

MANAGER
DE PROJETS
GEOMATIQUES



Rapport de thèse professionnelle

Développement d'une méthode de suivi de la dynamique spatio-temporelle de l'herbier de la lagune du Grand Bagnas (Hérault) : exploitation des séries temporelles Sentinel-2

Travail effectué dans le cadre du LabEx NUMEV

Marion Menu

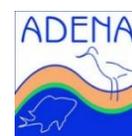
Septembre 2018



Commanditaire : Estelle Pitard (L2C – UMR 5221)

Tuteur SILAT : Samuel Alleaume (IRSTEA – UMR TETIS)

Partenaires : Frédéric Andrieu, Guilhem de Barros, Guillaume Papuga (CBNMed)



LETTRE DE MISSION

Commanditaire	Tuteurs pédagogiques	Chef du projet
Laboratoire Charles Coulomb (L2C) UMR 5221 CNRS/UM2	UMR TETIS/IRSTEA	AgroParisTech – MS SILAT
Estelle Pitard estelle.pitard@umontpellier.fr	Samuel Alleaume samuel.alleaume@irstea.fr Jean-Baptiste Féret jean-baptiste.feret@teledetection.fr	Marion Menu marion.menu@agroparistech.fr

Intitulé du projet : Suivi de la dynamique spatio-temporelle du couvert de végétation de la lagune du Grand Bagnas par télédétection haute résolution spatiale - *Travail effectué dans le cadre du LabEx NUMEV.*

Echéance du projet : 16 avril au 19 octobre 2017

Contexte : La compréhension des processus à l'origine de la dynamique spatiale et temporelle des espèces constitue un enjeu majeur en écologie. Cette thématique de recherche est développée au niveau fondamental au Laboratoire Charles Coulomb (L2C, UMR 5221) et à l'UMR AMAP (botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations). Des outils de physique statistique et de mathématique permettent de modéliser les habitats des espèces ainsi que la dynamique de leurs populations. Les modèles prédictifs ainsi développés constituent de précieux outils d'aide à la décision pour les gestionnaires de l'environnement et les acteurs socio-économiques locaux. Ils leur permettent en effet d'appréhender la réponse des écosystèmes aux forçages environnementaux et anthropiques, en vue d'ajuster les mesures de gestion futures. Les besoins en données réelles, résolues spatialement et temporellement sont importants afin de construire puis valider ces modèles. Dans le cadre de ce projet, le système écologique étudié est le milieu lagunaire.

Objectifs : Le projet s'inscrit dans une dynamique de collaboration entre physiciens théoriciens, télédéTECTEURS et écologues. Les objectifs sont triples :

- Développer une méthodologie reproductible d'extraction par télédétection haute résolution du couvert végétal de la lagune du Grand Bagnas ;
- Appliquer la méthode sur deux séries temporelles pour analyser les variabilités inter-annuelle et saisonnière ;
- Automatiser la méthode via le développement d'une chaîne de traitement documentée.

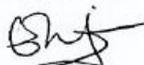
Finalités :

- Fournir des cartes précises pour affiner les modèles de prédictions de systèmes écologiques développés dans un cadre fondamental;
- Améliorer la connaissance historique et le fonctionnement écologique de la Réserve du Bagnas en vue d'ajuster les mesures de gestion ;
- Formuler une méthodologie applicable à d'autres milieux lagunaires.

Livrables :

- Un lot de cartes intra-annuelles de répartition des herbiers sur une période d'environ un an ;
- Un lot de cartes inter-annuelles de répartition des herbiers sur une période d'environ 15 ans ;
- La chaîne de traitement documentée et sa notice d'utilisation ;
- Le rapport de mission professionnelle et le rapport de conduite de projet.

le 20 Avril 2018



Estelle PITARD.

le 23/04/18.

Marion MENU

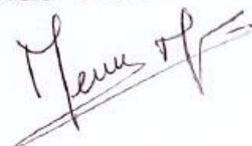


TABLE DES MATIÈRES

I	CONTEXTE	5
1.	Origine du projet	5
1.1.	Les zones humides littorales : un patrimoine écologique vital et menacé	5
1.2.	De la recherche scientifique aux besoins des gestionnaires des zones humides	5
1.3.	Apport de la télédétection pour le suivi des zones humides	7
2.	Cadrage du projet.....	7
2.1.	Intérêt de suivi des herbiers aquatiques	7
2.2.	Choix du site d'étude : la Réserve Naturelle Nationale du Grand Bagnas	7
2.3.	Objectifs.....	9
3.	Originalité du projet	9
3.1.	Une approche pluridisciplinaire pour une finalité fondamentale et appliquée.....	9
3.2.	Exploitation de séries temporelles pour une étude de dynamique	10
II	DÉMARCHE SCIENTIFIQUE	11
1.	Contexte technique	11
1.1.	Matériels : données et logiciels.....	11
1.2.	Étapes préalables à la mise en place d'une méthode de classification.....	13
1.3.	Etude des profils temporels des indices.....	14
2.	Méthode finale	16
2.1.	Prétraitement des images	16
2.2.	Classification par seuillage sur un indice radiométrique.....	16
2.3.	Démélange linéaire spectral	16
3.	Résultats	18
3.1.	Méthode 1 : qualification du couvert d'herbier	18
3.2.	Méthode 2 : calcul d'un indice continu de développement de l'herbier	20
3.3.	Comparaison des résultats des deux méthodes.....	21

III DISCUSSION	24
1. Approche critique	24
1.1. Intérêts et complémentarité des deux méthodes de classification	24
1.2. Limites du démélange spectral.....	24
1.3. Voies d'améliorations.....	25
2. Perspectives.....	25
2.1. Valorisation du travail	25
2.2. Etude de la variation interannuelle de l'herbier	26
2.3. Exploitation des résultats en modélisation de dynamique de populations	27
IV CONCLUSION	27
Remerciements.....	29
Liste des abréviations	30
Bibliographie.....	31
Table des illustrations.....	35
Annexes	35
Résumé	45

I CONTEXTE

1. ORIGINE DU PROJET

1.1. Les zones humides littorales : un patrimoine écologique vital et menacé

Les zones humides désignent une grande diversité d'habitats où l'eau et les processus d'inondation jouent un rôle prépondérant. Selon l'Article 1 de la Convention de Ramsar portant sur la protection et l'utilisation rationnelle des zones humides (Ramsar, Iran, 1971), elles peuvent être «naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, [et l'eau] stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée ». L'hydrologie définit les caractéristiques du sol et par conséquent le profil des communautés végétales et animales qui s'y installent.

Parmi ces habitats, les lagunes côtières occupent une place à part entière. Situées à l'interface entre milieu marin et masses d'eaux continentales, ces habitats sont soumis à l'influence de régimes hydrologiques souvent complexes, dont le sel est un des facteurs centraux. Hotspots de biodiversité, elles procurent des ressources (alimentation, reproduction, abri) à de nombreuses espèces de faune vertébrée et invertébrée qui en dépendent pour leur survie (Barnaud, 1997).

Ces milieux procurent également des services écologiques essentiels pour le fonctionnement du bassin versant (Geijzendorffer *et al.*, 2017). En effet, les lagunes côtières constituent des zones tampons qui permettent de maîtriser les crues et les submersions marines. Elles permettent également de recharger les eaux souterraines en cas de sécheresse. De plus, elles améliorent la qualité de l'eau douce qui arrive sur le littoral souvent chargée en nutriments.

Malgré leur valeur intrinsèque et leur rôle écologique remarquable, les zones humides côtières sont fragiles et menacées. Elles souffrent notamment de leur situation privilégiée et attractive sur le littoral méditerranéen. Leur déclin en superficie et en qualité est principalement dû aux pressions urbaines et touristiques grandissantes (Tour du Valat, 2012). De plus, elles sont sensibles à la pollution des eaux issue des activités agricoles et industrielles. La conséquence directe de cette dernière menace est l'augmentation progressive de l'eutrophisation. Ce phénomène d'enrichissement du milieu aquatique par des nutriments azotés et phosphorés favorise la prolifération de végétation aquatique comme les algues vertes et perturbent ainsi l'équilibre du milieu.

1.2. De la recherche scientifique aux besoins des gestionnaires des zones humides

Les zones humides méditerranéennes figurent au cœur des enjeux internationaux et nationaux de protection des paysages et de la biodiversité (MedWet, 2016). Le constat des menaces qui pèsent sur elles a conduit à l'émergence d'outils multi-échelles visant leur protection. Les outils techniques de la conservation des milieux lagunaires sont nombreux, qu'ils soient de types fonciers (propriétés du Conservatoire du Littoral, Espaces

Naturels Sensibles du Département), règlementaires ou de gestion (Réserve Naturelle, Natura 2000, Parcs nationaux), de planification (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux, Plans locaux d'Urbanisme, Contrats d'étang etc.) (Pôle relais lagunes méditerranéennes, 2008). En 2013, une enquête du Museum National d'Histoire Naturelle (MNHN) a identifié et mis en lien les centres d'intérêt des gestionnaires et chercheurs, afin de faciliter l'appropriation des résultats scientifiques par les acteurs locaux et de les rendre opérationnels. Les besoins des gestionnaires de l'environnement peuvent se manifester sous forme d'une méthode pour atteindre un résultat donné ou encore d'un outil robuste validé scientifiquement (Gayet *et al.*, 2016a).

Les points soulevés dans l'enquête portent prioritairement sur les fonctions des lagunes en termes d'hydrologie et d'habitat. Supports d'activités économiques et traditionnelles (aquaculture, pêche, chasse, exploitation de sel), le fonctionnement des espaces lagunaires est singulier et souvent difficile à appréhender. La nécessité d'identifier les changements opérés dans ces milieux et comprendre leur évolution est souvent mentionnée par les gestionnaires, notamment en ce qui concerne les roselières (Gayet *et al.*, 2016b). Ainsi, pour appréhender les processus physico-chimiques d'une zone humide impactant la dynamique des espèces, définir une échelle de temps est primordiale. Il s'agit en effet, d'être en phase avec la dynamique lente de ces milieux et de «développer des instrumentations et expérimentations sur le long terme pour tendre vers des modélisations prédictives » (Gayet *et al.*, 2016c).

La compréhension des processus à l'origine de la dynamique spatiale et temporelle des espèces est développée au niveau fondamental au Laboratoire Charles Coulomb (L2C, UMR 5221) et à l'UMR AMAP (botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations). Les projets de recherche menés dans ces UMR visent la capitalisation de connaissances pour prévoir la réponse des écosystèmes aux pressions environnementales. Des outils de physique statistique et de mathématiques permettent de modéliser les habitats des espèces ainsi que la dynamique de leurs populations (Huth *et al.*, 2014 et 2015). Les objectifs consistent à comprendre la dynamique à long terme d'espèces végétales réparties dans des patchs d'habitats hétérogènes dans un environnement changeant (variations saisonnières, impact du changement climatique).

Les besoins en données sont importants afin d'apporter une réalité écologique pour construire puis valider ces modèles théoriques (Austin, 2007). Les chercheurs en modélisation sont alors amenés à envisager des méthodes interdisciplinaires pour répondre à leurs problématiques. C'est dans ce contexte qu'Estelle Pitard, chercheuse en mathématiques appliquées (CNRS, L2C), a sollicité en 2017 des ingénieurs et chercheurs de l'UMR TETIS (Territoire Environnement Télédétection Information Spatiale) ainsi que des étudiants du MS SILAT d'AgroParisTech pour explorer les possibilités offertes par la télédétection et l'exploitation des images satellites.

1.3. Apport de la télédétection pour le suivi des zones humides

La télédétection dédiée à l'observation de la Terre regroupe l'ensemble des techniques développées permettant de déterminer à distance la nature, les propriétés physiques ou encore biologiques d'objets. En ce sens, les données acquises par satellites sont particulièrement intéressantes pour suivre l'état des surfaces végétalisées. Le signal radiométrique émis et réfléchi par la végétation, selon les différents domaines spectraux, dépend étroitement de ses caractéristiques propres, tant liées à sa structure qu'aux propriétés biophysiques des éléments qui la composent. Dans le domaine optique, la grandeur mesurée est la réflectance, c'est-à-dire la fraction d'énergie lumineuse incidente réfléchie par la cible.

L'intérêt de l'imagerie satellitaire réside dans la capacité des capteurs optiques à fournir des données permanentes sur l'ensemble de la planète à des résolutions spectrales, spatiales et temporelles de plus en plus fines. Parallèlement à ces évolutions technologiques, l'imagerie spatiale est davantage accessible aux acteurs publics et scientifiques via des initiatives comme l'EQUIPEX-GEOSUD (projet de valorisation du potentiel de l'imagerie satellitaire). La télédétection devient donc un domaine technologique de choix pour suivre le couvert végétal caractéristique des zones humides et détecter les changements.

2. CADRAGE DU PROJET

2.1. Intérêt de suivi des herbiers aquatiques

Le suivi des phanérogames (plantes à fleurs formant des herbiers) permet de comprendre les enjeux de conservation des zones humides (Girard *et al.*, 2011). Constituants d'habitats essentiels et sources de nourriture pour de nombreuses espèces d'invertébrés et de poissons, les herbiers représentent un réservoir important de biodiversité. Ce sont des espèces bioindicatrices de changements et perturbations du milieu à l'échelle locale (activités aquacoles, plaisance, eutrophisation) (Réseau de Suivi Lagunaire, 2013). La surveillance de leur dynamique spatio-temporelle constitue ainsi un moyen de suivre l'état écologique de l'écosystème lagunaire. L'estimation du recouvrement et de la densité des herbiers aquatiques couplée à l'analyse de leur dynamique sont ainsi des problématiques émergentes dans la gestion des zones humides (Pôle-relais lagunes méditerranéennes, 2017).

2.2. Choix du site d'étude : la Réserve Naturelle Nationale du Grand Bagnas

La phase avant-projet a été déterminante pour cibler un site d'étude pertinent. Celui-ci devait concentrer des enjeux de gestion liés aux herbiers aquatiques, tout en présentant des conditions idéales pour exploiter les outils de télédétection.

Un partenariat a été établi avec l'antenne Languedoc-Roussillon du Conservatoire Botanique National Méditerranéen de Porquerolles (CBNMed) pour mutualiser les objectifs, les expertises, la zone d'étude et les données. La zone d'étude choisie est la lagune du Grand Bagnas, classée Réserve Naturelle Nationale depuis 1983 et propriété du Conservatoire du Littoral depuis 2004 (Figure 1). Située entre Agde et Marseillan, au sud-

ouest de l'étang de Thau, cet espace naturel abrite une biodiversité importante, notamment à travers des cortèges d'oiseaux d'eau qui occupent le site à différentes périodes de l'année, ainsi qu'une flore originale. Elle présente des conditions favorables pour exploiter les outils de télédétection optique : eau faiblement salée (oscillant de 5 à 20 g/L), peu profonde (moyenne de 45 cm) et claire. Cela permet ainsi de diminuer les problèmes de détection des herbiers submergés en début de croissance, liés à l'atténuation de leur réponse spectrale par l'eau (Ackleson, 1987 ; Lieutaud et Puech, 1996 ; Vis et al., 2003). Fortement marquée par l'activité humaine, la lagune fait l'objet d'une gestion hydraulique avec des apports d'eau douce provenant du Canal du Midi, pour maintenir des niveaux d'eau adaptés à la nidification des hérons et des laro-limicoles. De plus, le plan d'eau est mis en assec, tous les 5 ans en moyenne, pour minéraliser les sédiments, fortement eutrophisés (Ifremer, 2014).

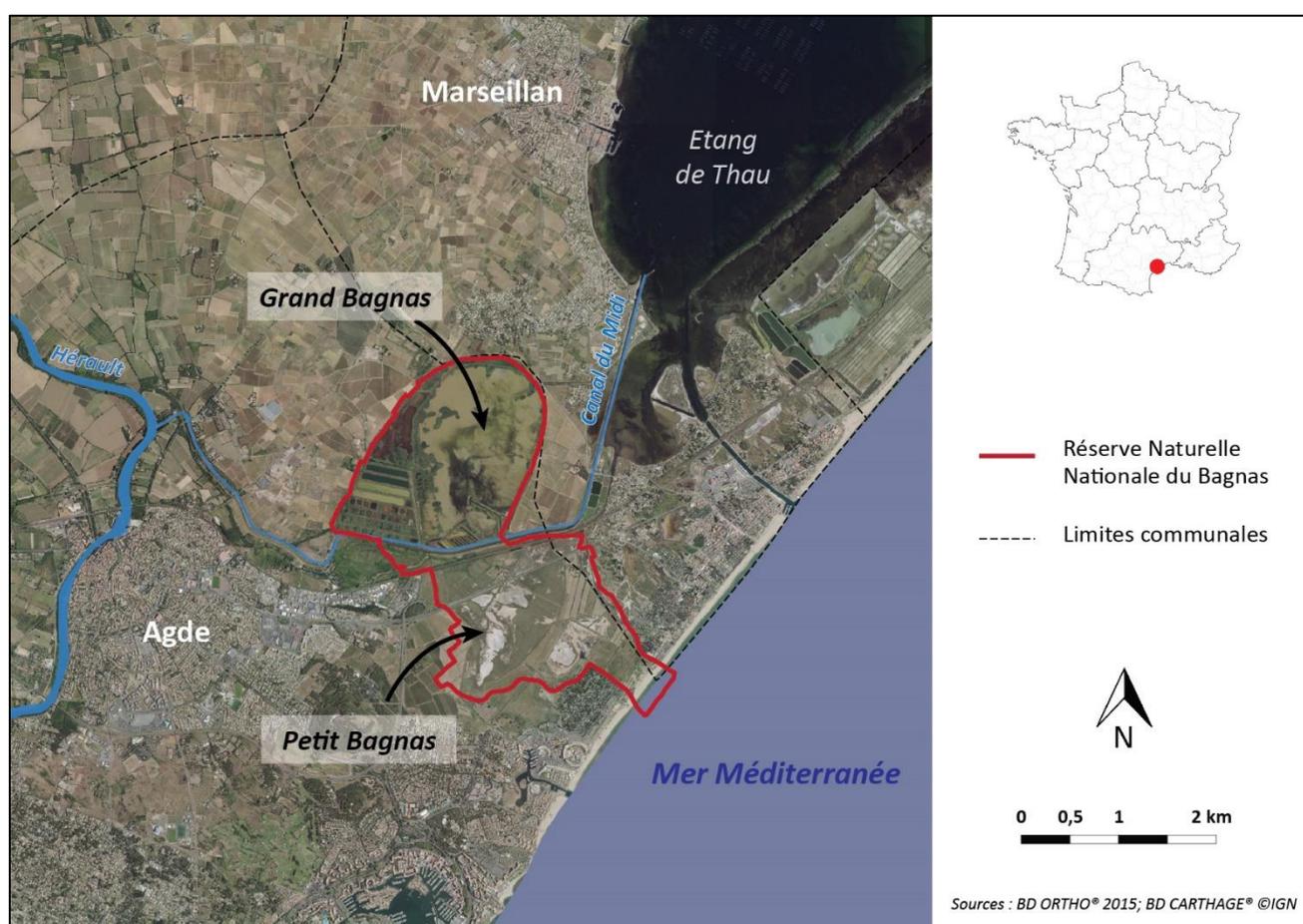


Figure 1. Localisation de la Réserve Naturelle Nationale du Bagnas

L'étang du Bagnas a fait l'objet d'un plan de gestion entre 2012 et 2016, actuellement en cours de révision. Pour répondre aux objectifs d'« améliorer la qualité des eaux et gérer plus efficacement les niveaux d'eau » (ADENA, 2012), les gestionnaires de la réserve souhaitent mettre en place un suivi de la flore aquatique (opération CS2), notamment des phanérogames du site. Cela nécessite une connaissance approfondie du contexte écologique et de la diversité spécifique de la lagune, initiée par le CBN-Med lors d'une campagne

terrain pendant l'été 2017. L'herbier du Grand Bagnas est dominé par le Potamot pectiné (*Stuckenia pectinata*), accompagné ponctuellement de Ruppie (*Ruppia cirrhosa*) (Figure 2). En 2017, il recouvrait la majeure partie de la pièce d'eau, bien que les facteurs écologiques conditionnant son développement soient encore mal compris (Papuga et Andrieu, 2018).

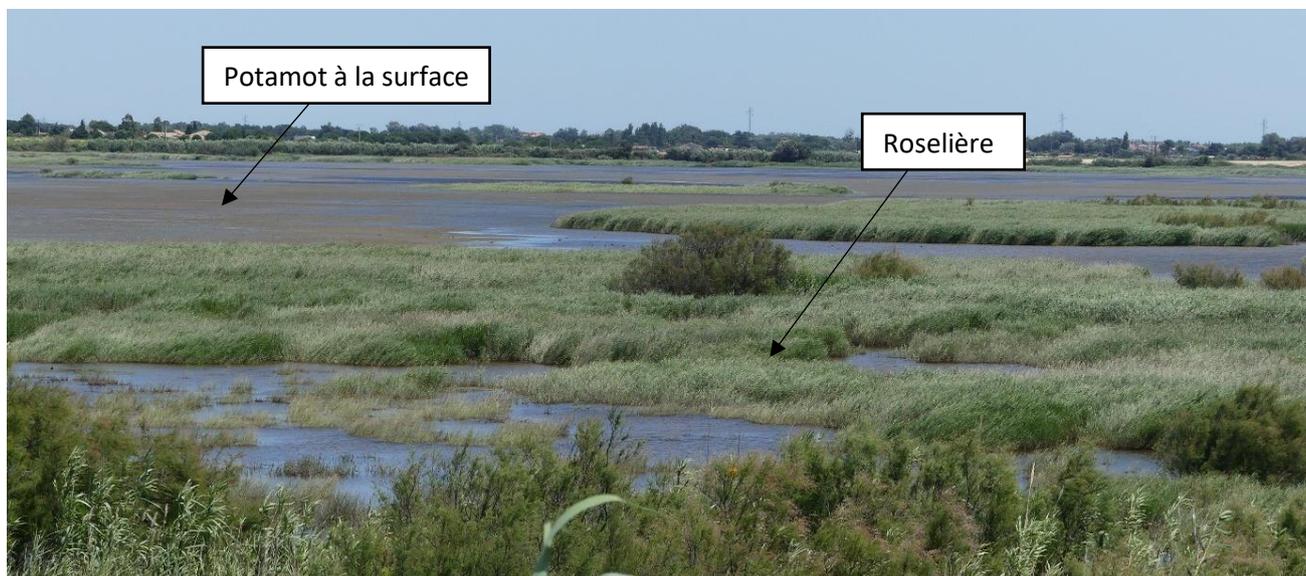


Figure 2. Lagune du Grand Bagnas (juillet 2018 ©Marion Menu)

2.3. Objectifs

L'étude propose de mettre au point, grâce à la géomatique et à la télédétection, une méthode de classification simple, robuste et reproductible, du couvert végétal de la lagune du Grand Bagnas. L'automatisation de cette méthode constituera une opportunité pour suivre à long terme l'évolution spatio-temporelle tant qualitative que quantitative, de l'herbier du plan d'eau.

Ce rapport se concentre sur l'étude de la variation saisonnière de l'herbier. Les résultats obtenus concernent la période comprise entre l'hiver 2017 et l'hiver 2018, correspondant à un cycle de croissance-sénescence de l'herbier.

3. ORIGINALITE DU PROJET

3.1. Une approche pluridisciplinaire pour une finalité fondamentale et appliquée

Le projet s'inscrit dans une dynamique de collaboration entre physiciens théoriciens, télédéTECTEURS et écologues. Les intérêts du projet sont doubles. D'une part, le travail s'insère dans un cadre fondamental où l'utilisation et l'ajustement d'outils de physique statistique visent une meilleure prédiction des systèmes écologiques. D'autre part, les résultats de l'étude permettraient de fournir aux gestionnaires de la Réserve des données fiables et historiques pour ajuster leur politique de conservation. Les livrables attendus constitueront des indicateurs de réalisation (résultats quantitatifs de l'herbier et cartographies) pour déterminer si les procédés de gestions répondent aux objectifs recherchés. Des échanges structurés entre chercheurs et

gestionnaires permettront de mettre directement en application des résultats scientifiques. De plus, l'expertise des écologues du CBN et de la Réserve est indispensable pour optimiser les choix méthodologiques et s'adapter au contexte du Grand Bagnas.

3.2. Exploitation de séries temporelles pour une étude de dynamique

Les séries temporelles sont de plus en plus utilisées pour augmenter la précision de la classification des habitats en milieux humides (Ozesmi et Bauer, 2002 ; Lyons, Roelfsema, et Phinn, 2013). L'approche multi-temporelle impose d'utiliser une série d'images de bonne qualité, avec le même niveau de correction radiométrique, afin de réduire au maximum la variabilité entre les images. Des études ont ainsi permis de mettre en évidence des motifs temporels caractéristiques des classes de végétation comme les macrophytes et la roselière, en lien avec leur phénologie (Sivanpillai et Latchininsky, 2007 ; Martinez et Le Toan, 2007 ; Davranche, 2008).

Dans un contexte similaire, une méthodologie a été développée pour suivre annuellement la couverture spatiale des herbiers de zostères sur l'étang de Vaccarès avec l'imagerie LANDSAT (Archambeau, 2015). Elle utilise des données de recouvrement, issues de campagnes terrain précises et reconduites chaque été. Dans le cas du présent projet, la possibilité de fournir un échantillon de données pour guider la classification, qu'il soit photo-interprété ou issu d'une campagne de terrain, a été écartée. De plus, la méthode d'extraction de l'herbier doit être robuste sur l'ensemble des images de la série temporelle, à tous les stades de développement de l'herbier (Figure 3). Pour répondre aux objectifs, le traitement nécessite de se faire par lot et de manière automatique. Un maximum de dates mérite d'être exploité afin d'extraire finement les successions de recouvrement de l'herbier et d'analyser ensuite sa dynamique saisonnière.



Figure 3. Illustration de la variabilité des images à traiter en fonction du stade de développement de l'herbier. Représentation de l'indice de végétation NDVI calculé sur 3 images Sentinel-2 de mars 2017 (a-lagune en eau, pas d'herbier) ; juin 2017 (b-herbiers submergés en développement) ; septembre 2017 (c- herbiers à la surface). L'échelle de gris est identique pour les trois images.

L'intérêt du projet réside donc dans l'exploitation de l'imagerie satellitaire à haute résolution temporelle, de l'ordre de quelques jours. Les séries temporelles Sentinel-2 offrent la possibilité d'analyser finement la trajectoire spatio-temporelle du couvert de végétation lagunaire pour une double finalité fondamentale et appliquée.

II DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

1. CONTEXTE TECHNIQUE

1.1. Matériels : données et logiciels

Sentinel-2, des données adaptées au suivi spatio-temporel de l'herbier du Grand Bagnas

La mission Sentinel 2 est développée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus. Les deux satellites identiques Sentinel-2A et Sentinel-2B ont été respectivement mis en orbite en juin 2015 et en mars 2017. Sentinel-2 fournit des images multispectrales à haute résolution spatiale avec une forte capacité d'observation multitemporelle. Les séries temporelles Sentinel-2 s'avèrent pertinentes pour le suivi saisonnier et pluriannuel des milieux naturels. Elles répondent notamment aux caractéristiques suivantes :

- Haute répétitivité, avec une fréquence temporelle de 5 jours pour les deux capteurs, en lien avec la dynamique temporelle courte des herbiers aquatiques (Plus, Deslous-Paoli, et Dagault, 2003 ; Laugier, Rigollet, et de Casabianca, 1999) ;
- Haute résolution spatiale (entre 10 et 60 mètres suivant la bande spectrale) ;
- Haute résolution spectrale, dimensionnée notamment pour le suivi de la végétation.

Le capteur Sentinel-2 couvre 13 bandes multispectrales du bleu à l'infrarouge moyen. Pour être en cohérence avec la taille de la zone d'étude (environ 300 hectares) et celle des plus petits objets à détecter (patchs isolés de végétation aquatique), sans altérer la qualité de la donnée par rééchantillonnage, il a été choisi de n'extraire l'information que sur les quatre bandes B2 (bleu), B3 (vert), B4 (rouge) et B8 (proche infra-rouge). Leur résolution spatiale de 10 mètres permet de répondre aux objectifs de l'étude. Une résolution supérieure à 10 mètres ne serait pas suffisante pour extraire des zones fragmentées d'herbiers (Bargain, 2012). Ces quatre bandes couvrent le spectre du visible et du proche infrarouge (PIR). Les réflectances mesurées dans ces longueurs d'onde ne donnent qu'une idée globale de la réponse spectrale de l'herbier. Cependant, elles permettent l'extraction de la végétation en mettant en évidence l'absorption dans le rouge due à l'activité chlorophyllienne et la forte réflectance dans le proche infrarouge liée à la structure des feuilles (Girard, Girard, et Andréani, 2010) (Figure 4).

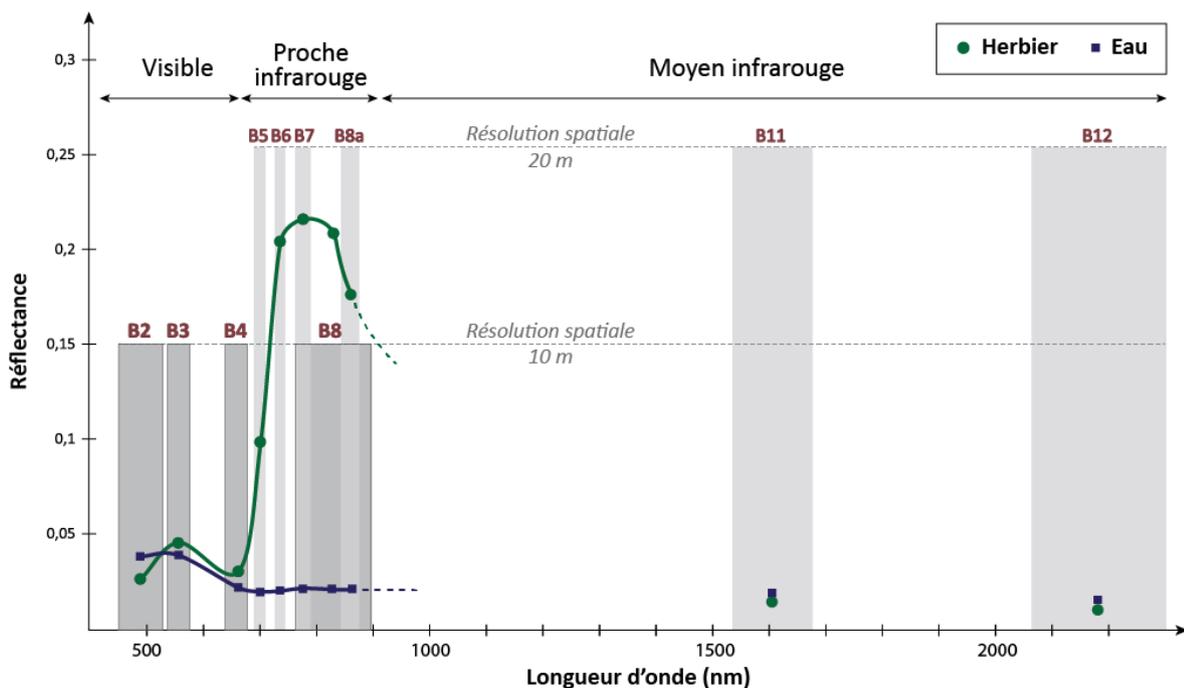


Figure 4. Caractéristiques des bandes spectrales du capteur MSI de Sentinel-2B (hors B1, B9 et B10, à 60 mètres de résolution et dédiées davantage aux études atmosphériques), en relation avec la réflectance mesurée sur un échantillonnage de zones en eau et d'herbiers de l'image du 5/09/2017.

Les produits des satellites Sentinel sont accessibles gratuitement sur différentes plateformes (ESA, THEIA, CNES) avec différents niveaux de prétraitement. L'ensemble des images acquises pour cette étude sont des produits distribués par le pôle THEIA, avec un niveau de correction 2A d'après la nomenclature définie par l'ESA et le CNES. Elles sont orthorectifiées et exprimées en réflectance de surface (TOC : Top Of Canopy). Le niveau 2A apporte, en plus de la correction des effets atmosphériques, la détection des nuages, des ombres et de l'épaisseur des aérosols (Hagolle *et al.*, 2010).

Le maximum d'images ne présentant pas de nuages a été téléchargé. Cela représente au total 32 images Sentinel-2 entre le 13 janvier 2017 et le 13 avril 2018 (annexe 1).

Logiciels utilisés

L'ensemble de l'étude a été réalisée à partir d'outils gratuits et libres afin d'assurer une continuité des travaux (réutilisation de la méthode) sans frein économique. L'ensemble des traitements ainsi que les analyses de données ont été réalisés sur la version 3.5.0 de R. Le tableau en annexe 2 liste l'ensemble des packages qui ont été importés pour les besoins de cette étude. Les bibliothèques libres GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) et OGR utilisées via l'interface R ont été nécessaires pour manipuler et traiter respectivement les données raster et vectorielles. Enfin, le logiciel SIG QGIS (version 2.18.19) a permis de numériser des données vectorielles par photo-interprétation et de visualiser les résultats produits sur R.

1.2. Étapes préalables à la mise en place d'une méthode de classification

Une première phase d'exploration permet d'identifier les contraintes présentées par l'objet d'étude et son contexte, afin d'adapter les choix méthodologiques.

Quel type de classification ?

En télédétection, la classification permet d'extraire les informations radiométriques et éventuellement spatiales des pixels des rasters monodates multibandes, pour les partitionner dans des classes générales d'occupation du sol comme l'eau, la végétation ou le sol nu.

Il existe deux grands types de classification. On oppose les classifications automatiques, dites non supervisées, aux classifications supervisées qui supposent des connaissances a priori du site d'étude (Girard, Girard, et Andréani, 2010). Dans l'approche non supervisée, le traitement se fait par lot, de manière automatique sans apporter préalablement d'informations sur les objets à définir. L'expertise s'effectue après la classification pour interpréter le résultat et labelliser l'occupation du sol produite. Cette méthode traite indépendamment les images, sans paramétrage fixe. Elle n'est donc pas pertinente pour étudier une dynamique temporelle, comme cela a été vérifié lors d'une phase d'exploration préliminaire avec l'algorithme K-means. Au contraire, une classification supervisée nécessite en entrée un échantillon dit d'apprentissage dont la classe est connue préalablement. Dans ce cas, la difficulté majeure consiste à fournir en entrée un jeu de données représentatif pour chaque image de la série temporelle et qui sert de base à la classification.

Quelles sont les caractéristiques du site et de l'objet d'étude ?

L'expertise des écologues du CBN et leur connaissance approfondie de l'étang du Bagnas ont contribué à caractériser le site d'étude. Les informations essentielles pour opérer les choix techniques sont résumées ci-après :

- Caractéristiques de la lagune du Grand Bagnas (profondeur, topographie, qualité de l'eau, salinité etc.) et lien avec les conditions optimales au développement du Potamot ;
- Fonctionnement de la lagune, gestion annuelle des niveaux d'eau ;
- Diversité spécifique de la végétation aquatique ;
- Phénologies de la roselière et l'herbier.

La connaissance du contexte écologique permet de cadrer la méthode. Elle conduira à l'extraction de deux types de surface : l'eau et la végétation aquatique, représentée majoritairement par l'herbier de Potamot pectiné (*Stuckenia pectinata* (L.) Börner) en 2017. D'autres espèces végétales sont présentes au sein de l'herbier de façon sporadique (e.g. *Ruppia cirrhosa* L.), et ne seront pas discernables avec les images Sentinels-2. Dans la suite de ce rapport, le terme « herbier » désignera par extension la végétation aquatique extraite de la lagune.

Quelles variables descriptives choisir?

Le recours à des indices spectraux normalisés est pertinent afin de s'affranchir de la variabilité radiométrique des images, des problèmes atmosphériques et d'éclairement. Ces indices permettent de quantifier les absorptions spécifiques des entités à discriminer (Davranche, 2008). Un indice résultant du ratio entre deux valeurs de réflectance permet d'effacer les effets de variations d'albédo biaisant parfois leurs mesures. Il existe un grand nombre d'indices de végétation. Plus le nombre de bandes spectrales est important, plus le choix d'indices est varié. Cependant, la qualité d'une classification ne dépend pas du nombre de variables descriptives utilisées (Niel, McVicar, et Datt, 2005), mais davantage de leur capacité à discriminer les classes attendues.

La plupart des indices radiométriques se base sur les valeurs relatives aux bandes de réflectance dans le rouge et le proche infrarouge (Gitelson *et al.*, 2002). L'indice de végétation le plus utilisé est le Normalized Difference Vegetation Index (Rouse *et al.*, 1974), appelé couramment NDVI. Il est toutefois sensible aux variations des propriétés spectrales du sol (brillance, couleur) et ne peut pas être appliqué dans tous les contextes. En effet, la télédétection appliquée aux milieux lagunaires peut être biaisée par l'interférence causée par la réflectance du substrat (Jay, 2012). Certains indices comme le GEMI (Pinty et Verstraete, 1992) présentent une sensibilité réduite aux variations saisonnières et aux effets de l'atmosphère (Bargain, 2012). D'autres indices comme le SAVI (Huete, 1988) et le MSAVI (Qi *et al.*, 1994) ont été créés pour diminuer les influences du substrat et de la réflexion spéculaire de l'eau sur la surface des feuilles. L'annexe 3 liste l'ensemble des indices spectraux qui ont été étudiés et les bandes spectrales nécessaires à leur calcul.

1.3. Etude des profils temporels des indices

Il est important d'appréhender la variation des indices au cours de l'année afin de cibler ceux qui sont sensibles à la croissance de l'herbier. Des échantillons de pixels caractérisant quatre zones d'intérêt ont été recueillis par photo-interprétation (Figure 5) à partir :

- de l'image de variance du NDVI pour isoler des zones invariantes au cours de l'année (eau de la lagune et roselière). Sur l'image ci-contre, le blanc traduit une importante variation de NDVI dans la lagune lié à la croissance de l'herbier ;
- des images en infra-rouge fausses couleurs, comparées date par date, pour isoler des zones caractérisant d'une part, l'herbier qui émerge rapidement et d'autre part, l'herbier à développement plus tardif.

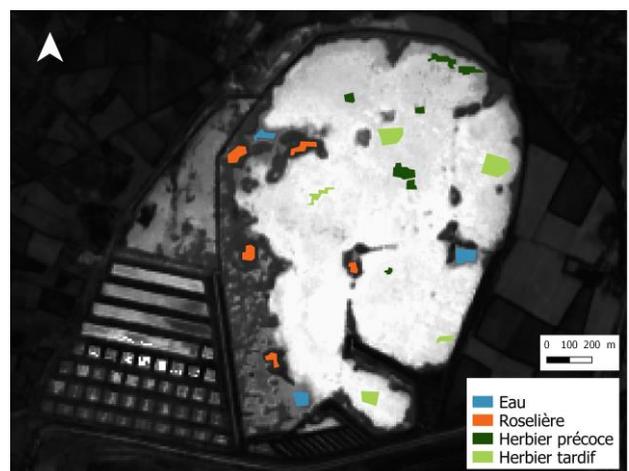


Figure 5. Variance du NDVI entre mars 2017 et avril 2018 en nuances de gris et polygones échantillonnés par type d'occupation du sol.

Au total, 646 pixels ont été échantillonnés (111 d'eau, 144 de roselière, 149 d'herbier précoce et 242 d'herbier tardif). La variation de la moyenne par zones d'intérêt a été étudiée pour chaque indice. Les profils temporels des indices MSAVI et MSAVI2 sont ceux qui paraissent les moins fluctuants et qui permettraient le mieux de discriminer les classes d'intérêt. Le calcul de l'indice MSAVI2 requiert les bandes du rouge (R) et du proche infra-rouge (PIR) :

$$MSAVI2 = \frac{2 \times PIR + 1 - \sqrt{((2 \times PIR + 1)^2 - 8 \times (PIR - R))}}{2}$$

La Figure 6 permet d'appréhender la variation de l'indice MSAVI 2 au cours de l'année en fonction de ces zones prédéfinies. Le maximum de MSAVI2 enregistré pour l'herbier varie autour de 0,3 entre mi-juin et octobre, période de développement maximal de l'herbier. Il est inférieur à celui de la roselière, le MSAVI2 atteignant 0,6 au mois de mai. Le graphique rend compte de la phénologie décalée entre la roselière qui se développe dès le début du printemps et l'herbier à partir de fin avril. La période comprise entre début août et octobre 2017 correspond à celle de la décroissance de la roselière et du développement maximal de l'herbier. Les signaux radiométriques entre les deux classes pendant cette période peuvent alors se confondre.

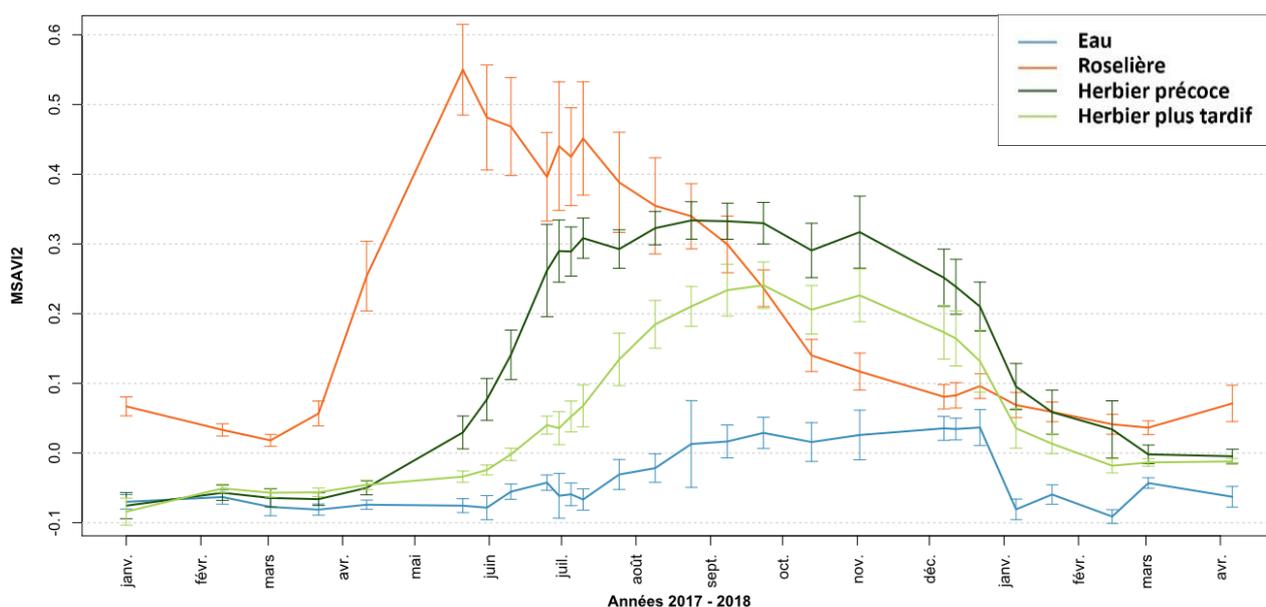


Figure 6. Profil temporel du MSAVI2 pendant un cycle de croissance/décroissance de l'herbier

L'écart entre les deux courbes d'herbier précoce et tardif traduit leur différence radiométrique en fonction du stade de développement. Les herbiers sont immergés en début de croissance et étalés à la surface à la fin de l'été au stade de productivité maximale. Des zones de végétation aquatique resteront ainsi immergées pendant toute la phase de croissance, sans atteindre la surface.

2. METHODE FINALE

2.1. Prétraitement des images

Les données acquises sur la plate-forme THEIA sont corrigées radiométriquement. L'étape de prétraitement consiste à isoler la lagune par découpage, puis concaténer les quatre bandes d'intérêt (B2, B3, B4, B8) et enfin de calculer l'ensemble des indices spectraux. Un masque a ensuite été créé pour n'appliquer la classification que sur les zones en eau en excluant la roselière. Celle-ci présente une faible dynamique spatiale annuelle. Elle a été isolée par seuillage sur MSAVI2 de l'image du 2 juin 2017 (MSAVI2 supérieur à 0,15), quand l'herbier n'est pas encore au maximum de son développement.

2.2. Classification par seuillage sur un indice radiométrique

D'après l'allure du profil temporel MSAVI2, il a été choisi de discriminer la végétation aquatique de l'eau par un seuillage fixe sur l'ensemble de la série temporelle étudiée. Il s'agit d'une classification supervisée car les seuils sont fixés manuellement selon des règles de décision. La croissance des herbiers dans l'eau, atténuant leur signal, constitue la principale difficulté pour déterminer manuellement les valeurs de seuils. Une classe intermédiaire est définie afin de conserver l'information de l'herbier submergé. Elle traduit des « mixels », assimilés à une densité réduite d'herbier ou à un faible couvert. Cette classe « mixte » qui sépare les classes plus évidentes de végétation et d'eau, regroupe également dans une moindre mesure les pixels d'interface (entre la roselière et l'eau par exemple), ainsi que la présence d'eau turbide avec une forte teneur en matières en suspension. Les valeurs seuils de MSAVI2 choisies sont 0,025 pour séparer l'eau de la classe « mixte » et 0,15 pour dissocier la classe « mixte » de l'herbier.

2.3. Démélange linéaire spectral

En parallèle de la classification par seuillage, un démélange spectral linéaire a été réalisé à partir des quatre bandes du visible et du proche infra-rouge. La classification classique suppose que chaque pixel est constitué d'un seul matériau pur, ce qui n'est pas la réalité pendant la phase de développement de l'herbier dans l'eau. Même si la classe « mixte » est intermédiaire entre l'eau et la végétation, elle peut être difficile à interpréter. La technique de démélange permet de déterminer l'abondance relative de classes prédéterminées appelées les « endmembers ». On considère dans ce cas que la réflectance mesurée pour chaque pixel représente la combinaison linéaire des signaux de chaque matériau pur qui le compose. En supposant que les pixels de la lagune représentent un mélange d'eau et de végétation aquatique, il est possible de déterminer la proportion relative de chacune de ces entités et donc de détecter l'herbier immergé, en début de développement. La méthode de démélange spectral nécessite de spécifier en entrée le signal de chaque endmember, c'est-à-dire de déterminer les réflectances caractéristiques de l'eau pure et de l'herbier pur pour les quatre bandes spectrales. Pour cela, une librairie spectrale représentative de la série temporelle a été créée par photo-interprétation pour ces deux classes. Les valeurs des quatre bandes de 42 pixels pour l'eau et 52 pixels pour

l'herbier ont été extraites à partir de 17 images différentes de la série temporelle. La moyenne de ces valeurs pour chaque classe a ensuite été utilisée en entrée de l'algorithme de démixage.

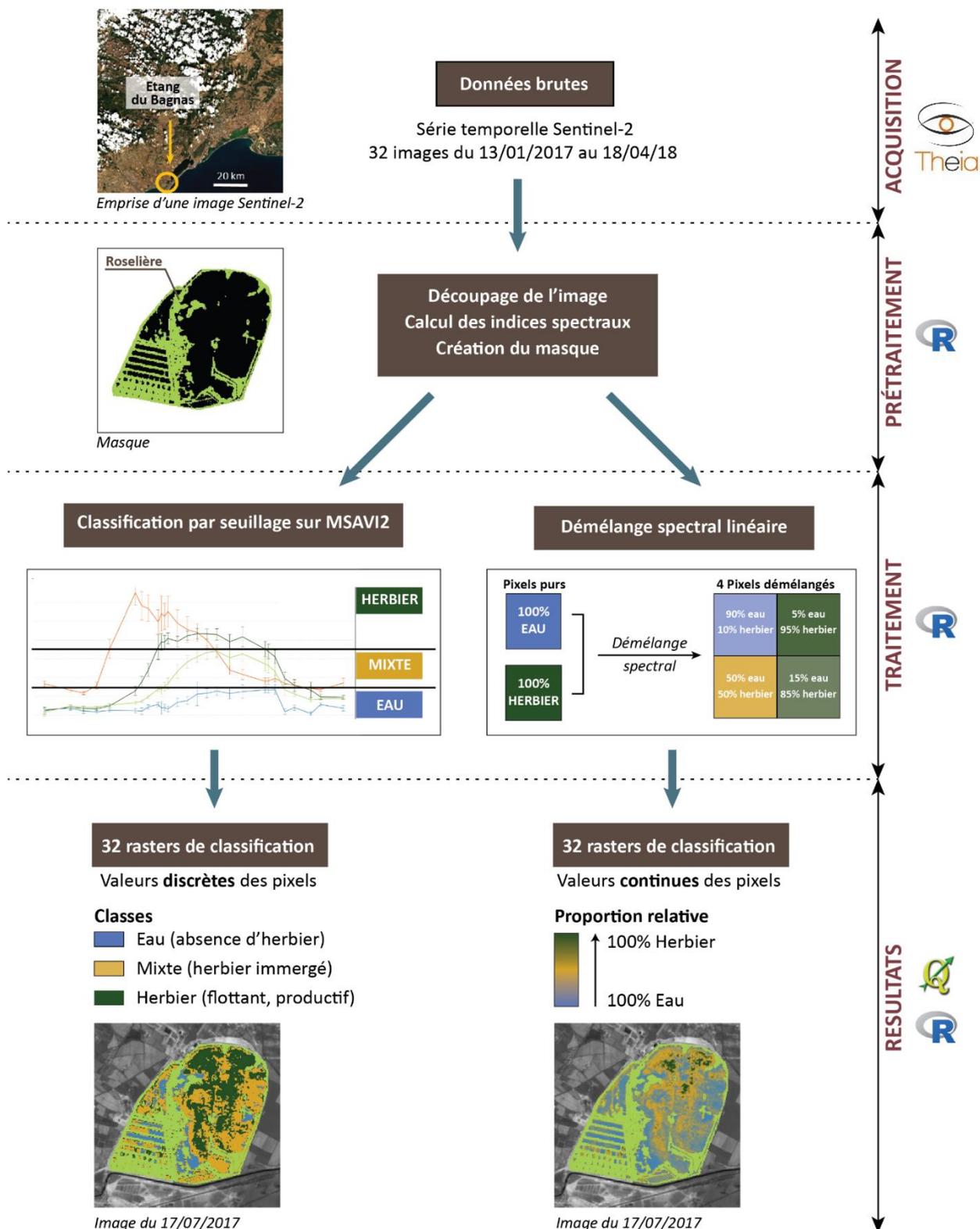


Figure 7. Schéma illustrant les grandes étapes de la méthode de classification

3. RESULTATS

Les résultats bruts des classifications, issus du seuillage sur MSAVI2 (méthode 1) et du démixage spectral (méthode 2) sont des rasters de résolution et d'étendue identiques aux données prétraitées Sentinel-2.

Afin de faciliter la lecture de ce rapport, les résultats obtenus par l'application des deux méthodes se concentrent sur six dates (14 mars 2017, 12 juin 2017, 22 juin 2017, 17 juillet 2017, 10 octobre 2017, 18 janvier 2018). Elles sont représentatives de la série temporelle étudiée et permettent d'appréhender la variabilité de l'herbier (phases de développement et de sénescence). Tous les résultats sont compilés en annexes 4 et 5.

3.1. Méthode 1 : qualification du couvert d'herbier

Les résultats de classification obtenus aux six dates choisies sont présentés en Figure 8. Visuellement, la dynamique spatiale de chaque classe est cohérente vis-à-vis de la série temporelle. En effet, un pixel « type » suit une trajectoire comparable au cycle de développement de l'herbier : « eau » (absence d'herbier), « mixte » (croissance dans l'eau), « herbier » (herbier émergent), « mixte » (sénescence de l'herbier), « eau » (absence d'herbier).

Les cartes sont accompagnées d'un graphique des surfaces relatives classées en « eau », « mixte » et « herbier », ainsi que la somme mixte » et « herbier », de chaque image de la série temporelle. La courbe de cumul entre les classes « herbier » et « mixte » traduit la phase de croissance en début de printemps 2017 et son extension maximale à la fin du mois d'août. L'herbier recouvrait alors la quasi-totalité de la lagune du Grand Bagnas, jusque début janvier. Ensuite, il décroît progressivement jusqu'à fin février, et la lagune retrouve un recouvrement total en eau. La proportion de surface classée « mixte » permet de détecter le début du développement de l'herbier submergé. Elle atteint un pic début juillet, moment où l'herbier commence à émerger. Après cette date, ces pixels mixtes basculent vers la classe « herbier », ce qui explique la chute du recouvrement de cette classe. La phase de sénescence de l'herbier suit la même tendance à l'inverse pendant l'hiver 2018. Le recouvrement total en végétation aquatique évolue de manière opposée à celui en eau.

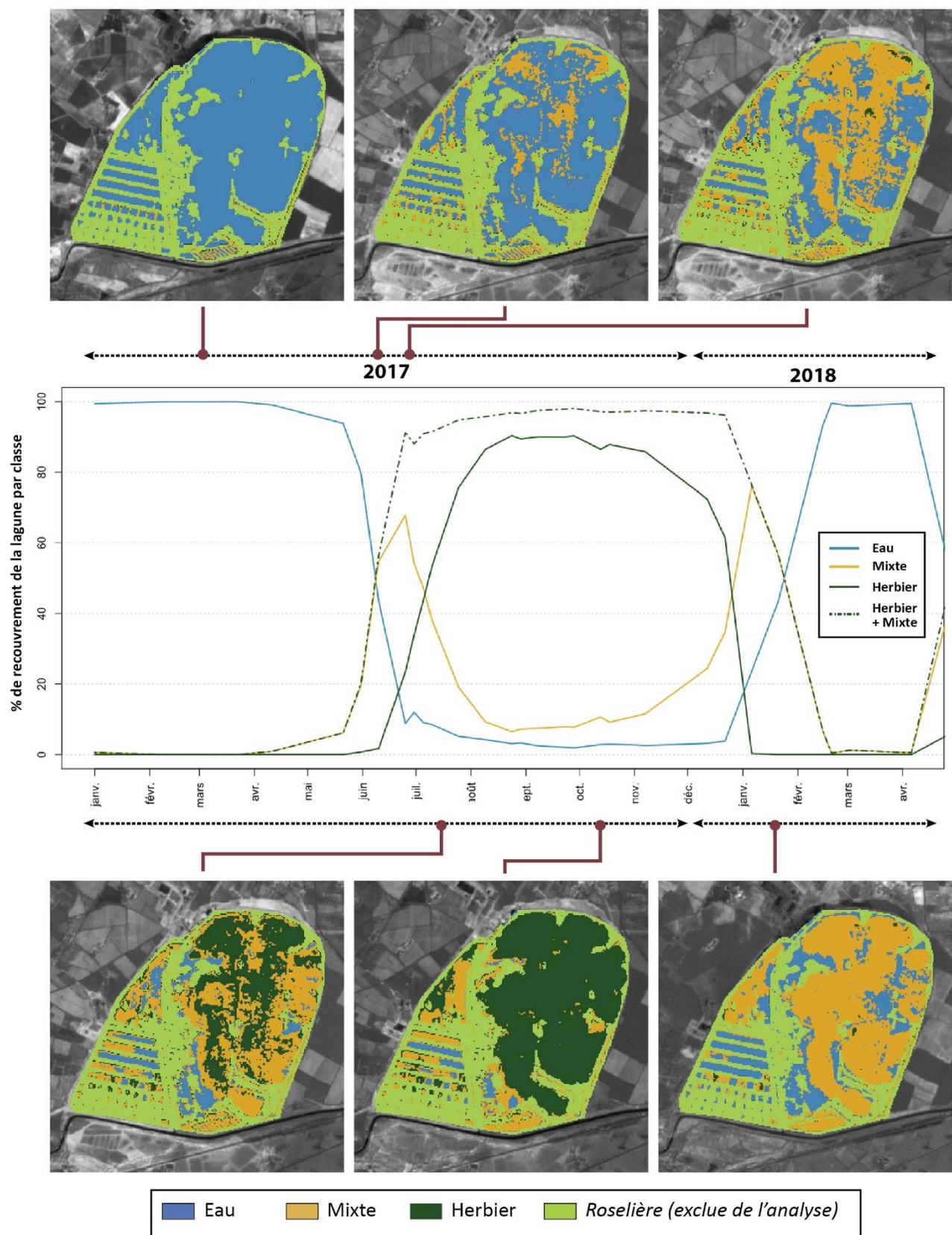


Figure 8. Évolution du couvert de végétation aquatique et de la surface en eau, dans la lagune du Grand Bagnas entre janvier 2017 et avril 2018 et six exemples de cartes de classification associées (14 mars 2017, 12 juin 2017, 22 juin 2017, 17 juillet 2017, 10 octobre 2017, 18 janvier 2018)

3.2. Méthode 2 : calcul d'un indice continu de développement de l'herbier

La Figure 9 regroupe les cartes issues du démélange spectral aux 6 dates représentatives de la période étudiée. La caractérisation du développement de l'herbier s'exprime alors quantitativement et de façon continue.

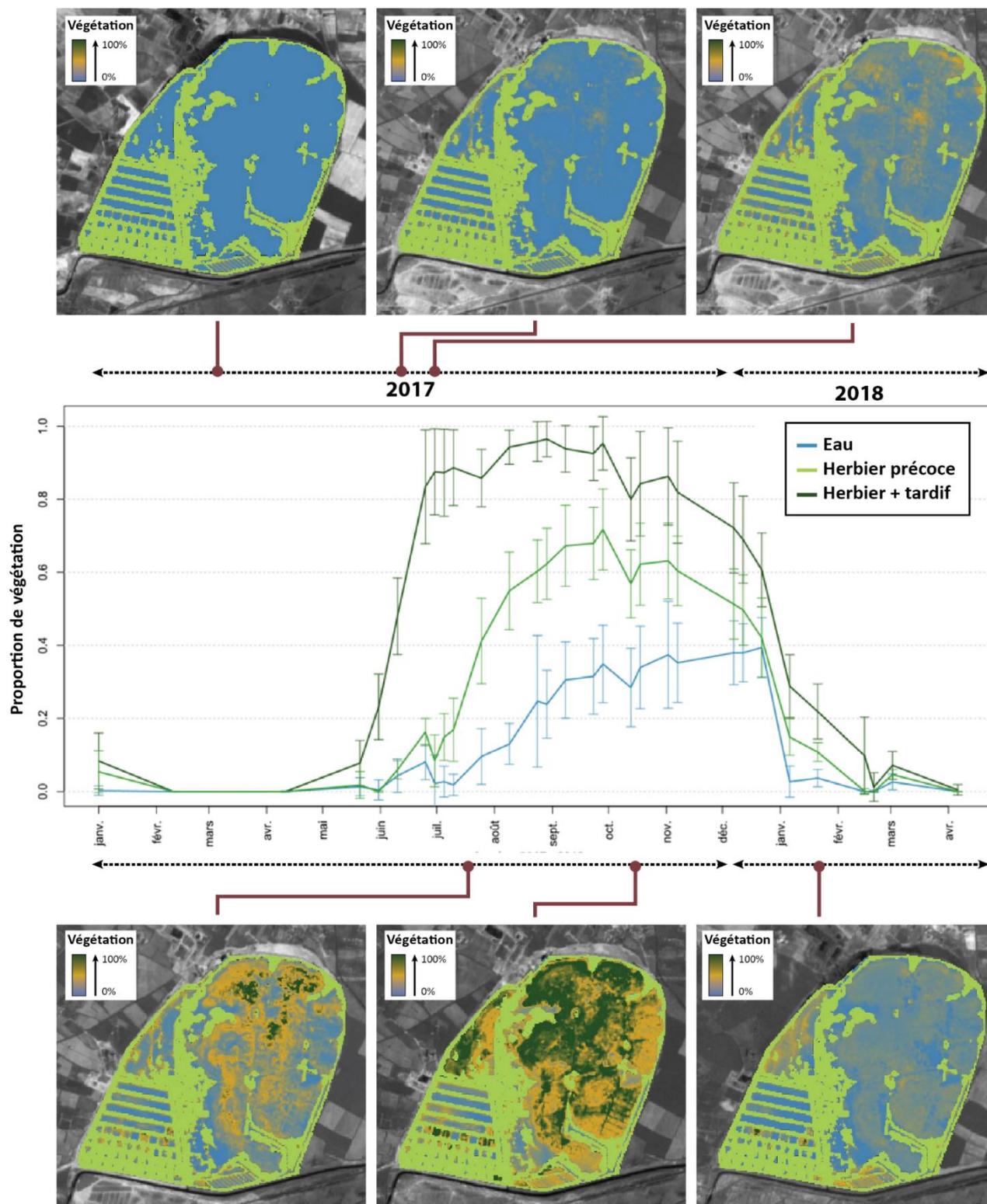


Figure 9. Profil temporel des résultats du démélange spectral dans la lagune du Grand Bagnas entre janvier 2017 et avril 2018 et six exemples de cartes de classification associées (14 mars 2017, 12 juin 2017, 22 juin 2017, 17 juillet 2017, 10 octobre 2017, 18 janvier 2018).

De manière analogue aux résultats obtenus par la méthode 1, les variations d'abondance d'herbier sont en lien avec son cycle de développement. Cependant, en parcourant successivement les 32 images de la série temporelle en annexe 5, quelques incohérences peuvent être détectées. Par exemple, des zones à près de 100% d'herbier au 22 juillet 2017 sont estimées plus faiblement au 6 août 2017, alors que l'herbier poursuit sa croissance. De la même manière, l'image du 25 octobre 2017 ne suit pas logiquement la série temporelle. Des zones d'herbier semblent diminuer alors qu'il est toujours à son stade de recouvrement maximal de la lagune.

Le graphique en Figure 9 présente les moyennes des résultats du démélange pour les zones en eau, les zones où l'herbier émerge précocement et les zones où son développement est plus tardif. Les polygones échantillonnés pour cette analyse sont les mêmes que ceux utilisés pour réaliser le profil temporel de MSAVI2 (§ II.1.3). Pour ces trois zonages, les abondances d'herbier relatives se discriminent sensiblement pendant la phase de croissance. La courbe de l'herbier précoce se distingue des deux autres à partir de la fin du mois de mai. Celle de l'herbier plus tardif est significativement différente de l'eau pendant le mois de juillet. Ensuite, les deux courbes relatives à l'herbier se confondent pendant la phase de sénescence, à partir du mois de décembre. En ce qui concerne les surfaces en eau, une valeur moyenne autour de 0% d'herbier (donc 100% d'eau) est attendue. Or, les moyennes issues du démélange atteignent presque 40% d'herbier entre octobre et janvier.

3.3. Comparaison des résultats des deux méthodes

Dynamique annuelle de l'herbier

L'outil d'analyse de trajectoires, communément utilisé pour l'étude des herbiers marins (Lyons, Phinn, et Roelfsema, 2012), est employé pour représenter la dynamique intra-annuelle de l'herbier. Tous les pixels de la série temporelle suivent une trajectoire qui leur est propre. Une valeur a été attribuée à chaque pixel résultant de la classification, en sommant les résultats obtenus. Concernant la classification par seuillage, les codes 0,1 et 2 sont respectivement attribués aux classes discrètes « eau », « mixte » et « herbier ». Après normalisation et discrétisation des résultats en cinq classes d'intervalles égaux, une carte de trajectoire spatialement explicite a été produite pour chacune des deux méthodes utilisées (Figure 10). Les deux cartes, comparables entre elles, représentent un indice sans unité de la dynamique de l'herbier (compris entre 0 et 100).

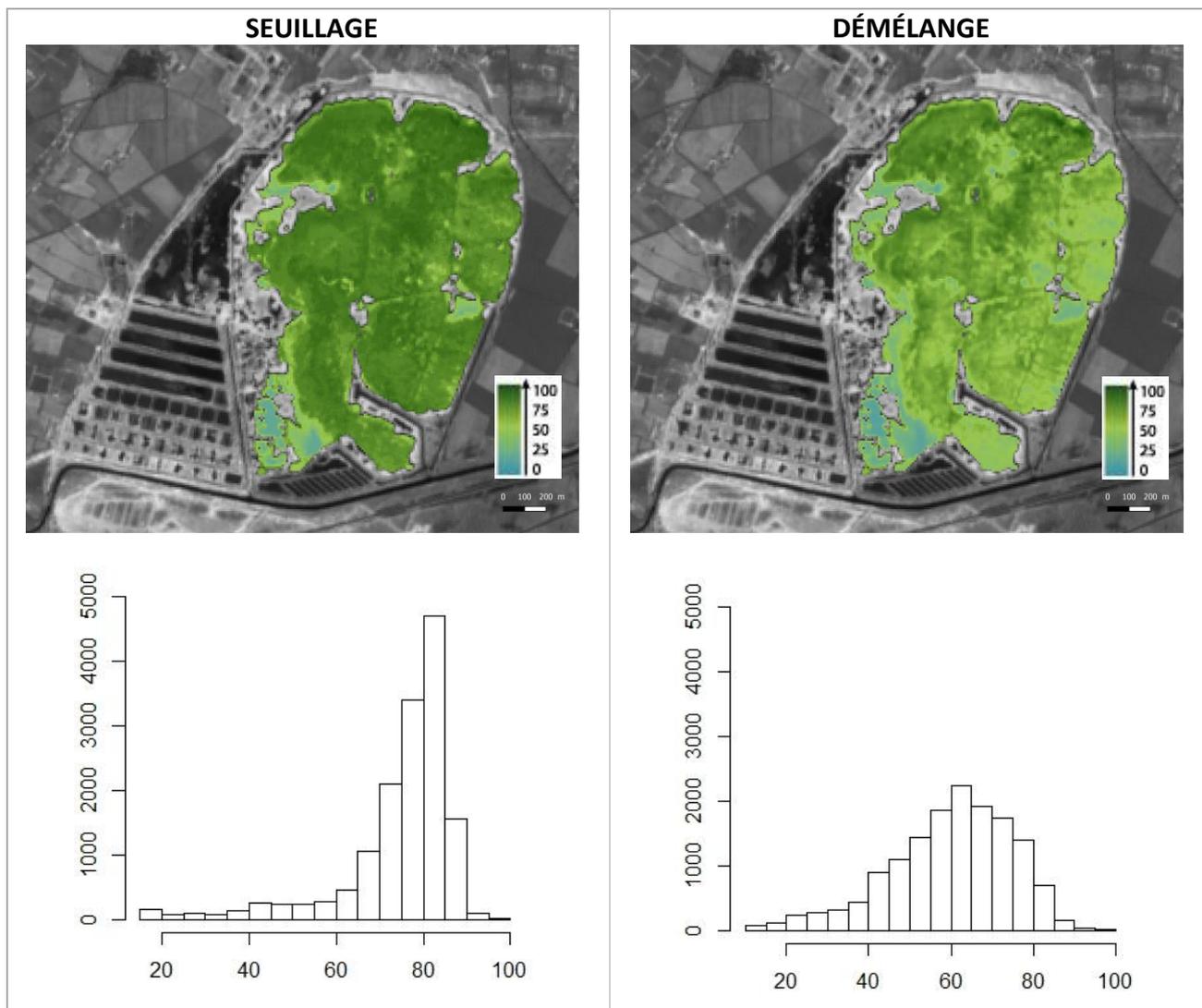


Figure 10. Cartes et histogrammes de distribution de l'indice de dynamique de l'herbier du Grand Bagnas entre mars 2017 et avril 2018, issus de la classification par seuillage (à gauche) et du démixage spectral linéaire (à droite)

Le gradient de vert des deux cartes représente la variabilité des surfaces en herbier au cours de la période étudiée. Plus les pixels sont foncés, plus l'herbier concerné émerge précocement. Les surfaces plus claires permettent de localiser les zones où l'herbier n'atteint pas la surface et celles où il se développe plus tardivement. Les cartes permettent de localiser les zones de la lagune qui restent en eau toute l'année, identiques pour les deux méthodes (indice compris entre 0 et 50). Les différences de nuances de vert entre les deux cartes sont liées au type des méthodes employées pour extraire l'herbier. Elles sont illustrées par le profil des histogrammes de distribution. L'indice issu du seuillage est construit à partir de valeurs discrètes. Or, à partir de septembre, la majeure partie de la lagune est classée en « herbier », codée 3 pour le calcul de l'indice. Cela traduit le pic de l'histogramme autour de 80. Au contraire, le gradient continu issu du démixage explique la distribution des valeurs d'indice qui semblent suivre une loi normale.

Distributions des valeurs du démélange en fonction des classes attribuées par seuillage

Afin de comparer les résultats des deux méthodes, les abondances relatives d'herbier estimées pour chaque pixel par démélange sont exprimées en fonction de la classe attribuée par seuillage (Figure 11). Les graphiques de type « boîtes à moustaches » (ou boxplots) sont utilisés pour analyser la variable d'abondance d'herbier en fonction des classes « eau », « mixte » et « herbier ». Ils permettent de confronter les intervalles des valeurs de démélange et leurs distributions pour chaque classe d'intérêt. Au 14 mars 2017, la lagune est en eau et la plupart des pixels du démélange ont une valeur proche de 0. Quelques pixels classés « mixte » renvoient à des surfaces végétalisées hors herbier dans les casiers de pisciculture au sud de la lagune, qui ont échappé au masque. Au cours du développement de l'herbier (12 juin 2017, 22 juin 2017 et 17 juillet 2017), ainsi qu'à son recouvrement maximal (10 octobre 2017), les trois classes se chevauchent peu. La classification par seuillage sur l'indice MSAVI 2 semble donc se justifier pour discriminer l'eau de l'herbier. La classe « mixte » apparaît également sensiblement différente des deux autres classes, d'où l'intérêt de la conserver dans la méthode.

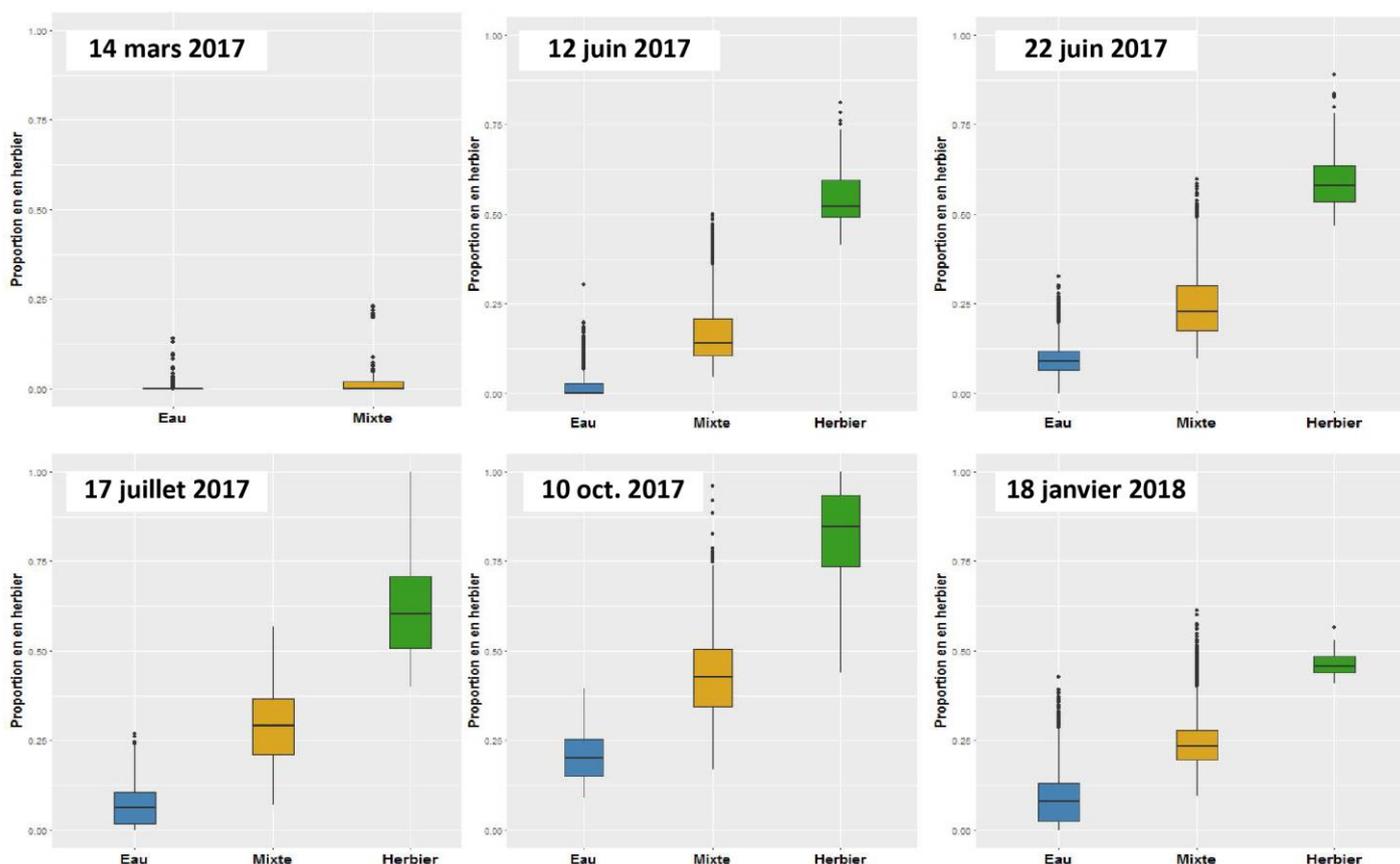


Figure 11. Boxplots résumant le profil statistique des 3 classes « eau », « mixte », « herbier » en fonction des valeurs de pixels démélangés pour six images de la série temporelle (14 mars 2017, 12 juin 2017, 22 juin 2017, 17 juillet 2017, 10 octobre 2017, 18 janvier 2018)

III DISCUSSION

1. APPROCHE CRITIQUE

1.1. Intérêts et complémentarité des deux méthodes de classification

Les deux méthodes d'extraction de l'herbier de la lagune montrent globalement des résultats satisfaisants sur la série temporelle étudiée, c'est-à-dire les 32 images extraites entre l'hiver 2017 et l'hiver 2018. Elles apportent des informations de natures différentes. D'une part, la classification par seuillage fournit des valeurs discrètes pour qualifier l'absence et la présence d'herbier. La classe « mixte » fait office de tampon entre ces deux catégories pour prendre en considération les pixels mixtes. D'autre part, le démixage spectral permet de conserver un gradient, et apporter une valeur quantitative « d'abondance » de l'herbier au sein de chaque pixel. Cette mesure abstraite ne peut cependant pas être directement reliée à la densité ou au recouvrement de l'herbier. Les deux méthodes de classification paraissent ainsi pertinentes et complémentaires. Le choix de la méthode à privilégier dépendra de l'objectif recherché, à savoir une localisation stricte de l'herbier contre une analyse quantitative de sa croissance.

Les points forts de cette approche sont sa simplicité d'application et rapidité d'exécution. D'une part, la qualité radiométrique des images Sentinel-2 favorise l'application des mêmes seuils déterminés sur la série temporelle 2017-2018. Si les résultats ne s'avéraient pas pertinents, il serait alors aisé d'ajuster les seuils par étude du profil temporel de l'indice MSAVI 2. D'autre part, l'algorithme de démixage spectral utilisé nécessite uniquement en entrée la signature spectrale dans les domaines du visible et du proche infra-rouge, des deux endmembers « eau » et « herbier ».

1.2. Limites du démixage spectral

Certaines images résultant du démixage ne semblent pas s'insérer correctement dans la série temporelle. Les résultats de la classification par seuillage ne présentent pas ce type d'incohérences. Cela confirme l'intérêt d'avoir recours à un indice radiométrique pour effacer les effets de variations d'albedo et ainsi s'affranchir de ces biais.

L'intérêt de la méthode de démixage atteint ici sa limite. En effet, il est appliqué à partir de la réponse spectrale des classes « pures » d'eau et d'herbier, dans les quatre bandes du visible et du proche-infra-rouge. Les proportions en eau et végétation issues du démixage sont dépendantes de la variabilité radiométrique (même réduite) de la série temporelle. Les profils temporels des valeurs mesurées dans les quatre bandes spectrales du bleu, vert, rouge et proche infra-rouge, présentés illustrent leurs fluctuations au cours de l'année (annexe 6). Une discrétisation de l'indice d'herbier extrait par pixel pourrait réduire les incohérences dans la dynamique temporelle. Elle apporterait un lissage des variations intra-classes tout en conservant la notion d'abondance d'herbier offerte par le démixage.

1.3. Voies d'améliorations

Pour améliorer les performances des deux méthodes, il serait intéressant de produire de nouvelles analyses en ajoutant les mesures dans les bandes spectrales B4, B5, B6, B7, B8a (domaine du proche infra-rouge) et B11 et B12 (moyen infra-rouge). Leur résolution spatiale est supérieure à 10 mètres, elles devront donc être rééchantillonnées par interpolation. L'information supplémentaire apportée notamment par les bandes B5 et B6, dont l'amplitude de longueur d'onde est réduite et comprise entre 700 et 750 nm, caractérise la région du red-edge, c'est-à-dire la brusque augmentation de réflectance de la végétation (Schuster, Förster, et Kleinschmit, 2012). Elle serait précieuse pour identifier l'herbier. D'une part, cela apporte la possibilité d'explorer la performance d'autres variables discriminantes. Le NDVI red-edge a par exemple fait ses preuves pour extraire les macrophytes et différencier l'eau turbide de la végétation (Khanna *et al.*, 2011). D'autre part, le signal des endmembers nécessaire pour appliquer le démixage pourrait être affiné.

La méthode de classification proposée est opérationnelle sans recourir à des inventaires terrain. De plus, une étude terrain est ponctuelle tandis que l'exploitation des séries temporelles rend possible un suivi régulier. La télédétection permet alors de s'affranchir des difficultés que présenteraient des suivis terrain répétitifs. Chronophages, les prospections doivent généralement couvrir de larges surfaces, souvent difficiles d'accès en milieux aquatiques. De plus, elles sont soumises à l'effet observateur en lien avec l'accessibilité visuelle des espèces (Bottner et Noël, 2014). Cependant, ces approches ne sont pas antagonistes et leur utilisation conjointe permettrait de valider les résultats. Un jeu de données issu des inventaires de végétations aquatiques de la lagune du Grand Bagnas, menés par le CBN en 2017 a été exploré et comparé aux résultats des classifications correspondantes (juillet-août). Les résultats en annexe 7 sont bruités et une relation significative paraîtrait difficile à extraire. Un échantillonnage in situ avec un protocole calibré à cette étude de télédétection (contraintes d'échelle respectées et compatibilité des paramètres des objets à détecter) serait pertinent pour apporter une vérité terrain à l'étude. L'analyse des résultats serait alors approfondie en évaluant la performance de la méthode proposée.

2. PERSPECTIVES

2.1. Valorisation du travail

À court terme, l'ensemble de ce travail vise à être diffusé aux gestionnaires de la Réserve Naturelle Nationale du Bagnas afin qu'ils s'approprient la méthode et la mettent en application dans les années à venir. Un suivi de l'herbier pourra ainsi être conduit de manière régulière et standardisée.

Tous les scripts R réalisés pour produire les images prétraitées, les outils d'analyse (profils temporels, images de variance, trajectoires spatiales) et les résultats cartographiques seront compilés au sein d'une même chaîne de traitement documentée. Un temps consacré à sa prise en main sera également proposé aux différents acteurs de ce projet.

A plus long terme et au-delà du cadre de cette mission, la méthode issue de ce travail pourrait être testée sur d'autres complexes lagunaires (Étang de Thau, Camargue), voire en milieu marin où des enjeux de conservation des herbiers de posidonies et de zostères (*Zostera* spp.) sont identifiés. La méthode nécessiterait d'être ajustée au cas d'étude. En effet, la lagune du Grand Bagnas présente des conditions favorables pour la mise en place d'une méthode de télédétection. Elle se place comme une zone pilote si cette méthode devait être généralisée et diffusée auprès des acteurs environnementaux. Pour aller plus loin, la chaîne de traitements des images satellites Sentinel-2 pourrait être traduite en Python et intégrée à la boîte à outils de traitements de QGIS. Cela permettrait idéalement d'assurer la reproductibilité de la méthode et en faciliter l'accessibilité pour les futurs utilisateurs.

2.2. Etude de la variation interannuelle de l'herbier

Les séries sentinelles Sentinel-2 et la méthode d'extraction de l'herbier seront par la suite directement fonctionnelles pour étudier la dynamique inter-annuelle de l'herbier de la lagune.

L'approche de trajectoire paysagère exploitée sur une échelle annuelle (§II.3.3) pourrait être appliquée de la même manière à une échelle pluriannuelle. Pour cela, il sera nécessaire de choisir judicieusement l'image représentative chaque année, pour détecter l'évolution spatiale de l'herbier d'une année à l'autre. Deux approches sont envisagées selon la disponibilité des données et la résolution temporelle du satellite. La première caractérise l'herbier à un moment choisi de l'année, de façon statique. Il serait observé à une date constante ou à celle correspondant à son recouvrement maximal (date variable d'une année à l'autre). La seconde est l'utilisation d'un indice de dynamique saisonnière comme présenté dans les résultats (somme des classifications de la série temporelle) ? D'autres indices basés par exemple sur la moyenne ou encore le maximum des résultats de classification de la série temporelle annuelle, peuvent être envisagés.

Les données Sentinel datent de 2016 et n'offrent pas un recul suffisant pour effectuer ce type d'analyse interannuelle. En revanche, d'autres capteurs peuvent être explorés pour acquérir des images d'archives de la lagune (Figure 12). Le traitement des données multispectrales RapidEye à très haute résolution spatiale est par exemple un moyen d'analyser la dynamique interannuelle des herbiers (Traganos et Reinartz, 2018).

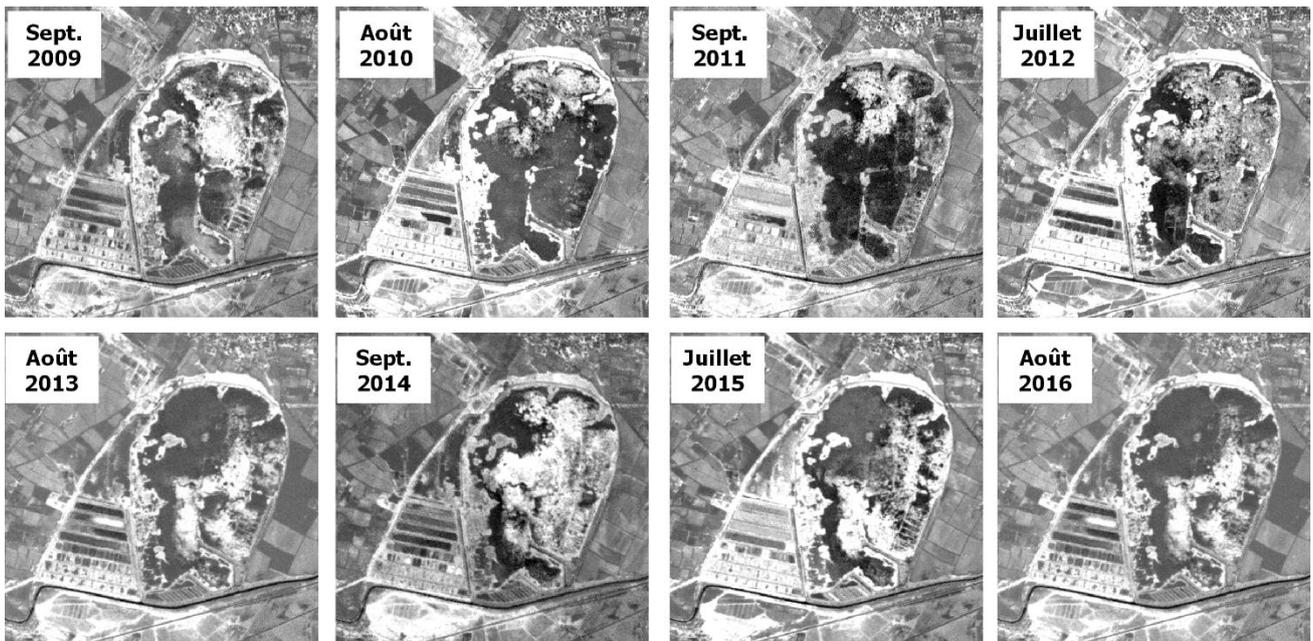


Figure 12. Illustration des potentialités du capteur RapidEye à 5 mètres de résolution, pour étudier l'évolution de l'herbier depuis 2009. Représentation du NDVI red-edge à la même échelle de gris.

2.3. Exploitation des résultats en modélisation de dynamique de populations

Les résultats obtenus seraient directement exploitables pour calibrer un modèle de dynamique de population. Ils répondent ainsi à la demande et à l'objectif originel du stage, formulés par Estelle Pitard. D'une part, la localisation stricte de l'herbier issu de la classification par seuillage peut être utile pour servir de point de départ à des simulations de type automate cellulaire (dynamique de populations en présence/absence). La cartographie de l'étendue spatiale de l'herbier dans la lagune, pendant sa période de croissance et à des dates rapprochées rendra également possible une extraction de paramètres de propagation et de persistance (Lyons, Roelfsema, et Phinn, 2013 ; Santos *et al.*, 2016). D'autre part, l'analyse quantitative de la croissance de l'herbier permettra d'extraire des taux effectifs de croissance, utiles pour construire des modèles prédictifs.

IV CONCLUSION

Ce projet de stage propose une méthode simple et robuste pour quantifier le développement de l'herbier sur la lagune du Grand Bagnas. Les différents choix opérés tout au long de l'étude visent à assurer la reproductibilité de la méthode. La gratuité des données satellitaires et des outils utilisés permettront aux différents acteurs concernés de s'approprier aisément la méthode pour l'appliquer à des fins de gestion environnementale et de recherche fondamentale.

Le suivi continu de l'herbier apporte des informations sur la qualité de l'eau, du milieu et de la biodiversité. La surveillance de son développement pourra être mise en relation avec les conditions hydrologiques et climatiques observées (Le Fur, 2018). Cette analyse permettra d'intégrer pleinement l'herbier dans la gestion du site en mettant lien son développement avec les mesures prises. Les produits cartographiques issus de ce travail constituent ainsi un outil de référence pour évaluer les interventions mises en place par la Réserve. Le

traitement des données historiques serait également précieux pour évaluer le recouvrement, non seulement de l'herbier, mais également de la roselière au fil des années. Plus particulièrement, il permettrait d'évaluer l'impact des mises en assec, opérées tous les cinq ans en moyenne pour minéraliser le milieu et favoriser le développement de la roselière.

L'étude montre tout l'intérêt de combiner les outils écologiques avec les méthodes de la géomatique et télédétection. L'accessibilité des données satellites et les évolutions technologiques associées permettent d'envisager des méthodes de plus en plus pointues en matière de suivi de la biodiversité. L'exploitation des données multispectrales est explorée ici via le programme Sentinel-2 mais d'autres types de données seraient pertinents pour compléter cette étude, en impliquant toutefois des coûts et méthodes différents. La méthode de démixage spectral proposée est habituellement utilisée dans le traitement des données hyperspectrales (Khanna *et al.*, 2011), caractérisées par des bandes spectrales nombreuses, contiguës et étroites. Elles offrent la possibilité d'extraire finement et de manière continue la signature spectrale des objets d'intérêt. Le projet HyperBerre, actuellement mené sur l'étang de Berre, a permis de constituer des bibliothèques spectrales des différentes espèces de phanérogames, mais aussi des algues vertes et de différents types de substrats (GIPREB et HyTECH Imaging, 2018). Ces travaux ouvrent la voie vers des analyses plus fines avec des méthodes de classification permettant de distinguer la diversité spécifique du couvert de végétation aquatique.

La suite directe de ce projet consistera à diffuser le travail réalisé auprès des acteurs locaux liés à la préservation et gestion des milieux humides. La phase de communication, à visée accessible et didactique, pourra prendre la forme de séminaires de restitution, d'une publication scientifique, d'une notice méthodologique ou encore de formations pour la prise en main des outils de traitement. Il s'inscrit dans le 3^{ème} plan national d'action en faveur des milieux humides (2014-2018), et notamment l'axe 2 qui vise à « Développer la connaissance et des outils stratégiques pour gérer les milieux humides ». En ce sens, il contribue à améliorer les connaissances en termes de fonctionnement du milieu lagunaire et valoriser les résultats de projets de recherche sur les milieux humides.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement ma commanditaire Estelle Pitard, à l'origine de ce projet. Merci de m'avoir permis de réaliser cette étude pluridisciplinaire et pour l'ensemble de nos échanges qui ont été très formateurs.

Merci à Frédéric Andrieu, Guilhem de Barros et Guillaume Papuga du Conservatoire Botanique National de Méditerranée, pour notre collaboration et leur expertise tout au long de cette étude.

Je souhaite également remercier Samuel Alleaume pour son encadrement, sa disponibilité et l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Je remercie Geneviève Carrière Béatrice Tomberli et pour la gestion administrative et financière, ainsi que le LabeX NUMEV : AAP2017-1-08, financeur du projet.

Merci à l'équipe de l'UMR TETIS, notamment Jean-Baptiste Féret, Dino Ienco, Marine le Louarn, Kenji Ose, pour m'avoir fait bénéficier de leurs connaissances en télédétection et analyse de données.

J'adresse mes remerciements à Susan Austin et Shruti Khanna de l'UC Davis pour m'avoir accueilli dans leur laboratoire et apporté de précieux conseils méthodologiques.

J'exprime ma gratitude à toute l'équipe du Laboratoire de Katie Boyer pour leur accueil chaleureux et pour m'avoir offert l'opportunité de participer à leur campagne de suivi de zostères dans la baie de San Francisco.

Je tiens à remercier Fred Portet et Leslie Ramos pour leur accompagnement sans faille pendant toute cette année de formation SILAT.

Merci aux stagiaires de la salle Afrique pour l'effervescence des cerveaux couplée à la bonne humeur. Je porte une attention particulière à Éric Chraïbi et sa patience malgré mes innombrables questions en télédétection.

Last but not least, un grand merci à l'ensemble de ma famille pour le soutien inconditionnel et aux habitués de la coloc' Diacon, Mathieu Chailloux, Ophélie Guillemin, Julien Guillot, Sami Marzouk et Céline Pornin pour tous nos moments de partage.

LISTE DES ABREVIATIONS

ADENA	Association de Défense de l'Environnement et de la Nature des Pays d'Agde
AMAP	Laboratoire botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations
CBNMed	Conservatoire Botanique National Méditerranéen de Porquerolles
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
EQUIPEX	Équipement d'Excellence
ESA	European Spatial Agency
L2C	Laboratoire Charles Coulomb
LabEx NUMEV	Laboratoire d'Excellence Solutions numériques et matérielles, modélisation de la vie environnementale et organique
LSU	Linear Spectral Unmixing
MNHN	Museum National d'Histoire Naturelle
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PIR (NIR)	Proche infrarouge (Near infra-red)
RNN	Réserve Naturelle Nationale
SILAT	Systèmes d'Informations Localisées pour l'Aménagement des Territoires
TETIS	Territoire Environnement Télédétection Information Spatiale
TOC	Top of Canopy
UMR	Unité Mixte de Recherche
ZH	Zone Humide

BIBLIOGRAPHIE

- ADENA. 2012. *Plan de Gestion de la RNN du Bagnas 2012-2016*.
- Archambeau R. 2015. *Développement d'une méthodologie de suivi par télédétection des herbiers de zostères sur l'hydrosystème Vaccarès*. Rapport de stage. Université de Toulouse III Paul Sabatier, 32 p.
- Austin M. 2007. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*. 200(1), p. 1-19.
- Bargain A. 2012. *Etude de la structure et de la dynamique des herbiers de Zostera noltii par télédétection multi et hyperspectrale*. Thèse de doctorat. Université de Nantes, 251 p.
- Barnaud G. 1997. *Conservation des zones humides : concepts et méthodes appliquées à leur caractérisation*. Thèse de doctorat. Université de Rennes 1, 451 p.
- Bengtsson H., Bravo H.C., Gentleman R., Hossjer O., Jaffee H., Jiang D., Langfelder P., et Hickey P. 2018. *matrixStats: Functions that Apply to Rows and Columns of Matrices (and to Vectors)*.
- Bivand R., Keitt T., Rowlingson B., Pebesma E., Sumner M., Hijmans R., Rouault E., Warmerdam F., Ooms J., et Rundel C. 2018. *rgdal: Bindings for the « Geospatial » Data Abstraction Library*.
- Bivand R., Lewin-Koh N., Pebesma E., Archer E., Baddeley A., Bearman N., Bibiko H.-J., Brey S., Callahan J., Carrillo G., Dray S., Forrest D., Friendly M., Giraudoux P., Golicher D., Rubio V.G., Hausmann P., Hufthammer K.O., Jagger T., Johnson K., Luque S., MacQueen D., Niccolai A., Pebesma E., Lamigueiro O.P., Short T., Snow G., Stabler B., Stokely M., et Turner R. 2018. *maptools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects*.
- Bottner B. et Noël C. 2014. Repérer les macrophytes depuis le ciel ou sous les eaux, quel appui pour les gestionnaires ? *Sciences Eaux & Territoires*. 15(3), p. 10-15.
- Charrad M., Ghazzali N., Boiteau V., et Niknafs A. 2014. NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Softwarz*. 61(6), p. 1-36.
- Davranche A. 2008. *Suivi de la gestion des zones humides camarguaises par télédétection en référence à leur intérêt avifaunistique*. Thèse de doctorat. Université de Provence - Aix-Marseille 1, 236p.
- Gayet G., Vivier A., Caessteker P., Touroult J., et Barnaud G. 2016a. *Synthèse des acquis et des besoins opérationnels. Zones humides, recherches et développements (2001-2011). Fascicule 1 : méthodes*. ONEMA, MNHN.
- . 2016b. *Synthèse des acquis et des besoins opérationnels. Zones humides, recherches et développements (2001-2011). Fascicule 2 : contributions scientifiques à l'action*. ONEMA, MNHN.
- . 2016b. *Synthèse des acquis et des besoins opérationnels. Zones humides, recherches et développements (2001-2011). Fascicule 3 : Application et besoins de recherche pour l'action*. ONEMA, MNHN.

- Geijzendorffer I.R., Cohen-Shacham E., Cord A.F., Cramer W., Guerra C., et Martín-López B. 2017. Ecosystem services in global sustainability policies. *Environmental Science & Policy*. 74, p. 40-48.
- Giordani P. et Ferraro M.B. 2018. *fclust: Fuzzy Clustering*.
- GIPREB et HyTECH Imaging. 2018. Méthodologie semi-automatique de cartographie des petits fonds en zone lagunaire. Application à la cartographie des herbiers de zostères de l'Etang de Berre. Projet HyperBerre. Dans : *Colloque SFPT-GH*. Montpellier :
- Girard M., Oheix J., Derolez V., et Laugier T. 2011. *Guide de reconnaissance et de suivi des macrophytes des lagunes du Languedoc-Roussillon*. Réseau de Suivi Lagunaire
- Girard M.-C., Girard C.M., et Andréani R. 2010. *Traitement des données de télédétection: environnement et ressources naturelles*. 2ème édition. Paris : Dunod, 576 p. (Technique et Ingénierie).
- Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Stark R., et Rundquist D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*. 80(1), p. 76-87.
- Hagolle O., Huc M., David V.P., et Dedieu G. 2010. A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VEN μ S, LANDSAT and SENTINEL-2 images. *Remote Sensing of Environment*. 114(8), p. 1747-1755.
- Harrell F.E. 2018. *Hmisc: Harrell Miscellaneous*.
- Hijmans R.J., Etten J. van, Cheng J., Mattiuzzi M., Sumner M., Greenberg J.A., Lamigueiro O.P., Bevan A., Racine E.B., Shortridge A., et Ghosh A. 2017. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*.
- Huete A.. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25(3), p. 295-309.
- Huth G., Haegeman B., Pitard E., et Munoz F. 2015. Long-Distance Rescue and Slow Extinction Dynamics Govern Multiscale Metapopulations. *The American Naturalist*. 186(4), p. 460-469.
- Huth G., Lesne A., Munoz F., et Pitard E. 2014. Correlated percolation models of structured habitat in ecology. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 416, p. 290-308.
- Ifremer. 2014. *Réseau de Suivi Lagunaire du Languedoc-Roussillon : Bilan des résultats 2013*.
- Jay S. 2012. *Estimation et détection en imagerie hyperspectrale: application aux environnements côtiers*. Thèse de doctorat. Ecole centrale Marseille, 126 p.
- Khanna S., Santos M.J., Ustin S.L., et Haverkamp P.J. 2011. An integrated approach to a biophysically based classification of floating aquatic macrophytes. *International Journal of Remote Sensing*. 32(4), p. 1067-1094.
- Laugier T., Rigollet V., et de Casabianca M.-L. 1999. Seasonal dynamics in mixed eelgrass beds, *Zostera marina* L. and *Z. noltii* Hornem., in a Mediterranean coastal lagoon (Thau lagoon, France). *Aquatic Botany*. 63(1), p. 51-69.

- Le Fur I. 2018. *Rôle des macrophytes dans la restauration des milieux lagunaires : successions écologiques*. Thèse de doctorat. Ecole doctorale GAIA : Montpellier, 224 p.
- Lehnert L.W., Meyer H., et Bendix J. 2018. *hsdar: Manage, Analyse and Simulate Hyperspectral Data*.
- Leutner B., Horning N., Schwalb-Willmann J., et Hijmans R.J. 2018. *RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis*.
- Lyons M.B., Phinn S.R., et Roelfsema C.M. 2012. Long term land cover and seagrass mapping using Landsat and object-based image analysis from 1972 to 2010 in the coastal environment of South East Queensland, Australia. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 71, p. 34-46.
- Lyons M.B., Roelfsema C.M., et Phinn S.R. 2013. Towards understanding temporal and spatial dynamics of seagrass landscapes using time-series remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 120, p. 42-53.
- Maechler M., Rousseeuw P., Struyf A., Hubert M., Roudier P., Gonzalez J., et Kozłowski K. 2018. *cluster: « Finding Groups in Data »: Cluster Analysis Extended Rousseeuw et al.*
- Martinez J.-M. et Le Toan T. 2007. Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sensing of Environment*. 108(3), p. 209-223.
- MedWet. 2016. *Les zones humides au service du développement durable dans la région méditerranéenne. Cadre d'action 2016-2030*.
- Niel T.G.V., McVicar T.R., et Datt B. 2005. On the relationship between training sample size and data dimensionality: Monte Carlo analysis of broadband multi-temporal classification. *Remote Sensing of Environment*. 4(98), p. 468-480.
- Ozesmi S.L. et Bauer M.E. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*. 10(5), p. 381-402.
- Papuga G. et Andrieu F. 2018. *Les macrophytes et les végétations aquatiques de la Réserve Naturelle Nationale du Bagnas. Inventaires, état de conservation et indicateurs de suivis des lagunes temporaires et permanentes*.
- Pebesma E., Bivand R., Rowlingson B., Gomez-Rubio V., Hijmans R., Sumner M., MacQueen D., Lemon J., O'Brien J., et O'Rourke J. 2018. *sp: Classes and Methods for Spatial Data*.
- Pinty B. et Verstraete M.M. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*. 101(1), p. 15-20.
- Plus M., Deslous-Paoli J.-M., et Dagault F. 2003. Seagrass (*Zostera marina* L.) bed recolonisation after anoxia-induced full mortality. *Aquatic Botany*. 77(2), p. 121-134.
- Pôle relais lagunes méditerranéennes. 2008. *Mieux gérer les lagunes méditerranéennes*.

- Pôle-relais lagunes méditerranéennes,. 2017. *Techniques de suivi des zones humides littorales par télédétection et cartographie.*
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., et Sorooshian S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment.* 48(2), p. 119-126.
- Réseau de Suivi Lagunaire. 2013. *Lagunes de la région Languedoc-Roussillon. Outil de gestion pour l'aménagement des milieux eutrophisés lagunaires.*
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., et Deering D.. 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.* 1, p. 309-318.
- Santos M.J., Khanna S., Hestir E.L., Greenberg J.A., et Ustin S.L. 2016. Measuring landscape-scale spread and persistence of an invaded submerged plant community from airborne remote sensing. *Ecological Applications.* 26(6), p. 1733-1744.
- Schuster C., Förster M., et Kleinschmit B. 2012. Testing the red edge channel for improving land-use classifications based on high-resolution multi-spectral satellite data. *International Journal of Remote Sensing.* 33(17), p. 5583-5599.
- Sivanpillai R. et Latchininsky A. 2007. Mapping Locust Habitats in the Amudarya River Delta, Uzbekistan with Multi-Temporal MODIS Imagery. *Environmental management.* 39, p. 876-86.
- Therneau T., Atkinson B., port B.R. (producer of the initial R., et maintainer 1999-2017). 2018. *rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees.*
- Thioulouse J., Chessel D., Dolédec S., Jean-Michel O., et Borcard. 1997. ade4: Analysis of Ecological Data: Exploratory and Euclidean Methods in Environmental Sciences. *Statistics and Computing.* 7, p. 75-83.
- Tour du Valat. 2012. *Observatoire des Zones Humides Méditerranéennes - Etat et tendances des espèces des zones humides méditerranéennes.*
- Traganos D. et Reinartz P. 2018. Interannual Change Detection of Mediterranean Seagrasses Using RapidEye Image Time Series. *Frontiers in Plant Science.* 9.
- Wei T., Simko V., Levy M., Xie Y., Jin Y., et Zemla J. 2017. *corrplot: Visualization of a Correlation Matrix.*
- Weiss M. et Baret F. 2016. *S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER.* INRA
- Wickham H., Chang W., Henry L., Pedersen T.L., Takahashi K., Wilke C., Woo K., et RStudio. 2018. *ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics.*

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Localisation de la Réserve Naturelle Nationale du Bagnas	8
Figure 2. Lagune du Grand Bagnas	9
Figure 3. Illustration de la variabilité des images en fonction du stade de développement de l'herbier.....	10
Figure 4. Caractéristiques des bandes spectrales du capteur MSI de Sentinel-2B	12
Figure 5. Variance du NDVI entre mars 2017 et avril 2018 et polygones échantillonnés par type d'occupation du sol	14
Figure 6. Profil temporel du MSAVI2 pendant un cycle de croissance/décroissance de l'herbier	15
Figure 7. Schéma illustrant les grandes étapes de la méthode de classification	17
Figure 8. Évolution du couvert de végétation aquatique et de la surface en eau, dans la lagune du Grand Bagnas entre janvier 2017 et avril 2018 et six exemples de cartes de classification associées.....	19
Figure 9. Profil temporel des résultats du démelange spectral dans la lagune du Grand Bagnas.....	20
Figure 10. Cartes et histogrammes de distribution de l'indice de dynamique de l'herbier.....	22
Figure 11. Boxplots résumant le profil statistique des 3 classes « eau », « mixte », « herbier » en fonction des valeurs de pixels démelangés pour six images de la série temporelle.....	23
Figure 12. Illustration des potentialités du capteur RapidEye à 5 mètres de résolution, pour étudier l'évolution de l'herbier depuis 2009. Représentation du NDVI red-edge à la même échelle de gris	27

ANNEXES

Annexe 1. Dates d'acquisition des données Sentinel-2 téléchargées pour l'analyse de la période de croissance-décroissance de l'herbier entre 2017 et 2018	36
Annexe 2. Liste et application des package R installés pour les besoins de l'étude	37
Annexe 3. Liste des indices radiométriques calculés	38
Annexe 4. Résultats des classifications par seuillage sur MSAVI 2	39
Annexe 5. Résultats du démelange spectral	41
Annexe 6. Profils temporels des réflectances mesurées dans les 4 bandes du bleu, vert, rouge et proche infra-rouge de Sentinels 2, pour les classes eau, herbier et roselière	43
Annexe 7. Comparaison des données terrain avec les résultats des classifications	44

Annexe 1. Dates d'acquisition des données Sentinel-2 téléchargées pour l'analyse de la période de croissance-décroissance de l'herbier entre 2017 et 2018

	Satellite	Date d'acquisition	Heure
1	2A	13/01/2017	104402
2	2A	22/02/2017	104801
3	2A	14/03/2017	104411
4	2A	03/04/2017	104138
5	2A	23/04/2017	104254
6	2A	02/06/2017	104212
7	2A	12/06/2017	104258
8	2A	22/06/2017	104021
9	2B	07/07/2017	104022
10	2A	12/07/2017	104605
11	2B	17/07/2017	104757
12	2A	22/07/2017	104522
13	2B	06/08/2017	104021
14	2A	21/08/2017	104208
15	2B	05/09/2017	104015
16	2A	10/09/2017	104212
17	2A	20/09/2017	104622
18	2B	05/10/2017	104550
19	2A	10/10/2017	104021
20	2B	25/10/2017	104120
21	2A	30/10/2017	104754
22	2B	14/11/2017	104257
23	2A	19/11/2017	104806
24	2A	19/12/2017	104438
25	2B	24/12/2017	104432
26	2B	03/01/2018	104424
27	2A	18/01/2018	104524
28	2B	02/02/2018	104813
29	2A	27/02/2018	104236
30	2B	04/03/2018	104407
31	2B	14/03/2018	104014
32	2A	18/04/2018	104512

Annexe 2. Liste et application des packages R installés pour les besoins de l'étude

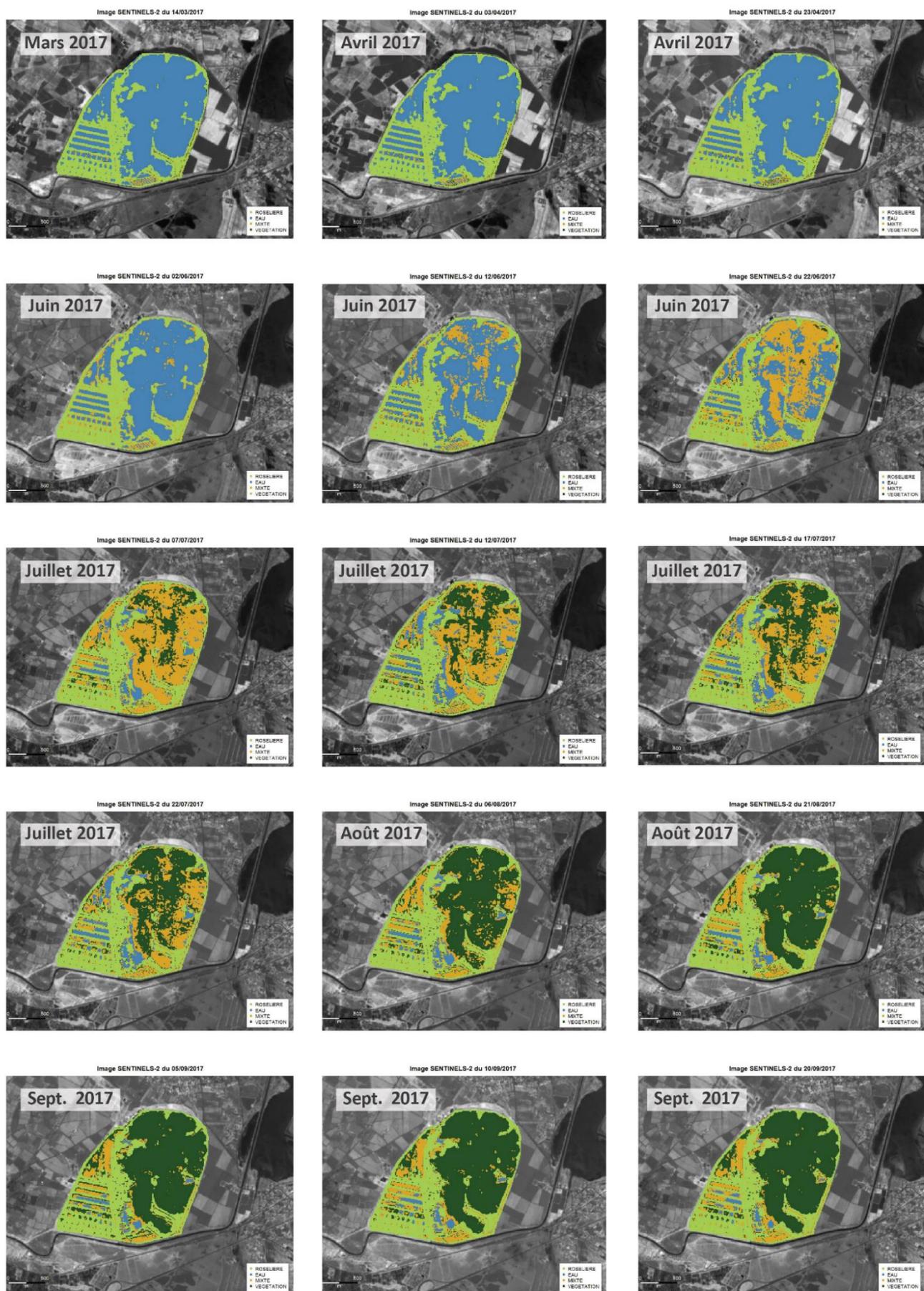
Domaine	Application	Package	Référence
Géomatique Télé-détection	Traitement raster - lien avec librairie GDAL	rgdal	Bivand, Keitt, <i>et al.</i> , 2018
	Traitement raster	raster	Hijmans <i>et al.</i> , 2017
	Traitement raster	Rstoolbox	Leutner <i>et al.</i> , 2018
	Manipulation et traitement de vecteurs	sp	Pebesma <i>et al.</i> , 2018
	Manipulation et traitement de vecteurs	maptools	Bivand, Lewin-Koh, <i>et al.</i> , 2018
	Démélange spectral linéaire	hsdar	Lehnert, Meyer, et Bendix, 2018
Classification	Optimisation du nombre de classes d'un jeu de données	NbClust	Charrad <i>et al.</i> , 2014
	Classification non supervisée : hiérarchique, partitionnement	cluster	Maechler <i>et al.</i> , 2018
	Classification non supervisée : algorithme Fuzzy-Means	fclust	Giordani et Ferraro, 2018
	Classification supervisée : arbres de classification et régression	rpart	Therneau <i>et al.</i> , 2018
Analyse de données statistiques	Fonctions optimisées pour les matrices	matrixStats	Bengtsson <i>et al.</i> , 2018
	Analyse en Composantes Principales / Analyse Factorielle Discriminante	ade4	Thioulouse <i>et al.</i> , 1997
	Représentation graphique : Visualisation des matrices de corrélation	corrplot	Wei <i>et al.</i> , 2017
	Représentation graphique améliorée	ggplot2	Wickham <i>et al.</i> , 2018
	Représentation graphique améliorée	Hmisc	Harrell, 2018

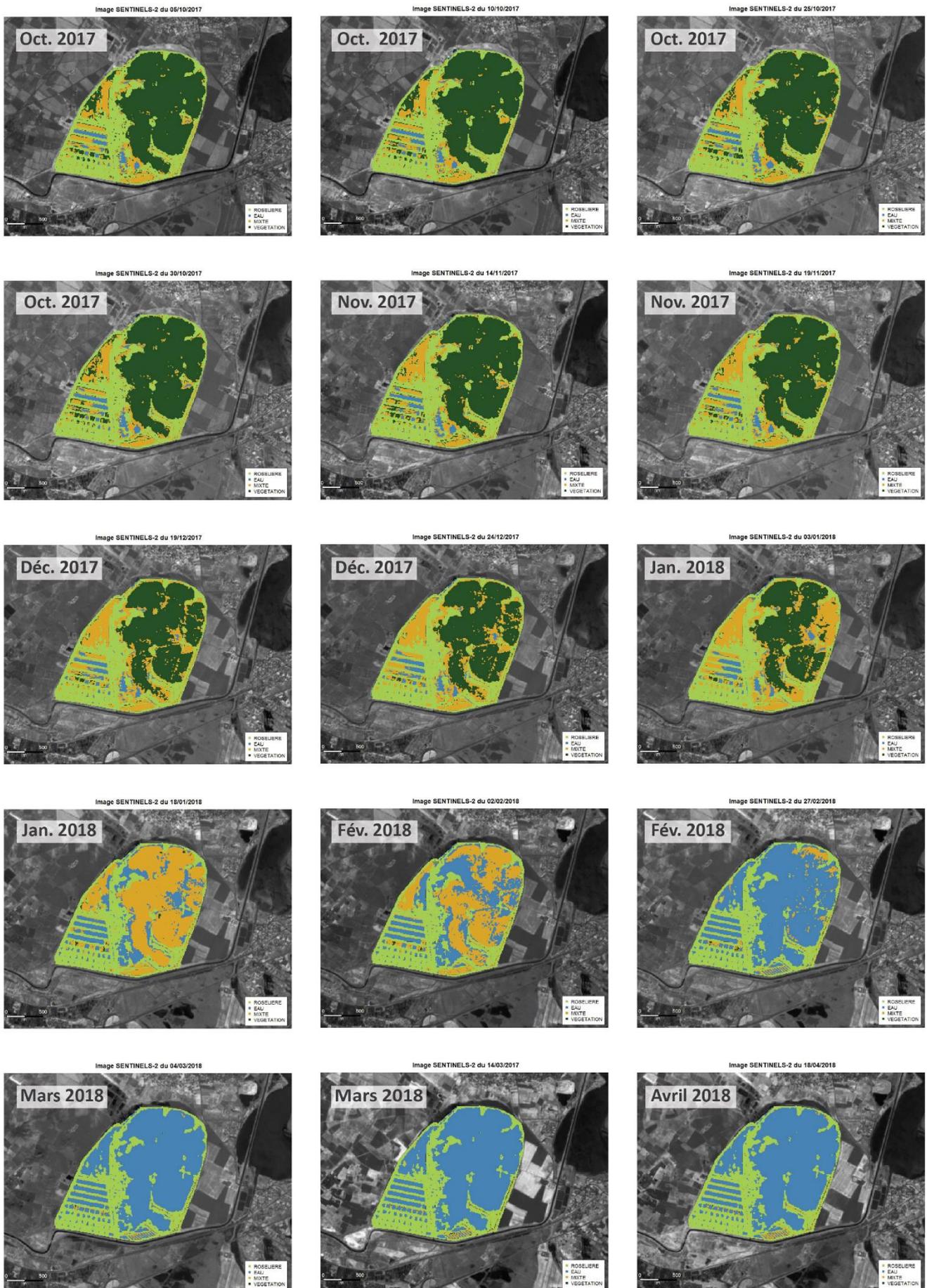
Annexe 3. Liste des indices radiométriques calculés

(B: bleu; G: vert; R: rouge; NIR: proche infra-rouge)

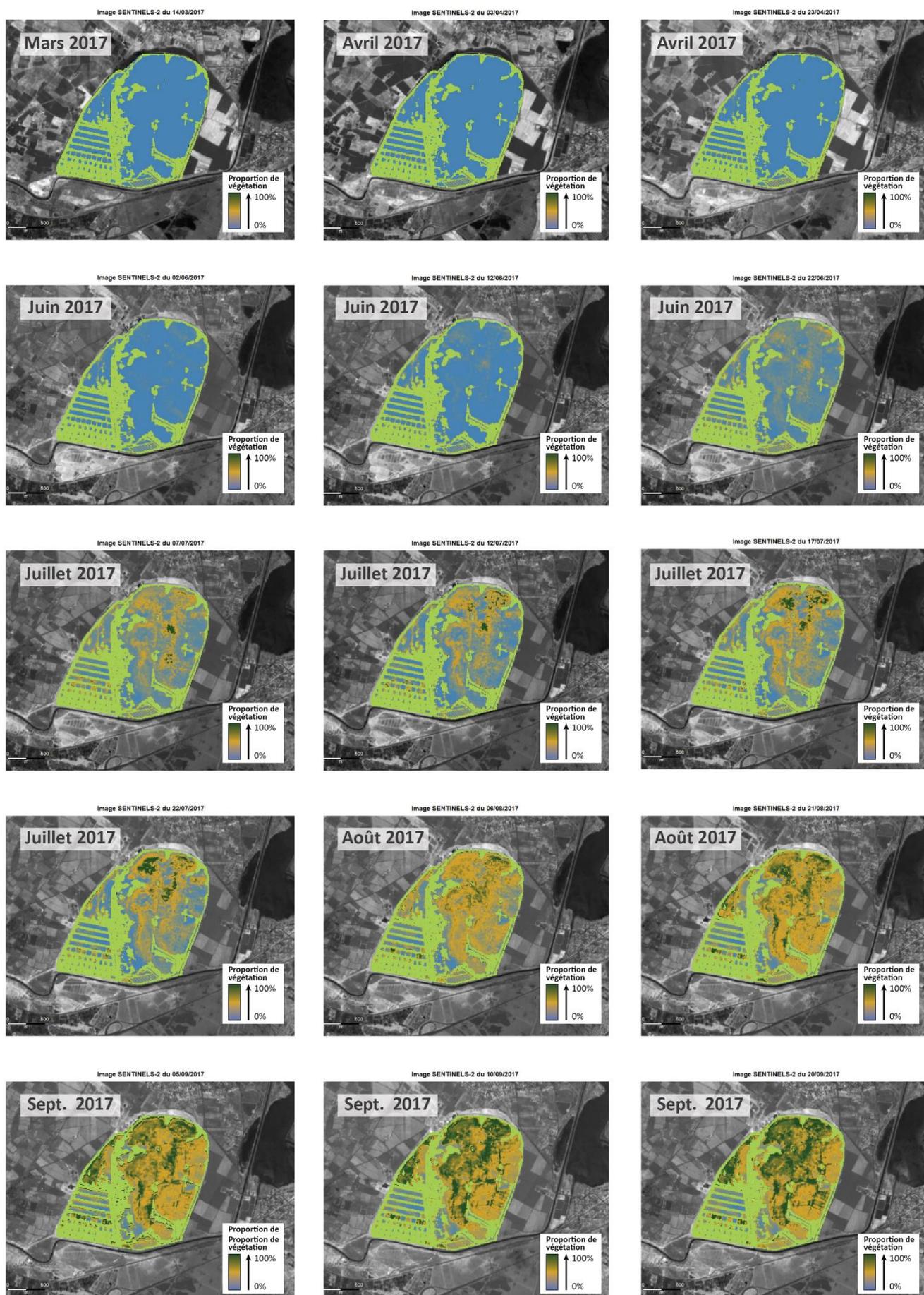
Nom	Bandes	Formule	Référence	
Difference Vegetation Index	DVI	R, NIR	$NIR - R$	
Simple Ratio Vegetation Index	SR	R, NIR	NIR/R	Birth et McVey, 1968
Normalised Difference Vegetation Index	NDVI	R, NIR	$(NIR - R)/(NIR + R)$	Rouse <i>et al.</i> , 1974
Corrected Transformed Vegetation Index	CTVI	R, NIR	$(NDVI + 0.5)/\sqrt{ NDVI + 0.5 }$	Perry et Lautenschlager, 1984
Enhanced Vegetation Index	EVI	B, R, NIR	$(G \times (NIR - R))/(NIR + C1 \times R - C2 \times B + Levi)$ <i>avec G=2,5 / C1=6 / C2=7,5 / Levi=1 (valeurs pour Sentinel)</i>	Huete <i>et al.</i> , 2002
Global Environmental Monitoring Index	GEMI	R, NIR	$\mu(1 - 0,25\mu) - (R - 0,25)/(1 - R)$ $\mu = (2(NIR^2 - R^2) + 1,5NIR + 0,5R)/(NIR + R + 0,5)$	Pinty et Verstraete, 1992
Green Normalised Difference Vegetation Index	GNDVI	G, NIR	$(NIR - G)/(NIR + G)$	Gitelson, Kaufman, et Merzlyak, 1996
Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	R, NIR	$((NIR - R)(1 + L))/(NIR + R + L)$ <i>avec L=0.5 (facteur de brillance du sol)</i>	Huete, 1988
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	MSAVI	R, NIR	$NIR + 0.5 - 0.5\sqrt{((2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - (2 \times R)))}$	Qi <i>et al.</i> , 1994
Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2	MSAVI2	R, NIR	$((2 \times NIR + 1 - \sqrt{((2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - R))})/2$	Qi <i>et al.</i> , 1994
Thiam's Transformed Vegetation Index	TTVI	R, NIR	$\sqrt{ NDVI + 0.5 }$	Thiam, 1997

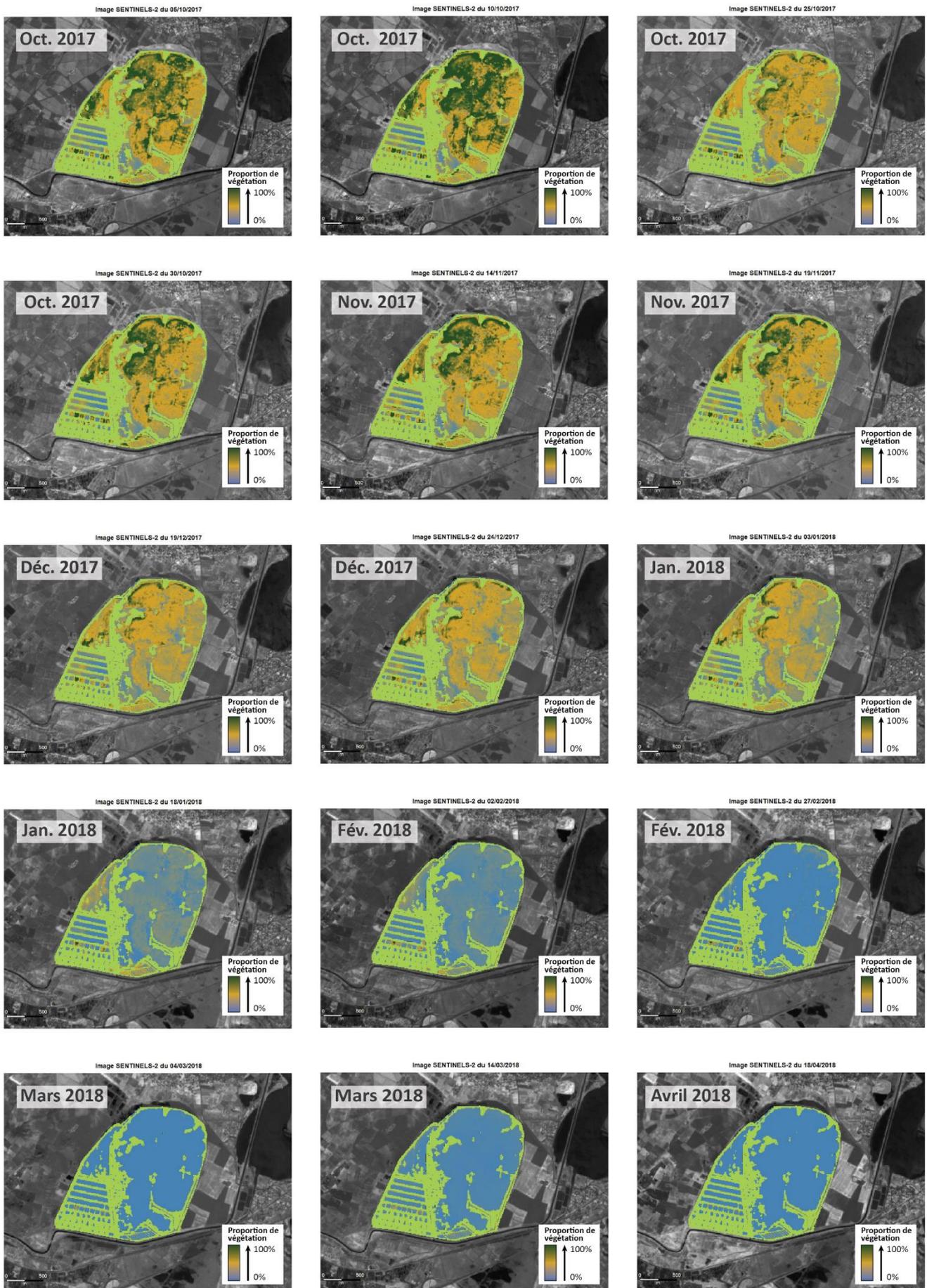
Annexe 4. Résultats des classifications par seuillage sur MSAVI 2



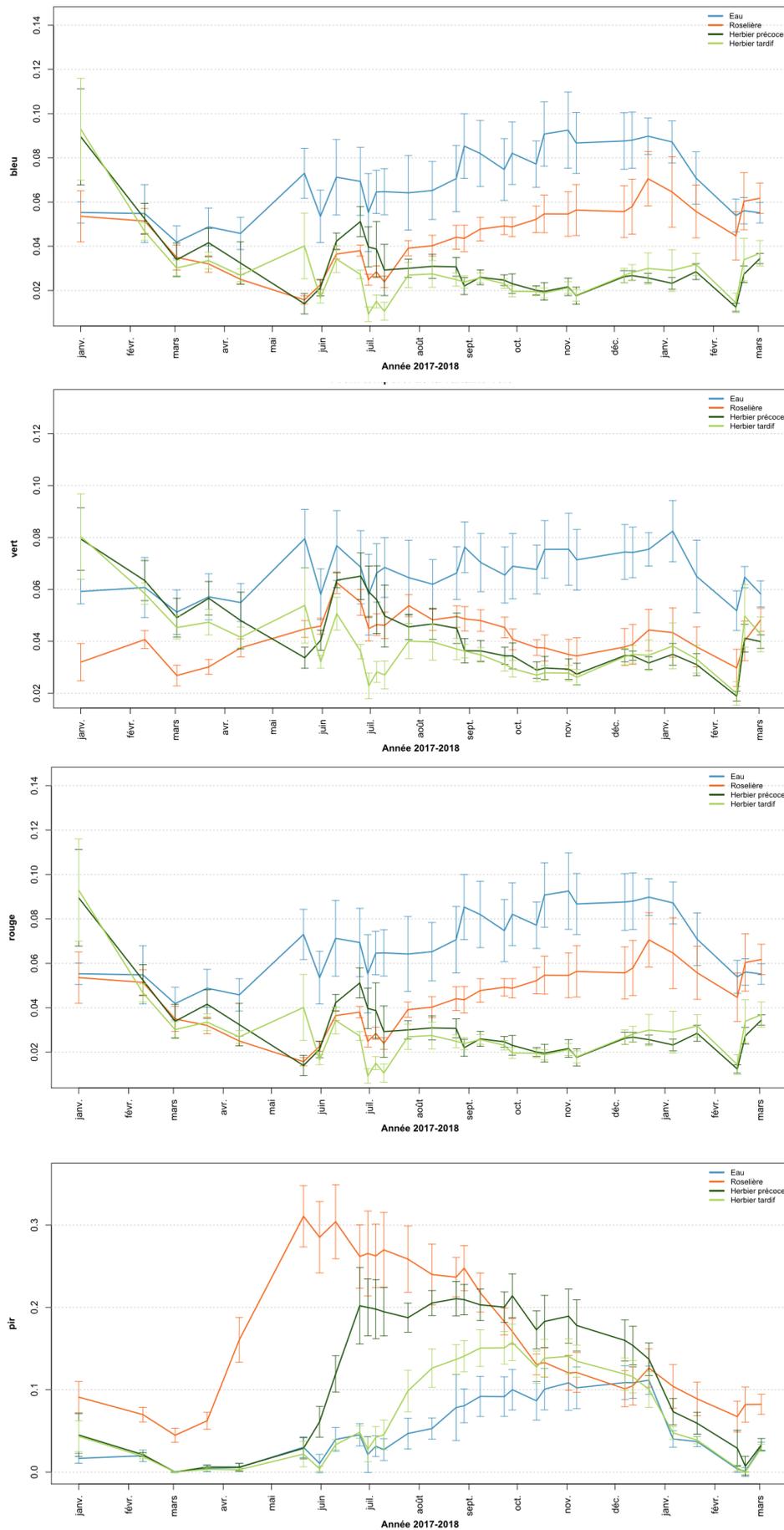


Annexe 5. Résultats du démixage spectral





Annexe 6. Profils temporels des réflectances mesurées dans les 4 bandes du bleu, vert, rouge et proche infra-rouge de Sentinelles-2, pour les classes eau, herbier et roselière



Annexe 7. Comparaison des données terrain avec les résultats des classifications

Les prospections menées par le CBN le 20 juillet et le 2 août 2017 visaient à cartographier la distribution et la densité de l'herbier. Elles ont suivi un maillage stratifié compatible avec l'échelle des données Sentinel-2 et homogène sur l'ensemble de la lagune. Les résultats obtenus pour chaque méthode sur les images du 22 juillet 2017 et le 6 août 2017 sont représentés en fonction du recouvrement d'herbier estimé en pourcentage pour chacun des 125 points échantillonnés.

Image Sentinels-2 du 22 juillet 2017

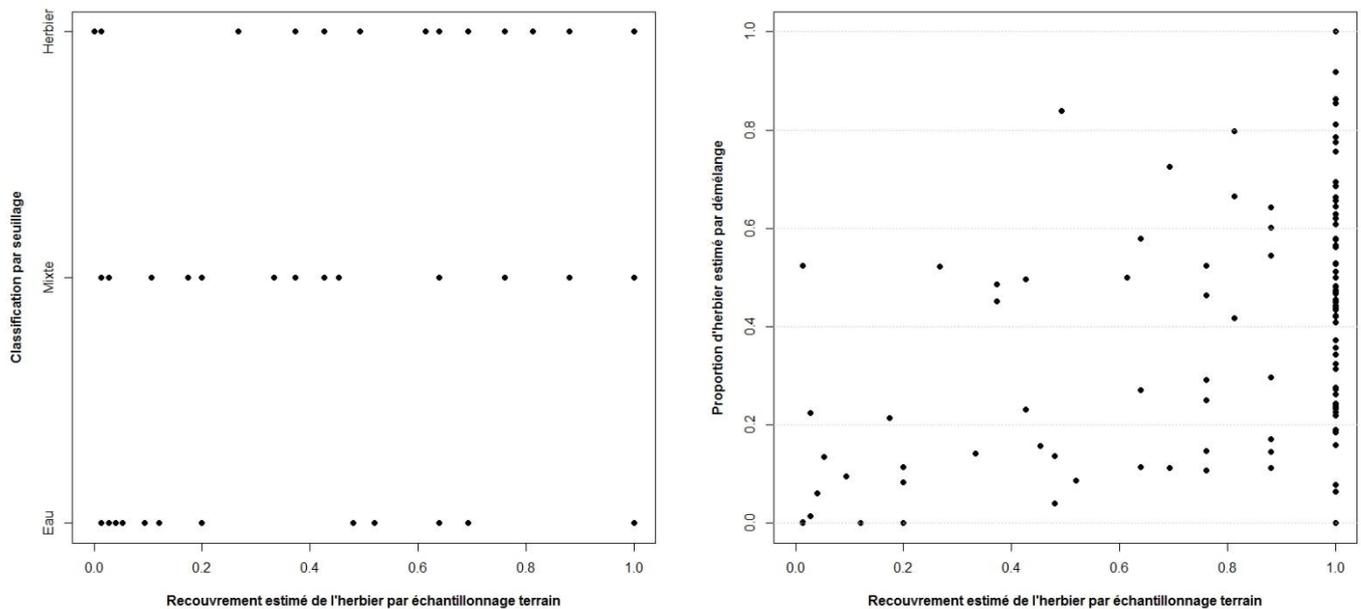
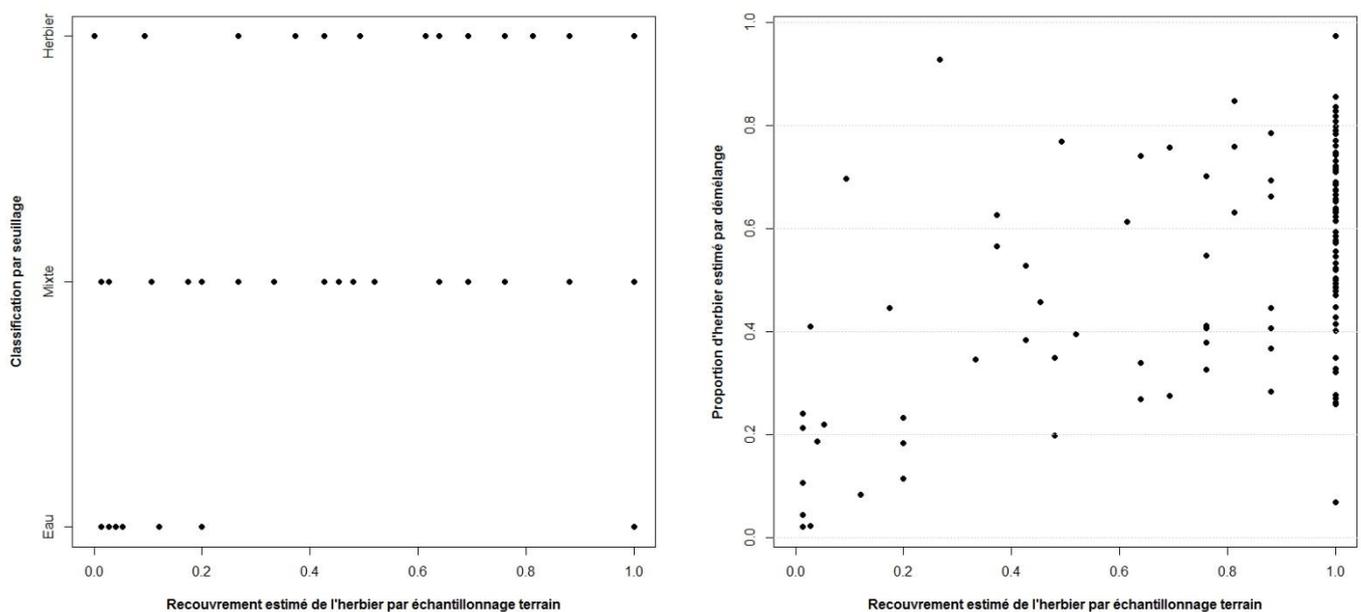


Image Sentinels 2 du 6 août 2018



RESUME - ABSTRACT

Le projet propose une approche concrète de suivi de la dynamique spatio-temporelle de l'herbier de la lagune du Grand Bagnas (Hérault) par télédétection multispectrale. La caractérisation des variations de l'herbier de la lagune, bioindicateur de la qualité du milieu, vise à améliorer les connaissances du site. La compréhension fine du fonctionnement de la lagune permettra d'optimiser les mesures de gestion dans un contexte global de préservation de la biodiversité. La méthode développée exploite les séries temporelles Sentinel-2, à haute résolution spatiale et temporelle. L'étude propose une méthode de classification du couvert de végétation lagunaire, testée sur une série de 32 images pendant un cycle de croissance-sénescence de l'herbier (2017-2018). Deux techniques complémentaires sont employées pour extraire le couvert végétal lagunaire. La première caractérise l'occurrence de l'herbier et la seconde quantifie son développement. Les choix techniques et méthodologiques et l'automatisation du traitement visent à une appropriation par les acteurs du projet pour assurer une surveillance de l'herbier.

Mots-clés : Télédétection – lagune mésohaline – méthode de classification – suivi temporel – Sentinel-2

This study has developed an operational method for monitoring spatio-temporal dynamics of Grand Bagnas lagoon pondweeds (Herault, France), using multispectral remote sensing tools. It is important for the nature managers to characterize the variations of grass beds which represent a key compartment of the ecosystem. It will help to understand the lagoon functioning and therefore optimize the managing processes in order to preserve the biodiversity in general. The method uses Sentinel-2 time series with high spatial and temporal resolution. A classification method was tested on 32 images of the Grand Bagnas lagoon, during growth and decline phases of the vegetation (2017-2018). Two complementary technics were used to extract the vegetation cover from the satellites data. The first one qualifies the presence/absence of the vegetation while the second one quantifies its development. The methodological and technical approach, including the automation of processing, will serve as an accurate tool for the local players in order to monitor precisely and regularly grass beds.

Key-words: Remote sensing – mesohaline lagoon – classification methods – time series – Sentinel-2