir une précision inférieure ou égale au mètre (Figure 6).

Ainsi, ce sont près de 111.2 Km qui ont été parcourus au cours des 24 sorties réalisées entre août et octobre 2007 puis en juillet 2008 (annexe 1).

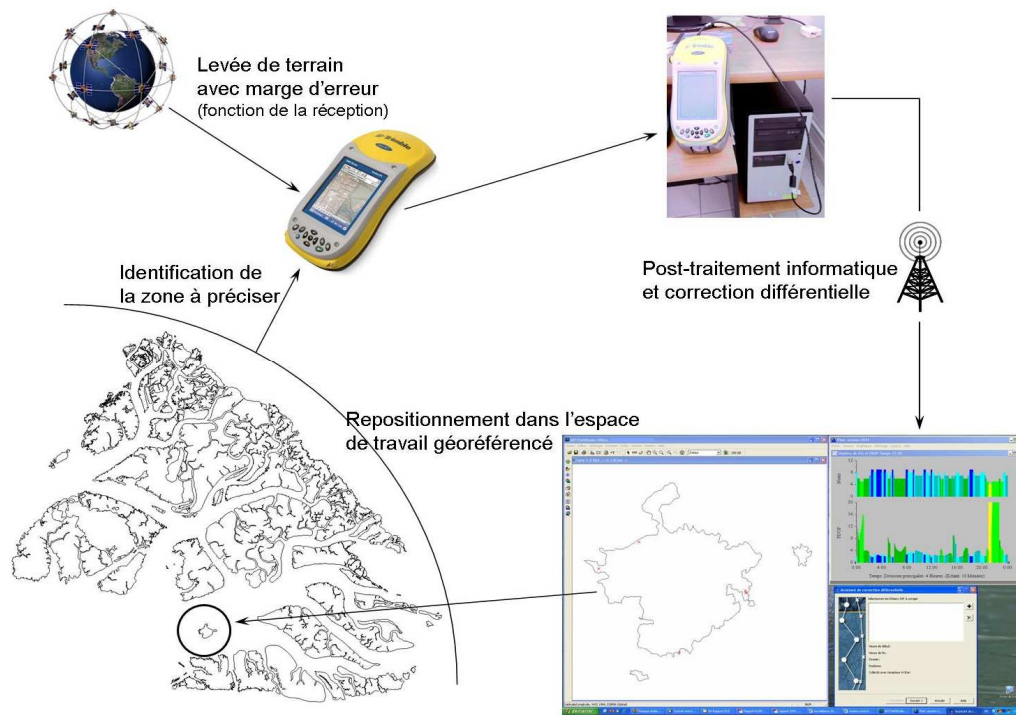


Figure 6 : Schéma d'acquisition numérique de terrain par DGPS et post-traitement

Le DGPS utilisé permet de définir un carnet de terrain qui comporte pour chaque classe d'objet à créer (point, ligne, polygone) un certain nombre d'attributs prédéfinis (liste de choix). Sur le terrain, ces attributs doivent être renseignés avant de démarrer l'acquisition des positions géographiques de l'objet. Les données ainsi collectées, sont transférées sur ordinateur et post-traitées à l'aide du logiciel GPS Pathfinder® 3.1x sous environnement Windows®. Elles sont ensuite exportées en fichiers de forme pour un géoréférencement sous ArcGis® 9.2.

Les limites ainsi obtenues sont utilisées dans la construction des polygones résultats par le prolongement du contour en vue de créer le polygone final délimitant la zone végétalisée (Figure 7).

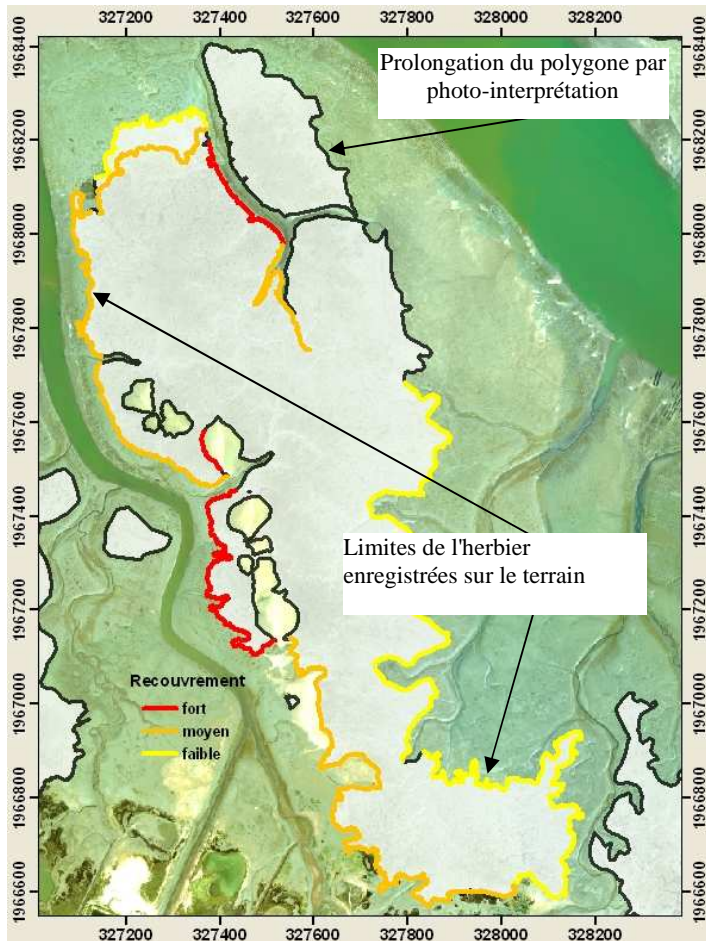


Figure 7 : Exemple d'acquisition linéaire de terrain (traits de couleur indiquant des taux de recouvrement différents) et prolongement de ceux-ci (trait noir) donnant le polygone final.

Par ailleurs, au cours de ces sorties de "validation terrain" de nombreuses photos géo-localisées ont été réalisées sur chaque zone étudiée de façon à qualifier le recouvrement : vue générale de la zone et cadre de 30X30 cm (Figure 8 et Tableau 1).

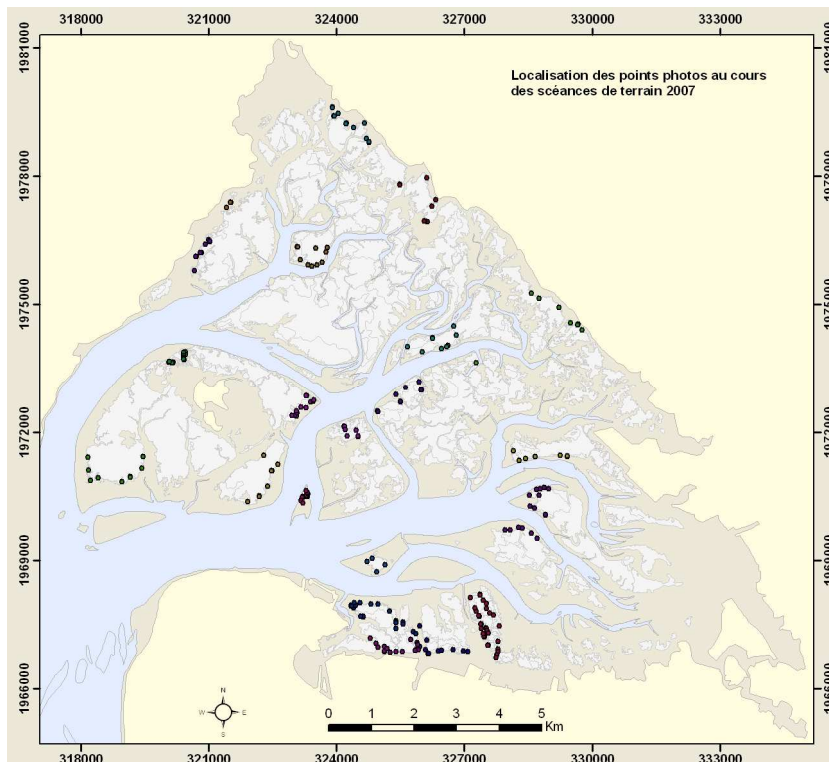





Figure 8 : Localisation des **294** photos prises sur le terrain.

La caractérisation du taux de recouvrement des herbiers a été effectuée selon la nomenclature reposant sur le pourcentage de recouvrement foliaire des plantes (Tableau 1) et s'inspirant des travaux de de Jong (2004). La calibration de l'interprétation a été réalisée à partir de jeux de photos de quadrats (30 x 30 cm) disposés sur l'herbier.

Les taux de recouvrement sont déclinés en trois catégories, comme suit :

Tableau 1 : Classification des types d'herbiers selon leur pourcentage de recouvrement
(Adapté de Alloncle *et al.*, 2005, de Jong, 2004)

Herbier de Zostères			
% de recouvrement	< 25%	25 à 75%	> 75%
Signification	Herbiers discontinus et très souvent hétérogènes avec des taches disséminées ou des pieds dispersés en faible densité	Herbiers discontinus, présentant une alternance de taches recouvertes et de zones de substrat nu	Herbiers continus et homogènes présentant une forte couverture foliaire
Illustration			

Chaque polygone est renseigné dans une table attributaire associée. Celle-ci précise la date, le site, la méthode employée (photo-interprétation), l'auteur à l'origine de la numérisation, la validation ou non du contour sur le terrain (par DGPS- Cf infra §3.3.1) et le taux de recouvrement.

Par ailleurs, un indice de qualité de la donnée a été affecté à chaque polygone et renseigné dans la table attributaire ; cet indice varie de 1 à 3 avec :

- 1. Peu fiable** : polygone photo-interprété sur une zone à très faible taux de recouvrement avec limite d'herbier peu évidente ou présence probable de macroalgues.
- 2. Assez fiable** : polygone photo-interprété sur une zone à recouvrement moyen avec des limites assez nettes.
- 3. Très fiable** : polygone photo-interprété sur une zone à recouvrement fort avec limites d'herbier très nettes ou limites vraies (vérité terrain).

3.2. Résultats concernant *Zostera noltii*

3.2.1. Cartes des herbiers de *Zostera noltii* du Bassin d'Arcachon en 1989, 2005 et 2007

1989 (Arcachon Amont)

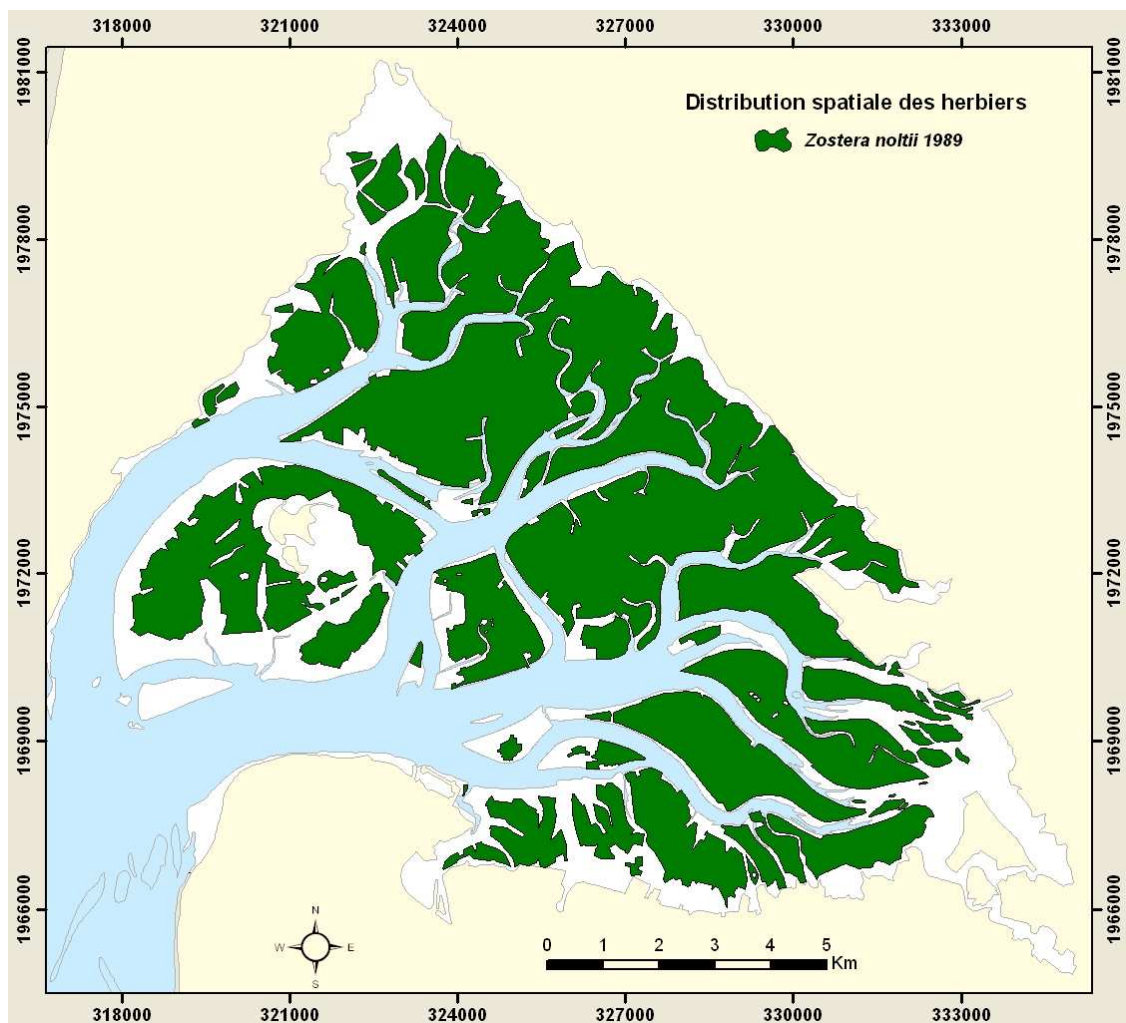


Figure 9 : Extension des herbiers de *Zostera noltii* dans le Bassin d'Arcachon en 1989

La figure 9, issue des travaux d'Auby (1991), présente la distribution des herbiers de *Zostera noltii* sur le Bassin d'Arcachon (Masse d'eau "Arcachon amont") en 1989.

Affichant alors une superficie de 6845,8 Ha, cet herbier recouvrait environ 45,0% de la surface de la masse d'eau "Arcachon amont".

Par rapport à la nomenclature relative à la densité adoptée dans les cartes suivantes, on peut considérer que les herbiers cartographiés à partir de la photographie de 1989 présentaient un taux de recouvrement au moins supérieur à 25 % (photographies aériennes archivées).

Cette carte servira de point initial pour l'analyse de la dynamique d'évolution de l'herbier de zostères naines dans la masse d'eau "Arcachon amont".

Dans la masse d'eau "Arcachon aval", les herbiers de zostères naines sont présents exclusivement dans le secteur du Banc d'Arguin. Ces herbiers n'ont pas été cartographiés en 1989, en raison de l'absence de données photographiques.

2005 (Arcachon Amont)

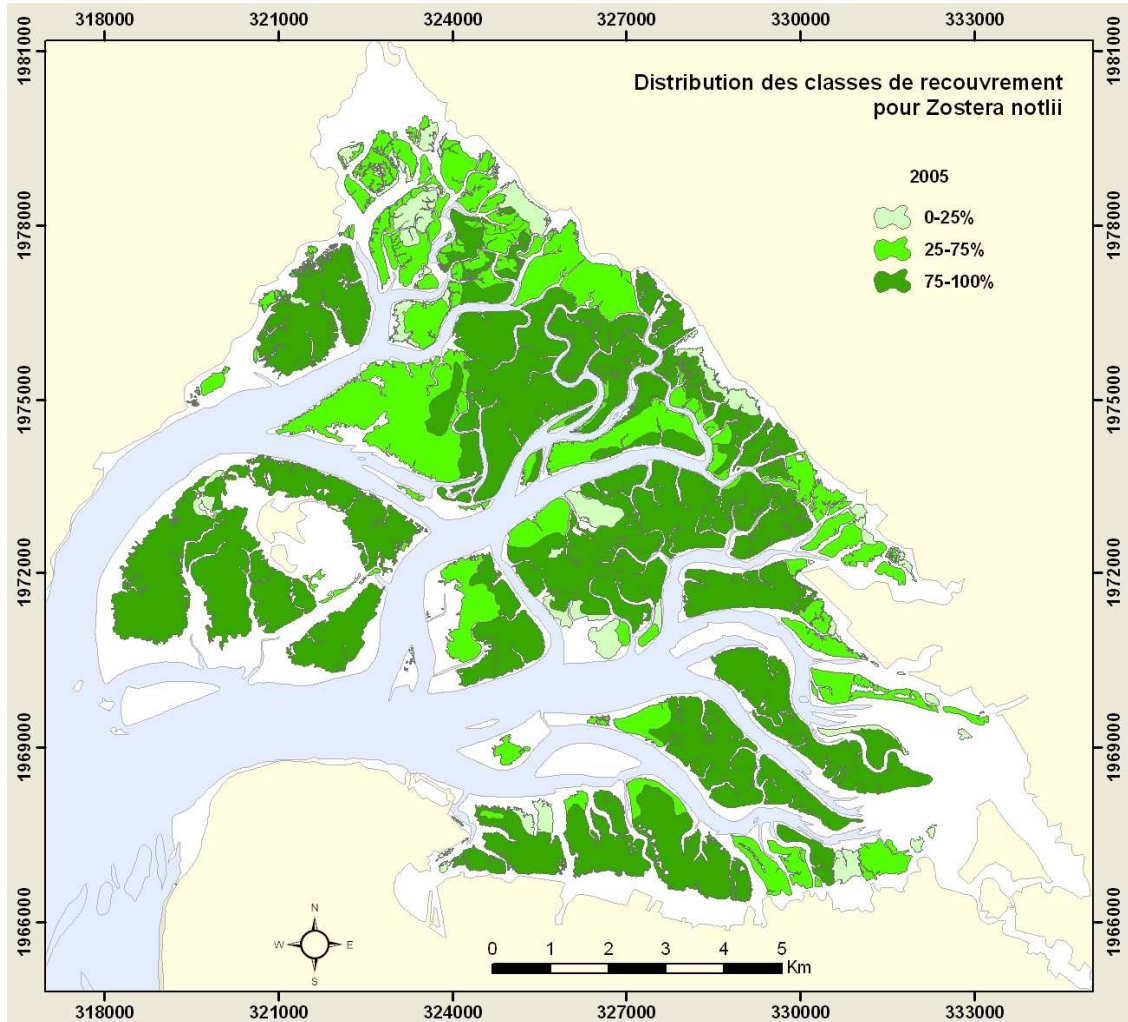


Figure 10 : Extension des herbiers de *Zostera nottii* dans le Bassin d'Arcachon en 2005

La figure 10 schématise l'état de l'herbier pour l'année 2005.

Affichant une superficie de l'ordre de 6 092 Ha, ces herbiers recouvrent alors près de 40,1% de la masse d'eau "Arcachon amont".

Cependant, comme évoqué précédemment, certaines dalles de l'orthophotographie réalisée en 2005 n'ont pas été acquises à $BM \pm 1h$. Sur ces dalles, les parties les plus basses des herbiers intertidaux sont recouvertes par un film d'eau, rendant délicate l'interprétation de leurs limites basses (Figure 11).

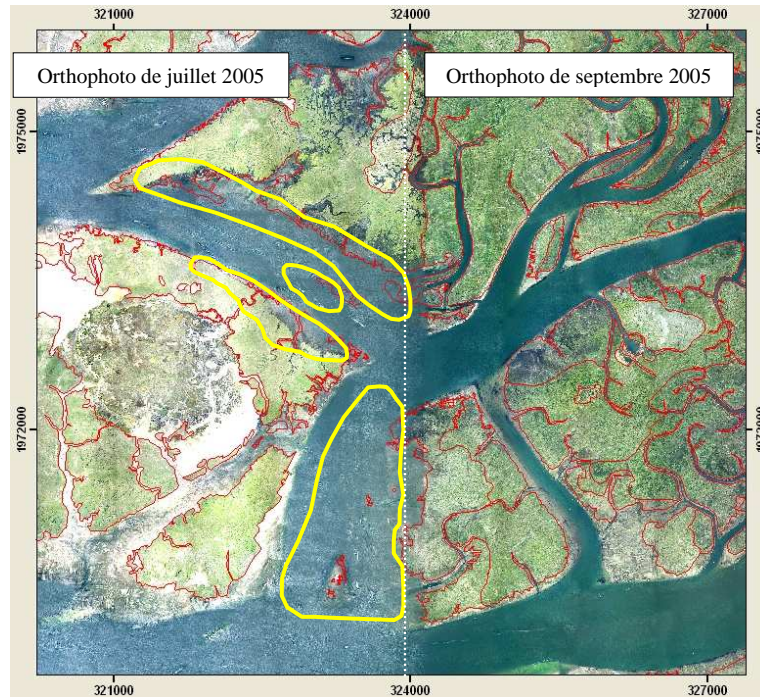


Figure 11 : Identification des zones d'herbier (en jaune) concernées par le biais "bas des herbiers immergés "

Dans ce cas de figure, considérant qu'il est peu probable que les herbiers encore présents en 2007 ne l'aient pas été en 2005, les polygones 2005 ont été fermés par les limites inférieures des polygones de 2007 (Figure 12). Il faut préciser que ce biais ne concerne que 19 polygones sur un total de 278. La surface transposée représente 122 ha sur les 6 092 ha d'herbier cartographiés, soit environ 2%.

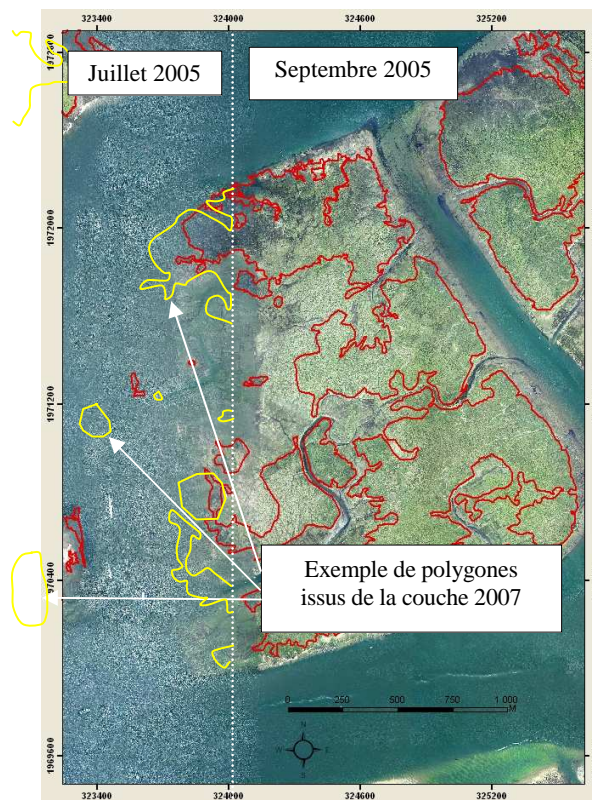


Figure 12 : Exemple de polygones dont la limite basse est issue de la photo-interprétation de 2007 (en jaune)

Une table attributaire du type de celle présentée dans le chapitre 3.2.3 a été associée à la couche de polygones 2005. Les renseignements concernant les classes de recouvrement ont été définis lors de la photo-interprétation en s'inspirant des signatures d'herbier observées sur l'orthophotographie 2007 en relation avec les nombreuses observations de terrain faites cette année là. Aucune validation de terrain n'a été réalisée pour l'établissement de cette carte 2005.

L'analyse de la couverture spatiale interprétée, occupée par chaque type de classe de recouvrement en 2005 donne les résultats suivants :

Tableau 2 : Présentation de l'occupation spatiale en 2005 pour chaque type de classe de recouvrement

2 0 0 5	Classe de recouvrement	Surface par classe (Ha)	% de la surface totale
	0-25%	383,48	6,3
	25-75%	1 693,40	27,8
	75-100%	4 015,13	65,9

On peut remarquer que près de 95 % des herbiers photographiés en été 2005 semblent présenter une densité moyenne à forte.

2005 (Arcachon Aval)

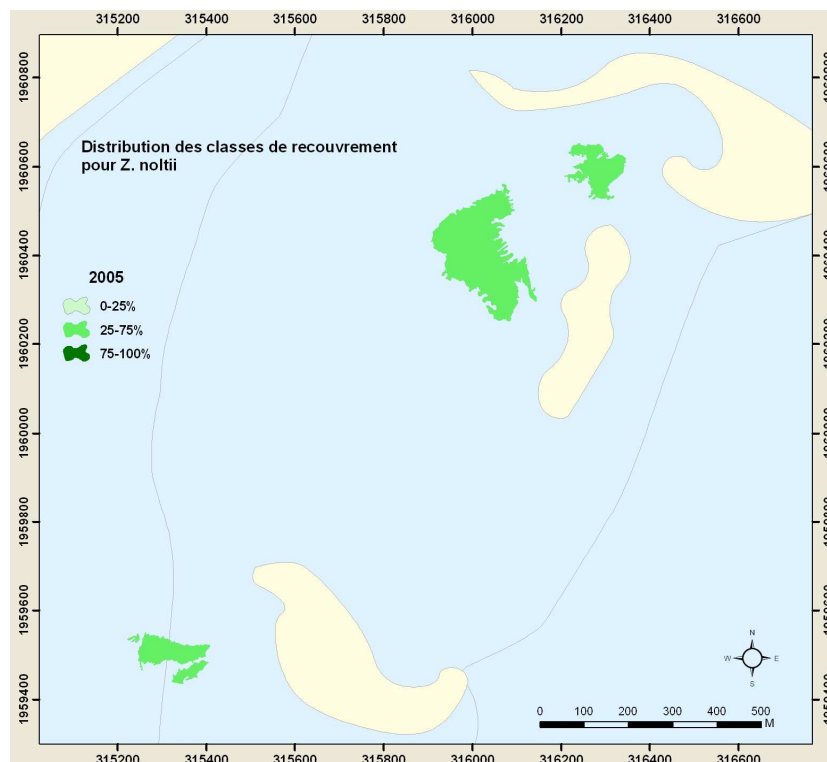


Figure 13 : Extension des herbiers de *Zostera noltii* sur le Banc d'Arguin pour l'année 2005

Tableau 3 : Présentation de l'occupation spatiale en 2005 pour chaque type de classe de recouvrement

2 0 0 5	Classe de recouvrement	Surface par classe (Ha)	% de la surface totale
	0-25%	0,00	0,00
	25-75%	5,34	100,00
	75-100%	0,00	0,00

En ce qui concerne le Banc d'Arguin (Masse d'eau "Arcachon aval"), l'année 2005 représente la levée cartographique la plus ancienne.

Plusieurs taches d'herbier ont été identifiées (Figure 13). Ces "taches" se répartissent en trois zones dont la plus méridionale correspond à une dépression dans l'étage intertidal. Celle-ci est utilisée comme zone de mouillage temporaire par les bateaux et affiche une superficie de 0,918 Ha.

Les deux zones d'herbières plus au nord sont situées de part et d'autre d'une dépression plus profonde où se développe un herbier à *Zostera marina*. Ce secteur est peu sujet aux perturbations nautiques du fait de la proximité de la réserve naturelle, et présente une superficie de 4,418 Ha.

Au total, les herbiers de zostères naines recouvraient 5,34 Ha en 2005, avec un taux de recouvrement appartenant à la classe 25-75 % (tableau 3).

2007 (Arcachon Amont)

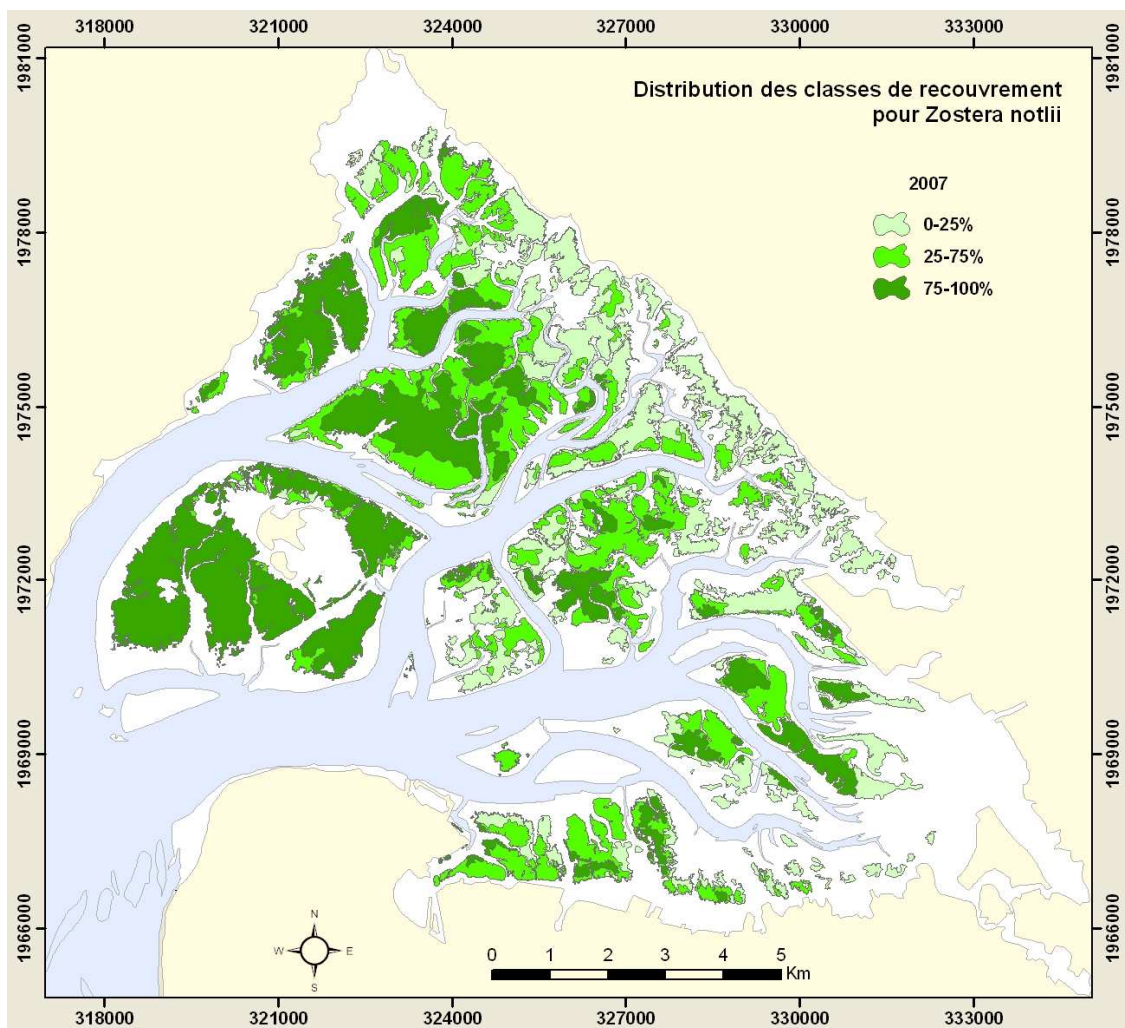


Figure 14 : Extension des herbiers de *Zostera noltii* dans le Bassin d'Arcachon en 2007

En 2007, l'herbier de zostères naines recouvre une superficie totale de 4 563.9 Ha, soit 30,0 % de la surface de la masse d'eau "Arcachon amont" (Figure 14).

L'analyse de la couverture spatiale occupée par chaque type de classe de recouvrement nous donne les résultats présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Présentation de l'occupation spatiale en 2007 pour chaque type de classe de recouvrement

2 0 0 7	Classe de recouvrement	Surface par classe (Ha)	% de la surface totale
	0-25%	1 354,20	29,70
	25-75%	1 470,74	32,00
	75-100%	1 738,93	38,10

Par rapport aux données de 2005 (Tableau 2), on observe une forte diminution de superficie des herbiers les plus denses (classe 75-100 %) et un accroissement de la superficie de la classe de recouvrement la plus faible.

Qualité des données de la carte 2007

Pour la masse d'eau "Arcachon amont", les données recueillies au cours des 24 sorties "vérité terrain" (limites des herbiers sur un linéaire de 93 Km, attribution d'un pourcentage de recouvrement aux parcelles explorées) ont permis de constituer 71 polygones recouvrant une surface de 1637,47 Ha.

En d'autres termes, en 2007, près de 36% de la surface des herbiers de zostères naines du Bassin d'Arcachon ont fait l'objet d'une validation terrain permettant d'établir leurs limites et leurs taux de recouvrement.

Comme spécifié dans le chapitre 3.2.3., ces herbiers qui ont fait l'objet de la validation terrain sont affectés de l'indice de confiance maximal (3), ainsi que ceux dont les limites sur les orthophotographies sont évidentes. Au total, environ 47 % des surfaces d'herbier peuvent être classées dans cette catégorie (Tableau 5).

Environ 36 % de la surface des herbiers présentent un indice de confiance intermédiaire (2) ; il s'agit de zones à taux de recouvrement moyen, qui n'ont pas fait l'objet d'observations sur le terrain.

A l'inverse, pour 17 % des surfaces cartographiées exclusivement à partir de l'interprétation des orthophotographies, une forte incertitude est affectée à la donnée, soit parce que ces herbiers présentent une couverture très faible, soit parce que la présence de macroalgues accumulées peut affecter l'interprétation. Ces herbiers sont affectés de l'indice de confiance minimal (1).

Tableau 5 : Superficies des herbiers cartographiés en 2007 affectés de leur indice de confiance.

2 0 0 7	Indice de confiance	Surface par classe (Ha)	% de la surface totale
	1 (peu fiable)	789,26	17,30
	2 (assez fiable)	1 647,86	36,10
	3 (très fiable)	2 126,75	46,60

La représentation spatiale de ces indices de confiance est rapportée sur la figure 15.

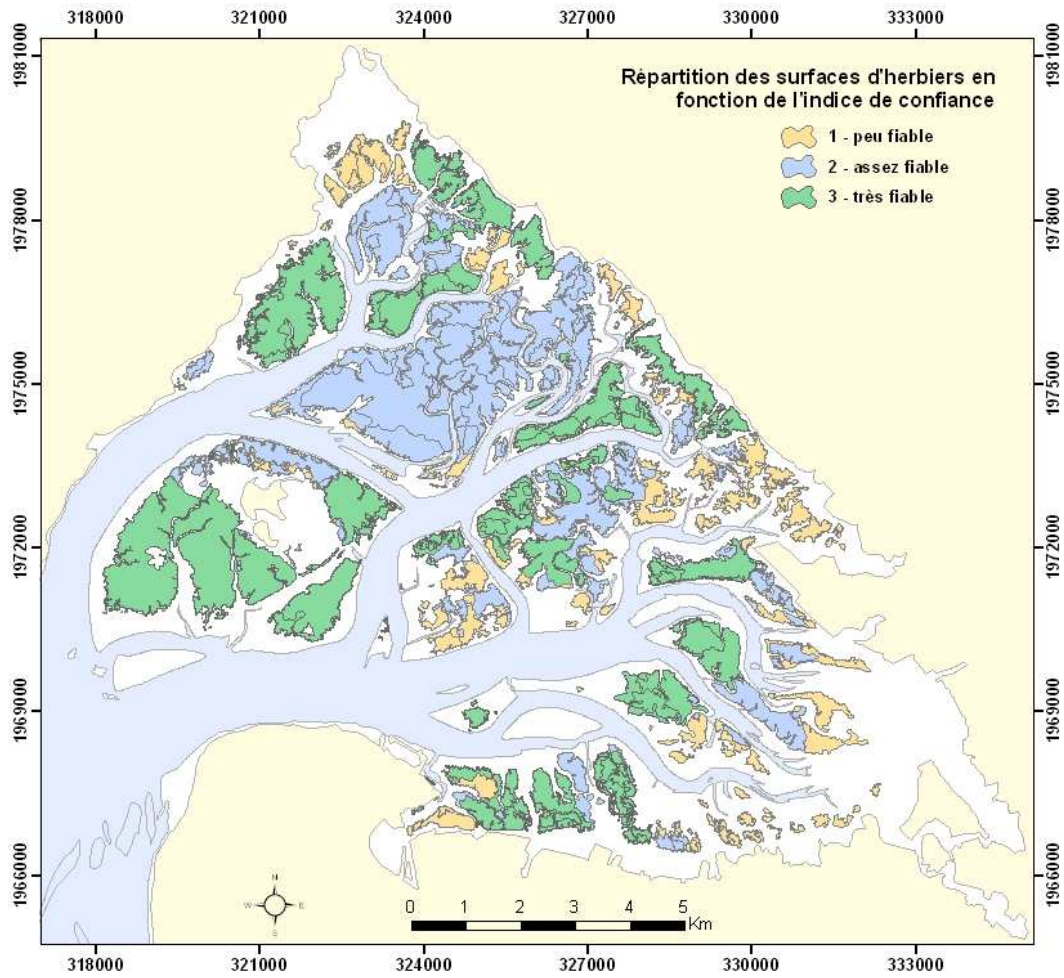


Figure 15 : Représentation des surfaces d'herbier pour 2007, affectées par un indice de confiance

2008 (Arcachon Aval)

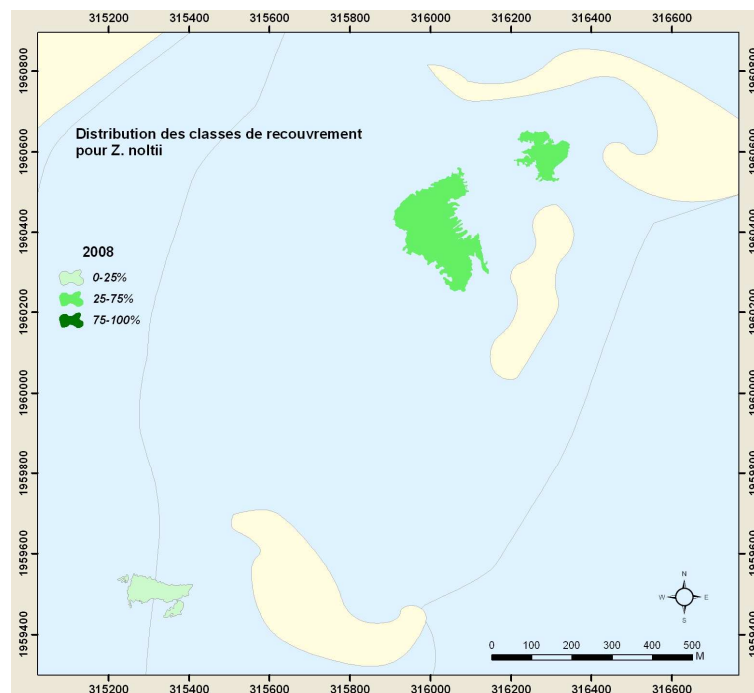


Figure 16 : Extension de l'herbier de *Z. noltii* sur le Banc d'Arguin en 2008

Compte tenu de la faible étendue de l'herbier de zostères naines sur le Banc d'Arguin, il a été possible de le cartographier directement sur le terrain à l'aide du dGPS Geo XT. Ces données peuvent ainsi être assorties d'un indice de confiance maximal (3).

Les trois herbiers recouvraient, en 2008, une superficie de 5,26 Ha, soit 4,42 Ha pour les deux parcelles du nord (affectées d'un taux de recouvrement compris entre 25 et 75 %) et 0,84 Ha pour la tache du sud (taux de recouvrement inférieur à 25 %).

Tableau 6 : Présentation de l'occupation spatiale pour chaque type de classe de recouvrement.

2	Classe de recouvrement	Surface par classe (Ha)	% de la surface totale
0	0-25%	0,84	16,00
0	25-75%	4,42	84,00
8	75-100%	0,00	0,00

3.2.2. Évolution temporelle de l'emprise des herbiers de *Zostera noltii*

La synthèse des données rapportées dans les paragraphes précédents permet de mettre en évidence une forte régression des herbiers de zostères naines dans la masse d'eau Arcachon amont entre 1989 et 2007-08 (Tableau 7) :

Tableau 7 : Superficie des herbiers de *Zostera noltii* dans les deux MEC du Bassin d'Arcachon

	1989	2005	2007-2008
Arcachon amont	6 845,83 Ha	6 092,00 Ha	4 563,90 Ha
Arcachon aval		5,34 Ha	5,26 Ha

Entre 1989 et 2005 (soit 16 ans), la superficie des herbiers à *Z. noltii* a régressé de 11,01%. Pendant les deux années suivantes (2006-2007), cette régression s'est fortement accélérée, pour atteindre, en 2007, 33,33 % par rapport à la situation de 1989 (Figure 17).

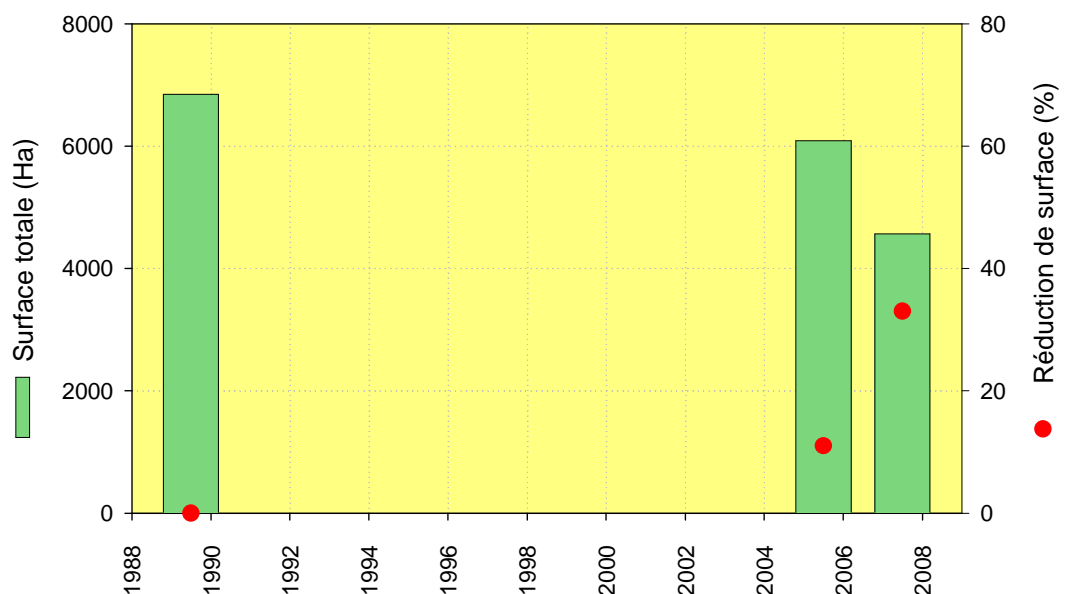


Figure 17 : Évolution temporelle des surfaces totales d'herbiers de zostères naines entre 1989 et 2007 et réduction de la surface par rapport à l'état initial de 1989.

Outre cette régression de l'emprise totale, une diminution du taux de recouvrement des herbiers a été mise en évidence entre 2005 et 2007, comme l'indiquent les résultats présentés sur la figure 18.

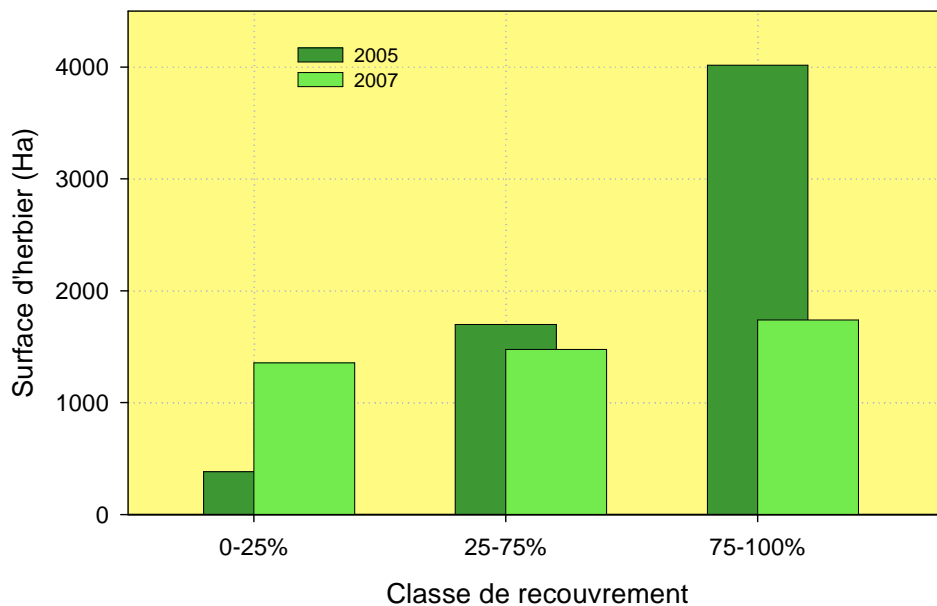


Figure 18 : Evolution de la répartition des surfaces d'herbiers de zostères naines selon les classes de recouvrement entre 2005 et 2007.

Entre les 2 années (2005 et 2007), les surfaces à faible recouvrement (0-25%) ont connu une progression de 141,3%. Dans le même temps les autres types de recouvrement ont subi une diminution de l'ordre de 18,0 % pour la classe 25-75% et 53,5% pour la classe de recouvrement supérieure à 75-100 %.

En résumé, non seulement la couverture de l'herbier a fortement diminué entre 2005 et 2007, passant de 6092 à 4564 Ha, mais dans le même temps, la représentation des herbiers très peu denses (taux de couverture < 25 %) a augmenté.

Ces herbiers très peu denses ont été cartographiés avec une bonne fiabilité en 2007, le plus souvent sur la base des observations terrain. En effet, la majorité d'entre eux n'apparaissent pas nettement sur les orthophotographies. On peut donc estimer qu'ils n'ont pas (ou mal) été pris en compte dans l'analyse des photographies précédentes (1989 et 2005). En outre, ces herbiers très clairsemés ne peuvent pas vraiment être considérés comme un habitat spécifique structurant les sédiments sur lesquels ils se développent et leur peuplement par la macrofaune benthique (Blanchet *et al.*, 2004).

Pour ces raisons, il a été décidé d'analyser dans les paragraphes suivants les données concernant exclusivement les herbiers dont le recouvrement est supérieur à 25 %.

Les cartes 2005 et 2007 des herbiers les plus denses sont présentées sur les figures 19 et 20.

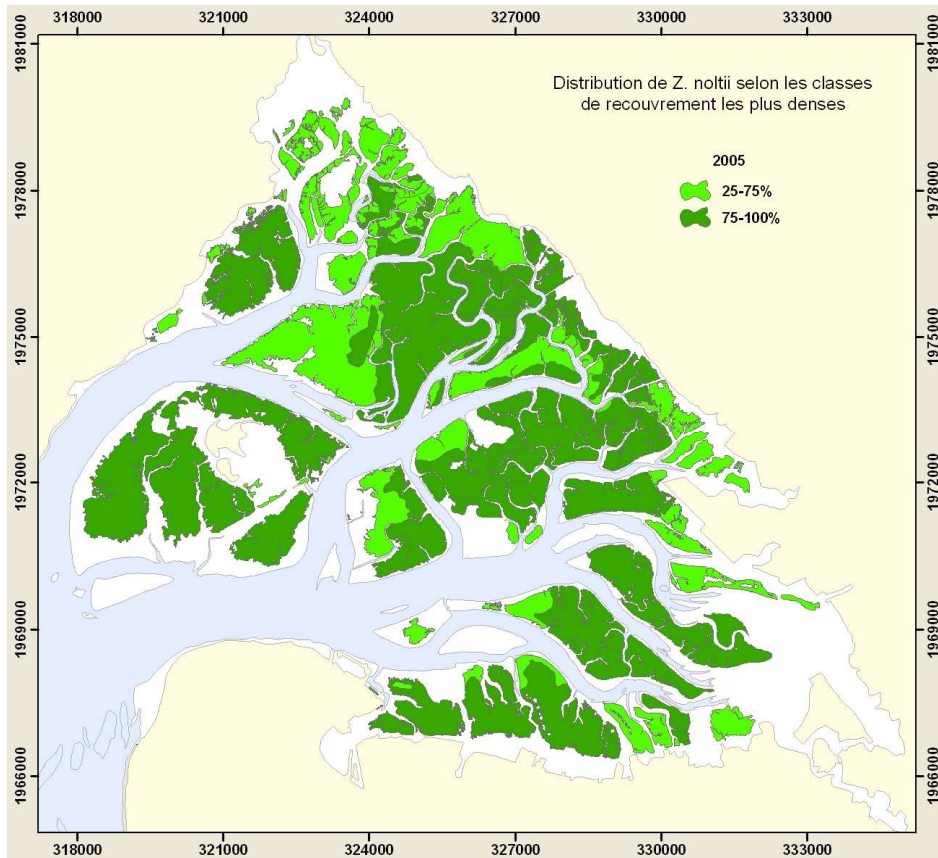


Figure 19 : Cartographie des herbiers de *Zostera noltii* les plus denses pour l'année 2005

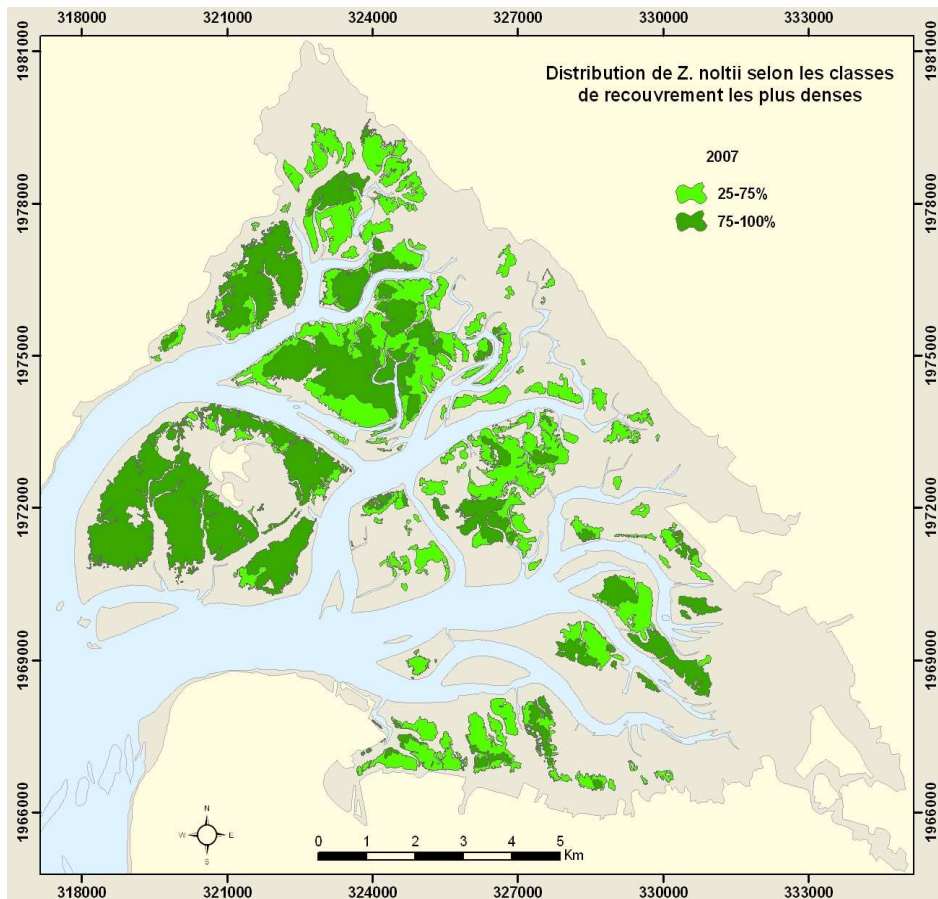


Figure 20 : Cartographie des herbiers de *Zostera noltii* les plus denses pour l'année 2007

L'évolution temporelle de la surface de ces herbiers denses montre une régression encore plus marquée que celle de l'emprise générale des zostères naines : 19,13 % de réduction entre 1989 et 2005, 53,11 % de réduction entre 1989 et 2007 (Figure 21).

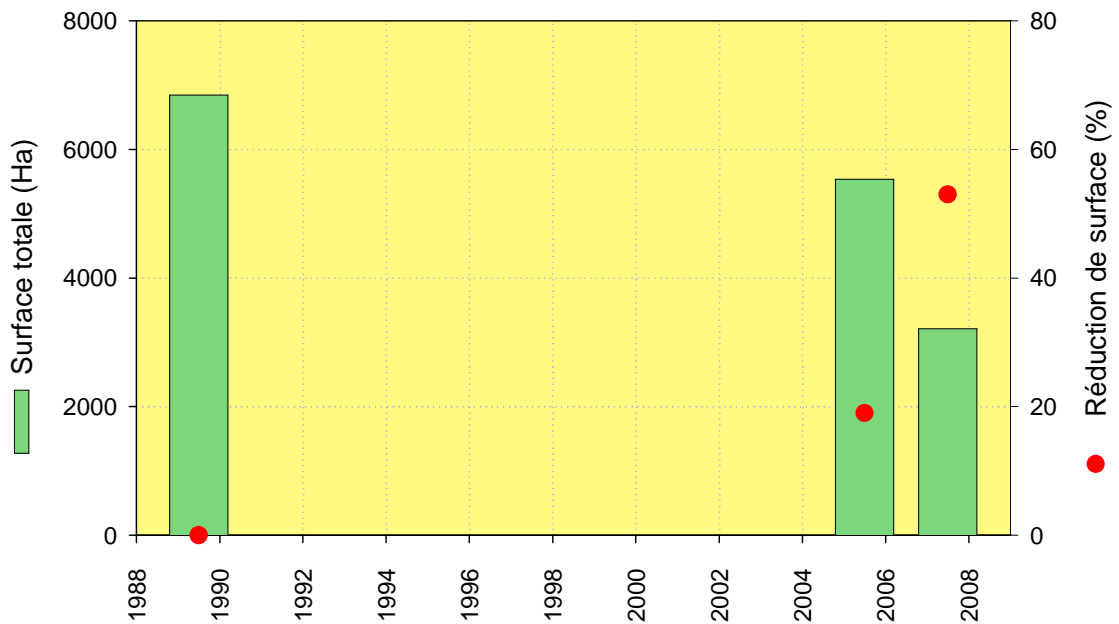


Figure 21 : Évolution temporelle des surfaces d'herbiers de recouvrement supérieur à 25 % entre 1989 et 2007 et réduction de la surface par rapport à l'état initial (1989)

Afin de déterminer les différences spatiales de cette évolution surfacique, deux types de traitements des données ont été réalisés :

- ✧ Croisement des couches SIG de l'extension des herbiers les plus denses (couverture > 25 %) aux différentes années 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 ce second type d'analyses, l'herbier a été découpé en 19 secteurs représentés sur la figure 22.

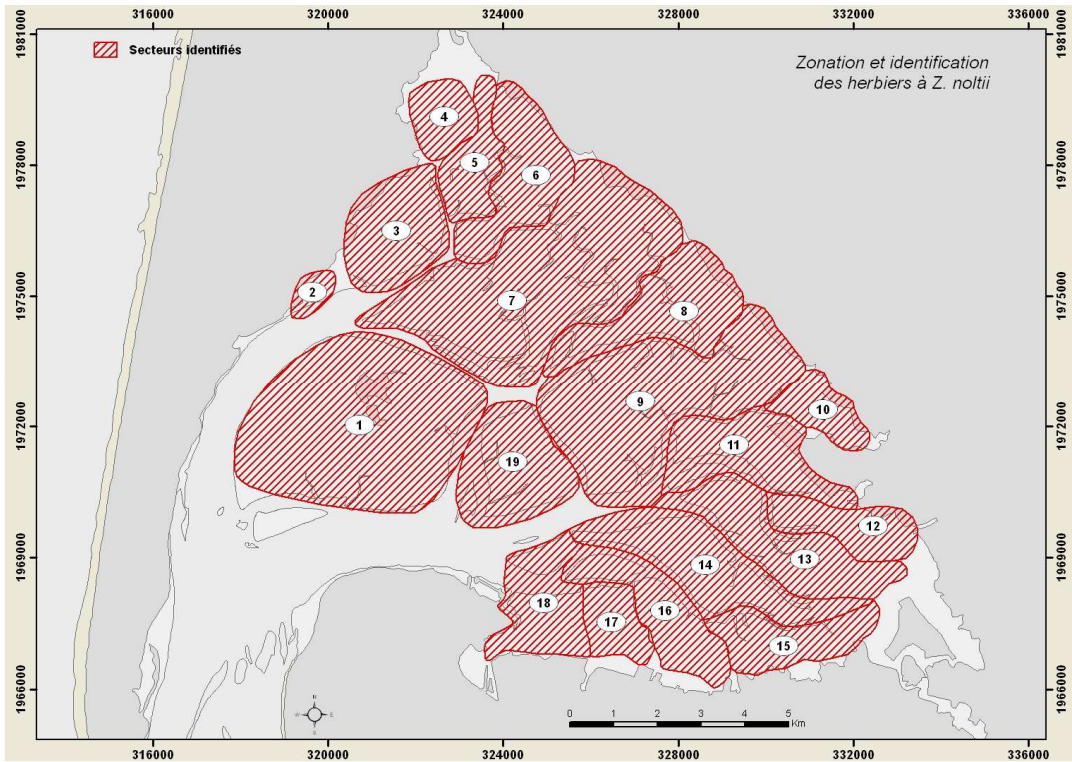


Figure 22 : Délimitation des 19 secteurs d'herbiers de *Zostera noltii*

Les résultats de ces deux types de traitements sur l'extension des herbiers denses (couverture > 25 %) pour les années 1989 et 2005 sont rapportés sur les figures 23 et 24.

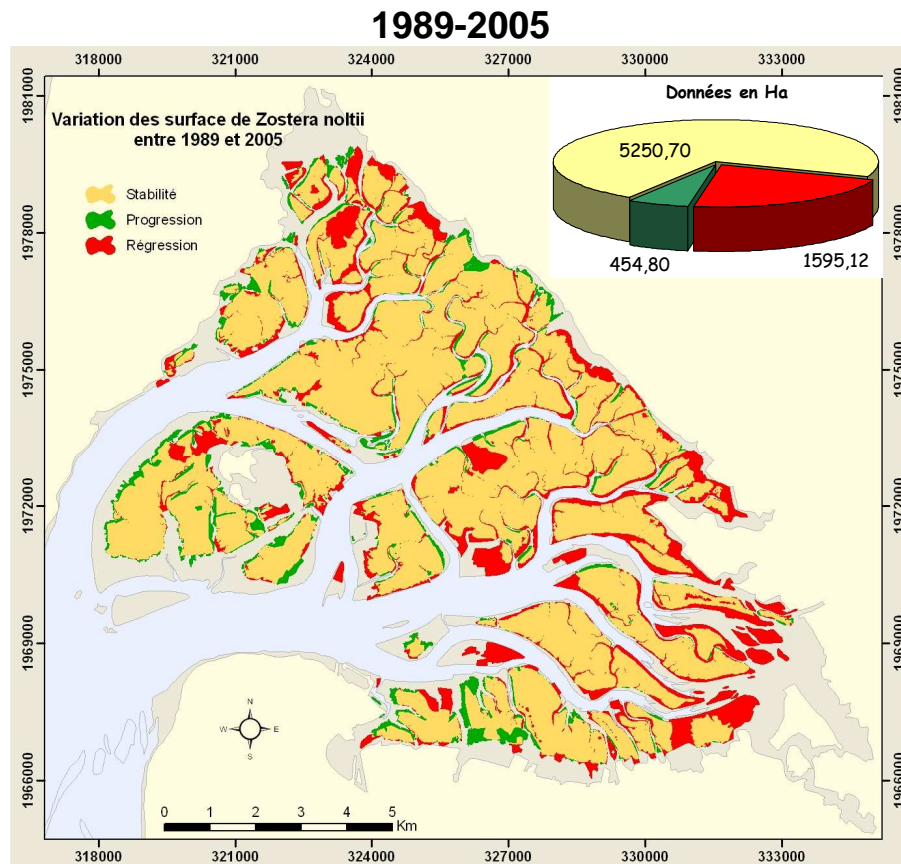


Figure 23 : Variations de l'extension des herbiers de zostères naines (taux de recouvrement > 25 %) entre 1989 et 2005

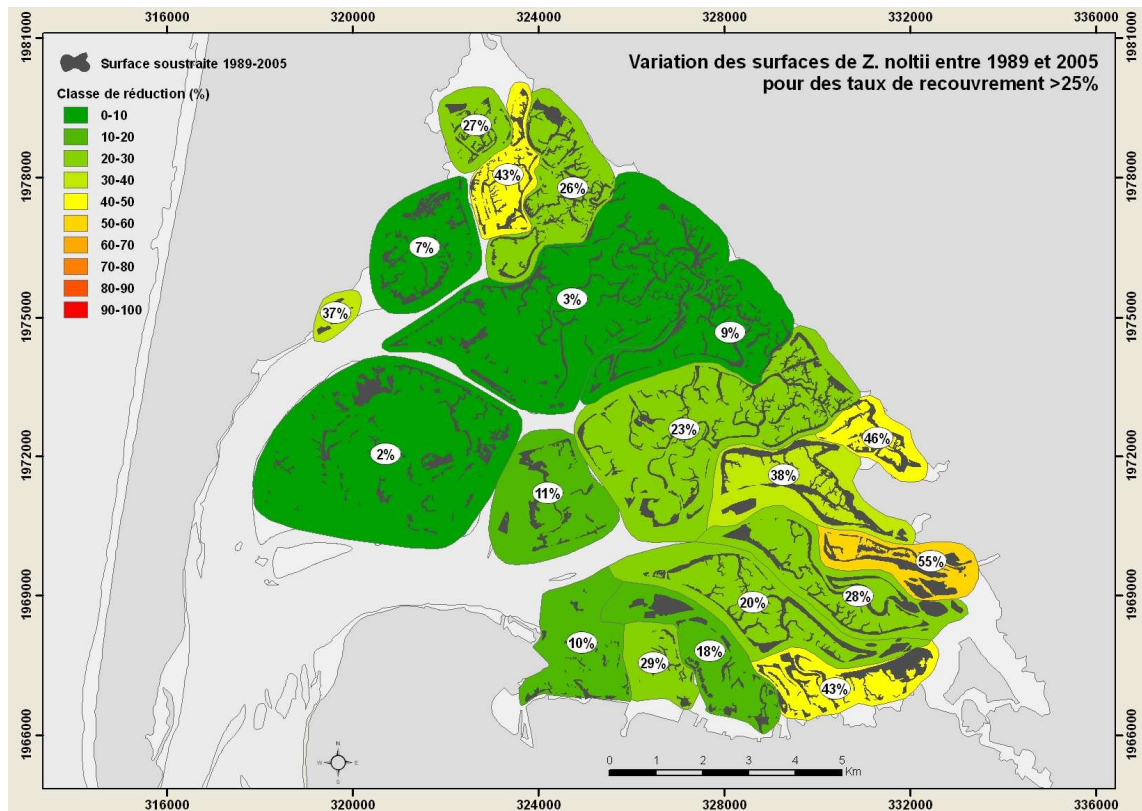


Figure 24 : Régression des surfaces d'herbiers de zostères naines (taux de recouvrement > 25 %) par secteur entre 1989 et 2005.

Entre 1989 et 2005, la régression des herbiers intertidaux est globalement modérée. Elle a affectée principalement la partie basse de l'estran, situées en bordure des chenaux, surtout dans la zone orientale du Bassin. Certains herbiers plus étendus ont également disparu. Pour certains d'entre eux, on dispose d'une explication à ce phénomène :

- Banc de la Matelle : Destruction physique dû au réaménagement de la zone à des fins ostréicoles (nord ouest du secteur n°16).
- Zone de la "Dispute" : Destruction physique dû à des travaux d'enfouissement des déchets ostréicoles provenant du réaménagement du banc de la Matelle et du nettoyage de parcelles ostréicoles (nord du secteur n°9).

Les zones où les herbiers progressent apparaissent largement minoritaires et traduisent peut-être simplement un effet de la précision du géotraitement.

1989-2007

Les résultats acquis pour la période 1989-2007 sont représentés sur les figures 25 et 26.

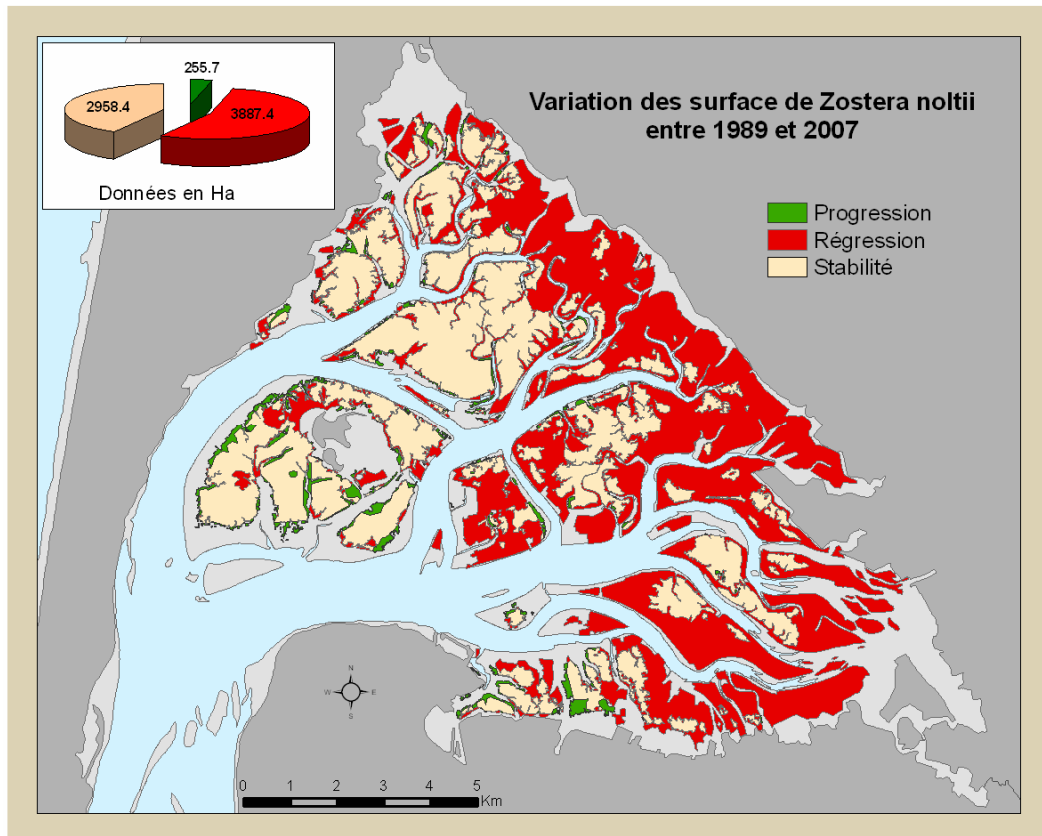


Figure 25 : Variations de l'extension des herbiers (taux de recouvrement > 25 %) entre 1989 et 2007

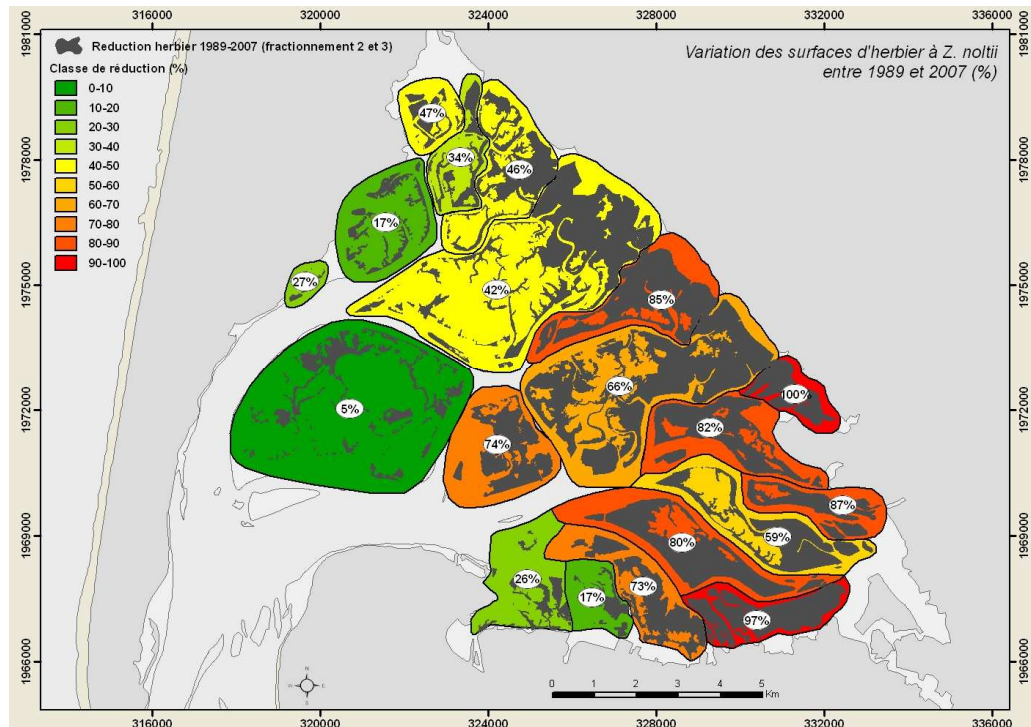


Figure 26 : Régression des surfaces d'herbier (taux de recouvrement > 25 %) par secteur entre 1989 et 2007.

La comparaison spatiale réalisée à partir des cartes de 1989 et de 2007 pour les herbiers très denses à moyennement dense montre une évolution beaucoup plus importante que celle constatée entre 1989 et 2005.

Au cours de cette période, seul le secteur 1 (Ile aux oiseaux) est resté stable. L'herbier très dense y est toujours présent et l'emprise maximale 2007 est identique à celle de 1989.

Au niveau des secteurs 2, 3 (Piquey, Jacquets) et 17, 18 (La Teste, La Hume), on note une régression modérée de l'herbier, comprise entre 15% et 25%.

Le secteur 7, très étendu, présente une régression hétérogène. La zone située à l'ouest du chenal de Platissey présente une assez bonne stabilité temporelle, comparable à celle observée sur les secteurs 2, 3, 17 et 18. Par opposition, la partie "est" de ce secteur est comparable aux secteurs voisins (6 et 4) en régression importante (- 50 %) avec une disparition quasi complète des herbiers moyennement denses, aujourd'hui remplacés par une alternance de vases nues et d'herbiers très peu denses.

Tous les secteurs situés dans la partie sud-est de la lagune présentent une forte régression. Cinquante à soixante dix pour cent de la surface occupée en 1989 par de l'herbier à petite zostère dense à moyennement dense a disparu ou a été remplacé par de l'herbier très peu dense mélangé à des zones de vases nues.

Le phénomène de régression observé affecte surtout les estrans côtiers (Gujan, Mestras, Le Teich, Audenge, Lanton, Andernos) limités, dans leur partie basse, par les chenaux et dans leur partie haute par le schorre.

L'herbier a disparu (remplacé par des vases nues) surtout dans ses parties basses, en bordure des chenaux. Sur la plupart de ces secteurs, la limite supérieure de l'herbier est restée stable et très proche de la côte mais son taux de recouvrement a diminué.

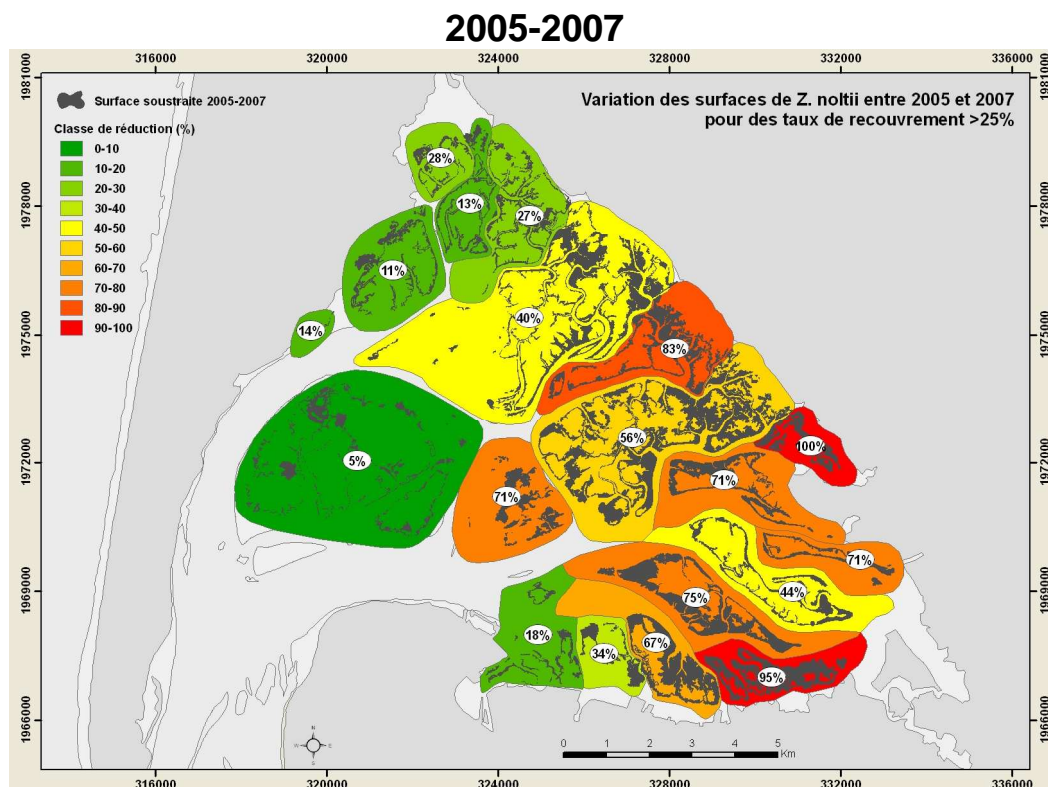


Figure 27 : Régression des surfaces d'herbier (taux de recouvrement > 25 %) par secteur entre 2005 et 2007.

La comparaison spatiale réalisée entre les cartes 2005 et 2007 montre sensiblement les mêmes régressions que celles décrites pour l'ensemble de la période (1989 – 2007).

Les évolutions spatiales décrites dans le paragraphe précédent peuvent donc être reprises.

Il est cependant important de noter que cette évolution (régression, voire disparition dans certains secteurs) s'est produite pour l'essentiel assez brutalement dans les dernières années.

4. *Zostera marina*

4.1. Matériel et méthodes

Deux cartographies complètes des herbiers de *Zostera marina* du Bassin d'Arcachon (Masses d'eau "Arcachon amont" et "Arcachon aval") ont été réalisées en 1989 et 2008.

Entre ces deux dates, 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© 9.2. 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 Datum NTF en Lambert II étendu. Le cas échéant certaines données ont été exploitées dans le système Datum GCS WGS84 (méridien d'origine : Greenwich) en degrés minutes décimales, mais transformées par la suite en Lambert II étendu.

4.1.1. Carte de 1989

La carte des herbiers de *Zostera marina* en 1989 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 90 sous ArcView© 3.2, puis transformées pour les besoins de la présente étude sous ArcGis© 9.2.

4.1.2. Observations de 2001

En 2001, une équipe de la Station Marine d'Arcachon, dirigée par Xavier de Montaudouin (Université Bordeaux I) a exploré en plongée les bordures de certains chenaux du Bassin (Figure 28) afin d'y repérer les zostères marines. Les observateurs en plongée 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 Montaudouin et Lebleu, 2002).

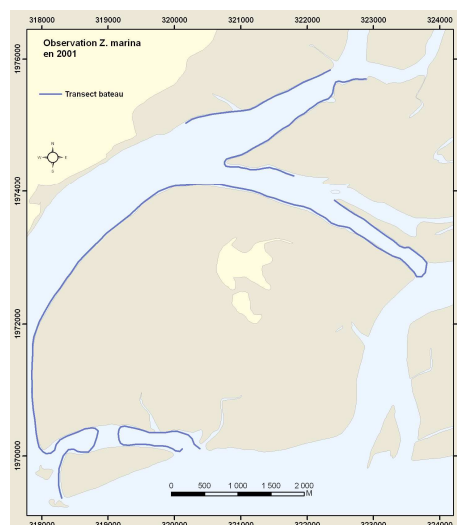


Figure 28 : Localisation des observations réalisées en 2001.

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.

4.1.3. Carte de 2008

En 2008, plusieurs types de méthodes ont été associées pour cartographier les herbiers de *Zostera marina* du Bassin.

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 bathymétrique multi-faisceaux, et échosondeur.

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 le système vidéo remorqué MOOGLI de l'Ifremer 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.

Les méthodes utilisées sont détaillées dans les paragraphes suivants.

L'herbier de zostères marines de la masse d'eau "Arcachon aval", sur le banc d'Arguin, a été cartographié manuellement, à l'instar des herbiers de zostères naines dans cette zone.

Acquisition et traitement des données acoustiques

Cartographie acoustique par sonar latéral

Principe du sonar latéral

Le sonar latéral 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.

Utilisation du sonar latéral : poisson remorqué ou fixé sous la coque

Pour que les images soient de bonne qualité, l'incidence doit être très rasante, et donc le poisson doit être à une altitude proche du fond, typiquement 10 m, au maximum 15 m (Figure 29).

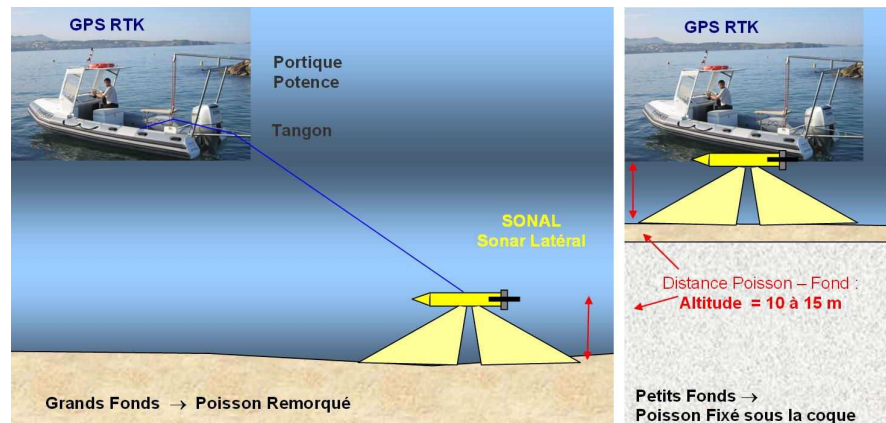


Figure 29 : Schéma de principe simplifié de l'acquisition sonar latéral

Sonar latéral utilisé pour ce projet

Compte tenu de la profondeur maximale de la zone (15 m), la société SEMANTIC a utilisé le sonar latéral GEOSWATH (Fréquence de 250 kHz). Dans ce cas, le sondeur est un système de bathymétrie multifaisceaux interférométrique fixé sous la coque du bateau. Il 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.

En outre, ce système permet l'acquisition simultanée de la bathymétrie et de l'imagerie de sonar latéral.

Afin de bien détecter la végétation, le sonar latéral doit fonctionner à une fréquence au moins supérieure à 200 kHz. Le matériel utilisé travaille à une fréquence de 250 kHz et permet la réalisation de vraies images de réflectivité avec une bonne identification des contours de végétation sous-marines.

Traitement des données : Réalisation de la mosaïque sonale

Les données acoustiques mesurées latéralement sont géo-référencées au moment de l'acquisition. Les profils acquis peuvent être ajoutés les uns aux autres, par superposition ou par fusion, afin de constituer l'image acoustique appelée "mosaïque sonale".

Exploitation des données : Interprétation de la mosaïque sonale

La mosaïque sonale permet de caractériser et de délimiter les zones homogènes de réflectivité du fond, comme présenté ci-dessous.

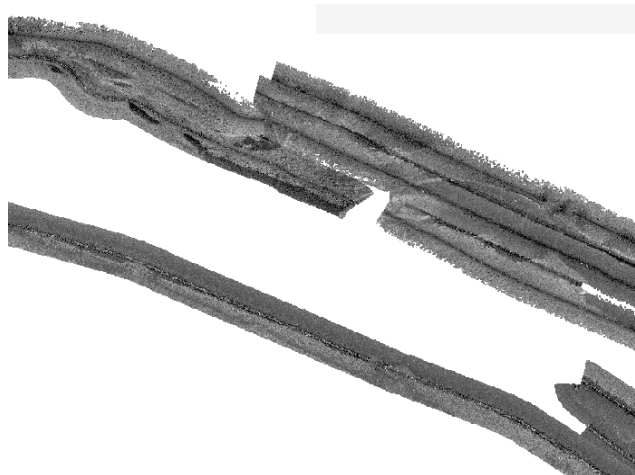


Figure 30 : Exemple de bandes sonales mosaïquées

Cette mosaïque doit ensuite être interprétée afin d'associer une nature du fond à un niveau de gris. La méthode DIVA et l'interprétation des films réalisés par la caméra de l'Ifremer permettent l'aide à l'interprétation de cette mosaïque.

Méthode de reconnaissance acoustique : Détection & Inspection Verticale Acoustique (DIVA)

Le navire instrumenté se déplace sur la zone à lever. Un PC installé à bord, récupère les informations en provenance des divers instruments de mesure, c'est-à-dire :

- la position (latitude, longitude et élévation de la mer) indiquée par un GPS différentiel,
- la réponse impulsionnelle du signal sonore réverbéré par le fond fournie par le sondeur.

Le système analyse et traite la réponse impulsionnelle et en déduit les caractéristiques de la végétation fixée sur le fond sous-marin

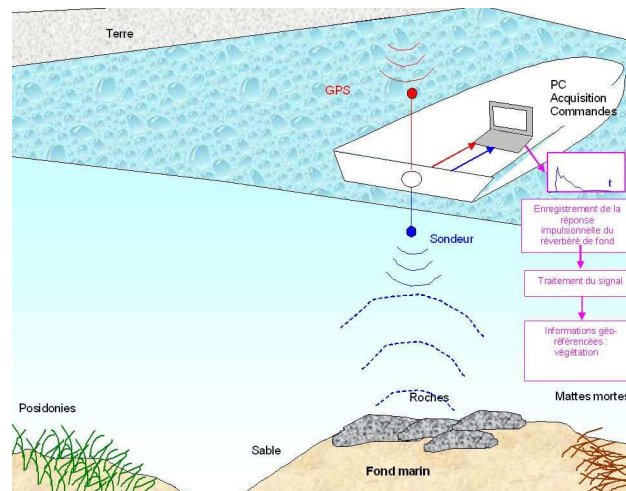


Figure 31 : Schématisation du procédé DIVA

Le PC traite les informations et, à une latitude et une longitude, il associe les informations caractéristiques de la végétation.

La première étape consiste à extraire du signal reçu par le sondeur le premier écho du fond. Une méthode d'analyse discriminante permet ensuite d'affecter à cet écho une classe de biocénose préexistante (par exemple : roche, sable, posidonie, ...). Cette affectation se fait par l'intermédiaire de fonctions discriminantes calculées à partir de fichiers d'apprentissage pour chacune des classes définies (phase d'apprentissage). 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 géo-référencement.

La société Semantic TS dispose sur son navire instrumenté d'un sondeur acoustique monofaisceau qui permet ce type de fonctionnement. Ce sondeur est un sondeur scientifique haut de gamme qui a déjà été utilisé par des équipes de l'INRA pour la caractérisation d'espèces de poissons à partir du signal acoustique réverbéré par les bancs de poissons. 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 caractérisations (les différentes fréquences signant les phénomènes environnementaux en fonction de la taille de leur longueur d'onde).

Sur le sondeur utilisé, la réponse acoustique est différente selon que le son se réfléchit sur une zone couverte de végétation ou non.

Par exemple, sur la carte ci-dessous, les réponses acoustiques du sondeur (points jaunes indiquant l'absence de végétation ; points verts indiquant sa présence) sont reportées sur la mosaïque sonale. Le croisement de ces deux informations permet de dessiner les polygones figurant les contours d'herbiers.

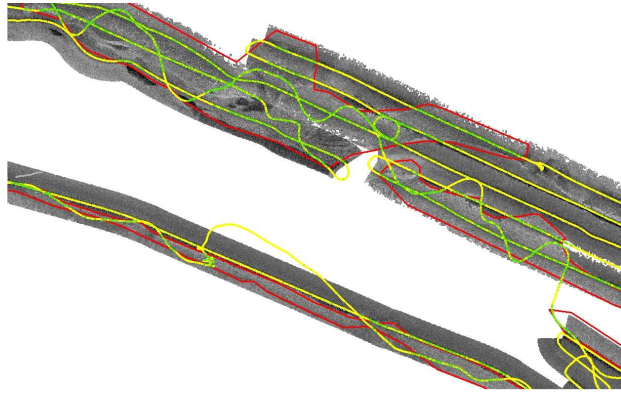


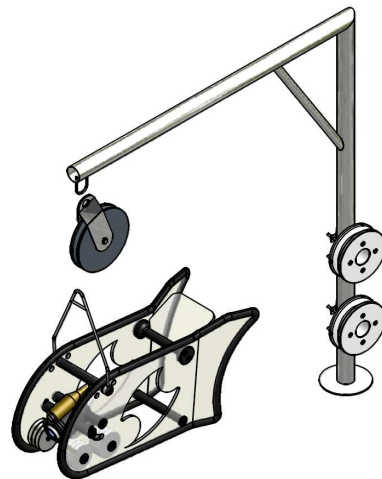
Figure 32 : Illustration de l'information DIVA (points jaune et vert) sur la mosaïque sonale permettant la délimitation d'un polygone d'"herbier" (rouge)

Acquisition et traitement des données vidéo Système MOOGLI - (Ifremer Toulon)

Le système MOOGLI est constitué d'un châssis support de la caméra et de la sonde (Figures 33 a-b), équipé de lests amovibles, remorqué via un câble électroporteur (Figure 33 c). Une régie surface intègre un mini ordinateur relié via RS 232 à l'ensemble des capteurs utilisés lors des acquisitions de données (Figure 34).



a



b



c

Figure33 : a) Partie immergée de MOGLI (chassis, caméra et sonde), b) Schéma de l'appareillage complet, (c) mise en oeuvre sur le bateau (notez sur la photo le câble électroporteur vert)

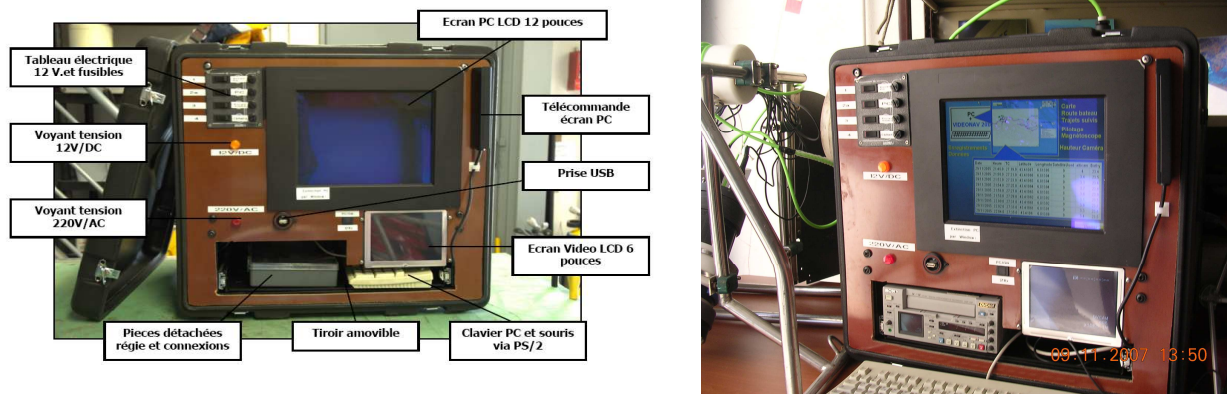


Figure 34 : Détail de la régie d'enregistrement du système MOOGLI

En cours d'acquisition, l'observation des fonds se fait sur un écran LCD, et les images sont enregistrées directement sur bande numérique haute résolution via un magnétoscope. La face avant de la régie (Figure 34) permet le démarrage complet du système et un pilotage à distance de la caméra. Un écran LCD supplémentaire affiche les données numériques sous environnement Windows.

Une interface logiciel "Videonav" enregistre automatiquement les données transmises par les capteurs en correspondance avec le time code video. Chaque ligne de données est classée sous forme de tableaux compatibles Excel.

Les capteurs utilisés par défaut sont : un GPS pour la position X,Y (enregistrement toutes les 2 secondes), un sondeur de bord pour la profondeur sous le navire. Le sondeur immergé et fixé sur le châssis renseigne sur la hauteur (Z) de la caméra.

Videonav est configurable en fonction des thèmes de l'étude et permet la saisie de commentaires in situ et/ou de champs de données de type "recouvrement" ou autres.

En fonction du protocole opératoire de l'étude, le système MOOGLI permet de réaliser des travaux de cartographie sur trajet linéaire et des "vérités terrain" en relation avec les techniques acoustiques précédemment citées (Semantic).

Dans le cadre de cette étude sur le bassin d'Arcachon, MOOGLI a été utilisé en de multiples points fixes, fournis par Semantic, pour valider les traitements et résultats obtenus par la méthode DIVA.

Méthodologie adoptée pour construire les cartes des herbiers en 2008

La campagne de terrain destinée à acquérir les cartographies sonales et les données écho acoustiques (Action SEMANTIC) a eu lieu au mois de juillet 2008. Un certain nombre de surfaces ont été identifiées comme herbiers probables.

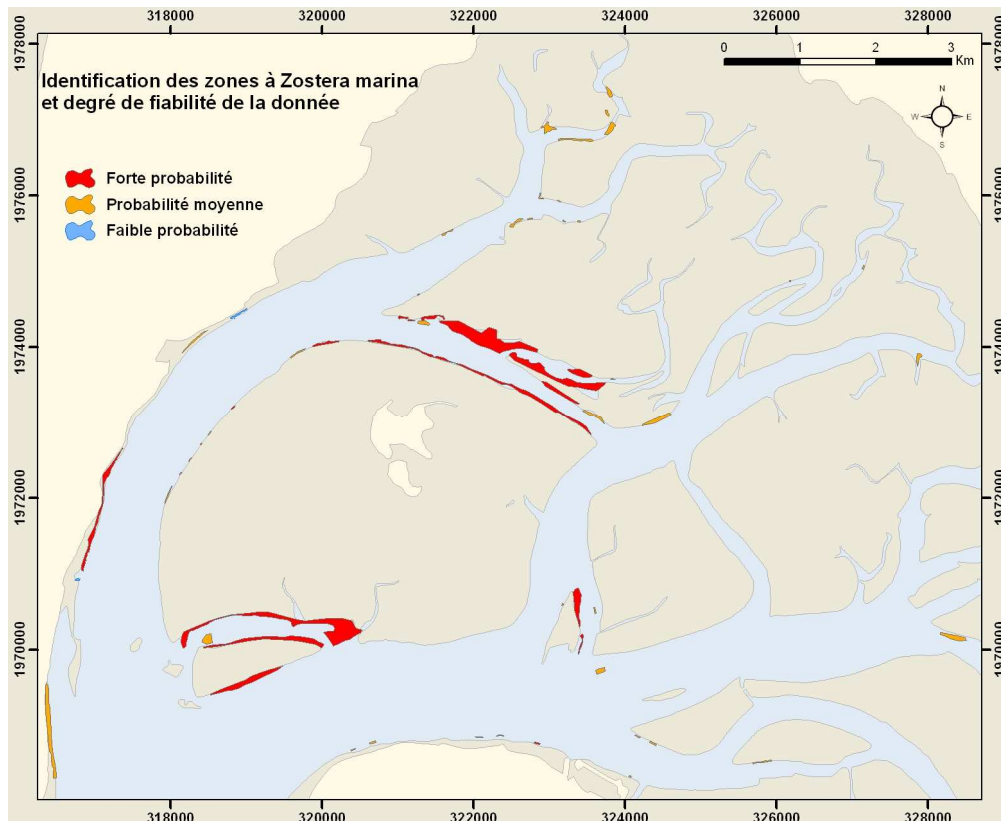
Dans le même temps, des données vidéo ont été collectées sur un certain nombre de zones (environ 2000 points).

Ces trois types de données (niveau de gris sonar, méthode DIVA, caméra tractée) ont été croisés. Ce traitement a permis de classer les zones cartographiées selon un degré de confiance défini comme présenté dans le tableau 8.

Tableau 8 : Critères de décision déterminant l'échelle de confiance attribuée aux données

Degré de confiance dans la détection de la présence	Commentaires
Forte probabilité	Soit les 3 méthodes détectent les herbiers, soit l'herbier est détecté par les deux méthodes acoustiques, soit il est détecté par DIVA et confirmé par la caméra
Probabilité moyenne	Ponctuellement, les zostères sont détectées, mais les limites d'herbier sont peu visibles, ou la faible densité crée un doute. De plus, certains substrats peuvent avoir la même réponse acoustique que des herbiers peu denses.
Probabilité faible	Détection par une seule méthode mais non confirmée par les autres.

La représentation spatiale des zones d'herbier "potentiel" affectées de leur degré de confiance est présentée figure 35.

**Figure 35** : Schématisation des surfaces d'herbier en fonction de degré de confiance des données

Afin de lever certains doutes, une seconde campagne de validation terrain (dispositif MOOGLI) a été réalisée en septembre 2008, sur les secteurs les plus litigieux, c'est-à-dire ceux affectés des degrés de confiance moyen et faible (Figure 35).

Cette validation à l'aide de la caméra vidéo-tractée, a permis d'obtenir 8089 points géo-référencés (Figure 36), confirmant, dans la plupart des cas, la présence d'herbiers et l'infirmité dans d'autres cas. Il est notamment apparu que les méthodes acoustiques ne permettent pas toujours de différencier les herbiers des bancs d'huîtres sauvages ou de crépidules.

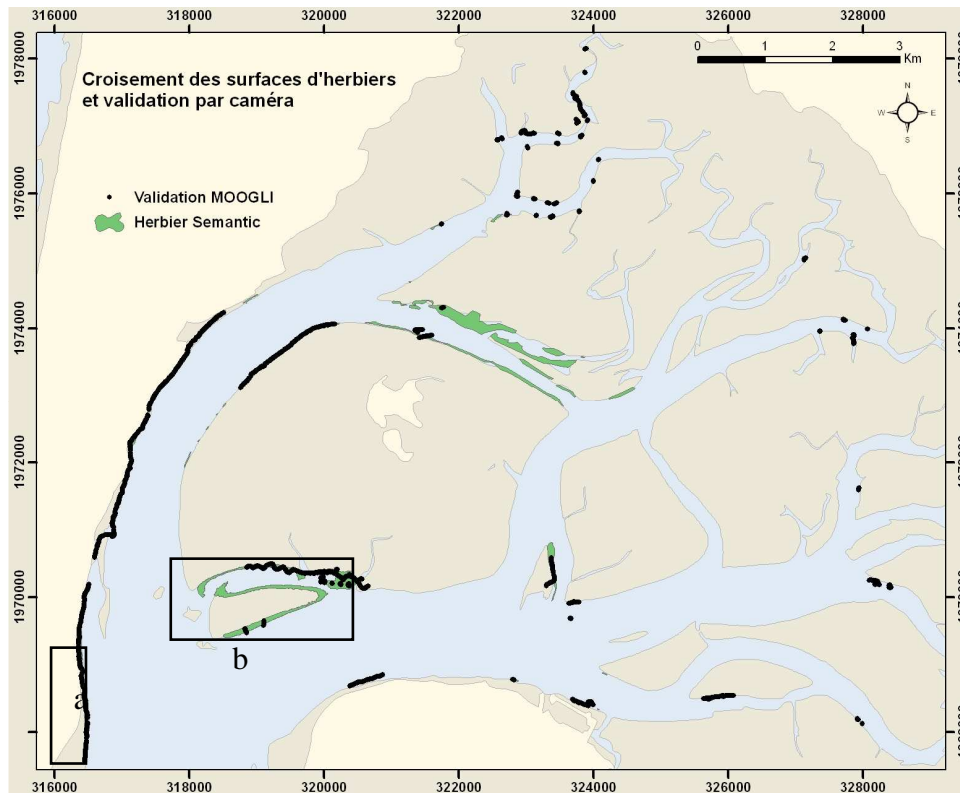


Figure 36 : Validation des secteurs d'herbiers (Semantic) par caméra embarquée (MOOGLI)

Outre des éclaircissements sur la nature des surfaces déterminées, cette validation a également permis de préciser certaines limites d'extension des herbiers de *Zostera marina*. (Figure 37).

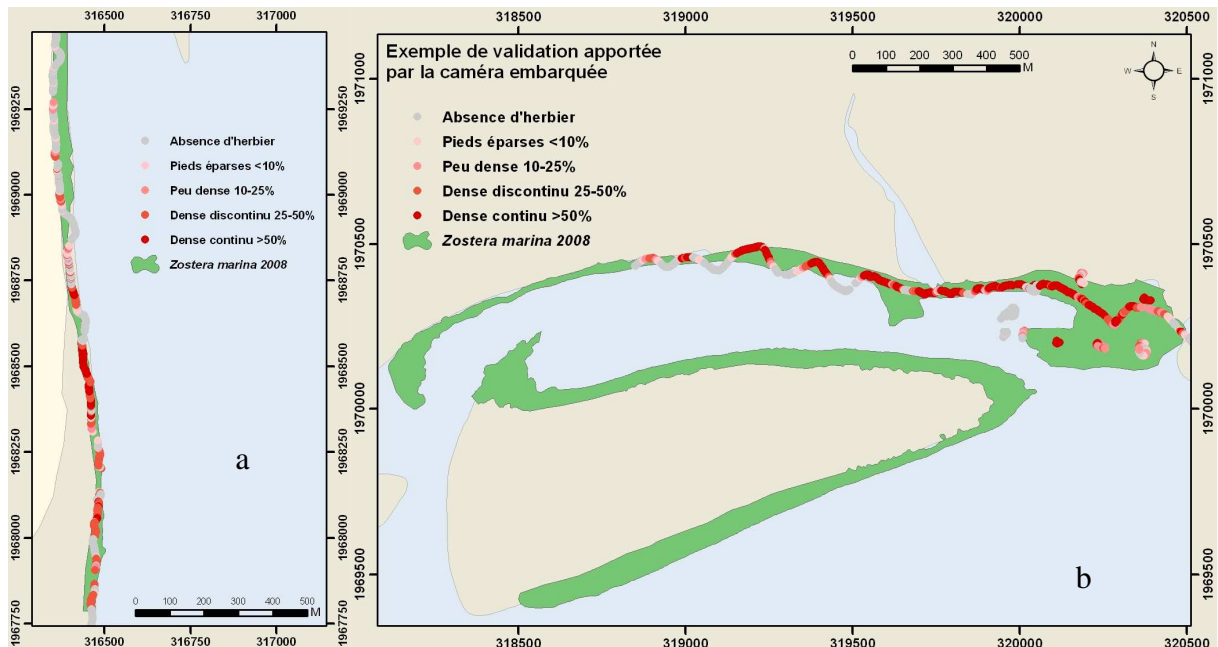


Figure 37 : Deux exemples de validation et de précision apportées par l'utilisation de la caméra embarquée

Comme pour *Zostera noltii*, des informations relatives à la densité des herbiers à *Zostera marina* sont venues compléter les tables attributaires dédiées au géo-référencement des surfaces. Cependant, cette information, issue des données provenant de la caméra du système MOOGLI ne couvre pas la totalité des surfaces issue de la détection acoustique (Semantic), elle ne figure donc pas dans la table attributaire de la cartographie 2008.

4.2. Résultats concernant *Zostera marina*

4.2.1. Cartes de 1988

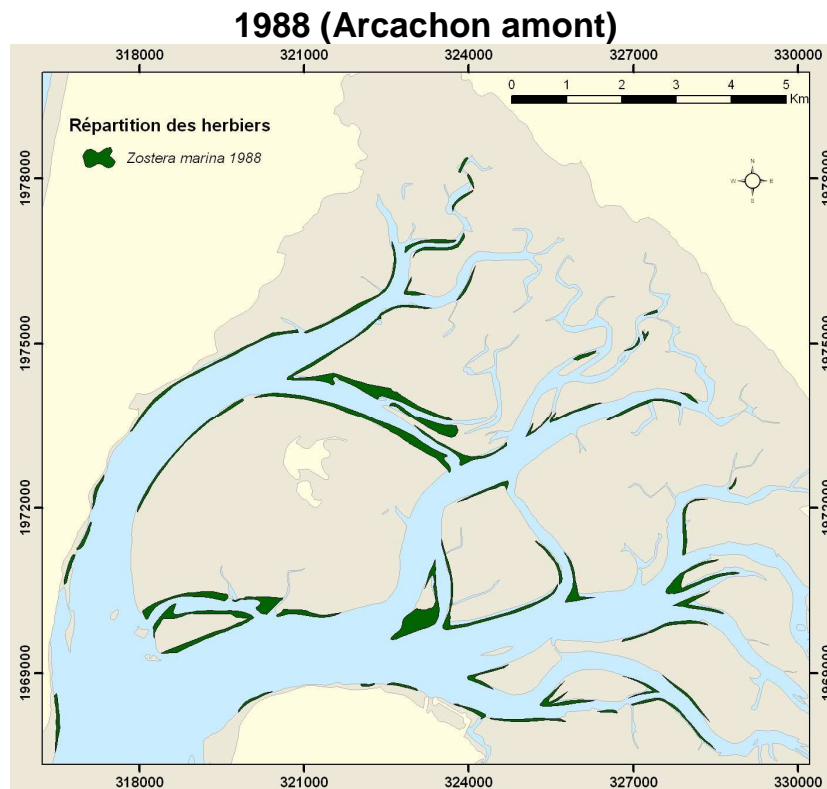


Figure 38 : Extension des herbiers de *Zostera marina* dans la masse d'eau "Arcachon amont" en 1988

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.

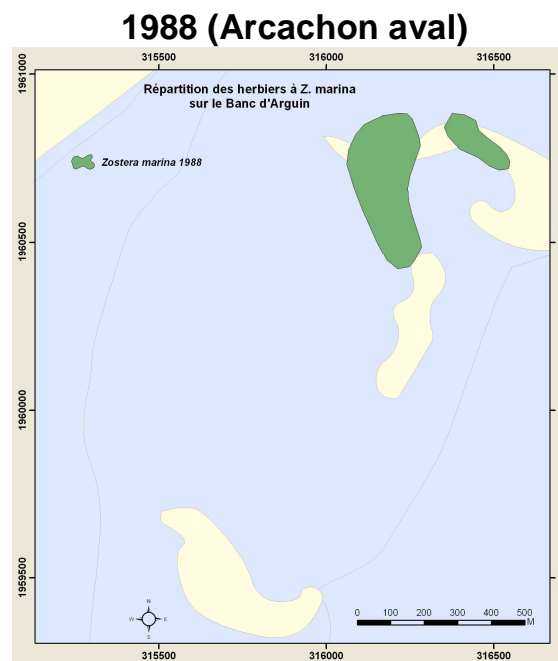


Figure 39 : Extension des herbiers de *Zostera marina* dans la masse d'eau "Arcachon aval" en 1988.

En 1988, les deux herbiers de *Zostera marina* du Banc d'Arguin recouvraient 8.50 Ha.

4.2.2.Observations de 2001

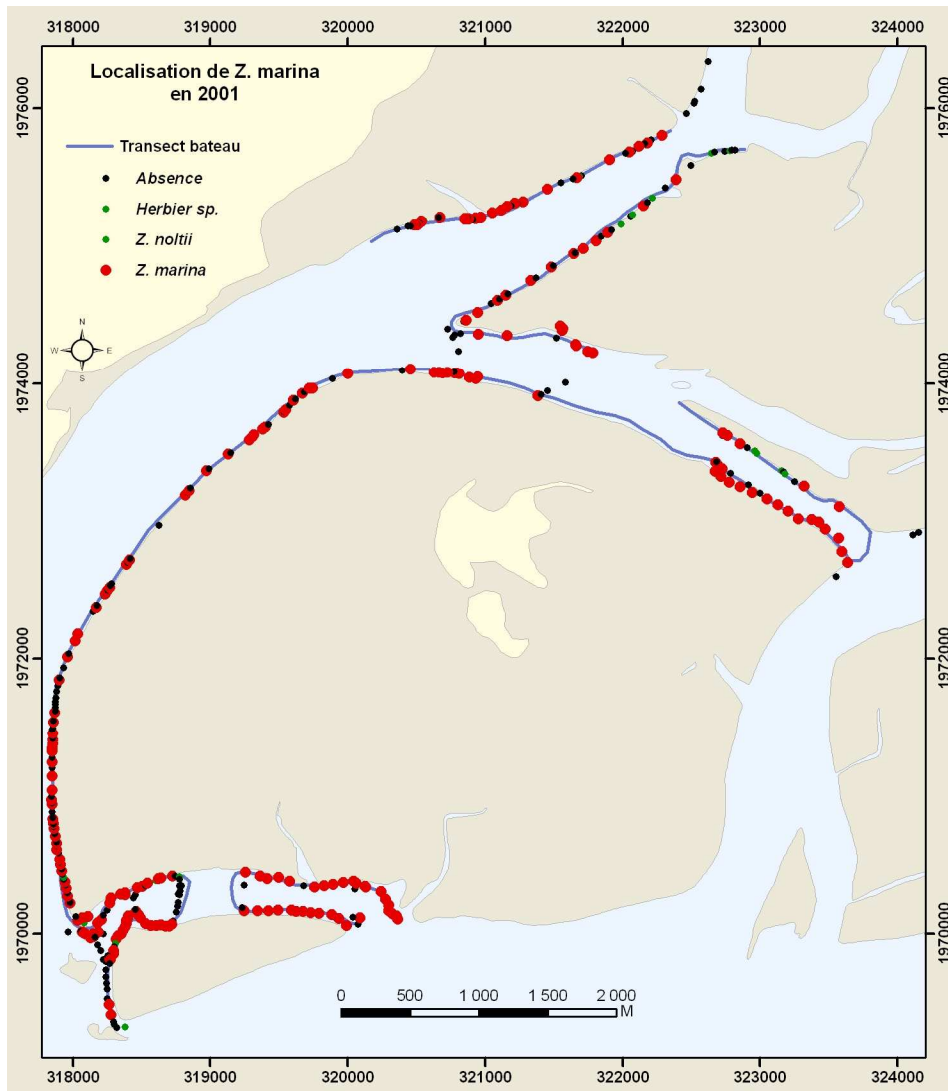


Figure 40 : Présence-absence de *Zostera marina* sur une portion de la ME "Arcachon amont" en 2001

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 dans la majorité des zones explorées, à l'exception des herbiers situés les plus au nord (extrémité nord du chenal d'Arès).

4.2.3. Carte de 2008

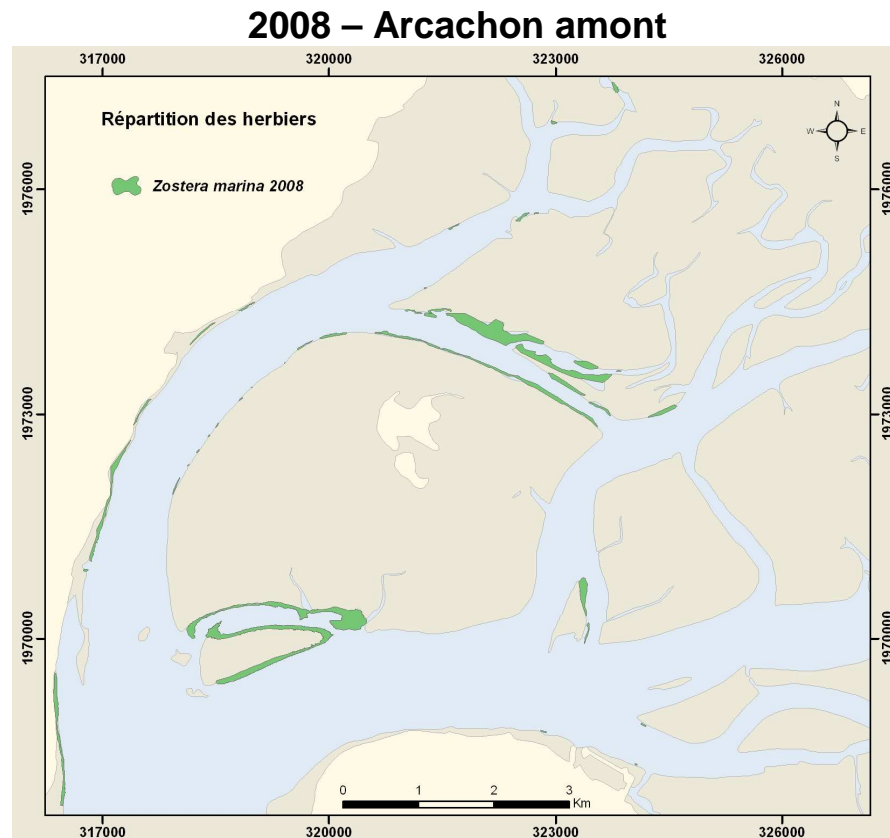


Figure 41 : Extension des herbiers de *Zostera marina* dans la masse d'eau "Arcachon amont" en 2008

En 2008 dans la masse d'eau "Arcachon amont", les herbiers de *Zostera marina* recouvraient une surface de 103.62 Ha (Figure 41).

Hormis quelques zones localisées au nord et au sud de l'île aux Oiseaux, la quasi totalité des secteurs affiche un fractionnement notable de l'habitat. La plus grande surface d'herbier n'est désormais plus que de 19.00 Ha.

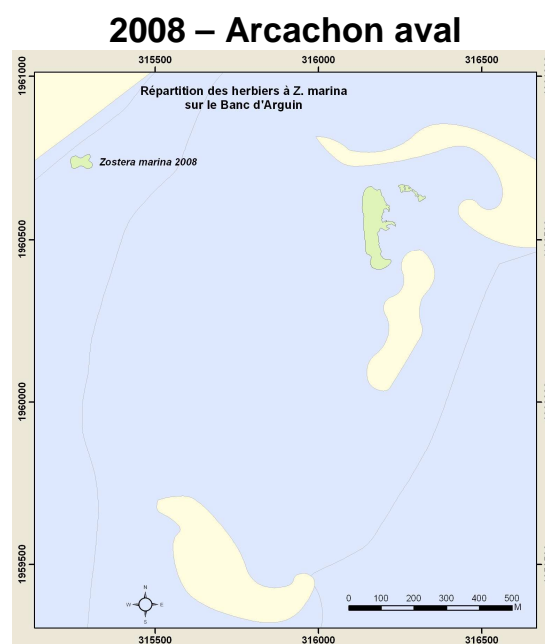


Figure 42 : Extension des herbiers de *Z. marina* dans la masse d'eau "Arcachon aval" en 2008

En 2008, sur le Banc d'Arguin, l'herbier de *Zostera marina* présente une superficie de 1.50 Ha (Figure 42). A priori, les 2 zones d'herbiers qui demeurent semblent être des secteurs résiduels issus de la zone la plus importante existant en 1988.

4.2.4. 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 2008 (Tableau 9):

Tableau 9 : Superficie des herbiers de *Zostera marina* dans les deux MEC du Bassin d'Arcachon

	1988	2008
<i>Arcachon amont</i>	373.50 Ha	103.62 Ha
<i>Arcachon aval</i>	8.50 Ha	1.50 Ha

Entre 1988 et 2008 (soit 20 ans), la superficie des herbiers à *Zostera marina* a régressé de 73 %. (Figure 43).

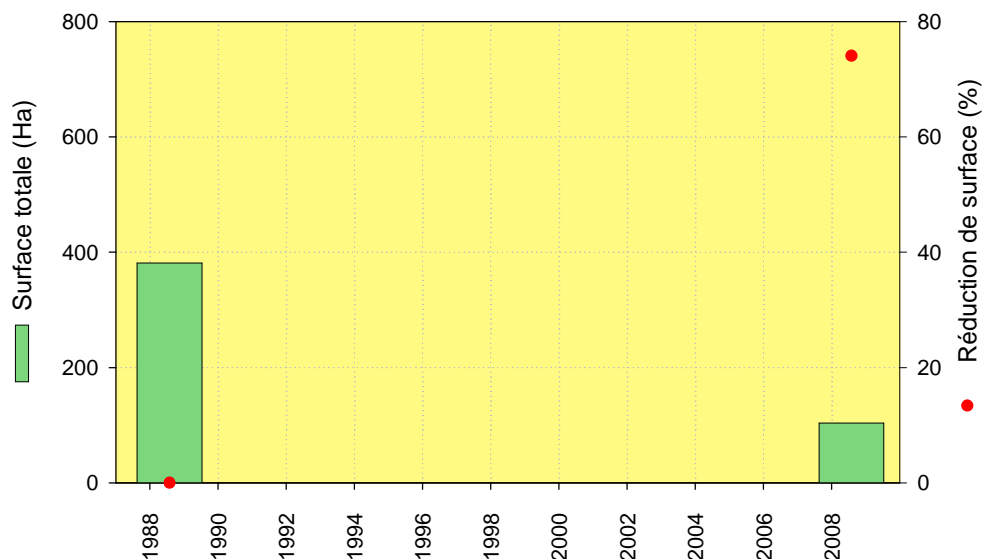


Figure 43 : Évolution temporelle des surfaces totales d'herbiers de *Zostera marina* entre 1988 et 2008 et réduction de la surface par rapport à l'état initial (1988)

Afin de déterminer les différences spatiales de cette évolution surfacique, les mêmes traitements de données que ceux utilisés pour *Zostera noltii* ont été réalisés :

- ✧ Croisement des couches SIG de l'extension des herbiers aux deux 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 ce second type d'analyses, les herbiers de *Zostera marina* de la masse d'eau "Arcachon amont" ont été découpés en 15 secteurs représentés sur la figure 44.

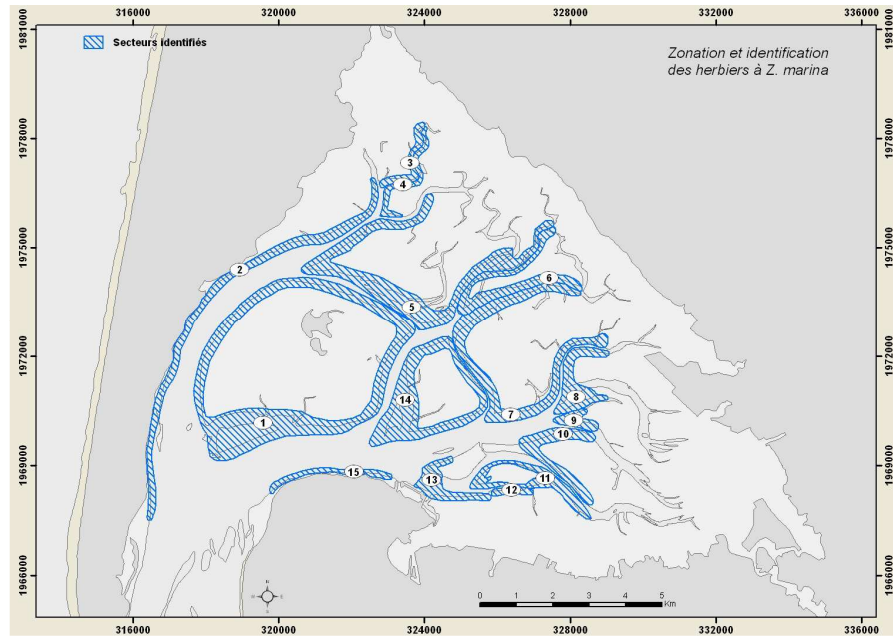


Figure 44 : Figure 23 : Délimitation des 15 secteurs d'herbiers de *Z. marina*

Les résultats de ces deux traitements sur l'extension des herbiers de *Zostera marina* pour les années 1988 et 2008 sont rapportés sur les figures 45 et 46.

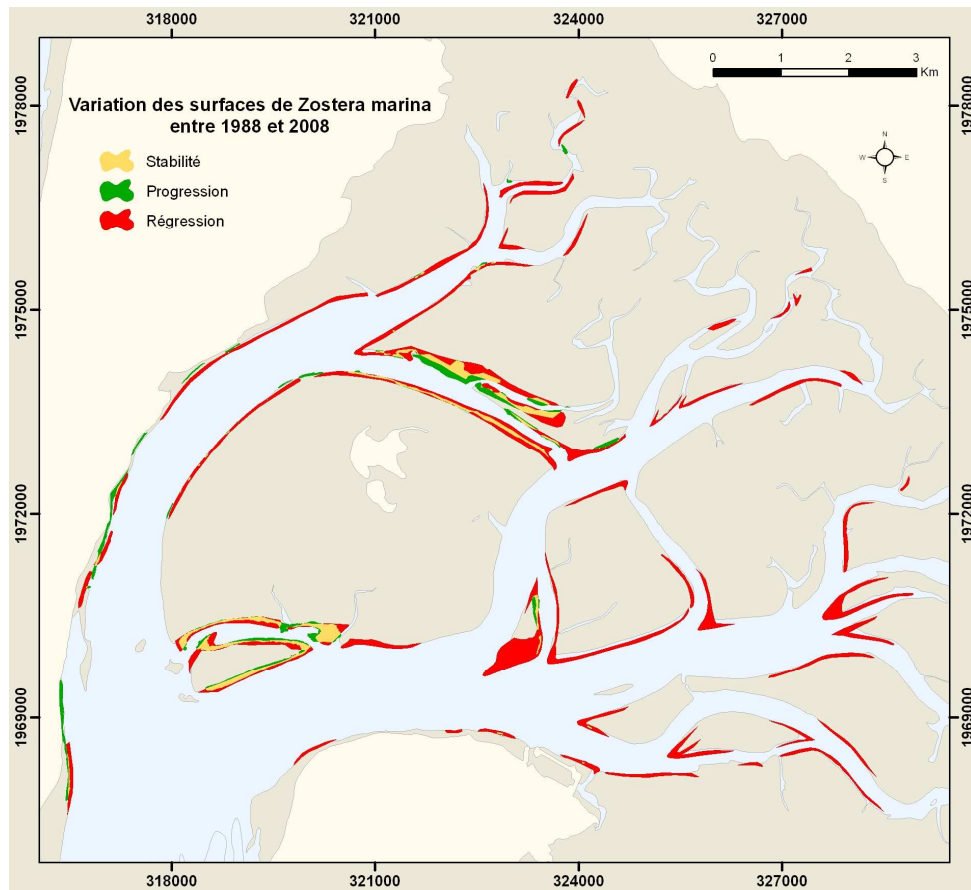


Figure 45 : Variations de l'extension des herbiers entre 1988 et 2008

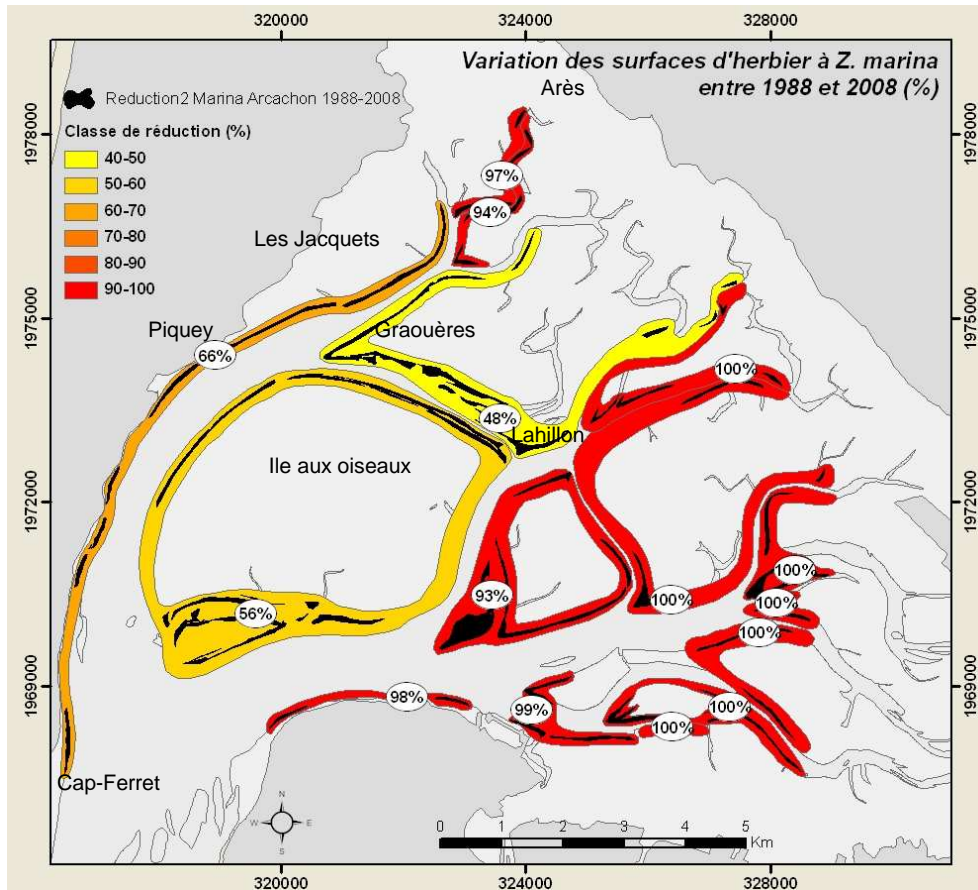


Figure 46 : Régression des surfaces d'herbier par secteur entre 1988 et 2008.

Comme dans le cas de *Zostera noltii*, la régression des herbiers de *Zostera marina* présente une forte hétérogénéité spatiale.

Deux zones principales présentent un **taux de régression très élevé**.

La première, très étendue, concerne la zone orientale au sud est du Bassin d'Arcachon. Les taux de réduction de la surface en herbier oscillent entre 93% et 100%.

La seconde zone se situe à l'extrémité nord de la lagune, au débouché du "canal des Etangs". On peut dire qu'aujourd'hui les herbiers de *Zostera marina* ont totalement disparus de ces deux secteurs.

Tout le linéaire 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 grandes zostères. 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 bas estrans du pourtour de l'île aux oiseaux et d'autre part, sur la zone Lahillon-chenal de Carret-Grauères située directement au nord de l'île aux oiseaux.

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 pour *Zostera noltii*, il est possible que la réduction de l'herbier à zostères marines se soit accélérée au cours des dernières années, affectant principalement la partie sud-est de la lagune et les chenaux proches des estrans côtiers.

5. Conclusion et perspectives

La cartographie des herbiers du Bassin d'Arcachon répond aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau se rapportant au volet "Evaluation de la qualité biologique des Masses d'Eau".

Le but de ce travail était d'établir un état des lieux relatif à la situation physique des herbiers de zostères (*Zostera noltii* et *Zostera marina*) du Bassin au travers de leur extension maximale de surface et de définir une année « de référence » (2007) pour ce paramètre.

Pour cela, diverses techniques ont été mises en œuvre, en relation avec les caractéristiques écologiques de chacune des espèces. Ainsi, les zones intertidales (découvrant à basse mer) colonisées par *Zostera noltii* ont fait l'objet d'un travail à partir d'orthophotoplans, complété en 2007 et 2008 par une importante étape de validation terrain à l'aide d'un GPS de précision submétrique.

En complément, ce travail a bénéficié d'orthophotographies (SIBA) acquises en 2005 à partir desquelles une carte (sans validation terrain) a pu être réalisée.

Compte tenu de l'existence d'une carte élaborée par interprétation stéréo-photographique de clichés de 1989, nous avons pu établir une évolution des surfaces recouvertes par *Zostera noltii* au cours de la période de 1989-2007.

En ce qui concerne l'espèce *Zostera marina*, présente sur les parties hautes des chenaux (en zone subtidale ne découvrant pas lors de la basse mer), une méthode innovante a été utilisée par le biais d'inventaires surfaciques s'appuyant sur le sonar déporté et la détection acoustique, complétée 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 1989 établie par Jean Marie Bouchet.

Pour les deux espèces, des analyses réalisées à l'aide d'un système d'informations géographiques ont montré une importante régression au cours des 20 dernières années.

Dans le cas de *Zostera noltii*, les données intermédiaires (2005) permettent d'affirmer que la diminution de l'emprise maximale de l'herbier s'est vivement accélérée entre 2005 et 2007. En outre, cette régression de l'habitat ne s'est pas opérée de façon homogène, puisque certaines zones comme les estrans de l'île aux Oiseaux n'ont subi aucune altération de surface tandis que sur d'autres secteurs (zone sud-est) on observe une disparition quasi complète des petites zostères.

Ainsi, en 20 ans, l'emprise surfacique des herbiers de *Zostera noltii* a diminué en moyenne de 34% (3%-82%), et cette régression a eu lieu presque en totalité entre 2005 et 2007.

Pour *Zostera marina*, la diminution de l'emprise maximale est encore plus importante puisqu'elle s'élève en moyenne à 74% (48%-100%). Pour cette espèce, l'absence de données intermédiaires ne permet pas de définir une date à partir de laquelle cette régression aurait débutée. Néanmoins, les données parcellaires acquises en 2001 témoignent d'un début de disparition dans la partie nord du bassin (Arès) à cette époque.

Les herbiers de zostères représentent un compartiment écologique fondamental au sein de l'écosystème lagunaire du Bassin d'Arcachon.

La réduction de l'emprise surfacique de ce biotope a potentiellement des répercussions 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).

Par ailleurs, en raison du rôle des zostères dans la fixation des sédiments fins, la raréfaction des herbiers est probablement un facteur d'accroissement de la turbidité des eaux dans la Baie (Sujet de thèse de Florian Ganthy, EPOC, Université Bordeaux 1, initiée en septembre 2009).

Pour ces raisons, il apparaît aujourd'hui essentiel de réaliser régulièrement un état des lieux de l'évolution surfacique de ces milieux et de mettre en oeuvre des recherches destinées à éclaircir les causes de la régression des herbiers dans la Baie.

Il faut toutefois souligner que, si les causes de cette régression sont identifiées et peuvent être contrées, les herbiers de zostères du Bassin pourraient recouvrir leur superficie « optimale » observée par le passé.

Les zostères sont en effet douées de fortes capacités de recolonisation dès que les conditions leur redeviennent favorables, notamment grâce aux stocks de graines contenus dans les sédiments. La réversibilité de leur régression a 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 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).

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

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

Blanchet, H., de Montaudouin, X., Lucas, A., Chardy, P., 2004. Heterogeneity of macrozoobenthic assemblages within a *Zostera noltii* seagrass bed: diversity, abundance, biomass and structuring factors. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 61, 111–123.

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.

Davison, D.M. & Hugues, D.J., 1998. *Zostera* Biotopes (Vol. I). An overview of dynamics and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs. Scottish Association for Marine Science (UK Marine SACs Project), 95 p.

De Jong, D.J., 2004. Water Framework Directive: determination of the Reference condition and Potential-REF/Potential-GES and formulation of indices for plants in the coastal waters CW-NEA3 (K1), CW-NEA4 (K2), CW-NEA1 (K3), transitional waters, TW-NEA11 (O2), and large saline lakes, NEA26 (M32), in The Netherlands. Working document RIKZ/OS/2004.832.x; final draft, 30 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. Hill y, Déc. 2004).
<http://www.ifremer.fr/rebent/>

Gerla, D., 2006. Inventaire des herbiers de zostères. Baies de Saint-Malo / Rance Haut estuaire du Trieux. In : Ifremer (Ed.). Ifremer, pp. 41.

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 menacés 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. lin. Bordeaux*, 96, 95-103

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

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.

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.

Annexes

Annexe 1 : Détail du personnel mobilisé pour la validation de terrain mise en œuvre lors de la cartographie de *Zostera noltii* réalisée en 2007

Date	lieu	Distance parcourue en Km	Nombre de personne et durée de la sortie
01/08/2007	Pointe de l'Aiguillon	1,1	2 pers pendant 3h
30/08/2007	Palourdey	7,6	2 pers pendant 4h
20/09/2007	La Teste-Rocher	4,1	2 pers pendant 4h
24/09/2007	Gahignon	10,5	2 pers pendant 5h
25/09/2007	Les Jalles	1,9	2 pers pendant 3h
26/09/2007	Le Congre + Mousette	3,3	3 pers pendant 4h
27/09/2007	Courbey	7,1	2 pers pendant 4h
28/09/2007	Le Bouc	6,2	2 pers pendant 4h
01/10/2007	La Hume	4,1	2 pers pendant 4h
02/10/2007	Madère	7,7	2 pers pendant 4h
03/10/2007	Madère	2,4	2 pers pendant 3h
08/10/2007	Arams	6,4	2 pers pendant 4h
09/10/2007	Hautebelle	6,1	2 pers pendant 4h
10/10/2007	Taussat	5,2	2 pers pendant 4h
11/10/2007	Garrèches	4,6	3 pers pendant 4h
12/10/2007	Comprian	4,1	2 pers pendant 4h
15/10/2007	Pireou	4,7	2 pers pendant 4h
16/10/2007	St Brice - Arès	5,9	2 pers pendant 5h
24/10/2007	Claouey	0,5	2 pers pendant 3h
25/10/2007	Arès	5,2	2 pers pendant 5h
26/10/2007	Les jacquets	4,2	2 pers pendant 5h
07/07/2008	Pointe du Tès	3,1	2 pers pendant 4h
24/07/2008	Arguin	3,6	2 pers pendant 4h
31/07/2008	Mapouchet	1,6	2 pers pendant 3h
Total :		111,2 km	