

Inventaire et cartographie des habitats naturels et de la flore d'intérêt communautaire du site NATURA 2000 FR 9301592 « Camargue »

Marché 2022-11

RAPPORT D'ETUDE



FICHE DOCUMENTAIRE

Date	02/04/2024
Maitre d'ouvrage	Parc Naturel Régional de Camargue Site internet : http://www.parc-camargue.fr/
Réalisation	i-Sea 30 avenue de Canteranne 33600 Pessac Site internet : https://i-sea.fr/
Rédacteurs	Nicolas Débonnaire : nicolas.debonnaire@i-sea.fr Cécile Curti : cecile.curti@i-sea.fr
Approbateur	Benoit Beguet : benoit.beguet@i-sea.fr
Citation recommandée	i-Sea, 2024. Inventaire et cartographie des habitats naturels et de la flore d'intérêt communautaire du site NATURA 2000 FR 9301592 « Camargue », Rapport d'étude, PNR Camargue, 23 p.

Sommaire

1	Contexte, enjeux et objectifs.....	5
2	Méthodes et données	7
2.1	Cartographie par classification d'images.....	7
2.1.1	Prospections terrain	7
2.1.2	Cartographie par classification d'images.....	8
2.2	Données.....	11
2.2.1	Données images	11
2.2.2	Données terrain.....	12
2.3	Mise en œuvre pratique	15
2.3.1	Travail par zones.....	16
2.3.2	Post-traitements automatiques	17
2.3.3	Construction de la couche d'information multiprobas	17
3	Résultats.....	18
3.1	Evaluation des classifications – performance cartographique	18
3.2	Ré-incrustation des masques des zones non naturelles.....	21
3.3	Post-traitements par surfaces minimales et règles de décision expertes.	22
4	Conclusions et perspectives	28
5	Remerciements	29
6	Bibliographie.....	29

Liste des illustrations

Figure 1. Localisation de la zone d'étude	6
Figure 2. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain	7
Figure 3. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement	9
Figure 4. Couverture satellitaire utilisée pour la cartographie des habitats de la partie terrestre de la ZSC du site Natura 2000 Camargue.	11
Figure 5. Carte de répartition des échantillons d'apprentissage sur le site N2000 Camargue.	14
Figure 6. Représentation cartographique des zonations sur le site Camargue.....	16
Figure 7. Guide de lecture d'une matrice de confusion	18
Figure 8. Matrice de confusion (modèle 1 à 4 images, cas équilibré) obtenue sur l'ensemble de test.	19
Figure 9. Répartition des F-scores selon les différentes classes sur le site Camargue, évaluation équilibrée.	20
Figure 10 Répartition des F-scores selon les différentes classes sur le site Camargue, évaluation déséquilibrée.....	20
Figure 11 Masques des zones non naturelles appliqué.....	22
Figure 12. Cartographie 2023 des habitats du site Natura 2000 de Camargue par télédétection multi-temporelle Pléiades	27
Tableau 1. Tableau des données terrain pour le travail de cartographie	8
Tableau 2. Synthèse des données d'apprentissage, polygones terrain et photo interprétés confondus sur le site Camargue.	12
Tableau 3 : Résumé des précisions globales (OA : Overall accuracy) obtenues pour les 3 modèles, en mode équilibré et déséquilibré.	21
Tableau 4 Surfaces minimales par habitat.	23
Tableau 5 Surfaces prédites pour chacun des habitats.	25

1 CONTEXTE, ENJEUX ET OBJECTIFS

Le site « Camargue » fait partie du réseau écologique européen Natura 2000, de par sa richesse en espèces et milieux naturels, support d'une importante biodiversité. Il a été désigné comme ZSC au titre de la directive « Habitats, Faune, Flore » par arrêté ministériel du 26/06/2014 et comme ZPS au titre de la directive « Oiseaux » par arrêté ministériel du 30/09/1986

Le PNR de Camargue (PNRC) a été désigné « animateur local » par le comité de pilotage du site Natura 2000 afin de mettre en œuvre le DOCUMENT d'OBJECTIFS (DOCOB), approuvé le 06/12/2011.

La cartographie des habitats d'intérêts communautaires du DOCOB a été réalisée d'avril à septembre 2008 sur SIG à partir de la cartographie de l'occupation du sol et d'une typologie de conversion « Habitats certains-Habitats probables-Habitats possibles » élaborées par la Réserve nationale de Camargue en 2006. Les données sont donc, pour la plupart, antérieures à 2008 et ont donc plus de 14 ans. De plus, le travail réalisé à l'époque n'avait pas pu s'atteler à délimiter précisément les habitats.

L'objet de la présente prestation est d'actualiser la cartographie, par une nouvelle campagne de terrain en 2023-2024, couvrant au moins une année écologique avec l'appui de la télédétection.

Dans ce contexte, le PNR Camargue a manifesté son intérêt à réaliser un inventaire des habitats naturels, inscrits à l'annexe I (DH1) de la directive « Habitats, Faune, Flore » et ayant justifié la désignation du site NATURA 2000. Secondairement, les habitats non N2000 sont également à prendre en compte dans l'inventaire mais avec un niveau de précision moindre.

Pour traiter le besoin d'une cartographie actuelle et exhaustive habitats, des données d'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale, combinées à des observations terrain, ont été exploitées dans un processus de traitement automatique robuste, fiable et reproductible basé sur des méthodes de machine learning (procédé Biocoast).

Le présent rapport rend compte :

- Des méthodes de traitement et des données utilisées pour caractériser les habitats d'intérêt sur le secteur étudié,
- Des résultats obtenus concernant la typologie retenue ainsi que la précision de la cartographie de l'habitat naturel étudié sur le site du PNR Camargue.

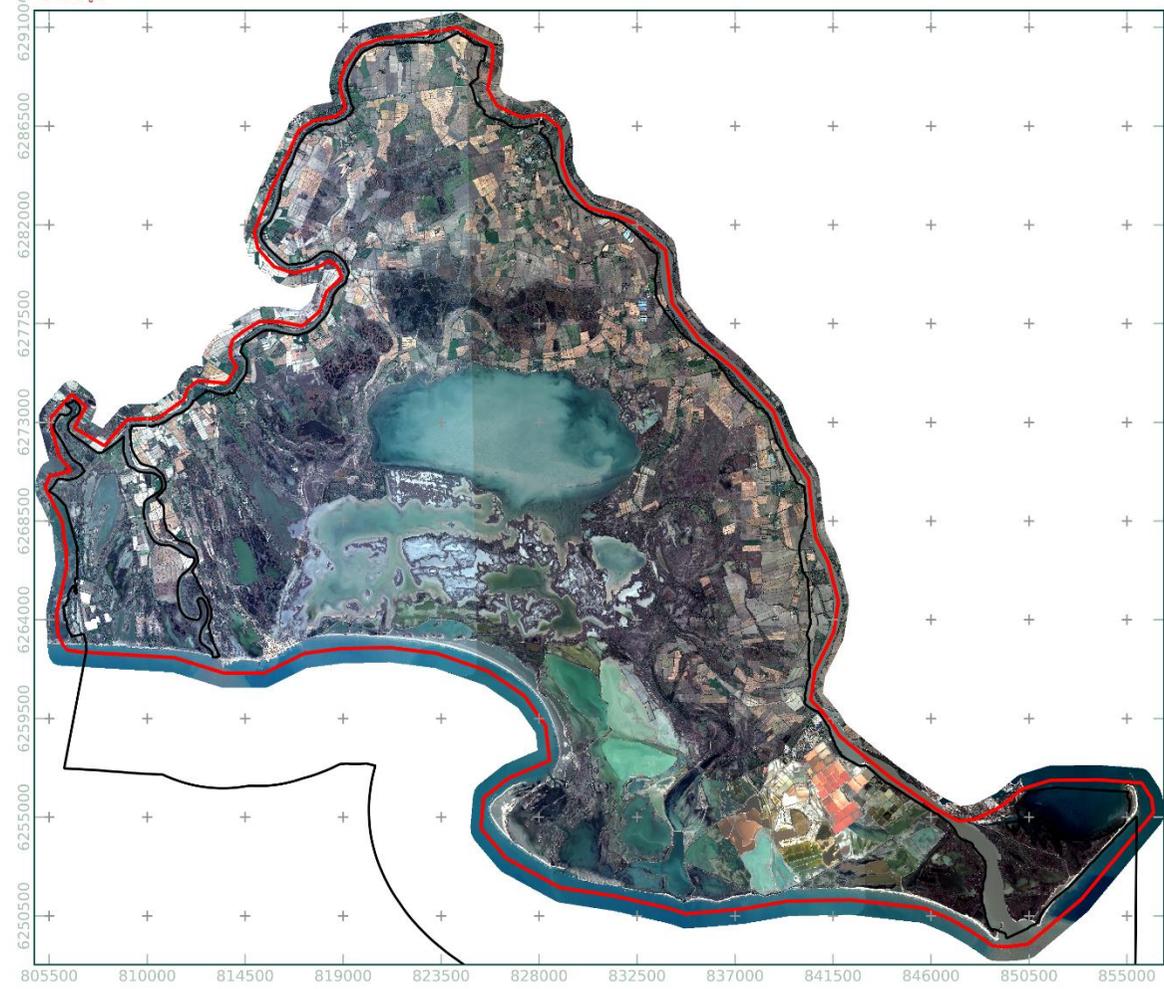
Le périmètre de la zone d'étude correspond à la partie terrestre de la ZSC du site Natura 2000 Camargue. Elle est présentée en Figure 1 et s'étend sur une superficie totale d'environ 77 800 ha.



Emprise de la zone d'étude Site Natura 2000 "Camargue" - 2023



Éditée le : 27 / 3 / 2024



FR9301592 - Camargue
emprise de la zone d'étude



Réalisation : i-Sea 2024
Sources :
- i-Sea, Nicolas Borel Consultant, PNR Camargue
- Natural Earth
- IGN
Image : Sentinel-2 du 20/11/2023 ©ESA
Système de coordonnées : Lambert 93



Figure 1. Localisation de la zone d'étude

2 METHODES ET DONNEES

La production de cartographies des végétations et 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 traitement 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 Cartographie par classification d'images

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 différents habitats présents sur les sites d'étude.

La Figure 2 représente un relevé de terrain respectant les conditions idéales pour le processus de cartographie Biocoast. Le centre du relevé doit être positionné à une distance de 5 fois la résolution spatiale des images utilisées, au centre d'une zone homogène. Cela garantit d'éviter des effets de bord d'une part, et d'avoir une surface échantillonnée suffisamment grande pour contenir plusieurs pixels. Cet ensemble de pixels permettra de caractériser la variabilité spatiale de la classe typologique échantillonnée dans cette surface.

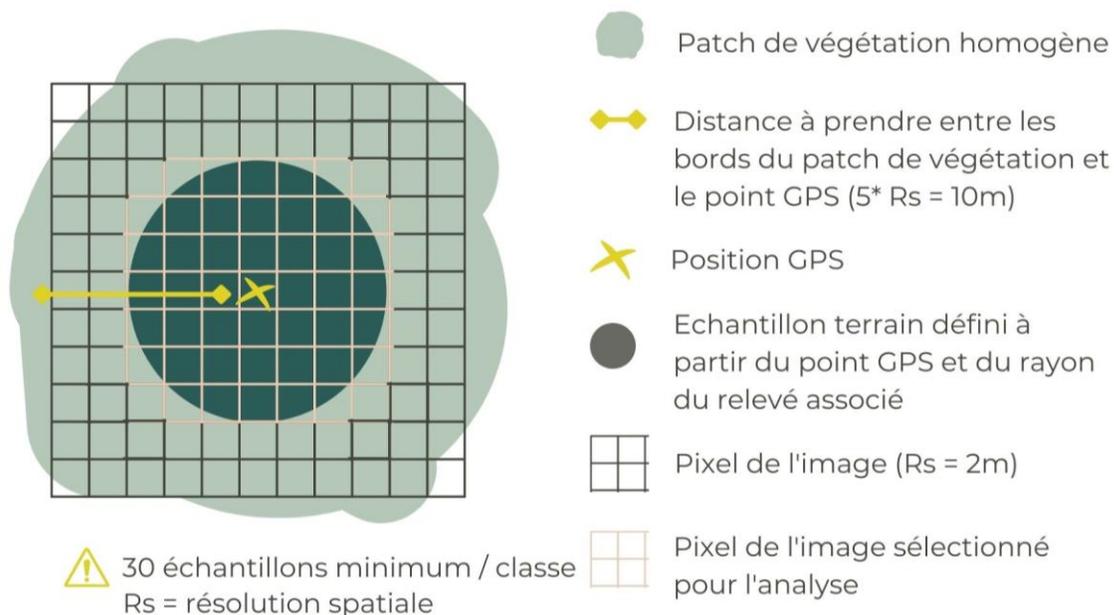


Figure 2. Sélection des zones à échantillonner sur le terrain

Dans cette étude, les points GPS ont été acquis au sein d'une zone homogène de 6 m de rayon pour s'adapter aux formations naturelles sur le terrain, en respectant une distance vis-à-vis du bord de la zone de 4 m minimum. i-Sea est chargé de l'extension du point en polygone et les informations qui lui sont fournies sont récapitulées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Tableau des données terrain pour le travail de cartographie

ATTRIBUT	DESCRIPTION	LISTE CHOIX
IDENT	Identifiant unique de la station	Génération automatique
DATE	Date de la mission	JJ/MM/AAAA
SOURCE	Source de la donnée	Nom de la structure source
X	Coordonnée X du point GPS	Génération automatique
Y	Coordonnée Y du point GPS	Génération automatique
SRC	Système de projection dans lequel les données doivent être utilisées	Système de projection
RAYON	Quelle est approximativement le rayon de cette étendue (ou patch)	En mètres
FORME	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
CODE_TYPO	Rattachement de la donnée d'apprentissage au code d'une unité typologique	Code de l'unité typologique
UNITE TYPOLOGIQUE	Rattachement de la donnée d'apprentissage à une unité typologique	Intitulé de l'unité typologique
COMMENTAIRES	Commentaires utiles à l'interprétation	Ex : remarques sur l'état de conservation de l'unité typologique concernée sur la station

Concrètement, le bureau d'étude Nicolas Borel consultant a effectué l'ensemble des relevés terrain, qui permettent de calibrer, valider et corriger les analyses d'images satellitaires, en étroite relation avec i-Sea.

2.1.2 Cartographie par classification d'images

Afin de déterminer une stratégie de classification d'images adaptée au problème de la reconnaissance et de la différenciation des types d'habitats présents sur les sites étudiés, différentes approches ont été testées. La démarche méthodologique adoptée est présentée sur la Figure 3.

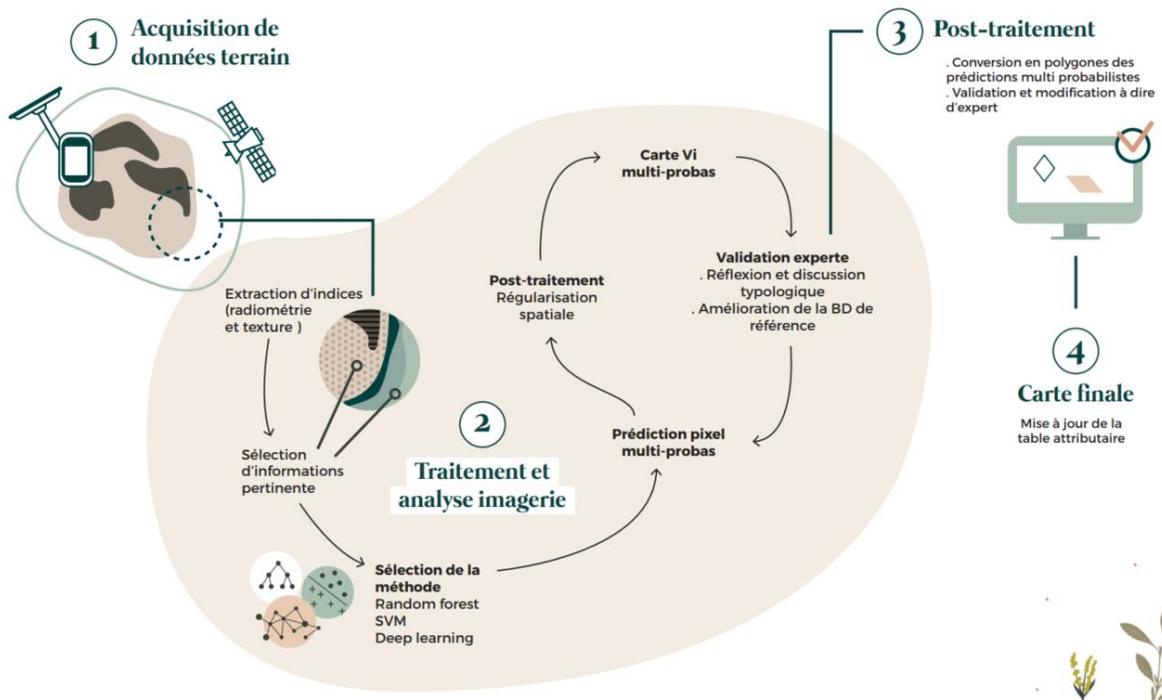


Figure 3. Schéma fonctionnel décrivant la méthode de traitement

Une fois l'acquisition des données terrain et images réalisée, le travail sur les données terrain permet d'affiner la typologie et donc d'affecter à chacune des observations (polygones) une classe (code numérique). Il est aussi essentiel de bien vérifier le positionnement de tous les polygones qui serviront à l'apprentissage et à la classification de façon à ne pas injecter dans le processus, des pixels qui ne seraient pas précisément représentatifs de la classe d'intérêt.

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.

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 sont calculés et injectés à la classification :

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

L'image multispectrale multi-temporelle est ensuite obtenue par concaténation de 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.

Pour cette étude, nous avons choisi de travailler avec les Random Forests (ou forêts aléatoires, Pal, 2005 ; Beguet *et al.*, 2014) qui apportent un bon compromis entre rapidité, simplicité de paramétrisation et performance. Les Random Forests 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.

L'étape de classification 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'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 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 à l'échelle de l'ensemble de l'emprise de l'image multi-temporelle,
- Régularisation et post-traitement

2.2 Données

2.2.1 Données images

Une série temporelle composée d'images Pléiades (RGBPIR, 0,5 m de résolution spatiale) a été acquise durant l'année 2023. Les images ont été contrôlées visuellement afin de s'assurer de leur qualité avant de les inclure dans la série temporelle utilisée pour la cartographie.

La base de données image a été collectée et mise à disposition par DINAMIS¹ (Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Satellites). Une transformation d'échelle (sous-échantillonnage d'un facteur 4) a été appliquée pour ré-échantillonner les images d'origine et ainsi passer de 0,5 m à 2 m de résolution spatiale.

La série temporelle utilisée pour la cartographie est ainsi composée de 4 images Pléiades, acquises entre mars 2023 et novembre 2023 (Figure 4)

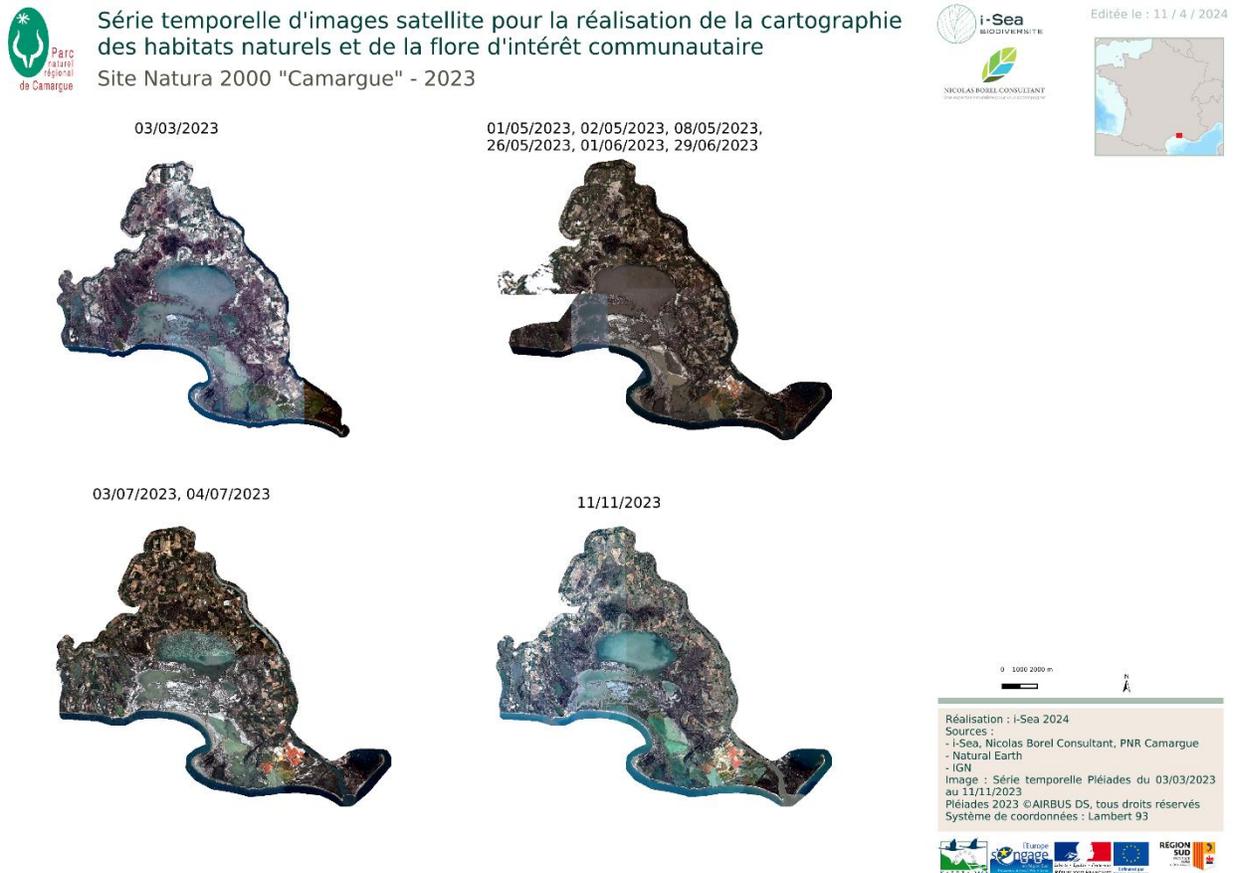


Figure 4. Couverture satellitaire utilisée pour la cartographie des habitats de la partie terrestre de la ZSC du site Natura 2000 Camargue.

¹ [Dynamis – Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Satellites \(data-terra.org\)](https://data-terra.org/)

2.2.2 Données terrain

Le bureau d'étude Nicolas Borel consultant a procédé à des campagnes terrain sur une période comprise entre avril et juillet 2023, ainsi qu'à la numérisation des polygones sur SIG par photo-interprétation afin d'enrichir la base de données terrain. i-Sea a ensuite vérifié chaque relevé pour la production cartographique.

Le terrain, effectué en 2023 a permis de collecter un total de 1 818 points, répartis entre les différentes classes de la typologie initialement établie (Tableau 2). A ces données terrain s'ajoutent les données photo interprétées. Au total, 2 464 polygones constituent la base de données d'entraînement. La Figure 5 présente la répartition spatiale des données de terrain ayant servi à l'apprentissage et à l'évaluation de la classification.

Tableau 2. Synthèse des données d'apprentissage, polygones terrain et photo interprétés confondus sur le site Camargue.

Typologie	Nombre de polygones dans la base de données d'apprentissage
Bancs de sable à faible couverture permanente d'eau marine	33
Dunes à végétation sclérophylle des <i>Cisto-Lavanduletalia</i>	19
Dunes avec forêts à <i>Pinus pinea</i> et/ou <i>Pinus pinaster</i>	51
Dunes avec pelouses des <i>Brachypodietalia</i> et des plantes annuelles	174
Dunes fixées du littoral du <i>Crucianellion maritimae</i>	48
Dunes littorales à <i>Juniperus spp</i>	31
Dunes mobiles du cordon littoral à <i>Ammophila arenaria</i> (dunes blanches)	62
Dunes mobiles embryonnaires	32
Eaux oligo mésotrophes calcaires avec végétation benthique à <i>Chara spp</i>	49
Forêts-galeries à <i>Salix alba</i> et <i>Populus alba</i>	46
Fourré d'Olivier de Bohême	53
Fourré de Baccharis	81
Fourrés halophiles méditerranéens et thermo-atlantiques (<i>Sarcocornietea fruticosi</i>)	177
Fruticée à Filaire ou Prunelliers	103
Galeries et fourrés riverains méridionaux (<i>Nerio-Tamaricetea</i> et <i>Securinegion tinctoriae</i>)	104
Gazons à <i>Brachypode de Phénicie</i>	37
Lacs eutrophes naturels avec végétation du Magnopotamion ou de l'Hydrocharition	36
Lagunes côtières	41
Mares temporaires méditerranéennes	78
Ormaie Frénaie	45

Parcours substeppiques de graminées et annuelles des Thero-Brachypodietea	143
Pâturages	77
Peuplements d'Amorpha	34
Peuplements de Cannes de Provence	51
Peuplements de Jussie	14
Phragmitaies	154
Prairie hygrophile à <i>Paspalum distichum</i>	76
Prairies fauchées meso-hygrophiles méditerranéennes	52
Prés salés méditerranéens	221
Replats boueux ou sableux exonde à marée basse	31
Ronciers	37
Sol nu	31
Steppes salées méditerranéennes (<i>Limonietalia</i>)	96
Terrains en friche	40
Typhaies	13
Végétation a Scirpes halophiles	35
Végétations pionnières à Salicornia et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses	59
Total	2 464

2.3 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. 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 (buffer), et superposées aux images Pléiades. Chacun des polygones a été corrigé et étendu de façon à correspondre aux limites visibles sur les supports de référence. Un certain nombre de polygones a été repris et corrigé par photo-interprétation, cela afin de ne contenir qu'une seule classe d'occupation « visible » comme par exemple la présence de sédiment nu dans un polygone de végétation. 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 d'évaluation (test),
- 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.

Ces évaluations ont été réalisées en mode « équilibré », c'est-à-dire en prenant en compte le même nombre de pixels de test pour chacune des classes. Le nombre de pixels de la plus petite classe a été retenu. Nous avons fait ce choix car la BD d'apprentissage était très déséquilibrée (certaines classes étaient sur-représentées et auraient pu biaiser fortement l'évaluation des classifieurs). Cette évaluation est présentée sous forme de matrices de confusion (tableau de contingence croisant prédictions et données de référence) et au calcul de la précision globale (proportion de pixels bien classés). Après l'étape d'évaluation du modèle fitté, un modèle complet, utilisant 100% des échantillons disponibles sur le site, a été entraîné et appliqué pour produire la cartographie brute.

2.3.1 Travail par zones

Une approche par zonations a dû être mise en place afin de palier à deux principaux problèmes dans la constitution de la série temporelle :

- La nébulosité présente sur certaines images (les pixels concernés ne peuvent être pris en compte dans la série temporelle)
- L'emprise des acquisition peut varier, avec des zones non imagées à toutes les périodes.

Une cartographie des différentes zonations a donc été établies de façon automatique, en combinant les masques de nébulosité et les emprises des images. Pour chacune de ces zones un modèle spécifique sera entraîné avec la série d'images correspondante. Au total, 3 zones et donc 3 modèles ont été nécessaires pour la mise en place du processus de cartographie Biocoast sur le site de Camargue (Figure 6).

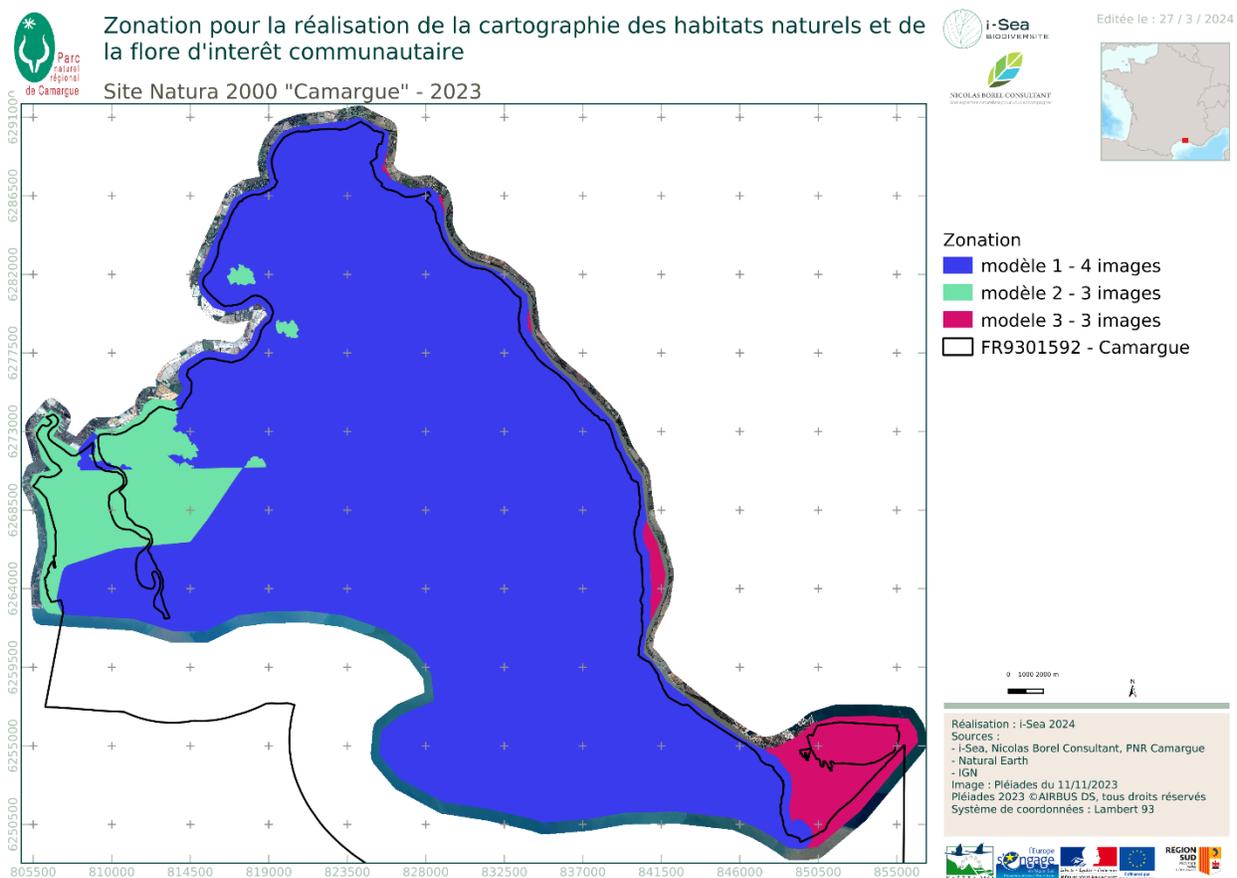


Figure 6. Représentation cartographique des zonations sur le site Camargue.

2.3.2 Post-traitements automatiques

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 format vecteur. La table attributaire de ce vecteur est uniformisée et mise à jour avec notamment le calcul des surfaces des polygones.

Une régularisation par surface minimale est ensuite appliquée, pour chacun des habitats, une surface minimale est définie a priori puis est appliquée à l'ensemble de la prédiction. Cette opération permet de simplifier la carte et de supprimer de très petites surfaces incohérentes sur le plan thématique.

Enfin, après l'analyse experte des cartographies produites, un ensemble d'erreurs systématiques peut être observé. Nous élaborons alors, en collaboration avec les experts des milieux naturels et les gestionnaires du site, un ensemble de règles de décisions thématiques, logiques et spatiales qui permettent, une fois implémentée, de réinjecter du « bon sens » de terrain et d'éliminer des erreurs potentielles.

2.3.3 Construction de la couche d'information multiprobas

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.

3 Résultats

3.1 Evaluation des classifications – performance cartographique

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.

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.

Un guide de lecture des matrices de confusion est illustré par la Figure 7. Ces matrices permettent d'observer la dispersion des erreurs de prédiction et ainsi de comprendre de potentielles confusions dans les résultats cartographiques.

L'ensemble des matrices au format PNG sont fournies avec la cartographie, il convient de les analyser, zone par zone et classe par classe pour une interprétation fine des résultats. La Figure 8 présente la matrice de confusion correspondant au modèle 1 à 4 images, modèle couvrant la majeure partie du site.

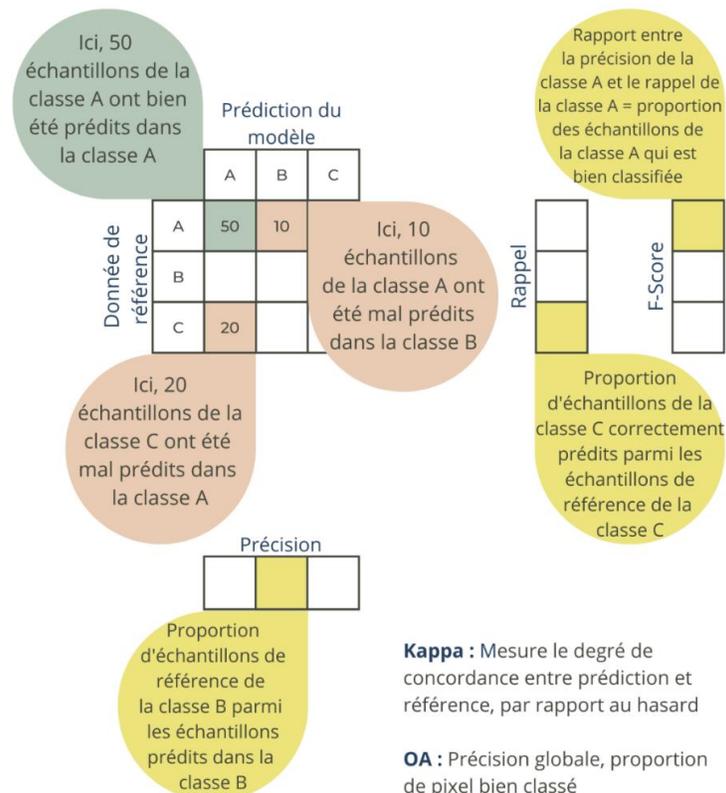


Figure 7. Guide de lecture d'une matrice de confusion

Une précision globale de 81,5% est obtenue pour le modèle 1 en mode équilibré (évaluation la plus pessimiste). On peut observer que la majorité des classes est bien prédite avec une grande précision. Le score est satisfaisant et permet d'envisager avec une confiance relativement bonne l'utilisation de la cartographie produite par la prédiction de l'ensemble de ces modèles de classification supervisée.

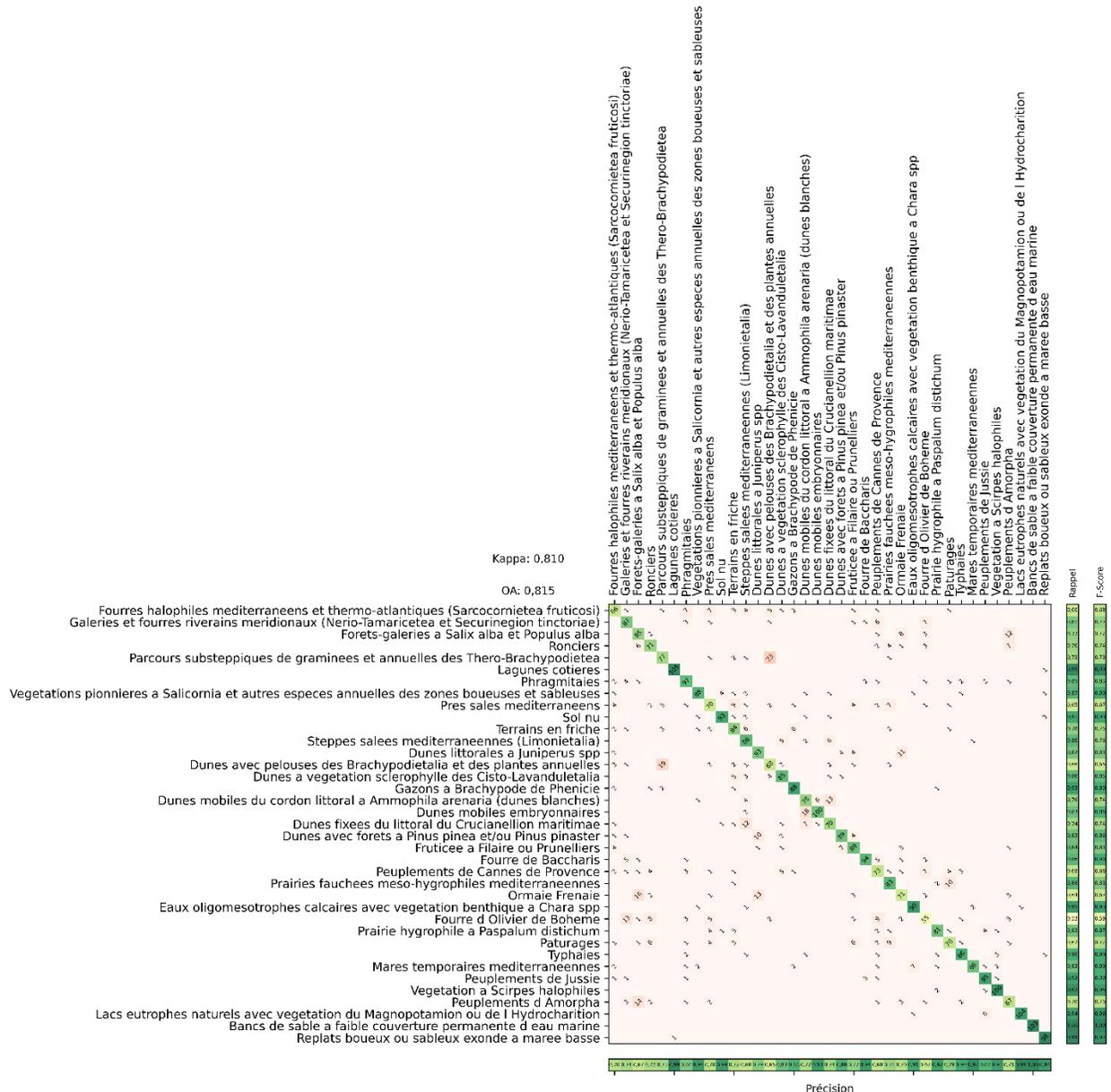


Figure 8. Matrice de confusion (modèle 1 à 4 images, cas équilibré) obtenue sur l'ensemble de test.

Le F-Score est un bon indicateur de la proportion des échantillons de chaque classe qui est bien classifiée (Figure 9). Le score le moins fort concerne la classe « Fourré d'olivier de Bohème » avec un F-Score de l'ordre de 59,14% pour le mode d'évaluation équilibré.

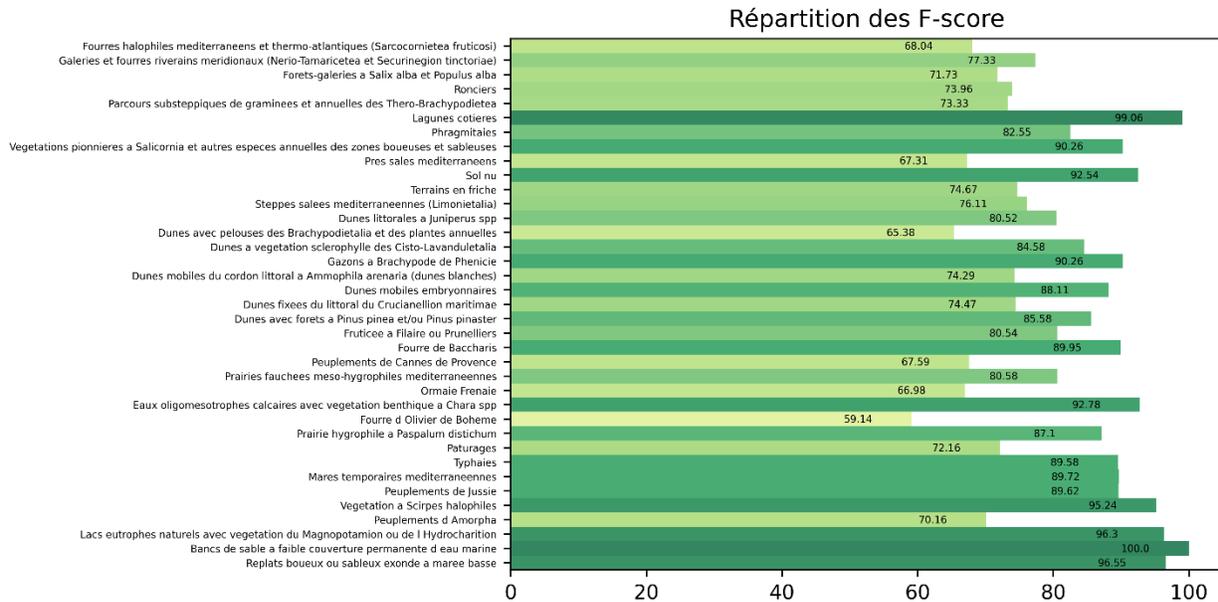


Figure 9. Répartition des F-scores selon les différentes classes sur le site Camargue, évaluation équilibrée.



Figure 10 Répartition des F-scores selon les différentes classes sur le site Camargue, évaluation déséquilibrée.

La Figure 10 présente les F-scores obtenus pour l'évaluation en mode « déséquilibré » (évaluation la plus optimiste, avec potentiellement des biais induit par la présence de classes faciles à reconnaître et sur-représentée dans notre base de données d'apprentissage. Il convient de considérer que les évaluations équilibrées et déséquilibrées permettent d'encadrer les précisions globales obtenues, donnant une fourchette cohérente. Enfin, le Tableau 3 permet de vérifier que les précisions obtenues par les modèles 2 et 3 sont elles aussi tout à fait satisfaisantes malgré un nombre moins important d'images considérées.

Tableau 3 : Résumé des précisions globales (OA : Overall accuracy) obtenues pour les 3 modèles, en mode équilibré et déséquilibré.

	OA "équilibré"	OA "déséquilibré"
modèle 1	81,15%	96,40%
modèle 2	78,40%	92,60%
modèle 3	78,20%	94,30%

3.2 Ré-incrustation des masques des zones non naturelles

Nous avons utilisé une couche d'Occupation du sol (OCSOL Du site N2000 de Camargue mis à jour en 2023) pour masquer les zones non naturelles dans la cartographie finale. Seules les classes « prairies temporaires » et « friches récentes » de la typologie concernant les cultures dans IOCSOL non pas été masquée afin d'être prédites par notre modèle. La Figure 11 présente ces surfaces de ré-incrustation.

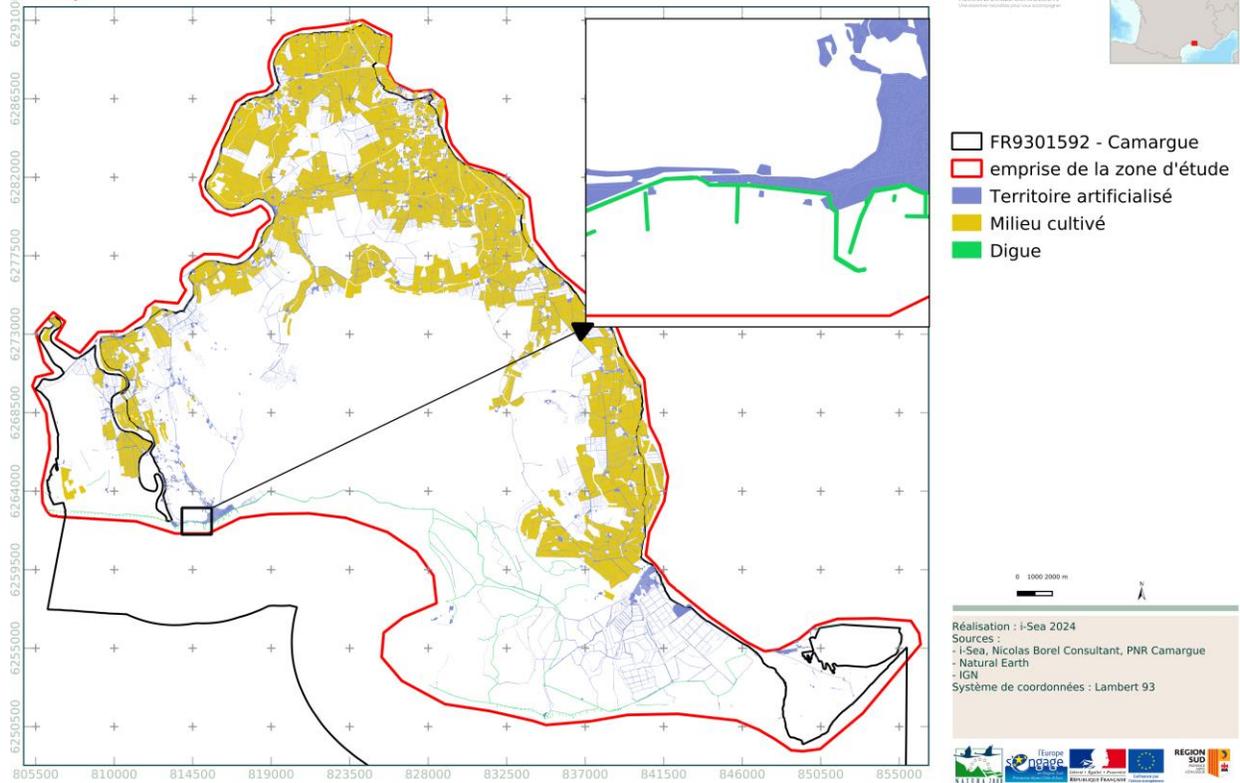


Figure 11 Masques des zones non naturelles appliqué.

3.3 Post-traitements par surfaces minimales et règles de décision expertes.

Enfin, la dernière étape de notre production consiste à appliquer les règles de surfaces minimales par habitat. Les règles appliquées sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 Surfaces minimales par habitat.

Nom Complet valide	Surface minimale en m2
Fourrés halophiles méditerranéens et thermo-atlantiques (Sarcocornietea fruticosi)	100
Galeries et fourrés riverains méridionaux (Nerio-Tamaricetea et Securinegion tinctoriae)	10
Forêts-galeries à Salix alba et Populus alba	1000
Ronciers	5
Parcours substeppiques de graminées et annuelles des Thero-Brachypodietea	5
Lagunes côtières	50
Phragmitaies	50
Végétations pionnières à Salicornia et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses	30
Prés salés méditerranéens	100
Sol nu	0
Terrains en friche	20
Steppes salées méditerranéennes (Limonietalia)	5
Dunes littorales à Juniperus spp.	20
Dunes avec pelouses des Brachypodietalia et des plantes annuelles	5
Dunes à végétation sclérophylle des Cisto-Lavanduletalia	5
Gazons à Brachypode de Phénicie	10
Dunes mobiles du cordon littoral à Ammophila arenaria (dunes blanches)	5
Dunes mobiles embryonnaires	5
Dunes fixées du littoral du Crucianellion maritimae	5
Dunes avec forêts à Pinus pinea et/ou Pinus pinaster	1000
Fruticée à Filaire ou Prunelliers	5
Fourré de Baccharis	5
Peuplements de Cannes de Provence	5
Prairies fauchées méso-hygrophiles méditerranéennes	1000
Ormaie Frênaie	100
Eaux oligomésotrophes calcaires avec végétation benthique à Chara spp	30
Fourré d'Olivier de Bohème	10
Prairie hygrophile à Paspalum distichum	30
Pâtures à grand jonc	réincrustée
Pâturages	100
Typhaies	5
Mares temporaires méditerranéennes	5
Peuplements de Jussie	5

Végétation à Scirpes halophiles	10
Peuplements d'Amorpha	5
Lacs eutrophes naturels avec végétation du Magnopotamion ou de l'Hydrocharition	30
Forêts à Quercus ilex et Quercus rotundifolia	réincrustée
Prairies humides méditerranéennes à grandes herbes du Molinio-Holoschoenion	réincrustée
Végétation à Eleocharis palustris	réincrustée
Bancs de sable a faible couverture permanente d eau marine	1000
Replats boueux ou sableux exonde a maree basse	1000

Enfin, après avoir appliqué ces règles de surfaces minimales, les règles de post-traitements sont appliquées en cascade, ces règles ont été élaborées avec Nicolas Borel et Alexandre Crestey pour affiner la cartographie et corriger des erreurs systématiques. Ces règles sont les suivantes :

- Régularisation par surfaces minimales
- Incrustation de la couche d'occupation du sol
- Tous les micro polygones jouxtant les digues sont des digues. Faire un buffer de 10 mètres autour des digues et dire que ce sont des digues.
- La classe « Sol nu » (10) ne doit pas exister à la fin, on lui appliquera les règles de décisions suivantes :
 - o Le polygone qui entoure « Sol nu » l'englobe et lui donne son nom
 - o Le polygone qui jouxte le plus (ou qui a le plus de frontière) avec « Sol nu » l'englobe
- Si « Mares temporaires méditerranéennes » (51) jouxte « Lagunes côtières » (6) alors le polygone le plus grand englobe le tout.
- Si polygone de « Lagune côtière » (6) jouxte « Eaux oligomésotrophes calcaires avec végétation benthique à Chara spp » (29) ou « Lacs eutrophes naturels avec végétation du Magnopotamion ou de l'Hydrocharition » (58) alors le polygone le plus grand l'englobe.
- Si polygone de « Bancs de sable a faible couverture permanente d eau marine » (63) ou polygone de « Replats boueux ou sableux exonde a maree basse » (64) jouxte « Lagune côtière » (6) alors le polygone le plus grand l'englobe.
- Pas d'habitat de dune de typologie (19,20,21) à plus de 1.5 km du front de mer (limite sud du site Natura 2000).
- Si terrain en friche (11) adjacent à pâturage (47) alors fusionner en pâturage (47).
- Si Prairie hygrophile à Paspalum (41) adjacent à Prairie fauchée (27) alors fusionner en Prairie fauchée (27).
- Si Lacs eutrophes naturels (58) adjacent à Eaux oligomésotrophes calcaires (29) alors le polygone le plus grand l'englobe.
- Utiliser la couche de réincrustations finale pour la lagune côtière (Polygones Lagunes Côtières).

Enfin, la cartographie finale est produite et mise en forme, la Figure 12 présente cette cartographie des habitats naturels par télédétection satellitaire Pléiades pour le site N2000 de Camargue. Le Tableau 5 présente les surfaces prédites pour chacun des habitats.

Tableau 5 Surfaces prédites pour chacun des habitats.

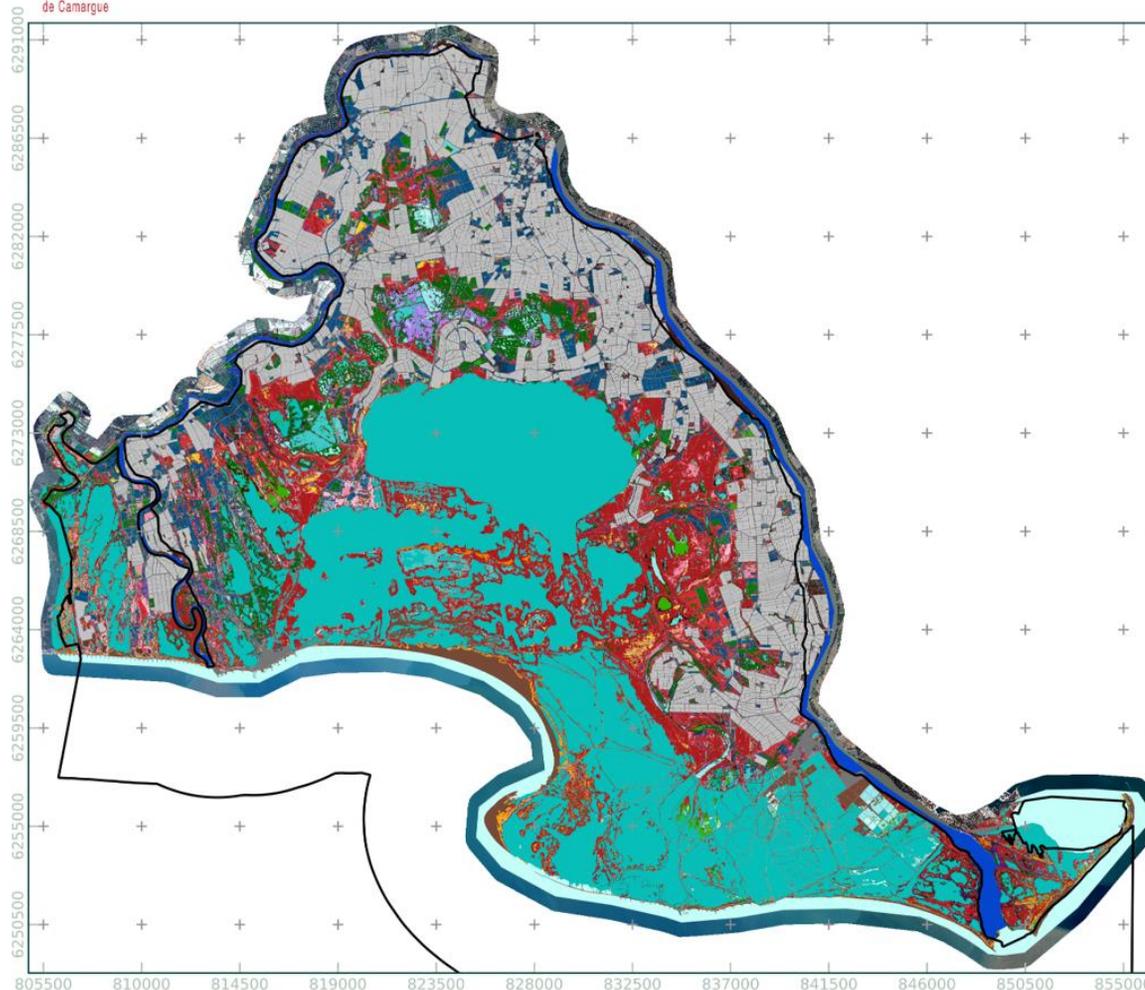
Typologie	surf_ha
Bancs de sable a faible couverture permanente d'eau marine	4708.31
Digue	273.76
Dunes avec forets a Pinus pinea et/ou Pinus pinaster	120.94
Dunes avec pelouses des Brachypodietalia et des plantes annuelles	289.78
Dunes a vegetation sclerophylle des Cisto-Lavanduletalia	5.18
Dunes fixees du littoral du Crucianellion maritimae	217.18
Dunes littorales a Juniperus spp	278.77
Dunes mobiles du cordon littoral a Ammophila arenaria (dunes blanches)	261.34
Dunes mobiles embryonnaires	65.98
Eaux oligomesotrophes calcaires avec vegetation benthique a Chara spp	1327.62
Forets a Quercus ilex et Quercus rotundifolia	5.41
Forets-galeries a Salix alba et Populus alba	1074.47
Fourre de Baccharis	125.67
Fourre d'Olivier de Boheme	480.37
Fourres halophiles mediterraneens et thermo-atlantiques (Sarcocornietea fruticosi)	8776.81
Fruticee a Filaire ou Prunelliers	846.28
Galeries et fourres riverains meridionaux (Nerio-Tamaricetea et Securinegion tinctoriae)	1255.64
Gazons a Brachypode de Phenicie	57.59
Lacs eutrophes naturels avec vegetation du Magnopotamion ou de l Hydrocharition	1068.38
Lagunes cotieres	26463.72
Mares temporaires mediterraneennes	380.70
Milieu cultive	16156.59
Ormaie Frenaie	286.16
Parcours substeppiques de graminees et annuelles des Thero-Brachypodietea	362.65
Paturages	3941.90
Patures a grand jonc	1.74
Peuplements d Amorpha	36.45
Peuplements de Cannes de Provence	160.13
Peuplements de Jussie	716.03
Phragmitaies	2928.34
Prairie hygrophile a Paspalum distichum	924.37
Prairies fauchees meso-hygrophiles mediterraneennes	596.14
Prairies humides mediterraneennes a grandes herbes du Molinio-Holoschoenion	1.19
Pres sales mediterraneens	3547.90

Replats boueux ou sableux exonde a maree basse	1740.83
Rivieres et estuaires soumis a la maree	1884.78
Ronciers	7.14
Steppes salees mediterraneennes (Limonietalia)	77.13
Terrains en friche	915.58
Territoire artificialise	5166.53
Typhaies	96.71
Vegetation a Eleocharis palustris	0.24
Vegetation a Scirpes halophiles	577.50
Vegetations pionnieres a Salicornia et autres especes annuelles des zones boueuses et sableuses	616.75

Cartographie des habitats naturels et de la flore d'intérêt communautaire Site Natura 2000 "Camargue" - 2023



Typologie



- FR9301592 - Camargue
 - Fourrés halophiles méditerranéens et thermo-atlantiques (Sarcocornietea fruticosi)
 - Végétations pionnières à Salicornia et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses
 - Près salés méditerranéens
 - Steppes salées méditerranéennes (Limonietalia)
 - Galeries et fourrés riverains méridionaux (Nerio-Tamaricetea et Securinegion tinctoriae)
 - Forêts-galeries à Salix alba et Populus alba
 - Dunes avec forêts à Pinus pinea et/ou Pinus pinaster
 - Ormaie Frénale
 - Forêts à Quercus ilex et Quercus rotundifolia
 - Replats boueux ou sableux exondé à marée basse
 - Ronciers
 - Terrains en friche
 - Fruticée à Filaire ou Prunelliers
 - Parcours substeppiques de graminées et annuelles des Thero-Brachypodietea
 - Dunes avec pelouses des Brachypodietalia et des plantes annuelles
 - Gazons à Brachypode de Phénicie
 - Lagunes côtières
 - Eaux oligomésotrophes calcaires avec végétation benthique à Chara spp
 - Mares temporaires méditerranéennes
 - Lacs eutrophes naturels avec végétation du Magnopotamion ou de l'Hydrochariton
 - Bancs de sable à faible couverture permanente d'eau marine
 - Phragmitaies
 - Prairie hygrophile à Paspalum distichum
 - Typhales
 - Végétation à Scirpes halophiles
 - Végétation à Eleocharis palustris
 - Dunes littorales à Juniperus spp
 - Dunes à végétation sclérophylle des Cisto-Lavanduletalia
 - Dunes mobiles du cordon littoral à Ammophila arenaria (dunes blanches)
 - Dunes mobiles embryonnaires
 - Dunes fixes du littoral du Crucianellion maritimae
 - Fourré de Baccharis
 - Peuplements de Cannes de Provence
 - Fourré d'Olivier de Bohême
 - Peuplements de Jussie
 - Peuplements d'Amorpha
 - Prairies fauchées
 - mésophiles méditerranéennes
 - Pâturages à grand jonc
 - Pâturages
 - Prairies humides méditerranéennes à grandes herbes du Molinio-Holoschoenion
 - Digue
 - Milieu cultivé
 - Territoire artificialisé
 - Rivières et estuaires soumis à la marée
- 0 1000 2000 m
- Réalisation : i-Sea 2024
Sources :
- i-Sea, Nicolas Borel Consultant, PNR Camargue
- Natural Earth
- IGN
Image : Série temporelle Pléiades du 03/03/2023 au 11/11/2023
Pléiades 2023 © AIRBUS DS, tous droits réservés
Système de coordonnées : Lambert 93

Figure 12. Cartographie 2023 des habitats du site Natura 2000 de Camargue par télédétection multi-temporelle Pléiades

4 Conclusions et perspectives

La présente étude menée en collaboration entre Nicolas Borel consultant (apport des données terrain) et la société i-Sea (par la mise en œuvre de son procédé Biocoast), a permis de produire une cartographie des habitats du site Natura 2000 Camargue par télédétection satellitaire multi-temporelle à très haute résolution spatiale (Pléiades).

Le process Biocoast a pu être appliqué avec succès pour produire cette cartographie des habitats. Nous avons pu bénéficier de 4 images Pléiades pour couvrir l'intégralité du site d'étude, réparties entre mars et novembre 2023. La faible présence de nuages dans cette série temporelle nous a permis de produire des résultats de qualité. Les campagnes de relevés terrain réalisées en 2023 ont permis de produire des données d'apprentissage contemporaines aux images satellite utilisées. Un travail de photo-interprétation a été nécessaire pour compléter cette base de données d'apprentissage afin d'enrichir les classes les moins représentées dans la campagne terrain.

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. Enfin, l'incrustation manuelle de polygones a été nécessaire pour compléter la cartographie et corriger certaines erreurs.

La méthodologie développée est générique et pourra être appliquée à nouveau pour produire des mises à jour cartographiques, 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 sous la gestion du PNR Camargue.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de creuser le potentiel d'un outil récemment intégré à Biocoast, qui calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel aux différentes classes de la typologie (multiprobab). 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 méthodologie pourrait être exploitée pour étoffer la typologie existante avec des habitats plus complexes. Une donnée de validation spécifique sera nécessaire pour vérifier les résultats du déploiement d'une telle approche. L'utilisation des images à la résolution de 50 cm est également une piste d'amélioration pour la caractérisation encore plus fine des habitats visés, en particulier des habitats isolés ou mosaïqués.

5 REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide du Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé d'Imagerie Satellitaire (DINAMIS <https://dinamis.data-terra.org>).

6 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.

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.