i-Sea

Pré-cartographie par télédétection satellitaire des habitats naturels de 3 sites Natura 2000 et développement d'un outil de suivi des retournements de prairies.

Contrat R&D
I-Sea /DREAL NOUVELLE-AQUITAINE

RAPPORT METHODOLOGIQUE

Conservatoire Botanique National SUD-ATLANTIQUE

Liberté • Égalité • Fraternité RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement NOUVELLE-AQUITAINE

Avril 2021

FICHE DOCUMENTAIRE

Date	22/02/2021 – VERSION TEMPORAIRE
Maitre d'ouvrage	DREAL NOUVELLE-AQUITAINE
Financement	DREAL Nouvelle-Aquitaine SIABVELG (Syndicat Intercommunal d'Aménagement des Eaux du Bassin Versant des Etangs du Littoral Girondin) Communauté de Communes des Grands Lacs
Réalisation	Cécile Curti, Nicolas Débonnaire, Virginie Lafon, Benoit Beguet - i-Sea Anthony LeFouler, Aurélien Belaud - (CBNSA) Jérôme Fouert (PNRLandesDeGascogne) Estelle Jardot (SIAEBVELG) Claire Betbeder (CCGrandsLacs) Clémence Ménégazzi (N2000 PaysMédoc) Gauthier Watelle (N2000 CCEstuaire)
Rédacteurs	Benoit Beguet : benoit.beguet@i-Sea.fr Cécile Curti : cecile.curti@i-Sea.fr 25 rue Marcel Issartier 33700 Mérignac Site internet : http://i-Sea.fr/fr/
Approbateur	Aurélie Dehouck : aurelie.dehouck@i-Sea.fr
Citation	i-Sea 2021, Pré-cartographie par télédétection satellitaire des habitats naturels de 3 sites Natura 2000 et développement d'un outil de suivi de retournement des prairies. Rapport méthodologique.54p.

Avertissement : Ce rapport est exclusivement dédié à la lecture du comité de pilotage de l'étude. Il ne peut être ni révisé, ni modifié, ni diffusé en l'état.

Sommaire

1 Contexte, enjeux et objectifs 6
2 Pré-cartographie par télédétection des habitats naturels 7
2.1 Les sites d'étude 7
2.2 Données et méthodes 10
2.2.1 Prospections Terrain 10
2.2.2 Cartographie par classification d'images (*machine Learning*) 12
2.2.3 Données initiales 16
2.3 Résultats et discussions 23
2.3.1 Site de la Leyre 23
2.3.2 Site des Grands Lacs 31
2.4 Conclusions et perspectives 40
3 Outil de suivi des retournements de prairie 42
3.1 Contexte et objectifs 42
3.2 Sites et données 42
3.3 Approches méthodologiques explorées 44
3.4 Premiers résultats 46
3.4.1 Exemple de cartographie des différences de NDVI 46
3.4.2 Exemple de cartographie des trajectoires de prairies 47
3.4.3 Observation des trajectoires temporelles de NDVI pour les parcelles de référence 48
3.4.4 Exemple de cartographie des retournements potentiels de prairies 50
3.5 Conclusions et perspectives 52
4 Bilan de l'étude et préconisations 53
5 BIBLIOGRAPHIE 54

Liste des illustrations

Figure 1. Présentation des sites d'étude 8
Figure 2. Observation de l'étendue des sites d'étude avec une scène Sentinel-2 (résolution 10 m) 9
Figure 3. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain 11
Figure 4. Géolocalisation des végétations sur le terrain 12
Figure 5. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement 13
Figure 6. Présentation des différentes données spatiales et topographiques utilisées pour la cartographie des habitats naturels des sites d'étude. 18
Figure 7. Présentation de la mosaïque Pléiades obtenue pour l'été 2020, site des Grands Lacs. 19
Figure 8 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2 sur la typologie complète. La précision globale obtenue est de 64%. 24
Figure 9 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2 sur la typologie complète. La précision globale obtenue est de 74%. 25
Figure 10 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2 sur la typologie simplifiée. La précision globale obtenue est de 70%. 26
Figure 11 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT sur la typologie simplifiée. La précision globale obtenue est de 76%. 27
Figure 12 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT+LIDAR sur la typologie simplifiée. La précision globale obtenue est de 92%. 28
Figure 13 Observation des différentes prédictions sur une zone d'intérêt (Maille « les trestas ») 29
Figure 14 Pré-cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire du site de la Leyre 30
Figure 15 Extrait de l'atlas cartographique généré (1/1000) pour la cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire du site de la Leyre. 31
Figure 16 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2. La précision globale obtenue est de 97% en mode déséquilibré et 57% en mode équilibré. 33
Figure 17 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT/Pléiades. La précision globale obtenue est de 94% en mode déséquilibré et 79% en mode équilibré.. 34
Figure 18 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT/Pléiades. La précision globale obtenue est de 96% en mode déséquilibré et 83% en mode équilibré.. 35
Figure 19 Observation des résultats de classification obtenus sur une région d'intérêt pour Sentinel-2 ainsi que pour SPOT/Pléiades/MNT dans sa version brute et dans sa version simplifiée. 36
Figure 20 Observation des résultats de classification obtenus sur une région d'intérêt pour Sentinel-2 ainsi que pour SPOT/Pléiades/MNT dans sa version brute et dans sa version simplifiée. 37
Figure 21 : Pré-cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire, site « lac Nord ». 38
Figure 22 Pré-cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire, site « lac Sud ». 39

Figure 23 Extrait de l'atlas cartographique généré (1/1000) pour la cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire du site des Grands Lacs. 40
Figure 24 : Sites sélectionnés pour la surveillance des prairies 43
Figure 25 Représentation schématique de la construction des indicateurs de retournements de prairie. 45
Figure 26 Exemple de cartographie des différences de NDVI Sentinel-2 (entre le 12/05/2019 et le 9/06/2019) pour des parcelles appartenant au masque prairies. 47
Figure 27 Exemple de cartographie des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles appartenant au masque 'prairies'. 48
Figure 28 Observations des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles de référence ayant subi un retournement en 2016. 49
Figure 29 Observations des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles de référence ayant subi un retournement en 2018. 49
Figure 30 Observations des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles de référence ayant subi un retournement en 2018. 50
Figure 31 Matrices de confusion obtenues pour la détection des changements (retournements potentiels) à partir des séries temporelles sur Sentinel-2 de 2016 et 2018. 51
Figure 32 Exemple de cartographie des retournements potentiels sur Sentinel-2 de 2016 pour les parcelles appartenant à la base de données de référence. 51

Tableau 1 : Fiche de terrain pour la saisie des stations. 10
Tableau 2. Présentation de la typologie pour la cartographie des habitats du site de Leyre et nombre d'échantillons par classe (après la campagne de terrain de 2019). 20
Tableau 4. Présentation de la typologie pour la cartographie des habitats des sites des Grands Lacs et nombre d'échantillons par classe (après la campagne de terrain de 2020). 21
Tableau 5 Présentation de la typologie et de ses caractéristiques pour la cartographie des habitats des sites des Grands Lacs ainsi que les dimensions minimales par classe. 23

1 CONTEXTE, ENJEUX ET OBJECTIFS

En 2016, la société I-SEA a reçu un financement du Programme Investissement d'Avenir (PIAVE axe « usages et services valorisant les informations issues du spatial ») pour soutenir le projet BIOCOAST visant à l'émergence d'un service de cartographie des habitats littoraux suivant les typologies réglementaires existantes, par imagerie satellitaire. Ce projet a permis le développement d'un protocole méthodologique de nouvelle génération combinant relevés terrain et données satellites et reposant sur des techniques novatrices d'intelligence artificielle (Machine et Deep Learning).

Les travaux du projet BIOCOAST ont été menés sur une période de 18 mois, de septembre 2016 à mars 2018, conjointement sur 5 sites pilotes (i) les « Rives de Gironde (Conservatoire du Littoral/ CREN Poitou-Charentes ; (ii) L'île Nouvelle et le vasard de Beychevelle (Conservatoire du Littoral, Département de la Gironde) ; (iii) la RNN des prés salés d'Arès-Lège Cap Ferret (ONCFS, communes), (iv) le Delta de la Leyre au sud du Bassin d'Arcachon (PNMBA, CBNSA) et (iv) la RNN Estuaire de la Seine (Maison de l'Estuaire).

La démarche développée au cours du projet associe étroitement les gestionnaires des sites, leurs référents écologues ou botanistes et l'équipe d'i-Sea dans le but d'intégrer la finesse de l'approche terrain à une observation spatialement exhaustive et haute fréquence, et de trouver le meilleur compromis entre la connaissance la plus exacte et fine possible de la typologie et les capacités et limites intrinsèques des techniques d'observation de la Terre.

A ce jour, et à notre connaissance, la stratégie BIOCOAST n'est pas déployée par d'autres équipes. Les méthodes de classification multi-temporelle d'images satellite intègrent des processus de calcul complexes maîtrisés par peu d'équipes à l'échelle nationale. D'autre part, BIOCOAST nous a servi de laboratoire pour paramétriser finement les calculs et déterminer, à l'issue de tests fastidieux et systématiques, le jeu de données d'entrée le plus adapté à la restitution des typologies complexes des milieux naturels. Une procédure de collecte de données terrain ou d'usage de relevés floristiques préexistants a également été établie. Propre à BIOCOAST, elle intègre tous les éléments nécessaires aux analyses phytosociologiques et à la construction d'un jeu de données d'entraînement robuste pour le classifier. Enfin, BIOCOAST est avant tout une stratégie originale alliant des outils parmi les plus performants de l'intelligence artificielle à l'expertise naturaliste d'écologues et phytosociologues. I-Sea a construit, éprouvé et validé cette stratégie notamment avec le concours du CBN. Nous ne lui connaissons pas d'équivalent opérationnel qui serait dédié à la cartographie, ou à la pré-cartographie, des habitats des sites Natura 2000.

Deux objectifs ont été définis par le maître d'ouvrage :

- Produire une pré-cartographie de 3 sites NATURA 2000 en ciblant les habitats d'intérêt communautaire. Cette expérimentation vise à allier le CBN Sud-Atlantique, i-Sea et les animateurs de site dans une démarche collective afin d'intégrer les données terrain (relevés floristiques étiquetés suivant la typologie fixée par le CBN) dans le module de traitement d'images, puis sur la base des résultats cartographiques BIOCOAST, retourner sur le terrain pour corriger la carte produite. La carte BIOCOAST est comprise

comme une pré-cartographie, document généralement établi par photo-interprétation. En plus de ces pré-cartographies, en guise de résultat de cette expérimentation, un guide de préconisation est proposé pour un usage du spatial en appui à la cartographie des sites NATURA 2000 suivant la typologie et suivant les milieux,

- Développer un outil de surveillance opérationnel des retournements de prairie pour remise en culture, afin de contribuer à la préservation de l'état de conservation de ces habitats d'intérêt communautaire à l'échelle régionale, dans le cadre d'un projet de Recherche et Développement visant à :
    - Contribuer à la surveillance nationale de l'état de conservation de ces habitats d'intérêt communautaire ;
    - Evaluer rétroactivement l'évolution de ces habitats prairiaux sur la période 2016-2018, afin d'appréhender l'ampleur du phénomène et d'identifier si des secteurs géographiques sont plus particulièrement touchés.

Le présent rapport méthodologique sera composé de deux parties principales. La première partie concernera le travail de pré-cartographie des habitats naturels par télédétection mené sur trois grands sites de Nouvelle-Aquitaine. La seconde partie se concentrera sur le développement d'un premier démonstrateur de suivi des retournements de prairie.

2 PRE-CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION DES HABITATS NATURELS

Cette section présente les travaux de pré-cartographie par télédétection menés durant le cadre du projet. Après avoir présenté les sites d'étude, l'ensemble des méthodes employées ainsi que les données utilisées sera explicité. Les résultats obtenus seront ensuite présentés et interprétés avant de dresser un bilan du potentiel de la télédétection satellitaire pour la cartographie des habitats naturels concernés.

2.1 Les sites d'étude

Les trois sites naturels visés par cette expérimentation sont les suivants :

- FR7200721 - Vallées de la Grande et de la Petite Leyre (env. 8 000 ha),
- FR7200714 - Zones humides de l'arrière-dune des pays de Born et de Buch (env. 13 000 ha),
- FR7200681 - Zones humides de l'arrière-dune du littoral girondin (env. 11 000 ha).

Dans le cadre de cette étude, les deux sites « zones humides » seront traités comme un seul grand site. En effet, les milieux concernés sont relativement similaires et font l'objet d'une seule et même typologie de végétation. L'ensemble de ces deux sites sera décrit sous l'appellation « Grands Lacs » pour la suite du travail. Le site de la Leyre est quant à lui particulier et répond à une typologie plus spécifique. Il est donc traité de façon indépendante dans cette étude. La figure 1 présente l'ensemble des sites d'étude.

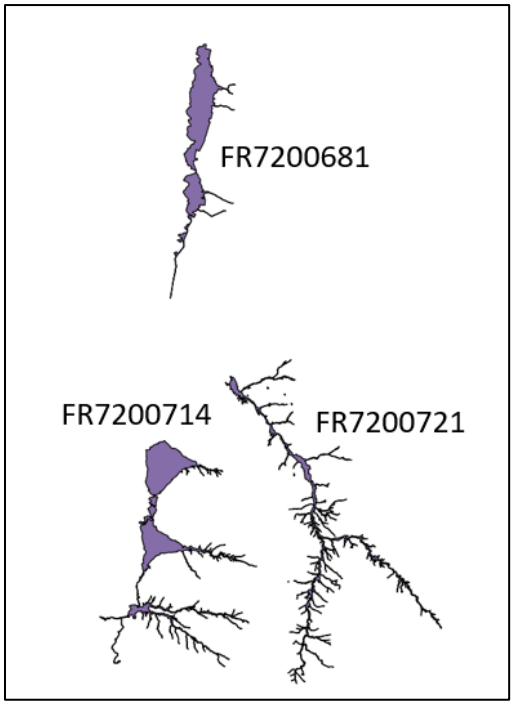

Figure 1. Présentation des sites d'étude

Une grande diversité de milieux caractérise l'ensemble de ces sites. Les milieux principaux sont :

- Habitats d'eaux douces ;
- Landes et fourrés tempérés ;
- Formations herbeuses naturelles et semi-naturelles ;
- Tourbières hautes, tourbières basses et bas-marais ;
- Forêts.

Une première difficulté majeure pour la cartographie par télédétection de ces sites réside dans leur emprise spatiale, à la fois étendue et étroite. En effet, cela impose de travailler avec de très grandes images pour couvrir toute l'emprise, ceci impliquant des difficultés de gestion de données et de ressources informatiques importantes. La figure 2 permet de situer les sites d'étude et d'apprécier leurs étendues géographiques sur une image satellite Sentinel-2 (10 m de résolution spatiale). Cette figure permet de se rendre compte de la très grande échelle visée et du défi cartographique que cela représente.

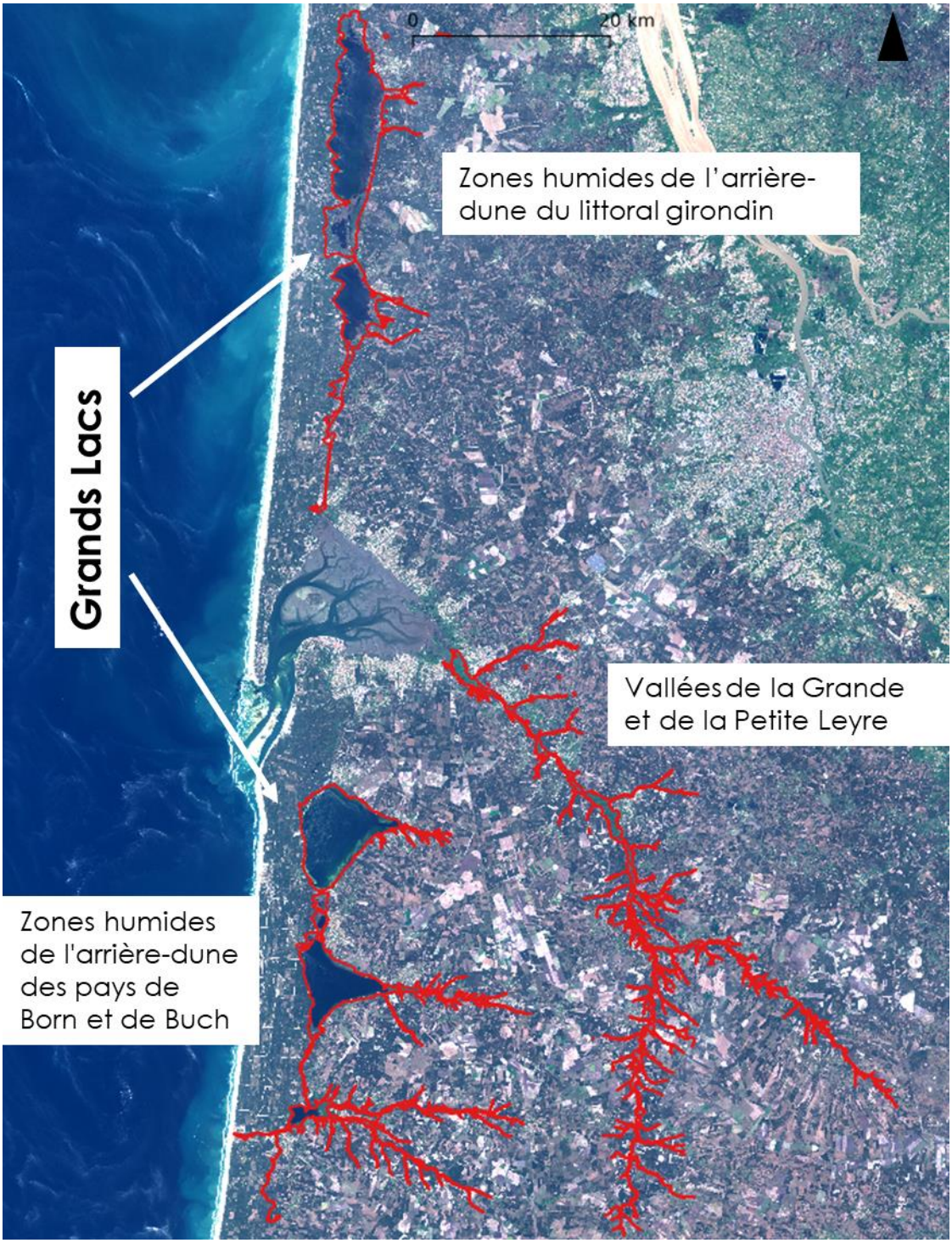

Figure 2. Observation de l'étendue des sites d'étude avec une scène Sentinel-2 (résolution 10 m)

2.2 Données et méthodes

Pour construire la cartographie des habitats naturels dont la surface peut être importante pour une cartographie de terrain, l'étude s'appuie sur les nouvelles technologies (Machine Learning et imagerie satellitaire) accompagnées de campagnes de terrain ciblées pour calibrer, vérifier et affiner cette cartographie.

Les cartographies des habitats de végétation seront produites en conjuguant les relevés de terrain avec des séries temporelles d'images satellite à Très Haute Résolution (THR) (Pléiades, 0.5 m – 2 m de résolution spatiale, SPOT 5 m - 1.5 m de résolution spatiale, Sentinel-2 10 m de résolution spatiale). La THR permet d'atteindre une grande précision des contours des entités recherchées ; la dimension temporelle permet, quant à elle, de discriminer les différents types de végétation en exploitant leurs différentes réponses en termes de variations phénologiques. Le processus de cartographie se veut itératif. Plusieurs versions sont produites, analysées et corrigées au fur et à mesure des échanges, entre l'expertise du terrain et l'expertise en télédétection. Cette section détaille les modalités des différentes étapes du travail et explicite les méthodologies employées.

2.2.1 Prospections Terrain

L'objectif de cette collecte de données *in situ* est de relever un maximum d'observations géolocalisées, au sein des différents habitats présents sur les sites d'étude. Si les premières versions de cartographie produites pour l'ensemble des deux sites se sont basées sur les données existantes fournies par le CBNSA, des versions plus avancées (complétées et affinées) ont été produites grâce à l'apport de nouvelles données collectées sur le terrain par les gestionnaires des sites.

Les zones à prospecter ont été définies au préalable par les phytosociologues du CBNSA et les gestionnaires des sites afin d'inventorier un maximum de communautés végétales différentes pour compléter les bases de données existantes et essayer de combler au mieux les carences en termes de nombre d'échantillons par classe.

Les informations relevées sur le terrain sont décrites dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Fiche de terrain pour la saisie des stations.

ATTRIBUT	DESCRIPTION	LISTE CHOIX
STATION	Identifiant unique de la station	Salses01
DATE	Date de la mission	JJ/MM/AAAA
NATURE	La station est relevée au sein d'une étendue ou d'un ilot/patch	Étendue patch

RAYON	Quelle est approximativement la taille de cette étendue (ou patch)	en mètre
SEDIMENT	Nature du sédiment	sable sablo-vaseux vase roche/bloc/gravier débris coquillier
RECOUVREMENT SOL NU	Pourcentage de recouvrement de sol nu	0 - 25% 25 - 50% 50 - 75% 75 - 100%
COMMENTAIRES	Commentaires utiles à l'interprétation	ex : dépôt algue non fixée visibilité mauvaise très grande étendue homogène …
PHOTO	Numéro des photos associées à la station	

En étroite relation avec le travail d'analyse d'images satellitaires réalisé par i-Sea, les gestionnaires et experts des milieux naturels ont effectué l'ensemble des relevés de terrain complémentaires permettant de calibrer, valider et corriger les analyses d'images satellitaires.

Les experts sur le terrain se placent au cœur d'une zone homogène afin de caractériser l'habitat en présence. Une zone homogène est définie comme une zone où l'habitat ne varie pas sur une distance minimale de 6 m de rayon (Figure 3).

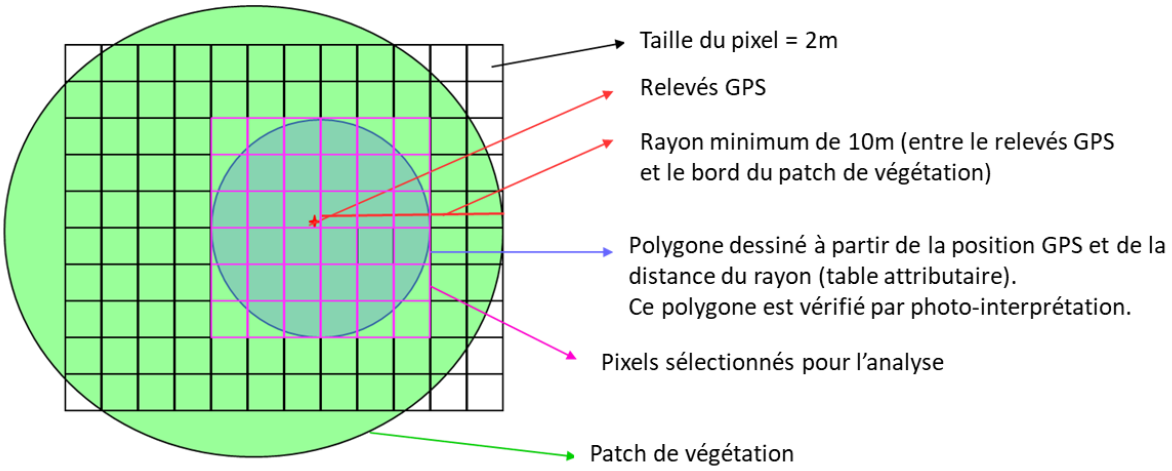

Figure 3. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain

La géolocalisation est réalisée par les experts terrain grâce à des tablettes de terrain équipées de GPS et SIG intégrés, avec les orthophotographies les plus récentes.

En complément, deux photographies de la végétation sur la station étudiée sont systématiquement réalisées : une vue verticale (vers le sol), une vue horizontale (dans le sens de la marche, pour estimer l'extension) (Figure 4).

Figure 4. Géolocalisation des végétations sur le terrain

2.2.2 Cartographie par classification d'images (*machine Learning*)

2.2.2.1 Méthodologie

Afin de déterminer une stratégie de classification d'images adaptée au problème de la reconnaissance et de la différenciation des types de végétation présentes sur le site étudié, différentes approches ont été testées. La démarche méthodologique adoptée est présentée dans la Figure 5.

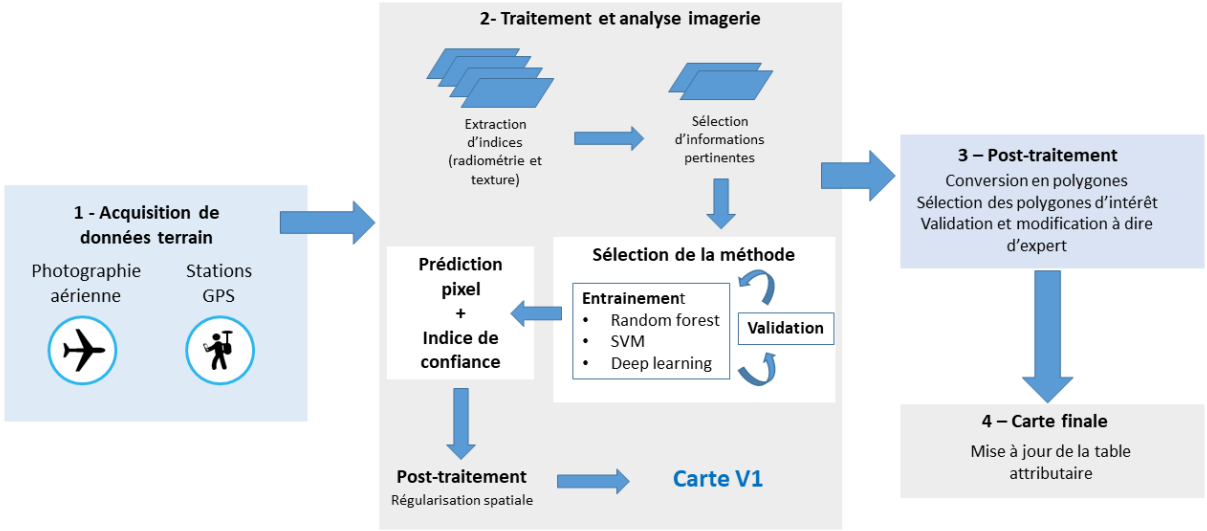

Figure 5. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement

Une fois l'acquisition des données de terrain et des images satellite réalisée, le travail sur les données *in situ* permet de définir la typologie et donc d'affecter à chacune des observations *in situ* (polygones) une classe (code numérique). De nombreuses discussions et itérations entre les différents partenaires du projet sont possibles et souvent nécessaires pour aboutir à la typologie finale.

En parallèle, une étape de pré-traitement (pre-processing) consiste à vérifier et préparer la série d'images. En effet, il faut s'assurer de la bonne coregistration de chacune des images de la série temporelle et ajuster leur calage géographique le cas échéant. Une opération de superposition de l'ensemble de la pile d'images est ensuite appliquée afin que chacun des pixels de la série temporelle occupe le même espace physique, autrement dit que toutes les images soient parfaitement superposables. Il est aussi essentiel de bien vérifier le positionnement de tous les polygones qui servent à l'apprentissage et au test des classifieurs de façon à ne pas injecter dans le processus des pixels qui ne seraient pas précisément représentatifs de la classe d'intérêt.

Une fois ces pré-traitements réalisés, l'étape de traitement de données consiste à extraire un certain nombre d'informations dérivées des images (indices radiométriques). Pour chaque image multispectrale utilisée, 6 indices radiométriques ont été calculés :

- Des indices de végétation (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index ; RVI : Ratio Vegetation Index ; SAVI : Soil Adjust Vegetation Index),
- 2 indices de sol (RI : Redness Index ; BI : Brightness Index),
- 1 indice d'eau (NDWI : Normalized Difference Water Index).

L'image multispectrale multi-temporelle est ensuite réalisée en concaténant l'ensemble des bandes spectrales et des indices calculés pour l'ensemble des dates considérées. Cela

correspond à 4 bandes spectrales + 6 indices radiométriques pour chacune des dates. Les pixels contenus dans les polygones sont ensuite extraits pour constituer une base de données (BD) de référence.

Nous avons testé les méthodes de classification les plus couramment utilisées en télédétection : Support Vector Machine (SVM), Multi Layer Perceptron (MLP, réseaux de neurones) et Random Forest (ou forêts aléatoires, Pal, 2005 ; Beguet *et al.*, 2014). Après différents tests, nous avons choisi de travailler avec les Random Forest qui apportent un bon compromis entre rapidité, simplicité de paramétrisation et performance.

Les Random Forests ou forêts aléatoires ont été introduites par Breiman (2001). C'est un algorithme d'apprentissage statistique très performant, à la fois pour des problèmes de classification et de régression. 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 leur prédiction 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 le principe général est de partitionner récursivement l'espace d'entrée de façon dyadique, puis de déterminer une sous-partition optimale pour la prédiction.

Une fois la meilleure méthode sélectionnée, l'étape de classification finale est réalisée. Elle consiste à entrainer un modèle avec l'ensemble des échantillons disponibles avant de prédire l'ensemble des pixels de la série temporelle ainsi que l'indice de confiance associé.

Enfin, une régularisation spatiale par filtre majoritaire est appliquée au résultat de 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 » et propose un rendu visuel plus « proche de la réalité ».

En résumé, la chaine de traitements sélectionnée pour réaliser la cartographie des types de végétation à partir d'une série temporelle d'images satellitaires à très haute résolution spatiale est classique. Elle intègre les étapes suivantes :

- Extraction d'informations (ici calcul d'indices radiométriques ou pseudo-canaux) ;
- Concaténation des bandes et indices radiométriques pour l'ensemble des dates ;
- Sélection aléatoire des échantillons (au niveau pixel) pour constituer une base de données d'apprentissage (ou entrainement) et une base de données de test (qui sera utilisée pour évaluer la capacité de prédiction du modèle) ;
- Apprentissage du modèle ;
- Evaluation du modèle ;
- Prédiction sur l'ensemble de l'image multi-temporelle ;
- Régularisation.

2.2.2.2 Mise en œuvre pratique

L'ensemble des données collectées sur le terrain a été uniformisé, dans le but d'attribuer une classe à chacun des échantillons. En effet, la méthode de classification semi-automatisée nécessite l'analyse d'échantillons d'apprentissage pour entrainer le modèle. Ces échantillons sont répartis au sein de l'ensemble des classes. Les photographies des stations de terrain ainsi que les informations renseignées par les opérateurs de terrain aident à la répartition des données GPS au sein des différentes classes établies. Ces données au format vectoriel (shapefile) de points sont ensuite converties automatiquement en polygones sous SIG, et superposées aux images. Chacun des polygones (tampon) est corrigé et étendu à dire d'expert de façon à correspondre aux limites visibles sur les supports de référence.

Des échantillons d'apprentissage sont ajoutés par photo-interprétation afin d'augmenter le nombre d'échantillons pour certaines classes facilement distinguables et ainsi appréhender au mieux la variabilité radiométrique et texturale de chaque classe d'intérêt. Cette étape est cruciale dans notre méthodologie de cartographie ; car, en effet, le niveau de précision de la classification produite (d'un point de vue spatial et typologique) dépend essentiellement de la qualité et de la représentativité de cette base de données de référence.

Compte tenu de la structure de nos données de référence, nous avons choisi de travailler au niveau pixel (et non polygone) pour la détermination de pixels d'apprentissage et de test. En effet, certaines classes possèdent un nombre réduit de polygones, séparer alors les polygones en apprentissage et test ne permet pas d'appréhender une variabilité suffisante pour bien apprendre à reconnaitre la classe considérée. Cette sélection des pixels d'apprentissage et de test au sein des mêmes polygones sera à prendre en compte pour l'interprétation des résultats. 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 validation,
- Pour l'apprentissage : équilibrage du nombre d'échantillons par classe à l'aide du nombre d'échantillons de la plus petite classe,
- Evaluation (test) sur la totalité des pixels de l'ensemble de test.

2.2.2.3 Post-traitements

Dans un premier temps, la prédiction brute (ou résultat de la classification) au niveau pixel est régularisée, un filtre majoritaire de rayon n pixels est appliqué. Cette première régularisation permet de lisser localement de potentiels « bruits » de classification.

Le résultat régularisé de la prédiction des classes d'intérêt au niveau pixel est ensuite converti en formes vectorielles dans un fichier de formes (shapefile). La table attributaire de ce shapefile est uniformisée et mise à jour avec notamment le calcul des surfaces des polygones.

Un second niveau de post-traitement a été testé uniquement pour le site dit des « Grands Lacs ». Ce post-traitement, imaginé pour d'autres projets de cartographie, a été testé en fin de projet à titre expérimental. Cette régularisation est guidée par des règles expertes (ou thématiques) : pour chacune des classes d'intérêt, une dimension minimale des objets recherchés est donnée. Les polygones ne respectant pas ces dimensions minimales sont alors réaffectés à la classe correspondante au polygone adjacent avec lequel la distance de contact est la plus grande. Ce procédé est répété de manière itérative jusqu'à ce que tous les polygones respectent les dimensions spécifiques pour chaque classe établie au préalable.

2.2.2.4 Construction de la couche d'informations multi-probabilité

Lors de l'étape de prédiction au niveau pixel, nous ne conservons pas seulement la classe prédite la plus probable, nous obtenons une information complexe contenant, pour chaque pixel, toutes les classes possibles et la probabilité associée d'y appartenir. Pour chaque polygone post-traité, nous déterminons et conservons les 3 classes majoritairement plus probables ainsi que leur probabilité associée. Cette information peut avoir de nombreux usages, notamment permettre de détecter des polygones incohérents (un mélange de classes aberrant) ou de comprendre plus finement certaines prédictions (mélange de classes proches ou possiblement en mosaïque.

2.2.3 Données initiales

2.2.3.1 Données images

L'étude visait au préalable l'usage de séries temporelles Pléiades pour la cartographie des habitats naturels des sites visés. Ces images, en passant par le fournisseur GEOSUD, n'ont pu être collectées ni en archives ni en programmation. Ce premier verrou important nous a poussé à trouver des solutions alternatives. Nous avons donc travaillé avec des séries temporelles Sentinel-2 (10m) qui permettent, grâce à la grande revisite (5 jours) et la disponibilité des données (depuis fin 2015), de construire des séries temporelles denses. Nous avons aussi travaillé avec des images SPOT, plus résolues (5m) mais moins fréquentes (seules deux scènes ont pu être exploitées pour notre étude). Enfin, une seule image Pléiades a pu être récupérée pour les sites des Grands Lacs. L'ensemble des images utilisées dans cette étude est résumé de la façon suivante :

Images Sentinel 2 : 10 dates ont été sélectionnées (avec une couverture nuageuse très faible) entre le 19/04/2018 et le 05/12/2019 (liste exhaustive : 2018/04/19, 2018/06/23, 2018/08/02, 2018/09/26, 2019/02/23, 2019/03/20, 2019/03/30, 2019/05/14, 2019/06/18, 2019/08/22, 2019/12/05). Cette série temporelle couvrant l'ensemble des sites, une version de cartographie Sentinel-2 a été produite pour tous les sites d'étude.

Images SPOT : deux scènes SPOT (05/10/2018 et 13/04/2019) ont été utilisée dans cette étude, ces scènes couvrant l'ensemble des sites. Ces images SPOT ont une résolution spatiale de 5 m en multi-spectral et 1.5 m en panchromatique. La disponibilité de ces deux sources d'information nous a permis de procéder à des opérations de fusion d'images (pansharpening) et ainsi de ramener la résolution multispectrale à 1.5 m. L'effet de cette fusion est observable dans la figure suivante (Figure 6).

MNT (Modèles Numériques de Terrain) : des modèles numériques de terrain ont aussi été utilisés dans différents tests comme variables explicatives (au même niveau que les bandes spectrales des images satellitaires). Pour la Leyre, un MNT issu d'une acquisition LIDAR pour le PNR Landes de Gascogne (couverture du site partielle) d'une résolution de 0.5 m a été utilisée (sa résolution a été ramenée à 1.5 m pour être utilisée avec les images SPOT). Un extrait de ce MNT est présenté en figure 6. Pour les sites des Grands Lacs, le MNT RGE ALTI V2 à 1 m de résolution a été mis à disposition par le CBNSA. De la même façon, il a été ramené à 1.5 m de résolution pour être utilisé avec les images SPOT.

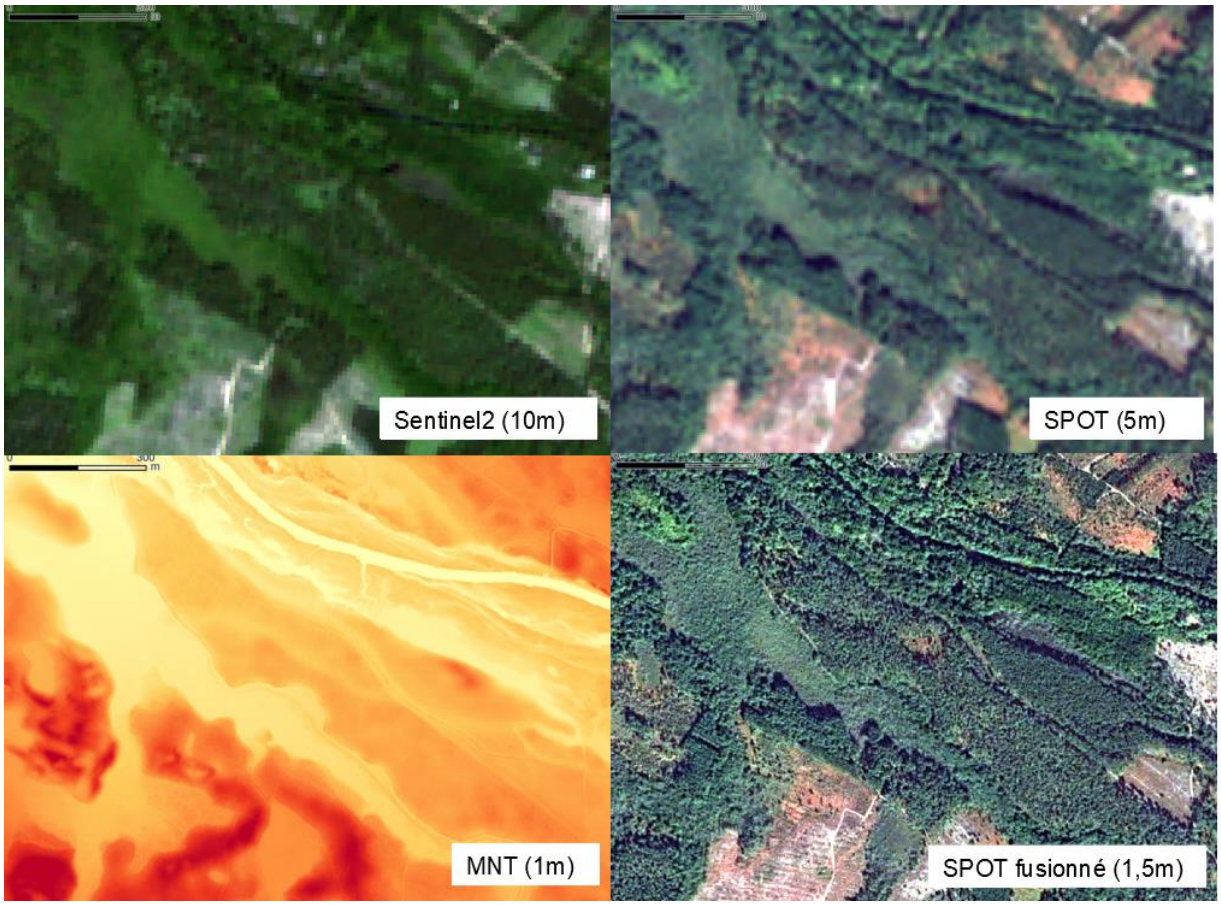

Figure 6. Présentation des différentes données spatiales et topographiques utilisées pour la cartographie des habitats naturels des sites d'étude.

- Images Pléiades : Pour les sites des Grands Lacs, un ensemble de petites scènes Pléiades ont pu être récupérées via GEOSUD. Ces scènes partielles (présentées figure 7) ont été combinées au mieux pour produire une mosaïque d'images couvrant tout le site pour l'été 2020. Cette mosaïque sera ajoutée à la série temporelle SPOT (et donc rééchantillonnées à 1.5 m) en permettant ainsi d'y ajouter une scène pour la période estivale.

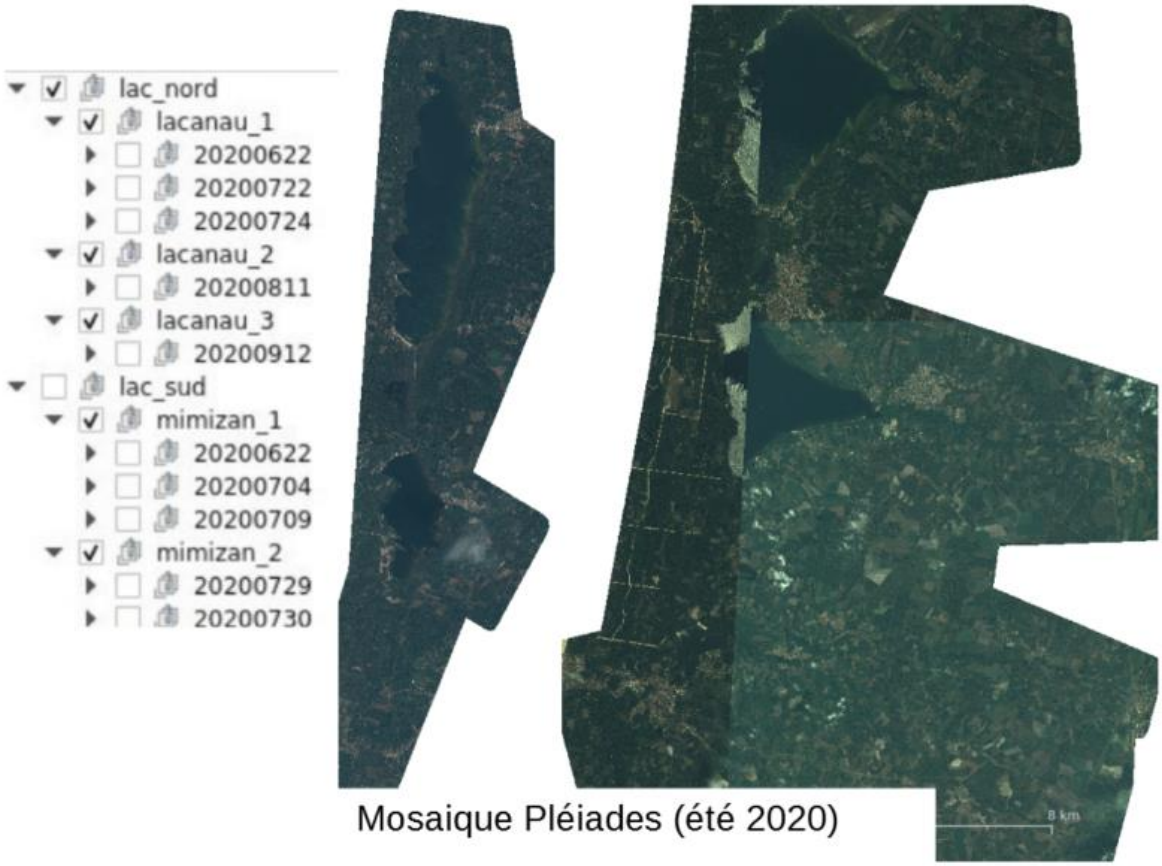

Figure 7. Présentation de la mosaïque Pléiades obtenue pour l'été 2020, site des Grands Lacs.

La constitution de séries temporelles d'images pertinentes pour notre étude a donc été délicate et nous a poussé à nous adapter. A défaut de travailler avec des séries temporelles Pléiades, nous avons déroulé le procédé de cartographie Biocoast sur (i) une série temporelle dense Sentinel 2 (cela pour tous les sites), (ii) une série constituée de deux images SPOT pour la Leyre et (iii) une série mixte constituée de deux images SPOT et une image Pléiades pour les sites des Grands Lacs.

2.2.3.2 Données terrain : site de la Leyre

Dans un premier temps, la base de données d'apprentissage utilisée pour les premières versions de cartographie a été constituée de données de terrain fournies par le CBNSA, rattaché au niveau le plus fin de la classification phytosociologique. Ces données ont permis d'établir une typologie des habitats naturels visés et de produire des premiers résultats. Les habitats visés sont des habitats qui sont à priori susceptible d'être télédétectés (habitat suffisamment fréquent et d'une étendue spatiale suffisamment grande). L'analyse de ces résultats ainsi que l'analyse des échantillons présents dans la base de données a permis de cibler une campagne de terrain

complémentaire pour compléter des classes trop peu représentées et/ou mal prédites par les premiers modèles. La campagne de terrain a été menée par Jérôme Fouert du PNR Landes de Gascogne durant l'été 2019 en suivant le protocole décrit précédemment. Les données issues de ces campagnes ont été vérifiées et qualifiées par le CBNSA avant d'être ajoutées à la base de données d'apprentissage. Certains polygones supplémentaires ont été ajoutés par photo-interprétation, cela uniquement pour des classes simples à photo-interpréter. Le tableau 2 présente la typologie visée dans notre étude pour le site de la Leyre.

Tableau 2. Présentation de la typologie pour la cartographie des habitats du site de Leyre et nombre d'échantillons par classe (après la campagne de terrain de 2019).

Classes visées	Nb échantillons	Classes regroupées
1-Forêt à Petite scutellaire et Bouleau pubescent	4	Aulnaies ou bétulaies marécageuses
2-Forêt à Laîche lisse et Aulne glutineux	4	
3-Forêt à Osmonde royale et Aulne glutineux	14	
4-Forêts riveraines des plaines alluviales	35	Aulnaies riveraines des plaines alluviales
5-Forêt à Valériane dioïque et Aulne glutineux, variante à Fraxinus excelsior	9	
6-Forêt à Fragon et Frêne	10	Frênaie-chênaie riveraine des plaines alluviales
7-Forêt à Viorne obier et Chêne pédonculé	20	Chênaie (-charmaie) à Viorne obier à engorgement voire inondation hivernale, des moyennes vallées
8-Forêt à Moline bleue et Bouleau pubescent	4	Forêt à Moline bleue et Bouleau pubescent
9-Chênaie pédonculée à Molinie bleue	22	Chênaie pédonculée à Molinie bleue
10-1 Chênaie pédonculée à Pin maritime et Chêne tauzin, avec Chêne tauzin dominant	21	Chênaie pédonculée à Pin maritime et Chêne tauzin, avec Chêne tauzin dominant
10-2 Chênaie pédonculée à Pin maritime et Chêne tauzin, avec Chêne tauzin non dominant	22	Chênaie pédonculée à Pin maritime et Chêne tauzin, avec Chêne tauzin non dominant
11-Fourré à sphaigne des marais et Saule roux	8	Fourrés hygrophiles, oligotrophiles à mésotrophiles à Saules et/ou Piment royal
12-Fourré à Iris des marais et Saule roux	10	
13-Fourré à Piment royal et Saule roux	9	
14-Fourré à Bruyère à balais et Piment royal	3	
15-Fourrés oligo à mésotrophiles thermo-atlantiques	5	Landes ou fourrés mésophiles
28-Lande à Avoine de Thore et Bruyère ciliée	8	
28p-Lande à Avoine de Thore et Bruyère ciliée, faciès à pin	2	Landes ou fourrés mésophiles, faciès à Pin maritime
27-Lande à Potentille des montagnes et Bruyère cendrée	11	Landes sèches
27p-Lande à Potentille des montagnes et Bruyère cendrée, faciès à pin	7	Landes sèches, faciès à Pin maritime
29-Lande à Bruyère à balais et Bruyère à quatre angles	25	Landes humides
20-Ourlet	1	Ourlets
21-Prairies hygrophiles, acidiphiles, oligotrophiles, atlantiques	22	Prairies
22-Prairie méso-eutrophile à eutrophile, à inondations de courte durée	26	
16-Prairie à Stellaire graminée et Flouve odorante	18	
18-Pelouse piétinée	2	
19-Pelouse à thérophytes	8	Pelouses d'annuelles
26-Tourbière/Bas Marais	18	Tourbières ou bas-marais
23-Roselière et 24 Cariçaies	7	Végétations palustres ou riveraines herbacées
25-Gazons amphibies	11	
30-Herbiers aquatiques	25	
Somme	391	

On peut observer que la typologie des classes visées est encore très fine et qu'un grand nombre de classes ont une quantité d'échantillons très faible. Les cartographies produites avec ce niveau de typologie n'ont pas été satisfaisantes car très bruitées et difficiles à interpréter. Un travail de regroupement de certaines classes a donc été mené par le CBNSA a posteriori afin de produire des cartes moins précises mais plus robustes.

2.2.3.3 Données terrain : site des Grands Lacs

Comme pour le site de la Leyre, des données d'entrainement ont été produites sur la base des échantillons fournis par le CBNSA et sur la typologie déterminée pour ces milieux. Ces données ont été analysées et leurs carences ciblées pour guider une campagne de terrain complémentaire durant l'été 2020 (menée par Estelle Jadot et Claire Betbeder). Ces données complémentaires ont été vérifiées et qualifiées par le CBNSA. Certains polygones supplémentaires ont été ajoutés par photo-interprétation, cela uniquement pour des classes simples à photo-interpréter. Différents niveaux de typologie ont été testés. Le tableau 5 présente la typologie finale conservée et le nombre d'échantillons correspondants par classe.

Tableau 3. Présentation de la typologie pour la cartographie des habitats des sites des Grands Lacs et nombre d'échantillons par classe (après la campagne de terrain de 2020).

Groupe_4	Nbre ech par classe
Aulnaies chenaies riveraines des plaines alluviales	9
Aulnaies et boulaies marecageuses	29
Autres herbiers aquatiques a feuilles flottantes	9
Autres roselieres	15
Bas-marais acidiclines	23
Bas-marais acidiphiles	30
Boulaies hygrophiles acidiphiles a Molinie bleue	8
Caricaies acidiclines a Iris des marais et Laiche elevee	13
Caricaies acidiphiles a Osmunde royale et Laiche paniculee	14
Chenaies-frenaies-charmaies mesohygrophiles	6
Chenaies mesophiles acidiphiles a Chene pedoncule et Pin maritime	34
Chenaies mesoxerophiles basiphiles a Chene vert et Pin maritime	5
Chenaies pedonculees hygrophiles acidiphiles a Molinie bleue	8
Cladiaies a Molinie bleue	45
Eaux libres sans vegetation	121
Fourres acidiphiles hygrophiles	15
Fourres acidiphiles marecageux	23
Fourres acidiphiles mesophiles	4
Gazons amphibies acidiclines	96
Gazons amphibies acidiphiles	37
Hauts-marais	5
Herbiers aquatiques a Characees	17
Herbiers aquatiques a Egerie dense ou a Grand lagarosiphon	4
Herbiers aquatiques a Jussies	15
Herbiers aquatiques a Nenuphar jaune	16
Herbiers aquatiques acidiclines a feuilles immergees	10
Landes hygrophiles	37
Landes mesohygrophiles	13
Plantations de Pin maritime	27
Plantations de Robinier	2
Plantations dEucalyptus	1
Prairies mesohygrophiles acidiphiles a Brande et Molinie bleue	5
Prairies paratourbeuses acidiphiles a acidiclines hydrophiles	23
Prairies paratourbeuses acidiphiles a acidiclines hygrophiles	28
Roselieres a Scirpes	49
Tourbe nue	6
Zones terrestres non vegetalisees	38
TOTAL	840

Enfin, le tableau suivant présente cette typologie avec ses caractéristiques et correspondances. Il contient aussi l'information de dimension minimale des objets recherchés (approche sériale) pour chacune des classes. C'est cette information qui devra être utilisée pour tester une approche de post-traitement avancé.

Tableau 4 Présentation de la typologie et de ses caractéristiques pour la cartographie des habitats des sites des Grands Lacs ainsi que les dimensions minimales par classe.

Groupe_4	Serie	Ph	Humidite	Physionomie	Code_EUR	Taille_min
Aulnaies chenaies riveraines des plaines alluviales	D1_D2	Acidiphile a acidicline	Hygrophile	Foret semi_naturelle feuillus	91E0	2500
Aulnaies et boulaies marecageuses	C1_C2	Acidiphile a acidicline	Hydrophile	Forestier pionnier a dominance de feuillus	NC	2500
Autres herbiers aquatiques a feuilles flottantes	A1	Acidicline	Aquatique	Aquatique	NC	500
Autres roselieres	B3	Neutrocline	Amphibie	Roseliere	NC	500
Bas-marais acidiclines	C2	Acidicline	Hydrophile	Pelouse	7230	500
Bas-marais acidiphiles	C1	Acidiphile	Hydrophile	Pelouse	7140, 7150	500
Boulaies hygrophiles acidiphiles a Molinie bleue	D1	Acidiphile	Hygrophile	Foret semi_naturelle feuillus	NC	2500
Caricaies acidiclines a Iris des marais et Laiche elevee	C2	Acidicline	Hydrophile	Caricaie	NC	500
Caricaies acidiphiles a Osmunde royale et Laiche paniculee	C1	Acidiphile	Hydrophile	Caricaie	NC	500
Chenaies-frenaies-charmaies mesohygrophiles	E1	Acidiphile	Mesohygrophile	Foret semi_naturelle feuillus	NC	2500
Chenaies mesophiles acidiphiles a Chene pedoncule et Pin maritime	F1	Acidiphile	Mesophile	Foret semi_naturelle feuillus	[9230]	2500
Chenaies mesoxerophiles basiphiles a Chene vert et Pin maritime	G1	Basophile	Mesoxerophile	Foret semi_naturelle feuillus	2180	2500
Chenaies pedonculees hygrophiles acidiphiles a Molinie bleue	D1	Acidiphile	Hygrophile	Foret semi_naturelle feuillus	9190	2500
Cladiaies a Molinie bleue	C2	Acidicline	Hydrophile	Caricaie	7210	500
Eaux libres sans vegetation	A0	Acidicline	Aquatique	Minerale non vegetalisee	NC	250
Fourres acidiphiles hygrophiles	D1	Acidiphile	Hygrophile	Fourre haut	NC	1000
Fourres acidiphiles marecageux	C1	Acidiphile	Hydrophile	Fourre haut	NC	1000
Fourres acidiphiles mesophiles	F1	Acidiphile	Mesophile	Fourre haut	NC	1000
Gazons amphibies acidiclines	B2	Acidicline	Amphibie	Pelouse	3110	500
Gazons amphibies acidiphiles	B1	Acidiphile	Amphibie	Pelouse	3110	500
Hauts-marais	D1	Acidiphile	Hygrophile	Pelouse	7110	500
Herbiers aquatiques a Characees	A1	Acidicline	Aquatique	Aquatique	3140	500
Herbiers aquatiques a Egerie dense ou a Grand lagarosiphon	A2	Neutrocline	Aquatique	Aquatique	NC	500
Herbiers aquatiques a Jussies	A1	Acidicline	Aquatique	Aquatique	NC	500
Herbiers aquatiques a Nenuphar jaune	A2	Neutrocline	Aquatique	Aquatique	NC	500
Herbiers aquatiques acidiclines a feuilles immergees	A1	Acidicline	Aquatique	Aquatique	NC	500
Landes hygrophiles	D1	Acidiphile	Hygrophile	Fourre nain	4020	1000
Landes mesohygrophiles	E1	Acidiphile	Mesohygrophile	Fourre nain	4030	1000
Plantations de Pin maritime	ZND	ND	ND	Cultures	NC	2500
Plantations de Robinier	NC	ND	ND	Cultures	NC	2500
Plantations dEucalyptus	NC	ND	ND	Cultures	NC	2500
Prairies mesohygrophiles acidiphiles a Brande et Molinie bleue	E1	Acidiphile	Mesohygrophile	Prairie	6410	500
Prairies paratourbeuses acidiphiles a acidiclines hydrophiles	C1_C2	Acidiphile a acidicline	Hydrophile	Prairie	6410	500
Prairies paratourbeuses acidiphiles a acidiclines hygrophiles	D1_D2	Acidiphile a acidicline	Hygrophile	Prairie	6410	500
Roselieres a Scirpes	B2	Neutrocline	Amphibie	Roseliere	NC	500
Tourbe nue	B2	Acidicline	Amphibie	Minerale non vegetalisee	NC	1000
Zones terrestres non vegetalisees	ZND	ND	ND	Minerale non vegetalisee	[3130]	1000

2.3 Résultats et discussions

2.3.1 Site de la Leyre

Cette section présente les principaux résultats obtenus pour la cartographie des habitats naturels du site de la Leyre. Un grand nombre d'essais infructueux et de tests ont été réalisés, seuls les derniers tests les plus concluants sont présentés ici.

Pour l'évaluation des performances de prédiction, 50% des pixels de la base de données de référence sont tirés au hasard et utilisés pour l'apprentissage du modèle de classification. Ce modèle est ensuite appliqué sur les 50% de pixels restants. Ils sont ensuite comparés aux données de référence pour construire des matrices de confusion.

Nous avons évalué 3 types de prédiction :

- Les prédictions issues de la série temporelle Sentinel-2,
- Les prédictions issues de la série temporelle SPOT,
- Les prédictions issues de la série temporelle SPOT complétée par le lidar.

Les prédictions obtenues dans un premier temps sur la typologie complète (présentée dans le tableau 3) sont présentées ci-dessous pour les sources de données Sentinel-2 et Spot.

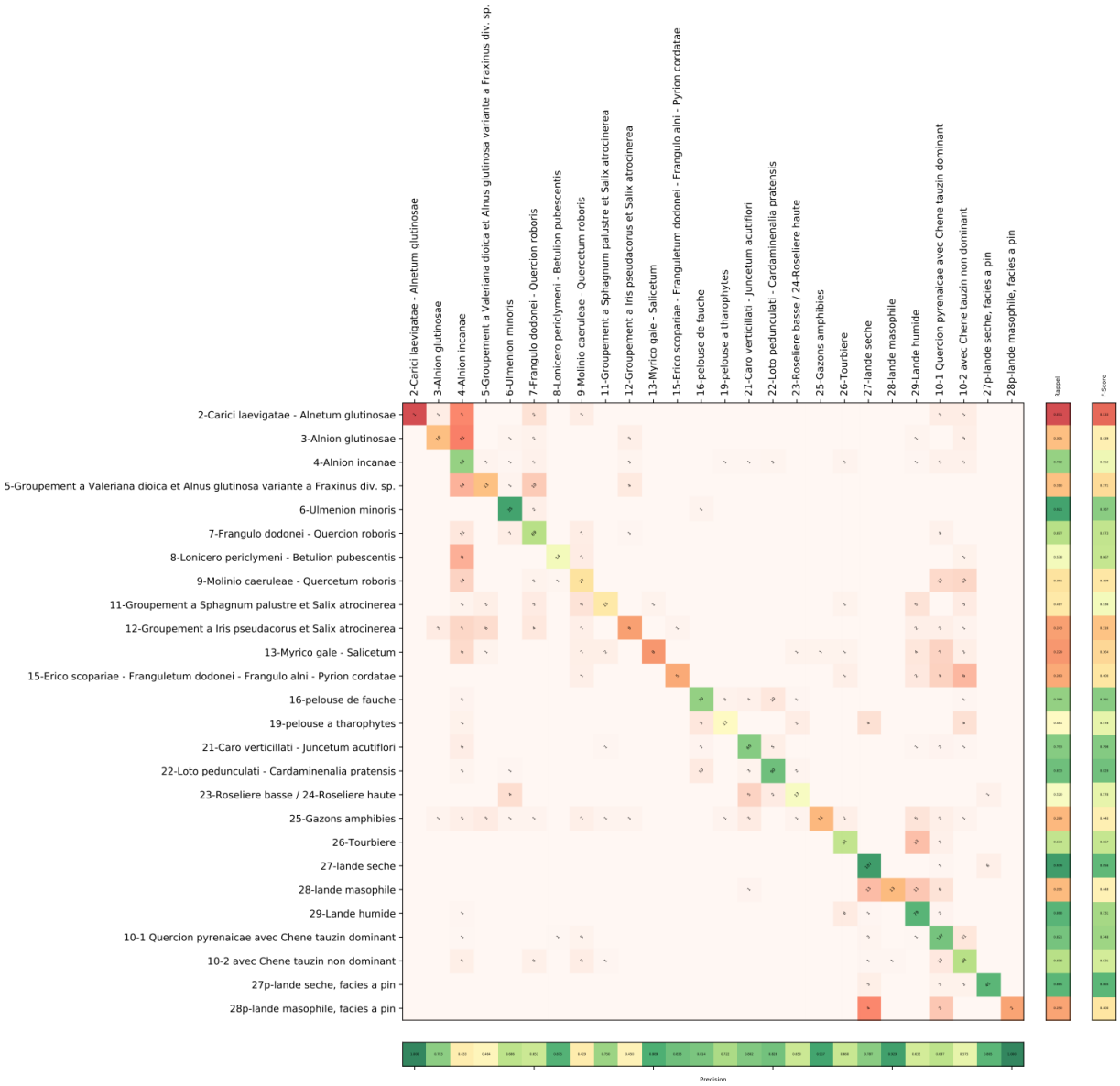

Figure 8 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2 sur la typologie complète. La précision globale obtenue est de 64%.

Figure 9 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2 sur la typologie complète. La précision globale obtenue est de 74%.

L'observation des matrices de confusion obtenues pour la caractérisation de la typologie complète présente de grandes difficultés à discriminer de manière efficace les classes visées. Les plus grandes confusions sont commises entre les différentes classes de boisement, que le système n'arrive pas à différencier de façon pertinente. L'analyse des cartographies produites nous a poussé à une phase de simplification de la typologie, afin d'obtenir des résultats plus robustes.

Les résultats présentés ci-dessous sont ceux obtenus après les groupements décrits plus haut. Les matrices de confusions sont présentées pour les cas déséquilibrés (respect de la distribution du nombre d'échantillons pour chaque classe). Les cas équilibrés (sélection du nombre d'échantillons de la plus petite classe pour toutes les classes) produisent des résultats incohérents du fait de la présence de classes très peu représentées.

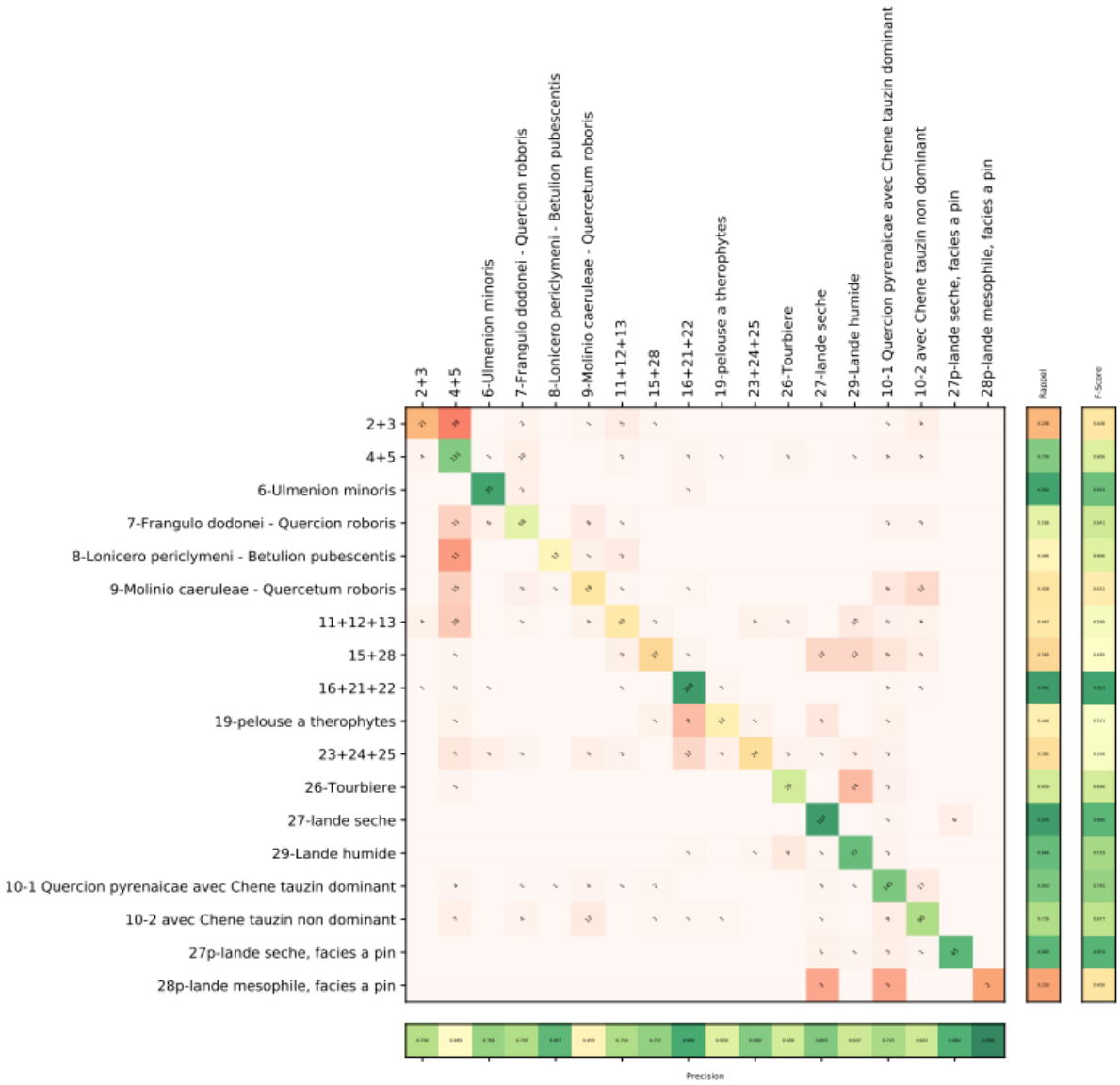

Figure 10 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2 sur la typologie simplifiée. La précision globale obtenue est de 70%.

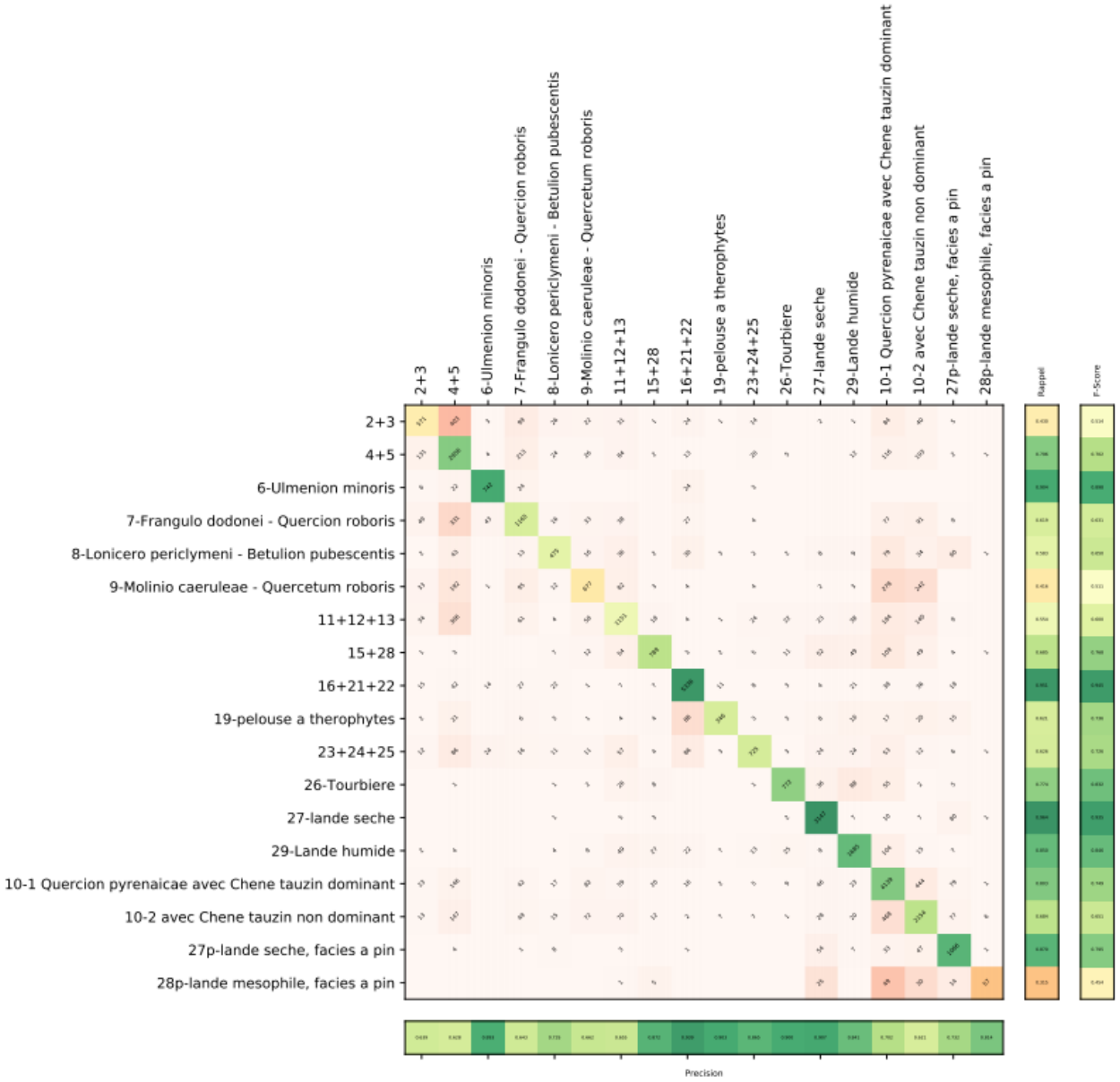

Figure 11 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT sur la typologie simplifiée. La précision globale obtenue est de 76%.

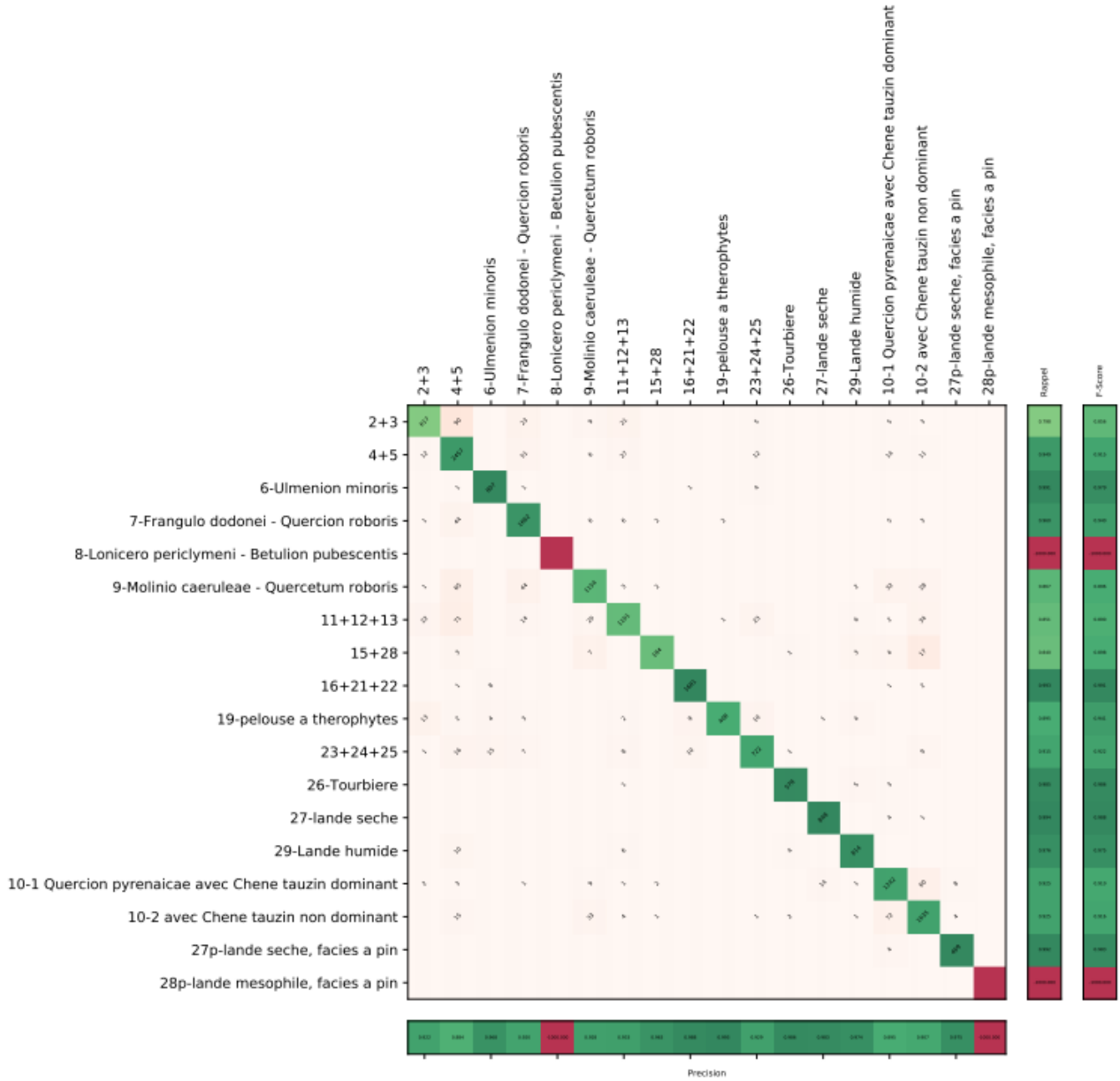

Figure 12 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT+LIDAR sur la typologie simplifiée. La précision globale obtenue est de 92%.

L'analyse des résultats présentés dans les figures de 10 à 12 est difficile. On peut observer que pour les cas Sentinel-2 et SPOT, si la simplification a amélioré les résultats globaux, les matrices de confusions montrent encore un nombre très important de confusions entre les classes. Cela montre la difficulté rencontrée par notre système pour la bonne reconnaissance de ces habitats.

La figure 12 est quant à elle trompeuse. En effet, les résultats semblent anormalement bons (malgré l'absence de certaines classes dans l'emprise du LIDAR). L'analyse visuelle des cartographies produites n'a pas su déterminer quelle source de données est la plus pertinente dans notre cas d'étude. Pour Sentinel-2, la pixellisation de la carte produite est jugée trop grossière et bon nombre d'habitats fins ne peuvent être reconnus. Les contours prédits sont simples et relativement cohérents. La production SPOT est quant à elle jugée trop bruitée mais elle reste intéressante, notamment au niveau multi-probabilités. Enfin, l'ajout de la donnée MNT semble mettre en évidence des contours plus cohérents pour certains habitats mais ne fait pas l'unanimité (les avis sont partagés sur l'information prédite la plus pertinente). Un exemple de prédiction sur les différentes sources de données est présenté dans la figure suivante (Figure 13).

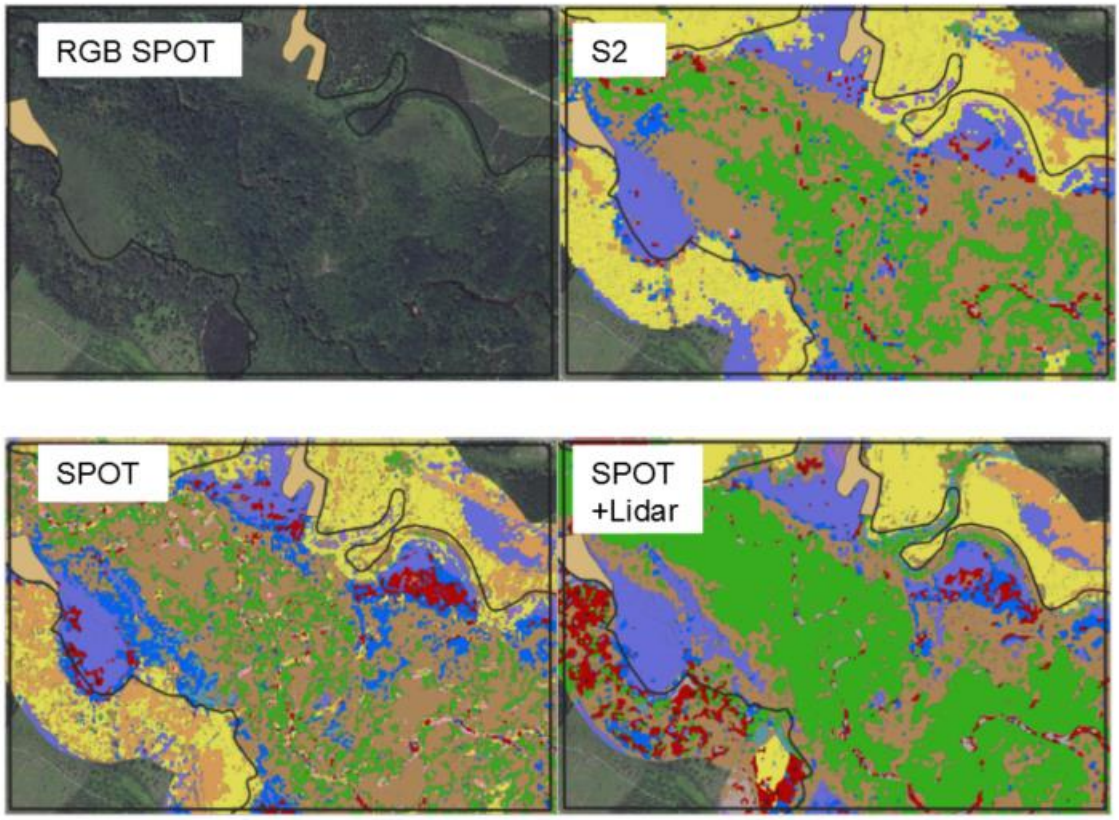

Figure 13 Observation des différentes prédictions sur une zone d'intérêt (Maille « les trestas »)

Différents niveaux de régularisation spatiale ont été testés et appliqués aux prédictions brutes afin de simplifier les cartographies produites. Pour Sentinel-2, une régularisation spatiale par filtre majoritaire de rayon 2 pixels a été choisies. Pour les productions issues de SPOT, une régularisation spatiale de 6 pixels de rayon a été retenue. Les cartographies produites pour ces 3 sources de

données ont donc été mises en forme et livrées. La figure suivante (figure 14) présente la cartographie produite à partir de la donnée SPOT (seule) à l'échelle du site complet de la Leyre. La figure 15 présente un extrait de l'atlas cartographique généré (1/10000)

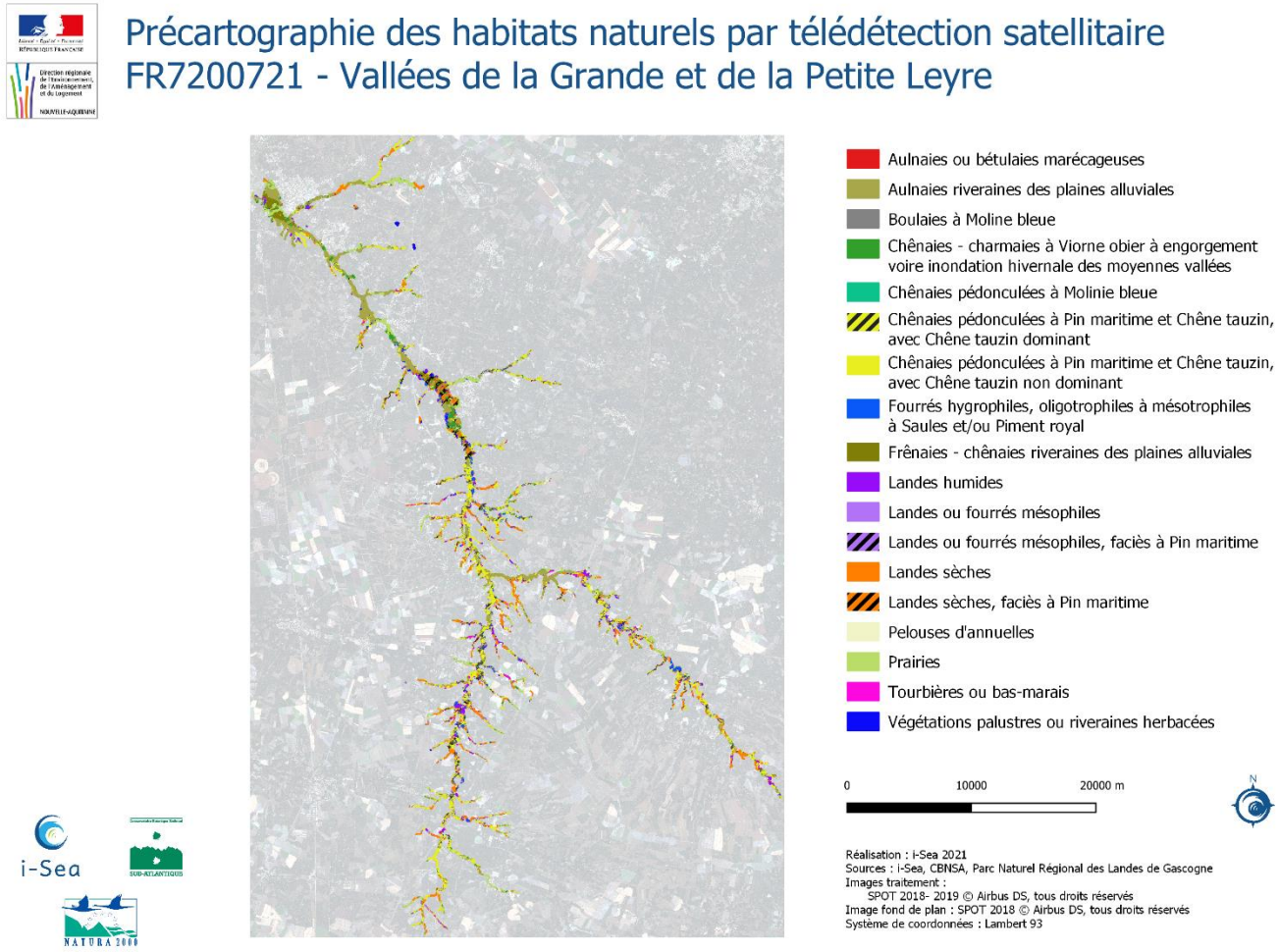

Figure 14 Pré-cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire du site de la Leyre

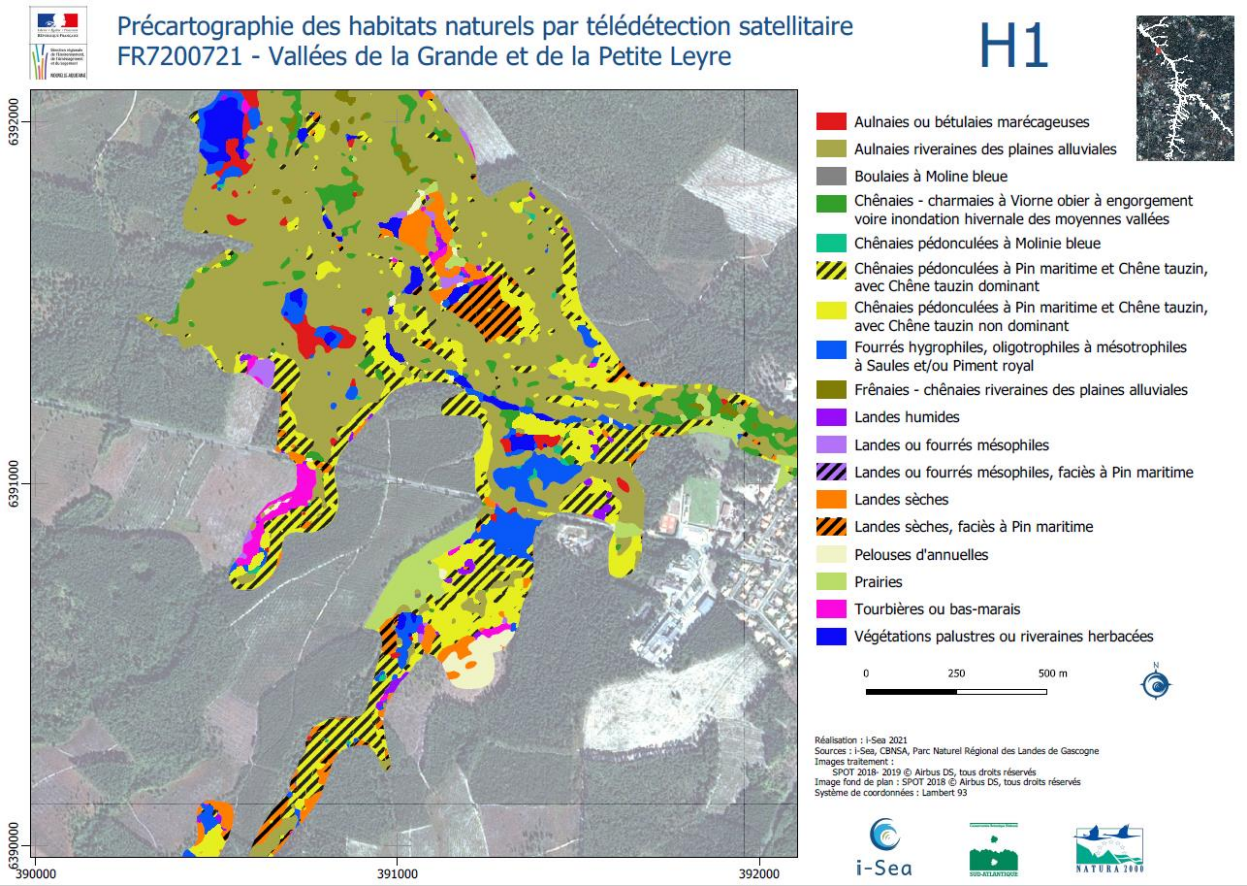

Figure 15 Extrait de l'atlas cartographique généré (1/1000) pour la cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire du site de la Leyre.

2.3.2 Site des Grands Lacs

Cette section présente les principaux résultats obtenus pour la cartographie des habitats naturels des sites des Grands Lacs. Comme pour la Leyre, un grand nombre d'essais infructueux et de tests ont été réalisés, seuls les derniers tests les plus concluants sont présentés ici.

Pour l'évaluation des performances de prédiction, 50% des pixels de la base de données de référence sont tirés au hasard et utilisés pour l'apprentissage du modèle de classification. Ce modèle est ensuite appliqué sur les 50% de pixels restants, ils sont ensuite comparés aux données de référence pour construire des matrices de confusion.

Nous avons évalué trois types de prédictions :

- Les prédictions issues de la série temporelle Sentinel-2
- Les prédictions issues de la série temporelle mixte SPOT/Pléiades
- Les prédictions issues de la série temporelle mixte SPOT/Pléiades complétée par le MNT

Les évaluations des performances de classification pour ces trois sources de données sont présentées ci-dessous (figures 16 à 18).

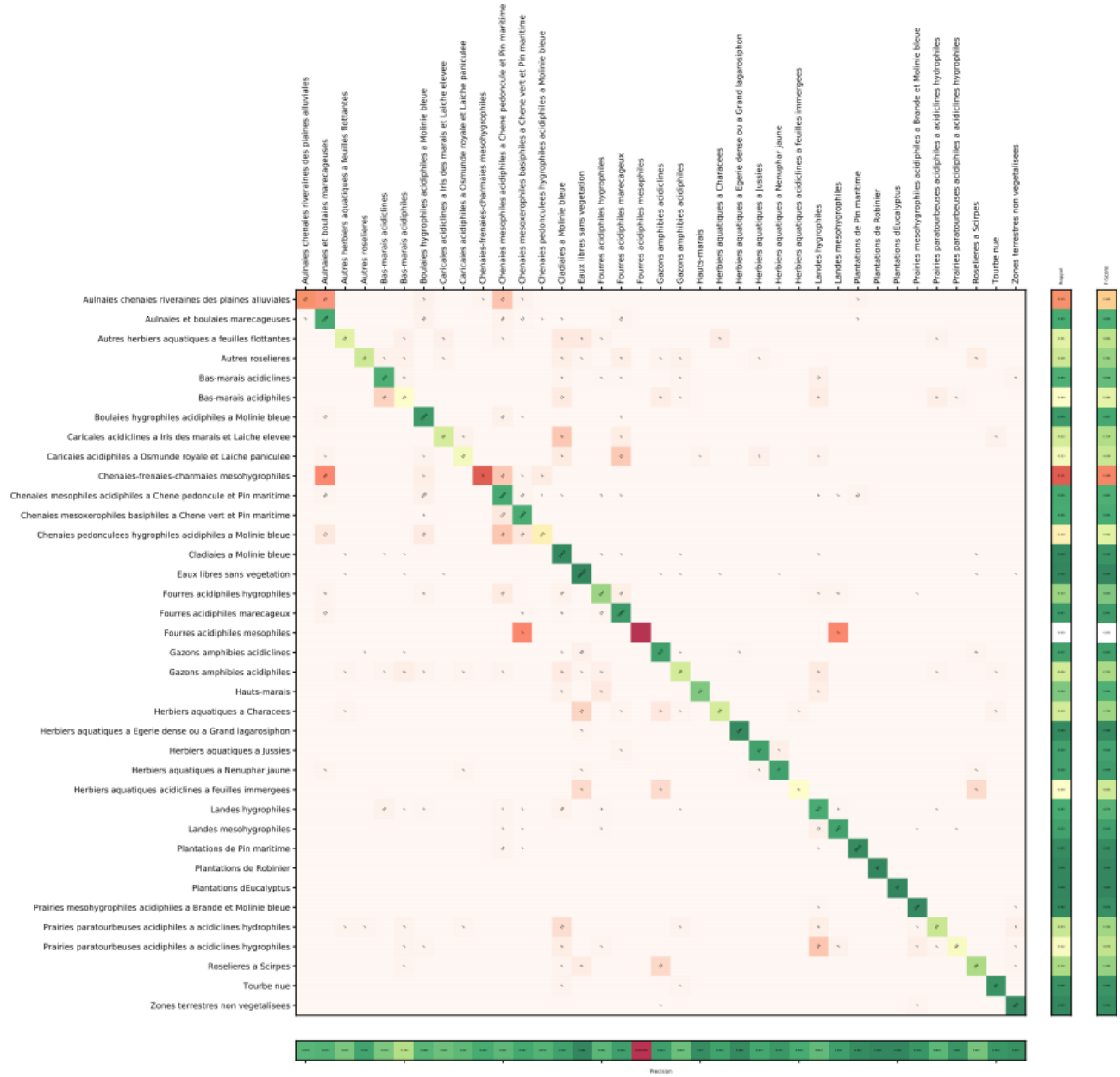

Figure 16 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle Sentinel-2. La précision globale obtenue est de 97% en mode déséquilibré et 57% en mode équilibré.

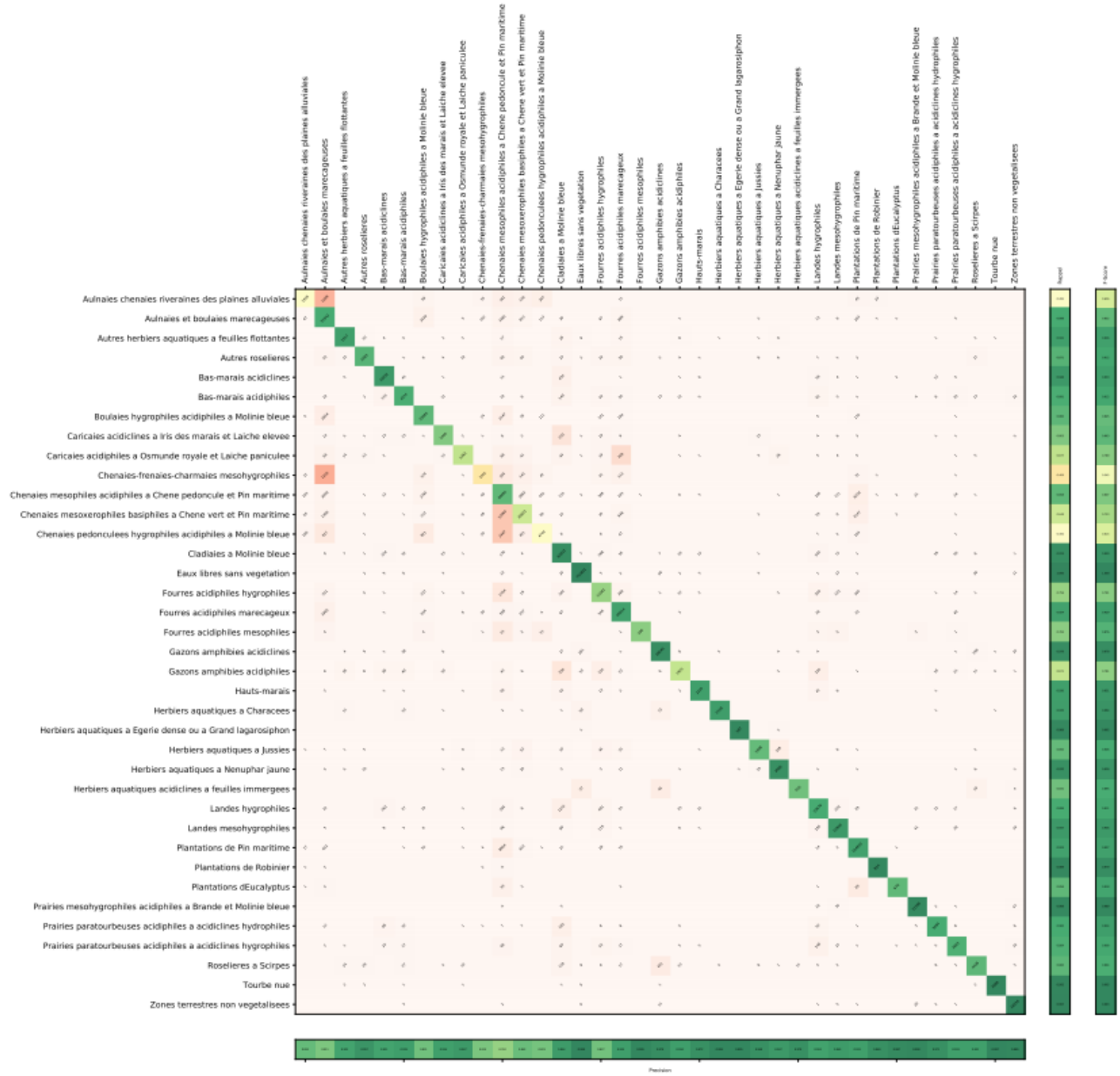

Figure 17 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT/Pléiades. La précision globale obtenue est de 94% en mode déséquilibré et 79% en mode équilibré.

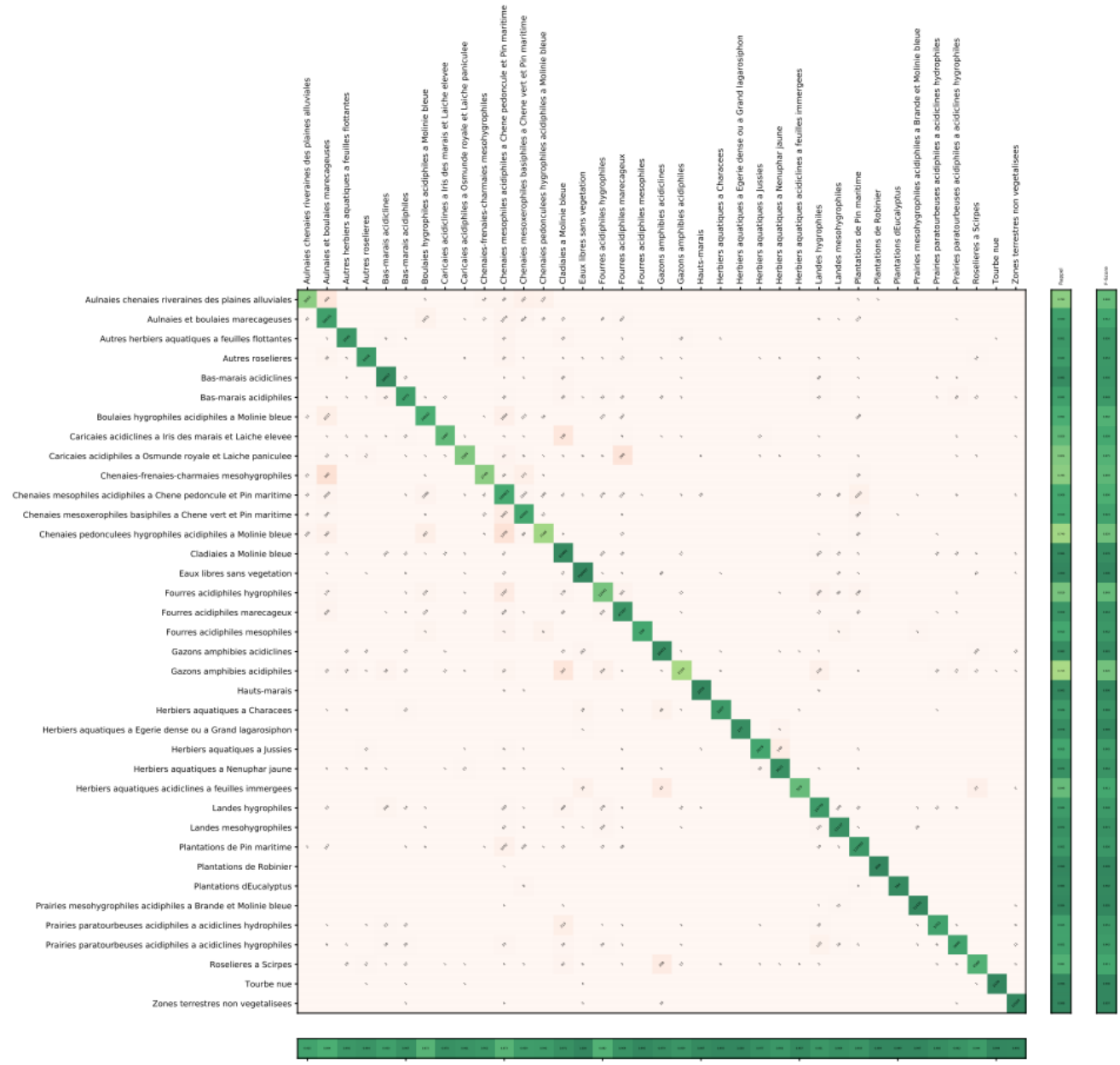

Figure 18 Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour le modèle SPOT/Pléiades. La précision globale obtenue est de 96% en mode déséquilibré et 83% en mode équilibré.

Les résultats obtenus pour la cartographie des habitats naturels des sites des Grands Lacs sont bien plus pertinents que pour la Leyre. La cartographie Sentinel 2 est trop grossière et ne permet pas de détecter des habitats très fins. Le très mauvais score obtenu en situation équilibré (57%) montre la difficulté à discriminer les classes visées. L'évaluation obtenue en mode déséquilibré (97%) doit être fortement biaisé par la présence de grands polygones dans des classes faciles à

discriminer. Il est important, d'après nous, de disposer des deux évaluations pour relativiser, dans certains cas, sur de « trop bons » scores. L'observation des scores obtenus avec les séries temporelles mixtes SPOT/Pléiades est quant à elle très encourageante (autour de 80% de bonne reconnaissance en mode équilibré), ce qui laisse penser que les cartographies produites peuvent être utilisées avec un niveau de confiance correct. L'apport du MNT semble bien améliorer les performances de prédiction. L'observation des cartographies produites va aussi dans ce sens. Cette dernière version a été sélectionnée et post-traitée en utilisant les règles de dimensions minimales par classe. Cette dernière étape permet d'obtenir une carte beaucoup plus simple et lisible. Il apparait alors que cette approche de post-traitement innovante est bien adaptée à notre problème de cartographie. Les figures suivantes présentent des extraits des résultats obtenus.

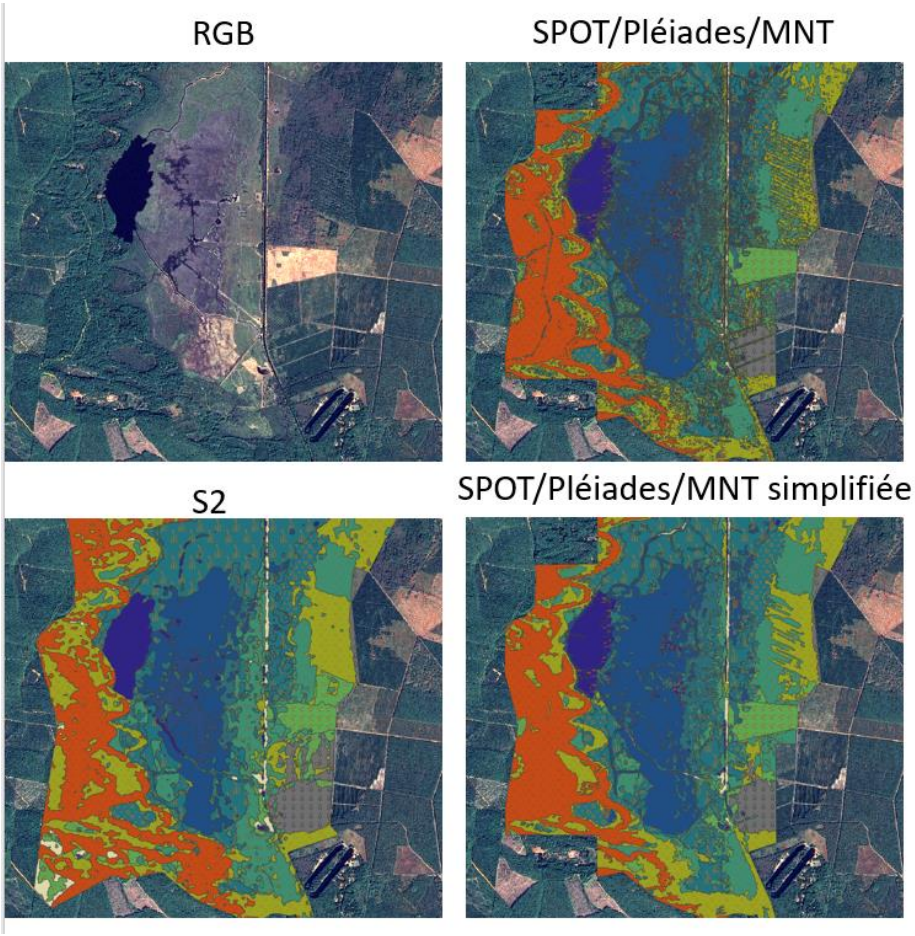

Figure 19 Observation des résultats de classification obtenus sur une région d'intérêt pour Sentinel-2 ainsi que pour SPOT/Pléiades/MNT dans sa version brute et dans sa version simplifiée.

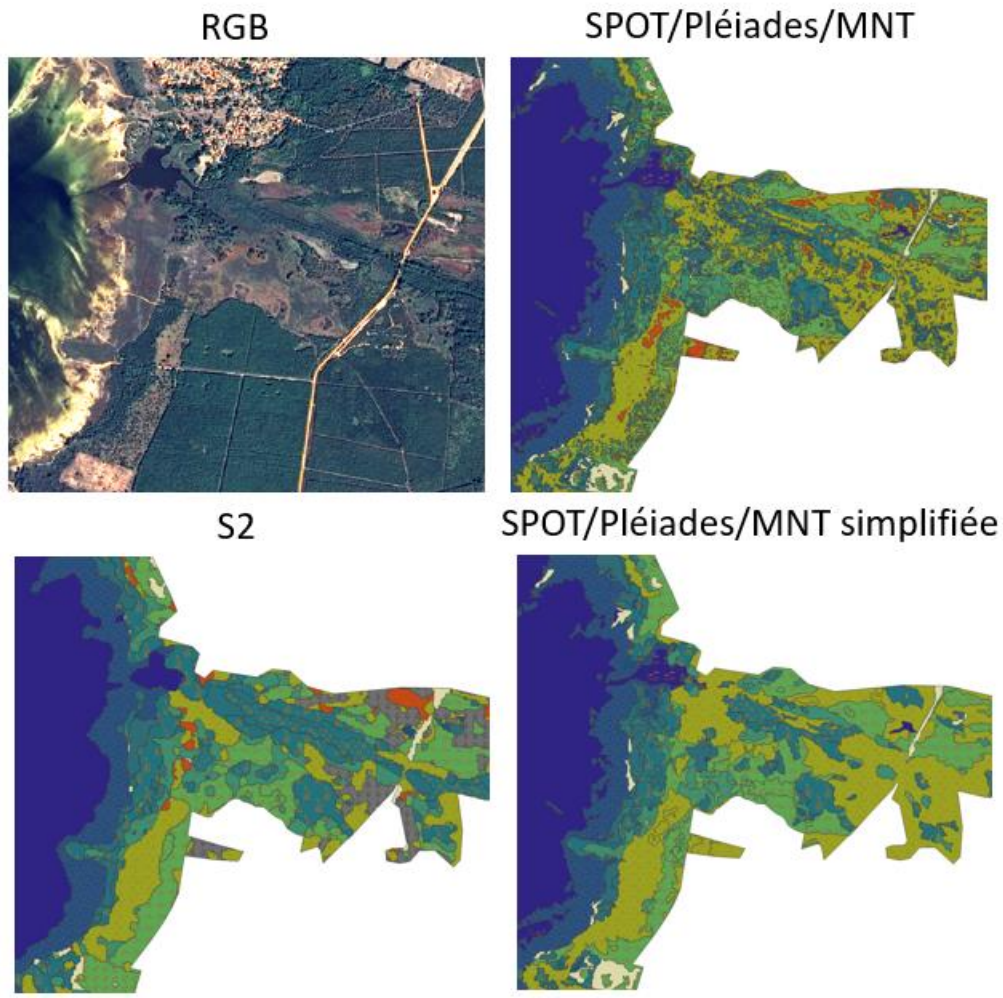

Figure 20 Observation des résultats de classification obtenus sur une région d'intérêt pour Sentinel-2 ainsi que pour SPOT/Pléiades/MNT dans sa version brute et dans sa version simplifiée.

Les cartographies complètes obtenues avec la source SPOT/Pléiades/MNT simplifiée sont présentées dans les figures suivantes.

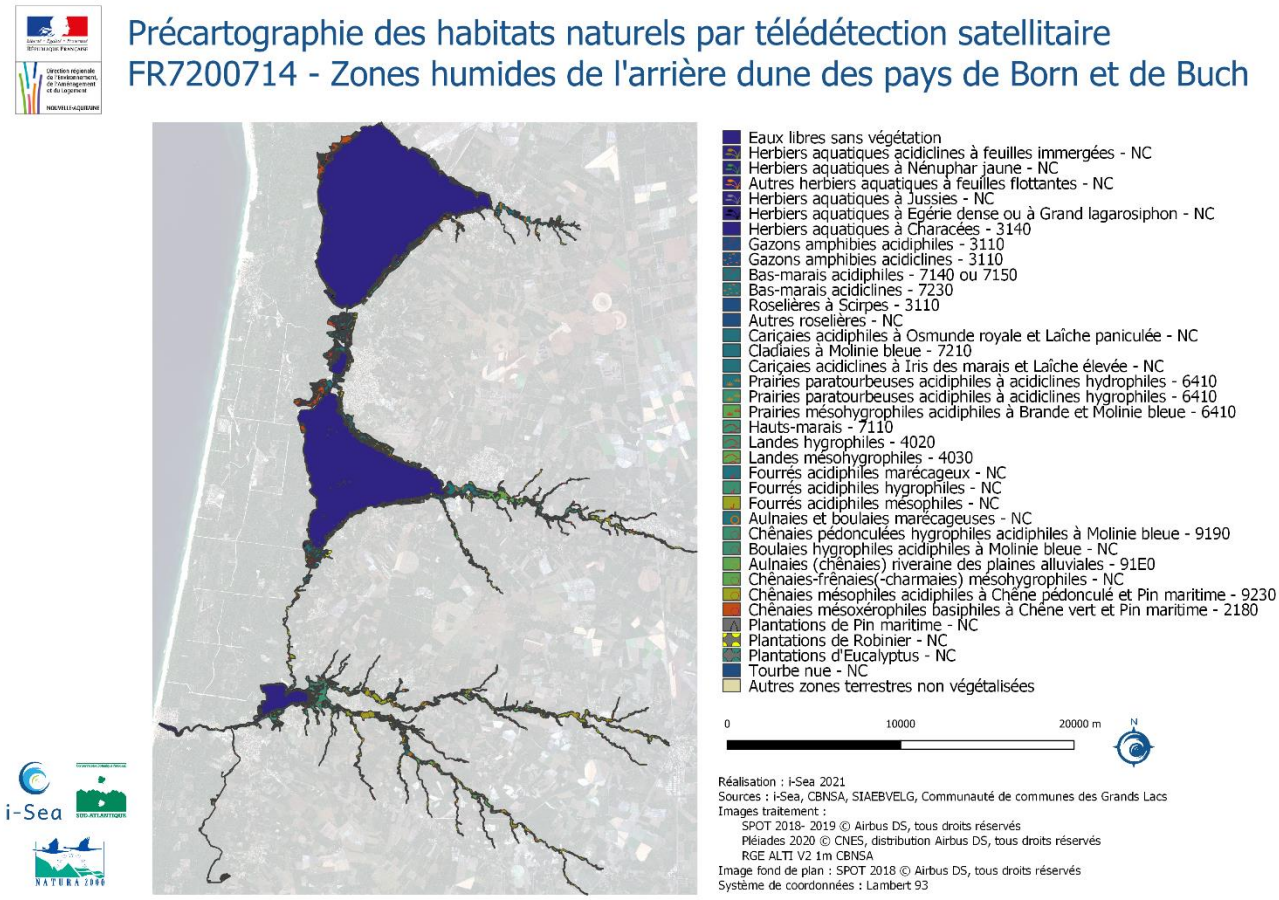

Figure 21 : Pré-cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire, site « lac Nord ».

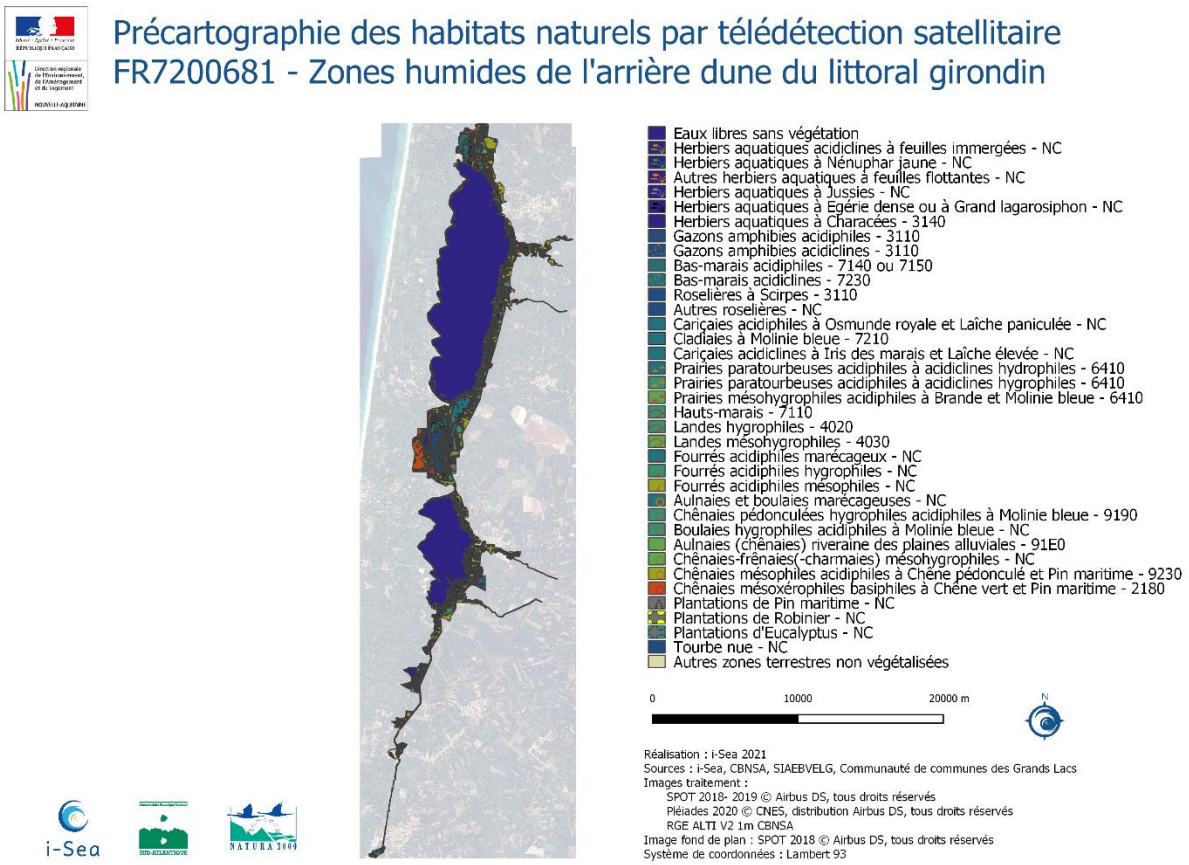

Figure 22 Pré-cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire, site « lac Sud ».

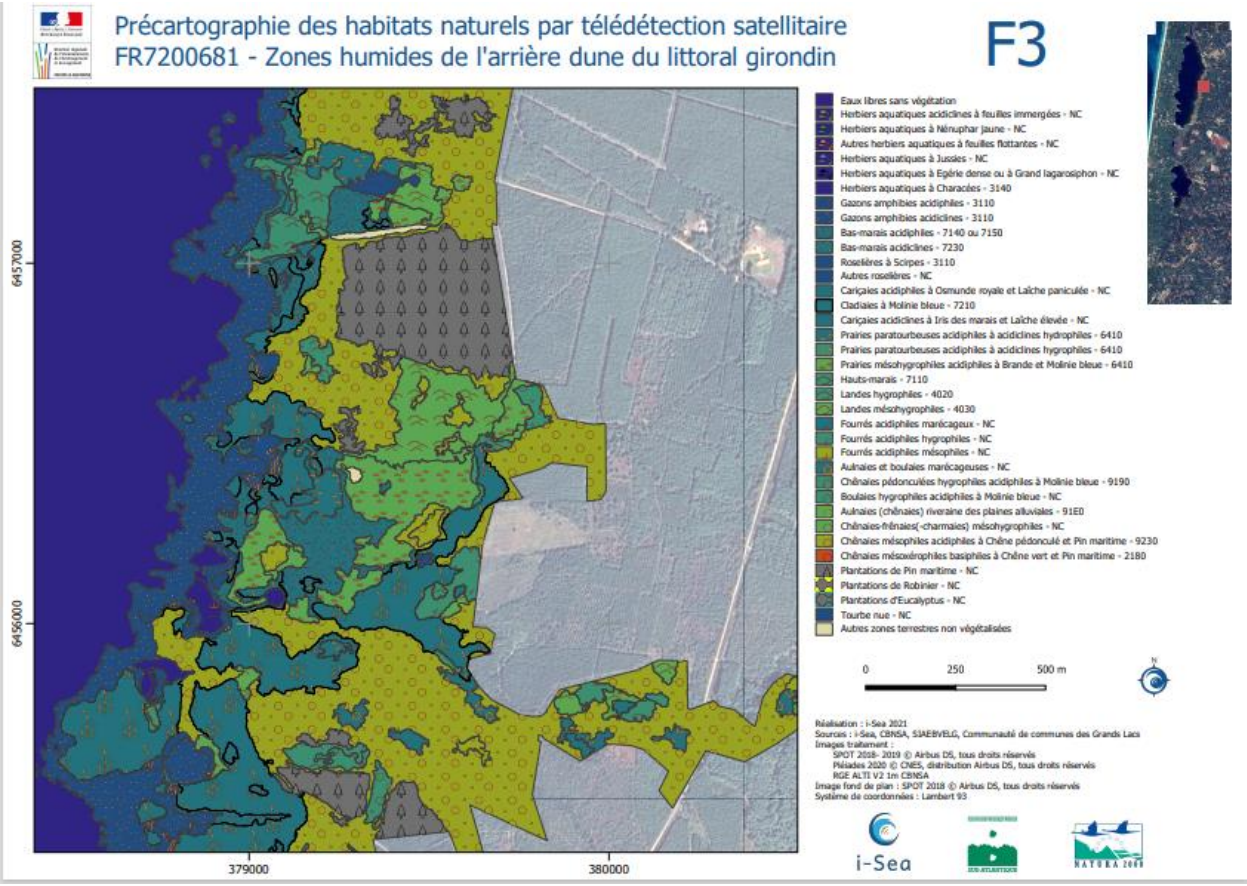

Figure 23 Extrait de l'atlas cartographique généré (1/1000) pour la cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire du site des Grands Lacs.

2.4 Conclusions et perspectives

La production des pré-cartographies des habitats naturels s'est déroulée de façon itérative selon le processus Biocoast déjà bien éprouvé sur des milieux naturels littoraux. Pour l'ensemble des sites cartographiés, une première version a été produite sur la base de données de terrain du CBNSA déjà existantes. De nombreux aller-retours et discussions ont été menés entre le CBNSA, les gestionnaires des sites et i-Sea pour arriver aux résultats les plus satisfaisants possibles. Cette approche a nécessité un effort important de la part de chacun pour produire des informations complémentaires mais aussi pour analyser, critiquer les résultats intermédiaires et ainsi progresser vers la pré-cartographie la plus aboutie possible. Bien entendu, cet effort et ces échanges devraient pouvoir continuer au-delà du présent projet pour approfondir les résultats (carte des habitats d'intérêt communautaire et carte des séries de végétations) et trouver des solutions pour les milieux les moins bien détectés.

Une des difficultés principales de l'étude a été la constitution de séries temporelles d'images satellitaires. Si Sentinel-2 permet une couverture à large échelle avec une haute fréquence temporelle, sa résolution de 10 m ne permet pas d'accéder aux habitats les plus fins, elle permet cependant d'obtenir des contours simples et relativement cohérents. Nous n'avons pas eu la chance de pouvoir constituer une série temporelle Pléiades et par conséquent nous n'avons pas pu explorer le potentiel de la THR pour la cartographie des milieux concernés. Nous avons pu travailler avec des images SPOT, ramenées à la résolution de 1.5 m (équivalent à Pléiades), mais nous n'avions que deux scènes et par conséquent une série temporelle très pauvre. Les résultats mitigés obtenus pour le site de la Leyre ne permettent donc pas de conclusions définitives. Une étude plus approfondie, avec une série temporelle plus dense et un jeu de données de terrain plus conséquent permettrait de mieux appréhender le potentiel de la télédétection pour la cartographie des milieux fermés. Pour les milieux plus ouverts (et donc plus accessibles par télédétection), comme sur les sites des Grands Lacs, les résultats sont beaucoup plus concluants. Il faut rappeler ici que ce site a bénéficié d'une image d'été supplémentaire (mosaïque Pléiades 2020) qui a permis de compléter la série temporelle SPOT.

Les productions au niveau multi-probabilités constituent un apport méthodologique important pour l'interprétation et l'analyse des résultats. Elles sont une première expérience de l'usage de ce type d'information, mais cela reste à approfondir. Les premiers tests de post-traitements proposés pour le site des Grands Lacs sont concluants. Ils mériteraient eux aussi d'être approfondis en intégrant, dans les règles de décisions pour la simplification des polygones, des notions de topographie ou de prédiction multi-probabiliste.

Enfin, cette expérimentation a bien permis de produire, pour l'ensemble des sites concernés, des pré-cartographies (ou fond blanc) des habitats naturels remplissant ainsi les objectifs fixés. Ces pré-cartographies peuvent maintenant être retravaillées pour y inclure des habitats complexes non détectables par télédétection. Elles doivent aussi servir à guider des campagnes de vérification et de compléments d'informations dans des zones complexes où les résultats sont difficiles à interpréter.

3 OUTIL DE SUIVI DES RETOURNEMENTS DE PRAIRIE

3.1 Contexte et objectifs

Afin de contribuer à la préservation de l'état de conservation des prairies, la DREAL Nouvelle-Aquitaine a souhaité initier le développement d'un outil de surveillance opérationnel des retournements de prairie. Cet outil doit permettre de contribuer à la surveillance nationale de l'état de conservation de ces habitats d'intérêt communautaire. A terme, il devra aussi permettre d'évaluer rétroactivement l'évolution de ces habitats prairiaux afin d'appréhender l'ampleur du phénomène et d'identifier si des secteurs géographiques sont plus particulièrement touchés.

Dans un premier temps, nous avons proposé de travailler sur un premier démonstrateur basé sur l'usage des données Sentinel-2. Celles-ci, gratuites et acquises tous les 5 jours hors couvert nuageux, sont adaptées à la recherche de changements brutaux de signature spectrale comme ceux liés au retournement d'une prairie. La résolution spatiale de Sentinel-2 (10 m) est adaptée au suivi des prairies dont la surface est supérieure à 2 500 m² (5 x 5 pixels), soit 0,25 ha.

L'objectif de cette expérimentation est de développer et tester des méthodes automatiques pour la détection des retournements de prairie à partir de séries temporelles Sentinel-2. Inspirés des nombreux travaux en télédétection pour des questions notamment de coupes rases forestières (IRSTEA, guide méthodologique : détection et cartographie des coupes rases par télédétection satellitaire, 2015), nous avons décidé de travailler à partir de l'indice de végétation bien connu NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), indicateur classique de la végétation en télédétection. L'idée principale est donc de venir détecter des variations anormales de NDVI à l'échelle de la parcelle, ces variations brutales étant indicatrices de changements brutaux pour la végétation d'une parcelle. Nous visons des méthodes capables de fournir deux niveaux d'informations pour les gestionnaires :

- Une information « en temps réel », correspondant à des détections de retournements entre deux dates,
- Un bilan annuel ou périodique, ce dernier devant permettre d'observer et de caractériser différents comportements des prairies sur une période donnée.

3.2 Sites et données

Le sites Natura 2000 visés par l'expérimentation sont les suivants :

- FR7200680 - Marais du Bas Médoc,
- FR7200683 - Marais du Haut Médoc,
- FR7200684 - Marais de Braud-et-Saint-Louis et de Saint-Ciers-sur-Gironde.

Ce sont au total 30 000 ha qui sont visés par cette expérimentation.

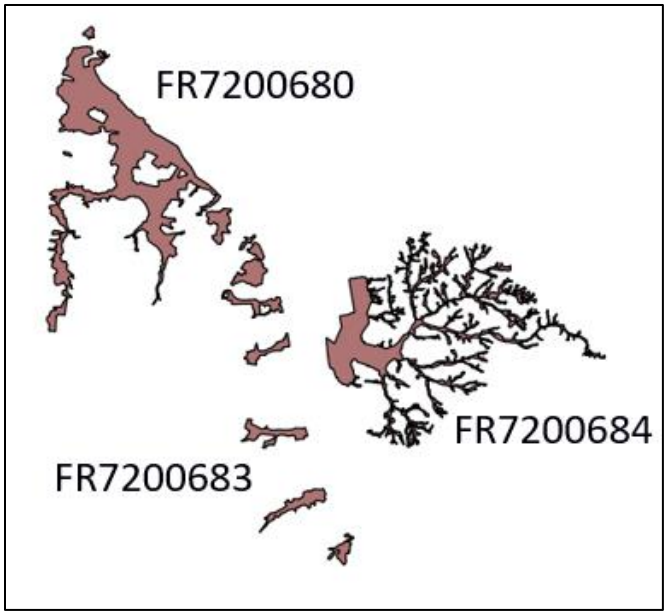

Figure 24 : Sites sélectionnés pour la surveillance des prairies

Un travail de collaboration importante a été mené entre I-Sea et les deux animateurs des sites Natura 2000 (Clémence Ménégazzi N2000 Pays Médoc et Gauthier Watelle N2000 CCEstuaire) afin de constituer une base de données de référence. Ces derniers ont croisé un nombre important de données recueillies afin d'extraire un ensemble de contours de prairies (polygones) pour l'étude. L'ensemble des données suivante a été utilisé pour construire ce « masque » des prairies pour les deux sites d'étude :

- Surface parcellaire graphique,
- RPG 2018,
- Cartographie Natura 2000,
- Maec 2017,
- DOCOB prairies,
- Enveloppe « prairies » sensibles.

Une fois ce masque constitué, des informations de référence sur le retournement des prairies ont été recherchées, sans succès. Nous avons donc commencé à travailler sur la méthodologie sans données de référence.

Après de nombreux efforts, seules 3 parcelles avec une information sur le retournement ont pu être récupérées par la DREAL, dont une parcelle très éloignée de nos sites d'étude. Les deux autres parcelles ont une indication sur un retournement ayant eu lieu fin 2018. Compte tenu de l'absence d'information de référence, nous avons cherché, en collaboration avec Clémence et Gauthier, une façon de trouver sur leurs sites des périodes de retournements pour les polygones connus. L'idée de rechercher les différences entre le dernier DOCOB et le RPG 2017 est apparue.

Pour le site N2000 CCEstuaire, deux parcelles ayant subi des changements en automne 2016 ont été trouvées. Pour le site des Marais du Médoc, un ensemble de parcelles ayant changé sur la période 2010-2017 a été sélectionné, sans toutefois avoir de date plus précise sur l'occurrence des retournements.

La base de données de référence que nous avons pu constituer est malheureusement insuffisante pour tester rigoureusement les méthodologies envisagées. L'absence de connaissance, à l'échelle de la région, sur ces questions de retournements de prairie justifie bien le besoin de la DREAL pour se doter d'un tel outil. Nous avons décidé, cela afin de pouvoir tester les méthodologies envisagées, d'étendre cette base de données de référence par photo-interprétation :

- Pour la série 2018, nous avons regardé le comportement des deux parcelles ayant subi un retournement et nous avons recherché d'autres parcelles de prairies dans la même zone (avec et sans retournement potentiel), 16 polygones et leurs dates de retournement potentiel ont été collectés.
- Pour la série 2016, de la même façon, nous avons recherché parmi les polygones de prairies des comportements « retournés » ou stable. 54 polygones et leurs dates de retournement potentiel ont été collectés.

Bien entendu, la photo-interprétation sur la base d'images Sentinel-2 n'est pas très précise et il ne faut pas aborder cette base de données complémentaire avec trop de confiance. L'objectif était de constituer, pour les deux séries 2016 et 2018, un ensemble de prairies ayant subi des changements brutaux et un ensemble de prairies n'ayant pas subi de changements visibles.

3.3 Approches méthodologiques explorées

Nous avons exploré trois sortes d'indicateurs, basé sur l'usage du NDVI des images Sentinel-2, permettant de répondre à des objectifs différents. Ces trois indicateurs reposent sur l'usage d'une base de données de statistiques de NDVI par parcelle. La figure ci-dessous (Figure 25) présente de façon simple les pistes envisagées :

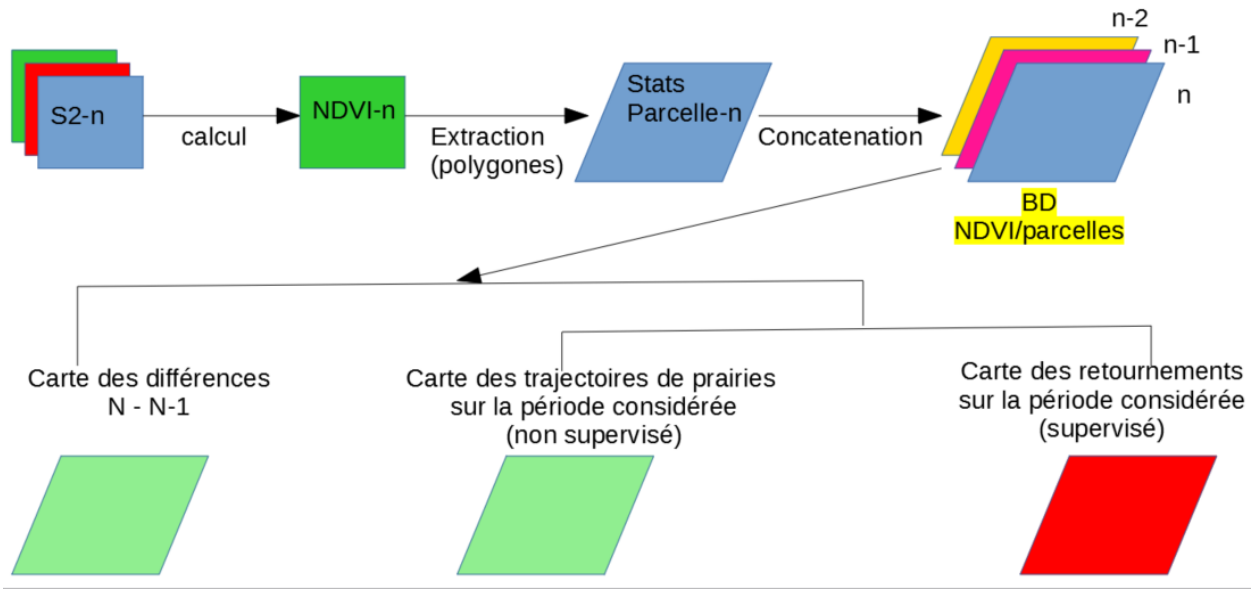

Figure 25 Représentation schématique de la construction des indicateurs de retournements de prairie.

Pour chaque nouvelle image Sentinel-2, le NDVI est calculé et les statistiques pour chacun des polygones (on suppose les polygones de prairies connus) sont conservées et concaténées dans une base de données contenant l'ensemble des dates ou scènes Sentinel-2. Cette base de données est ensuite utilisée à 3 différents niveaux pour produire trois différents types de cartes :

- La carte des différences entre deux dates : la production de cette carte ne nécessite pas d'informations *a priori*, le calcul est une simple différence des moyennes de NDVI pour chaque polygone. Cette carte des différences peut être générée de façon automatique dès la réception d'une nouvelle image Sentinel-2. Les parcelles présentant des différences importantes de NDVI avec l'image précédente sont directement mises en relief, à la façon d'une alarme. Le gestionnaire peut donc avoir régulièrement ce système d'alarme pour ensuite venir visiter les prairies concernées sur le terrain.

- La carte des trajectoires de prairies : cette carte est issue d'une classification non supervisée (K-Means) de la série temporelle de NDVI au niveau de la parcelle. Cette opération permet de grouper les parcelles ayant le même comportement temporel sur une période donnée. Cette approche a été testé et envisagée au début de l'étude car nous n'avions pas de données de référence. Elle permet de travailler « sans *a priori* » mais les différents comportements temporels obtenus sont difficiles à caractériser a posteriori.

- La carte des retournements : cette carte est la version supervisée de l'idée de carte des trajectoires. En se basant sur la connaissance d'un ensemble de parcelles de référence

ayant subi un retournement et d'un ensemble de parcelles n'ayant pas subi de retournement, il est alors possible d'entrainer un classifieur supervisé. Le classifieur ainsi entrainé sera capable, à partir des caractéristiques temporelles de NDVI au niveau parcelle, de prédire si la prairie a connu ou non un retournement sur la période considérée.

3.4 Premiers résultats

3.4.1 Exemple de cartographie des différences de NDVI

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur une série temporelle Sentinel-2 de 2019, les NDVI moyens par parcelle ont été calculés pour toutes les dates ainsi que les différences date à date pour chaque parcelle. Il est alors possible, pour chaque couple de date, d'observer et d'analyser la carte des différences de NDVI. Nous avons, dans cet exemple, reclassé les différences de NDVI de façon arbitraire. Les différences de NDVI négatives indiquent une déprise de la végétation tandis que les différences de NDVI positives indiquent une augmentation de l'activité végétale. La figure suivante présente un extrait de la carte des différences entre le 12/05/2019 et le 9/06/2019.

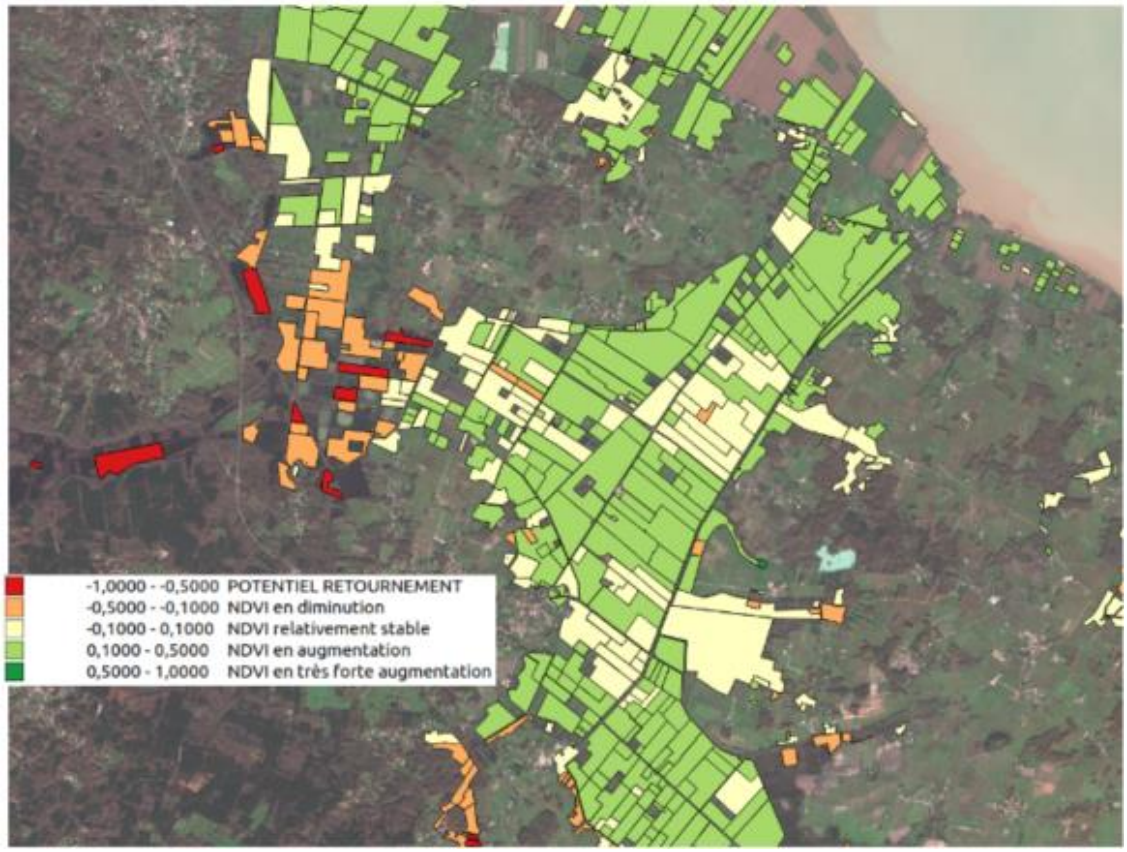

Figure 26 Exemple de cartographie des différences de NDVI Sentinel-2 (entre le 12/05/2019 et le 9/06/2019) pour des parcelles appartenant au masque prairies.

Dans l'exemple présenté ci-dessus, nous pouvons localiser en un coup d'œil les parcelles présentant des différences critiques entre les deux dates. Pour l'ensemble des parcelles en vert (évolution positive de l'activité végétale), il n'y a pas de potentiel retournement entre les deux dates. Les parcelles en rouge et en orange doivent quant à elles être visitées sur le terrain pour valider ou non le changement détecté. Ces cartographies, sans information *a priori*, sont simples et robustes, elles constituent un bon indicateur date à date des retournements potentiels de prairies et permettent un premier niveau de suivi en quasi-temps réel et à grande échelle.

3.4.2 Exemple de cartographie des trajectoires de prairies

Sur la base de la série temporelle constituée pour l'année 2019, nous avons testé la mise en place d'un algorithme de classification non supervisée (K-Means) pour classifier l'ensemble de la série temporelle des NDVI moyens par parcelle sur la période considérée. Nous avons cherché à constituer (de façon arbitraire) 4 classes de trajectoires temporelles de NDVI, ces classes seront compliquées à déterminer *a posteriori,* rendant l'utilité d'une telle information tout à fait discutable. Il faudrait pouvoir venir investiguer plus précisément la signification des groupes créés

par l'algorithme de clustering, mais, comme décrit précédemment, les données de référence disponibles pour cette étude ne permettent pas une telle analyse. Cette approche est toutefois à conserver pour de futurs travaux.

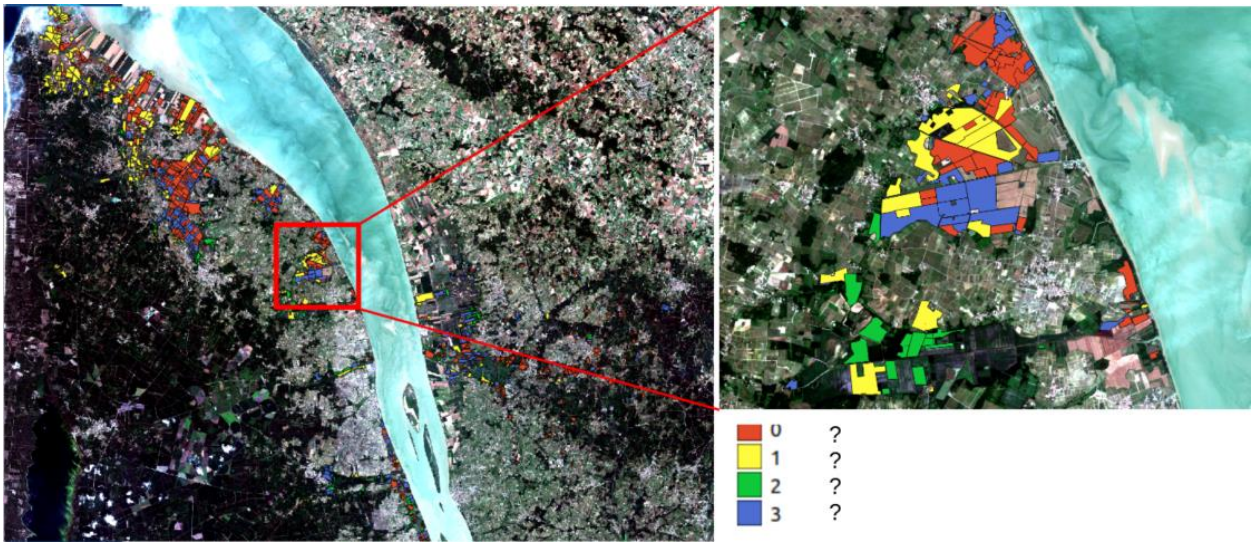

Figure 27 Exemple de cartographie des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles appartenant au masque 'prairies'.

3.4.3 Observation des trajectoires temporelles de NDVI pour les parcelles de référence

Afin d'exploiter au maximum les rares données de référence recueillies, nous avons constitué deux séries temporelles Sentinel-2 pour les années 2016 et 2018-2019 afin d'observer, dans un premier temps, les trajectoires des moyennes de NDVI sur les parcelles de références collectées.

La figure 27 présente les résultats obtenus pour les prairies avec un retournement connu en 2016. Pour les deux prairies présentées, nous pouvons observer une augmentation du NDVI entre le 24 avril et le 04 mai, ce qui semble correspondre à une augmentation de l'activité végétale. La prairie représentée par la courbe bleue a été détectée retournée entre le 30/11/2016 et le 18/02/2017 par le photo-interprète. Cette détection est confirmée par une variation significative dans la trajectoire du NDVI moyen pour cette parcelle, à cette période. Pour la parcelle orange, la trajectoire de NDVI montre une rupture brutale entre le 04/05/2016 et le 23/07/2016, ce qui correspond bien à la période de retournement estimée par le photo-interprète.

La figure 28 présente les résultats obtenus pour les prairies avec un retournement connu en 2018.

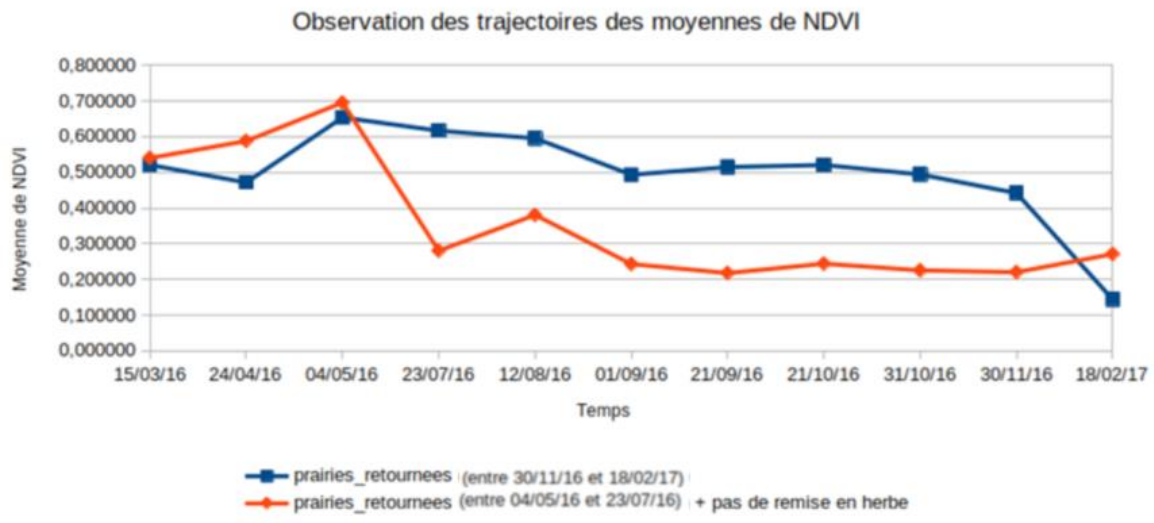

Figure 28 Observations des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles de référence ayant subi un retournement en 2016.

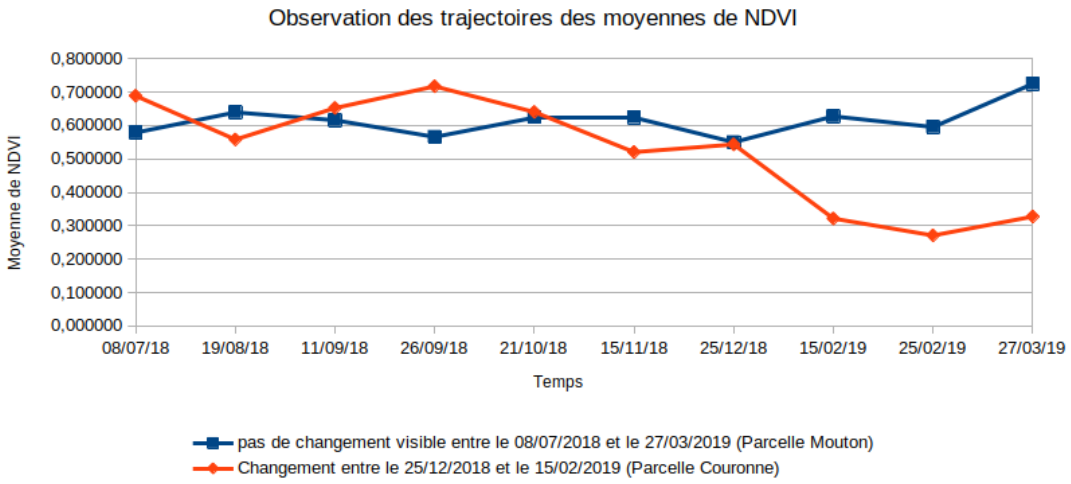

Figure 29 Observations des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles de référence ayant subi un retournement en 2018.

Enfin, nous avons tracé les trajectoires moyennes des NDVI pour l'ensemble des parcelles observées par photo-interprétation. Trois grands groupes se sont dégagés : (i) les parcelles ayant subi un retournement potentiel entre le 04/05/2016 et le 23/07/2016, (ii) les parcelles ayant subi un retournement potentiel entre le 23/07/2016 et le 12/08/2016, et enfin (iii) les parcelles pour lesquelles aucun retournement potentiel n'a été observé. Ces résultats sont présentés dans la figure 29.

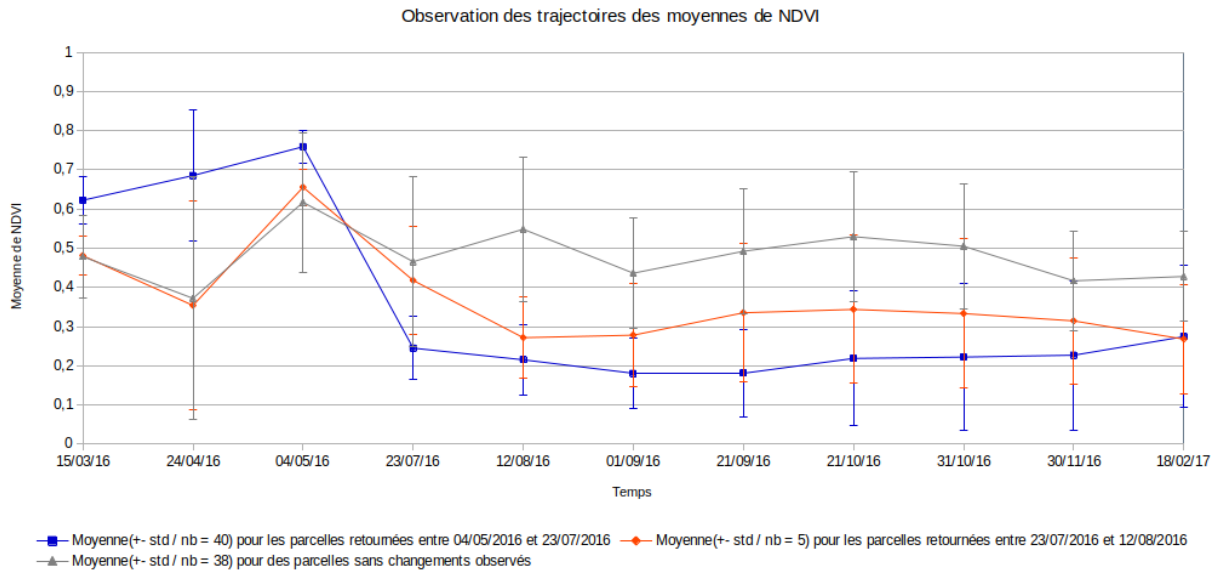

Figure 30 Observations des trajectoires de NDVI Sentinel-2 pour les parcelles de référence ayant subi un retournement en 2018.

Cette figure permet d'observer les deux grandes catégories de trajectoires de NDVI moyens. En gris, les parcelles n'ayant pas subi de retournement potentiel ont un comportement relativement stable. Si le NDVI connait un « pic d'activité chlorophyllienne » au mois de mai, il ne subit pas de rupture brutale pour le reste de l'année. Les changements brutaux sont quant à eux bien observables pour les deux autres groupes de parcelles avec des diminutions importante dans un temps court du NDVI.

Sur la base de ces travaux, la section suivante présente un premier test de classification supervisée de ces trajectoires de NDVI pour aboutir à une carte des retournements.

3.4.4 Exemple de cartographie des retournements potentiels de prairies

Des premiers tests de classification supervisée ont été menés sur la base du travail de photo-interprétation mené pour constituer une base de données de référence. Cette base de données n'étant pas qualifiée, les résultats obtenus sont à considérer avec une grande prudence. Ils sont ici donnés à titre d'exemple, pour éprouver la méthodologie mise en place.

Pour chacun des exercices (2016 et 2018), 50% des parcelles sont sélectionnées pour l'apprentissage d'un modèle de classification supervisée 'Random Forest'. Les 50% restants sont utilisés pour la validation par matrice de confusion. Nous avons choisi de donner en entrée du classifieur l'ensemble des caractéristiques de NDVI pour chaque parcelle, c'est-à-dire les valeurs

minimales et maximales, la moyenne et l'écart-type, afin de définir au mieux la distribution des valeurs de NDVI au sein du polygone. Ces statistiques sont donc concaténées pour toutes les dates. La figure suivante présente les résultats obtenus pour cet essai de classification supervisée.

2016	Changement	Pas de changement
Changement	**34**	**1**
Pas de changement	**4**	**15**
Précision globale :	**90%**	
2018	Changement	Pas de changement
Changement	**6**	**2**
Pas de changement	**2**	**6**
Précision globale :	**75%**	

Figure 31 Matrices de confusion obtenues pour la détection des changements (retournements potentiels) à partir des séries temporelles sur Sentinel-2 de 2016 et 2018.

Les premiers résultats sont encourageants mais ils nécessitent d'être approfondis avec une collecte importante de données qualifiées et vérifiées. Nous avons appliqué ce modèle de prédiction sur les parcelles constituant la base de données étiquetée par photo-interprétation et ainsi donner une idée des cartes pouvant être produites.

Figure 32 Exemple de cartographie des retournements potentiels sur Sentinel-2 de 2016 pour les parcelles appartenant à la base de données de référence.

Cette dernière étape a permis de dérouler jusqu'au bout la chaine de traitements d'images automatique pour la détection des retournements de prairie. A ce stade, il manque à appliquer notre méthodologie dans un test « grandeur nature » avec une base de données de référence suffisamment conséquente et robuste pour entrainer un modèle pertinent et cohérent à l'échelle de la Région.

3.5 Conclusions et perspectives

Cette expérimentation a permis de montrer le potentiel des séries temporelles des images Sentinel 2 pour le suivi des prairies et la détection des retournements. Nous avons pu développer et tester un premier démonstrateur, mais nous n'avons malheureusement pas pu l'éprouver avec un jeu de données de référence pertinent. Le développement s'est basé sur des approches non supervisées dans un premier temps, les cartes de différences de NDVI produisant déjà un niveau d'information très riche. Le potentiel d'approches basées sur l'usage du Machine Learning pour caractériser et discriminer différents types de trajectoires de prairies a été montré mais une analyse et une évaluation critique par des experts thématiques est nécessaire, sur la base de connaissances supplémentaires qu'il faudrait dès aujourd'hui centraliser et archiver.

Les approches proposées permettent la vision d'un démonstrateur opérationnel automatisé. Ce dernier pourrait, en routine sur un serveur déporté, télécharger et prétraiter chaque nouvelle acquisition Sentinel-2. Une qualification de la nébulosité et un masque de nuages serait automatiquement réalisé. Enfin, les statistiques de NDVI par parcelle seraient calculées et stockées dans une base de données. Cette base de données permettrait à tout moment de :

- Cartographier des différences entre deux dates et localiser des « alarmes »,
- Cartographier des retournements sur une période donnée (à définir : l'année, la saison etc.),
- Croiser des informations produites via SIG pour les experts thématiques et les gestionnaires de sites.

Cette expérience a donc permis de poser les bases méthodologiques pour un outil de suivi des retournements de prairie à l'échelle de la Région. Il reste à appliquer et évaluer ces méthodologies avec un jeu de données complet et pertinent afin d'obtenir un modèle robuste et générique de détection des retournements de prairie à partir des séries temporelles Sentinel-2.

4 BILAN DE L'ETUDE ET PRECONISATIONS

Cette étude a montré le potentiel de la télédétection satellitaire pour la cartographie des habitats naturels à l'échelle des grands sites naturels de la Région Nouvelle-Aquitaine. La méthodologie développée dans le cadre du projet Biocoast, basé sur l'usage d'algorithmes de Machine Learning et de données de référence de terrain pour classifier des séries temporelles d'images a été appliquée avec succès sur ces sites très étendus. Ceci a permis de produire des pré-cartographies pertinentes pour les gestionnaires. Une des limites principales rencontrées dans notre étude est la disponibilité des images THR Pléiades. Il est donc préconisé, pour ce type d'étude, de prévoir un budget pour la commande de ces images dans le cas où le service GEOSUD ne permettrait pas de les obtenir librement. Il n'y a cependant aucune limite ni contrainte pour travailler avec les images Sentinel-2.

Les résultats ont montré une bonne cohérence des prédictions pour les milieux ouverts (site des 'Grands Lacs'). Ils sont plus discutés pour les milieux fermés forestiers. Cette dernière observation est à nuancer compte tenu la série temporelle limitée utilisée pour la cartographie du site de la Leyre, ainsi que le nombre réduit d'échantillons par classe disponibles. Cet exercice est donc à approfondir pour le site de la Leyre. L'approche de cartographie itérative, qui est au cœur de notre procédé Biocoast, a permis, pour chacun des sites, d'améliorer au fur et à mesure les prédictions en ajoutant des échantillons relevés sur le terrain ou par photo-interprétation. Cette approche est à conserver pour de futurs travaux. Elle permet d'injecter au fur et mesure du « bon sens » de terrain et de la connaissance thématique. La qualité des prédictions est directement dépendante de la qualité et de la précision de la base de données d'apprentissage. Un effort important de qualification et de validation de ces bases de données naturalistes est donc essentiel pour ce type de travaux.

Des premiers tests de post-traitement avancés, basés sur l'usage de règles thématiques prédéfinies, ont suscité un grand intérêt et sont donc à poursuivre dans de futurs travaux. L'idée est de rendre les cartes le plus lisible possible tout en conservant au maximum la précision des contours prédits. Les informations prédites au niveau multi-probabilités pourraient aussi être intégrées à ces étapes de post-traitement ainsi que les informations sur la topographie fournies par le MNT. Ces approches, initiées dans ce projet, méritent d'être approfondies dans de futurs travaux.

Enfin, nous avons proposé une méthodologie simple et robuste pour produire des indicateurs de suivi des retournements de prairie à partir de séries temporelles d'images Sentinel-2. Ces approches ont été développées, implémentées et testées mais n'ont pas pu être appliquées avec rigueur par manque d'informations. Il est essentiel de collecter dès aujourd'hui les informations manquantes et évoquées dans ce rapport, à l'échelle de la Région Nouvelle-Aquitaine, sur la date et la localisation de retournements de prairie. Une fois une base de données de référence cohérente et pertinente constituée, il sera alors possible, sur la base de la

méthodologie proposée, de construire un modèle générique de détection des retournements de prairie à l'échelle de la Région.

5 BIBLIOGRAPHIE

Beguet, B., Guyon, D., Boukir, S., Chehata, N., 2014, Classification of forest structure using Very High Resolution Pléiades image texture, IEE IGARSS, 13-18 July, Québec, Canada.

Breiman L., 2001. Random forests. Machine Learning, 45(1), 5-32.

Breiman L., Friedman, J.H., Olsen, R.A., Stone, C.J., 1984. Classification and Regression trees. Wadsworth International Group, Belmont, CA.

Pal, M., 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. International Journal of Remote Sensing, 26(1), 217–222.

– Fin du document –