

VARIATIONS SAISONNIERE ET ANNUELLE DE L'INDICE NDVI EN RELATION AVEC LES HERBIERS DE ZOSTERES (ZOSTERA NOLTII) PAR IMAGES SATELLITES SPOT : EXEMPLE DU BASSIN D'ARCACHON (FRANCE)

Jean-Marie Froidefond¹, Virginie Lafon², Xavier de Montaudouin¹

1 : Université Bordeaux-1, Laboratoire EPOC
Avenue des Facultés 33405 Talence cedex
Tel : + 33 (0) 5 40 00 88 67 - Fax : + 33 (0) 5 56 84 08 48
jm.froidefond@epoc.u-bordeaux1.fr

2 : GEO-Transfert, Laboratoire EPOC
Avenue des Facultés 33405 Talence cedex
Tel : + 33 (0) 5 40 00 83 28 - Fax : +33 (0) 5 40 00 08 48
v.lafon@epoc.u-bordeaux1.fr

Résumé

Le Bassin d'Arcachon est caractérisé par des surfaces intertidales importantes (115 km² au total) qui sont colonisées en grande partie par des herbiers à zostères (*Zostera noltii*). L'enveloppe globale des herbiers constitue un indicateur de l'état écologique des eaux du bassin au sens de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Elle est donc régulièrement cartographiée. Les herbiers présentent des variations saisonnières (croissance printanière et estivale) et annuelles. Ces dernières années, on a pu observer une diminution de la surface totale occupée par les zostères. Dans le cadre du développement d'un outil de suivi opérationnel (programme LITEAU2 QuaLiF), plusieurs approches basées sur l'utilisation de données de télédétection spatiales ont été expérimentées.

Cette étude présente les résultats de l'application de l'indice de végétation normalisé (NDVI) à une série de scènes Spot acquises dans le cadre du programme Kalideos Littoral du Centre National d'Études Spatiales (CNES). Sur ces images satellites, il est possible de détecter les herbiers dans le proche infrarouge à marée basse. L'indice NDVI a donc été appliqué pour mesurer la dynamique temporelle du couvert. Le maximum de NDVI est observé en automne et son minimum en hiver. À l'échelle interannuelle, les cartes de NDVI Spot montrent une diminution récente de l'extension de l'herbier, en particulier des zones de forte densité. Des mesures hyperspectrales de terrain et des photographies aériennes à basse altitude valident ces résultats et confirment l'utilité des données satellites à haute résolution spatiale pour la mise en œuvre du suivi DCE.

Mots-clés : télédétection spatiale, indice de végétation, herbiers intertidaux, *Zostera noltii*, Spot, HR.

Abstract

*The Arcachon bay is characterised by extensive intertidal flats (115 km² altogether) that are widely colonised by *Zostera noltii* meadows. The meadow cover constitutes an index of the lagoon water ecological status of the Water Framework Directive (WFD). Thus, the seagrass meadows are regularly mapped. *Zostera noltii* meadows show seasonal (spring and summer growth) and annual variations. These last years, a decrease of the total surface occupied by this eelgrass has been observed. In the framework of the development of an operational monitoring tool (LITEAU2 QuaLiF program), various approaches based on the use of space remote sensing data have been tested.*

This study shows the results of the application of the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) to a series of Spot scenes acquired in the framework of the Kalideos program (Centre National d'Etudes Spatial, CNES). On these images, it is possible to detect the seagrass cover in the near infrared waveband. Thus, the NDVI index has been applied with the aim to measure the temporal dynamics of the cover. NDVI maxima are observed during the autumn and minima occur in winter time. At the inter-annual scale, the Spot NDVI maps show a recent decrease of the seagrass meadow cover, in particular of the areas showing the highest vegetation densities. Field hyperspectral measurements and airborne pictures validate these results and confirm the usefulness of high resolution satellite data for the implementation of the WFD monitoring.

Keywords: Spatial remote sensing, vegetation index, intertidal seagrass meadows, *Zostera noltii*, Spot, HR.

1. Introduction

Les herbiers à *Zostera noltii* sont très répandus sur les estrans sablo-vaseux atlantiques de l'Europe, depuis la Norvège méridionale, jusqu'à la Mauritanie en Afrique, mais également en Méditerranée, mer d'Aral, mer Noire et mer Caspienne. A l'heure actuelle, le Bassin d'Arcachon abrite le plus grand herbier d'Europe. Ces herbiers constituent des habitats remarquables pour leurs fonctions de réservoir de biodiversité, de zone de reproduction et de nourrissage (Blanchet04). Ils jouent également un rôle important dans la dynamique hydrosédimentaire des estrans. La présence et la densité de zostères atténuent les vagues (Paul et Amos, 2011) et la vitesse des courants sur le fond (Widdows et al., 2008). Ainsi, en l'absence de feuilles de zostères, les contraintes sur le fond sont plus fortes, favorisant la remise en suspension de particules fines (Widdows et al., 2008). Enfin, ces végétaux jouent un rôle clé dans les cycles biogéochimiques (de Wit et al., 2001). En

condition d'autotrophie, ils participent de façon importante à l'oxygénation et à l'absorption des nutriments de la colonne d'eau.

Outre le rôle majeur des herbiers dans le fonctionnement écologique et hydro-sédimentaire des littoraux sur lesquels ils se développent, l'enveloppe globale et le taux de recouvrement des herbiers à *Zostera noltii* font partie des indicateurs écologiques de bonne qualité des milieux définis par la DCE. À ce titre, ils font l'objet d'une surveillance régulière. Celle-ci est menée par télédétection dans le cas des herbiers les plus vastes. Si la photo-interprétation reste largement privilégiée (e.g. Dalloyau et al., 2009), l'utilisation de la télédétection spatiale se développe également afin de proposer une alternative moins coûteuse et basée sur des critères de détection optiques objectifs, contrairement à la photo-interprétation, par essence subjective.

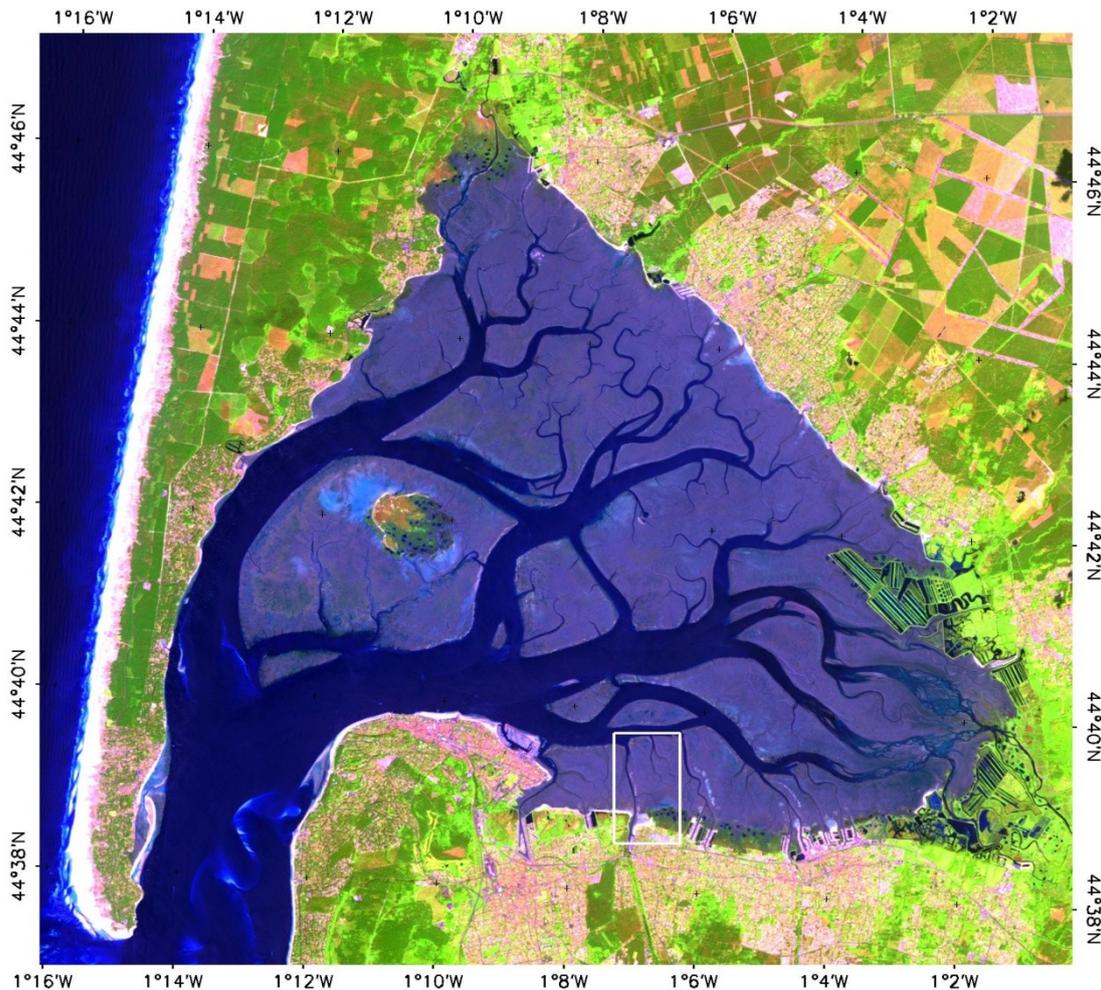


Figure 1 : Bassin d'Arcachon (Spot 4 mai 2007 © CNES) et site de La Hume (cadre blanc).

Zostera noltii est une plante à fleurs (phanérogame, monocotylédone) dont l'appareil végétatif comprend un

rhizome portant de très nombreuses racines adventives et des feuilles étroites de 5 à 40 cm de long. Elles sont

souples et se couchent dans le sens du courant à marée basse. Cette caractéristique facilite l'observation des herbiers par satellite. Plusieurs études, basées sur l'exploitation de données Spot, montrent qu'il est possible d'extraire les indicateurs DCE (emprise totale et taux de recouvrement (Sauriau, 2008 ; Harin et al., 2009, Lafon et al., 2009a ; 2009b), mais également sa biomasse (Guillaumont, 1991; Alloncle et al., 2005; Barillé et al., 2010).

Les travaux entrepris dans le cadre du suivi DCE s'appuient sur deux approches différentes. La première basée sur des algorithmes de classification a été développée à Arcachon dans le but d'obtenir une cartographie exhaustive de l'ensemble des faciès bio-sédimentaires de la lagune (Lafon et al., 2008). La seconde est basée sur l'exploitation de l'indice NDVI (Normalised Difference Vegetation Index (Tucker, 1979)) et a été expérimentée dans la baie de Marennes-Oléron.

L'objectif de la présente étude, menée dans le cadre du projet QuaLiF du programme LITEAU-II (de Montaudouin, 2009), est de quantifier les variations saisonnières et interannuelles de la couverture végétale dans le Bassin d'Arcachon à partir de mesures de télédétection spatiale en se basant sur l'indice de végétation NDVI.

2. Matériel et méthode

2.1. Site d'étude

L'étude concerne le Bassin d'Arcachon (**Figure 1**), situé par 44°40' N et 01°10' W. D'une superficie totale de 174 km², les 2/3 de sa surface sont occupés par des estrans intertidaux (Auby, 1991). L'herbier à *Zostera noltii* couvrait 68 km² en 1984 contre seulement 46 en 2007 (Dalloyau et al., 2009). Ces résultats, obtenus à partir de l'interprétation de photographies aériennes et de mesures DGPS, montrent la régression spatiale du couvert foliaire de l'herbier.

Afin d'évaluer le potentiel du NDVI pour restituer l'extension spatiale des herbiers à partir de données satellites, nous avons d'abord focalisé nos analyses sur le site de La Hume situé sur la rive sud du Bassin d'Arcachon (**Figure 1**, encadré).

2.2. Acquisition des données

Des mesures optiques de terrain ont été réalisées sur le site d'étude de la Hume le 27 octobre 2003. Un capteur TriOS RAMSES ARC couplé à un capteur ACC ont été utilisés afin de mesurer, respectivement, la luminance (L) et l'éclairement (E) de cibles choisies, dans la gamme de longueurs d'onde (λ) couvrant le visible et le proche infrarouge. Ces données hyperspectrales ont permis de reconstruire les réflectances de télédétection ($Rrs(\lambda, st-1) = L\lambda/Ed\lambda$), lesquelles ont été utilisées pour valider l'indice NDVI.

Des échantillons d'herbier ont été prélevés pour calculer la biomasse et la corréler à des taux de recouvrement. Une corrélation linéaire a été mise en évidence (Prinçaud, 2006, de Montaudouin, 2009).

Des photographies aériennes effectuées à bord d'un ULM dans le cadre du programme LITEAU entre fin 2006 et fin 2007 ont été utilisées dans cette étude pour valider les cartes NDVI Spot (**Tableau 1**). Il s'agit d'images obliques numériques en RVB acquises à marée basse.

Une série d'images satellites Spot 1 (20 m de résolution), Spot 4 (20 m de résolution) et Spot 5 (10 m de résolution) acquises dans le cadre du programme Kalideos Littoral a été sélectionnée afin de coïncider à la fois à des basses mers et aux dates de prises de vue ULM. Cinq scènes réunissant ces conditions (**Tableau 1**) seront exploitées pour l'analyse de la variation saisonnière des herbiers. Enfin, quatre scènes Spot acquises à marée basse (1989-2009) ont été choisies pour l'analyse interannuelle (**Tableau 1**).

Variations saisonnières							
Année	2006	2006	2007	2007	2007	2007	2007
Photos aériennes	27 oct.	26 nov.	21 fév.	24 mars	10 mai	30 août	31 oct.
Images Spot	8 oct.		17 fév.		4 mai	13 sept.	11 déc.
Variations pluriannuelles							
Année	1989	2001	2006	2009			
Images Spot	4 oct.	16 oct.	8 oct.	8 sept.			

Tableau 1 : Dates d'acquisition des photographies aériennes et des images satellites exploitées.

2.3. Corrections géométriques et atmosphériques des images Spot par le CNES

Le CNES met à la disposition des chercheurs sur un site internet (<http://kalideos.cnes.fr>) des scènes Spot corrigées des effets géométriques et mises en projection

Lambert II étendu. Pour une meilleure conformité avec d'autres types de données, nous les avons projetées en Lambert III sous ENVI. Nous avons constaté que les décalages géographiques entre les deux projections sont inférieurs ou égaux à 1 pixel (20 m ou 10 m). Comme nous analysons des dynamiques temporelles et

non spatiales, cette imprécision ne peut influencer les résultats obtenus.

D'autre part, les données Kalideos sont corrigées des variations radiométriques et des effets atmosphériques par le CNES. Une méthode basée sur le code de transfert radiatif 6S (Vermote et al., 1994) a été développée à cet effet. Elle exploite des données TOMS/TOAST, NCEP et SeaWiFS qui permettent de caractériser, respectivement, l'ozone stratosphérique, la pression atmosphérique, la vapeur d'eau et l'humidité relative, ainsi que l'épaisseur optique des aérosols. Le modèle maritime de (Shettle et Fenn, 1979) est utilisé pour décrire la composition de la population d'aérosols. Ainsi, seul ce paramètre n'est pas estimé à partir de données in situ ou de climatologies. En domaine littoral, où l'atmosphère est brassée et turbulente, ce choix peut dégrader la qualité des réflectances au sol calculées.

2.4. Traitement des données

Pour valider les observations satellites, l'indice de végétation NDVI a été calculé à partir des mesures optiques hyperspectrales. Le NDVI est défini par le rapport entre le proche infrarouge (PIR) et le rouge (R) :

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad (1)$$

soit, si on considère les bandes spectrales du satellite Spot XS3 (0,78-0,89 μm) dans le PIR et XS2 (0,61-0,68 μm) dans le R :

$$NDVI = \frac{XS3-XS2}{XS3+XS2} \quad (2)$$

Ainsi, les réflectances équivalentes Spot ont été calculées en intégrant les mesures dans les bandes XS2 et XS3, pondérées par les sensibilités spectrales.

Au cours des années 2003 à 2006, des recherches ont été engagées pour établir un lien entre la densité des herbiers et le rapport NDVI. Ces mesures de terrain ont permis de confirmer la validité du NDVI. Mais cet indice n'est pas caractéristique des herbiers à zostère. Il peut donner des valeurs similaires pour un couvert algal (*Monostroma obscurum*, *Enteromorpha clathrata*...) ou une végétation de prés salés. Pour éviter la confusion entre ces différents types de couvert, un suivi sur le terrain a été réalisé et complété par des prises de vue en ULM

2.5. Cartographie du NDVI et normalisation

Chaque scène Spot a été traitée de façon à obtenir une image du NDVI en utilisant l'équation (2). Les surfaces couvertes de prés salés naturels (schorres) ont été masquées sur les images NDVI Spot, ainsi que sur l'Île aux Oiseaux et, plus généralement, sur toutes les surfaces émergées à marée haute afin de faciliter la lecture des cartographies obtenues. Par contre, nous n'avons pas pu masquer les herbiers à spartines isolés du schorre, les biofilms (Herlory, 2005) et les couverts

algaires, car leur répartition spatiale est variable dans le temps. Toutefois, les surfaces de spartines ne sont pas significatives comparées aux surfaces couvertes par les herbiers. En ce qui concerne les couverts algaires, les années correspondant à des blooms d'algues *Monostroma* ont été exclues. Enfin, les biofilms ont un NDVI faible (Barillé et al., 2010), parfois confondu avec le NDVI des herbiers dont le taux de recouvrement est réduit. Les surfaces présentant un NDVI faible devront donc être analysées avec précaution. Une classification a ensuite été appliquée pour distinguer la répartition et la surface des valeurs NDVI comprises entre 0,1 et 0,8.

Il serait logique d'obtenir des valeurs très faibles sur les sols nus et nulles sur l'eau. Ce n'est pas le cas, et cela malgré les corrections atmosphériques. L'obtention de valeurs erronées est vraisemblablement due à l'approximation faite sur la composition en aérosols atmosphériques. Pour remédier à ces différences entre les images NDVI, qui gênent les comparaisons, des surfaces sans herbiers ont été prises comme référence pour normaliser les images et permettre l'étude de l'évolution saisonnière. Plus précisément, une constante positive ou négative a été ajoutée à chaque image de façon à obtenir la même valeur sur le site de référence contrôlé sur le terrain.

Pour l'analyse interannuelle, le NDVI moyen de surfaces dont le couvert est stable ont été comparées (sable, forêt) afin de s'assurer qu'il ne variait pas de façon significative d'une scène à l'autre. Pour les quatre scènes concernées, le NDVI de ces différentes cibles de référence est relativement stable. Cela peut s'expliquer car les scènes retenues ont été prises à la même saison, en automne. Les NDVI Spot peuvent donc être comparés.

3. Résultats

3.1. NDVI observés in situ

Les mesures hyperspectrales réalisées sur le site d'étude de la Hume montrent que la différence entre les réflectances rouge et proche infrarouge augmente avec la densité du couvert. Pour la vase sans zostère, mais présentant un biofilm de *microphytobenthos* (Herlory, 2005), le rapport NDVI était de 0.18 en moyenne. Pour les zostères peu denses, ce rapport était de 0.38 et pour les zostères denses, il était de 0.69.

Guillaumont (1991) et Alloncle et al. (2005) ont démontré une corrélation robuste entre la biomasse à *Zostera noltii* et le NDVI pour des biomasses inférieures à environ 100 g.PSm⁻², les valeurs de NDVI saturant ensuite (superposition des feuilles). Des résultats quantitatifs plus précis et permettant de détecter des biomasses plus élevées ont été obtenus sur le site de la Baie de Bourgneuf par Barillé et al.(2010). Ces auteurs trouvent une relation de type puissance entre le NDVI et la Biomasse ($r^2 = 0,97$) selon l'équation (Figure 3):

$$Y = 610,61.X^{1,88} \quad (3)$$

où X représente le NDVI et Y la biomasse (PS g/m²)

3.2. Observation par photographies aériennes du site de La Hume

Les survols en ULM, réalisés à 90 m d'altitude environ, montrent la variation saisonnière des feuilles de zostères entre février et septembre 2007 (**Figure 4**). Le 21 février 2007, les herbiers ne sont pas visibles, le sol sablo-vaseux apparaît nu avec un petit chenal traversier et, en arrière-plan le schorre. Le 27 septembre 2007, les vasières intertidales sont couvertes par les feuilles des herbiers à zostères de part et d'autre du chenal traversier. Cette variation de densité du feuillage des herbiers a été confirmée sur le terrain. En mars 2007, les herbiers n'étaient pas encore visibles. Lors du survol du 10 mai 2007, le développement des feuilles est suffisant pour apparaître sur les photographies aériennes, tout au moins à proximité immédiate du chenal traversier. Les herbiers deviennent bien visibles en juillet 2007. Ils atteignent leur maximum de développement en septembre 2007.

Cette variation au cours de l'année 2007 a été constatée aussi en 2006. Elle s'est reproduite en 2008 (cinq

missions de photographies aériennes effectuées entre les mois de janvier et d'octobre). De nouveau, les feuilles ont disparu entre décembre 2008 et janvier 2009. Ces résultats sont conformes aux observations menées par (Auby et Labourg, 1996) sur le terrain en plusieurs points de la lagune. L'indice NDVI est exploité ici pour spatialiser ces observations à l'échelle de la lagune.

3.3. Variations du NDVI Spot suivant un profil nord-sud à La Hume

Pour comparer les variations entre les différentes scènes Spot, un profil radiométrique nord-sud, situé à la longitude 1°06'49.3" W (site de la Hume, **Figure 1**) a été relevé sur les images traitées en NDVI. Pour que ces profils soient comparables, c'est-à-dire superposés les uns aux autres, nous avons sélectionné un site de ce secteur où les sédiments sont dépourvus de végétation, présentant donc des valeurs NDVI très faibles sur toutes les images. Puis, en nous référant à la valeur la plus faible sur ce site (NDVI = 0,1), nous avons retranché pour chaque image une valeur NDVI constante de façon à obtenir une superposition des profils aux endroits de faibles NDVI quelle que soit la date. Les variations sont reportées sur la Figure 5.

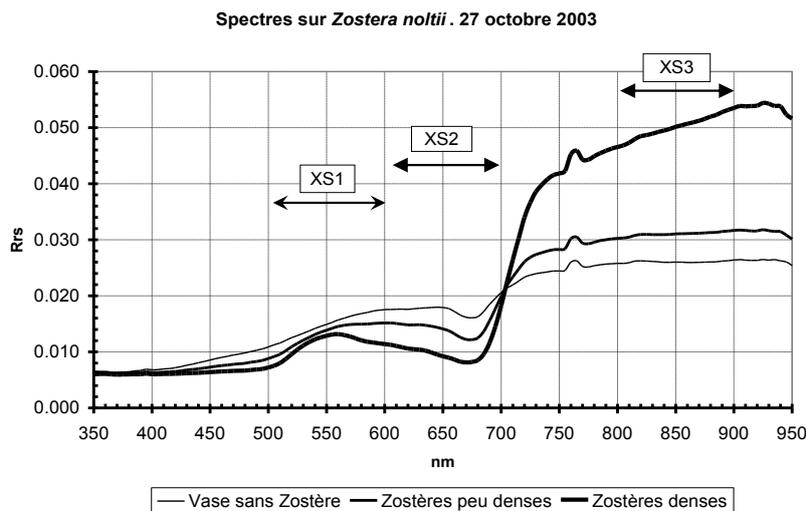


Figure 2 : Spectres de réflectance de vase sans zostère, de vase avec des petites feuilles de zostère et de vase avec une dense couverture de feuilles de zostère sur le site de La Hume.

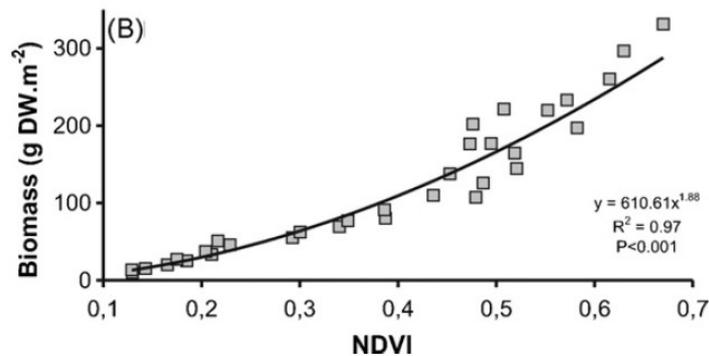


Figure 3 : Relation entre biomasse et indice NDVI pour *Zostera noltii* (d'après (Barillé et al., 2010)).



Figure 4 : Photographies prises le 21 février 2007 et le 27 septembre 2007 montrant le chenal traversier et les prés salés de La Hume au second plan.

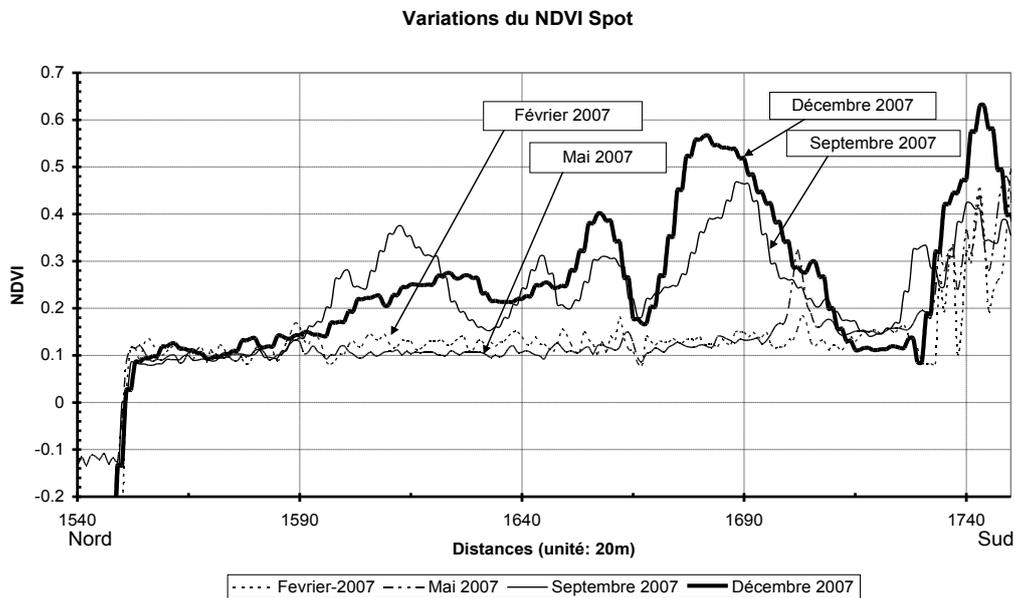


Figure 5 : Variations du NDVI au cours de l'année 2007 le long d'un profil N-S sur le site expérimental de la Hume.

La chute des feuilles fin janvier 2007 explique les NDVI très faibles observés sur le profil du 17 février 2007 (**Figure 5**). Ensuite, les valeurs du NDVI augmentent après le mois de mai. Le maximum est observé au mois de septembre. Au mois de décembre, certains secteurs présentent une augmentation et d'autres une diminution (**Figure 5**, profil foncé).

3.4. Étude des variations saisonnières à l'échelle du Bassin d'Arcachon

L'année 2007 a été sélectionnée car le nombre d'images Spot prises à marée basse était suffisant. Sur les cartes, les teintes de gris sont plus claires au fur et à mesure que les valeurs du NDVI augmentent. Le contraste entre les NDVI correspondant au début de l'année 2007 et à l'automne 2007 est net (**Figure 6**, **Figure 7**).

En février, les valeurs de NDVI sont très faibles, ce qui explique la teinte grise uniforme de l'ensemble des estrans. Les valeurs sont beaucoup plus élevées et les teintes de la carte plus claires en septembre. Les valeurs de NDVI sont maximales en automne et au début de l'hiver (**Figure 7**).

La **Figure 8** présente des diagrammes montrant les surfaces d'herbier en km² pour chacune des classes d'octobre 2006 à décembre 2007.

Ainsi, les maxima d'indices sont observés en automne (octobre 2006 et septembre 2007). Les feuilles des herbiers à zostères tombent en majorité durant l'hiver et ne sont plus observables depuis l'espace jusqu'au printemps. Les surfaces dont le NDVI est supérieur à 0.45 diminuent de 19 km² en octobre 2006 à 0.3 km² en février 2007. Sur le terrain, des feuilles très fines et courtes sont observables au début du printemps. Au

mois de mai 2007, une faible couleur verte correspondant à des couverts de zostères de faible densité était observable en ULM. Toutefois, entre les images Spot de février et mai 2007, le NDVI n'augmente pas de façon significative. On pourrait s'attendre à une augmentation du NDVI dans les classes 0,3 à 0,4 qui correspondent à des taux de recouvrement faibles à

moyens. Ainsi, les cartes NDVI Spot semblent sous-estimer le couvert végétal au début de la pousse des feuilles de zostères. Enfin, la surface couverte à l'automne 2007 (12 km²) est plus faible qu'à l'automne 2006 (19 km²). Il est donc important d'examiner en détail les variations pluriannuelles.



Figure 6 : NDVI calculé sur la scène Spot du 17 février 2007 (les prés salés et l'Île aux Oiseaux sont masqués).

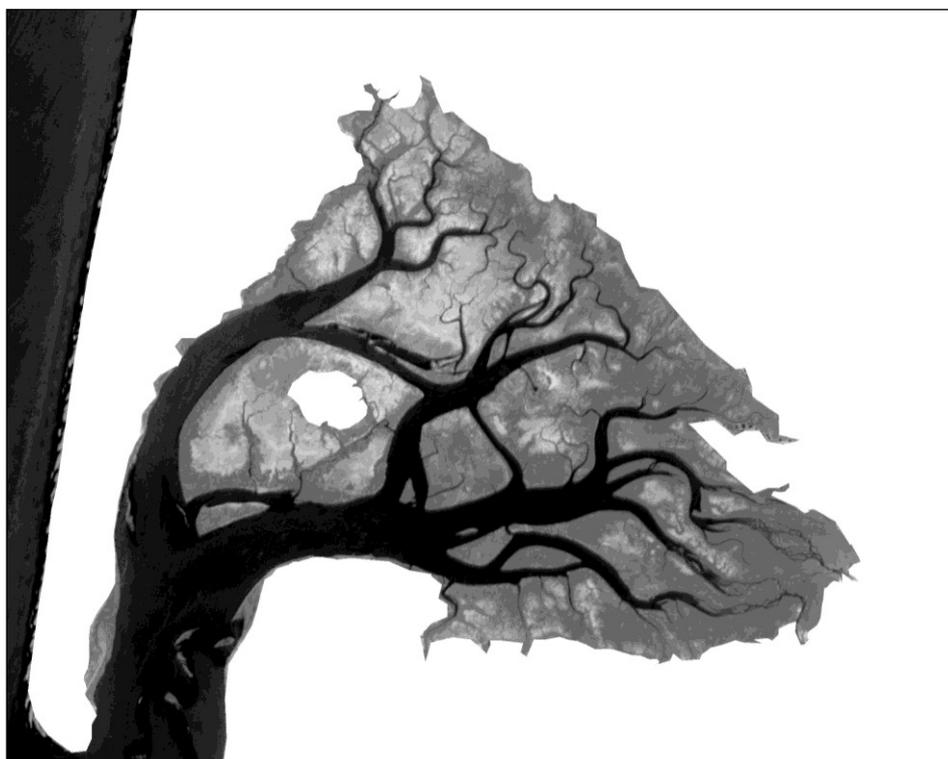
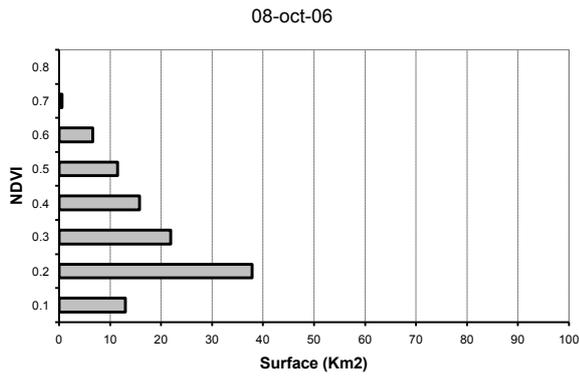
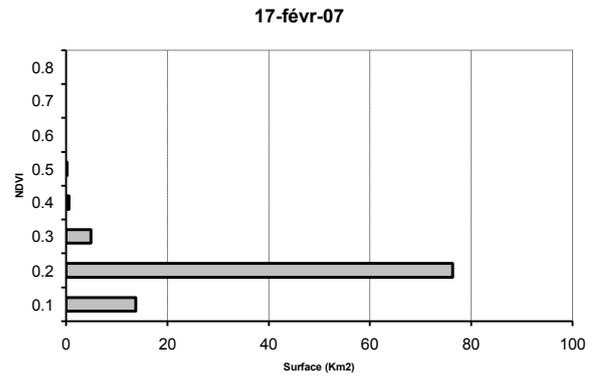


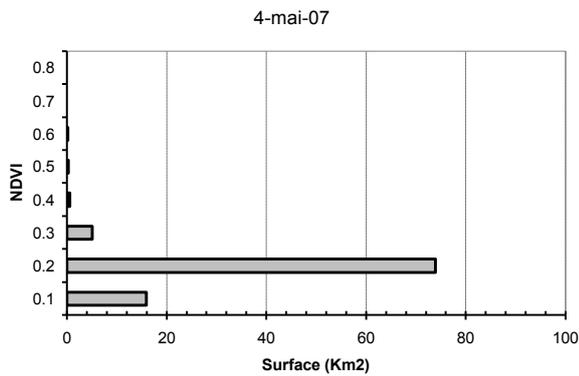
Figure 7 : NDVI calculé sur la scène Spot du 13 septembre 2007.



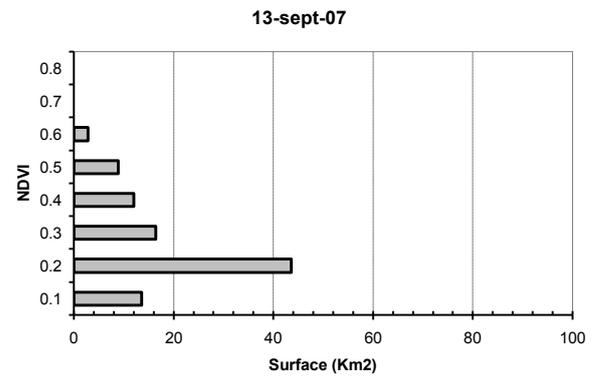
8 octobre 2006 - Surface avec des NDVI > 0,45 : 19 km²



17 février 2007 - Surface avec des NDVI > 0,45 : 0,3 km²



4 mai 2007 - Surface avec des NDVI > 0,45 : 0,6 km²



13 septembre 2007 - Surface avec des NDVI > 0,45 : 12 km²

Figure 8 : Variation des surfaces des zones intertidales ayant des NDVI supérieurs à 0,45.

3.5. Analyse des variations pluriannuelles

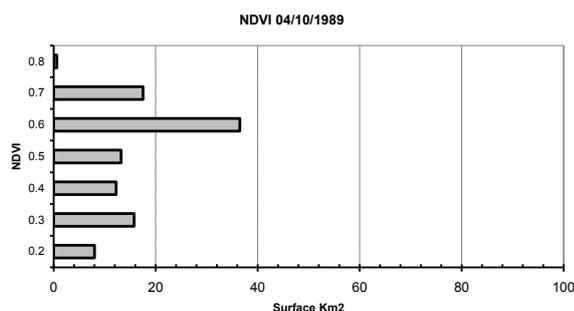
Une procédure similaire a été utilisée pour les observations pluriannuelles, mais en sélectionnant les scènes prises à marée basse et en automne afin de minimiser l'effet saisonnier et d'observer à la fois les couvertures végétales les plus denses et l'extension maximale des herbiers. Nous disposons de scènes Spot depuis 1986, mais la première scène prise à marée basse date du 4 octobre 1989. Les scènes entre 1990 et 1998 n'ont pas été utilisées à cause des proliférations d'algues vertes *Monostroma obscurum* (Auby et al., 1994) qui auraient faussé les résultats. Entre 2001 et 2006, aucune scène n'a été prise à marée basse entre septembre et fin novembre. Ainsi, les scènes utilisées correspondent aux dates suivantes : 4 octobre 1989, 16 octobre 2001, 8 octobre 2006 et 8 septembre 2009.

Les diagrammes de la **Figure 9** montrent un net fléchissement des NDVI correspondant à une diminution globale du couvert des herbiers. Pour les NDVI supérieurs à 0,5 (fort taux de recouvrement de la végétation), celui-ci passe de 52 km² en 2001 (**Figure 10**) à 12 km² en 2009 (**Figure 11**). Cette diminution est plus importante dans le quart sud-est du Bassin

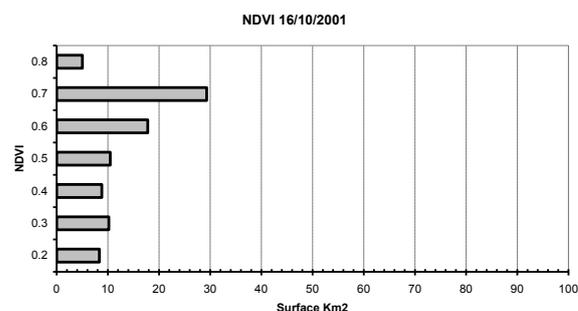
d'Arcachon. Au contraire, dans la partie centrale de la lagune et au nord-ouest de l'Île aux Oiseaux, les herbiers sont beaucoup plus stables. Cette tendance est comparable à celle observée par photo-interprétation (Dalloyau et al., 2009 ; Plus et al., 2010).

4. Discussion et conclusion

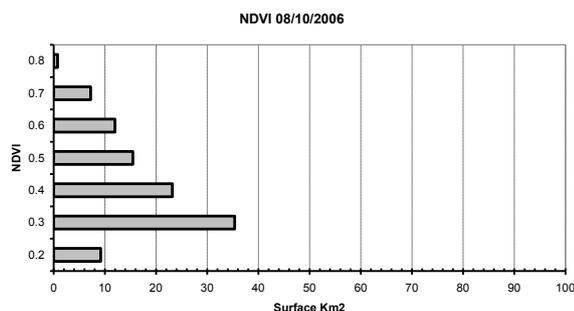
Les variations saisonnières analysées sur le site de La Hume à l'aide de cartes NDVI Spot montrent une diminution significative de l'indice de végétation normalisé au cours de l'hiver 2006-2007, puis son augmentation avec un maximum à l'automne 2007. Ces résultats sont validés par les clichés ULM et les observations in situ (Auby, 1991 ; Auby et al., 2007). Des mesures hyperspectrales des surfaces intertidales et un suivi saisonnier évitent les confusions possibles avec des biofilms constitués de diatomées et des dépôts d'algues par exemple. Lorsque les feuilles sont jeunes et étroites, la présence des herbiers influence peu la radiométrie du sédiment. Ainsi, les herbiers sont mal détectés, ce qui peut conduire à une sous-estimation du couvert total au printemps. Par conséquent, l'indice NDVI ne peut être utilisé seul. Il doit être vérifié et corrigé par des observations ou des mesures de terrain.



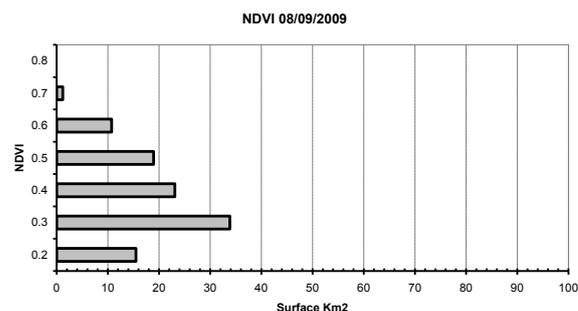
4 octobre 1989 - Surface avec des NDVI > 0,5 : 55 km²



16 octobre 2001 - Surface avec des NDVI > 0,5 : 52 km²



8 octobre 2006 - Surface avec des NDVI > 0,5 : 20 km²



8 septembre 2009 - Surface avec des NDVI > 0,5 : 12 km²

Figure 9 : Variation des surfaces des zones intertidales ayant des NDVI supérieurs à 0,5.

En comparant les indices de NDVI des différentes images sur des surfaces réputées sans végétation (vase, vase et sable) ou ayant une végétation « stable » (forêt de pins, green de golf), les résultats (**Figure 12**) montrent de fortes variations au cours d'une année (octobre 2006/décembre 2007). Par exemple sur la vase, il varie de 0,1 à 0,21. D'une façon générale, les valeurs de NDVI sont plus faibles pour l'image du 13 septembre 2007. Ces différences peuvent être dues aux conditions de prise de vue ou aux aérosols. Pour pallier cette difficulté et afin de comparer les images, celles-ci ont été normalisées en prenant comme référence des surfaces réputées stables. Mais ces variations ne se reproduisent pas de la même façon sur toute la zone étudiée, d'où une incertitude sur les valeurs absolues de NDVI lorsque celui-ci est faible.

Ces variations du NDVI sur la vase (**Figure 12**) pourraient être dues en partie à l'effet induit par l'humidité du substrat sur sa signature optique. En effet, les images satellites ont toutes été prises à basse mer (BM), mais à des moments différents du cycle de marée. Cependant, les différences de niveau d'eau entre les scènes Spot n'excèdent pas 64 cm. A l'heure actuelle, aucune référence ne nous permet d'affirmer que des variations relativement faibles du niveau de l'eau modifient significativement le NDVI des herbiers. On peut toutefois raisonnablement penser que seuls les plus faibles NDVI des zones basses de l'estran risqueraient d'être affectés par cet effet. En outre, des variations similaires sont observables en prenant

d'autres cibles comme la forêt de pins (NDVI variant de 0,73 à 0,85, **Figure 12**).

Pour les variations pluriannuelles, nous avons comparé les cartes de NDVI Spot à celles obtenues par Ifremer (Plus et al., 2010). Les auteurs de ces travaux notent des emprises de l'herbier de 68 km² en 1989, 61 km² en 2005 et 46 km² en 2007. Les NDVI Spot montrent la même tendance, en particulier si on retient les pixels dont le NDVI est supérieur à 0.5 (taux de recouvrement moyen à fort). Pour ces valeurs d'indice, les surfaces d'herbier détectées sont de 55 km² en 1989, 52 en 2001, 20 en 2006 et 12 en 2009. La régression des herbiers est estimée à 33 % par (Plus et al., 2010)) pour l'ensemble des herbiers du bassin d'Arcachon. Les herbiers présentant des taux de recouvrement moyen à fort perdent 25 % de leur surface (Dalloyau et al., 2009). Ainsi, même si les valeurs absolues de NDVI ne sont pas encore suffisamment fiables pour chiffrer précisément la diminution de surface de l'herbier par satellite, les tendances exprimées par les cartes de NDVI sont, elles, correctes

Sur le plan méthodologique, des améliorations doivent être apportées notamment pour fiabiliser la normalisation des images et valider la quantification des indicateurs de l'état de l'herbier, en particulier son extension spatiale et son taux de recouvrement, requis pour le suivi DCE. A l'heure actuelle dans le cadre du programme SYNIHAL (TOSCA CNES), des mesures optiques sont réalisées afin de définir sur le terrain l'indice NDVI de l'herbier en condition automnale pour les différentes classes de recouvrement DCE.

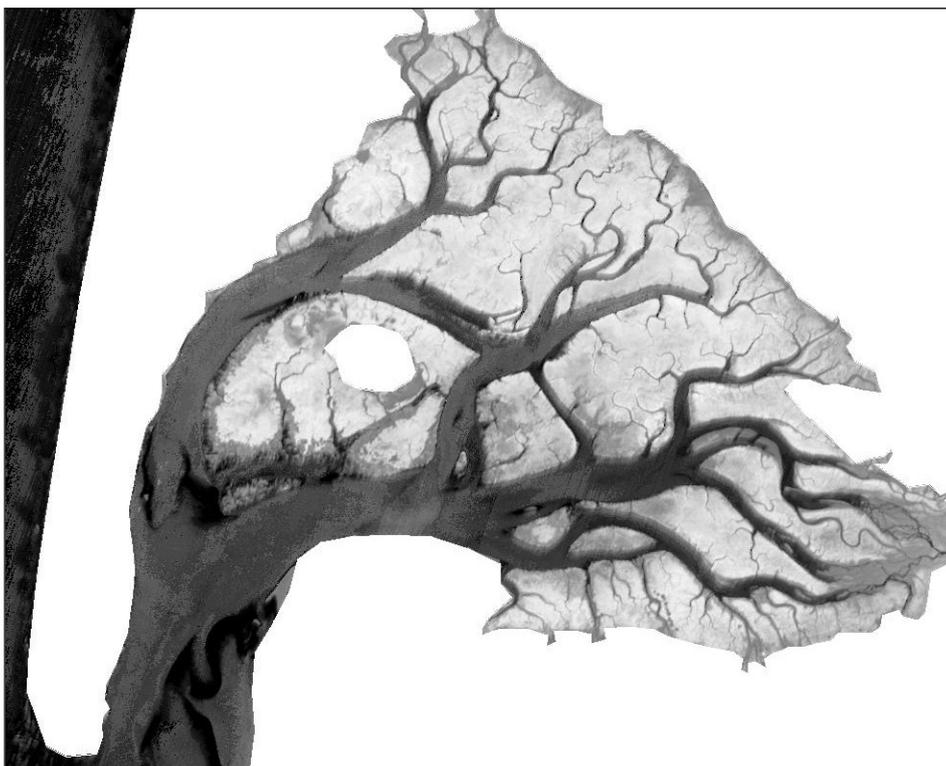


Figure 10 : NDVI obtenu à partir de la scène Spot du 16 octobre 2001.

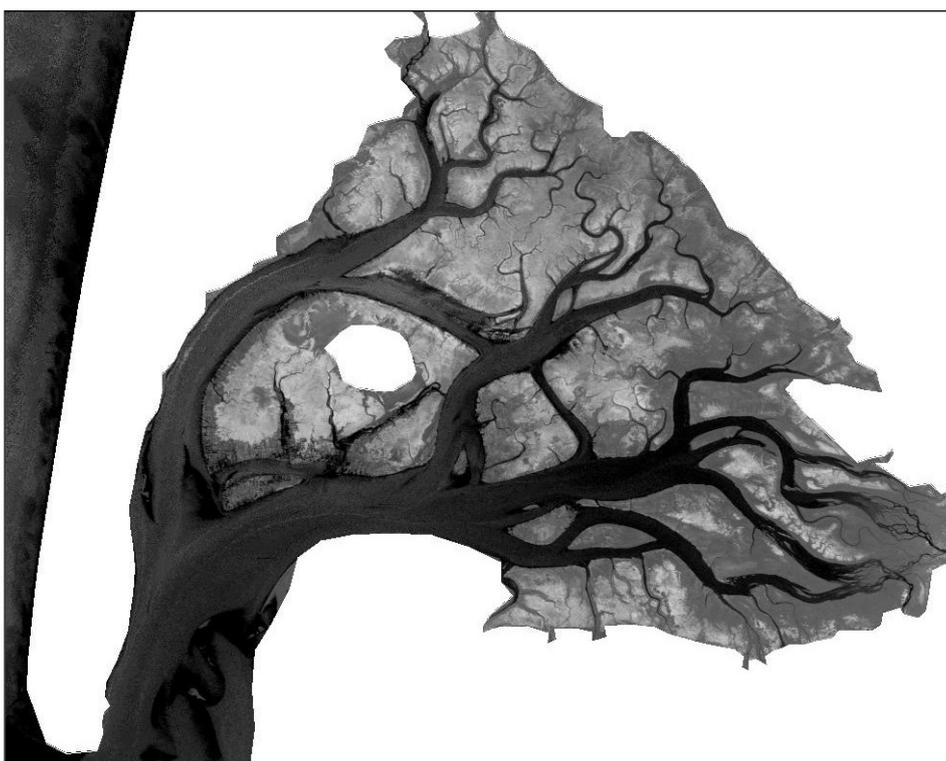


Figure 11 : NDVI obtenu à partir de la scène Spot du 8 septembre 2009.

Les cartes satellites du NDVI de l'herbier seront alors conformes à la méthodologie de cartographie DCE (Dalloyau et al., 2009 ; Plus et al., 2010). Ainsi, nous pourrons comparer les quantifications Spot et celles obtenues par photo-interprétation et qualifier

définitivement l'indice NDVI comme outil de suivi pour la DCE. Cet indice est par essence adaptable à de nombreux capteurs optiques haute à très haute résolution intégrés comme Sentinel-2, Pléiades ou encore VEN μ S. La mise à disposition des données

images dans le cadre du dispositif de surveillance GMES permettra, à terme, de développer un service de surveillance de l'herbier opérationnel. Les résultats présentés ici constituent donc une étape préliminaire qui valide toutefois l'intérêt du NDVI pour la cartographie des herbiers intertidaux à *Zostera noltii*.

Remerciements

Cette étude a pu être réalisée grâce aux programmes LITEAU-2 du MEDDEM et Kalideos Littoral du CNES. Nous remercions les responsables de ces programmes et les personnes qui nous ont apporté leur appui.

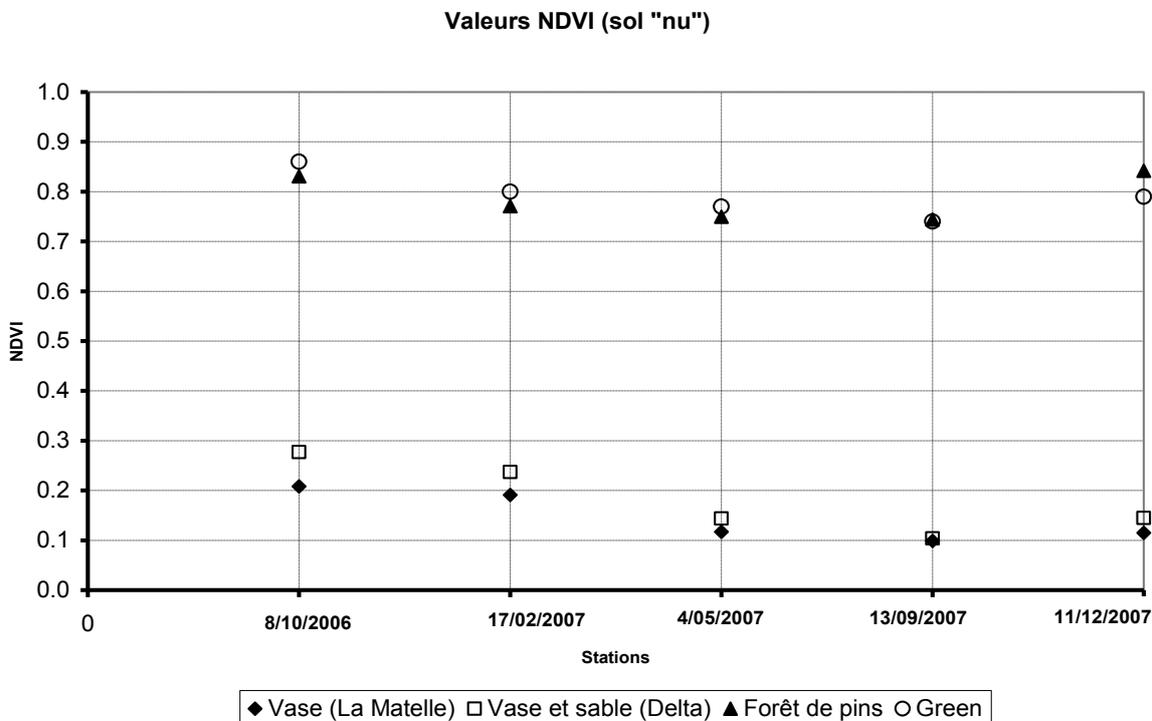


Figure 12 : Variation de l'indice NDVI sur des sols de référence pour les images de 2006 à 2007.

Références

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 des herbiers de Zostera noltii dans le Bassin d'Arcachon : Dynamique, production et dégradation, macrofaune associée*. Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux, I, France: 1-234.

Auby, I., Labourg, P.-J., 1996. *Seasonal dynamics of Zostera noltii Hornem. in the Bay of Arcachon (France)*. Journal of Sea Research, 35(4), 269-277.

Auby, I., Manaud, F., Maurer, D., Trut, G., 1994. *Étude de la prolifération des algues vertes dans le Bassin d'Arcachon*. Ifremer, Cemagref, SSA, Sabarc. Rapport Ifremer. 269 p.

Auby, I., Trut, G., Plus, M., Vignon, A., Bujan, S. 2007. *Suivi stationnel des herbiers de zostères (Zostera noltii et Zostera marina) de la masse d'eau côtière FRFC06 - Arcachon amont-District hydrographique Adour-Garonne*. Rapport Ifremer. 37 p.

Barillé, L., Robin, M., Harin, N., Bargain, A., Launeau, P., 2010. *Increase in seagrass distribution at Bourgneuf Bay (France)*

detected by spatial remote sensing. Aquatic Botany, 92(3), 185-194.

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*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 61,111-123.

Dalloyau, S., Trut, G., Plus, M., Auby, I., 2009. *Caractérisation de la qualité biologique des masses d'eau côtière : cartographie des herbiers de Zostera noltii et Zostera marina du Bassin d'Arcachon*. Rapport Ifremer. 51 p.

De Montaudouin, X., 2009. *Évaluation de la qualité biologique des milieux littoraux semi-fermés*. Rapport LITEAU-2. Laboratoire Epec. Université de Bordeaux-1. 43 p.

De Wit, R., Stal, L.J., Lomstein, B.A., Herbert, R.A., van Gemerden, H., Viaroli, P., Cecherelli, V.U., Rodriguez-Valera, F., Bartoli, M., Giordani, G., Azzoni, R., Schaub, B., Welsh, D.T., Donnelly, A., Cifuentes, A., Antòn, J., Finster, K., Nielsen, L.B., Underlien Pedersen, A.G., Turi Neubauer, A., Colangelo, M.A., Heijs, S.K., 2001. *ROBUST: The Role of Buffering capacities in stabilising coastal lagoon ecosystems*. Continental Shelf Research 21, 2021-2041.

- Guillaumont, B., 1991. *Utilisation de l'imagerie satellitaire pour les comparaisons spatiales et temporelles en zone intertidale*. Estuaries and Coasts: Spatial and temporal intercomparisons, 63-68.
- Harin, N., Lafon, V., Sauriau, P.-G., 2009. *Dynamique temporelle (1989-2006) des herbiers intertidaux à Zostera noltii de la masse d'eau Pertuis Breton (FRGC53) dans le cadre de la DCE*. Rapport d'étude IFREMER/AELB. Biolittoral, Université de Nantes, 29 p.
- Herlory, O., 2005. *Étude du biofilm microalgal des vasières intertidales : dynamique spatio temporelle à micro-échelle et performance photosynthétique*. Thèse de Doctorat. Université de la Rochelle. 240 p.
- Lafon, V., Dehouck, A., De Montaudouin, X., Marieu, V., Blanchet, H., Froidefond, J.-M., 2009a. *Cartographie de l'herbier du Bassin d'Arcachon par télédétection spatiale : potentiel pour le suivi d'un indicateur DCE*. 31^{èmes} Journée de l'Hydraulique de la SHF « Morphodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas », Paris, 22-23 septembre 2009
- Lafon, V., Harin, N., Sauriau, P.-G., 2009b. *Dynamique temporelle (1989-2006) des herbiers intertidaux à Zostera noltii de la masse d'eau Pertuis Charentais (FRFC02) dans le cadre de la DCE*. Rapport d'étude IFREMER/AEAG. GEO Transfert, UMR EPOC, Université Bordeaux-1, 34 p.
- Lafon, V., Marieu, V., Butel, R., Dehouck, A., Froidefond, J.-M., Trut, G., 2008. *Cartographie des faciès bio-sédimentaires du Bassin d'Arcachon à partir de l'imagerie Formosat-2*. 10^{èmes} Journées nationales Génie Côtier Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sofia Antipolis, 10 p.
- Prinçaud, M., 2006. *Télédétection des herbiers*. Rapport de Master-2. Laboratoire Epec, Université Bordeaux-1. 24 p.
- Paul, M., Amos, C.L., 2011. *Spatial and seasonal variation in wave attenuation over Zostera noltii*. Journal of Geophysical Research, 116 (C08019), 16 p.
- Plus, M., Dalloyau, S., Trut, G., Auby, I., De Montaudouin, X., Emery, E., Claire, N., Viala, C., 2010. *Long term evolution (1998-2008) of Zostera spp. meadows in Arcachon Bay (Bay of Biscay)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 87, 357-366.
- Sauriau, P.-G., 2008. *Surveillance faune et flore benthique DCE « Vitalité herbier de Zostera noltii masse d'eau FRFC02 Pertuis charentais Prospection 2008 »*, Contrat Ifremer n° 2008 5 51522020, 27 p.
- Shettle, E.P., Fenn, R.W., 1979. *Models for the aerosols for the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties*. Environmental Research Papers, N° 676, AFGL-TR-79-0214, USAF, 94 p.
- Tucker, C.J., 1979, *Red and photographic infrared linear combinations monitoring vegetation*. Remote Sensing of Environment, 8, pp. 127-150.
- Vermote, E., Tanré, D., Deuzé, J.-L., Herman, M., Morcrette, J.-J., 1994. *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)*. 6S User guide Version 0, April 18, 1994.
- Widdows, J., Pope, N.D., Brinsley, M.D., Asmus, H., Asmus, R.M., 2008. *Effects of seagrass beds (Zostera noltii and Z. marina) on near-bed hydrodynamics and sediment resuspension*. Marine Ecology Progress Series, 358, 125-136.