

Cartographie semi-automatisée des habitats naturels, semi-naturels et des espèces végétales des sites Natura 2000 Complexe lagunaire de Salses-Leucate

RAPPORT METHODOLOGIQUE

@ Laure Sirvent, CBN Med

FICHE DOCUMENTAIRE

Date	7/10/2021
Maitre d'ouvrage	SYNDICAT MIXTE RIVAGE SALSES-LEUCATE Mairie de Leucate Rue du Dr Sidras 11370 Leucate
Réalisation	i-Sea 25 rue Marcel Issartier 33700 Mérignac Site internet : http://i-sea.fr/fr/
Rédacteurs	Benoit Beguet : benoit.beguet@i-sea.fr Cécile Curti : cecile.curti@i-sea.fr Clara Gritti (CBN Med & CEFE CNRS): c.gritti@cbnmed.fr
Approbateur	Virginie Lafon : virginie.lafon@i-sea.fr
Citation	i-Sea 2021, Cartographie semi-automatisée des habitats naturels, semi naturels et des espèces végétales des sites N2000. Complexe lagunaire de Salse Leucate

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.....	5
2	Données et méthodes.....	7
2.1	Méthodes.....	7
2.1.1	Prospections terrain	7
2.1.2	Travail sur la typologie des habitats	9
2.1.3	Cartographie par classification d'image	10
2.2	Données initiales	14
2.2.1	Données images	14
2.2.2	Données terrain.....	15
3	Résultats.....	19
3.1	Typologies	19
3.2	Travail sur les zones d'habitats	25
3.3	Evaluation des classifications	25
3.4	Post-traitement « experts »	30
3.5	Présentation des résultats cartographiques	30
4	Conclusions et perspectives	36
5	Bibliographie	38

Liste des illustrations

Figure 1. Emprise du site d'étude.....	6
Figure 2. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain (format point).....	8
Figure 3. Matériel terrain	9
Figure 4. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement.....	10
Figure 5. Série d'images satellite utilisée pour la cartographie.	15
Figure 6. Carte de répartition des données d'apprentissage sur le site d'étude.....	16
Figure 7. Localisation des espèces d'intérêt communautaire	17
Figure 8. Localisation des espèces végétales protégées au niveau national et/ou régional..	18
Figure 9. Cartographie des différentes zones d'habitats définies à dire d'expert	27
Figure 10. Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour la zone z35_1 (cas équilibré). La précision globale obtenue est de 97%.....	29
Figure 11. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (vue d'ensemble)	32
Figure 12. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (extrait de l'atlas cartographique)	33
Figure 13. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (typologie EUNIS).....	34
Figure 14. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (typologie EUR28).....	35
Tableau 1. Fiche de terrain pour la saisie des stations	8
Tableau 2. Travail sur la typologie, proposition de regroupements	20
Tableau 3. Classes de végétation écartées du travail de télédétection (jugées non détectables) à incruster manuellement a posteriori.....	24
Tableau 4. Typologie retenue et nombre d'échantillons par classe pour la cartographie des habitats du complexe lagunaire de Salse Leucate	25
Tableau 5. Résumé des différentes classes présentes dans chacune des zones (en orange absence, en vert présence).....	28
Tableau 6. Résumé des précisions globales estimées pour l'ensemble des modèles de classification supervisés évalués	30
Tableau 7. Présentation des règles de décision expertes appliquées en post-traitement	31

1 CONTEXTE, ENJEUX ET OBJECTIFS

En tant qu'animateur du DOCOB de la Zone Spéciale de Conservation « Complexe lagunaire de Salses-Leucate – FR 9101463 » et de la Zone de Protection Spéciale « Complexe lagunaire de Salses – FR 9112005 », le Syndicat Mixte RIVAGE Salses-Leucate souhaite faire réaliser, en 2020, une cartographie des habitats naturels, semi-naturels, agricoles et anthropiques des sites Natura 2000 du complexe lagunaire de Salses-Leucate. Pour le syndicat mixte RIVAGE, cette cartographie servira plusieurs enjeux de gestion, en particulier :

- L'évaluation de la représentativité des habitats naturels d'intérêt communautaire, leur dynamique et l'obtention de certains éléments sur leur état de conservation,
- L'actualisation de la hiérarchisation des enjeux de conservation selon la méthode en cours de mise à jour par la DREAL Occitanie,
- La comparaison entre l'état des lieux actuel et celui effectué en 2008 lors de l'élaboration du DOCOB (dans la mesure du possible),
- La définition de l'état du site en 2020 en précisant son intérêt vis à vis de la Directive Habitat et, d'une façon plus générale, son intérêt patrimonial,
- La mise à jour du formulaire standard des données (FSD).

RIVAGE souhaite que l'approche de cartographie mise en œuvre soit reproductible, afin de permettre une analyse diachronique des surfaces dans le temps, et qu'elle intègre la finesse de l'approche terrain à la vision synoptique, exhaustive et récurrente de l'observation par satellite.

La société i-Sea s'associe au Conservatoire botanique national méditerranéen de Porquerolles (CBN Med) pour proposer une offre technique répondant point par point aux exigences du cahier des charges élaboré par le syndicat mixte RIVAGE Salses-Leucate, en particulier :

- La mise en œuvre de l'approche de cartographie Biocoast semi-automatisée et reproductible basée sur des données satellitaires couplées à des méthodes de phytosociologie sigmatiste,
- La restitution d'une carte suivant une typologie finale du site élaborée et validée par le CBN Med et le syndicat RIVAGE,
- L'évaluation de l'état de conservation des différents habitats d'intérêt communautaire à l'échelle du site.

La philosophie portée par le groupement repose sur un travail de co-construction cartographique fondé sur des interactions très régulières (choix et compromis des classes prises en compte dans la classification, analyse et validation des prédictions, allers-retours prédictions-terrain, ...) en cours d'étude pour parvenir à un document unique le plus fiable et documenté possible.

Le présent rapport rend compte :

- Des méthodes d'analyse et des données sélectionnées pour caractériser les différents habitats sur le secteur étudié,

- Des résultats obtenus concernant la typologie des habitats retenue ainsi que la cartographie des habitats naturels des sites étudiés.

La zone d'intérêt concernée par l'étude (Figure 1) couvre une surface de près de 175 km².



Figure 1. Emprise du site d'étude

2 DONNEES ET METHODES

La production de cartographies des habitats naturels par le procédé Biocoast développé par la société i-Sea s'articule autour de l'usage de deux sources de données principales : des images satellites et des données de terrain. Ces deux sources de données sont injectées dans une chaîne de traitements automatisée, basée sur l'usage d'algorithmes de machine learning, permettant de produire des cartographies prédictives. La section suivante présente dans le détail la méthodologie ainsi que les données utilisées durant cette étude.

2.1 Méthodes

2.1.1 Prospections terrain

L'objectif de cette collecte de données *in situ* est de relever un maximum d'observations géolocalisées, au sein des différentes unités typologiques présentes sur le complexe lagunaire de Salses-Leucate.

Les 250 polygones d'apprentissage de départ étaient répartis inégalement selon les unités typologiques : certaines n'étaient pas assez représentées. C'est pourquoi une campagne de prospections de terrain a été réalisée par le CBN Med durant tout le mois de juin 2020 pour toutes les classes de milieux naturels. Pour toutes les unités typologiques hors milieux naturels, le Syndicat mixte RIVAGE a réalisé des prospections de terrain en parallèle. Cette campagne de terrain avait pour but de combler les lacunes de données d'apprentissage pour toutes les unités typologiques représentées par moins de 10 polygones. Les prospections de terrain ont été orientées grâce :

- À la connaissance du site du Syndicat mixte RIVAGE et du CBN Med,
- Aux pointages GPS des espèces végétales indicatrices des unités typologiques renseignées dans la typologie locale du site (Gritti & Argagnon 2021),
- À la cartographie d'occupation des sols de la zone des Courbatières à Leucate, fournie par la Mairie de Leucate,
- Au tableau récapitulatif des polygones d'apprentissage disponibles par unité typologique.

Les données d'apprentissage ont été acquises sous deux formats :

- Format « points » (Figure 2), au début du projet : des points GPS ont été pris au centre d'une zone homogène de l'unité typologique visée d'au moins 6 m de rayon et des informations ont été fournies à i-Sea (Tableau 1), chargé de l'extension de ce point en polygone,
- Format « polygone » pour la grande majorité des données d'apprentissage : les unités typologiques ont été détournées directement sur le terrain sur tablette tactile (SAMSUNG SM-T390) munie de l'application QField (v. 1.9.6). Cette application est un outil SIG mobile ayant les mêmes fonctionnalités que le logiciel QGIS sur ordinateur. Ce format étant le plus pratique pour tous les partenaires, il a été préféré au format « points ».

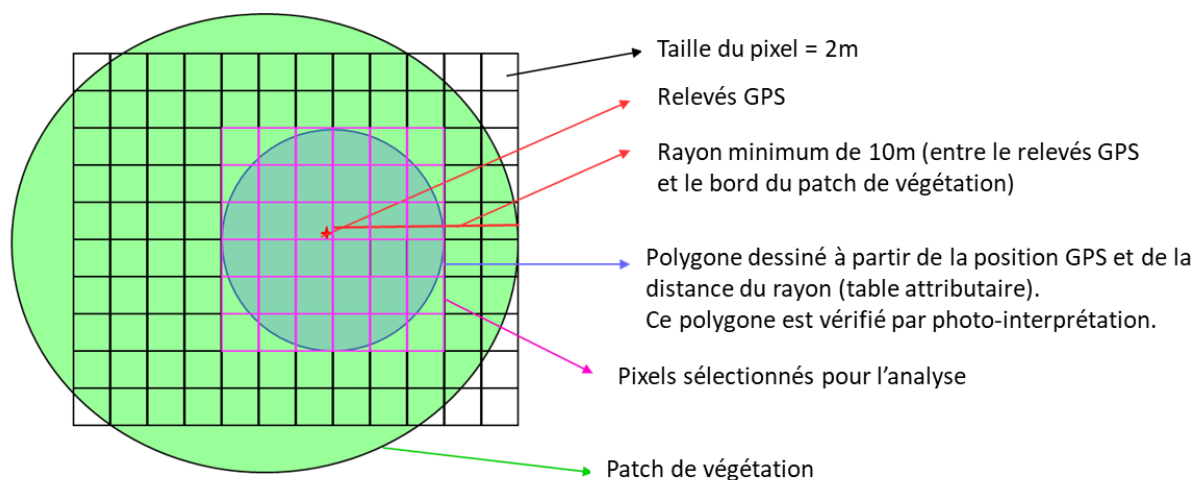


Figure 2. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain (format point)

Tableau 1. Fiche de terrain pour la saisie des stations

ATTRIBUT	DESCRIPTION	LISTE CHOIX
STATION	Identifiant unique de la station	Génération automatique
DATE	Date de la mission	JJ/MM/AAAA
UNITE TYPOLOGIQUE	Rattachement de la donnée d'apprentissage à une unité typologique	Code et intitulé de l'unité typologique
NATURE (uniquement pour les données au format « points »)	La station est relevée au sein d'une étendue ou d'un îlot/patch (les limites de la station sont visibles sur le terrain)	Étendue ou patch
RAYON (uniquement pour les données au format « points »)	Quelle est approximativement la taille de cette étendue (ou patch)	En mètres
COMMENTAIRES	Commentaires utiles à l'interprétation	Ex : remarques sur l'état de conservation de l'unité typologique concernée sur la station
PHOTOS	Identifiants des photos associées à la station	

Concrètement, le CBN Med a effectué l'ensemble des relevés terrain, permettent de calibrer, valider et corriger les analyses d'images satellitaires, en étroite relation avec le travail d'analyse d'images satellitaires réalisé par i-Sea.

La géolocalisation des experts du CBN Med est assurée par la position de la tablette tactile utilisée (SAMSUNG SM-T390) (Figure 3).

En complément, des photographies de l'habitat sur la station étudiée sont réalisées.

Au fur et à mesure de l'avancement du projet et des rendus de cartographie successifs (cartographies V1 et V2), il est apparu que certaines unités typologiques ne pourraient pas être prédites correctement. Ces unités typologiques ont donc été écartées du processus de modélisation et ont été cartographiées manuellement avant d'être incrustées dans la carte finale. La numérisation des polygones sur SIG a été réalisée soit par photo-interprétation à partir de la géolocalisation de relevés de terrain antérieurs au projet, soit par de nouvelles prospections de terrain (septembre 2020 et juin 2021). Ce cas de figure concerne douze unités typologiques qui sont détaillées dans la partie Résultats (p. 24).



Figure 3. Matériel terrain

2.1.2 Travail sur la typologie des habitats

Concernant les milieux naturels, tous les groupements végétaux à cartographier étaient déjà répertoriés dans la typologie locale du site (Gritti & Argagnon 2021). Cette typologie a constitué la première version de la légende de la carte qui a rapidement évolué. Des prédictions cartographiques successives ont permis de bien cerner les confusions possibles entre certaines unités typologiques. En effet, la réalité floristique du terrain n'est pas traduite de manière exacte par la méthode de cartographie par télédétection. Aussi, la typologie des milieux naturels a été adaptée à la méthode de cartographie.

En plus des milieux naturels, d'autres unités ont été ajoutées à la typologie de la carte :

- Différents types de surfaces agricoles,
- Groupements monospécifiques d'espèces végétales exotiques,
- Surfaces anthropisées ou urbanisées,
- Autres surfaces homogènes (eau, sol).

De nombreuses discussions et itérations entre les différents partenaires du projet sont nécessaires pour aboutir à une typologie finale. Les remaniements par rapport à la typologie locale des milieux naturels du site sont détaillés dans un rapport indépendant (Gritti, 2021). La typologie retenue est assez détaillée : elle comporte 54 unités typologiques, ou classes, et constitue la légende de la carte.

2.1.3 Cartographie par classification d'image

2.1.3.1 Méthodologie

Afin de déterminer une stratégie de classification d'images adaptée au problème de la reconnaissance et de la différenciation des types de végétation présents sur le site étudié, différentes approches ont été testées. La démarche méthodologique adoptée est présentée dans la Figure 4.

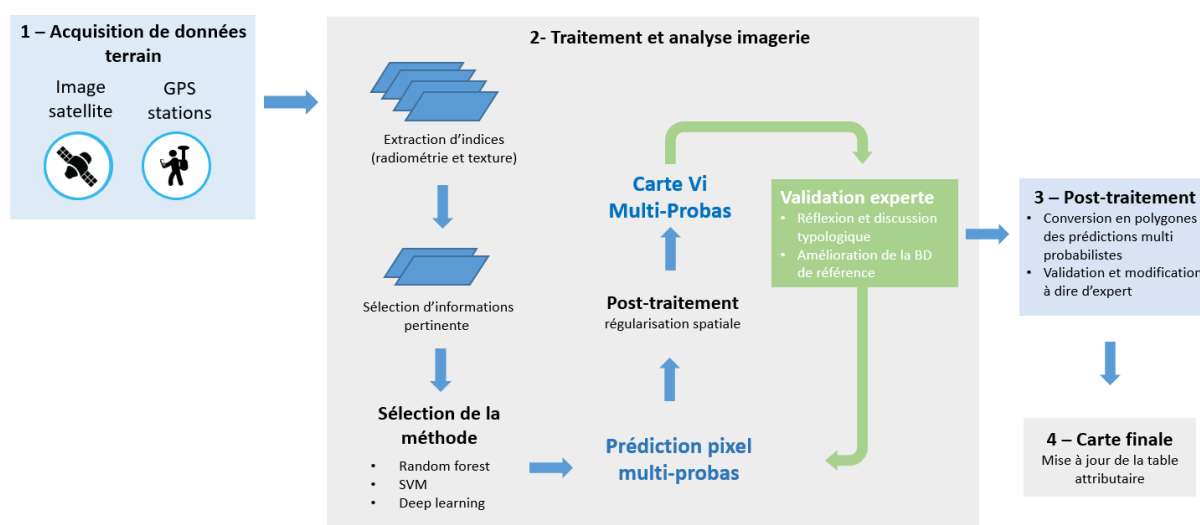


Figure 4. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement

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

En parallèle, une étape de prétraitement 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 réajuster le recalage 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 serviront à l'apprentissage et le 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 des informations des images (indices radiométriques). Pour chaque image multispectrale utilisée, 6 indices radiométriques ont été calculés :

- Des indices de végétation : les NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al., 1973), RVI (Ratio Vegetation Index, Jordan, 1969) et SAVI (Soil Adjust 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 Water Index, Gao, 1996).

Ces indices radiométriques permettent de mettre en relief et de donner du poids à certaines entités de l'occupation du sol, ils ont été testés et sélectionnés lors de multiples tests lors de la phase R&D du projet Biocoast. Ils sont à présent utilisés de façon systématique dans la chaîne de traitement Biocoast pour la cartographie des milieux naturels.

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 Machines (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 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 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 apprendre 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 chaîne de traitement 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'information (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 entraînement) 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 de l'ensemble de l'image multi-temporelle,
- Régularisation.

2.1.3.2 Mise en œuvre pratique

L'ensemble des données collectées sur terrain a été uniformisé, dans le but d'attribuer une classe à chacun des échantillons. Ces échantillons sont répartis au sein de l'ensemble des classes. Les données d'apprentissage au format shape de points ont été converties automatiquement en polygones sous SIG, et superposées aux images Pléiades. Chacun des polygones (buffer) a été corrigé et étendu de façon à correspondre aux limites visibles sur les supports de référence. Un certain nombre de polygones ont été repris et corrigés par photo-interprétation, cela afin de ne contenir qu'une seule classe d'occupation « visible » comme par exemple la présence de sol nu (sable) dans un polygone de végétation. Cela a permis de corriger certains défauts des premières versions de prédictions.

Cette étape est cruciale dans notre méthodologie de cartographie. 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 reconnaître 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 : Equilibrage 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.

2.1.3.3 Travail par zones ou types de milieux

Le site d'études comporte des milieux extrêmement variés, ce qui a pu compliquer les prédictions cartographiques. C'est pourquoi un découpage du site d'études en plusieurs zones a été imaginé.

Cette approche est une première dans les cartographies Biocoast, elle consiste donc à décomposer la tâche de classification supervisée en sous zones (cela afin de simplifier et de rendre plus robuste les prédictions dans un contexte très complexe avec une typologie fine et très variée). Un ensemble de modèles spécifiques à chaque zone a donc été utilisé pour produire la carte finale. Chacun de ses modèles ayant une base de données d'apprentissage spécifique, ne contenant que les classes de la typologie possible au sein de son emprise.

Le découpage en zones a été basé sur le principe que chaque groupement végétal identifié sur le site présente un fonctionnement écologique propre et est donc inféodé à un ou plusieurs grands types de milieux. Par exemple, les groupements à *Ephedra distachya* (UT 33, 36, 37) sont retrouvés uniquement en milieux dunaires, alors que les groupements à *Cladium mariscus* (UT 42, 42b) se trouvent plutôt en zones humides. Le but était d'éviter au maximum les prédictions en faux-positif, c'est-à-dire la prédiction d'une classe à un endroit donné alors qu'il est impossible qu'elle s'y trouve. En clair, on souhaitait éviter que, par exemple, des groupements à *Cladium mariscus* soient prédits sur les dunes et inversement que des groupements à *Ephedra distachya* soient prédits en zones humides.

Les contours des zones ont été dessinés sous SIG par photo-interprétation sur les images Pléiades. Ces contours ont été placés en partie à dire d'expert à partir des connaissances de terrain du Syndicat mixte RIVAGE et du CBN Med, mais aussi à partir de la cartographie des zones humides du site d'études datant de 2008 fournie par RIVAGE.

Six grandes zones ont été imaginées :

- Zone xérique de garrigues,
- Zones humides,
- Zones humides à *Cladium mariscus*,
- Zone de dunes,
- Zone sableuse proche de l'embouchure de l'Agly,
- Zone de l'île de la Corrège.

À ces 5 zones a été ajouté un calque « zones agricoles » qui a été détourné par photo-interprétation et connaissance du terrain. Ce calque a été appliqué sur les zones déjà existantes. Cela a permis de délimiter les zones de prédictions des classes de surfaces agricoles qui étaient souvent confondues avec d'autres classes.

Par ailleurs, certaines zones étaient difficilement délimitées et donc imbriquées l'une dans l'autre. Par exemple, sur le site d'étude, les dunes sont souvent entremêlées avec les zones humides. C'est pourquoi ces deux zones ont été superposées pour former une nouvelle zone « zones de dunes et zones humides ». De la même manière, à au sud-ouest du site, les zones « garrigues » et « humides » ont été superposées pour former une zone à part entière.

Ces superpositions de zones ont permis de se rapprocher de la réalité mais ont démultiplié les zones : 13 espaces ont été délimités sur le site. La carte finale sera donc obtenue en combinant les prédictions de 13 modèles différents.

2.1.3.4 Post-traitements

Dans un premier temps, la prédiction brute (ou résultat de la classification) au niveau pixel est régularisée, un filtre majoritaire de rayon 2 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 shape. La table attributaire de ce shape est uniformisée et mise à jour avec notamment le calcul des surfaces des polygones. Une seconde passe de régularisation est alors appliquée. Cette régularisation est guidée par des règles expertes (ou thématique) : 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 il a la plus grande distance de contact.

Enfin, des règles expertes ont été travaillées, testées puis appliquées pour corriger des erreurs systématiques et persistantes. Ces règles permettent d'injecter *a posteriori* de la connaissance de terrain pour corriger les cartographies produites et ainsi améliorer les résultats. Une fois les règles définies par le CBN Med (ces règles seront présentées Tableau 7), elles sont codées et appliquées de façon automatique à l'ensemble des polygones de la cartographie produite.

2.1.3.5 Construction de la couche d'informations multiprobables

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 alors les 3 classes majoritairement plus probables ainsi que leurs probabilités associées. Cette information peut avoir de nombreux usages, elle peut 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). Cette information pourra être utilisée dans les étapes suivantes de l'étude, pour l'automatisation de l'agrégation des polygones.

2.2 Données initiales

2.2.1 Données images

Une série temporelle composée de 10 images Pléiades (RGBPIR, 0.5m de résolution spatiale) a été acquise entre le mois de mars 2020 et le mois d'avril 2021. Cette série est de grande qualité avec une couverture nuageuse tout à fait négligeable (Figure 5). Deux autres scènes ont été acquises mais n'ont pas été prises en compte dans l'étude car partiellement nuageuses.

Une vérification de la bonne coregistration de ces images a été faite avant de les préparer et d'en constituer une série temporelle homogène. Cette série temporelle est très dense et de très bonne qualité ce qui permet de couvrir les cycles de végétation sur une année complète. La fréquence temporelle pour cette série d'images Pléiades est exceptionnelle.

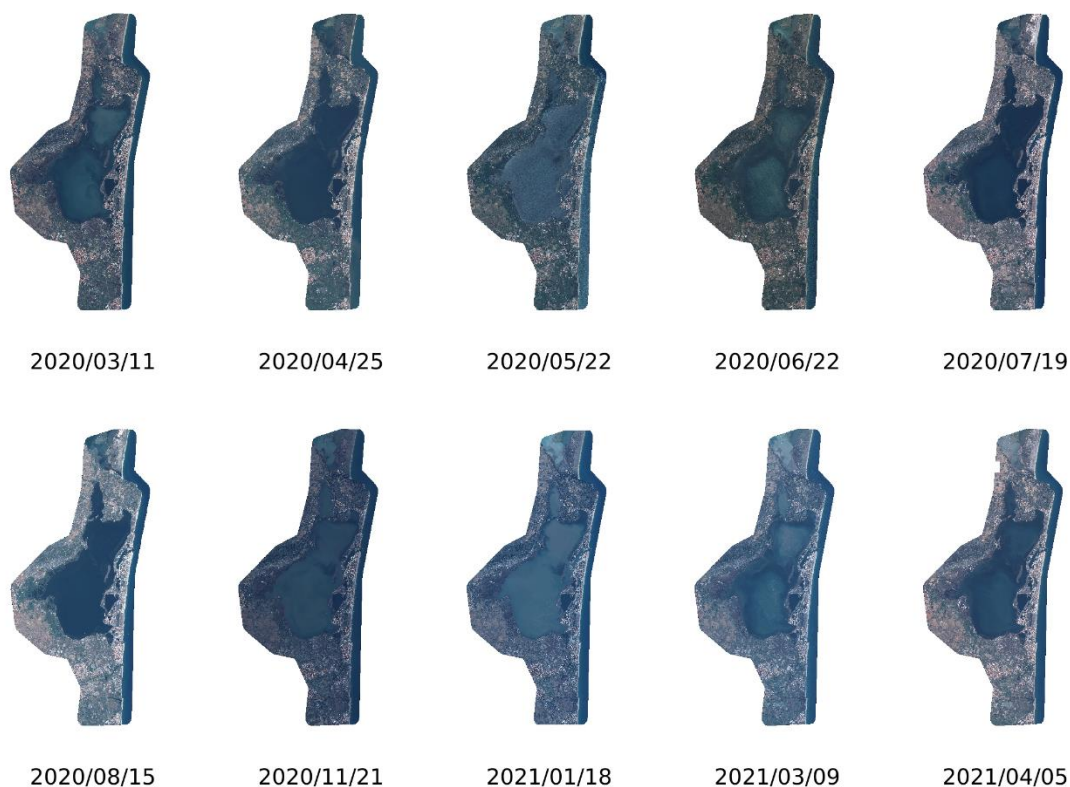


Figure 5. Série d'images satellite utilisée pour la cartographie.

2.2.2 Données terrain

Les relevés de terrain acquis avant le début du projet en 2020 ont été exploités lors de la première étape de cette étude (cartographie V0). Le site Natura 2000 étudié comprenait en effet plusieurs centaines de relevés phytosociologiques avant même le début du projet, ce qui est exceptionnel. Ces données ont servi en amont de la campagne de terrain 2020, à réaliser une pré-cartographie dans le but d'orienter l'effort terrain à venir. Une campagne de terrain, plus ciblée grâce à l'analyse de la V0, a eu lieu durant l'été 2020. Cette base de données plus complète a permis la production d'une cartographie V1. Enfin, l'analyse experte de certaines erreurs systématiques de prédiction a conduit à la constitution d'un complément de base de données d'apprentissage par photo-interprétation pour certaines classes « faciles » à corriger, ceci permettant la production d'une nouvelle version plus affinée V2.

Au total, 1392 polygones d'apprentissage ont été fournis pour la cartographie du site. La Figure 6 présente l'ensemble des données de terrain ayant servi à l'apprentissage et à l'évaluation des modèles de prédiction RandomForest, puis à l'apprentissage complet d'un modèle pour prédire l'ensemble du site d'étude. Un certain nombre de polygones ont été repris et corrigés par photo-interprétation, cela afin de ne contenir qu'une seule classe d'occupation « visible » comme par exemple la présence de sol nu (sable) dans un polygone de végétation. Cela a permis de corriger certains défauts des premières versions de prédictions. Parmi les relevés, les Figure 7 et Figure 8 repèrent cartographiquement, respectivement, les relevés correspondants aux espèces d'intérêt communautaire et des espèces végétales protégées au niveau national et/ou régional.

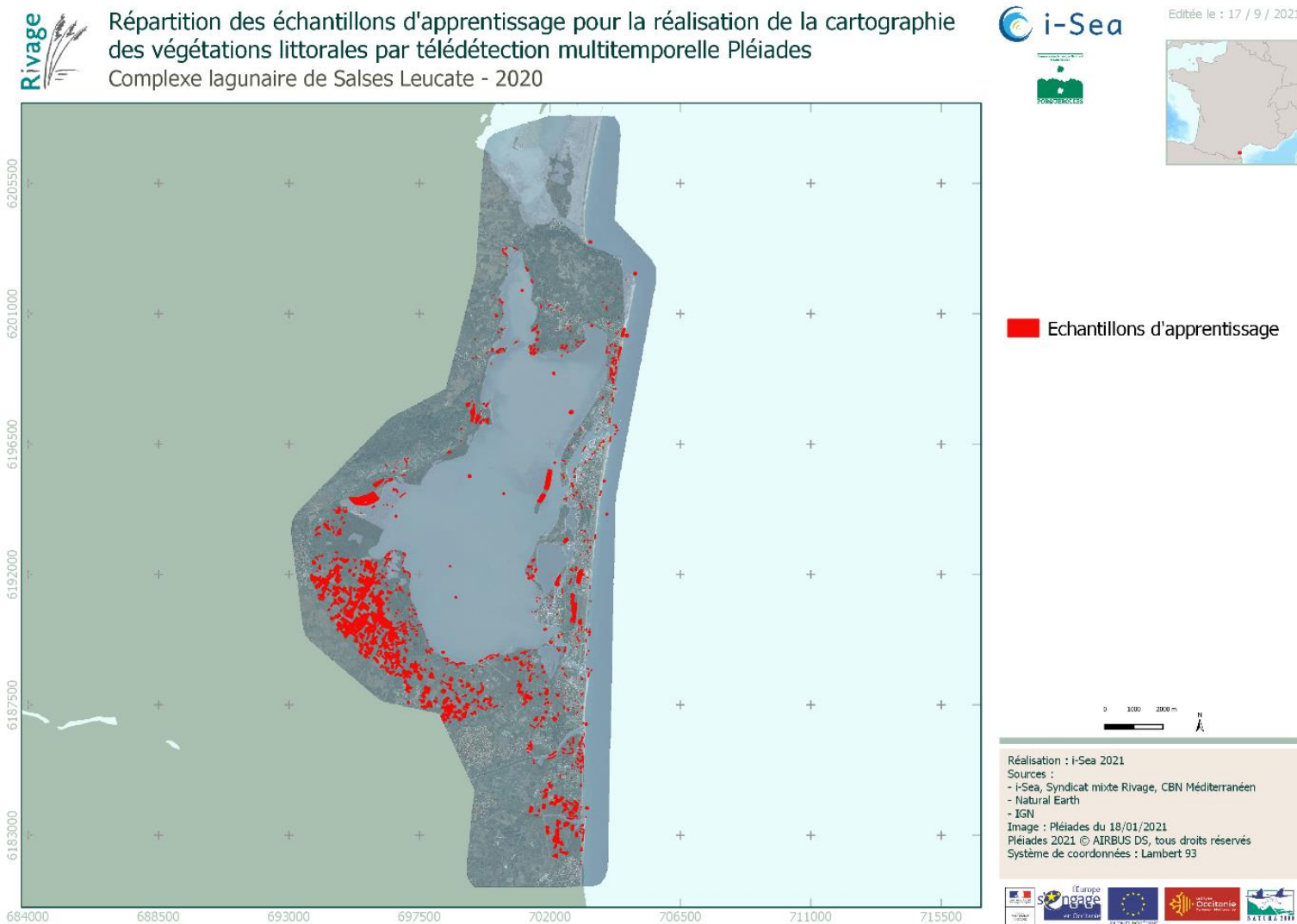


Figure 6. Carte de répartition des données d'apprentissage sur le site d'étude

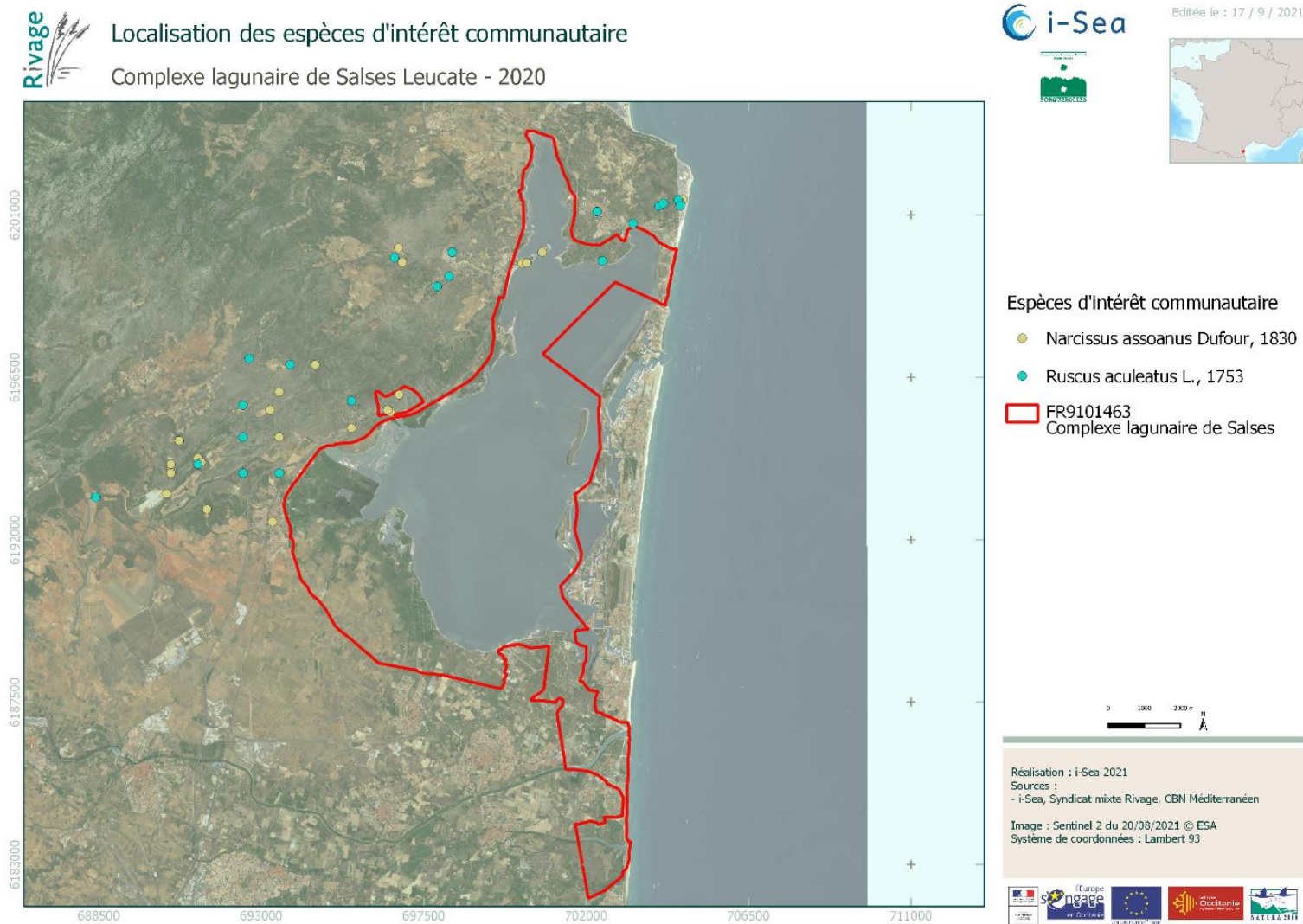


Figure 7. Localisation des espèces d'intérêt communautaire

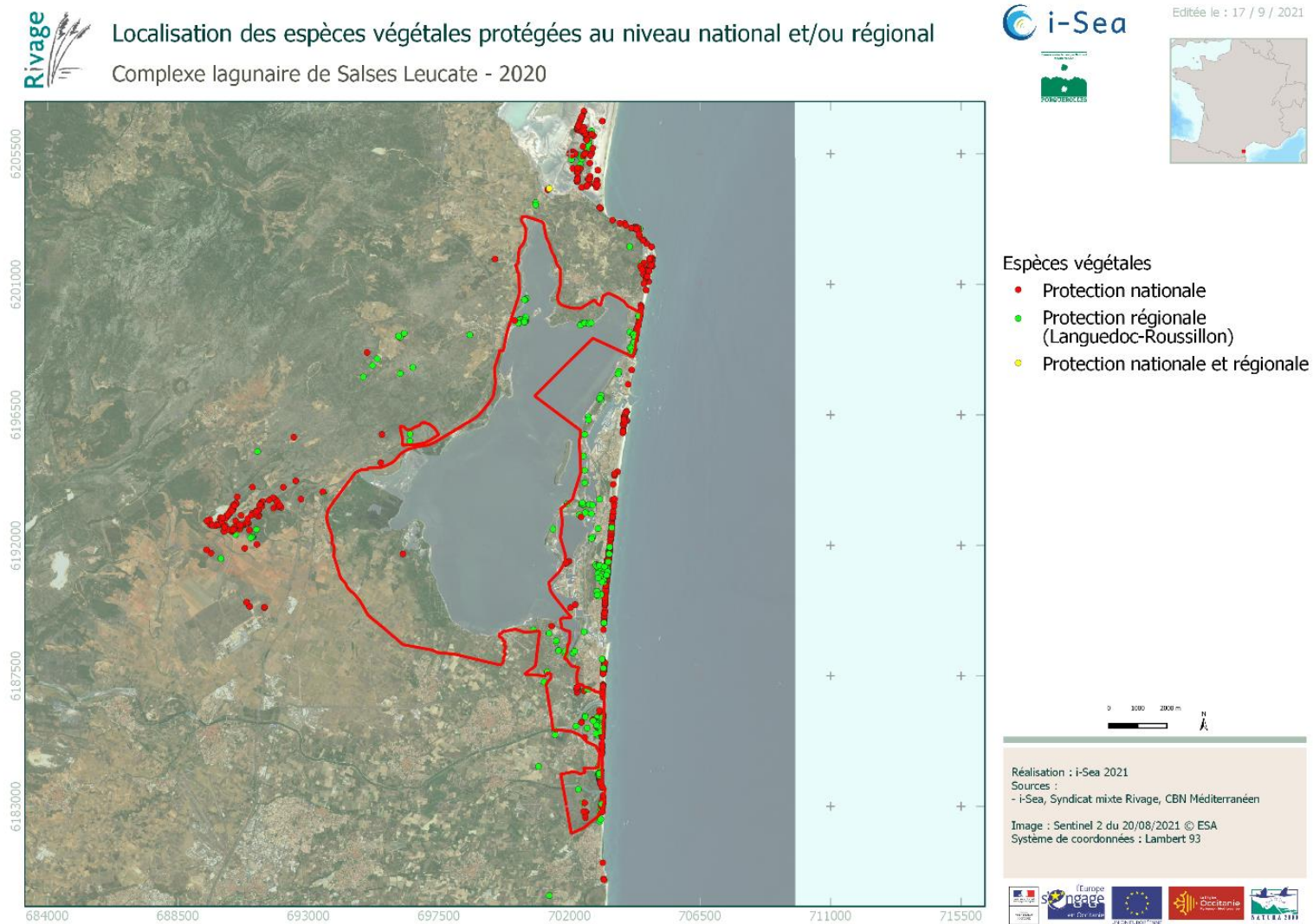


Figure 8. Localisation des espèces végétales protégées au niveau national et/ou régional

3 Résultats

3.1 Typologies

Suite aux travaux du CBN Med autour de l'élaboration de la typologie des milieux naturels mais aussi non naturels présents sur le site, de nombreux échanges et discussions ont eu lieu. Ces échanges ont été rythmés par les différentes versions de cartographie, cela afin d'aboutir à une typologie finale, compromis entre les besoins exprimés en termes de précision typologique et robustesse des prédictions. La typologie finale est présentée dans le Tableau 2. Ce tableau présente les intitulés des groupements végétaux ou d'autres catégories de milieux présents sur le site d'étude, en spécifiant leur type (milieux naturels ou autres) ainsi que les codes et intitulés correspondants dans les typologies EUNIS et EUR28.

Un ensemble d'UTs (Unités Typologiques) a été écarté du travail de télédétection, en effet ces unités typologiques sont soit trop rares pour être échantillonnées de façon représentative soit non détectables par télédétection. Ces unités typologiques ont donc fait l'objet d'un travail particulier, avec un effort cartographique de terrain. Ces UTs sont donc incrustées à posteriori à la cartographie finale. Le Tableau 3 présente l'ensemble de ces classes.

Enfin, une fois les échantillons préparés, vérifiés et superposés à la série temporelle, un résumé du nombre d'échantillons par classe constituant la base de données d'apprentissage est dressé. Le Tableau 4 présente ce résumé, il est important de conserver et de consulter ce tableau pour une analyse fine de la cartographie, cela notamment afin de relativiser la pertinence des prédictions pour les classes les plus sous-représentées.

Tableau 2. Travail sur la typologie, proposition de regroupements

Association	Type	EUR28	Intitulés EUR28	EUNIS	Intitulés EUNIS
Groupe à <i>Brachypodium phoenicoides</i> et <i>Phragmites australis</i>	Milieu naturel	non_IC	non IC	E1.3	Pelouses xériques ouest-méditerranéennes
<i>Lino biennis</i>-<i>Festucetum arundinaceae</i>	Milieu naturel	1410	Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)	E2.1	Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage
<i>Orchido palustris</i>-<i>Festucetum arundinaceae</i>	Milieu naturel	1410	Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)	E3.1	Prairies humides hautes méditerranéennes
<i>Populetum albae</i>	Milieu naturel	92A0	Forêts galeries à <i>Salix alba</i> et <i>Populus alba</i>	G1.3	Forêts riveraines méditerranéennes à peupliers
<i>Echinophoro spinosae</i>-<i>Elymetum farcti</i>	Milieu naturel	2110	Dunes mobiles embryonnaires	B1.3	Dunes côtières mobiles
<i>Salsolo kali</i>-<i>Cakiletum maritimae</i>	Milieu naturel	2110	Dunes mobiles embryonnaires	B1.3	Dunes côtières mobiles
Groupe à <i>Helosciadium nodiflorum</i> et <i>Nasturtium officinale</i>	Milieu naturel	non_IC	non IC	C3.1	Formations à héliophytes riches en espèces
Groupe à <i>Corynephorus divaricatus</i> et <i>Filago pyramidata</i>	Milieu naturel	non_IC	non IC	E1.8	Pelouses fermées, sèches, acides et neutres méditerranéennes
Groupe à <i>Ephedra distachya</i> de l'île de la Corrège	Milieu naturel	2210	Dunes fixées du littoral du <i>Crucianellion maritimae</i>	B1.4	Pelouses des dunes côtières fixées (dunes grises)
<i>Lobulario maritimae</i>-<i>Ephedretum distachyae typicum</i>	Milieu naturel	2210	Dunes fixées du littoral du <i>Crucianellion maritimae</i>	B1.4	Pelouses des dunes côtières fixées (dunes grises)
<i>Lobulario maritimae</i>-<i>Ephedretum distachyae dégradé</i>	Milieu naturel	2210	Dunes fixées du littoral du <i>Crucianellion maritimae</i>	B1.4	Pelouses des dunes côtières fixées (dunes grises)
<i>Lobulario maritimae</i>-<i>Ephedretum distachyae matthioletosum sinuatae</i>	Milieu naturel	2210	Dunes fixées du littoral du <i>Crucianellion maritimae</i>	B1.4	Pelouses des dunes côtières fixées (dunes grises)
<i>Diantho catalaunici</i>-<i>Corynephorum canescentis</i>	Milieu naturel	2210	Dunes fixées du littoral du <i>Crucianellion maritimae</i>	B1.4	Pelouses des dunes côtières fixées (dunes grises)

Crucianelletum maritimae	Milieu naturel	2210	Dunes fixées du littoral du <i>Crucianellion maritimae</i>	B1.4	Pelouses des dunes côtières fixées (dunes grises)
Groupe à Phragmites australis et Juncus acutus	Milieu naturel	1410	Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)	A2.5	Marais salés côtiers et roselières salines
Groupe à Phragmites australis et Juncus maritimus	Milieu naturel	1410	Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)	A2.5	Marais salés côtiers et roselières salines
Groupe à Limonium virgatum et Plantago coronopus	Milieu naturel	1410	Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)	A2.5	Marais salés côtiers et roselières salines
Phlomido lychnitidis-Brachypodietum retusi	Milieu naturel	6220	Parcours substeppiques de graminées et annuelles des <i>Thero-Brachypodietea</i>	E3.1	Prairies humides hautes méditerranéennes
Groupe à Tamarix gallica et Geranium rotundifolium	Milieu naturel	92D0	Galerias et fourrés riverains méridionaux (<i>Nerio-Tamaricetea et Securinegion tinctoriae</i>)	F9.3	Galerias et fourrés riverains méridionaux
Groupe à Tamarix gallica et Convolvulus sepium	Milieu naturel	92D0	Galerias et fourrés riverains méridionaux (<i>Nerio-Tamaricetea et Securinegion tinctoriae</i>)	F9.3	Galerias et fourrés riverains méridionaux
Groupe de roselière	Milieu naturel	2190	Dépressions humides intradunales	C3.2	Roselières et formations de bordure à grands hélophytes autres que les roseaux
Groupe de roselière	Milieu naturel	non_IC	non IC	C3.2	Roselières et formations de bordure à grands hélophytes autres que les roseaux
Groupe de roselière et Cladium mariscus en mosaïque	Milieu naturel	7210	Marais calcaires à <i>Cladium mariscus</i> et espèces du <i>Caricion davallianae</i>	C3.2	Roselières et formations de bordure à grands hélophytes autres que les roseaux
Groupe à Cladium mariscus dominant	Milieu naturel	7210	Marais calcaires à <i>Cladium mariscus</i> et espèces du <i>Caricion davallianae</i>	C3.2	Roselières et formations de bordure à grands hélophytes autres que les roseaux
Groupe aquatique de rivière	Milieu naturel	3260	Rivières des étages planitiaire à montagnard avec végétation du <i>Ranunculion fluitantis</i> et du <i>Callitrichio-Batrachion</i>	C2.3	Cours d'eau permanent non soumis aux marées, à débit régulier
Groupe à Pinus halepensis	Milieu naturel	non_IC	non IC	F5.1	Matorrals arborescents
Groupe à Quercus coccifera	Milieu naturel	non_IC	non IC	F5.1	Matorrals arborescents

Groupe à <i>Salix atrocinerea</i> et <i>Laurus nobilis</i>	Milieu naturel	non_IC	non IC	F9.2	Saussaies marécageuses et fourrés des bas-marais à <i>Salix</i>
Chaetomorpha-Ruppia cirrhosa	Milieu naturel	1150	Lagunes côtières	A5.5	Sédiment subtidal dominé par des macrophytes
Groupe à <i>Sarcocornia fruticosa</i> ou <i>S. perennis</i>	Milieu naturel	1420	Fourrés halophiles méditerranéens et thermo-atlantiques (<i>Sarcocornietea fruticosi</i>)	A2.5	Marais salés côtiers et roselières salines
Groupe à <i>Halimione portulacoides</i> et <i>Sarcocornia fruticosa</i>	Milieu naturel	1420	Fourrés halophiles méditerranéens et thermo-atlantiques (<i>Sarcocornietea fruticosi</i>)	A2.5	Marais salés côtiers et roselières salines
Groupe à <i>Alkanna matthioli</i> et <i>Campanula erinus</i>	Milieu naturel	6220	Parcours substeppiques de graminées et annuelles des <i>Thero-Brachypodietea</i>	E1.3	Pelouses xériques ouest-méditerranéennes
Groupe à <i>Salicornia europaea</i>	Milieu naturel	1310	Végétations pionnières à <i>Salicornia</i> et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses	A2.5	Marais salés côtiers et roselières salines
<i>Suaeda maritima</i>-<i>Kochietum hirsutae</i>	Milieu naturel	1310	Végétations pionnières à <i>Salicornia</i> et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses	A2.5	Marais salés côtiers et roselières salines
Groupe rudéral de friche	Milieu naturel	non_IC	non IC	E1.C	Habitats méditerranéens secs à végétation herbacée non-vernale inappétente
Surface homogène de Figuier de Barbarie	Groupe monospécifique d'espèce exotique	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Surface homogène de Griffes de sorcière	Groupe monospécifique d'espèce exotique	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Surface homogène de Baccharis	Groupe monospécifique d'espèce exotique	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Vignes	Agriculture	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Culture d'artichauts	Agriculture	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Surface homogène de Canne de Provence	Groupe monospécifique d'espèce exotique	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné

Station d'épuration	Urbanisation	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Eau lagunaire	Surface aquatique homogène	1150	Lagunes côtières	A5.5	Sédiment subtidal dominé par des macrophytes
Eau marine	Surface aquatique homogène	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Eau temporaire	Surface aquatique homogène	1150	Lagunes côtières	A5.5	Sédiment subtidal dominé par des macrophytes
Roche	Surface homogène	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Surface homogène d'Herbe de la Pampa	Groupement monospécifique d'espèce exotique	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Sable nu	Surface homogène	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Bâtiment	Urbanisation	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Chaussée/Voirie	Urbanisation	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Sol nu	Surface homogène	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Vergers	Agriculture	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Surface homogène de Canne à sucre	Groupement monospécifique d'espèce exotique	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Digue	Urbanisation	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Sable coquillier	Surface homogène	non IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Stades de foot	Urbanisation	non_IC	non IC	non_renseigné	non renseigné
Estuaire	Surface aquatique homogène	1130	Estuaires	non_renseigné	non renseigné

Tableau 3. Classes de végétation écartées du travail de télédétection (jugées non détectables) à incruster manuellement a posteriori

Association	N° polygones	Choix de réincrustation
Crucianelletum maritimae	17	Végétation identifiée tardivement (juin 2021)
Digue	30	Prédictions incorrectes, faux-positifs trop nombreux
Estuaire	2	Classe trop rare sur le site pour être prédite correctement
Groupement à Brachypodium phoenicoides et Phragmites australis	2	Classe trop rare sur le site pour être prédite correctement
Groupement à Cladium mariscus dominant	5	Classe trop rare sur le site pour être prédite correctement
Groupement à Corynephorus divaricatus et Filago pyramidata	8	Classe trop rare sur le site pour être prédite correctement
Groupement à Helosciadium nodiflorum et Nasturtium officinale	37	Végétation linéaire dans des fossés étroits, mauvaise appréciation sur les images satellites
Groupement à Salicornia europaea	6	Classe trop rare sur le site pour être prédite correctement
Groupement à Salix atrocineria et Laurus nobilis	1	Classe trop rare sur le site pour être prédite correctement
Groupement aquatique de rivière	7	Prédictions incorrectes, faux-positifs trop nombreux
Lino biennis-Festucetum arundinaceae	2	Classe trop rare sur le site pour être prédite correctement
Stades de foot	11	Prédictions incorrectes, faux-positifs trop nombreux
Station d'épuration	16	Prédictions incorrectes, faux-positifs trop nombreux
TOTAL	144	

Tableau 4. Typologie retenue et nombre d'échantillons par classe pour la cartographie des habitats du complexe lagunaire de Salses Leucate (les intitulés et codes UT ont été modifiés a posteriori pour la cartographie finale).

TYPLOGIE RETENUE	Nombre de polygones	Code UT
Artichaut	16	123
asphalte	74	139
baccharis	14	124
bati	105	114x118
canne_de_p	47	125
Diantho catalaunici-Corynephorum canescentis	13	38
digue	10	200
eau_lagune	16	110
eau_marine	11	111
eau_temporaire	24	112
Echinophoro spinosae-Elymetum farcti	64	2a
Friche	66	702
Griffe de S	27	128
Groupement a Quercus coccifera	11	11c
Groupement a Alkanna matthioli et Campanula erinus	14	34
Groupement a Ephedra distachya de l'ile de la Corregé	16	32
Groupement a Halimione portulacoides et Sarcocornia fruticosa	44	55
Groupement a Limonium virgatum et Plantago coronopus	19	62
Groupement a Phragmites australis et Juncus acutus	34	43a
Groupement a Phragmites australis et Juncus maritimus	10	46
Groupement a Sarcocornia fruticosa ou perennis	28	51
Groupement a Tamarix gallica et Convolvulus sepium	21	45b
Groupement a Tamarix gallica et Geranium rotundifolium	39	91a
Groupement de roseliere	29	41
Groupement de roseliere et Cladium mariscus en mosaïque	18	42
Lobulario maritimae-Ephedretum distachyae degrade	15	36
Lobulario maritimae-Ephedretum distachyae matthioletosum sinuatae	6	37
Lobulario maritimae-Ephedretum distachyae typicum	11	33
opuntia	25	130
Orchido palustris-Festucetum arundinaceae	46	96a
pampa	13	131
Phlomidio lychnitidis-Brachypodietum retusi	24	12b
Pinède	54	11bx134
Populetum albae	10	45a
roche	16	120
Sable nu	22	119
Sables coquilliers	11	201
Saccharum s	25	135
Salsolo kali-Cakiletum maritimae	9	2c
sol nu	27	138
Suaedo maritimae-Kochietum hirsutae	16	99
Vergers	106	140
vigne	186	137
SOMME		1392

3.2 Travail sur les zones d'habitats

Afin de simplifier le problème de classification supervisé, un important travail de zonation a été réalisé par le CBN Med. Ce travail a consisté à détourner, par photo-interprétation sur les images Pléiades, ces grands ensembles. Le résultat obtenu est présenté Figure 9. Cette cartographie des zonations est à conserver et à consulter en parallèle des cartographies produites sous SIG. En effet cette carte, complétée par le Tableau 5, permet de repérer facilement les Unités Typologiques présentes et prises en compte en tout point du territoire. Le Tableau 5 présente donc chacune des UTs présentes dans chacune des zones, il contient aussi les informations sur les dimensions minimales des objets à cartographier qui sont ensuite utilisées dans l'étape de post-traitement.

3.3 Evaluation des classifications

Cette section présente les résultats obtenus pour l'évaluation des performances de classification de l'ensemble des modèles RandomForest utilisés pour produire la cartographie finale. Pour rappel, un modèle spécifique a été entraîné puis évalué pour chacune des zones

d'études, cela avec une base de données ne contenant que les classes présentes dans ces zones.

Ces évaluations ont été réalisées en mode « équilibré », c'est-à-dire en prenant en compte le même nombre de pixels pour chacune des classes, le nombre de pixels de la plus petite classe. Nous avons fait ce choix car la BD d'apprentissage était très déséquilibrée (certaines classes étaient très sur-représentées et auraient pu biaiser fortement l'évaluation des classifieurs). Pour chacun de ces modèles, 50% des pixels sont sélectionnés pour l'apprentissage du modèle et les 50% restants sont conservés pour la validation. Cette validation consiste en la construction des matrices de confusions (tableau de contingence croisant prédictions et données de référence) et au calcul de la précision globale (proportion de pixels bien classés).

Les matrices de confusions étant très difficiles à visualiser en raison du très grand nombre de classes, nous avons choisi de n'en présenter qu'une à titre d'exemple. L'ensemble des matrices aux formats PNG sont fournies avec les cartographies, il convient de les analyser, zone par zone et classe par classe pour une interprétation fine des résultats. La Figure 10 présente la matrice de confusion correspondant au modèle évalué pour la zone « z35_1 », cette zone contient 9 UTs.

Une précision globale de 97% est obtenue pour ce modèle, on peut observer que l'ensemble des classes sont prédites avec une grande précision. Les classes les moins bien reconnues sont les classes « groupement à *Halimione portulacoide* et *Sarcocornia fruticosa* » et « groupement à *Phragmites australis* et *Juncus acutus* » avec des précisions de l'ordre de 92%. Ce résultat n'est pas forcément aberrant puisque, d'un point de vue floristique, ces deux groupements sont relativement proches. La matrice permet ensuite d'observer la dispersion des erreurs de prédictions et ainsi de comprendre de potentielles confusions dans les résultats cartographiques.

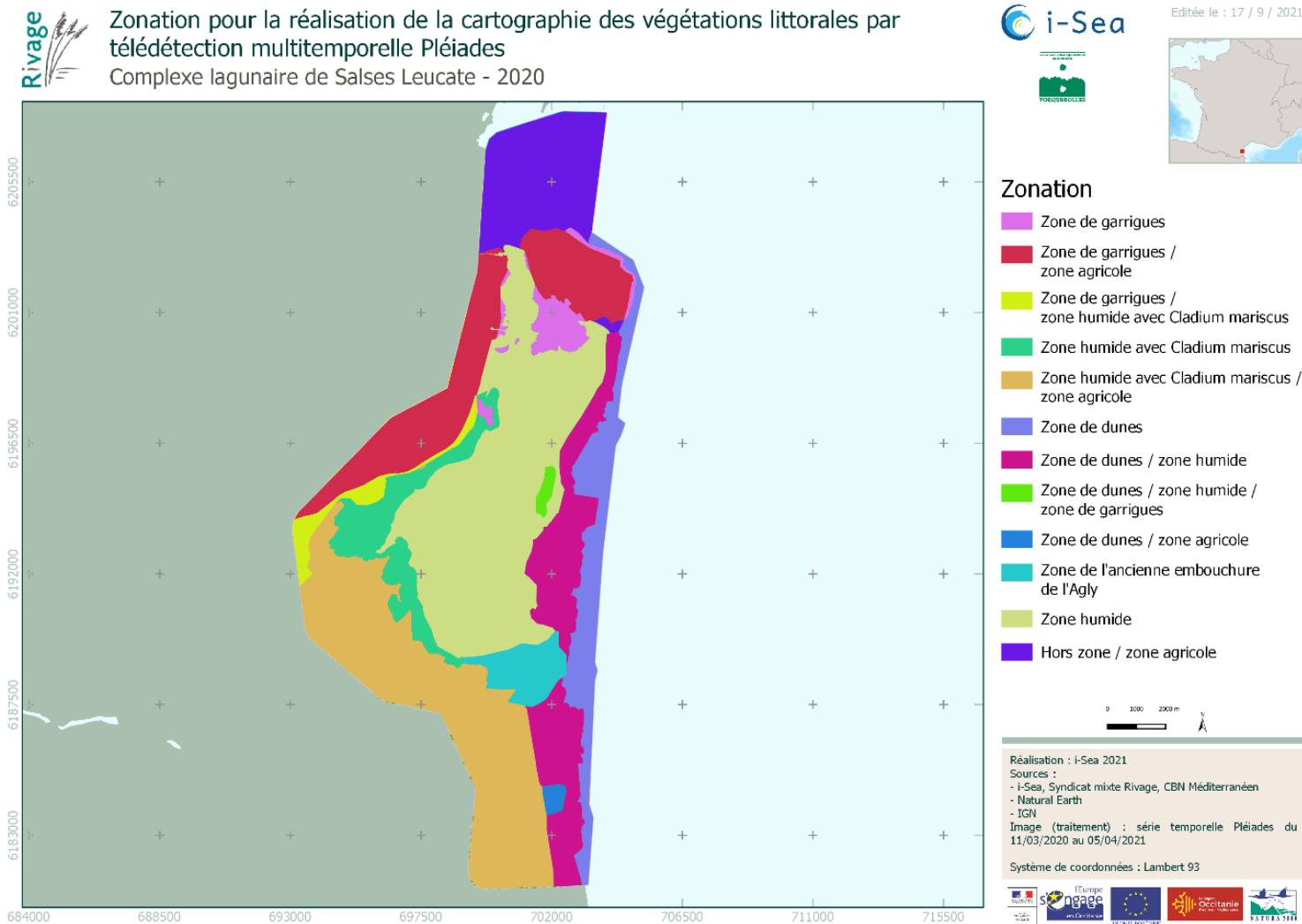
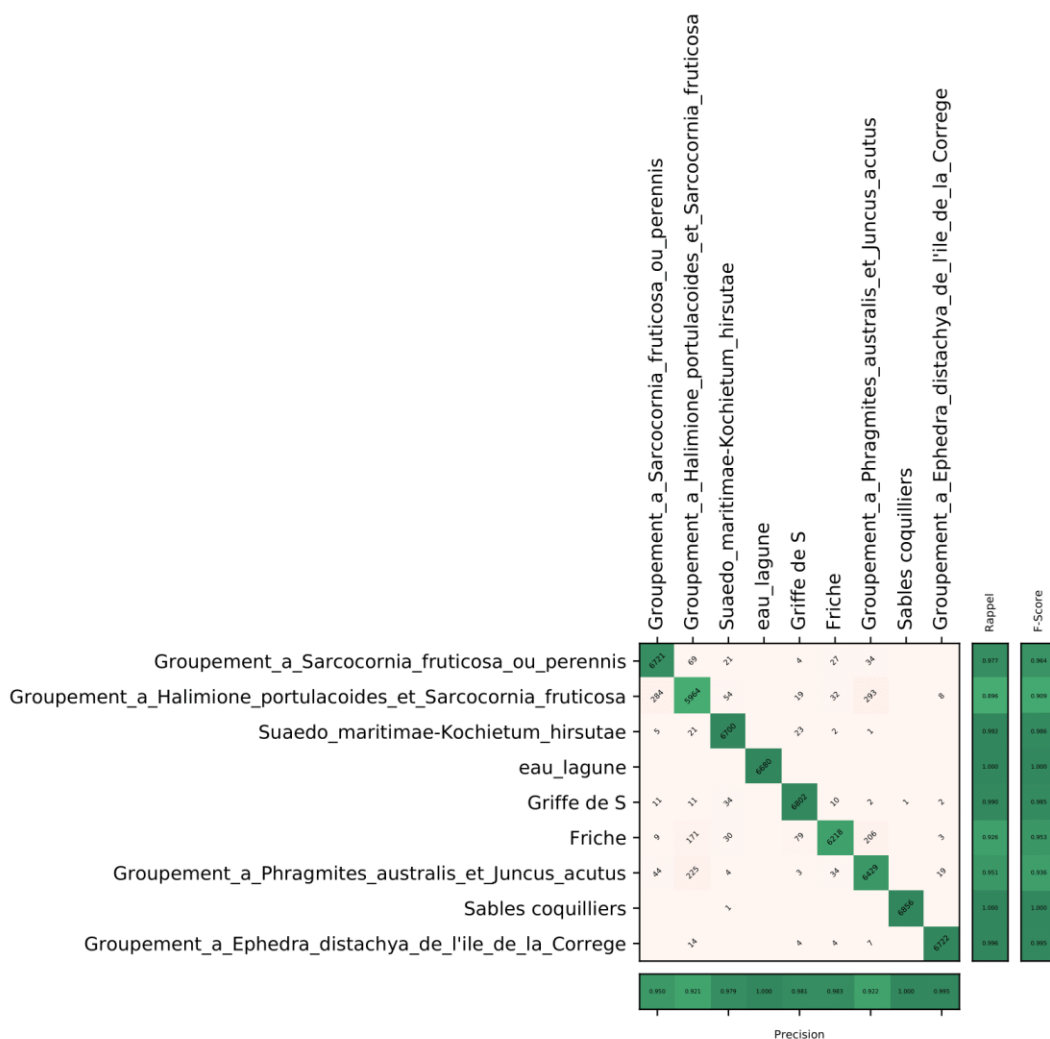


Figure 9. Cartographie des différentes zones d'habitats définies à dire d'expert

Tableau 5. Résumé des différentes classes présentes dans chacune des zones (en orange absence, en vert présence, les intitulés et codes UT ont été modifiés à posteriori pour la cartographie finale).

Association	z1	z1_za	z2	z2_za	z12	z5	z3	z35	35_za	z4	HZ_za	z35_1	surf_min (m2)
Lobulario maritimae-Ephedretum distachyae typicum	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	16
Groupement_a_Akanna_matthioli_et_Campanula_erinus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	16
Lobulario maritimae-Ephedretum distachyae degrade	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	16
Lobulario maritimae-Ephedretum distachyae matthioletosum sinuatae	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	16
Diantho catalaunici-Corynephorum canescentis	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	16
Groupement de roseliere	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	25
Groupement de roseliere et Cladium mariscus en mosaïque	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	25
Groupement_a_Phragmites_australis_et_Juncus_maritimus	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	25
Groupement_a_Sarcocornia_fruticosa_ou_perennis	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	25
Groupement_a_Halimione_portulacoides_et_Sarcocornia_fruticosa	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	25
Groupement_a_Limonium_virgatum_et_Plantago_coronopus	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	16
Suaedo maritimae-Kochietum hirsutae	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	16
eau lagune	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4
eau marine	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	25
eau temporaire	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	4
Sable nu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
roche	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
Artichaut	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	500
baccharis	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	50
canne de p	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	25
Griffe de S	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16
opuntia	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	16
pampa	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	25
Saccharum s	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	25
vigne	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	500
sol nu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
asphalte	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Vergers	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	500
Friche	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	25
bati	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Pinede	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	250
Echinophoro spinosae-Elymetum farcti	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	16
Salsolo kali-Cakiletum maritimae	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	16
Groupement_a_Quercus_coccifera	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	25
Phlomido lychnitidis-Brachypodietum retusi	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	25
Groupement_a_Phragmites_australis_et_Juncus_acutus	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	25
Populetum albae	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	200
Groupement_a_Tamarix_gallica_et_Convolvulus_sepium	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	50
Groupement_a_Tamarix_gallica_et_Geranium_rotundifolium	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	50
Orchido palustris-Festucetum arundinaceae	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	25
digue	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
Sables coquilliers	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Groupement_a_Ephedra_distachya_de_l'ile_de_la_Correge	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0



KAPPA: 0.966
OA: 0.970

Figure 10. Matrice de confusion obtenue sur l'ensemble de test pour la zone z35_1 (cas équilibré). La précision globale obtenue est de 97%

Enfin, nous avons résumé l'ensemble des évaluations obtenues pour chacune des zones dans un tableau récapitulatif. Le Tableau 6 présente le nombre d'UTs ainsi que la précision globale obtenue pour l'ensemble des zones considérées. Les précisions globales varient entre 93,70% pour la zone « HZ_za » à 42 classes (la zone la plus importante en termes de surface sur le site d'étude) et 97,90% pour la zone « z1 » à 13 classes. La moyenne des précisions globales est de l'ordre de 96%, ce score est très satisfaisant et permet d'envisager avec une grande confiance l'utilisation de la cartographie produite par la prédiction de l'ensemble de ces modèles de classification supervisée.

Tableau 6. Résumé des précisions globales estimées pour l'ensemble des modèles de classification supervisés évalués

	nb classe	Précision Globale (mode équilibré)
z1	13	97,90%
z1_za	16	97,70%
z2	27	97,70%
z2_za	30	97,70%
z12	30	96,80%
z5	24	97,40%
z3	26	95,20%
z35	33	96,90%
35_za	36	96,80%
z4	29	96,90%
HZ_za	42	93,70%
z35_1	9	97%

Après l'évaluation de ces modèles, les modèles complets, utilisant 100% des échantillons disponibles ont été entraînés et appliqués pour produire la cartographie brute. La régularisation par filtre majoritaire de taille 2 a été appliquée pour chaque zone et les résultats ont été vectorisés puis fusionnés pour obtenir une cartographie complète du site d'étude.

3.4 Post-traitement « experts »

Une fois la cartographie produite et convertie au format vecteur, deux étapes de post-traitement ont été appliquées. La première consiste à simplifier la cartographie en supprimant les polygones trop petits pour chacune des classes (les dimensions minimales par classes sont présentées Tableau 5) et en affectant la classe du polygone voisin ayant la plus grande surface de contact. Ce post-traitement permet de supprimer bon nombre d'aberrations de prédictions, de réduire le nombre de polygones prédits et ainsi rendre la carte plus lisible est plus cohérente par rapport à la réalité de terrain.

Enfin, une dernière étape de post-traitement a été appliquée sur la base de règles de décisions expertes. Le Tableau 7 présente l'ensemble des règles imaginées avec RIVAGE et le CBN Med et encodées et appliquées par i-Sea. Ces règles injectent du bon sens et de la logique de terrain dans la cartographie et permettent de corriger bon nombre d'erreurs systématiques observées et analysées. La dernière étape consiste à réincruster l'ensemble des classes non considérées par le travail de télédétection et cartographiées sur le terrain.

3.5 Présentation des résultats cartographiques

Cette ultime section présente un extrait de l'atlas cartographiques produit. Nous présentons, à titre d'exemple, en particulier, la cartographie des végétations littorales par télédétection multi-temporelle Pléiades en plan élargi (Figure 11) et zoomé (Figure 12), les cartographies selon les typologies Eur28 (Figure 13) et Eunis (Figure 14) obtenues directement par correspondance.

Tableau 7. Présentation des règles de décision expertes appliquées en post-traitement

Ordre des modifications	Modifications	Explications
1	Seuls les polygones de "Suaedo-Kochietum" qui touchent "Eau lagunaire" sont conservés (dont la surface réelle est supérieure à la surf min), tous les autres sont fusionnés avec le voisin le plus grand	De par leur fonctionnement écologique propre, les Suaedo-Kochietum sont toujours localisés à la bordure de l'eau de la lagune principale.
2	Seuls les polygones de "Sable coquillier" qui touchent "Eau lagunaire" OU "Suaedo-Kochietum" sont conservés (dont la surface réelle est supérieure à la surf min), tous les autres sont fusionnés avec le voisin le plus grand	Sur le site, le sable coquillier est toujours localisé au contact d'eau lagunaire ou des Suaedo-Kochietum
3	Modification manuelle à "dire d'expert"	Recodage de certains polygones manuellement sur la base de la connaissance de terrain
4	Réalisation d'un buffer de 10m vers les terres et 3m vers la lagune autour de la lagune principale, tous les polygones de "Suaedo-Kochietum" hors de ce buffer sont recodifiés en "Eau temporaire"	De par leur fonctionnement écologique propre, les Suaedo-Kochietum sont toujours localisés à la bordure de l'eau de la lagune principale.
5	Si "Chaussée/Voirie" touche « Eau marine » recodification en « Sable nu »	Élimination des polygones de « Chaussée/Voirie » sur les plages.
6	Dans toutes les zonations <u>sauf les zonations 1 et 12</u> : si "Surface homogène de Griffes de sorcière" adjacent de "Bâtiment" ou "Chaussée/Voirie" = recodification en « Sol nu » <u>Dans les zonations 1 et 12</u> : fusion de tous les polygones "Surface homogène de Griffes de sorcière" au polygone adjacent le plus grand SAUF s'il touche un polygone "Sol nu", dans ce cas on le fusionne avec ce dernier	Hors zonations 1 et 12 : élimination des faux-positifs de « Surface homogène de Griffes de sorcière » en zone urbaine Zonations 1 et 12 : probabilité plus élevée de trouver des Griffes de sorcière au contact des zones ouvertes de « Sol nu ».
7	Réincrustation	Voir Tab. 3

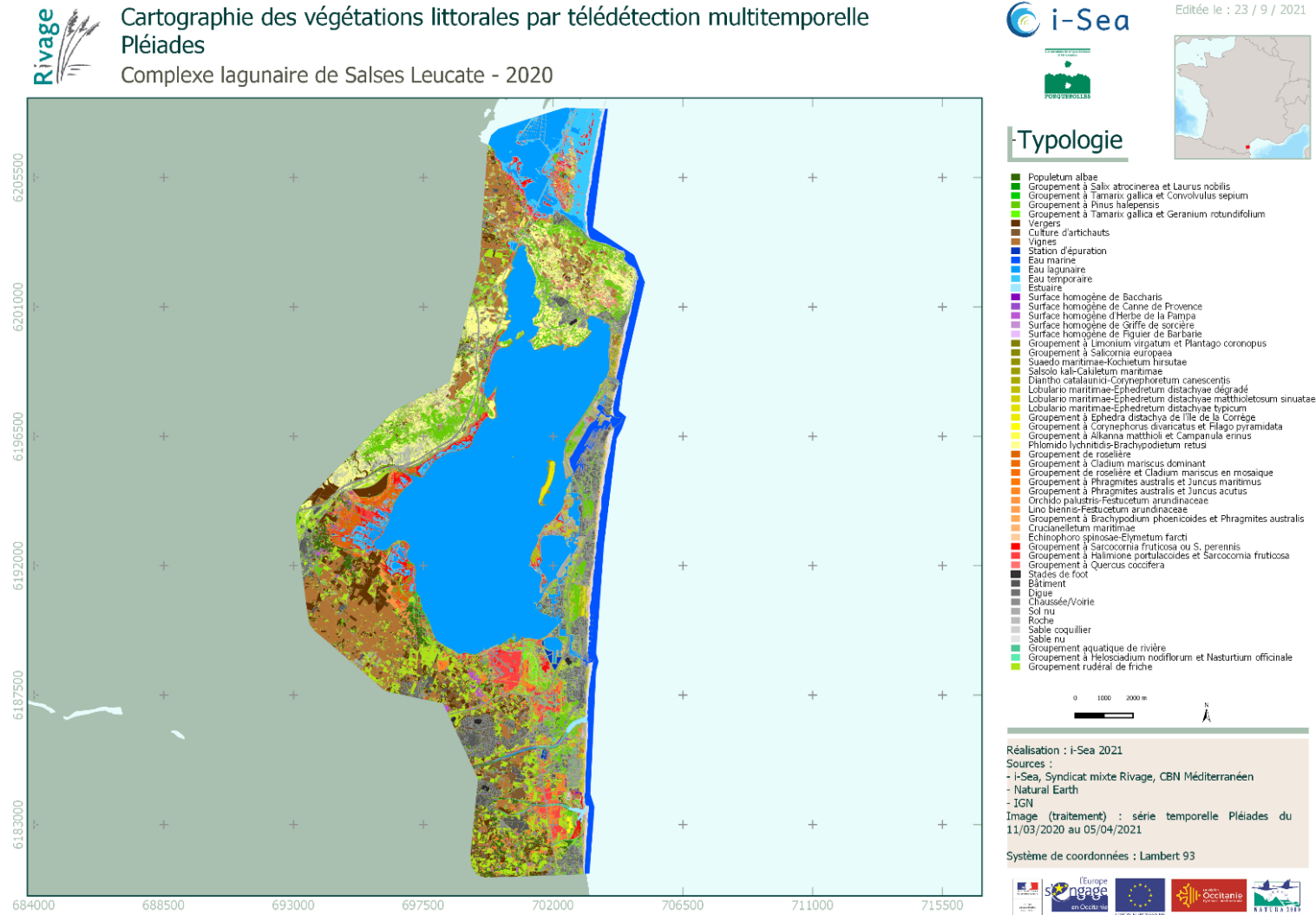


Figure 11. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (vue d'ensemble)



Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle
Pléiades
Complexe lagunaire de Salses Leucate - 2020

I2



Editée le : 23 / 9 / 2021



Typologie

- Populetum albae
- Groupement à Salix atrocinerea et Laurus nobilis
- Groupement à Tamarix gallica et Convolvulus sepium
- Groupement à Pinus halepensis
- Groupement à Tamarix gallica et Geranium rotundifolium
- Vergers
- Culture d'artichauts
- Vignes
- Station d'épuration
- Eau marine
- Eau lagunaire
- Eau temporaire
- Estuaire
- Surface homogène de Baccharis
- Surface homogène de Canne de Provence
- Surface homogène d'Herbe de la Pampa
- Surface homogène de Griffes de sorcière
- Surface homogène de Figues de Barbarie
- Groupement à Limonium virgatum et Plantago coronopus
- Groupement à Salicornia europaea
- Suaedo maritima-Kochietum hirsutae
- Salsolo kali-Cakiletum maritimae
- Diantho catalaunico-Corynephoretum canescens
- Lobulario maritima-Ephedretum distachyae dégradé
- Lobulario maritima-Ephedretum distachyae matthioletosum sinuatae
- Lobulario maritima-Ephedretum distachyae typicum
- Groupement à Ephedra distachya de l'île de la Corne
- Groupement à Corynephorus divaricatus et Filago pyramidata
- Groupement à Alkanna matthioli et Campanula erinus
- Phlomis lychnitis-Brachypodietum retus
- Groupement de roselière
- Groupement à Cladium mariscus dominant
- Groupement de roselière et Cladium mariscus en mosaïque
- Groupement à Phragmites australis et Juncus maritimus
- Groupement à Phragmites australis et Juncus acutus
- Orchido palustris-Festucetum arundinaceae
- Lino biennis-Festucetum arundinaceae
- Groupement à Brachypodium phoenicoides et Phragmites australis
- Crucianellum maritimae
- Echinophoro spinosae-Elynetum farcti
- Groupement à Sarcocornia fruticosa ou S. perennis
- Groupement à Halimione portulacoides et Sarcocornia fruticosa
- Groupement à Quercus coccifera
- Stadés de foot
- Bâtiment
- Digue
- Chaussée/Voie
- Sol nu
- Roche
- Sable coquillier
- Sable nu
- Groupement aquatique de rivière
- Groupement à Helosciadium nodiflorum et Nasturtium officinale
- Groupement rudéral de friche



Réalisation : i-Sea 2021
Sources :
- i-Sea, Syndicat mixte Rivage, CBN Méditerranéen
- Natural Earth
- IGN
Image (traitement) : série temporelle Pléiades du 11/03/2020 au 05/04/2021
Système de coordonnées : Lambert 93



6197000

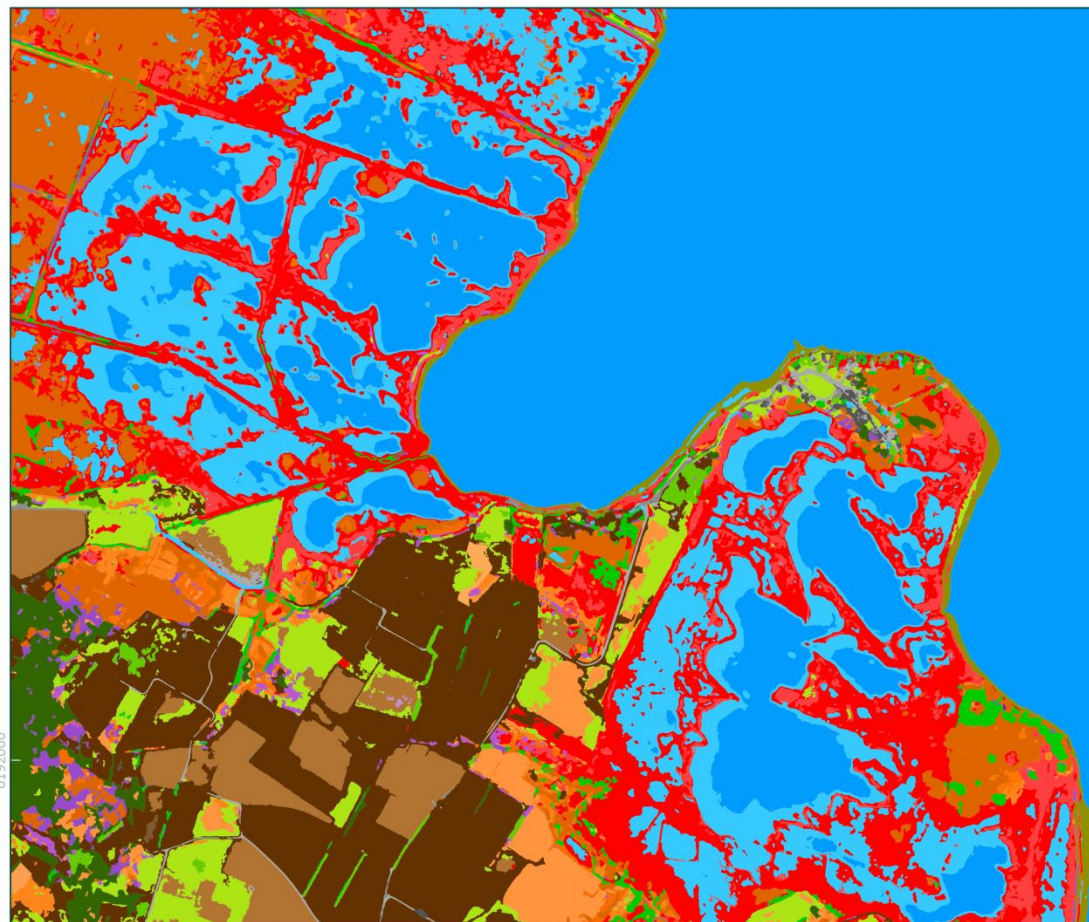


Figure 12. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (extrait de l'atlas cartographique)

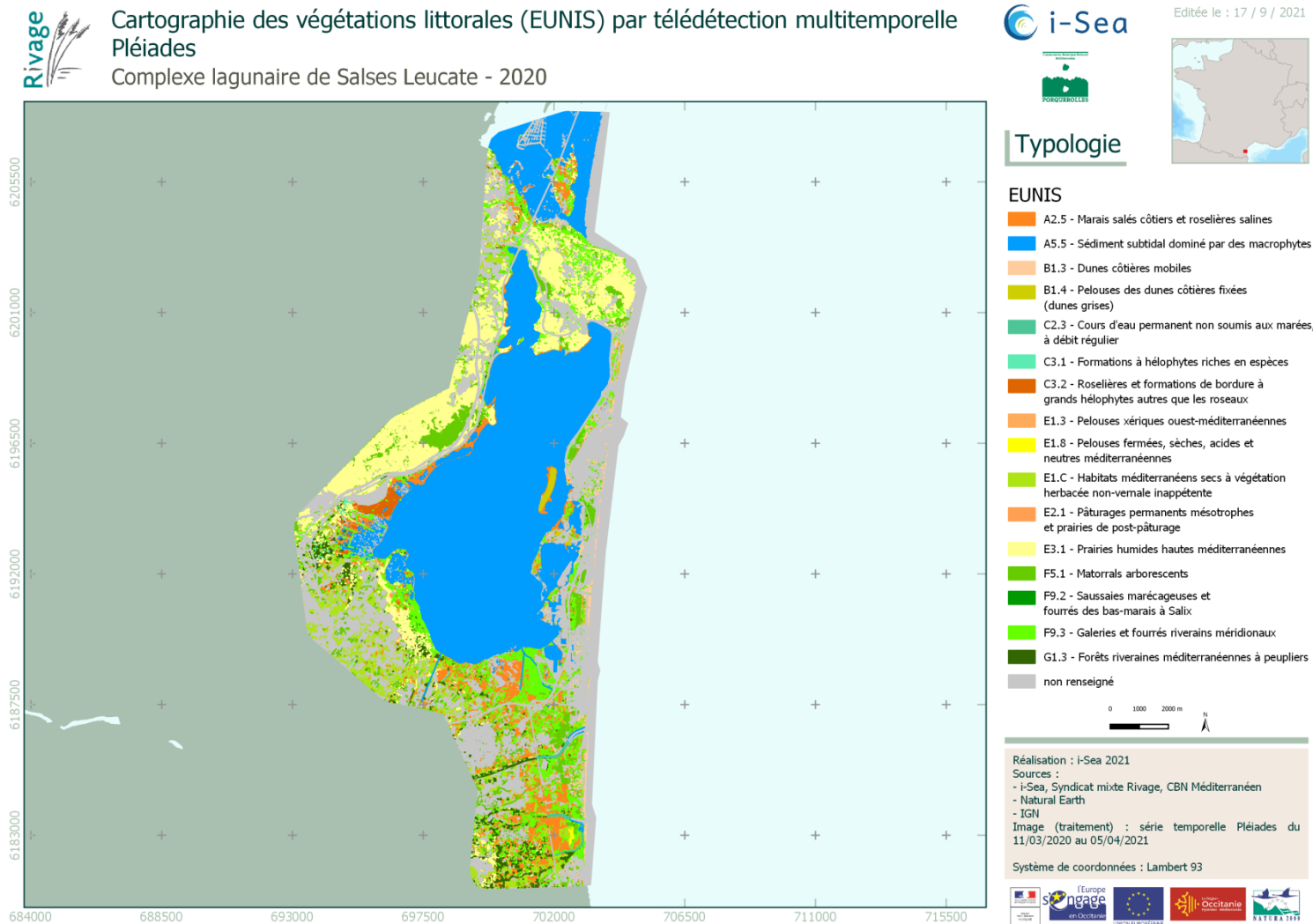


Figure 13. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (typologie EUNIS)

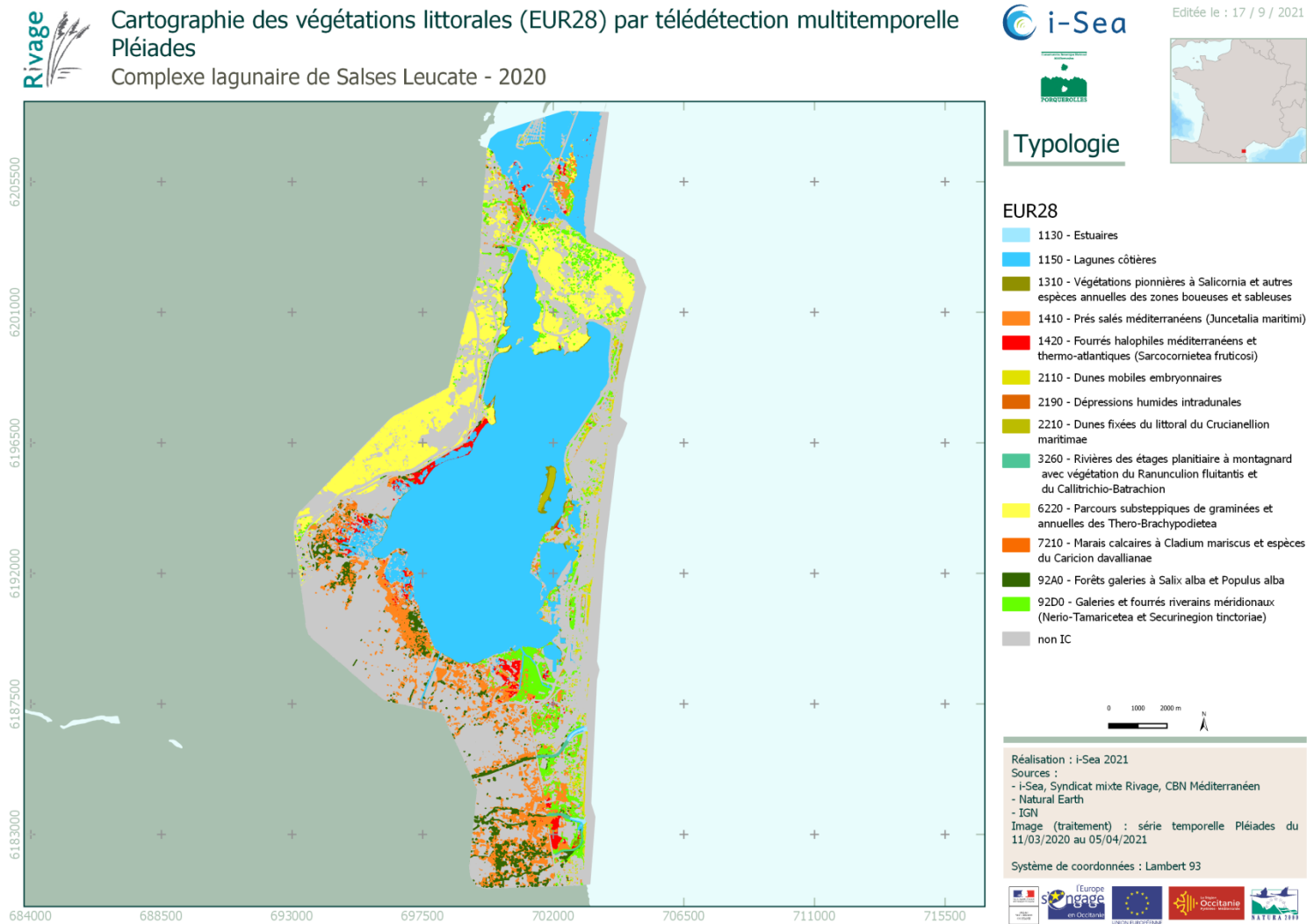


Figure 14. Cartographie des végétations littorales par télédétection multitemporelle Pléiades (typologie EUR28)

4 Conclusions et perspectives

La présente étude menée en collaboration entre le CBN Med, le syndicat mixte RIVAGE et la société i-Sea a permis de produire la première cartographie des végétations littorales du complexe lagunaire de Salses-Leucate par télédétection satellitaire multi-temporelle à très haute résolution spatiale (Pléiades). Le travail réalisé en amont par le CBN Med a permis d'établir une typologie fine définissant les habitats naturels et non naturels du complexe lagunaire de Salses-Leucate (Gritti, C. 2021). Cette typologie a été éprouvée au fur et à mesure des différentes versions de cartographies produites durant le projet, cette stratégie permettant d'écarter certaines unités typologiques ne pouvant être prédites par télédétection. Le caractère itératif de notre processus de cartographie Biocoast a ainsi été mis en valeur par la participation constructive de chacun. Cette typologie répond au mieux aux besoins de gestion du site tout en permettant une cartographie précise et robuste. Un effort très important a été fourni par le CBN Med ainsi que par le syndicat mixte RIVAGE sur le terrain pour produire une base de données de référence solide et pertinente permettant d'envisager le travail de télédétection avec confiance.

La chaîne de traitement d'images Biocoast a pu être appliquée avec succès pour produire la cartographie des végétations du site. Nous avons pu bénéficier d'une série temporelle Pléiades exceptionnelle, autant sur la qualité des images acquises que sur la densité temporelle obtenue. Ce facteur est un critère primordial pour notre processus de cartographie, au même niveau que la qualité des données de terrain utilisées pour entraîner les modèles de classification supervisés.

En revanche, nous n'avons pas simplement appliqué notre chaîne de traitement déjà bien éprouvée. En effet, l'investissement du syndicat mixte RIVAGE et du CBN Med nous a permis d'aller beaucoup plus loin, d'une part dans le raffinement de notre méthodologie générale et plus particulièrement dans l'élaboration de post-traitements avancés et innovants. La grande complexité de la typologie du site nous a poussé à décomposer le problème de cartographie en sous-zones, chacune de ces zones a été définie géographiquement par le CBN Med en spécifiant l'ensemble des classes possiblement présentes en leur sein. Cela a permis de développer des modèles de classification plus spécifiques et donc plus performants, améliorant ainsi significativement la qualité des résultats produits. Cette approche de modélisation « par zone » est une avancée méthodologique qui bénéficiera à nos prochains travaux de cartographie des milieux naturels.

Des post-traitements « experts » ont été appliqués, la première étape consistant à simplifier les polygones prédits en donnant une information de taille minimale des objets par classes a permis de produire un niveau de cartographie plus cohérent et plus proche de la réalité. Des premiers tests de cette approche avaient été réalisés avec le CBN Sud Atlantique ainsi qu'avec le CBN Bailleul. Cette étude a confirmé l'intérêt de ce genre d'approche. Enfin, un niveau supplémentaire de post-traitements a été développé, impliquant des règles de décision expertes *a posteriori* et permettant de supprimer des erreurs systématiques en prenant en compte la

connaissance et le bon sens de terrain. Cette approche est une avancée notable, elle sera approfondie durant de prochaines études.

L'union des investissements de chacun a permis de produire des cartographies de qualité et pouvant répondre à des besoins précis de gestion et de conservation des milieux naturels, notamment pour les habitats d'intérêt communautaires. La méthodologie développée est générique et pourra être appliquée à nouveau pour produire des mises à jour des cartographies, cela en garantissant une certaine précision et une importante objectivité. La méthodologie proposée et les résultats produits fournissent par conséquent des outils précieux pour le suivi et la gestion des habitats naturels du complexe lagunaire de Salse-Leucate.

5 BIBLIOGRAPHIE

Beguet, B., 2014. Characterization and mapping of forest structure from Very High-Resolution satellite images. PhD Informatics-Image Analysis., University of Bordeaux, ENSEGID-IPB / INRA.

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..

Gao, B.C, 1996. A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of the Environment* 58: 257-266.

Gritti, C., 2021. Typologie locale du site Natura 2000 « Complexe Lagunaire de Salses-Leucate ». CBNMed & CEFE CNRS 94 p. + annexes

Gritti, C, Argagnon, O., 2021. Conception d'une typologie locale des milieux naturels du site Natura 2000 « Complexe lagunaire de Salses-Leucate ». CBNMed & CEFE CNRS 31 p. + annexes

Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25 (3): 295–309. doi:10.1016/0034-4257(88)90106-X.

Jordan, Carl F., 1969. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor". *Ecology*. 50 (4): 663–666. doi:10.2307/1936256. ISSN 0012-9658.

Mathieu, R., Cervelle, B., Rémy, D., Pouget, M., 2006. Field-based and spectral indicators for soil erosion mapping in semi-arid Mediterranean environments (Coastal Cordillera of central Chile). *Wiley InterScience* DOI:10.1002/esp.1343.

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

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D., Deering, W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, ERTS Third Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309-317.

– Fin du document –