

CONTRAT DEB15-146

Élaboration d'indicateurs de biodiversité spatiaux-temporels intégrant la télédétection et portrait partiel de la biodiversité du Québec

Chargées de projet

Anouk Simard, Chargée de projet

Direction de la biodiversité et des maladies de la faune
Direction générale sur la faune et ses habitats,
Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs (MFFP),
et

Sabrina Courant, Chargée de projet

Chargée de projets en biodiversité
Direction de l'expertise en biodiversité
Ministère du Développement durable, de l'Environnement
et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC)

Préparé par

Monique Bernier, Chercheuse principale
Professeure en télédétection
INRS Centre Eau Terre Environnement

Maria Dissanska, Associée de recherche
INRS Centre Eau Terre Environnement

Rapport final (étape #4)

INRS R1751

31 octobre 2016

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2016
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-934-0 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2019

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	2
Liste des abréviations et des acronymes.....	4
1. Introduction.....	7
1.1. Portée du rapport sur l'application de protocole de télédétection pour le développement d'indicateurs de biodiversité spatiaux-temporels.....	7
1.2. Objectifs spécifiques.....	7
1.3. Structure du rapport.....	8
1.4. Sites d'étude	8
2. Phénologie de la végétation	13
2.1. Suivi des paramètres phénologique par télédétection	13
2.2. Méthodologie	15
2.2.1. indices de végétation	18
2.2.2. Prétraitement	22
2.2.2.1. Téléchargement.....	22
2.2.2.2. Extraction des couches de NDVI, Fiabilité de pixels et couche contenant l'information avec le jour exact de l'acquisition pour chaque pixel pour chaque période composite	22
2.2.2.3. Création des séries temporelles.....	24
2.2.2.4. Application d'un masque de la région d'intérêt.....	24
2.2.2.5. Création des séries temporelles en format netCDF	25
2.2.2.6. Présélection (FILTRAGE) des données.....	25
2.2.3. Lissage	26
2.2.4. Paramètres phénologiques	32
2.2.5. Validation	35
2.2.6. Analyse	35
2.3. Résultats	36
2.3.1. Début de la saison de croissance	36
2.3.2. Fin de la saison de croissance.....	40
2.3.3. Durée de la saison de croissance.....	43
2.3.4. Le jour de maximum de la saison de croissance	47
2.3.5. Valeur maximale du NDVI	50
2.3.6. Valeur moyenne du NDVI	55

2.3.7. Valeur maximale du NDVI pour la période estivale (juin-juillet- août)	57
2.3.8. Valeur moyenne du NDVI pour la période estivale (juin-juillet- août).....	59
2.3.9. Amplitude	61
2.3.10. Valeur maximale du NDVI (interpolée)	64
2.3.11. Jour de maximum du NDVI (interpolé).....	67
3. Caractérisation de la neige et du couvert de glace	70
4. Conclusion	73
Références.....	75
Annexe I. Photos de la caméra à Umiujaq.....	83

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES

AD	Jour d'acquisition (Acquisition Day)
ArcGIS	Logiciel de cartographie et analyse spatiale de la compagnie ESRI
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i> – Capteur à bord de NOAA satellites
BdQc	Suivi de la biodiversité du Québec
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution</i>
CIS	Service canadien des glaces (Canadian Ice Service)
CV-MVC	<i>Constrained View angle – Maximum Value Composite</i>
EOS	Fin de la saison de croissance (<i>End Of the Season</i>)
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
INRS	Institut national de recherche scientifique
ISIN	<i>Integrated Sinusoïdal Projection</i>
LAI	Indice de surface foliaire
Landsat	Système satellitaire doté d'un capteur optique à haute résolution
LGS	Durée de la saison de croissance (<i>Length of Growing Season</i>)
MA	Milieux aquatiques
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MFFP	Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs
MFo	Milieux forestiers
MH	Milieux humides
MIR	Mid-Infra Red reflectance
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MT	Milieux toundriques
MTQ	Ministère de Transport de Québec

NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (indice de la végétation par différence normalisée)
netCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NIR	<i>Near-Infra Red reflectance</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NPS	<i>National Park Service</i>
PIR	Proche infrarouge, bande du spectre électromagnétique (0,7 - 1,1 μm)
QA	<i>Quality Assurance rank</i>
QuickBird	Satellite doté d'un capteur optique à très haute résolution
QuickSCAT	<i>Quick Scatterometer</i> - Mission satellitaire de la NASA, équipée avec un capteur microonde actif (SeaWinds)
RADAR	« <i>Radio Detection And Ranging</i> » - Capteurs opérant dans la partie du spectre électromagnétique couvert par les micro-ondes (1 mm à 1 m) -
RADARSAT	Satellites de l'Agence spatiale canadienne équipé d'un radar à synthèse d'ouverture
SAVI	<i>Soil adjusted Vegetation Index</i>
SDS	<i>Scientific Data Sets</i>
Sentinel	Constellation satellitaire de l'Agence Spatiale Européenne
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre - une famille de satellites développés par le Centre national d'études spatiales français.
SSM/I	<i>Special Sensor Microwave Imager</i> , Capteur microonde passif à bord de satellites du <i>Defense Meteorological Satellite Program</i> (DMSP)
SOS	Début de la saison de croissance (<i>Start Of the Season</i>)
SAR	Radars à synthèse d'ouverture
SIG	Système d'information géographique
Terra	Satellite américain d'observation de la Terre opéré par NOAA

TerraSAR-X	Satellite radar d'observation de la Terre de l'Agence spatiale allemande (DLR).
Tif	Format de fichier graphique (<i>Tagged Image File Format</i>)
VIS	Partie visible du spectre électromagnétique (~ 0,39 - 0,7 μm)
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

1. INTRODUCTION

1.1. PORTÉE DU RAPPORT SUR L'APPLICATION DE PROTOCOLE DE TELEDETECTION POUR LE DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS DE BIODIVERSITE SPATIAUX-TEMPORELS

Ce rapport fait suite aux travaux réalisés dans le cadre du contrat (DEB15-146) dont l'objectif principal était de valider les indicateurs de biodiversité issus des données de la télédétection sélectionnés par des groupes d'experts pour quatre différents milieux (les milieux humides (MH), forestiers (MFo), toundriques (MT) et aquatiques (MA; lacs et rivières), ainsi que les indicateurs de télédétection composites pour l'ensemble du Québec. Dans ce rapport, nous démontrons leur potentiel en appliquant un protocole à partir d'images satellites gratuites.

À l'étape précédente, un inventaire des données/produits existants et disponibles issus de la télédétection a été réalisé [Bernier et al, 2016]. Suite à une discussion de leur pertinence et de leur utilité potentielle pour les objectifs du projet de réseau de suivi de la biodiversité (Suivi BdQc), deux indicateurs ont été choisis pour démontrer le potentiel des données de télédétection : la phénologie de la végétation (**I1**) et le couvert nival (**I7**).

Ces deux indicateurs sont directement liés aux variations climatiques. Ainsi, leur suivi est d'intérêt particulier pour la biodiversité, car les changements observés pourraient avoir un impact direct sur l'utilisation des habitats – de reproduction, de repos et d'alimentation. Vue l'immensité du territoire visé par Suivi BdQc et l'accès limité dans les zones éloignées, la télédétection est le seul moyen qui permet d'obtenir une vue d'ensemble et de suivre ces indicateurs de manière régulière et à un coût raisonnable.

1.2. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

La quatrième et dernière étape de ce contrat visait trois objectifs spécifiques, notamment :

- 1) développer la méthodologie pour le traitement et l'analyse des produits MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*);
- 2) décrire le protocole à suivre afin d'avoir une démarche facile à reproduire;
- 3) appliquer le protocole sur des séries d'images afin d'extraire un portrait sommaire des indicateurs sélectionnés (**I1** et **I7**).

Cette étape d'application permet d'initier la création d'un bilan des changements observés pour ces indicateurs pour une région donnée et permet d'évaluer la faisabilité et l'effort requis pour un suivi des indicateurs choisis.

Plus précisément, ce rapport présente le protocole spécifique développé pour l'extraction des paramètres phénologiques (**I1**) de la végétation (par exemple, début, fin et longueur de la saison de croissance) à partir des produits MODIS VI (i.e. NDVI, image composite 16 jours, résolution spatiale de 250 m). Ce rapport présente aussi les résultats d'application du protocole développé pour deux zones nordiques situées près de la limite de la toundra forestière et de la toundra arctique arbustive. Pour valider la fiabilité des résultats, des photos prises par une caméra d'observation située sur la côte (suivi de la glace de mer) et installée par l'INRS comme mandataire du MTQ et de l'Administration régionale de Kativik dans le village nordique d'Umiujaq (Nunavik), ont été utilisées. Cependant, dues aux contraintes de temps et d'argent alloué pour le contrat, le protocole pour le deuxième indicateur (**I7**, couvert nival) n'a pu être complété et appliqué.

1.3. STRUCTURE DU RAPPORT

Ce rapport contient trois chapitres et une annexe. Suite à l'introduction, le second chapitre présente une description de la phénologie de la végétation du point de vue de la télédétection, les données satellitaires utilisées, les sites d'application du protocole, la méthodologie d'extraction d'information retenue et automatisée (programmée avec PYTHON) et les résultats de l'approche sur des tuiles sélectionnées. Le troisième chapitre décrit les produits disponibles pour suivre le second indicateur (I7, phénologie du couvert nival) par télédétection.

Le rapport se termine par une conclusion et des recommandations. L'Annexe 1 montre les photos in-situ prises en 2010 et 2015 sur l'une des tuiles. Le code PYTHON développé pour le traitement et l'extraction des paramètres phénologiques est documenté sous pli séparé.

1.4. SITES D'ÉTUDE

Les deux sites, P1 et P2 (Figure 1), où le protocole d'extraction des paramètres phénologiques développé a été testé, se trouvent dans la zone de limite nordique des arbres, notamment à la limite des domaines bioclimatiques de la toundra forestière et la toundra arctique arbustive. Ces deux sites ont été choisis pour évaluer la méthodologie proposée, car la végétation de cette zone est très sensible aux changements climatiques.

Tableau 1. Sites d'étude

Site	Latitude	Longitude	Superficie
P1	55°15'20''	75°10'36''	50 x 50 pixels
P2	56°33'22''	75°52'48''	50 x 50 pixels

Le domaine bioclimatique de la toundra forestière est l'écotone, ou transition, entre la zone boréale et la zone arctique. Il s'étend approximativement¹ du 55^e jusqu'au 58^e parallèle. Le paysage est dominé par des landes arbustives, entrecoupées de forêts dans les sites abrités. On y trouve surtout des peuplements d'épinettes noires rabougries, qui ne mesurent pas plus de trois mètres de hauteur.

Le domaine bioclimatique de la toundra arctique arbustive s'étend du 58^e jusqu'au 61^e parallèle approximativement¹. La toundra arctique arbustive est un milieu caractérisé par l'abondance d'affleurement rocheux, l'absence d'arbres et une dominance de la végétation haute de seulement quelques centimètres (des graminées pour la plupart, ainsi que des lichens et des mousses) et des arbustes de petite taille (les saules et les bouleaux nains).



Figure 1. Localisation de sites d'étude P1 et P2

¹ <https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp#toundraForestiere>

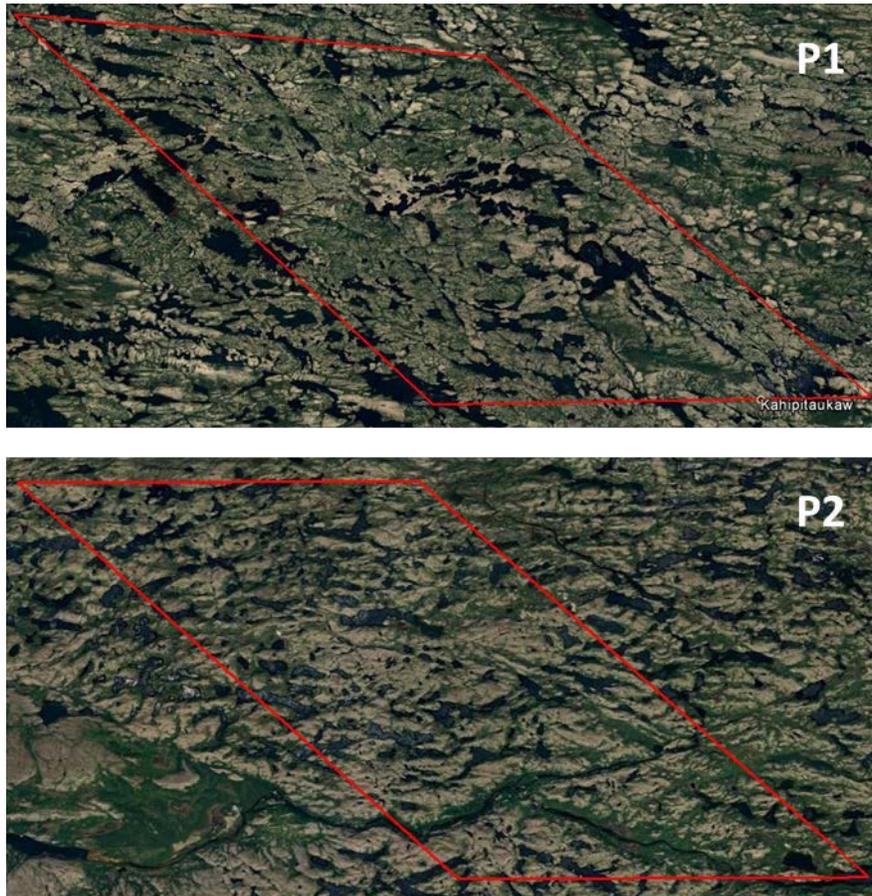


Figure 2. Sites d'étude P1 et P2 (Image Landsat, Google Earth)

Les facteurs climatiques, caractérisés par des faibles températures, des faibles précipitations - 150 à 250 millimètres incluant les précipitations solides (neige)-, des vents violents ainsi qu'une courte photopériode hivernale, limitent le développement de la végétation. Compte tenu de ces facteurs limitants, le sol est très lent à se former et la couche active est très mince (de 25 à 100 cm)². Peu d'espèces sont en mesure de s'adapter pour survivre dans la toundra. La petite taille de la végétation est une adaptation au microclimat plus favorable près du sol à l'abri des vents violents, tout en bénéficiant du réchauffement du substrat par le soleil. Certaines espèces d'arbres/arbustes poussent à l'horizontale, et non vers le haut. De cette manière, la couverture de neige les protège pendant l'hiver. Les plantes de la toundra doivent pousser rapidement pendant le peu de temps permis par la température et la lumière. Malgré les étés courts, les journées sont plus longues et certaines plantes peuvent pousser et se développer très rapidement³.

² <http://www.hww.ca/assets/pdfs/factsheets/tundra-fr.pdf>

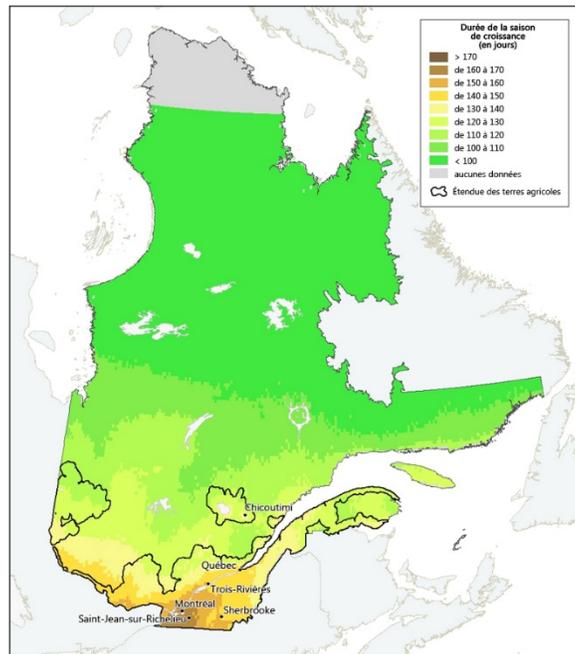


Figure 3. Durée de la saison de croissance de 1971 à 2000 au Québec³

Plusieurs études récentes ont constaté un verdissement (changement de NDVI) pan-Arctique (Myneni *et al.*, 1997; Olthof *et al.*, 2008; Stow *et al.* 2004; Fraser *et al.*, 2011; Beck et Goetz, 2011). Elles rapportent que ces changements sont principalement attribuables à l'expansion et à la densification de la toundra arbustive (saules, aulnes et petits bouleaux) provoquées par le réchauffement climatique (Duguay *et al.*, 2015; Provencher-Nolet *et al.*, 2014; Ropars et Boudreau, 2012, McManus *et al.*, 2012, Epstein *et al.*, 2015). Une étude toute récente, réalisée avec des séries d'images Landsat 5 et Landsat 7, couvrant l'Alaska et le Canada sur une période de 32 ans (de 1984 à 2012), a démontré que le changement dans la végétation durant ces décennies est plus prononcé au Nord du Québec (Junchang et Masek, 2016).

Cependant, malgré la cohérence des changements observés dans la composition et la structure de la végétation à haute latitude avec le réchauffement climatique récent, l'expansion des arbustes est assez hétérogène et dépend d'autres facteurs biotiques et abiotiques : la pente, l'élévation, le dépôt de surface, le changement du couvert nival, les perturbations dues au dégel du pergélisol et aux feux, la couverture initiale des arbustes, etc. (Lantz et al.; Raynolds et al. 2013; Tape et al. 2012; Ropars et Boudreau, 2012). Tape et al. (2006) ont observé que la plus forte augmentation de la couverture arbustive se produit dans les plaines inondables et le long des pentes des vallées et que les changements sont minimes sur les interfluves. Tape et al. (2011) ont utilisé des images Landsat TM de 1986 et 2009 pour évaluer l'expansion d'arbustes hauts dans le nord-est de l'Alaska. Ils ont constaté que les grands arbustes occupaient des plaines d'inondation et le long des réseaux d'écoulement en 1986 et ont élargi leur couverture le long de ces couloirs.

³ <http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/pratiques-agricoles/agriculture-et-climat/perspectives-d-avenir/scenarios-de-changements-climatiques/duree-de-la-saison-de-croissance-au-quebec/?id=1363104198111>

D'autres études ont constaté que la colonisation des sites passés au feu est plus rapide (Payette *et al.*, 2008). Pour beaucoup de sites subarctiques étudiés, les spécialistes constatent l'avancement de la limite des arbres et le déplacement vers le nord de la forêt boréale (Tremblay *et al.*, 2012; Dufour-Tremblay *et al.* 2012, Lantz *et al.*, 2013).

La transformation de la toundra modifie aussi la réflexion de la lumière solaire qui provoque une rétroaction positive contribuant aussi au réchauffement (Sturm *et al.*, 2005; Chapin *et al.*, 2005; Euskirchen *et al.*, 2016). Ces changements du paysage peuvent provoquer des changements chez les espèces animales qui l'habitent en modifiant leur survie, leur reproduction et leur croissance.

2. PHÉNOLOGIE DE LA VÉGÉTATION

2.1. SUIVI DES PARAMÈTRES PHÉNOLOGIQUE PAR TÉLÉDÉTECTION

La phénologie représente la dynamique saisonnière de la végétation. La température et les précipitations (la disponibilité de l'eau) sont les facteurs principaux qui contrôlent la saisonnalité du développement de la végétation. Plusieurs études ont associé le changement de la longueur de la saison de croissance avec des changements climatiques et écologiques (Walther *et al.*, 2002). Ainsi, la phénologie de la végétation est un indicateur efficace pour le suivi de la dynamique des écosystèmes en réponse aux changements climatiques.

Dans le sens traditionnel, la phénologie est définie comme des événements spécifiques dans le cycle de vie des espèces végétales individuelles observées in situ. Cependant, la phénologie observée par les moyens de la télédétection est une information agrégée à l'échelle de la résolution spatiale du capteur satellitaire. De plus, pour le suivi de la phénologie à l'aide de la télédétection, un certain nombre d'images acquises au cours d'une saison végétative est nécessaire afin de détecter les éléments principaux dans le développement de la végétation. Ainsi, les images à plus haute fréquence temporelle sont essentielles afin de capturer les moments principaux du développement saisonnier de la végétation. Afin de détecter les tendances et d'éviter d'évaluer la variabilité interannuelle typique pour ces indices, l'existence de longues séries de données est également de grande importance.

Dans les dernières décennies, différents indices de végétation (p.ex. NDVI, EVI, SAVI, LAI, etc.) ont été développés pour le suivi de l'état de la végétation. Les indices de la végétation sont des mesures radiométriques combinant plusieurs bandes spectrales, afin de maximiser le signal de la végétation à partir des pixels avec une signature mixte (produite par plusieurs types de couvert terrestre recouvert par le pixel) et de minimiser l'effet du type ou de la nature (texture, couleur) du sol. Par exemple, un arbre d'une même espèce sera « observé » d'un satellite de manière très différente s'il pousse sur un sol rocailleux versus un sol herbacé.

Un des indices le plus fréquemment utilisé est l'indice de différence normalisée de la végétation (NDVI), basé sur la réflectance de la végétation dans les bandes spectrales rouge et proche infrarouge enregistrées par la plupart des capteurs optiques (Rouse *et al.*, 1973):

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{pir}} - \rho_r) / (\rho_{\text{pir}} + \rho_r) \quad \text{Éq. 1}$$

où ρ_{pir} est la réflectance dans la bande proche infrarouge et ρ_r est la réflectance dans la bande rouge. Cet indice est fortement lié à la physiologie de la végétation, car la chlorophylle des plantes absorbe la radiation solaire dans la bande rouge tandis que la radiation dans la bande proche infrarouge est réfléchiée. Par conséquent, le contraste de la réponse entre ces deux bandes est une mesure sensible à l'état et l'abondance de la végétation. Ainsi, la végétation en santé présente un NDVI élevé. Le NDVI varie de -1.0 à 1.0. Les valeurs près de zéro caractérisent les surfaces non-végétalisées (roches, sol nu, eau, nuages, neige, glace).

Le NDVI est bien adapté pour détecter la différence subtile de la couverture végétale clairsemée (Leaf area index (LAI) entre 0 et 2) et constitue ainsi un indice sensible de croissance chez les jeunes cultures, les prairies et les régions semi-arides (Gamon *et al.*, 1995). Cependant, cet indice de végétation a une sensibilité réduite dans les zones à biomasse élevée (par ex. la forêt tropicale), à cause de la faible variation dans la bande spectrale rouge. Par conséquent, le NDVI est « saturé », i.e. la valeur du NDVI varie peu malgré une densité foliaire croissante. Dans ces conditions, le lien entre NDVI et différentes propriétés biophysiques de la végétation, telles l'abondance, la LAI, la productivité, la biomasse, ou l'état des cultures agricoles, n'est plus linéaire et il est plus difficile d'estimer ces paramètres (Huete *et al.* 1997; Kouadio *et al.*, 2014). La saturation du NDVI peut aussi avoir un impact sur l'estimation des paramètres phénologiques durant la période de maximum du développement de la végétation. Cependant, les périodes de production foliaire et de sénescence ne sont pas affectées (Wang *et al.* 2005). Malgré cette faiblesse, le NDVI est largement utilisé pour le suivi des différentes propriétés biophysiques de la végétation (Asrar *et al.*, 1984; Myneni *et al.*, 1995; Hicke *et al.* 2002; Wang *et al.*, 2005; Kouadio *et al.*, 2014; Goswami *et al.*, 2015).

Les données NDVI dérivées principalement des données du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), à bord des satellites NOAA, sont les plus utilisées car elles offrent les plus longues séries de données (environ 36 années). Cependant, ce capteur n'a pas été conçu pour le suivi de la végétation et souffre des deux limitations principales: 1) sa bande proche infrarouge (0.725 - 1100 μm) est plus large et recouvre une partie du spectre (0.9 à 0.98 μm) où l'absorption de la vapeur d'eau est considérable; 2) la saturation de la bande rouge, donc du NDVI, est relativement rapide pour les zones à végétation plus dense (Fensholt et Sandholt, 2005).

Par contre, le capteur MODIS propose quelques améliorations par rapport au capteur AVHRR, ce qui fait de lui un meilleur choix pour le suivi de certains indicateurs de biodiversité d'intérêt pour le suivi BdQc. Plus particulièrement, MODIS propose une meilleure:

- résolution spectrale,
- résolution radiométrique (12-bit vs 10-bit pour AVHRR),
- résolution spatiale (250 m vs 1km pour AVHRR),
- géolocalisation,
- une calibration à bord du satellite, ce qui produit des mesures de réflectance plus précises.

Avec ses 36 bandes spectrales étroites, ce capteur a été spécialement conçu pour le suivi de la végétation et d'autres types de couverture terrestre (Fensholt et Sandholt, 2005). Les bandes spectrales plus étroites permettent d'éviter les parties du spectre où l'absorption de la vapeur d'eau est élevée. De plus, la plus haute résolution radiométrique améliore la sensibilité aux variations de la chlorophylle et diminue la saturation pour les zones à végétation dense. La haute

résolution temporelle des images MODIS contribue aussi à la pertinence de ce type de données pour le suivi de la phénologie de la végétation. Les séries temporelles de NDVI permettent d'estimer 12 indicateurs annuels de la phénologie (Reed *et al.*, 1994). Ces paramètres peuvent être divisés en trois catégories :

A. Temporaux

1. Moment du début de la saison de croissance (jour de l'année);
2. Fin de la saison de croissance (jour de l'année);
3. Longueur de la saison de croissance (jours);
4. Moment du maximum de l'activité photosynthétique (jour de l'année);

B. Niveau de l'activité photosynthétique (valeur de NDVI)

1. Niveau de l'activité photosynthétique au début de la saison de croissance (NDVI);
2. Niveau de l'activité photosynthétique à la fin de la saison de croissance (NDVI);
3. Niveau maximal de l'activité photosynthétique (max NDVI);
4. Amplitude de l'activité photosynthétique par rapport à une référence (*scaled NDVI*);

C. Caractéristiques des séries temporelles

1. Activité photosynthétique durant toute la saison de croissance (*time-integrated NDVI*).
2. Taux de verdure - Accélération de la photosynthèse (*Rate of greenup*)
3. Taux de sénescence - Décélération de la photosynthèse (*Rate of senescence*)
4. Modalité - Périodicité de l'activité photosynthétique

Ces paramètres sont des outils efficaces pour détecter les tendances dans la phénologie des végétaux. Cependant, un certain degré d'incertitude et de variabilité entre les données issues de différents capteurs, tels que AVHRR, MODIS, Landsat et Quickbird, est souvent rapporté (Théau *et al.*, 2010; Abuzar *et al.*, 2014, Hirano et Batbileg, 2014). Il est important de valider les paramètres estimés à partir des images satellites avec des données in situ pour différents milieux (forêt, toundra, etc.). Une première validation a été faite avec des photographies in situ que l'INRS avait à sa disposition (2.2.5). Dans le futur, le Suivi BdQc pourra valider les produits à partir des données et photographies in-situ recueillies au niveau des sites de suivi.

2.2. MÉTHODOLOGIE

Les données obtenues par satellite ne sont pas dans un format qui peut être facilement utilisé comme un indicateur de biodiversité (Secades *et al.*, 2014) et nécessitent quelques manipulations algorithmiques afin de devenir un indicateur (Strand *et al.*, 2007). La donnée seule mesurée (ou observée) devient un indicateur à partir du moment où elle est associée à un effet ou qu'elle est utilisée pour faire un diagnostic (AAMP, 2015).

La méthode que nous proposons est basée sur l'extraction des paramètres phénologiques à partir des séries temporelles de NDVI issues des produit MODIS (SÉRIE 13, 16 jours, images composites, résolution 250 m, Version 6).

Le traitement a été réalisé avec les outils de programmation PYTHON et ArcPy afin d'intégrer le code développé dans une éventuelle *Boîte à outils* ArcMap avec d'autres indicateurs de télédétection pour les besoins du Suivi BdQc. De cette manière, l'outil serait facile à utiliser et le traitement des images se ferait de manière automatique sans nécessiter d'être spécialiste pour le réaliser. Ce travail a été inspiré par « MODIS Phenology Image Service ArcMap Toolbox »⁴ (National Park Service (NPS), U.S. Geological Survey (USGS), National Aeronautics and Space Administration (NASA)).

Les principales étapes du traitement sont résumées à la Figure 4. La description plus détaillée de chacune de ces étapes est présentée dans les sections suivantes du rapport.

⁴ (<https://my.usgs.gov/catalog/PhenolImageServer>)
https://www.nps.gov/gis/remote_sensing/rss/documents/20140212KMJames_RSS_Feb.pdf

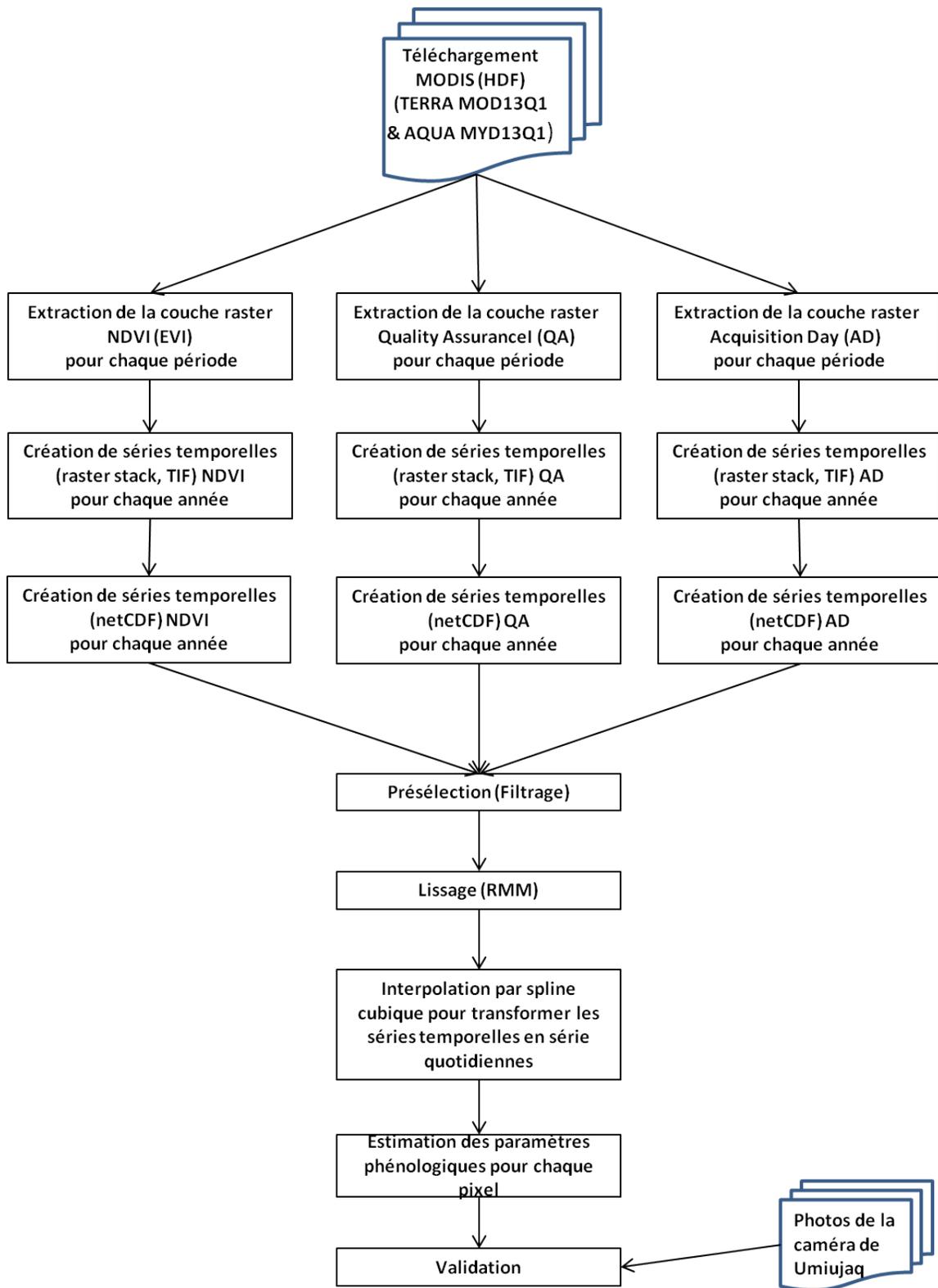


Figure 4. Les étapes de traitement des produits MODIS VI (MOD13Q1 et MYD13Q1) et d'extraction des paramètres phénologiques.

2.2.1. INDICES DE VÉGÉTATION

Lors des discussions avec le Comité de suivi BdQc, les produits MODIS VI (MOD13Q1 et MYD13Q1, Version 6) ont été choisis comme les plus pertinents pour le suivi de la phénologie de la végétation. Les données du capteur MODIS à bord de deux satellites de NOAA, Terra et Aqua, proposent un bon compromis entre la résolution spatiale (250 m) et temporelle pour le suivi de la phénologie d'une région donnée. Avec une fréquence temporelle d'une journée, ces images offrent plus de chance d'acquérir un nombre suffisant d'images sans nuage. L'avantage des produits issus des images MODIS par rapport aux images brutes est qu'elles ont subi un certain prétraitement basé sur des algorithmes déjà approuvés pour leur efficacité. De plus, les séries temporelles générées par ces produits sont moins bruitées par rapport aux données quotidiennes (Hmimina *et al.*, 2013; Testa *et al.*, 2014).

Les deux indices de végétation (NDVI et EVI) des produits MODIS VI (série MOD13Q1 et MYD13Q1) sont calculés à partir de la réflectance composite de 8 jours de MODIS (MOD09Q1 et MYD09Q1, à une résolution spatiale de 250 m, sauf pour la bande bleu dont la résolution est de 500 m laquelle est utilisée pour calculer l'EVI). Les produits de série 9 sont de niveau L2, c.-à-d. qu'un prétraitement (correction atmosphérique, radiométrique, géométrique, etc.) a été déjà appliqué. Comme les orbites se superposent, il est possible que plusieurs observations soient acquises le même jour pour un pixel donné. Cependant, dû au couvert nuageux, les observations utilisables sont parfois réduites. En utilisant des images composites de 8 jours, des filtres basés sur la qualité des données ont été appliqués pour choisir des données sans nuage, avec un angle d'observation plus près du nadir, ainsi qu'un minimum de réflectance dans la bande bleu afin de minimiser l'effet des aérosols et d'autres composantes dans l'atmosphère. La réflectance composite est ensuite utilisée pour calculer le NDVI pour chaque pixel et créer des données composites de 16 jours (Didan *et al.*, 2015).

Finalement, une procédure nommée CV-MVC (*Constrained View angle – Maximum Value Composite*) a été appliquée, laquelle associe la valeur ayant le maximum de NDVI et l'angle d'observation minimal à chaque pixel afin de représenter le NDVI pour chacune des périodes des 16 jours (Didan *et al.*, 2015; Holben, 1986).

Ces données sont déposées sur le site ftp de la NASA (pour Terra et Aqua)⁵ et sont accessibles gratuitement. Afin de conserver une taille de fichiers raisonnable, ces données sont sous forme de tuiles, qui ne se superposent pas en format HDF-EOS (Hierarchical Data Format, *.hdf). Chacune de tuiles couvre environ 1200 km x 1200 km (à l'équateur) et sont en projection ISIN (*Integrated Sinusoïdal Projection, Datum WGS84*). Les tuiles qui contiennent uniquement de l'eau ne sont pas traitées. Comme il est illustré à la Figure 5, le territoire du Québec est recouvert par cinq (5) de ces tuiles : notamment h14v02, h14v03, h13v03, h13v04 et h12v04.

⁵ <ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/6/>

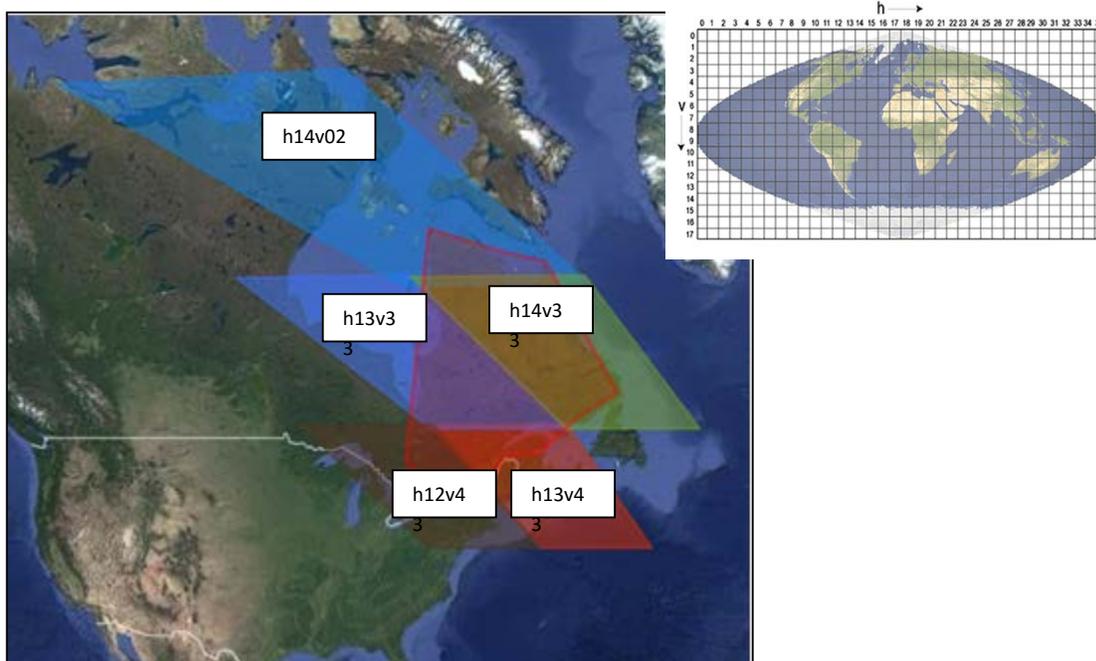


Figure 5. Le territoire entier du Québec est couvert par 5 tuiles des produits MODIS VI (h14v02, h14v03, h13v03, h13v04 et h12v04).

Chaque tuile est constituée de 12 couches (Tableau 2), des données SDS (*Scientific Data Sets*) fournissant deux indices de végétation, quatre autres couches présentant la réflectance dans les bandes 1,2,3, et 7 utilisées pour calculer les Indices de végétation, ainsi que des couches d'information sur l'angle d'observation, l'angle d'illumination (zénith du Soleil), le jour réel d'acquisition pour chaque pixel, et de l'information concernant la fiabilité de données pour chaque pixel (sommaire et détails). Les lignes en rouge dans le Tableau 2 correspondent aux couches SDS utilisées pour la présente étude. Donc, les données **MOD13Q1** (MODIS/Terra *Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m Grid SIN Version 006*) et **MYD13Q1** (MODIS/Aqua *Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m Grid SIN Version 006*) ont été combinées afin d'améliorer la fréquence temporelle. De cette manière, il y aura une donnée disponible pour chaque période de 8 jours.

Couverture temporelle : Cette étude utilise les données pour la période entre le jour julien 97 (7 avril) et le jour julien 305 (1 novembre) pour deux années **2010** et **2015** et ce, pour les données de deux satellites MOD13Q1.006 et MYD13Q1.006 (Tableau 3). En réalité, la date réelle d'acquisition associée à la période débutant le jour 305 pourrait varier entre le jour julien 305 et le jour 320 (305+15), donc entre le 1^{er} et le 15 novembre.

Tableau 2. Liste de couche d'information scientifique (SDS) dans chacune des tuiles MOD13Q1 et MYD13Q1.

Science Data Set	Units	Data type	Valid Range	Scale factor
250m 16 days NDVI	NDVI	int16	2000, 10000	0.0001
250m 16 days EVI	EVI	int16 -	2000, 10000	0.0001
250m 16 days VI Quality detailed	QA	Bits uint16	0, 65534	NA
250m 16 days red reflectance (Band 1)	Reflectance	int16	0, 10000	0.0001
250m 16 days NIR reflectance (Band 2)	Reflectance	int16	0, 10000	0.0001
250m 16 days blue reflectance (Band 3)	Reflectance	int16	0, 10000	0.0001
250m 16 days MIR reflectance (Band 7)	Reflectance	int16	0, 10000	0.0001
250m 16 days view zenith angle	Degree	int16	-9000, 9000	0.01
250m 16 days sun zenith angle	Degree	int16	-9000, 9000	0.01
250m 16 days relative azimuth angle	Degree	int16	-18000, 18000	0.01
250m 16 days composite day of the year	Day of year	int16	1, 366	NA
250m 16 days pixel reliability summary	QA Rank	int8	0, 3	NA

***Note :** Les lignes en rose dans le tableau correspondent aux couches SDS utilisées pour la présente étude.

Tableau 3. Liste de tuiles utilisées.

Couverture spatiale	Tuile h13v3	
Couverture temporelle	Terra (MOD13Q1.006)	Aqua MYD13Q1.006
	097 (07 avril)	105
	113	121
	129	137
	145	153
	161	169
	177	185
	193	201
	209	217
	225	233
	241	249
	257	265
	273	281
	289	297
	305 (1 ^{er} novembre)	

2.2.2. PRÉTRAITEMENT

2.2.2.1. TÉLÉCHARGEMENT

Les données MOD13Q1 etMYD13Q1 ont été téléchargées de manière automatique du site ftp de la NASA⁶ et ce pour la période d'intérêt.

Le code PYTHON concernant le téléchargement des données MODIS a été créé par Charles Gignac, candidat au Doctorat en sciences de l'eau à INRS-ETE.

2.2.2.2. EXTRACTION DES COUCHES DE NDVI, FIABILITE DE PIXELS ET COUCHE CONTENANT L'INFORMATION AVEC LE JOUR EXACT DE L'ACQUISITION POUR CHAQUE PIXEL POUR CHAQUE PERIODE COMPOSITE

Comme les fichiers téléchargés sont en format HDF (Hierarchical Data Format), seules les couches contenant les valeurs NDVI (couche 1), le jour d'acquisition (couche 11) et l'information sur la fiabilité des données (couche 12) ont été extraites et exploitées par la suite. À noter que les valeurs du NDVI tout au long de ce rapport sont multipliées par 10000 (données originales : voir *Scaling Factor* au tableau 2).

La couche "Jour d'acquisition" contient l'information concernant le jour réel d'acquisition pour chacun des pixels. En effet, les images composites sont équidistantes dans le temps, cependant chacun des pixels peut être acquis dans n'importe lequel jour de chaque période de 16 jours. La distance réelle entre deux périodes adjacentes peut donc varier de 1 à 32 jours. La Figure 6 montre la différence entre les jours d'acquisition pour une période donnée : A) 7 avril 2015 et B) 28 juillet 2015. La discontinuité spatiale est encore plus grande pour les périodes de l'année où le couvert nuageux est plus fréquent (Figure 6A). Si les séries temporelles sont créées en utilisant sur l'axe du temps les jours Julien associés à chacune des périodes, les positions incorrectes vont affecter la forme des séries temporelles (Figure 7). Comme conséquence, les paramètres phénologiques ne seront pas précis et ne seront pas comparables avec les données in situ (Testa *et al*, 2014). Afin d'éliminer les décalages temporels (Figure 7), nous avons utilisé la date réelle d'acquisition de chacun des pixels.

⁶ <ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/allData/6/>

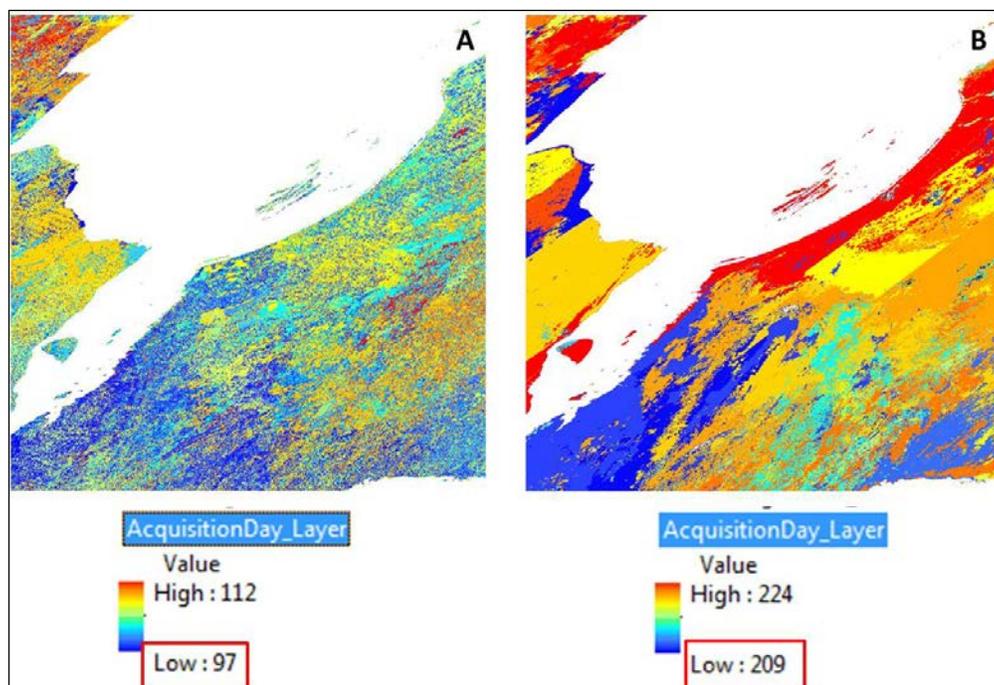


Figure 6. Variation du jour réel d'acquisition dans une période composite : A) Période débutant le jour 97 (07 avril 2015) et B) période débutant le jour 209 (28 juillet 2015).

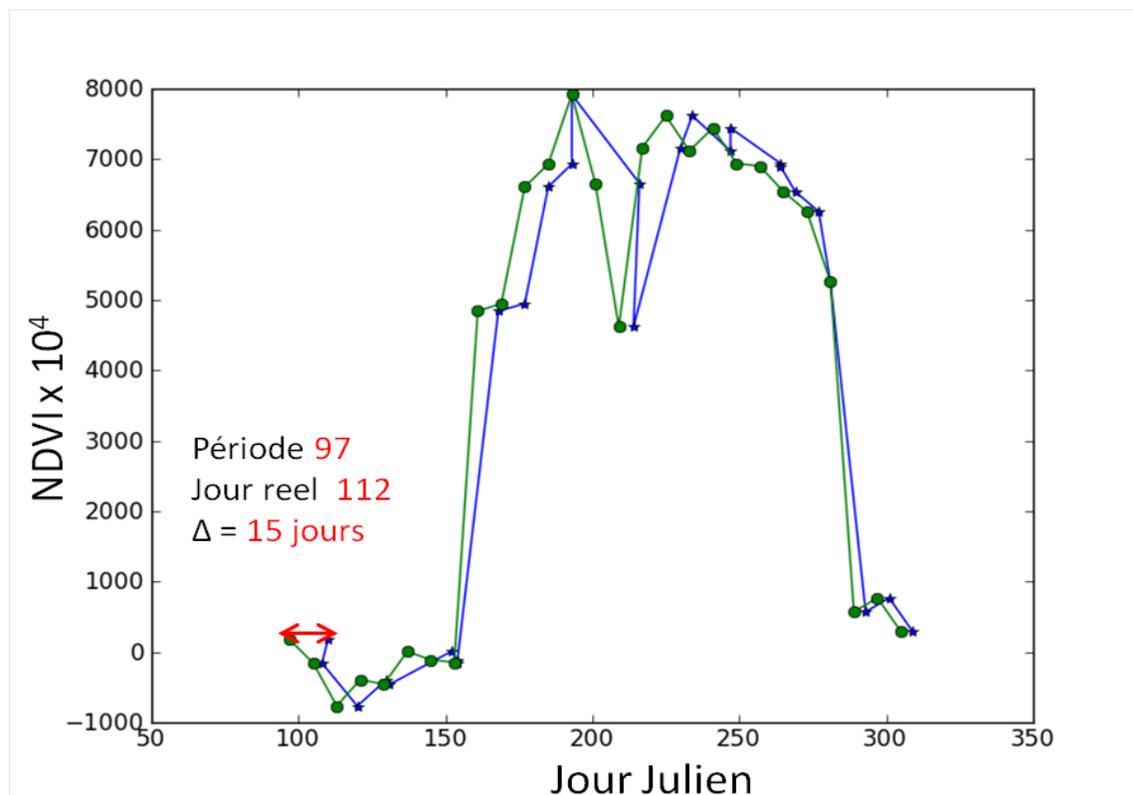


Figure 7. Différence entre les séries temporelles créées avec les périodes équidistantes associées avec chaque période composite (points verts) et les séries temporelles créées avec le jour réel d'acquisition (étoiles bleues).

La couche "Summary QA" (QA) contient l'information simplifiée sur la fiabilité des données. Les valeurs varient de 0 à 4. La signification de ces valeurs est présentée au Tableau 4:

Tableau 4. Les indicateurs de qualité des données (SDS couche QA)

QA	Description
0	Données bonne qualité
1	Bonne mais
2	Neige
3	Nuage

Ces trois couches ont été transformées en format GeoTiff. Chaque couche comprend 4800 lignes x 4800 pixels (ou colonnes), avec une taille moyenne de pixel de 230m. Il est possible que pour d'autres tuiles MODIS (i.e. d'autres latitudes ou longitudes), cette taille varie. Cependant, le code créé cherche directement cette information dans les fichiers et il n'a pas besoin d'intervention.

2.2.2.3. CRÉATION DES SÉRIES TEMPORELLES

L'ensemble des rasters créés (MOD et MYD de Terra et Aqua) pour une année donnée a été trié pour la période indiquée dans le nom du fichier et regroupé dans des rasters multi bandes pour former les séries temporelles. Donc, chacun de ces fichiers contient 27 bandes, correspondant au nombre de périodes composites entre le 7 avril et le 1 novembre.

2.2.2.4. APPLICATION D'UN MASQUE DE LA RÉGION D'INTÉRÊT

Il s'est avéré impossible de traiter une tuile au complet à cause de la limite de mémoire vive de 2GB imposé par la version ArcGIS 32 bits. Nous avons essayé de diviser ces images en 25 blocs (960 x 960 pixels). Cependant, le code a fonctionné correctement jusqu'à environ 7500 pixels et de nouveau, un message de manque de mémoire s'affichait. Le problème provient du fait qu'on crée 11 matrices (11 paramètres phénologiques) qui sont conservées dans la mémoire vive durant tout le traitement. Nous avons consulté différentes sources et, en général, le traitement est appliqué en séparant l'image en plusieurs cellules. Ensuite, ces cellules sont mosaïquées.

Une autre solution serait d'appliquer la procédure individuellement pour chacun des paramètres phénologiques. Le code a donc été modifié en fin de projet de façon à ce que l'utilisateur puisse sélectionner un ou des paramètres phénologiques parmi les 11 et les calculer un à la fois.

Toutefois, pour la démonstration, afin de diminuer le nombre des pixels à traiter, nous avons appliqué un masque (clip) des polygones priorisés par le comité Suivi BdQc avant de passer aux étapes suivantes.

2.2.2.5. CRÉATION DES SÉRIES TEMPORELLES EN FORMAT NETCDF

C'est un format largement utilisé pour les données temporelles. Ce format permet de lire l'information pour un pixel à la fois dans l'environnement ArcGIS (pas besoin d'ouvrir l'image entière si elle est en format Géotiff) et de la garder en mémoire.

2.2.2.6. PRÉSÉLECTION (FILTRAGE) DES DONNÉES

Après l'extraction des données de NDVI, du jour d'acquisition (AD) et de la fiabilité (QA) pour un pixel, quelques étapes de filtrage ont été appliquées:

- *Vérification si le nombre de données (points) dans chacune des trois séries annuelles (NDVI, AD et QA) sont identiques .*

Parfois, dans une des couches d'information, il manque des données pour une des périodes (i.e. il y a une valeur 'NoData'). Cependant, il semble que ces valeurs sont ignorées lors de l'extraction de la série temporelle par la fonction ArcGIS utilisée (MakeNetCDFTableView_md; Multidimension Tools). Ainsi, seules les périodes pour lesquelles les trois paramètres (NDVI, AD et QA) ont des données valides ont été prises en compte. La Figure 8A montre une série temporelle après la première étape de filtrage (points bleu et rouge).

- *Élimination des données dans les séries temporelles (NDVI, AD et QA) dont le QA indique "Couvert nuageux" (i.e. QA = 3) ou "Neige" (i.e. QA=2) ou qui ont une valeur de NDVI ≤ 0 .*

La Figure 8B montre les valeurs de QA pour la série temporelle présentée à la Figure 8A. Après le deuxième filtrage, seules les valeurs (points) en rouge sont conservées pour le traitement suivant.

- *Tri des données selon le jour d'acquisition réel.*

À cause de la combinaison des données de deux satellites, notamment Aqua et Terra, et compte tenu que les deux périodes de 16 jours se chevauchent, il est possible que la date réelle d'acquisition pour un pixel donné associé à une période ne suive pas l'ordre croissant supposé. Par exemple, un pixel acquis par Terra le jour 13 d'une période de 16 jour (période débutant le jour Julien 97) et un pixel acquis par Aqua le jour 2 de la période suivante (commençant le jour Julien 105), ne sera plus en ordre chronologique. La date d'acquisition du premier pixel sera 210 tandis que celle du pixel associé à la période suivante sera 107.

- *Vérification de l'existence de duplicata des données*

De même, il est possible que le jour réel d'acquisition d'un pixel soit le même pour les données composites acquises par les deux satellites mais la valeur de NDVI soit différente. Dans ce cas, le maximum des deux valeurs de NDVI est associé à ce jour.

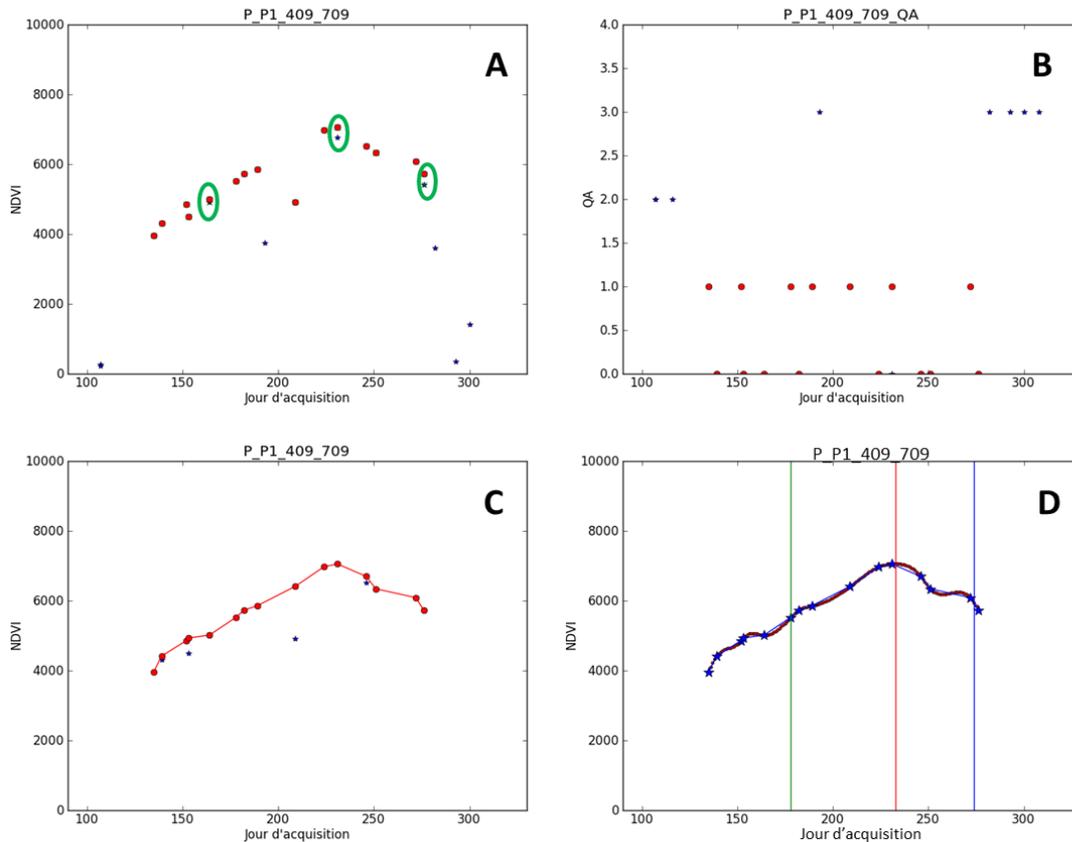


Figure 8. A) La série de données complète pour un pixel. Les points bleus correspondent aux données qui selon l'information dans la couche QA ont une valeur de QA égale à 3 (nuage) ou 2(neige). Ces points ne sont pas pris en compte pour le traitement suivant. Seules les valeurs en rouge ont été conservées; B) Les valeurs de QA pour chaque jour pour la même série temporelle; C) Série temporelle après le lissage (points rouges) et D) interpolation par Spline cubique afin d'obtenir des séries quotidiennes.

2.2.3. LISSAGE

Une fois mises en bonne ordre, les séries temporelles ne sont pas encore prêtes pour l'extraction des paramètres phénologiques. Comme la Figure 8A (points rouges) le montre, les séries temporelles sont encore bruitées. Cette variabilité est due aux différents phénomènes comme les nuages non-détectés au niveau des sous-pixels, des différences dans la géométrie d'acquisition et de l'observation (BRDF), des signatures mixtes, des différents types de couverture terrestre, de la localisation, etc. Ces effets ont tendance à réduire les valeurs du NDVI et à modifier la forme des séries temporelles. Cela, par conséquent, va affecter la précision d'extraction des paramètres phénologiques.

Plusieurs méthodes de complexité variable sont utilisées afin de réduire ces effets et de reconstruire les séries temporelles. Dans la liste ci-dessous sont nommées les sept méthodes les plus courantes :

- Median smoothing (Reed *et al.*, 1994)
- Moving average (White *et al.*, 2009)
- Fourier décomposition (Azzali et Menenti, 2000; Moody et Johnson, 2001; Wagenseil et Samimi, 2006) - L'analyse de Fourier est une technique efficace de lissage car l'effet non périodique (p.ex. l'atténuation atmosphérique) est restreinte aux termes plus hauts. Les paramètres des termes plus bas de la décomposition de Fourier peuvent être interprétés comme des paramètres associés avec la croissance de la végétation: la moyenne est une mesure de la verdure, l'amplitude est associée avec le degré de la productivité de la biomasse, le nombre de termes dans la décomposition est associé aux nombres de pics pour la période observée, la phase décrit le temps entre l'origine et le pic et détermine la date du maximum de verdure. Cependant, l'analyse de Fourier est basée sur l'hypothèse que le signal périodique est sinusoïdal, ce qui n'est pas toujours évident pour le NDVI. C'est donc une technique relativement complexe, qui ne fonctionne pas pour des séries temporelles irrégulières et asymétriques. De plus, cette méthode peut causer des oscillations artificielles dans les données (Swets *et al.*, 1999; van Dijk *et al.*, 1987).
- Asymmetric Gaussian function (Jonsson & Eklundh, 2002).
- Double logistic function (Beck *et al.*, 2006).
- Whittaker smoother (Atkinson *et al.* 2012; Eilers, 2003)
- Savitzky-Golay filter (Chen *et al.*, 2004) – Le filtre Savitzky-Golay (SG) est fréquemment utilisé pour le lissage des données bruitées, parce qu'il préserve la forme et les particularités du signal mieux que certaines autres approches (moyenne glissante, etc.). La méthode SG ajuste sur chaque point un polynôme de degrés 2 ou 3 aux valeurs dans une fenêtre (i.e. effectue une régression polynomiale locale) afin de déterminer la valeur lissée. On ne remplace que la valeur centrale. Cependant, cette méthode est très sensible à la dimension de la fenêtre. Il existe également des études comparatives évaluant la performance de ces méthodes (Bachoo & Archibald (2007) ; Hird et McDermid (2009); Shao *et al.* (2016)). Dans toutes ces études, le filtre de Savitzky-Golay montre une bonne performance.
- RMMEH (Jin et Xu, 2013), - méthode rapide et non linéaire qui reconstruit les séries temporelles de NDVI. Son avantage principal est que cette méthode n'a pas besoin d'aucun paramétrage.

Nous avons testé trois différentes techniques de lissage : les filtres Savitzky-Golay, Whitaker et RMMEH. Ces trois méthodes ont été testées sur 13 séries temporelles correspondantes aux points identifiés par la lettre P à la Figure 9.

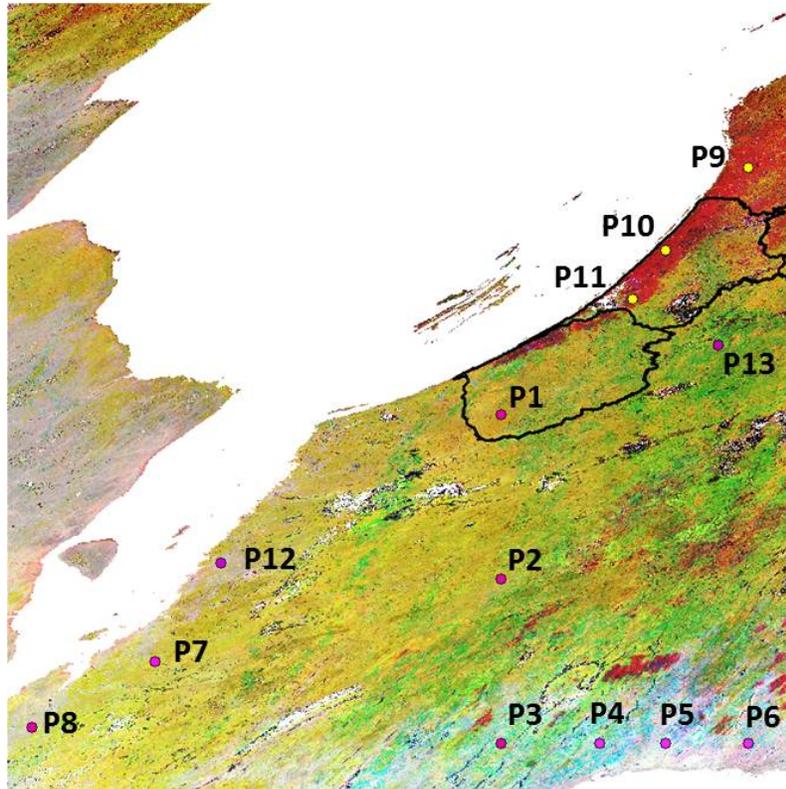


Figure 9. Composée couleur NDVI (MOD13Q1) pour 3 dates : R : 28/07/2015 (jour 209), G : 02/06/2015 (jour 153); B : 24/10/2015 (jour 297)

La fonction de Savitzky-Golay étant déjà incluse dans la bibliothèque scientifique de PYTHON (SciPy), les deux autres filtres ont été codés pour les besoins de ce projet.

La Figure 10 montre les résultats de la méthode RMMH (les triangles rouges) ainsi que du filtre Savitzky-Golay (carrés verts) pour les 13 points. Dans la plupart des cas, les résultats sont très similaires. Cependant, dans les cas où il y a des données aberrantes (P4 et P12), la méthode RMMEH se comporte mieux. Pour cette raison, nous l'avons adoptée et appliquée sur les séries temporelles.

En effet, comme la plupart des méthodes utilisées pour lissage de séries temporelles du NDVI, la méthode originale RMMEH repose sur deux considérations principales :

1. Le profil temporel du NDVI (qui n'est plus affecté par les phénomènes mentionnés ci-dessus) va changer graduellement en suivant le cycle de croissance annuelle de la végétation (i.e. avec une forte autocorrélation temporelle).

2. Toutes les contaminations mentionnées plus hauts ont tendance à diminuer les valeurs du NDVI.

Par conséquent, la méthode RMMEH est basée sur trois opérations :

- Lissage par une médiane glissante (running medians smoother)

$$R_t = \text{MEDIAN} \{ \text{NDVI}_{t-2}, \text{NDVI}_{t-1}, \text{NDVI}_t, \text{NDVI}_{t+1}, \text{NDVI}_{t+2} \} \quad \text{Éq. 2}$$

- Moyenne arithmétique des voisins d'un point donné (arithmetic average)

Comme on suppose que le profil temporel du NDVI change graduellement, le NDVI de chaque point dans la série temporelle devrait approcher la moyenne entre la valeur précédente et la valeur suivante.

$$M_t = (\text{NDVI}_{t-1} + M_{t+1}) / 2 \quad \text{Éq. 3}$$

- Maximum (MAX) opération

Les trois points – le NDVI original (NDVI_t), la médiane mobile calculée (R_t) et la moyenne arithmétique (M_t) – ne sont pas généralement localisés au même endroit sur l'axe de NDVI. Afin de s'assurer que la meilleure estimation du NDVI pour chaque point demeure plus élevée ou au moins égale à la valeur originale, la stratégie utilisée se nomme l'enveloppe supérieure. Donc, la procédure assigne à chacun des points la valeur maximale des trois valeurs mentionnées (NDVI_t , R_t , M_t) :

$$\text{NDVI}_{\text{RMM}_t} = \text{MAX} (\text{NDVI}_t, R_t, M_t) \quad \text{Éq. 4}$$

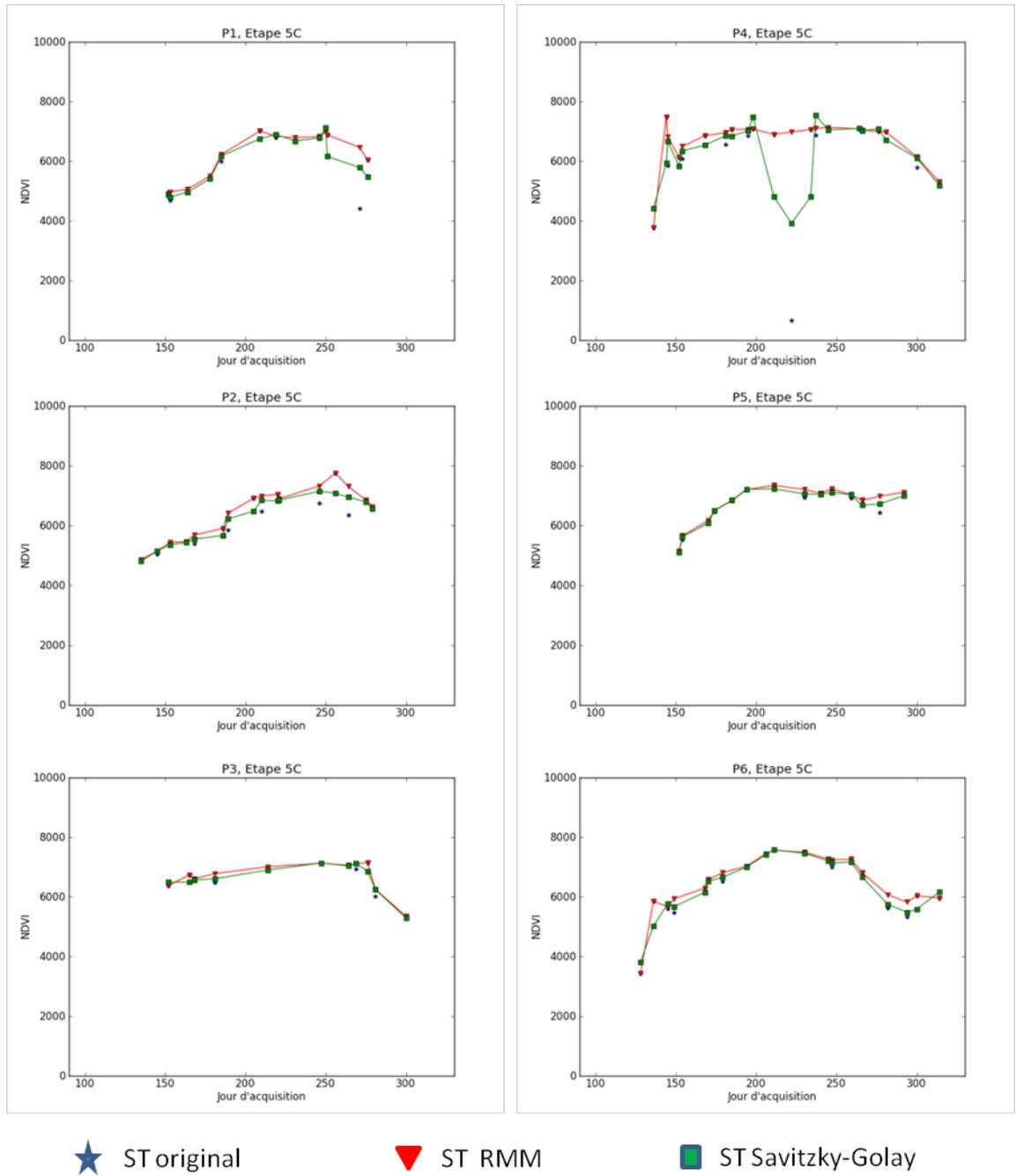


Figure 10a. Lissage des pixels 1 à 6 avec le filtre Savitzky-Golay (en vert) et par la méthode RMM (points rouges).

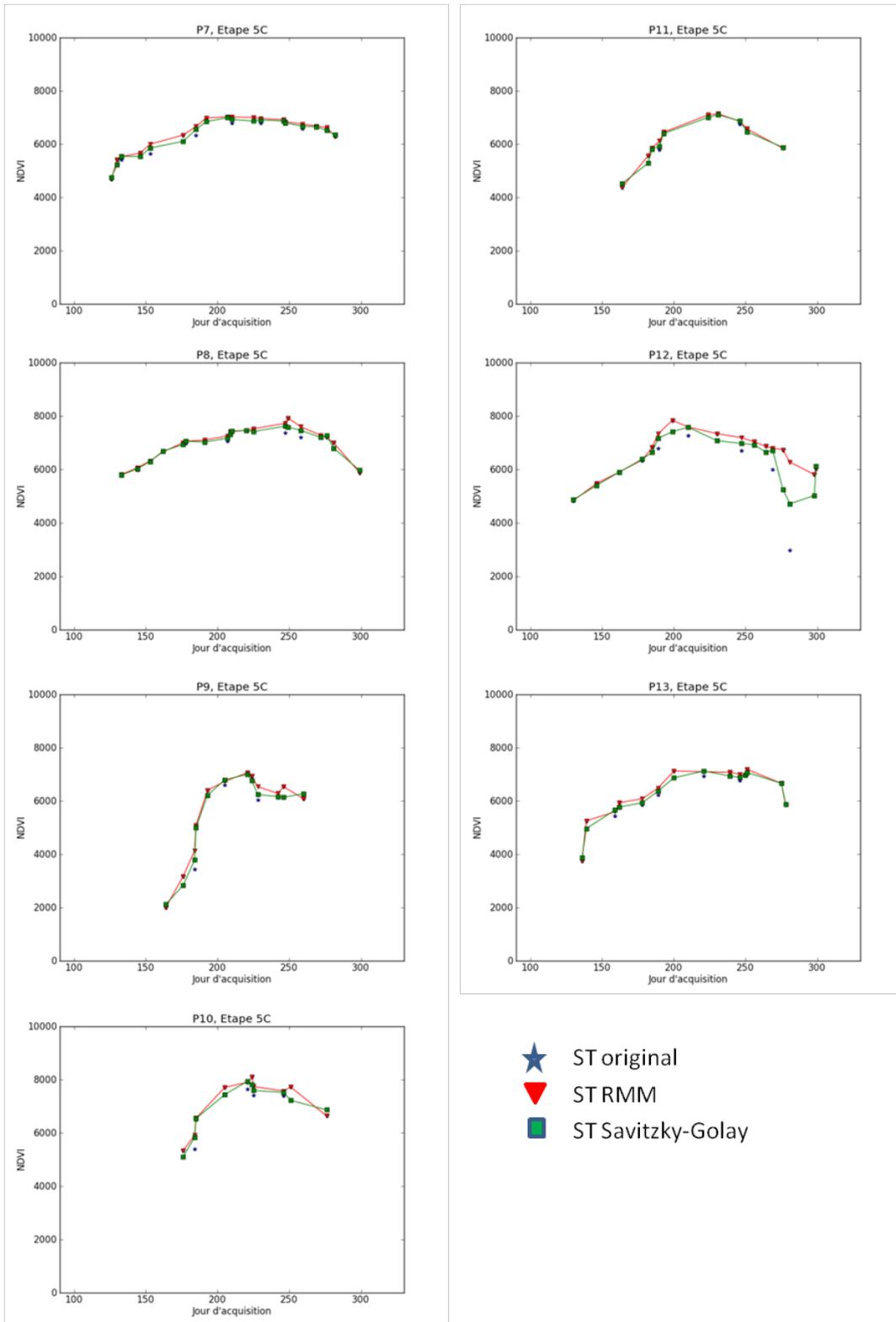


Figure 11b. Lissage des pixels 7 à 13 avec le filtre Savitzky-Golay (en vert) et par la méthode RMM (points rouges).

2.2.4. PARAMÈTRES PHÉNOLOGIQUES

Afin d'extraire les paramètres phénologiques à partir des séries temporelles, plusieurs approches ont été utilisées. Chacune de ces approches est adaptée pour répondre à une question de recherche spécifique. Elles se séparent en deux catégories :

- **Seuils** – une méthode efficace basée sur une valeur prédéfinie ou une référence relative pour définir le début et la fin de la saison de croissance (Reed *et al.*, 2003). Le début de la saison (SOS) est défini comme le jour de l'année où la branche ascendante de la série temporelle franchit le seuil. Alors que la fin de la saison de croissance (EOS) est définie par le jour où la branche descendante de la série temporelle franchit le seuil (de Beurs et Henebry, 2010). Certaines de ces techniques appliquent les seuils basés sur la moyenne à long terme, des seuils basés sur une année de référence, ou bien des seuils basés sur une valeur de référence ou des rapports (de Beurs & Henebry, 2010).
- **Dérivées de fonctions analytiques**

Afin d'estimer les paramètres clé du cycle phénologique, tels que le début et la fin de la période de croissance, les dérivées de fonctions analytiques sont souvent utilisées (Zhang *et al.*, 2003, Tan *et al.*, 2011). Certaines de ces fonctions ont été mentionnées dans la section 2.2.3. (asymmetric Gaussians, Double logistic function, ou Savitzky-Golay). Chacune de ces fonctions a ses forces et ses faiblesses (Jonsson *et Eklundh*, 2002). Le choix de la fonction dépend des données d'origine et, en général, il est validé en inspectant l'ajustement de chacune des fonctions aux données.

Par exemple, Jonsson *et Eklundh* (2002) mentionnent que si la série temporelle est lisse mais avec un plateau indiquant que le signal sous-jacent est composé de deux signaux de végétation, le filtre de Savitzky-Golay est préférable. Toutefois, en cas des séries temporelles bruitées, cette méthode donne parfois des résultats indésirables. Ainsi, la fonction gaussienne asymétrique ou la fonction logistique double peuvent devenir le meilleur choix.

Tan *et al.* (2011) ont investigué les dérivées de la fonction gaussien asymétrique ajustée aux indices de végétation EVI (MODIS) et ont trouvé que la troisième dérivée est le meilleur indicateur pour identifier les moments les plus importants du cycle phénologique. Selon eux, le minimum et le maximum locaux de la première dérivée correspondent au taux maximal d'augmentation et de diminution de la verdure (*greenup* et *browndown*). Les minimum et maximum locaux de la deuxième dérivée correspondent respectivement au début, au pic et à la fin de la période de croissance (*greenup*) ainsi qu'au début et à la fin de la période de sénescence (*browndown*). Le maximum local et le minimum de la courbe de la troisième dérivée correspondent au début du *greenup*; la pente maximale croissante, à la fin du *greenup* ou début du brunissement; la pente maximale décroissante, à la fin du brunissement. Les deuxième et troisième dérivées correspondent aux moments du verdissement et de la sénescence. Selon les mêmes

chercheurs, la seconde dérivée indique le moment où la majorité de la végétation dans le pixel devient verte, tandis que le début de verdissement détecté par la troisième dérivée représente le moment où le taux du changement dans la courbe phénologique est maximal (apparition des premières feuilles vertes), ce qui pourrait être associé avec le "greenup" observé in situ.

Après avoir appliqué différentes dérivées de fonctions analytiques, une approche qui nous semblait plus universelle, nous nous sommes rendu compte que cela ne fonctionnait pas toujours sur les séries temporelles. Les dérivées fonctionnaient sur la majorité des images, mais des extrêmes locaux artificiels étaient parfois créés en utilisant Spline cubic afin d'obtenir des séries quotidiennes, ce qui faussait les résultats. Nous avons donc adopté une méthode de seuil.

Les seuils sont basés sur des rapports pour déterminer le début (SOS) et la fin de la saison de croissance (EOS), ainsi que la longueur de la saison de croissance (LGS). Cette technique calcule le rapport de l'amplitude saisonnière mesurée à partir des valeurs minimales gauche et droite pour définir respectivement le SOS et l'EOS (Jönsson & Eklundh, 2010). Cependant, sachant que dans certains pixels de la zone testée, la branche descendante des séries temporelles n'est pas complète ou manquante à cause du couvert nuageux persistant, seule la valeur minimale gauche a été utilisée. De plus, les seuils basés sur les rapports sont considérés comme une détermination cohérente, indépendamment de la localisation géographique et de la couverture de la zone d'étude observée (de Beurs & Henebry, 2010). Nous avons appliqué un seuil (**S**) qui est égal à 50% de l'amplitude **A** (*standard Midpoint_{pixel} method*, White et al., 1997) :

$$S = NDVI_{\min} + 0.5 A \quad \text{Éq. 5}$$

$$A = NDVI_{\max} - NDVI_{\min} \quad \text{Éq. 6}$$

Cependant, afin de pouvoir extraire les paramètres phénologiques avec une plus grande précision, nous avons interpolé les données lissées par une Spline cubique pour obtenir une estimation de la valeur du NDVI pour chaque jour entre le début et la fin de la série temporelle (Figure 8D). Par la suite, le seuil a été appliqué et les paramètres comme SOS, EOS et LGS ont été déterminés.

Nous avons estimé **11 paramètres phénologiques** résumés au Tableau 5.

Tableau 5. Paramètres phénologiques

Paramètres phénologiques	Description	
SOS	Début de la saison de croissance (Jour Julien)	
EOS	Fin de la saison de croissance (Jour Julien)	
LSC	Longueur de la saison de croissance (Jours)	
MAX_NDVI	Valeur maximale de la série temporelle originale	
DAY_MAX	Jour julien où le maximum de la série temporelle (originale) a été estimé	
MEAN_NDVI	La valeur moyenne de la série temporelle originale	
TI_MAX_NDVI	La valeur maximale de la série temporelle interpolée	
TI_DAY_NDVI	Jour julien où le maximum de la série temporelle (interpolée) a été estimé	
A	Amplitude (MAX-MIN)	Associée à la variation annuelle
JJA_MAX	La valeur maximale pour la période estivale (juin-juillet-août) de la série temporelle	
JJA_MEAN	La valeur moyenne pour la période estivale (juin-juillet-août) de la série temporelle	

2.2.5. VALIDATION

Les indicateurs comme le NDVI sont un outil efficace pour détecter les tendances dans le cycle saisonnier des végétaux. Cependant, un certain degré d'incertitude et de variabilité entre les données issues de différents capteurs satellitaires existent. Donc, la validation des paramètres estimés à partir des images satellites avec des données in situ est une étape importante.

Pour valider la fiabilité/justesse des résultats du protocole développé, des photos prises par une caméra in situ, localisée sur la côte et installée près d'infrastructures maritimes par l'INRS comme mandataire du MTQ et de l'Administration régionale de Kativik dans le village nordique d'Umiujaq (Nunavik), ont été utilisées. Dans un contexte opérationnel, le comité Suivi BdQc pourrait utiliser des données de ses inventaires terrain et/ou des photos in situ pour quelques sites biens répartis sur des transects (ou transects) longitudinaux et latitudinaux.

La caméra Umiujaq (56°33'03.38"N 76°32'56.05"O, élévation 10m) est située dans la limite du polygone N2, à une distance de 40km du site P2 et de 166 km NO du site-P1. Ces photos nous informent du début et de la fin de la saison de croissance dans la région. Il faut comprendre qu'il y a un mélange d'espèces végétales à l'intérieur d'un pixel MODIS.

Nous avons aussi comparé nos résultats avec deux autres outils qu'on a trouvés gratuitement sur le web.

- *MODIS Phenology Image Service ArcMap Toolbox*. Nous avons testé la boîte à outils et les statistiques pour les polygones d'intérêt. Cependant, les données ne sont disponibles que jusqu'en 2012. De plus, les statistiques présentées pour les années 2008-2012 amènent certaines questions. La période de croissance est beaucoup plus courte que pour les années 2000-2007, ce qui semble très suspect. De plus, ces données sont présentement inaccessibles et l'outil fonctionne mal. Nous avons contacté les gens qui ont créé l'outil, mais il semble qu'un problème ait été identifié et que l'outil est non-utilisable. Ils nous ont recommandé un autre site ne couvrant actuellement que les États-Unis d'Amérique.
- *MODIS Global Land Cover Dynamics (MOD12Q2, Version 5)* – ce produit MODIS fournit également une estimation de paramètres phénologiques à partir de l'indice de végétation EVI, à une résolution de 500 m. Cependant, une défaillance dans la couche SDS (QA/QC) concernant la qualité des données a été identifiée. Ce problème devrait être résolu avec la version 6 du produit⁷.

2.2.6. ANALYSE

À partir des rasters créés pour chacun des paramètres phénologiques, différentes statistiques (moyenne, maximum, minimum, écart type, etc.) pourraient être calculées à différentes échelles d'intérêt (pixels, polygones, type d'occupation du sol, cellules). Nous avons utilisé les

⁷ https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd12q2

histogrammes à l'échelle de 2 cellules de 11.5 x 11.5km (i.e. 2 sites de 50 x 50 pixels traités), afin d'être capable d'interpréter et de comparer les résultats pour les deux sites (P1 et P2) et pour les années 2010 et 2015.

Les paramètres phénologiques montrent une grande variabilité interannuelle qui est associée aux variations climatiques. Pour détecter des tendances dans leur évolution, il existe différentes techniques (test de Mann–Kendall, anomalie, régression, etc.) dépendamment des données satellitaires utilisées et de la résolution spatiotemporelle correspondante (Forkel et al., 2013).

2.3. RÉSULTATS

Les résultats présentés dans cette section fournissent un portrait des paramètres phénologiques pour les deux cellules situées dans la zone d'intérêt pour deux années 2010 et 2015.

Selon les photos prises par la caméra installée à Umiuaq (Annexe I), le printemps 2015 était plus tardif par rapport à l'année 2010. Comme on peut voir sur les photos de 2010, les feuilles sur les arbustes apparaissent autour du 10 juin (jour julien 161) tandis que sur les photos de 2015, ce moment correspond à l'état de la végétation entre le 25 juin (JJ 176) et le 1^{er} juillet (JJ 182). Vers le 1^{er} juillet 2010 (JJ182), les arbustes et les herbacées sont déjà bien développés. Cela arrive environ deux semaines plus tard en 2015 (15 juillet, JJ 196). En août, la végétation arrive à maturité et on ne peut pas voir de différence entre les photographies de 2010 et 2015. Malheureusement, pour l'automne 2010 (septembre et octobre), il n'y a pas de photographies. Pour l'automne 2015, on voit que la végétation commence à perdre sa vigueur vers le 25 septembre (JJ268). Vers le 1^{er} octobre (JJ 274), la végétation (arbustives et herbacées) est en phase de sénescence : il reste encore des feuilles vertes sur les arbustes mais en perte de vitalité, tandis que les herbacées sont déjà jaune. Vers le 10 octobre 2015, la neige arrive et la température est sous 0°C à midi. Cependant, il y a encore des feuilles sur les arbustes. Vers le 20 octobre, le sol est couvert par la neige et les feuilles des arbustes sont brunes ou tombées.

Bien que l'information fournie par les photos prises par la caméra in situ soit très limitée, ces photos donnent une idée des moments clé du développement de la végétation dans la région.

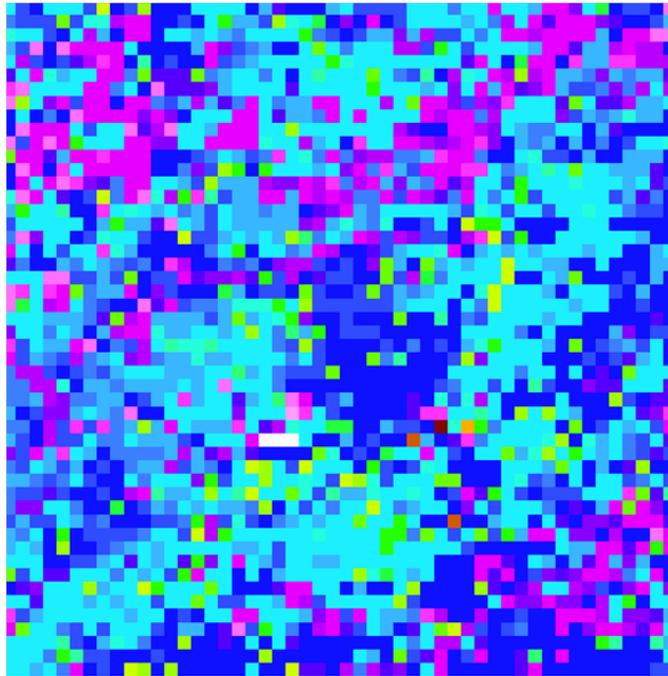
2.3.1. DEBUT DE LA SAISON DE CROISSANCE

Les Figures 11 et 12 montrent le début de la saison de croissance pour les sites P1 et P2 estimé pour chaque pixel à l'aide de la méthode décrite ci-dessus. Afin de mieux interpréter les résultats, les valeurs de pixels ont été regroupées en classes avec un intervalle de 5 jours. La couleur rose/bleu des images de 2010 pour les deux sites indiquent un début de la saison de croissance plus hâtif tandis que les couleurs rouge/brun indiquent un début de la saison de croissance plus tardif.

Début de la saison (SOS)

Site P1

2010



2015

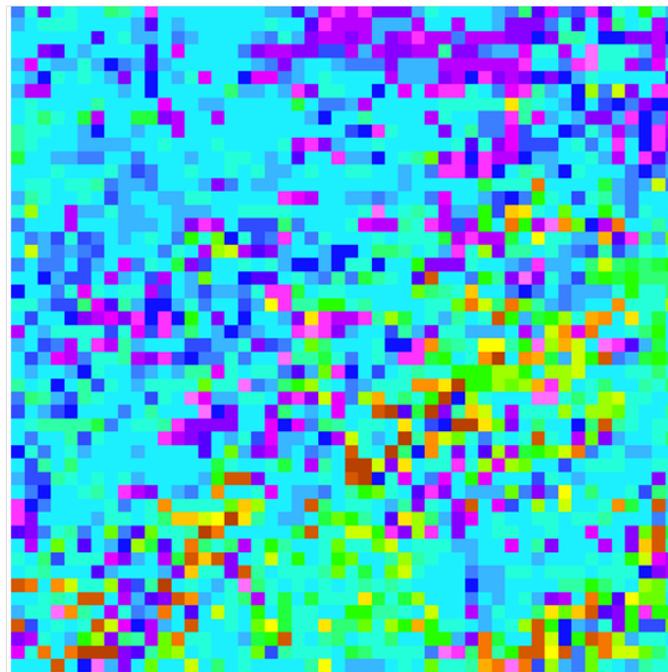
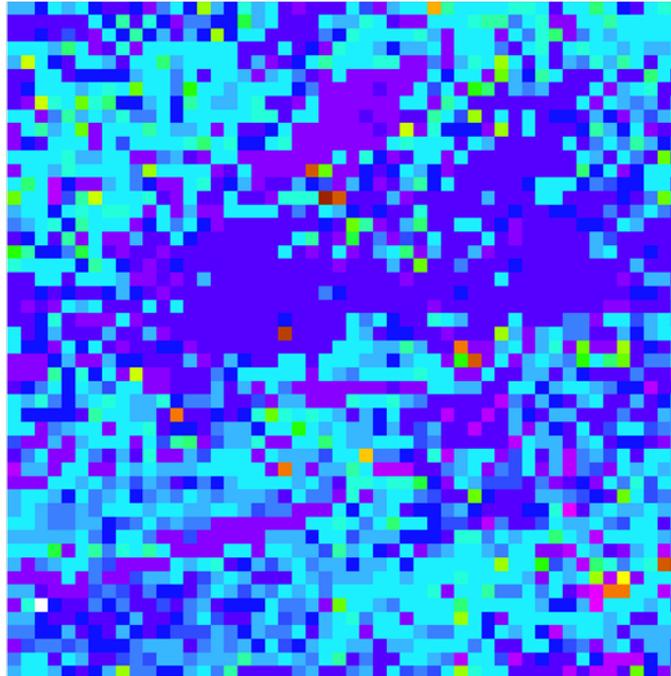


Figure 12. Début de la saison de croissance pour le site P1 en 2010 et 2015.

Début de la saison (SOS)

Site P2

2010



2015

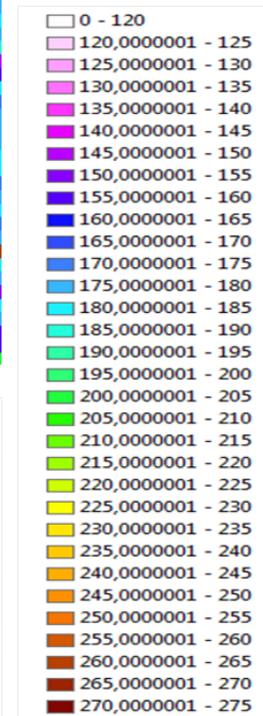
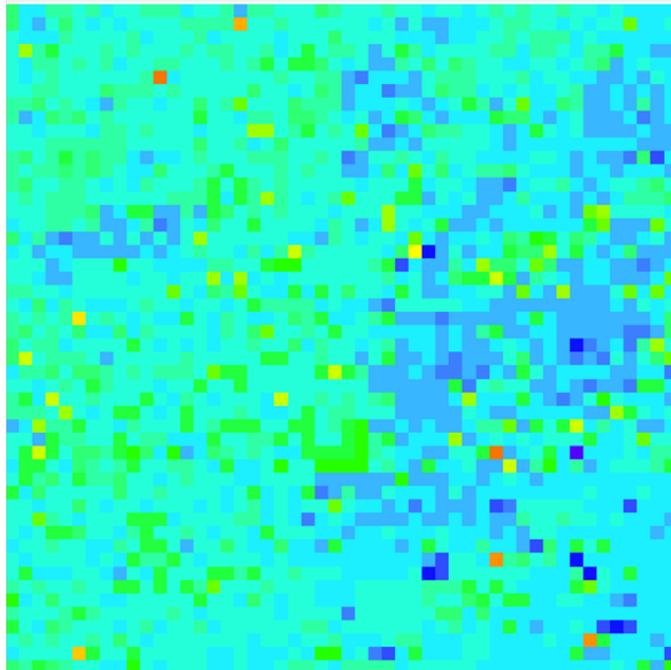


Figure 13. Début de la saison de croissance pour le site P2 en 2010 et 2015.

La Figure 13 présente les histogrammes pour la distribution des valeurs estimées du début de saison de croissance (Figure 11 et 12) pour les cellules P1 et P2. Ces histogrammes montrent deux pics plus significatifs en 2010 pour les deux cellules. Le double pic pourrait être expliqué par la présence de types différents de végétation dans les limites des zones étudiées et qui auraient des cycles phénologiques décalés. Par exemple, sur les photos prises par la caméra installée à Umiujaq, on peut voir que l'apparition des feuilles des arbustes précède le verdissement des herbacées. Selon les histogrammes, le premier pic pour le site P1 correspond à l'intervalle de temps entre les jours de l'année 160 et 165 (9 -14 juin), le deuxième aux jours 180-185 (29 juin - 4 juillet). Pour le site P2, ces pics correspondent aux périodes 155-160 (4 - 9 juin) et 180-185. Pour 2015, le début de la saison est centré dans l'intervalle entre 180 et 185 jours pour P1 et 185-190 (4 -9 juillet) pour le site P2. Ces estimations correspondent très bien aux observations fournies par les photos in-situ. Par contre, le fait d'avoir 2 pics en 2010 et juste 1 en 2015 soulève des questions. Pour l'expliquer, deux hypothèses pourraient être avancées : 1) la différence du moment de "greenup" de différents types de végétation est moins évidente à cause des conditions météorologiques (p. ex. des températures plus chaudes); et/ou 2) un changement de type de végétation (remplacement d'un type plus hâtif par un autre).

Début de la saison de croissance (SOS) pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

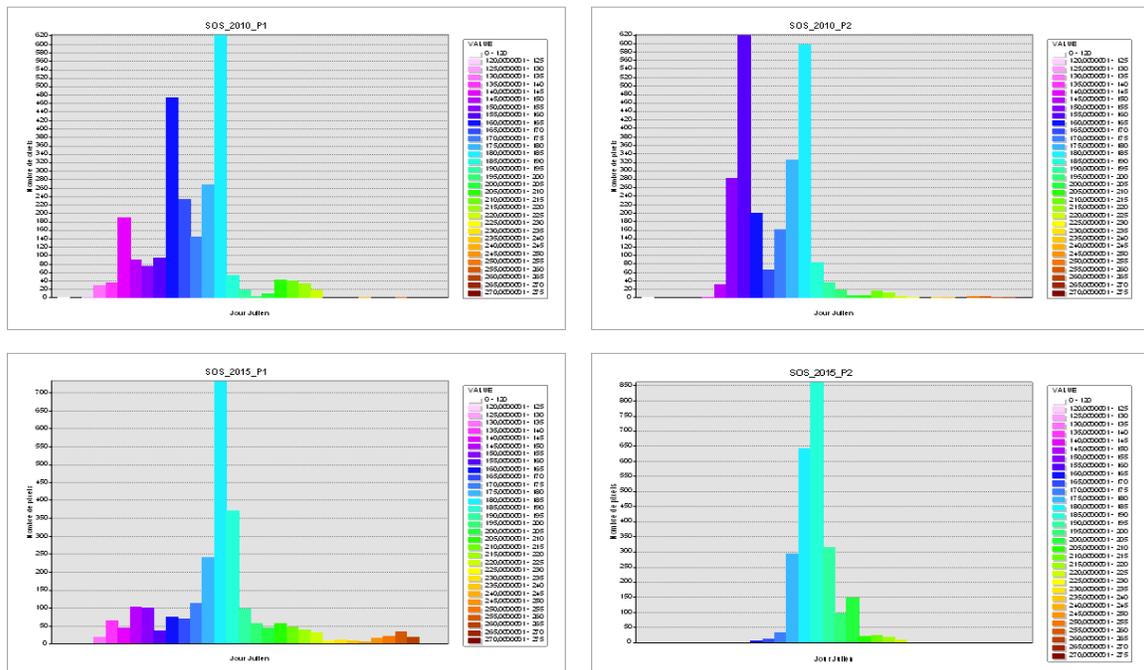


Figure 14. Histogramme de la distribution des valeurs de "Début de la saison de croissance" pour les sites P1 et P2 en 2010 et en 2015.

2.3.2. FIN DE LA SAISON DE CROISSANCE

Les Figures 14 et 15 présentent la fin de la saison de croissance en 2010 et 2015 pour les deux sites (P1 et P2). Comme l'indiquent les couleurs de ces images, la fin de la saison de croissance en 2010 était plus tardive et avec une plus grande variabilité par rapport à celle en 2015 (surtout pour le site P1).

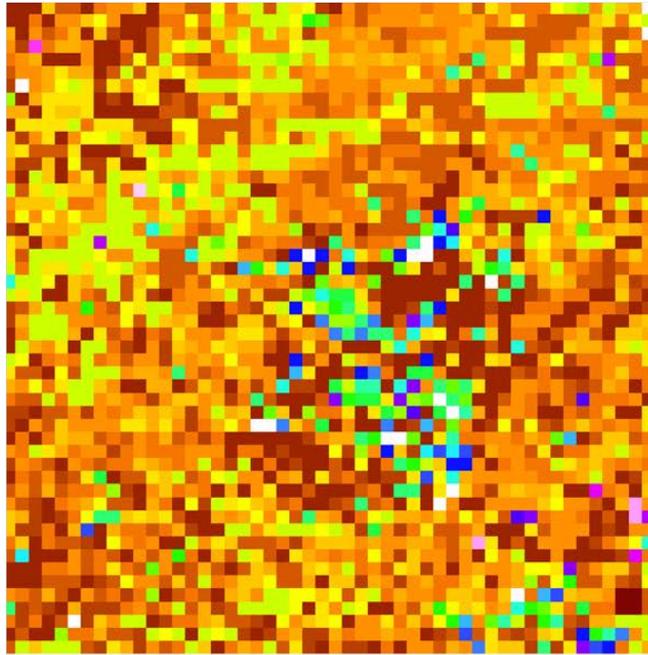
Les histogrammes à la Figure 16 montrent que la phase de sénescence pour 2010 est plus étalée, entre le Jour Julien 250 et 255 (7 -12 septembre) et le jour 305 (1^{er} novembre). Le pic est autour des jours Juliens 275 -280 (2-7 octobre). Pour le site P2, la distribution est plus étroite avec un pic entre les jours Juliens 275-280 (2 - 7 octobre).

En 2015, pour les deux sites à l'étude, la fin de la période de croissance pour la majorité des pixels a été estimée à entre les jours Julien 270-275 (27 septembre - 2 octobre). Ces estimations sont aussi en très bon accord avec les observations des photographies de la caméra à Umiujaq. Par exemple, le pic étroit de la distribution pourrait être le résultat d'un refroidissement rapide.

Fin de la saison (EOS)

Site P1

2010



2015

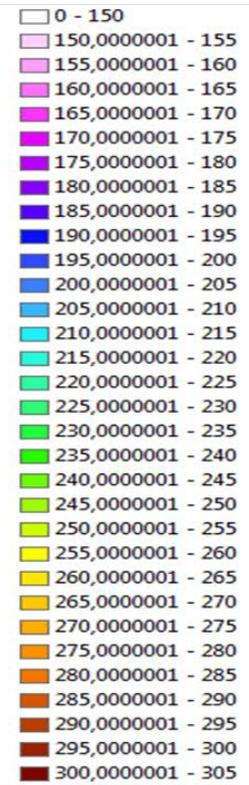
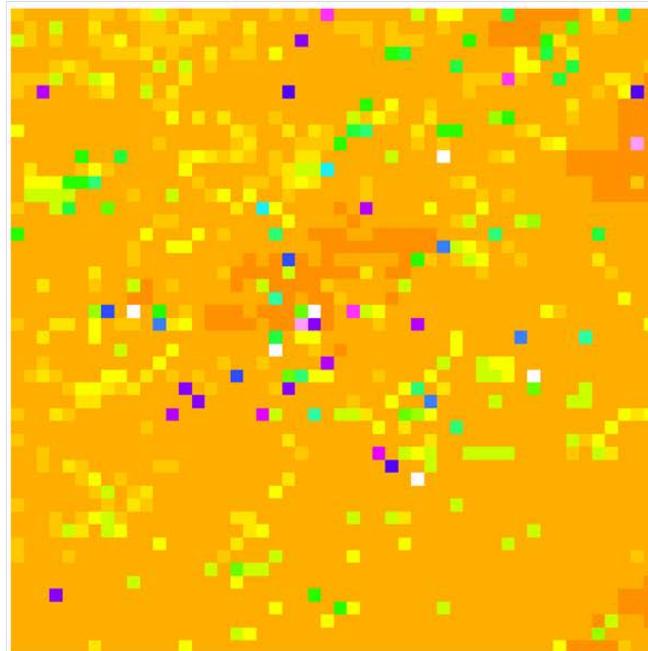
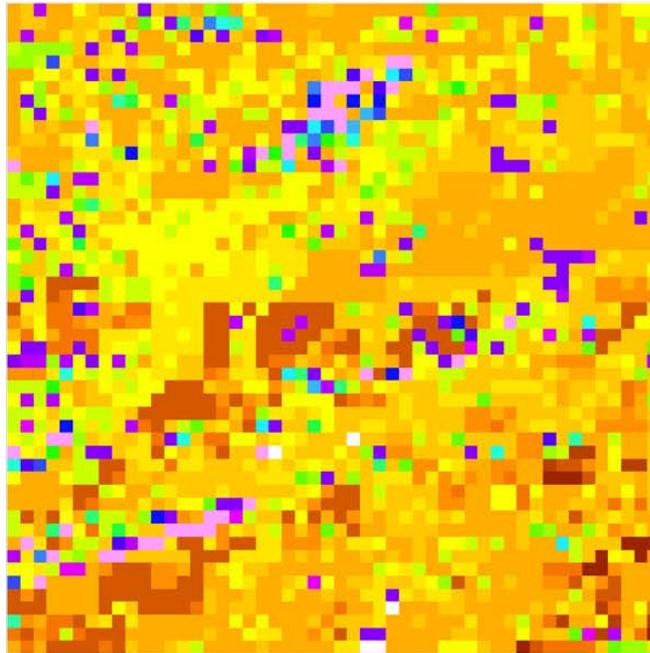


Figure 15. . Fin de la saison de croissance pour le site P1 en 2010 et 2015.

Fin de la saison (EOS)

Site P2

2010



2015

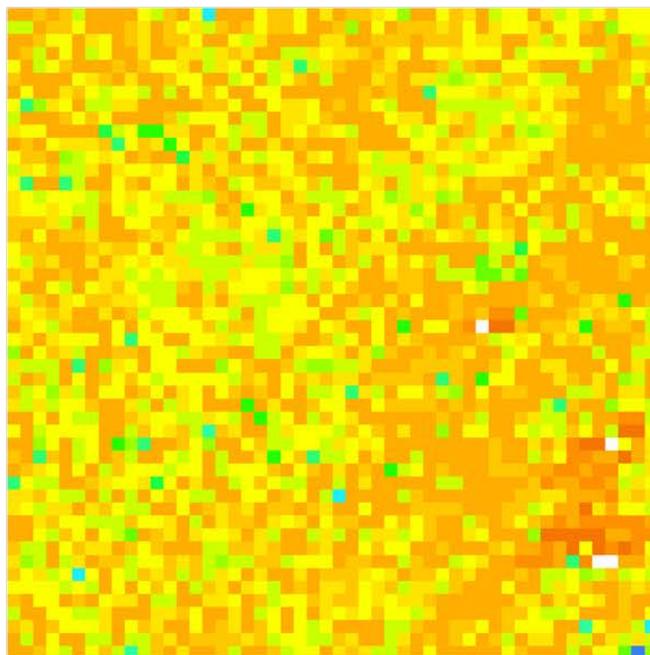


Figure 16. Fin de la saison de croissance pour le site P2 en 2010 et 2015.

Fin de la saison de croissance (EOS) pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

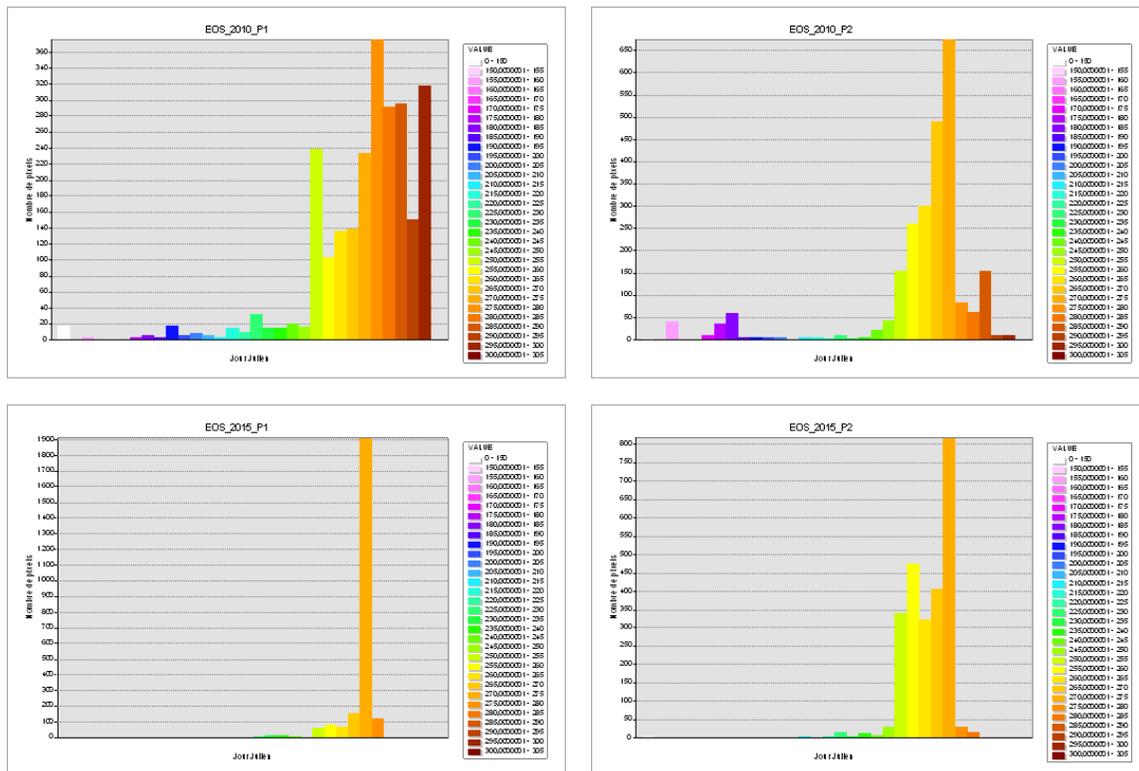


Figure 17. Histogramme de la distribution des valeurs de "Fin de la saison de croissance" pour les sites P1 et P2 en 2010 et en 2015.

2.3.3. DUREE DE LA SAISON DE CROISSANCE

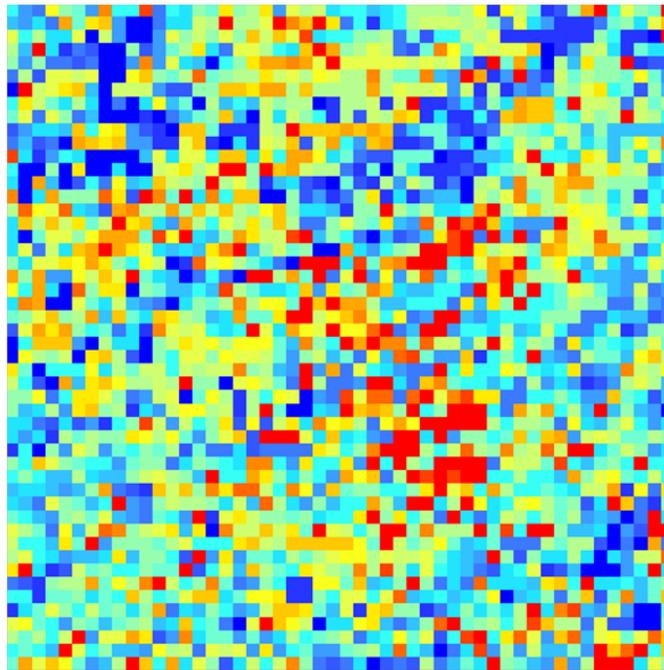
Les Figures 17 et 18 présentent la durée de la saison de croissance en 2010 et 2015 pour les deux sites (P1 et P2). La différence des couleurs entre 2010 et 2015 pour les deux sites indique une saison de croissance plus longue en 2010 par rapport à 2015 et dépasse de 100 jours la majorité des pixels. Les histogrammes de la Figure 19 montrent que la saison de croissance en 2010 est très étalée et centrée autour de 105-110 jours pour le site P1 et autour de 95-100 jours pour le site P2.

En 2015, la durée de la période de croissance pour la majorité des pixels du site P1 est estimée à 85 - 90 et 90 - 95 jours. Pour le site P2, la durée de la période de croissance ne dépasse pas 100 jours pour plupart des pixels. Ces résultats sont en accord avec la Figure 2, présentant la longueur moyenne de la saison de croissance pour le Québec.

Durée de la saison de croissance (LGS)

Site P1

2010



2015

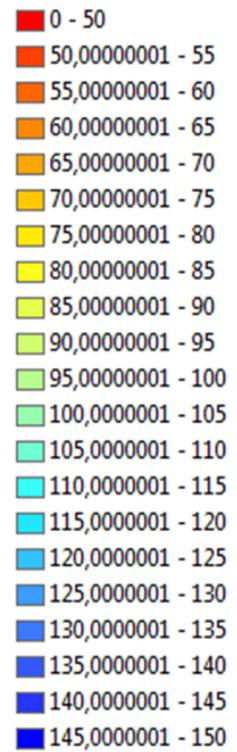
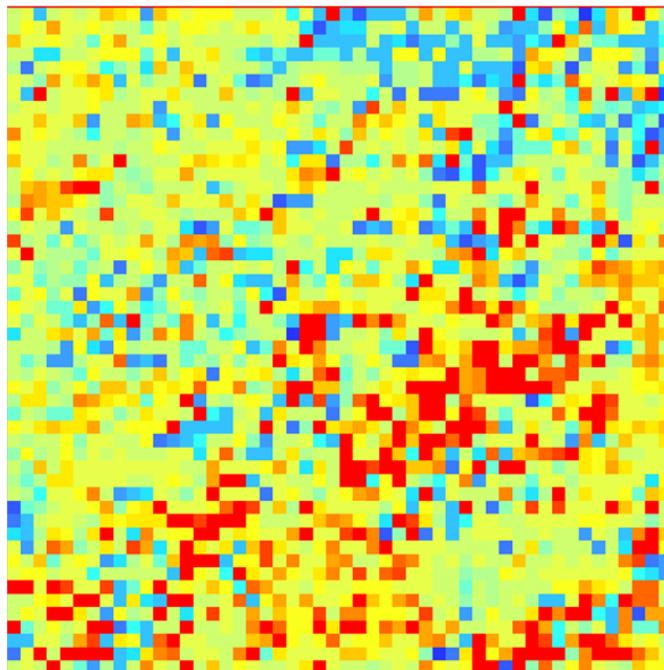
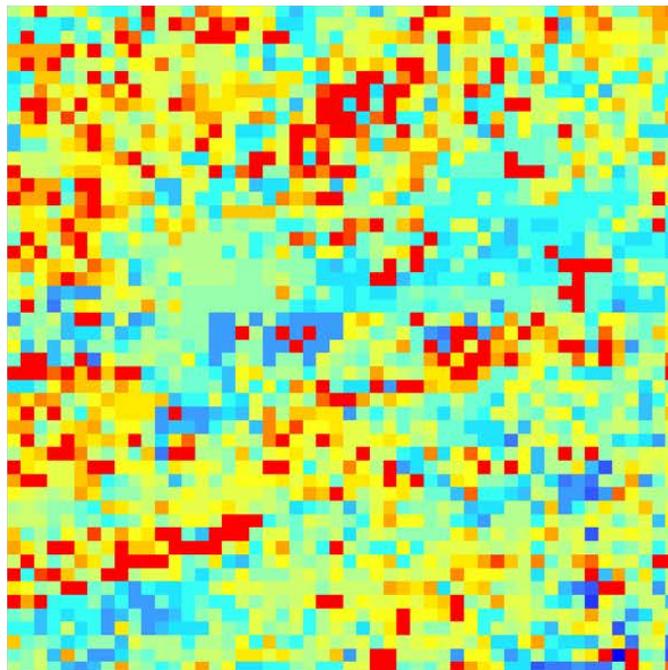


Figure 18. Durée de la saison de croissance pour le site P1 en 2010 et 2015.

Durée de la saison de croissance (LGS)

Site P2

2010



2015

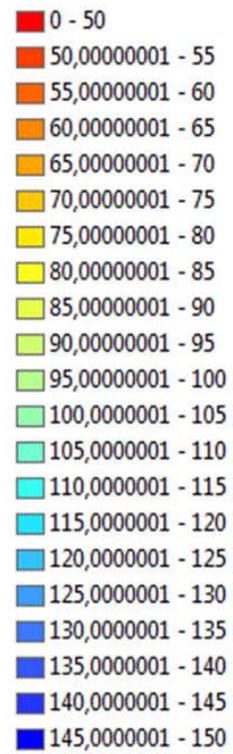
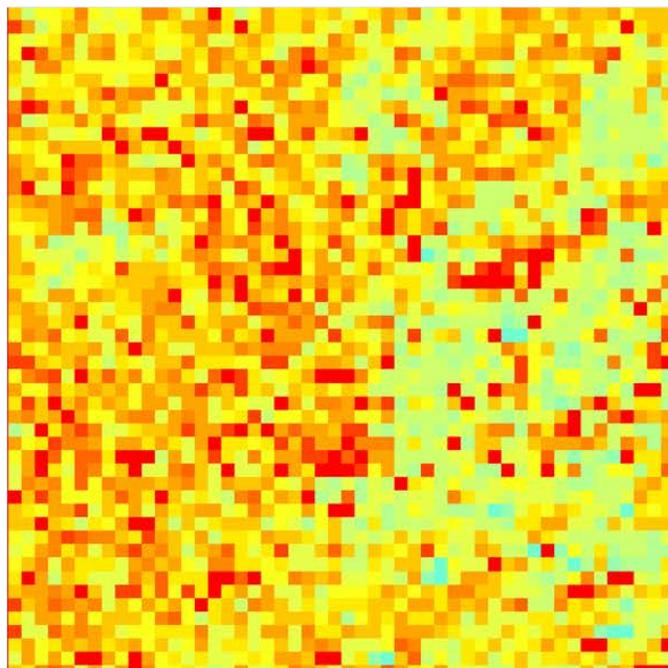


Figure 19. Durée de la saison de croissance pour le site P2 en 2010 et 2015.

Durée de la saison de croissance (LGS) pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

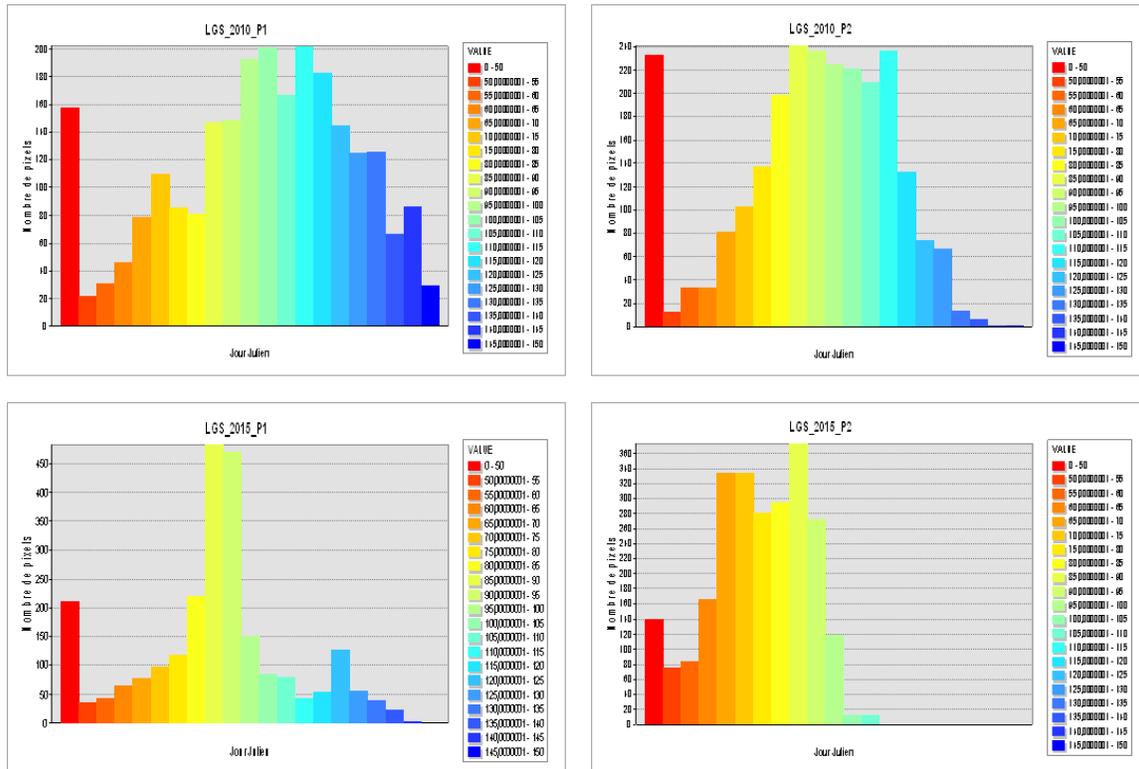


Figure 20, Histogramme de la distribution des valeurs de "Durée de la saison de croissance" pour les sites P1 et P2 en 2010 et en 2015.

Il semble que l'année 2010 était une année exceptionnelle de point de vue météorologique. Selon Environnement Canada⁸, le mercure au Canada a été particulièrement élevé en 2010. En 63 ans de relevés météorologiques, l'année 2010 a été la plus chaude jamais enregistrée au Canada en raison d'une température plus douce tout au long de l'année. L'hiver et le printemps ont été les plus chauds jamais connus, l'été 2010 occupe le troisième rang parmi les plus chaudes et l'automne 2010 occupe le deuxième rang.

L'année 2015 était aussi remarquable d'un point de vue météorologique. Pour la deuxième année consécutive, l'événement météorologique canadien le plus marquant a été un hiver long, froid et enneigé dans l'est du pays, alors qu'on enregistrerait un des hivers les plus chauds depuis 135 ans à l'échelle planétaire⁹.

⁸<https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=53E29740-1>

⁹ http://cmos.ca/site/top_ten?language=fr_FR&a=2015

Toute cette information concernant la météo pour 2010 et 2015 vient supporter les résultats obtenus:

- une période de croissance plus longue en 2010, le printemps plus hâtif et une période de sénescence plus graduelle et plus longue et tardive;
- par contre, en 2015, les résultats montrent un printemps plus tardif, une période de croissance plus courte et une période de sénescence très courte dans la tundra.

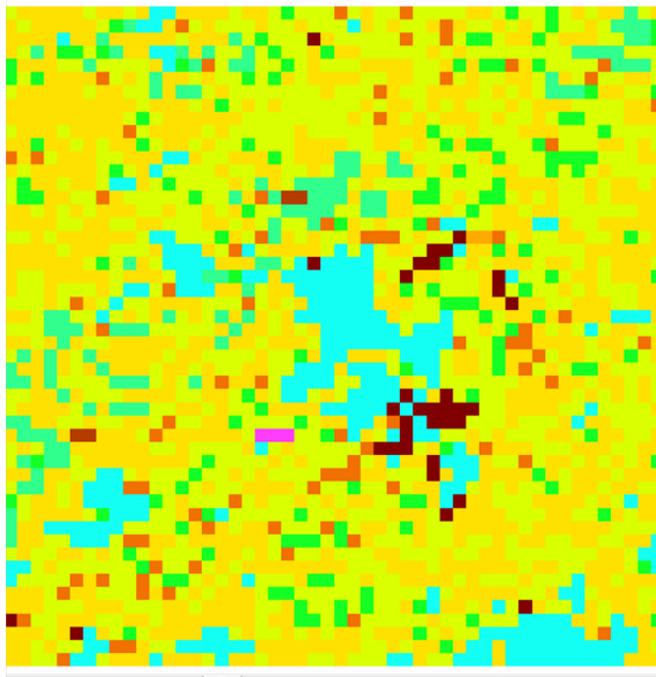
2.3.4. LE JOUR DE MAXIMUM DE LA SAISON DE CROISSANCE

Comme le montrent les Figures 20-22, le moment de la maturité maximale de la végétation en 2010 et 2015 pour les deux sites se situe entre le jour Julien 220 et 240 (8 - 28 août). Les photos de la caméra à Umiujaq montrent une végétation en pleine croissance. Ce qui est intéressant, c'est qu'il semble y avoir peu de différence entre 2010 et 2015 pour le moment de la maturité maximale, malgré les différences dans les conditions météorologiques.

Jour de maximum de NDVI

Site P1

2010



2015

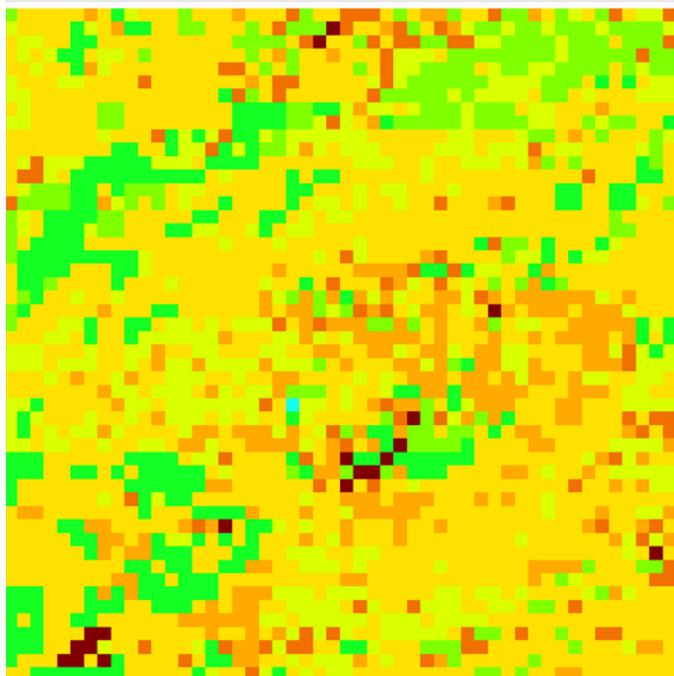
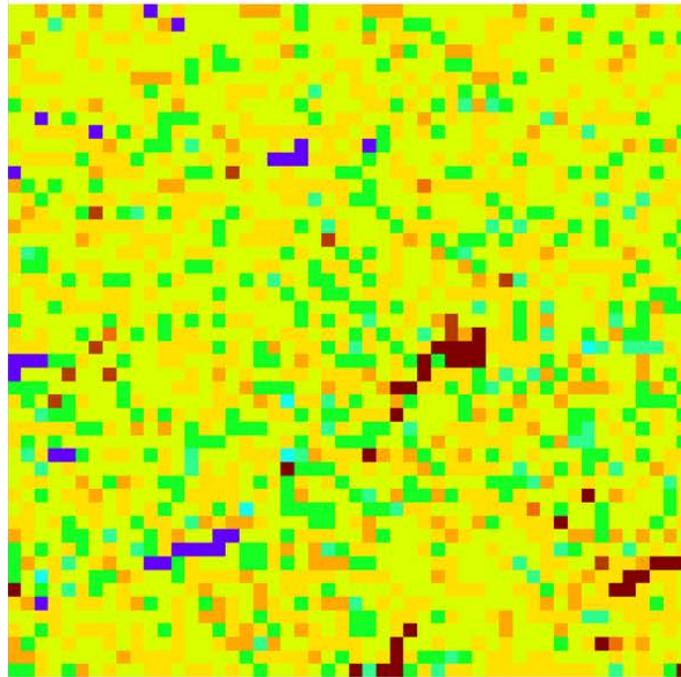


Figure 21. Jour de maximum maturité de la végétation pour le site P1 en 2010 et 2015

Jour de maximum de NDVI Site P2

2010



2015

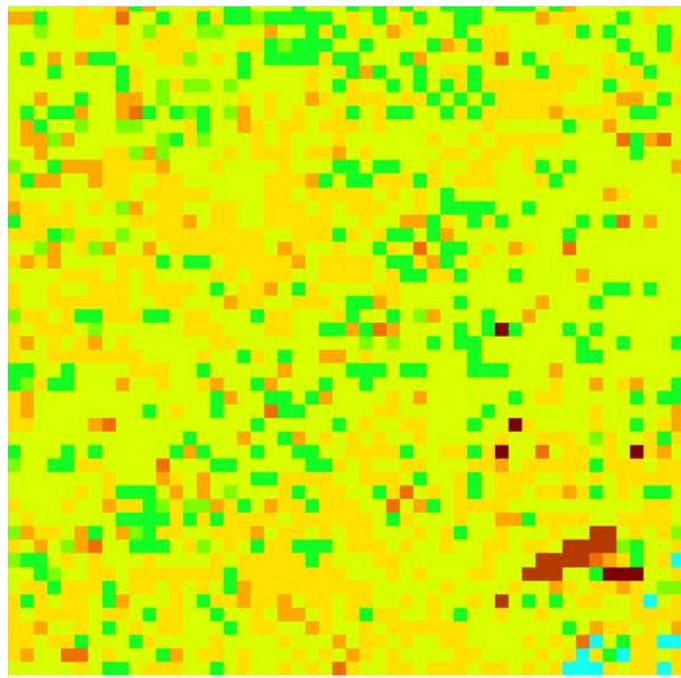


Figure 22. Jour de maximum maturité de la végétation pour le site P2 en 2010 et 2015

Jour de maximum de NDVI (day_max) pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

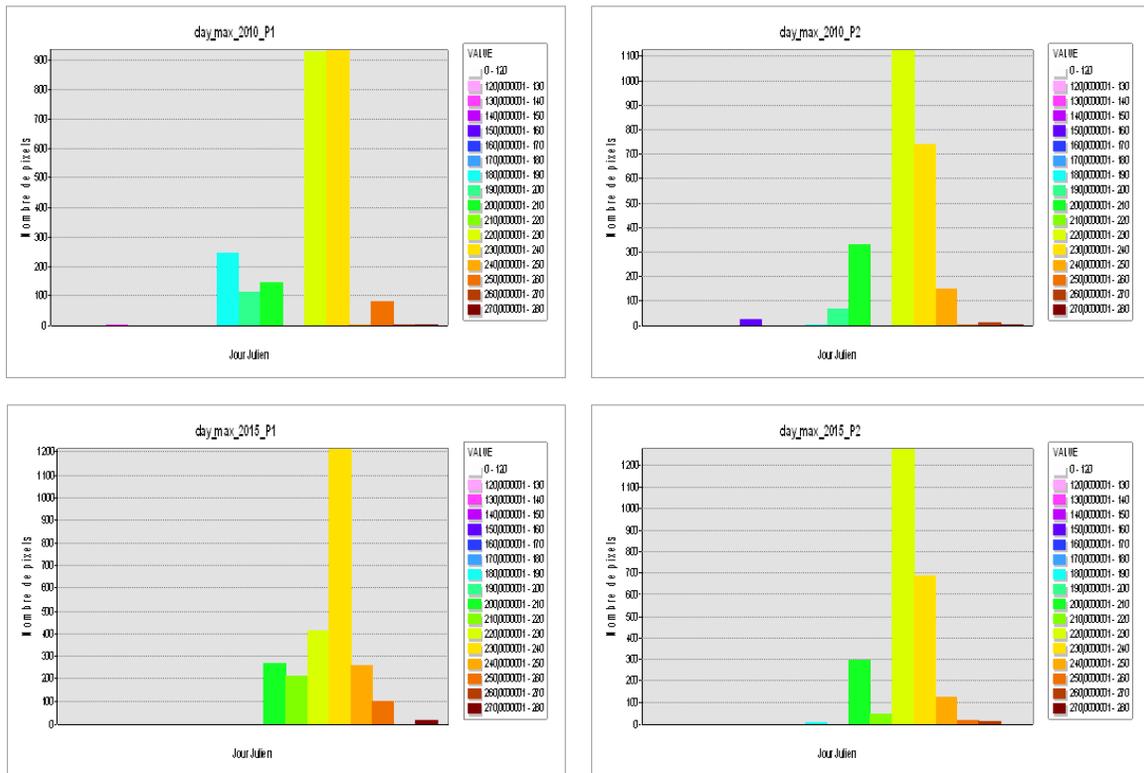


Figure 23. Histogramme de la distribution des valeurs de jour où l'NDVI atteint le maximum pour les sites P1 et P2 en 2010 et en 2015.

2.3.5. VALEUR MAXIMALE DU NDVI

La valeur du NDVI est bien corrélée aux différentes propriétés de la végétation comme les propriétés structurales (LAI Leaf Area index), la biomasse verte ou la productivité (la radiation photosynthétiquement active absorbée). Bien que plusieurs facteurs puissent influencer la valeur du NDVI (santé de la végétation, sécheresse, etc.), les valeurs plus élevées du NDVI sont en général associées avec un couvert végétal plus dense. Les chercheurs du Centre Canadien de Télédétection ont analysé les tendances concernant le pic annuel atteint par le NDVI au cours d'une période de 22 ans (de 1985 à 2006) et ils ont utilisé les changements du NDVI comme indicateurs des changements survenus dans la productivité primaire (Ahern *et al.* 2011). Walker *et al.* (2011) ont utilisé la valeur maximale du NDVI afin d'étudier les changements dans les zones

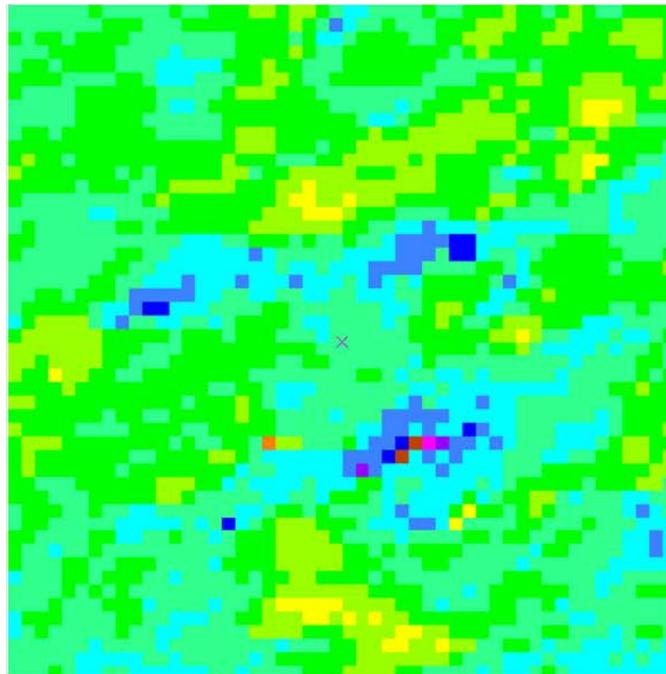
Arctique en Eurasie et en Amérique du Nord pour la période de 1982-2010. Leur étude a montré une tendance positive de ce paramètre.

Comme le montrent les Figures 23 - 25, malgré la saison de croissance plus courte en 2015, il y a plus de pixels avec les valeurs maximales plus élevées (couleur jaunâtre). Cet effet est plus évident pour le site P2. Cette observation suggère une végétation plus dense. De plus, ces pixels sont spatialement connectés. Cela pourrait être une indication de l'expansion de ces zones végétales. Bien que ces observations soient basées sur deux années avec des conditions météorologiques particulières, le suivi temporel de cet indicateur (valeur maximale) serait important pour le suivi BdQc.

Valeur maximale de NDVI

Site P1

2010



2015

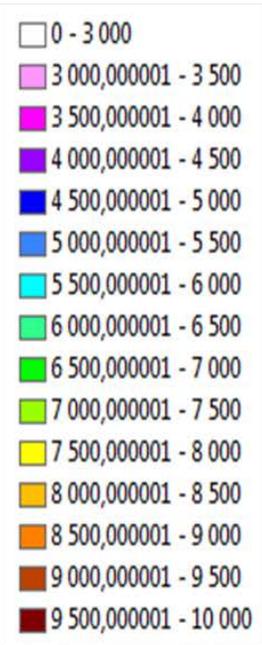
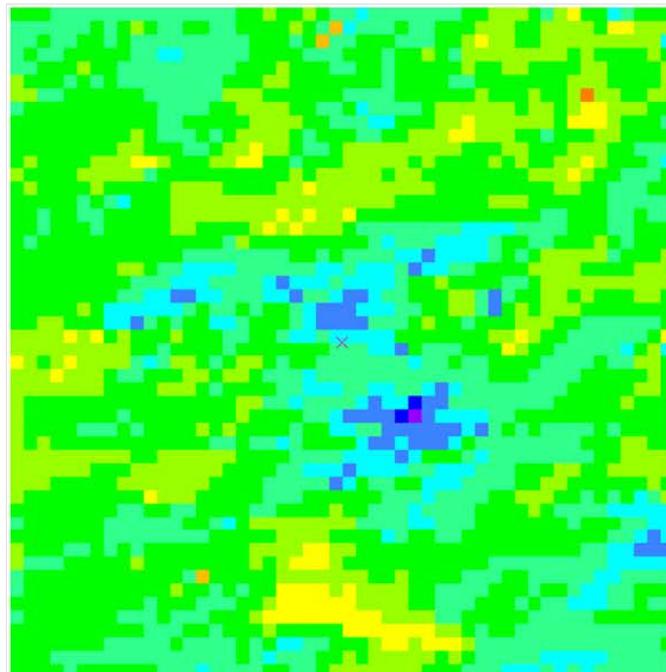
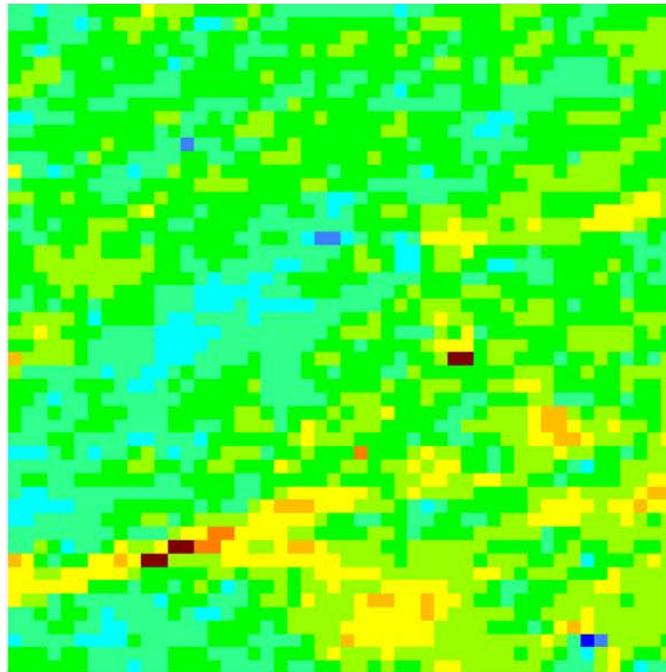


Figure 24. Valeur maximale du NDVI pour le site P1 en 2010 et 2015

Valeur maximale de NDVI

Site P2

2010



2015

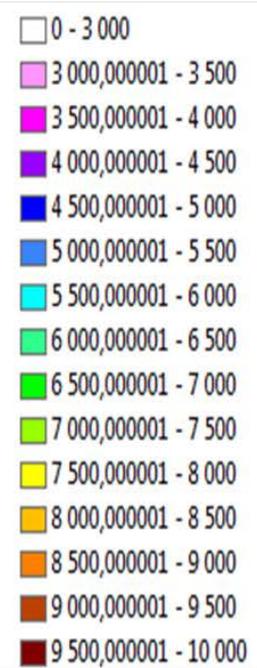
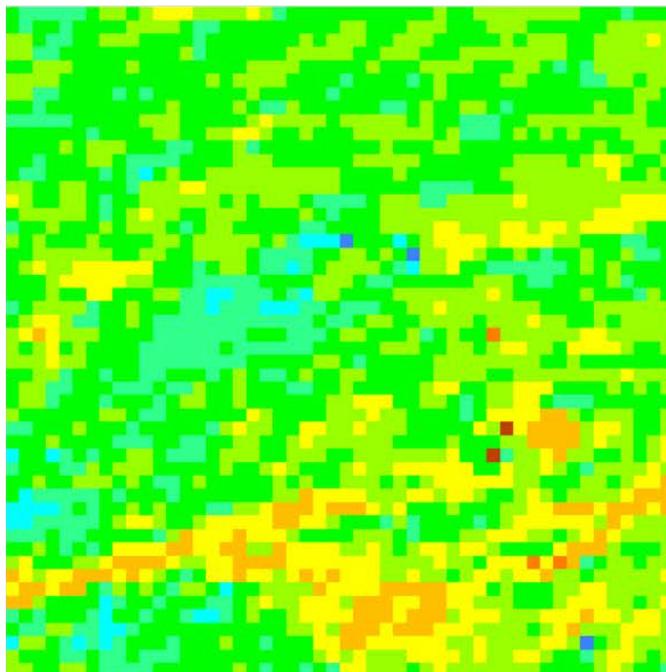


Figure 25. . Valeur maximale du NDVI pour le site P2 en 2010 et 2015

Valeur maximale du NDVI pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

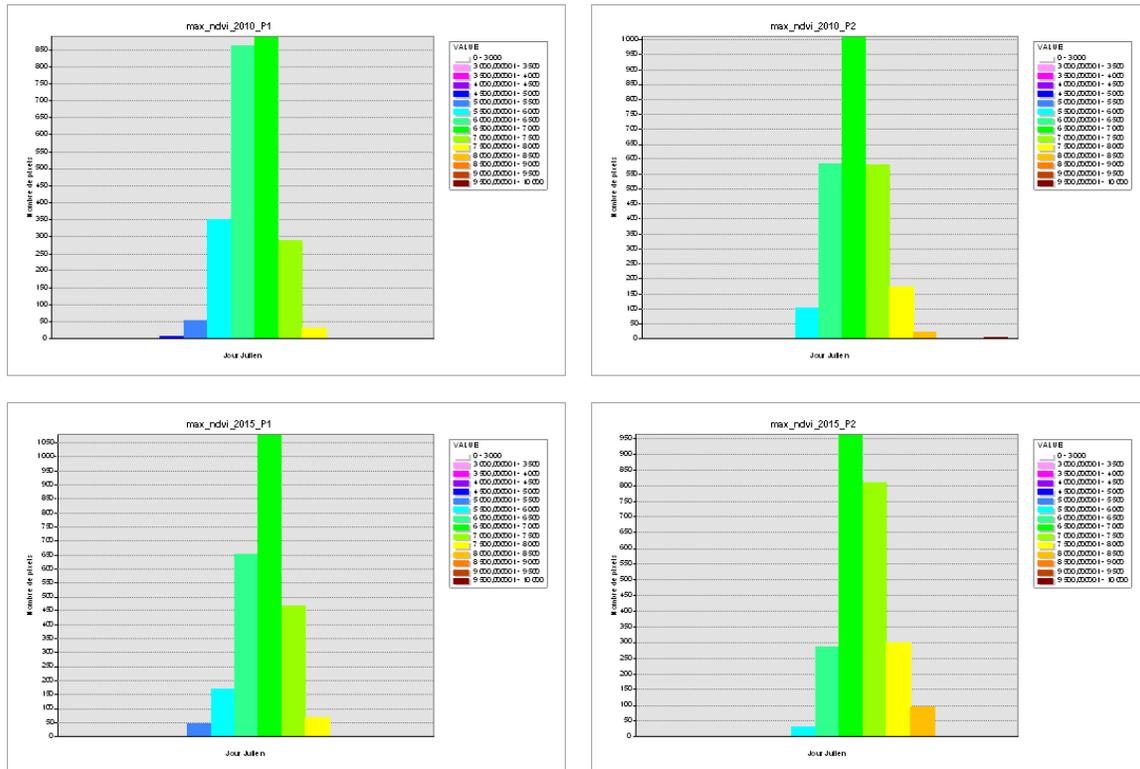


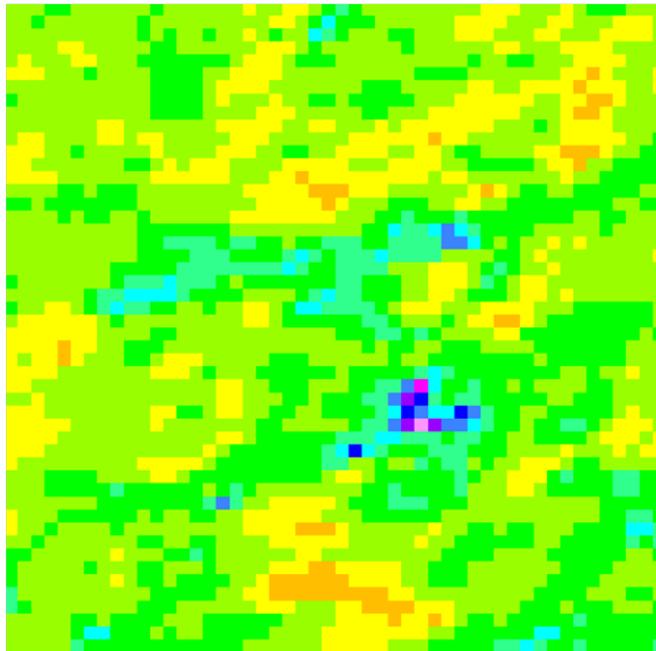
Figure 26. Histogramme de la distribution des valeurs maximale du NDVI pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

2.3.6. VALEUR MOYENNE DU NDVI

Valeur moyenne du NDVI

Site P1

2010



2015

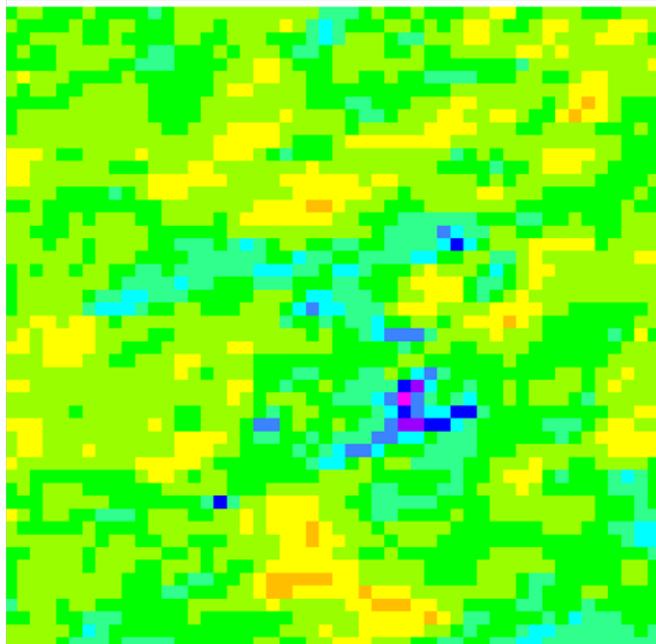
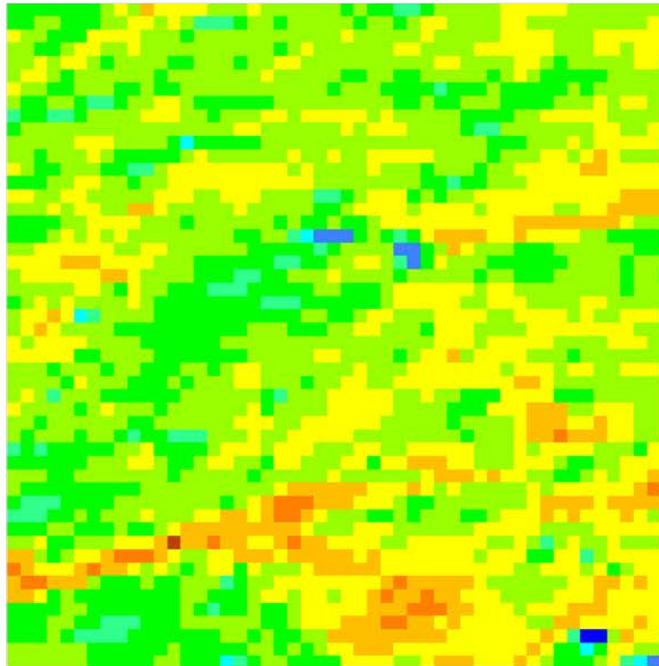


Figure 27. Valeur moyenne du NDVI pour le site P1 en 2010 et 2015

Valeur moyenne du NDVI

Site P2

2010



2015

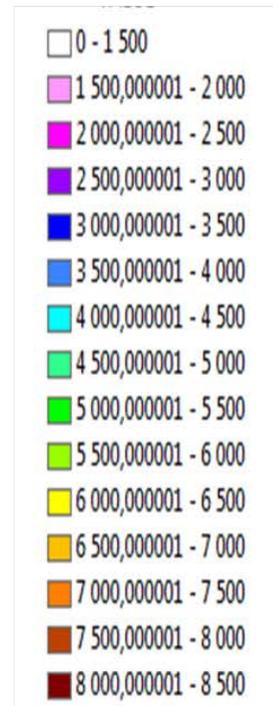
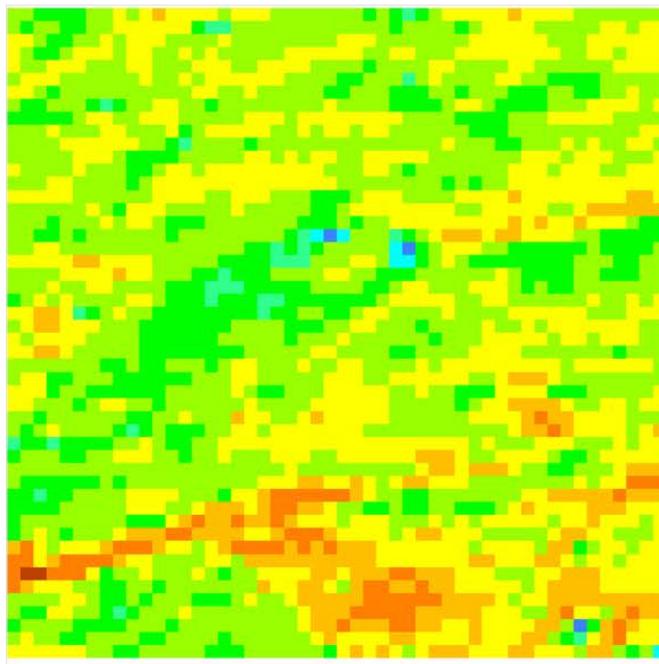


Figure 28. Valeur moyenne du NDVI pour le site P2 en 2010 et 2015

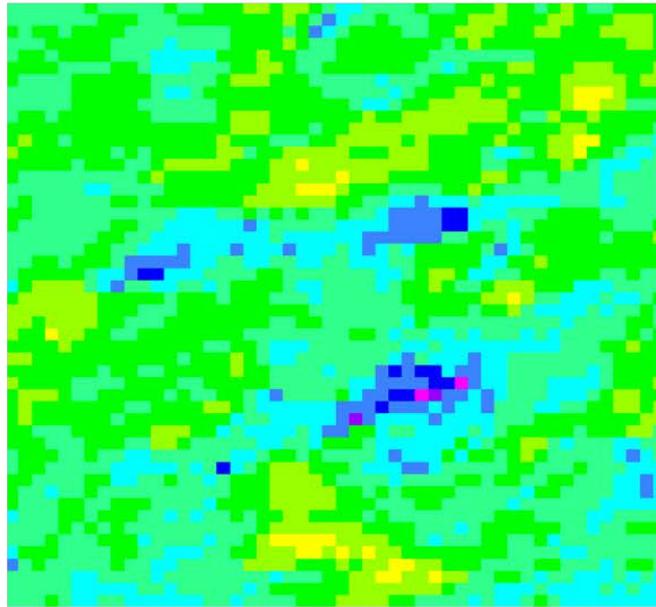
2.3.7. VALEUR MAXIMALE DU NDVI POUR LA PÉRIODE ESTIVALE (JUN-JUILLET- AOÛT)

Comme le maximum de la maturité survient en août (Figure 21-23), ce paramètre est presque identique avec le maximum annuel présenté aux Figures 24-25.

Valeur maximale du NDVI durant l'été (juin-juillet-août)

Site P1

2010



2015

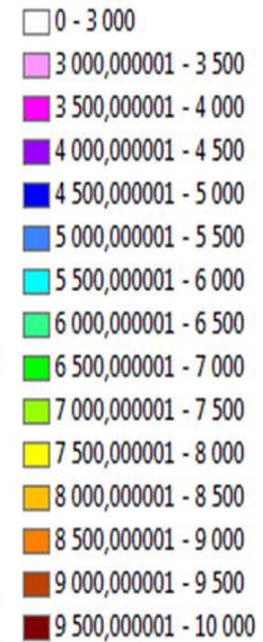
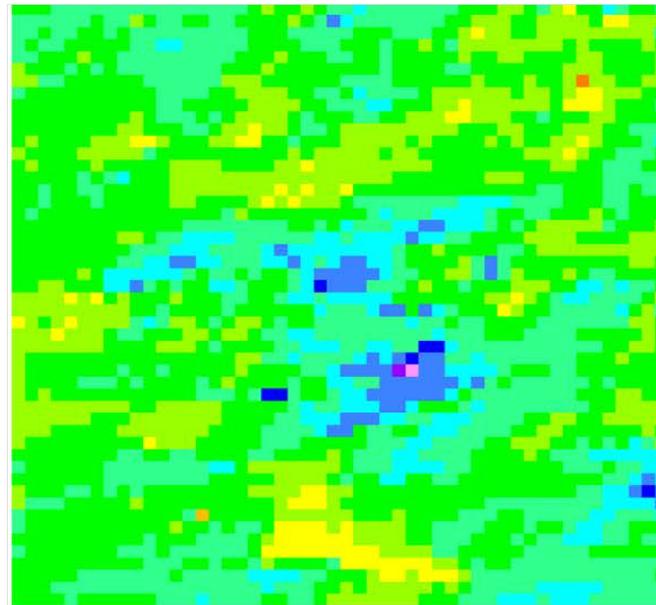
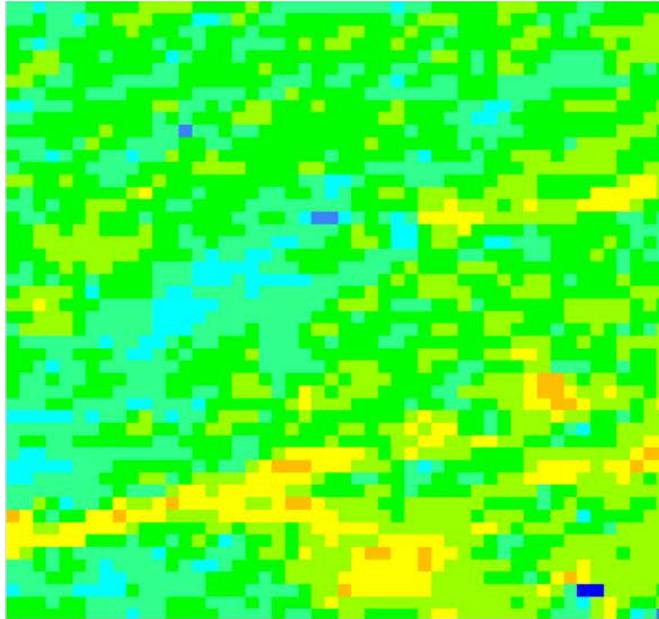


Figure 29. Valeur maximale du NDVI durant l'été pour le site P1 en 2010 et 2015

Valeur maximale du NDVI durant l'été (juin-juillet-août)

Site P2

2010



2015

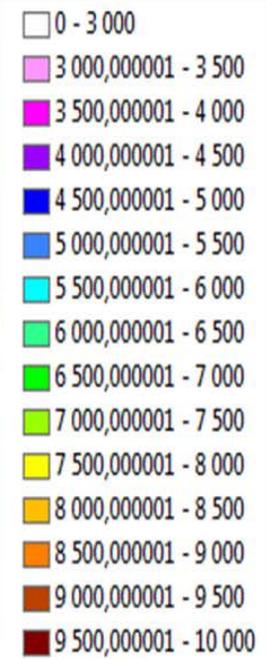
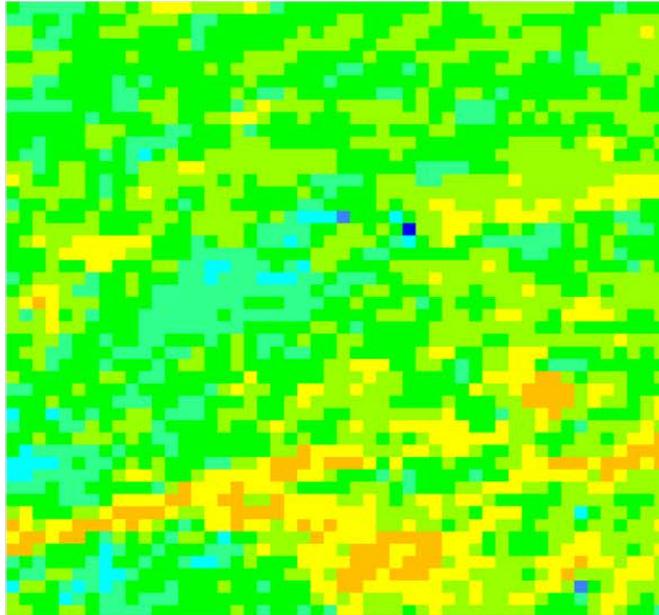


Figure 30. Valeur maximale du NDVI durant l'été pour le site P2 en 2010 et 2015

2.3.8. VALEUR MOYENNE DU NDVI POUR LA PÉRIODE ESTIVALE (JUIN-JUILLET- AOÛT)

La valeur moyenne est plus élevée pour la plupart des pixels en 2010, car la saison a commencé plus tôt.

Valeur moyenne du NDVI durant l'été (juin-juillet-août)

Site P1

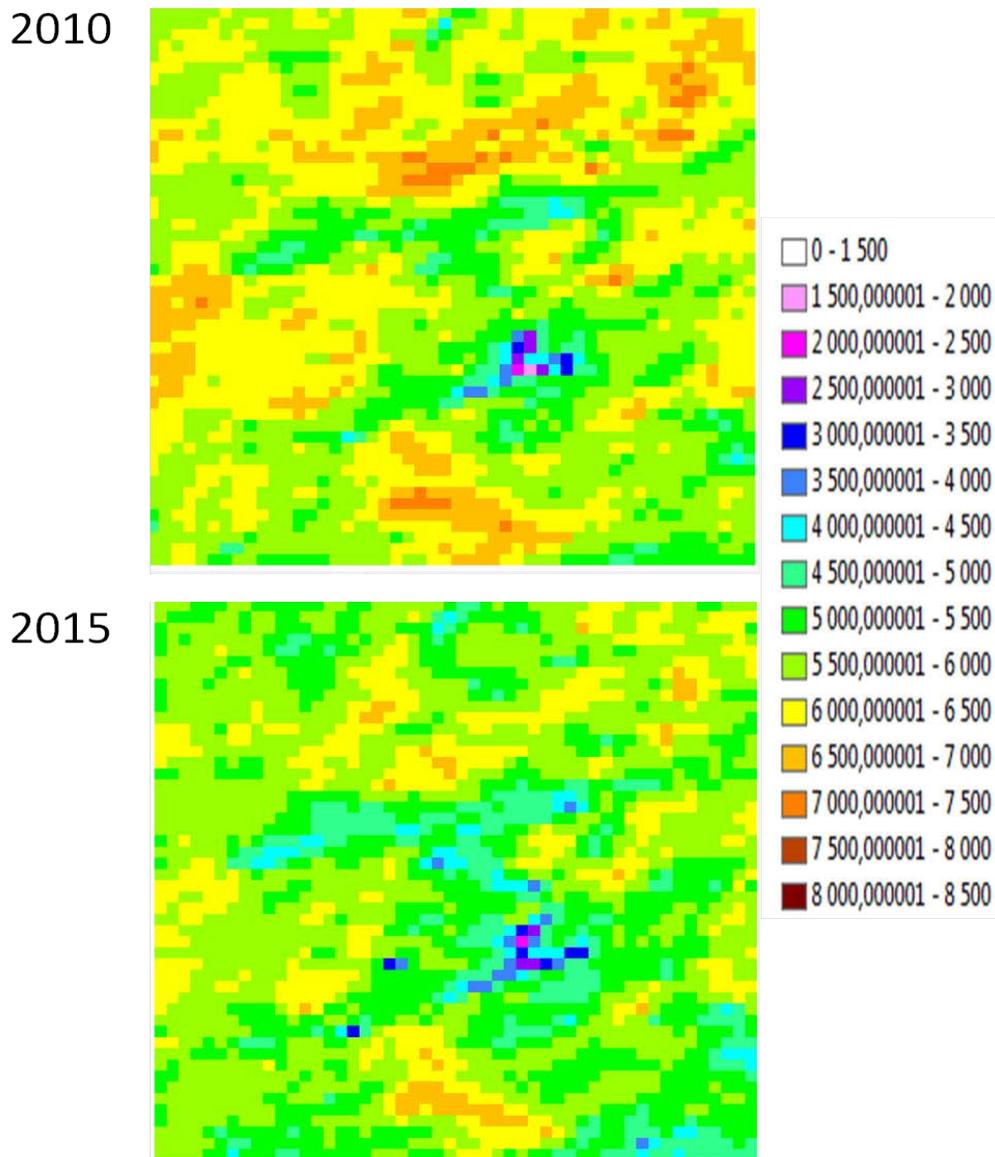
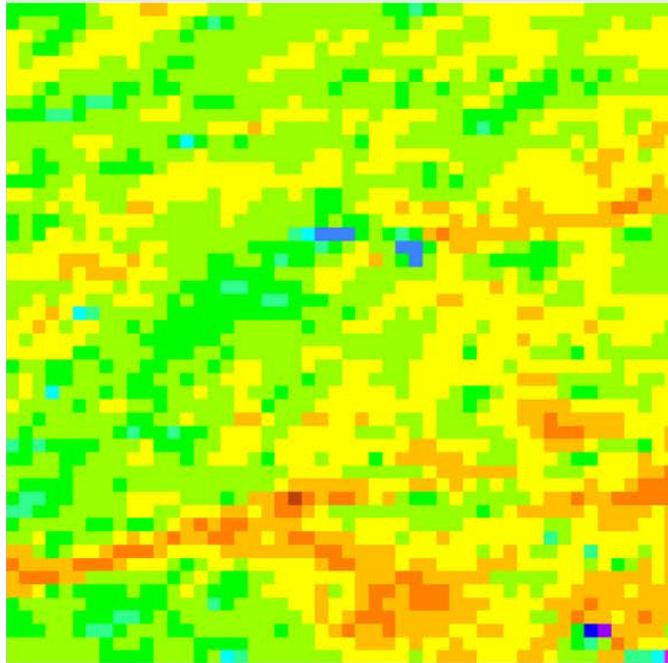


Figure 31. Valeur moyenne du NDVI durant l'été pour le site P1 en 2010 et 2015

Valeur moyenne du NDVI durant l'été (juin-juillet-août)

Site P2

2010



2015

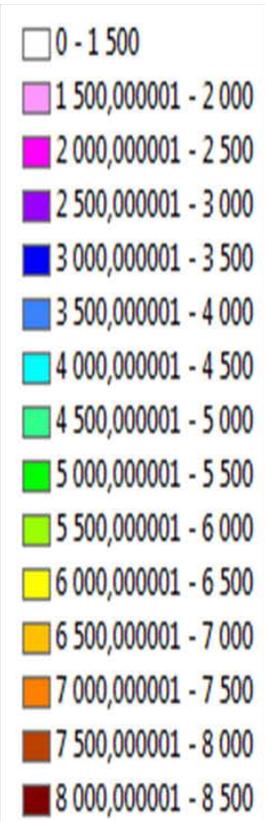
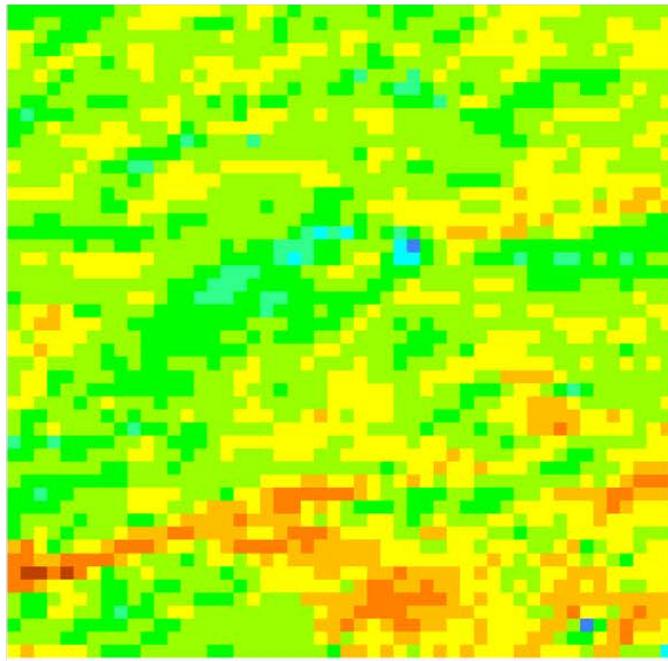


Figure 32. Valeur maximale du NDVI durant l'été pour le site P2 en 2010 et 2015

2.3.9. AMPLITUDE

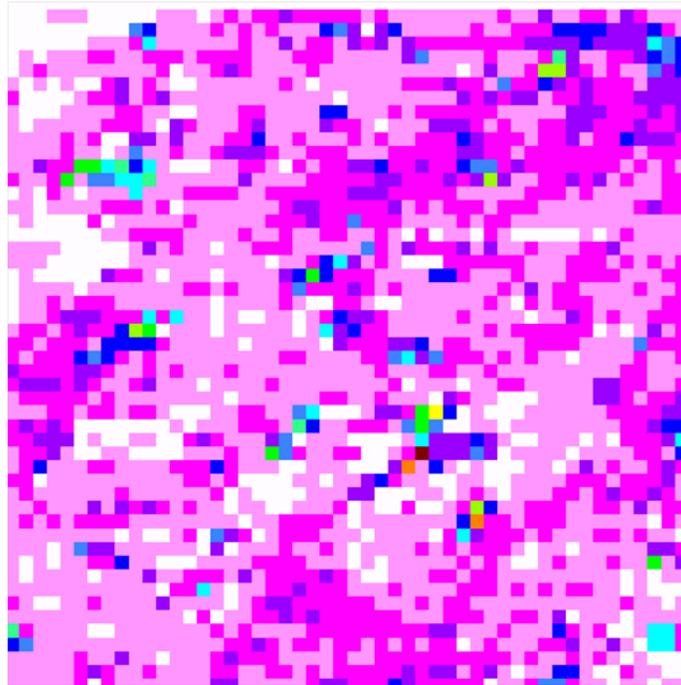
L'amplitude du NDVI est une mesure de la dynamique saisonnière de la végétation. Comme il était mentionné dans les sections précédentes, c'est le résultat de plusieurs facteurs (météo, santé, humidité du sol, etc.). La qualité des données pourrait aussi avoir un effet sur l'amplitude, car la valeur minimale des séries temporelles utilisées pour le calcul de l'amplitude peut être plus variable. Néanmoins, un changement de ce paramètre à long terme pourrait être également associé à un changement du type de végétation. Par exemple, la dynamique saisonnière du NDVI des conifères est moins prononcée que celle des feuillus. Cependant, compte tenu que le NDVI peut saturer dans les zones à végétation dense (p.ex. forêt tropical), cela va avoir un effet sur l'amplitude.

Comme l'indiquent les couleurs dans les Figures 33 et 34, l'amplitude était plus élevée en 2015 pour les deux sites. Sur les histogrammes de la Figure 35, on voit clairement ce décalage. Compte tenu de la saison de croissance plus tardive et plus courte pour l'année 2015, ce décalage dans la distribution des amplitudes est très intéressant.

Amplitude de NDVI

Site P1

2010



2015

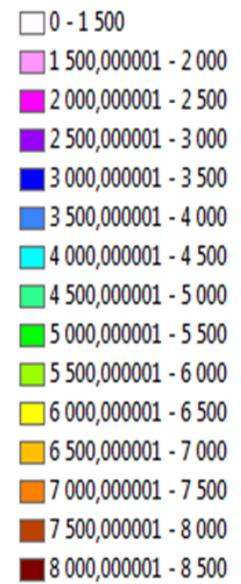
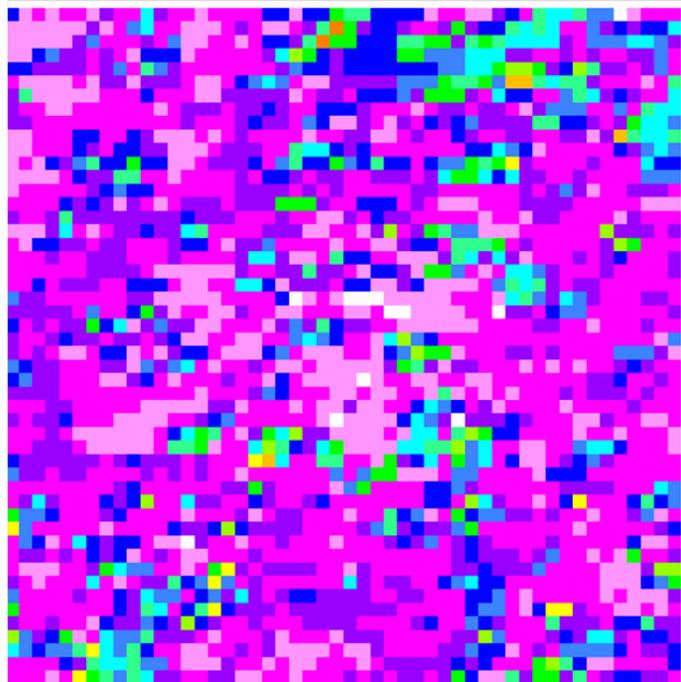
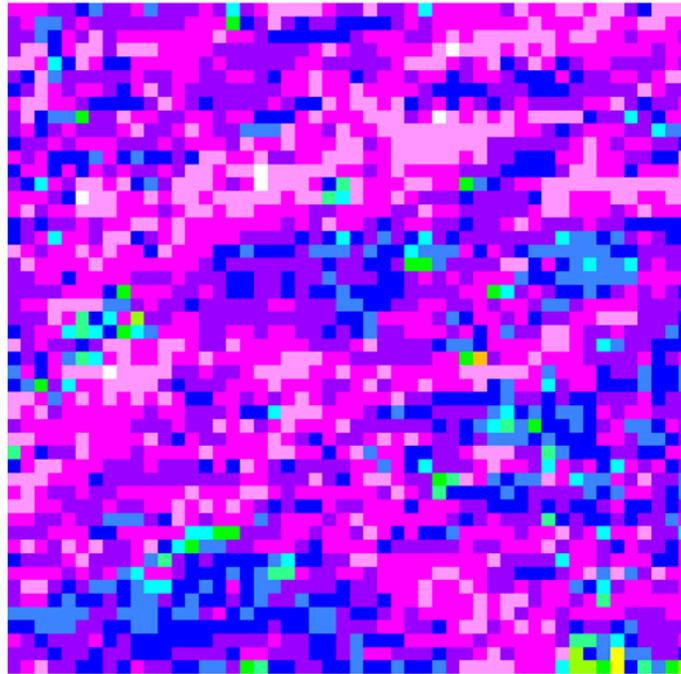


Figure 33. Amplitude du NDVI pour le site P1 en 2010 et 2015

Amplitude de NDVI

Site P2

2010



2015

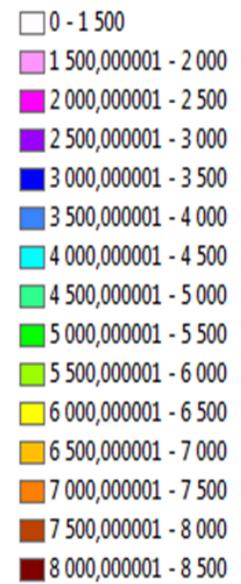
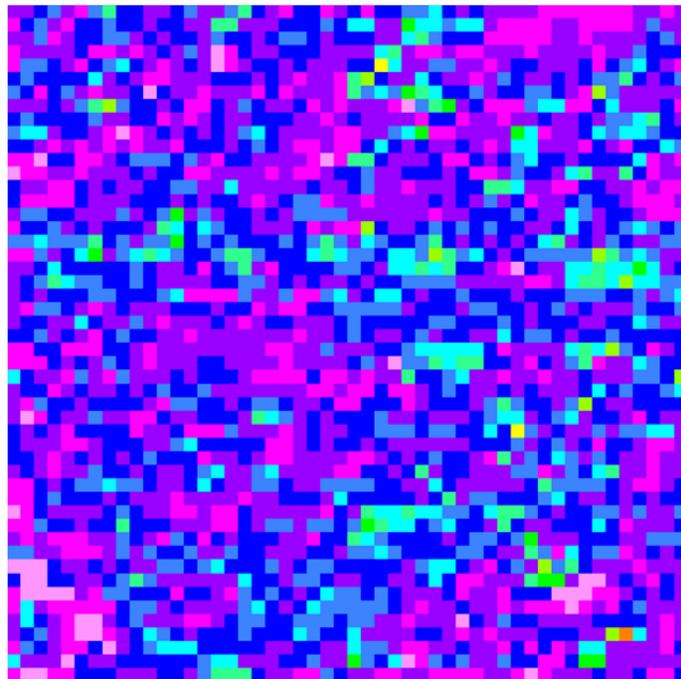


Figure 34. Amplitude du NDVI pour le site P1 en 2010 et 2015

Amplitude(A) pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

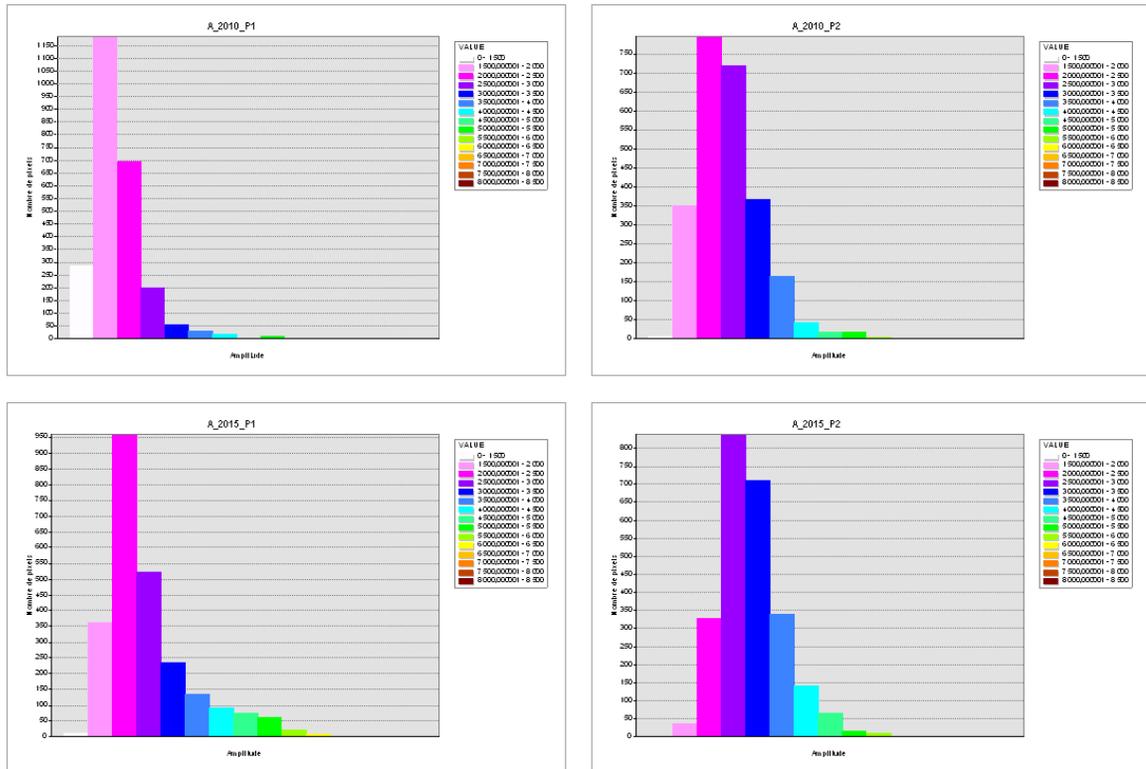


Figure 35. Histogramme de l'amplitude saisonnière du NDVI pour les sites P1 et P2 en 2010 et en 2015

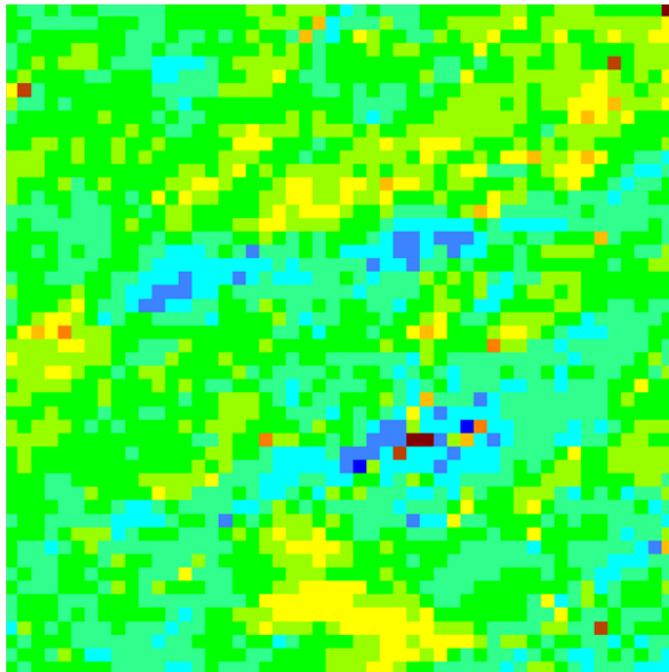
2.3.10. VALEUR MAXIMALE DU NDVI (INTERPOLÉE)

Nous avons également estimé la valeur maximale du NDVI (Figure 35 et 36) et le jour du maximum du NDVI interpolé (Figures 37 - 39) à partir des séries temporelles interpolées par Spline cubique. Étant donné que les séries interpolées permettent l'estimation du NDVI entre les jours ayant des mesures de NDVI, le but d'utiliser des séries interpolées est d'obtenir une estimation plus précise du jour du maximum. Cependant, les particularités observées sur le jour de maximum estimé pour le site P1 en 2015 (Figure 38) sont difficiles à expliquer et nécessitent une vérification de l'effet du *Spline* sur ces séries.

Valeur maximale du NDVI (interpolée)

Site P1

2010



2015

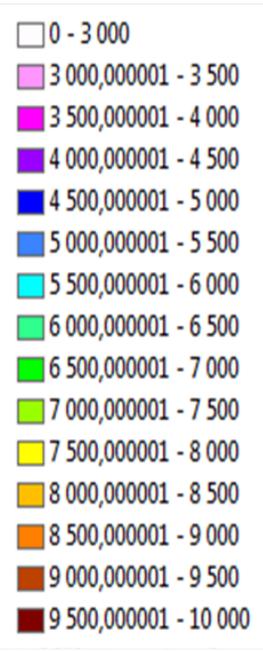
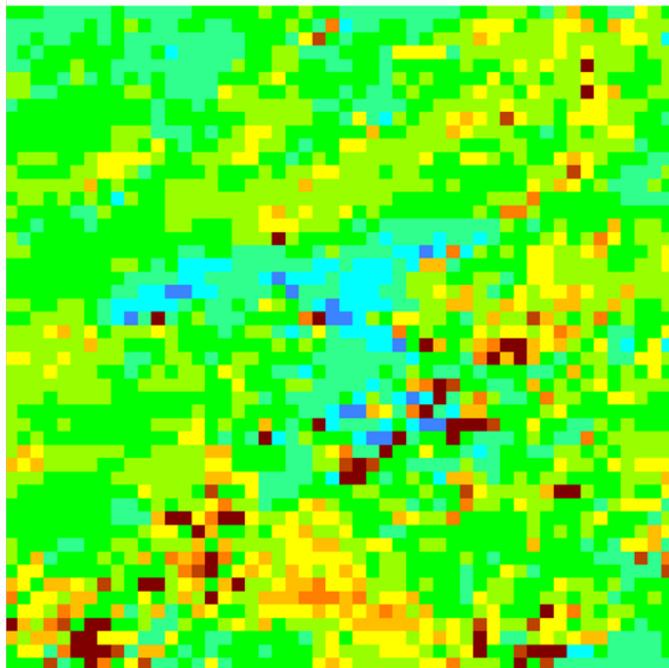
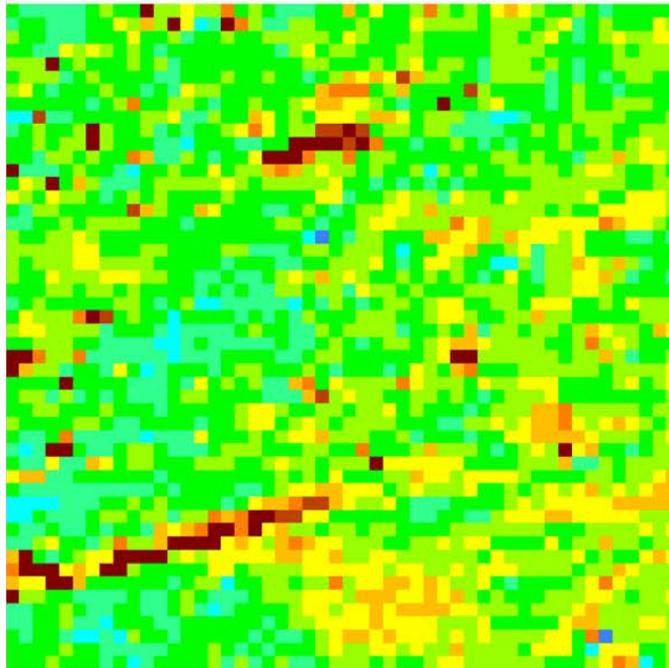


Figure 36. Valeur maximale du NDVI interpolée pour le site P1 en 2010 et 2015

Valeur maximale de NDVI (interpolée)

Site P2

2010



2015

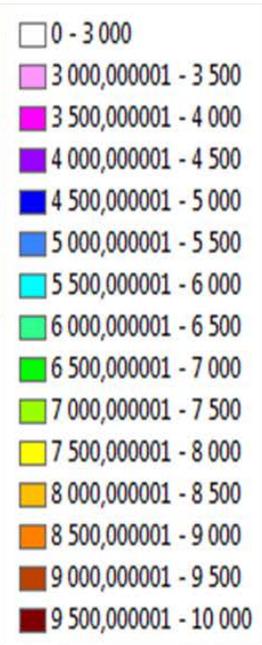
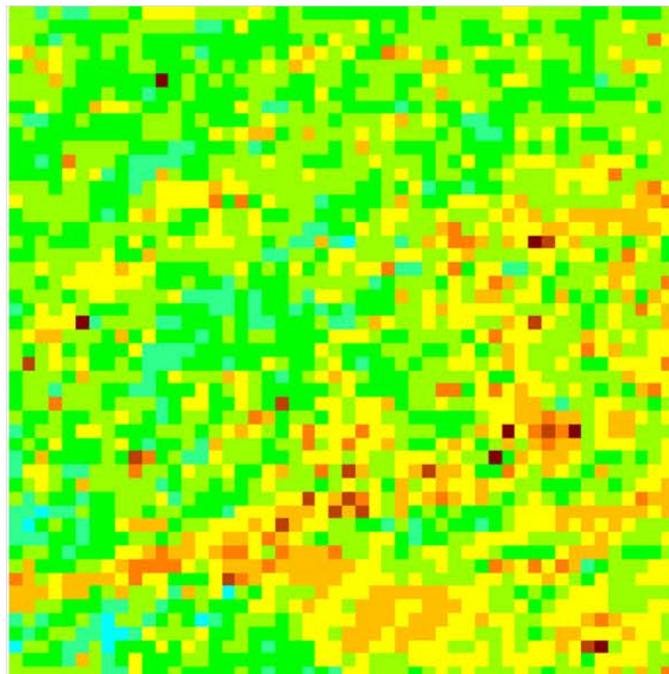
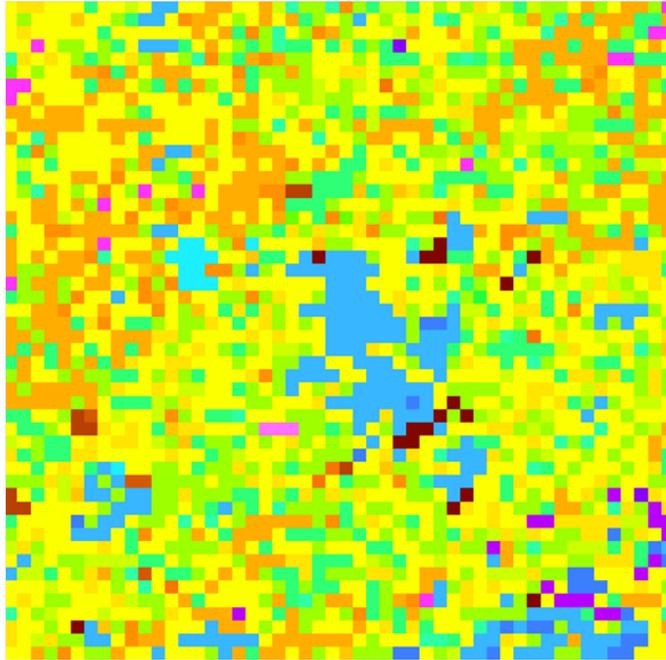


Figure 37. Valeur maximale du NDVI interpolée pour le site P2 en 2010 et 2015

2.3.11. JOUR DE MAXIMUM DU NDVI (INTERPOLÉ)

Jour de maximum de NDVI (interpolée) Site P1

2010



2015

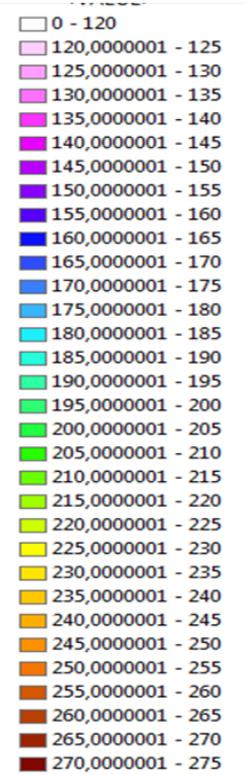
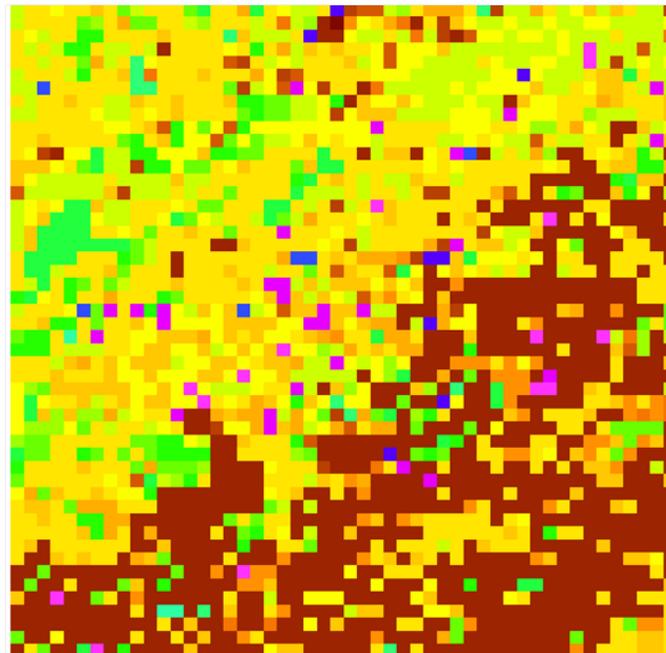
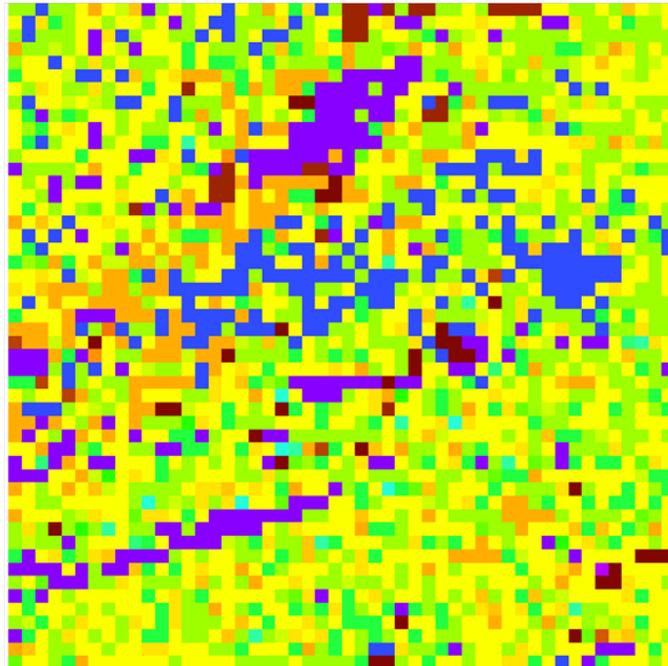


Figure 38. Jour de maximum maturité de la végétation (séries interpolées) pour le site P1 en 2010 et 2015

Jour de maximum de NDVI (interpolée) Site P2

2010



2015

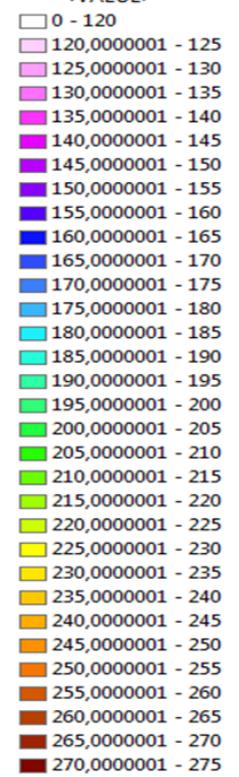
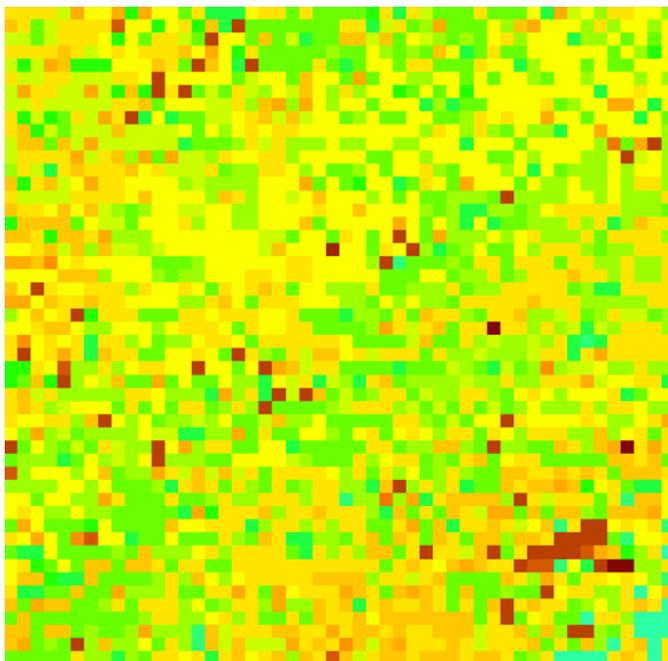


Figure 39. Jour de maximum maturité de la végétation (séries interpolées) pour le site P2 en 2010 et 2015

Jour du maximum du NDVI (interpolée) pour les sites P1 et P2 en 2010 et 2015

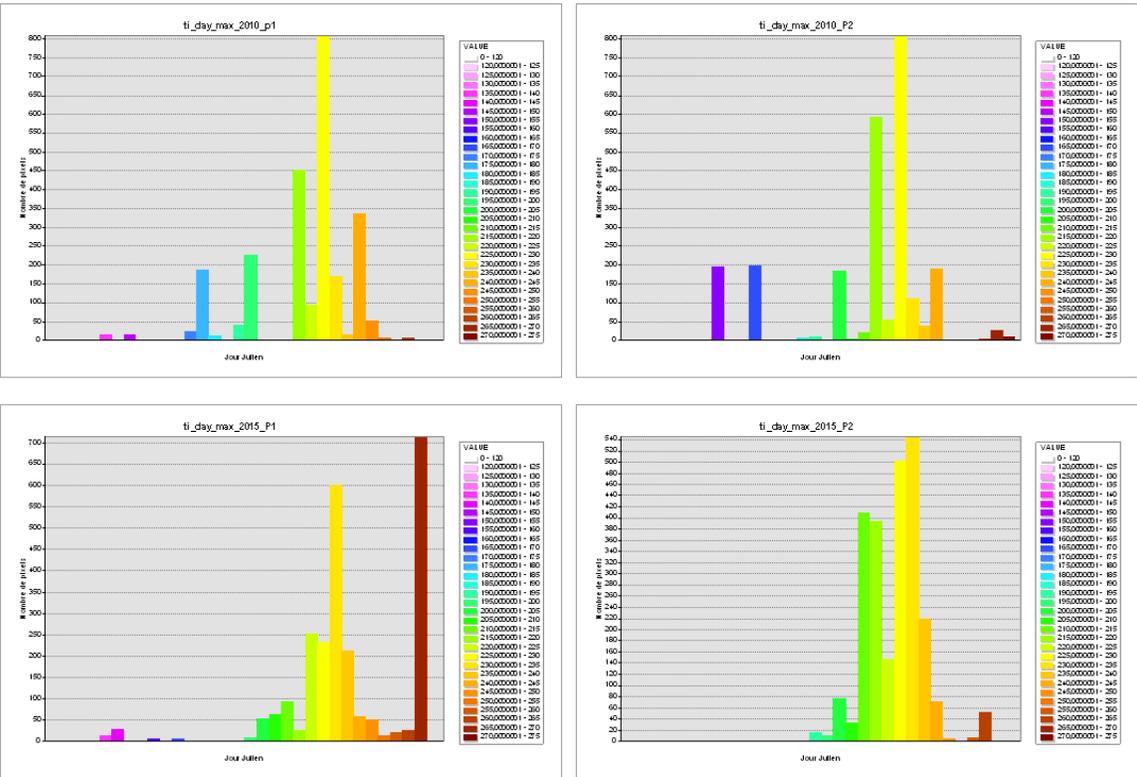


Figure 40. Histogramme de la distribution des valeurs de jour où l'NDVI interpolé atteint le maximum pour les sites P1 et P2 en 2010 et en 2015.

3. CARACTERISATION DE LA NEIGE ET DU COUVERT DE GLACE

La couverture de la neige peut être un facteur de contrôle dominant de la biodiversité dans les climats froids. L'épaisseur et la dynamique du couvert de neige peuvent avoir un impact direct sur la phénologie des plantes et des animaux, sur le bilan hydrique, ainsi que sur la qualité des habitats et leur productivité (Wulder *et al.*, 2012).

Au Canada et au Québec, le couvert nival s'établit et disparaît à l'intérieur d'une période de six mois. Les caractéristiques uniques de la neige, notamment sa réflectance plus élevée et sa température plus froide, sont exploitées par les algorithmes de détection à l'aide de la télédétection (Muñoz *et al.*, 2013; Roberge, 2013). Le couvert nival peut être détecté et suivi avec une variété de capteurs satellitaires. Les capteurs optiques (AVHRR, MODIS, Landsat, SPOT VEGETATION, etc.) sont efficaces pour suivre l'étendue du couvert nival au sol, cependant ils ne permettent pas d'estimer d'autres caractéristiques de la neige comme l'épaisseur, la densité ou l'équivalent en eau. Pour l'estimation de l'équivalent en eau et de l'épaisseur de la neige, des capteurs micro-onde passives (SSM/I, AMSR-E, AMSR-2) et actives (ERS, RADARSAT, QuickSCAT, etc.) sont utilisés (Bernier *et al.*, 1999; Goïta *et al.*, 2003; Pulliainen, 2006, Royer *et al.*, 2010, De Sève *et al.*, 2012). Les capteurs micro-ondes (passives et actives) ont la capacité de pénétrer les nuages et de fonctionner autant de jour que de nuit. Toutefois, les capteurs micro-ondes passives sont limités par leur résolution grossière, variant entre 12 km et 25 km (Roberge, 2013). Ainsi, une combinaison des capteurs optiques et micro-ondes peut être utilisée afin d'allier la plus haute résolution spatiale du capteur optique à la capacité de pénétrer les nuages du capteur de micro-ondes passives (Kongoli *et al.*, 2007; Chokmani *et al.*, 2013; Roberge, 2013). Une autre alternative est le radar à synthèse d'ouverture (p. ex. RADARSAT, TerraSAR-X, et Sentinelle-1A et 1B). Ils existent depuis le début des années 90. Ils offrent une résolution plus fine (25m, 10m, 3m), mais une résolution temporelle de 5-6 jours, ce qui limite leur utilisation pour le suivi BdQc dans les périodes de transition (automne et printemps) Néanmoins, le lancement d'un second SAR, jumeau à Sentinelle-1, par l'Agence spatiale européenne et la future mission canadienne Constellation (trois satellites SAR en 2018), va de beaucoup améliorer la répétitivité des acquisitions au-dessus d'un site donné.

Pour le suivi BdQc, compte tenu de la nature éphémère de la neige et de la glace, les images qui offrent une haute fréquence de revisite et qui couvrent une grande étendue terrestre et disposent de longues séries de données, telles AVHRR et MODIS, sont préférables pour le suivi de la dynamique du couvert nival ainsi que la glace de milieu aquatique. Les images MODIS offrent une meilleure résolution (250 m), par contre les images AVHRR ont une plus longue série de données (≈45 ans).

Comme la variation spatio-temporelle du couvert nival a une haute importance dans les activités anthropiques, et étant une composante clé dans les études de changements climatiques, elle est suivie constamment. Il existe différents produits opérationnels pour suivre l'évolution du couvert de neige issus de données de télédétection. Parmi ces produits, les produits MODIS Snow-Cover offrent la meilleure résolution spatiale. Les produits MODIS sont des images composites, c.-à-d.

des images produites par la fusion de plusieurs orbites pour une seule date d'acquisition ou par la fusion de plusieurs dates d'acquisition afin d'obtenir des images à ciel clair. De plus, les produits MODIS incorporent un ajustement pour le couvert végétal dense qui réduit les imprécisions dans la cartographie de la neige en présence de couvert forestier qui cache la neige sous la canopée (Nolin, 2010). Seul le produit MODIS offre de l'information sur la sous-fraction de neige (pourcentage de couverture de neige présente dans un pixel) (Roberge, 2013). Cette information est préférée à la classification binaire de pixel (neige/ pas de neige), car elle pourrait plus précisément tenir compte de la variabilité spatiale de la couverture neigeuse lorsque la couverture est inférieure à 100% (Nolin, 2010).

Cependant, même si ces produits MODIS montrent une haute précision pour la cartographie de la neige, il faut noter qu'à ce jour, ils ne sont pas validés au Québec (Roberge, 2013). D'une part, parce que les stations de mesure sont rares lorsqu'on s'éloigne de la vallée du Saint-Laurent et d'autre part, à cause de la grande proportion de la superficie du Québec occupée par la forêt boréale dont la canopée masque la présence de la neige au sol. De plus, comme dans le cas des paramètres phénologiques (produits MODIS), un post-traitement des produits MODIS est nécessaire afin de déterminer les moments d'établissement du couvert nival et du début de la fonte de manière automatique, régulière et pour les endroits d'intérêt.

Concernant les produits AVHRR (1km de résolution) disponibles pour le Québec, un algorithme de détection de la neige au sol sous couvert forestier est en train d'être développé et validé à l'INRS par une étudiante au doctorat du professeur Karem Chokmani (Sophie Roberge). Cet algorithme sera la base d'un atlas en ligne de la couverture nival du Québec à partir des images AVHRR qui aura une résolution de 1km et qui couvrira la période de 1988 jusqu'à 2015 et sera mis à jour régulièrement. L'atlas devrait permettre d'extraire les probabilités d'avoir une couverture de neige à un endroit donné un jour donné, comme la probabilité d'avoir de la neige au sol le 25 décembre à Québec par exemple.

Il existe peu d'algorithmes pour cartographier automatiquement la glace des plans d'eau. Un de ces algorithmes, SNOWMAP, est à la base des produits MODIS Snow Cover qui fournit de l'information sur le couvert nival des surfaces terrestres, ainsi que sur le couvert de glace des plans d'eau intérieurs à une résolution spatiale de 500 m et une fréquence temporelle de 1 jour, 8 jours ou mensuelle (Duguay *et al.*, 2014). Quelques études (Brown et Duguay (2012); Kropachek *et al.*, 2013) ont démontré les capacités de ce produit à suivre la phénologie de la glace des lacs. Latiphovic et Pouliot (2007) ont développé un algorithme pour extraire la phénologie de la glace. Ils ont appliqué cet algorithme sur des images AVHRR historiques (i.e. 1985 – 2004) et l'ont validé pour 36 grands lacs canadiens. À noter que, selon les auteurs, la méthode est applicable pour des données provenant d'autres satellites. Toutefois, malgré la résolution temporelle des images optiques, l'acquisition de ces images est souvent problématique à cause de la présence d'une couverture nuageuse (surtout durant la période de gel des lacs). Dans ces conditions, ainsi que dans les conditions de nuit polaire, les capteurs micro-ondes actifs (RADAR) sont plus avantageux pour distinguer le couvert de glace de l'eau libre.

4. CONCLUSION

La quatrième et dernière étape de ce mandat visait trois objectifs spécifiques, notamment :

- 1) développer la méthodologie pour le traitement et l'analyse de produits MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ;
- 2) décrire le protocole à suivre afin d'avoir une démarche facile à reproduire;
- 3) appliquer le protocole sur des séries d'images afin d'extraire un portrait sommaire de deux indicateurs sélectionnés (I1 et I7).

Les trois objectifs ont été atteints pour l'un des deux indicateurs, la phénologie de la végétation. Un protocole spécifique pour le suivi de la phénologie de la végétation par télédétection a été développé, décrit et appliqué pour deux sites situés dans la zone à la limite des arbres. En plus, la méthodologie a été automatisée sur ArcGIS. Le code PYTHON programmé dans le cadre de ce mandat pour le traitement automatisé des images MODIS et la détermination de 11 paramètres de végétation a été transmis au MDDELCC sous pli séparé.

Le second indicateur (couvert nival) n'a pas été traité, car toutes les étapes de traitement et d'analyse pour les 11 paramètres de végétation (y compris les fonctions analytiques) ont dû être programmées dans ArcGIS, ce qui a pris beaucoup plus de temps que celui prévu dans le devis soumis à l'hiver 2016. L'INRS pourra fournir au Ministère un nouveau devis si jamais il était souhaité de développer un protocole spécifique pour détecter l'installation du couvert nival et le début de la fonte à partir des images MODIS. Certains codes programmés pour les paramètres phénologiques de la végétation pourront être utilisés à nouveau pour les paramètres liés au couvert nival.

Ce rapport montre le potentiel des données issues de la télédétection pour le suivi temporel et spatial de la phénologie de la végétation. Il fournit un ensemble de lignes directrices pour le traitement des données MODIS et l'extraction de l'information. Bien que le protocole ait été appliqué seulement pour deux petits sites, les résultats montrent que la méthode proposée est capable de fournir les paramètres phénologiques de la végétation désirés de manière satisfaisante avec une bonne concordance avec des photos in situ servant de validation primaire et, dans ce cas et endroit, d'unique validation. Les résultats issus du produit MODIS montre aussi une différence phénologique entre les deux sites étudiées (P1 et P2) et ce, pour les deux années.

Lors de la réalisation de ce mandat, la principale difficulté a été la limite d'espace mémoire de 32 bits d'ArcGIS, mais l'outil développé sera en mesure de traiter les cinq tuiles. Comme discuté, une approche alternative serait d'estimer un seul paramètre phénologique à la fois par tuile, ce qui permettrait de traiter une image environ 121 fois plus grande. Le code PYTHON (livré sous pli séparé) a donc été modifié à la toute fin du projet pour permettre de sélectionner et calculer un seul paramètre phénologique.

En ce moment, nous ne pouvons pas dire que nos méthodes sont plus précises que celles d'autres chercheurs, car ils n'ont pas travaillé sur le même territoire avec les mêmes images MODIS. Nous ne pouvons que comparer leurs résultats sur un même indicateur. De plus, comme le but du comité Suivi BdQc est de faire un suivi sur une base régulière dans le temps, il faut s'assurer d'appliquer la même méthode. D'autres études citées dans ce document montrent un changement basé sur le pic de NDVI, mais les paramètres que le comité Suivi BdQc voulait connaître (début, fin et longueur de la saison de croissance) ne sont pas évalués par ces études. De plus, à notre connaissance, les autres méthodes n'utilisent pas le jour exact d'acquisition des images MODIS pour chaque pixel, approche qui améliore la précision temporelle.

En raison du mélange des espèces végétales dans les limites d'un pixel de 250 m par 250 m, les paramètres SOS (début de saison) et EOS (fin de saison) peuvent varier pour chacune des espèces. La proportion des espèces peut aussi changer dans le temps et cela va affecter les paramètres phénologiques. Les paramètres SOS et EOS issus de l'interprétation des images optiques satellitaires sont des paramètres un peu abstraits mais ils pourraient permettre de faire un suivi dans le temps des changements de la végétation à l'échelle désirée.

Les paramètres phénologiques montrent une grande variabilité interannuelle, associée aux variations climatiques. L'analyse que nous avons faite sur deux années et avec deux séries d'images MODIS montre cette variation dans la toundra le long de la limite de croissance des arbres. Il aurait été bien de comparer les résultats en milieu forestier mais nous n'avons pas de photographie in situ. Pour détecter des tendances dans l'évolution des paramètres phénologiques sur plusieurs années, il existe différentes techniques (test de Mann–Kendall, anomalie, régression, etc.) dont la performance dépend des données satellitaires utilisées et de la résolution spatiotemporelle correspondante (Forkel *et al.*, 2013).

Finalement, pour une intégration optimale des données de télédétection dans le réseau de suivi BdQc, une collaboration étroite avec les spécialistes en biodiversité (biologistes, écologues, etc.) sera nécessaire afin d'analyser ces premiers résultats et d'adapter au besoin les paramètres (conservés ou éliminés certains des 11) ou les méthodes (p.ex. lissage, interpolation, etc.), pour qu'ils soient applicables pour la variété de paysages du Québec.

RÉFÉRENCES

- AAMP, (2015). *Plans de gestion des Parcs naturels marins. Note méthodologique. Fiche sur indicateurs / tableau de bord.* (Document interne). Brest, Agence des Aires Marines Protégées, 9 p.
- Abuzar M., Sheffield K., Whitfield D., O'Connell M., McAllister A., (2014). *Comparing Inter-Sensor NDVI for the Analysis of Horticulture Crops in South-Eastern Australia.* American Journal of Remote Sensing. **2**(1): 1-9.
- Ahern F., Frisk J., Latifovic R., Pouliot D., (2011). *Surveillance à distance des écosystèmes : sélection de tendances mesurées à partir d'observations par satellite du Canada. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010*, Rapport technique thématique no 17. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, (Ont.), 70p.
- Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T., & Hatfield J.L., (1984). *Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat*. Agron. J. 76:300-306.
- Atkinson P. M., Jeganathan C., Dash J., & Atzberger C., (2012). *Intercomparison of four models for smoothing satellite sensor timeseries data to estimate vegetation phenology*, Remote Sens. Environ., **123**, 400–417.
- Atzberger C. & Eilers P.H.C., (2011). *Evaluating the effectiveness of smoothing algorithms in the absence of ground reference measurements*, International Journal of Remote Sensing, **32** (13), 3689–3709.
- Azzali, S. & Menenti, M., (2000). *Mapping vegetation-soil-climate complexes in Southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data.* International Journal of Remote Sensing, 21, 973–996.
- Bachoo A. & Archibald S., (2007). *Influence of using date-specific values when extracting phenological metrics from 8-day composite NDVI data*, Multi Temp 2007. IEEE, Leuven, Belgium.
- Beck P.S.A, Atzberger C, Høgda K.A., Johansen B. & Skidmore A.K., (2006). *Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI.* Remote Sensing of Environment, **100**, 321 – 334.
- Beck P. S. A., & Goetz S.J., (2011). *Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences.* Environ. Res. Lett. **6**.
- Bernier M., Dissanska, M. Lachapelle, B., (2016) *Élaboration d'indicateurs de biodiversité spatiaux-temporels intégrant la télédétection et portrait partiel de la biodiversité du Québec. Rapport d'étape 2.* INRS. Présenté au MDDELCC CONTRAT DEB15-146. Juillet. 57 pages + 3 Annexes.

- Bernier M., Fortin J.-P., Gauthier Y., Vincent P., (1999). *Determination of snow water equivalent using RADARSAT SAR data in eastern Canada*. Hydrological Processes **13**(18):3041-3051.
- Chapin F.S., (2005). *Role of land-surface changes in Arctic summer warming*. Science, **310**, 657-660.
- Chen J. et al., (2004). *A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter*. Remote Sensing of Environment, **91**(3-4), 332-344.
- Chokmani K., Bernier M. & Royer A., (2013). *A merging algorithm for regional snow mapping over eastern Canada from AVHRR and SSM/I data*. Remote Sensing **5**(11):5463-5487.
- Chokmani K, Benjamin R.-A., Bernier M., (2008). *Développement d'un prototype d'atlas interactif du couvert nival pour l'est du Canada*. Rapport de recherche (R1025). INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec.
- de Beurs K.M., & Henebry G. M., (2010). *A land surface phenology assessment of the northern polar regions using MODIS reflectance time series*. Canadian Journal of Remote Sensing **36**(Suppl. 1): S87–S110. [Special Issue on International Polar Year].
- De Sève D, Vachon F & Choquette Y., (2012). *A dynamic algorithm for mapping of snow cover using SSM/I data*. IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 4875-4878.
- Dufour-Tremblay G., Lévesque E. & Boudreau S., (2012). *Dynamics at the treeline: differential responses of Picea mariana and Larix laricina to climate change in eastern subarctic Québec*. Environmental Research Letters, **7**(4).
- Duguay Y., Bernier M., Lévesque E., Tremblay B., (2015). *Potential of C and X Band SAR for Shrub Growth Monitoring in Sub-Arctic Environments*. Special Issue Remote Sensing of Changing Northern High Latitude Ecosystems, Remote Sensing, **7**, 9410-9430.
- Duguay C., Bernier M., Gautghier Y., Kouraev A., (2014). Remote sensing of lake and river ice, Chapitre dans: Remote Sensing of the Cryosphere. John Wiley & Sons, Ltd, pp 273-306. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118368909.ch12>.
- Eilers P.H.C., (2003). *A perfect smoother*. Anal. Chem., **75**, 3631–3636.
- Epstein H. E., Bhatt U. S., Raynolds M. K., Walker D. A., Bieniek P. A., Tucker C. J., Pinzon J., Myers-Smith I. H., Forbes B. C., Macias-Fauria M., Boelman N. T., Sweet S. K., (2015). *Tundra Greenness*. In Arctic Report Card., Ed. Jeffries M. O., Richter-Menge J., Overland J. E., NOAA Press Release (www.arctic.noaa.gov/reportcard/tundra_greenness.html)
- Euskirchen E. S., Bennett A. P., Breen A. L., Genet H., Lindgren M., Kurkowski T. A., McGuire A. D. & Rupp T.S., (2016). *Consequences of changes in vegetation and snow cover for climate feedbacks in Alaska and northwest Canada*. Environmental Research Letters, **11**(10)

- Fensholt R., & Sandholt I., (2005). *Validation of the MODIS and NOAA AVHRR vegetation indices with in situ measurements in a semi-Arid environment*. International Journal of Remote Sensing, **26** (12), 2561–2594.
- Forkel M., Carvalhais N., Verbesselt J., Mahecha M.D., Neigh C. S. R., & Reichstein M., (2013). *Trend change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology*. Remote Sensing, **5**, 2113–2144.
- Fraser R., Olthof I., Carrière M., Deschamps A., & Pouliot D., (2011). *Detecting long-term changes to vegetation in northern Canada using the Landsat satellite image archive*. Environmental Research Letters. **6**, 1-9.
- Gauthier Y., Jasek , M., Poulin J., Bernier M., (2014). *Understanding ice processes in a dynamic river section using multipolarisation Radarsat-2 data*. IEEE-Explore, IGARSS 2014, July 13-18.
- Goïta K., Walker AE. & Goodison BE., (2003). *Algorithm development for the estimation of snow water equivalent in the boreal forest using passive microwave data*. International Journal of Remote Sensing, **24** (5):1097-1102.
- Goswami S., Gamon, J., Vargas S., & Tweedie C. (2015). *Relationships of NDVI, biomass, and eaf area index (LAI) for six key plan species in Barrow, Alaska*. Peerj PrePrint, 1–17.
- Hicke J. A., Asner G.P., Randerson J.T., Tucker C.J., Los S.O., Birdsey R., Jenkins J. C., Field C. B., & Holland E. A. (2002). *Satellite-derived increases in net primary productivity across North America, 1982-1998.*, Geophysical Research Letters, **29** (10): 1427.
- Hirano A., Batbileg B., (2014). *On exchangeability of spectral measurements obtained from multi-platform satellite sensors - Case study for Mongolian steppe*, Proceedings, the 35th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Nay Pyi Taw, Myanmar, October 27-31, 2014
- Hird J. N. & McDermid G. J., (2009). *Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques*. Remote Sens. Environ., **113**, 248–258.
- Hmimina G., Dufrêne E., Pontailier J. Y., Delpierre N., Aubinet M., Caquet B., et al. (2013). *Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements*. Remote Sensing of Environment, **132**, 145–158.
- Holben B. N., (1986). *Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data*, International Journal of Remote Sensing, **7**(11), 1417–1434.
- Huete A. R., Liu H. & van Leeuwen W. J. D. (1997). *Use of vegetation indices in forested regions: Issues of linearity and saturation*. In Anon (Ed.), IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (Vol. 4, pp. 1966-1968).

- Jin Z. et Xu B., 2013. *A Novel Compound Smoother—RMMEH to Reconstruct MODIS NDVI Time Series*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, **10**(4): 942-946.
- Jönsson P. and Eklundh L., (2004). *TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data.* Computers and Geosciences, 30, p.p. 833–845.
- Jönsson P. & Eklundh L. (2003). *Seasonality extraction from time-series of satellite sensor data. Frontiers of Remote Sensing Information Processing*, World Scientific, edited by C.H. Chen, 487-500.
- Jönsson P. & Eklundh L., (2002). *Seasonality extraction by function-fitting to time series of satellite sensor data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, 1824–1832.
- Junchang J., & Masek J.G., (2016). *The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data*. Remote sensing of environment, 176(4), 1-16.
- Didan K, Munoz A.B., Solano R., & Huete A., (2015). *MODIS Vegetation Index User’s Guide (MOD13 Series, Collection 6)*.
- Kouadio L., Newlands N.K., Davidson A., Zhang Y., & Chipanshi A., (2014). *Assessing the Performance of MODIS NDVI and EVI for Seasonal Crop Yield Forecasting at the Ecodistrict Scale*. Remote Sens. 2014, **6**, 10193-10214
- Kongoli C., Dean C.A., Helfrich S.R., Ferraro R.R., (2007). *Evaluating the potential of a blended passive microwave-interactive multi-sensor product for improved mapping of snow cover and estimations of snow water equivalent*. Hydrological Processes **21**(12):1597-1607.
- Lantz, T. C., S. E. Gergel, and G. H. R. Henry. 2010a. *Response of green alder (Alnus viridis subsp fruticosa) patch dynamics and plant community composition to fire and regional temperature in north-western Canada*. J. Biogeography **37**:1597–1610.
- Lantz, T. C., S. E. Gergel, and S. V. Kokelj. 2010b. *Spatial heterogeneity in the shrub tundra ecotone in the mackenzie delta region, northwest territories: implications for arctic environmental change*. Ecosystems **13**: 194–204.
- Lantz T.C., Marsh P. & Kokelj S.V., (2013). *Recent shrub proliferation in the Mackenzie Delta Uplands and microclimatic implications*. Ecosystems **16**: 47-59.
- McManus K.M., Morton D.C., Masek J.G., Wang D., Sexton J.O., Nagol J.R., Ropars P. ,Boudreau, S., (2012). *Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in Northern Quebec from 1986 to 2010*. Global Change Biology, **18**(7): 2313–2323.
- MDDELCC, MFFP et CSBQ. (Novembre 2015). *Perspective globale sur les réseaux de suivis et les indicateurs de biodiversité*.

- Moody A. & Johnson D., 2001, *Land-surface phenologies from AVHRR using the discrete Fourier transform*. *Remote Sensing of Environment*, **75**, 305–323.
- Muñoz J., Infante J., Lakhankar T., Khanbilvardi R., Romanov P., Krakauer N., Powell A., (2013). *Synergistic use of remote sensing for snow cover and snow water equivalent estimation*. *British Journal of Environment & Climate Change*, **3**(4): 612-627
- Myneni R. B., Keeling C. D, Tucker C. J., Asrar G. & Nemani R. R.(1997). *Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991*, *Nature* **386**, 698 - 702.
- Myneni R.B., Los S.O. & Asrar G., (1995). *Potential gross primary productivity of vegetation from 1982-1990*. *Geophysical Res. Letters*, **22**, 2617-2620.
- Nolin A.W., (2010). *Recent advances in remote sensing of seasonal snow*. *Journal of glaciology*, **56** (200): 1141-1150.
- Olthof I., Pouliot D., Latifovic R. & Chen W., (2008). *Recent (1986–2006) Vegetation-Specific NDVI Trends in Northern Canada from Satellite Data*. *Arctic*, **61**(4) 381-394.
- Parmesan C., (2006). *Ecological and evolutionary responses to recent climate change*. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, **37**, 637–669.
- Provencher-Nolet L., Bernier M., & Lévesque E., (2014). *Quantification des changements récents à l'écotone forêt-toundra à partir de l'analyse numérique de photographies aériennes*. *Écoscience*, **21**(3-4), 419-433.
- Pulliainen J., (2006). *Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations*. *Remote Sensing of Environment* 101(2):257-269.
- Reed B. C., Brown J. F., Vanderzee D., Loveland T. R., Merchant J. W., & Ohlen D. O., (1994). *Measuring phenological variability from satellite imagery*, *J. Vegetation Sci.*, **5**(5): 703–714.
- Reed B.C., White M. & Brown J.F., (2003). *Remote sensing phenology*. *Phenology: An integrative environmental science*, Vol. 39, Series Tasks for Vegetation Science, pp. 365-381.
- Raynolds M.K., Walker D. A., Verbyla D. & Munger C.A., (2013). *Patterns of Change within a Tundra Landscape: 22-year Landsat NDVI Trends in an Area of the Northern Foothills of the Brooks Range, Alaska*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **45**(2), 249-260.
- Roberge S., (2013). *Développement d'un algorithme satellitaire à seuils évolutifs pour le suivi de l'étendue spatiale du couvert nival adapté aux conditions régionales du Québec et du Labrador et son adaptation à l'estimation d'ensemble*. Mémoire de maîtrise (Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada). 105 pages

- Ropars P. & Boudreau S., (2012). *Shrub expansion at the forest–tundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography*. Environmental Research Letters, 7(1).
- Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., & Deering D.W. (1974) *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, vol. 1, p. 48-62.
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022592.pdf>
- Royer A., Goïta K., Kohn J. & De Sève D., (2010). Monitoring Dry, Wet, and No-Snow Conditions from Microwave Satellite Observations. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters **7**(4):670-674.
- Sakamoto T, Yokozawa M., Toritani H., Shibayama M., Ishitsuka N., & Ohno H., (2005). *A crop phenology detection method using time-series MODIS data*. Remote Sensing of Environment, **96**, 366 – 374.
- Shao Y., Lunetta R.S., Wheeler B., Liames J.S., & Campbell J.B., (2016). *An evaluation of time-series smoothing algorithms for land-cover classifications using MODIS-NDVI multi-temporal data*. Remote Sensing of Environment, **174**, 258–265.
- Stow D.A., Hope, A., McGuire, D., Verbyla, D., Gamon, J., Huemmrich, F., Houston, S., Racine, C., Sturm M., Tape K., Hinzman L., Yoshikawa K., Tweedie C., Noyle B., Silapaswan C., Douglas D., Griffith B., Jia G., Epstein H., Walker D., Daeschner S., Petersen A., Zhou L., & Myneni, R. (2004). *Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic tundra ecosystems*. Remote Sensing of Environment, **89** (3):281–308
- Sturm M, Douglas T, Racine C, & Liston G.E., (2005). *Changing snow and shrub conditions affect albedo with global implications*. Journal of Geophysical Research **110**: G01004
- Secades C., O'Connor B., Brown C., Walpole M., (2014). *Earth Observation for Biodiversity Monitoring: A review of current approaches and future opportunities for tracking progress towards the Aichi Biodiversity Targets*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montréal, Canada. Technical Series, **72**, 183 pages.
- Strand H., Höft R., Strittholt J., Miles L., Horning N., Fosnight E., Turner W., eds., (2007). *Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series, **32**, 203 pages.
- Swets D. L., Reed B.C., Rowland J. R., & Marko S. E., (1999). *A weighted least-squares approach to temporal smoothing of NDVI*. In ASPRS Annual Conference, From Image to Information, May 17-21 1999, Portland, Oregon. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.

- Talbert C., Kern T., Morissette J., Brown D., & James K., (2013). *MODIS Phenology Image Service ArcMap Toolbox. National Park Service and the Great Northern Landscape Conservation Cooperative*, Open-File Report, 2013–1250.
- Tape K, Hallinger M, Welker J. & Ruess R., (2012). *Landscape heterogeneity of shrub expansion in Arctic Alaska*. *Ecosystems*, **15**:711–724.
- Tape K.D., Verbyla D., & Welker J. M., (2011) *Twentieth century erosion in Arctic Alaska foothills: The influence of shrubs, runoff, and permafrost*. *Journal of Geophysical Research*, **116** (G4), paper no. G04024.
- Tape K.D., Sturm M. & Racine C., (2006). *The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic*. *Global Change Biology*. **12** (4):686-702.
- Testa S., Borgogno Mondino E.C. & Pedroli C., (2014). *Correcting MODIS 16-day composite NDVI time-series with actual acquisition dates*. *European Journal of Remote Sensing* **47**, 285-305.
- Théau J., Sankey T.T., Weber K.T., (2010). *Multi-sensor analyses of vegetation indices in a semi-arid environment*. *GIScience and Remote Sensing*, Vol. **47**, No. 2, pp. 260-275.
- Tremblay B., Lévesque, E. & Boudreau S., (2012). *Recent expansion of erect shrubs in the Low Arctic: evidence from Eastern Nunavik*. *Environ. Res. Lett.* **7** 035501 (11pp).
- Dufour-Tremblay G., Lévesque E. & Boudreau S., (2012). *Dynamics at the treeline: differential responses of *Picea mariana* and *Larix laricina* to climate change in eastern subarctic Québec*. *Environmental Research Letters*, 7(4)
- van Dijk A., Callis S. L., Sakamoto C. M., & Decker, W. L., (1987). *Smoothing vegetation index profiles: an alternative method for reducing radiometric disturbance in NOAA/AVHRR data*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **53**, 1059-1067.
- Wagenseil H, Samimi C (2006) *Assessing spatio-temporal variations in plant phenology using Fourier analysis on NDVI time series: results from a dry savannah environment in Namibia*. *Int. J. Remote Sensing*, **27**, 3455–3471
- Wang Q., Adiku, Tenhunen J. & Granier A., (2005). *On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site*, *Remote Sensing of Environment*, **94**(2), 244-255.
- Walker D.A., Bhatt U.S., Callaghan T.V., Comiso G.C., Epstein H.E., Forbes B.C., Gill M., Gould W.A., Henry G. H. R., Jia G. J., Kokelj S. V., Lantz T. C., Oberbauer S. FPinzon J. E., Raynolds M. K., Shaver G. R., Tucker C. J., Tweedie C. E., & Webber P. J., (2011). *Vegetation [in Arctic Report Card 2011]*, <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.
- Walther, G.-R., (2010). *Community and ecosystem responses to recent climate change*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365, 2019–2024

- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416** (6879), 389-395
- White M. A., de Beurs K. M., Didan K., Inouye D. W., Richardson A. D., Jensen O. P., O'Keefe J., Zhang G., Nemani R. R., Van Leeuwen W. J. D., Brown J. F., Wit A. D., Schaepman M., Lin X., Dettinger M., Bailey A. S., Kimball J., Schwartz M. D., Baldocchi D. D., Lee J. T., & Lauenroth W. K., (2009). *Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006*, *Glob. Change Biol.*, 15, 2335–2359.
- Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C., & Huete A., (2003). *Monitoring vegetation phenology using MODIS*. *Remote Sensing of Environment*, **84**(3), 471–475.

ANNEXE I. PHOTOS DE LA CAMÉRA À UMIUJAQ

2010

2015

10-06-2010 (161)

10-06-2015 (161)



15-06-2010 (166)

15-06-2015 (166)



25-06-2010(176)

25-06-2015(176)



2010

2015

01-07-2010 (182)



01-07-2015 (182)



15-07-2010 (196)



15-07-2015 (196)



15-08-2010 (227)



15-08-2015 (227)



2010

2015

20-08-2010 (232)



20-08-2015 (232)



25-08-2010 (237)



25-08-2015 (237)



30-08-2010 (242)



30-08-2015 (242)



2010

2015

15-09-2010 (258)

15-09-2015 (258)



25-09-2010 (268)

25-09-2015 (268)



01-10-2010 (274)

01-10-2015 (274)



2010

2015

05-10-2010 (278)

05-10-2015 (278)



10-10-2010 (283)

10-10-2015 (283)



20-10-2010 (293)

20-10-2015 (293)

