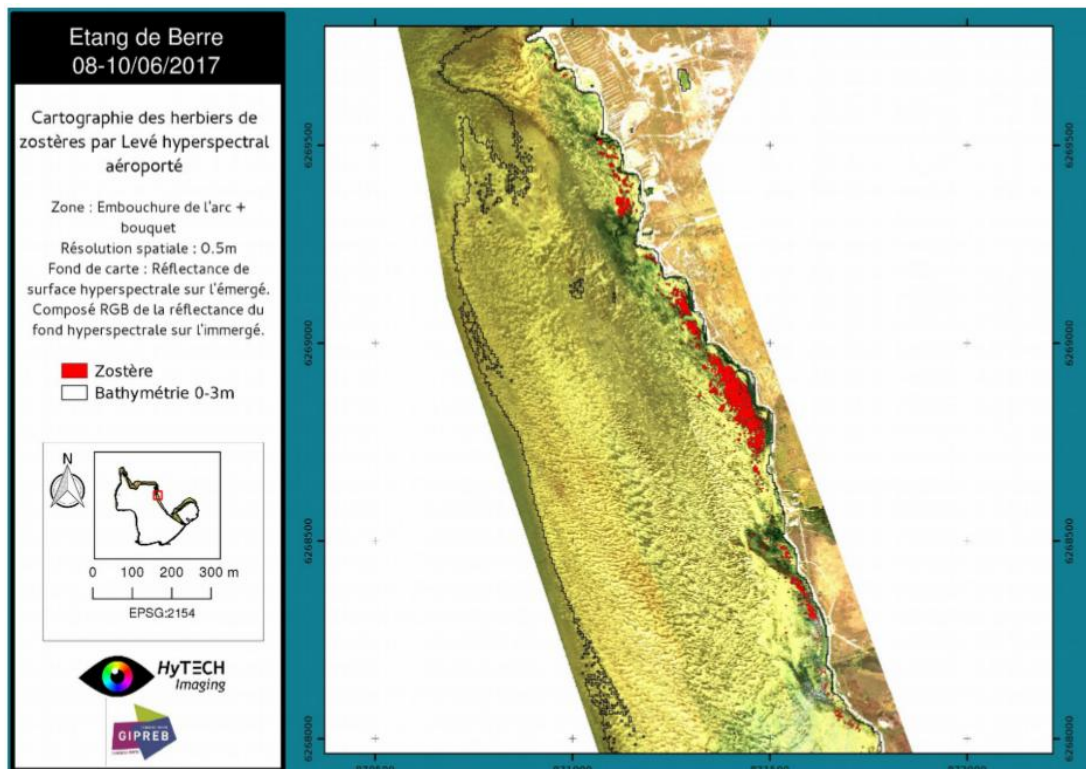




Projet HYPERBERRE

Cartographie des habitats de l'étang de Berre par imagerie hyperspectrale aéroportée : application aux herbiers de zostères

Rapport Final



Vincent FAURE, 12/12/2018

Sommaire

Contexte	3
1 Cartographie des herbiers sur orthophotographies (Juin 2018 - GIPREB)	4
1.1 Méthodologie	4
1.2 Cartographie des herbiers : résultats et remarques	5
2 Rapport de synthèse sur la méthodologie hyperspectrale (HYTECH IMAGING)	8

Contexte

Depuis 2014, les surfaces couvertes d'herbiers de zostères dans l'étang de Berre ont montré une nette progression. Ces phanérogames protégées font parties des espèces indicatrices de la dynamique fonctionnelle de l'étang. Elle est dite « ingénieur d'écosystème », jouant un rôle de production d'oxygène, de nurserie et de nourrissage pour de nombreuses espèces, et de protection contre l'érosion. Il apparaît ainsi un besoin important de pouvoir suivre l'étendue de ces herbiers à l'échelle de l'étang.

En 2017, des efforts importants ont été réalisés pour la cartographie de ces herbiers de zostères, à l'échelle de l'ensemble de l'étang de Berre. Co-financé par l'appel à projet Biodiversité de l'Agence de l'Eau, **le projet HYPERBERRE** est un projet porté par le GIPREB, en collaboration avec le bureau d'étude HYTECH IMAGING.

A travers ce projet, différentes méthodes et moyens ont été utilisées :

- Cartographie par contourage manuel à partir d'orthophotographies satellites et aéroportées.
- Cartographie automatisée des herbiers par imagerie hyperspectrale (avec création d'une librairie spectrale *in situ* des habitats de l'étang de Berre).
- Utilisations de *vérités-terrains* en plongée avec utilisation d'un GPS haute précision. Ces données récoltées *in situ* permettent de calibrer les cartographies automatisées et ensuite de valider l'ensemble des produits cartographiques.

Ce rapport final du projet HYPERBERRE comporte deux parties distinctes :

- Présentation des cartographies manuelles, publiées en juin 2018 par le GIPREB (rapport annuel de l'Observatoire).
- Rapport de synthèse de la cartographie hyperspectrale (acquisition, librairie spectrale, traitements des données, cartographie automatisée), écrit par HYTECH IMAGING avec des modifications/validations par le GIPREB (rapport validé le 03/05/2018).

Une présentation de ces résultats a été réalisée lors d'un séminaire organisé par le GIPREB à Berre l'Etang le 4 Septembre 2018 (avec entre autre la présence de l'Agence de l'Eau).

Ces études ont donné lieu à deux communications complémentaires : un poster au colloque MERIGEO (Aix en Provence, mars 2018) et une présentation orale lors du colloque SPFT-GH (Montpellier, mai 2018).

L'ensemble de l'étude est décrit sur le site internet du GIPREB avec les posters et présentations téléchargeables : <https://etangdeberre.org/comprendre/observatoire-du-gipreb-moyens-et-methodes/description-de-loutil-de-teledetection/projet-hyperberre-cartographie-par-imagerie-hyperspectrale/>

1 Cartographie des herbiers sur orthophotographies (Juin 2018 - GIPREB)

1.1 Méthodologie

Les orthophotographies proviennent de deux sources de données différentes :

- Acquisition aéroportée par HYECH IMAGING les 8 et 9 juin 2017 (résolution 30cm) dans le cadre du projet HYPERBERRE (voir chapitre 2 de ce rapport)
- Données satellites PLEIADES acquises le 22 Juin 2017 (résolution 2m) par le GIPREB.

Le contourage manuel est effectué sur un logiciel de cartographie (QGIS).

Un exemple de contourage validé par utilisation des vérités-terrains est décrit sur les Figure 1 et Figure 2.

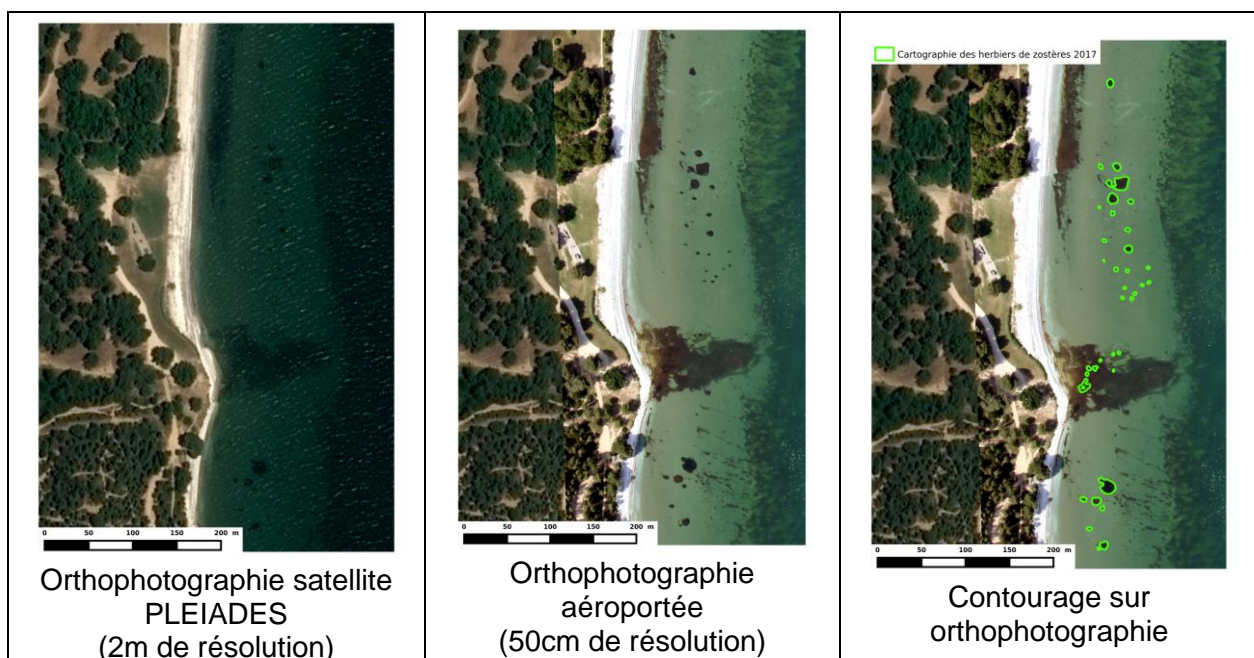


Figure 1: Exemple de contourage manuel d'herbiers de zostères à partir de 2 sources d'orthophotographies (+vérités terrains) au niveau de Figuerolles (Martigues)

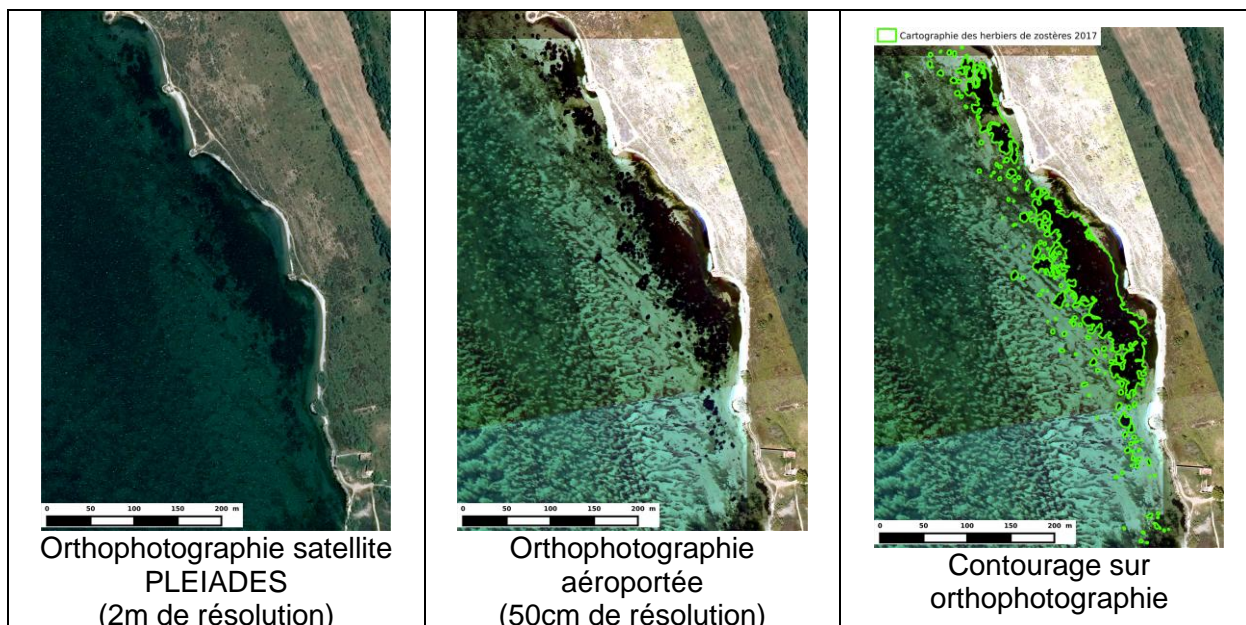


Figure 2 : Exemple de contourage manuel d'herbiers de zostères à partir de 2 sources d'orthophotographies (+vérités terrains) au niveau de Bouquet (Berre l'Étang)

L'utilisation des deux types d'orthophotographies a montré que l'image aéroportée permettait de détourner plus nettement l'ensemble des taches d'herbiers. Pour les herbiers plus étendus comme celui de Bouquet, l'image satellite est cependant satisfaisante.

En 2017, le contourage final pour l'Observatoire du GIPREB est celui basé sur les images aéroportées et validées par les nombreuses « vérités-terrain ». En revanche, l'utilisation d'images satellites de type PLEIADES, moins coûteuses, pourrait être envisagée afin de réaliser un suivi plus régulier (annuel par exemple) à l'échelle de l'ensemble de l'étang. L'ensemble de ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un stage de Master 2.

1.2 Cartographie des herbiers : résultats et remarques

Des résultats de la cartographie par contourage manuel sur orthophotographies sont présentés sur la Figure 3 pour les principaux herbiers.

Cette cartographie a permis de mettre en évidence une progression des herbiers de zostères dans l'étang de Berre. **Ils colonisent maintenant 17,9 ha contre 4.4 ha en 2014.** Cette progression s'est faite majoritairement à partir des herbiers existants (Pointe de Berre, Arc, bassin de délimonage et étang de Vaïne) par coalescence des tâches existantes, colonisation latérale mais aussi développement en profondeur. Les herbiers descendent jusqu'à 2 m de profondeur et certaines petites taches peuvent être observées plus en profondeur. Un nouvel herbier s'est formé, à partir de coalescence de petite taches, sur la bordure littorale est (Bouquet) ; de nombreuses nouvelles taches ont également fait leur apparition sur cette même bordure littorale et dans une moindre mesure sur la côte ouest (Ranquet, Figuerolles). Il sera intéressant de suivre le devenir de ces taches pour voir si elles pourront constituer des herbiers dans le futur. Des taches de zostères ne jouent pas un rôle écologique majeur à la différence des herbiers.

Cartographie des principaux herbiers de Zostères

■ Cartographie des herbiers en 2017

- 1 : Pointe de Berre
- 2 : Bassin de délimonage
- 3 : Etang de Vaïne
- 4 : Sud de l'embouchure de l'Arc



Les images du fond proviennent d'images satellites Pleïades

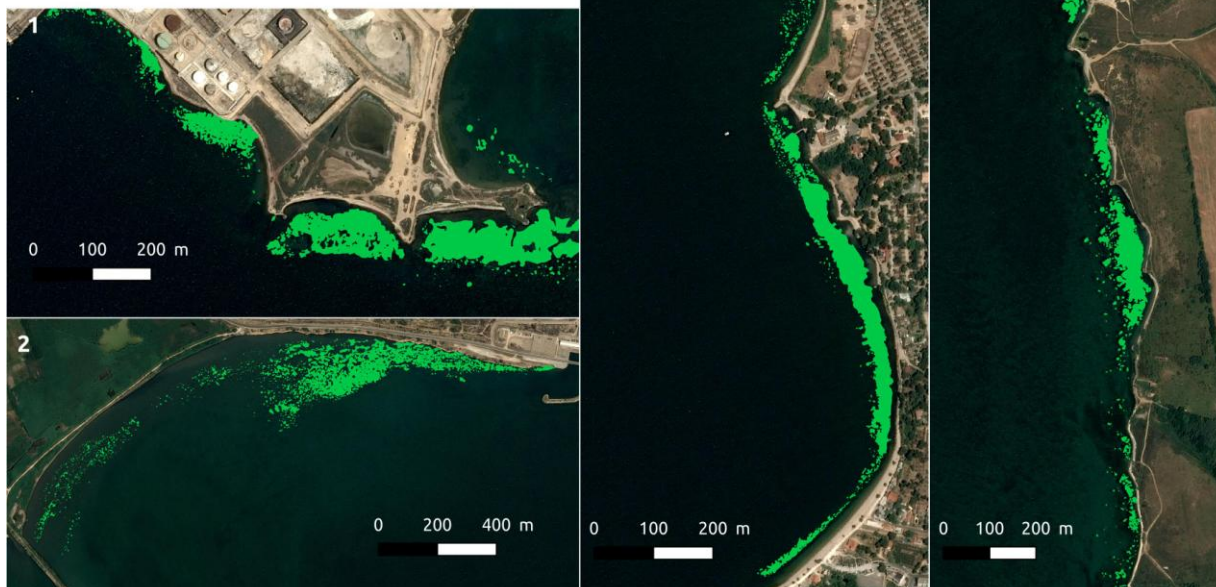


Figure 3: Cartographie des principaux herbiers de zostères en 2017.

Les peuplements sont constitués de zostère naine. Ponctuellement des taches (quelques m²) de *Zostera marina* ont également été observées au cours des différentes prospections de terrain. Cette espèce qui était considérée comme disparue de l'étang de Berre semblerait avoir bénéficié de l'expérience de transplantation réalisée par le GIPREB en 2010. Ce qui n'a pas été le cas pour la zostère naine.

La meilleure transparence de l'eau observée en 2017 devrait avoir permis aux herbiers de zostères de réaliser des réserves énergétiques importantes dans leurs rhizomes. Ces réserves devraient leur permettre un bon début de croissance au printemps 2018 et de mieux résister à des conditions qui seraient moins favorables. En complément, l'augmentation de la surface des herbiers de zostères devrait favoriser de futures colonisations en raison de l'augmentation des boutures disponibles et en constituant une plus grande source de graines si une reproduction sexuée importante a eu lieu en 2017.

La progression des herbiers de zostères est certes relativement importante mais les surfaces couvertes en 2017 restent faibles par rapport aux objectifs du GIPREB (Figure 4) à savoir un herbier continu de 0 à 3 m de fond à l'exception de la partie sud (Jaï) soit un recouvrement de 1 980 ha. La surface en 2017 (17,9 ha) ne représente que 0,9 % de cet objectif. L'écart entre les surfaces actuelles et les objectifs de la DCE (50 % des surfaces potentiellement colonisables par des espèces de référence, environ 1500 ha) reste également considérable pour l'atteinte du bon état écologique.

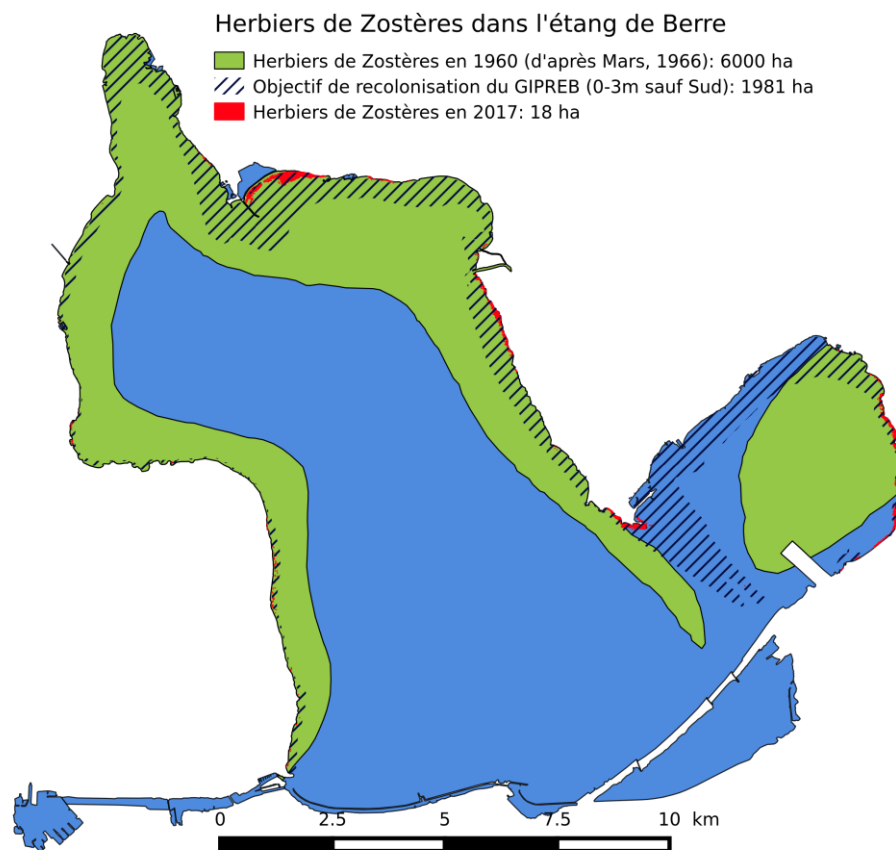


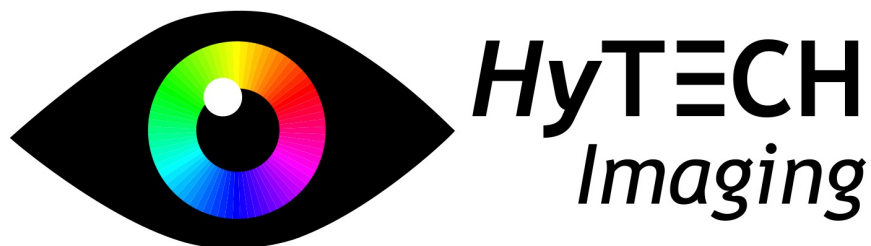
Figure 4: Cartographie des herbiers de zostères de l'étang de Berre en 2017 (en rouge), comparativement à 1966 et à l'objectif de recolonisation défini par le conseil scientifique du GIPREB.

2 Rapport de synthèse sur la méthodologie hyperspectrale (HYTECH IMAGING)

Le rapport de synthèse concernant la cartographie hyperspectrale est un rapport fourni par HYECH IMAGING le 03/05/2018, validé par le GIPREB après différentes évolutions et améliorations réalisées (référence : PS-1707-RS-20180503)

Il décrit l'ensemble de la méthodologie, des traitements sur les données, les méthodes de cartographie, et les résultats sur les zones principales d'intérêt.

Ce rapport est inclus dans ce document à partir de la page suivante.



**Cartographie des herbiers de zostère sur
l'étang de Berre par levé aéroporté
hyperspectral et orthophotos**

Rapport de synthèse

Projet	HYPERBERRE
Client	GIPREB
Type	Cartographie hyperspectrale et photos
Localisation	Etang de Berre
Projet #	PS-1701
Document	Rapport de synthèse
Document #	PS-1701-RS-20180503
Révision	1.1
Préparé	Simon GUEGUEN/Nicolas THOMAS
Approuvé	Marc LENNON
Date	03/05/2018

Suivi des modifications

Rév.	Auteur	Date	Commentaire
0.1	SGU	24/11/2017	Document initial
1.0	NTH	10/03/2018	Validation – ajout section traitements
1.1	NTH	03/05/2018	Prise en compte des commentaires GIPREB

Diffusion :
GIPREB

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	4
2	Zone d'intérêt	5
3	Instrumentation	9
3.1	Équipement de l'aéronef.....	9
3.2	Caractéristiques des capteurs aéroportés.....	10
3.3	Caractéristiques des capteurs pour les mesures sous-marines.....	10
4	Déroulement et analyse des levés spectroradiométriques de terrain	11
4.1	Déroulement et description de la bibliothèque acquise.....	11
4.2	Analyse de la bibliothèque spectrale.....	12
5	Déroulement de la mission aéroportée et des acquisitions	16
6	Traitement des données photos	16
7	Pré-traitement des données hyperspectrales	19
7.1	Schéma général de pré-traitement.....	19
7.2	Calibration radiométrique (L0→ L1a).....	19
7.3	Orthorectification (L1a→ L1b).....	19
7.4	Corrections atmosphériques (L1b→ L1c).....	20
7.5	Post-correction empirique.....	21
8	Traitement de données hyperspectrales pour la cartographie des herbiers de Zostères	23
8.1	Suppression de la colonne d'eau.....	23
8.2	Méthode de cartographie des herbiers de Zostères.....	25
8.3	Résultats de cartographie.....	31
9	Conclusion	35

1 Introduction

Ce document constitue le rapport de synthèse de la société Hytech-Imaging, relatif à la cartographie des herbiers de zostère sur l'étang de Berre par levé aéroporté hyperspectral et orthophotos réalisé dans le cadre du contrat-cadre de collaboration « académique » entre le GIPREB et HYTECH IMAGING.

Le levé aéroporté a été réalisé entre le 08 et 10 Juin 2017 à l'aide d'un capteur hyperspectral imageur de type Hyspex VNIR 1600 et d'un capteur photo EOS 5D MKII, embarqués sur plate-forme aéroportée de type Partenavia P68 Observer, parallèlement à la réalisation d'un librairie spectrale par le GIPREB.

Le présent document présente un rappel de la zone d'intérêt, décrit la configuration des capteurs utilisée, le déroulement du levé aérien et de l'acquisition de la bibliothèque spectrale, les caractéristiques de la bibliothèque spectrale acquise, les étapes de prétraitements d'images réalisées et la méthode de cartographie des zostères développée et mise en œuvre lors de cette étude. Il présente et analyse enfin les cartes de zostère obtenues sur les zones d'intérêt.

2 Zone d'intérêt

La zone d'intérêt du GIPREB est la zone de bathymétrie de l'étang de Berre comprise entre 0 et 3m. Cette zone se trouve dans l'espace aérien proche de l'aéroport de Marseille-Provence et partiellement dans l'espace aérien de la base d'Istres.

En prenant en compte ces contraintes, et en accord avec le GIPREB, deux jeux de polygones d'acquisition ont été définis. Un jeu pour un levé dit à « Haute altitude » (2150m) permettant d'obtenir une couverture globale de la zone d'intérêt à résolution spatiale 1m pour l'hyperspectral et 30cm pour l'orthophoto. Un jeu pour un levé dit à « Basse altitude » (1250m) permettant d'obtenir une couverture partielle de la zone d'intérêt, sur les sites pilotes, à résolution spatiale 50cm pour l'hyperspectral.

La Figure 1 présente les polygones du levé « Haute altitude » et les lignes de vol associées. Le Tableau 1 présente les paramètres de ces polygones. La Figure 2 présente les polygones du levé « Basse altitude » et les lignes de vol associées. Le Tableau 2 présente les paramètres de ces polygones.



Figure 1 Polygones et lignes de vol du levé « Haute altitude »



Figure 2 Polygones et lignes de vol du levé « Basse altitude »

Zone/Polygone	A1Z01	A1Z02	A1Z03	A1Z04	A1Z05	A1Z06	A1Z07	A1Z08	A1Z09	A1Z10
Résolution spatiale	1m	1m	1m	1m	1m	1m	1m	1m	1m	1m
Hauteur de vol	2150m	2150m	2150m	2150m	2150m	2150m	2150m	2150m	2150m	2150m
Angle de visée	17°	17°	17°	17°	17°	17°	17°	17°	17°	17°
Recouvrement latéral	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %	35 %
Fauchée utile	411m	411m	411m	411m	411m	411m	411m	411m	411m	411m
Surface acquise	10,6km2	11,7km2	9,3km2	13,2km2	13km2	3,9km2	11,8km2	8,18km2	2,37km2	11,12km2
Surface cartographiée	6,9km2	7,6km2	6,0km2	8,55km2	8,5km2	2,55km2	7,6km2	5,3km2	1,54km2	7,78km2
Orientation des lignes de vols	NO-SE	O-E	NO-SE	NO-SE	NE-SO	NO-SE	NE-SO	N-S	O-E	N-S
Nombre de lignes de vol	3	5	3	4	4	2	3	2	1	3
Gamme spectrale	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm
Nombre de bandes spectrales	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
Résolution spectrale	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm

Tableau 1 : Paramètres d'acquisition du levé hyperspectral pour les vols à Haute Altitude

Zone/Polygone	A2Z01	LZ01	LZ02	LZ05
Résolution spatiale	50cm	50cm	50cm	50cm
Hauteur de vol	1250m	1250m	1250m	1250m
Angle de visée	17°	17°	17°	17°
Recouvrement latéral	35 %	35 %	35 %	35 %
Fauchée utile	230m	230m	230m	230m
Surface acquise	12,17km ²	9,69km ²	10,6km ²	10,59km ²
Surface cartographiée	7,9km ²	6,3km ²	6,94km ²	6,88km ²
Orientation des lignes de vols	NO-SE	NO-SE	O-E	NE-SO
Nombre de lignes de vol	9	5	8	7
Gamme spectrale	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm	400-1000nm
Nombre de bandes spectrales	160	160	160	160
Résolution spectrale	4.5nm	4.5nm	4.5nm	4.5nm

Tableau 2 : Paramètres d'acquisition du levé hyperspectral pour les vols à Basse Altitude

3 Instrumentation

3.1 Équipement de l'aéronef

Un aéronef bimoteur non pressurisé de type Partenavia P98 Observer a été utilisé pour la campagne (Figure 3).



Figure 3 Aéronef Partenavia P68 Observer utilisé pendant la campagne

L'instrumentation installée dans l'aéronef pour le levé hyperspectral comprend les éléments suivants :

- Capteur hyperspectral Hypspx VNIR-1600-SN0014
- Capteur photo EOS 5D MKII
- Centrale inertielle IMAR iTrace RT F200 avec récepteur GPS L1/L2 Omnistar
- Antenne GPS avionique Omnistar L1/L2
- Système d'aide à la navigation
- Rack de commande des instruments

Les têtes de capteurs sont montées dans l'habitacle avec une liaison mécanique solidaire de la centrale inertielle (Figure 4). L'antenne GPS est fixée sur le toit de l'appareil. Le rack de commande des instruments et les écrans de visualisation des données sont également installés dans l'habitacle de l'aéronef.

Le système de navigation 3D comprend un dispositif de visualisation des écarts à la route théorique placé face au pilote et un micro-terminal de commande et de visualisation des paramètres de navigation. L'ensemble de ce système de navigation a permis la programmation des lignes de vol et l'assistance au pilotage.

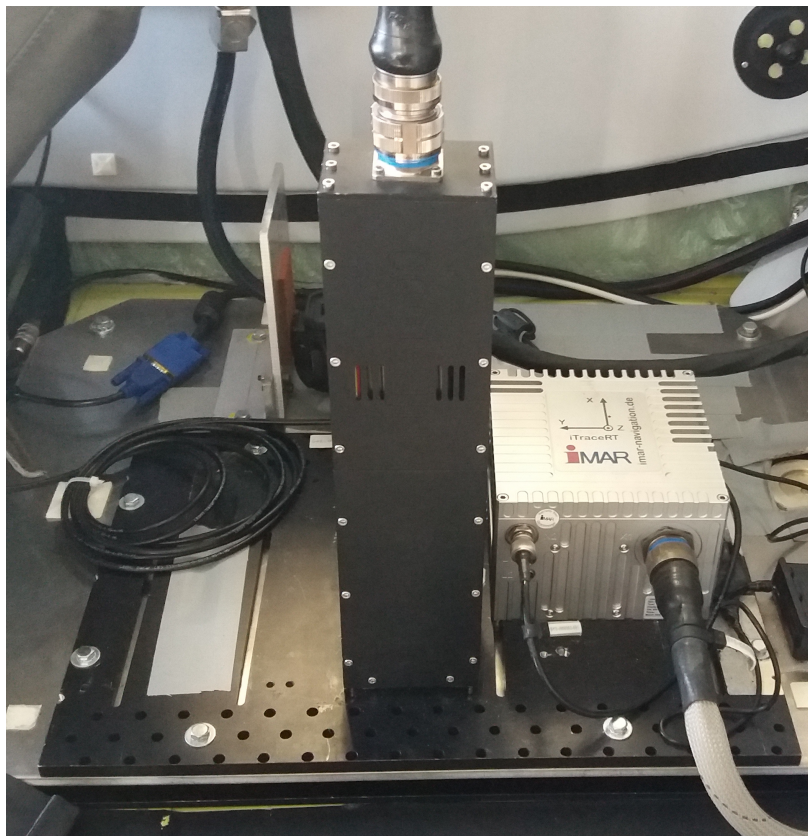


Figure 4 Têtes capteurs VNIR et EOS et centrale i-Trace RT F200

3.2 Caractéristiques des capteurs aéroportés

Le capteur hyperspectral mis en œuvre présente les caractéristiques suivantes :

Module	Détecteur	Pixels spatiaux	FOV across-track	iFOV across / along-track	Gamme spectrale	Résolution spectrale	Echantillonnage spectral	Nb bandes spectrales	Dynamique	Vitesse acquisition max.
VNIR-1600	Si CCD	1600	17°	0.18 / 0.36 mrad	0.4 – 1 μ m	4.5 FWHM	3.7 nm	160	12 bit	120 fps

Tableau 3 : Caractéristiques du capteur hyperspectral mis en œuvre

Le capteur EOS 5D-MKII mis en œuvre présente les caractéristiques suivantes :

Module	Détecteur	Pixels spatiaux	FOV across/along track	iFOV across / along-track	Nb bandes	Dynamique
EOS 5D MKII	CMOS	5 616 × 3 744	40°/27°	0.124 mrad	3	14 bit

Tableau 4 : Caractéristiques du capteur EOS 5D-MKII mis en œuvre

3.3 Caractéristiques des capteurs pour les mesures sous-marines

Parallèlement aux levés aéroportés, des levés spectroradiométriques ont été réalisés à l'aide du spectrodiamètre GER-1500 en caisson étanche (Figure 5) afin de pouvoir effectuer des mesures sur les peuplements et substrats immergés. Ses caractéristiques principales sont :

Module	Détecteur	Gamme spectrale	Résolution spectrale	Nb bandes
GER-1500	Si photo diode	0.35 – 1.05 um	3.2 FWHM	512

Tableau 5 : Caractéristiques du capteur GER-1500 mis en œuvre

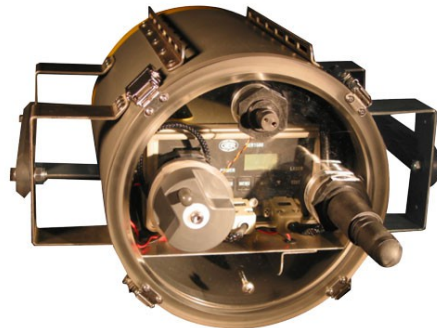


Figure 5 Spectroradiomètre GER-1500 en caisson étanche

4 Déroulement et analyse des levés spectroradiométriques de terrain


4.1 Déroulement et description de la bibliothèque acquise

Les levés spectroradiométriques ont été réalisés sur l'étang de Berre les 4, 9, 15, 16 et 17 mai 2017 par le GIPREB. Ces levés ont permis de constituer une bibliothèque de 60 cibles spectrales comportant des substrats (Sables, Roches...) et des types de peuplement purs ou mixtes (*Z.noltii*, Ulves, *Polysiphonia*...).

Chaque fiche de la bibliothèque correspond à une cible levée par 5 mesures consécutives. Elle présente la cible en photo sous trois niveaux de zoom, les paramètres d'acquisition et la description de la cible, la luminance solaire, la luminance de la cible, et la réflectance calculée ainsi que son écartype sur les 5 mesures réalisées. Un exemple de fiche de la bibliothèque est présenté en Figure 6 .

L'intérêt de la réalisation d'un tel levé est d'une part de pouvoir évaluer la discriminabilité spectrale des différents substrats et peuplements présents sur la zone d'intérêt, d'autre part de pouvoir mieux appréhender la complexité de la scène et les difficultés qu'elle peut engendrer lors du traitement des images aéroportées. Les levés ont par exemple mis en évidence la présence de limon sur les *Zostera Noltii* ainsi que la présence importante d'épiphytes par endroits sur ces mêmes *Zostera Noltii*. Ce type d'éléments couvrant les peuplements d'intérêt complexifie les procédures de classification automatiques.

Par ailleurs la bibliothèque spectrale peut être utilisée comme donnée d'entrée par certains algorithmes de classification des images aéroportées.

<p>INFORMATIONS</p> <p>Location: - Area : Bouquet - Site : SL3 - Longitude : 871530.7429 - Latitude : 6268601.151</p> <p>Time: - Date : 170517 - Acquisition Time : from 10:39:19 UT to 10:39:58 UT</p> <p>Spectrometry: - Spectrometer Id. : GER1500 - Surface description : Z.noltii - Family : Phanerogames - Type : Zostera - Weather conditions : Wave Focusing - Number of points : 5 (from 56 to 60) - Number of acquisitions : 15 - Observations : ensoleillement direct; Z non epiphytes avec une densite de 100%</p> <p>measured by GIPREB</p>	<p>PHOTOGRAPHIES</p>  <p style="text-align: center;"> Site view Target view Target zoom </p>
---	--

MEASUREMENTS

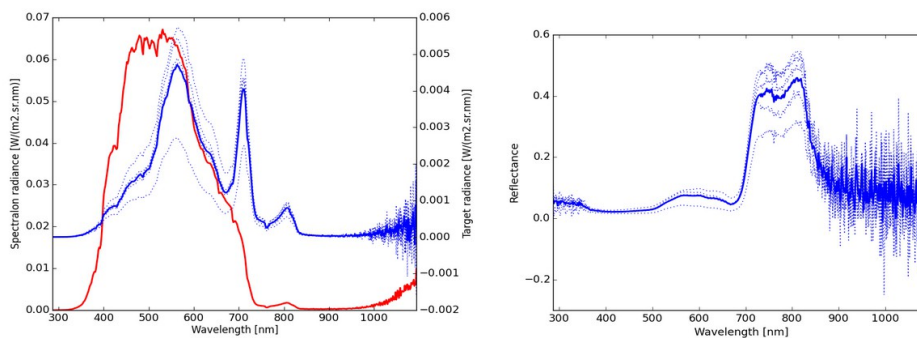


Figure 6 Exemple de fiche de la bibliothèque spectrale constituée

4.2 Analyse de la bibliothèque spectrale

Pour l’analyse de la bibliothèque spectrale, parmi les 60 fiches présentes, 40 ont été retenues considérées comme des cibles « pures ». Ces 40 fiches représentent 199 mesures de spectres réparties comme suit sur 9 peuplements/substrats distincts :

Peuplement/Substrat	Nombre de spectres
Chetomorphe	5
Ectocarpacea	13
Gracilaires	28
Polysiphonia	20
Roche	16
Sable	39
Ulves	22
Zmarina	18
Znoltii	38
TOTAL	199

Figure 7 Nombre de spectres utilisés pour l’analyse, pour chaque substrat/peuplement

A partir de ces données il est possible de calculer une moyenne des spectres de réflectance pour chaque substrat/peuplement. Cette moyenne est présentée en Figure 8 sur la gamme de longueurs d'onde en pratique exploitable pour de la cartographie sur zones immergées (le signal sur les longueurs d'onde supérieures, du proche infrarouge, est rapidement absorbé par la colonne d'eau). On constate sur ce graphe des caractéristiques spectrales discriminantes marquées entre les 9 éléments, même si entre *Zostera Marina* et *Zostera Noltii*, la différence porte uniquement sur un faible écart de niveau de l'ordre de 1 à 2 % de réflectance.

Cependant si l'on représente également l'intervalle de confiance à 68 % (Figure 9) on constate une forte variabilité intra-classe. Il est déjà possible d'anticiper à partir de ce graphe une difficulté dans la discrimination automatique des substrats les plus sombres et les moins marqués spectralement (*Zmarina*, *Znoltii*, *Ectocarpacea* notamment). Afin de confirmer cette observation, il est possible d'appliquer un algorithme de regroupement hiérarchique en dendrogramme aux 199 spectres traités. L'algorithme organise les spectres, sans connaissance a priori de leur classe d'appartenance, en utilisant un type de distance inter-spectre défini (ici l'angle spectral). Dans le cas idéal, tous les spectres d'une même classe de peuplement/substrat doivent se retrouver dans une même famille distincte des autres.

L'application de cet algorithme aux données (Figure 10), montre, hors anomalies locales, une bonne séparabilité entre les grands ensembles substrat nus (roches, sables), algues rouges (*polysiphonia*, *gracilaires*), et ensemble des autres peuplements (herbiers, algues vertes et brunes). La séparabilité à l'intérieur de ces ensembles est moins bonne. On peut voir notamment qu'il n'y a pas de séparation franche entre *Zostera Noltii* et *Zostera Marina*.

Ce résultat est bien sûr dépendant de la distance utilisée et de certains paramètres de regroupement hiérarchiques, mais il montre certaines limites auxquelles on pourra s'attendre sur la capacité de discrimination des différents peuplements et substrats sur les cartes finales.

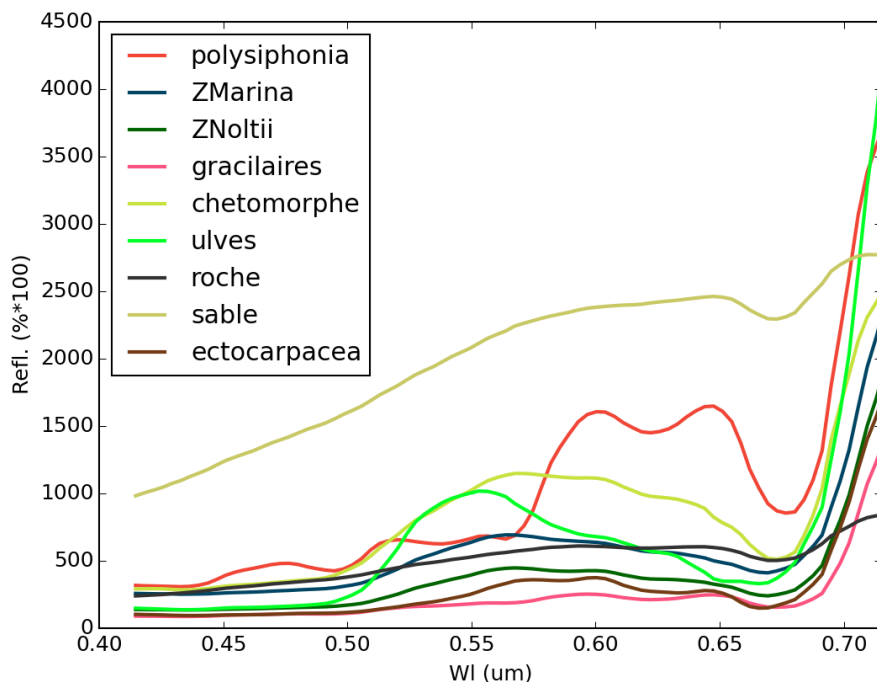


Figure 8 Moyenne des spectres de réflectances disponibles, pour chaque substrat/peuplement

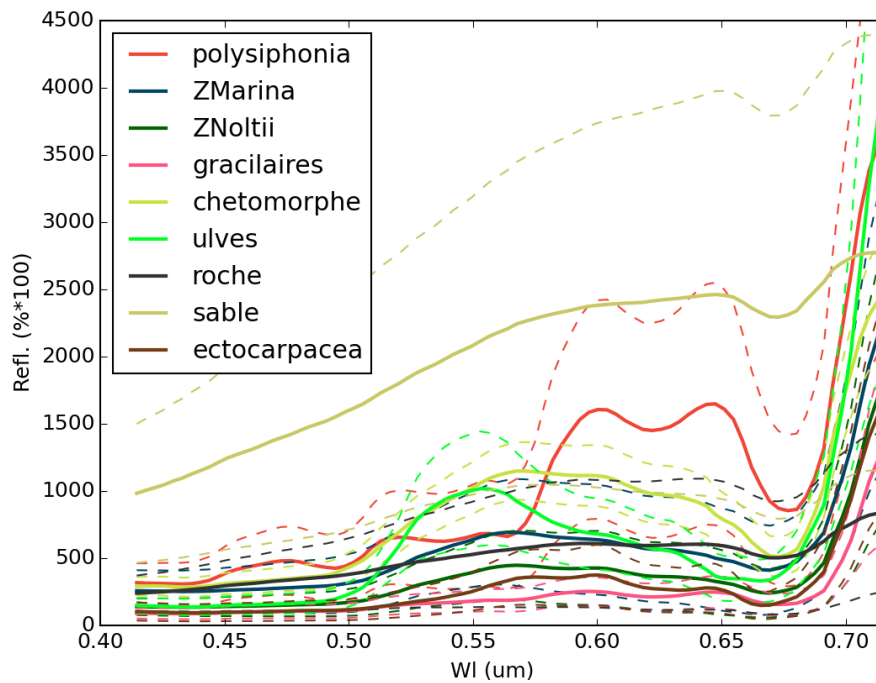


Figure 9 Moyenne des spectres de réflectances disponibles, et intervalle de confiance à 68 % (pointillés), pour chaque substrat/peuplement

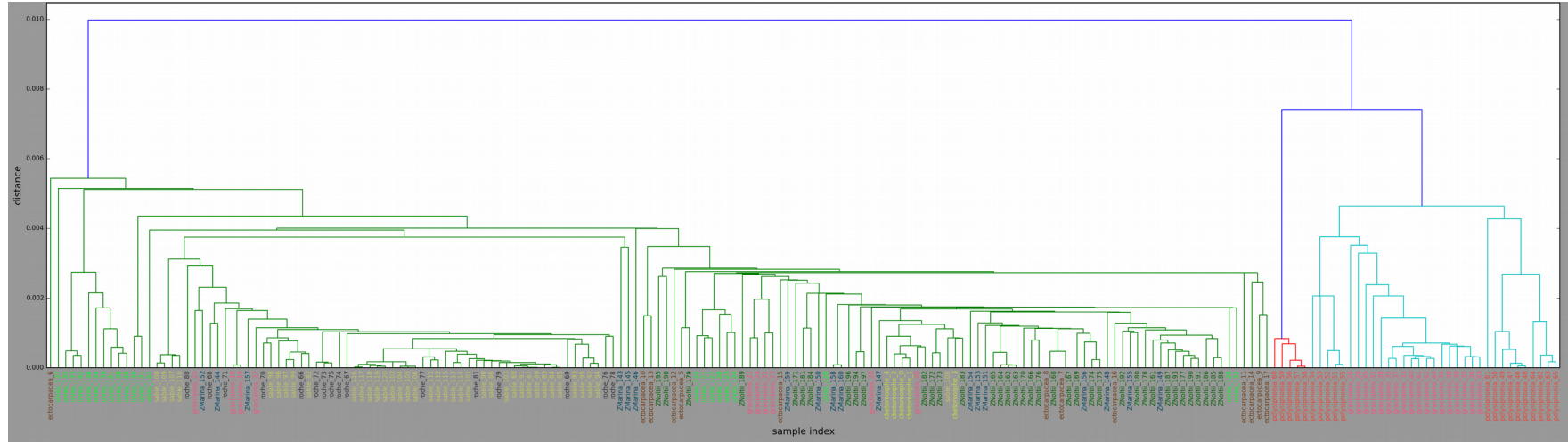


Figure 10 Regroupement hiérarchique automatique en dendrogramme des 199 spectres de la bibliothèque analysés avec une distance de type « angle spectral ».

5 Déroulement de la mission aéroportée et des acquisitions

Le levé aéroporté a été réalisé sur trois jours entre le 08/06/2017 et le 10/06/2017.

Les levés « Haute altitude » ont été réalisés :

- Le 8 juin de à 09h52 à 13h19 UT
- Le 9 juin de à 12h32 à 14h40 UT

Les levés « Basse altitude » ont été réalisés :

- Le 9 juin de à 10h15 à 12h21 UT
- Le 10 juin de à 10h12 à 12h28 UT

Le niveau relatif de turbidité de l'étang était bon sur cette période, avant augmentation du taux de phytoplancton du fait de l'augmentation de la température.

Les conditions atmosphériques était assez bonnes (éclairage quasi direct, léger voile de haute altitude).

Le niveau de vent a évolué tout au long des trois journées. La première journée fut marquée par la présence d'un vent dans l'après-midi, avec des rafales jusqu'à 40 Km/h produisant un peu d'agitation et des effets de surface (« glint »). Cela a impliqué le revol d'une partie des polygones « Haute altitude » le 9 juin. Les conditions de vent, et donc de surface, étaient optimales lors de la journée du 9 juin. Concernant la journée du 10 juin, les conditions étaient légèrement moins favorables que le jour précédent, avec quelques rafales de plus de 30Km en fin d'après-midi.

6 Traitement des données photos

Le traitement des données photos a consisté à leur orthorectification sur la surface de l'étang de Berre et à leur mosaïquage sur les zones d'intérêt.

Il a été choisi pour ce projet d'utiliser un système d'orthophotographie simplifié basé sur un reflex numérique (EOS 5D-MKII).

Ce type de système, qui permet de réduire les coûts d'acquisition en comparaison des systèmes de photogrammétrie de précision, ne dispose pas des mêmes solutions de synchronisation photo/centrale inertielle et de calibration géométrique et radiométrique. Par conséquent, pour le système utilisé, une post-synchronisation par optimisation entre photos et centrale inertielle est nécessaire. Elle a été réalisée une première fois lors de l'installation du capteur, sur un site de calibration géométrique situé sur l'aéroport d'Angers, dans le but de déterminer les offset d'angles entre tête capteur et centrale inertielle, spécifiques à l'installation.

Elle a ensuite été réalisée pour chacun des levés à l'aide de points de contrôle au sol.

A l'issue de cette synchronisation, les photos ont pu être orthorectifiées au niveau de la surface de l'étang. La précision planimétrique obtenue est de quelques mètres. Les photos ont

ensuite été mosaïquées de façon optimale, pour réduire au maximum, à l'aide des recouvrements entre photos, le niveau de « glint » sur la mosaïque finale.

La mosaïque finale a ensuite été découpée sur l'emprise exacte des polygones d'acquisition de « Haute altitude »

La Figure 11 présente la carte de l'orthophoto obtenue. La Figure 12 présente un zoom sur la zone de Bouquet. L'image produite a ainsi pu être utilisée par le GIPREB pour détourner manuellement les herbiers de Zostère afin de constituer une donnée de référence pour la validation de la méthode hyperspectrale.



Figure 11 Orthophoto à 30cm de résolution spatiale sur la zone de bathymétrie 0-3m de l'Etang de Berre

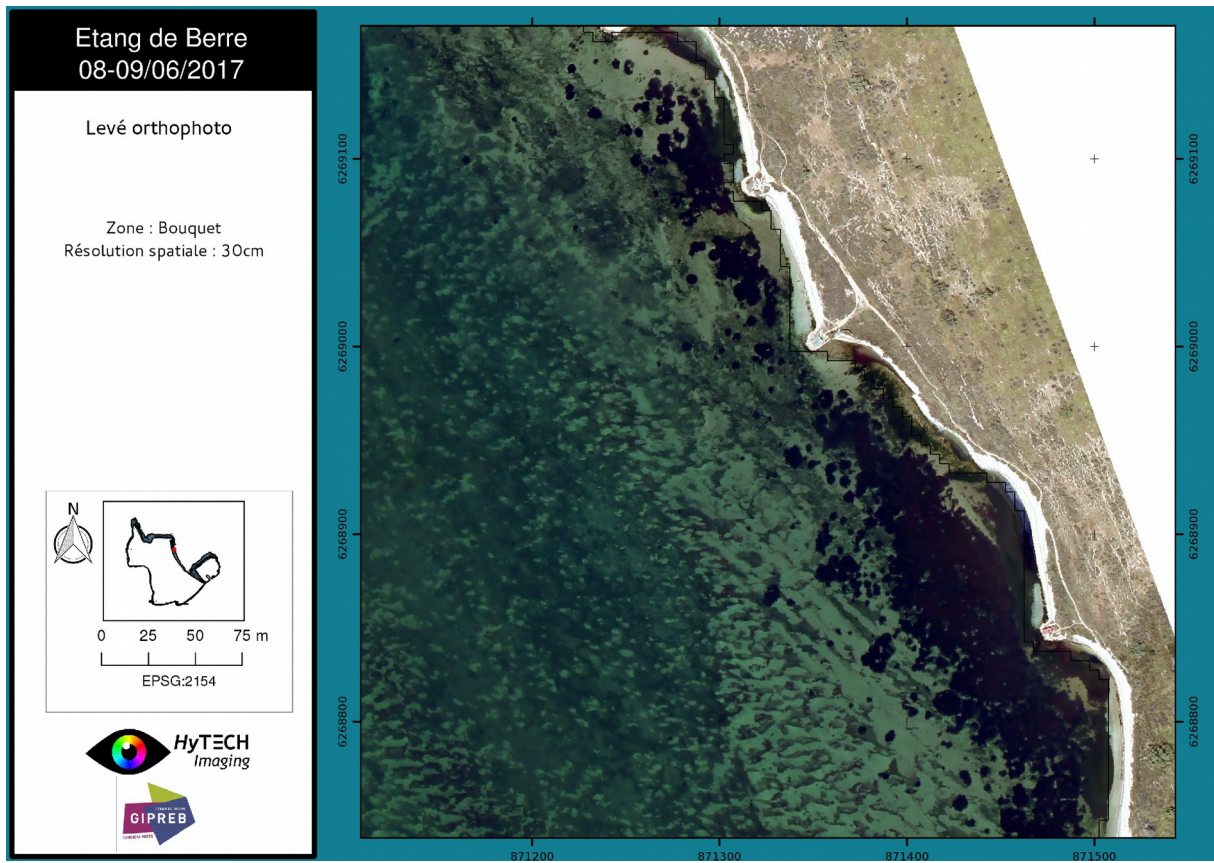


Figure 12 Orthophoto à 30cm de résolution spatiale sur la zone de bathymétrie 0-3m de l'Etang de Berre – Zoom sur zone de Bouquet

7 Pré-traitement des données hyperspectrales

7.1 Schéma général de pré-traitement

Les données ont été pré-traitées par la chaîne intégrée HYPIP® d'Hytech-Imaging permettant de passer des données brutes (L0) aux données de réflectance de surface (L1c) (Figure 13). Cette chaîne intègre les solutions PARGE et ATCOR-4 de ReSe.

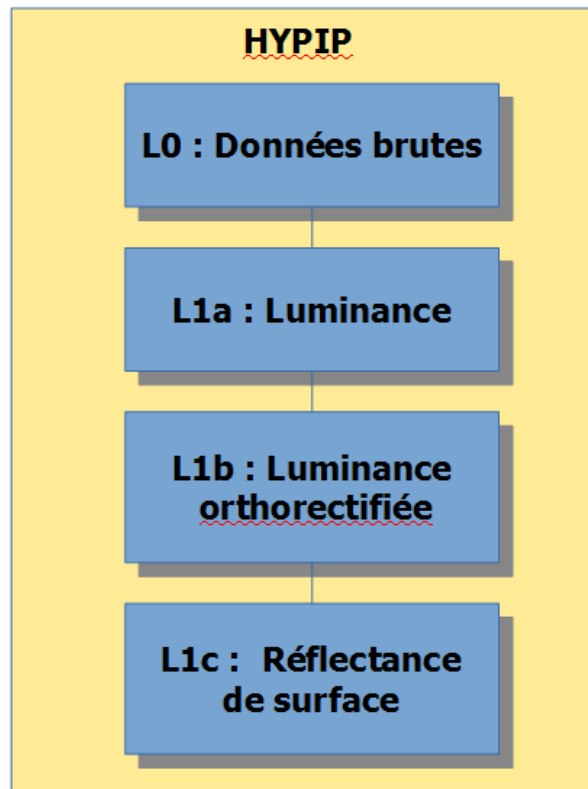


Figure 13 Schéma bloc de la chaîne de traitement HYPIP®

7.2 Calibration radiométrique (L0 → L1a)

La calibration radiométrique est réalisée à l'aide des paramètres de calibration statiques du constructeur (notamment efficacité quantique, réponse relative de la matrice de pixels et calibration spectrale) et de la mesure de courant noir de chaque image, intégrés dans les headers des données brutes.

Au cours de cette étape, les images sont également découpées en « slices » afin de diminuer l'espace disque requis pour l'étape de d'orthorectification.

7.3 Orthorectification (L1a → L1b)

Au cours de cette étape de traitement les images sont orthorectifiées.

Les images produites ont une résolution de grille spatiale de 1m pour les vols à plus de 2150m et 50cm pour le vol à 1250m.

La précision géométrique relative obtenue sur la zone d'intérêt est de l'ordre de deux pixels (Figure 14).

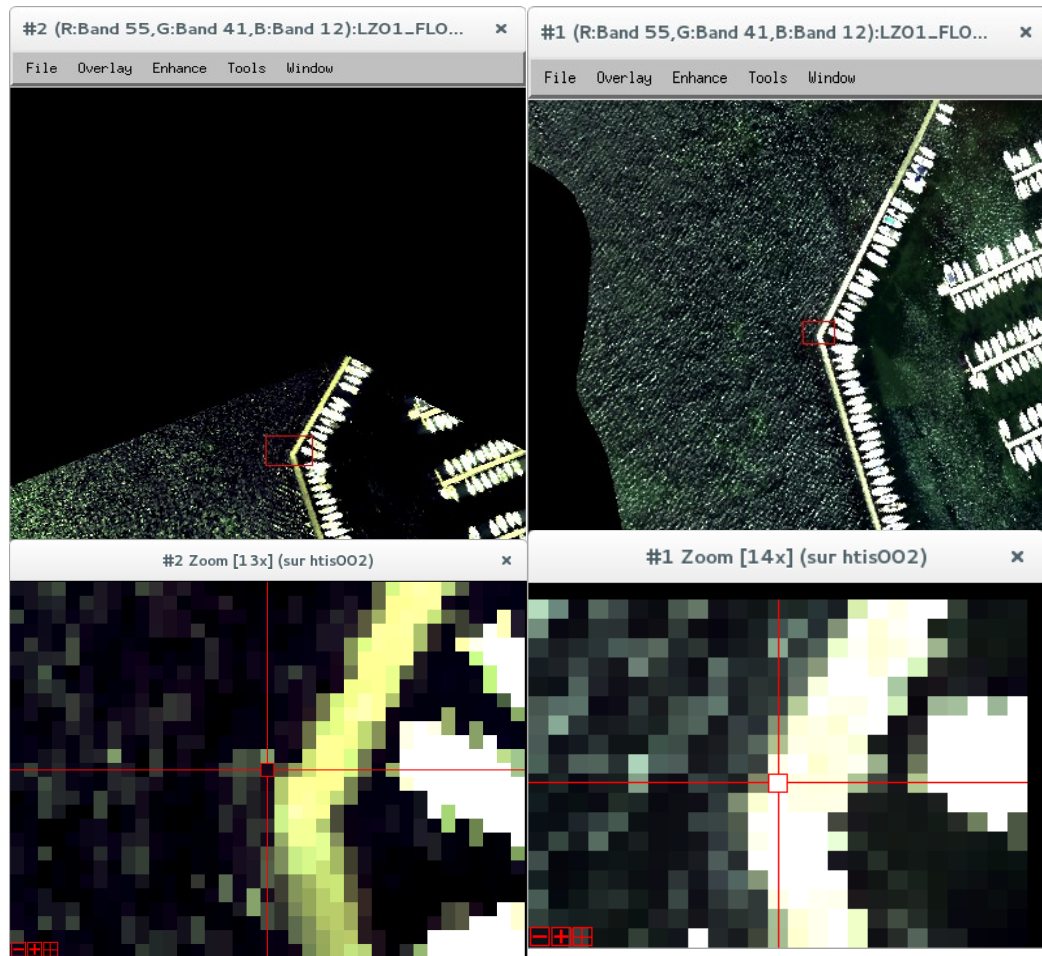


Figure 14 Illustration de la précision géométrique relative atteinte sur le produit VNIR 50cm;
Zone LZ01 : 2017/06/09

7.4 Corrections atmosphériques (L1b → L1c)

Les corrections atmosphériques ont été réalisées par modèle ATCOR-4.

Le modèle d'aérosols utilisé est « Maritime ».

La vapeur d'eau est estimée par ATCOR-4.

La visibilité est estimée par ATCOR-4 et configurée comme constante pour chaque levé. Pour tous les levés réalisés, une visibilité de 40Km a été retenue.

La Figure 15 présente des exemples de spectres de réflectance des données de niveau L1c.

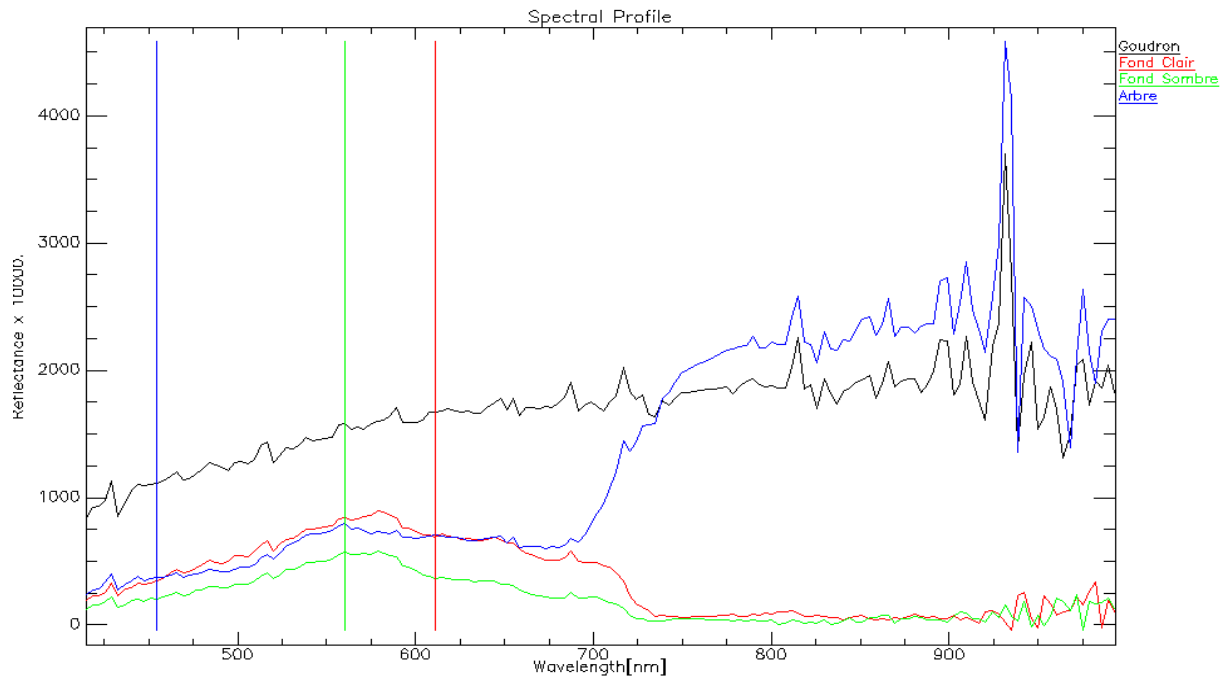


Figure 15 : Exemple de spectres de réflectance de surface de la zone LZ05– Produit VNIR 50cm
10/06/2017

7.5 Post-correction empirique

Grâce à l'installation de bâches calibrées en bordure de l'étang, une post-correction atmosphérique empirique a pu être appliquée sur les données acquises. Il s'agit d'une correction linéaire pour chaque bande spectrale qui permet de corriger des effets atmosphériques locaux non ou mal pris en compte par le modèle, en particulier le niveau général du spectre dans certaines bandes spectrales, ainsi que de réduire le niveau de bruit systématique sur les données.

La Figure 16 présente des exemples de spectres de réflectance des données de niveau dit « L1c-post » pour le jeu LZ05 50cm. La Figure 17 présente les coefficients appliqués pour cette post-correction.

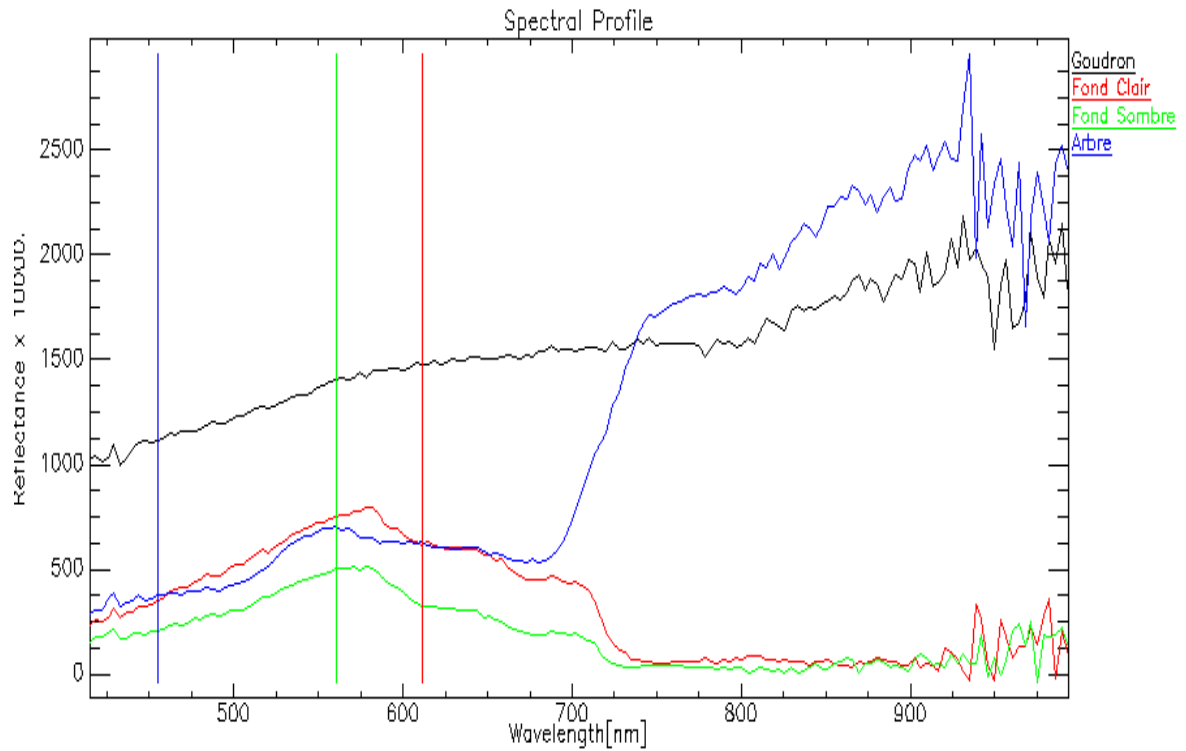


Figure 16 Spectres de réflectances après post-corrrection empirique, zone LZ05– Produit VNIR 50cm 10/06/2017

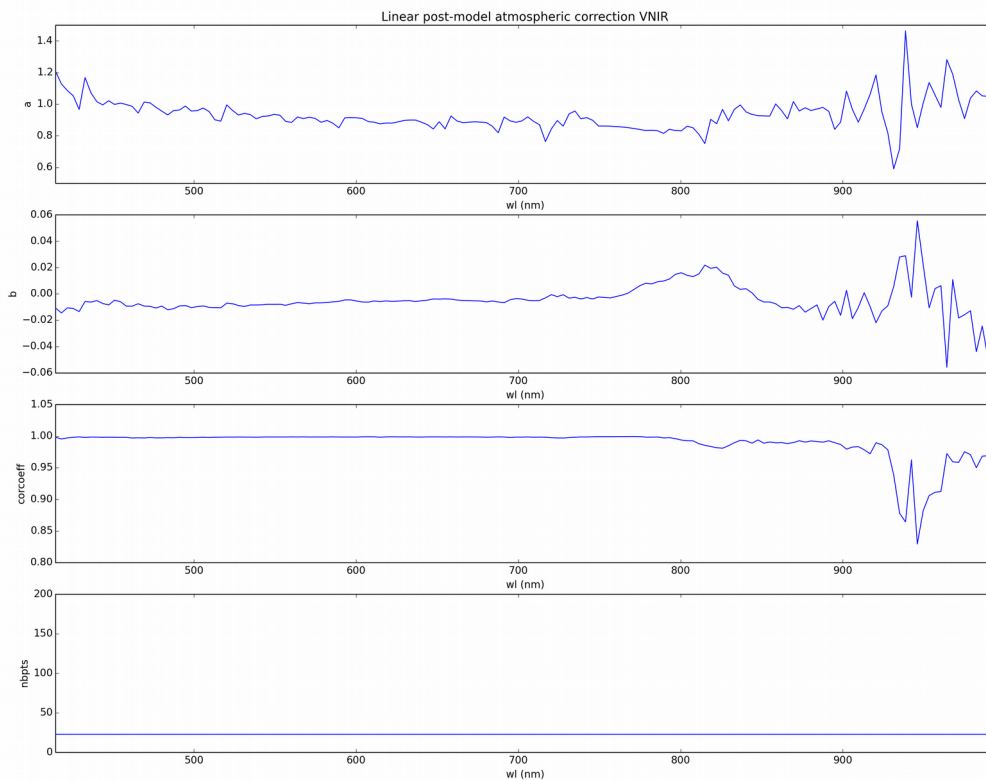


Figure 17 Coefficients de régression appliqués aux données de réflectance surface,zone LZ05– Produit VNIR 50cm 10/06/2017

8 Traitement de données hyperspectrales pour la cartographie des herbiers de Zostères

8.1 Suppression de la colonne d'eau

La cartographie des zostères à partir des images hyperspectrales passe par une première étape consistant à supprimer l'effet de la colonne d'eau sur les images. Ce traitement est réalisé par le logiciel SWIM® (Shallow Water mapping using optical reMote sensor(s)). Le logiciel SWIM® réalise une inversion du modèle de transfert radiatif dans la colonne d'eau (Figure 18), permettant de séparer, grâce à la grande dimensionnalité des images hyperspectrales, la contribution du fond, de la contribution de la colonne d'eau, sur l'image, et d'obtenir ainsi une image de réflectance du fond (Figure 19).

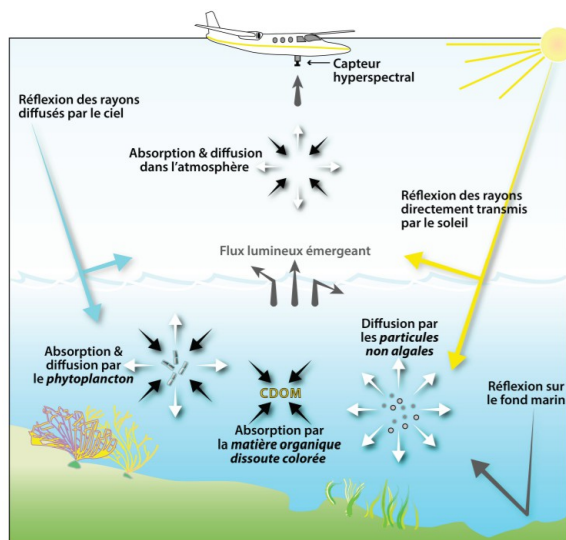


Figure 18 Phénomènes optiques intervenant dans le trajet de la lumière entre le soleil et le capteur hyperspectral (Petit et al., 2017)

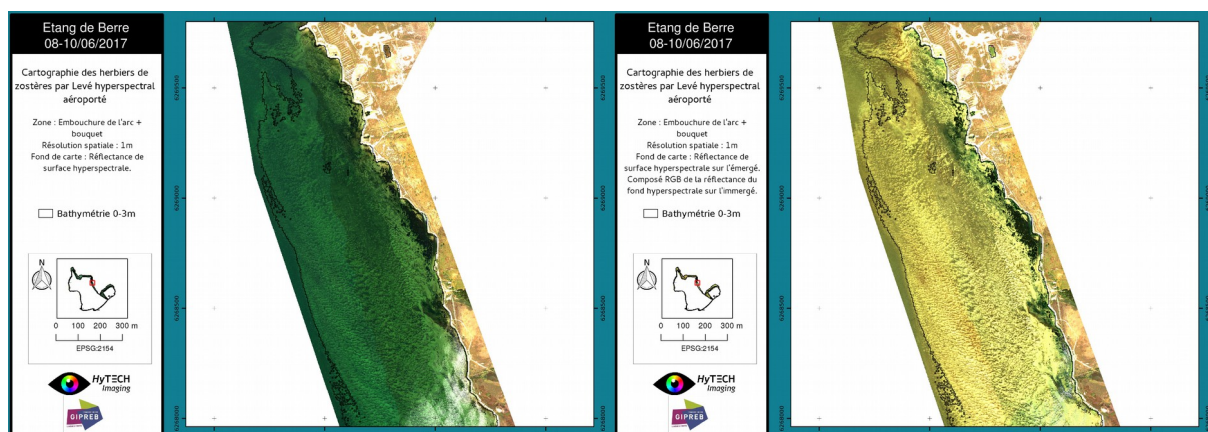


Figure 19 Exemple de suppression de la colonne d'eau par SWIM®, sur la zone « Embouchure de l'Arc - Bouquet ». Gauche : Composé RGB de la réflectance de surface - Droite Composé RGB de la réflectance du fond.

Pour cette étude, le logiciel SWIM® a été configuré spécifiquement de façon à s'adapter aux particularités de la zone, notamment au niveau de phytoplancton élevé en comparaison des niveaux rencontrés sur en zone côtières ouvertes habituellement traitées par SWIM® .

SWIM® a été appliqué à l'ensemble des images issues du levé « Haute altitude » et « Basse altitude » (Figure 20 et Figure 21).

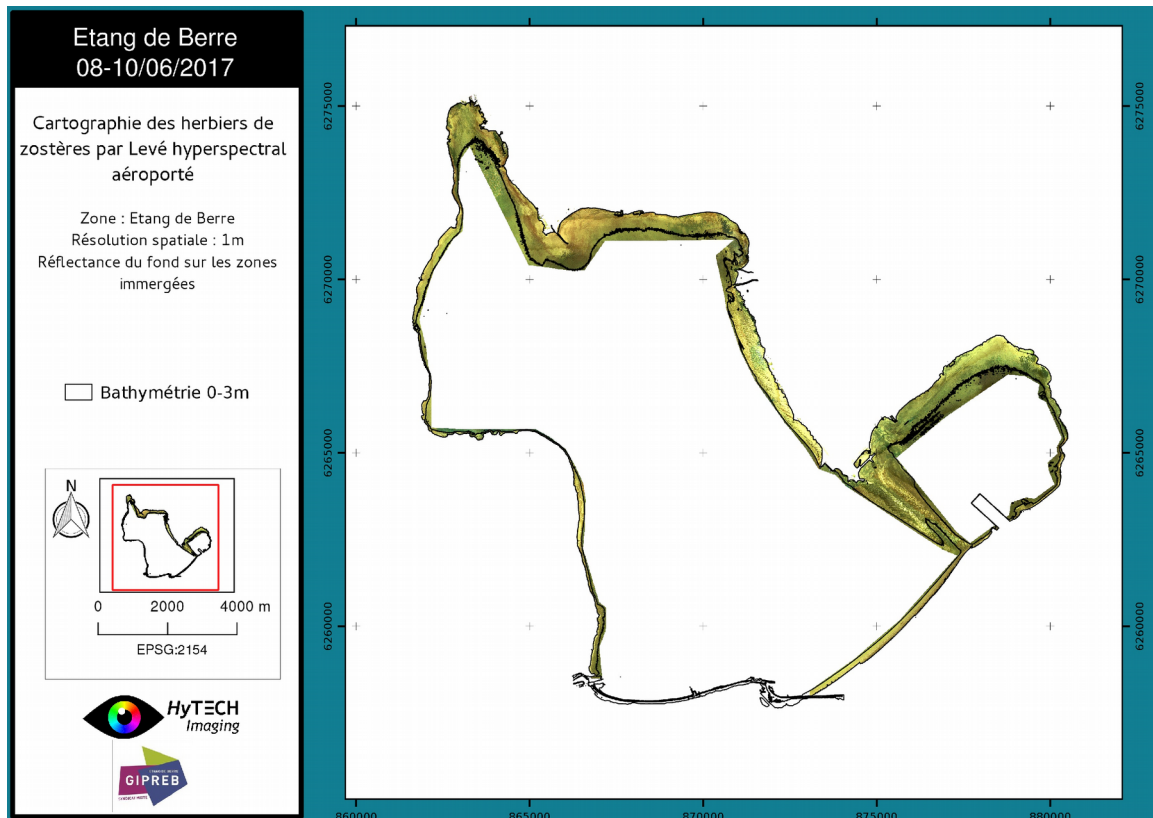


Figure 20 Composé RGB de la réflectance du fond sur l'ensemble du levé « Haute altitude » à 1m de résolution spatiale.

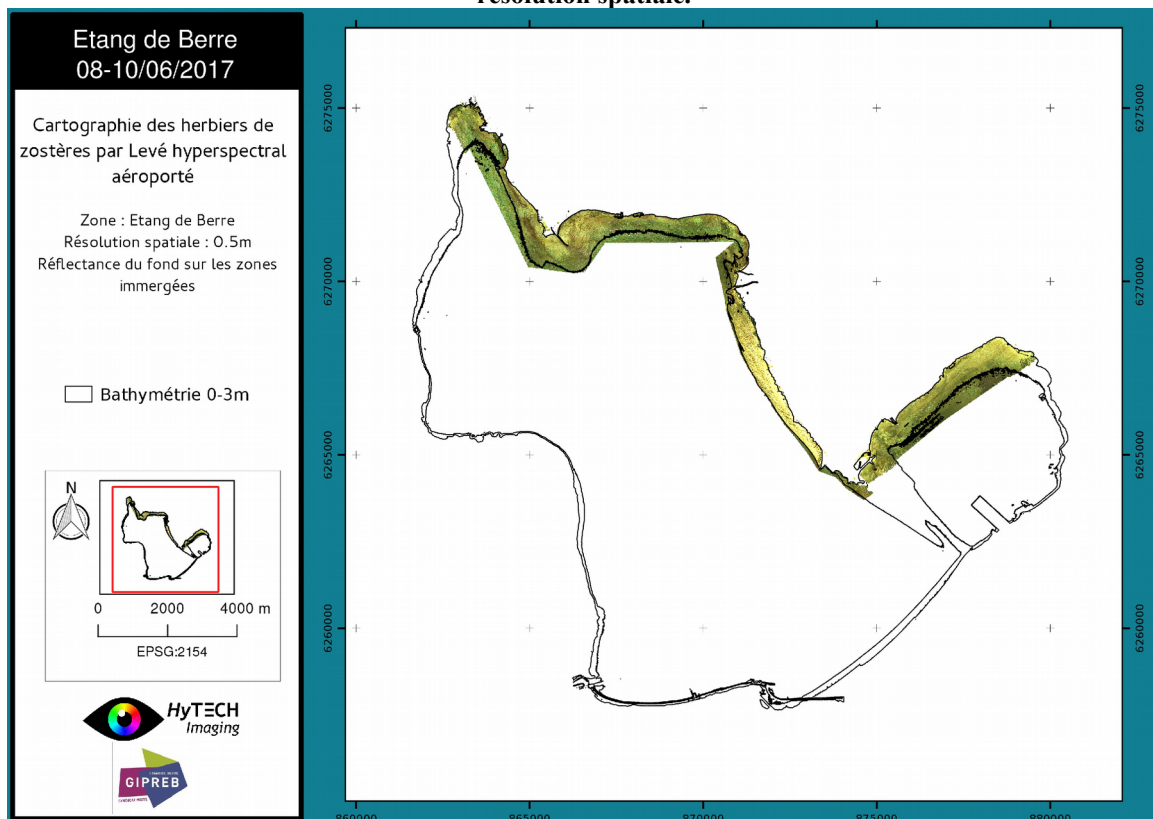


Figure 21 Composé RGB de la réflectance du fond sur l'ensemble du levé « Basse altitude » à 50cm de résolution spatiale.

Les cartes de réflectance du fond produites constituent en elles-même un premier produit à forte valeur ajoutée de l'étude, puisqu'elles permettent de bien discriminer visuellement les zones de présence des herbiers des autres types de fond.

Dans le processus de cartographie, ces cartes de réflectance du fond pourraient être utilisées pour détourner manuellement certains herbiers de Zostères afin de constituer une base de données d'entraînement et de validation pour les algorithmes de classification automatique des images hyperspectrales. Plus informatives visuellement, il est envisageable de les utiliser à la place des orthophotographies.

8.2 Méthode de cartographie des herbiers de Zostères

La cartographie automatisée des zostères constitue la dernière étape et l'aboutissement de tous les traitements préalables.

Dans le cadre de ce projet, l'enjeu consistait à mettre au point une méthode de cartographie robuste à la diversité de forme/texture/couleur des zostères sur l'étang (Figure 22), basée uniquement sur la réponse spectrale des éléments d'intérêt, et nécessitant le minimum possible de connaissance de la zone (données in situ notamment).

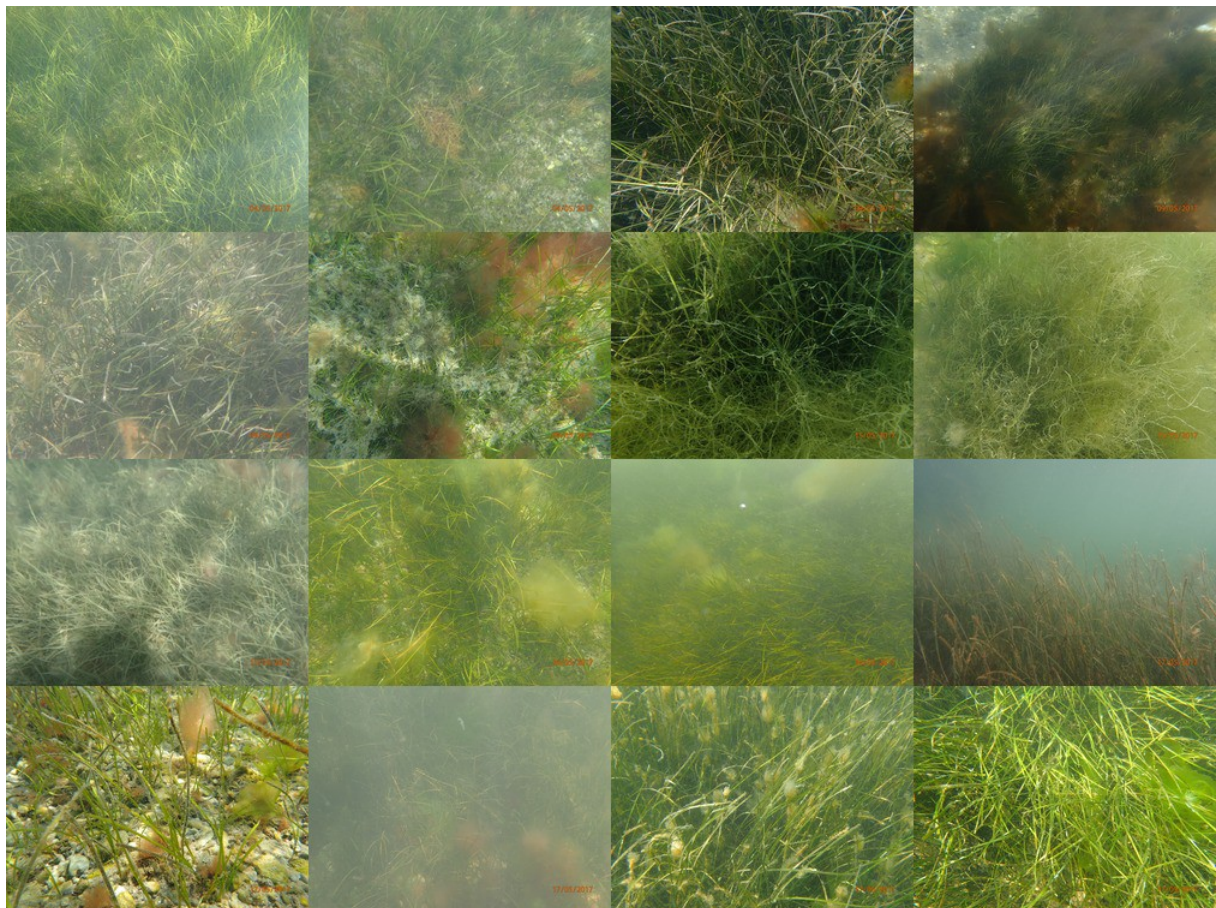


Figure 22 Illustration de la diversité de forme/texture/couleur des Zostère Noltii sur l'Étang de Berre (Extrait de la librairie spectrale)

Plusieurs algorithmes ont été testés pour obtenir des cartes de zostères à partir de la réflectance du fond :

- Démixage linéaire suivi d'une décision sur la base de l'abondance d'herbier obtenue.
- Classification directe par angle spectral avec prise en compte de la diversité intraclasse.
- Classification directe par distance euclidienne avec prise en compte de la diversité intraclasse.

Pour ces trois cas il s'agit d'algorithmes supervisés nécessitant l'apport de spectres de référence des natures de fond recherchées. Aussi deux jeux de spectres de référence ont été testés :

- Spectres issus de la bibliothèque spectrale in-situ
- Spectres prélevés sur patchs connus sur les images de réflectance du fond.

Les spectres de réflectance du fond des images en sortie de SWIM® permettent de bien reproduire les caractéristiques spectrales observées sur les mesures issues de la librairie spectrale (Figure 23). Cependant, on observe généralement une différence de niveau entre spectres de fond mesurés et spectres estimés, ainsi qu'une variabilité intraclasse plus faible sur les spectres estimés. Cela rend difficile l'exploitation directe de la librairie spectrale dans l'algorithme de classification. Une hypothèse pour expliquer cet écart peut provenir d'une difficulté de SWIM® à estimer correctement les paramètres de la colonne d'eau sur cet étang présentant une colonne d'eau globalement riche en chlorophylle et/ou matière en suspension. Nous avons donc choisi d'utiliser une méthode ici plus robuste consistant à extraire des spectres de référence directement de l'image pour l'entraînement des algorithmes de classification.

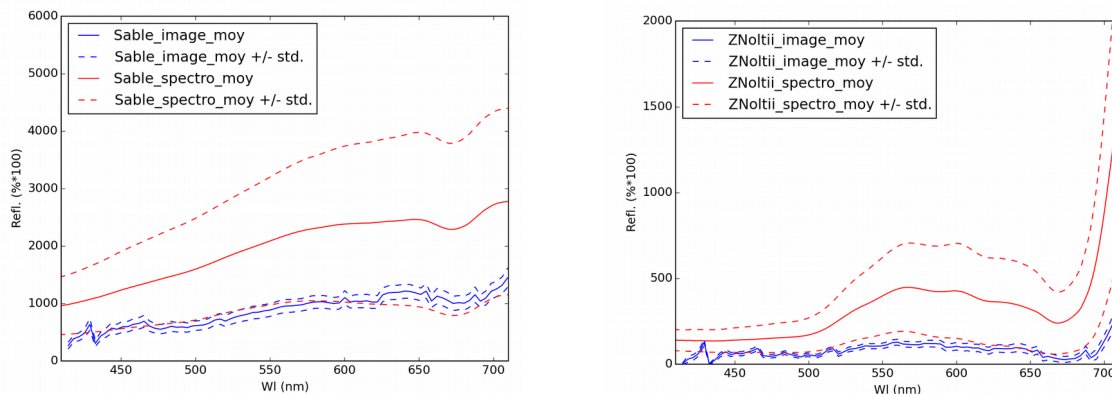


Figure 23 Spectres de réflectance issus de la bibliothèque spectrale (rouge) et de l'image en sortie de SWIM® (bleu), pour du sable et pour Zostera Noltii.

Parmi les trois algorithmes testés, c'est le démixage linéaire, qui a été retenu pour la pertinence et la robustesse des résultats produits sur l'ensemble de l'étang. Les deux autres algorithmes, basés sur la recherche de distances à des spectres « purs », se sont révélés moins robustes à la variabilité intraclasse des herbiers..

Pour la mise en œuvre de l'algorithme de démixage, les spectres de référence ont été prélevés sur le seul site de « Bouquet ». Quatre références (« endmembers ») ont été utilisées : zostères, non-zostère sable, non-zostères algues vertes, non-zostères-mineral_fonce. Notons que la distinction entre zostère Noltii et zostère Marina a volontairement été exclue de l'étude du fait de la forte proximité spectrale entre ces deux peuplements montrée au §4.2. Les spectres de

références utilisés sont présentés en Figure 24. La procédure utilise donc une connaissance a priori très réduite de la zone. Elle permet de produire un masque représentant les peuplements de Zostère.

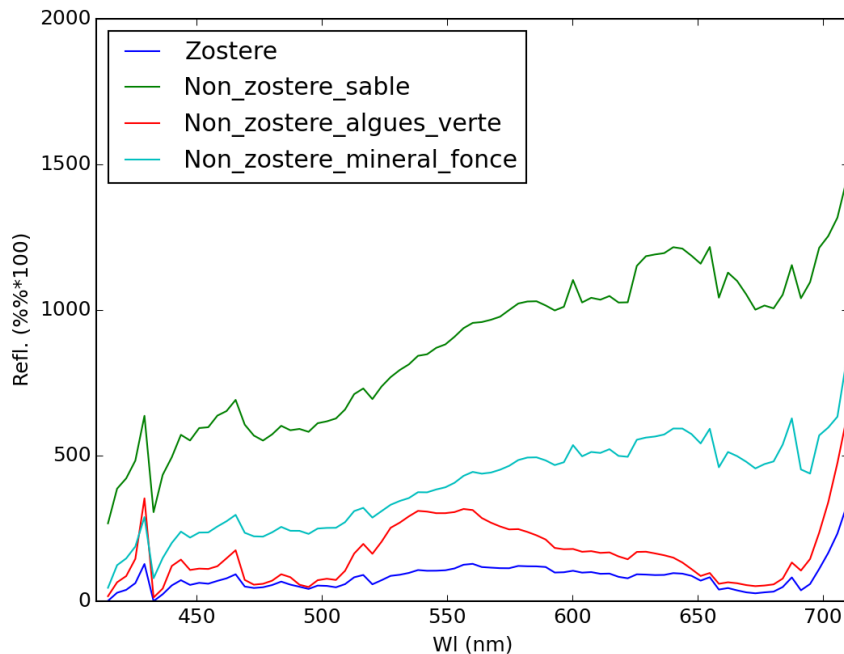


Figure 24 Spectres des 4 endmembers utilisés pour le processus de démixage

Ces masques ont été produits pour les levés « Haute altitude » et « Basse altitude ». Les Figure 25 et Figure 26 présentent le résultat obtenu pour ces deux levés sur la zone de Bouquet. Qualitativement le résultat semble bon dans les deux cas sur ce site, avec une différence difficilement décelable visuellement entre les deux levés.

Une évaluation plus quantitative de l'algorithme est donnée par sa courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) utilisée classiquement dans les algorithmes de détection. Cette courbe présente la relation « probabilité de vrais positifs » (probabilité de détection) en fonction de la « probabilité de faux positifs » (probabilité de fausse alarme) lorsque le seuil de détection varie (ici seuil sur l'abondance en herbier). Afin de produire une telle courbe, il faut disposer d'une vérité terrain représentative. C'est pourquoi cette courbe a été produite sur la zone de Bouquet comportant une connaissance terrain locale exhaustive et précise des herbiers. Les courbes ROC produites sont présentées en Figure 27 pour l'algorithme appliqué à la résolution spatiale 1m et 0.5m. Les points de fonctionnement utilisés pour la cartographie sont également représentés. On note une meilleure performance globale avec la résolution 0.5m même si, sur cette zone d'application, la probabilité de faux positifs reste faible, en dessous de 3 % sur l'ensemble des deux courbes. On peut noter que les courbes ROC n'atteignent jamais 100 % de probabilité de détection (90.9 % pour la résolution 1m, 93.1 % pour 0.5m). Cela s'explique par le premier critère de décision fixe, appliqué préalablement au seuil sur le taux d'abondance. Il consiste à éliminer les pixels pour lesquels l'abondance en Zostere n'est pas supérieure aux trois autres abondances.

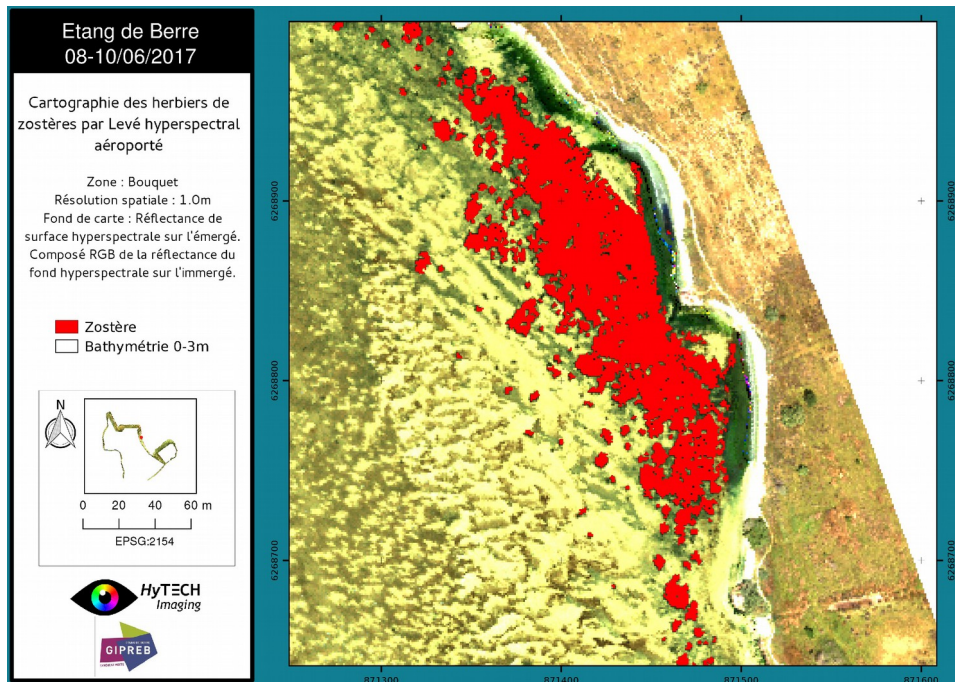


Figure 25 Carte des herbiers de zostères sur la zone de Bouquet issue du levé « Haute altitude » à 1m de résolution spatiale.

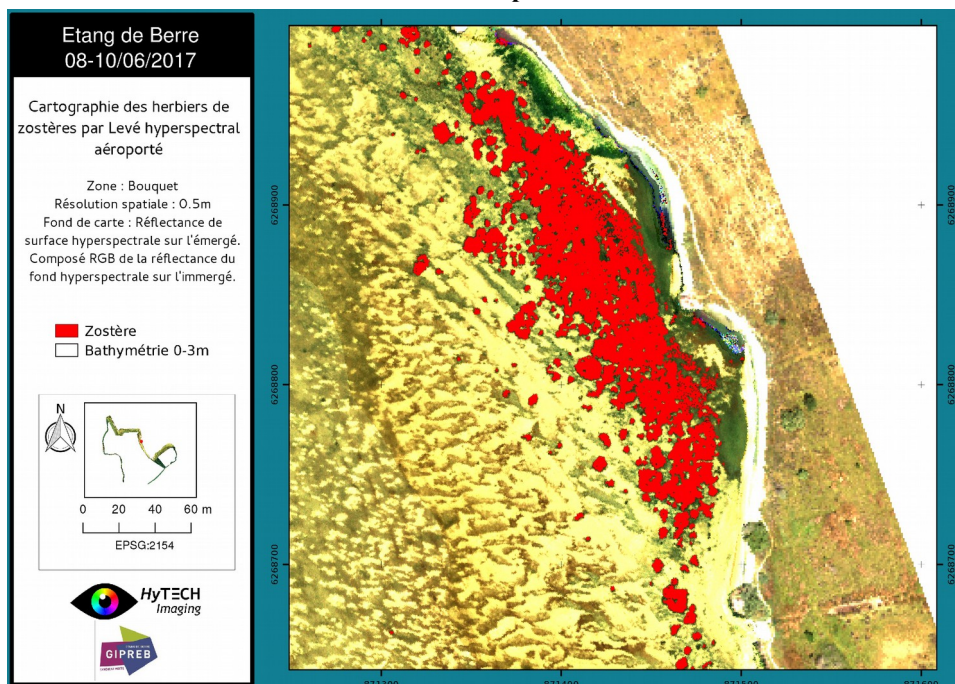


Figure 26 Carte des herbiers de zostères sur la zone de Bouquet issue du levé « Basse altitude » à 50cm de résolution spatiale.

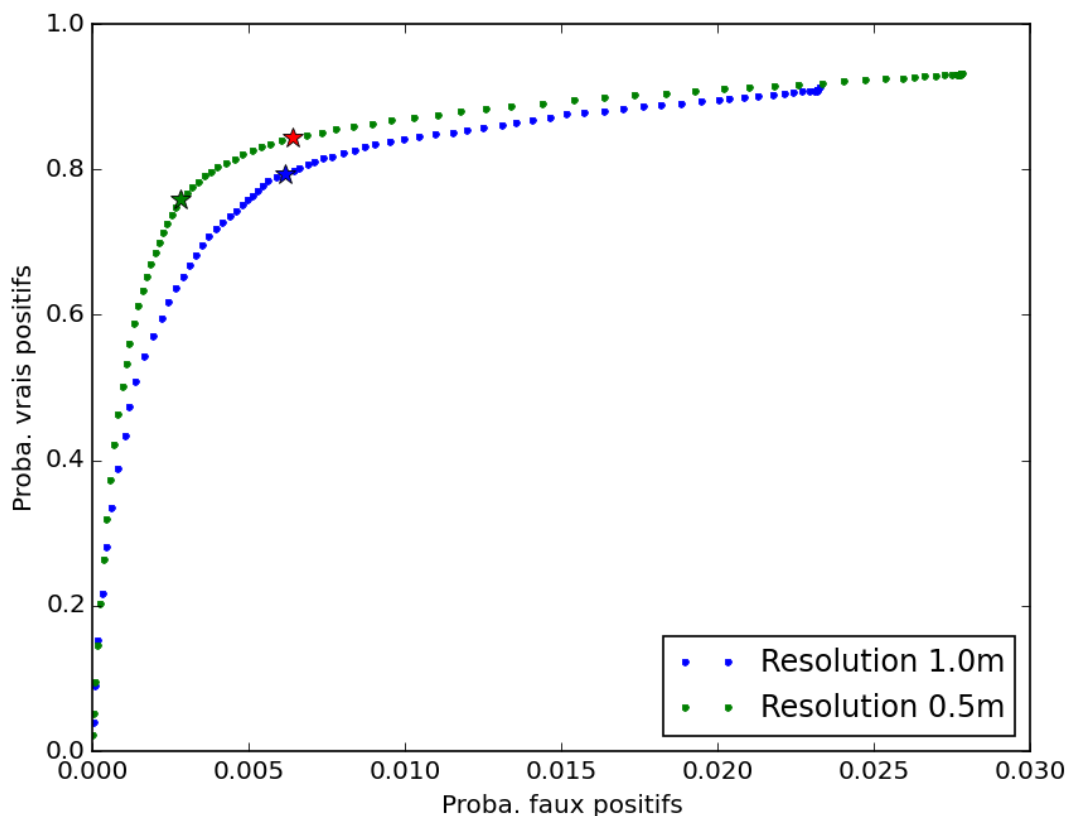


Figure 27 Courbes ROC de l'algorithme de détection d'herbier et points de fonctionnement utilisés pour la cartographie sur l'ensemble de l'étang (étoiles verte et bleue) et localement sur le Bassin de délimonage pour la résolution 0.5m (étoile rouge) .

Au cours des contrôles qualité portés sur les résultats de détection, il est apparu que le point de fonctionnement de l'algorithme (seuil de détection) ajusté pour l'ensemble de l'étang, ne détectait pas ou peu d'herbiers sur le site du bassin de délimonage, connu pourtant pour présenter un important herbier. Sur ce site, les zostères présentent un état écologique particulier et sont susceptibles d'être couverts par une fine pellicule de limon (Figure 28), ce qui peut expliquer la moins bonne sensibilité de l'algorithme sur cette zone.



Figure 28 *Zostera Noltii* avec pellicule de limon

Ce problème a été pallié sur la zone en y réduisant localement le seuil de détection des zostères (Figure 29). Le point de fonctionnement correspondant est présenté en rouge sur la Figure 27. Ceci montre qu'avec une intervention réduite (ajustement d'un seuil) et un apport de connaissance « a priori » limité, par zone de suivi des herbiers, il est possible d'améliorer les performances de cartographie au regard d'un traitement avec configuration identique pour l'ensemble de l'étang. Cela montre également que le modèle de mélange linéaire est a priori trop simple pour décrire des abondances. Ainsi l'abondance obtenue par démixage ne traduit pas nécessairement une densité spatiale des herbiers, ou des « endmembers » en général, mais peut traduire d'autres phénomènes plus complexes (comme ici le recouvrement par une pellicule de limon), c'est pourquoi l'abondance mesurée est utilisée ici comme indicateur de présence préalable à la détection et non pas comme une mesure réelle d'abondance.

L'algorithme mis en œuvre peut également être utilisé pour cartographier les différents peuplements et/ou substrats utilisés comme « endmembers ». La Figure 30 illustre cette possibilité en présentant la carte combinée des détections obtenues pour les 4 « endmembers » utilisés lors du démixage, sur la zone de Bouquet. Notons que comme l'algorithme vise à obtenir une décision franche de présence/non présence pour chacun des endmembers via l'application d'un seuil sur l'abondance, une partie des pixels n'est pas cartographiée. Elle correspond à des pixels soit trop fortement mixés, soit de signature spectrale trop éloignée de celles incluse dans les « endmembers ».

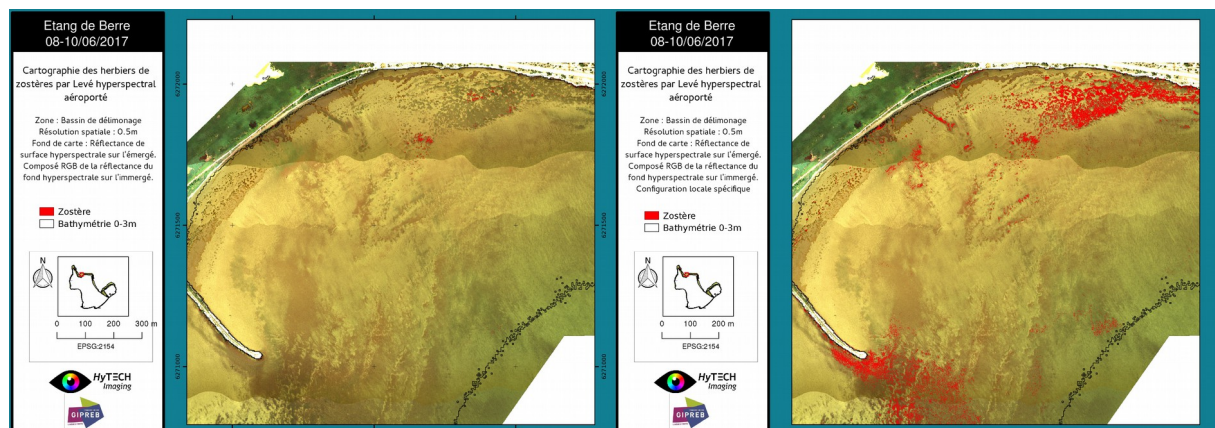


Figure 29 Carte des herbiers de zostères sur la zone « Bassin de délimonage » issue du levé « Basse altitude » à 50cm de résolution spatiale, avec la configuration de détection globale de l'étang (Gauche), locale (Droite).

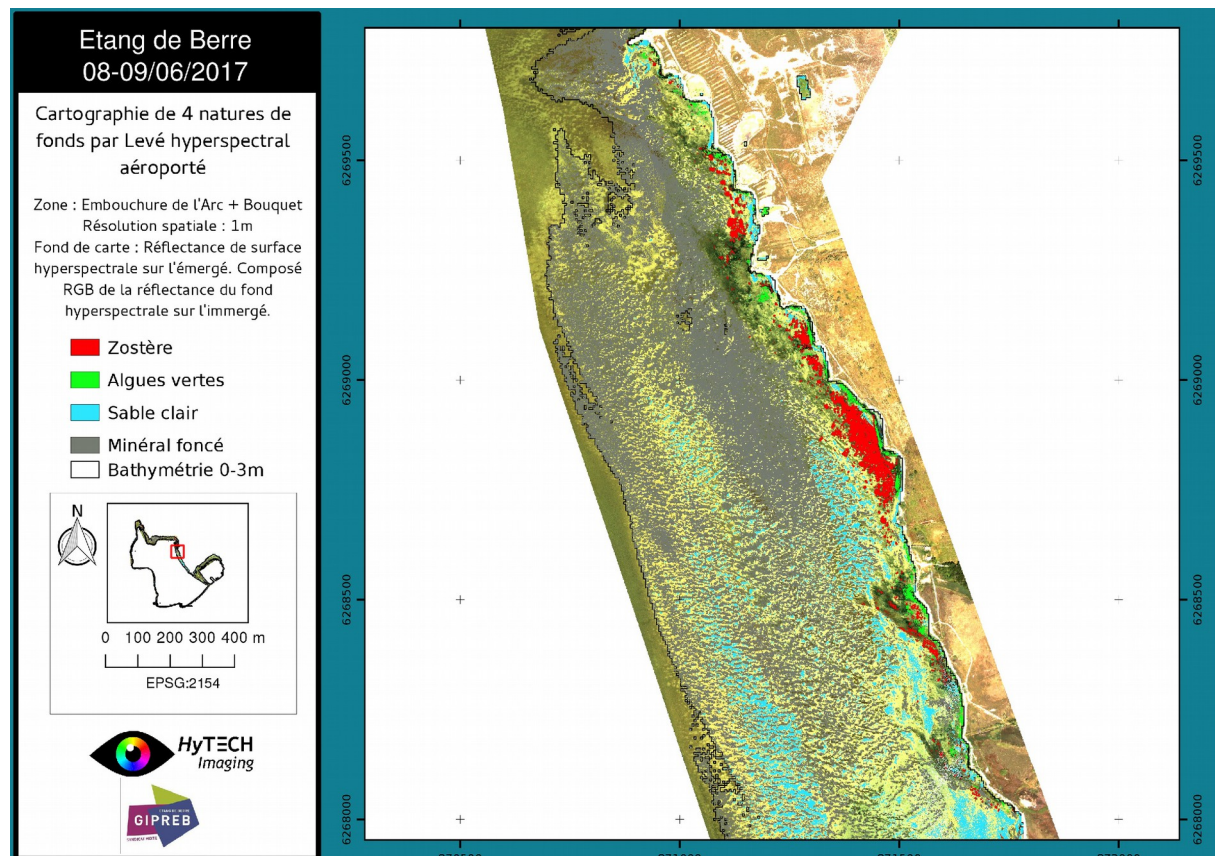


Figure 30 Carte de 4 natures de fond sur la zone « Embouchure de l'Arc + Bouquet » issue du levé « Haute altitude » à 1m de résolution spatiale.

8.3 Résultats de cartographie

Les cartes de zostères obtenues sont présentées sur les sites principaux d'intérêt Figure 32 à Figure 35. Les cartes à 50cm de résolution sont présentées en priorité sur celles à 1m de résolution quand elles sont disponibles. Pour le bassin de délimonage, le résultat issu de la configuration spécifique à cette zone est présenté. Par comparaison avec la connaissance in situ et le détournage sur orthophotos, on peut formuler une analyse qualitative des résultats :

- On constate que les grands ensembles d'herbiers attendus sont cartographiés avec un détournage précis notamment sur les zones « Etang de Vaine » et « De l'embouchure de l'Arc aux Salins »
- Sur la zone « Pointe de Berre », il manque des détections sur la partie la plus à l'Est de la pointe. Les signatures spectrales des zostères y sont différentes du fait d'un état écologique particulier (présence d'épiphytes et de macroalgues).
- Sur la zone « bassin de délimonage et alentours » l'herbier principal est bien cartographié, mais l'ajustement du seuil de détection à cette zone génère quelques fausses alarmes plus au sud près de la jetée.
- Certains types de fond ou éclaircissements particuliers (ombres, glint...) génèrent localement des sur-détections sur la zone « Côte ouest ».

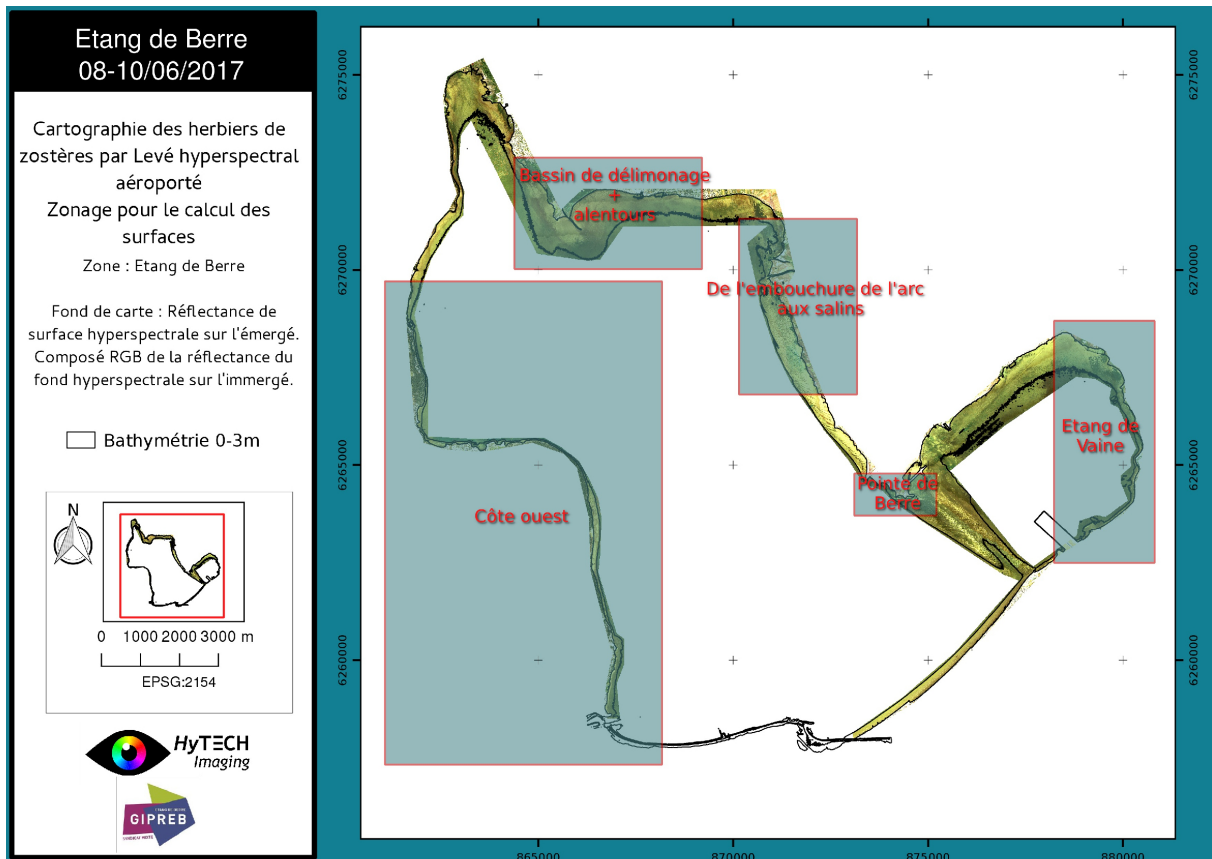


Figure 31 Zones d'intérêt

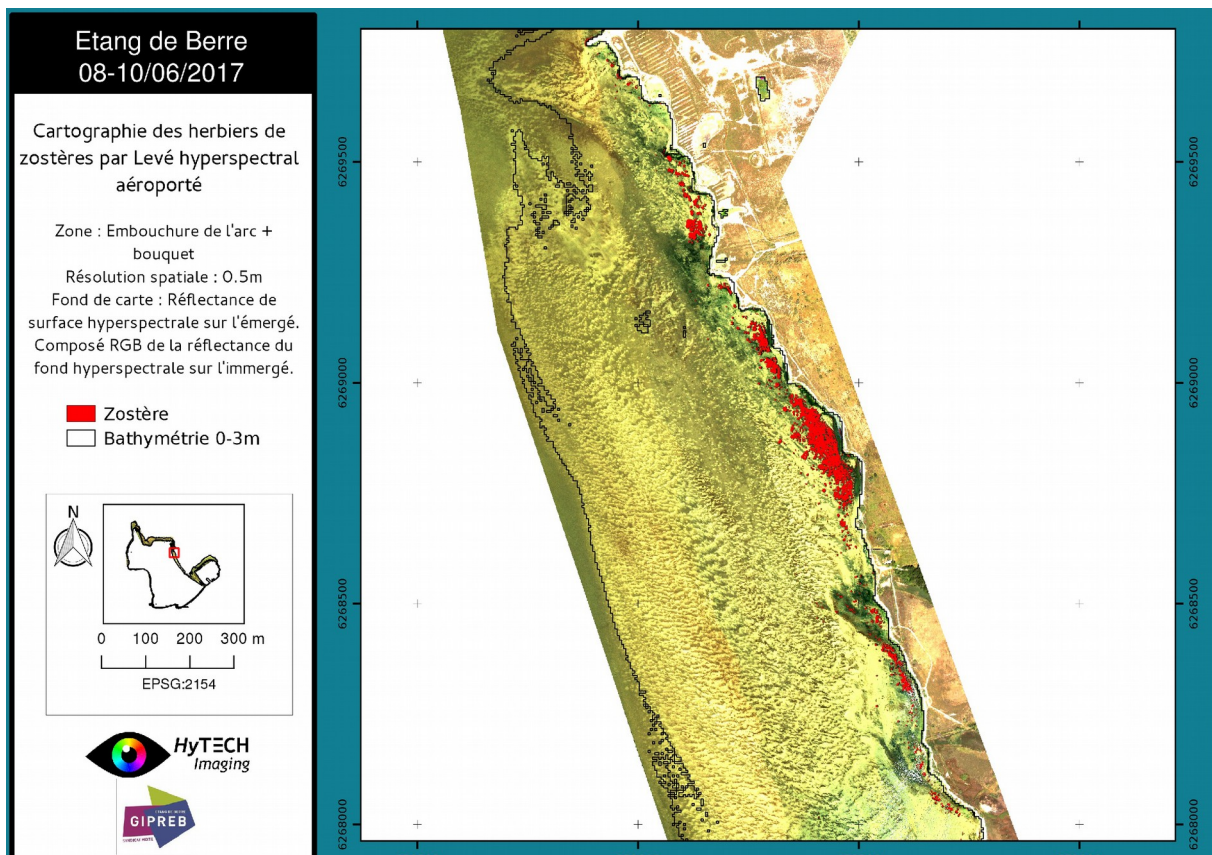


Figure 32 Carte des herbiers de zostères sur la zone « Embouchure de l'Arc + Bouquet » issue du levé « Basse altitude » à 50cm de résolution spatiale, avec la configuration de détection globale de l'étang.

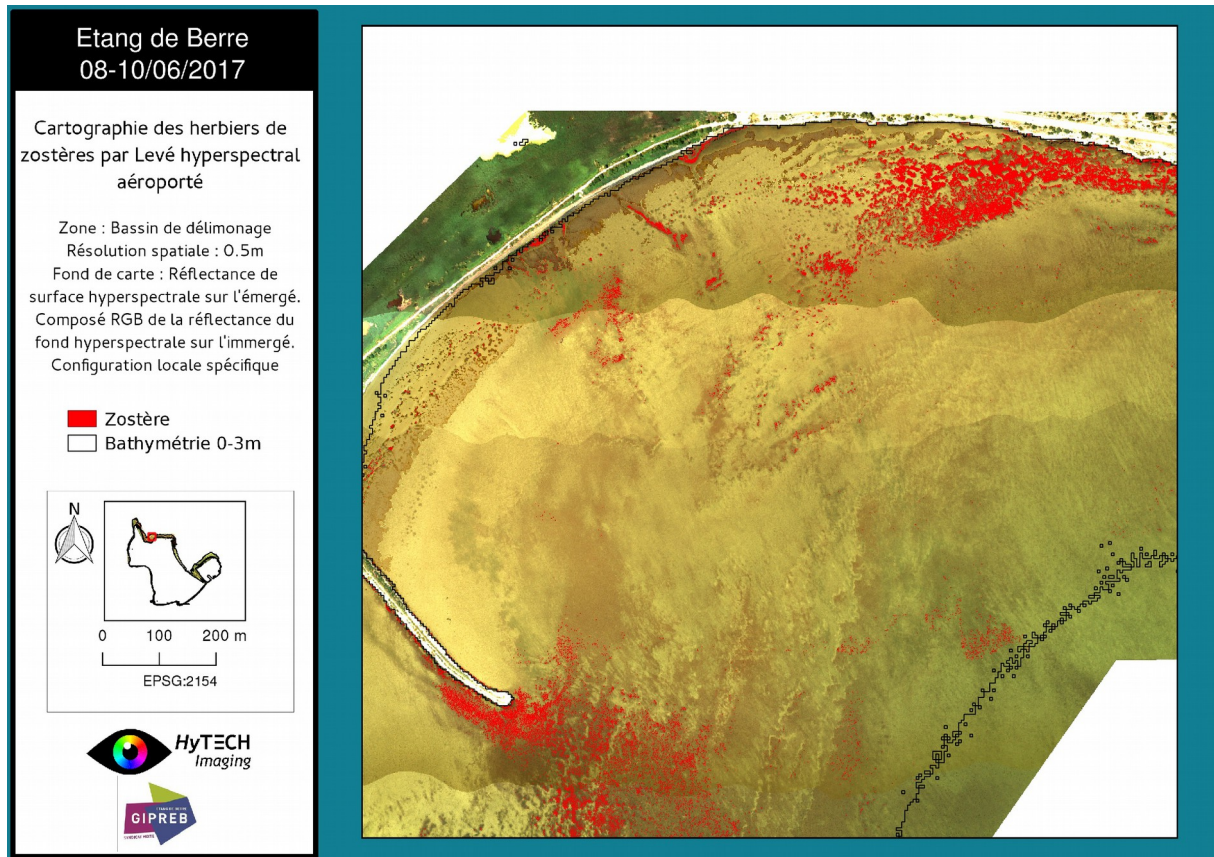


Figure 33 Carte des herbiers de zostères sur la zone « Bassin de délimonage » issue du levé « Basse altitude » à 50cm de résolution spatiale, avec la configuration de détection locale .



Figure 34 Carte des herbiers de zostères sur la zone « Pointe de Berre » issue du levé « Basse altitude » à 50cm de résolution spatiale, avec la configuration de détection globale de l'étang.

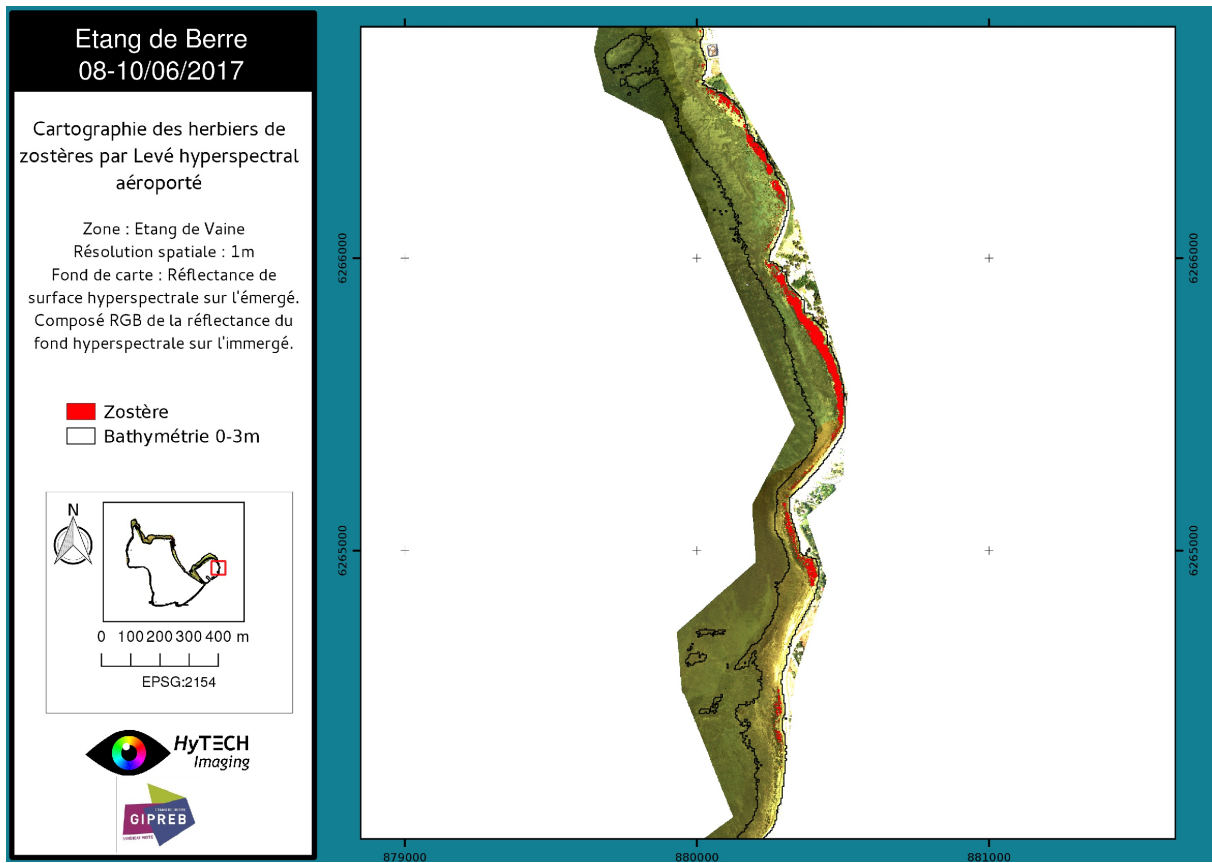


Figure 35 Carte des herbiers de zostères sur la zone « Etang de Vaine » issue du levé « Haute altitude » à 1m de résolution spatiale, avec la configuration de détection globale de l'étang.

9 Conclusion

Une méthode innovante de cartographie des herbiers de zostère par imagerie hyperspectrale a été développée et mise en œuvre sur l'étang de Berre. Ce développement s'est notamment appuyé sur les données d'une bibliothèque spectrale des natures de fond (substrats, végétaux) présent sur l'étang de Berre, réalisée par le GIPREB dans le cadre de ce projet.

Parallèlement un levé orthophoto a été réalisé afin de permettre de produire une cartographie de référence par une procédure classique de détournage manuel des herbiers couplée à des mesures in-situ.

Le premier produit de la méthode de cartographie hyperspectrale est la réflectance du fond de l'étang. Cette première couche d'information permet de visualiser la présence ou non des herbiers en s'affranchissant des effets de la colonne d'eau. Elle pourrait a priori être utilisée comme produit de photo-interprétation en complément, voire à la place des orthophotographies.

Le second produit de la méthode de cartographie hyperspectrale est la carte des herbiers sur l'ensemble de l'étang.

La production de cette carte a nécessité une **connaissance a priori des zostères sur la zone d'étude limitée à quelques patches de référence**. Sa configuration peut être adaptée localement en cas d'état écologique spécifique des herbiers afin d'en améliorer la précision. **Outre ces quelques interventions, elle est complètement automatisée.**

Un mode semi-automatique avec paramétrage local pourra être envisagé pour améliorer les performances de la méthode et permettre sa mise en œuvre dans le contexte d'une poursuite des suivis multi-temporels des surfaces de zostères sur l'étang.

Hytech-imaging poursuivra dans les mois et années à venir ses développements sur les algorithmes de détection / classification adaptés à cette thématique. La méthode évoluera vers une plus grande précision de cartographie et l'extraction d'informations complémentaires plus riches, et pourra en outre être étendue à d'autre type de peuplements et/ou substrats. Le caractère automatisé ou semi-automatisé des solutions développées permettra le cas échéant de retraiter rapidement les levés plus anciens avec une version d'algorithme plus performante, ceci afin d'éviter les éventuels biais entre versions des algorithmes.