



Suivi des prairies par mesures hyperspectrales et séries temporelles d'images satellitaires à haute résolution spatiale : influence des modes de gestion sur le signal spectral

Donatien Dallery

► To cite this version:

Donatien Dallery. Suivi des prairies par mesures hyperspectrales et séries temporelles d'images satellitaires à haute résolution spatiale : influence des modes de gestion sur le signal spectral. Biodiversité et Ecologie. 2016. hal-02801627

HAL Id: hal-02801627

<https://hal.inrae.fr/hal-02801627>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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



Suivi des prairies par mesures hyperspectrales et séries temporelles d'images satellitaires à haute résolution spatiale : influence des modes de gestion sur le signal spectral

Mémoire de fin d'étude Master 2 IMAGE /
Université Rennes 2 – Agrocampus Ouest
*Sous le sceau de l'Université Européenne de
Bretagne*

Département de Géographie
Mention : Géographie ; Spécialité : Géomatique
Année universitaire : 2014 - 2016

Présenté par

DONATIEN DALLERY

Préparé à l'UMR DYNAFOR 1201
INRA-INPT ENSAT
24 Chemin de Borde Rouge-Auzeville
CS 52627
31326 Castanet Tolosan cedex

Devant le jury :

Le / / à Rennes

Sous la présidence de :

Samuel Corgne, Professeur, Université Rennes 2

Thomas Houet, Chargé de recherches, CNRS

Hervé Nicolas, Professeur, Agrocampus Ouest

Maître de stage :

Mathieu Fauvel, Maître de Conférences, INP ENSAT

Enseignant référent :

Johan Oszwald, Maître de Conférences, Université Rennes 2

Autres membres du jury :

Mailys Lopes, Doctorante, INRA de Toulouse

Bon pour dépôt (version
définitive) : ☐

Date :/...../.....

Signature :

Autorisation de diffusion :
oui ☐ non ☐

« Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'Agrocampus-Ouest et de l'Université Rennes 2 »

Fiche de diffusion du mémoire

A remplir par l'auteur⁽¹⁾ avec le maître de stage.

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

Préciser les limites de la confidentialité⁽²⁾ :

➤ Confidentialité absolue : ☐ oui ☐ non

(ni consultation, ni prêt)

↳ Si oui ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

➤ A l'issue de la période de confidentialité **ou** si le mémoire n'est pas confidentiel, merci de renseigner les éléments suivants :

Référence bibliographique diffusable⁽³⁾ : ☐ oui ☐ non

Résumé diffusable : ☐ oui ☐ non

Mémoire consultable sur place : ☐ oui ☐ non

Reproduction autorisée du mémoire : ☐ oui ☐ non

Prêt autorisé du mémoire : ☐ oui ☐ non

.....
Diffusion de la version numérique : ☐ oui ☐ non

↳ Si oui, l'auteur⁽¹⁾ complète l'autorisation suivante :

Je soussigné(e) _____, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date : _____ Signature : _____

Rennes/Angers, le

Le maître de stage⁽⁴⁾,

L'auteur⁽¹⁾,

L'enseignant référent,

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Mathieu Fauvel et Maïlys Lopes, mes encadrants. Ils m'ont permis de pratiquer de manière intensive la programmation python et m'ont accompagné dans cette démarche. Leurs remarques et conseils au cours de ce stage m'ont été extrêmement formateurs. Encore merci à Maïlys Lopes pour les nombreuses journées passées avec moi à acquérir des données dans les coteaux de Gascogne.

Je tiens ensuite à remercier Marc Deconchat, directeur de l'UMR DYNAFOR et Claude Monteil, directeur adjoint (INP-ENSAT), pour m'avoir accueilli au sein de l'UMR.

Je remercie Jérôme Molina, Jérôme Willm et Bruno Dumora pour m'avoir accompagné sur le terrain pour effectuer des mesures hyperspectrales.

Je remercie David Sheeren pour ses conseils et Annie Ouin pour ses connaissances sur les prairies.

Je remercie également Vincent Thierion pour ses conseils quant à la création de la base de données où est stocké l'ensemble des données terrain.

Merci à Johan Oszwald, mon tuteur académique, pour ses connaissances, son humour et les événements auxquels il m'a permis de participer.

Merci aux agents de l'UMR basé à l'ENSAT, Adam, Adrien, Corine, Hugo, Romain pour la bonne humeur qu'ils dégageaient, les repas conviviaux et les discussions qui rythmaient nos journées.

Merci enfin à tous les autres membres de l'UMR DYNAFOR avec qui j'ai sympathisé au cours de ce stage.

Glossaire

Assolement : liste chronologique des espèces cultivées qui se succèdent de façon répétée avec l'indication des principales opérations culturales et du moment où elles sont réalisées.

Climax : état théorique dans lequel une communauté végétale atteint un état d'équilibre stable et durable. Il est caractérisé par un équilibre dynamique à partir duquel l'énergie et les ressources ne servent qu'à maintenir l'écosystème en l'état.

Mesure hyperspectrale : mesure du rayonnement électromagnétique dans un nombre important de longueurs d'onde contiguës.

Mesure multispectrale : mesure du rayonnement électromagnétique dans un petit nombre de bandes spectrales pas nécessairement contiguës.

Radar : capteur utilisant une longueur d'onde dans les hyperfréquences avec plusieurs polarimétries.

Red-Edge : région du spectre électromagnétique entre 680-750nm faisant l'interface entre la réflectance de la chlorophylle dans le visible et le proche infrarouge. Le Red-Edge correspond au pic de réflectance de la chlorophylle.

Point d'inflexion du red-edge : longueur d'onde à laquelle le red-edge atteint son maximum de réflectance et se stabilise dans le proche infrarouge.

Service écosystémique : services rendus par les écosystèmes à l'homme.

Station (écologie) : surface présentant des conditions physiques et biologiques homogènes tels la topographie et le climat (IGN).

Succession écologique : processus naturel d'évolution d'un écosystème d'un stade initial vers un stade théorique final dit climacique.

Liste des figures

Figure 1 : Axes de recherche de l'UMR DYNAFOR.....	2
Figure 2 : Localisation de la zone d'étude sur Saint-Lys (Formosat) et l'emprise totale du RPG.....	5
Figure 3 : Méthodologie pour la production de l'historique des ilots purs à partir du RPG.	7
Figure 4 : Extrait de l'historique des ilots purs.....	8
Figure 5 : Extrait des successions agricoles correspondant aux différents comportements identifiés.	9
Figure 6 : Carte de localisation des ilots purs de prairies permanentes ayant comportements non conformes, étant effectivement permanentes et des ilots purs ne remplissant pas ces deux critères.	10
Figure 7 : Évolution temporelle du NDVI des prairies permanentes selon l'âge.	11
Figure 8 : Localisation de la zone d'étude correspondant au nom de projet SYMPA.....	13
Figure 9 : Gradient pour la caractérisation des prairies (réalisé par David Sheeren).....	14
Figure 10 : Localisation et identifiant des prairies sélectionnées.....	14
Figure 11 : Saut de valeur correspondant au changement de capteur (courbe rouge) et sa correction (courbe bleue). Source : « SAMS 2.0 » de Carlos A. Rueda et Anne F. Wrona, 2003).....	16
Figure 12 : Modèle Conceptuel des Données de la base de données présentant les différentes tables et les clés primaires (attributs soulignés) ainsi que les cardinalités.....	17
Figure 13 : Méthodologie appliquée pour le traitement des mesures hyperspectrales.....	18
Figure 14 : Réflectance des principaux états du sol des prairies avec une photo de représentation (Donatien Dallery, Mailys Lopes). Les valeurs au-delà de 1400nm ne sont pas exploitables (la courbe rouge dans ces valeurs correspond au spectroradiomètre présentant une erreur dans le moyen infrarouge), mais cela n'impacte pas cette étude...	21
Figure 15 : Évolution de la réflectance d'une mesure de la prairie 405. L'erreur dans le moyen infrarouge causée par le nouveau spectroradiomètre est visualisable sur les courbes orange et rouge.	22
Figure 16 : Evolution des bandes du bleu, du vert et du rouge d'après une estimation de densité par noyau à chacune des dates de mesure sur la prairie 500 et 37.....	26
Figure 17 : Evolution des bandes du red-edge et du proche infrarouge d'après une estimation de densité par noyau à chacune des dates mesurées sur la prairie 500 et 37.	28
Figure 18 : Estimation de densité par noyau du NDVI (gauche) et du MSAVI2 (droite) pour la prairie 500 et 37.....	30
Figure 19 : Estimation de densité par noyau du S2REP pour la prairie 500 (gauche) et 37 (droite).....	31
Figure 20 : Extrait de la végétation de la prairie 212 lors des mesures terrain (Donatien Dallery, Mailys Lopes).....	31
Figure 21 : Estimation de densité par noyau de la prairie 212 selon le S2REP.	31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes spectrales Formosat-2.	5
Tableau 2 : Liste des attributs des fichiers du RPG.	6
Tableau 3 : Résultats de l'identification des comportements des ilots de prairies.	9
Tableau 4 : Caractéristiques de chacune des prairies étudiées.	15
Tableau 5 : Caractéristiques des bandes spectrales du capteur Sentinel-2.....	16
Tableau 6 : Bilan de la réflectance dans les différentes longueurs d'onde selon l'état du sol. .	22

Tableau 7 : Description de l'évolution de la réflectance de la prairie 405 selon l'état du sol et les modes de gestion (photos de Maïlys Lopes et Donatien Dallery).	22
Tableau 8 : Description de l'évolution de la prairie 500 (photos de Maïlys Lopes et Donatien Dallery).....	24
Tableau 9 : Description de l'évolution de la prairie 37. Cette prairie possède une pente et des zones de replat, provoquant une végétation hétérogène en termes de stades de croissance et a été pâturée intensivement l'année précédente (photos de Maïlys Lopes et Donatien Dallery).....	25

Liste des annexes

Annexe I : Codes des cultures du Registre Parcellaire Graphique

Annexe II : Graphiques représentant la réflectance hyperspectrale de chacune des prairies à chacune des dates d'acquisition

Annexe III : Tableau référençant les dates de mesure et d'opérations de gestion pour chacune des prairies

Annexe IV : Graphiques présentant l'évolution de la réflectance des prairies pour chacune des bandes Sentinel-2 et des valeurs de NDVI, MSAVI2 et S2REP d'après une estimation de densité par noyau gaussien

Annexe V : Graphiques présentant l'évolution temporelle du NDVI, du MSAVI2 et du S2REP d'après les données Sentinel-2 simulées pour chacune des prairies

Table des matières

1. Introduction.....	1
1.1. Présentation de la structure d'accueil.....	2
1.2. Objectifs du stage et hypothèses de travail.....	2
1.3. État de l'art : la télédétection pour l'étude des prairies.....	3
1.4. Bilan de l'état de l'art.....	4
2. Outil pour localiser les ilots de prairies permanentes et déterminer l'influence de leurs âges sur la réflectance.....	4
2.1. Présentation de la zone d'étude	5
2.2. Matériels.....	5
2.2.1. Données satellites Formosat-2	5
2.2.2. Registre Parcellaire Graphique (RPG)	6
2.3. Méthodologie	6
2.3.1. Production de l'historique des ilots	6
2.3.2. Extraction et analyse du signal spectral des ilots purs de prairies	7
2.4. Résultats	8
2.4.1. Résultats de l'historique des prairies.....	8
2.4.2. Résultats de la comparaison du NDVI des ilots purs de prairies permanentes selon leur ancienneté	10
2.5. Discussion	11
3. Étude de l'impact des modes de gestion sur la réflectance des prairies à partir de mesures hyperspectrales intra-annuelles	13
3.1. Présentation de la zone d'étude	13
3.1.1. Sélection des prairies étudiées	13
3.2. Matériels.....	15
3.2.1. Spectroradiomètre ASD - Données hyperspectrales	15
3.2.2. Mission Sentinel-2	16
3.2.3. Relevés botaniques.....	17
3.2.4. Base de données pour les mesures hyperspectrales.....	17
3.3. Méthodologie	18
3.3.1. Traitement des données hyperspectrales et Sentinel-2 simulées.....	19
3.3.1.1. Analyse des réflectances.....	19
3.3.1.2. Simulation du capteur Sentinel-2 à partir des données hyperspectrales	19
3.3.1.3. Calcul du NDVI, MSAVI2 et S2REP.....	19
3.3.1.4. Analyse des bandes et des indices de végétation	20
3.4. Résultats	20
3.4.1. Résultats de l'analyse des réflectances	20
3.4.1.1. Réflectance des quatre principaux états du sol des prairies	20
3.4.1.2. Évolution de la réflectance d'une mesure	22
3.4.2. Résultats de la simulation des bandes Sentinel-2	23
3.4.2.1. Description des prairies 37 et 500	23
3.4.2.2. Évolution de la réflectance des bandes Sentinel-2	26
3.4.2.3. Évolution de la réflectance des indices de végétation.....	29
3.4.2.3. Évolution du point d'inflexion du red-edge à partir du S2REP	30
3.5. Discussion	32
3.5.1. Évolution de la réflectance des prairies avant une opération de gestion	32
3.5.2. Influence des modes de gestion sur la réflectance des prairies.....	33
3.5.2.1. Réflectance des prairies fauchées	33
3.5.2.2. Réflectance des prairies après avoir été fauchées.....	34
3.5.2.3. Réflectance des prairies fauchées puis pâturées.....	34
3.6. Conclusion.....	35

Bilan personnel.....	36
Bibliographie	38
ANNEXES	1

1. Introduction

Les prairies sont des milieux ouverts caractérisées par une végétation majoritairement herbacée. Elles couvrent 31.5% des terres émergées, faisant d'elles l'occupation du sol dominante, devant les espaces forestiers (27.7%) et les sols nus (15.2%) (**Latham et al., 2014**). Celles-ci ont un rôle économique important dans l'élevage pour nourrir le bétail. En plus de ce rôle, elles offrent différents services tels que la fixation et le stockage du carbone, la régulation de la qualité de l'eau, une participation à la pollinisation, de par le recouvrement floristique, et enfin différents services culturels telles la promenade et le paysage (**Millenimum Ecosystem Assessment, 2005**). Ces services vont varier en fonction du type de prairie et des modes de gestion. La faune et la flore associée aux prairies dépendent de ces pratiques. Les modes de gestion appliqués aux prairies permettent de conserver ce stade au sein d'une succession écologique dont la prairie n'est pas le climax (**Bergman et al., 2008 ; Pokluda et al., 2012 ; Punjabi et al., 2013 ; Van Swaay, 2002**). Une gestion intensive, tels le surpâturage ou le retournement fréquent des parcelles, dégrade les prairies causant des flux de nitrates élevés et une dégradation de la qualité de l'eau (**Vertès et al., 2007 ; Soussana et Lüscher, 2007**).

Dans les années 70, des actions politiques ont été mises en place pour la modernisation et l'intensification de l'agriculture dont le but était d'augmenter les surfaces de cultures céréalières au détriment des surfaces fourragères comme les prairies. Ces politiques ont entraîné une évolution des pratiques agricoles sur tous les types de cultures, dont les surfaces en herbe (**Huyghe, 2009**). Puis, l'Union Européenne a mis en œuvre depuis 1992 des politiques pour le maintien des prairies (**Plantureux et al., 2012**). Une uniformisation de la définition d'une prairie permanente a été déterminée par les États membres : « c'est une surface dans laquelle l'herbe ou d'autres plantes fourragères herbacées prédominent depuis cinq années révolues au moins. Toute prairie temporaire n'ayant pas été déplacée (même si entre-temps labourée et réensemencée) devient une prairie permanente au bout des cinq années révolues ».

Cependant, cela a provoqué la diminution de la surface des prairies permanentes au profit des prairies temporaires (souvent monospécifiques) gérées comme des cultures et rentrant dans l'assolement.

Les prairies et pâturages :

- ont augmentés de 1.4% entre 2005 et 2013 ;
- représentent près de 29.7% de la Surface Agricole Utile ;
- recouvrent 12.8% du territoire métropolitain en 2013 (**Eurostat, 2013**).

Afin de caractériser les milieux prairiaux, un suivi de leur évolution est nécessaire. En écologie, les prairies sont décrites par des enquêtes terrain. Celles-ci prennent en compte la biodiversité des prairies, ses caractéristiques abiotiques et ses services écosystémiques. Acquérir ces informations est coûteux en temps et en moyens humains impliquant des contraintes spatiales et temporelles limitant le suivi des prairies. Dans ce contexte, la télédétection est un outil qui permet de résoudre ces contraintes du fait de la fréquence de revisite et de l'importante couverture spatiale des capteurs satellite. Avec les nouvelles missions spatiales, comme Sentinel-2, le suivi de la végétation sur de larges territoires avec une résolution spatiale et temporelle élevée est aujourd'hui possible à moindre coût.

Ainsi, qu'apporte la haute résolution temporelle pour le suivi de la réflectance des prairies au cours d'une saison de végétation ? Est-il possible de déterminer les modes de conduite selon l'évolution de la réflectance ? Ce stage de fin d'études s'intègre dans ces réflexions.

1.1. Présentation de la structure d'accueil

L'Unité Mixte de Recherche DYNAFOR, rattachée à l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) et l'Institut National Polytechnique de Toulouse, a été créée en 2003. Cette UMR d'écologie du paysage est composée en 2016 de 36 permanents (chercheurs, techniciens et administratifs) et 9 doctorants. Les travaux de DYNAFOR sont centrés sur la gestion durable des ressources forestières, la préservation de la biodiversité et l'étude des services écosystémiques dans les milieux ruraux. L'UMR produit des outils d'aide à la décision et à la gestion afin de modéliser et de comprendre les relations entre des processus écologiques, socio-techniques et patrons spatiaux.

L'UMR est organisée en trois axes de recherche scientifique (figure 1) :

- **RAMSSES** (Recherche en Analyse et Modélisation de Systèmes Socio-Ecologiques Spatialisés) dont les compétences sont la télédétection, la géomatique et la modélisation ;
- **BIOFOR** (Biodiversité des forêts rurales et des milieux semi-naturels dans les paysages) dont les compétences s'appliquent sur la biodiversité, les espaces forestiers et la faune.
- **SECOTEAM** (Services écosystémiques de la biodiversité dans les paysages agricoles) dont les compétences s'accordent avec les services écosystémiques ainsi que l'étude des pratiques et interactions entre acteurs ;

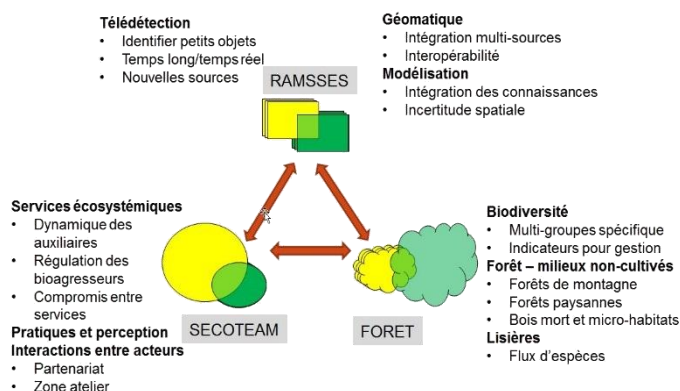


Figure 1 : Axes de recherche de l'UMR DYNAFOR.

Les travaux développés dans ce stage se situent à la frontière des axes **RAMSSES** et **SECOTEAM**. Les données satellitaires sont utilisées pour caractériser des objets semi-naturels. Ces éléments sont étudiés pour expliquer l'état des services écosystémiques. Durant ce stage, j'ai travaillé principalement avec M. Lopes et M. Fauvel, et ponctuellement avec D. Sheeren et A. Ouin.

1.2. Objectifs du stage et hypothèses de travail

Mon stage s'intègre dans le projet de thèse de M. Lopes consistant à utiliser des images à haute résolution spatiale pour la modélisation spatio-spectro-temporelle des prairies. Les objectifs de mon stage sont d'une part produire un outil permettant d'étudier l'historique de prairies à partir du Registre Parcellaire Graphique (RPG) et d'une série temporelle d'images satellites. Cet outil a pour but d'identifier comment l'âge d'une prairie permanente influence sa réflectance. D'autre part, il s'agit de produire un outil permettant de comprendre et identifier l'impact des pratiques agricoles, telles que la fauche et le pâturage, sur l'évolution du signal spectral de prairies au cours d'une saison de végétation.

Pour le premier objectif, je vais m'intéresser à produire et analyser l'historique de prairies à partir du RPG. Cet historique sera contrôlé avec des images satellites. Puis, l'évolution de la réflectance des prairies permanentes sera étudiée selon leurs âges. L'intérêt est de savoir si l'âge des prairies permanentes peut se distinguer, selon le NDVI, facteurs permettant de supposer la biodiversité des prairies. L'objectif est de fournir aux écologues de l'UMR DYNAFOR un outil pour estimer la biodiversité des prairies permanentes.

Le second objectif consiste à comprendre l'évolution du signal spectral de prairies au cours d'une saison de végétation et selon les modes de gestion de celles-ci. Afin de pouvoir capter les événements clés tels la fauche et la repousse, nous avons choisi de suivre l'évolution du signal spectral des prairies par une campagne terrain avec un spectroradiomètre. Celle-ci va s'effectuer sur l'ensemble de ce stage et a pour objectif d'acquérir des données le plus souvent et régulièrement possibles. Ces mesures serviront également à simuler les bandes spectrales du capteur Sentinel-2. Ainsi, quels sont les facteurs influençant la réflectance des prairies et comment influencent-ils le signal spectral ? Est-il possible de déterminer les opérations de gestion à partir de la réflectance des prairies ? Les résultats permettront une meilleure compréhension de l'impact des modes de gestion sur la réflectance des prairies et leur détection.

1.3. État de l'art : la télédétection pour l'étude des prairies

L'identification de l'occupation et de l'usage des sols est une application majeure de la télédétection. Celle-ci peut s'effectuer à plusieurs échelles spatiales et avec divers capteurs (*Friedl et al., 2010 ; Cherril et al., 1994 ; Förster et al., 2008*). L'utilisation de données auxiliaires comme la géologie, la climatologie, la pédologie et d'autres caractéristiques abiotiques permettent de réaliser ou d'affiner cette identification (*Hatunen et al., 2008 ; Ali et al., 2013 ; Bargiel, 2013*). Concernant les prairies, souvent de petite taille (inférieures à un hectare), elles ne se distinguent pas avec une résolution spatiale trop faible. Par exemple, le capteur MODIS possédant une résolution spatiale de 250 mètres ne permet pas de les distinguer (*Lecerf, 2008*).

On retrouve dans la littérature des travaux portant soit sur l'utilisation directe des réflectances, soit sur la création de néo-canaux (*Courault et al., 2010 ; Franke et al., 2012 ; Maskova et al., 2008*) adaptés à l'étude des prairies. Dans le domaine optique, le NDVI combiné avec des données auxiliaires et une méthode orientée objet permet de produire une classification d'occupation et d'usage des sols efficace et précise (*Bock et al., 2005*). Dans le domaine du radar, la classification de l'occupation du sol nécessite l'utilisation de toutes les polarimétries pour avoir une classification précise (*Dusseux et al., 2014*). De même, l'usage de données dans les hyperfréquences permet d'estimer la biomasse des parcelles pour distinguer des types de prairies (*Barrett et al., 2014*), mais aussi pour détecter l'irrigation de celles-ci (*Hajj et al., 2014*).

La résolution temporelle joue un rôle important pour la caractérisation inter et intra-annuelle des prairies. Au sein de la même année, l'utilisation d'une à trois images permet d'identifier les prairies sur des surfaces de plusieurs centaines de km² (*Zhang et Guo, 2008*). Il est également possible avec des images acquises durant la saison de végétation de déterminer des habitats naturels (*Feret et al., 2015*). De plus, l'étude intra-annuelle des prairies avec des images à haute résolution spatiale permet de les distinguer selon leur intensité d'utilisation (*Franke et al., 2012*).

Avec l'utilisation de plusieurs images par année sur plusieurs années, il est possible d'estimer l'évolution des prairies, de connaître leur ancienneté, mais aussi de les localiser dans les successions culturales (*Vannier, 2012*). La haute résolution temporelle intra-annuelle permet de compenser la faible résolution spatiale des capteurs pour suivre l'évolution d'îlots parcellaires, sans possibilité de distinguer les prairies sauf dans le cas d'îlots importants et à dominante prairiale (*Lecerf, 2008*).

Pour la détection des modes de gestion, il est important de travailler sur une saison de végétation (*Maskova et al., 2008 ; Franke et al., 2012*), pour prendre en compte la variation de la végétation au cours de la saison (*Turner et al., 1992*). Ainsi, il est possible de suivre et mesurer l'état des prairies et d'intégrer ces informations dans des modèles ou des méthodes de

classifications (**Hill, 2013**). De cette manière, l'utilisation de modèles par apprentissage automatique type « Random Forest » permet, à partir de séries temporelles et d'indices de végétation de distinguer, entre autres, des prairies temporaires et semi-naturelles compte tenu de la gestion plus intensive de celles-ci par rapport aux prairies naturelles (**Nitze et al., 2015**). Ces études ont utilisé des données multispectrales ou radars.

Afin de décrire les prairies, d'autres études ont utilisé des données hyperspectrales qui permettent d'avoir des informations complémentaires aux données multispectrales et radars.

La réflectance de la végétation dépend des caractéristiques de son habitat, permettant ainsi de relier les valeurs de réflectance à la composition floristique d'une prairie (**Schmidtlein et Sassin, 2004**). En acquérant des données hyperspectrales sur des espèces floristiques indicatrices de terres abandonnées, il est possible de localiser une prairie au sein d'une succession écologique (**Carvalho et al., 2013**). En plus de ces espèces indicatrices, la couverture de la végétation et les nutriments disponibles permettent de déterminer l'âge des prairies (**Möckel et al., 2014**). Également, la production en biomasse d'une prairie est modélisable à partir d'une série temporelle de mesures hyperspectrales (**Psomas et al., 2011**).

Étant donné que les données hyperspectrales sont acquises sur une multitude de longueurs d'onde, des chercheurs ont utilisé cette caractéristique pour simuler des capteurs multispectraux pour déterminer le capteur le plus efficace pour un contexte donné. De cette manière, des études prospectives ont étudié les propriétés du capteur Sentinel-2 pour caractériser les prairies (**Feret et al., 2015 ; Hill, 2013**).

1.4. Bilan de l'état de l'art

Les études sur les prairies utilisant la télédétection ont exploité différents types de capteurs, ayant des résolutions spatiales, temporelles et spectrales différentes. Celles-ci avaient pour objectifs de classer les prairies selon l'intensité d'utilisation (**Franke et al., 2012**), d'estimer leur âge (**Carvalho et al., 2013 ; Feret et al., 2015**), mais aussi de les décrire en termes floristiques (**Schmidtlein et Sassin, 2004**). Concernant les résultats exploitant une série temporelle, ceux-ci se basaient sur des images à basse résolution spatiale (**Lecerf, 2008 ; Friedl et al., 2010**). De plus, les études intra-annuelles mettent en avant la caractérisation des prairies et les études interannuelles se focalisent sur l'évolution de celles-ci. Enfin, les données hyperspectrales permettent de travailler sur la biochimie des plantes et des sols pour caractériser les prairies. Les données multispectral permettent de distinguer le fonctionnement des prairies.

Ainsi, peu d'études combinent la haute résolution temporelle et spatiale pour la caractérisation de l'évolution intra-annuelle des prairies. Pour les études exploitant ces caractéristiques, celles-ci se concentrent sur des critères abiotiques, faisant que l'influence des modes de gestion sur la réflectance des prairies n'est pas prise en compte. De cette manière, quel est l'impact des modes de gestion sur l'évolution du signal spectral au cours d'une saison de végétation ?

Chaque objectif de ce stage est présenté de manière indépendante. Pour chacun d'eux, la zone d'étude, les données et leur traitement, les résultats et leur discussion et une conclusion pour le second objectif sont présentés. Une conclusion de l'ensemble des travaux ainsi qu'un bilan personnel concluront ce rapport de stage.

2. Outil pour localiser les îlots de prairies permanentes et déterminer l'influence de leurs âges sur la réflectance

L'objectif est de produire un outil permettant d'obtenir l'historique de prairies à partir du RPG afin d'identifier l'âge et les successions d'occupation du sol de 2006 à 2014 de celles-ci. Puis,

la série temporelle d'images satellites issues du capteur Formosat-2 va permettre d'étudier la réflectance des prairies selon leurs âges.

2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans le département de Haute-Garonne au sud-ouest de la métropole toulousaine (figure 2). Le climat est de type tempéré avec des influences océaniques et méditerranéennes. Les hivers sont doux et plus froids dans le sud de cette zone et les étés sont chauds et orageux. Les précipitations sur la zone de Toulouse représentent en moyenne 655 mm/an.

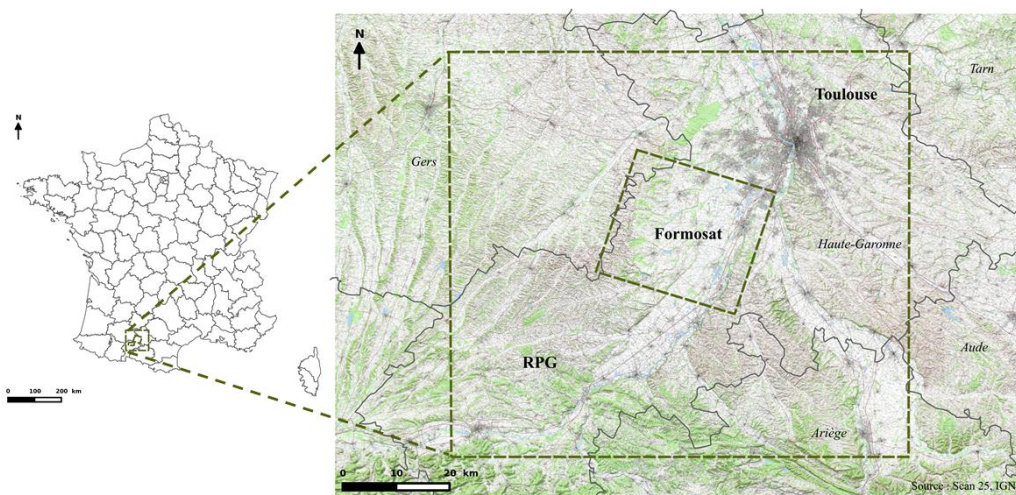


Figure 2 : Localisation de la zone d'étude sur Saint-Lys (Formosat) et l'emprise totale du RPG.

Cette partie va se porter sur la zone d'étude Saint-Lys de l'UMR DYNAFOR. Elles couvrent notamment les villes de Saint Lys et de Rieumes. L'élevage n'est pas une activité très présente dans cette zone, elle est même en régression. Cela est dû aux agriculteurs qui arrêtent cette activité au profit des grandes cultures (maïs, tournesol, etc.). Une partie des prairies déclarées sont des réserves foncières entretenues, mais pas vraiment exploitées, en particulier dans la partie nord-est de la zone située à la limite de la métropole toulousaine (Lang M., 2015).

2.2. Matériels

2.2.1. Données satellites Formosat-2

Le satellite Formosat-2, lancé en mai 2004, est un satellite optique à haute résolution spatiale et temporelle avec une fauchée de 24 km² et qui possède 2 capteurs pour un total de 5 bandes spectrales (tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes spectrales Formosat-2.

Bande	Centre λ (nm)	Intervalle spectral (nm)	Résolution spatiale (m)	Capteur
1 : Bleu	490	70	8	MS
2 : Vert	560	80	8	MS
3 : Rouge	660	60	8	MS
4 : Proche Infrarouge	830	140	8	MS
5 : Panchromatique	675	450	2	PAN

Dans le cadre de la préparation de la mission Sentinel-2 (European Space Agency) ainsi que de la mission VENUS portée par l'UMR Centre d'Etude Spatiales de la BIOSphère (CESBIO), celle-ci dispose d'une série temporelle allant de 2006 à 2014 avec 10 à 16 dates par an. Le

CESBIO, dans le cadre du dispositif Kalideos OSR MiPy coordonné par le Centre National d'Études Spatiales, a fourni les images prétraitées sur la zone d'étude de Saint Lys.

2.2.2. Registre Parcellaire Graphique (RPG)

Le RPG a été mis en place dans le cadre de la PAC en 2002 pour permettre la déclaration et l'identification des ilots agricoles de chaque exploitant auprès de l'Agence de Service et de Paiement. Les données sont renseignées par les exploitants agricoles sur la base de la BD-ORTHO de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière à une échelle de précision au 1/50 000ème. Chaque entité du fichier correspond à un ilot agricole pouvant contenir plusieurs parcelles et cultures. Pour chaque entité, diverses informations sont disponibles (tableau 2) :

Tableau 2 : Liste des attributs des fichiers du RPG.

Attribut	Description
ID_ILOT	Identifiant de l'ilot, commun à chaque année
ANNEE	Année pour laquelle les données correspondent
DEPARTEMENT	Département dans lequel se trouve l'ilot
ID_RPG_ILO	Identifiant de l'ilot qui peut être différent chaque année
ID_EXPLOIT	Identifiant de l'exploitation à laquelle l'ilot appartient
SURFACE	Surface totale de l'ilot en hectare
CULT_X	Code de la Xème culture (x allant de 1 à 5)
SURF_X	Surface de la Xème culture dans l'ilot

Les cultures sont codifiées (annexe I). Le code des prairies est 18 pour les permanentes et 19 pour les temporaires. Le RPG est disponible aux mêmes années que la série temporelle Formosat-2.

2.3. Méthodologie

Pour ce premier objectif, la méthodologie se décompose en deux parties. La première consiste à utiliser le RPG pour produire l'historique des ilots purs. Celui-ci permet de suivre l'évolution des ilots à travers les successions d'occupation du sol. Dans un second temps, les images Formosat-2 sont employées pour contrôler l'historique obtenu à partir du RPG et analyser la réflectance des prairies permanentes selon leurs âges. L'ensemble de la méthodologie est intégré dans un outil que j'ai produit afin de réaliser les traitements automatiquement et sera mis à disposition des écologues de l'UMR.

2.3.1. Production de l'historique des ilots

Un ilot peut être composé de différentes cultures, mais aucune information sur la localisation de celles-ci au sein de l'ilot n'est disponible. Ainsi, je me focalise sur les ilots purs, c'est-à-dire composés d'une seule occupation du sol, pour ne pas travailler avec plusieurs types de cultures par ilot. Les traitements utilisés pour la production de l'historique des ilots permettent de prendre en compte la gestion des exploitants, mais aussi des caractéristiques propres aux fichiers du RPG qui sont :

- Les ilots peuvent changer de forme, apparaître et disparaître au cours du temps (vente, ilots non déclarés, ilots purs devenant non purs) ;
- La superposition des ilots au fil des ans n'est pas parfaite dans les fichiers ;

Ces deux contraintes nécessitent de produire un parcellaire élémentaire prenant en compte l'ensemble des modifications des ilots au cours du temps. Pour les géométries ainsi obtenues, leur surface (m²) est calculée afin de ne pas conserver les entités provenant de la différence de superposition.

Pour faire suite à la production de l'historique des ilots purs, il est possible d'étudier les successions agricoles pour identifier les prairies permanentes et acquérir différentes informations sur celles-ci et leurs évolutions. La succession agricole de l'ensemble des ilots de prairies est contrôlée selon la réglementation de la PAC. Les ilots purs de prairies ne respectant pas la réglementation, telle les cinq années révolues, sont identifiés sous le terme de comportement non conforme. L'étape suivante consiste à utiliser les images Formosat-2 pour contrôler les ilots de prairies permanentes présentant un comportement non conforme et analyser l'impact de l'âge. La figure 3 résume ces étapes.

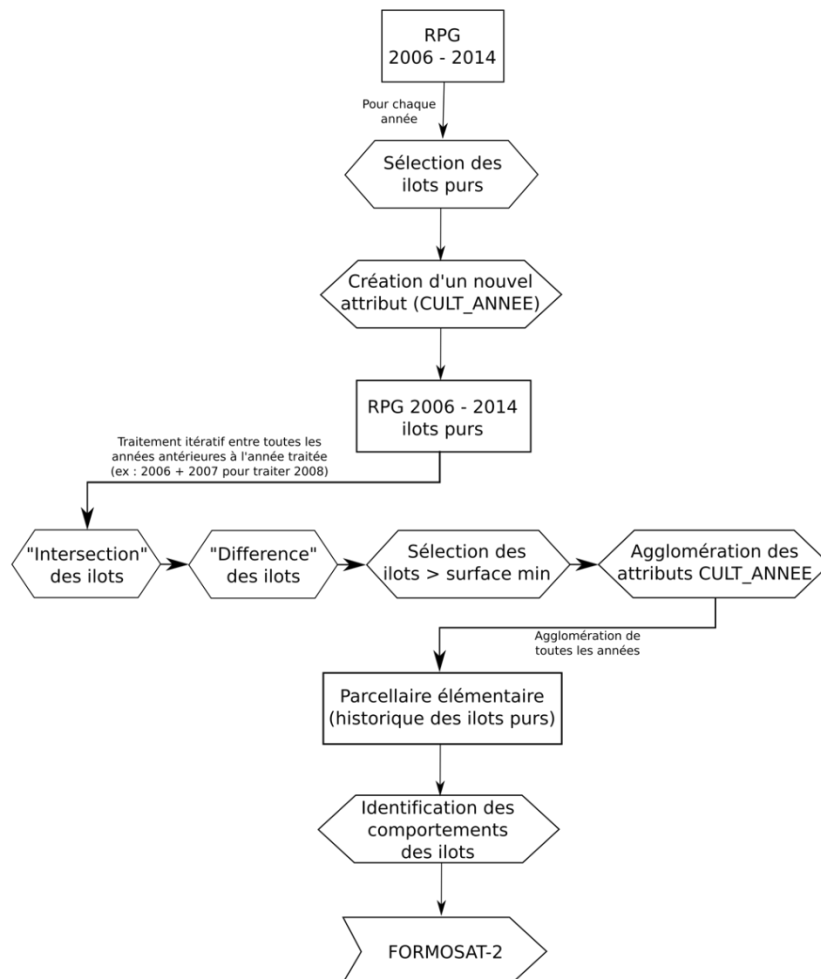


Figure 3 : Méthodologie pour la production de l'historique des ilots purs à partir du RPG.

2.3.2. Extraction et analyse du signal spectral des ilots purs de prairies

Les données issues du RPG sont déclarées par les exploitants. La série temporelle Formosat-2 permet de contrôler l'historique des ilots purs de prairie présentant un comportement non conforme. Ainsi, ces successions proviennent-elles d'erreurs de déclaration ou bien se révèlent exactes ? Ce contrôle permet de s'assurer d'employer des ilots de prairies permanentes et surtout d'estimer leurs âges le plus précisément possible.

Pour les ilots identifiés comme des prairies permanentes, leur âge est calculé et auquel est ajouté les cinq années révolues de la réglementation. Puis, pour la dernière année disponible, le NDVI des prairies permanentes est comparé selon leur ancienneté.

2.4. Résultats

2.4.1. Résultats de l'historique des prairies

La sélection et la production de l'historique des ilots purs prend le terme de parcellaire élémentaire dont voici un extrait de la table attributaire (figure 4) :

	CULT_2006	CULT_2007	CULT_2008	CULT_2009	CULT_2010	CULT_2011	CULT_2012	CULT_2013	CULT_2014
0	0	0	11	0	0	0	0	0	NULL
1	0	0	1	6	1	6	1	6	13
2	3	6	1	6	3	6	1	6	1
3	28	28	28	28	28	28	28	28	28
4	19	0	0	19	0	4	4	19	19
5	19	0	0	19	0	19	18	18	18

Figure 4 : Extrait de l'historique des ilots purs.

Ainsi, l'entité n°1 n'existait pas en tant qu'ilot pur en 2006 et 2007 étant donné la valeur 0 dans les attributs de ces années. Puis en 2008, une rotation de blé (1) et de tournesol (6) s'est mise en place jusqu'en 2014 où elle passe en 13 (autres gel). Les successions agricoles permettent de distinguer celles ne respectant pas les critères de la PAC au sujet des prairies permanentes.

L'analyse des successions agricoles des ilots de prairies ne respectant pas la réglementation ou étant particulières m'a permis de relever 7 types de comportements non conformes :

1. Les prairies passant de temporaires à permanentes sans les cinq années révolues. Ceci indique une erreur de déclaration vis-à-vis des critères de la PAC ;
2. Les prairies passant en permanentes, alors que l'ilot n'existait pas l'année précédente. Ce constat peut être dû à un ilot non pur une année et devenant pur à la suivante ou bien à une prairie permanente n'ayant pas été déclarée jusqu'à cette année ;
3. Les prairies temporaires ayant plus de cinq années d'ancienneté. D'après la PAC, celles-ci doivent être déclarées permanentes même si elles ont été retournées ou réensemencées au cours de ces 5 années ;
4. Les prairies passant de permanentes à temporaires. Les prairies ne sont pas déplacées, elles sont donc censées rester permanentes même si elles ont été retournées et réensemencées au cours des 5 dernières années ;
5. Les prairies permanentes qui étaient en culture l'année précédente. Compte tenu de la définition d'une prairie permanente, ce cas de figure n'est pas possible. La prairie devrait être déclarée en temporaire ;
6. Les prairies passant de permanentes à temporaires puis de nouveau à permanentes. Cette alternance doit être probablement due à une erreur de déclaration ;
7. Les prairies permanentes mises en culture. Cette succession culturale est réglementée et peut être interdite dans certains cas.

La détermination des comportements est basée sur deux règles :

1. les prairies permanentes en 2006 ont au moins cinq ans d'ancienneté et l'année 2006 est la sixième ;
2. les prairies temporaires en 2006 sont à leurs premières années d'existence, tout en conservant le fait qu'elles étaient potentiellement existantes les années précédentes.

La figure 5 montre un exemple de succession culturale correspondant à chaque comportement non conforme.

	CULT_2006	CULT_2007	CULT_2008	CULT_2009	CULT_2010	CULT_2011	CULT_2012	CULT_2013	CULT_2014	COMPORTE ▾
5	1	1	6	19	18	18	18	18	18	1
6	0	0	0	18	18	18	18	18	18	2
0	3	19	19	19	19	19	19	19	19	3
2	18	18	18	18	19	19	19	19	19	4
3	11	11	3	5	4	6	18	18	18	5
4	18	18	18	18	18	18	19	18	18	6
1	18	18	6	19	1	5	1	6	1	7

Figure 5 : Extrait des successions agricoles correspondant aux différents comportements identifiés.

Le parcellaire élémentaire référence 5907 entités d'îlots purs entre 2006 et 2014 dont 399 îlots de prairies ayant un comportement non conforme (tableau 3) :

Tableau 3 : Résultats de l'identification des comportements des îlots de prairies.

Comportement	Nombre d'entités	Surface totale (hectare)
1	28	44.19
2	46	131.59
3	230	552.03
4	41	99.63
5	34	41.05
6	8	16.26
7	12	13.45
Total	399	898.21

Le comportement le plus fréquent est le n°3 correspondant aux prairies temporaires n'étant pas déclarées permanentes. Les prairies permanentes en 2014 ne présentant pas de comportements sont au nombre de 71 pour une surface totale de 377ha avec une ancienneté allant de 12 à 14 années (voir plus dans le cas où certaines peuvent être présentes avant 2006). En 2014, 455 prairies temporaires sont dénombrées pour une surface totale de 1149ha. Sur la période de 2006 à 2014, 25 nouvelles entités de prairies permanentes pures ont été déclarées. Finalement, un nombre important d'îlots purs ont été supprimés pour une surface de 5855ha sur 19086ha (soit 30%). Ce constat augmente le nombre d'îlots non purs et donc de parcelles de prairies dont la localisation n'est plus accessible à partir du RPG.

La localisation des îlots purs de prairies ayant un comportement est référencée sur la figure 6.

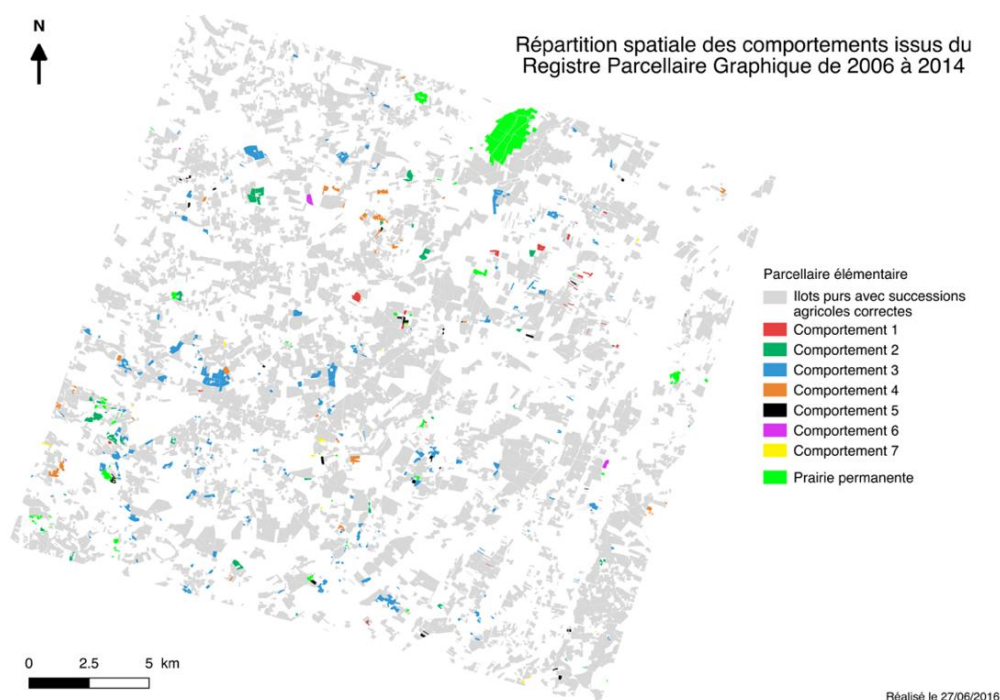


Figure 6 : Carte de localisation des ilots purs de prairies permanentes ayant comportements non conformes, étant effectivement permanentes et des ilots purs ne remplissant pas ces deux critères.

Les prairies permanentes sont réparties sur toute la zone d'étude avec un ensemble d'ilots au nord correspondant à une zone militaire. Ensuite, le comportement n°3 présente des surfaces importantes avec des regroupements de plusieurs ilots contrairement aux autres comportements qui sont plus disséminés.

2.4.2. Résultats de la comparaison du NDVI des ilots purs de prairies permanentes selon leur ancienneté

L'âge des prairies permanentes est un critère permettant d'estimer leur biodiversité d'après les écologues de l'UMR. L'outil développé permet d'afficher l'évolution du NDVI selon l'âge des prairies permanentes. De cette manière, il est possible d'observer s'il y a un effet de l'âge sur la valeur et la variation du NDVI des prairies permanentes. L'information ainsi obtenue est présentée sur la figure 7.

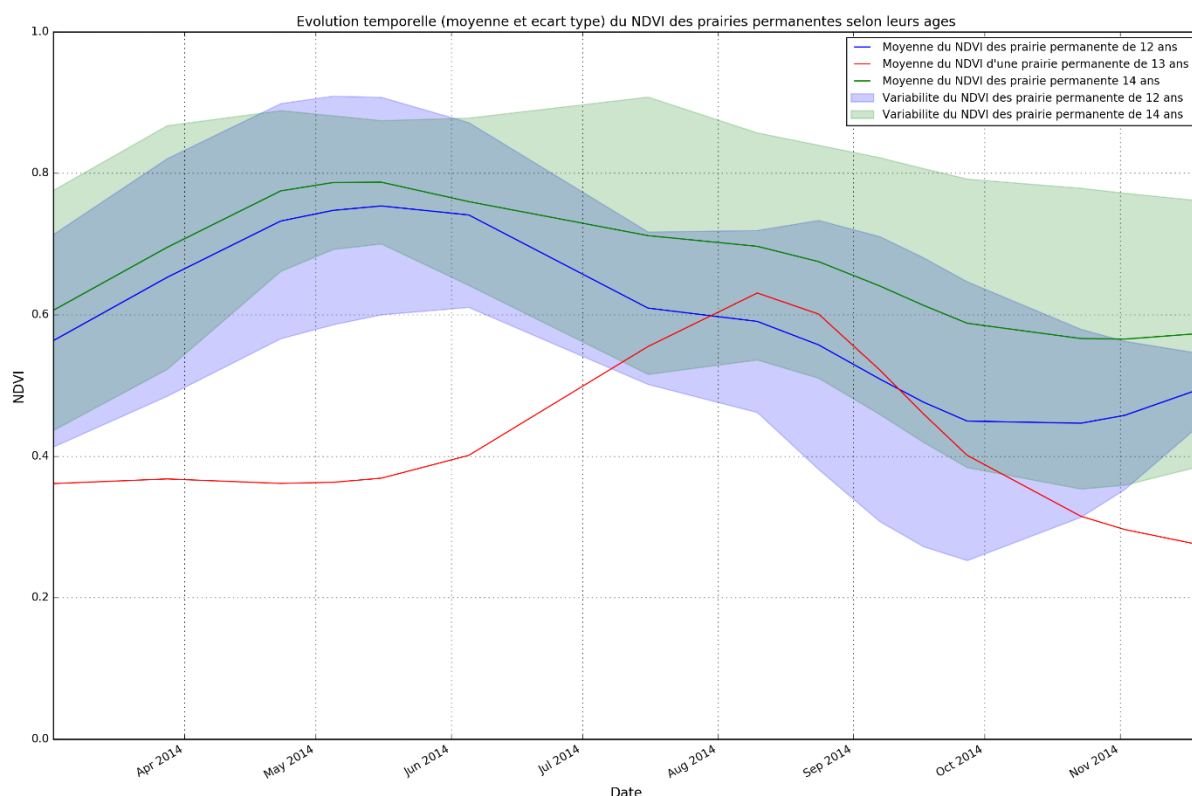


Figure 7 : Évolution temporelle du NDVI des prairies permanentes selon l'âge.

Selon le RPG, nous disposons de 5 prairies de 12 ans, 1 de 13 ans et 65 de 14 ans. La courbe représentant l'évolution du NDVI pour la prairie de 13 années n'est pas exploitable compte tenu du manque d'échantillon. Puis, pour les prairies de 12 et 14 années, il semble se distinguer un effet âge en matière de valeurs du NDVI. Selon le test de Wilcoxon et sous l'hypothèse H_0 que le NDVI n'est pas influencé par l'âge des prairies, les valeurs brutes de NDVI ne sont pas significativement différentes, au contraire de la moyenne ($p\text{-value} = 2.5 \cdot 10^{-12}$). Ainsi, les prairies permanentes ont une variabilité de NDVI importante, limitant la distinction de celles-ci selon leur âge. Cependant, en travaillant avec la valeur moyenne, il semble possible de distinguer l'âge de celles-ci à partir de la réflectance. Cependant, compte tenu de l'effectif de prairies permanentes âgées de 12 ans, il est important de vérifier le résultat à partir d'un échantillon plus important.

2.5. Discussion

L'outil développé a permis de poser plusieurs constats sur la méthode appliquée et sur les résultats. Concernant le traitement du RPG :

- Les géotraitements effectués ont mis en évidence un problème de superposition. Ce constat nécessite de sélectionner les entités ayant une surface supérieure à un seuil défini. De cette manière, les entités produites à cause du décalage ont été supprimées, mais potentiellement pas toutes. De plus, certaines entités correctes ont pu être considérées comme des erreurs ;
- L'utilisation des ilots exclusivement purs a produit des successions agricoles incorrectes dans certains cas. Cependant, cette étape est nécessaire pour permettre l'utilisation des images Formosat-2 de manière optimale ;
- Les ilots du RPG ne permettent pas d'avoir une information spatiale précise des parcelles agricoles dans le cas d'ilots non purs ;

- Certaines successions se révèlent être probablement dues à des erreurs humaines, telles les comportements n°4-5-6 présentant peu d'occurrences. De plus, selon un agent de l'UMR DYNAFOR, il arrive que les exploitants fassent des erreurs volontaires lors des déclarations afin de garder certaines libertés vis-à-vis de leurs parcelles. Cela concerne en particulier les prairies permanentes soumises à une interdiction de retournement, dans certains cas, par la PAC. Ainsi, les prairies ayant le comportement n°3 peuvent être passées en culture par les exploitants sans effectuer de demande auprès de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer.

Ces constats mettent en avant les limites du RPG pour localiser et estimer l'âge des prairies permanentes.

Concernant l'utilisation des images Formosat-2 pour vérifier automatiquement les comportements non conformes a mis en évidence la limite du RPG. En effet, les ilots purs contiennent d'autres éléments par moment. Par exemple des arbres, du bâti et parfois celles-ci sont référencées dans une forêt. Ainsi, l'outil développé avait pour objectif de différencier automatiquement la réflectance des ilots non conformes vis-à-vis des ilots de prairies permanentes. Cependant, la diversité d'éléments contenue dans certains ilots empêche d'effectuer ce traitement automatiquement.

Ainsi, le résultat présenté pour la distinction du NDVI selon l'âge des prairies ne possède pas un nombre suffisamment important pour permettre d'affirmer que l'âge des prairies permanentes a un impact sur le NDVI. Cependant, ce traitement étant intégré dans l'outil développé, il est possible de reproduire ce résultat avec des données plus étoffées.

Finalement, l'outil permet de produire l'historique des ilots purs du RPG. Cet historique permet d'obtenir diverses informations sur les prairies permanentes, mais aussi identifier des prairies pouvant être permanentes, car présentant des comportements non conformes vis-à-vis de la réglementation. Après un contrôle, probablement manuel, il est potentiellement possible de déterminer de nouvelles prairies permanentes pour ensuite étudier l'effet de l'âge sur le NDVI et distinguer si cette différence est significative.

Il est également intéressant d'intégrer les prairies temporaires dans cette réflexion afin d'identifier la possibilité de les distinguer des prairies permanentes.

3. Étude de l'impact des modes de gestion sur la réflectance des prairies à partir de mesures hyperspectrales intra-annuelles

L'objectif de cette partie est d'analyser l'impact des modes de gestion tels le pâturage et la fauche sur le signal spectral de prairies. Ces événements se produisent de manière ponctuelle, localisée et imprévisible dans une période donnée. Pour étudier ces phénomènes, il est nécessaire d'acquérir des données fréquemment et particulièrement lors des opérations de gestion. Pour cela, une campagne de relevés terrain avec un spectroradiomètre a été réalisée sur l'ensemble de la durée de ce stage. Celle-ci a permis d'avoir des données permettant de simuler les bandes spectrales Sentinel-2 et de lier le signal électromagnétique à l'état des prairies observé sur le terrain.

3.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans les coteaux de Gascogne (figure 8) qui est un site d'études écologiques à long terme (LTER_EU_FR_003). C'est une zone vallonnée entre 250-400 mètres d'altitude caractérisée par un paysage fragmenté de petits bois, de prairies et de parcelles agricoles. Cette zone est dominée par la polyculture-élevage avec des prairies permanentes ou temporaires sur les parcelles escarpées et des cultures annuelles (maïs, blé, tournesol) dans les vallées (*Choisis et al., 2010*).

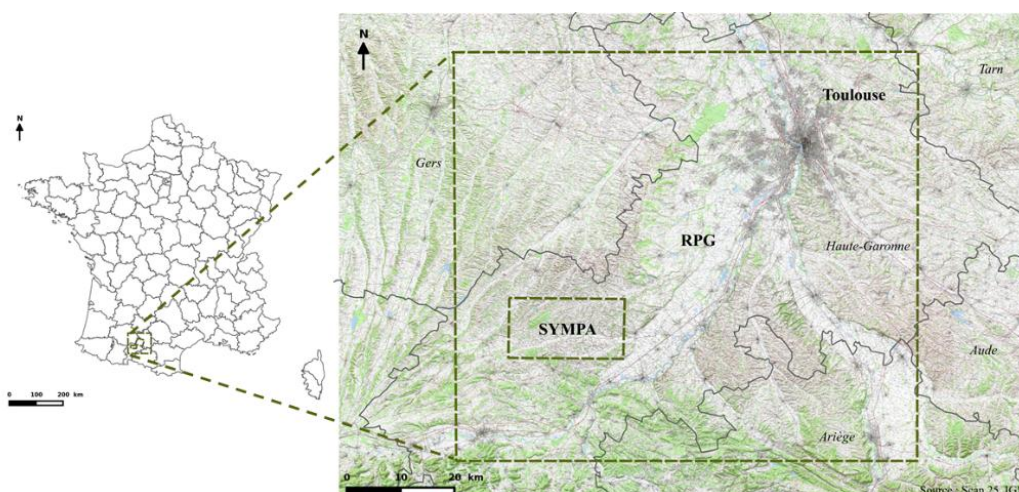


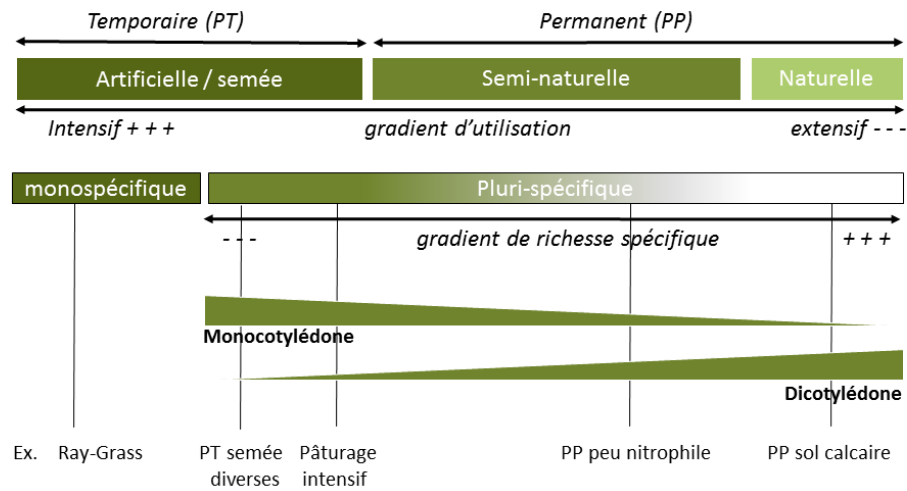
Figure 8 : Localisation de la zone d'étude correspondant au nom de projet SYMPA.

3.1.1. Sélection des prairies étudiées

La sélection des prairies pour cette étude s'est effectuée selon plusieurs critères :

- les prairies devaient présenter une surface supérieure à un hectare pour permettre, lors de l'utilisation de Sentinel-2, de posséder un nombre minimal de pixels au sein des prairies ;
- la pente des prairies devait être faible pour permettre le parcours de celles-ci dans les meilleures conditions ;
- les prairies devaient se situer à proximité les unes des autres pour limiter la durée de déplacement ;
- avoir des prairies appartenant à différents exploitants pour diversifier les pratiques agricoles ;
- l'échantillon de prairie devait contenir des prairies artificielles, des prairies fauchées et non pâturées, des prairies fauchées et pâturées et aucune prairie pâturée avant la fauche ;

- les prairies devaient suivre un gradient allant de la prairie temporaire (artificielle) à la prairie permanente (naturelle) (figure 9) :



Indicateurs : ancienneté, traces de semis, pratiques agricoles, espèces indicatrices, diversité

Figure 9 : Gradient pour la caractérisation des prairies (réalisé par David Sheeren).

Selon le gradient d'utilisation d'une prairie, sa richesse floristique et faunistique sera plus ou moins importante. Cette différence est liée aux successions écologiques, où les dicotylédones vont dominer progressivement les monocotylédones. Les monocotylédones sont majoritaires, voir exclusives dans le cas d'une prairie temporaire monospécifique. La composition floristique d'une prairie peut permettre de déterminer son ancienneté et l'intensité de sa gestion. Une prairie ayant une richesse floristique importante dominée par les dicotylédones sera probablement semi-naturelle ou naturelle, plutôt âgée et gérée extensivement.

Au départ, 18 prairies avaient été sélectionnées, mais compte tenu des conditions météorologiques et du temps nécessaire pour l'acquisition des données, ce nombre a été réduit à 12 prairies lors des premières sorties terrain (figure 10).

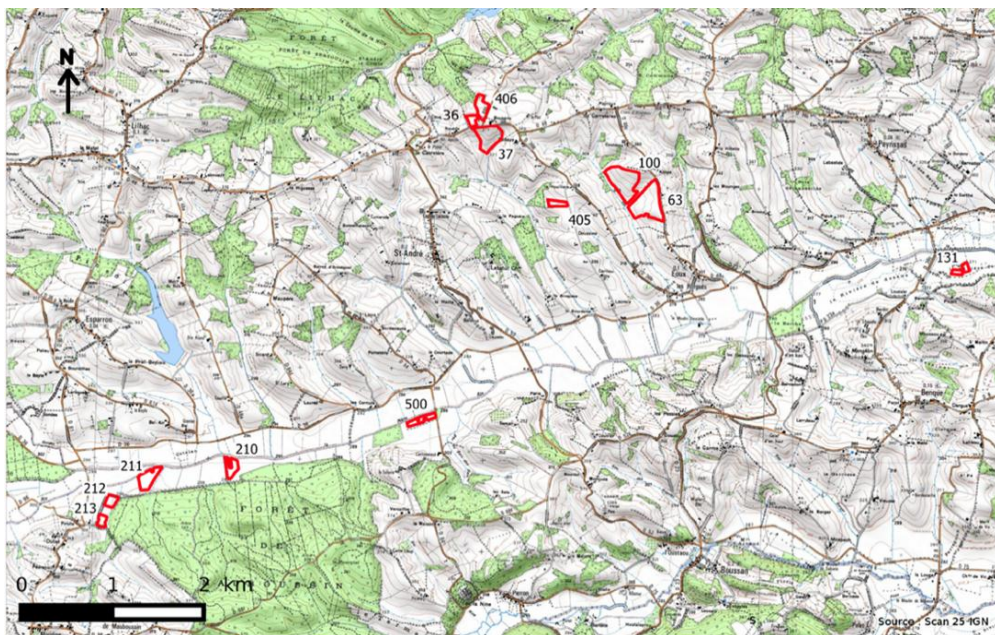


Figure 10 : Localisation et identifiant des prairies sélectionnées.

Le tableau 4 récapitule les caractéristiques des prairies au cours de la saison de végétation :

Tableau 4 : Caractéristiques de chacune des prairies étudiées.

N° prairie	Type	Pente	Surface (ha)	Intrant(s)	Pâturage	Fauchage	Intensité de gestion (1 = faible)
36	PSN	Faible	1.12	Engrais minéral	Oui	Oui	2
37	PSN	Moyenne	5.77	Engrais minéral	Oui	Oui	2
63	PSN	Faible	9.63	Compost et fumier	Oui	Oui	3
100	PA de Ray-Grass	Moyenne	8.73	x	Oui	Oui	4
131	PSN	Nulle	1.16	Fumier	Oui	Oui	2
210	PSN	Nulle	2.06	Fumier	Non	Oui	1
211	PSN	Nulle	3.37	x	Oui	Oui	2
212	PSN	Faible	1.37	x	Oui	Oui	2
213	PSN	Faible	1.07	x	Oui	Oui	2
405	PSN	Faible	1.18	Fumier	Oui	Oui	2
406	PA de Ray-Grass	Moyenne	2.58	Engrais minéral	Oui	Oui	5
500	PSN	Nulle	1.69	x	Non	Oui	1

3.2. Matériels

3.2.1. Spectroradiomètre ASD - Données hyperspectrales

Le spectroradiomètre utilisé mesure la réflectance dans les longueurs d'onde de 350 à 2500 nm avec un pas de 1nm réparti dans trois capteurs. L'étalonnage du spectroradiomètre s'effectue toutes les 10 mesures à l'aide d'un spectre étalon pour prendre en compte les conditions atmosphériques et obtenir une réflectance normalisée. Les mesures ont été effectuées entre 10h et 16h, période où le rayonnement électromagnétique est le plus important. De plus, une absence de nuages est nécessaire, car ils réfléchissent le rayonnement électromagnétique. Ce critère a été une contrainte importante en ce qui concerne les mesures terrain. Les conditions météorologiques sont le principal facteur ayant empêché d'obtenir un jeu de données hypertemporel avec des acquisitions régulières. Pour faire le lien avec Sentinel-2, les mesures ont été acquises à plus de 10 mètres des bords des parcelles compte tenu de sa résolution spatiale et pour éviter les zones de transition.

L'acquisition consiste en une marche aléatoire (en S) sur toute la prairie pour effectuer 60 mesures hyperspectrales pour obtenir une représentation statistique des prairies. Un spectre de réflectance correspond à la moyenne de 25 acquisitions consécutives de spectres. Par mesure, cinq spectres de réflectance sont produits consécutivement. Cette manière de procéder permet de calculer la variation de l'intensité lumineuse au cours d'une mesure et de la corriger au besoin. Les mesures sont effectuées avec un angle de visée de 25° permettant de mesurer l'ensemble des éléments au sol (de préférence homogènes) sur 50cm de diamètre lorsque le viseur est à 1m du sol. Pour chaque mesure, une photo a été prise pour aider à l'interprétation

des spectres de réflectances, mais aussi pour conserver visuellement l'état de la végétation et les éléments mesurés.

Les données ont été acquises tout au long de ce stage, de mars à août, pour un total de 20 journées.

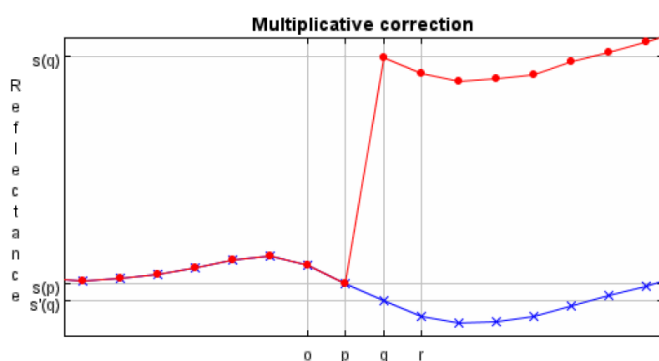


Figure 11 : Saut de valeur correspondant au changement de capteur (courbe rouge) et sa correction (courbe bleue). Source : « SAMS 2.0 » de Carlos A. Rueda et Anne F. Wrona, 2003).

Des traitements sont appliqués pour vérifier et corriger les mesures. Comme indiqué précédemment, le spectroradiomètre emploie trois capteurs qui sont le visible et proche infrarouge de 350 à 1000nm, le moyen infrarouge 1 de 1001 à 1830nm et le moyen infrarouge 2 de 1831 à 2500nm.

Chaque changement de capteur cause un « saut » de réflectance qu'il est nécessaire de corriger (figure 11). Puis, il est nécessaire de supprimer les valeurs correspondantes aux bandes d'absorption

de l'eau, c'est-à-dire aux longueurs d'onde 1350-1410nm, 1810-1970nm, au-delà de 2400nm

Suite à ces traitements, les réflectances sont exploitables pour l'étude des prairies, mais aussi pour la simulation du capteur Sentinel-2.

3.2.2. Mission Sentinel-2

La mission Sentinel-2 a été mise en place par l'European Spatial Agency (ESA) dans le cadre du programme Copernicus pour la surveillance et l'étude des surfaces continentales. Pour cela, deux satellites ayant les mêmes caractéristiques vont être employés (actuellement un seul) afin d'obtenir une fréquence de revisite de 5 jours (actuellement 10 jours). Le capteur a une fauchée de 290 km². Le tableau 5 possède la description bandes spectrales :

Tableau 5 : Caractéristiques des bandes spectrales du capteur Sentinel-2.

Bande	Centre λ (nm)	Intervalle spectral (nm)	Résolution spatiale (m)
1 : Bleu profond	443	20	60
2 : Bleu	490	65	10
3 : Vert	560	35	10
4 : Rouge	665	30	10
5 : Red-Edge 1	705	15	20
6 : Red-Edge 2	740	15	20
7 : Red-Edge 3	783	20	20
8 : Proche infrarouge	842	115	10
8a : Red-Edge 4	865	20	20
9 : Vapeur d'eau	945	20	60
10 : Nuages	1375	30	60
11 : Moyen infrarouge	1610	90	20
12 : Moyen infrarouge	2190	180	20

Ce capteur a l'avantage d'avoir une haute résolution temporelle et spatiale. De plus, il possède des bandes radiométriques dans les longueurs d'onde du Red-Edge pour l'étude de la végétation (bandes 5, 6, 7, 8a). Compte tenu des conditions météorologiques du printemps, aucune image

Sentinel-2 sur la zone d'étude n'était disponible sur cette période. Il était donc impossible d'effectuer un suivi hypertextuel des prairies, d'observer la croissance de la végétation, mais aussi la fauche de certaines des prairies étudiées.

3.2.3. Relevés botaniques

Un relevé botanique a été effectué par un botaniste sur chacune des prairies afin d'effectuer un inventaire des espèces présentes sur chacune des prairies. D'après la figure 9, cette information permet de localiser les prairies sur ce gradient selon l'abondance des monocotylédones et dicotylédones. De plus, il est possible de calculer des indices de biodiversité ou des métriques écologiques telles l'indice de Shannon. Ce relevé s'est effectué fin avril 2016, après floraison et avant la fauche.

L'inventaire floristique s'effectue sans s'approcher des bords de parcelles pour ne pas prendre en compte les zones de transition. Pour chacune des espèces rencontrées, leur abondance est estimée visuellement sur l'ensemble de la prairie selon les coefficients de Braun-Blanquet (**Braun-Blanquet J., 1964**). Le recouvrement floral est évalué et prend en compte uniquement les plantes mellifères.

3.2.4. Base de données pour les mesures hyperspectrales

Afin d'optimiser le stockage et l'utilisation des données, il a été décidé de réaliser une base de données sous PostgreSQL. Celle-ci a pour but de conserver l'ensemble des informations acquises lors de cette étude (données vectorielles, photos, mesures hyperspectrales). L'utilisation d'un Système de Gestion de Base de Données est un élément très peu employé au sein des projets de l'UMR DYNAFOR. Cette base de données permet également d'optimiser le stockage des données, faciliter leur partage et leur réutilisation. De plus, l'ensemble des outils produit pour l'analyse de ces données sont connectés à cette base de données. De cette manière, l'ajout de données est automatiquement ajouté dans les traitements. Le modèle conceptuel des données est présenté en figure 12.

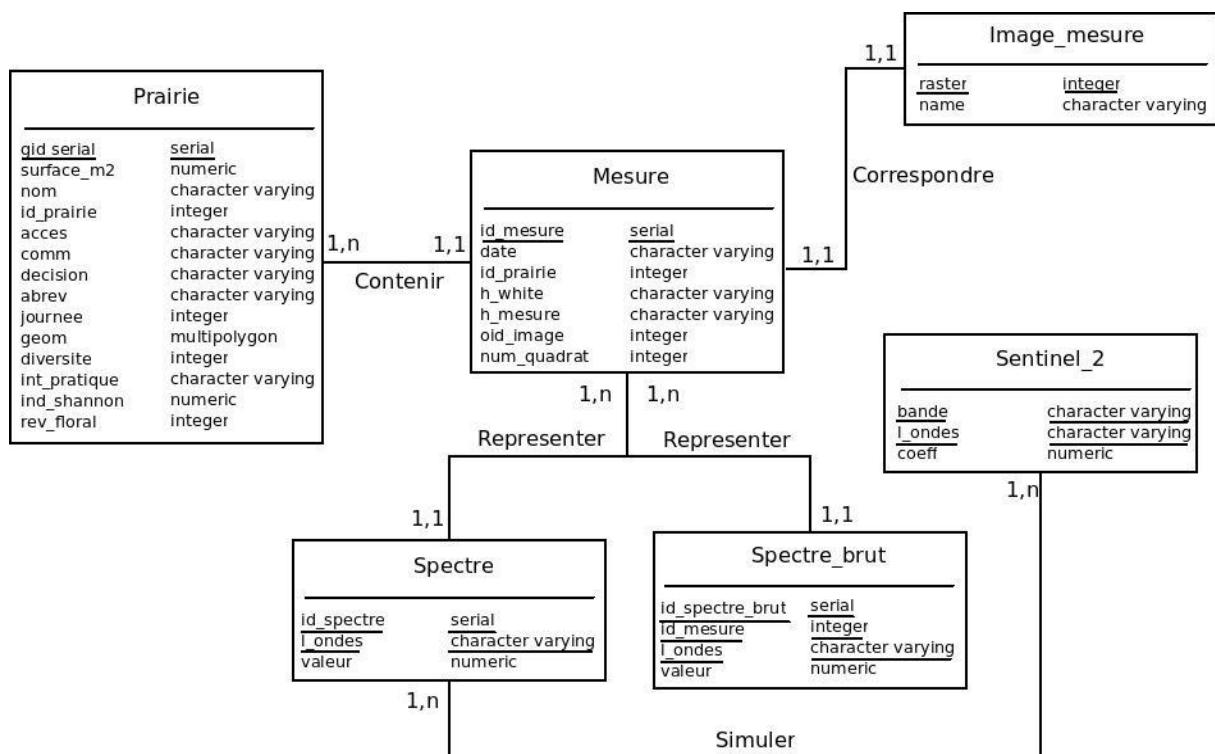


Figure 12 : Modèle Conceptuel des Données de la base de données présentant les différentes tables et les clés primaires (attributs soulignés) ainsi que les cardinalités.

La table « prairie » possède diverses informations sur les prairies et possède un champ « geom » où est stockée la géométrie des prairies. Il est possible de se connecter à la base de données via une connexion WMS pour afficher et mettre à jour les prairies. Le numéro de la prairie « id_prairie » permet de lier la table « prairie » avec la table « mesure » d'après le principe de clé étrangère. La table « mesure » permet de faire le lien entre la table « prairie », la table « image_mesure » et les tables « spectres » et « spectres brut ». Les photos sont enregistrées dans la base de données sous l'identifiant « raster ». La table « spectre » contient les spectres prétraités et la table « spectre_brut » les spectres bruts. La table « Sentinel-2 » contient les informations permettant de simuler les bandes Sentinel-2, c'est-à-dire les sensibilités spectrales des bandes selon les différentes longueurs d'onde. Les bandes Sentinel-2 sont produites dynamiquement selon un système de « vue ». De cette manière, il est possible d'intégrer d'autre sensibilité de capteur pour effectuer leur simulation à partir des mesures hyperspectrales.

Ci-dessous, le Modèle Logique de Données Relationnelles permettant de mettre en évidence les clés primaires et étrangères entre les différentes tables :

- **Prairie**(gid_serial, surface_m2, nom, id_prairie, acces, comm, decision, abrev, journee, geom, diversite, int_pratique, ind_shannon, rev_floral)
- **Mesure**(id_mesure, date, h_white, h_mesure, oid_image, num_quadrat, #id_prairie)
- **Image_mesure**(raster, name, #oid_image)
- **Spectre**(id_spectre, l_ondes, valeur, #id_mesure)
- **Spectre_brut**(id_spectre_brut, id_mesure, l_ondes, valeur, #id_mesure)
- **Sentinel_2**(bande, l_ondes, coeff)

Les mots en gras représentent les tables, les mots soulignés les clés primaires et les clés étrangères sont précédées par les dièses.

3.3. Méthodologie

La figure 13 représente les traitements effectués sur les données hyperspectrales et Sentinel-2 simulées. Ceux-ci ont pour objectifs d'analyser les réflectances hyperspectrales après prétraitement et simuler les bandes Sentinel-2. Les bandes simulées sont utilisées pour calculer des indices de végétation et effectuer une estimation de densité de probabilités des réflectances. Ces données vont permettre de comprendre l'évolution de la réflectance des prairies au cours de la saison de végétation et particulièrement l'impact des modes de gestion sur celle-ci.

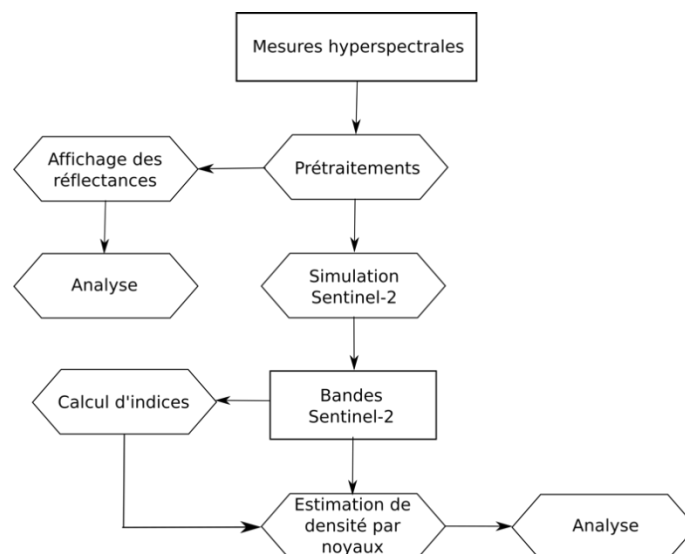


Figure 13 : Méthodologie appliquée pour le traitement des mesures hyperspectrales.

3.3.1. Traitement des données hyperspectrales et Sentinel-2 simulées

3.3.1.1. Analyse des réflectances

L'analyse des réflectances acquises avec le spectroradiomètre consiste à étudier l'évolution de celles-ci au cours de la saison de végétation et lors des opérations de gestion dans les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge. L'objectif est d'identifier les longueurs d'onde influencées par les modes de gestion, mais aussi de décrire l'évolution de la réflectance au cours d'une saison de végétation.

3.3.1.2. Simulation du capteur Sentinel-2 à partir des données hyperspectrales

La simulation du capteur Sentinel-2 permet :

- d'évaluer le potentiel de ce capteur pour identifier les opérations de gestion des prairies ;
- remplacer les images aux dates ayant un recouvrement nuageux conséquent ;
- relier les mesures hyperspectrales avec les bandes Sentinel-2 ;

Pour simuler les bandes du capteur Sentinel-2, j'ai utilisé les sensibilités spectrales mises à disposition sur le site de l'ESA. Pour la simulation du capteur, j'ai effectué une moyenne pondérée des valeurs pour chaque longueur d'onde selon le coefficient de sensibilité spectrale assigné à celles-ci (**Feilhauer et al., 2013**). La bande 10 simulée de Sentinel-2 n'est pas utilisable puisque les longueurs d'onde nécessaires à sa simulation ont été supprimées lors des prétraitements.

3.3.1.3. Calcul du NDVI, MSAVI2 et S2REP

Les néo-canaux utilisés ont pour objectif de décrire la végétation en exploitant les bandes Sentinel-2. Le NDVI est un indice de végétation standard dans l'étude de la végétation (**Gao, 1996**). Cet indice ne prend pas en compte l'influence du sol dans le signal spectral et sature rapidement face à un Leaf Area Index élevé. Cet indice est utilisé dans cette étude pour évaluer sa capacité à suivre l'évolution des prairies et à distinguer les opérations de gestion compte tenu des critères précédemment cités.

Des chercheurs ont produit des indices de végétation capables de prendre en compte la participation du sol à partir d'un coefficient fixe comme le Soil Adjustment Vegetation Index (SAVI) (**Huete, 1988**). Puis, diverses améliorations de cet indice ont été proposées afin de simplifier, adapter et automatiser celui-ci. C'est le cas du Modified Soil-Adjusted Vegetation Index 2 (MSAVI2) (**Qi et al., 1994**) qui calcule dynamiquement la participation du sol :

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

Cet indice de végétation est performant pour l'étude des couverts peu dense, et inversement, avec des niveaux de LAI élevés (**Broge et Leblanc, 2000 ; Haboudane et al., 2004**). De plus, il est efficace en début de saison de végétation, mais aussi tout au long de celle-ci par rapport au NDVI saturant rapidement face à une végétation dense (**Dorigo et al., 2007 ; Verger et al., 2008 ; Huete et al., 1997**).

Le Sentinel-2 Red-Edge Point (S2REP) (**Frampton et al., 2013**) est un indice permettant de quantifier le taux de chlorophylle dans la végétation et donc son dynamisme à partir de la localisation du point d'inflexion du red-edge :

$$S2REP = 705 + 35 * \left(\frac{\left(\frac{(B7 + B4)}{2} \right) - B5}{B6 - B5} \right)$$

Un S2REP proche de 700nm correspond à une faible concentration de chlorophylle et inversement près de 730nm.

3.3.1.4. Analyse des bandes et des indices de végétation

L'interprétation des indices et des bandes Sentinel-2 va s'effectuer au travers d'une estimation de densité par noyau. C'est une méthode non paramétrique d'estimation de la densité de probabilité des données. Elle permet de représenter l'ensemble des mesures faites au sein d'une prairie à une date et dans une bande spectrale ou un indice de végétation par une seule fonction.

Cette méthode permet également de limiter l'effet du nombre de mesures effectuées par prairie, car parfois moins de 60 mesures ont été acquises. Cette méthode lisse les valeurs selon une fonction d'estimation d'après la distance des points par rapport au centre de valeur. Le lissage s'effectue à partir d'une valeur déterminée par la méthode de B.W Silverman (1986). L'estimation réalisée se base sur un noyau gaussien, car nous avons supposé que les mesures de réflectance au sein d'une même prairie à une date donnée suivent une loi normale.

Les résultats obtenus seront interprétés et testés afin de déterminer leur significativité. Le test de Wilcoxon a été retenu puisqu'il permet de comparer deux mesures d'une variable quantitative. Il va permettre de distinguer si la réflectance des prairies entre deux dates est significativement différente, particulièrement lors des opérations de gestion.

3.4. Résultats

3.4.1. Résultats de l'analyse des réflectances

L'analyse de la réflectance hyperspectrale des prairies permet de distinguer l'impact de la croissance, de la sénescence, du pâturage et du fauchage sur le signal spectral des prairies. Cependant, l'analyse ne se porte pas sur les longueurs d'onde du moyen infrarouge pour deux raisons :

- les bandes Sentinel-2 dans ces longueurs d'onde sont à 60 mètres de résolution spatiale et sont utilisées pour effectuer les corrections atmosphériques ;
- un problème technique nous a fait changer de spectroradiomètre. Cependant, le nouvel appareil produit des valeurs aberrantes dans le moyen infrarouge rendant ces longueurs d'onde inexploitable.

L'ensemble des réflectances des prairies est disponible en annexe II.

3.4.1.1. Réflectance des quatre principaux états du sol des prairies

Au cours de la saison de végétation, quatre états du sol ont été principalement mesurés et dont les réflectances type sont présentées par la figure 14. Ces profils ne prennent pas en compte la dimension temporelle des mesures. L'étude de la réflectance se base sur les longueurs d'onde entre 350 et 1070nm.

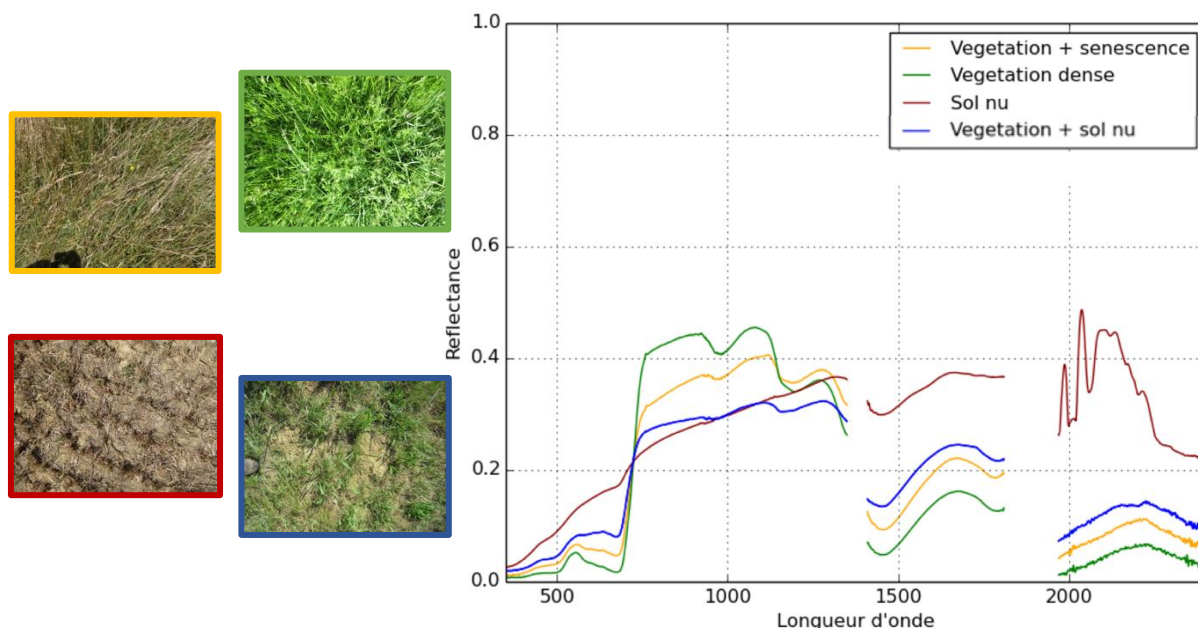


Figure 14 : Réflectance des principaux états du sol des prairies avec une photo de représentation (Donatien Dallery, Maillys Lopes). Les valeurs au-delà de 1400nm ne sont pas exploitables (la courbe rouge dans ces valeurs correspond au spectroradiomètre présentant une erreur dans le moyen infrarouge), mais cela n'impacte pas cette étude.

La courbe de référence pour cette analyse est celle de la « végétation dense ». Dans le domaine du visible, la chlorophylle absorbe l'énergie solaire dans les longueurs d'onde du bleu (450nm) et du rouge (660nm) et réfléchit dans celle du vert (550nm). Puis, le red-edge dispose d'une forte intensité de réflectance. Dans le proche infrarouge, entre 910-1070nm, se situe une diminution de réflectance correspondant aux longueurs d'onde où l'eau contenue dans la végétation absorbe le rayonnement électromagnétique. Ainsi, la présence de végétation correspond à une faible réflectance dans le bleu et le rouge et plus forte dans le vert, un red-edge important et une diminution de réflectance dans le proche infrarouge.

La courbe « végétation + sénescence » permet d'observer une augmentation de réflectance dans le bleu, le vert et le rouge. La végétation sénescente a pour effet de ne plus absorber dans les longueurs d'onde du bleu et du rouge. L'augmentation de la réflectance dans le vert provient de la végétation sénescente. De par l'augmentation de réflectance dans le rouge et la diminution de végétation saine, l'intensité du red-edge est moins importante. Le rayonnement électromagnétique dans les longueurs d'onde entre 910-1070nm est plus faible compte tenu de la sénescence.

La courbe « végétation + sol nu » se comporte comme la courbe précédente, mais avec une réflectance plus forte dans les longueurs d'onde du visible et plus faible pour le red-edge et le proche infrarouge.

La courbe « sol nu » ne permet plus de distinguer la présence de végétation. La réflectance dans les longueurs d'onde du visible est élevée et dépend de la rugosité, la couleur et l'humidité du sol principalement. L'intensité du red-edge est quasiment nulle (quelques brins d'herbe peuvent subsister) et aucune absorption de réflectance n'est visualisable entre 910-1070nm compte tenu de l'absence de végétation. Le bilan de ces états est le suivant (tableau 6) :

Tableau 6 : Bilan de la réflectance dans les différentes longueurs d'onde selon l'état du sol.

État du sol	Réflectance bleue	Réflectance verte	Réflectance rouge	Intensité red-edge	Absorption eau proche infrarouge
Végétation dense	0.02	0.05	0.03	0.4	0.05
Végétation + sénescence	0.03	0.06	0.05	0.31	0.02
Végétation + sol nu	0.03	0.08	0.09	0.25	0.01
Sol nu	0.04	0.13	0.18	0.22	0
Variabilité	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	Moyenne

3.4.1.2. Évolution de la réflectance d'une mesure

La figure 15 représente l'évolution de la réflectance d'une mesure de la prairie 405 au cours de la saison de végétation dont la description se situe dans le tableau 7.

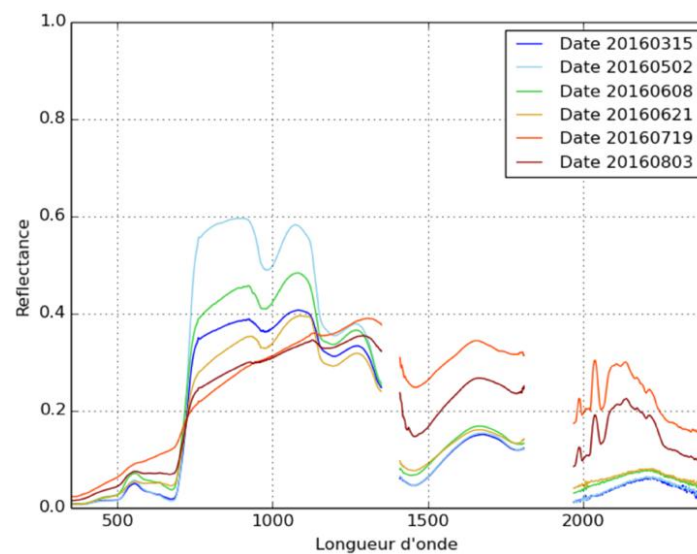


Figure 15 : Évolution de la réflectance d'une mesure de la prairie 405. L'erreur dans le moyen infrarouge causée par le nouveau spectroradiomètre est visualisable sur les courbes orange et rouge.

Tableau 7 : Description de l'évolution de la réflectance de la prairie 405 selon l'état du sol et les modes de gestion (photos de Mailys Lopes et Donatien Dallery).

Semaine (date)	Commentaire	Photo
11 (15/03)	En début de saison de végétation, la végétation est dense, mais encore peu dynamique comme l'indique l'intensité du red-edge.	
18 (02/05)	La végétation parvient à son maximum de croissance, comme le dénotent l'intensité du red-edge et les longueurs d'onde absorbées par l'eau contenue dans les plantes.	

23 (08/06)	La végétation est en phase de sénescence. La réflectance a augmenté dans les longueurs d'onde du bleu, du vert et du rouge. L'intensité de la réflectance du red-edge et l'absorption des longueurs d'onde de l'eau des plantes ont diminué.	
25 (21/06)	La prairie est encore en phase de sénescence, mais avec une végétation moins dynamique compte tenu de la diminution de la réflectance du red-edge et de l'absorption de la réflectance par l'eau dans les plantes.	
29 (19/07)	La prairie est fauchée. La réflectance dans le visible augmente, plus particulièrement dans le rouge. L'intensité du red-edge est faible, car il y a encore de la végétation présente de manière éparse. L'absorption de l'eau contenue dans les feuilles est quasiment nulle. D'après la photo, le sol n'est pas observable, élément visualisable sur la figure 15 étant donné que la réflectance du rouge s'approche de 0.11 alors que le sol nu a une réflectance proche de 0.2 (figure 14).	
31 (03/08)	La repousse de la végétation a pour effet de diminuer la réflectance dans le visible, mais la présence de végétation sénescence est notable dans le rouge. Le red-edge se distingue à nouveau, de même pour le rayonnement entre 910-1070nm, mais de manière très faible.	

La réflectance d'une prairie évolue de manière graduelle au cours de la saison de végétation. Cependant, la fauche rompt cet aspect en supprimant la végétation verte instantanément. La distinction d'une fauche se situe principalement par l'intensité de la réflectance dans les longueurs d'onde du rouge, du red-edge et du proche infrarouge. La réflectance des longueurs d'onde du bleu et du vert ne varie pas suffisamment face à cette opération. Elles ne permettent pas cette distinction.

3.4.2. Résultats de la simulation des bandes Sentinel-2

La simulation des bandes Sentinel-2 permet de connaître la capacité de ce capteur à suivre l'évolution de la réflectance des prairies au cours de la saison de végétation et particulièrement pour détecter les opérations de gestion. Dans un premier temps, les prairies utilisées pour présenter les résultats sont décrites en ce qui concerne les opérations de gestion et la végétation à chacune des dates à laquelle elles ont été mesurées (les opérations de toutes les prairies se situent en annexe III). Dans un second temps, l'évolution de la réflectance des bandes Sentinel-2 pour ces prairies est décrite. Pour terminer, les résultats des néo-canaux calculés à partir des bandes Sentinel-2 concluront cette partie.

3.4.2.1. Description des prairies 37 et 500

Ces deux prairies ont été choisies, car nous avons le plus de mesure sur celles-ci et sont représentatives des prairies fauchées. La prairie 37 a été pâturée au contraire de la 500. La partie pâturée a été mesurée deux fois, permettant de distinguer son évolution. De plus, la prairie 37 permet d'observer l'effet d'une gestion différenciée sur la réflectance à l'échelle de la prairie. La prairie 500 permet de distinguer les quatre états du sol présenté précédemment, mais aussi

l'impact de la fauche, de la sénescence et de la repousse sur la réflectance. Les tableaux 8 et 9 contiennent respectivement la description de la prairie 500 et 37 à chacune des dates mesurées avec des photos d'illustrations.

Tableau 8 : Description de l'évolution de la prairie 500 (photos de Mailys Lopes et Donatien Dallery)

Semaine (date)	Commentaire	Photo
12 (23/03)	La prairie présente un mélange de sols, de végétation en croissance et sénescence.	
17 (29/04)	La végétation est à son maximum de croissance et est également en fleur.	
23 (08/06)	La floraison des graminées est terminée et la végétation commence à changer de couleurs pour indiquer un début de sénescence.	
25 (22/06)	La prairie est fauchée et présente du sol nu, de la végétation sénescence et de la végétation en croissance.	
27 (07/07)	La végétation repousse, mais du sol et de la sénescence sont encore observables.	
30 (29/07)	La prairie est hétérogène avec des zones de sols nus et des zones avec de la végétation très dense et couvrante.	

Tableau 9 : Description de l'évolution de la prairie 37. Cette prairie possède une pente et des zones de replat, provoquant une végétation hétérogène en termes de stades de croissance et a été pâturée intensivement l'année précédente (photos de Maïlys Lopes et Donatien Dallery).

Semaine (date)	Commentaire	Photo
11 (14/03)	La végétation est dense, mais rase par endroit et du sol nu à d'autres.	
18 (02/05)	La végétation est dense et haute avec beaucoup de fleurs selon les endroits. La présence de sol nu est à dénoter à plusieurs endroits.	
25 (21/06)	La prairie a été fauchée. La prairie est représentée par de la végétation sénescente et morte, du sol nu et des repousses. Malheureusement, la mesure a été effectuée plusieurs jours après la fauche (07/06), laissant le temps à la végétation de repousser.	
29 (19/07) Pâturée	La prairie est pâturée sur une partie. Celle-ci présente du sol nu, de la végétation sénescente et morte et quelques brins d'herbe sains sont observables.	
29 (19/07)	La partie non pâturée repousse, mais de la végétation morte, sénescente et du sol nu sont tout de même observables.	
31 (03/08) Pâturée	La zone pâturée possède une végétation sénescente et morte, du sol nu et quelques pousses de végétation.	
31 (03/08)	La partie n'ayant pas été pâturée présente le même état lors de la précédente sortie, mais avec une présence de végétation sénescente plus importante.	

Ces deux prairies permettent d'étudier l'impact de la fauche, du pâturage et d'une gestion homogène et différenciée sur la réflectance des prairies. En effet, au cours de la campagne de mesures terrain, il est commun de rencontrer des parcelles de prairies présentant plusieurs modes de gestion à la fois.

3.4.2.2. Évolution de la réflectance des bandes Sentinel-2

3.4.2.2.1. Évolution de la réflectance des bandes Sentinel-2 dans le visible

Par rapport aux résultats obtenus précédemment et décrits à l'échelle de la mesure, la réflectance des bandes Sentinel-2 est présentée à l'échelle de la prairie. L'ensemble des résultats pour chacune des prairies se situe en annexe IV.

L'estimation de densité par noyau de la réflectance des bandes du bleu, du vert et du rouge pour les prairies 500 et 37 est représentée en figure 16.

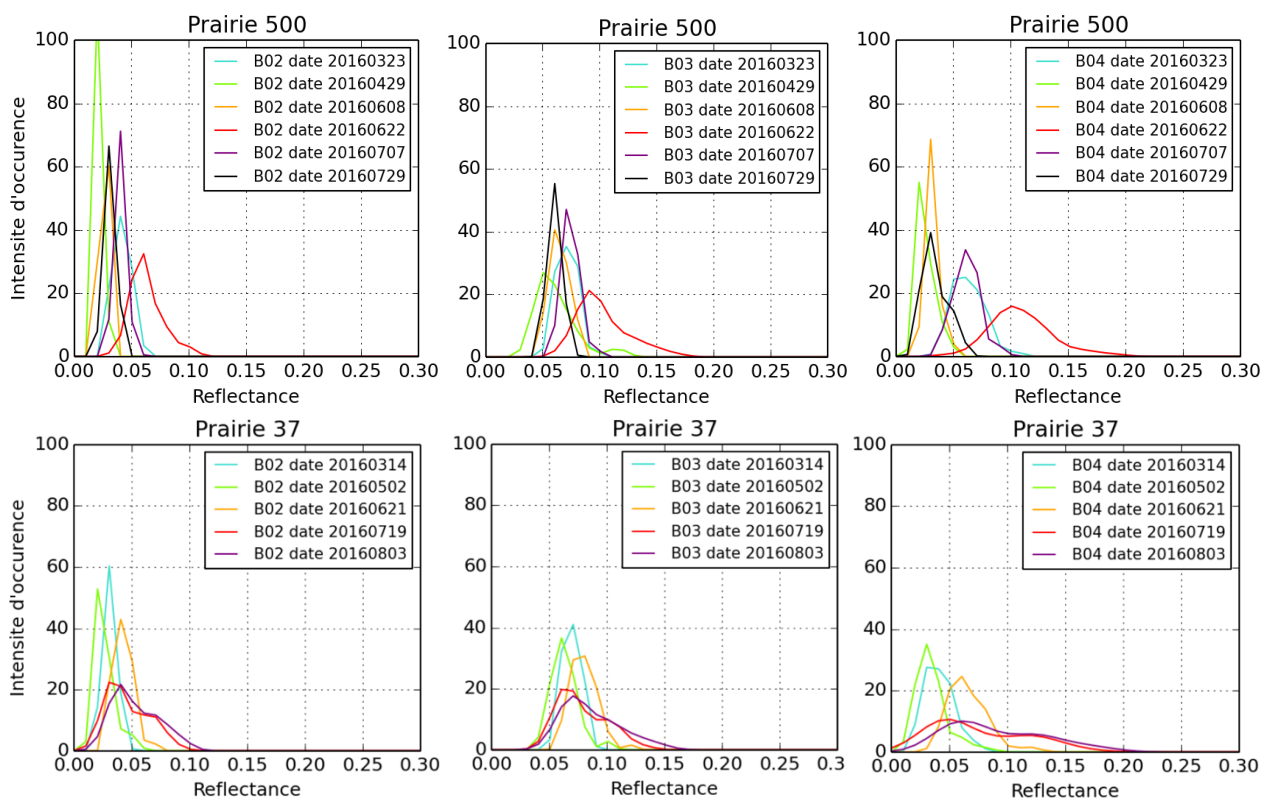


Figure 16 : Evolution des bandes du bleu, du vert et du rouge d'après une estimation de densité par noyau à chacune des dates de mesure sur la prairie 500 et 37.

L'évolution de la réflectance dans les bandes du visible indique une diminution de celle-ci lorsque la végétation croît. Puis, la sénescence de la végétation indique une augmentation de la réflectance dans chacune des bandes, mais aussi de la variabilité de celle-ci. Puis, l'opération de fauche se démarque parfaitement de toutes les autres dates (courbe rouge pour la prairie 500, orange pour la prairie 37) en termes de réflectance et de variabilité. Cependant, cette augmentation est moins notable pour la prairie 37 puisque celle-ci a été mesurée 2 semaines après la fauche, laissant le temps à la végétation de repousser et donc de diminuer la réflectance dans ces bandes. Pour faire suite à cette opération de gestion, l'évolution de la réflectance des prairies sélectionnées est différente.

La prairie 500 indique une diminution constante de la réflectance et de la variabilité des bandes du visible jusqu'à être équivalente à celles avant fauche. Pour la prairie 37, la réflectance prend en compte la gestion différenciée de la prairie, c'est-à-dire du pâturage et de la végétation en

croissance. Les courbes présentent deux modes ayant pour l'un une réflectance faible et pour l'autre une réflectance élevée. Le premier mode correspond à la partie non pâturée avec une végétation en croissance et le second à la partie pâturée présentant une quantité importante de sol nu. Pour la bande du rouge, la réflectance de la prairie 37 après fauche présente une variabilité importante. Ce constat est dû à la présence de sol nu ayant une réflectance élevée et à la chlorophylle absorbant le rayonnement électromagnétique dans ces longueurs d'onde. La dernière mesure de cette prairie diminue l'observation de ces deux modes. En effet, compte tenu des caractéristiques de cette prairie, la végétation n'a pas repoussé dynamiquement bien qu'elle ait été fauchée 2 semaines avant la prairie 500. Elle est également en phase de sénescence. De plus, la partie pâturée ne l'a pas été de nouveau, laissant la végétation repousser.

Ensuite, pour la prairie 500 et selon l'hypothèse H_0 d'avoir des valeurs de réflectance significativement semblables entre deux dates, le test de Wilcoxon permet de rejeter cette hypothèse d'après un seuil d'erreur de 0.05 pour :

- la bande 2 entre les mesures avant et après fauche ($p\text{-value} = 0.003$), mais aussi entre la mesure de la fauche et de la première repousse ($p\text{-value} = 0.02$) ;
- la bande 3 entre toutes les mesures, particulièrement entre la date avant et après fauche ($p\text{-value} = 8.6^{-5}$), sauf pour les deux dernières dates ;
- la bande 4 entre les mesures avant et après fauche ($p\text{-value} = 1.2^{-8}$), mais aussi entre la mesure de la fauche et de la première repousse ($p\text{-value} = 4.3^{-5}$).

Selon la même hypothèse et le même seuil pour la prairie 37, le test de Wilcoxon permet de rejeter l'hypothèse pour :

- la bande 2 entre les dates avant et après fauche ($p\text{-value} = 0.005$) ;
- la bande 3 entre les dates avant et après fauche ($p\text{-value} = 0.01$) ;
- la bande 4 entre les dates avant et après fauche ($p\text{-value} = 1.1^{-9}$).

Ainsi, pour les bandes du bleu et du rouge leur réflectance est significativement différente après une fauche, mais aussi lors de la première repousse. La différence significative de réflectance après la fauche s'observe sur l'ensemble des prairies, sauf pour la prairie 37 compte tenu de sa gestion différenciée. La réflectance de la bande du vert est significativement différente lors de la fauche d'après la prairie 500 et 37.

Cependant, la réflectance de cette bande est également significativement différente lors de la phase de croissance et de sénescence pour la prairie 500. Ce test a été effectué sur l'ensemble des prairies mesurées, permettant d'identifier la prairie 500 comme étant la seule à obtenir cette différence significative de réflectance pour ses dates avant fauche. Étant la seule prairie à présenter ce résultat et d'après sa repousse extrêmement dynamique, il est possible qu'une fréquence de revisite plus élevée permettrait d'accepter l'hypothèse H_0 pour la bande du vert à toutes les dates ne présentant pas de gestion.

3.4.2.2.2. Évolution de la réflectance des bandes Sentinel-2 dans le red-edge et le proche infrarouge

L'estimation de densité par noyau de la réflectance des bandes du red-edge et du proche infrarouge pour la prairie 500 et 37 est représentée sur la figure 17.

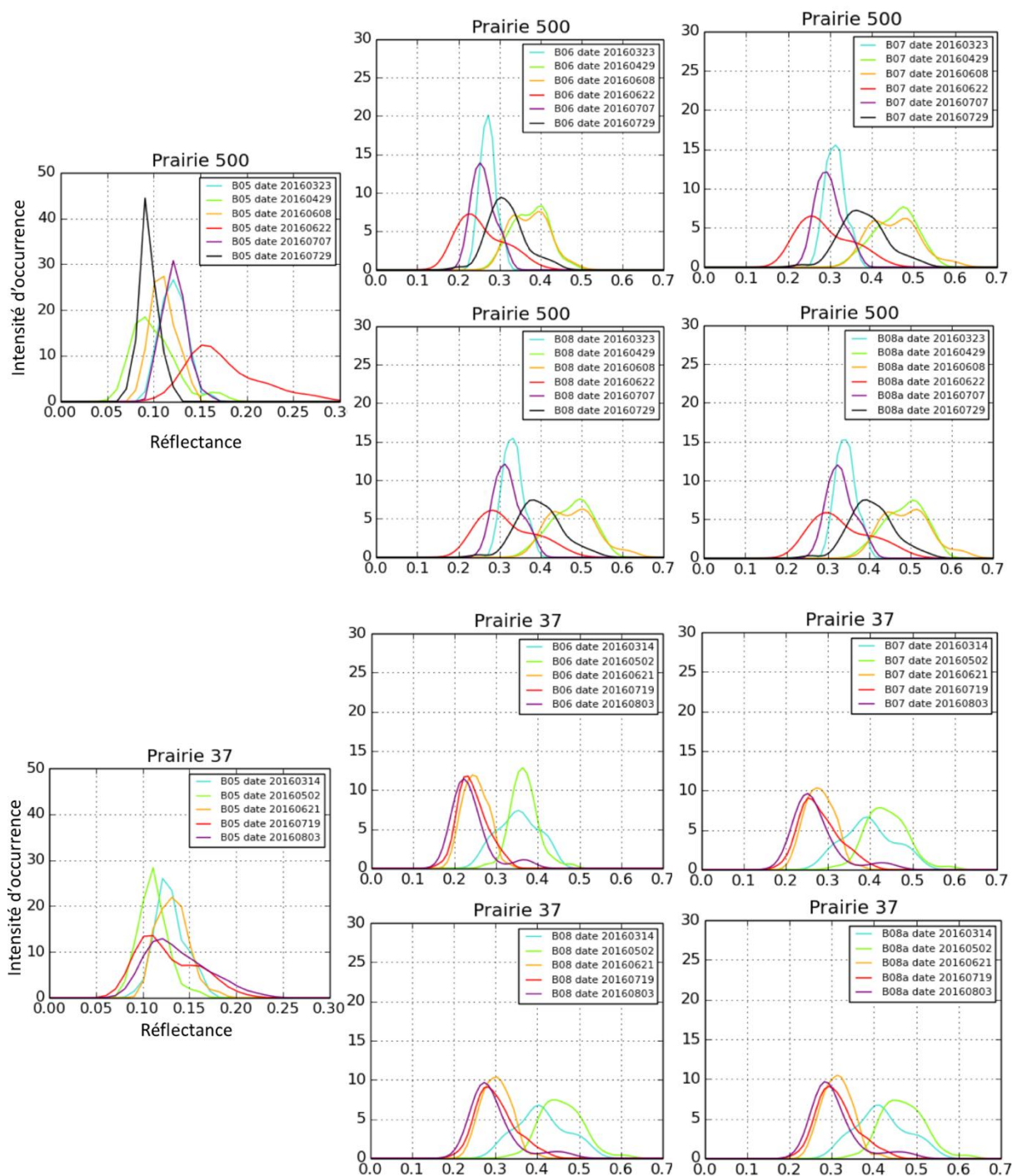


Figure 17 : Evolution des bandes du red-edge et du proche infrarouge d'après une estimation de densité par noyau à chacune des dates mesurées sur la prairie 500 et 37.

Tout d'abord, la bande 5 possède une réflectance s'apparentant aux bandes du visible. Cette bande du red-edge se distingue des autres par ce critère, mais également par l'ordre d'évolution des courbes. La réflectance de la bande 5 diminue lors de la croissance de la végétation. Elle augmente lors de la sénescence et de la fauche. Pour la prairie 500, la réflectance va diminuer de nouveau lors de la repousse. Pour la prairie 37, la mesure de la fauche ayant été effectuée 2 semaines après celle-ci, la réflectance de la prairie ne se distingue pas comme pour la prairie 500. De plus, compte tenu de la gestion différenciée, la réflectance lors des mesures après celle de la fauche évolue dans deux directions à la fois. La variabilité de la réflectance est la plus importante lors de la fauche et lors d'une gestion différenciée.

Pour les bandes 6,7,8 et 8a, l'évolution de la réflectance indique une augmentation de celles-ci lorsque la végétation croît. Puis, la sénescence de la végétation indique une diminution de la réflectance. La réflectance de l'opération de fauche se démarque par rapport à celle avant fauche. Cette diminution est notable pour la prairie 37 bien qu'elle ait été mesurée 2 semaines après la fauche, laissant le temps à la végétation de repousser. Cependant, il est probable que cette distinction puisse être plus conséquente. Après la fauche, les prairies sélectionnées ont une évolution de leur réflectance dans ces bandes différente.

La prairie 500 indique une augmentation de la réflectance et une diminution de la variabilité des bandes du proche infrarouge jusqu'à être presque équivalente à celles avant fauche. Pour la prairie 37, la première mesure après fauche présente une diminution de la réflectance minimale et une augmentation de la réflectance maximale. Ces évolutions correspondent à la partie pâturée (réflectance minimale) et à la partie en croissance (réflectance maximale). La seconde mesure après fauche pour cette prairie permet de distinguer deux modes. Le premier correspond à la partie pâturée et le second à la partie non pâturée. Compte tenu de la faible occurrence de cette partie, et d'après la description de la prairie 37, la prairie est majoritairement en phase de sénescence expliquant la forte occurrence de réflectance entre 0.2-0.4.

Ensuite, pour la prairie 500 et selon l'hypothèse H_0 d'avoir des valeurs de réflectance significativement semblables entre deux dates, le test de Wilcoxon permet de rejeter cette hypothèse d'après un seuil d'erreur de 0.05 pour :

- la bande 5 entre toutes les mesures, sauf pour les deux dernières dates, et particulièrement entre la date avant et après fauche ($p\text{-value} = 1.8^{-11}$) et entre la mesure après fauche et la mesure suivante ($p\text{-value} = 1.6^{-11}$), c'est-à-dire la repousse ,
- les bandes 6, 7, 8 et 8a entre les deux premières mesures et les mesures après fauche.

Selon la même hypothèse et le même seuil pour la prairie 37, le test de Wilcoxon permet de rejeter l'hypothèse pour :

- la bande 5 entre la mesure après fauche et la mesure suivante ($p\text{-value} = 1.5^{-4}$) ;
- la bande 6 entre les mesures avant et après fauche ($p\text{-value} = 0.004$) et entre les mesures de la gestion différenciée ($p\text{-value} = 0.008$) ;
- les bandes 7, 8 et 8a entre les mêmes mesures que la bande 6, mais aussi entre la mesure après la fauche et la première mesure de la gestion différenciée.

3.4.2.3. Évolution de la réflectance des indices de végétation

3.4.2.3.1. Évolution des valeurs du NDVI et du MSAVI2

L'estimation de densité par noyau du NDVI et du MSAVI2 est représentée sur la figure 18 ci-après.

Le NDVI, comme le MSAVI2, permet de distinguer l'évolution de la végétation. Cette évolution va se poursuivre jusqu'à la phase de sénescence pour la prairie 500 où une diminution des valeurs est observable. Puis, l'opération de fauche va diminuer de manière conséquente les valeurs de ces indices et permettre une distinction totale des courbes avant et après fauche. Concernant l'occurrence des valeurs du NDVI lors de la seconde et de la troisième mesure, c'est-à-dire lorsque la végétation était la plus importante, celle-ci était très importante avec une variabilité très faible permettant d'observer la saturation de cet indice. Ce constat ne se fait pas pour le MSAVI2.

Puis, après la mesure de la fauche, la valeur de ces indices augmente de nouveau pour la prairie 500 jusqu'à atteindre une valeur proche de l'état avant fauche. De plus, particulièrement pour le NDVI, l'augmentation de cet indice en 2 semaines ne permet quasiment plus de distinguer la

fauche puisque la valeur s'approche du profil observé en début de saison de végétation et en 1 mois, les valeurs de ces indices sont identiques à celles avant fauche.

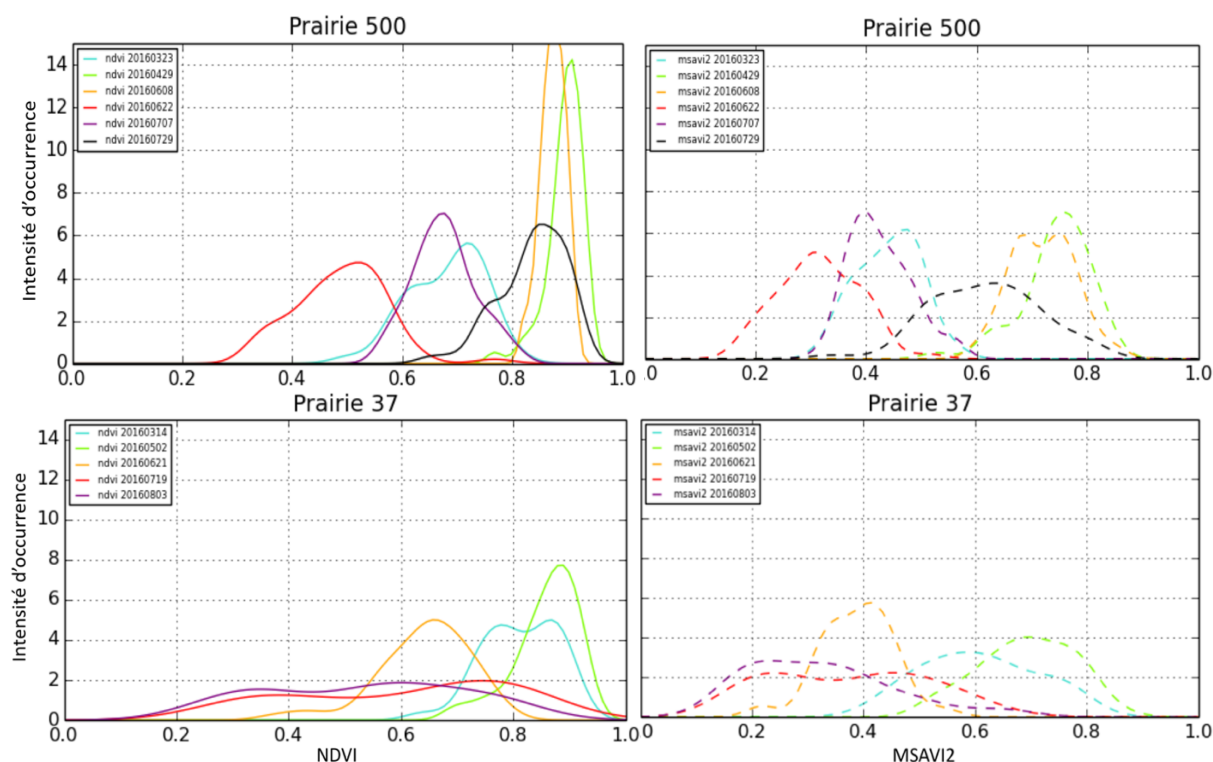


Figure 18 : Estimation de densité par noyau du NDVI (gauche) et du MSAVI2 (droite) pour la prairie 500 et 37.

Pour la prairie 37, ces indices présentent une variabilité importante, avec une occurrence très faible. La gestion différenciée de la prairie s'observe parfaitement avec une légère distinction des deux modes.

Ensuite, selon l'hypothèse H_0 d'avoir des valeurs de NDVI significativement semblables entre deux dates, le test de Wilcoxon permet de rejeter cette hypothèse d'après un seuil d'erreur de 0.05 pour :

- la prairie 500 entre toutes les mesures, sauf les deux dernières ;
- la prairie 37 entre toutes les mesures, sauf les deux dernières, et particulièrement entre la mesure avant fauche et après fauche ($p\text{-value} = 1.1^{-5}$) et entre la mesure après fauche et la première mesure de gestion différenciée ($p\text{-value} = 1.1^{-5}$).

Selon la même hypothèse et le même seuil pour le MSAVI2, le test de Wilcoxon permet de rejeter l'hypothèse pour :

- la prairie 500 entre toutes les mesures, sauf les deux premières correspondant à la croissance de la prairie ;
- la prairie 37 entre la mesure après fauche et la première mesure de gestion différenciée ($p\text{-value} = 2.3^{-5}$).

4.2.3.3. Évolution du point d'inflexion du red-edge à partir du S2REP

Le S2REP permet d'estimer la dynamique de la végétation selon le point d'inflexion du red-edge. Cet indice est sensible à la végétation puisque le red-edge se focalise sur la chlorophylle. Il n'est pas observable dans le cas de sol nu ou de sénescence.

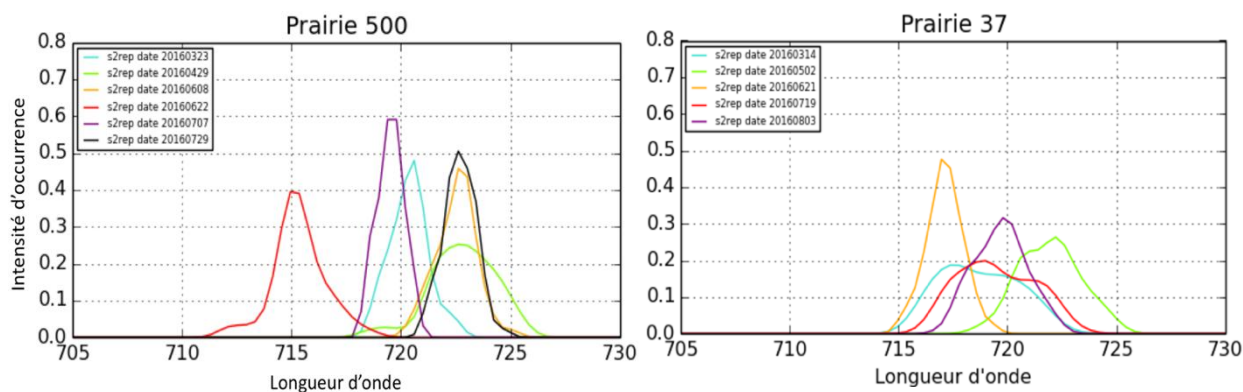


Figure 19 : Estimation de densité par noyau du S2REP pour la prairie 500 (gauche) et 37 (droite).

Pour la prairie 500, la succession des courbes est identique au NDVI et au MSAVI2 (figure 19). La première sortie en mars indique une végétation saine avec un S2REP moyen à 721nm. Le S2REP augmente lorsque la végétation est dynamique et saine. Lors de la mesure de la prairie 500 en phase de sénescence, cet indice a légèrement diminué. La fauche diminue de manière importante le S2REP. La repousse de la végétation pour la prairie 500 augmente les valeurs de cet indice et diminue la variabilité des valeurs. Les valeurs du S2REP après la fauche pour la prairie 37 indiquent une augmentation de la variabilité, mais aucune diminution contrairement au NDVI et au MSAVI2. La dernière date permet de distinguer une légère augmentation de la valeur minimale du S2REP et une légère diminution des valeurs maximales.

Ainsi, le S2REP ne permet pas de distinguer la gestion différenciée de la prairie. L'apport de cet indice est de pouvoir estimer la quantité de chlorophylle et suivre la santé de la végétation de la prairie à partir de sa réflectance dans le red-edge. En ce qui concerne le suivi, cet indice ne prend pas en compte le sol nu et la végétation morte.

Pour certaines prairies, la fauche n'est pas identifiable par une diminution de valeur avec le S2REP. C'est le cas de la prairie 212 dont voici un extrait de la végétation mesurée à chacune des dates (figure 20) et le S2REP de celle-ci (figure 21).



Figure 20 : Extrait de la végétation de la prairie 212 lors des mesures terrain (Donatien Dallery, Mailys Lopes).

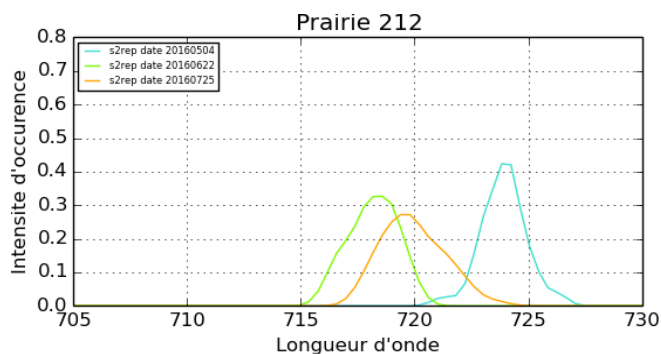


Figure 21 : Estimation de densité par noyau de la prairie 212 selon le S2REP.

La première acquisition de données s'est effectuée sur une végétation dense et dynamique. La seconde majoritairement sur de la sénescence et la troisième correspond à la fauche avec des repousses disséminées sur la prairie.

La première mesure indique un S2REP élevé, compte tenu de la date de la première mesure. Puis, la seconde mesure sur la sénescence indique une diminution

des valeurs de manière à distinguer totalement les deux premières. Cependant, la valeur du S2REP n'est pas suffisamment faible par rapport à celui de la prairie 500 pour supposer une fauche. La mesure de la prairie une fois fauchée correspond à la courbe jaune et indique une augmentation des valeurs du S2REP par rapport à la précédente mesure. Cette augmentation correspond à la repousse de la végétation, laissant supposer une fauche ayant été effectuée plusieurs semaines auparavant.

Le S2REP permet de distinguer une prairie fauchée par l'augmentation des valeurs de cet indice (dans le cas d'une prairie en sénescence avancée) induit par la repousse de la végétation. Si celle-ci n'avait pas été fauchée, le S2REP aurait probablement continué de diminuer compte tenu de la dominance de la végétation sénescente empêchant la repousse de la végétation sous-jacente. Cet effet est également supposé à partir de la prairie 405 d'après l'évolution du S2REP selon les deux phases de sénescence consécutives avant la fauche (annexe V).

Selon l'hypothèse H_0 d'avoir des valeurs de S2REP significativement semblables entre deux dates, le test de Wilcoxon permet de rejeter cette hypothèse d'après un seuil d'erreur de 0.05 pour :

- la prairie 500 entre toutes les mesures, sauf les deux dernières ;
- la prairie 37 lors entre toutes les mesures ;
- la prairie 212 entre la mesure de la sénescence et de la repousse ($p\text{-value} = 0.006$).

3.5. Discussion

3.5.1. Évolution de la réflectance des prairies avant une opération de gestion

La réflectance de la végétation des prairies évolue de la même manière au cours de la saison de végétation. La croissance de la végétation s'effectue de manière progressive jusqu'en mai avant de passer en phase de sénescence.

La réflectance dans les longueurs d'onde du bleu et du rouge diminue lorsque la végétation devient dense et dynamique, contrairement à la réflectance dans le vert augmentant légèrement. Lorsque la végétation devient sénescente, la réflectance dans le bleu et le rouge augmente compte tenu de la diminution de la chlorophylle. La réflectance dans ces bandes est significativement semblable entre les dates de mesure.

La réflectance dans le proche infrarouge est élevée pour une végétation dense, saine et dynamique. La végétation dans cet état contient beaucoup d'eau dans le parenchyme lacuneux, expliquant cette réflectance. Cependant, l'eau contenue dans la végétation absorbe le rayonnement électromagnétique dans les longueurs d'onde entre 910-1070nm. Ainsi, cette absorption est plus importante lorsque la végétation est dans l'état décrit précédemment. La sénescence de la végétation va diminuer la réflectance dans le proche infrarouge et l'augmenter dans les longueurs d'onde entre 910-1070nm. La réflectance dans ces longueurs d'onde est majoritairement différente entre les dates de mesures. Cette différence étant également significative lors de l'opération de fauche, ces longueurs d'onde sont probablement plus sensibles à l'aspect temporel des données par rapport aux bandes du visible. En effet, l'espace de temps entre les mesures avant la fauche est de l'ordre d'un mois.

L'évolution du NDVI, du MSAVI2 et du S2REP est identique à l'évolution des bandes et longueurs d'onde dans le proche infrarouge, sauf dans le cas d'une végétation en sénescence avancée ou à une gestion différenciée pour le S2REP. Dans le cas où aucune opération de gestion n'est effectuée sur les prairies, celles-ci vont probablement poursuivre leur sénescence de manière progressive jusqu'à la fin de la saison de végétation. Cette supposition se base sur les prairies 212, 213 et 405 qui ont été mesurées tardivement avant la fauche. La végétation de

ces prairies était haute et sénescence avec une tendance à se coucher. De ce fait, la végétation sous-jacente ne peut se développer.

Le test de Wilcoxon pour chacune des dates de ces indices indique une différence significative des valeurs à quasiment toutes les dates. Ce constat, comme pour les bandes du proche infrarouge, permet d'identifier la limite temporelle des données causant une différence aussi importante que les opérations de gestion sur la réflectance.

3.5.2. Influence des modes de gestion sur la réflectance des prairies

L'opération de gestion la plus représentée dans notre jeu de données est la fauche. Elle produit un milieu hétérogène composé de sol nu, de végétation morte et sénescence et de végétation en croissance. L'effet de la fauche est semblable à la celui de la sénescence sur la réflectance, mais de manière plus intense. De plus, l'impact de la fauche est instantané sur la réflectance au contraire de la sénescence.

3.5.2.1. Réflectance des prairies fauchées

La réflectance dans les longueurs d'onde du visible augmente lors de la fauche. Celles du rouge sont les plus influencées par cette opération étant donné leur sensibilité au sol nu et à la végétation morte et sénescence. L'intensité de la réflectance dans ces longueurs d'onde dépend également des caractéristiques du sol (rugosité, humidité et couleur). La fauche cause une hétérogénéité importante de la réflectance des bandes du visible. La bande 5 évolue comme la bande 4, mais avec une réflectance plus élevée. L'impact de la fauche sur la réflectance s'observe aussitôt celle-ci effectuée. La différence de réflectance entre la date avant et après la fauche est significativement différente, mais aussi entre la fauche et la première repousse. De cette manière, la différence conséquente de réflectance dans la bande du rouge permet de distinguer une opération de fauche.

La réflectance dans le red-edge est faible compte tenu de la réflectance élevée dans le rouge et faible dans le proche infrarouge. Cet effet est dû à la diminution importante de végétation verte. Le red-edge peut être totalement absent dans le cas où une prairie fauchée ne présente plus de végétation verte. C'est surtout le cas des prairies artificielles, celles-ci ont une végétation moins couvrante faisant que le sol est beaucoup plus visible une fois fauchée (prairies 100, 406).

L'impact de la fauche sur la réflectance dans le proche infrarouge permet de distinguer une diminution de la réflectance compte tenu de la diminution de la végétation. Les valeurs sont particulièrement faibles dans le cas d'une fauche. Cependant, la réflectance est significativement différente entre chacune des dates de mesures, en plus de la fauche et de la repousse. De ce fait, le jeu de données actuel ne permet pas de distinguer une opération de gestion d'après l'intensité d'évolution des valeurs. En effet, cette évolution est conséquente lors de la fauche, mais aussi lors de la croissance et de la repousse.

Les indices employés permettent de suivre l'évolution de la végétation. La fauche a pour effet de diminuer les valeurs de ces indices de manière importante et brusque. Cependant, le NDVI met en évidence des valeurs trop importantes compte tenu de la quantité de sol nu et d'herbe morte après la fauche, faussant l'interprétation des valeurs. Le MSAVI2 permet de limiter cette influence pour indiquer des valeurs plus en adéquation avec l'état des prairies. De plus, le MSAVI2 permet de distinguer l'hétérogénéité des prairies en début de saison de végétation. Le S2REP permet de suivre l'évolution de la réflectance et d'identifier une opération de fauche. Cependant, dans le cas de la fauche d'une prairie en sénescence avancée et si la mesure de la prairie après fauche s'effectue tardivement, le S2REP n'indiquera pas une diminution des valeurs. La présence de sol nu ne sera pas identifiée puisque cet indice est influencé uniquement par la végétation. Ce sera donc le phénomène de repousse induit par la fauche qui sera capté.

Finalement, il est primordial d'utiliser des données à haute résolution temporelle pour distinguer les opérations de fauche compte tenu de la vitesse de croissance de la végétation avant et après fauche.

3.5.2.2. Réflectance des prairies après avoir été fauchées

Une prairie non fauchée rentre en phase de sénescence à partir de juin. Cet état devient de plus en plus visible sur la réflectance de la végétation au cours de la saison. Une prairie dans cet état empêche la végétation sous-jacente de se développer. La fauche enraye ce processus.

Elle favorise la repousse en supprimant la dominance de la végétation sénescente. De même, le stress induit par la fauche relance le développement de la végétation. Ainsi, la fauche influe sur la réflectance des prairies lors de sa réalisation, mais aussi après.

Ainsi, la repousse s'observe par une diminution de la réflectance dans les bandes du visible, une augmentation dans les bandes du proche infrarouge. Les indices de végétations permettent de capter cette évolution par une augmentation de leurs valeurs.

La repousse de la végétation se fait de manière progressive, intense et rapide. En deux semaines, et selon les caractéristiques des prairies, la réflectance de la végétation peut laisser penser à de la sénescence. Cette supposition peut être infirmée par l'utilisation du S2REP qui se focalise uniquement sur la chlorophylle. De cette manière, un S2REP élevé par rapport à un NDVI ou un MSAVI2 faible permet de distinguer la sénescence de la repousse. De plus, une diminution de cet indice suivie d'une hausse suppose une prairie ayant été fauchée.

En l'espace d'un mois, la réflectance des prairies peut s'assimiler à celle d'une prairie n'ayant pas été fauchée. La majorité des prairies mesurées ont été fauchées en juin. Lors de la mesure de celles-ci après la fauche, certaines présentent une repousse très dynamique. Les critères expliquant probablement cette distinction, mais n'ayant pas été étudiés sont la topographie de la prairie et sa localisation dans les coteaux. Les prairies présentant une repousse dynamique ont une pente nulle, se situent près d'un cours d'eau et en fond de vallée.

La repousse de la végétation peut être également limitée par le pâturage.

3.5.2.3. Réflectance des prairies fauchées puis pâturées

L'impact du pâturage sur la réflectance dépend de plusieurs critères. Le premier est la pression du pâturage. Dans le cas de la prairie 36, celui-ci n'a pas été intense faisant que la réflectance de la prairie a légèrement diminué dans le cas du MSAVI2 et du NDVI. Pour la prairie 406, le pâturage indique une diminution plus importante des indices de végétation. La partie pâturée de la prairie 37 indique une réflectance presque identique à la prairie 406. La différence provient des espèces présentes, c'est-à-dire du ray-grass ayant une forte appétence pour la prairie 406 et une multitude d'espèces pour la 37. La prairie 406 démontre une absence importante de végétation d'après sa réflectance. En plus du pâturage, l'artificialité de la prairie limite le recouvrement du sol par la végétation. La réflectance de la partie pâturée de la prairie 37 indique une forte quantité de sols nus, mais aussi de la végétation correspondant à des refus.

Ainsi, le pâturage et la fauche ont le même effet sur la réflectance des prairies, mais de manière plus intense pour le pâturage compte tenu de la différence de végétation. La raison est la hauteur de fauche ayant pour effet de laisser de la végétation en place au contraire du pâturage (à part quelques refus). Les refus sont identifiables à partir de la réflectance, plus particulièrement par le S2REP puisque cet indice prend en compte uniquement la végétation. Ces deux modes de gestion se distinguent selon l'occurrence de réflectance des refus et de la végétation en croissance.

Le pâturage et la fauche sont distinguables à partir de la quantité de valeurs de réflectance correspondant à de la végétation et à du sol nu. Ces opérations se distinguent également d'après l'évolution de la réflectance après la fauche. Si celle-ci présente une augmentation de la végétation, la prairie n'est pas pâturée. Si celle-ci présente une diminution de la végétation et une augmentation du sol nu, le pâturage est probable après la fauche. De plus, il est possible que les prairies présentent une gestion différenciée. Dans le cas d'une prairie présentant du pâturage et une végétation en croissance, la variabilité des valeurs est importante avec des réflectances plus faibles par rapport à la fauche, mais également plus élevée.

3.6. Conclusion

L'objectif de cette partie est de déterminer l'impact des modes de gestion sur le signal spectral au cours d'une saison de végétation et d'évaluer la possibilité de détecter ces opérations d'après la réflectance.

Les résultats obtenus présentent comme limite principale la résolution temporelle due aux conditions météorologiques. Certaines opérations de gestion ont été mesurées tardivement, limitant leur impact sur la réflectance des prairies. Également, ces conditions ont contraint les exploitants à effectuer le fauchage quasiment tous en même temps. De ce fait, le phénomène de fauche précoce et tardive n'a pas pu être correctement évalué. De plus, la mesure des prairies n'a pas pu être réalisée aux mêmes heures de la journée, l'angle d'incidence du soleil ayant un effet sur la réflectance.

La réflectance des prairies est influencée par quatre éléments : le sol nu, la végétation morte, sénescence et verte. Les longueurs d'onde permettant de différencier ces éléments sont principalement dans le rouge, le red-edge et le proche infrarouge.

Les prairies ont une réflectance homogène au maximum de leur croissance. Une fois ce maximum atteint, la végétation passe en phase de sénescence et semble diminuer de manière constante. Les données acquises ne permettent pas d'étudier ce phénomène sur l'ensemble de la saison de végétation.

Une prairie fauchée présente du sol nu, de la végétation sénescence, morte et saine. La réflectance des prairies fauchée est hétérogène. Cette opération instaure un cycle de repousse, plus ou moins dynamique selon les conditions de station. La repousse peut être nulle dans le cas d'un pâturage intensif et faible dans le cas d'un pâturage extensif.

La fauche est identifiable à partir des bandes du visible et du proche infrarouge de Sentinel-2 ayant une résolution spatiale de dix mètres. Ces bandes permettent de calculer des indices de végétation dont l'évolution permet d'identifier la fauche et l'état des prairies. La résolution temporelle est un critère primordial pour identifier l'impact de la fauche sur la réflectance des prairies. Si la résolution temporelle est supérieure à 1 mois, la fauche peut ne pas être distinguable à partir de la réflectance. De plus, la fauche peut être indiscernable avant ce délai si les conditions de station sont favorables à la croissance de la végétation. Dans le cas d'un pas de temps trop faible, la différence entre deux mesures sera constamment significative, empêchant de distinguer un phénomène d'origine anthropique d'un phénomène naturel.

Les prairies pâturées sont au nombre de 3 dans notre jeu de données. Ces prairies étaient pour deux d'entre elles pâturées en partie, limitant le nombre de mesures pour étudier l'impact sur la réflectance de ce mode de gestion. La troisième a été pâturée sur une courte période ayant pour effet de produire une pression très faible. Cependant, les résultats obtenus sont convaincants en termes d'informations vis-à-vis du pâturage. Le pâturage apporte une pression plus intense sur les prairies, lorsqu'il est intensif, par rapport à la fauche. La réflectance de ces prairies est dominée par le sol nu. Cependant, des refus sont observables sur ces parcelles et

produisent une hétérogénéité de réflectance comme pour la fauche. Cependant, la réflectance assimilée à la végétation présente un effectif moins important pour les prairies pâturées par rapport aux prairies fauchées.

Ainsi, la mission Sentinel-2 présente les caractéristiques nécessaires pour étudier la réflectance des prairies et déterminer les modes de gestion. Cependant, les données Sentinel-2 n'ont pas été exploitées principalement à cause du recouvrement nuageux constant durant la majeure partie de cette étude. Il n'a donc pas été possible de vérifier les résultats obtenus avec le spectroradiomètre.

Pour conclure, les opérations de gestion, la fauche et le pâturage, ont un impact sur le spectre électromagnétique de 350 à 1070nm. Ces opérations diminuent la quantité de végétation et augmentent la surface de sol nu, influençant la réflectance de ces éléments. La haute résolution temporelle permet d'identifier ces opérations.

En perspective, les images Sentinel-2 n'ont pas été utilisées, compte tenu des conditions météorologiques lors des opérations de gestion. Cependant, la période estivale ayant été clémente, la repousse de la végétation est probablement identifiable. Ensuite, les conditions de station semblent avoir un impact sur la réflectance des prairies, il serait intéressant de vérifier ce phénomène. Puis, l'objectif de cette étude étant de distinguer l'impact des modes de gestion sur la réflectance des prairies et la possibilité de détecter ceux-ci, je n'ai pas étudié suffisamment les données botaniques. Cependant, les premiers résultats semblent indiquer que la réflectance des prairies ne se distingue pas selon ces données botaniques. Par contre, les mesures hyperspectrales ayant un fort recouvrement floral présentent une hausse de réflectance dans les longueurs d'onde du visible de manière distincte à la végétation et au sol nu. De ce fait, est-ce que la résolution spatiale de Sentinel-2 peut permettre de distinguer le recouvrement floral et si oui, à partir de quel seuil de recouvrement ?

La dimension hypertemporelle n'a pas pu être utilisée dans le cadre de ce stage, de même pour les images Sentinel-2. Cette dimension devrait permettre de distinguer plus efficacement l'évolution de la réflectance des prairies selon les modes de gestion. Elle devrait également permettre de différencier plus efficacement la fauche du pâturage et de la croissance de la végétation compte tenu de la différence de rapidité d'exécution de ces phénomènes. Les mesures hyperspectrales et la simulation des bandes Sentinel-2 ont fourni des résultats pertinents quant à la détection des opérations de gestion selon la réflectance des prairies, mais qui doivent être vérifiées à partir des images Sentinel-2.

Bilan personnel

Ce stage m'a été particulièrement formateur dans différents domaines.

Le premier correspond à la programmation sous le langage Python. Au cours du master IMAGE, j'ai eu des cours sur ce langage permettant d'avoir les bases. Mon stage a exclusivement fait appel à ce langage pour traiter les données, permettre leur automatisation et surtout la réutilisation des outils développés. Cela m'a également permis de m'extraire des contraintes des logiciels que j'ai pu utiliser au cours du Master IMAGE.

Ensuite, l'utilisation de la programmation est particulièrement intéressante compte tenu de la base de données produite vers laquelle les scripts vont chercher les données. De cette manière, il est possible d'ajouter de nouvelles données et de générer des résultats automatiquement. L'apport d'une base de données, mais aussi la possibilité d'intégrer n'importe quel type d'informations dedans et de connecter des scripts à celle-ci m'incite à réutiliser cette méthode de travail à l'avenir.

Également, ce stage m'a permis de travailler d'une manière nouvelle, c'est-à-dire de collecter et traiter des données au cours du temps. Jusqu'à maintenant, mes travaux s'étaient portés sur des jeux donnés complets. De cette manière, les résultats étaient directement accessibles. Dans le cadre de ce stage et de l'acquisition continue de données, les analyses et résultats variaient constamment. De plus, ce constat m'a permis d'identifier l'apport conséquent de la programmation puisque la production du script pour effectuer les traitements n'était pas impactée par l'évolution du jeu de données.

J'ai également beaucoup appris sur les prairies. Étant de formation forestière, je connaissais très peu les particularités de ces milieux.

La collecte de données terrain m'a permis de me rendre compte des contraintes que l'on peut rencontrer en télédétection. Je connaissais déjà celles-ci, mais les vivre permet d'avoir un autre regard et surtout de se rendre compte à quel point elles peuvent être contraignantes.

Finalement, ce stage dans le milieu de la recherche m'a permis d'observer la réflexion et les méthodes de travail particulières à ce domaine. Il m'a également permis de côtoyer des chercheurs travaillant sur différentes thématiques et ayant des points de vue différents. Cela m'a également permis de me renseigner sur le monde de la recherche. Avant d'effectuer ce stage, j'avais pour ambition de réaliser une thèse, mais au fil des mois, j'ai finalement mis cette idée de côté. Cependant, la réflexion propre à la recherche m'attire particulièrement, mais je souhaite avant toute chose acquérir de l'expérience technique et professionnelle avant d'envisager ce domaine.

Bibliographie

- Ali A., De Bie C.A.J.M., Skidmore A.K., Scarrott R.G., Hamad A., Venus V. and Lymberakis P. (2013). Mapping land cover gradients through analysis of hyper-temporal NDVI imagery. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. Vol.23, pp.301-312.
- Bargiel D. (2013). Capabilities of high resolution satellite radar for the detection of semi-natural habitat structures and grasslands in agricultural landscapes. *Ecological informatics*. Vol.13, pp.9-16.
- Barrett B., Nitze I., Green S., *et al.* (2014). Assessment of multi-temporal, multi sensor radar and ancillary spatial data for grasslands monitoring in Ireland using machine learning approaches. *Remote Sensing for Environment*. Vol.152, pp.109-124.
- Bergman K.-O., Ask L., Askling J., *et al.* (2008). Importance of boreal grasslands in Sweden for butterfly diversity and effects of local and landscape habitat factors. *Biodiversity and Conservation*, 17, pp.139–53.
- Bock M., Xofis P., Mitchley J., Rossner G. and Wissen M. (2005). Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. *Journal for Nature Conservation*. Vol.13, pp.75-89.
- Braun-Blanquet (1964). *Pflanzensoziologie : Grundzüge der Vegetationskunde*. 3te aufl. Springer-Verlag, Wein. pp.865.
- Broge N.H. and Leblanc E. (2000). Comparing prediction power and stability of broadland and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote sensing environment*. Vol.76, pp.156-172.
- Carvalho S., Schlerf M., Van Der Putten W.H. and Skidmore A.K. (2013). Hyperspectral reflectance of leaves and flowers of an outbreak species discriminates season and successional stage of vegetation. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. Vol.24, pp.32-41.
- Cherril A.J., Lane A., Fuller R.M. (1994). The use of classified Landsat-5 Thematic Mapper imagery in the characterization of landscape composition : a case study in Northern England. *Journal of Environmental Management*. Vol.40, no.4, pp. 357-377.
- Choisin J.-P. (2010). Understanding regional dynamics of mixed crop-livestock agricultural systems to support rural development in south-western France uplands. *Agriculture*. Vol.19, no.2, pp.97-103.
- Courault D., Hadria R., Ruget F., Oliso A., Duchemin B., Hagolle O. and Dedieu G. (2010). Combined use of FORMOSAT-2 images with a crop model for biomass and water monitoring of permanent grassland in Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*. Vol.14, pp.1731-1744.
- Dorigo W.A., Zurita-Milla R., de Wit A.J.W., Brazile J., Singh R. and Schaepman M.E. (2007). A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. Vol.9, pp.165-193.
- Dusseux P. (2014). Exploitation de series temporelles d'images satellites à haute resolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole. Thèse de géographie. Université Rennes 2. 170p.
- Feret J.-B., Corbane C. and Alleaume S. (2015). Detecting the phenology and discriminating Mediterranean natural habitats with multispectral sensors – An analysis based on

multiseasonal field spectra. *Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. Vol.8, no.5.

Frampton W.J., Dash J., Watmough Gary R. and Milton E.J. (2013). Evaluating the Capabilities of Sentinel-2 for Quantitative Estimation of Biophysical Variables in Vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, pp. 83–92.

Franke J., Keuck V. and Siegert F. (2012). Assessment of grassland use intensity by remote sensing to support conservation schemes. *Journal for Nature Conservation*. Vol.20, no.3, pp. 125–134.

Friedl Mark A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A. and Huang X. (2010). MODIS Collection 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets. *Remote Sensing of Environment*. Vol.114, no.1, pp. 168–182.

Förster M., Frick A., Walentowski H. and Kleinschmit B. (2008). Approaches to utilising Quickbird-data for the monitoring of NATURA 2000 habitats. *Community Ecology*. Vol.9, pp.155-168.

Gao B.-C. (1996). NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Proceeding of SPIE*. Vol.58, no.3, pp.257-266.

Girard M.C., Girard C.M. (1999). *Taitement des données de télédétection*. Dunod editions Paris. 529 pages.

Haboudane D., Miller J.R., Pattey E., Zarco-Tajada P.J. and Strachan I.B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies : modelling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing environment*. Vol.90, no.3, pp.337-352.

Hajj M., Baghdadi N., Belaud G., Zribi M., Cheviron B., Courault D., Hagolle O. and Charron F. (2014). Irrigated grassland monitoring using a time series of TerraSAR-X and COSMO-SkyMed X-band SAR data. *Remote Sensing*. Vol.6, no.6.

Hatunen S., Harma P., Kallio M. and Torma M. (2008). Classification of natural areas in Northern Finland using remote sensing images and ancillary data. *Proceedings of SPIE*. Vol.7110.

Hill M.J. (2013). Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna : an analysis with simulated SENTINEL 2 data for a north American transect. *Remote Sensing of Environment*. Vol.137, pp.94-111.

Huete A.R., Jackson R.D. and Post D. F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*. Vol.17, no.1, pp. 37–53.

Huete A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. Vol.25, pp. 295-309.

Huete A. R., Liu H.Q., Batchily K. and Van Leeuwen W. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 59, no.3, pp. 440–451.

Huyghe C., De Vlieghe A. and Golinski P. (2009). European grasslands overview : temperate region.

Lang Marc. Localisation des types de prairies et estimation de la diversité taxonomique à partir de séries temporelles d'images satellites. INP ENSAT : UMR DYNAFOR, 2015. p.12.

- Latham J., Cumani R., Rosati I., and Bloise M. (2014). Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE): database Beta-Release Version 1.0.
- Lecerf R. (2008). Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne). Thèse de géographie, Université Rennes 2, 326p.
- Maskova Z., Zemek F., Kvet J. (2008). Normalized difference vegetation index (NDVI) in the management of mountain meadows. *Boreal Environment Research*. Vol.13, pp.417-432.
- Möckel T., Dalmayne J., Prentice H.C., Eklundh L., Purschke O., Schmidtlein S. and Hall K. (2014). Classification of grassland successional stages using airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing*. Vol.6, pp.7732-7761.
- Nitze I., Barrett B., Cawkwell F. (2015). Temporal optimisation of image acquisition for land cover classification with Random Forest and MODIS time-series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol.34, pp. 136–46.
- Plantureux S., Pottier E., and Carrère P. (2012). La prairie permanente : nouveaux enjeux, nouvelles définitions ? *Fourrage*. Vol.211, pp.181-193.
- Pokluda P., Hauck D., Cizek L. (2012). Importance of marginal habitats for grassland diversity: fallows and overgrown tall-grass steppe as key habitats of endangered ground-beetle *Carabus hungaricus*. *Insect Conservation and Diversity*. Vol.5, pp. 27–36.
- Psomas A., Kneubühler M., Huber S., Itten K. and Zimmermann N.E. (2011). Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats. *International journal of remote sensing*. pp.1-25.
- Punjabi G.A., Chellam R., Vanak A.T. (2013). Importance of native grassland habitat for den-site selection of indian foxes in a fragmented landscape. *PLoS ONE*.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H. and Sorooshian S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing environment*. Vol.48, pp.119-126.
- Schmidtlein S. and Sassin J. (2004). Mapping of continuous floristic gradient in grasslands using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*. Vol.92, pp.126-138.
- Silverman B.W (1986). Density estimation. *London : Chapman and hall*.
- Soussana J-F., Lüscher A. (2007). Temperate grasslands and global atmospheric change : a review. *The journal of the British Grassland Society*. Vol.62, pp. 127-134.
- Turner C.L., Seastedt T.R., Dyer M.I., Kittel T.G.F. and Schimel D.S. (1992). Effects of management and topography on the radiometric response of a tallgrass prairie. *Journal of geophysical research*. Vol.97, no17, pp. 18855-18866.
- Van Swaay C.A.M. (2002). The importance of calcareous grasslands for butterflies in Europe. *Biological Conservation*. Vol. 104, pp. 315–318.
- Vannier C. (2012). Analyse spatiale de structures paysagères en contexte agricole bocager. *Cybergeographie : European Journal of Geography [en ligne]*. Document 607, mis en ligne le 17 mai 2012, consulté le 07 août 2016.
- Verger A., Baret F. and Weiss M. (2008). Performances of neural networks for deriving LAI estimates from existing CYCLOPES and MODIS products. *Remote sensing environment*. Vol.112, pp.2789-2803.

Vertès F., Hatch D.J., Velthof G.L., Taube F., Laurent F., Loiseau P. and Recous S. (2007). Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. *Grassland Science in Europe*. Pp. 227–246.

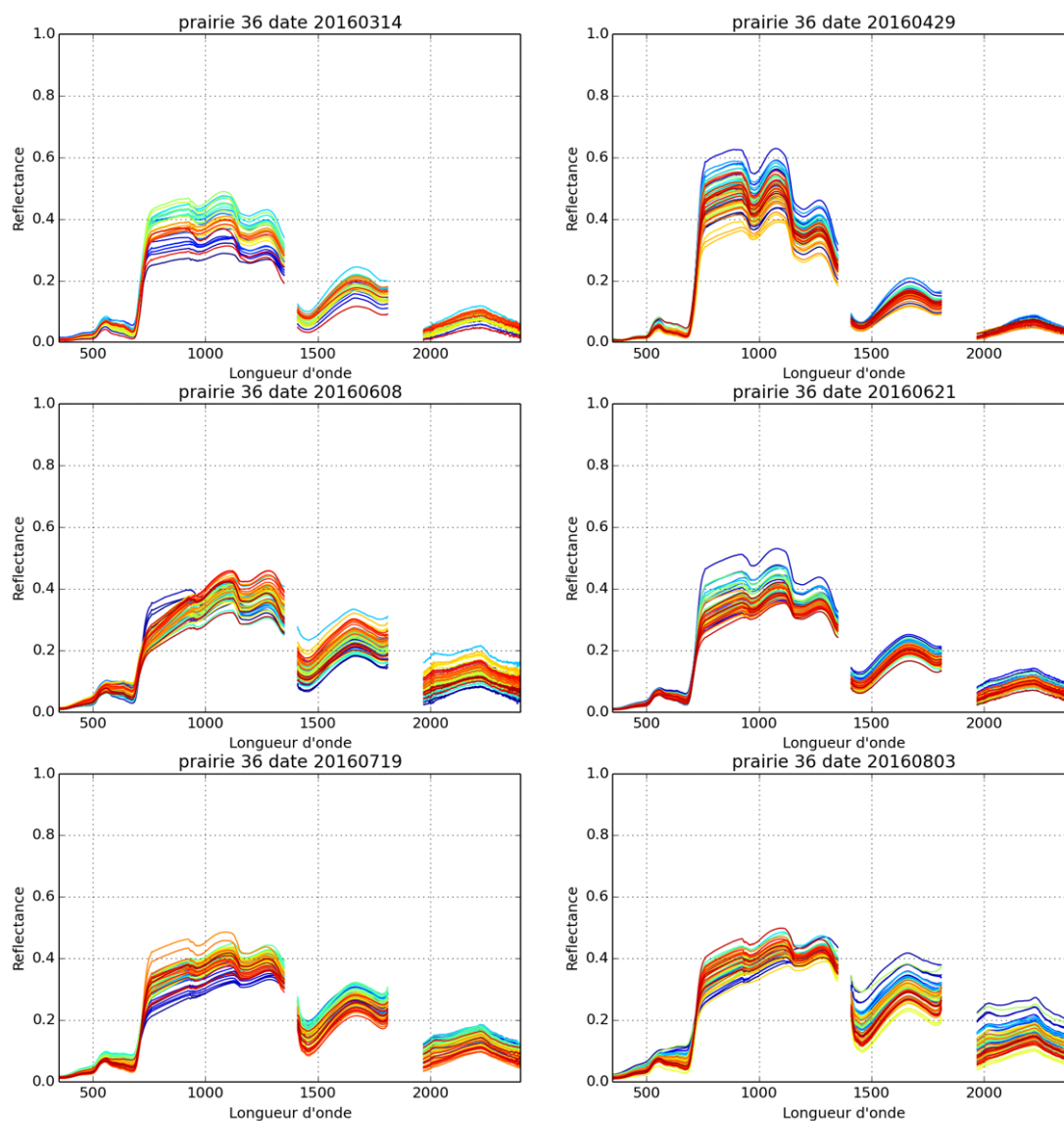
Zhang C. and Guo X. (2008). Monitoring northern mixed prairie health using broadband satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.29, no. 8, pp. 2257–2271.

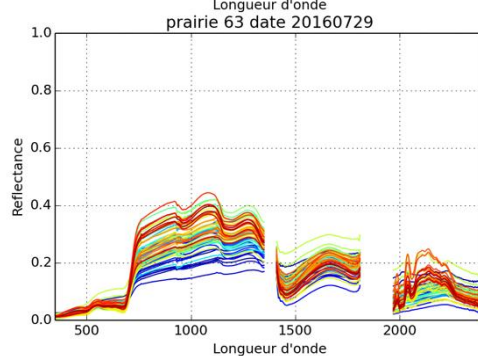
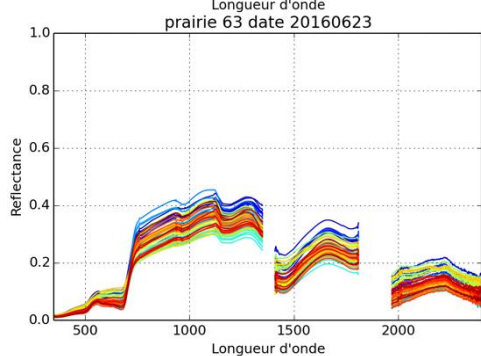
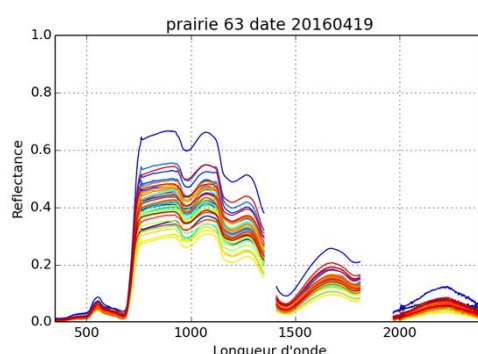
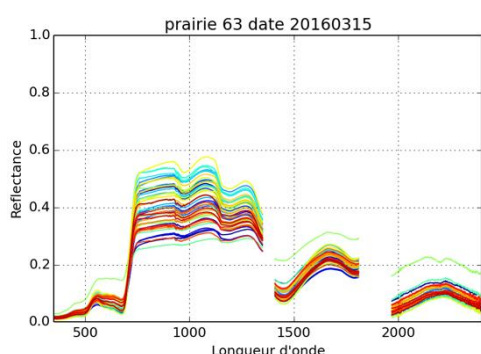
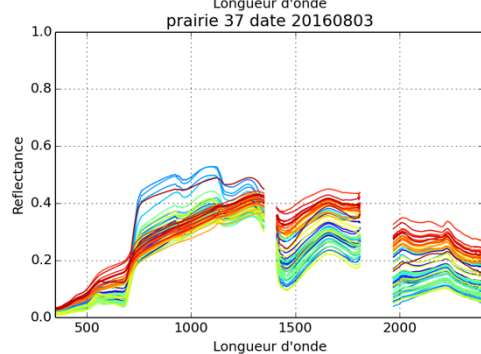
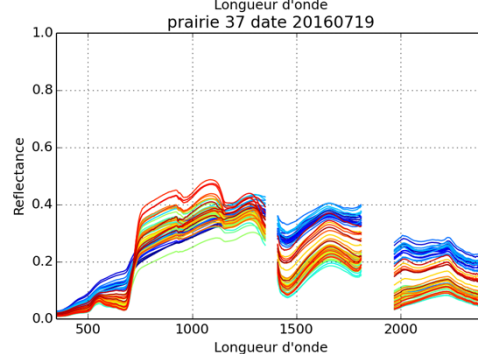
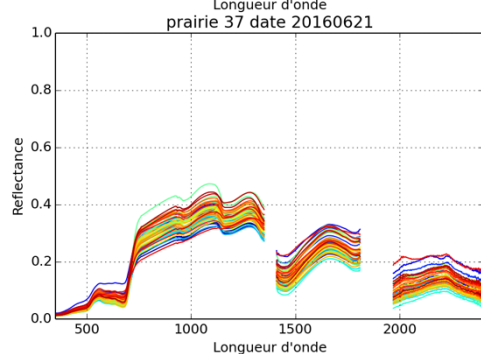
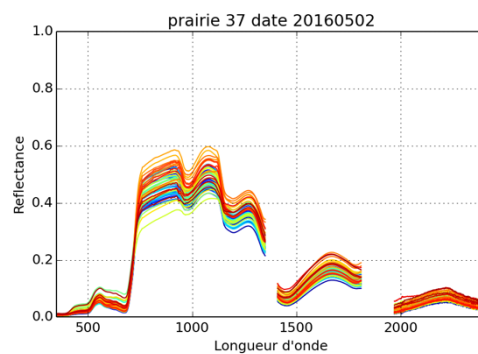
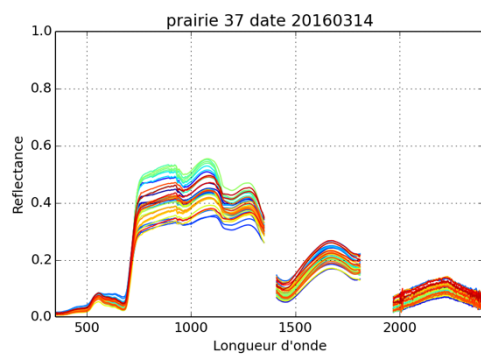
ANNEXES

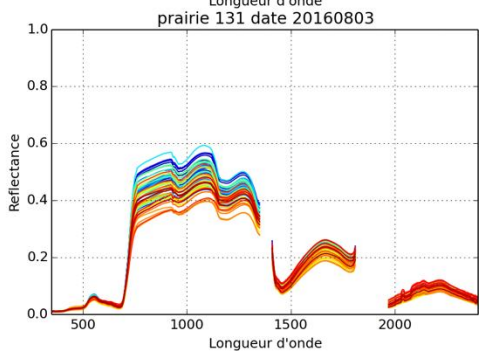
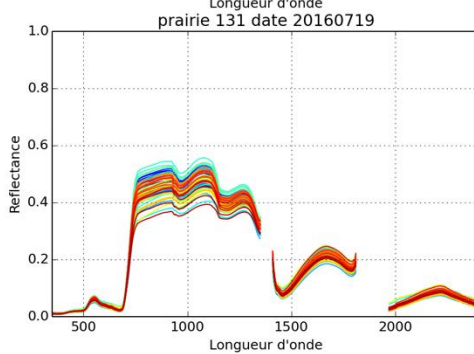
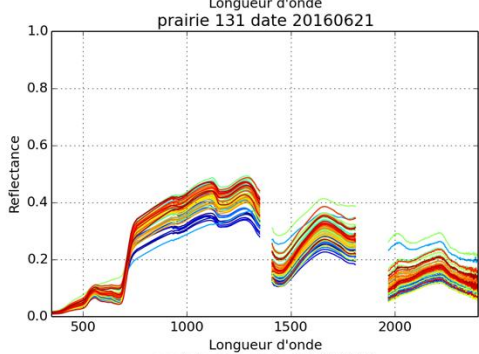
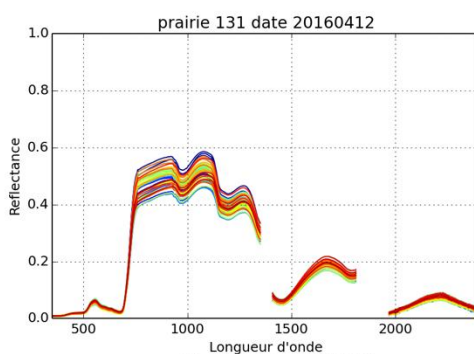
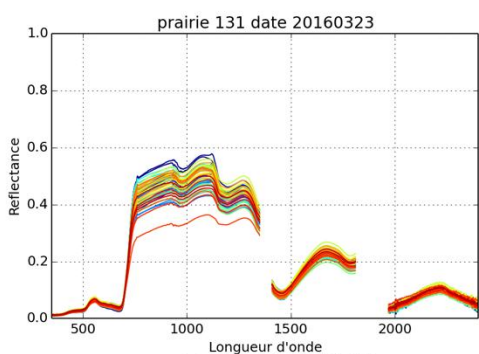
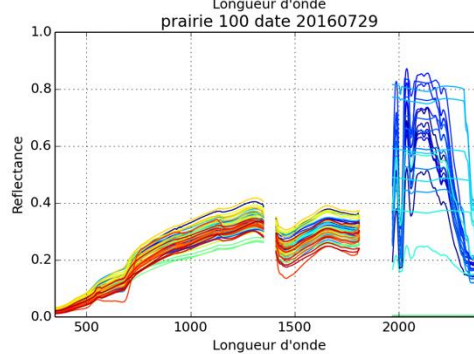
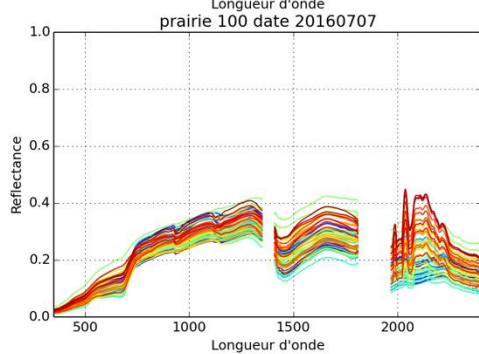
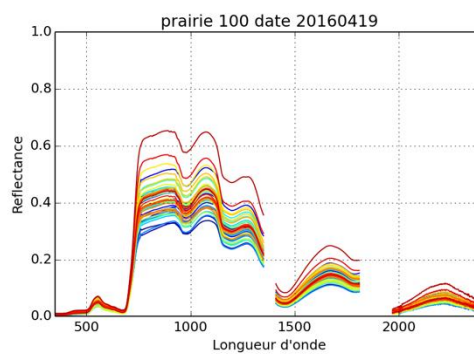
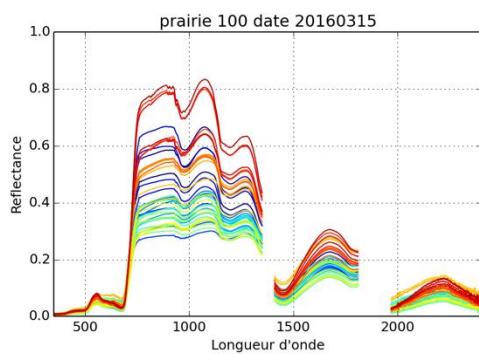
Annexe I : Codes des cultures du Registre Parcellaire Graphique

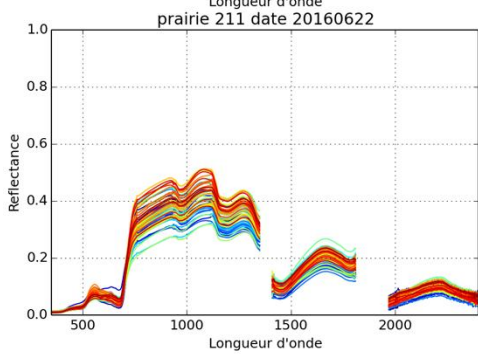
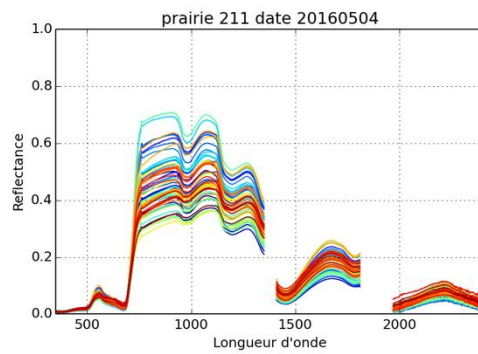
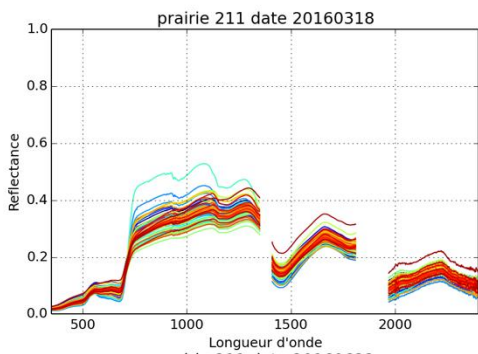
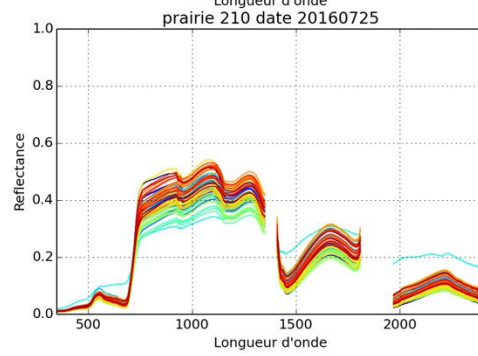
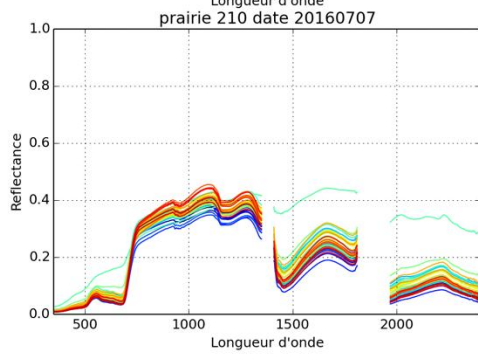
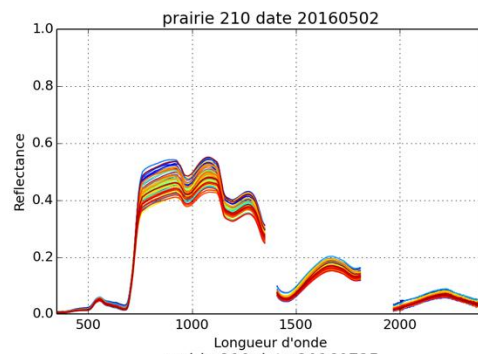
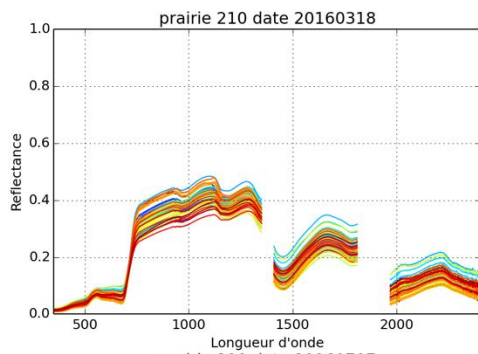
1	Blé tendre
2	Maïs grain et ensilage
3	Orge
4	Autres céréales
5	Colza
6	Tournesol
7	Autres oléagineux
8	Protéagineux
9	Plantes à fibres
10	Semences
11	Gel sans production
12	Gel industriel
13	Autres gel
14	Riz
15	Légumineuses à grains
16	Fourrage
17	Estives, landes
18	Prairie permanente
19	Prairie temporaire
20	Vergers
21	Vignes
22	Fruits à coque
23	Oliviers
24	Autres cultures industrielles
25	Légumes-fleurs
26	Canne à sucre
27	Arboriculture
28	Divers

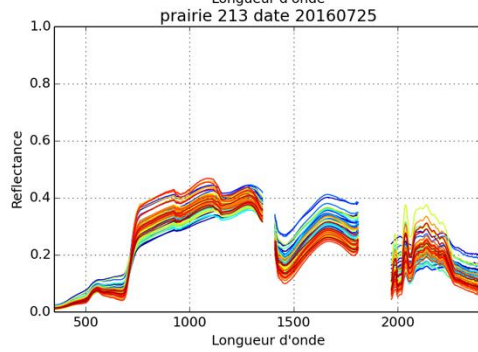
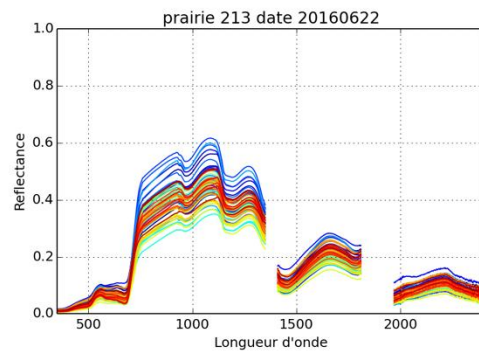
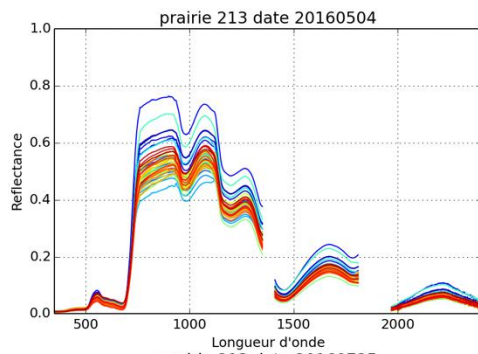
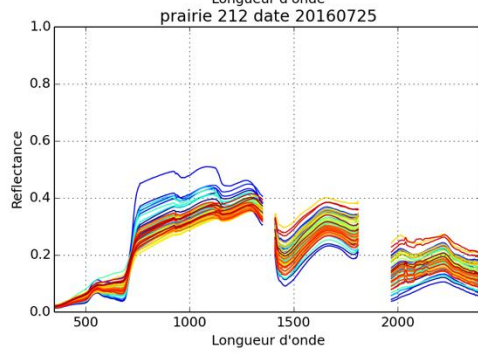
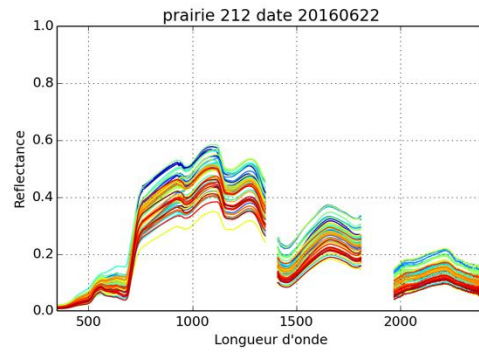
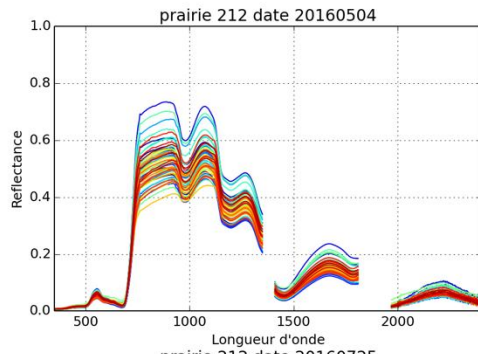
Annexe II : Graphiques représentant la réflectances hyperspectrales de chacune des prairies à chacune des dates d'acquisition

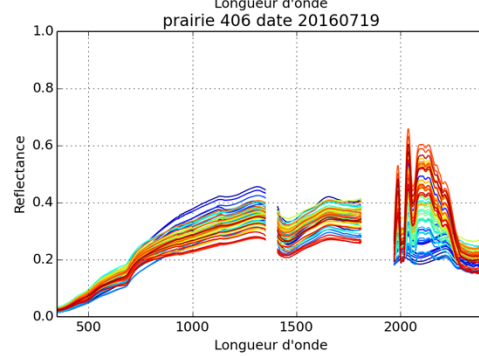
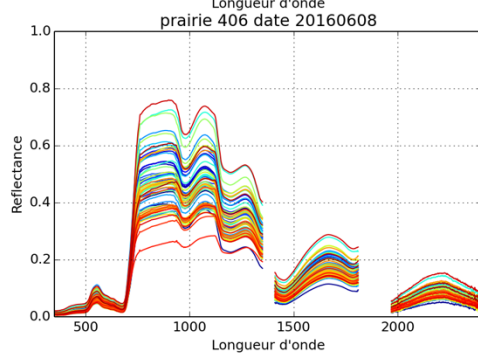
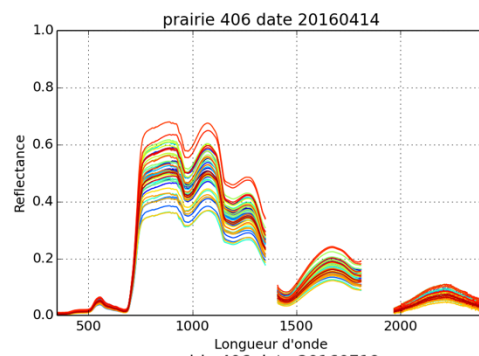
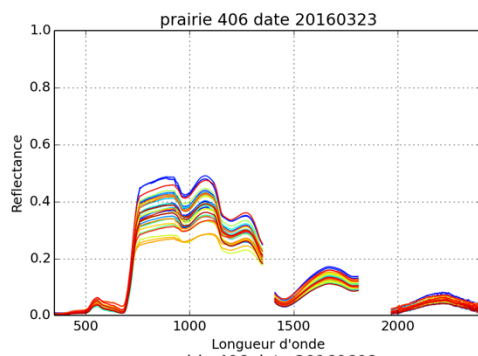
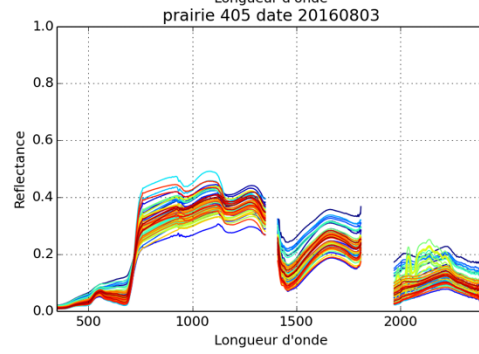
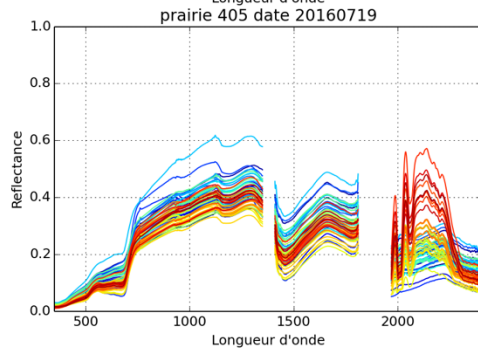
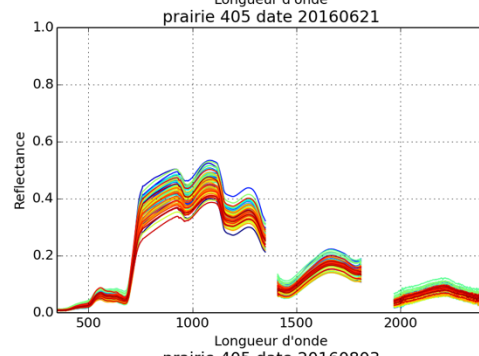
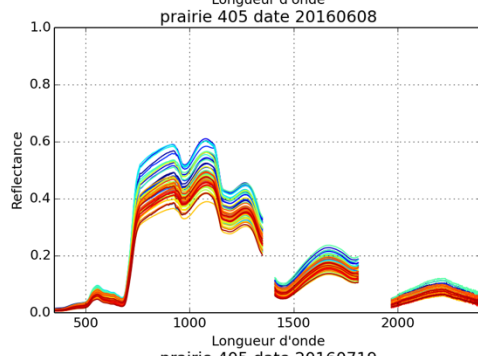
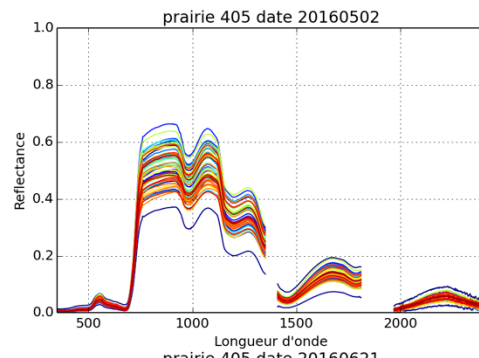
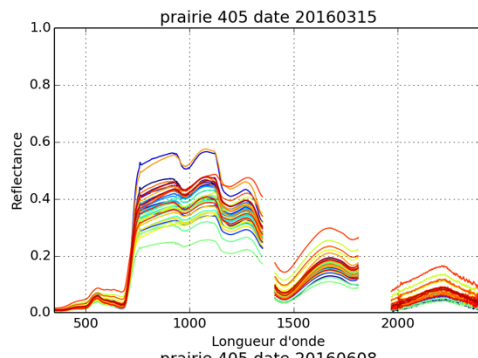


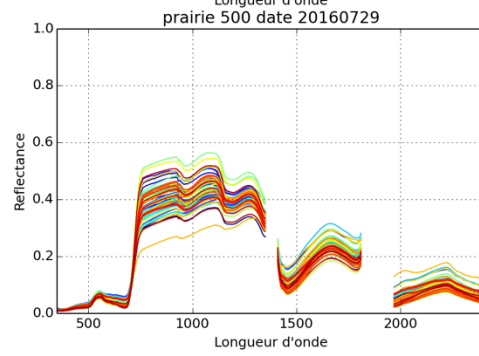
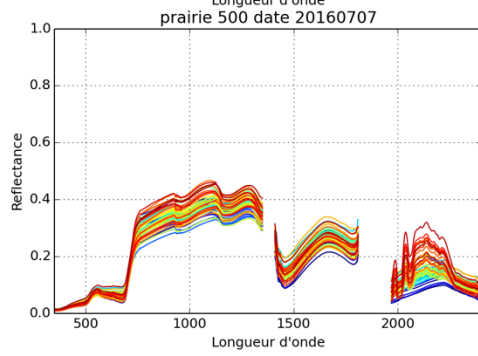
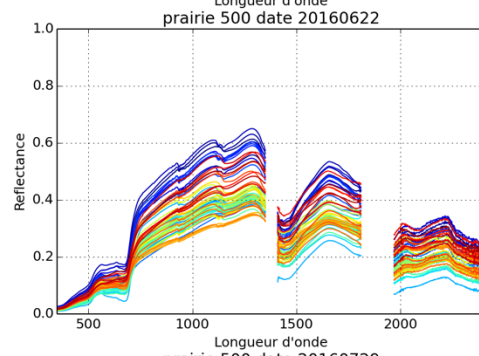
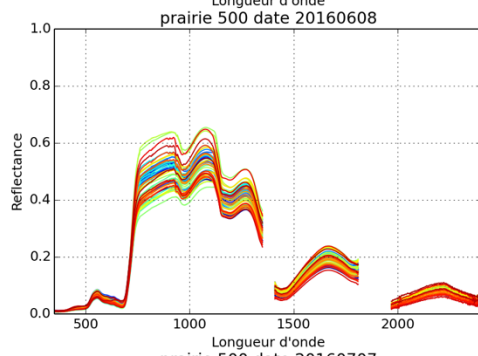
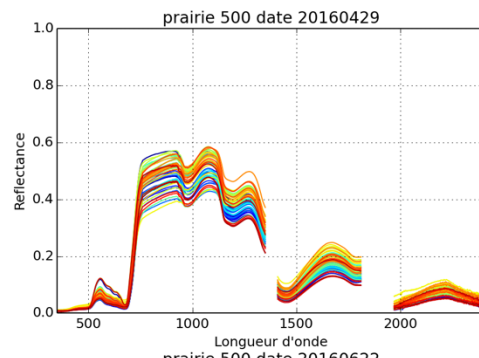
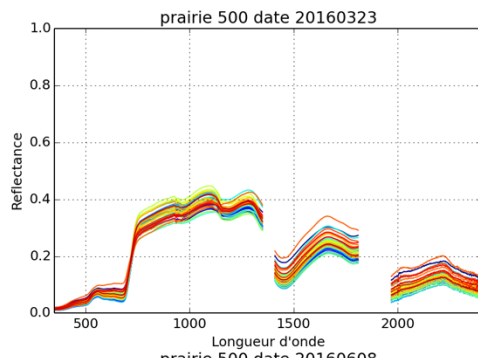








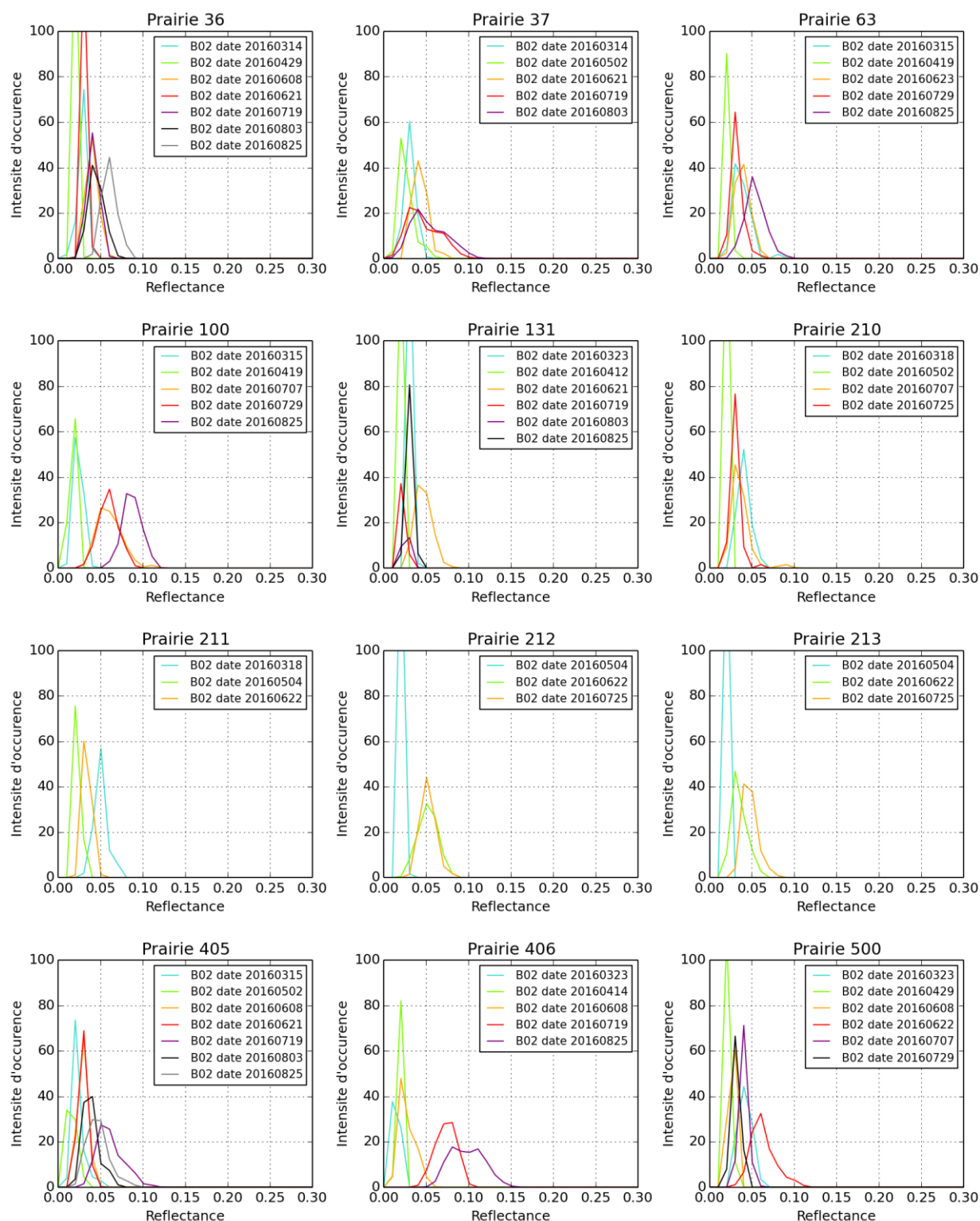


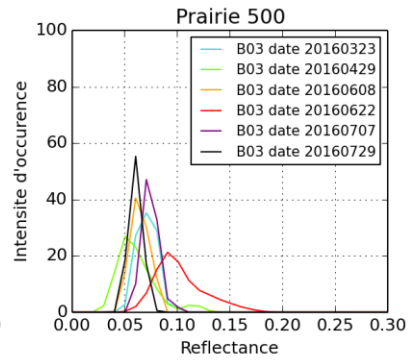
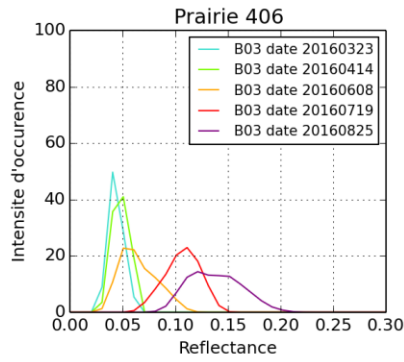
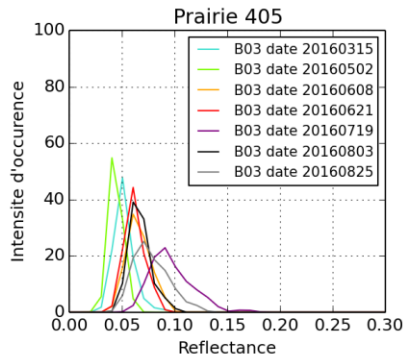
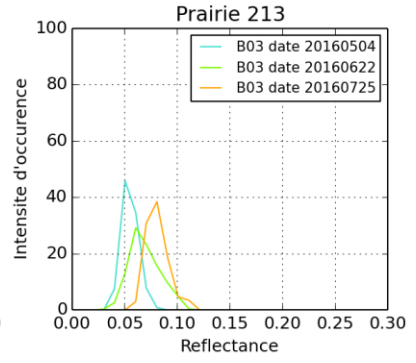
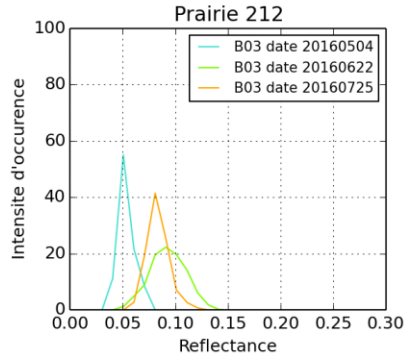
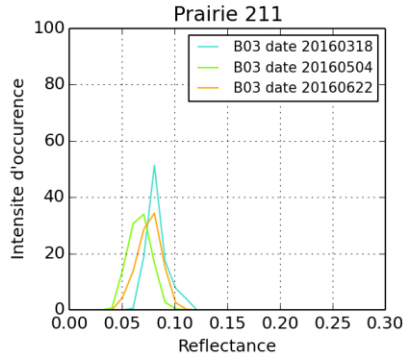
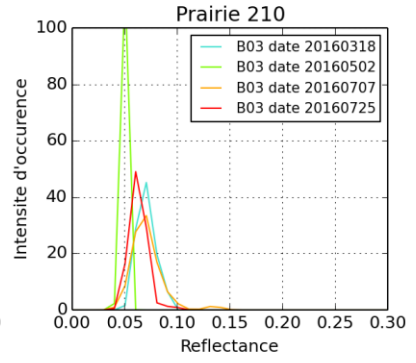
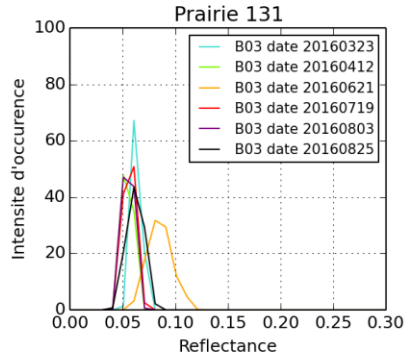
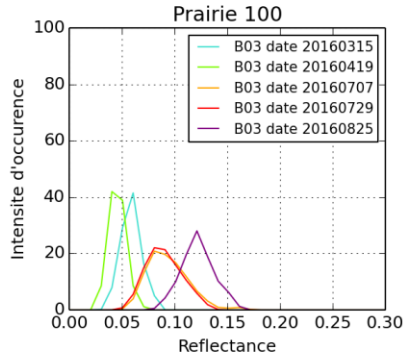
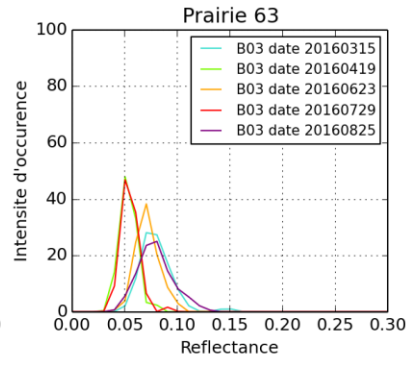
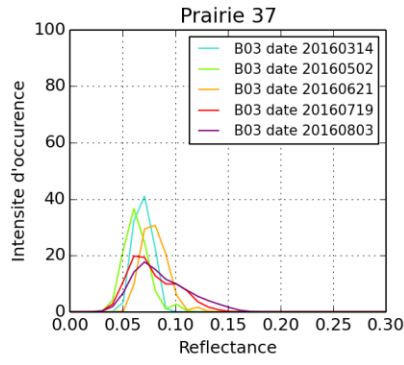
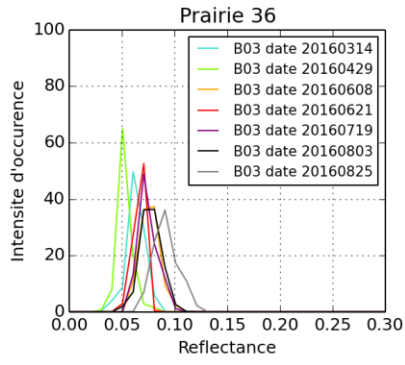


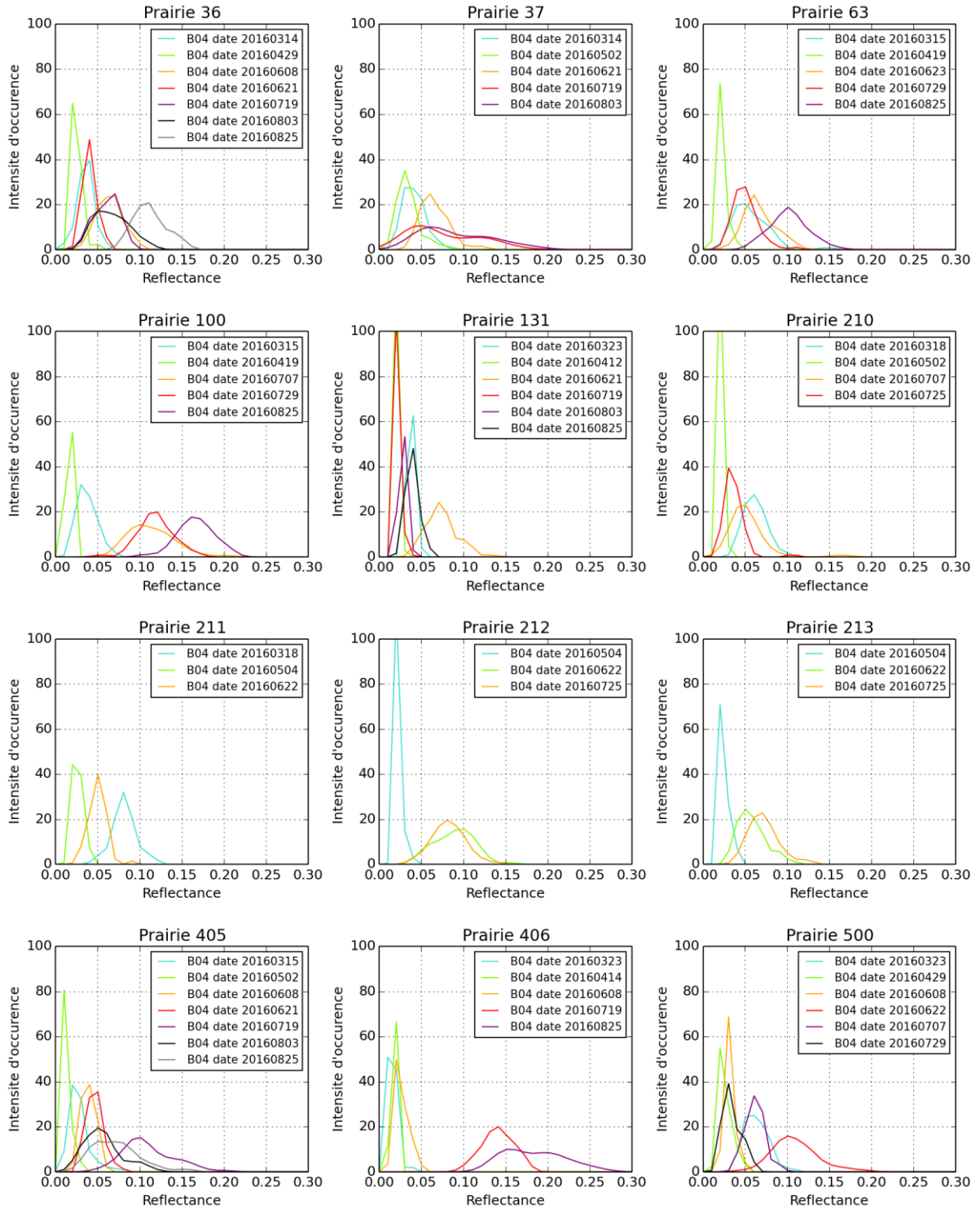
Annexe III : Tableau des dates de mesures et des opérations de gestion pour chacune des prairies

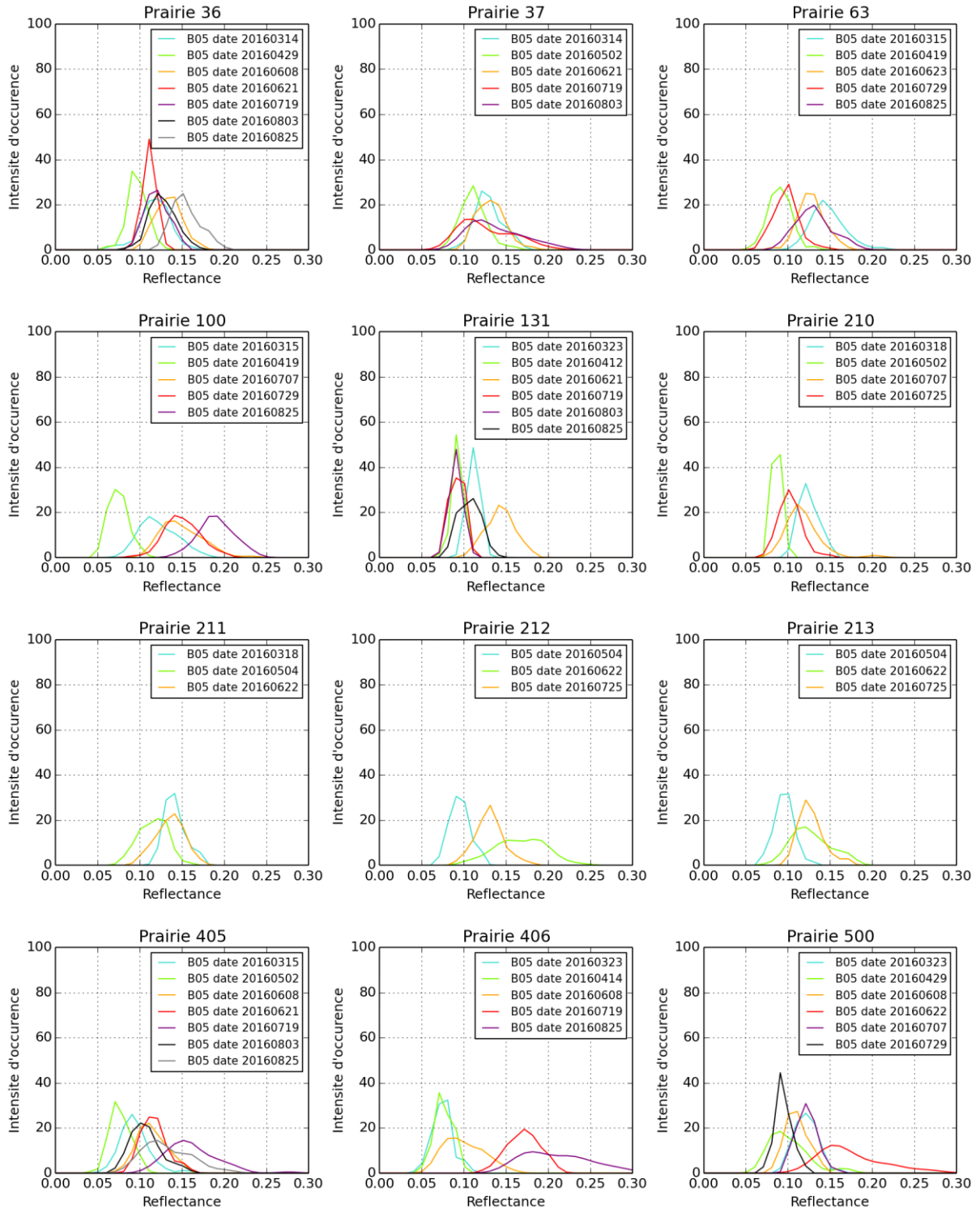
Prairie	Date mesure	Commentaire		Prairie	Date mesure	Commentaire
36	14/03/2016			211	18/03/2016	
36	29/04/2016			211	04/05/2016	
36	08/06/2016	A été fauchée		211	22/06/2016	
36	21/06/2016			212	06/05/2016	
36	19/07/2016	Pâturée		212	22/06/2016	
36	03/08/2016			212	25/07/2016	Fauchée
37	14/03/2016			213	04/05/2016	
37	02/05/2016			213	22/06/2016	
37	21/06/2016	Fauchée		213	25/07/2016	Fauchée
37	19/07/2016	Pâturée en partie		405	15/03/2016	
37	03/08/2016	Pâturée en partie		405	02/05/2016	
63	15/03/2016			405	08/06/2016	
63	19/04/2016			405	21/06/2016	
63	23/06/2016	A été fauchée et pâturée en partie		405	19/07/2016	A été fauchée
63	29/07/2016	Pâturée en partie		405	03/08/2016	
100	15/03/2016			406	23/03/2016	
100	19/04/2016			406	14/04/2016	
100	07/07/2016	A été fauchée fin mai		406	08/06/2016	A été fauchée le 3 mai
100	29/07/2016	Pâturée en partie et maladie (rouille)		406	19/07/2016	A été fauchée une seconde fois et est pâturée
131	23/03/2016			500	23/03/2016	
131	12/04/2016			500	29/04/2016	
131	21/06/2016	A été fauchée		500	08/06/2016	
131	19/07/2016			500	22/06/2016	A été fauchée
131	03/08/2016			500	07/07/2016	
210	18/03/2016			500	29/07/2016	
210	02/05/2016					
210	07/07/2016	A été fauchée				
210	25/07/2016					

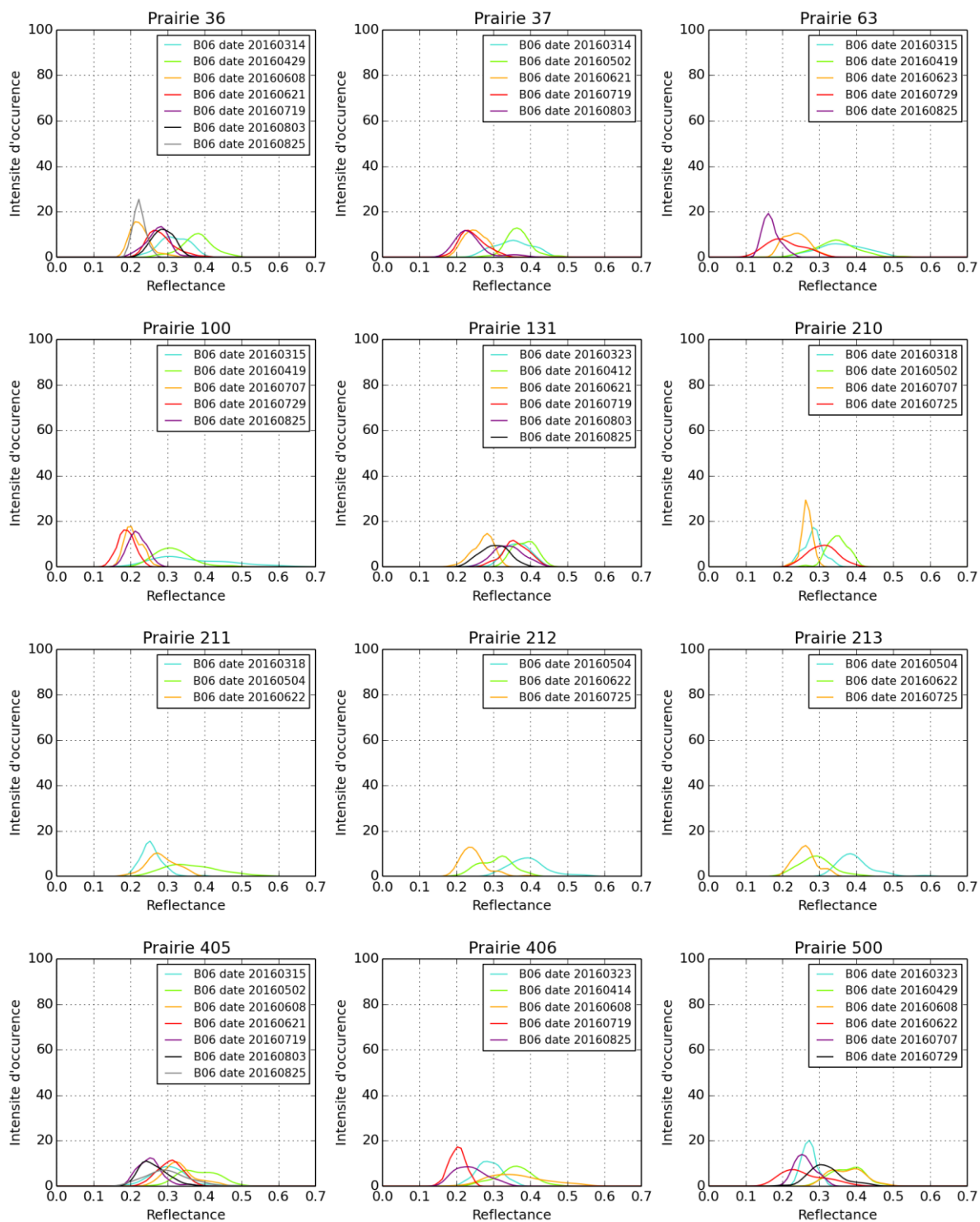
Annexe IV : Evolution de la réflectance des prairies dans les bandes 2 à 8a de Sentinel-2 et des valeurs de NDVI, MSAVI2 et S2REP d'après une estimation de densité par noyau gaussien

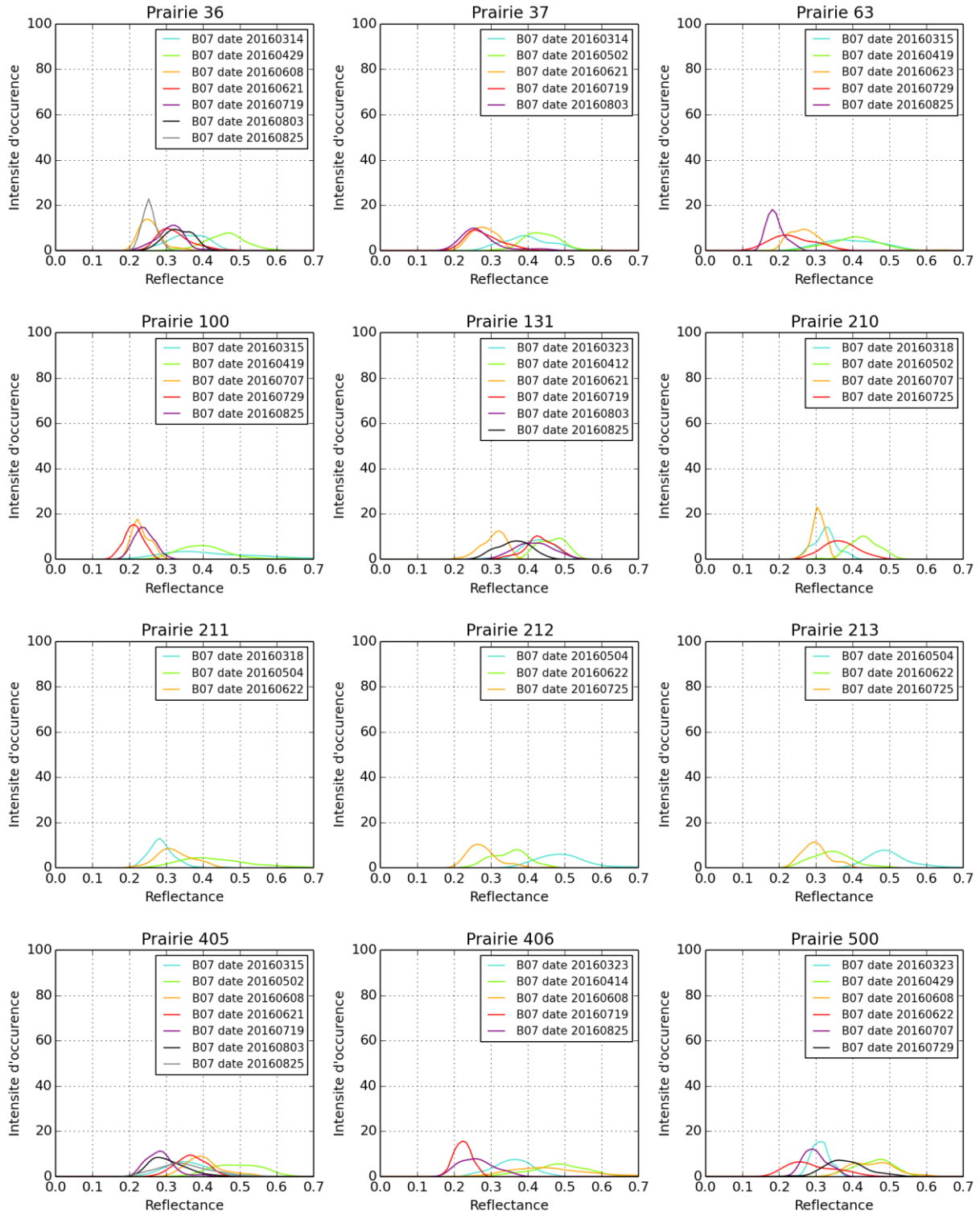


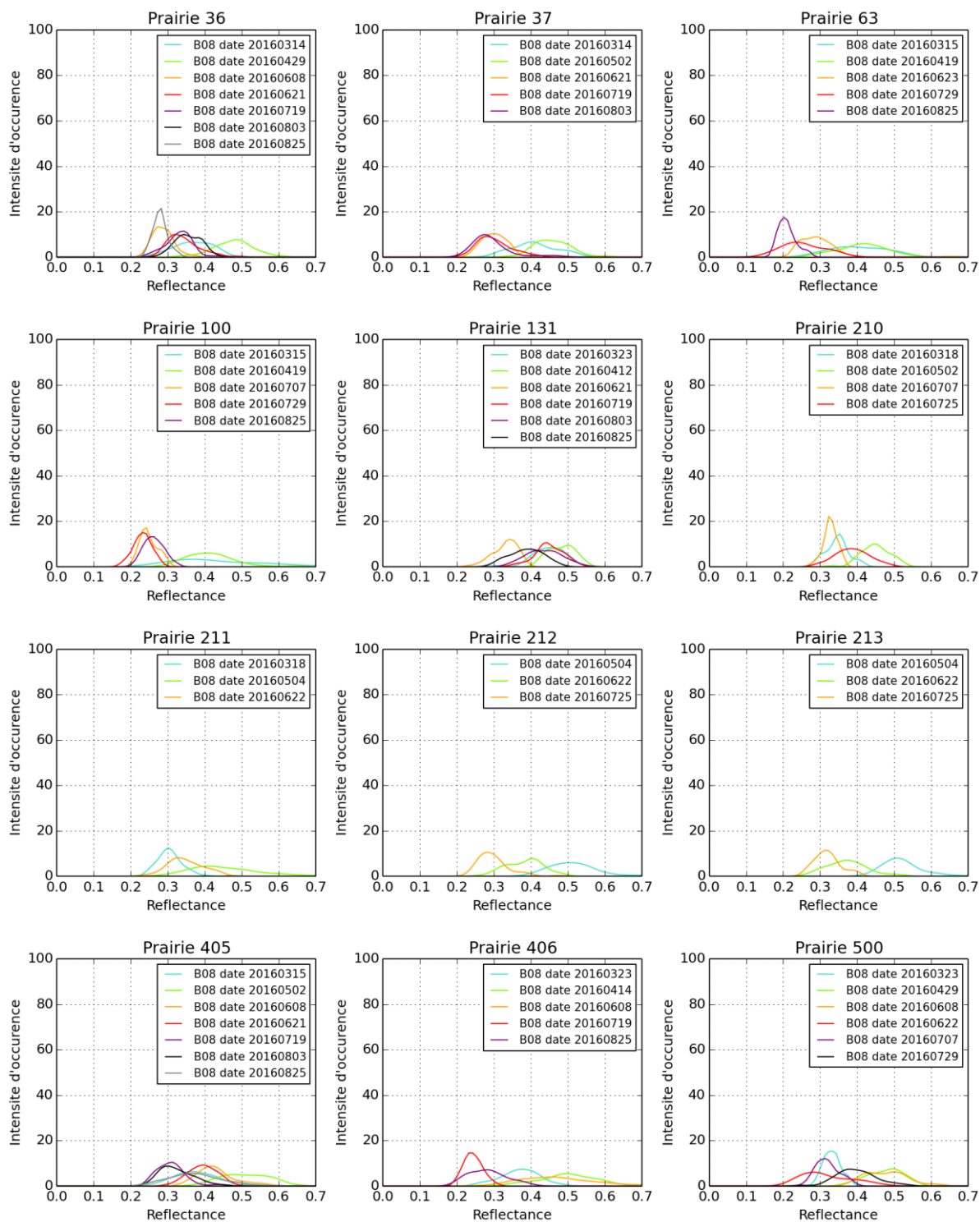


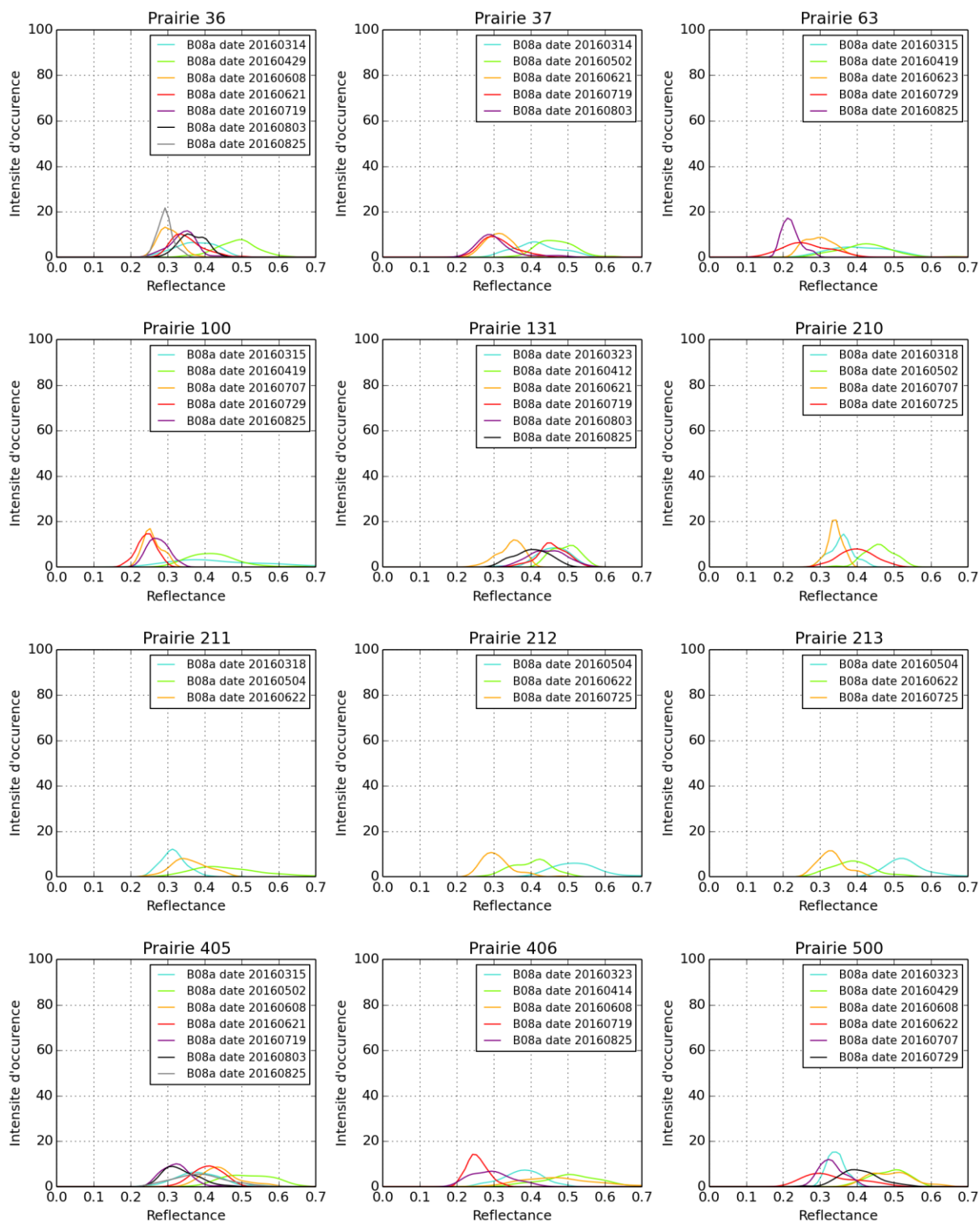




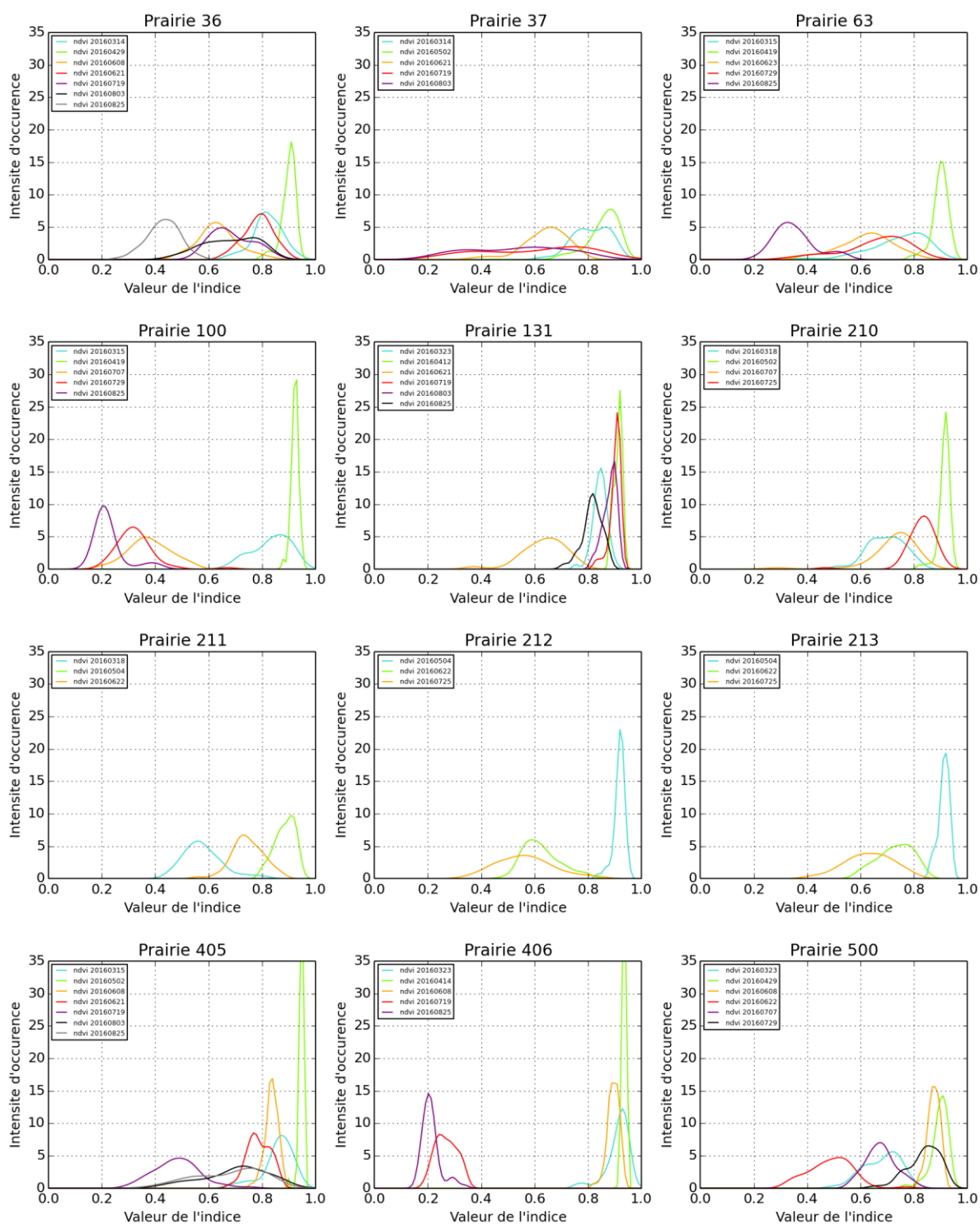




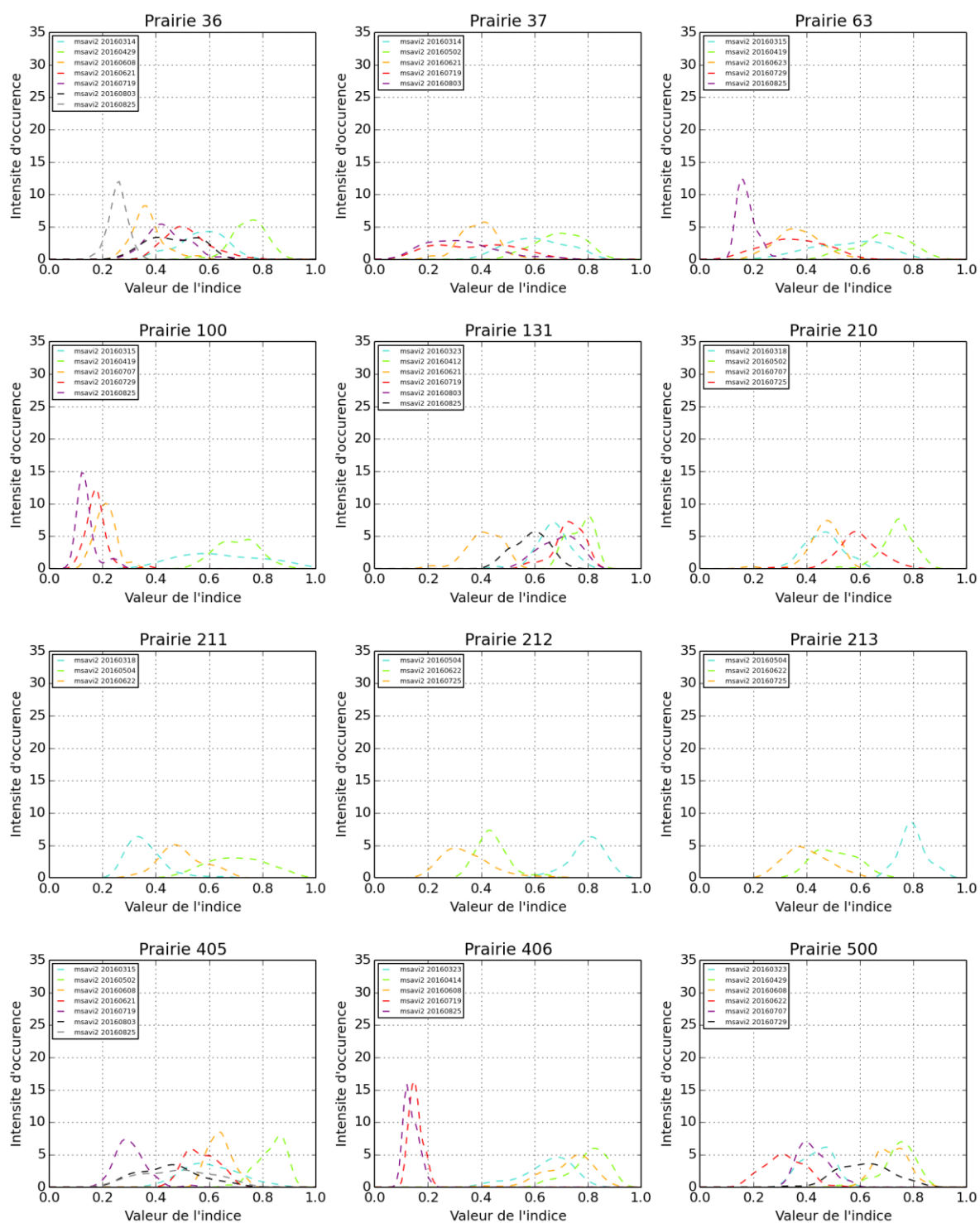




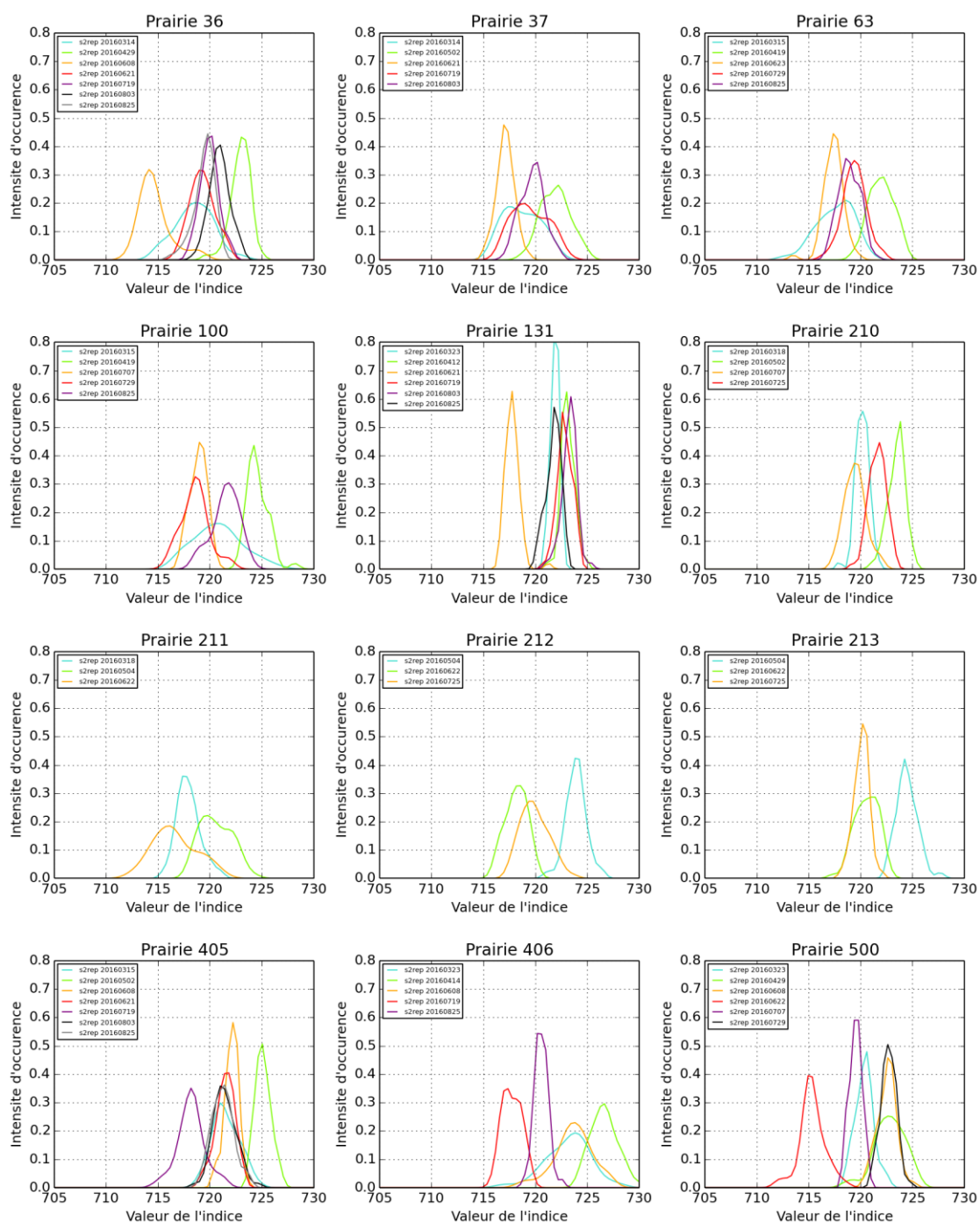
NDVI

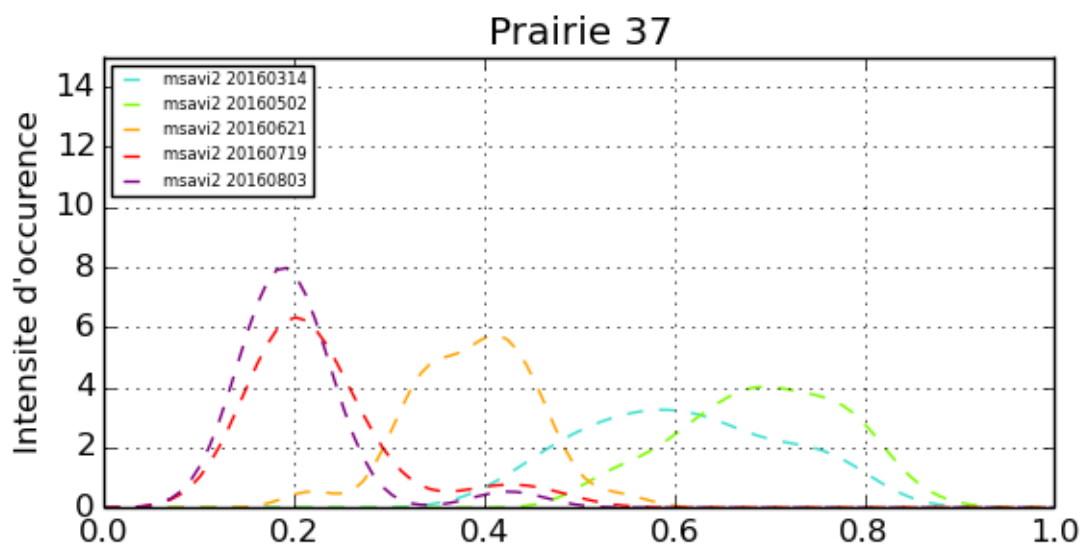


MSAVI2

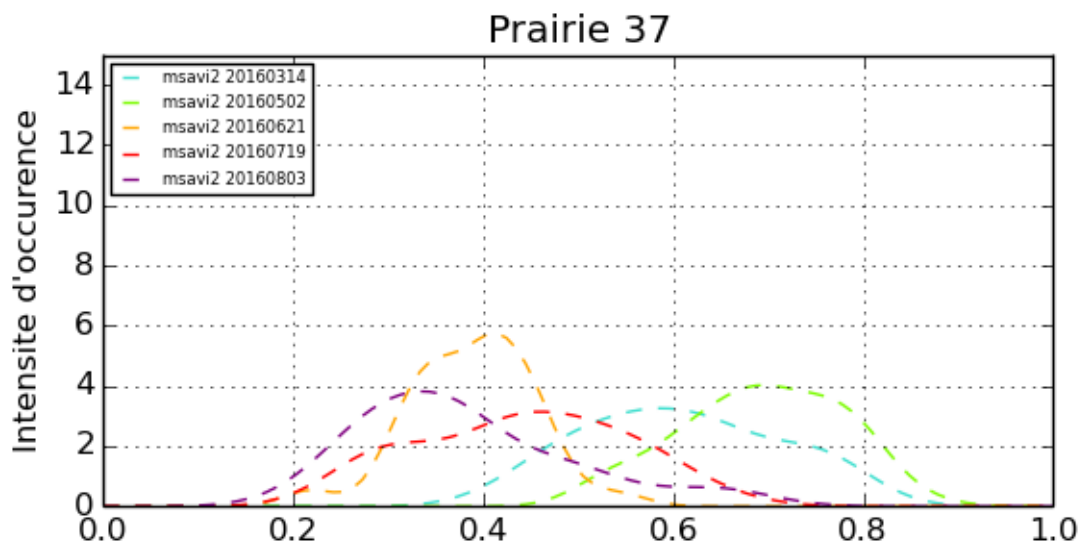


S2REP

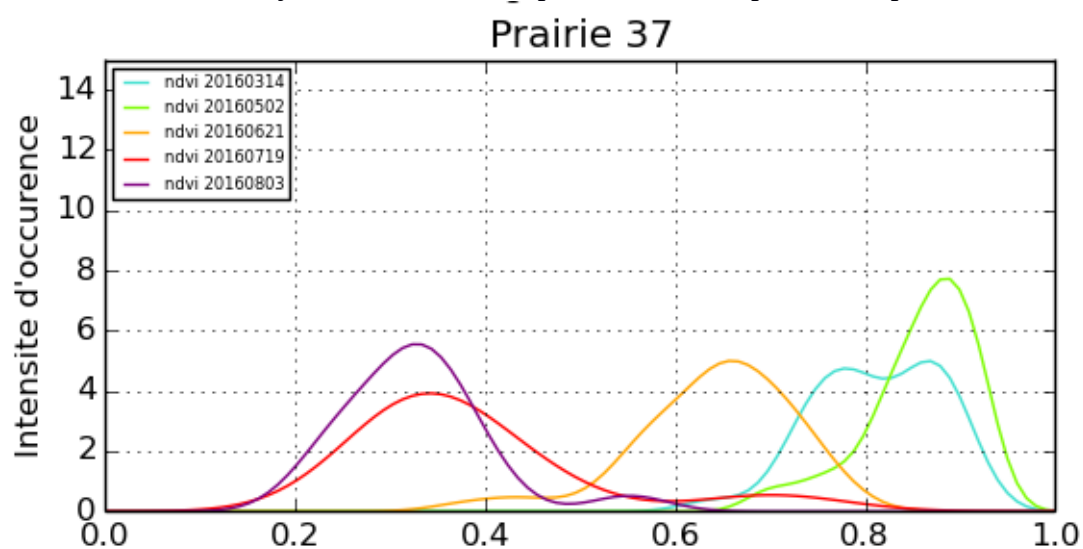




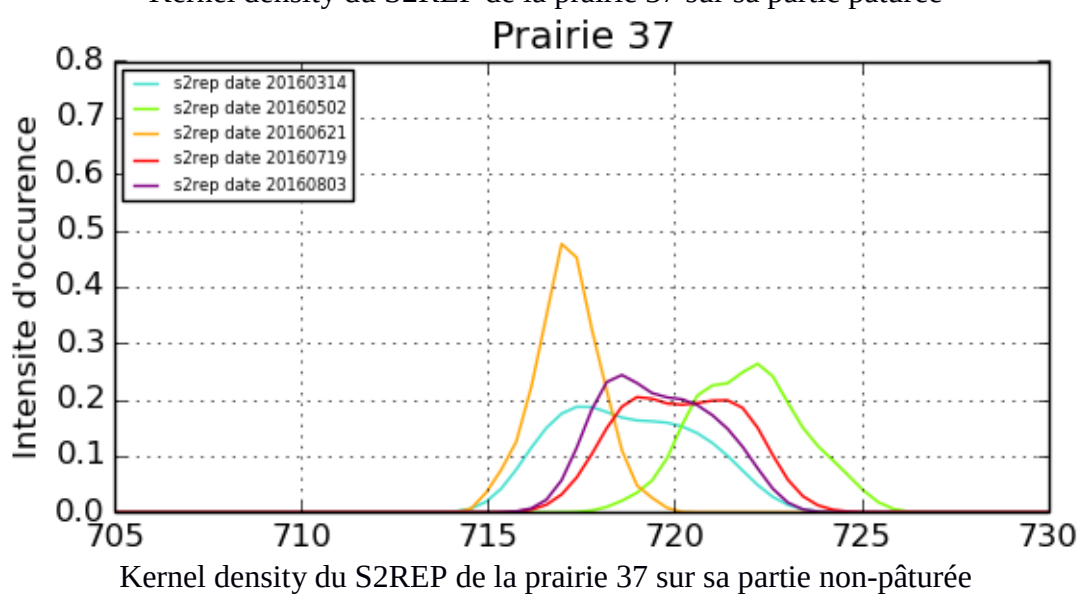
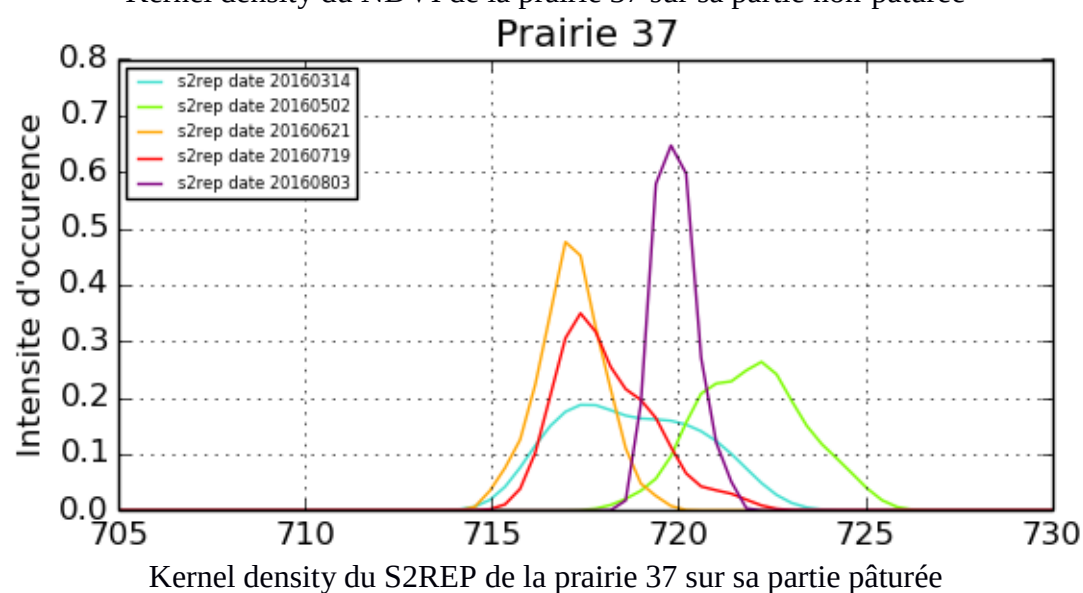
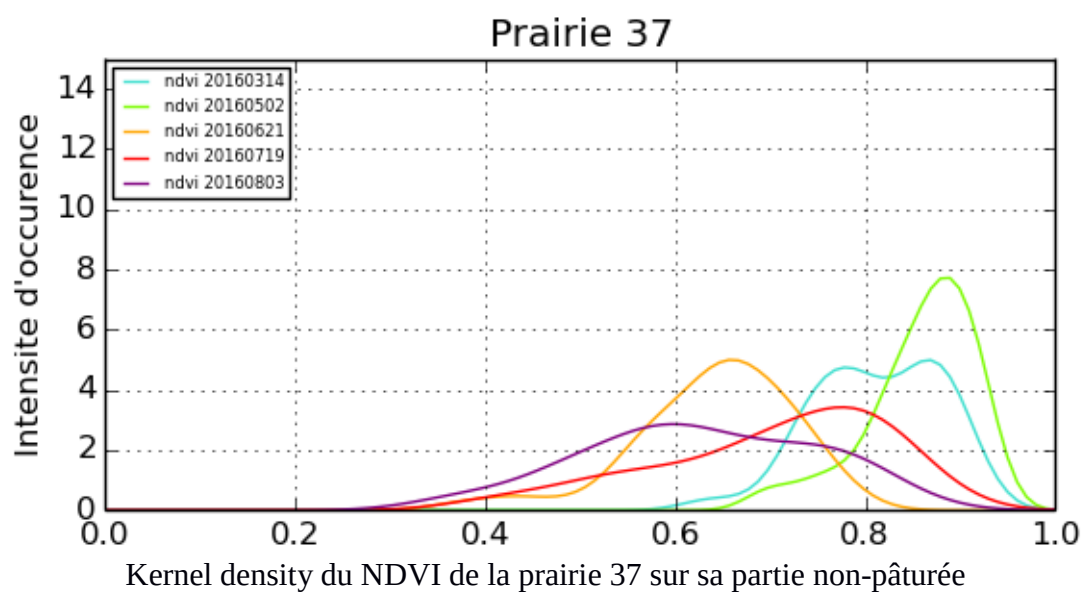
Kernel density du MSAVI2 de la prairie 37 sur sa partie pâturée



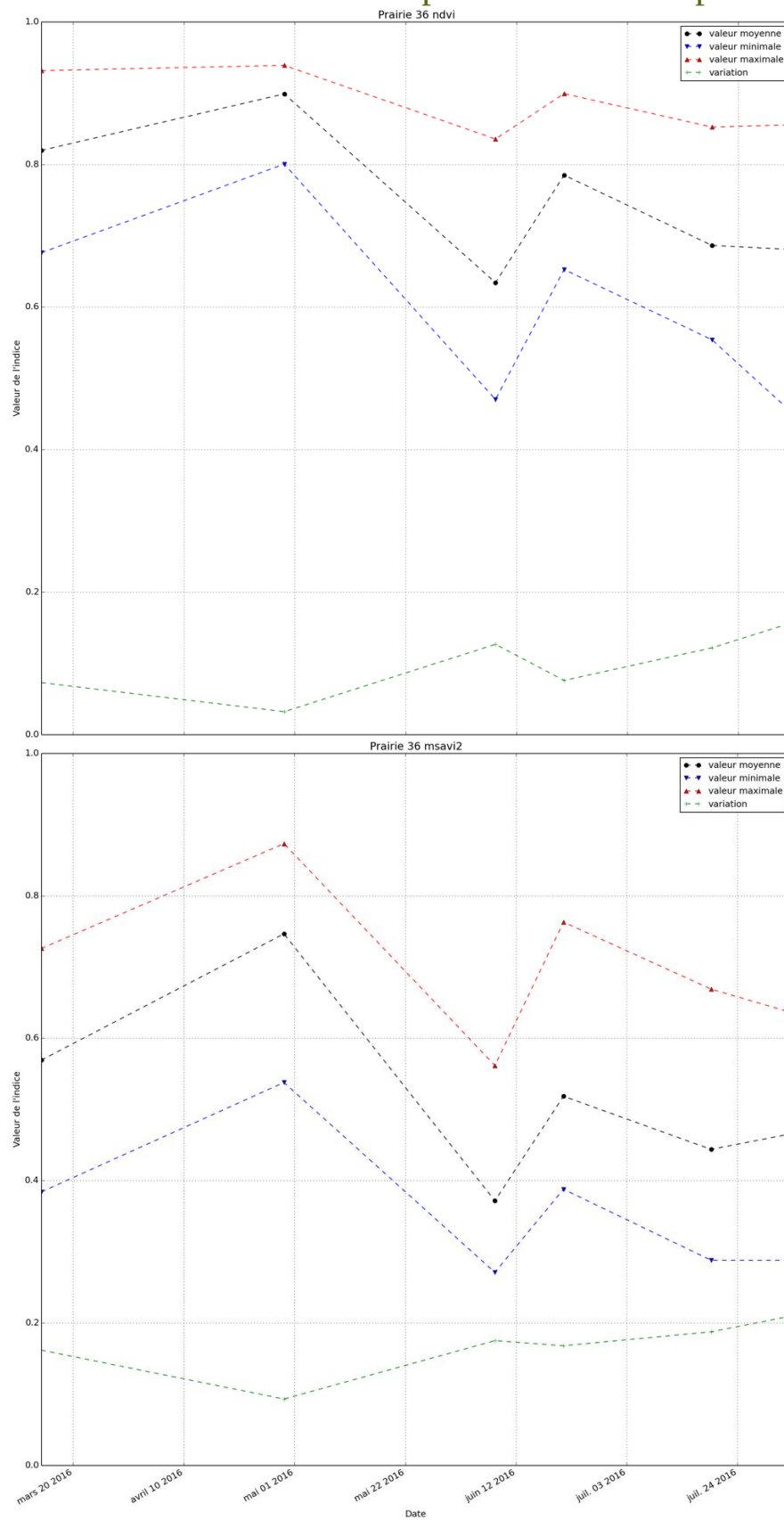
Kernel density du MSAVI2 de la prairie 37 sur sa partie non-pâturée

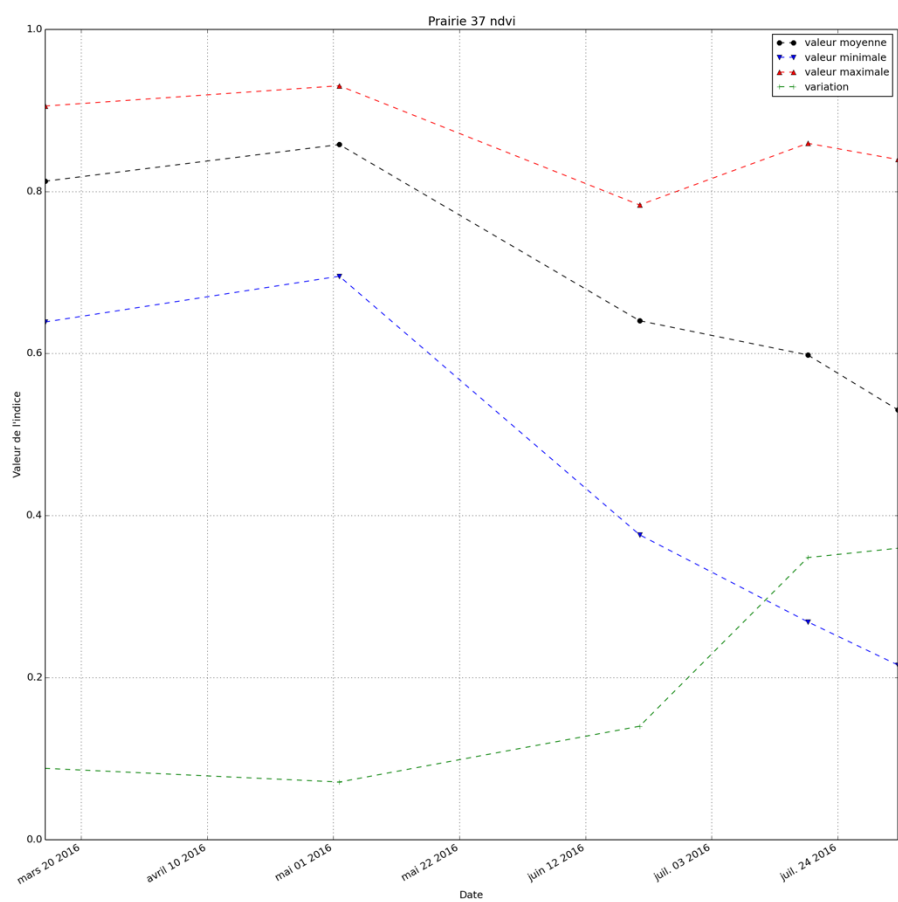
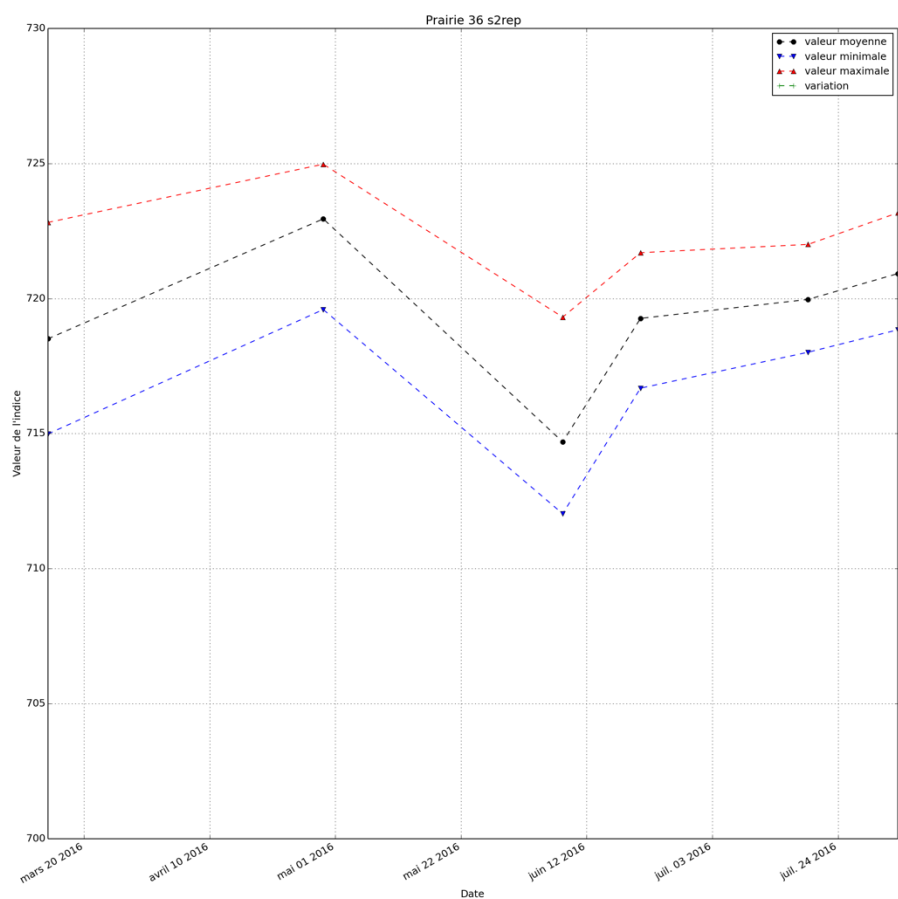


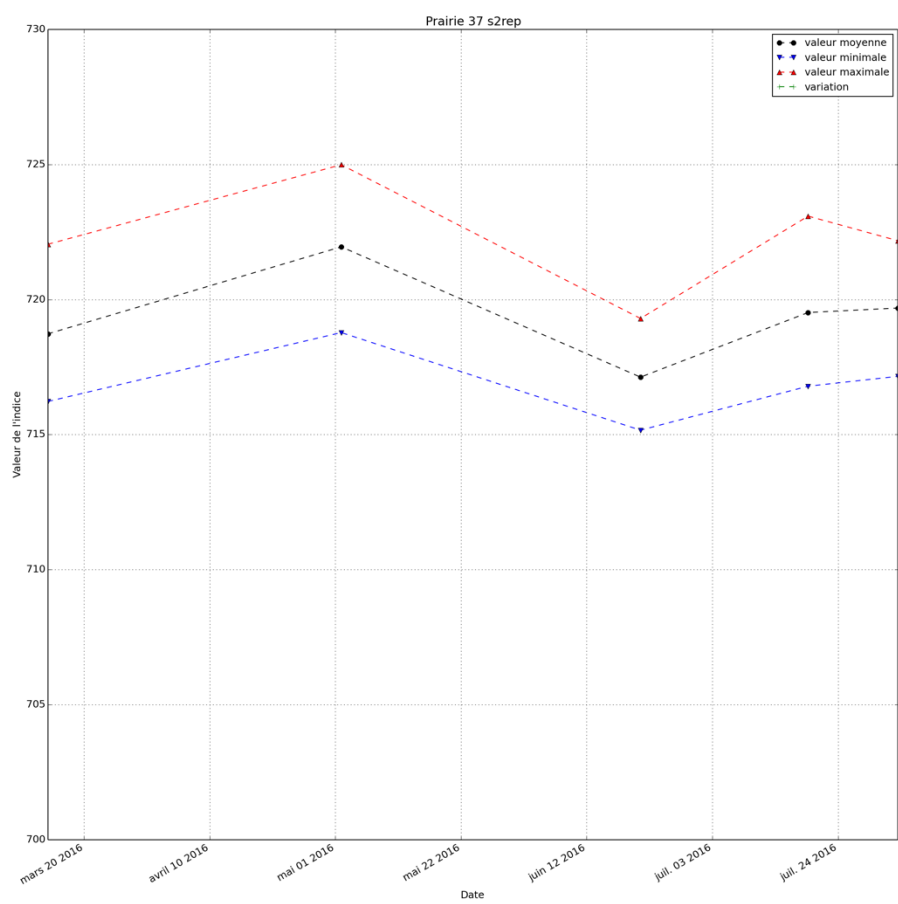
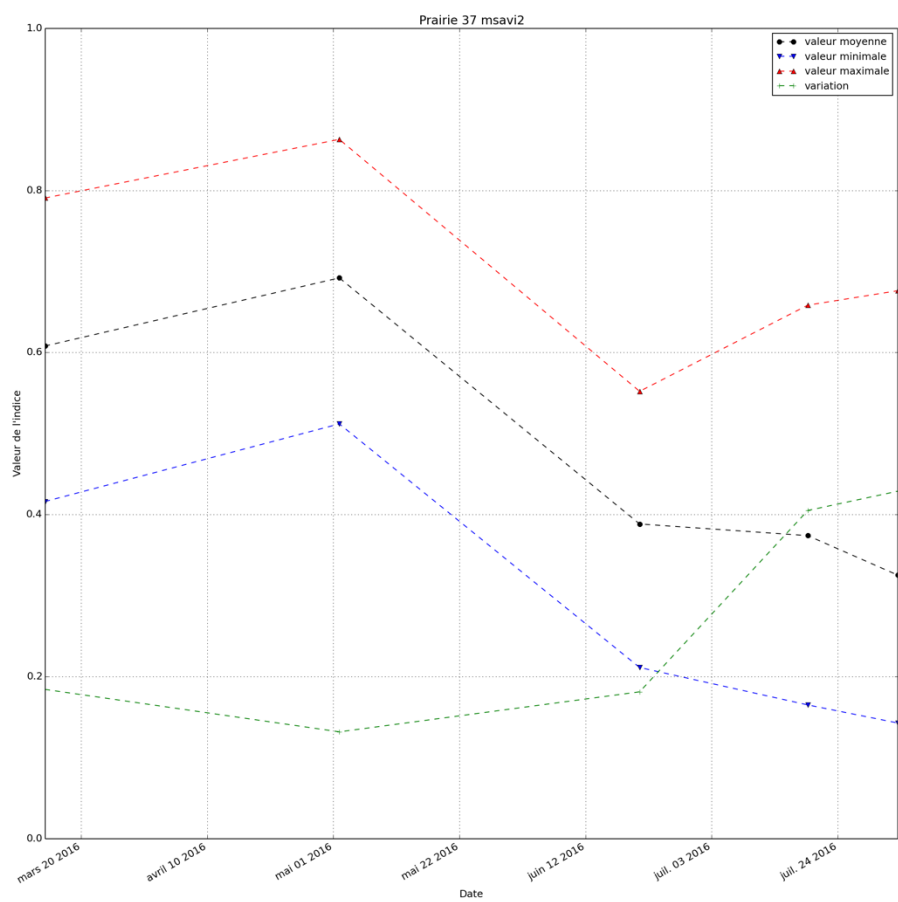
Kernel density du NDVI de la prairie 37 sur sa partie pâturée

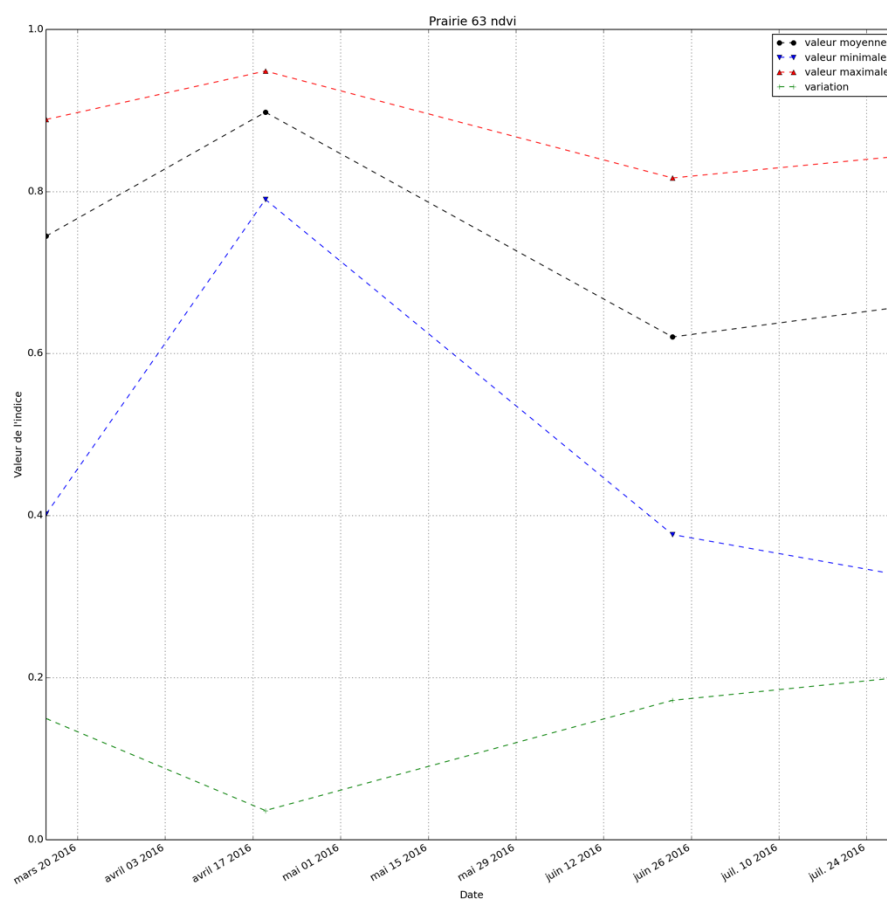
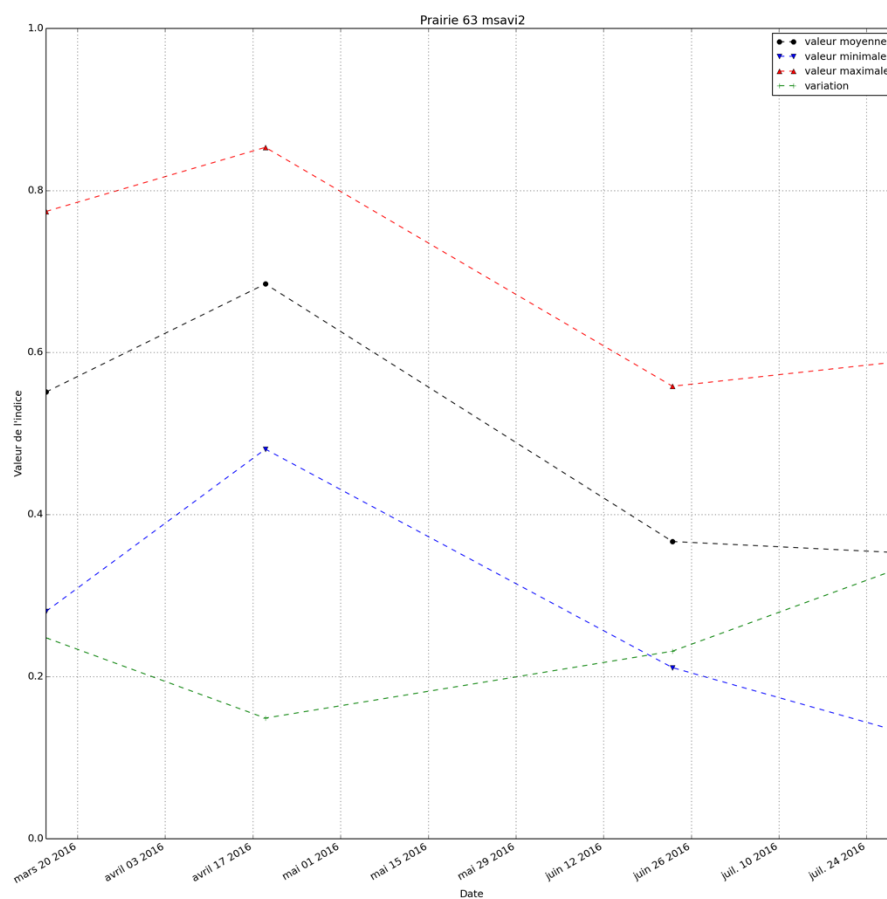


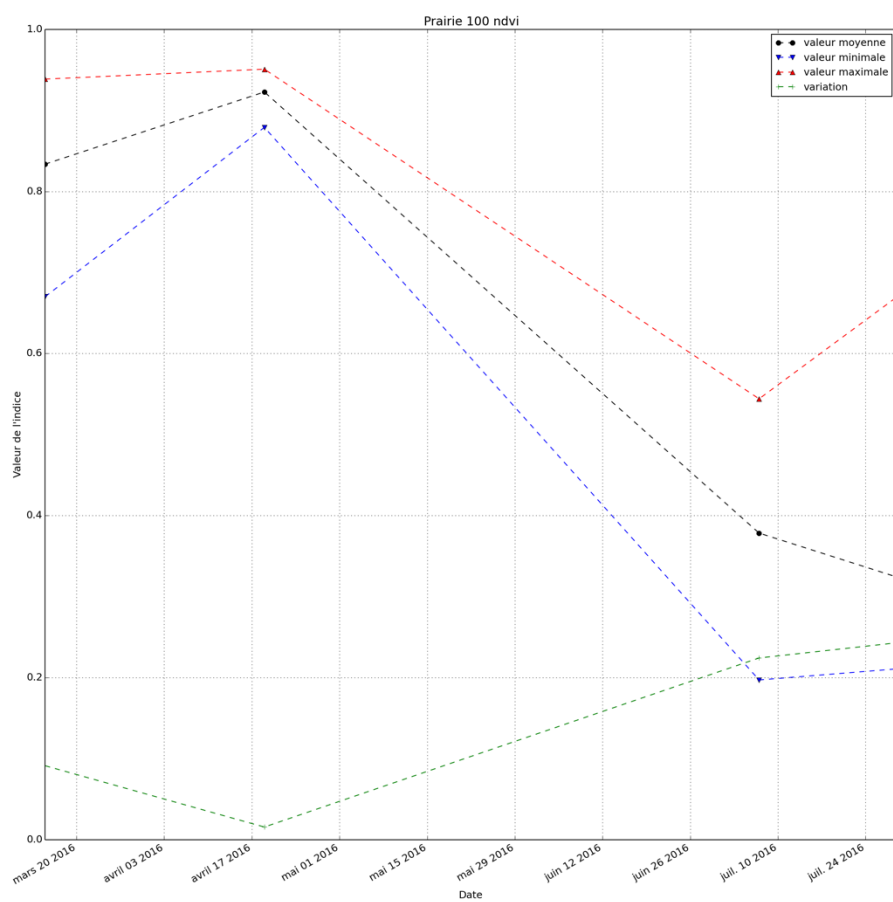
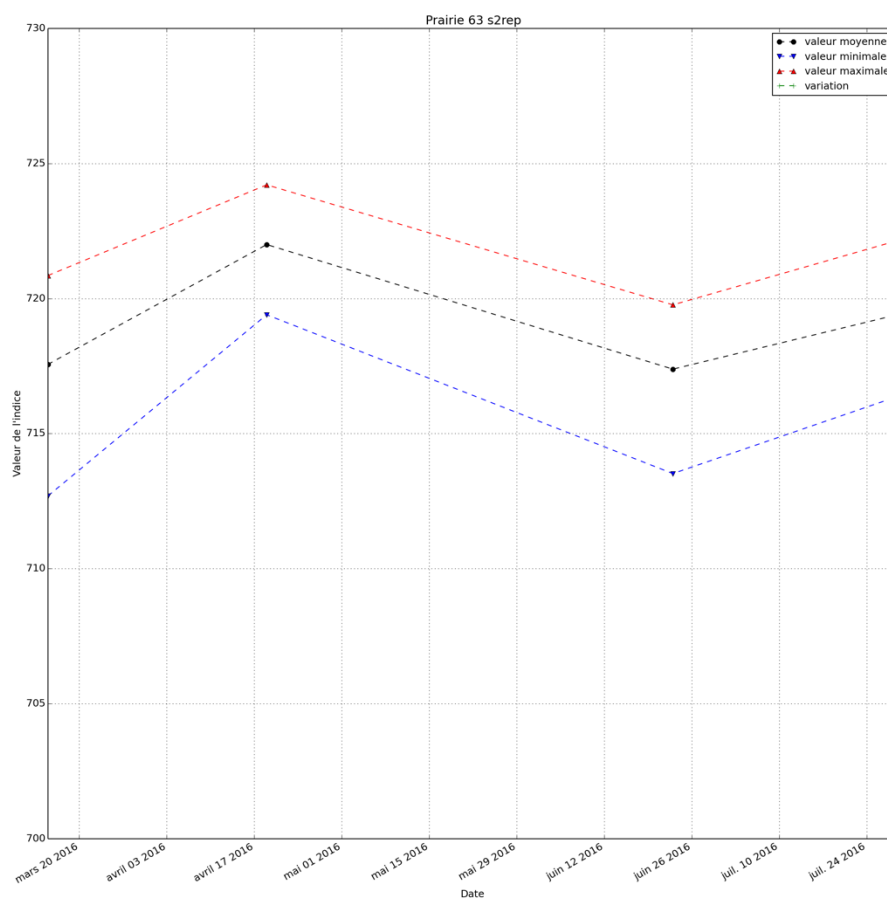
Annexe V : Évolution temporelle du NDVI, du MSAVI2 et du S2REP avec les données Sentinel-2 simulée pour chacune des prairies

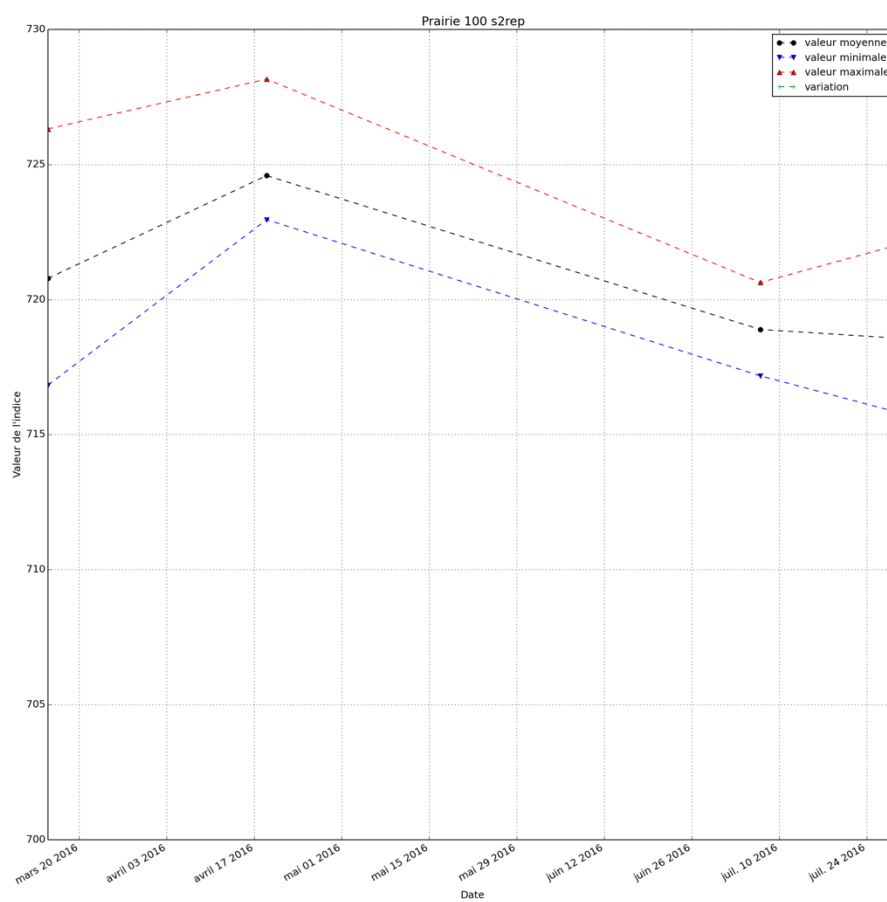
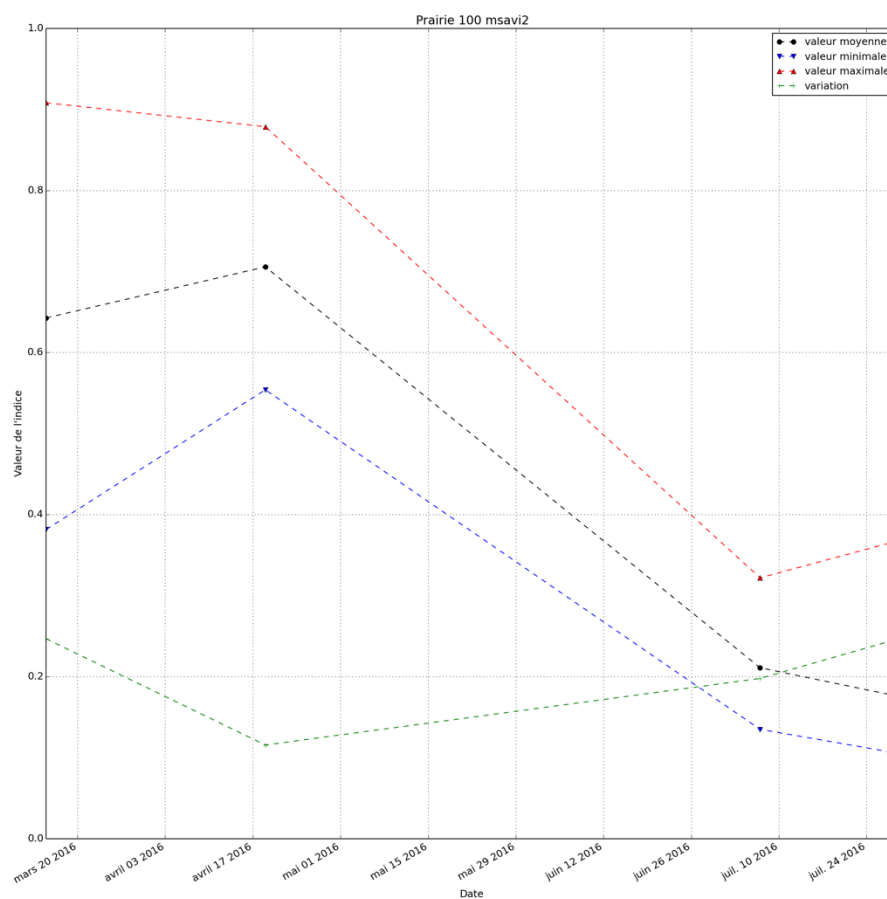


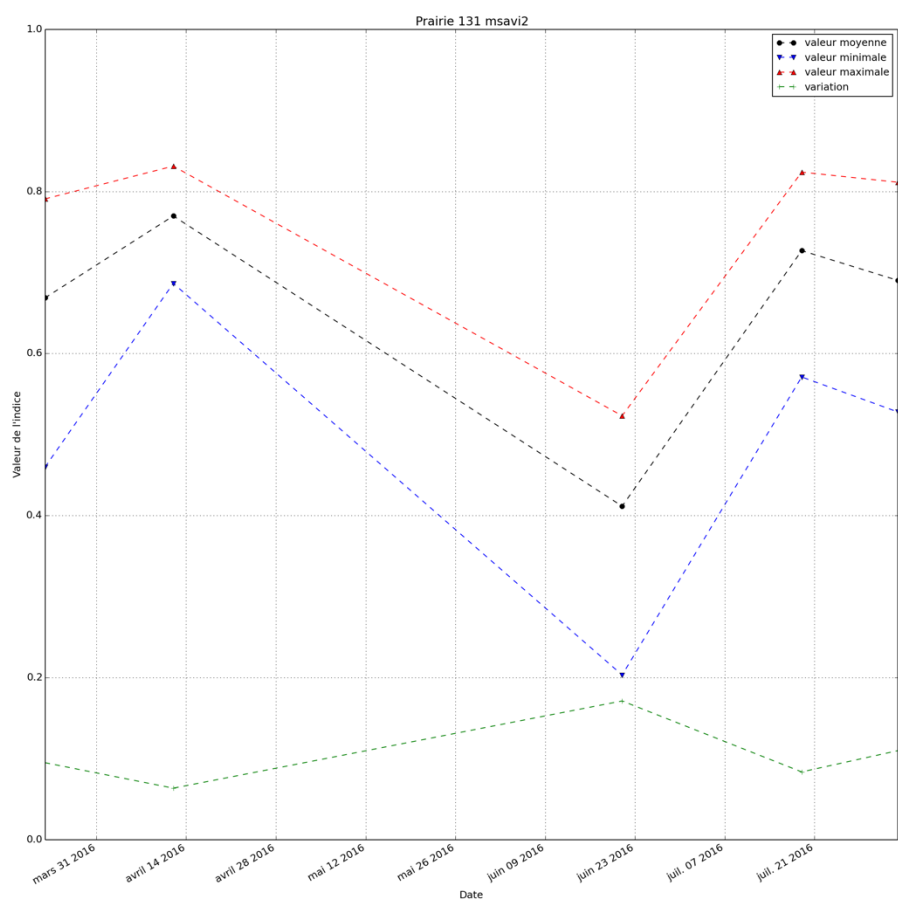
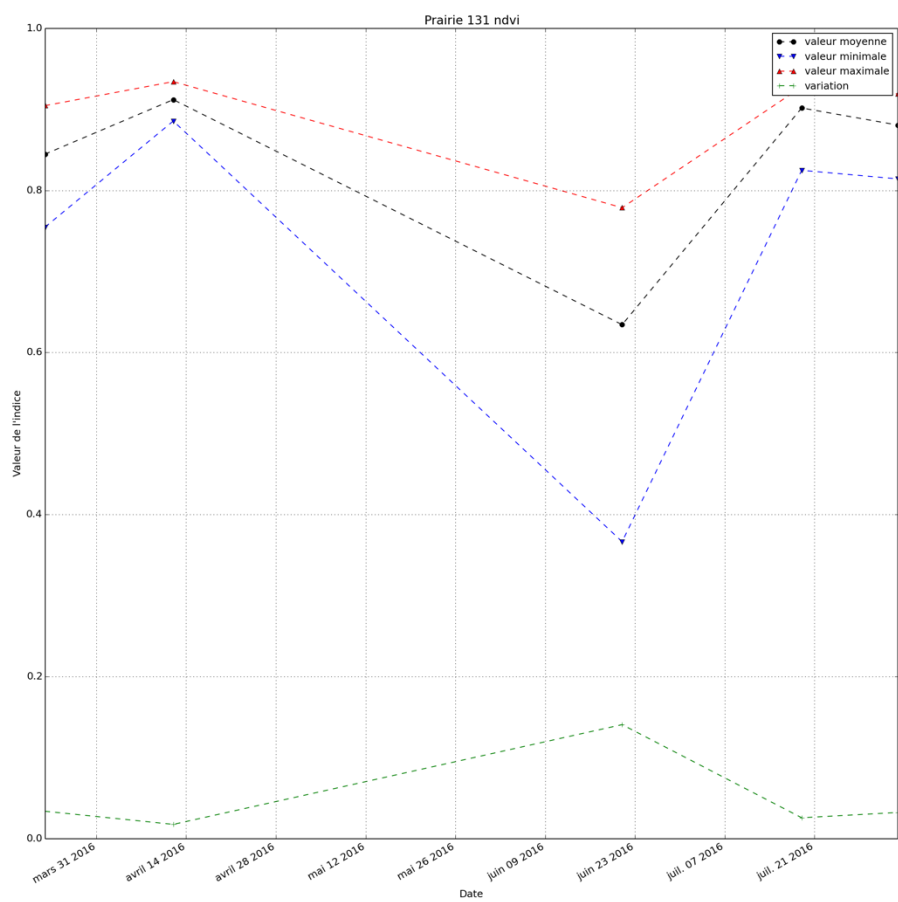


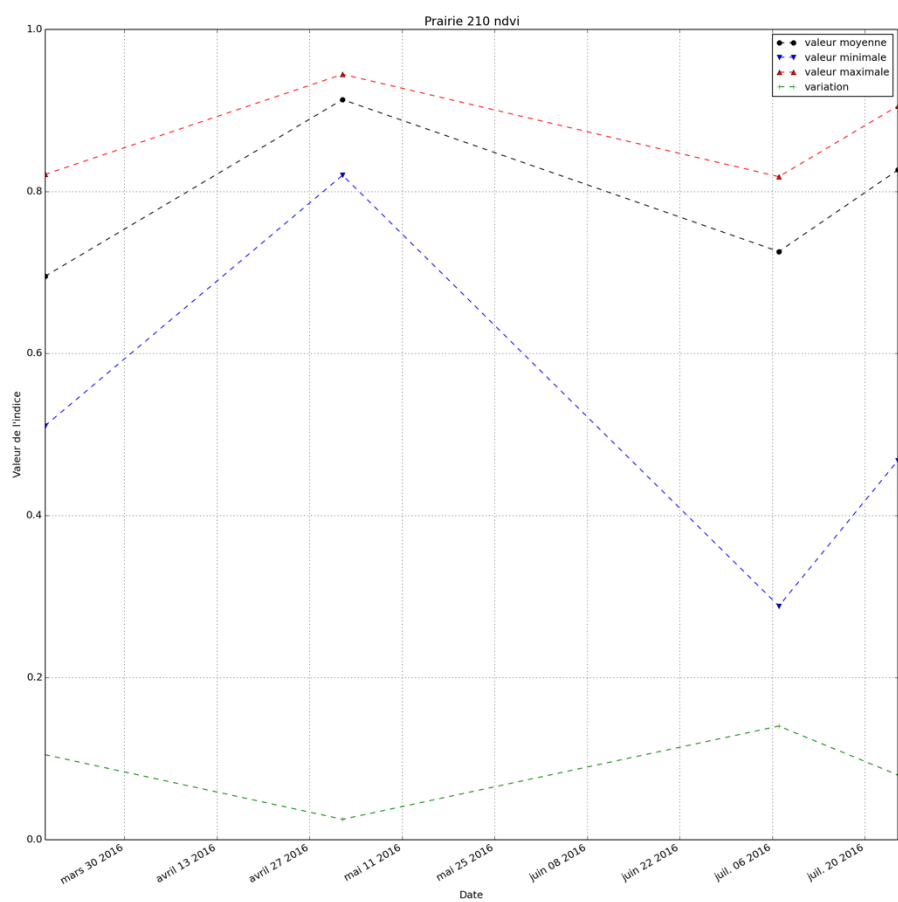
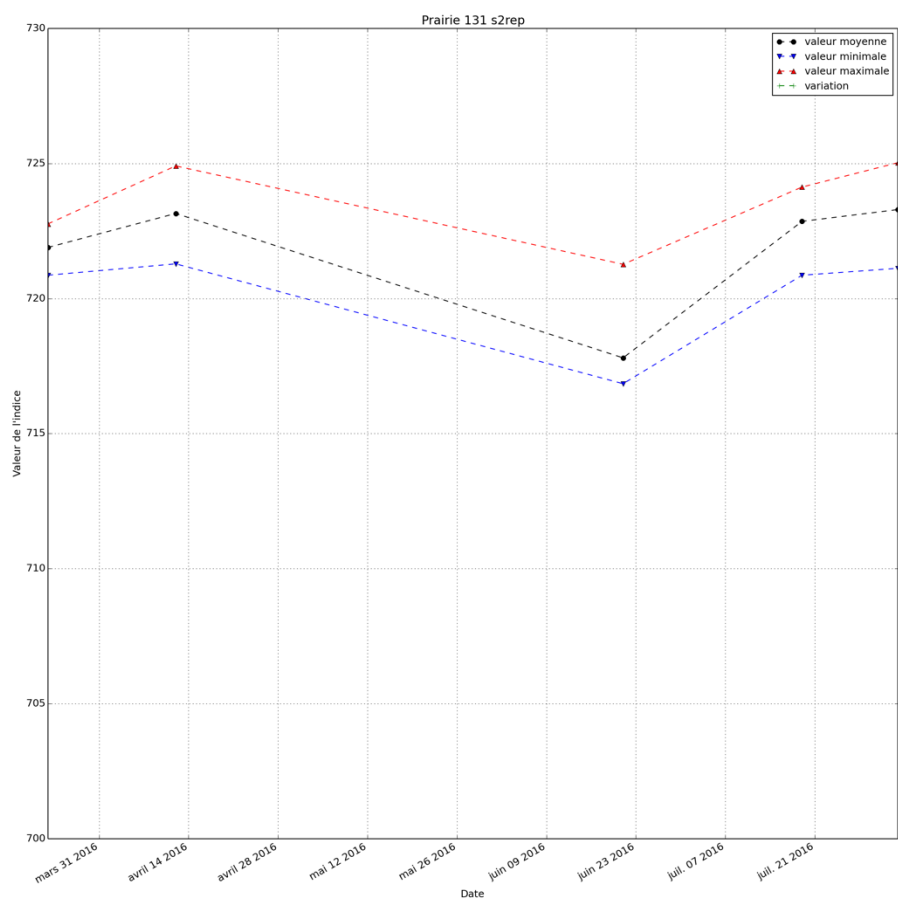


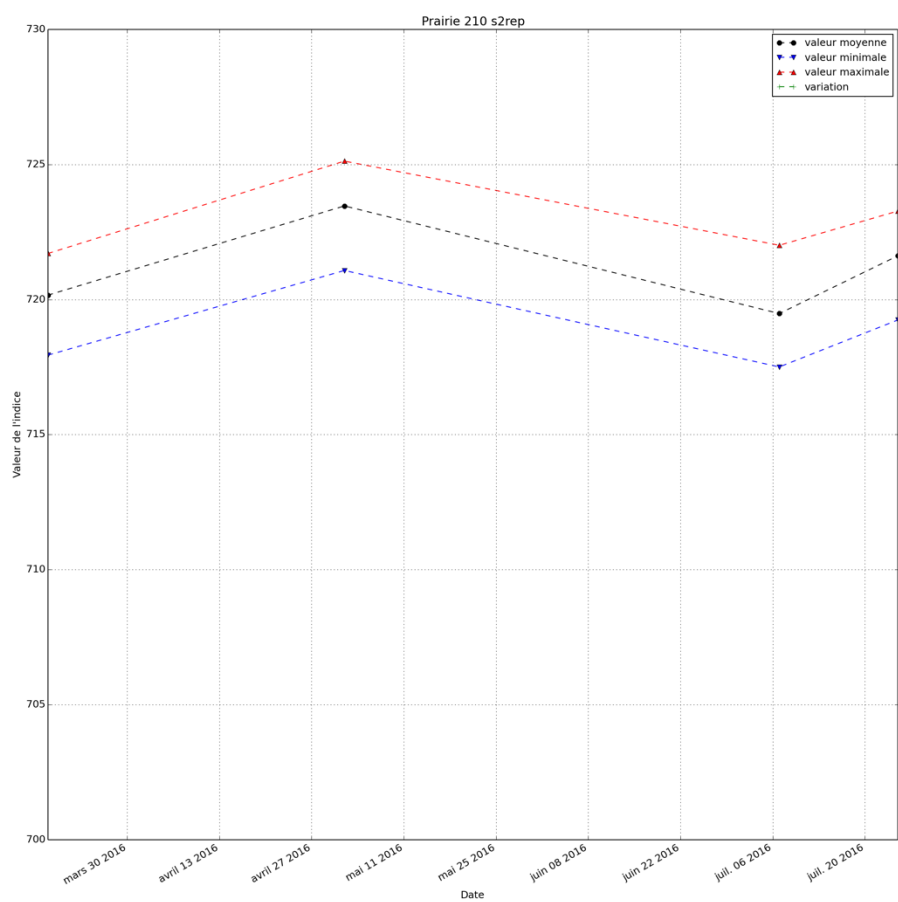
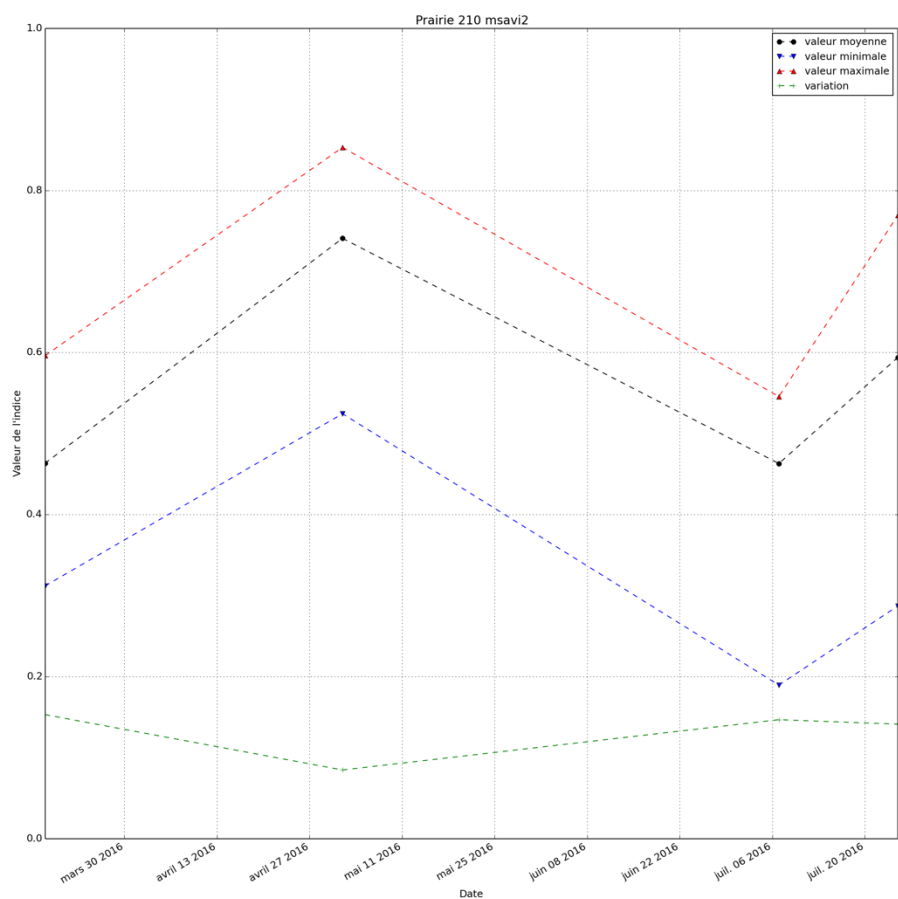


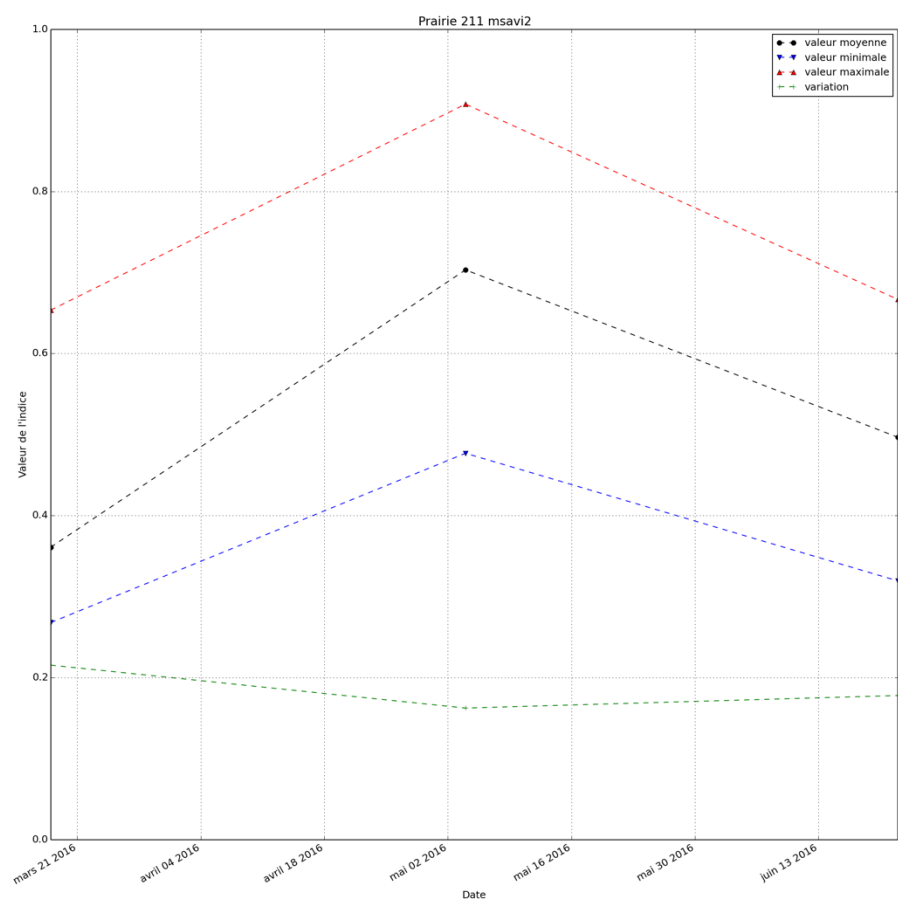
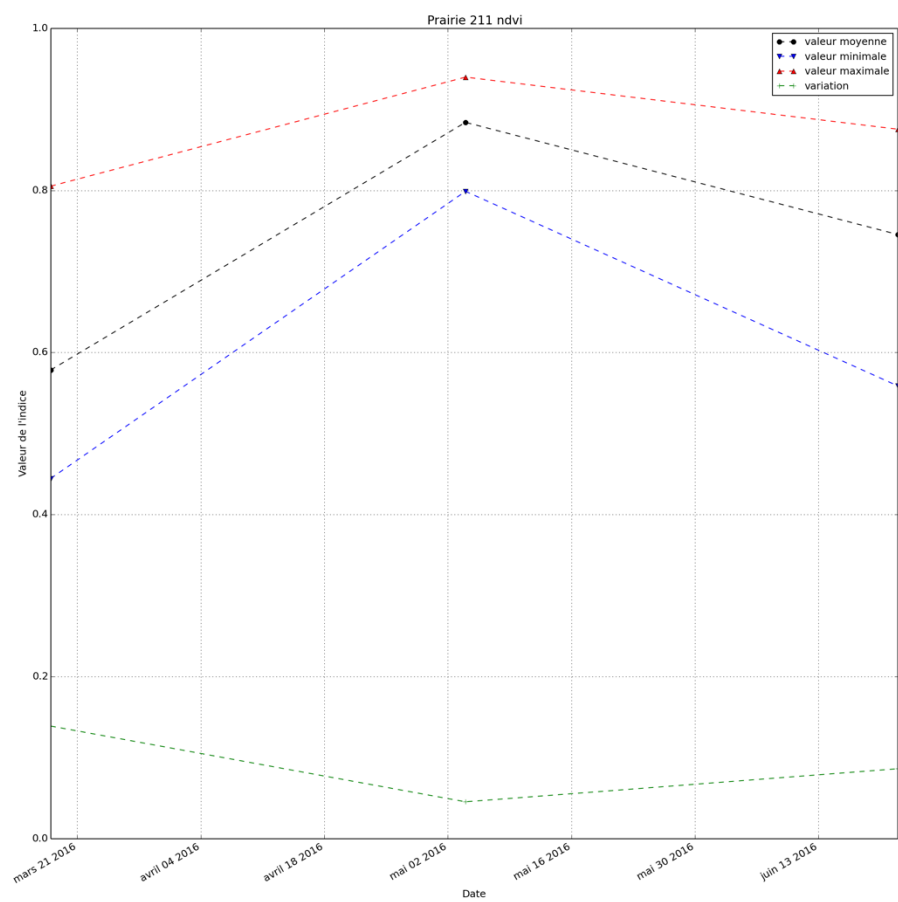


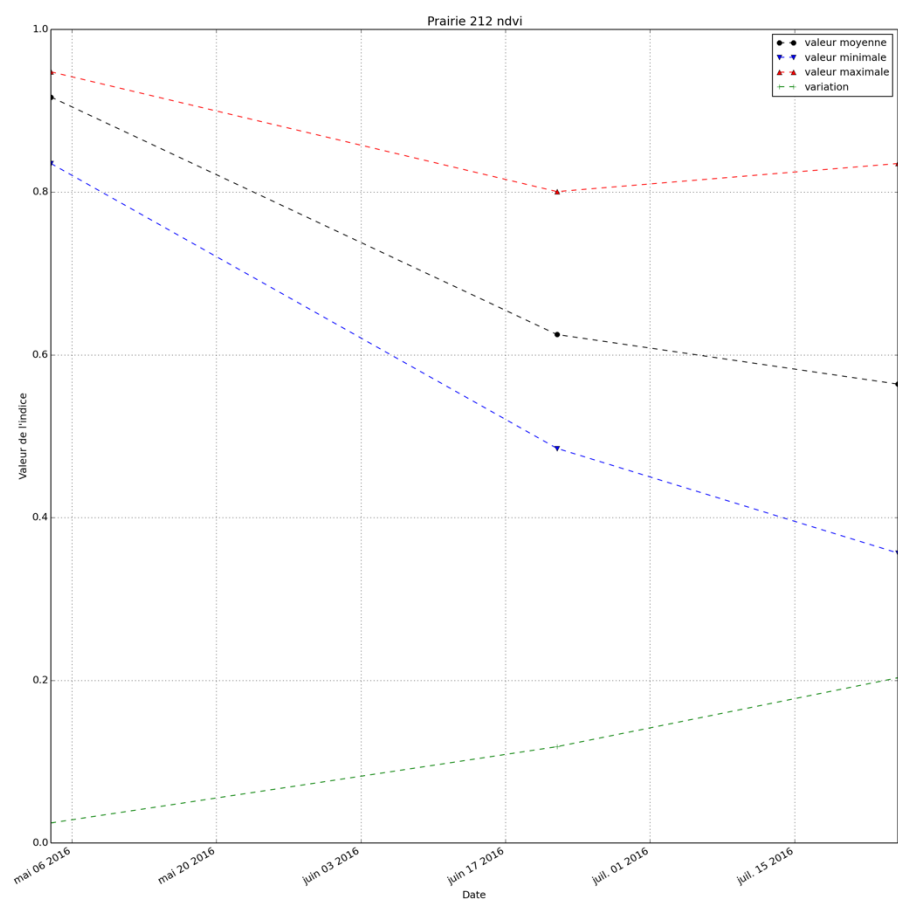
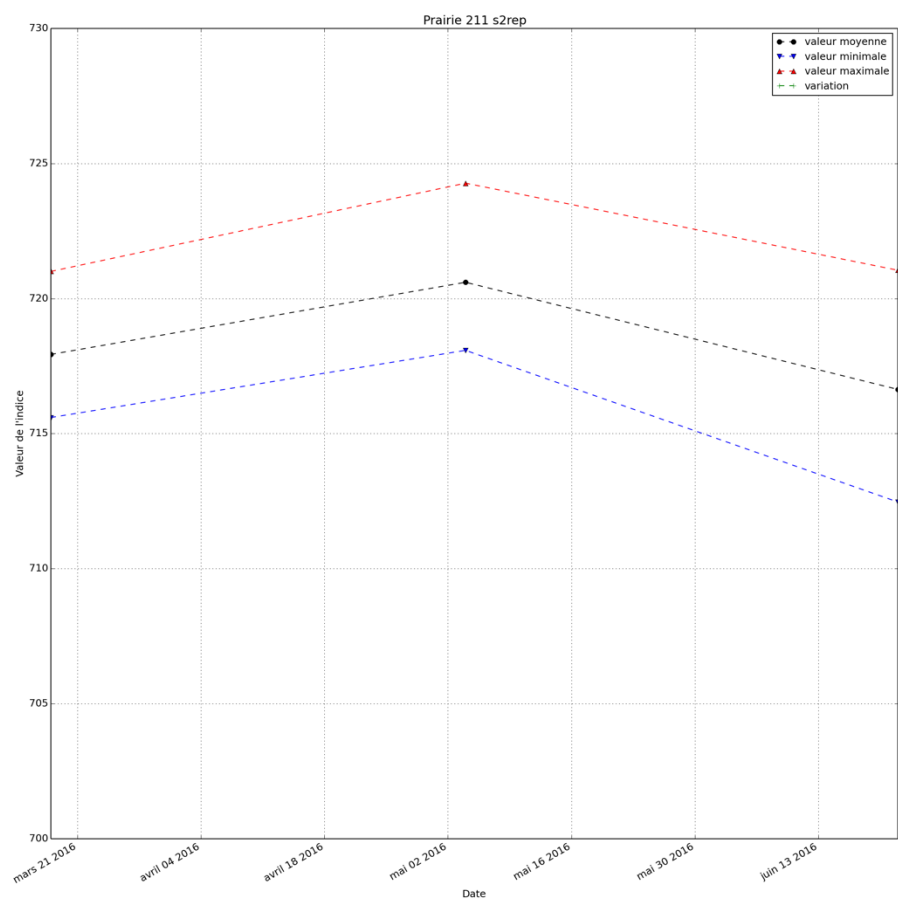


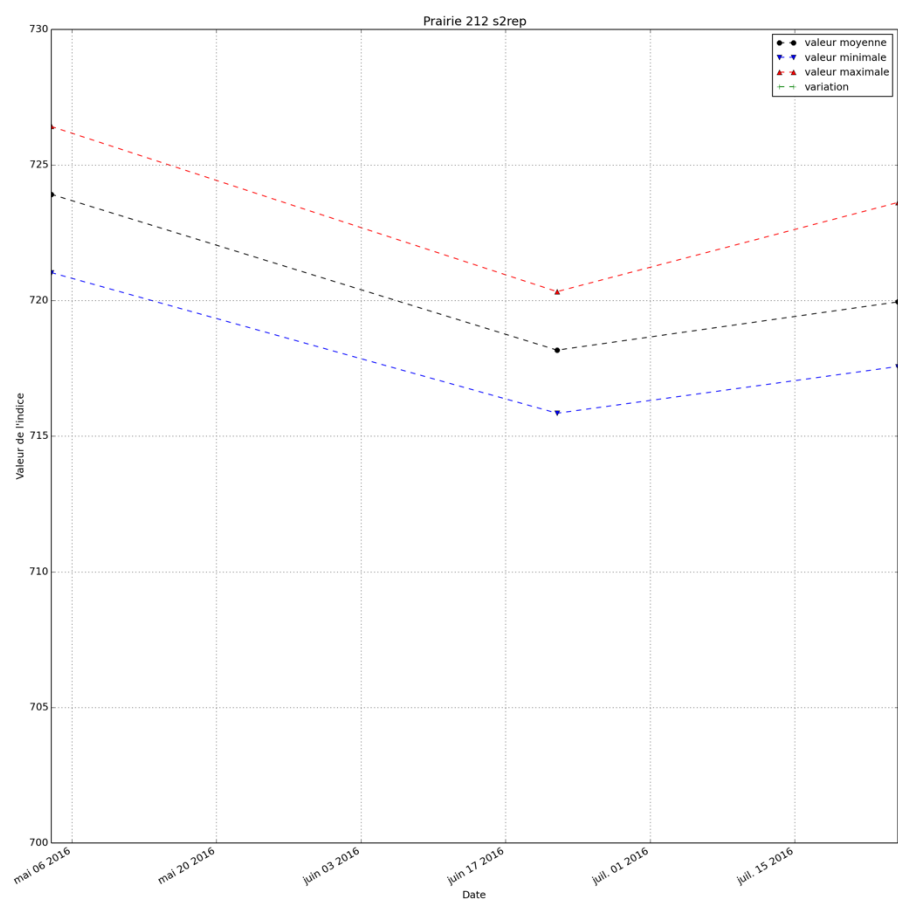
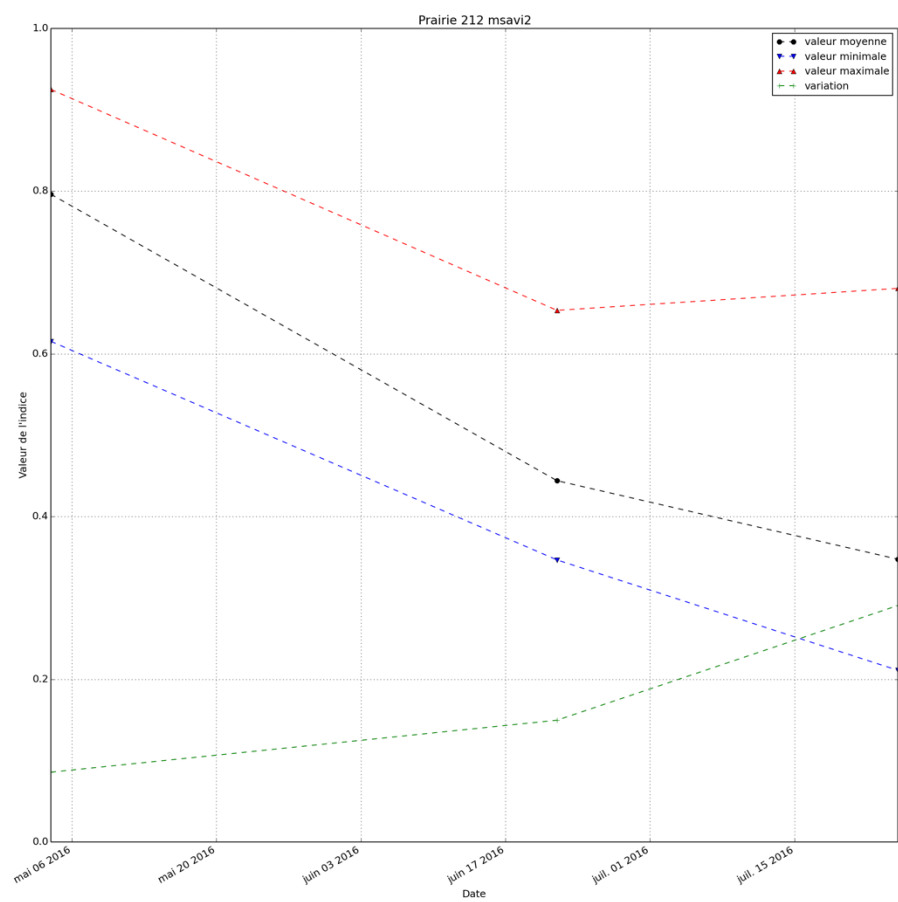


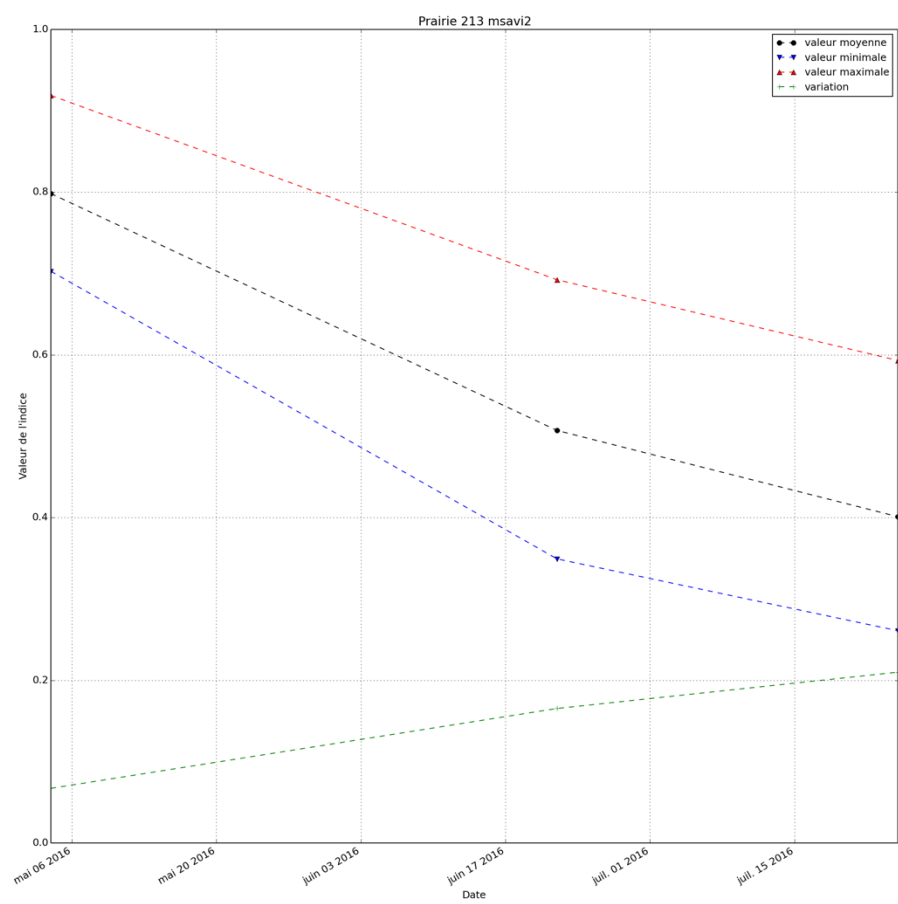
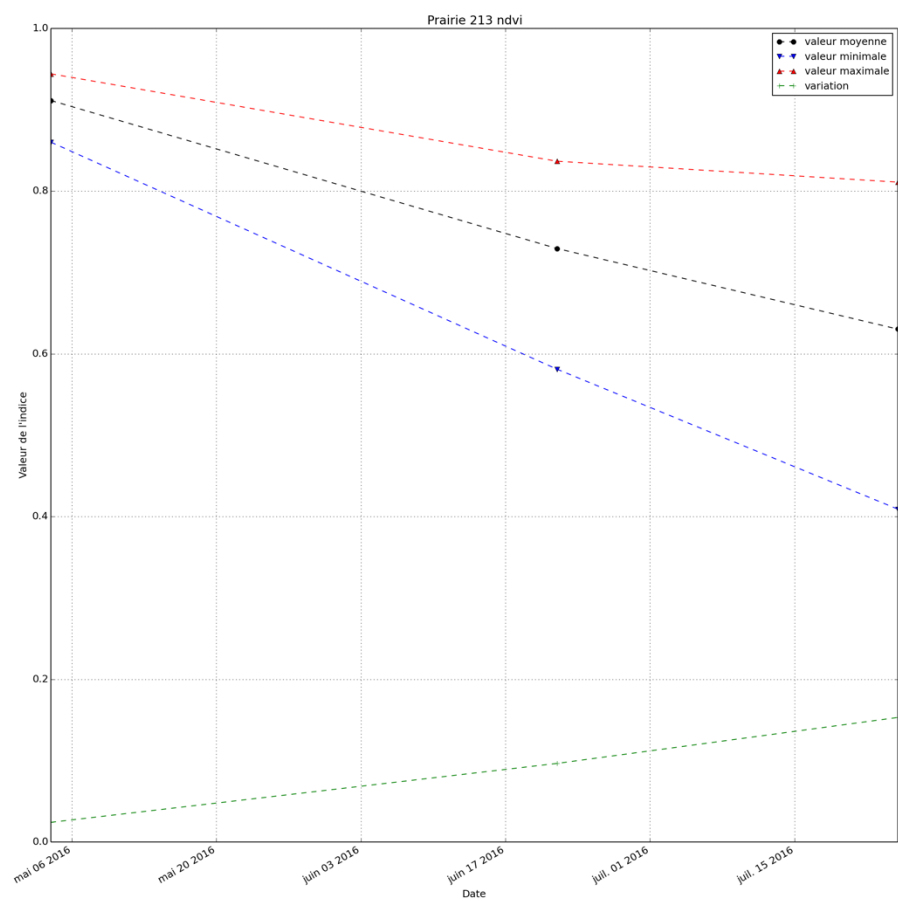


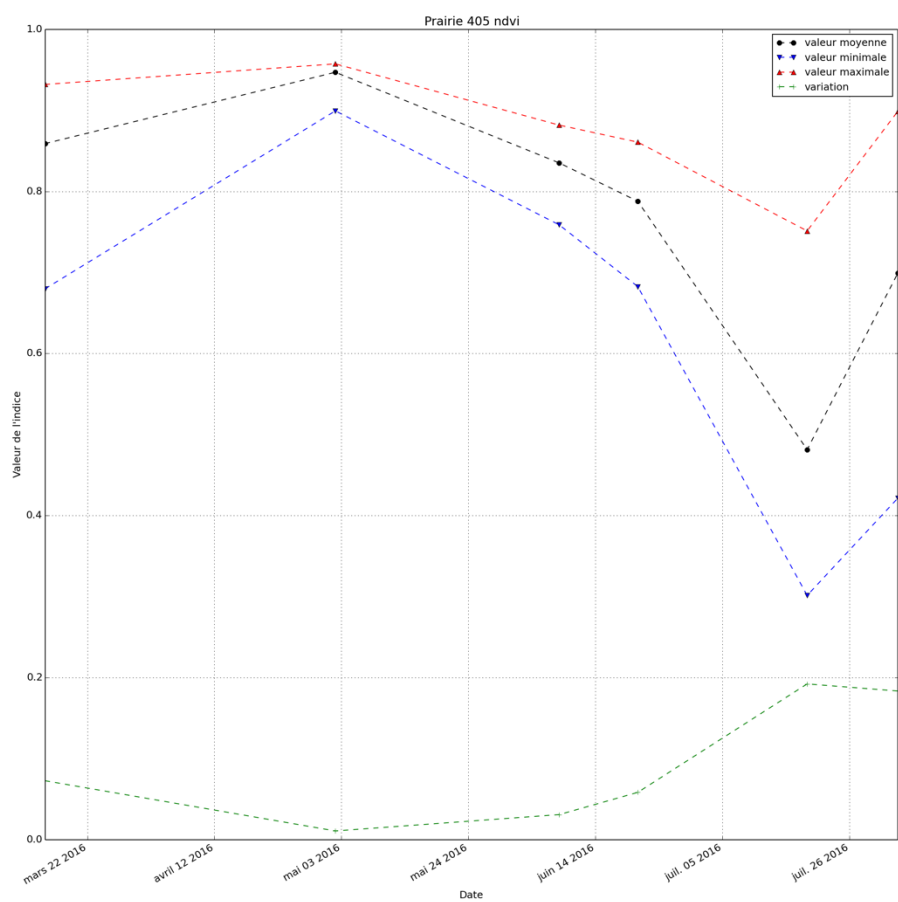
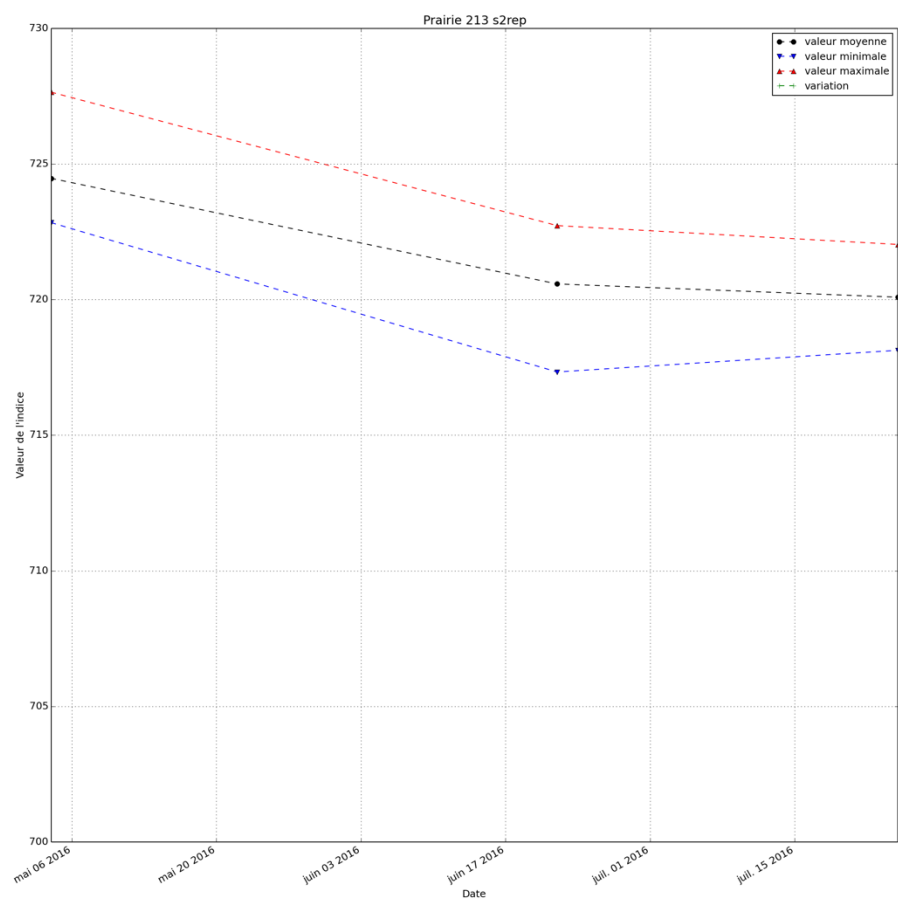


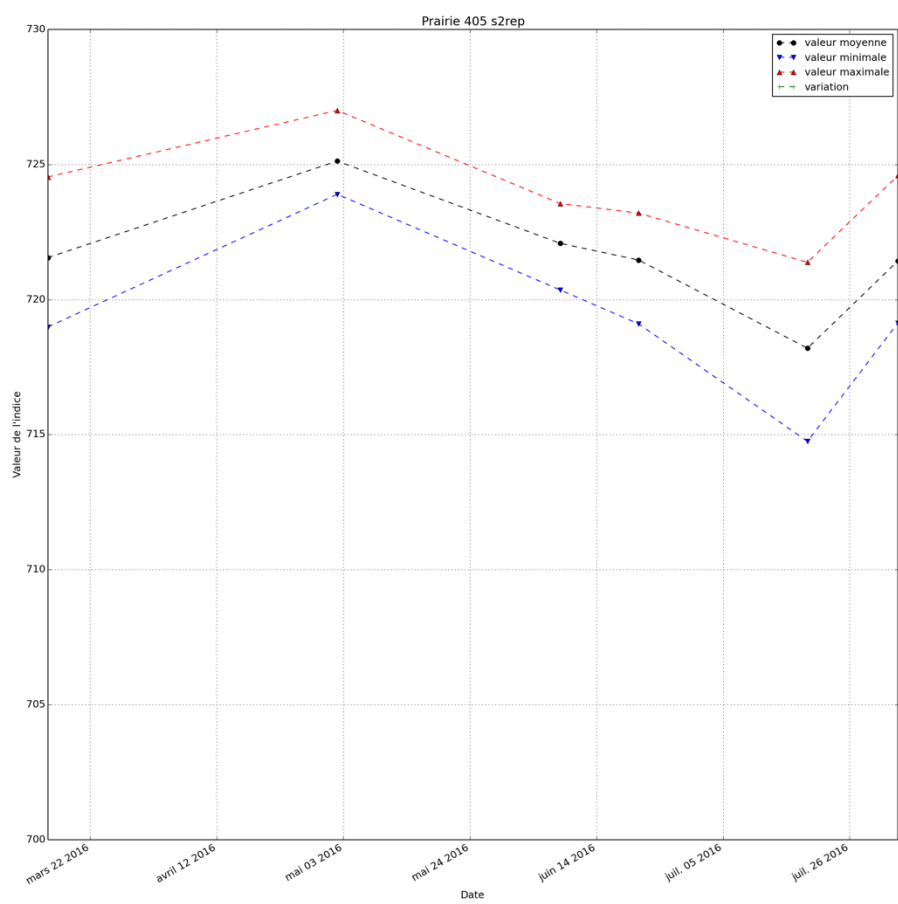
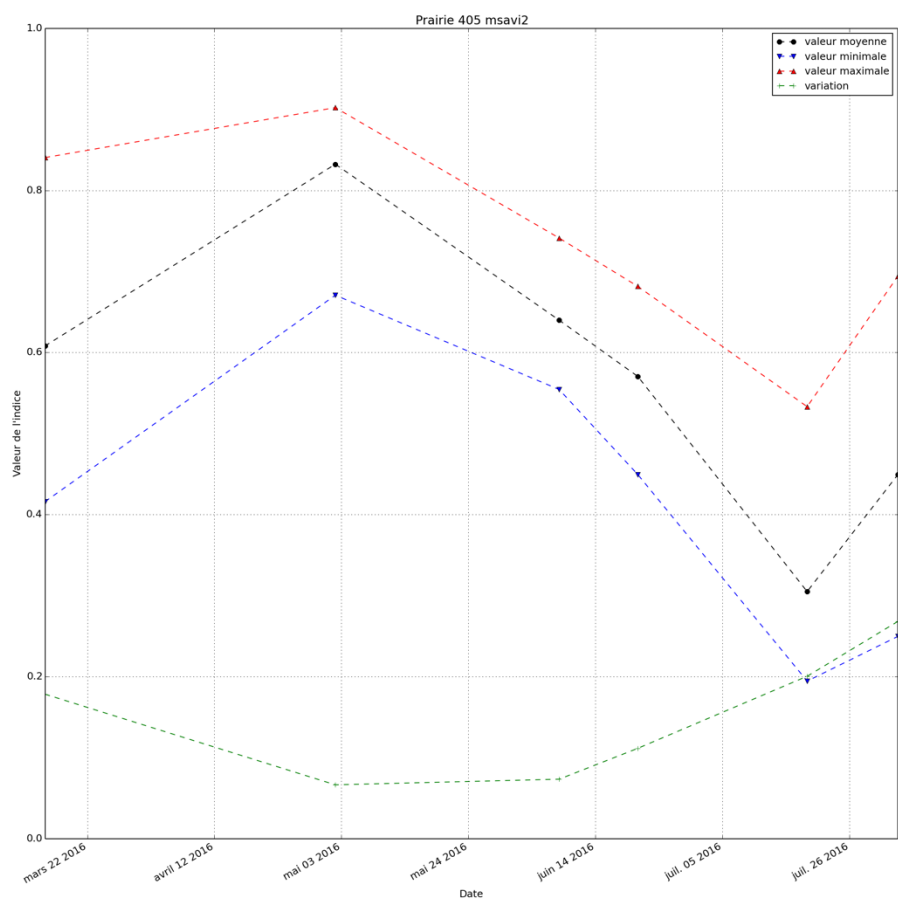


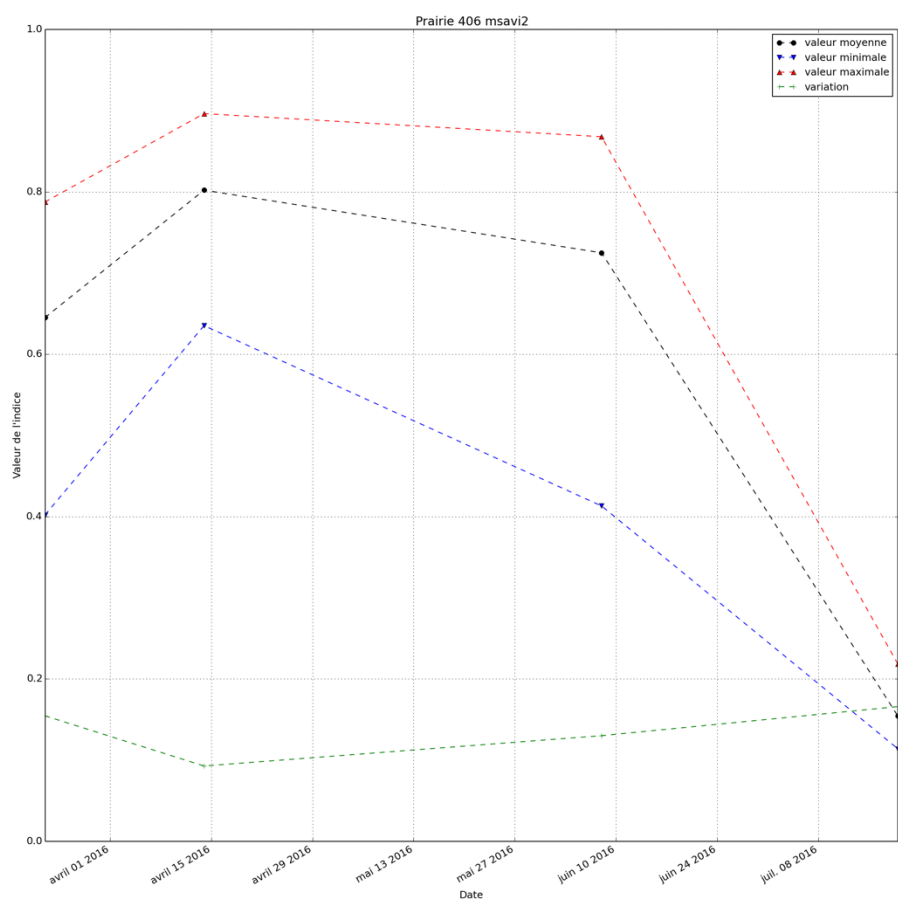
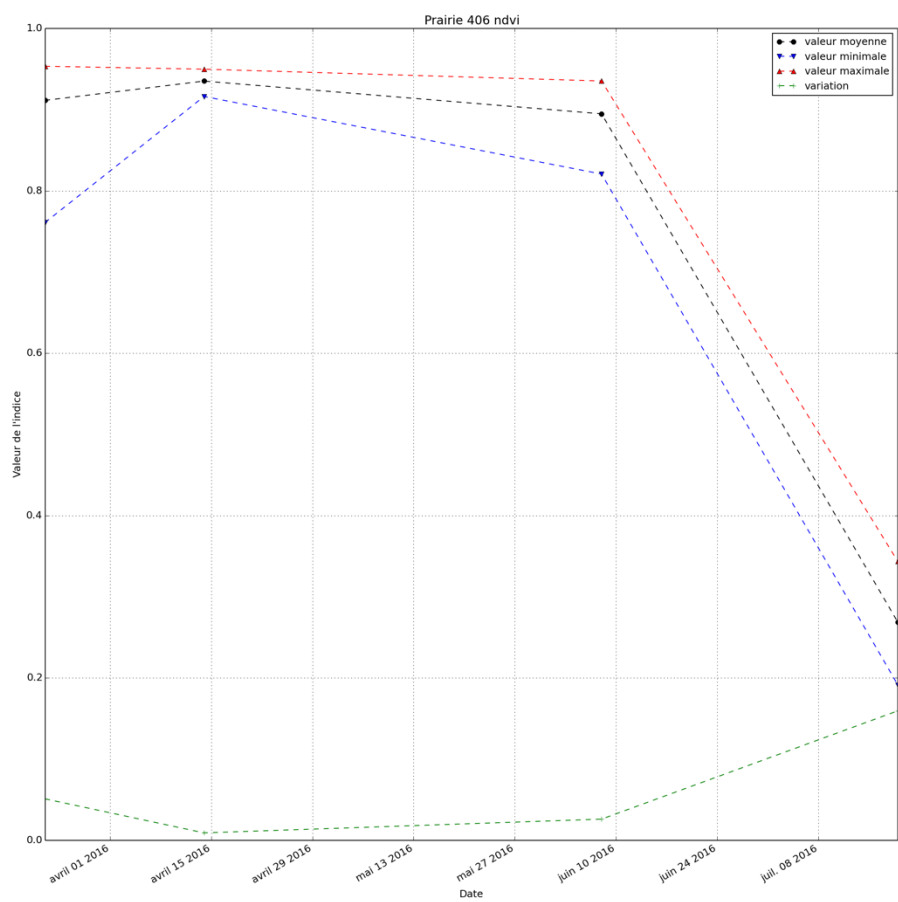


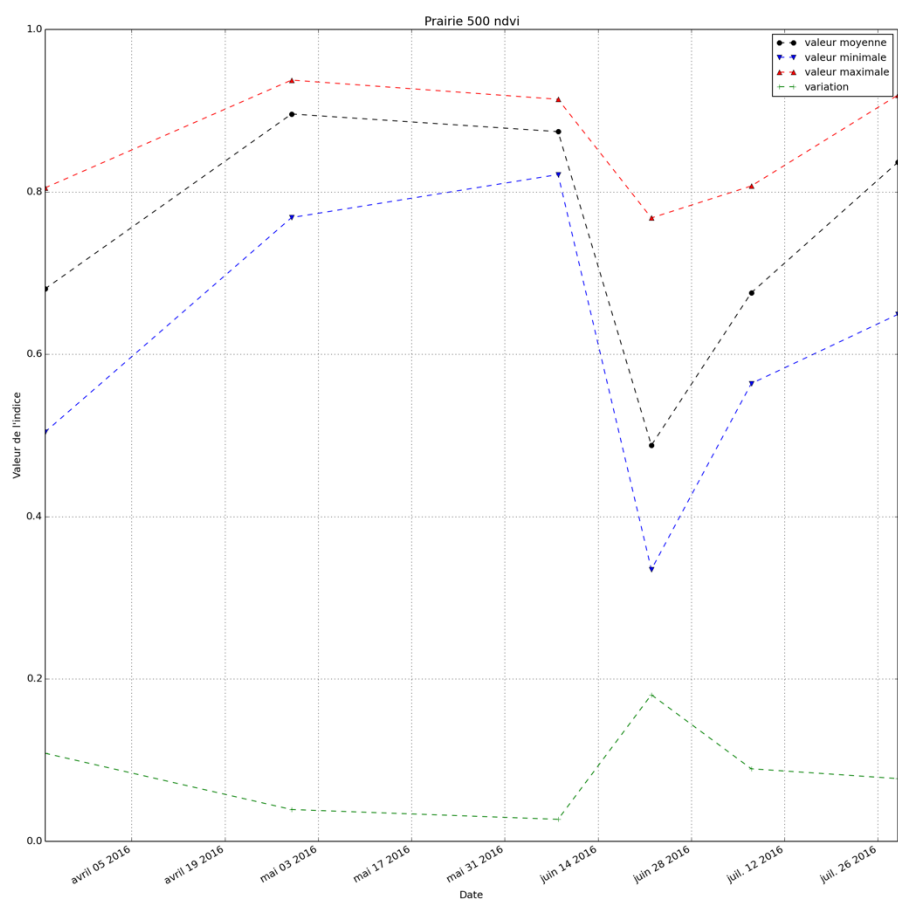
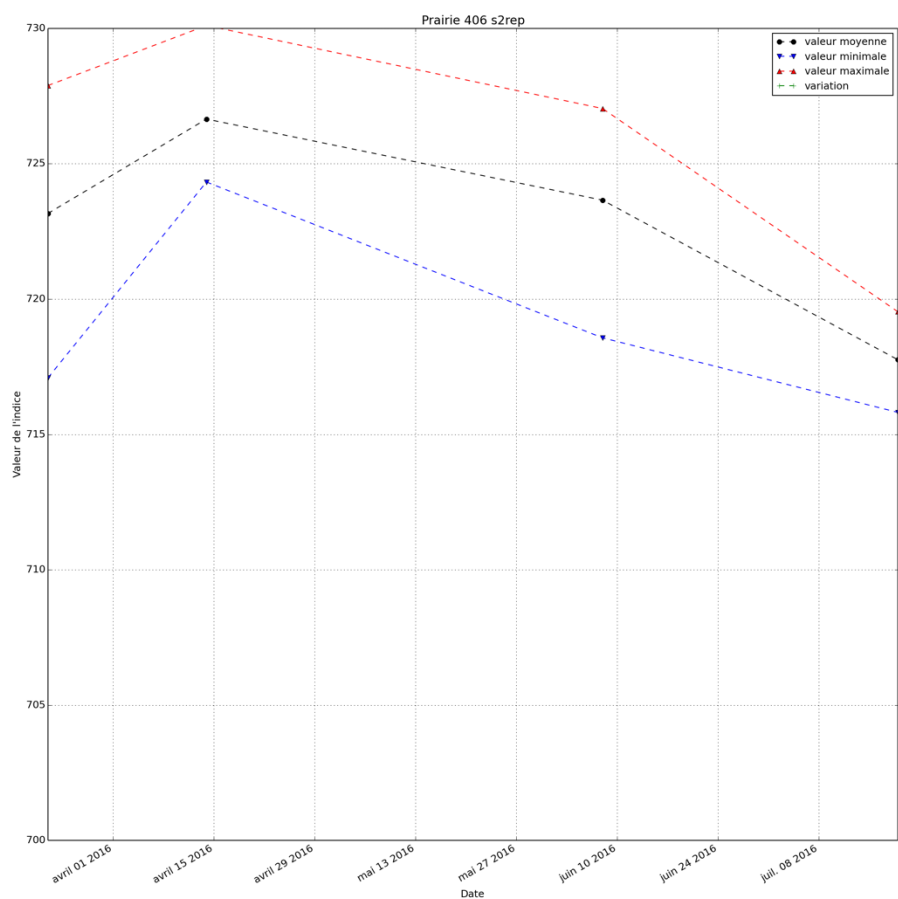


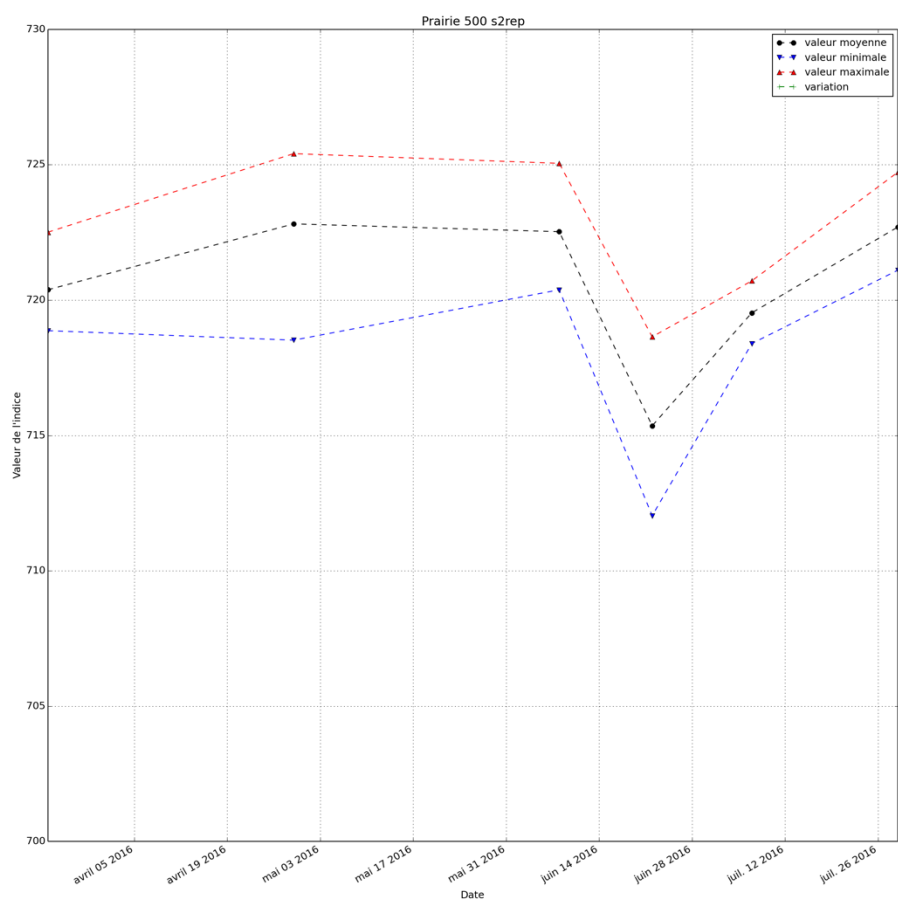
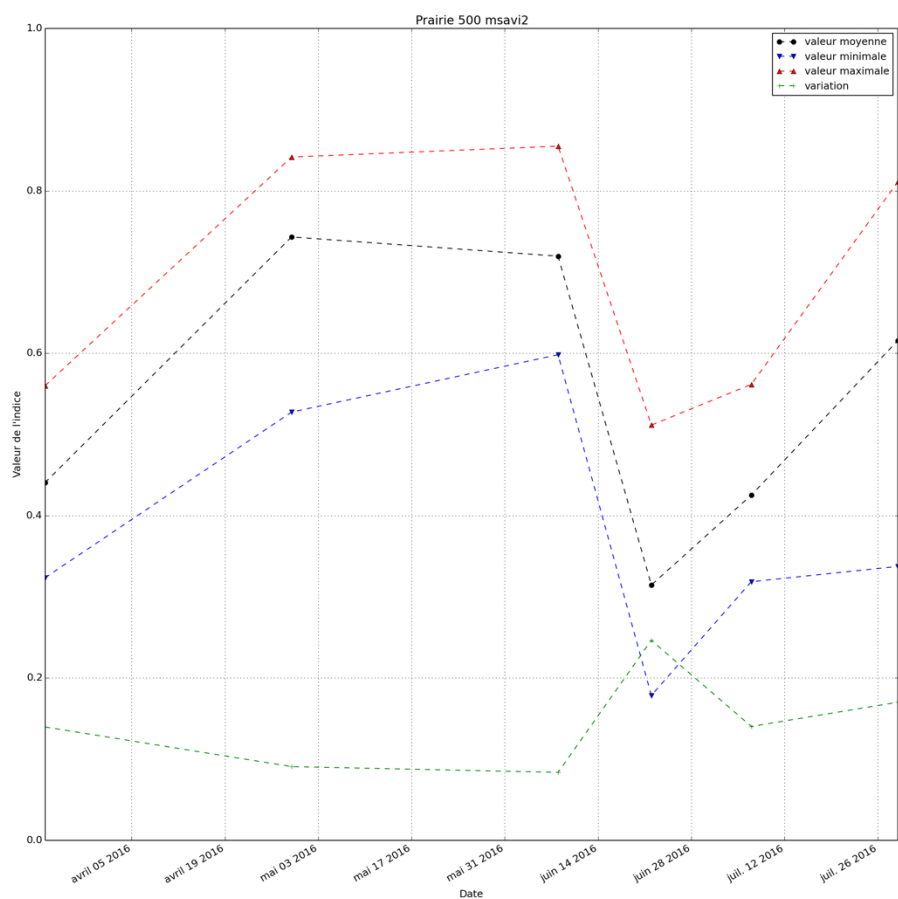












	Diplôme : Master Géographie et Aménagement Spécialité : Géomatique Spécialisation / option : IMAGE Enseignant référent : Johan Oszwald	
Auteur(s) : Donatien Dallery Date de naissance* : 02/07/1991	Organisme d'accueil : UMR DYNAFOR – INRA / INPT de Toulouse Adresse : INRA, 24 chemin de Borde Rouge – Auzeville CS 52627	
Nb pages : 36 Annexe(s) : 44	31326 Castanet Tolosan cedex	
Année de soutenance : 2016	Maître de stage : Mathieu Fauvel	
Titre français : Suivi des prairies par mesures hyperspectrales et série temporelle d'images satellitaires à haute résolution spatiale : influence des modes de gestion sur le signal spectral Titre anglais : Study of grasslands with hyperspectral data and temporal serie of high spatial resolution imagery : influence of agricultural practice on spectral signal		
Résumé (1600 caractères maximum) : Une prairie est un milieu ouvert caractérisé par une végétation majoritairement herbacée pouvant présenter une importante biodiversité. Les modes de gestion déséquilibrent ce milieu physiquement, mais leurs impacts sur la réflectance ne sont pas connus. Ainsi, des mesures hyperspectrales ont permis de suivre l'évolution de la réflectance, mais aussi d'identifier le potentiel de la mission Sentinel-2 pour ce suivi. Dans le cas où aucune gestion n'est appliquée, les prairies deviennent sénescentes jusqu'à la fin de la saison de végétation. La sénescence augmente la réflectance dans le rouge et la diminue dans le proche infrarouge. Les opérations de gestion impactent principalement ces longueurs d'onde. Cet impact s'observe instantanément après la fauche. L'hétérogénéité spectrale des prairies est plus importante après une opération de gestion, particulièrement après une fauche. Les prairies sont alors composées de végétation sénescente, saine et de sol nu. L'impact du pâturage sur la réflectance est plus important par rapport à la fauche. De plus, ces opérations ont pour effet de relancer la croissance de la végétation en diminuant la compétitivité entre la végétation sénescente et sous-jacente. Un suivi hypertemporel est primordial pour identifier ces opérations à partir de la réflectance.		
Abstract (1600 caractères maximum) : Grassland is an open area characterised by the domination of herbaceous vegetation with an important diversity. The management practices disturb grassland physically, but their effect on reflectance isn't known. So, the acquisition of hyperspectral data allows to track the evolution of reflectance and identify the potential of Sentinel-2 mission for this. In the case where no practice is effectuate, the grasslands become senescent in June. The senescence increases the reflectance in red band and decreases near-infrared band. The operations impact this wavelength in particular. This impact can be seen instantly after mowing. The spectral heterogeneity of grasslands can be more important after an operation, particularly after mowing. Grasslands then consist of senescent and healthy vegetation and bare soil. The pasture impact on the reflectance is more important than mowing. Moreover, this operation causes a new vegetation growth by a diminution of competitiveness between senescence and underlying vegetation. An hypertemporal assessment is essential to identifying the grasslands management practices with reflectance.		
Mots-clés : Hyperspectrale, prairies, modes de gestion, Sentinel-2, multitemporel Key Words: Hyperspectral, grasslands, management practices, Sentinel-2, multitemporal		