



HAL
open science

Téledétection satellitaire multi-sources pour la caractérisation, la cartographie et le suivi des végétations des zones humides et de leurs fonctions écologiques de l'échelle locale à l'échelle globale

Julie Mollies

► To cite this version:

Julie Mollies. Téledétection satellitaire multi-sources pour la caractérisation, la cartographie et le suivi des végétations des zones humides et de leurs fonctions écologiques de l'échelle locale à l'échelle globale. Informatique [cs]. 2024. dumas-04788137

HAL Id: dumas-04788137

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04788137v1>

Submitted on 18 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES

de BORDEAUX AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex (1)

MEMOIRE de fin d'études
pour l'obtention du titre
d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

« Télédétection satellitaire multi-sources pour la
caractérisation, la cartographie et le suivi des végétations des
zones humides et de leurs fonctions écologiques de l'échelle
locale à l'échelle globale. »

Mollies, Julie

Spécialisation :  AgroTIC

Etude réalisée à : i-Sea, 30 Avenue de Canteranne 33600 Pessac.

- 2024 -

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES

de BORDEAUX AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex (1)

MEMOIRE de fin d'études
pour l'obtention du titre
d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

« Télédétection satellitaire multi-sources pour la
caractérisation, la cartographie et le suivi des végétations des
zones humides et de leurs fonctions écologiques de l'échelle
locale à l'échelle globale. »

Mollies, Julie

Tuteurs entreprise : Beguet Benoit, Rozo Clémence

Tuteur pédagogique : Da Costa Jean-Pierre

Remerciements

Je tiens à remercier Virginie Lafon et Aurélie Dehouck ainsi que toute l'entreprise i-Sea pour leur accueil chaleureux durant cette année d'alternance. Merci à chacun de mes collègues pour leur présence au quotidien, au bureau ou à distance, pour leur bienveillance, leur accessibilité et leur partage.

Un grand merci à Clémence Rozo, ma tutrice, pour tous les moments que nous avons partagés, pour ses conseils et pour avoir rendu cette année en alternance unique. Un deuxième grand merci à Benoit Beguet pour son accompagnement, sa confiance et toutes les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir. Ce fut un réel plaisir de travailler à leur côté.

Merci à Rémi Budin, mon voisin de bureau, pour tous les moments qu'il a consacrés à m'expliquer le fonctionnement des librairies python, des traitements ou à partager ses travaux. Ses connaissances et son enthousiasme m'ont beaucoup apporté pour la réalisation de ce travail.

Je souhaite remercier Mr Jean-Pierre Da Costa, pour ces précieux retours et son accompagnement pour la rédaction de ce mémoire. Merci également à Mr Christian Germain pour ses conseils et son regard critique sur mon travail lors du point mi-parcours. Merci à l'ensemble du corps enseignant Agrotic pour cette année de spécialisation très riche et intéressante.

Merci également à Alexandre Lee, Barna Keresztes et aux étudiants du module "TIC pour l'environnement", pour leur confiance et le travail accompli sur le terrain. Je remercie également Amélie Séchaud de m'avoir accompagnée et aidée pour l'acquisition des données.

Merci à mes proches pour leurs encouragements tout au long de la rédaction de ce mémoire, sans oublier Jérém et Antonin, les i-Sea kids, pour leur bonne humeur et leur soutien.

Pour finir, merci à ma famille qui m'a toujours apporté la plus grande force au quotidien et dans tout ce que j'ai entrepris.

Table des matières

Introduction	1
1 Etude des zones humides par télédétection.....	2
1.1 Observation de l'environnement par l'industrie spatiale dans un contexte de changement climatique.....	2
1.1.1 i-Sea, le spatial pour le littoral et la biodiversité	2
1.1.2 Le pôle biodiversité et l'offre de service Biocoast	3
1.1.3 La conduite d'un projet Biocoast et les principaux partenaires.....	3
1.2 Intérêt de l'étude des zones humides dans un contexte de bouleversement climatique	4
1.2.1 Définition des zones humides.....	4
1.2.2 Les zones humides, des écosystèmes menacés.....	4
1.2.3 L'étude des zones humides par le pôle biodiversité : problématisation	5
1.2.4 Les fonctions écologiques des zones humides	5
1.2.4.1 Les fonctions hydrologiques.....	6
1.2.4.2 Les fonctions biologiques.....	6
1.2.4.3 Les fonctions biogéochimiques ou physiques	6
1.3 Contexte et démarche autour du projet ingénieur.....	7
1.3.1 Besoins opérationnels	7
1.3.2 Illustration des besoins opérationnels sur les fonctions des zones humides au travers de trois projets	7
1.3.2.1 Le projet Olives, échelle locale	7
1.3.2.2 Le projet CAFEZH – Cartographie des fonctions écologiques des Zones Humides, échelle régionale.....	8
1.3.2.3 Le projet ESA Coastal Blue Carbon, échelle globale	9
1.3.3 Problématisation	10
1.3.4 Démarche ingénieure	10
1.3.4.1 Déroulement de la période d'alternance.....	10
1.3.4.2 Méthodologie employée pour répondre à la problématique	10
2 Caractérisation des végétations et des fonctions écologiques des zone humides par télédétection	11
2.1 Les capteurs utilisés pour l'observation des zones humides	11
2.2 Le choix des images pour l'étude des zones humides	12
2.2.1 La période temporelle	12
2.2.2 La résolution spatiale et le changement d'échelle	12
2.2.3 Le prix.....	13
2.3 Données pour la télédétection des zones humides.....	13

2.3.1	Les données terrain	13
2.3.2	Les indices de télédétection	14
2.3.3	Les données issues des capteurs actifs	15
2.3.4	Les valeurs de Ellenberg, spatialisées en télédétection	15
2.3.5	Les méthodes de cartographies en télédétection.....	16
2.3.5.1	L'apprentissage non supervisé.....	16
2.3.5.2	L'apprentissage supervisé.....	16
2.3.5.3	Différents modes de Random Forest	17
2.4	Synthèse de la recherche bibliographique pour la cartographie des végétations et des fonctions écologiques des zones humides.....	17
3	Propositions méthodologiques pour l'étude des végétations, des trajectoires écologiques et l'expression des fonctions écologiques des zones humides	18
3.1	Avant-propos sur la méthodologie et le travail réalisé	18
3.2	Données à disposition	19
3.3	Les chaînes de traitements	20
3.3.1	Proposition méthodologique et outils utilisés.....	20
3.3.2	Chaîne de traitement pour la classification d'images.....	21
3.3.3	Etude de séries d'images	23
3.3.3.1	Méthodologie pour la trajectoire des pixels	23
3.3.3.2	Chaîne de traitement pour l'analyse spatio-temporelle des images et indices radiométriques par télédétection.....	24
3.3.4	Choix techniques et professionnels pour la sélection des fonctions écologiques des zones humides.....	25
3.3.4.1	Analyse des climats d'humidité.....	25
3.3.4.2	Analyse de la productivité	25
3.3.4.3	Définir la zone humide par les valeurs d'Ellenberg	25
3.4	Elaboration d'une méthodologie terrain basée sur les traitements de télédétection	26
3.4.1	Intérêt d'un test terrain en zone humide	26
3.4.2	Choix du site d'étude	26
3.4.3	Méthodologie pour les relevés de végétations et de biomasses.....	27
3.4.3.1	Organisation générale du protocole terrain.....	27
3.4.3.2	Méthodologie pour la biomasse.....	28
3.5	Synthèse sur les méthodologies employées.....	29
4	Présentation et analyse des résultats produits et expérimentés pour les différents projets	29
4.1	Résultats dans le cadre du projet Olives	29

4.1.1	Classification des habitats naturels par la solution Biocoast sur le marais d'Olives	29
4.1.1.1	La typologie.....	29
4.1.1.2	Exploitation des données.....	30
4.1.1.3	Evaluation du modèle.....	31
4.1.1.4	Post-traitement.....	32
4.1.1.5	Résultats cartographiques de la classification des habitats naturels.....	33
4.1.2	Les climats d'humidité.....	33
4.1.2.1	Exploitation des données.....	33
4.1.2.2	Les trajectoires d'humidité.....	34
4.1.2.3	L'étude du Most Frequent.....	35
4.1.3	Les changements et trajectoires de végétation.....	36
4.1.3.1	Cartographie des changements.....	36
4.1.4	Synthèse sur les résultats.....	39
4.2	Résultats dans le cadre du projet CAFEZH.....	40
4.2.1	Cartographie de prédiction des habitats naturels.....	40
4.2.1.1	Adaptation de la stratégie de classification à l'échelle régionale.....	40
4.2.1.2	Résultats de la cartographie des végétations.....	41
4.2.2	Etude des valeurs d'Ellenberg.....	41
4.2.3	Etude de la productivité primaire.....	42
4.2.3.1	L'indice NDVI-I.....	42
4.2.3.2	L'indice MMAX.....	43
4.2.3.3	Influence des modes de gestion sur la productivité primaire.....	43
4.2.4	Synthèse sur les résultats.....	44
4.3	Résultats préliminaires sur le projet ESA Coastal Blue Carbon.....	45
4.3.1	Un algorithme k-Means pour la préparation de la stratégie d'échantillonnage	45
4.3.2	Retours sur la campagne terrain.....	46
4.3.3	Perspectives pour la base de données.....	47
4.3.4	Synthèse sur les résultats.....	48
4.4	Discussion sur la méthode et les résultats dans le cadre de l'étude des végétations et des fonctions écologiques des zones humides par télédétection.....	48
	Conclusion.....	51

Liste des figures

Figure 1 : Etapes clés et chronologie d'un projet Biocoat © , i-Sea	4
Figure 2 : Différents écosystèmes de zones humides.....	4
Figure 3 : Représentation schématique des relations entre milieu, fonction écologique et service écosystémique.....	6
Figure 4 : Emprise, clients, partenaires, et surface de la zone d'étude pour le projet Olives.....	8
Figure 5 : Emprise, clients, partenaires, et surface de la zone d'étude pour le projet CAFEZH.....	9
Figure 6 : Emprise, clients, partenaires, et surface de la zone d'étude pour le projet Coastal Blue Carbon.....	9
Figure 7 : Diagramme de Gantt pour la réalisation de l'étude durant l'année d'alternance réalisée chez i-Sea. Les périodes grisées correspondent aux périodes de formation école.....	10
Figure 8 : Satellites utilisés pour l'observation des zones humides (non exhaustive) selon le type, l'année de lancement, la résolution et la gratuité.....	11
Figure 9 : Relation entre l'étendue de la surveillance, le domaine de résolution spatiale et l'incertitude de la donnée produite, reproduction (Campbell et al., 2022).	13
Figure 10 : Méthodologie terrain de création de polygones d'apprentissage pour des habitats homogènes, adaptée à l'usage d'images satellite, extrait solution Biocoast i-Sea.....	14
Figure 11 : Schéma des différents niveaux hiérarchiques en phytosociologie, les associations représentent des espèces végétales regroupées.	15
Figure 12: Déroulement de l'algorithme des k-Means et illustration sur une image Sentinel-2 du bassin d'Arcachon.....	16
Figure 13 : Schéma bilan sur la cartographie d'une fonction écologique d'une zone humide par télédétection et algorithme d'intelligence artificielle. Les carrés roses représentent les limites et axes de réflexion à induire dans la méthodologie pour les différents.	18
Figure 14: Chaîne de traitement générale pour la classification de pixels sur images THR à partir de données de terrain ponctuelles. Les étapes colorées sont optionnelles.....	22
Figure 15 : Stack d'images pour représentation des trajectoires temporelles des pixels....	23
Figure 16 : Chaîne de traitement pour l'étude des indices de télédétection sur séries temporelles Sentinel-2.....	24
Figure 17 : Plan et situation géographique de la Réserve Naturelle des Prés Salés d'Arès. Source : Réserve Naturelle des Prés Salés d'Arès.	27
Figure 18 : Carte des ceintures de prés salés extrapolée pour Réserve Naturelle des prés salés d'Arès basée sur la cartographie des habitats produite en 2017 par télédétection et relevés terrain (à gauche), Extrait du protocole terrain mis en place dans le cadre du module TIC avec Bordeaux Sciences Agro pour la visualisation de la mission terrain (à droite).....	27

Figure 19: Représentation schématique de l'échantillonnage des ceintures constituant les prés salés d'une zone humide pour un traitement par télédétection sur des images satellites avec des pixels à différentes résolutions. Méthodologie choisie dans le cadre d'un test terrain pour la détermination de la perte d'informations entre un pixel S2 et un pixel Pl.....	28
Figure 20 : Comparaison entre un modèle d'apprentissage basé sur des polygones en échantillonnage non équilibré (A) et un modèle basé sur des pixels en échantillonnage non équilibré pour l'année 2019.....	32
Figure 21 : Résultats cartographiques pour la classification des habitats naturels du marais d'Olives à Pempuyre de 2019 à 2023, réalisés à partir de relevés terrain et de chaîne de traitement en télédétection, Biocoast ©.	33
Figure 22 : Nombre d'images Sentinel-2 disponibles de 2019 à 2023 pour l'étude du marais d'Olives.....	34
Figure 23 : Distribution des moyennes mensuelles des indices NDWI et NDMI par année sur la zone d'étude du marais d'Olives à Pempuyre.	35
Figure 24 : Résultats pour l'indicateurs Most Frequent sur le NDVI et le NDMI.....	36
Figure 25 : Inventaire des surfaces de végétations cartographiées sur la zone d'étude du marais d'Olives pour 2019 et 2023.	36
Figure 26 : Cartographie de l'évolution de la classe « HOLCLANA », Végétation à houlque laineuse (<i>Holcus lanatus</i>) entre 2019 et 2023.....	37
Figure 27 : Matrice des changements pour les habitats naturels sur le marais d'Olives entre 2019 et 2023.....	38
Figure 28 : Représentation des successions des classes de végétations sur le marais d'Olives de 2019 à 2023, focus sur l'évolution de la classe de végétation ERIGSP. Observée en 2019 (gauche), et l'origine de la classe de végétation HOLCLANA observée en 2023.....	38
Figure 29 : Diagramme de Sankey pour la visualisation globale des successions de végétation avec un seuil à 1000 pixels.....	39
Figure 30 : Méthodologie de classification hiérarchique pour la production de la cartographie au niveau de l'ordre.....	41
Figure 31 : Cartographie des valeurs de Ellenberg pour la spatialisation de l'humidité basée sur la cartographie des végétations au niveau ordre réalisée par télédétection.....	42
Figure 32 : Cartographie des valeurs de Ellenberg pour la spatialisation de la trophie basée sur la cartographie des végétations au niveau ordre réalisée par télédétection.....	42
Figure 33 : Cartographie de l'indice de productivité primaire NDVI-I sur la zone humide de l'estuaire de la Seine.	43
Figure 34 : Cartographie de l'indice de productivité primaire MMAX sur la zone humide de l'estuaire de la Seine.....	43
Figure 35 : Cartographie de l'activité de biomasse pour détection de la fauche et du pâturage sur les prairies de la zone estuarienne de la Seine pour 4 moments de l'année.	44

Figure 36 : Différentes sources de données pour la cartographie des prés salés d'Arès (A, B, C) et résultats de la classification k-Means sur une série temporelle Sentinel-2 pour la distinction des enveloppes de prés salés (D).....	46
Figure 37 : Points terrains collectés lors de la campagne terrain de juin 2024 sur la Réserve Naturelle des prés salés d'Arès.	47
Figure 38 : Extrait des étapes suivies lors du déroulement du Minimum Viable Product (MVP).....	48

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des Random Forest selon le mode classification ou régression.	17
Tableau 2 : Présentation des données mises à disposition et utilisées pour les différents projets.	19
Tableau 3 : Résumé des données disponibles pour le modèle de prédiction. Les * indiquent les codes des classes supprimées pour l'entraînement du modèle car trop peu représentées. .	30

Glossaire

Estuaire : Zone de mélange des eaux douces avec les eaux marines, se formant à l'embouchure d'un fleuve lorsqu'il se jette dans la mer.

Habitats naturels : Unité naturelle, bien identifiable, essentiellement caractérisée par sa végétation, son climat, son exposition, son altitude, sa géologie (sous-sol), sa pédologie, et par les activités humaines qui s'y déroulent.

Photo-interprétation : Analyse visuelle directe des images aériennes ou satellitaires servant à établir les éléments de base d'une carte.

Phytosociologie : Branche de l'écologie dont l'objet est l'étude des communautés végétales. Elle repose sur des inventaires floristiques à partir desquels peuvent être mis en évidence des ensembles d'espèces (notions de groupements végétaux, de formations végétales ou de végétations) en relation avec les conditions du milieu (sol, climat, etc.).

Preferenda : En écologie, le terme *preferenda* désigne l'ensemble des conditions environnementales dans lesquelles une espèce végétale ou un groupe de plantes préfère vivre et se développer. Ces conditions peuvent inclure des facteurs comme la température, l'humidité, la lumière, le type de sol, la disponibilité en eau, et d'autres éléments qui influencent la croissance et la survie des plantes.

Proxy : En télédétection, un proxy est une variable ou une mesure indirecte utilisée pour estimer ou représenter une caractéristique d'intérêt qui ne peut pas être mesurée directement à distance.

Série temporelle : Une série temporelle d'images est une succession d'images satellites ou aériennes prises de la même zone à différents moments. Cela permet d'observer et d'analyser les changements dans l'environnement ou les surfaces terrestres au fil du temps

Taux d'abattement : Réduction de la concentration d'un polluant dans un milieu donné, comme l'eau ou l'air.

Télédétection : Méthode qui permet d'obtenir des informations sur des objets en recueillant et en analysant des données sans contact direct entre l'instrument utilisé et l'objet analysé. Dans ce mémoire, le mot télédétection est utilisé dans le cadre de l'imagerie satellitaire ou aérienne.

Trophie : Dans le contexte des valeurs de Ellenberg, la trophie fait référence à la disponibilité des nutriments dans le sol, ou autrement dit, à la richesse nutritive du milieu.

Liste des abréviations

MVP : Minimum Viable Product

PL : Pléiades

R&D : Recherche et Développement

RF : Random Forest

RNN : Réserve Naturelle Nationale

S2 / S1 : Sentinel-2 / Sentinel-1

THRS : Très Haute Résolution Spatiale

Introduction

L'essor des techniques de télédétection apporte de nouvelles données pour la protection et la gestion des milieux naturels. L'entreprise i-Sea développe des solutions basées sur l'imagerie et le traitement de données spatiales et réalise, parmi d'autres produits, des cartographies des habitats naturels sur les zones humides. Ces écosystèmes sont protégés et font fréquemment l'objet de politiques de conservation ou de restauration. Les zones humides jouent un rôle crucial pour la biodiversité, 40% des espèces animales et végétales de la planète y vivent ou s'y reproduisent. Ces milieux rendent également de nombreux services écologiques en participant à la régulation de l'eau et du climat (Ramsar, 2018).

Face aux changements rapides des écosystèmes dus au dérèglement climatique et à l'anthropisation (Ramsar, 2018; Office Français de la Biodiversité, 2024), les gestionnaires de l'environnement expriment un besoin de données environnementales, temporelles et spatiales afin d'évaluer et d'optimiser le fonctionnement écologique des zones humides (Ministère de la Transition Ecologique, 2022). Chez i-Sea, le pôle biodiversité est confronté à ce besoin au sein de trois projets qui serviront à illustrer la question posée dans cette étude : comment la télédétection satellitaire multi-sources peut servir à la cartographie, au suivi et à la caractérisation des végétations et des fonctions écologiques des zones humides de l'échelle locale et globale ?

Un travail de recherche bibliographique, de développement et de mise en application sur les données à disposition a été effectué afin d'amener des premiers éléments de réponse à une vaste problématique au cœur des enjeux de télédétection pour l'environnement.

1 Etude des zones humides par télédétection

1.1 Observation de l'environnement par l'industrie spatiale dans un contexte de changement climatique

Le vivant évolue dans différents écosystèmes présents sur la Terre, dont l'état physique, biologique et écologique font l'objet de nombreuses études scientifiques, avec pour objectif de comprendre leur fonctionnement et de les protéger. Grands nombres d'écosystèmes sont en danger, l'ère industrielle et le changement climatique ont entraîné une érosion des milieux et mis en péril leur fonctionnement (Commission européenne, 2020). D'après le rapport de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) de 2019, la Terre subit la première crise d'extinction massive des animaux et des plantes depuis la disparition des dinosaures, il y a environ 65 millions d'années. Il est important de connaître les écosystèmes dégradés et leur état car ceux-ci sont plus fragiles et ont « une capacité limitée à faire face aux phénomènes extrêmes et aux nouvelles maladies » (Commission européenne, 2020). Ainsi, surveiller les écosystèmes et leur évolution dans le temps est devenu capital.

L'observation de la Terre depuis l'espace, possible depuis quelques décennies, a permis une meilleure connaissance du « système Terre » considéré par les composantes : globe solide, océans, atmosphère, glaces et terres émergées. Les satellites acquièrent des données globales, également sur des zones difficiles d'accès, en réalisant des mesures homogènes, répétitives et sur de grandes périodes temporelles. Les paramètres des capteurs donnent accès à différents types de données afin de qualifier les systèmes observés grâce à des techniques de télédétection. Les progrès de l'imagerie satellitaire ont permis l'observation des changements globaux subis sous l'effet des phénomènes naturels et des activités humaines (Cazenave, 2013).

De nombreuses entreprises proposent aujourd'hui leurs services pour l'analyse et la valorisation des données spatiales notamment dans les domaines de l'environnement, de la gestion des ressources naturelles et de l'agriculture.

1.1.1 i-Sea, le spatial pour le littoral et la biodiversité

L'entreprise i-Sea est un bureau d'innovation fondé en 2014, spécialiste dans le développement de solutions spatiales en faveur du littoral et de la biodiversité.

Ses services s'adressent aux entités publiques telles que les parcs naturels régionaux, les métropoles et autres institutions en charge de la gestion des territoires et des espaces naturels. L'objectif est d'apporter aux acteurs de l'environnement des données spatiales et environnementales adaptées aux enjeux de leurs territoires.

Les bureaux sont localisés au bâtiment Wood Office de Pessac et accueillent une équipe pluridisciplinaire d'une quinzaine de personnes. Grâce aux différents thèmes d'expertise, l'offre de prestation propose divers outils pour la cartographie des habitats naturels, des risques littoraux, de la qualité de l'eau ou de la fréquentation nautique. C'est en 2018, avec l'entrée sur le marché de l'outil Biocoast pour la cartographie des habitats naturels que les activités et les bureaux ont été divisés selon les deux pôles de compétence : le pôle biodiversité et le pôle littoral.

Ce mémoire est rédigé dans le cadre des travaux du pôle biodiversité.

1.1.2 Le pôle biodiversité et l'offre de service Biocoast

Les acteurs de la biodiversité et de la gestion de l'environnement ont un besoin réglementaire de cartographie des végétations pour leur milieu. A titre d'illustration, les gestionnaires des sites classés Natura 2000 nécessitent des cartes soumises à des cadres méthodologiques spécifiques pour le suivi écologique de leur milieu. Les cartographies sont retransmises dans des documents d'objectifs (DOCOB) rédigés par tous les partenaires locaux concernés (élus, propriétaires, gestionnaires, ...) pour la préservation des habitats présents sur le site (Services de l'état, 2014).

La télédétection appliquée à l'étude d'images satellitaires, domaine de prédilection de i-Sea, constitue un outil technologique pertinent et efficace pour la réalisation des cartographies exigées par les gestionnaires. Forte de son expertise sur la cartographie des végétations dunaires des zones littorales et suite aux demandes des acteurs de la biodiversité, l'équipe R&D a mis au point l'outil Biocoast. Cette solution a pour objectif la cartographie des habitats naturels ou semi-naturels et est déployable sur les milieux littoraux, ruraux, montagneux ou encore urbains. Depuis sa mise en service en 2018, Biocoast est le principal produit du pôle biodiversité de i-Sea et a conduit à une vingtaine de réalisations.

1.1.3 La conduite d'un projet Biocoast et les principaux partenaires

Trois éléments principaux sont nécessaires à la réalisation d'un projet Biocoast. Pour un site d'étude :

- Une série temporelle d'images satellites représentant au mieux la saisonnalité et les cycles de végétation.
- Des échantillons terrains localisés, décrits suivant une typologie adaptée au produit final et relevés suivant un protocole terrain ajusté pour un traitement en télédétection.
- Une chaîne de traitement d'images automatisée, basée sur l'usage des Random Forest (algorithme de classification supervisé (Breiman, 2001)).

A ces éléments s'ajoutent, l'expertise thématique des chefs de projets et les réunions régulières organisées avec les écologues ou les gestionnaires spécialistes du site, afin de réaliser des corrections adaptées et de livrer des données fiables et représentatives du milieu (Figure 1). Il s'agit donc d'un processus itératif qui permet d'affiner étape par étape la qualité et la pertinence des prédictions, grâce à un travail réalisé au plus près de l'expertise terrain.

Les projets Biocoast sont à destination de différents partenaires et collaborateurs : l'Office National des Forêts (ONF), l'Office Français de la Biodiversité (OFB), les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), Parcs Naturels Marins (PNM), les établissements portuaires, les communautés de commune, les agglomérations, les Groupements d'intérêt public et tout autre institution en charge de la gestion de l'environnement.

Les couches cartographiques produites par i-Sea représentent des données d'inventaire importantes et décisives pour les gestionnaires de l'environnement. Nombreux collaborateurs du pôle biodiversité sont des gestionnaires des zones humides, des écosystèmes à fort enjeu écologique.

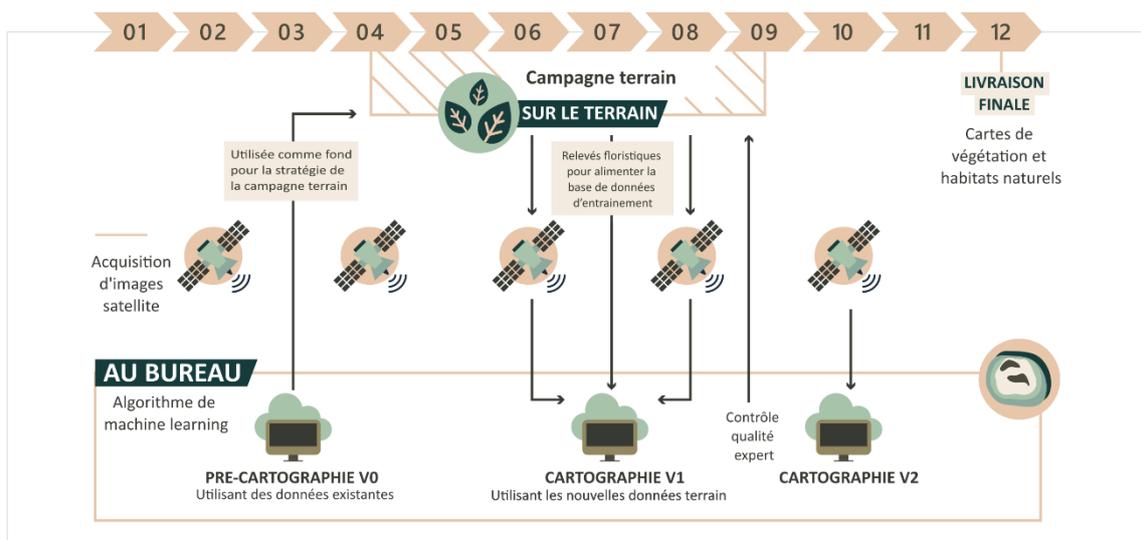


Figure 1 : Etapes clés et chronologie d'un projet Biocoat © , i-Sea .

1.2 Intérêt de l'étude des zones humides dans un contexte de bouleversement climatique

1.2.1 Définition des zones humides

Les zones humides sont des « terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire, ou dont la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année », article L211-1 du Code de l'environnement. Cette dénomination comprend donc de nombreux écosystèmes : tourbières, prairies inondées, marais, prés salés, forêts alluviales et mangroves (Figure 2).



RNN des prés salés d'Arès



Marais d'Olives, Parempuyre



Mangroves, Guyane Française

Figure 2 : Différents écosystèmes de zones humides.

Les zones humides abritent une faune et une flore extrêmement riches et fournissent de multiples services utiles aux équilibres naturels et aux activités humaines (Office Français de la Biodiversité, 2024).

1.2.2 Les zones humides, des écosystèmes menacés

Les zones humides sont des écosystèmes hautement menacés par les activités anthropologiques. Entre 1970 et 2015, leur superficie aurait diminué de près de 35%, un déclin trois fois supérieur au taux de disparition des forêts (Ramsar, 2018). Selon l'évaluation de l'état de conservation des zones humides réalisée dans le cadre de la directive européenne Habitats-

Faune-Flore pour la période 2013-2018, seuls 6% des habitats humides sont en bon état de conservation (Office Français de la Biodiversité, 2024).

La protection et la gestion des zones humides font l'objet d'une convention internationale spécifique, la Convention de Ramsar (1971). Des plans nationaux d'actions sont menés depuis 1995 afin de renforcer la connaissance, la protection et la restauration des milieux humides. Le 4^e plan national d'action des milieux humides pour la période 2022-2026, présente parmi ses mesures phares la cartographie de l'ensemble des zones humides françaises d'ici fin 2024, « un référentiel au 1/10 000^e qui retranscrit l'identité physique du territoire vis-à-vis de la circulation de l'eau en identifiant les zones humides [...] il sera possible d'évaluer l'état des milieux humides (préservés, altérés, détruits). [...] permettra aussi de quantifier les services rendus (bénéfices, pertes) » (Ministère de la Transition Ecologique, 2022).

1.2.3 L'étude des zones humides par le pôle biodiversité : problématisation

Le pôle biodiversité a conduit de nombreux projets cartographiques sur des zones humides, souvent pour l'actualisation de cartes Natura 2000. A titre d'exemple parmi les projets concernés, i-Sea a réalisé les cartographies des habitats naturels de l'étang de Salses Leucate, des herbiers de Magnoliophytes des lagunes méditerranéennes, ou encore des habitats naturels des Marais de la vallée des Baux (marais d'Arles, N2000). Tous ces travaux sont visibles sur le site internet de l'entreprise (<https://i-sea.fr/>).

Les résultats satisfaisants des cartographies réalisées par télédétection, les possibilités d'accès à diverses données environnementales et temporelles acquises par différents capteurs ainsi que les enjeux liés à la gestion des milieux naturels et anthropisés face aux changements climatiques amènent de nouveaux besoins : les gestionnaires souhaitent quantifier ou évaluer les fonctions écologiques des écosystèmes. Des indicateurs de l'état 'bon' à 'dégradé' des services rendus par les zones humides permettent une meilleure connaissance de ces milieux et une gestion plus adaptée, pouvant conduire à des mesures de restauration.

Ces nouveaux enjeux se présentent comme une suite à la cartographie des habitats naturels et sont abordés au sein de plusieurs projets menés aujourd'hui au sein du pôle biodiversité. Pour mieux répondre aux gestionnaires, il est nécessaire d'acquérir une meilleure connaissance des processus écologiques au sein des zones humides.

1.2.4 Les fonctions écologiques des zones humides

Un écosystème est considéré par différentes composantes : flore, faune et milieu physique. Les interactions entre les composantes sont à l'origine des fonctions écologiques assurant le fonctionnement et le maintien du milieu. Les Hommes en retirent des bénéfices directs ou indirects, qualifiés de services écosystémiques. L'articulation entre milieux, fonctions écologiques et services écosystémiques est illustrée sur la Figure 3. Les fonctions écologiques des zones humides se distinguent en trois groupes : les fonctions hydrologiques, biogéochimiques ou physiques et biologiques (Clément *et al.*, 2008; Maltby and Acreman, 2011).

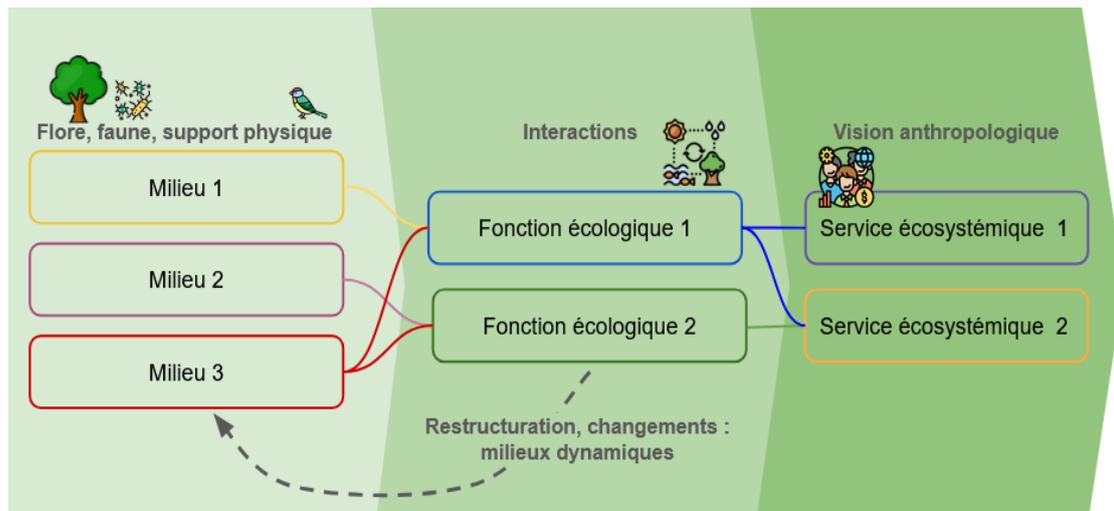


Figure 3 : Représentation schématique des relations entre milieu, fonction écologique et service écosystémique.

1.2.4.1 Les fonctions hydrologiques

Les zones humides, sont des zones tampons ou dites écotones, c'est-à-dire des espaces servant de transition entre deux milieux. Elles assurent un stockage latéral et longitudinal des eaux, permettant de contrôler les crues et de recharger les nappes phréatiques. Ces écosystèmes sont indispensables à la régulation du régime hydrologique des territoires. Les activités anthropiques telles que le déboisement, l'agriculture ou l'urbanisation dégradent les zones humides et les territoires alentours subissent des inondations brutales et importantes (Barnaud, 2009). Une zone humide peut réduire les coûts liés aux dégâts des inondations jusqu'à 30% (Ramsar, 2021).

1.2.4.2 Les fonctions biologiques

Les écosystèmes des zones humides sont des réservoirs de biodiversité. Ces milieux abritent des réseaux trophiques complexes et servent d'habitats à de nombreuses espèces végétales et animales (pour un cycle de vie complet ou partiel). A titre d'exemple, la convention de Ramsar de 2001 annonce « les zones humides d'eau douce contiennent plus de 40% des espèces de la planète et 12% de toutes les espèces animales ».

La diversité biologique est expliquée par la forte hétérogénéité spatiale des milieux causée par la présence de forts gradients d'humidité et de salinité. Ces écosystèmes dynamiques sont considérés comme fortement productifs en ressources animales et végétales.

Ce sont les différentes interactions présentes entre les individus ainsi que la composition et la diversité des communautés qui influencent le fonctionnement des écosystèmes. La perte de diversité entraîne, entre autres, des conséquences sur les productions primaires, secondaires et tertiaires, les processus de décomposition ou les structures trophiques, mettant à l'épreuve la stabilité des écosystèmes de zone humide. (Clément *et al.*, 2008; Barnaud, 2009).

1.2.4.3 Les fonctions biogéochimiques ou physiques

L'eau présente dans les zones humides subit des processus biogéochimiques conduisant à la rétention, la transformation ou la dégradation d'éléments chimiques. Ces milieux sont des zones propices à la dénitrification de par leurs sols hydromorphes. Ce processus consiste à convertir les nitrates en diazotes, afin d'éliminer les substances azotées présentes dans l'eau. Il

est réalisé dans les sols ou l'eau est en condition anaérobie, avec une forte teneur en matière organique. La flore bactérienne y puise son oxygène directement dans les molécules de nitrates, entraînant ainsi la dénitrification. Une étude menée par l'IFREMER en 1995 sur la roselière du marais de Kervijen (Finistère) a conduit à l'estimation d'un taux d'abattement des nitrates compris entre 2.4 et 8 kg par hectare de zone humide et par jour, soit une capacité de captage d'azote de l'ordre de 19 à 64 tonnes d'azote par an.

1.3 Contexte et démarche autour du projet ingénieur

1.3.1 Besoins opérationnels

Les chefs de projet travaillent directement avec les clients pour répondre à leurs demandes de projets cartographiques. Les chargés de production réalisent les demandes à l'aide de chaînes de traitement développées par les personnes en charge de la R&D. La chaîne de traitement pour la réalisation des projets Biocoast et la « boîte à outil i-Sea » est en constante évolution, en fonction des besoins des projets et des retours des chargés de production. Les chaînes de traitements sont basées sur des techniques de traitements d'images mais aussi sur des apports de connaissances thématiques pour une meilleure appréhension des milieux à cartographier d'un point de vue écosystémique.

Les zones humides font l'objet de nombreuses études menées par le pôle biodiversité. Les projets récents exigent la production de données permettant i) l'état des lieux des végétations sur les sites d'études et leur évolution dans le temps, ii) l'étude des données acquises par télédétection en tant qu'indicateurs des fonctions écologiques et iii) la cartographie des fonctions écologiques.

L'état des lieux des végétations exigé par les différents projets est basé sur une chaîne de traitement générale (Biocoast), qui est à adapter en fonction des stratégies cartographiques exigées par les projets. L'étude des indicateurs et des fonctions écologiques constitue la partie R&D des projets, très valorisée par l'entreprise. Les temps R&D vendus pour les projets permettent à i-Sea de développer des nouvelles solutions et d'améliorer leurs chaînes de traitements existantes. Par ailleurs, ce temps est valorisable par des crédits impôts recherche. Des livrables sont attendus par le client à la suite de cette partie exploratoire, ainsi que de nouvelles méthodologies et chaînes de traitement pour l'entreprise.

La caractérisation et l'évolution des végétations et des fonctions écologiques des zones humides s'inscrivent au cœur de trois projets menés par le pôle biodiversité, produits et utilisés pour le développement de chaîne de traitement en réponse aux exigences des projets.

1.3.2 Illustration des besoins opérationnels sur les fonctions des zones humides au travers de trois projets

1.3.2.1 *Le projet Olives, échelle locale*

La ville de Bordeaux Métropole a développé en 2017 « Biodiver'Cité », une stratégie en faveur des zones humides et de la biodiversité. L'axe II « Préserver et restaurer les milieux naturels » inclut le programme de restauration du site Olives, un marais dégradé par l'agriculture intensive racheté en 2016 par Bordeaux Métropole pour sa reconversion en zone humide. L'objectif de l'étude est d'effectuer un suivi dynamique des végétations et d'améliorer la compréhension des processus liés aux effets de modifications des régimes d'inondations sur

la végétation, dans le cadre d'opérations de restauration de zones humides (Bordeaux Métropole, 2021). Ce projet inclut également une réflexion sur le choix des outils opérationnels pour le suivi des zones humides en restauration. La zone d'étude, les clients et partenaires sont présentés sur la Figure 4.

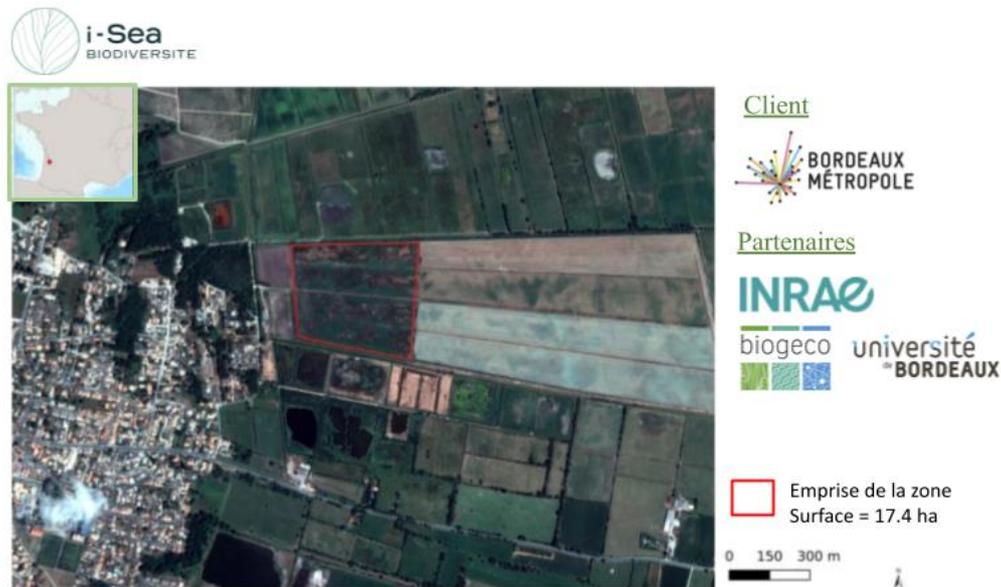


Figure 4 : Emprise, clients, partenaires, et surface de la zone d'étude pour le projet Olives.

1.3.2.2 Le projet CAFEZH – Cartographie des fonctions écologiques des Zones Humides, échelle régionale

Le projet CAFEZH, Cartographie des Fonctions Écologiques des Zones Humides, est réalisé à grande échelle sur la zone estuarienne aval de la Seine, depuis l'embouchure de la Seine jusqu'en amont de la ville de Rouen (Figure 5). Il vise à caractériser deux fonctions écologiques majeures : le stockage du carbone et la dénitrification, à partir de données multi-sources. Ce projet porté par i-Sea depuis 2022 et commandé par le Groupement d'Intérêt Général Seine Aval, mobilise de nombreux partenaires : l'UMR Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) de l'université de Bordeaux, l'Observatoire des Zones Humides Méditerranéennes par l'institut Tour du Valat, l'UMR ECOBIO de l'université de Rennes, l'UMR METIS Sorbonne Université et l'UMR TETIS à Montpellier. Les partenaires sont chargés de fournir différents types de données de terrain et de télédétection pour arriver à une proposition opérationnelle finale de cartographie des processus de dénitrification et de stockage du carbone de la zone humide en milieu estuarien. Un des livrables attendus est également la cartographie des habitats selon trois échelles hiérarchiques de communautés de végétations.

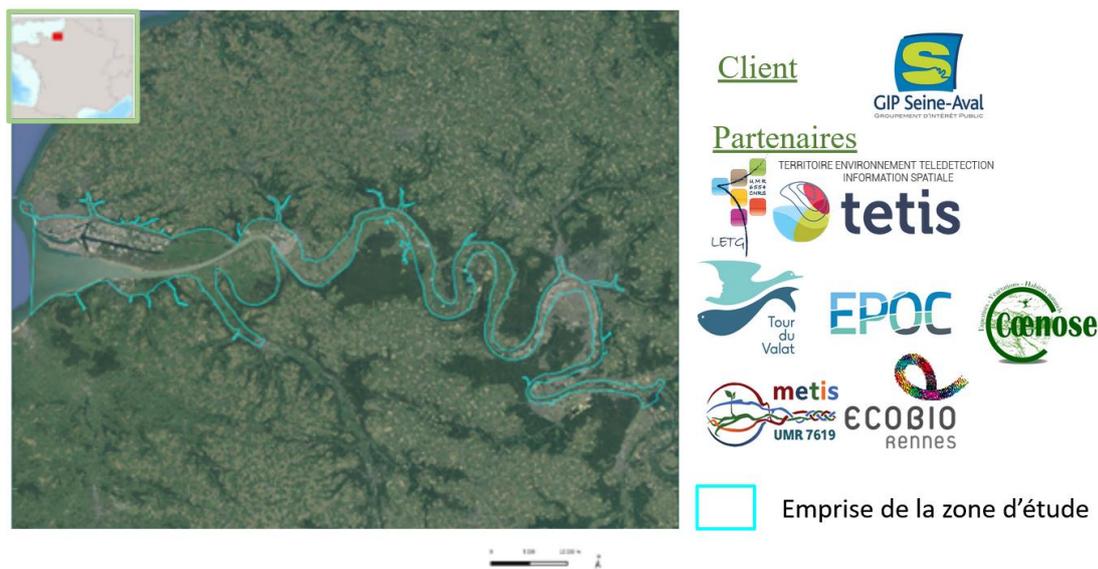


Figure 5 : Emprise, clients, partenaires, et surface de la zone d'étude pour le projet CAFEZH.

1.3.2.3 Le projet ESA Coastal Blue Carbon, échelle globale

L'agence spatiale européenne est intéressée par les stocks de carbone des zones humides littorales. Le projet ESA Coastal Blue Carbon porte sur trois écosystèmes majeurs pour le stockage du carbone dit « bleu », les mangroves, prés salés et herbiers marins (Figure 6). Ce projet à très grande échelle commandé par l'Agence Spatiale Européenne et dirigé par i-Sea prévoit la cartographie des stocks de carbone à échelle globale sur les littoraux de France (coté Atlantique et méditerranéen), d'Espagne, de Guyane, et du Canada 3 millésimes : 2015, 2020 et 2025. i-Sea fait appel à de nombreux partenaires pour la réalisation de ce projet, concernant la collecte de données et l'apport de connaissances sur les écosystèmes de carbone bleu. L'échelle de la cartographie finale et la donnée à produire imposent une grande phase de réflexion sur les technologies et techniques de télédétection, le traitement des données déjà existantes et l'acquisition de nouvelles données terrain.

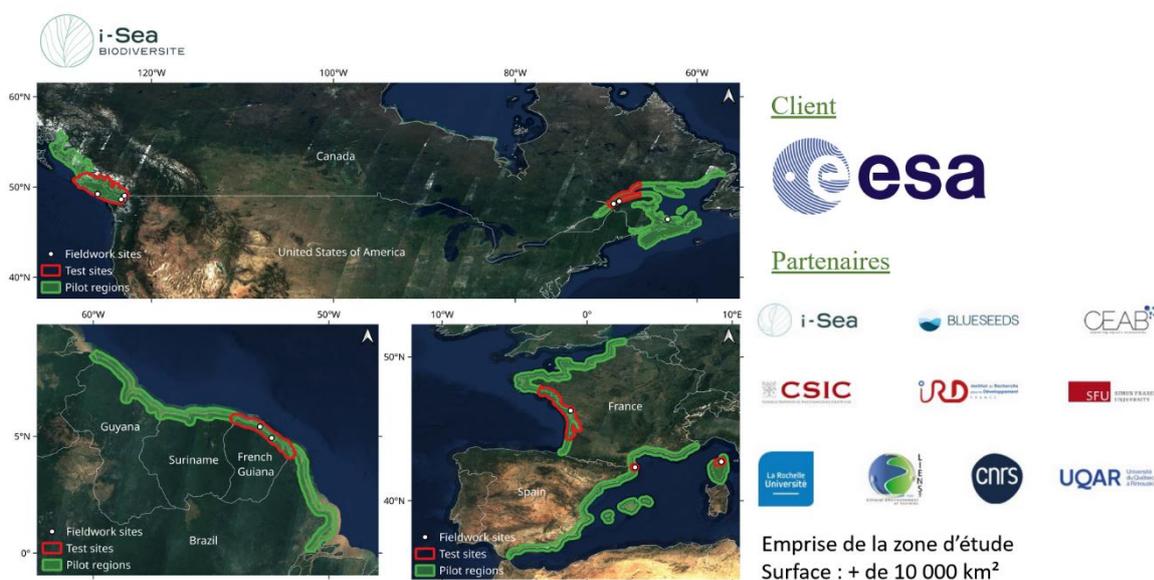


Figure 6 : Emprise, clients, partenaires, et surface de la zone d'étude pour le projet Coastal Blue Carbon.

1.3.3 Problématisation

Face aux nouvelles exigences des plans de gestions des zones humides, aux progrès des technologies et aux demandes des gestionnaires, les solutions de télédétection suscitent un fort intérêt pour la cartographie des végétations et des fonctions écologiques des zones humides. Ainsi, dans le cadre de ce mémoire ingénieur, il semble pertinent de s’interroger sur comment la télédétection satellitaire multi-sources peut-elle contribuer à caractériser les végétations et les fonctions écologiques des habitats naturels des zones humides à l’échelle locale et globale ?

1.3.4 Démarche ingénieure

1.3.4.1 Déroulement de la période d’alternance

La période d’alternance durant laquelle la problématique est étudiée s’étend sur un an. Le temps consacré à l’entreprise, divisé entre le travail sur la problématique présentée et les différentes missions en tant que chargée de production (volet de travail en bleu) est représenté sur le diagramme de Gantt, Figure 7.

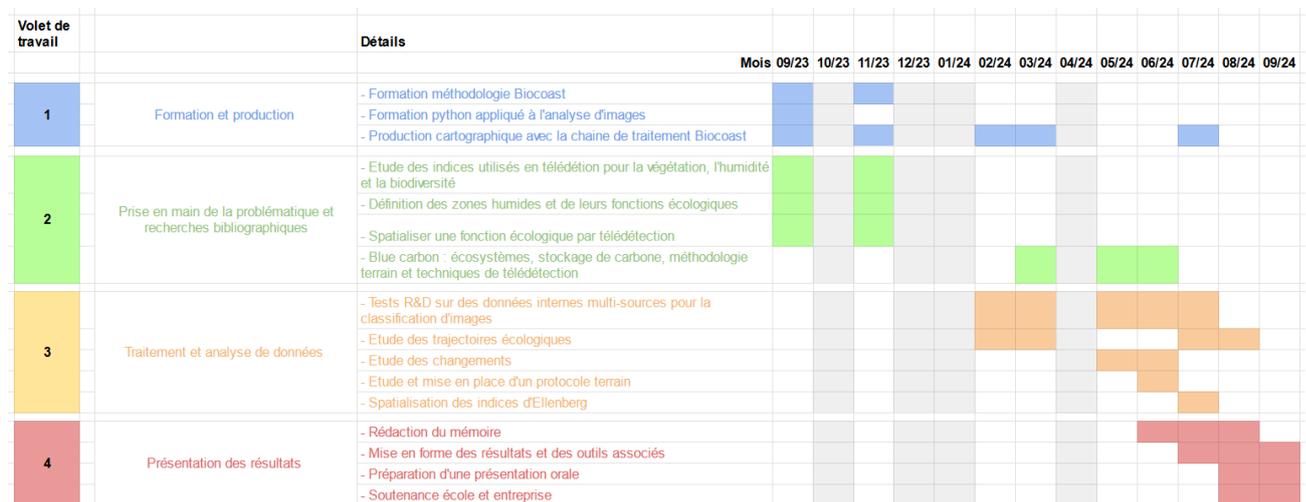


Figure 7 : Diagramme de Gantt pour la réalisation de l’étude durant l’année d’alternance réalisée chez i-Sea. Les périodes grisées correspondent aux périodes de formation école.

La mission a été rythmée par des phases de formation aux technologies de l’entreprise, de recherches bibliographiques, de production et de recherches libres pour la R&D. Des réunions régulières et de nombreuses discussions scientifiques ont été réalisées avec les tuteurs entreprises pour l’avancement des différents projets. De même lors des réunions clients qui ont permis d’avoir des premiers retours sur les productions R&D. Les dernières périodes sont dédiées à la rédaction du mémoire et à la transmission au pôle Biodiversité du travail effectué durant l’année.

1.3.4.2 Méthodologie employée pour répondre à la problématique

La méthodologie mise en place pour répondre à la problématique consiste en 3 grandes phases ; i) la réalisation d'un état de l'art général à la problématique puis spécifique aux besoins des différents projets, ii) la proposition de méthodes et de chaînes de traitement et iii) la mise en œuvre des chaînes de traitements pour la production de données expérimentales. Cette

méthodologie a été suivie durant toute la période d’alternance et appliquée pour les différents projets.

Le plan de rédaction de ce mémoire retrace la méthodologie employée pour répondre à la problématique, en mettant en lumière chaque étape du processus de travail et en expliquant les choix techniques effectués tout au long du projet. Les prochaines parties présentent donc un état de l’art de l’étude des zones humides par télédétection, puis les chaînes de traitements utilisées et mises en place, pour finir par l’analyse critique des résultats obtenus concernant les zones humides étudiées. La dernière partie est consacrée à une discussion approfondie visant à répondre à la problématique de l’étude, au vu des résultats obtenus.

2 Caractérisation des végétations et des fonctions écologiques des zones humides par télédétection

2.1 Les capteurs utilisés pour l’observation des zones humides

L’étude des zones humides nécessite d’obtenir des images aériennes ou satellitaires, qui apportent une vue d’ensemble des milieux et des différents compartiments les constituant. Il est possible d’acquérir ces images grâce à des capteurs portés par des avions, des véhicules aériens sans humain à bord (UAV) tels que des drones, ou des satellites.

Les premiers outils de télédétection étaient basés sur l’imagerie aérienne. L’essor de l’imagerie satellitaire, entre 1970 et 1980, a entraîné de larges progrès techniques pour l’analyse des images (M. Guo *et al.*, 2017). Le programme Landsat a été le premier programme de mise à disposition d’images satellites à des fins civiles. Développé dans les années 1960 par la NASA, National Aeronautics and Space Administration, l’objectif de la mission était de rassembler des données concernant les ressources naturelles sur la surface de la Terre (*History | Landsat Science*, no date). S’en sont suivis de nombreux programmes spatiaux dédiés à l’observation de l’environnement : Copernicus en Europe avec le lancement des satellites optiques Sentinel, le programme « Satellites Pour l’Observation de la Terre » (SPOT) pensé par le CNES ou d’autres constellations utilisées pour l’étude de l’environnement. Les capteurs sont définis selon plusieurs paramètres, la Figure 8 en présentent quelques-uns : capteur actif ou passif, prix, résolution spatiale, année de lancement. La figure représente les différents paramètres des capteurs mentionnés dans cette étude et ne constitue pas une liste exhaustive des capteurs satellites utilisés pour la télédétection des zones humides.

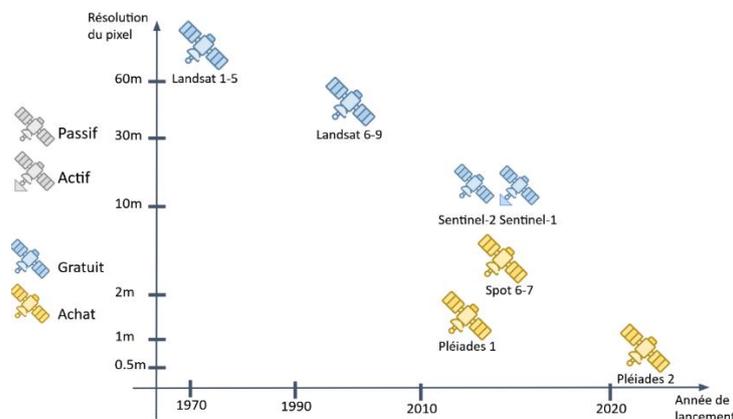


Figure 8 : Satellites utilisés pour l'observation des zones humides (non exhaustive) selon le type, l'année de lancement, la résolution et la gratuité.

2.2 Le choix des images pour l'étude des zones humides

Les zones humides sont étudiées en télédétection avec tout type d'images : photographies aériennes anciennes, images à moyennes et hautes résolutions spatiales, images hyperspectrales, données radar et Lidar (M. Guo *et al.*, 2017). Pour la mise en place d'une solution opérationnelle, plusieurs paramètres sont à prendre en compte lors du choix du capteur et des images.

2.2.1 La période temporelle

Une estimation des végétations et des processus écologiques induit l'acquisition de séries d'images dans le temps avec une résolution temporelle plus ou moins importante afin de prendre en compte les dynamiques saisonnières (M. Guo *et al.*, 2017). La qualité des images optiques est dépendante de la présence des nuages au moment du passage du satellite et, pour certains écosystèmes, de l'état de la marée. Les écosystèmes des zones humides littoraux sont à étudier à marée basse. Nombreux critères limitent ainsi l'utilisabilité des images satellites et l'observation de l'écosystème sur de longues périodes de temps (jusqu'à plusieurs mois). Par ailleurs certaines saisons sont plus propices à l'acquisition d'images pour visualiser le cycle phénologique des végétations des zones humides (mars à octobre).

2.2.2 La résolution spatiale et le changement d'échelle

La résolution spatiale dépend des objets observés et de l'échelle de la donnée finale à obtenir. De nombreux écosystèmes des zones humides sont étudiés à partir d'images à très haute résolution spatiale (THRS), l'évolution des machines de calculs permet de créer des cartes de classification à échelle très fine et de distinguer les habitats naturels. Les études sur la cartographie des stocks de carbone ont montré que les équations allométriques peuvent induire des biais supérieurs à 100% (Campbell *et al.*, 2022). L'extrapolation d'échantillons ponctuels à grande échelle induit une forte incertitude qu'il est important de calculer et de prendre en compte pour la lecture et la compréhension de la carte. La grande diversité, la dynamique hydrologique et la taille variable des zones humides complexifient la cartographie des enveloppes des écosystèmes et l'incertitude des valeurs écologiques telles que le carbone augmente de l'échelle locale à l'échelle mondiale (Figure 9). Cependant, une résolution spatiale plus grossière est attendue dans le cas d'une approche globale du territoire, la perte de précision permet de conclure sur des grandes tendances plutôt que sur des valeurs quantitatives des processus écologiques (Clément *et al.*, 2008; Rapinel *et al.*, 2016; M. Guo *et al.*, 2017). L'étude bibliographique de Sun *et al.*, a mis en évidence des valeurs de précisions équivalentes entre des modèles réalisés à différentes échelles spatiales (Sun *et al.*, 2024).

La Figure 9 résume l'incertitude entre la mesure terrain et l'extrapolation, dans le cas d'une extrapolation de la donnée sur une image. Sur ce schéma, l'imagerie satellite est moins précise qu'une image aérienne ou issue d'un UAV, ce qui induit une incertitude supplémentaire à prendre en compte. Cette incertitude est d'autant plus grande selon l'étendue spatiale de la zone d'étude et les paramètres du capteur (résolution spatiale spectrale et temporelle).

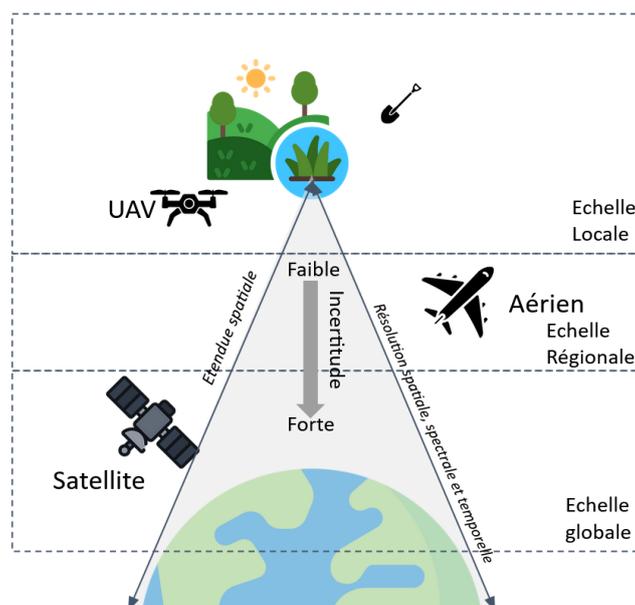


Figure 9 : Relation entre l'étendue de la surveillance, le domaine de résolution spatiale et l'incertitude de la donnée produite, reproduction (Campbell et al., 2022).

2.2.3 Le prix

Les images acquises par Landsat et Sentinel sont accessibles gratuitement. D'autres images doivent être commandées et sont payantes. Les institutions publiques peuvent bénéficier de la gratuité de certaines images grâce au Dispositif Institutionnel National d'Accès Mutualisé en Imagerie Satellitaire (DINAMIS). Il s'agit d'une plateforme d'acquisition et de diffusion de données spatiales par l'Infrastructure de Recherche Data Terra, afin de faciliter l'accès aux données spatiales et d'encourager leur usage dans le cadre de programme éducatifs ou environnementaux.

2.3 Données pour la télédétection des zones humides

2.3.1 Les données terrain

Les zones humides sont des zones complexes à cartographier en raison de l'influence des variables biophysiques (telles que les variations du niveau d'eau), des cycles phénologiques des végétations et de leur structure physique souvent complexe. L'information observée sur les images est connue grâce à une observation terrain ou grâce à la photo-interprétation. Il est également possible d'utiliser les deux sources de données lors de la réalisation cartographique (M. Guo et al., 2017).

Les relevés terrain doivent faire l'objet d'une réflexion adaptée à un traitement en télédétection. Selon la résolution spatiale de l'image, certains objets ne seront pas visibles au sein d'un pixel et donc mélangés avec d'autres entités du paysage. Des relevés terrain peuvent être ponctuels lorsqu'ils ne qualifient qu'une donnée décrivant une mesure effectuée à une position précise. D'autres types de relevés permettent de qualifier une surface sur le terrain, obtenant ainsi des données stockées dans des polygones plutôt que ponctuelles. Par exemple, lors de la réalisation d'une carte des habitats naturels, les relevés sont effectués au sein d'habitats homogènes comprenant potentiellement plusieurs pixels afin de représenter la variabilité des pixels d'un même milieu lors de la classification (Figure 10). La base de données finale est sous forme de polygones (Méthode Biocoast, i-Sea).

Les relevés doivent être représentatifs du milieu et décrire une surface importante de la zone d'étude. Lorsque l'objectif de la campagne terrain est de cartographier des végétations, l'échantillonnage doit prendre en compte toutes les végétations possibles sur la zone. Le nombre d'échantillons doit également être adapté aux traitements, pour l'implémentation d'un RF comme dans la méthode Biocoast, l'idéal est de 30 échantillons par classe. Pour des relevés quantitatifs, les relevés ponctuels peuvent être prélevés selon les gradients physiques ou d'hétérogénéité du milieu, afin de prendre en compte les variations de la donnée sur le milieu selon les influences présentes.

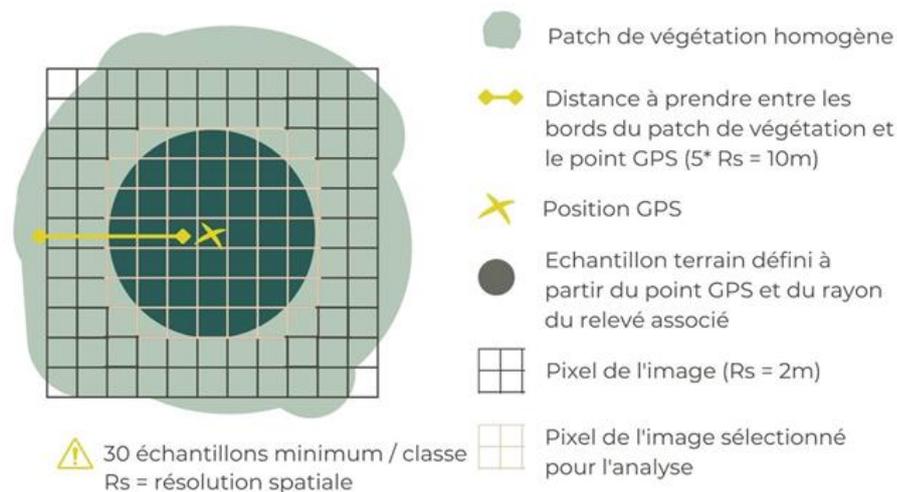


Figure 10 : Méthodologie terrain de création de polygones d'apprentissage pour des habitats homogènes, adaptée à l'usage d'images satellite, extrait solution Biocoast i-Sea

2.3.2 Les indices de télédétection

Les objets observés par télédétection sont définis par des pixels dont la valeur correspond à l'intensité du rayonnement réfléchi dans la gamme de longueur d'ondes auxquelles le capteur est sensible. Des indices peuvent être calculés par des opérations sur les longueurs d'ondes pour qualifier les zones humides. Les indices permettent de faire des estimations indirectes des conditions physiques d'un milieu.

Le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) est un indice de végétation utilisé dans de nombreuses études sur les zones humides en télédétection (Clément *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2024). Le NDVI est calculé à partir des bandes proche infrarouge et rouge, sensibles à la présence de végétations. Il est utilisé pour détecter la végétation, renseigner la santé ou la densité des végétaux. Le suivi temporel du NDVI permet d'identifier des cycles de culture ou les changements subits par les écosystèmes naturels ou les agro-systèmes (Rouse *et al.*, 1974).

D'autres indices de végétation sont utilisés dans le cas de l'étude des zones humides et de l'estimation de la diversité des végétations tels que le Ratio Vegetation Index (RVI) ou le Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI) (Cabezas Peña, Galleguillos and Perez-Quezada, 2016; Sun *et al.*, 2024). Ces indices sont également basés sur l'utilisation des bandes rouges et infrarouges. Le SAVI comporte un paramètre d'ajustement L pour caractériser le sol et le taux de recouvrement par la végétation (Huete, 1988).

Le Normalized Difference Water Index (NDWI), est calculé pour surveiller l'humidité des milieux et détecter les zones en eau ou inondées grâce à l'utilisation de la bande spectrale verte et du proche infrarouge (Gao, 1996). Malgré sa citation moins courante, l'utilisation de

cet indice a montré des résultats efficaces pour la délimitation des zones humides (Singha and Pal, 2022).

2.3.3 Les données issues des capteurs actifs

L'imagerie Radar (Radio Detecting And Ranging) n'est pas soumise à l'absence de nuage comme c'est le cas pour les capteurs optiques. Le satellite Sentinel-1 (S1) du programme Copernicus de l'ESA a permis l'accès gratuit à des séries temporelles d'imagerie Radar. Le signal capté par le radar S1 en bande C est influencé par l'humidité, l'effet de la pente, la rugosité et la biomasse superficielle (Moreau and Le Toan, 2003; Baghdadi *et al.*, 2018). L'utilisation simultanée de S1 et S2 permet de cartographier l'humidité des sols. (Attarzadeh *et al.*, 2018; Baghdadi *et al.*, 2018). En ce qui concerne les capteurs actifs, l'accès à des données Lidar se révèle intéressant pour la discrimination des structures de végétation (A. X. Guo *et al.*, 2017)

2.3.4 Les valeurs de Ellenberg, spatialisées en télédétection

La méthode des valeurs de Ellenberg a été définie par le botaniste Heinz Ellenberg, qui a créé un référentiel décrivant les *preferenda* des espèces végétales d'Europe. Cinq facteurs abiotiques sont décrits selon une échelle ordinale : l'humidité, la lumière, le pH, la trophie et la salinité. Les valeurs de Ellenberg peuvent servir à la délimitation des zones humides sur l'ensemble des régions biogéographiques et des grands types d'habitats.

La méthodologie préconise d'effectuer des relevés phytosociologiques, c'est-à-dire suivant des communautés végétales caractéristiques des conditions écologiques locales. Les relevés terrains sont donc réalisés pour représenter des communautés végétales plutôt que des espèces. La classification des communautés peut être plus ou moins précise selon le niveau hiérarchique choisi entre association, alliance, ordre et classe comme représenté sur la Figure 11.

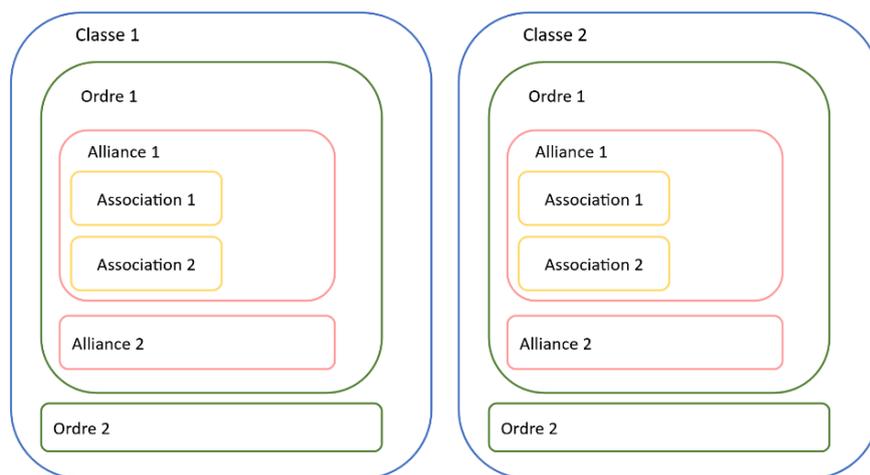


Figure 11 : Schéma des différents niveaux hiérarchiques en phytosociologie, les associations représentent des espèces végétales regroupées.

Les valeurs d'Ellenberg ainsi associées aux relevés terrain permettent l'apport de données très informatives pour la délimitation des écosystèmes et le suivi fonctionnel des zones humides (Perrin *et al.*, 2023).

2.3.5 Les méthodes de cartographies en télédétection

2.3.5.1 L'apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé permet de segmenter les images selon des milieux supposés homogènes ou semblables. Par exemple, un algorithme k-Means, souvent utilisé pour de la classification non supervisée, a permis de distinguer différents milieux dont les chenaux creusés par le passage de l'eau sur des séries temporelles de NDVI sur le bassin d'Arcachon. Cet algorithme permet de regrouper des données en trouvant les centroïdes des groupes de manière à ce que chaque point soit le plus proche possible de son centroïde. Cela permet de découvrir des structures ou des patterns dans les données en formant des groupes homogènes. Le principe du k-Means est illustré sur la Figure 12.

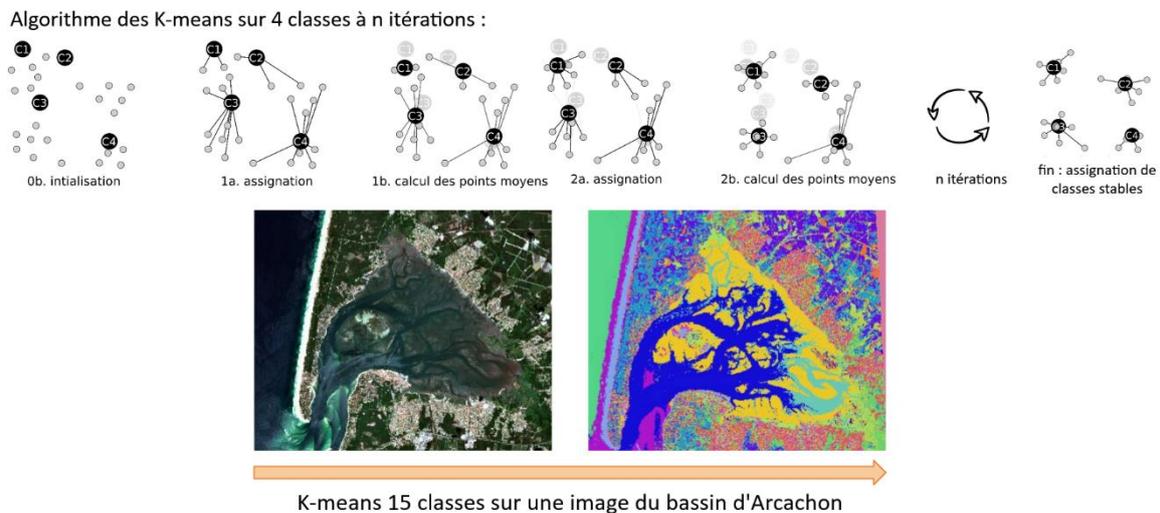


Figure 12: Déroulement de l'algorithme des k-Means et illustration sur une image Sentinel-2 du bassin d'Arcachon.

2.3.5.2 L'apprentissage supervisé

Pour les articles étudiés, les cartographies des zones humides sont réalisées par apprentissage supervisé à partir de jeux de données associant des classes à des propriétés de télédétection. Les différentes études évoquent de nombreux algorithmes utilisés pour la cartographie des végétations et des fonctions écologiques ; Random Forest, Catboost, XGBoost, Regression Kriging. Ces algorithmes permettent de croiser un grand nombre de données multi-sources comme pour la combinaison de données optiques, radar et Lidar. Les algorithmes de Random Forest sont les plus utilisés dans le cas d'études sur les zones humides (Rapinel *et al.*, 2016; Mupepi *et al.*, 2024), ils apportent un bon compromis entre rapidité, simplicité de paramétrisation et performance (Breiman, 2001; Beguet *et al.*, 2014).

Les Random Forest ou forêts aléatoires ont été introduites par Breiman (2001). C'est un algorithme d'apprentissage statistique très performant, pour les classifications et les régressions. L'algorithme appartient à la famille des méthodes d'ensemble de classifieurs. Le principe général de ces méthodes est de construire une collection de classifieurs (prédicteurs) faibles, pour ensuite agréger l'ensemble de leurs prédictions afin d'obtenir un classifieur robuste. Le classifieur faible considéré est un arbre de décision de type Classification and Regression Tree (CART) (Breiman *et al.*, 1984) dont l'idée principale consiste à diviser l'espace

des données d'entrée en deux parties de manière répétée (division dyadique). Ensuite, la meilleure manière de diviser ces parties pour optimiser les prédictions est trouvée. En d'autres termes, les données sont coupées en morceaux, et ce processus de découpe continue jusqu'à ce que la meilleure organisation de ces morceaux soit trouvée pour obtenir des prédictions précises.

2.3.5.3 Différents modes de Random Forest

Les Random Forest peuvent être utilisés pour de la classification (modélisation de données qualitatives ou de la régression (modélisation de données quantitatives) (Hastie, Tibshirani and Friedman, 2009). Pour les deux processus, la première étape consiste à un échantillonnage Bootstrap : l'algorithme crée plusieurs sous-échantillons de l'ensemble de données d'origine. Ainsi, chaque arbre de décision formé présente un ensemble de données légèrement différent. Par la suite, un arbre de décision est construit pour chaque sous-échantillon. Dans le cas d'une classification, un sous-ensemble aléatoire de caractéristiques est choisi, introduisant de la diversité entre les arbres. Une fois tous les arbres construits, chaque arbre fait une prédiction pour une observation donnée. La classe finale prédite est déterminée par un vote majoritaire des prédictions des arbres.

Pour une régression, une sélection aléatoire de caractéristiques est faite pour chaque nœud et la division est effectuée de manière à minimiser l'erreur quadratique moyenne (MSE). Pour une observation donnée, chaque arbre produit une prédiction continue. La prédiction finale est obtenue en calculant la moyenne des prédictions de tous les arbres (Hastie, Tibshirani and Friedman, 2009; Scikit-learn Documentation, no date). Le Tableau 1 résume les différences entre les deux modes de Random Forest.

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des Random Forest selon le mode classification ou régression.

Caractéristique	Mode Classification	Mode Régression
Type de prédiction	Classes discrètes	Valeurs continues
Critère de division	Entropie	Erreur quadratique moyenne (MSE)
Prédiction finale	Vote majoritaire	Moyenne des prédictions
Mesure de la performance	Taux de classification correcte	Erreur quadratique moyennes (MSE) ou R ²

2.4 Synthèse de la recherche bibliographique pour la cartographie des végétations et des fonctions écologiques des zones humides

La recherche bibliographique a été résumée en une figure schématique des différents process entrant en jeu pour la cartographie des fonctions écologiques des zones humides (Figure 13). L'expression de la fonction de la zone humide résulte des interactions entre la faune, la flore et le support physique des différents habitats présents sur la zone humide. Les végétations et les fonctions écologiques évoluent dans le temps et sont influencées par les saisons. Selon la cartographie à réaliser, les relevés sur le terrain prennent différentes formes. Ces relevés peuvent être effectués sur des surfaces homogènes pour qualifier un habitat, ou il peut s'agir de relevés ponctuels d'une mesure quantitative, comme une mesure du stock de carbone. Une fonction écologique peut également être estimée par un proxy, une mesure intermédiaire, à condition d'avoir les connaissances nécessaires à la modélisation du processus écologiques. A

titre d'illustration, les mesures de biomasse aérienne permettent de représenter la productivité du milieu, mais sont également un proxy du carbone de la végétation aérienne.

Des axes de réflexion sont identifiés pour les différentes étapes du processus et signalés en rose sur le schéma Figure 13. Le choix des images est dépendant de l'accès, du prix et des exigences en termes de résolution spatiale, spectrale et temporelle. La date et le moment d'acquisition des images de la série temporelle doivent garantir l'absence de nuages, une heure de marée basse et des périodes représentatives de moments phénologiques clés de la végétation constituant ces zones afin d'avoir une observation optimale de la zone humide. La méthodologie terrain nécessite une réflexion adaptée aux traitements en télédétection. La réalité terrain peut réduire les possibilités d'échantillonnage notamment à cause de l'accessibilité de certains milieux. La mise en place des modèles ou le choix des proxys sont dépendants des connaissances biologiques et bibliographiques sur les écosystèmes, un socle de connaissance supplémentaire est nécessaire pour l'expérimentateur en télédétection. Par ailleurs, la reproductibilité des modèles n'est pas garantie d'une localisation à l'autre. Les différentes études mentionnent plusieurs algorithmes d'apprentissage ; Random Forest, Catboost, XGB, Regression kriging, l'intelligence artificielle étant systématiquement utilisée. Le traitement de données spatiales induit des processus longs, nécessitant une puissance de machine adaptée.

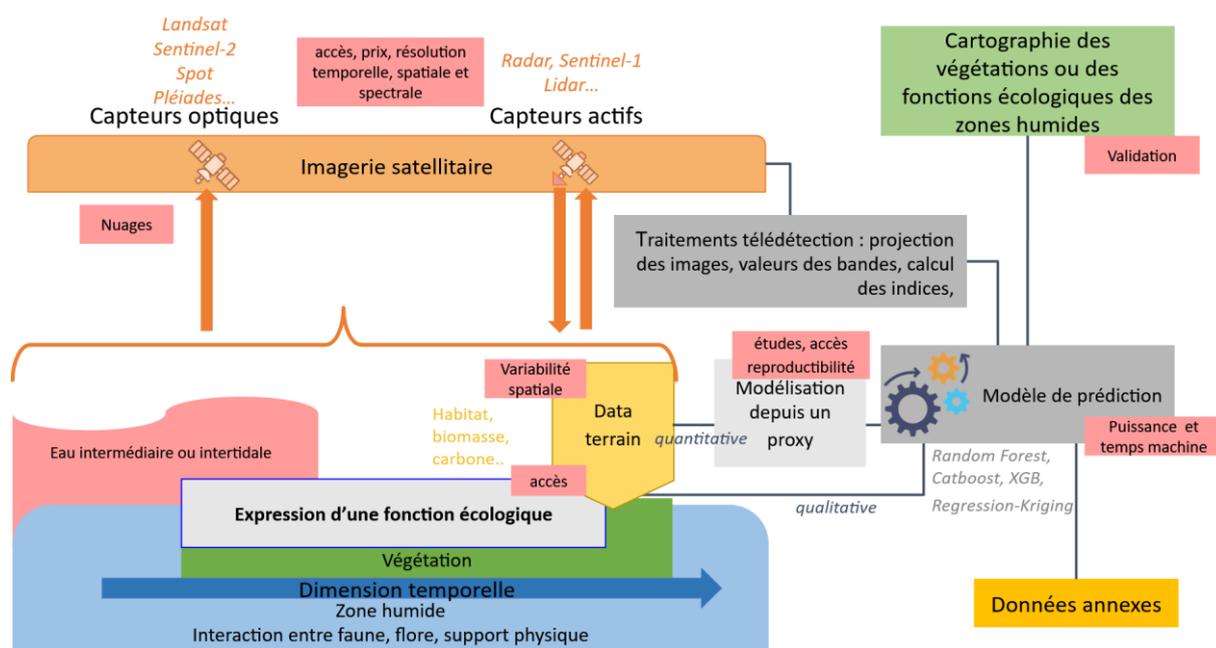


Figure 13 : Schéma bilan sur la cartographie d'une fonction écologique d'une zone humide par télédétection et algorithmes d'intelligence artificielle. Les carrés roses représentent les limites et axes de réflexion à induire dans la méthodologie pour les différentes.

3 Propositions méthodologiques pour l'étude des végétations, des trajectoires écologiques et l'expression des fonctions écologiques des zones humides

3.1 Avant-propos sur la méthodologie et le travail réalisé

Les tests réalisés s'inscrivent dans un contexte professionnel au sein d'une entreprise privée. Les besoins opérationnels ainsi que les contraintes de temps, que ce soit au niveau de

l'entreprise ou des partenaires intervenant sur les projets en cours, ne permettent pas de traiter toutes les manières de réaliser des classifications d'habitats ou de cartographier des fonctions écologiques des zones humides. De plus, les tests effectués ne traitent pas toutes les fonctions écologiques abordées dans la partie contexte. Ce travail est une première approche pour l'exploitation des données de télédétection pour la caractérisation des végétations et des fonctions écologiques des zones humides.

3.2 Données à disposition

Les données utilisées dans le cadre du travail sur les fonctions écologiques sont issues des projets CAFEZH, Marais d'Olives, et des tests ont été effectués, sur des données d'archives recueillies lors de précédents projets, pour Coastal Blue Carbon. Pour chaque zone d'étude, sont à disposition des images THRS, des données terrain et des séries temporelles Sentinel-2. Le détail des données utilisées est présenté dans le Tableau 2. Le tableau est organisé par type de données afin de souligner les principales entrées nécessaires pour les chaînes de traitement.

Tableau 2 : Présentation des données mises à disposition et utilisées pour les différents projets.

Type de donnée	Description	Date	Projet associé
Images satellites THRS	Images SPOT, SRC 2154, 4 bandes (R, V, B, PIR) pixels à 1.5m de résolution spatiale. Zone d'acquisition : zone humide du port du Havre à la ville de Rouen.	Séries temporelles de 2020 à 2022	CAFEZH
	Images Pléiades, SRC 2154, 4 bandes (R, V, B, PIR) pixels à 0.5m de résolution spatiale. Zone d'acquisition : parcelle marais d'Olives au nord de Bordeaux.	Séries temporelles 2019 à 2023	Olives
	Pléiades, SRC 2154, 4 bandes, pixels à 1.5 m de résolution spatiale. Zone d'acquisition : RNN des prés salés d'Arès.	Année 2023	Coastal Blue Carbon -
Images satellites en accès libre	Sentinel-2, SRC 32630, 13 bandes, pixels à 10 m de résolution spatiale pour les bandes R, V, B, PIR. Zone d'acquisition : zone humide du port du Havre à la ville de Rouen.	Années 2022 et 2023	CAFEZH

	Sentinel-2, SRC 32630, 13 bandes, pixels à 10 m de résolution spatiale pour les bandes R, V, B, PIR. Bande SWIR rééchantillonnée à 10m. Zone d'acquisition : parcelle marais d'Olives au nord de Bordeaux.	Années 2019 à 2023	Olives
	Sentinel-2, SRC 32630, 13 bandes, pixels à 10 m de résolution spatiale pour les bandes R, V, B, PIR. Zone d'acquisition : RNN des prés salés d'Arès.	Années 2023 et 2024.	Coastal Blue Carbon
Relevés terrain spatialisés	Relevés décrivant des communautés végétales réalisés par un expert phytosociologue du laboratoire Coenose, sous-traitant de i-Sea. 3 hiérarchies : Classe, Ordre, Alliance.	Campagnes réalisées de mai à octobre 2022.	CAFEZH
	Relevés des végétations réalisés par l'UMR Biogeco de l'université de Bordeaux.	Campagnes annuelles réalisées sur la période du mois d'aout pour chaque année.	Olives
Données annexes	Table des valeurs de Ellenberg pour l'humidité, la luminosité, le pH et la trophie selon les alliances de végétation.	Réalisation 2022, Bureau d'étude Coenose.	CAFEZH

3.3 Les chaines de traitements

3.3.1 Proposition méthodologique et outils utilisés

Afin de garantir la production des données pour la cartographie des végétations et d'étudier de nouveaux indicateurs pour les fonctions écologiques, deux processus de traitements sont présentés dans ce mémoire. Il s'agit de chaines de traitements générales et transverses aux projets étudiés. Le premier processus suit la méthodologie générale dans le cadre de la classification des habitats et est basée sur les différentes étapes de la solution Biocoast, outil interne à l'entreprise. Après la prise en main des protocoles Biocoast pour le traitement des données, les outils de la chaine ont été adaptés à la demande des projets, spécifiquement dans le cadre du projet CAFEZH pour une production à grande échelle. La deuxième chaine de

traitement (généralisée) présentée, concerne la partie exploration des données et a été mise en place dans le cadre de l'étude des fonctions écologiques des zones humides. Les chaînes de traitements sont codées en python 3.9.1, le langage de programmation privilégié dans l'entreprise, mais également choisi pour son accessibilité et les nombreuses bibliothèques associées pour le traitement d'images telles que rasterio, scikit-learn, geopandas, numpy ou shapely. Ce langage permet l'accès à de nombreuses ressources en ligne comme EOdatacube, une chaîne utilisée pour le téléchargement des images Sentinel-2. Les traitements sur les images sont réalisés grâce à la bibliothèque logicielle de traitement d'images Orfeo Toolbox. Le logiciel SIG open Source QGIS est utilisé pour la visualisation, certains traitements manuels et la mise en page cartographiques des données spatiales.

3.3.2 Chaîne de traitement pour la classification d'images

La chaîne de traitement pour la classification supervisée des images suit les processus présentés en Figure 14. Les données d'entrée sont des images satellites, des relevés terrain et, de façon facultative, des données annexes issues d'autres sources de données, selon les variables disponibles. Une fois le stack créé, la commande Superimpose de l'Orfeo Toolbox permet de superposer l'ensemble de la pile d'images afin que chacun des pixels de la série temporelle occupe le même espace physique, autrement dit que toutes les images soient parfaitement superposables.

Lors du traitement des images les bandes rouge, verte, bleue et proche infrarouge sont gardées pour leur représentativité de la variabilité des végétations, du milieu et des processus. Les bandes proche infra-rouge et rouge sont toujours des variables d'intérêt dans les différentes études (Clément *et al.*, 2008; Campbell *et al.*, 2022).

Pour la classification des habitats selon le protocole Biocoast ©i-Sea, d'autres indices de télédétection sont ajoutés au stack ; 6 indices radiométriques sont calculés et injectés à la classification :

- Des indices de végétation : les NDVI Normalized Difference Vegetation Index, (Rouse *et al.*, 1973), RVI Ratio Vegetation Index (Jordan, 1969), et SAVI Soil Adjusted Vegetation Index, (Huete, 1988).
- Deux indices de sol : les RI (Redness Index, Mathieu *et al.*, 2006) et BI (Brightness Index, Gao, 1996),
- Un indice d'eau : le NDWI Normalized Difference Vegetation Index (Gao, 1996).

Les données du stack d'images sont ensuite extraites et associées aux polygones ou points correspondant afin de créer la base de données pour les jeux de données d'apprentissage et de validation. Le ratio est choisi par l'opérateur.

Les données terrain peuvent être polygonisées si elles décrivent une surface, l'opération est effectuée manuellement par photo-interprétation. L'objectif est d'attribuer un polygone autour du point terrain qui définit une zone homogène sur les images de la zone d'étude.

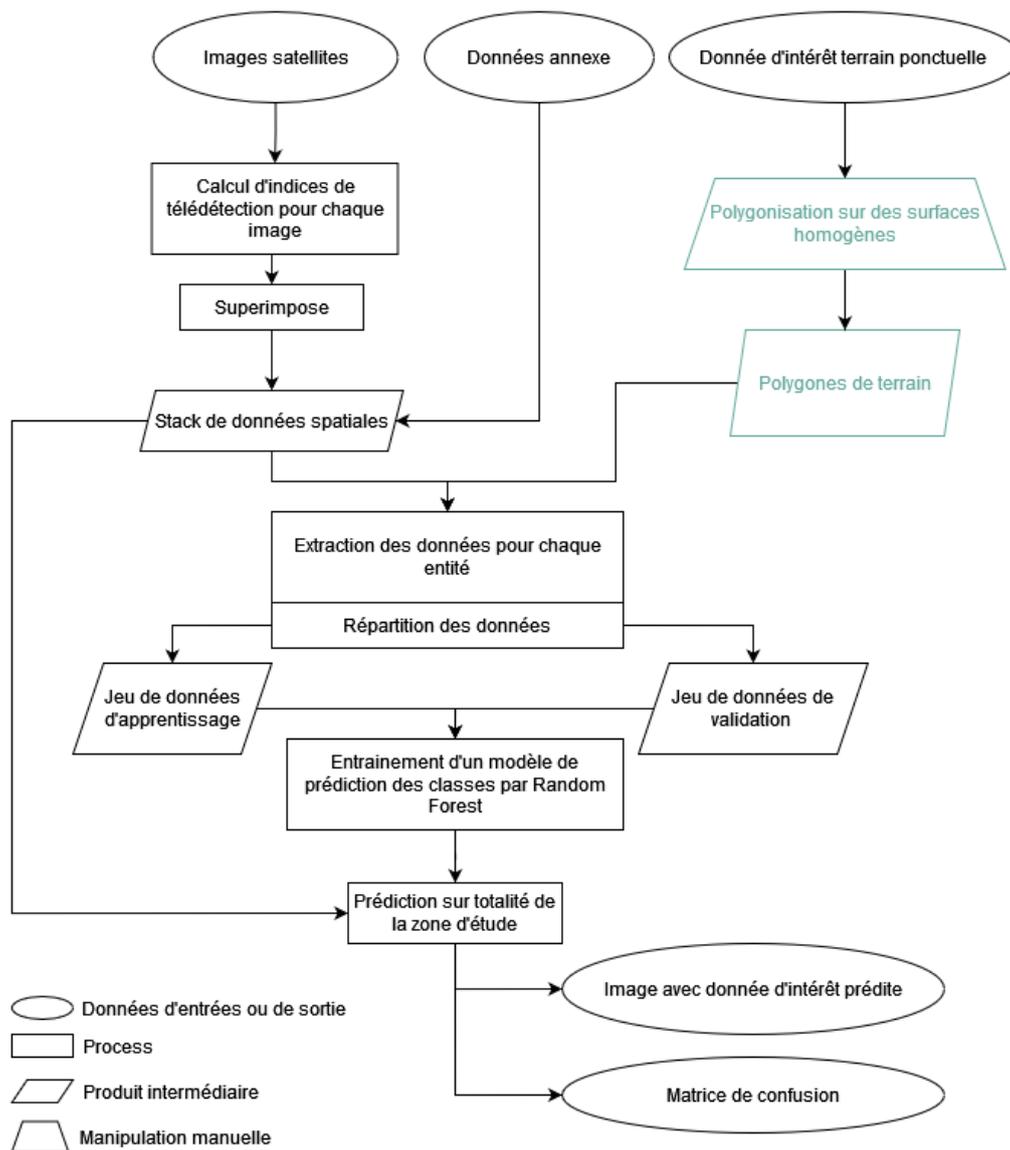


Figure 14: Chaîne de traitement générale pour la classification de pixels sur images THR à partir de données de terrain ponctuelles. Les étapes colorées sont optionnelles.

L'extraction permet ensuite d'attribuer les différentes données de la pile d'images « stack », à chaque pixel ou chaque polygone. Les jeux de données servent ensuite à l'implémentation du Random Forest. Une fois le modèle entraîné, les valeurs sont prédites sur la totalité du stack et une image est créée à partir de la prédiction. Les évaluations sont présentées sous forme de matrices de confusion, des tableaux de contingence croisant prédictions et données de référence (Annexe 1). Elles permettent d'observer la dispersion des erreurs de prédiction et ainsi de comprendre de potentielles confusions dans le résultat cartographique. L'évaluation des modèles peut être effectuée de plusieurs manières :

- Mode pixel : la séparation des jeux de données est effectuée sur les pixels, des pixels appartenant au même polygone peuvent servir d'entraînement et d'évaluation.
- Mode polygone : la séparation des jeux de données est effectuée en prenant en compte la notion de polygones, les pixels d'un polygone servent à l'entraînement, et l'évaluation est effectuée sur un polygone différent de la même classe.

Pour les deux modes, les jeux de données peuvent être équilibrés en ajustant le nombre de pixels pris en compte par classe, cela revient à attribuer l'effectif de la classe la moins représentée à toutes les classes. Cette méthode permet d'équilibrer le jeu de données mais peut entraîner une perte d'information, voire de représentativité du terrain.

La chaîne présentée explique donc le processus global mis en place dans la chaîne Biocoast, mais aussi dans d'autres chaînes de traitement pour la réalisation de tests R&D. Pour la production des cartographies des habitats pour les projets CAFEZH et Olives, la boîte à outil Biocoast a été directement utilisée.

3.3.3 Etude de séries d'images

Les trajectoires de végétations et les fonctions écologiques des zones humides sont des processus dynamiques qui induisent une étude spatio-temporelle du milieu. Par conséquent, un grand axe d'étude concerne l'observation des trajectoires temporelles des pixels et des produits issus de ces données. Un workflow général est présenté pour étudier les trajectoires temporelles des indices et des végétations. Des fonctions supplémentaires ont été mises en place pour les besoins spécifiques des projets et pour la création des graphiques qui permettent l'analyse des données.

3.3.3.1 Méthodologie pour la trajectoire des pixels

Les pixels des images satellites de la zone d'étude sont superposés dans un ordre chronologique afin de simuler la dynamique temporelle de la radiométrie. La superposition est qualifiée de « stack » et peut contenir un grand nombre de couches de données datées (Figure 15). Par exemple, la superposition d'indices NDVI permet de suivre la dynamique de la végétation dans le temps.

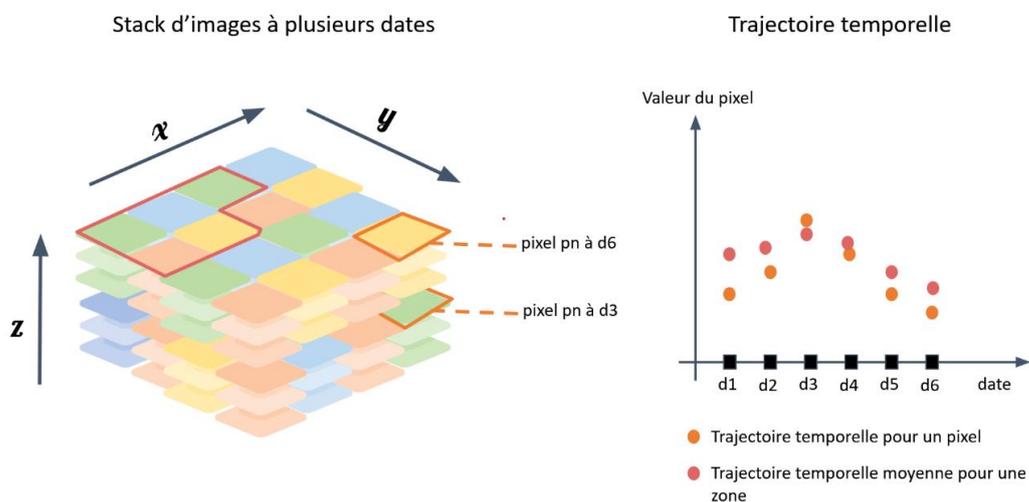


Figure 15 : Stack d'images pour représentation des trajectoires temporelles des pixels.

Les trajectoires de pixels peuvent alors être observées pour un seul pixel ou sur une zone pour laquelle la moyenne et l'écart type des valeurs des pixels sont extraits. L'étude des moyennes de pixels a été privilégiée afin d'avoir une visualisation plus robuste de la radiométrie observée. Par ailleurs, cela permet d'impliquer une dimension supplémentaire à l'analyse dans

le cas où la zonation dépend d'un type de végétation par exemple. Les chaînes de traitements pour l'analyse des trajectoires sont basées sur ce principe.

3.3.3.2 Chaîne de traitement pour l'analyse spatio-temporelle des images et indices radiométriques par télédétection

La chaîne de traitement pour l'analyse spatio-temporelle des images S2 et des indices radiométriques dérivés est présentée dans la Figure 16. La chaîne EOdag Download a été utilisée pour automatiser le téléchargement des images Sentinel-2, grâce aux différents paramètres à indiquer par l'opérateur : date de début, date de fin, localisation (emprise), seuil de pourcentage des nuages. Une vérification manuelle est ensuite effectuée pour garantir l'absence de nuage et la qualité de l'acquisition. Comme pour la chaîne précédente, les pixels sont alignés et les indices radiométriques d'intérêts sont calculés et ajoutés au stack dans un ordre chronologique. La classification qui va permettre un zonage des pixels est ensuite alignée au stack de façon à créer une sélection de pixels par classe. Sans zonation, l'image peut également être moyennée entièrement. Le dernier fichier intermédiaire est donc un stack de toutes les données calculées ou non, par ordre chronologiques avec une zonation attribuée à chaque pile de pixel. A partir de ce fichier, il est possible de générer des trajectoires temporelles sur un graphique présentant les valeurs des pixels en fonction du temps, ou de créer de nouvelles données par des opérations mathématiques sur les stacks.

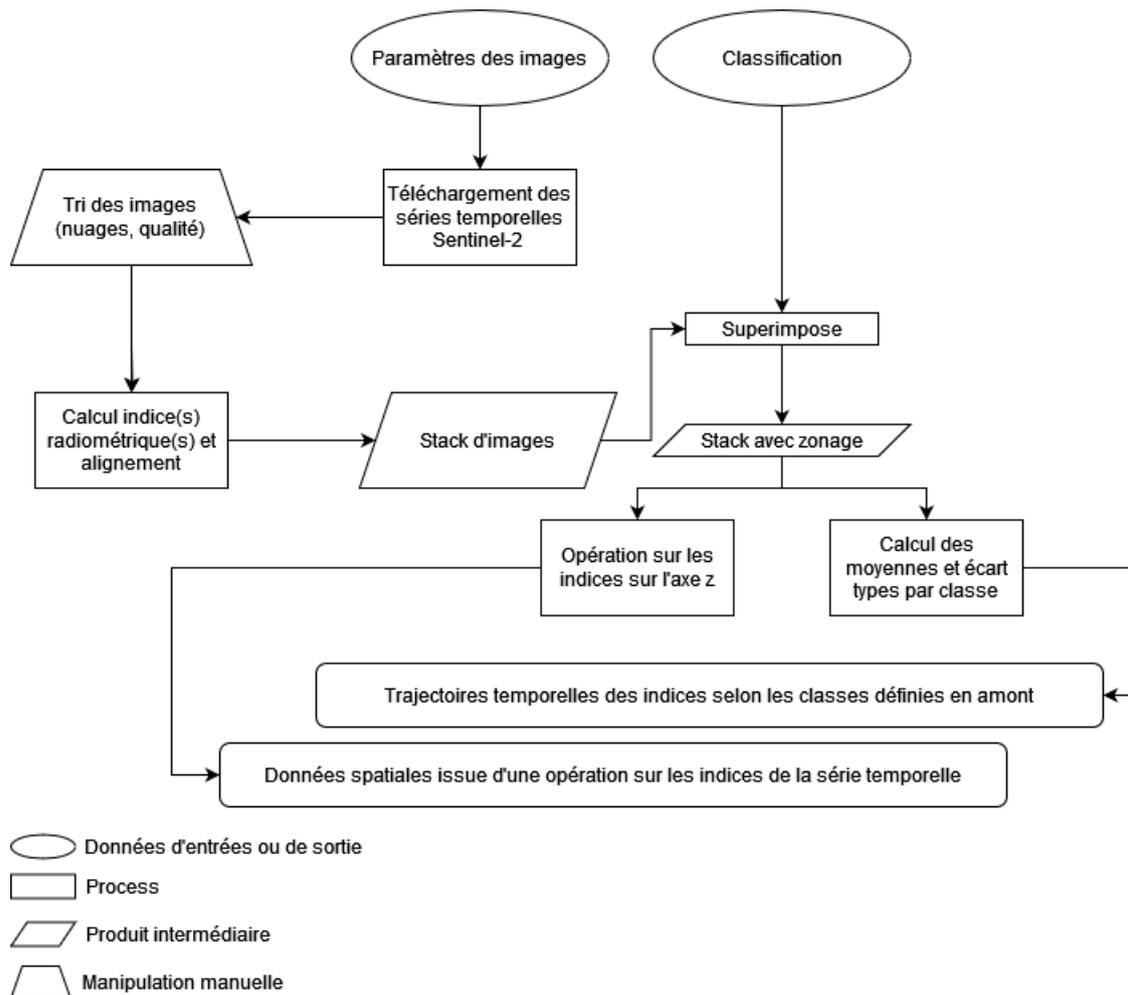


Figure 16 : Chaîne de traitement pour l'étude des indices de télédétection sur séries temporelles Sentinel-2.

3.3.4 Choix techniques et professionnels pour la sélection des fonctions écologiques des zones humides.

Les chaînes de traitements sont adaptées à l'étude des fonctions écologiques par télédétection selon les processus établis par les recherches bibliographiques, et les besoins impératifs et opérationnels des projets en cours.

3.3.4.1 *Analyse des climats d'humidité*

Les climats d'humidité sont étudiés avec les indices NDWI et NDMI. Les deux indices sont en lien avec la teneur en eau des végétations. Le NDMI est utilisé pour détecter la végétation de l'eau et des sols grâce à la bande infrarouge à ondes courtes (Jin and Sader, 2005). Cette bande étant à 20m de résolution spatiale pour les images Sentinel-2, elle a donc été rééchantillonnée à 10m pour correspondre aux pixels des autres bandes Sentinel-2 pour le traitement des images. Les deux indices utilisent des bandes spectrales différentes représentatives de compartiments du sol et de la végétation. Leur étude permet ainsi de prendre en compte les différents stocks d'eau dans l'écosystème.

3.3.4.2 *Analyse de la productivité*

La fonction de productivité de la zone humide est étudiée selon une première méthode, appliquée sur l'indice NDVI. Cet indice, d'après la littérature, est le plus couramment utilisé lors de l'étude de la productivité en termes de biomasse. Il est corrélé dans de nombreuses études avec les mesures de biomasses et de hauteur de végétation (Clément *et al.*, 2008; Rapinel *et al.*, 2020; Masenyama *et al.*, 2022). Il est possible à partir du NDVI de produire des indices supplémentaires prenant en compte les dynamiques temporelles de la végétation, le NDVI-I (Pettorelli *et al.*, 2005) et le MMAX (Weber, Schaepman-Strub and Ecker, 2018).

Le NDVI-I est une somme de NDVI sur une année pour chaque pixel de la zone humide. Cet indice permet de distinguer les espaces à forte productivité sur une année. Il y a cependant plusieurs limites identifiées : i) l'imagerie satellitaire n'est pas disponible tous les mois selon la qualité des acquisitions, la méthode est donc simplifiée à l'utilisation d'une image par mois au moins sur la période de végétation et ii) la valeur obtenue pour la somme de NDVI-I n'est pas une valeur de production ni de biomasse mais doit bien être considérée comme une échelle de la productivité. Cette notion est à prendre en compte lors de la lecture de la carte. Les valeurs sont dépendantes du nombre d'images utilisées et des périodes d'acquisition. Une comparaison entre deux années n'est pas pertinente à moins de normaliser les données et de veiller à choisir des images acquises à des périodes similaires.

Le MMAX consiste à observer le pic de productivité au sein de la trajectoire temporelle. La production finale est un indicateur de la date de l'image pour laquelle le pic de productivité a été atteint. Il s'agit d'un indicateur de la saisonnalité des flux de production qui peut être intéressant à intégrer dans des modèles concernant les processus écologiques.

3.3.4.3 *Définir la zone humide par les valeurs d'Ellenberg*

La spatialisation des indices d'Ellenberg est testée pour la représentation des fonctions de la zone humide grâce aux relevés terrains effectués dans le cadre du projet CAFEZH. Selon la méthodologie préconisée par G. Perrin (2023), les valeurs fournies par alliance de végétation sont moyennées sans pondération pour obtenir les valeurs d'Ellenberg pour l'humidité et la trophie par ordre de végétation (la carte des végétations n'ayant pas été produite au niveau

alliance). Le choix de ce niveau hiérarchique permet de réduire la marge d'erreur induite par les moyennes des valeurs d'Ellenberg et de produire une carte plus précise. Une fois le calcul des valeurs par ordre réalisé, la carte produite est le résultat d'une jointure attributaire entre l'ordre de végétation et la valeur de Ellenberg associée.

3.4 Elaboration d'une méthodologie terrain basée sur les traitements de télédétection

3.4.1 Intérêt d'un test terrain en zone humide

Dans le cadre du projet ESA Coastal Blue Carbon réalisé à l'échelle globale, l'utilisation de dalle Sentinel-2 est préconisée. Ces images sont plus accessibles que les images THRS, sollicitent moins de ressources informatiques pour traiter des emprises très larges et possèdent une résolution spatiale plus cohérente pour la visualisation finale. L'étude des zones humides est souvent réalisée localement ou à l'échelle régionale et l'utilisation des images THRS est pratiquement systématique pour distinguer les écosystèmes composant les zones humides. Le projet ESA Coastal Blue Carbon, de par son échelle globale confronte les opérateurs à une première limite : la cartographie des zones humides sans images THR. La qualité des campagnes terrain est un facteur clé pour la modélisation et la représentativité de la cartographie finale. Un module pédagogique organisé par i-Sea en collaboration avec l'école de Bordeaux Sciences Agro a permis une réflexion autour de la méthodologie terrain dans le cadre du projet ESA Coastal Blue Carbon. La fonction écologique du stockage de carbone par la zone humide est étroitement liée à la biomasse présente sur la zone d'étude. L'objectif du test terrain est d'expérimenter une méthodologie d'échantillonnage adaptée et réfléchi pour la cartographie d'une fonction écologique par télédétection et d'appréhender la perte d'information entre THR et S2.

3.4.2 Choix du site d'étude

Les tests pour les relevés de biomasse sont effectués sur la Réserve Naturelle des Prés Salés d'Arès, lieu bien connu de i-Sea qui avait réalisé une cartographie fine des végétations en 2017 (Figure 17). Les prés salés sont des écosystèmes des zones humides. Ils sont constitués d'étendues plates submersibles lors des grandes marées, couvertes d'un tapis végétal herbacé et faites d'un sol constitué d'un matériel fin, tangué ou vase, où serpentent des chenaux. Les prés salés sont composés en plusieurs parties qualifiées de ceintures : haut schorre, moyen schorre, bas schorre et slikke.

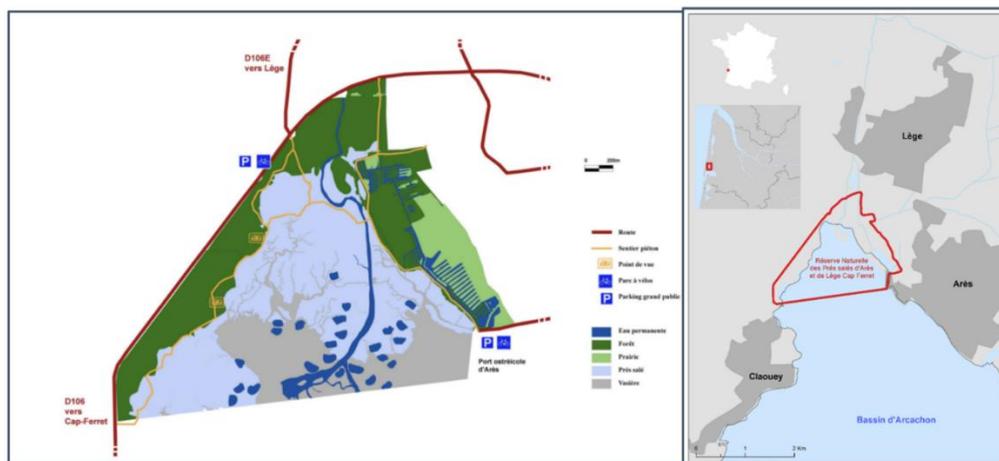


Figure 17 : Plan et situation géographique de la Réserve Naturelle des Prés Salés d'Arès. Source : Réserve Naturelle des Prés Salés d'Arès.

3.4.3 Méthodologie pour les relevés de végétations et de biomasses

L'objectif est d'obtenir une base de données permettant à la fois de cartographier les habitats ainsi que la biomasse (g/m^2), en comparant la possible perte d'informations liées au changement de résolution entre Pléiades et Sentinel-2 en vue d'un changement d'échelle.

3.4.3.1 Organisation générale du protocole terrain

Le protocole est établi grâce à la connaissance du milieu. La carte de 2017 est utilisée pour repérer les changements de ceinture à confirmer sur le terrain (Figure 18). Les chemins à suivre ont fait l'objet de discussion avec des personnes ayant déjà fait des campagnes terrain sur la zone et avec le directeur de la Réserve Naturelle. L'objectif est de privilégier les chenaux les plus accessibles durant la marée basse et d'éviter zones abritant des oiseaux, car la campagne est organisée en période de nidification. Les trajets choisis sont présentés dans la figure X.

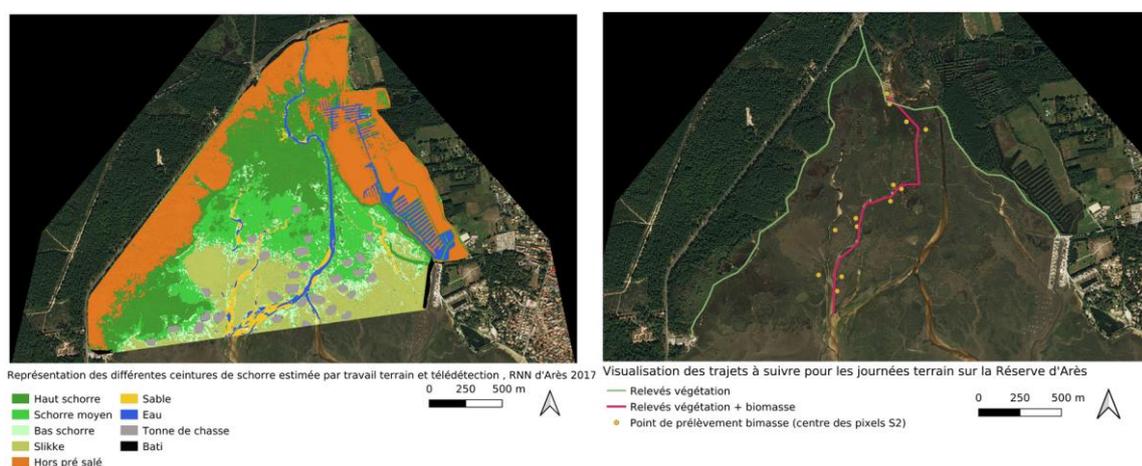


Figure 18 : Carte des ceintures de prés salés extrapolée pour Réserve Naturelle des prés salés d'Arès basée sur la cartographie des habitats produite en 2017 par télédétection et relevés terrain (à gauche), Extrait du protocole terrain mis en place dans le cadre du module TIC avec Bordeaux Sciences Agro pour la visualisation de la mission terrain (à droite).

Deux jours de terrain sont prévus et les horaires de marée limitent les temps de sortie à environ 4h sur la zone d'étude. Par ailleurs, les consignes de la Réserve impose la formation de petits groupes de personnes afin de limiter la dégradation du milieu ainsi que les nuisances sonores pouvant perturber l'avifaune. Afin d'optimiser la campagne, deux protocoles ont été mis en place. Le premier concerne les relevés de végétation sans prélèvement servant à acquérir des points localisés des espèces et des ceintures du milieu. Le deuxième protocole concerne les prélèvements de biomasse et de hauteur de tiges, avec l'acquisition de points localisés. Pour les deux protocoles, les données spatiales acquises doivent renseignées sur les espèces dominantes présentes, la ceinture, la couleur du sédiment, l'humidité du sol, le type de sol. Ces données annexes permettent de conserver un maximum d'information sur les conditions du milieu avec les contraintes de temps et de matériel imparties. Les relevés de biomasse sont réalisés dans le trajet central, en rose sur la figure X. Suivre le chenal comme indiqué, permet de traverser toutes les ceintures et garanti l'échantillonnage de toutes les classes.

3.4.3.2 Méthodologie pour la biomasse

Les relevés d'une variable quantitative telle que la biomasse sont réfléchis différemment des relevés qualitatifs effectué lors d'une classification d'habitats. La biomasse sur le terrain peut avoir une très grande variabilité, au sein d'une même ceinture et selon la végétation présente ou l'absence de végétation sur des milieux plus éparse. Ainsi, selon la taille du quadrat et la résolution des images observées, un relevé de biomasse ne pourra pas être totalement représentatif de la valeur du NDVI sur le pixel dans lequel le point est situé.

L'objectif principal est de déterminer la variabilité présente au sein d'un pixel Sentinel-2 et d'estimer la perte d'information par rapport à une cartographie réalisée une image Pléiades. Le protocole vise donc à simuler un pixel Sentinel-2 sur le terrain en réalisant des mesures au sein d'une surface de 10m*10m soit la résolution spatiale du pixel S2. Cinq points sont prélevés au sein du pixel Sentinel-2 théorique afin d'appréhender à la fois la variabilité locale de la végétation et de sa biomasse tout en observant la variabilité spectrale correspondante enregistrée par Pléiades. Les stations ont été placées en amont pour cibler les différentes grandes ceintures de prés salés afin de comprendre les gradients de végétation et de productivité pour les prés-salés d'Arès. La Figure 19 représente de façon schématique les ceintures de schorre et la méthode d'échantillonnage au sein du pixel S2.

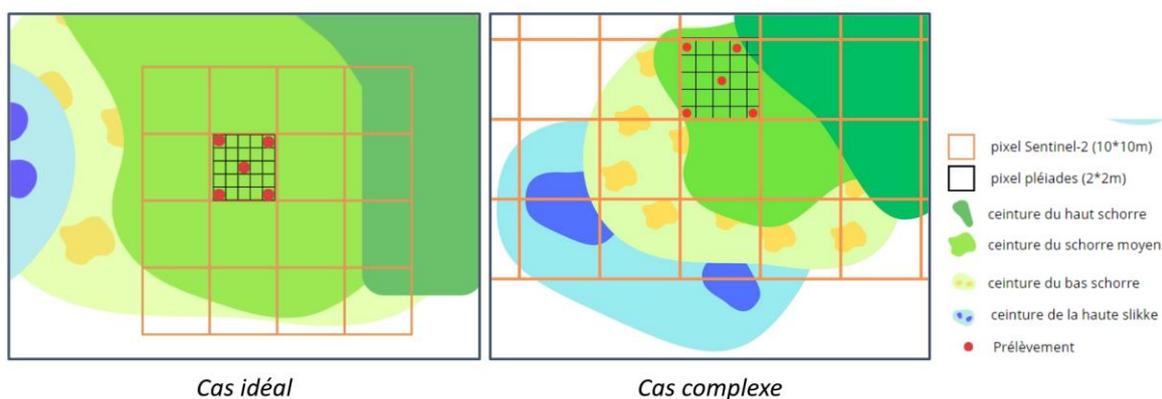


Figure 19: Représentation schématique de l'échantillonnage des ceintures constituant les prés salés d'une zone humide pour un traitement par télédétection sur des images satellites avec des pixels à différentes résolutions. Méthodologie choisie dans le cadre d'un test terrain pour la détermination de la perte d'informations entre un pixel S2 et un pixel Pl.

La difficulté du protocole consiste à placer la zone de 10x10m au sein d'un espace homogène constitué de la même ceinture, comprenant d'autres pixels S2. Le cas idéal présenté à droite présente un cas de figure où tous les pixels autour sont sur la même ceinture. Le cas complexe, plus proche de la réalité terrain, prend en compte la structure des ceintures de prés salés qui sont souvent des surfaces larges mais peu épaisses. Le cas complexe indique un pixel non enclavé dans une ceinture, dont un angle serait à l'extrémité d'une ceinture différente. Dans ce cas, le protocole est mis en place mais les prélèvements doivent rester au sein de la ceinture à prélever. Le but du protocole est également d'estimer la viabilité et la facilité de mise en place de la méthodologie sur le terrain.

Le prélèvement de biomasse est basé sur une méthodologie classique de prélèvement sur 30*30cm, surface choisie en fonction de la bibliographie (Howard *et al.*, 2014), des contraintes dues à l'équipement (four) et avec pour objectifs de dégrader le moins possible la Réserve Naturelle.

3.5 Synthèse sur les méthodologies employées

Pour la réalisation des classifications des habitats naturels, la chaîne Biocoast a été employée. Cette chaîne de traitement opérationnelle est largement utilisée par l'entreprise, permettant la classification d'image par RF à partir de relevés terrain. D'autres chaînes de traitements ont été développées, basées sur l'exploitation de stacks d'images, pour des études temporelles ou multi-sources. Les données écologiques étudiées concernent les habitats (relevés de végétations), l'humidité (indices NDMI et NDWI), la productivité (indices NDVI-I et MMAX). Une méthodologie terrain est également proposée pour l'étude des changements d'échelle induite par l'étude des zones humides de l'échelle locale à globale selon une stratégie d'échantillonnage du pixel S2.

4 Présentation et analyse des résultats produits et expérimentés pour les différents projets

Cette partie présente dans un premier temps les résultats obtenus pour les études menées sur les zones humides des projets Olives, CAFEZH et Coastal Blue Carbon. Les résultats obtenus sont ensuite remis en perspective dans une discussion visant à amener une réponse à la problématique de l'étude.

4.1 Résultats dans le cadre du projet Olives

4.1.1 Classification des habitats naturels par la solution Biocoast sur le marais d'Olives

La classification des habitats sur le marais d'Olives a été produite pour cinq années de 2019 à 2023 sur des séries temporelles d'images Pléiades à 50 cm de résolution spatiale. La classification a été réalisée à partir d'un algorithme de Random Forest selon le protocole Biocoast établi par i-Sea.

4.1.1.1 La typologie

La typologie des habitats a subi multiples allers-retours entre l'experte botaniste et l'équipe télédétection conduisant à de nombreux essais de classifications suivant des typologies différentes, afin d'obtenir une cartographie la plus représentative possible des espèces végétales présentes. Le relevé brut est défini par toutes les espèces présentes sur la zone homogène et leur

pourcentage d'abondance. Les typologies testées diffèrent selon la méthode pour catégoriser les relevés botaniques. En fonction de la méthode choisie, deux polygones d'apprentissage peuvent être dans une même classe ou être séparés. Les échantillons dominés par un sol nu ou de l'eau ont été supprimés. Certaines classifications privilégiaient les relevés « purs » alors que d'autres prenaient en compte les mélanges d'espèces. La classification retenue, après analyse de l'experte terrain a été générée à partir des relevés bruts grâce à une succession d'analyses factorielles des correspondances (ou AFP) et d'analyses de groupements (CAH, algorithme de Ward sur distance euclidienne). Elle est ainsi basée sur les similitudes entre les compositions des différents relevés bruts. Un total de 16 classes a permis de distinguer différents groupes représentés par des espèces indicatrices.

Ce travail a permis de questionner l'importance de la typologie utilisée pour les modèles de classification. La typologie doit être faite par l'expert botanique de la manière la plus cohérente possible pour représenter le terrain, en prenant en compte les contraintes de surface des relevés sur ce type d'étude (dépendante de ce que la résolution spatiale permet de visualiser sur l'image satellite). Si le regroupement de certaines espèces est cohérent du point de vue de la phytosociologie, une réflexion est à mener sur l'intérêt d'un regroupement des espèces selon leur signature spectrale.

4.1.1.2 Exploitation des données

L'exploitation et la méthode sont présentés pour l'année 2019 et sont similaires pour les années suivantes. Le Tableau 3 résume les données disponibles en 2019 pour le modèle de prédiction. Des codes représentent les végétations observées (Annexe 1).

Tableau 3 : Résumé des données disponibles pour le modèle de prédiction. Les * indiquent les codes des classes supprimées pour l'entraînement du modèle car trop peu représentées.

Code	Nb polygones	Code	Surface (m2)	Nb pixel
AGROSTOL	9	6	506,7509643	2027
CIRSARVE	33	2	2545,809578	10183
Divers meso	12	7	593,3161786	2373
ECHICRUS	44	5	4998,426585	19993
ELYTREPE	1*	10	24,59079108	98
ERIGSP	25	4	2056,41108	8225
HOLCLANA	13	11	1152,615186	4610
JUNCEFFU.GR	9	9	321,4546972	1285
Litter	2*	8	152,4629047	609
PERSMACU	2*	3	112,9005609	451

Les classes avec un nombre de polygones inférieur à 5 ou couvrant trop peu de surface sont supprimées. Le nombre d'échantillons est considéré comme trop peu représentatif pour l'entraînement du modèle. Les échantillons des végétations codées ELYTREPE, Litter et PERSMACU présentent un nombre très faible de polygones et de pixels, ils sont donc retirés de la prédiction cartographique. Comme il s'agit de végétations observées sur le terrain, il a été décidé de les ajouter par la suite sur la cartographie finale par incrustation.

4.1.1.3 Evaluation du modèle

Pour chaque modèle, le travail s'est effectué au niveau pixel (et non polygone). Ainsi, des pixels ont été sélectionnés pour l'apprentissage et d'autres pour le test, de manière aléatoire. Certaines classes possèdent un nombre réduit de polygones, ainsi, séparer les polygones en jeux de données d'apprentissage et de test ne permet pas d'appréhender une variabilité suffisante pour l'apprentissage de la classe par le modèle. Ce choix est à prendre en compte pour l'interprétation des résultats. Pour chaque modèle, la méthode appliquée pour la constitution de la base de données d'apprentissage et la base de données de test est décrite ci-dessous :

- Tirage aléatoire au sein des polygones : 50% des pixels pour l'ensemble d'apprentissage et 50% utilisés pour l'ensemble de test,
- Pour l'apprentissage : Pas d'équilibrage entre les classes.
- Évaluation (test) sur la totalité des pixels de l'ensemble de test.

Les modèles ont été réalisés en mode « déséquilibrés », c'est-à-dire en gardant le nombre initial de pixels de test pour chacune des classes. Les déséquilibres de la base de données d'apprentissage étaient acceptables en termes de nombre de pixels et de représentativité terrain. Cependant, un risque de sur-représentation peut exister pour les classes présentant un fort nombre d'échantillons.

La Figure 20 : Comparaison entre un modèle d'apprentissage basé sur des polygones en échantillonnage non équilibré (A) et un modèle basé sur des pixels en échantillonnage non équilibré pour l'année 2019. Figure 20 présente les évaluations selon deux modèles non équilibrés, (A) réalisé en mode polygone et (B) en mode pixels. Les deux modèles affichent des indicateurs de précision (OA – Overall Accuracy) satisfaisants, supérieurs à 0,80. Le modèle polygone indique davantage de confusion. Certaines classes comportent peu de polygones, telles que AGROSTOL ou JUNCEFFU.GR, les jeux de données d'apprentissage et de validation présentent donc peu d'individus et sont insuffisants pour que le classifieur les distingue correctement des autres classes. En mode pixel, ces classes contiennent respectivement 2027 et 1285 pixels, les échantillons sont donc beaucoup plus nombreux pour construire le modèle de prédiction. Par ailleurs, une confusion est observée en 2019 entre JUNCEFFU.GR et ERIGSP. Sur l'année 2020, le développement de végétations codées JUNCEFFU.GR au milieu de ERIGSP est remarqué. La confusion observée semble donc cohérente lorsqu'elle est mise en relation avec les données d'évolution du milieu.

Les matrices de confusion sont une évaluation du modèle et non de la classification cartographique de manière générale. L'étude des matrices permet surtout de montrer les confusions au sein du modèle entre les classes. Celles-ci sont souvent expliquées d'un point de vue écologique. C'est grâce à l'étude de ces matrices que la typologie a également pu être retravaillée afin d'éviter les confusions. A titre d'illustration, la classe AGROSTOL a été prédite de façon satisfaisante par le classifieurs d'après l'experte.

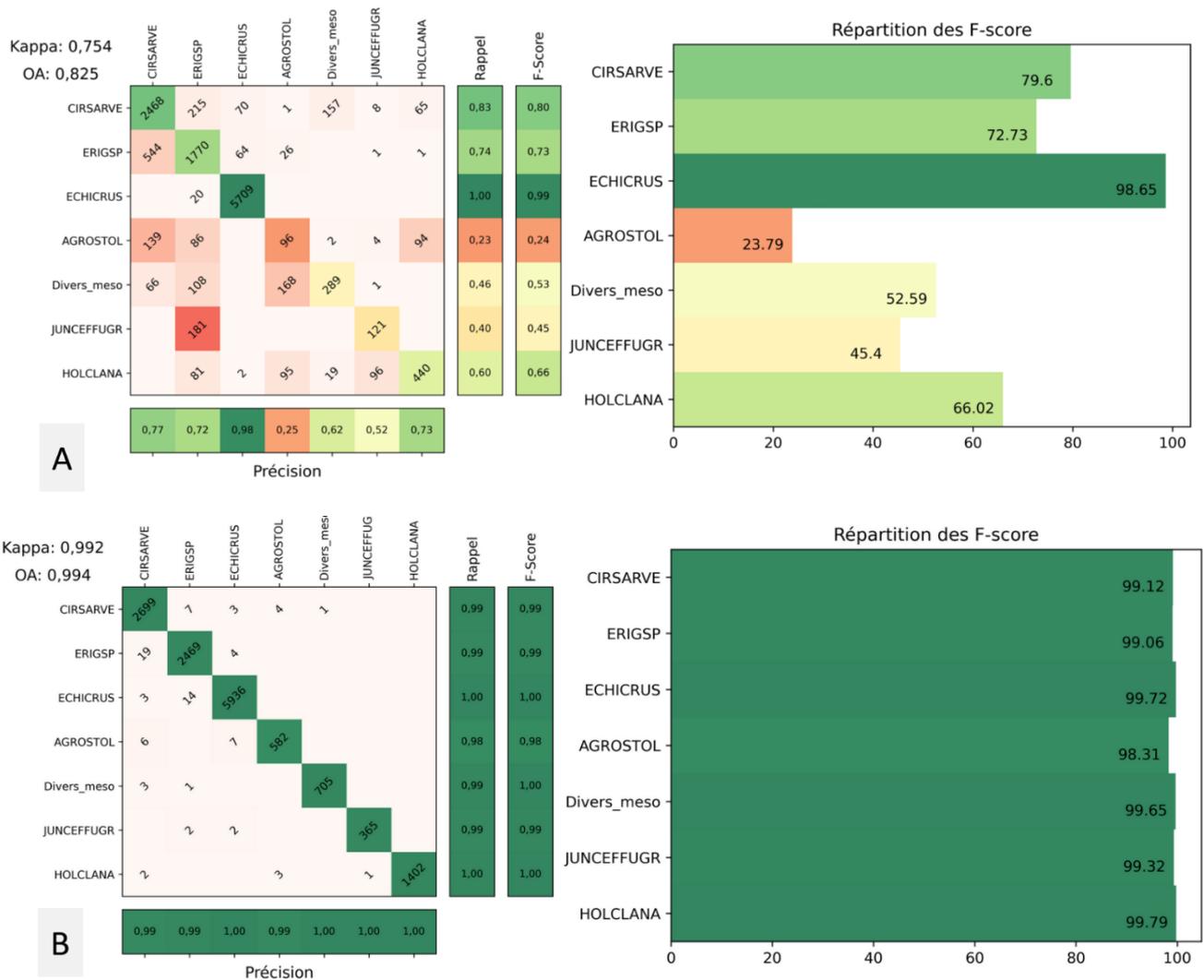


Figure 20 : Comparaison entre un modèle d'apprentissage basé sur des polygones en échantillonnage non équilibré (A) et un modèle basé sur des pixels en échantillonnage non équilibré pour l'année 2019.

4.1.1.4 Post-traitement

Une régularisation spatiale par filtre majoritaire est appliquée au résultat brut de la classification. Cette régularisation consiste à affecter à chaque pixel l'étiquette (ou classe) majoritaire (en termes de nombre d'occurrences) dans son voisinage. Le rayon de ce voisinage a été fixé à 2 pixels. Cette étape de post-traitement permet d'éliminer une partie du « bruit de classification ».

Enfin, des post-traitements automatiques et manuels ont été appliqués pour injecter du sens logique et thématique dans le résultat cartographique. Les polygones des classes retirées de l'apprentissage ont été re-incrustés afin que les végétations observées sur le terrain soient bien présentes sur la cartographie finale. Le chemin et les fossés ont été détournés à la main pour chaque année et également incrustés en post-traitement. De même, des polygones d'eau ont été détournés suivant les surfaces toujours en eau stable dans la série temporelle.

La même méthodologie a été appliquée pour les autres années.

4.1.1.5 Résultats cartographiques de la classification des habitats naturels

La Figure 21 présente les résultats cartographiques obtenus pour les cinq années. La végétation évolue rapidement d'une année à l'autre. La classe codée HOLCLANA semble coloniser le milieu, contrairement à ERIGSP qui est moins visible en 2023. Des surfaces en eau apparaissent sur la zone d'étude à partir de 2022. Ces cartographies confirment l'intérêt d'étudier les trajectoires de végétation afin de comprendre les processus écologiques en cours. Par ailleurs, certaines espèces végétales sont des indicateurs des conditions écologiques et climatiques qui constituent des données d'entrée à l'étude des fonctions écologiques. Des espèces invasives ou incohérentes sur le milieu peuvent également être des indices de la dégradation de la zone humide. Une étude dans le temps sur la trajectoire des végétations constitue donc une base de données précieuse pour les gestionnaires souhaitant monitorer les zones humides. Les discussions sur la typologie ont permis d'arriver à une représentation satisfaisante de la zone selon l'experte botanique ayant réalisé le terrain.

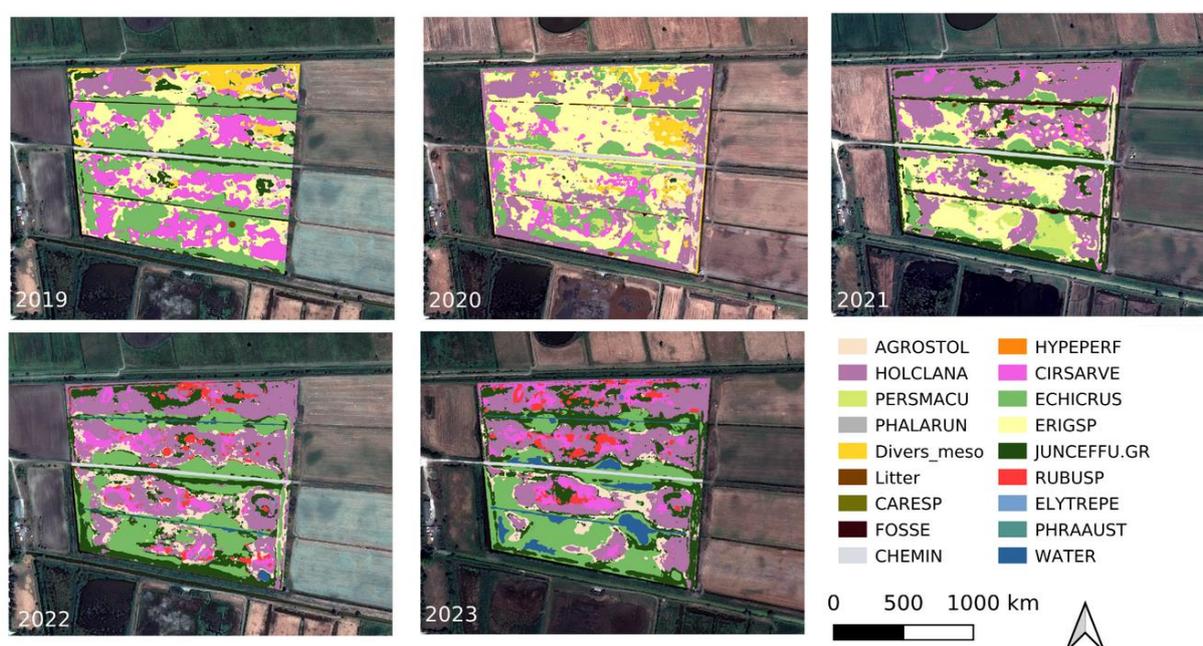


Figure 21 : Résultats cartographiques pour la classification des habitats naturels du marais d'Olives à Pempuyre de 2019 à 2023, réalisés à partir de relevés terrain et de chaîne de traitement en télédétection, Biocoast ©.

4.1.2 Les climats d'humidité

4.1.2.1 Exploitation des données

Les images Sentinel-2 pour le marais d'Olives ont été téléchargées de manière automatique pour les 5 années. L'ajout d'une fonction pour le découpage d'une ROI (Region Of Interest) a permis de travailler sur des images à taille du marais plutôt que sur la dalle S2 entière et d'optimiser les temps de traitements. Cependant, sur les 5 ans considérés, énormément d'images comportaient des nuages. Le seuil avait été fixé à 70% de couverture nuageuse maximum, ce qui reste un seuil élevé. La surface du marais étant faible, ce seuil permettait d'augmenter le nombre d'images sélectionnées en limitant le risque de présence de nuage sur le site. Ainsi, le tri manuel a été indispensable et 128 images ont été gardées (Figure 22). Certains mois d'hiver comme janvier ou décembre, ne possèdent pas d'acquisition et ne sont pas représentés dans les trajectoires temporelles.

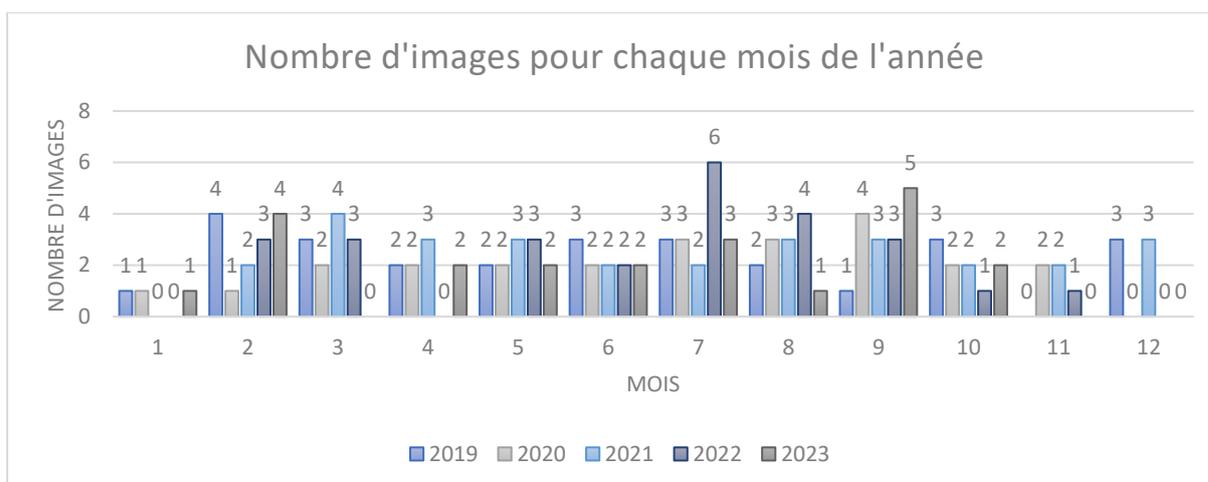


Figure 22 : Nombre d'images Sentinel-2 disponibles de 2019 à 2023 pour l'étude du marais d'Olives.

Pour que les années soient représentées par un nombre d'images similaire, des moyennes mensuelles ont été calculées sur les bandes spectrales lorsque plusieurs images étaient disponibles pour un mois, afin d'obtenir une image par mois de 2019 à 2023.

4.1.2.2 Les trajectoires d'humidité

Une première approche des climats d'humidité sur Olives a consisté à l'observation de la trajectoire temporelle des indices NDWI et NDMI sur Sentinel-2. Les valeurs de NDWI sont inférieures à zéro car cet indice permet de démarquer les corps hydriques et leur niveau d'humidité. Ainsi, les valeurs négatives désignent les surfaces non aqueuses. L'indice NDMI indique l'eau contenue dans la végétation et est plus complexe à interpréter car il dépend également de la couverture de canopée. L'évolution des indices a d'abord été tracée temporellement (Annexe 2), ce qui a amené l'hypothèse d'une augmentation moyenne de leur valeur au cours des années.

Afin de déterminer s'il existe des différences entre les jeux de données pour chaque année, la distribution des séries temporelles par année a été représentée sur des graphiques en boîte à moustaches (Figure 23). Les valeurs de NDWI et NDMI ont ensuite été comparées à l'aide de tests statistiques (Anova et Kruskal-Wallis, Annexe 3). Les tests effectués permettent de conclure sur un changement significatif ($p < 0,05$) du NDWI sur les différentes années. Les moyennes mensuelles sont significativement différentes entre 2019 et les années 2022 et 2023, ce qui peut signifier un changement vers des années plus humides. Cependant l'année 2020 est similaire aux années 2022 et 2023, pouvant indiquer la trajectoire observée est celle du climat général (des années plus ou moins humides à l'échelle de la région), plutôt que l'effet de la restauration hydraulique. Dans le cas du NDMI, la différence est significative entre les données de 2019 et de 2023. Ce constat rejoint l'idée de la colonisation d'une végétation plus humide. L'ajout d'années supplémentaires peut être pertinent pour déterminer s'il s'agit d'un événement isolé ou s'il existe une tendance réelle de changement d'humidité sur la parcelle. Dans ce cas, l'année 2024 serait significativement différente de 2019. Ainsi, l'observation des ces indices est à mettre en parallèle avec les conditions climatiques d'une année à l'autre. De même, les trajectoires observées sur la parcelle pour les indices NDWI et NDMI peuvent être comparées avec les parcelles alentours, sans mesure de restauration ou gestion. Cela permet d'observer si

les trajectoires sur la ROI sont le seul effet du climat ou dues à l'effet de la nouvelle gestion hydraulique.

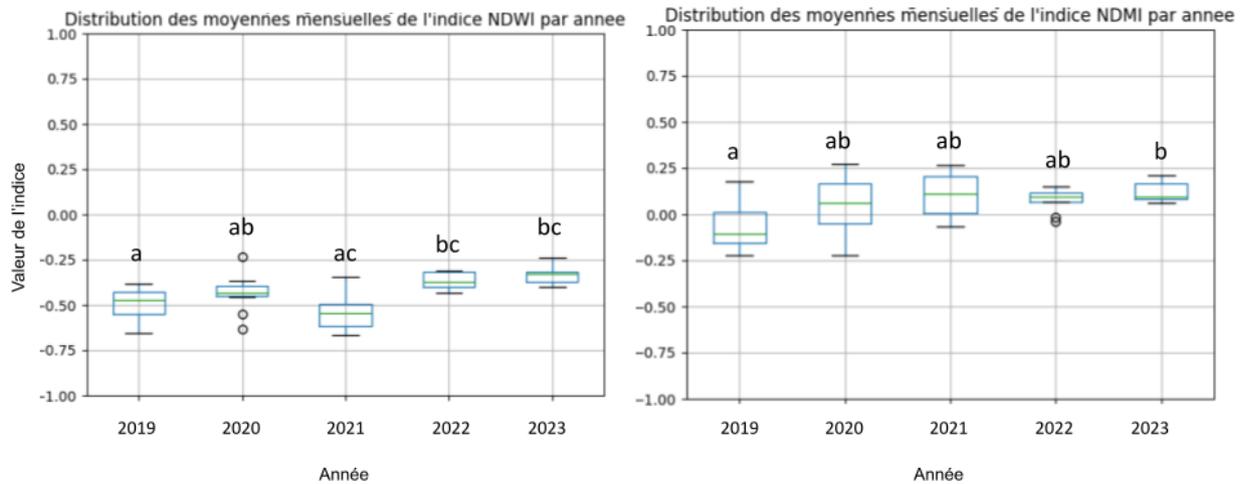


Figure 23 : Distribution des moyennes mensuelles des indices NDWI et NDMI par année sur la zone d'étude du marais d'Olives à Parempuyre.

4.1.2.3 L'étude du Most Frequent

Pour chacune des images NDWI et NDMI de la série temporelle, un algorithme de k-Means a servi à classifier les pixels en 5 classes. Les moyennes de ces 5 classes ont été calculées afin de les classer du groupe ayant la moyenne la plus faible à la plus forte. Cette manipulation a été réalisée sur l'ensemble de la série temporelle. Par la suite, grâce au stack d'image sur une année, chaque pixel s'est vu annoté de la valeur de la classe dans laquelle il a été le plus fréquemment attribué. Cette méthode est nommée « Most Frequent, MF » et permet de produire des cartographies annuelles indiquant les niveaux d'indices les plus fréquents pour chaque pixel sur une année. Elle a été réalisée grâce aux stacks d'images de séries temporelles. Les résultats sont présentés sur la Figure 24. Il est possible de visualiser des tendances et de repérer les endroits qui à l'échelle de la parcelle ont été les plus humides le plus souvent, ou au contraire relativement sec.

Comparer ces données avec les schémas des végétations cartographiées sur la parcelle est intéressant. Des patterns similaires sont observables, notamment au niveau de la présence d'eau sur le marais qui est clairement visible pour 2022 et 2023. Les espaces d'eau semblent plus épais que sur les cartographies des végétations, mais celles-ci ont été créés à partir d'images acquises plutôt au printemps ou en été, où les espaces d'eau liquide étaient sûrement amoindris. Dans ce cas, les zones les plus humides détectées pour 2022 et 2023 sont estimées sur toutes les séries temporelles de l'année. Pour le MF-NDMI, les premières années semblent présenter des végétations à tendance sèche, et la proportion de végétation humide semble augmenter au cours du temps. Il pourrait indiquer que des espèces végétales plus humides colonisent le milieu. L'étude des trajectoires des végétations et à leurs caractéristiques écologiques semblent donc pertinent.

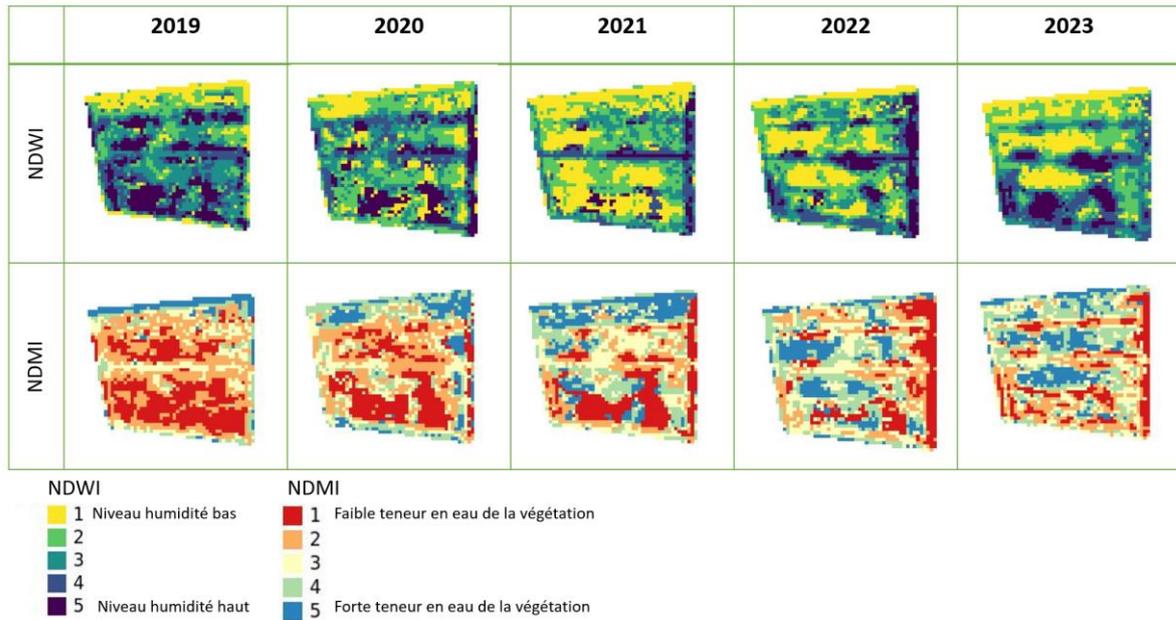


Figure 24 : Résultats pour l'indicateurs Most Frequent sur le NDVI et le NDMI.

4.1.3 Les changements et trajectoires de végétation

4.1.3.1 Cartographie des changements

Les cartographies des végétations réalisées, ainsi que l'inventaire des espèces présentes entre 2019 et 2023, permettent d'affirmer que des changements majeurs de végétations ont eu lieu sur la parcelle d'étude (Figure 25).

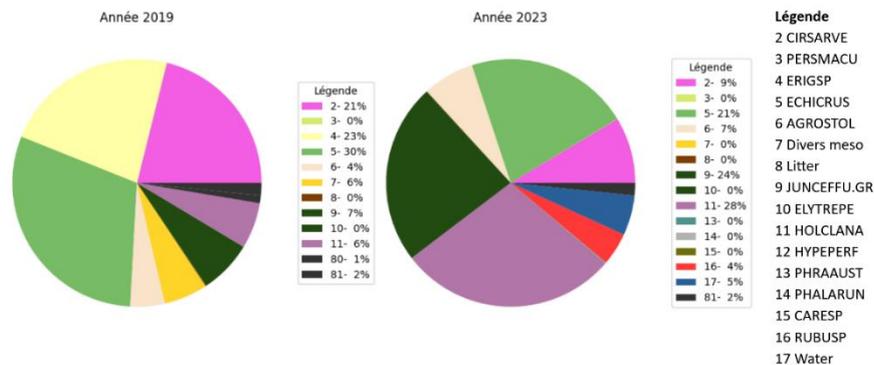


Figure 25 : Inventaire des surfaces de végétations cartographiées sur la zone d'étude du marais d'Olives pour 2019 et 2023.

La végétation majoritaire de l'année 2019 est ERIGSP avec un pourcentage de 30%, et est toujours présente en 2023 sur 21% de la zone d'étude. Cependant, la végétation majoritaire en 2023 est HOLCLANA à 28% présente. La classe ERIGSP, très présente en 2019 à hauteur de 23% de la surface, a totalement disparu en 2023. Les végétations majoritaires en 2023 étaient toutes déjà présentes en 2019. Il est possible que les classes « nouvelles » colonisent le milieu encore davantage dans les années suivantes.

Des cartographies des changements ont été produites entre chaque nouveau millésime, désignant par un code numérique le changement d'une classe vers une autre. Ces cartes ont été

réalisées selon la chaîne de traitement des stacks présentée précédemment. Les données sont ensuite cartographiées afin de visualiser la colonisation ou la disparition des végétations sur le milieu. La Figure 26 présente une des cartographies produites dans le cadre de l'étude, pour l'habitat codé HOLCLANA.

Le code HOLCLANA désigne la typologie « Végétation à houlque laineuse (*Holcus lanatus*) » (Annexe 3). On constate une forte colonisation du milieu par la houlque et une disparition localisée vers le côté nord ouest de la parcelle. Ces végétations se développent sur des sols à tendance acide et peuvent donc témoigner d'une zone humide à prairie hygrophile acide. Grâce à l'étude des trajectoires des végétations, il est possible de connaître les végétations précédant l'apparition de la houlque laineuse.

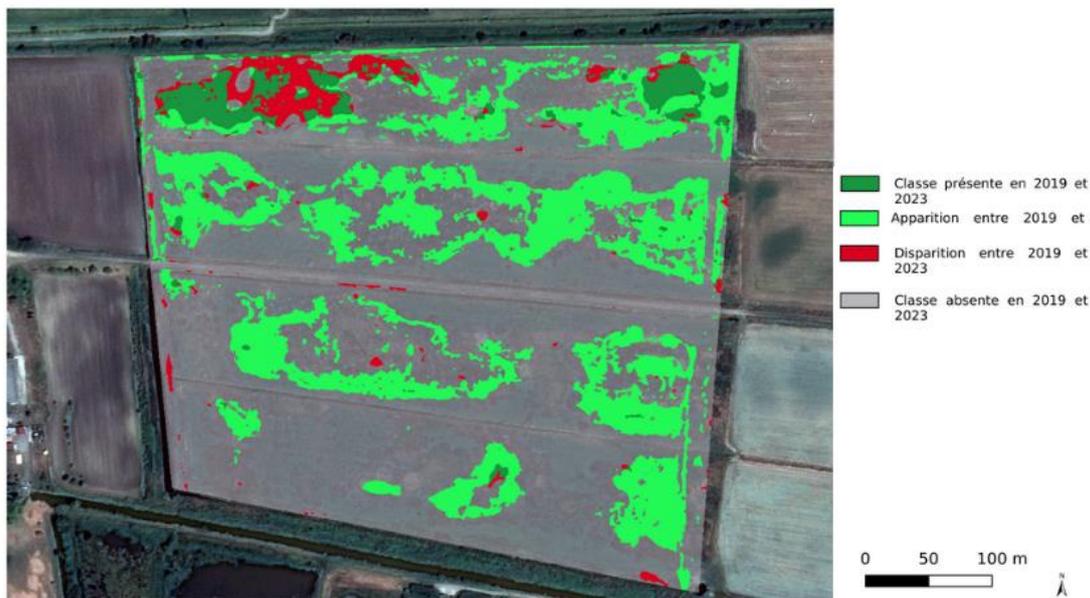


Figure 26 : Cartographie de l'évolution de la classe « HOLCLANA », Végétation à houlque laineuse (*Holcus lanatus*) entre 2019 et 2023.

La Figure 27 présente une vision globale des changements ayant eu lieu entre 2019 et 2023. La métrique en nombre de pixels permet de raisonner en termes de surface. Cette matrice est réalisée en prenant en compte uniquement la classe initiale d'un pixel en 2019 et la classe finale du pixel 2023. Par conséquent, le passage du pixel par des classes intermédiaires n'est pas visible. La somme des pixels permet d'identifier les flux les plus importants et ainsi les dynamiques majeures sur la zone d'étude pour la période considérée. Un flux important de pixels est observé en provenance de nombreuses classes vers la classe HOLCLANA (11) en 2023 (en lecture verticale) alors que cette classe était peu présente sur la zone en 2019 (lecture horizontale). Cette végétation a colonisé majoritairement les espaces autrefois occupés par CISAVE (2) et ERISGP (4). Ces codes représentent respectivement les végétations à cirse des champs (*Cirsium arvense*) et grande ortie (*Urtica dioica*), et les végétations à vergerettes (*Erigeron spp.*).

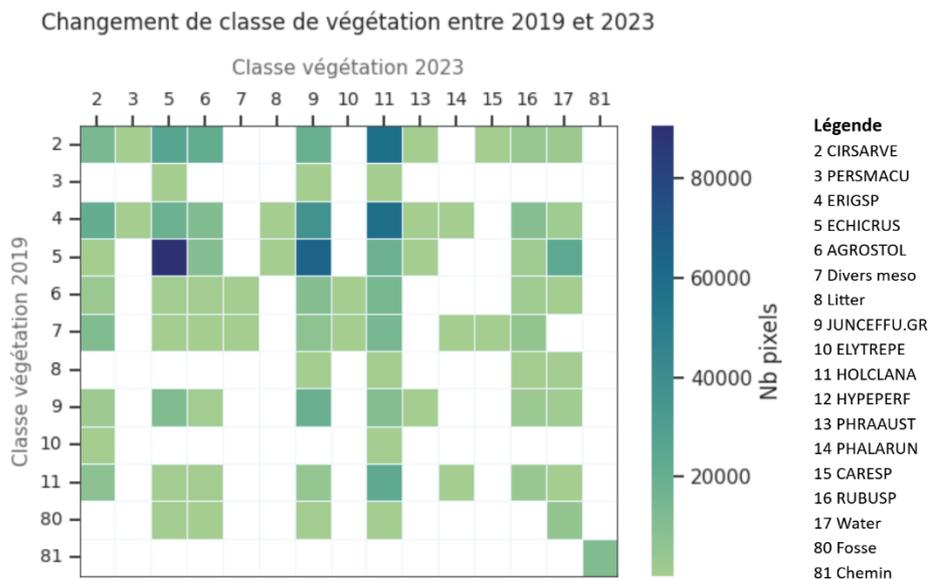


Figure 27 : Matrice des changements pour les habitats naturels sur le marais d'Olives entre 2019 et 2023.

Les conditions générales du milieu ont évolué et entraîné des changements majeurs dans l'inventaire des végétations en l'espace de 5 ans, allant jusqu'à l'apparition de certaines espèces (13, 14, 15, 16) ou leur disparition (4, 12) (Figure 27). La présence d'eau (17) est également à noter en 2023, témoignant de l'effet de la gestion hydraulique pour la restauration de la zone humide.

Grâce aux stacks d'images, il est également possible d'observer les successions de végétations au cours des années. L'intérêt se porte sur l'étude de la surface spatialisée d'une végétation en 2019 et sur la visualisation de l'évolution des classes des pixels sur les années suivantes. Ainsi, tous les habitats ayant succédé ou précédés à une végétation peuvent être représentés (Figure 28).

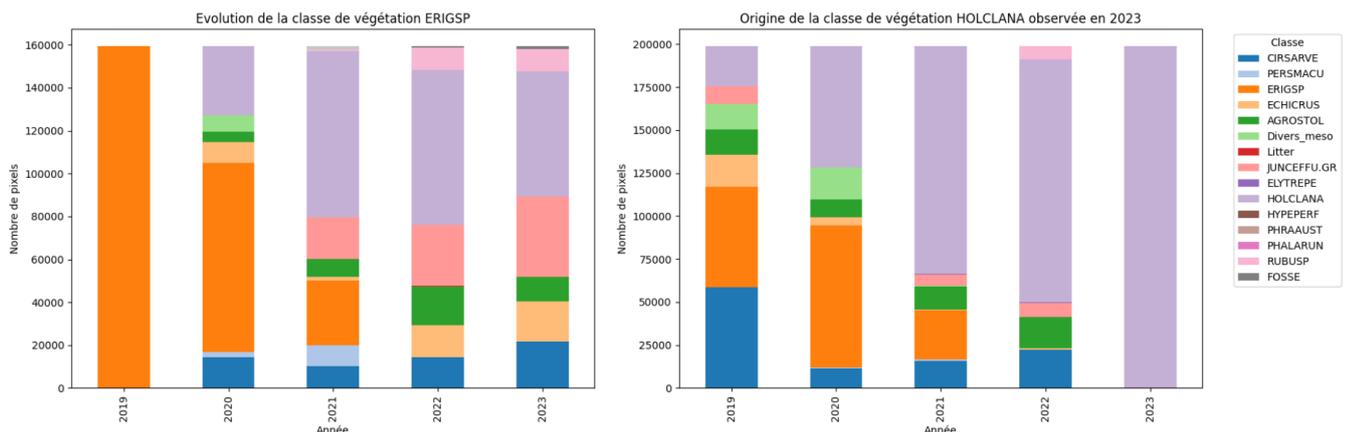


Figure 28 : Représentation des successions des classes de végétations sur le marais d'Olives de 2019 à 2023, focus sur l'évolution de la classe de végétation ERIGSP. Observée en 2019 (gauche), et l'origine de la classe de végétation HOLCLANA observée en 2023.

Le graphique présente les végétations ayant succédé à la classe ERIGSP, ainsi que les végétations à l'origine de la classe HOLCLANA. La visualisation des habitats succédant à la classe de végétation ERIGSP est intéressante car celle-ci a totalement disparue de la zone

d'étude en 2023 selon les analyses précédentes. D'après ce graphique, elle semble disparaître dès 2022 pour être remplacée majoritairement par HOLCLANA, (la végétation ayant le plus de surface en 2023, représentée sur le graphique de droite). La classe de végétation HOLCLANA diminue tout de même au profit de JUNCEFFU.GR dont la surface a fortement augmenté au cours des 5 années. Cette végétation pourrait coloniser encore davantage le milieu.

Ces graphiques permettent de visualiser des trajectoires écologiques, des données très informatives pour les phytosociologues étudiant les successions des végétations. Pour le marais d'Olives, il s'agit de successions écologiques suite à la perturbation du milieu induites par les mesures de restauration du système hydraulique sur la zone. L'étude de la succession des végétations constitue ainsi un bon indicateur de l'effet des mesures. La vision globale des flux ayant eu lieu sur la zone a également été représentée sur un diagramme de Sankey (Figure 29). Ce type de diagramme permet de représenter des flux, à travers différentes étapes, dans ce cas, des flux de pixels et des années. La figure étant complexe à appréhender, un seuil a été fixé pour ne représenter que les flux supérieurs 1000 pixels. Ce graphique est le bilan de l'analyse des données et nécessite un œil expert pour une compréhension optimale. Les outils présentés précédemment permettent des analyses plus ciblées et d'observer directement des trajectoires d'intérêt. Cependant des tendances observées précédemment ressortent de ce graphique, notamment la colonisation du milieu par HOLCLANA puis sa diminution en 2023, avec l'apparition de nouvelles espèces telles que la végétation codée RUBUSP à partir de 2022.

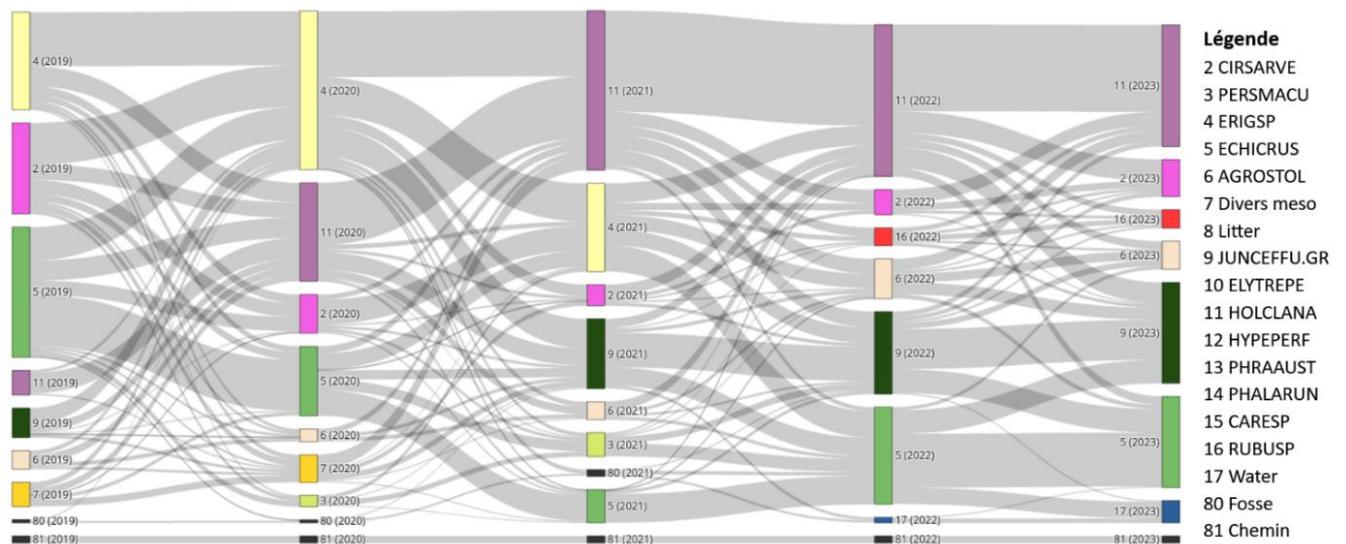


Figure 29 : Diagramme de Sankey pour la visualisation globale des successions de végétation avec un seuil à 1000 pixels

4.1.4 Synthèse sur les résultats

Les chaînes de traitement mises en place permettent d'observer les changements au niveau des trajectoires de végétation et d'humidité (NDWI et NDMI) et ainsi d'observer les effets de la restauration sur la zone d'étude. L'étude des trajectoires de végétations permet de suivre les dynamiques écologiques en cours sur le marais, à la fois spatialement et temporellement. Les données produites peuvent être des indicateurs des fonctions d'habitats et d'hydrologie de la zone humide, grâce à une expertise botanique et biologique.

4.2 Résultats dans le cadre du projet CAFEZH

4.2.1 Cartographie de prédiction des habitats naturels

4.2.1.1 *Adaptation de la stratégie de classification à l'échelle régionale*

La classification a été réalisée avec le protocole Biocoast suivant les processus et traitements expliqués précédemment. Cependant, la surface cartographiée de 238 km² est près de 1367 fois plus grande que la zone d'étude du marais d'Olives. Pour pallier cet enjeu la typologie a été adaptée afin de pouvoir décrire des grandes surfaces de végétations. La typologie est hiérarchisée entre classe, ordre et alliance. A partir de la cartographie des habitats au niveau classe, des masques ont été créés pour chaque classe afin de prédire les ordres au sein de celles-ci selon la méthodologie décrite sur la Figure 30.

Cette méthodologie permet, en cas d'erreur du classifieur, de ne pas prédire des ordres à l'extérieur des classes auxquelles ils n'appartiennent pas. Ainsi, les cartes livrées restent cohérentes. Comme le processus est très répétitif, l'extraction des classes pour la création des masques et les étapes pour la sélection des ordres à retirer de la prédiction ont été automatisés. Le niveau alliance n'a pas été cartographié à cause d'un nombre d'échantillons trop peu représentatif. En effet, plus la hiérarchie se complexifie, plus les échantillons sont redivisés, créant parfois des groupes d'effectif trop faible.

Une autre spécificité de cette classification est l'ajout de variables écologiques dans le stack d'images grâce à une couche Lidar fournie sur la zone d'étude :

- La distance à la mer
- La distance à la Seine
- Le dénivelé au cours d'eau
- La hauteur de canopée
- Topographic Wetness Index (TWI) : l'indice topographique d'humidité, modélisation d'estimation des zones d'accumulation de l'eau (BEVEN and KIRKBY, 1979)
- Le nombre de retour Lidar
- Multi-Scale Topographic Index (MSTI) : consiste à capturer la variabilité de la topographie à différentes échelles spatiales, ce qui peut offrir une représentation plus précise des flux d'eau et des zones potentiellement humides dans un paysage (Sørensen, Zinko and Seibert, 2006)
- Vertical Channel Network Index (VCNI) : caractérise la densité et la structure verticale du réseau de drainage dans un paysage

Ces variables écologiques, fournies par un partenaire du projet à i-Sea, sont utilisées pour l'entraînement des modèles et la prédiction cartographique. L'implémentation de ces variables issues du Lidar permettent d'alimenter le modèle avec une dimension hydrologique. Les végétations sont dépendantes des conditions topographiques et hydrologiques de la zone humides, l'ajout de ces valeurs au sein du modèle est donc cohérent et permet d'améliorer le classifieur.

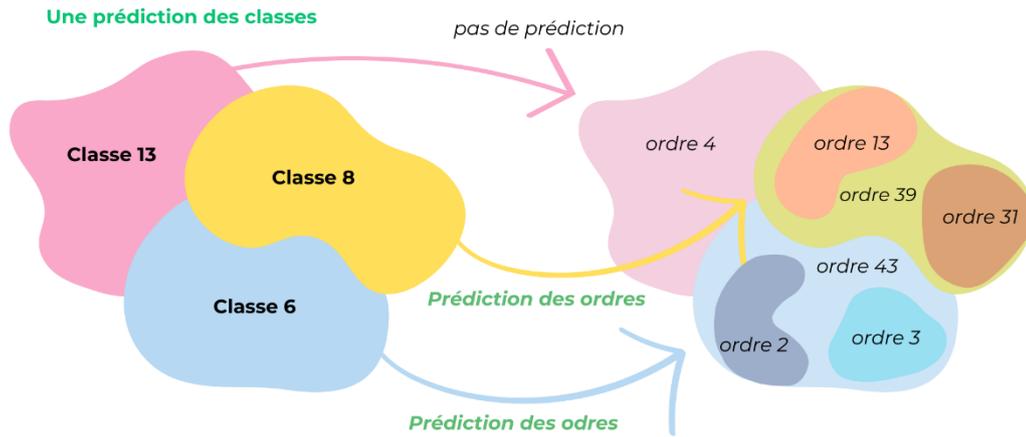


Figure 30 : Méthodologie de classification hiérarchique pour la production de la cartographie au niveau de l'ordre.

4.2.1.2 Résultats de la cartographie des végétations

4.2.2 Etude des valeurs d'Ellenberg

Pour donner suite à la cartographie des végétations (Annexe 4 et 5), l'humidité et la trophie, deux paramètres écologiques majeurs de la zone humide, ont été cartographiés selon la méthode des valeurs d'Ellenberg (Perrin, 2023). Les résultats présentés sont visibles sur une sous-zone du site d'étude, dans la Réserve Naturelle Nationale (RNN) de l'estuaire de la Seine. La Figure 31 présente les résultats pour l'humidité. Selon la littérature, les zones humides présentent une végétation dont l'indice d'humidité est supérieur à 5,7 (Perrin *et al.*, 2023). Or, la carte indique des ordres à tendance sèche non considérés comme de la zone humide, ce qui paraît incohérent. En ce qui concerne les valeurs de trophie sur la Figure 32, il semble que cette partie de la RNN présente des conditions fertiles à très fertiles, avec aucun risque de trop forte concentration en nitrate. Aucune donnée annexe n'est disponible pour confirmer ou infirmer cet indicateur.

La donnée est à lire avec précaution car elle est basée sur la carte des ordres de végétation. Si une erreur de prédiction a été commise, elle est répercutée sur la spatialisation des indices d'Ellenberg. Par ailleurs, des doutes sont émis sur la méthode. Les regroupements des alliances au sein des ordres a possiblement créé des groupes trop hétérogènes. Une étude supplémentaire a servi à l'analyse des regroupements des alliances au sein des ordres (Annexe 6). Les résultats indiquent que les valeurs regroupées ont de très forts écarts types jusqu'à des valeurs extrêmes. Certains ordres sont représentés par très peu de données terrain. Les groupes au niveau ordre ne sont donc pas homogènes pour une grandeur d'Ellenberg donnée.

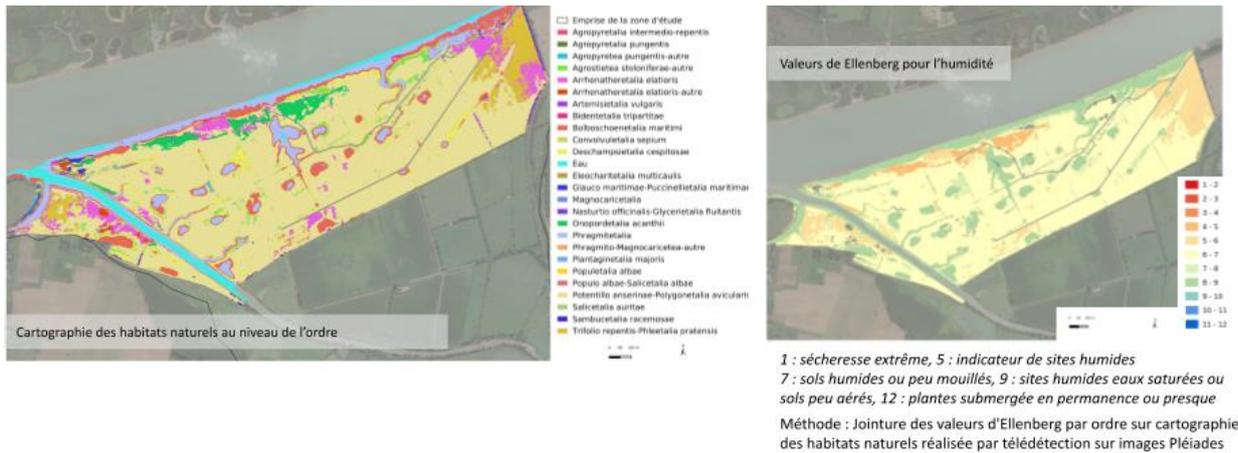


Figure 31 : Cartographie des valeurs de Ellenberg pour la spatialisation de l'humidité basée sur la cartographie des végétations au niveau ordre réalisée par télédétection.

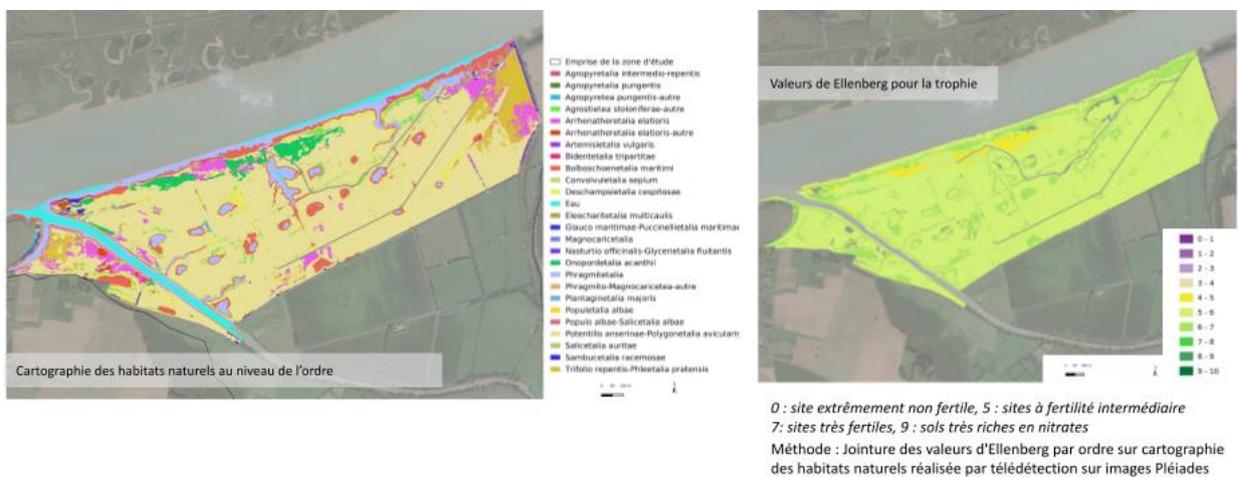


Figure 32 : Cartographie des valeurs de Ellenberg pour la spatialisation de la trophie basée sur la cartographie des végétations au niveau ordre réalisée par télédétection.

4.2.3 Etude de la productivité primaire

4.2.3.1 L'indice NDVI-I

La Figure 33 présente la cartographie de l'indice de productivité primaire NDVI-I. Celle-ci a été produite sur une série temporelle d'images Sentinel-2, selon la chaîne de traitement des stacks d'images. Les valeurs de NDVI-I sont ensuite triées selon 5 niveaux de productivité grâce à une répartition par quantile. Cette carte permet une zonation des endroits les plus productifs au niveau de la végétation. Les résultats obtenus ne suivent pas le découpage des classes des habitats naturels visibles sur les figures précédentes. Cet indicateur de productivité semble être influencé par d'autres métriques que seulement la végétation. Une superposition avec les données de trophie (après vérification) issue des valeurs d'Ellenberg serait intéressant pour un repérage des aires à forte productivité et forte fertilité. Ces aires pourraient être des zones à fort potentiel carbone. Au contraire, une zone sans productivité ou fertilité, pourrait être intéressante à étudier dans le cadre des fonctions de dénitrification, processus exécuté en condition anaérobie.

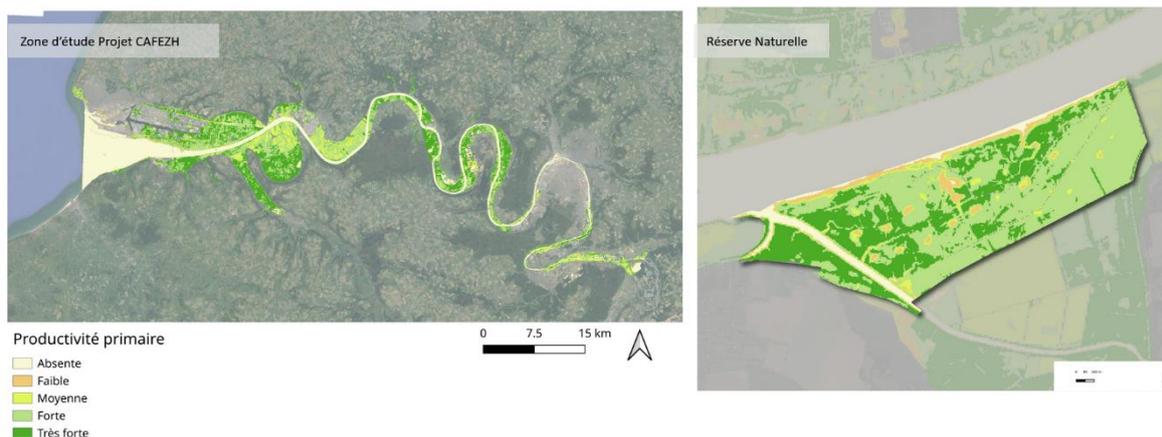


Figure 33 : Cartographie de l'indice de productivité primaire NDVI-I sur la zone humide de l'estuaire de la Seine.

4.2.3.2 L'indice MMAX

Les trajectoires de NDVI permettent de calculer un indice MMAX qui consiste à observer le pic de productivité au sein de la trajectoire temporelle (Figure 34). Cet indice de saisonnalité des flux de production peut être intéressant à intégrer dans des modèles concernant les processus écologiques.

Les productions cartographiques pour les années 2022 (à gauche) et 2023 (à droite) ont été réalisées sur des acquisitions durant des périodes similaires d'une année à l'autre. Les images sans nuages et communes (par mois) entre les années ne permettent pas de représenter tous les pics possibles et la donnée produite est donc spécifique à la série temporelle utilisée. Entre les deux années, les valeurs de NDVI maximums sur les pixels ne sont pas observées à la même période. Cela indique la présence d'une saisonnalité à prendre en compte, dépendante des habitats et des climats annuels. Les pics de NDVI peuvent être naturels selon un cycle phénologique saisonnier, ou influencés par un mode de gestion anthropique, impactant la production de biomasse annuelle.

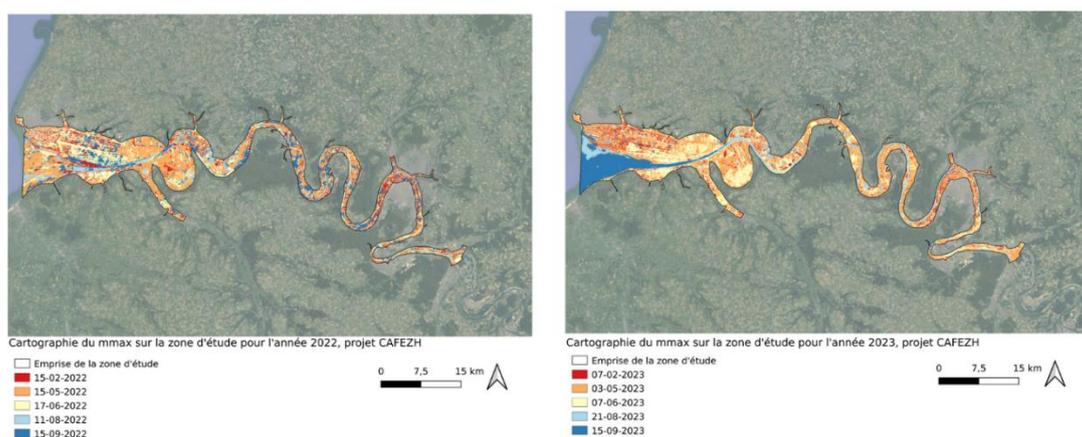


Figure 34 : Cartographie de l'indice de productivité primaire MMAX sur la zone humide de l'estuaire de la Seine.

4.2.3.3 Influence des modes de gestion sur la productivité primaire

Les prairies de la zone humide sont soumises à des modes de gestion influant sur la production de biomasse. Le pâturage ou la fauche induisent une diminution soudaine du NDVI

passant d'une forte biomasse à un sol presque nu. Pour cette étude, un masque de polygones de prairies a été créé à partir du Registre Parcellaire Graphique de l'IGN (accès libre) et une série temporelle d'images Sentinel-2. Pour chaque polygone de prairie, les pixels superposés sont moyennés pour obtenir la moyenne et l'écart type de l'indice NDVI pour chaque image de la série temporelle. La différence de valeur de NDVI pour un polygone de prairie, d'une date à l'autre, est utilisée comme indicateur d'une activité de fauche ou de pâture sur la parcelle. L'image à date d-1 est soustraite à l'image à la date d. Un seuil à -0,2 a été fixé empiriquement pour la détection d'un changement important du taux de biomasse sur la parcelle.

La Figure 35 les cartographies des activités de biomasses sur les prairies pour une série temporelle de 5 images en 2022. Les parcelles en rouge ont franchi le seuil indiqué et témoignent d'une perte de biomasse depuis la date d'observation précédente. Ainsi, cette étude montre les dynamiques de la biomasse à l'échelle de la zone estuarienne-aval de la Seine et l'influence du mode de gestion. La dimension temporelle est capitale lors de l'étude de la zone humide, afin d'appréhender ce type de dynamique. De plus, les conséquences des modes de gestions sont des données à prendre en compte lors de l'étude des fonctions écologiques des zones humides. Le pâturage, par la présence des animaux, influe sur le cycle des nitrates et peut également avoir un impact sur les sols et leur dégradation lorsqu'il est réalisé à trop haute fréquence. Les pratiques agricoles intensives peuvent également amenuiser la biodiversité.

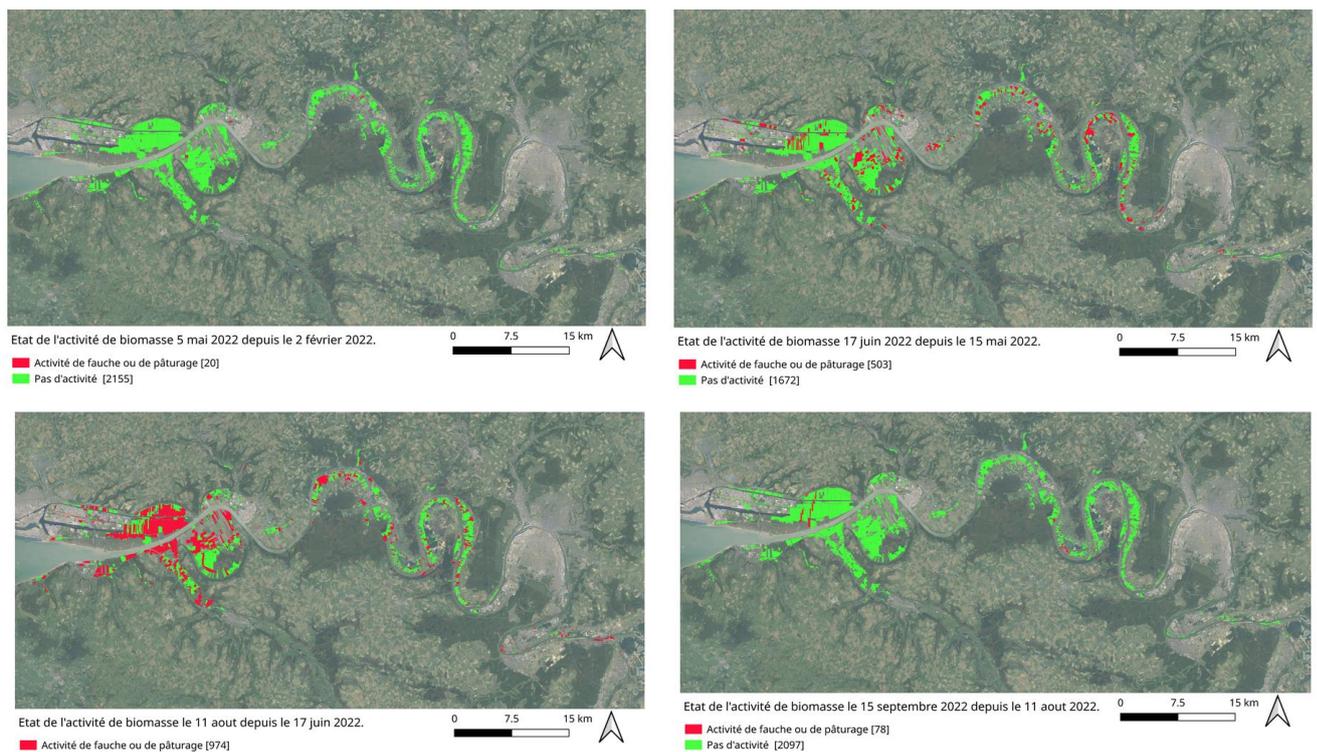


Figure 35 : Cartographie de l'activité de biomasse pour détection de la fauche et du pâturage sur les prairies de la zone estuarienne de la Seine pour 4 moments de l'année.

4.2.4 Synthèse sur les résultats

La stratégie de prédiction hiérarchique est cohérente avec les principes de la phytosociologie. Cependant, l'échantillonnage doit être prévu en fonction des niveaux de végétation à atteindre et garantir un nombre d'échantillons corrects pour tous les niveaux hiérarchiques. La définition d'une typologie adaptée à l'échelle spatiale pour la classification

des végétations s'est révélée très important. Les produits dérivés des trajectoires temporelles de l'indice NDVI permettent d'identifier les zones à forte productivité (fort potentiel carbone) ainsi que des interventions anthropiques. Ces produits constituent des données d'entrées pertinentes pour l'appréhension des fonctions écologiques de la zone humide. Des réserves sont émises concernant les valeurs d'Ellenberg, face à quelques incohérences relevées. Une vérification auprès des experts phytosociologues et les gestionnaires terrain est nécessaire afin de garantir la pertinence de cette donnée à l'échelle de l'ordre de végétation.

4.3 Résultats préliminaires sur le projet ESA Coastal Blue Carbon

4.3.1 Un algorithme k-Means pour la préparation de la stratégie d'échantillonnage

Dans le cas du projet Blue Carbon, l'un des enjeux est la classification des habitats naturels à échelle globale. La perception des objets est affectée par l'utilisation d'images Sentinel-2, ayant une résolution spatiale plus grossière que les capteurs SPOT ou Pléiades utilisés précédemment.

Un test à l'aide d'un algorithme k-Means a servi à visualiser les classifications possibles sur un stack d'images d'une série temporelle Sentinel-2. Le test a été réalisé sur la RNN des prés salés d'Arès. La zone d'étude étant connue d'i-Sea, elle a été choisie afin de constater quels habitats étaient distinguables par cette méthode. La Figure 36 présente les images acquises le 30 septembre 2023 par Pléiades (A) et Sentinel-2 (B). L'image Pléiades a des pixels de 2x2m de résolution spatiale, contre des pixels de 10x10m pour Sentinel-2. La taille minimale des objets visibles est donc très différente entre les deux images, induisant une classification plus grossière sur Sentinel-2 et une potentielle perte d'information. L'estimation de cette perte est l'un des enjeux de la campagne terrain menée lors du module TIC. La classification non supervisée (C) a été réalisée à partir d'une série temporelle Sentinel-2 sur l'année 2023, avec des images acquises à marée basse. Le k-Means a été paramétré pour créer 15 classes. Une ancienne cartographie des habitats naturels datant de 2017 produite sur la RNN des Prés Salés d'Arès a été modifiée pour changer la typologie en regroupant les végétations selon leur ceinture d'habitats. Cela a permis de créer une carte (non validée) des ceintures de prés salés sur la zone d'étude en 2017 (B). Cette carte sert de référence pour l'interprétation du k-Means.

Le contour du pré salé (totalité des ceintures) est visible, démontrant un intérêt de la méthode pour la cartographie des enveloppes des prés salés. Les milieux fortement contrastés tels que les chenaux ou les tonnes de chasses ressortent dans des classes séparées. Au sein du pré salé, des strates sont visibles, notamment ce qui semble être la partie vaseuse nommée slikke apparaissant en jaune. Une augmentation du nombre de classes pourrait permettre de segmenter d'autant plus le milieu et de révéler les autres ceintures. L'ajout d'une image radar dans le stack de la série temporelle peut permettre la discrimination de ceintures plus fines comme le bas schorre, grâce à la sensibilité du radar aux milieux humides. Le changement de résolution est un point limitant dans les milieux où les objets à distinguer sont spatialement peu étendus et non distinguables au sein des pixels Sentinel-2, ce qui est possible dans le cas du bas schorre pour la Réserve des prés salés d'Arès.

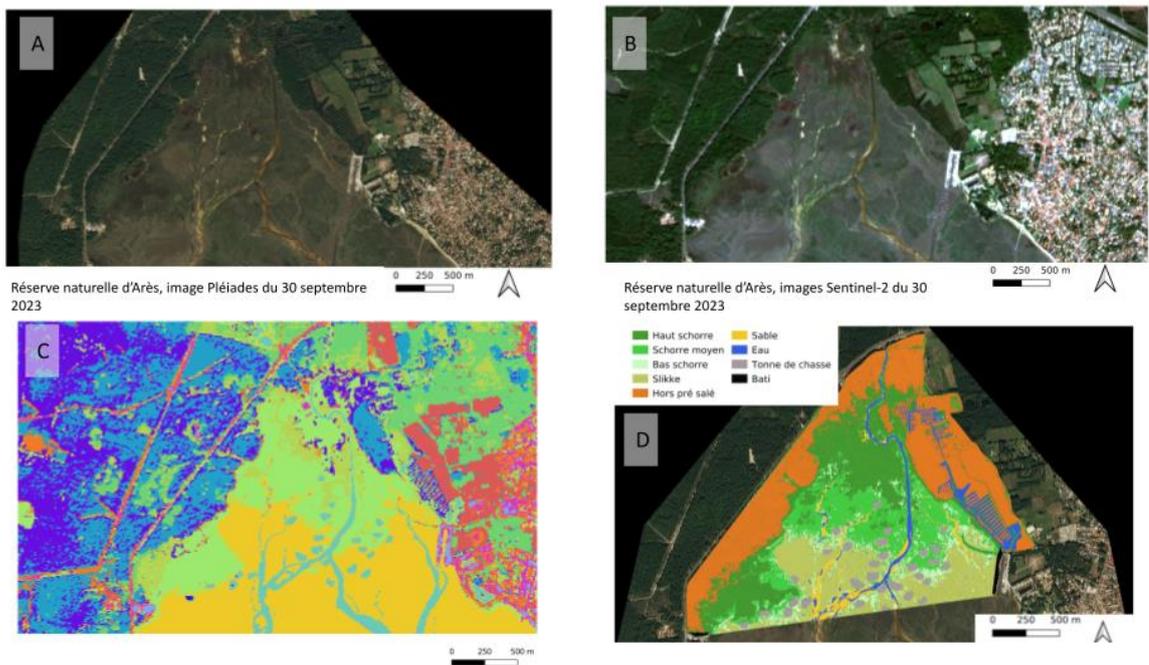


Figure 36 : Différentes sources de données pour la cartographie des prés salés d'Arès (A, B, C) et résultats de la classification *k-Means* sur une série temporelle Sentinel-2 pour la distinction des enveloppes de prés salés (D).

Malgré le changement de résolution entre les deux cartographies, l'expérience apporte des résultats satisfaisants sur la distinction de l'enveloppe générale des prés salés et de certaines ceintures. Cette technique peut être explorée dans le cas de la préparation d'un échantillonnage terrain de manière à repérer les changements visibles au sein de l'information satellite, avant tout ajout de données terrain.

4.3.2 Retours sur la campagne terrain

La campagne terrain menée sur la Réserve des Prés Salés d'Arès a permis l'acquisition de 189 points dont 41 points avec des mesures de biomasses sèches. Les points collectés sont présentés sur la Figure 37. Le nombre de points n'est pas homogène entre les classes, cela est dû aux trajets choisis en amont et à la difficulté d'accès à certaines zones, notamment dans la slikke. La confrontation avec la réalité terrain a permis une première appréhension des limites et difficultés à prendre en compte lors de l'élaboration des futurs protocoles.

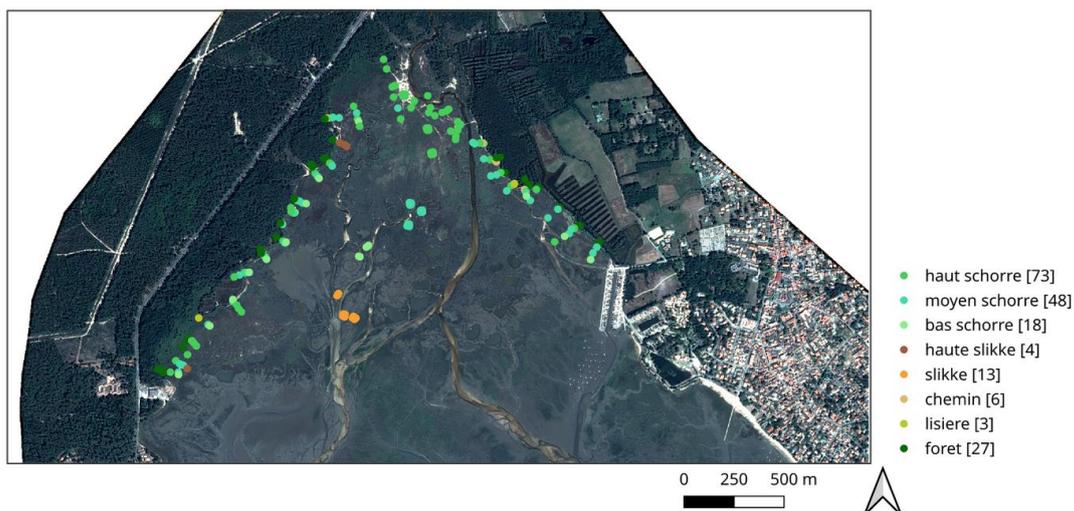


Figure 37 : Points terrains collectés lors de la campagne terrain de juin 2024 sur la Réserve Naturelle des prés salés d'Arès.

La structure de la zone humide et sa praticabilité ont constitué une première contrainte, de même que le temps alloué au terrain pour respecter les horaires de marée. La stratégie d'échantillonnage pour la biomasse est basée sur des points repérés en amont ce qui constitue deux limites :

- Une limite pratique, due à l'accès difficile de certains points.
- Une limite d'échantillonnage, due à la prise de quadrats sur des « trous » sans végétation. Ces points sont représentatifs du terrain sur 30x30cm mais pas systématiquement cohérent avec l'information spectrale recueillie ensuite.

Ainsi, la stratégie proposée est encore à améliorer avec ces nouveaux éléments mais constitue une base solide de réflexion pour la suite des travaux.

4.3.3 Perspectives pour la base de données

La base de données produite s'inscrit dans le cadre du projet Coastal Blue Carbon. La campagne terrain réalisée constitue un premier essai pour la mise en place d'une méthodologie à échelle globale. Le pôle biodiversité a exploité ces données pour la réalisation d'un Minimum Viable Product (MVP) et réalisé une première cartographie des stocks de carbone de la biomasse aérienne.

L'objectif du MVP est le déroulement d'une méthodologie depuis le téléchargement des images et le traitement des données terrains jusqu'à une cartographie finale. Celui-ci s'appuie sur la cartographie réalisée pour le projet Coastal Blue Carbon et pour ce mémoire. L'enjeu est de repérer les outils existant chez i-Sea et ceux à développer dans le cadre du projet Coastal Blue Carbon. Ce premier MVP a amené de nombreuses questions sur les liens entre biomasse et carbone, en attente de réponses de la part des experts du consortium. Ces connaissances biologiques et écologiques sont capitales afin de mieux appréhender les données de télédétection.

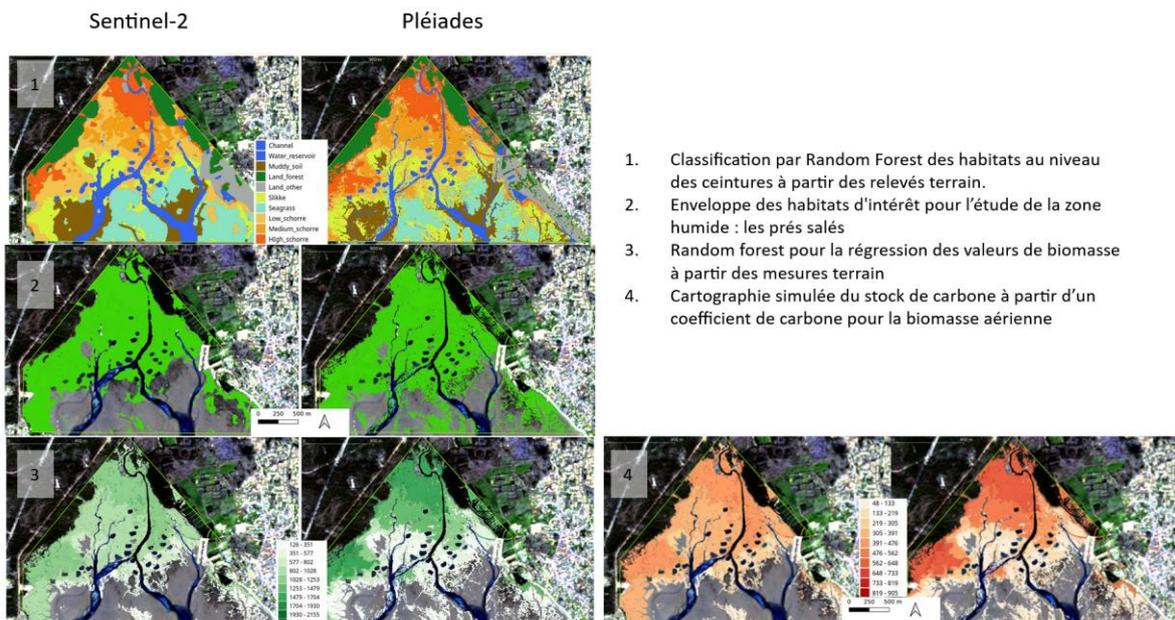


Figure 38 : Extrait des étapes suivies lors du déroulement du Minimum Viable Product (MVP).

4.3.4 Synthèse sur les résultats

Le travail effectué pour le projet Coastal Blue Carbon a permis d’appréhender la partie terrain de la télédétection pour les zones humides. La réalisation de relevés quantitatifs adaptés est complexe, tant au niveau pratique que méthodologique. Le protocole a été appliqué avec succès et a permis un apport de données de biomasse sèche. Ces données seront à étudier pour le pôle biodiversité dans le cadre d’un MVP vers une méthodologie pour la cartographie des stocks de carbone.

4.4 Discussion sur la méthode et les résultats dans le cadre de l’étude des végétations et des fonctions écologiques des zones humides par télédétection

Les objectifs fixés pour la description des zones humides du marais d’Olives, de la zone estuarienne de la Seine et de la Réserve Naturelle d’Arès, selon les attendus des projets, ont été atteints par la production de données écologiques (habitats, productivité, humidité, données terrain). Le travail sur le carbone pour le projet CAFEZH, constituant la phase finale de travail, n’a pas été réalisé en raison de certaines contraintes de calendrier imposées par les partenaires. Une phase de vérification, validation des composantes produites et d’échange avec les gestionnaires locaux est en cours de réalisation avec i-Sea et le client. Le projet doit se terminer en janvier 2025.

Les résultats obtenus sont à mettre en perspective afin d’évaluer l’intérêt des méthodologies utilisées pour l’étude des végétations et des fonctions écologiques des zones humides. La classification des végétations par Random Forest est un procédé bien connu d’i-Sea, perfectionné au cours des années selon un modèle de gestion de projet performant (campagnes terrain, échanges dynamiques avec les experts, etc.). Le travail effectué est une preuve de la qualité de la chaîne de traitement (projet Olives, bons retours du client sur la production) mais émet des questionnements sur la pertinence du procédé dans le cas d’une réalisation à échelle régionale (CAFEZH) ou globale (Coastal Blue Carbon). La qualité de la campagne terrain et la typologie choisie sont des vecteurs de réussite essentiels. Les Random Forest sont des méthodes

très performantes et leur utilisation est cohérente. Cependant, l'implémentation d'autres algorithmes cités dans la littérature peut constituer un levier de recherche supplémentaire à explorer, notamment dans le cas de projets tels que Coastal Blue Carbon, qui nécessite de la modélisation de données quantitatives.

Par ailleurs, la modélisation quantitative soulève des questions en termes d'échantillonnage terrain. Dans le cas de la cartographie de la biomasse, il est nécessaire de pouvoir généraliser la biomasse à une unité typologique visible afin que les modélisations soient cohérentes. Plutôt que d'échantillonner des pixels, la méthodologie terrain peut être organisée selon des classes de données pour des cartographies à plusieurs niveaux de lecture. Par exemple, un échantillonnage sur les prés salés pourrait permettre de déterminer la biomasse moyenne par ceinture pour réaliser une cartographie de biomasse à cette échelle. Dans le cas de l'utilisation de proxy, un travail étroit est attendu avec les spécialistes du terrain afin de produire une donnée de bonne qualité et de garantir le bon niveau hiérarchique pour la modélisation et la cartographie finale. [OBJ]

Les trajectoires de végétations étudiées à partir des classifications démontrent l'intérêt de la télédétection pour le suivi des zones humides. Leur étude, appliquée à la phytosociologie, permet l'apport de données sur les processus écologiques et climatiques auxquels la zone d'étude est soumise. L'ajout de données issues de Digital Elevation Model (DEM) et Canopy Height Model (CHM) est intéressant pour montrer les changements structuraux des zones humides et peuvent être complémentaires aux études menées sur les végétations (Rummell *et al.*, 2022). L'étude des trajectoires des indices radiométriques semble pertinente pour la description de processus dynamiques. Le téléchargement des images Sentinel-2 est en libre accès, rendant l'utilisation et l'exploitation de ces images aisément réalisable. Ce paramètre permet de créer des chaînes de traitement en partie autonomes pour la visualisation et l'exploitation des trajectoires. Le tri manuel des images reste une étape très chronophage (le nombre d'images non exploitables reste considérable). Dans certains cas, un téléchargement manuel est plus pertinent, à moins de mieux maîtriser le filtre de couverture nuageuse ainsi que l'heure des marées.

Les images S2 sont intéressantes pour les études à échelle globale, et permettent d'extraire des grandes tendances. De nombreuses données traduisant des dynamiques spatio-temporelles peuvent être étudiées ajoutées dans les modèles, ou servir à produire des indicateurs des fonctions écologiques. L'étude du mode de gestion des prairies a illustré l'impact anthropique sur la productivité de biomasse pour les prairies de l'estuaire de la Seine (CAFEZH). Les images Sentinel-2 permettent de capter des grandes tendances pour la végétation ou les climats d'humidité. Le cas du projet Olives soulève la question de l'échelle de la zone d'étude pour l'étude des trajectoires temporelles sur S2. Dans un premier temps, la surface du marais est de 17ha, ce qui représente environ 1700 pixels S2, l'étude de ces pixels pose alors la question d'une surface minimale représentative d'une dynamique, voire de la représentativité d'un pixel isolé pour une trajectoire temporelle. Dans un second temps, une étude comparative avec d'autres zones d'étude spatialement proche du marais pourrait confirmer que les trajectoires observées sont spécifiques à la zone humide d'Olives (et à la restauration) et que ce n'est pas une tendance générale.

Les indices radiométriques utilisés semblent pertinents et sont largement étudiés dans la littérature. Le NDVI-I notamment, paraît être un indicateur pertinent pour relever la production

de biomasse. Une réflexion autour de la normalisation des valeurs pour une comparaison inter-annuelle peut être intéressante. Leur étude par la méthode du MF, pourrait être améliorée en imposant des centroïdes des k-Means. Cela prendrait en compte des trajectoires temporelles plus larges.

Le cas des valeurs d'Ellenberg est complexe, cette méthode a été utilisée à grande échelle et est présentée comme une démarche "simple et robuste" (Perrin *et al.*, 2023). Les résultats obtenus sur l'estuaire de la Seine sont en attente de validation par les gestionnaires locaux afin de conclure sur leur apport dans le cas de ce projet. Cette méthode paraît pertinente pour les études en phytosociologie et de nombreuses recherches sont menées à l'échelle européenne pour l'amélioration de la fiabilité des indicateurs d'Ellenberg. Des adaptations pour la spatialisation des indices sont nécessaires, en particulier concernant le changement d'échelle spatiale et typologique.

Les études menées constituent une première approche vers la quantification et la description des fonctions écologiques des zones humides en utilisant des méthodes et outils issus de la télédétection. La principale limite de ce travail, et de la télédétection en général, se trouve dans la validation et l'estimation de la précision de la carte finale. La pertinence des indicateurs produits peut être estimée à l'aide de relevés terrain réalisés à posteriori de la cartographie, vérifiant les gradients ou grandeurs obtenues sur les zones humides étudiées. Cette partie n'est pas abordée dans ce mémoire mais est néanmoins capitale en vue de la production de données à usage de gestion environnementale locale et globale. Les précisions accessibles sont celles des modèles de prédiction, elles peuvent expliquer les confusions du classifieur dans le cas d'une cartographie des habitats, mais ne sont en aucun cas représentatives de la véracité de la carte. Des stratégies de validation peuvent être réfléchies mais elles sont dépendantes des moyens mis en œuvre dans les projets et par les clients. Une campagne de terrain pour la validation d'une carte est rarement envisagée par manque de moyen. La validation peut être effectuée « à dire d'experts » grâce à la vision des phytosociologues et des gestionnaires qui ont des fortes connaissances terrain.

Le travail effectué présente des méthodes opérationnelles pour le traitement et la représentation des données spatiales et temporelles. L'objectif principal est d'ouvrir la discussion scientifique entre les gestionnaires, les experts phytosociologues et l'entreprise. Les retours lors des réunions clients sont précieux pour l'entreprise. Ils permettent une amélioration constante des chaînes de traitements et de la R&D conduite par le pôle biodiversité pour la caractérisation, la cartographie et le suivi des végétations des zones humides et de leurs fonctions écologiques.

Conclusion

Ce mémoire s'inscrit dans les défis actuels de la télédétection appliquée à l'observation des zones humides, tout en répondant aux besoins de l'entreprise i-Sea pour satisfaire les attentes des gestionnaires de l'environnement. La caractérisation des végétations par télédétection a été réalisée avec succès pour les projets CAFEZH et Olives grâce aux techniques de classification par Random Forest selon la solution Biocoast. L'étude de séries temporelles issues de différents capteurs a permis d'obtenir i) des données sur les trajectoires de végétations et ii) des indicateurs des dynamiques écologiques des zones humides. Un focus a été fait sur les notions d'habitats, de productivité, d'humidité. L'étude a également montré l'intérêt de l'utilisation des images Sentinel-2 pour le développement de chaînes de traitement automatisées et la production d'indices représentant des dynamiques spatio-temporelles. Le début du projet Coastal Blue Carbon a amené beaucoup de questionnement sur la spatialisation quantitative d'une fonction écologique. Le travail réalisé, sur les parties terrain et sur les projets transverses est un apport sur la construction de la méthodologie et la compréhension des processus.

Ainsi, ce mémoire apporte des premières clés pour l'étude des fonctions écologiques des zones humides et montre l'intérêt de la télédétection pour répondre aux enjeux de protection de ces écosystèmes. Les résultats et workflow développés seront intégrés au travail du pôle biodiversité et constituent une base de travail importante pour la suite des réflexions de l'entreprise. Les projets mentionnés ont débuté avant le cycle d'alternance et se poursuivent après cette période. Certains résultats sont intermédiaires et constituent des éléments de recherches voués à être améliorés grâce aux apports des différents partenaires scientifiques et techniques. Des questions évoquées dans ce mémoire restent en suspens pour le moment car elles sont survenues avec l'avancées des résultats et font partie intégrante du processus de recherche et développement. Ce mémoire, tant dans les réponses qu'il apporte que les questions qu'il soulève, s'inscrit directement dans des réflexions actuelles et internationales sur l'usage de la télédétection pour l'étude des zones humides, de la biomasse.

A titre personnel, le travail réalisé durant l'année d'alternance m'a apporté une vision globale des enjeux de télédétection pour l'environnement. Mon poste au sein du pôle biodiversité a été polyvalent entre la production, la R&D, les réunions clients et même ma participation en tant qu'auditrice à un séminaire scientifique dans le cadre du projet CAFEZH. Mon travail transverse entre les projets du pôle m'a permis de me confronter à différentes problématiques sur les zones humides et d'étayer mes connaissances sur des écosystèmes divers et leurs dynamiques. J'ai particulièrement aimé les moments consacrés aux retours des clients et partenaires qui amènent des connaissances précieuses et captivantes sur leurs zones d'étude, ainsi que les moments d'échanges avec mes collègues consacrés à la recherche ou la mise en place de méthodologies. Le fort intérêt des gestionnaires envers les solutions développées par i-Sea, m'a confirmé le potentiel des techniques de télédétection pour la gestion de l'environnement et m'encourage encore davantage à continuer dans cette voie pour la suite de mon projet professionnel.

Bibliographie

- Attarzadeh, R. *et al.* (2018) ‘Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at Plot Scale’, *Remote Sensing*, 10(8), p. 1285. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs10081285>.
- Baghdadi, N. *et al.* (2018) ‘Comment estimer l’humidité des sols à partir des images Sentinel (s)?’, in *Sentinel, quelles opportunités pour l’agriculture?*, p. 15. Available at: <https://hal.inrae.fr/hal-02607412> (Accessed: 10 August 2024).
- Barnaud, G. (2009) ‘Entre terre et eaux, les fonctions écologiques des zones humides’.
- Beguet, B. *et al.* (2014) ‘Forest structure quantification and mapping using the Pleiades image texture’, pp. 83–88.
- BEVEN, K.J. and KIRKBY, M.J. (1979) ‘A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d’appel variable de l’hydrologie du bassin versant’, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), pp. 43–69. Available at: <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>.
- Bordeaux Métropole (2021) ‘Stratégie BiodiverCité et plan action 2021 2026’.
- Breiman, L. *et al.* (1984) *Classification and Regression Trees*. Taylor & Francis.
- Breiman, L. (2001) ‘Random Forests’, *Machine Learning*, 45(1), pp. 5–32. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Cabezas Peña, J., Galleguillos, M. and Perez-Quezada, J. (2016) ‘Predicting Vascular Plant Richness in a Heterogeneous Wetland Using Spectral and Textural Features and a Random Forest Algorithm’, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13, pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2532743>.
- Campbell, A.D. *et al.* (2022) ‘A review of carbon monitoring in wet carbon systems using remote sensing’, *Environmental Research Letters*, 17(2), p. 025009. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4d>.
- Cazenave, A. (2013) ‘La Terre et l’environnement observés depuis l’espace : Leçon inaugurale prononcée le jeudi 21 mars 2013’, in *La Terre et l’environnement observés depuis l’espace : Leçon inaugurale prononcée le jeudi 21 mars 2013*. Paris: Collège de France (Leçons inaugurales). Available at: <https://doi.org/10.4000/books.cdf.3292>.
- Clément, B. *et al.* (2008) ‘Evaluation des fonctions des zones humides à partir de données de télédétection à très haute résolution spatiale’.
- Commission européenne (2020) *Nouveau rapport sur l’état de conservation de la nature*. Text. Available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_20_1920 (Accessed: 21 July 2024).
- Gao, B. (1996) ‘NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space’, *Remote Sensing of Environment*, 58(3), pp. 257–266. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).

Guo, A.X. *et al.* (2017) ‘Regional mapping of vegetation structure for biodiversity monitoring using airborne lidar data’, *Ecological Informatics*, 38. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.01.005>.

Guo, M. *et al.* (2017) ‘A Review of Wetland Remote Sensing’, *Sensors*, 17(4), p. 777. Available at: <https://doi.org/10.3390/s17040777>.

Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J. (2009) ‘Random Forests’, in T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman (eds) *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. New York, NY: Springer, pp. 587–604. Available at: https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7_15.

History | *Landsat Science* (no date). Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/history/> (Accessed: 14 July 2024).

Howard, J. *et al.* (2014) *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.

Huete, A.R. (1988) ‘A soil-adjusted vegetation index (SAVI)’, *Remote Sensing of Environment*, 25(3), pp. 295–309. Available at: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).

Jin, S. and Sader, S.A. (2005) ‘Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances’, *Remote Sensing of Environment*, 94(3), pp. 364–372. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>.

Jordan, C.F. (1969) ‘Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor’, *Ecology*, 50(4), pp. 663–666. Available at: <https://doi.org/10.2307/1936256>.

Maltby, E. and Acreman, M.C. (2011) ‘Ecosystem services of wetlands: pathfinder for a new paradigm’, *Hydrological Sciences Journal*, 56(8), pp. 1341–1359. Available at: <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.631014>.

Masenyama, A. *et al.* (2022) ‘A systematic review on the use of remote sensing technologies in quantifying grasslands ecosystem services’, *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), pp. 1000–1025. Available at: <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2088652>.

Ministère de la Transition Ecologique (2022) ‘4e Plan national milieux humides - 2022-2026’.

Moreau, S. and Le Toan, T. (2003) ‘Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management’, *Remote Sensing of Environment*, 84(4), pp. 477–492. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00111-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00111-6).

Mupepi, O. *et al.* (2024) ‘A systematic review on remote sensing of wetland environments’, *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 79(1), pp. 67–85. Available at: <https://doi.org/10.1080/0035919X.2024.2322946>.

Office Français de la Biodiversité (2024) *Les zones humides*. Available at: <https://www.ofb.gouv.fr/les-zones-humides> (Accessed: 21 July 2024).

Perrin, G. (2023) 'Apport des bases de données ouvertes à l'identification des zones humides / analyse de l'intérêt de « l'approche Ellenberg »'.

Perrin, G. *et al.* (2023) 'La démarche Ellenberg : une alternative simple et robuste à la démarche réglementaire pour la délimitation des zones humides en France métropolitaine', *Sciences Eaux & Territoires*, (43), pp. 37–42. Available at: <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2023.43.7506>.

Pettorelli, N. *et al.* (2005) 'Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change', *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), pp. 503–510. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>.

Ramsar (2018) 'Convention de Ramsar sur les zones humides. Perspectives mondiales des zones humides : état des zones humides à l'échelle mondiale et des services qu'elles fournissent à l'humanité.'

Ramsar (2021) *GWO Special Edition 2021, Global Wetland Outlook*. Available at: <https://www.global-wetland-outlook.ramsar.org/report-1> (Accessed: 19 August 2024).

Rapinel, S. *et al.* (2016) 'Mapping wetland functions using Earth observation data and multi-criteria analysis', *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11), p. 641. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5644-1>.

Rapinel, S. *et al.* (2020) 'Mapping the functional dimension of vegetation series in the Mediterranean region using multitemporal MODIS data', *GIScience & Remote Sensing*, 57(1), pp. 60–73. Available at: <https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1662167>.

Rouse, J.W. *et al.* (1974) 'Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS', in. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614> (Accessed: 7 August 2024).

Rummell, A.J. *et al.* (2022) 'Watching the Saltmarsh Grow: A High-Resolution Remote Sensing Approach to Quantify the Effects of Wetland Restoration', *Remote Sensing*, 14(18), p. 4559. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs14184559>.

Scikit-learn Documentation (no date) *RandomForestClassifier*, *scikit-learn*. Available at: <https://scikit-learn/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (Accessed: 25 August 2024).

Services de l'état (2014) *Document d'objectif (DOCOB) : élaboration et animation, Les services de l'État dans l'Oise*. Available at: <https://www.oise.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement/Nature-et-Biodiversite/Natura-2000/Generalites/Document-d-objectif-DOCOB-elaboration-et-animation> (Accessed: 26 July 2024).

Singha, P. and Pal, S. (2022) 'Predicting wetland area and water depth in Barind plain of India', *Environmental Science and Pollution Research*, 29. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20787-w>.

Sørensen, R., Zinko, U. and Seibert, J. (2006) 'On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations', *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), pp. 101–112. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>.

Sun, W. *et al.* (2024) 'Monitoring wetland plant diversity from space: Progress and perspective', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130, p. 103943. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103943>.

Weber, D., Schaepman-Strub, G. and Ecker, K. (2018) 'Predicting habitat quality of protected dry grasslands using Landsat NDVI phenology', *Ecological Indicators*, 91, pp. 447–460. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.081>.

Liste des annexes

Annexe 1 : Méthode de lecture des matrices de confusion et des métriques Rappel, F-score, Précision, Kappa et OA. Fiche fournie à la suite d'une classification par Random Forest dans le cadre de la solution Biocoast.

Annexe 2 : Graphique représentant les séries temporelles des moyennes mensuelles sous forme de courbes pour l'indice NDWI sur le marais d'Olives entre 2019 et 2023.

Annexe 3 : Résultats pour l'analyse statistique sur les climats d'humidité pour les indices NDWI et NDMI.

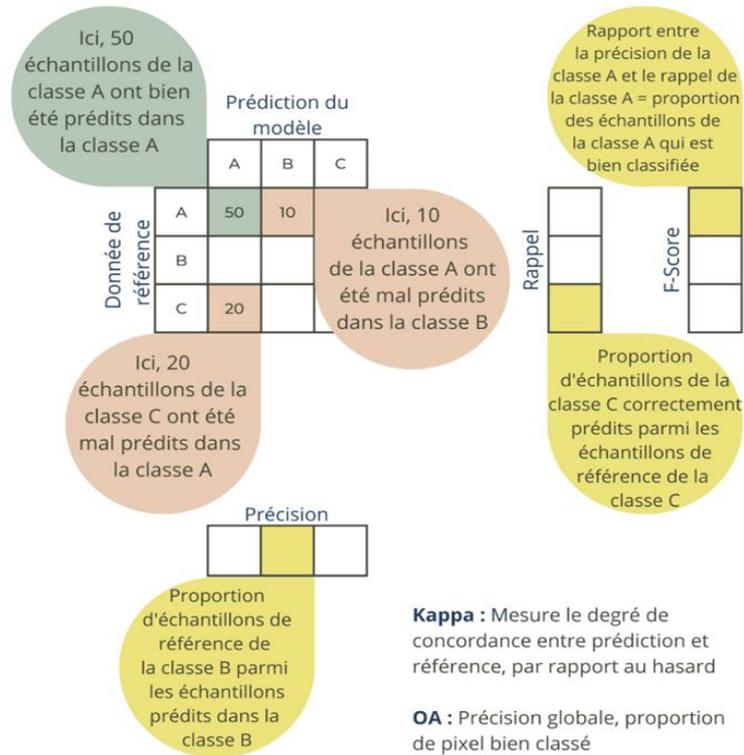
Annexe 4 : Nom de l'habitat cartographié pour chaque code utilisé sur les cartographies du marais d'Olives.

Annexe 5 : Livrable cartographique pour la classification des habitats naturels réalisé pour le projet CAFEZH – niveau communautaire de la classe

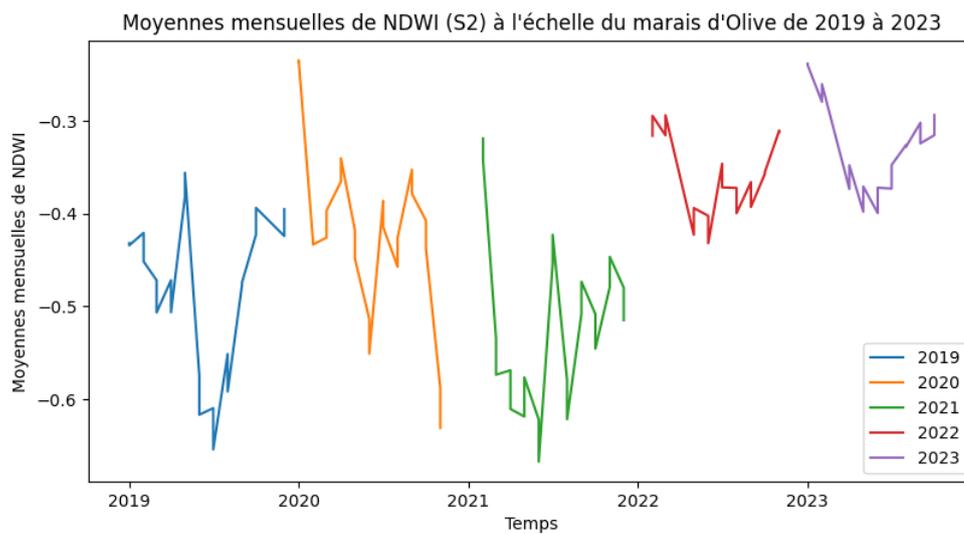
Annexe 6 : Livrable cartographique pour la classification des habitats naturels réalisé pour le projet CAFEZH – niveau communautaire de l'ordre

Annexe 7 : Analyse de la répartition des valeurs de Ellenberg pour le niveau hiérarchique de l'ordre d'après les relevés de terrain pour le projet CAFEZH

Annexe 1 : Méthode de lecture des matrices de confusion et des métriques Rappel, F-score, Précision, Kappa et OA. Fiche fournie à la suite d'une classification par Random Forest dans le cadre de la solution Biocoast.



Annexe 2 : Graphique représentant les séries temporelles des moyennes mensuelles sous forme de courbes pour l'indice NDWI sur le marais d'Olives entre 2019 et 2023.



Annexe 3 : Résultats pour l'analyse statistique sur les climats d'humidité pour les indices NDWI et NDMI.

Analyse du NDWI							Analyse du NDMI						
2019							2019						
Statistique de Shapiro-Wilk: 0.9157880898242083							Statistique de Shapiro-Wilk: 0.8909446397013472						
Valeur p: 0.2851046314373026							Valeur p: 0.14289541278018342						
Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).							Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).						
2020							2020						
Statistique de Shapiro-Wilk: 0.9304542479849262							Statistique de Shapiro-Wilk: 0.9610698277332083						
Valeur p: 0.41546708066549254							Valeur p: 0.784966317070561						
Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).							Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).						
2021							2021						
Statistique de Shapiro-Wilk: 0.9526146006479036							Statistique de Shapiro-Wilk: 0.9228451147347546						
Valeur p: 0.6774956437481519							Valeur p: 0.34305339464033535						
Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).							Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).						
2022							2022						
Statistique de Shapiro-Wilk: 0.9060698214187184							Statistique de Shapiro-Wilk: 0.8712408751534539						
Valeur p: 0.28932776406451266							Valeur p: 0.12677256696214118						
Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).							Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).						
2023							2023						
Statistique de Shapiro-Wilk: 0.9287027176746041							Statistique de Shapiro-Wilk: 0.8768110829329625						
Valeur p: 0.46909212590291405							Valeur p: 0.145311457912219						
Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).							Les données suivent une distribution normale (ne rejette pas H0).						
Statistique de Bartlett: 6.743076158597751							Statistique de Bartlett: 11.564840367319487						
Valeur p: 0.1501045588243397							Valeur p: 0.020898326684474538						
Les populations ont une variance égale (ne rejette pas H0).							Les populations n'ont pas une variation égale (rejette H0).						
Anova							Statistique H: 10.596096713743776 Test Kruskal Wallis						
Statistique F: 10.691671279839944							Valeur p: 0.03149871410362054						
Valeur p: 3.2793446736377805e-06							Il existe une différence significative entre au moins deux années.						
Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05													
group1	group2	meandiff	p-adj	lower	upper	reject	1	2	3	4	5		
2019	2020	0.0625	0.3923	-0.0367	0.1617	False	1	0.000000	0.35787	0.081455	0.248849	0.038846	Test de Dunn
2019	2021	-0.0431	0.7329	-0.1423	0.0562	False	2	0.357870	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
2019	2022	0.1281	0.0094	0.0235	0.2327	True	3	0.081455	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
2019	2023	0.1602	0.0007	0.0556	0.2648	True	4	0.248849	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
2020	2021	-0.1056	0.0319	-0.2048	-0.0064	True	5	0.038846	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	
2020	2022	0.0656	0.3971	-0.0839	0.1702	False							
2020	2023	0.0977	0.0777	-0.0069	0.2022	False	1	False	False	False	False	True	
2021	2022	0.1712	0.0003	0.0666	0.2758	True	2	False	False	False	False	False	
2021	2023	0.2032	0.0	0.0986	0.3078	True	3	False	False	False	False	False	
2022	2023	0.0321	0.92	-0.0776	0.1418	False	4	False	False	False	False	False	
							5	True	False	False	False	False	

Annexe 4 : Nom de l'habitat cartographié pour chaque code utilisé sur les cartographies du marais d'Olives.

Code	Nom de l'habitat naturel
RUBUSP	Roncier (<i>Rubus</i> sp.)
CIRSARVE	Végétation à cirse des champs (<i>Cirsium arvense</i>) et grande ortie (<i>Urtica dioica</i>)
Divers_meso	Végétations diverses à helminthie fausse vipérine, moutarde des champs et/ou torilis des champs (<i>Helminthotheca echioides</i> , <i>Sinapsis arvensis</i> , <i>Torilis arvensis</i>)
HOLCLANA	Végétation à houlque laineuse (<i>Holcus lanatus</i>)
AGROSTOL	Végétation à agrostide stolonifère (<i>Agrostis stolonifera</i>)
ERIGSP	Végétation à vergerettes (<i>Erigeron</i> spp.)
PERSMACU	Végétation à persicaire (<i>Persicaria maculosa</i>)
ECHICRUS	Végétation à échinochloa pied-de-coq (<i>Echinochloa crus-galii</i>)
JUNCEFFU.GR	Végétation à joncs diffus et agglomérés (<i>Juncus</i> groupe effusus)
PHRAAUST	Patch de roseau (<i>Phragmites australis</i>)
Litter	Sol nu ou recouvert de litière
Water	Eau libre
ELYTREPE	Patch de chiendent rampant (<i>Elytrigia repens</i>)
HYPEPERF	Patch de millepertuis perforé (<i>Hypericum perforatum</i>)
CARESP	Patch de laîche (<i>Carex</i> sp.)
PHALARUN	Patch de baldingère faux-roseau (<i>Phalaris arundinacea</i>)

Annexe 5 : Livrable cartographique pour la classification des habitats naturels réalisé pour le projet CAFEZH – niveau communautaire de la classe



Cartographie des habitats par télédétection multitemporelle SPOT au niveau de la classe
Vallée estuarienne de la Seine



Éditée le : 20 / 2 / 2024



Typologie

- Emprise de la zone d'étude
- Agropyreteea pungentis*
- Agrostietea stoloniferae*
- Alnetea glutinosae*
- Arrhenatheretea elatioris*
- Artemisietea vulgaris*
- Asteretea tripolii*
- Bidentetea tripartitae*
- Carpino betuli-Fagetetea sylvaticae*
- Eau
- Filipendulo ulmariae-Convulvuletea sepium*
- Franguletea alni*
- Glycerio fluitantis-Nasturtietea officinalis*
- Littorelletea uniflorae*
- Molinio caeruleae-Juncetea acutiflori*
- Phragmito-Magnocaricetea*
- Populo albae-Salicetea albae*
- Quercetea robori-petraeae*
- Rhamno catharticae-Prunetea spinosae*
- Salicetea purpureae*
- Vaccinio-Piceetea*

Réalisation : i-Sea 2024
Sources :
- i-Sea, Groupement d'intérêt Public Seine-Aval
- Natural Earth
- IGN
- Image (traitement) : SPOT 6-7 @ADS, 2022. Date d'acquisition : du 23/04/2020 au 07/10/2022.
Production DINAMIS.
Système de coordonnées : Lambert 93



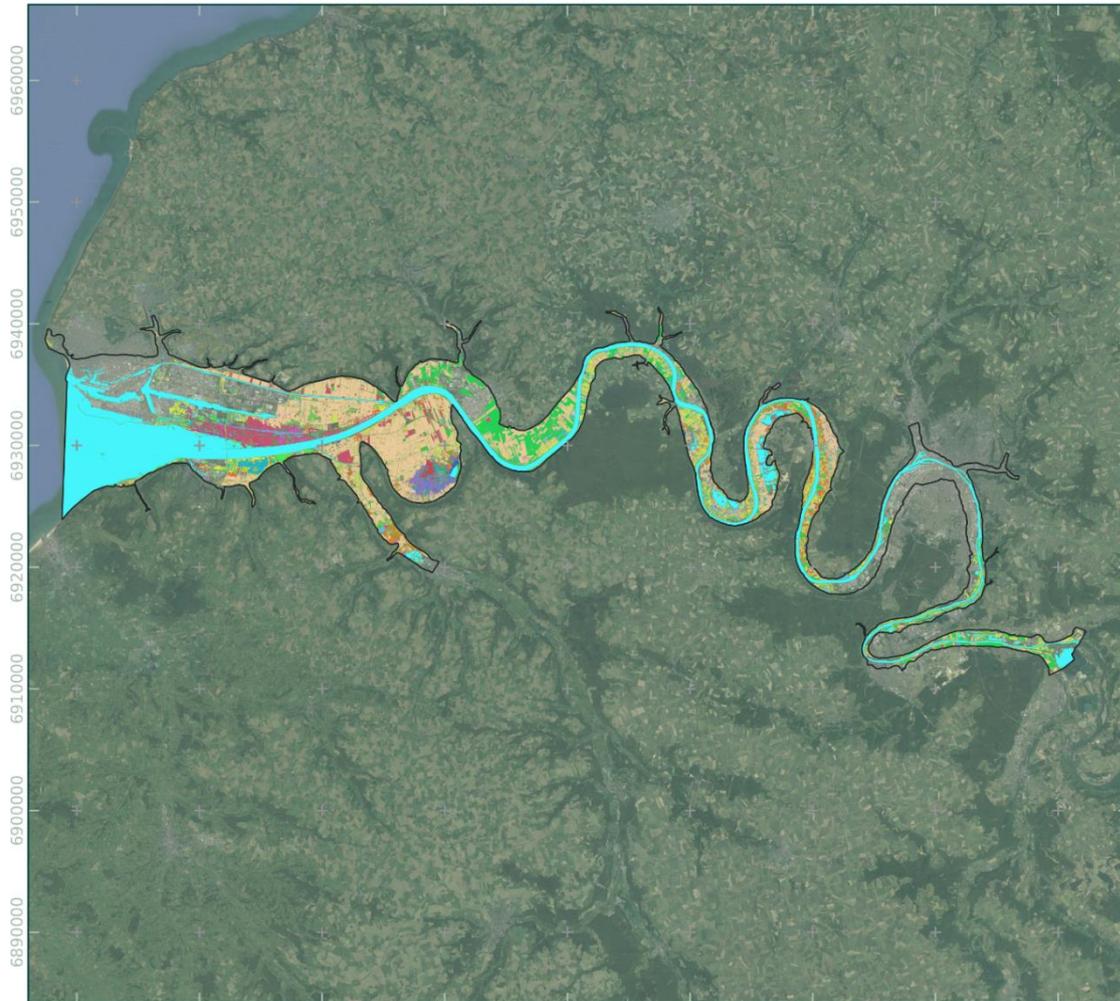
Annexe 6 : Livrable cartographique pour la classification des habitats naturels réalisé pour le projet CAFEZH – niveau communautaire de l’ordre



Cartographie des habitats par télédétection multitemporelle
SPOT au niveau de l'ordre

Vallée estuarienne de la Seine 2022

Éditée le : 21 / 2 / 2024



Typologie

- | | |
|---|---|
| Emprise de la zone d'étude | <i>Loto pedunculati-Filipenduletalia ulmariae</i> |
| <i>Agropyretalia intermedio-repentis</i> | <i>Magnocaricetalia</i> |
| <i>Agropyretalia pungentis</i> | <i>Molinietalia caeruleae</i> |
| <i>Agropyretealia pungentis-autre</i> | <i>Molinio caeruleae-Quercetalia roboris</i> |
| <i>Agrostietea stoloniferae-autre</i> | <i>Nasturtio officinalis-Glycerietalia fluitantis</i> |
| <i>Alnetalia glutinosae</i> | <i>Onopordetalia acanthii</i> |
| <i>Arrhenatheretalia elatioris</i> | <i>Phragmitetalia</i> |
| <i>Arrhenatheretalia elatioris-autre</i> | <i>Phragmito-Magnocaricetalia-autre</i> |
| <i>Artemisietalia vulgaris</i> | <i>Plantagnetalia majoris</i> |
| <i>Bidentetalia tripartitae</i> | <i>Populetalia albae</i> |
| <i>Bolboschoenetalia maritimi</i> | <i>Populo albae-Salicetalia albae</i> |
| <i>Convolvuletalia sepium</i> | <i>Potentillo anserinae-Polygonetalia avicularis</i> |
| <i>Deschampsietalia cespitosae</i> | <i>Salicetalia auritae</i> |
| Eau | <i>Salicetalia purpureae</i> |
| <i>Eleocharitetalia multicaulis</i> | <i>Sambucetalia racemosae</i> |
| <i>Glaucio maritimae-Puccinellietalia maritimae</i> | <i>Sphagno-Betuletalia pubescentis</i> |
| <i>Lonicero periclymeni-Betuletalia pubescentis</i> | <i>Trifolio repentis-Phleetalia pratensis</i> |



Réalisation : i-Sea 2024
Sources :
- i-Sea, Groupement d'intérêt public Seine-Aval
- Natural Earth
- IGN
Image (traitement) : SPOT 6-7@ADS, 2022. Date d'acquisition : du 23/04/2020 au 07/10/2022.
Production DINAMIS
Système de coordonnées : Lambert 93

Résumé

Télédétection satellitaire multi-sources pour la caractérisation, la cartographie et le suivi des végétations des zones humides et de leurs fonctions écologiques de l'échelle locale à l'échelle globale.

Les zones humides abritent divers écosystèmes protégés soumis à des politiques publiques de conservation ou de restauration. L'entreprise i-Sea propose des solutions de télédétection pour la surveillance de l'environnement. Le pôle biodiversité produit des cartographies fines des habitats naturels des zones humides. Afin d'étendre leurs solutions et de mieux appréhender ces écosystèmes, l'entreprise s'intéresse à l'usage d'outils de télédétection multi-sources pour caractériser les végétations des zones humides et leurs fonctions écologiques de l'échelle locale à globale.

Des classifications des habitats naturels ont été réalisées sur le marais d'Olives et l'estuaire de la Seine. Un protocole terrain pour l'étude de la biomasse a été appliqué sur la Réserve Naturelle des prés salés d'Arès. La classification est réalisée selon le procédé Biocoast à partir de relevés terrain, de séries temporelles d'images et d'un algorithme de Random Forest. Des chaînes de traitement ont été développées pour l'étude des fonctions écologiques basées sur des séries temporelles satellitaires (SPOT, Pléiades et Sentinel-2), des indices issus de télédétection (NDVI, NDWI et NDMI) et des données annexes (valeurs d'Ellenberg).

Les résultats montrent le potentiel de la télédétection pour suivre les changements de végétation, estimer la production de biomasse et analyser les climats d'humidité pour évaluer les fonctions des zones humides. Le protocole terrain doit être amélioré pour s'adapter aux changements de résolution spatiale et permettre une collecte de données quantitatives plus adaptée à la résolution des cartes finales.

Ce travail s'intègre au développement R&D du pôle biodiversité de l'entreprise et constitue un apport aux réflexions actuelles.

Mots clés : Zones humides, Télédétection, Fonctions écologiques, Cartographies d'habitats, Séries temporelles, Trajectoires de végétations

Abstract

Wetlands are highly diverse ecosystems, protected by public measures for their conservation and restoration. The i-Sea company offers remote sensing solutions for environmental monitoring. The Biodiversity Team produces detailed maps of wetland habitats. In order to extend their solutions and gain a better understanding of these ecosystems, the company is interested in the use of multi-source remote sensing tools to characterize wetland vegetation and their ecological functions from local to global scales.

Natural habitat classifications have been carried out on the Olives marsh and the Seine estuary. A field protocol for studying biomass has been applied to the Arès Salt Meadows Nature Reserve. Classification was carried out using the Biocoast process, based on field surveys, image time series and a Random Forest algorithm. Processing chains have been developed to study ecological functions based on satellite time series (SPOT, Pleiades and Sentinel-2), remote sensing indices (NDVI, NDWI and NDMI) and ancillary data (Ellenberg values).

The results show the potential of remote sensing for monitoring vegetation changes, estimating biomass production and analyzing moisture climates to assess wetland functions. The field protocol needs to be improved to adapt to changes in spatial resolution, and to enable quantitative data to be collected in a way more suited to the resolution of the final maps.

This work is part of the R&D development of the company's Biodiversity Team and represents a contribution to current thinking.

Keywords: Wetlands, Remote sensing, Ecological functions, Habitat mapping, Times series, Vegetation trajectories