



HAL
open science

**Hilaire MARTIN IRSTEA Nogent-sur-Vernisson
Certificat d'études avancées en géomatique**

Hilaire Martin

► **To cite this version:**

Hilaire Martin. Hilaire MARTIN IRSTEA Nogent-sur-Vernisson Certificat d'études avancées en géomatique. [Rapport de recherche] IRSTEA. 2017. hal-02918740

HAL Id: hal-02918740

<https://hal.inrae.fr/hal-02918740>

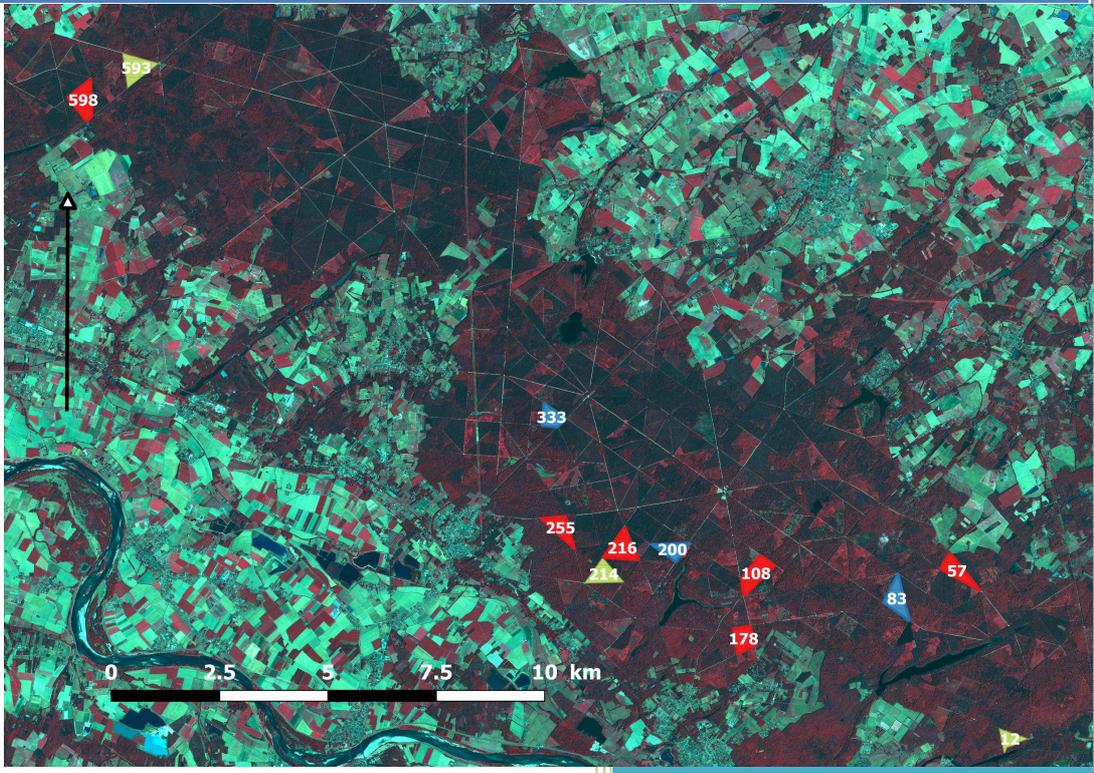
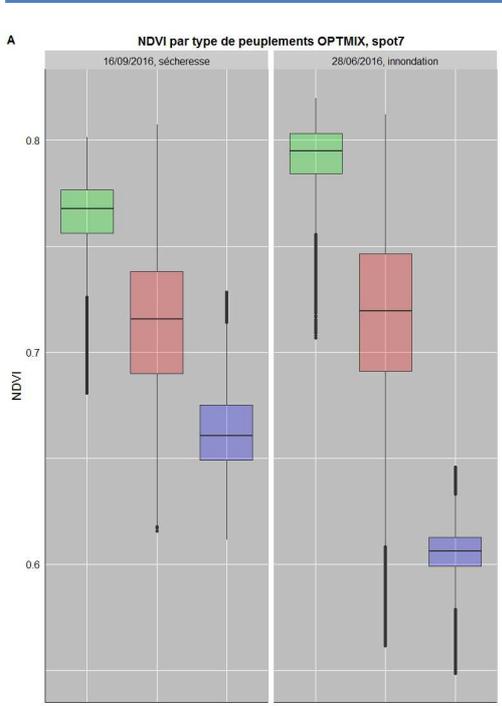
Submitted on 21 Aug 2020

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

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



Certificat d'études avancées en géomatique



Hilaire MARTIN

IRSTEA

Nogent-sur-Vernisson

Février 2017



PRÉAMBULE

Le présent document constitue l'étape finale pour l'obtention du certificat d'études avancées en géomatique d'AgroParisTech. Initié en 2014, ce diplôme regroupe 6 formations, toutes suivies à la Maison de la Télédétection à Montpellier et comptant pour la validation de la partie théorique :

- R: prise en main et statistiques descriptives, du 19 au 21 novembre 2007;
- Prise en main du logiciel Definiens Developer, du 12 au 15 octobre 2009 ;
- Images et orthophotos dans les S.I.G, du 11 au 13 mai 2009 ;
- Prise en main de l'imagerie satellitaire GEOSUD, du 25 au 28 mars 2013 ;
- Modèles Numériques de Terrain, du 6 au 10 janvier 2014 ;
- Statistiques spatiales, du 18 au 21 février 2014.

Le rendu de la partie pratique s'articule en deux études menées de 2014 jusqu'au début 2017. Durant cette période, la télédétection a rapidement pris une place importante par rapport à un objectif initial d'une utilisation au sens large de la géomatique. De manière concomitante, cet engouement a trouvé un écho favorable auprès des équipes du centre Irstea de Nogent-sur-Vernisson qui souhaitaient explorer « l'infrarouge » dans leurs projets de recherches scientifiques.

Le premier travail s'est attaché à analyser le comportement de deux variétés Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) face au stress hydrique grâce à des clichés pris à très basse altitude par Sylvain Labbé et Patrick Baldet (équipe GeeDAAF). Les résultats ont été tout récemment acceptés en tant que rapport technique dans la revue *iforest* (<http://www.sisef.it/iforest/>).

La seconde étude se décompose en deux volets et concerne le dispositif OPTMix qui vise à comprendre les interactions du mélange entre Le Chêne sessile et le Pin sylvestre, en Forêt Domaniale d'Orléans. Une première approche sur quelques parcelles avec des images Rapideye a conduit à des réflexions encourageantes quant au comportement entre les deux espèces. Ces premiers résultats ont motivé Nathalie Korboulewsky responsable de l'équipe ForHet et porteur projet du dispositif OPTMix à acquérir auprès de l'EQUIPEX GEOSUD des images plus fines sur l'ensemble des placettes de mesure et à des dates précises. Ces images SPOT 7 sont analysées dans un second volet.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme Investissements d'Avenir pour le projet EQUIPEX GEOSUD portant la référence ANR-10-EQPX-20

SOMMAIRE

PRÉAMBULE.....	1
DETECTING TREE WATER DEFICIT BY VERY LOW ALTITUDE REMOTE SENSING.....	5
INTRODUCTION	5
MATERIAL AND METHODS	6
RESULTS.....	11
DISCUSSION	13
CONCLUSIONS	15
ACKNOWLEDGEMENTS	15
REFERENCES	15
TRAITEMENT DES IMAGES GEOSUD POUR LE PROJET OPTMIX (premier volet).....	18
INTRODUCTION	18
MATÉRIELS ET MÉTHODES	18
RÉSULTATS.....	22
DISCUSSION	25
TRAITEMENT DES IMAGES GEOSUD POUR LE PROJET OPTMIX (deuxième volet).....	28
INTRODUCTION	28
MATÉRIELS ET MÉTHODES	28
RÉSULTATS.....	31
DISCUSSION	32
BIBLIOGRAPHIE.....	36
ANNEXE 1	38
ANNEXE 2	41
ANNEXE 3	42

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1 – View of a part of the experiment	7
Fig. 2 – Color Filter Array	8
Fig. 3 – a=Mobile darkroom. B=Example of tree/box photography; left: NIR and right: RGB	9
Fig. 4 – Example of image processing for box n°36 photographed on August 30 th , 2013	10
Fig. 5 – Mean NDVI at different dates. Different letters indicate significant differences in stress intensity (Tukey H.S.D method with $P < 0.05$)	14
Fig. 1 – Localisation du site OPTMix	18
Fig. 2 – En vert (parcelle 214), peuplement de Chêne sessile mono-spécifique. En bleu (parcelle 200), peuplement de Pin sylvestre. En rouge (parcelle 2016) peuplement de Chêne et Pin sylvestre en mélange. <i>Image satellite Rapideye du 05/09/2010.</i>	19
Fig. 3 – Image Rapideye du 21 mars 2011 à gauche et du 30 septembre 2011 à droite, avec les parcelles du dispositif OPTMix	21
Fig. 4 – Distribution des valeurs de NDVI par parcelles, par date et par correction radiométrique. Colonne de gauche valeurs du NDVI non corrigées et colonne de droite les valeurs du NDVI corrigées. En première ligne les valeurs pour le 21 mars puis celles pour le 30 septembre.	22
Fig. 5 – Évolution du NDVI au cours de la saison de végétation de l'année 2011 pour les 3 parcelles du dispositif OPTMix. Les points représentent la moyenne et la barres ± 1 fois l'écart-type (68,2% de la distribution des pixels)	24
Fig. 6 – Effet de la taille du pixel sur les valeurs du pixel dans la parcelle en mélange. En vert le Chêne sessile et en orange le Pin sylvestre. Dans l'encart de droite le cercle bleu pointe un pixel sur lequel il y a deux chênes et un pin.	26
Fig. 7 – En vert, peuplement de Chêne sessile mono-spécifique. En bleu, peuplement de Pin sylvestre. En rouge peuplement de Chêne et Pin sylvestre en mélange. <i>Images satellites SPOT 7 du 16/09/2016</i>	29
Fig. 8 – Images satellites SPOT 7 du 28/06/2016	30
Fig. 9 – Images satellites SPOT 7 du 16/09/2016	31
Fig. 10 – A : Indice de végétation normalisé par types de peuplements et par dates. B : Indices de végétation par types de peuplements, par placettes et par dates.	34
Fig. 11 – Deux exemples de spatialisation de l'indice de végétation. A : Parcelle 57. B : Parcelle 598.	35

TABLEAUX

Tab. 1 – Percentage of soil water content by stress level	7
Tab. 2 – Canon© EOS 350D Camera settings	11
Tab. 3 – Anovas analyzing the effects of stress and origin on mean tree NDVI per box for three dates (calculated on 25×10^4 pixels)	12

Tab. 1 – Caractéristiques des images Rapideye fournies par le projet GEOSUD.	20
Tab. 2 – Caractéristiques de l'expérimentation OPTMix	29

DETECTING TREE WATER DEFICIT BY VERY LOW ALTITUDE REMOTE SENSING

#ms15/1690 - Martin H et al. - Journal Section: Technical Reports
DETECTING TREE WATER DEFICIT BY VERY LOW ALTITUDE REMOTE SENSING...
Round: #3 - Manuscript Accepted, Copy-editing Stage

iForest

Open Paper

Manuscript Status

Current Processing Round	#3
Current Stage	Manuscript Accepted, Copy-editing Stage (7)
Editor	Roberto Tognetti
Submission Date	Apr 27, 2015
Completion Date	Nov 16, 2016
Overall Processing Time (since submission)	18.97 months

Hilaire Martin¹, Sylvain Labbé², Patrick Baldet¹, Frédéric Archaux¹, Gwénaél Philippe¹

Author's address: 1, IRSTEA National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture, Domaine des Barres, Nogent-sur-Vernisson 45290 Nogent-sur-Vernisson (France)

2, IRSTEA, National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture, 361 rue J.F. Breton BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5 (France).

hilaire.martin@irstea.fr; sylvain.labbe@irstea.fr; patrick.baldet@irstea.fr; frederic.archaux@irstea.fr; gwenael.philippe@irstea.fr

Corresponding Author: Hilaire Martin, hilaire.martin@irstea.fr

Keywords: very low altitude remote sensing, water deficit, variety, Douglas fir.

Abstract: In a context of climate change and expected increasing drought frequency, it is important to select tree species adapted to water deficit. Experimentation in tree nurseries makes it possible to control for various factors such as water supply. We analyzed the spectral responses for two genetic varieties of Douglas fir sapling exposed to different levels of water deficit. Our results show that the mean NDVI derived from remote sensing at very low altitudes clearly differentiated stress levels while genetic varieties were partially distinguished.

INTRODUCTION

Important innovations in satellite sensors over the last decades have made available a great deal of information about landscape monitoring (Pettorelli et al. 2014). Using plant reflectance of both high and low wavelengths in infrared and red bandwidths, many vegetation indices have been created.

Among these, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) developed by (Rouse 1973) is being widely used to study agricultural activities, biomass, plant productivity, chlorophyll concentrations and phenology. In forests, the NDVI has been used for about thirty years to assess fire risks (Gitas et al. 2014). In terms of stand productivity, NDVI values are strongly linked with leaf area index, which is a good indicator of plant biomass (Wang et al. 2005). Moreover, other studies have used the NDVI for tree species identification on monoculture plots (Carleer & Wolff 2004). In addition, Camarero et al. (2010) used variations in NDVI to detect an increase in canopy cover preceding mast years for *Quercus ilex*. For drought monitoring, this vegetation index is of particular interest (Peng et al. 2012, Volcani et al. 2005). Drought conditions result in a reduction in soil water availability. Reduced levels of water in the soil layers alter both soil-root and leaf-atmosphere interfaces (Bréda et al. 2006). With global climate change, droughts are expected to become more frequent, and it is important to plant tree varieties selected for their resistance to dry conditions. Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) was introduced in France for its exceptional stand productivity and the quality of its wood. However, this species comes from regions where annual rainfall exceeds 800 mm/year, a level that is not always reached in the areas where the tree was introduced (Rozenberg et al. 2012). Particularly for saplings, hydric stress can cause mortality because the young tree's shallow roots are subjected to high temperatures in the topsoil (Bréda et al. 2000). In tree nurseries, we can experiment with drought effects on young trees by controlling the water supply. Coupled with the recently developed NDVI technology for crop monitoring (Lebourgeois et al. 2008, Meyer & Camargo Neto 2008), we used modified commercial digital cameras and a mobile darkroom in order to extract NDVI at low cost. We studied the spectral response of two Douglas Fir varieties exposed to different stress levels.

MATERIAL AND METHODS

Plant material and experimental design

The experiment took place on two-year-old Douglas fir saplings in a greenhouse during the 2013 growing season. Twenty-four boxes were planted with saplings following a two-way randomized block design crossing two genetic varieties (A and B) and six water stress levels, with one replication. Each

box had been planted in 2012 on bare soil with 30 one-year-old trees. The rectangular boxes were 1.40 m by 1.10 m and 0.78 m deep (Fig. 1).



Fig. 1 – View of a part of the experiment

The volume of soil available for roots in each box was 0.70 m^3 . Stress levels were measured by probes (TRIME-IPH) and 6 categories from 1 (wettest) to 6 (driest) were distinguished by Time-domain reflectometry (TDR) monitoring. Tab. 1 presents the percentage of soil water content for each stress level. Note that the intermediate level (Stress 3) was characterized by normal watering (15% water content) during the first phase of the experiment, then watering was completely suspended on August 6th, 2013 in order to simulate summer drought conditions. The soil water content for this level was nearly the same as stress level 6 at the end of the experiment (November, 2013).

Tab. 1 – Percentage of soil water content by stress level

Water deficit 1	Water deficit 2	Water deficit 3	Water deficit 4	Water deficit 5	Water deficit 6
19.6	17.3	15	12.7	10.4	8.1

Image acquisition

We used a modified commercial digital camera to access the infrared bandwidth and an identical non-modified digital camera to assess the red band. Digital camera sensors are sensitive to the full light spectrum but manufacturers affix a Color Filter Array (CFA), called “Bayer Matrix” (Fig. 2), in order to record only visible wavelengths (red, green and blue). When this filter is removed, commercial cameras become sensitive to infrared wavelengths (Rabatel et al. 2014). By photographing the same

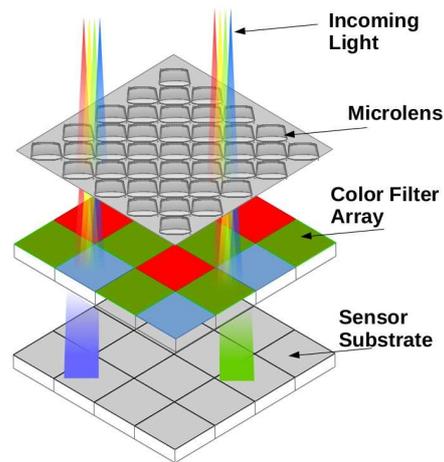


Fig. 2 – Color Filter Array.

target with one modified and one non-modified Canon® EOS 350D digital camera, we recorded both near infrared (NIR) and red (from RGB) bands that could be used to calculate the NDVI. A mobile darkroom was built in order to ensure identical photography conditions: target center points (tree box), light intensity and camera height (Fig. 3a, b). Cameras were attached to a sliding support on the top of the dark chamber in order to move alternatively each camera on a common image acquisition vertical axis ideally located in the center of the dark chamber roof. For light intensity we chose tungsten lights due to the major part of radiation emitted in the red and infrared wavelengths. The roof of the dark room was equipped with 6 tungsten lights (Model Philips Aluline 111, 50W, G53, 12V 8D, 1CT) provided by batteries with accurate tension monitoring in order to guaranty color temperature of 3000 K.



Fig. 3 - a=Mobile darkroom. b=Example of tree/box photography; left: NIR and right: RGB

Camera settings were kept unchanged throughout the experiment and images were recorded in RAW format with a constant focal length of 34 mm and the best resolution (3456 x 2304 pixels). We photographed the 24 boxes at three dates during the 2013 growing season: August 30, 2013; 4-5 October 2013; 4-5 November 2013.

Image treatment

We processed the images with the ArcGIS® software version 10.2. In lack of spectral calibration of cameras, we divided red and near infrared bands with a gray target (more visible in infrared spectrum) of constant reflectance in order to overcome different lighting effects related to bandwidth (Fig. 4). A panel was painted with three layers of gray matt acrylic paint (AFNOR NF T 36-005) to obtain a homogeneous reference surface with low reflectance. An image of the gray target was acquired with

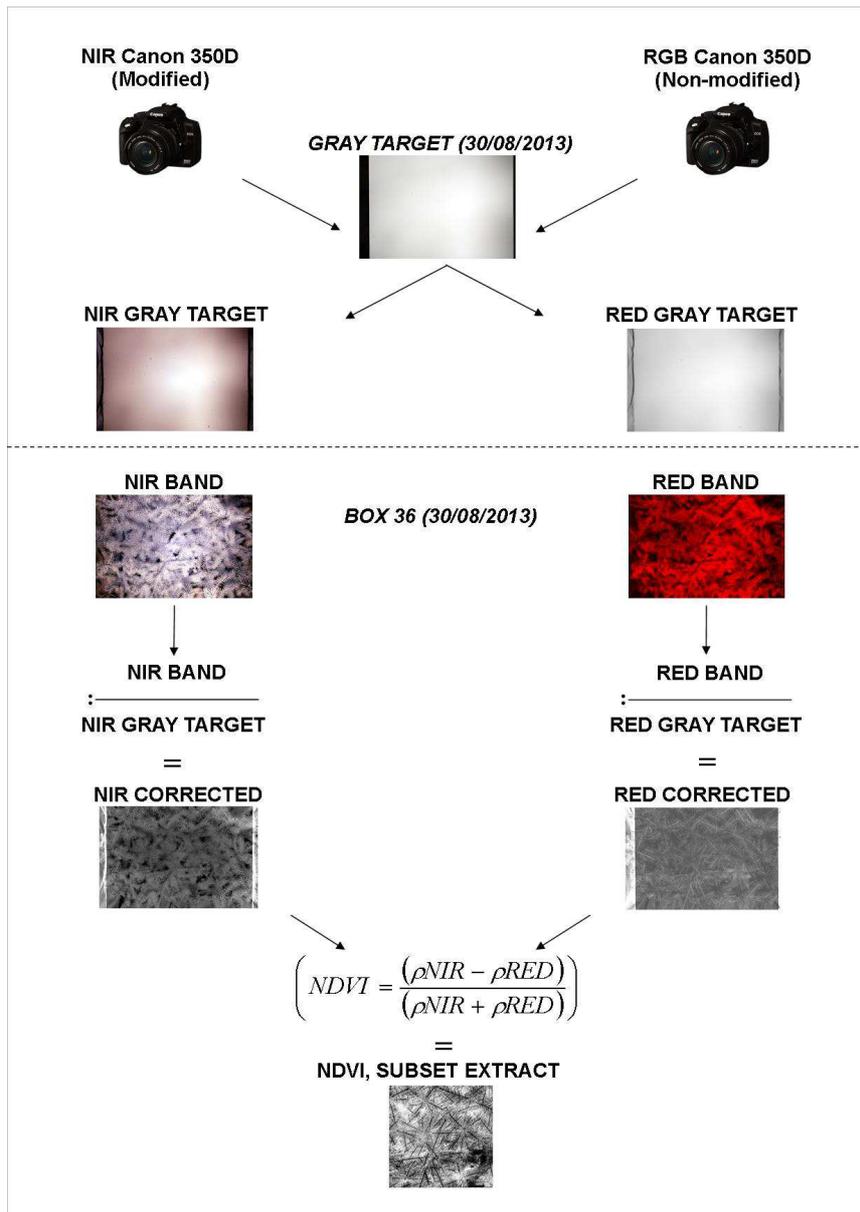


Fig. 4 - Example of image processing for box n°36 photographed on August 30th, 2013.

the modified and non-modified cameras in order to quantify lighting heterogeneity, reflectance from lateral walls and other uncontrolled effects. Due to different wavelengths in infrared and visible bandwidths, settings differ from cameras (Tab. 2). Thereafter we kept same settings of cameras for the plant material image acquisition. Only one picture of red and infrared spectrum was used as reference for correcting all pictures acquired on plant material.

Tab. 2 - Canon® EOS 350D Camera settings

Camera	Shutter	Sensitivity	Aperture
--------	---------	-------------	----------

	speed		
NIR	0.4	100	22.0
NIR GRAY TARGET	0.4	100	22.0
RGB	0.5	100	11.0
RGB GRAY TARGET	0.5	100	11.0

We performed our analysis on a square mask centered on the middle of the image to avoid vignette effects (500 x 500 pixels). The NDVI of each box was calculated by automatic image processing for the three dates as follows:

$$\left(NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \right)$$

Where ρ is the reflectance value in spectral bands.

Statistical analyses

We used linear mixed effects models with gaussian error distribution to analyse the effects of stress (6 levels) and varieties (2 levels) and their interaction on the mean NDVI (calculated on 25×10^4 pixels per box and per date). A random “box” effect was added on the intercept to take into account a potential effect of replication (there were two boxes for a given variety and a level of stress, 12 replications in total). We used an analysis of variance (ANOVA, threshold = 5%) to assess the effects of treatments (stress x variety) on the response variable. All analyses were performed in R version 3.1.0 (Development Core team 2014), and the library “nlme”.

RESULTS

Stress effect

In general, $NDVI_{mean}$ decreased with stress intensity during the growing season (Fig. 5a, b, c). Specifically, starting in August, $NDVI_{mean}$ decreased almost linearly from stress level 1 (well watered) to 5 (almost never watered). Fig. 5c shows the lowest $NDVI_{mean}$ values for stress level 6 at around 8 percent soil water content. By the end of the experiment, all the plants in this category had died. For the second period (Fig. 5b), when watering was suddenly stopped in August, $NDVI_{mean}$ decreased for stress 3. This trend was more pronounced at the end of the growing season (Fig. 5c). Throughout the experiment, stress effect levels were significantly different. (Tab. 3).

Variety effect

During the growing season, differences between varieties were slightly statistically significant starting October. There was only one significant interaction between stress level and genetic variety for the second period (Tab. 3).

Tab. 3 - Anovas analyzing the effects of stress and origin on mean tree NDVI per box for three dates (calculated on 25×10^4 pixels).

NDVI	Variable	d.f	Mean	F value	Pr>(F) ^a
			Sq		
30/08/13	STRESS	5	0.65	82.02	7.45e-09 ***
	VARIETIES	1	0.00	0.00	0.93
	ST x VA	5	0.00	0.84	0.54
NDVI 4-5/10/13	Variable	d.f	Mean	F value	Pr>(F) ^a
			Sq		
	STRESS	5	0.17	545.14	1.03e-13 ***
	VARIETIES	1	0.00	12.65	0.003 **
	ST x VA	5	0.00	3.15	0.04 *
NDVI 4-5/11/13	Variable	d.f	Mean	F value	Pr>(F) ^a
			Sq		
	STRESS	5	0.14	251.23	1.04e-11 ***
	VARIETIES	1	0.00	7.57	0.01 *

	ST x VA	5	0.00	1.22	0.35
--	---------	---	------	------	------

d.f : degrees of freedom. *** $p \leq 0.001$, ** $p \leq 0.01$, * $p \leq 0.05$, $\cdot p \leq 0.01$.. ^aLevel of significance, $\alpha = 0.05$.

DISCUSSION

In this experiment, we studied the spectral response of two Douglas Fir varieties exposed to different water stress levels during the 2013 growing season. To be cost effective, we adapted a method used in crop studies and used a modified digital camera and a non-modified digital camera (Rabatel et al. 2014, Lebourgeois et al. 2008, Jensen et al. 2007) and a mobile darkroom. This technology has also been used for forest monitoring with Unmanned Aerial Vehicles (Lisein et al. 2014). The results in Tab. 3 and Fig. 5a, b, c are promising for very low altitude NDVI in water deficit monitoring. Because water deficit events strongly impact young tree roots (Bréda 2000), it is important to test the most suitable tree species in a global climate change context. We were not able to provide results on genetic variety effects in our experiment due to methodological limitations (not enough replications) and similar spectral responses by the two genetic varieties. From a forestry point of view, these results are insufficient. Indeed, an experiment on only one growing season cannot predict stress behavior over the life of a stand. We should measure dendrometric variables for at least two successive years, as suggested in Becker's work (1974), in order to test correlations between tree sizes and spectral responses.

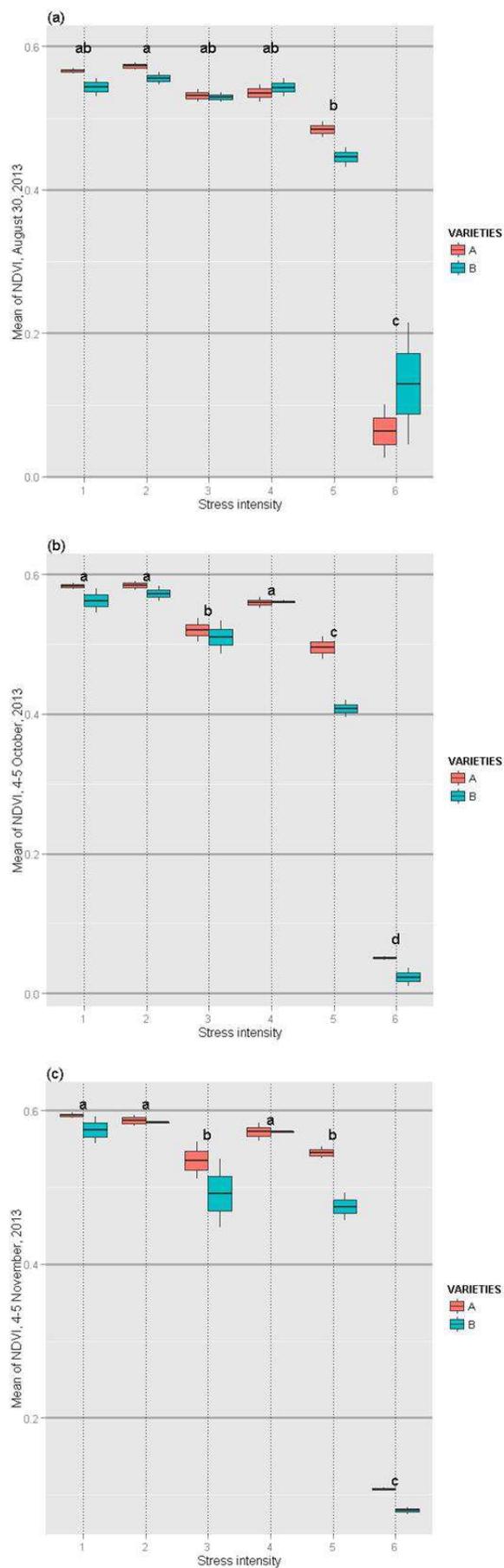


Fig. 5 - Mean NDVI at different dates. Different letters indicate significant differences in stress intensity (Tukey H.S.D method with $P < 0.05$).

CONCLUSIONS

Very low altitude remote sensing could have a positive impact in tree nurseries. Further research may focus on testing photography with direct solar light in order to avoid having to use a mobile darkroom. Other vegetation indices, including simpler ones based only on RGB bands, could be tested, following Meyer & Camargo-Neto (2008) suggestion for crop monitoring.

ACKNOWLEDGEMENTS

S.L., P.B., G.P., conceived and designed the experiment, H.M., F.A., analyzed data, and all authors contributed to the writing paper.

We thank Anne Villemey, Yoan Paillet and Emmanuel Cornieux for their constructive comments and Stéphane Matz, Vincent Bourlon, Pascal Croizet, Franck Stocchero, Aurélien Brochet and Cécile Joyeau for constructing the mobile darkroom and for image acquisition.

REFERENCES

Becker M (1974). Étude expérimentale de la transpiration et du développement de jeunes Douglas en fonction de l'alimentation en eau. Annals of Forest Science 31: 997-109.

Bréda N, Granier A, Aussenac G, (2000). Evolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres. Revue forestière Française numéro spécial 52: 73-90.

Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E, (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Annals of Forest Science 63: 625-644.

Camarero JJ, Albuixech J, López-Lozano R, Casterad MC, Montserrat-Martí G, (2010). An increase in canopy cover leads to masting in Quercus ilex. Trees, 24: 909-918.

Carleer A, Wolff E, (2004). Exploitation of Very High Resolution Satellite Data for Tree Species Identification. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 70(1): 135-140.

Gitas IZ, San-Miguel-Ayanz J, Chuvieco E, Camia A, (2014). Advances in remote sensing and GIS applications in support of forest fire management. International Journal of Wildland Fire, 23: 603-605.

Jensen T, Apan A, Young F, Zeller L, (2007). Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. Computers and Electronics in Agriculture, 59: 66-77.

Lebourgeois V, Bégué A, Labbé S, Mallavan B, Prévot L, Roux B, (2008). Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test. Sensors, 8: 7300-7322.

Lisein J, Bonnet S, Lejeune P, Pierrot-Deseilligny M, (2014). Modélisation de la canopée forestière par photogrammétrie depuis les images acquises par drone. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 206: 45-54.

Meyer GE, Camargo Neto J, (2008). Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. Computers and Electronics in Agriculture, 63: 282-293.

Peng J, Dong W, Yuan W, Zhang Y, (2012). Responses of Grassland and Forest to Temperature and Precipitation Changes in Northeast China. Advances in Atmospheric sciences, 29(5): 1063-1077.

Pettorelli N, Laurance WF, O'Brien TG, Wegmann M, Nagendra H, Turner W, (2014). Satellite remote sensing for applied ecologist: opportunities and challenges. Journal of applied ecology, 51: 839-848.

R Development Core Team, (2014). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. [online]. URL: <http://www.R-project.org/>

Rabatel G, Gorreta N, Labbé S, (2014). Getting simultaneous red and near infrared bands from a single digital camera for plant monitoring applications: Theoretical and practical study. *Biosystems Engineering*, 117(1): 2-14.

Rouse J, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Proceeding of the "3rd ETRS Symposium"*, NASA SP-351 1. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA, pp. 309-317.

Rozenberg P, Sergent A-S, Dalla-Salda G, Martinez-Meier A, Marin S, Ruiz-Diaz M, Bastien J-C, Sanchez L, Bréda N, (2012). Analyse rétrospective de l'adaptation à la sécheresse chez le douglas. *Schweiz Z Forstwes*, 163 (3) : 88-95.

Volcani A, Karnieli A, Svoray T, (2005). The use of remote sensing and GIS for spatio-temporal analysis of the physiological state of semi-arid forest with respect to drought years. *Forest Ecology and Management*, 215 : 239-250.

Wang Q, 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.

TRAITEMENT DES IMAGES GEOSUD POUR LE PROJET OPTMIX (premier volet)

INTRODUCTION

Une série d'images satellites de l'année 2011 a été analysée sur trois parcelles forestières de la Forêt Domaniale d'Orléans dans le Loiret (45). Ces parcelles représentent un échantillon du site d'étude OPTMix (http://optmix.irstea.fr/?page_id=25) visant à comprendre à long terme, le fonctionnement des forêts mélangées de plaine face aux changements climatiques. L'effet du mélange est étudié au travers de deux essences forestières : le Chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., 1784) et le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L., 1753). Pour assurer ce suivi, de nombreuses mesures biotiques et abiotiques sont réalisées au sol par l'équipe Forêts Hétérogènes (FORHET) de l'IRSTEA de Nogent-sur-Vernisson.

La récente gratuité des images satellites via le projet EQUIPEX GEOSUD a interpellé les chercheurs quant à l'intérêt de l'exploitation de l'infrarouge comme variable explicative potentielle.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Parcelles étudiées

Les parcelles sélectionnées pour cette étude sont localisées en Forêt Domaniale d'Orléans (département du Loiret) Fig 1.

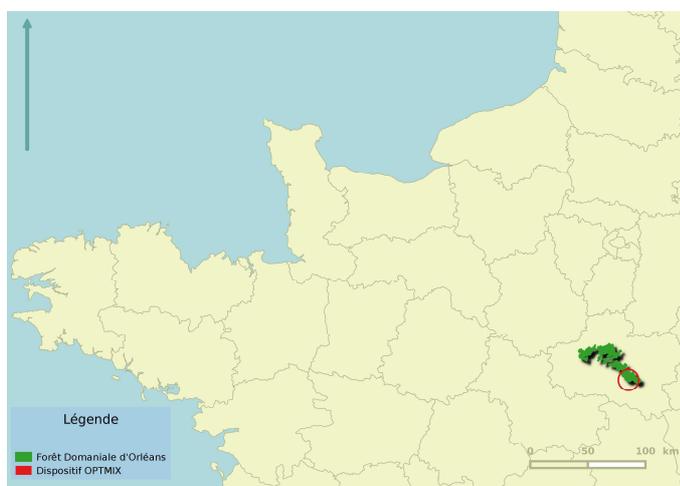


Fig 1. Localisation du site OPTMix.

Les peuplements forestiers étudiés sont des peuplements adultes menés en futaie régulière et sont répartis à l'Est de la Forêt Domaniale sur le massif de Lorris :

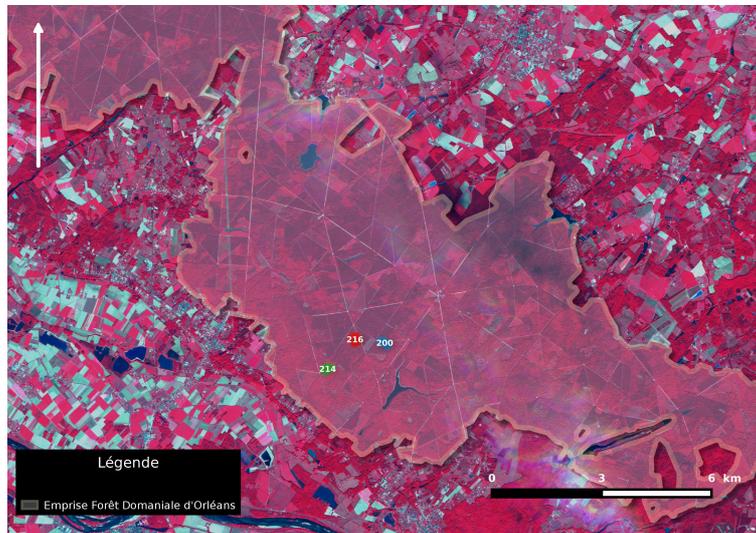


Fig 2. En vert (parcelle 214), peuplement de Chêne sessile mono-spécifique. En bleu (parcelle 200), peuplement de Pin sylvestre. En rouge (parcelle 216) peuplement de Chêne et Pin sylvestre en mélange. *Image satellite Rapideye du 05/09/2010.*

Pour la parcelle 216, le pourcentage de mélange en surface terrière (G) est respectivement pour le chêne et le pin de 48% et 47 %.

Les images

L'intérêt de l'exploitation du signal infrarouge peut se traduire par la comparaison des réflectances des essences forestières en peuplements mono-spécifiques et mélangés. Cela nécessite plusieurs images sur une même période de végétation (printemps, été et automne) pour une même année. Pour notre site d'étude nous avons retenue l'année 2011 avec les satellites de la constellation Rapideye. Le tableau 1 retrace les divers éléments disponibles pour l'année 2011.

Tab. 1 : Caractéristiques des images Rapideye fournies par le projet GEOSUD.

IMAGES 2011 RAPIDEYE	HEURE	ORBIT-DIR	AZIMUT-ANG -DEG-	ELEV-ANG -DEG-
RE-21-mars	11:47:11	DESCENDING	1,75	4,33
RE-23-mars	11:51:00	DESCENDING	1,78	4,34
RE-04-mai	11:52:09	DESCENDING	1,82	5,79
RE-01-juin	11:58:03	DESCENDING	1,84	6,45
RE-02-juin	12:00:39	DESCENDING	1,87	6,27
RE-05-juillet	11:54:27	DESCENDING	1,80	6,44
RE-30-septembre	11:59:08	DESCENDING	1,85	3,97

Les caractéristiques de prises de vues au regard des dates, heures, azimuts et élévations sont homogènes pour l'ensemble des images fournies. Notons que pour les mois de mars et de juin 2011, deux clichés à dates rapprochées sont disponibles. A titre d'exemple nous présentons en figure 3 les parcelles du site OPTMIX avec les images du 21 mars 2011 et du 30 septembre en infrarouge fausse couleur (image sans correction radiométrique). L'emprise des images ne couvre qu'une partie de la parcelle 200. A la date du 21 mars les chênes ne sont pas encore débourrés, seuls les pins présentent une activité chlorophyllienne se traduisant par une couleur rouge bordeaux. Au fur et à mesure de la saison de végétation, les chênes mettent en place leur feuillage et leur activité chlorophyllienne s'intensifie. Cela se traduit par un rouge plus clair pour les chênes et un rouge plus foncé pour les pins.

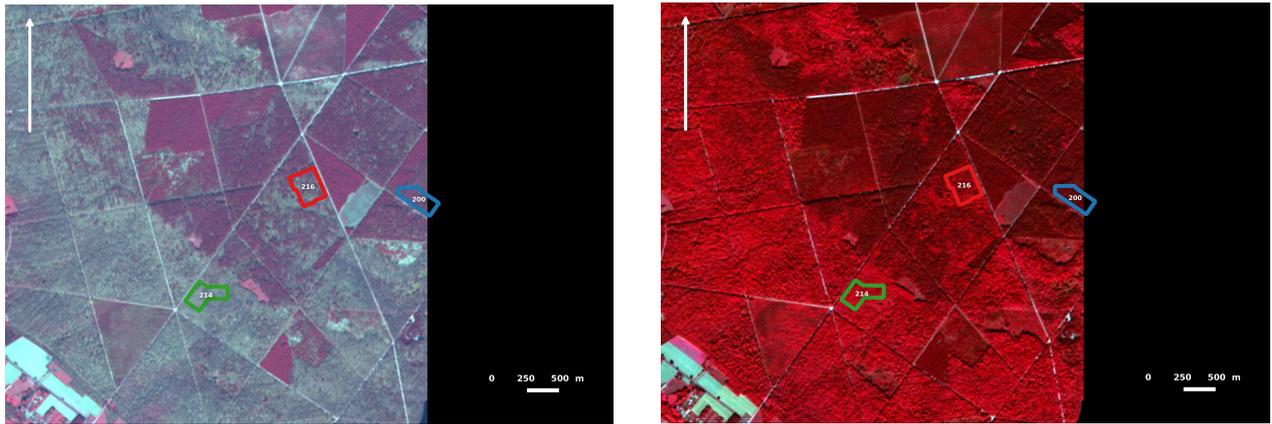


Fig 3. Image Rapideye du 21 mars 2011 à gauche et du 30 septembre 2011 à droite, avec les parcelles du dispositif OPTMix.

Traitement des images

Nous avons testé sans succès, une comparaison de moyenne (par modèles linéaires mixtes) de pixel entre peuplements mono-spécifiques et mélangés pour chaque essence forestière. Bien qu'intellectuellement stimulante, cette démarche n'a pas été retenue en raison de distributions de valeurs de pixels trop différentes. L'ensemble de cette démarche est présenté en annexe 1.

Les procédures suivantes décrivent le traitement du signal à la fois sur les images avec et sans correction radiométrique. Les corrections ont été effectuées avec l'extension « Geosud Toa Reflectance » développée sous Qgis par Kenji Ose de Irstea (<https://plugins.qgis.org/plugins/geosudRefToa/>).

Logiciel Qgis

Les images ont été découpées en fonction de la forme des parcelles. A l'aide de la calculatrice raster, l'indice de végétation par différence normalisée a été calculé selon la formule suivante (Rouse et al. 1973) :

$$\left(\text{NDVI} = \frac{(\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{Rouge}})}{(\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{Rouge}})} \right)$$

où ρ est la valeur de la réflectance dans la longueur d'onde (PIR= Proche infrarouge).

Par la suite, les rasters monocanaux ont été convertis au format ASCII.

Import sous le logiciel R

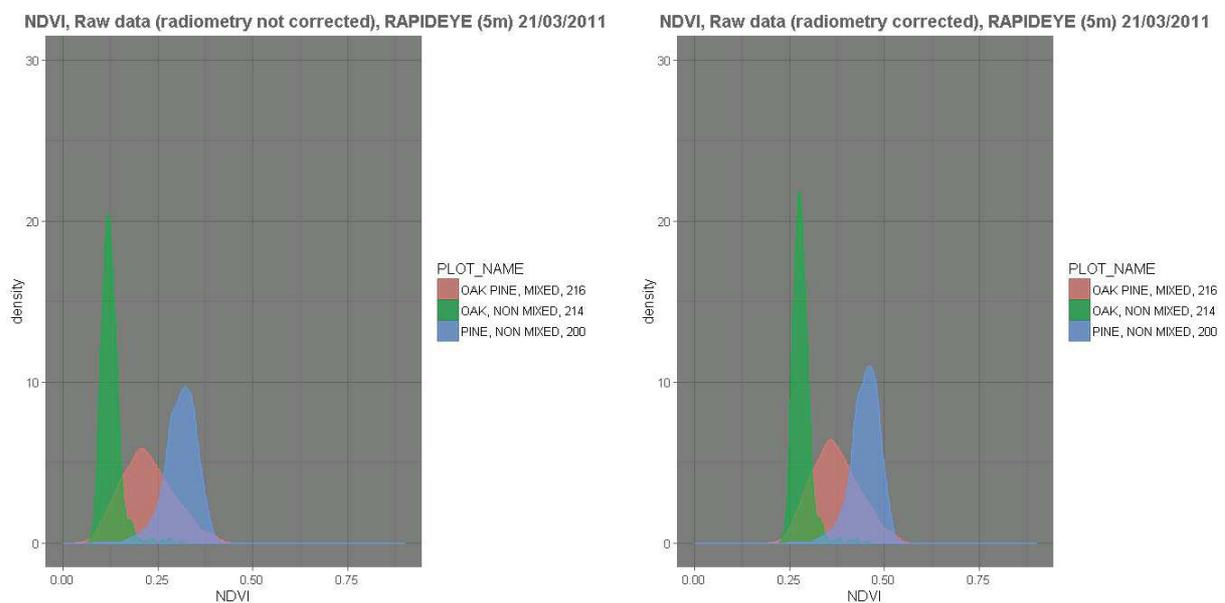
Les fichiers ASCII ont été intégrés au logiciel R et transformés en tableau. La librairie « ggplot2 » a permis l'édition des graphes.

RÉSULTATS

L'ensemble des graphes pour chaque parcelle, par dates et par correction radiométrique est présenté en annexe 2.

Correction radiométrique

De prime abord, la correction radiométrique augmente les valeurs du NDVI mais conserve les distributions des pixels. L'exemple de la Figure 4 reprenant les dates de mars et de septembre souligne ce constat.



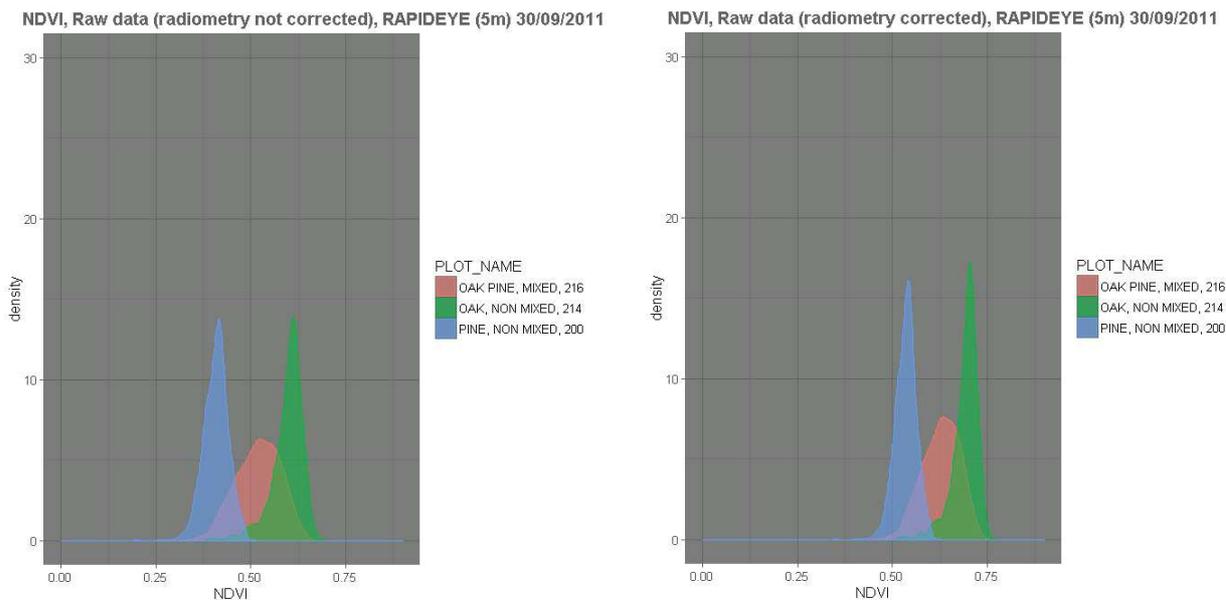


Fig 4. Distribution des valeurs de NDVI par parcelles, par date et par correction radiométrique. Colonne de gauche valeurs du NDVI non corrigées et colonne de droite les valeurs du NDVI corrigées. En première ligne les valeurs pour le 21 mars puis celles pour le 30 septembre.

Évolution du signal au cours de la saison de végétation

Afin de ne pas encombrer la lecture, seul le graphe général pour les valeurs corrigées du point de vue radiométrique est présenté.

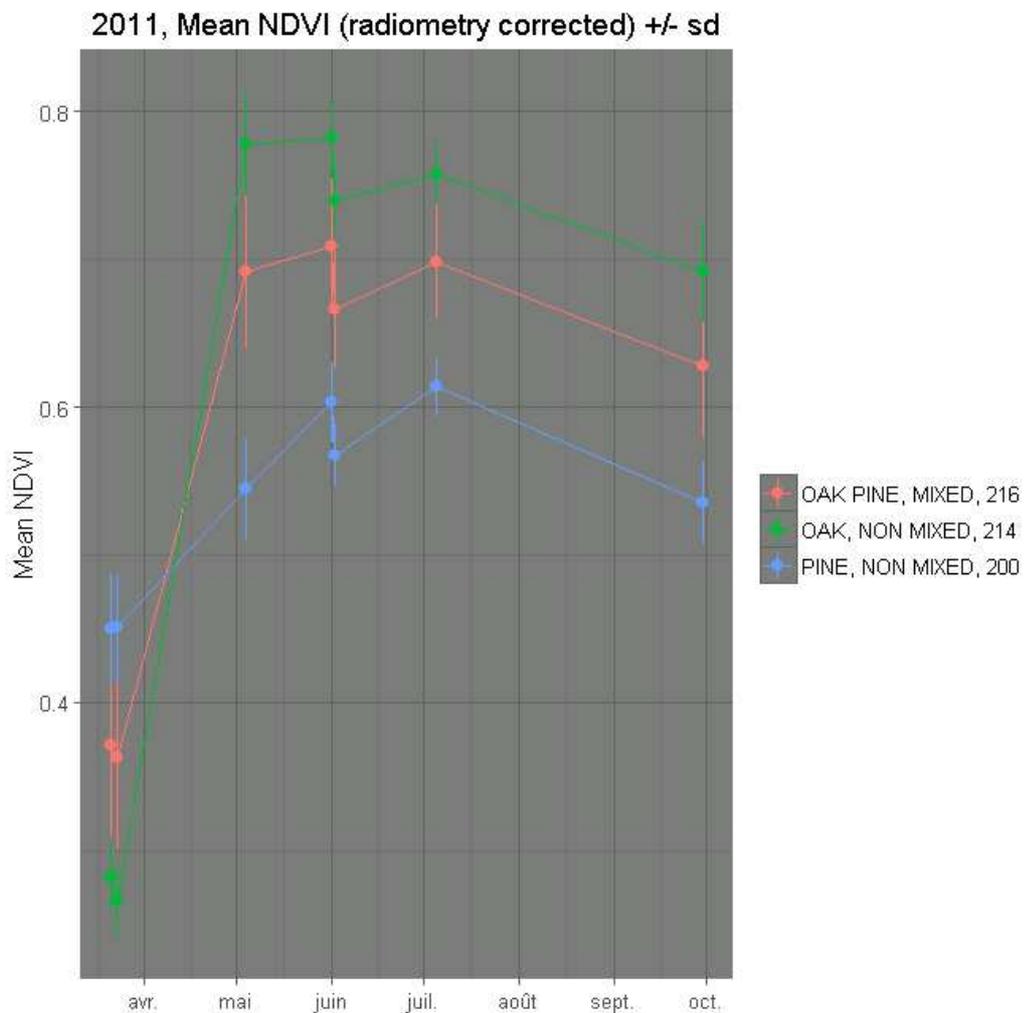


Fig 5. Évolution du NDVI au cours de la saison de végétation de l'année 2011 pour les 3 parcelles du dispositif OPTMix. Les points représentent la moyenne et les barres ± 1 fois l'écart-type (68,2 % de la distribution des pixels).

Au début de la saison de végétation, le Chêne sessile n'est pas encore débourré et la moyenne du NDVI de la parcelle 214 est bien inférieure à celle des parcelles 200 (pin mono-spécifique) et 216 (chêne et pin en mélanges). Plus précisément, on observe une légère baisse de l'indice entre les 21 et 23 mars pour la parcelle en mélange (216) et la parcelle de chêne (214).

Le cliché du 4 mai montre des valeurs fortes pour la parcelle 214. L'activité photosynthétique est importante chez les feuillus et la valeur du signal de la parcelle en mélange est plus proche de la parcelle 214 que de la parcelle 200.

Pour le 1^{er} juin, la moyenne de l'indice de végétation pour la parcelle de chêne semble se stabiliser.

On note une légère augmentation par rapport à la valeur de mai. Sur cette même période, le NDVI

continue de croître pour la parcelle de pin sylvestre et la parcelle en mélange. L'image satellite du 2 juin se caractérise par diminution systématique de l'indice pour les 3 parcelles.

Au 5 juillet, la moyenne du NDVI est à son maximum de la saison de végétation pour la parcelle de pin. Les valeurs du signal pour les autres parcelles commencent à décroître.

Au 30 septembre, l'ensemble des valeurs de l'indice de végétation diminuent de manière concomitante.

DISCUSSION

L'objet de cette étude était d'explorer l'intérêt de la réflectance dans les longueurs d'onde infrarouge pour le suivi de deux essences forestières : le Chêne sessile et le Pin sylvestre dans le cadre du projet OPTMIX. Plus précisément, il s'agissait de mettre en évidence une éventuelle différence de l'indice de végétation normalisé (NDVI) pour une même essence forestière dans un contexte mono-spécifique et mélangé. Ce travail s'est porté sur la saison de l'année 2011 avec des images satellites de la constellation RAPIDEYE fournies par le projet GEOSUD.

D'une manière générale la correction radiométrique augmente les valeurs de l'indice de végétation et conserve la distribution des pixels. Ce constat montre que pour une répétabilité de cette procédure sur ces mêmes parcelles, il n'est pas nécessaire d'apporter des corrections radiométriques pour un seul cliché.

Les résultats montrent des différences de l'indice de végétation entre les deux essences forestières tout au long de la saison de végétation. Ces deux essences sont rattachées à deux divisions botaniques différentes : gymnospermes pour le pin et angiospermes pour le chêne (Tison et al. 2014). Le Pin sylvestre a des feuilles en forme d'aiguilles persistantes l'hiver et le chêne sessile des feuilles à limbes élargis, tombantes en hiver. Aussi ce comportement s'observe-t-il sur cette étude puisqu'en mars 2011, la parcelle de pin mono-spécifique présente un NDVI plus élevé que celle du chêne. Tout au long de l'hiver le Pin sylvestre maintient une activité chlorophyllienne ralentie grâce à la persistance de ses aiguilles alors que le Chêne sessile est encore en dormance. Au fur et à mesure de l'avancement de la saison de végétation le Chêne met en place ses feuilles et le NDVI dépasse largement celui du Pin. Cet écart de l'indice de végétation se retrouve également entre le hêtre (*Fagus sylvatica*, L.) et le Pin sylvestre sur des travaux menés en Pologne (Piekarski & Zwoliński 2014). Si

Hêtre et Chêne diffèrent morphologiquement, ils restent des arbres à feuilles caduques (ils appartiennent tous deux à la famille des Fagacées) et le comportement de leur indice de végétation est identique face à celui du Pin sylvestre. Ainsi du point de vue de la phénologie, cette étude confirme-t-elle l'intérêt de l'utilisation de l'indice de végétation normalisé. Ce résultat est largement relayé dans la littérature scientifique (Carreiras et al. 2006 ; Clerici et al. 2012 ; Han et al. 2013).

En revanche pour le suivi du NDVI par essences en peuplements mono-spécifiques et mélangés, les images dont nous disposons ne nous ont pas permis d'établir une relation entre la réflectance dans les longueurs infrarouges et la composition. Dans un premier temps nous avons essayé d'attribuer la valeur des pixels à une essence dans la parcelle mélangée en fonction des valeurs de la parcelle mono-spécifique. Les résidus des modèles nous ont alertés sur une distribution non bimodale des pixels dans la parcelle en mélange. La taille de pixel de 5 m pour les images de la constellation RAPIDEYE n'est probablement suffisante pour tracer d'éventuels changements. En effet la figure 6 montre dans la parcelle mélangée (216), qu'un même pixel peut porter plusieurs arbres d'essences différentes.

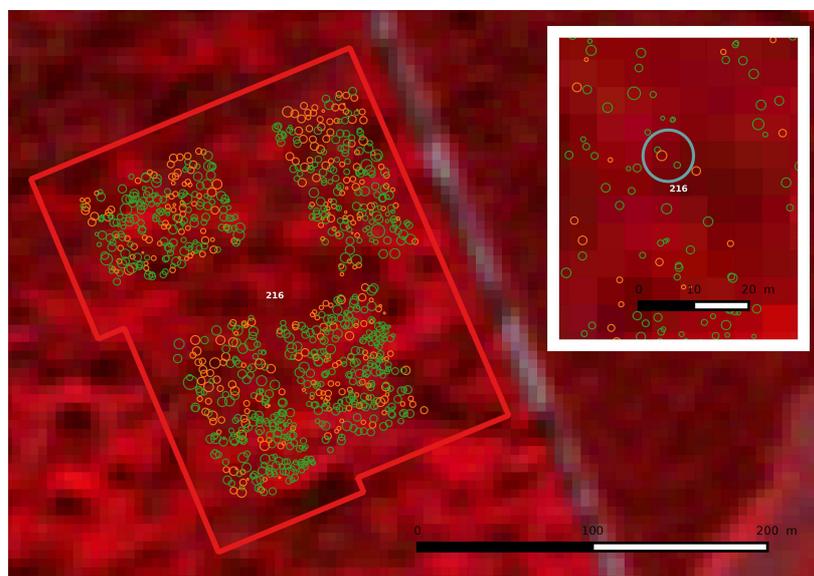


Fig 6. Effet de la taille du pixel sur les valeurs du pixel dans la parcelle en mélange. En vert le Chêne sessile et en orange le Pin sylvestre. Dans l'encart de droite le cercle bleu pointe un pixel sur lequel il y a deux chênes et un pin.

Une autre explication non dénuée d'intérêt est de regarder le problème de l'autre côté, plus précisément sous la canopée. L'éclairage relatif est une notion qui traduit la quantité de lumière présente au sol.

Des mesures ont été effectuées sous des peuplements adultes de Pins sylvestre et de Chêne sessile. Par la suite les chercheurs ont modélisé la relation entre la quantité de lumière au sol en fonction de la surface terrière du peuplement (G). Balandier et al en 2006 et Sonohat et al en 2004 montrent que pour un m² de surface terrière de chêne et de pin, la quantité de lumière au sol est nettement moindre dans le cas du chêne. Un m² de surface terrière de chêne laisse donc moins passer de lumière et cela peut se retrouver au niveau de la canopée. Si effectivement la parcelle 216 présente des pourcentages de G à peu près proportionnelles entre les deux essences, on peut penser qu'au niveau du houppier cela diffère au profit du chêne en pleine saison de végétation.

Nous avons également envisagé de détourner dans la parcelle mélangée des pixels appartenant à des collectifs d'arbres d'une même espèce pour comparer le NDVI avec les parcelles mono-spécifiques. Cette option a pour l'heure été écartée car un collectif d'une même espèce fonctionne a priori comme un peuplement mono-spécifique. L'idée initiale était de détecter finement d'éventuels comportements en situation de peuplement mélangés et mono-spécifiques face à un stress hydrique.

Cette première expérience sur le site OPTMIX montre un intérêt de l'exploitation de l'infrarouge pour le suivi phénologique des essences forestières. Le suivi de l'indice de végétation serait à relier avec d'autres mesures effectuées au sol comme par exemple l'indice foliaire. Une étude géographique proche en Forêt Domaniale de Fontainebleau montre en effet, un lien fort entre l'indice foliaire et le NDVI pour le Chêne sessile et le Pin sylvestre (Davi et al. 2006 ; voir aussi Lawley et al. 2016). D'autres indices de végétation seraient à explorer notamment pour délimiter la couronne et la densité des arbres (Kahriman et al. 2014).

TRAITEMENT DES IMAGES GEOSUD POUR LE PROJET OPTMIX (deuxième volet)

INTRODUCTION

Cette analyse fait suite au précédent travail avec de nouvelles images acquises grâce au projet EQUIPEX GEOSUD. Ces images issues de Spot 7 apportent un double intérêt à la fois sur la précision puisque nous sommes avec une résolution de 1.5 m et sur le choix des dates d'acquisition.

Dans un premier temps trois périodes avaient été convenues :

- Du 1 au 30 juin 2016 ;
- Du 5 au 20 juillet 2016 ;
- Du 5 au 20 août 2016 ;
- Du 10 au 15 septembre 2016.

En raison des conditions météorologiques, seules deux séries d'images ont été prises à savoir : les 28 juin et 16 septembre 2016. Malgré ce résultat, ces deux dates ont cerné deux événements climatiques très importants pour la saison de végétation 2016.

En effet, les abondantes précipitations hivernales et printanières ont largement alimenté les cours d'eau du Loiret et notamment le Loing (affluent de la Seine) qui a dépassé son niveau de 1910. Les services de la préfecture du Loiret ont alors reconnu l'état de catastrophes naturelles pour les inondations et les coulées de boues survenues de fin mai 2016 à fin juin 2016 pour plus d'une dizaine de communes.

Paradoxalement à cette crue centennale, la fin de la saison de végétation 2016 a connu une sécheresse estivale obligeant les services publics à restreindre les utilisations en eau. Dans un tel contexte, ces séries de clichés ont encore plus stimulé l'intérêt des chercheurs pour l'analyse du NDVI sur l'ensemble du dispositif OPTMix.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Lors de l'étude précédente nous avons porté notre analyse à l'échelle de la parcelle en raison de la résolution des images de la constellation Rapideye (5 m). Avec une précision plus fine de l'ordre de

1.5 m nous avons opté pour traiter les données à l'échelle de la placette de mesure soit environ 0.5 ha.

Parcelles étudiées

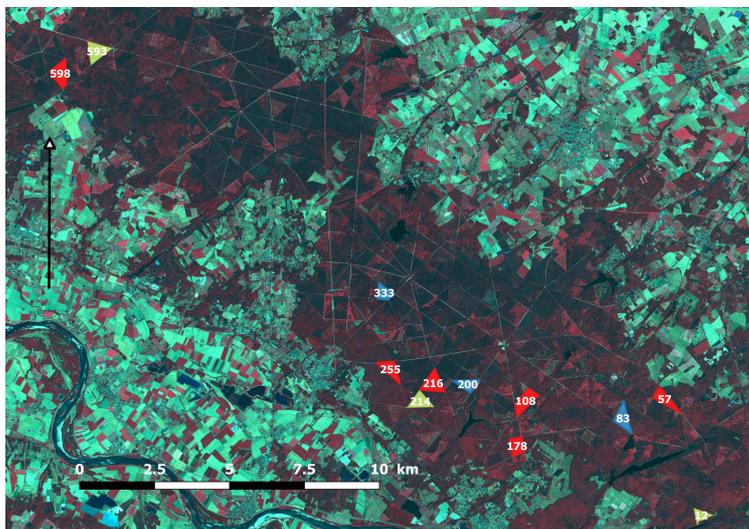


Fig 7. En vert, peuplement de Chêne sessile mono-spécifique. En bleu, peuplement de Pin sylvestre et en rouge, peuplement de Chêne et Pin sylvestre en mélange. *Images satellites SPOT 7 du 16/09/2016.*

Le tableau suivant recense les 42 placettes de mesure.

Tab.2: Caractéristiques de l'expérimentation OPTMix.

DISPOSITIF	NOMBRE DE PLACETTES DE MESURE	COMPOSITION
O12	3	Chêne
O57	4	Mélange
O83	3	Pin
O108	4	Mélange
O178	4	Mélange
O200	3	Pin
O214	3	Chêne
O216	4	Mélange

O255	4	Mélange
O333	3	Pin
O593	3	Chêne
O598	4	Mélange

Les images

Les cartes suivantes montrent les emprises des dalles orthorectifiées par Le personnel du projet EQUIPEX GEOSUD

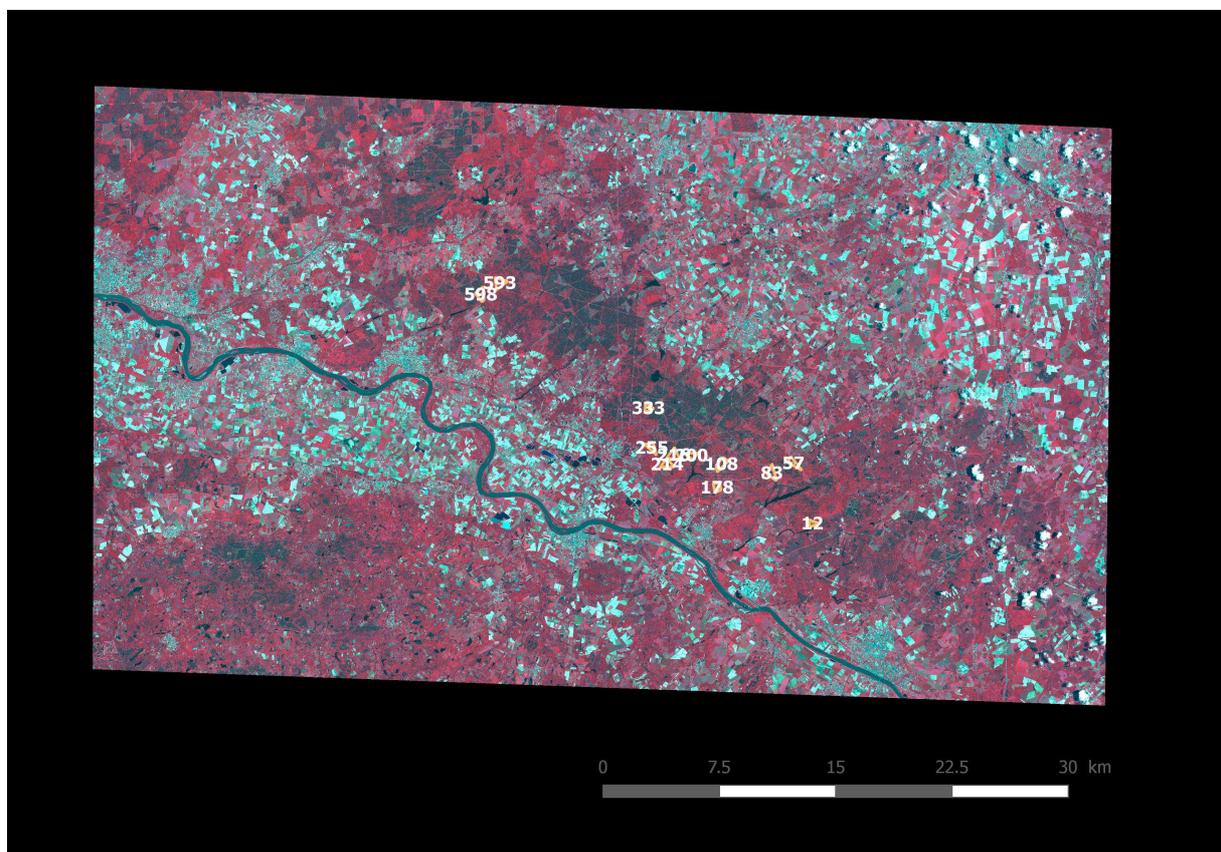


Fig 8. Images satellites SPOT 7 du 28/06/2016.

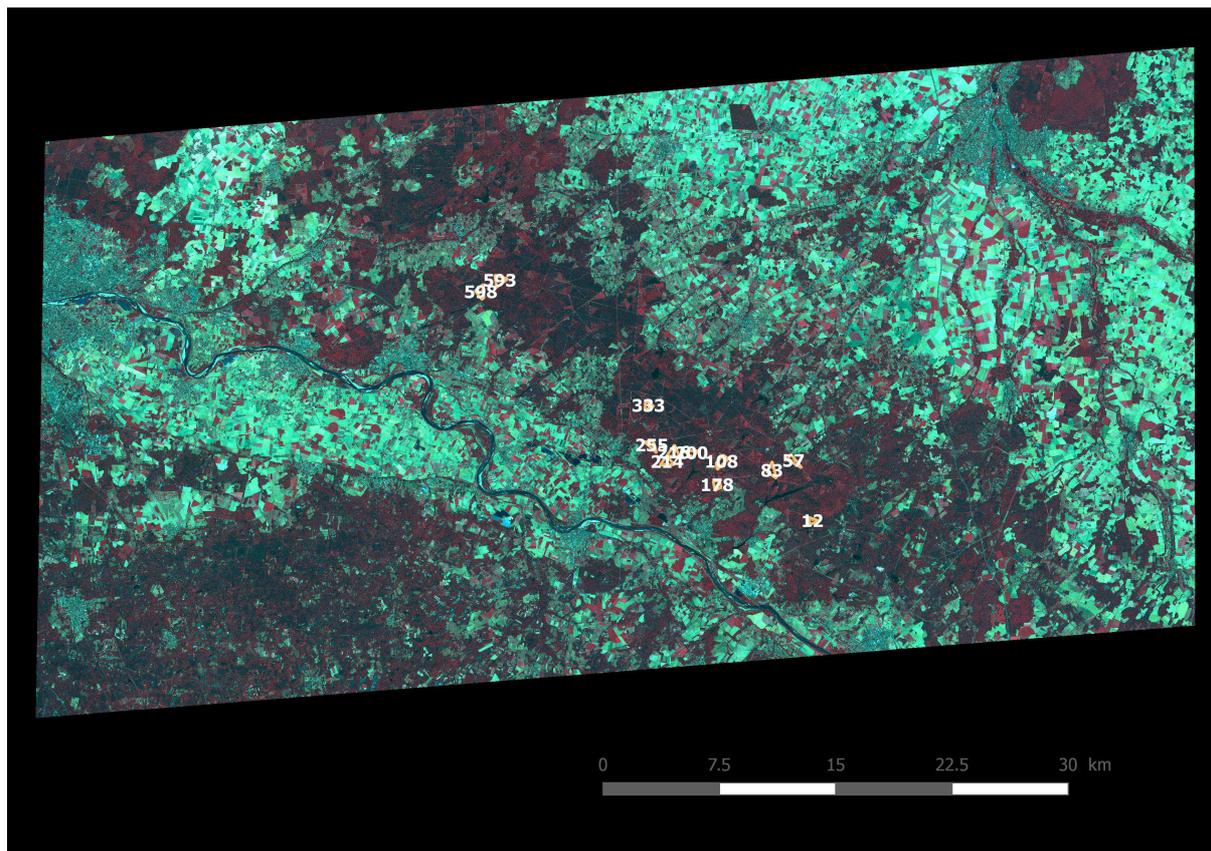


Fig 9. Images satellites SPOT 7 du 16/09/2016.

Traitement des images

La procédure pour cette analyse est rigoureusement identique au travail précédent. Nous n'avons pas testé l'intérêt de la correction radiométrique puisque cette dernière est indispensable dans le cadre de dalles successives. Un exemple de script R est présenté en annexe 3.

RÉSULTATS

Le graphique 10 A présente les valeurs de NDVI ventilées par types de peuplements et par date. Ce graphe a été édité avec les valeurs des 42 placettes de mesures.

Si pour les peuplements mélangés (couleur rouge) la présentation en boîte à moustaches ne montre aucune différence entre les deux dates, en revanche pour les peuplements mono-spécifiques ce

simple mode graphique révèle des comportements différents entre le Chêne sessile et le Pin sylvestre.

Les clichés du 28 juin 2016 se situent pendant l'épisode de la crue centennale du Loing. Les fossés et sols forestiers étaient à cette période, encore largement gorgés d'eau et les valeurs des NDVI pour ces deux essences forestières sont très disparates : de l'ordre de 0.6 pour le Pin sylvestre et jusqu'à 0.79 pour le Chêne sessile.

Pour les images de septembre, le contexte météorologique était paradoxalement à l'opposé de l'inondation puisque l'ensemble des végétaux présentaient des stress liés à une sévère sécheresse estivale. L'amplitude des valeurs moyennes des NDVI paraît plus resserrée puisque le Pin remonte aux environs de 0.66 et le Chêne diminue vers 0.76.

La figure 10 B présente les mêmes valeurs mais de manière détaillée pour chaque dispositif. On retrouve les mêmes ordres de grandeurs pour les placettes de mesures mono-spécifiques. Les valeurs des placettes de mélange quant à elles, se distribuent sur un gradient plus lâche. L'étude du NDVI à l'échelle de la placette n'est pas pertinente pour les peuplements en mélange. Une simple cartographie explicite la spatialisation de l'indice de végétation qu'il conviendrait d'analyser avec d'autres traitements géomatiques et statistiques. Deux exemples de cette répartition en fonction des dates d'acquisition sont consultables sur la figure 11.

DISCUSSION

Le but de ce travail était de valider l'utilisation d'images satellites à résolution fine (de l'ordre du mètre) en pleine saison de végétation pour le dispositif de recherche OPTMix. Une première approche descriptive a fait apparaître des valeurs de l'indice de végétation normalisé différentes selon les essences forestières et les dates d'acquisition. Pour l'année 2016 ces dernières revêtent un caractère particulier puisqu'elles témoignent d'épisodes météorologiques contrastés : une inondation centennale printanière et une sécheresse estivale. Le NDVI du Pin sylvestre a été plus bas durant la période d'inondation que pendant la sécheresse. A l'opposé le Chêne sessile ne semble pas avoir souffert de l'inondation mais son indice a subi un recul durant le stress hydrique.

Deux fonctionnements différents selon des stress très tranchés. Ces deux essences sont très plastiques du point de vue de leurs exigences édaphiques (Rameau et al. 1989 ; Ducouso & Bordacs. 2003 ; Bastien et al. 2015) et supportent des engorgements et des sécheresses temporaires. L'originalité de la saison de végétation 2016 réside que de telles contraintes en eau ce sont exprimées au printemps et à l'été 2016. Ce double stress ne sera pas sans conséquences sur les peuplements forestiers et milite pour des observations pluriannuelles par capteurs satellites.

A l'opposé ce travail n'a pas permis de pleinement exploiter l'indice de végétation à l'échelle de la placette de mesures pour les peuplements mélangés. Si les cartes 11 illustrent une spatialisation de l'indice dans les placettes de mesures, on ne peut cependant pas encore attribuer ces variations à l'emplacement des Pins et Chênes. Un travail plus approfondi semble nécessaire avec des outils géomatiques et statistiques adaptés.

Au vues de ces résultats il est indéniable de continuer à suivre l'ensemble du dispositif de recherche avec une telle précision et répétitivité accrue pendant la saison de végétation.

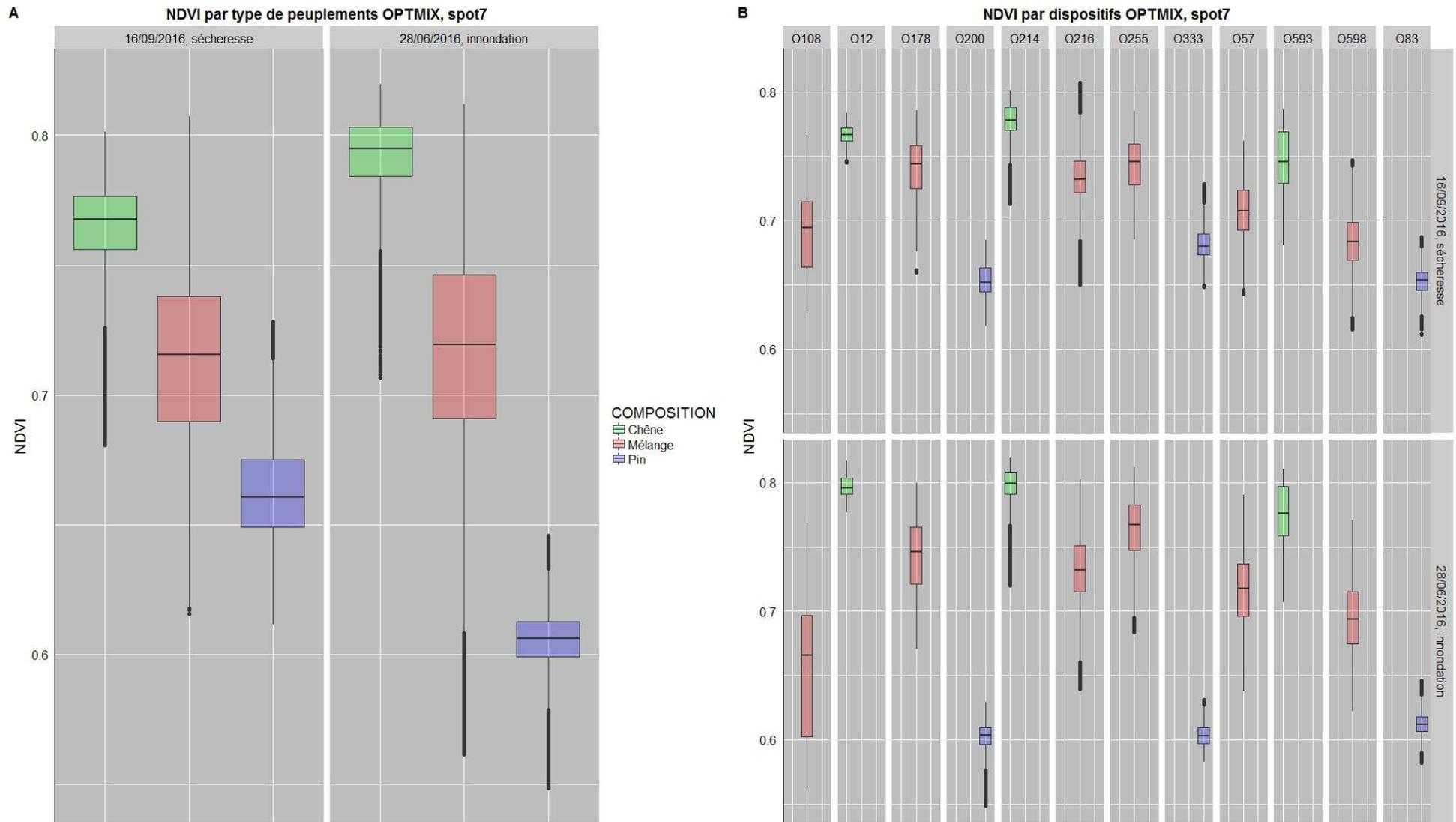


Fig 10. A : Indice de végétation normalisé par types de peuplements et par dates. B : Indices de végétation par types de peuplements, par placettes et par dates.

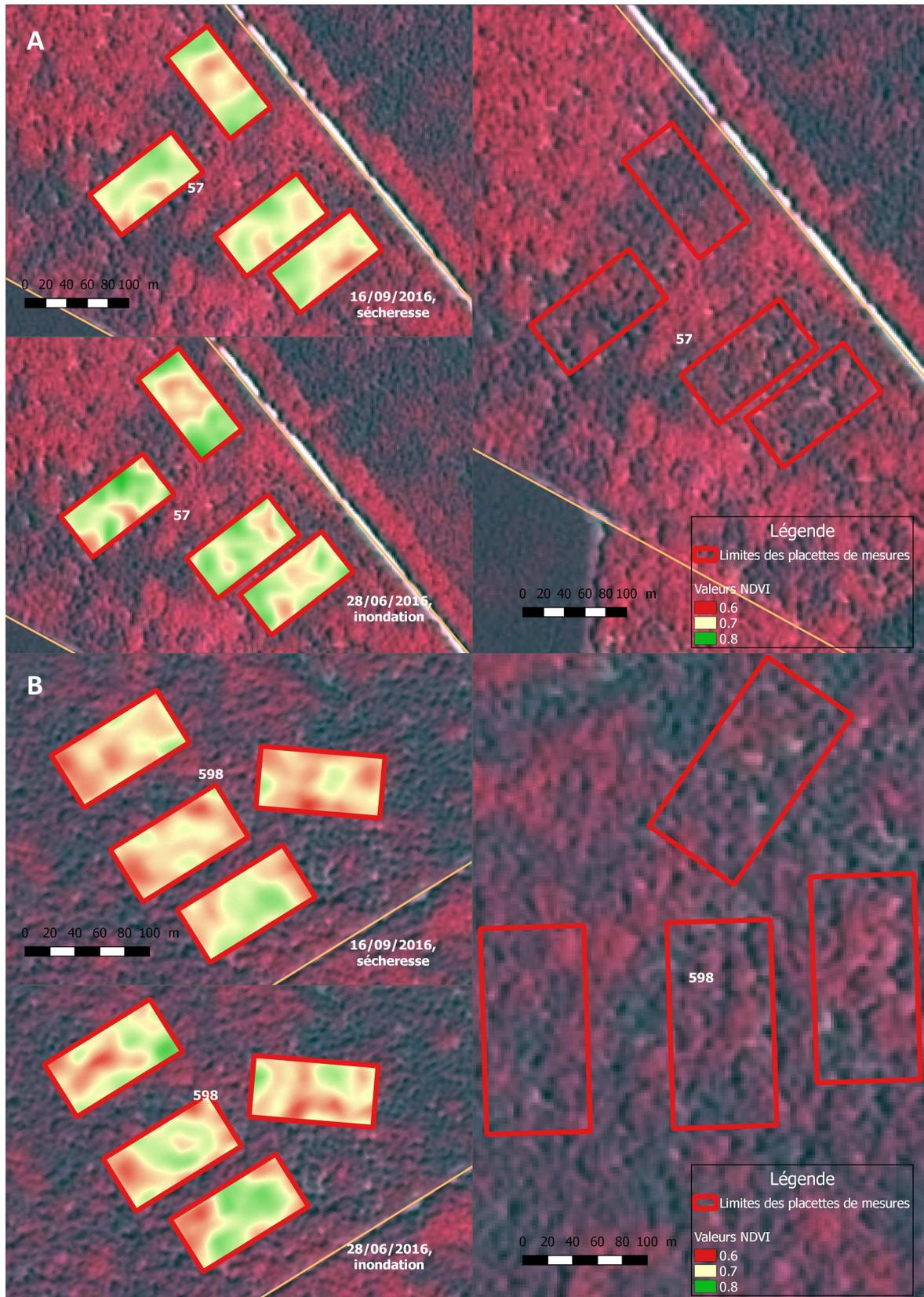


Fig 11. Deux exemples de spatialisation de l'indice de végétation. A : Parcelle 57. B : Parcelle 598.

BIBLIOGRAPHIE

Balandier, P., Sonohat, G., Sinoquet, H., Varlet-Grancher, C., Dumas, Y., (2006). Characterisation, prediction and relationships between different wavebands of solar radiation transmitted in the understorey of even-aged oak (*Quercus petraea*, *Q. robur*) stands) *Trees - Structure and Function*, 20 (3), pp. 363-370.

Bastien, C., Ricodeau, N., Collin, E., (2015). *Pinus sylvestris* L. Caractéristiques générales de l'espèce. Ministère de l'Agriculture, pp. 1-10.

http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/151218_psy_fiche.pdf

Carreiras, J.M.B., Pereira, J.M.C., Pereira, J.S., (2006). Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 223 (1-3), pp. 45-53.

Clerici, N., Weissteiner, C.J., Gerard, F., (2006). Exploring the use of MODIS NDVI-based phenology indicators for classifying forest general habitat categories. *Remote Sensing*, 4 (6), pp. 1781-1803.

Davi, H., Soudani, K., Deckx, T., Dufrene, E., Le Dantec, V., François, C., (2006). Estimation of forest leaf area index from SPOT imagery using NDVI distribution over forest stands. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (5), pp. 885-902.

Ducousso, A., Bordacs, S., (2003). Chênes pédonculé et sessile, fiche technique pour la conservation génétique. EUFORGEN. ISBN 92-9043-660-3

http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Countries/France/Quercus-petraea_FR_forweb.pdf

Han, Q., Luo, G., Li, C., (2013). Remote sensing-based quantification of spatial variation in canopy phenology of four dominant tree species in Europe. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7 (1), art. no. 073485.

Kahriman, A., Günlü, A., Karahalil, U., (2014). Estimation of Crown Closure and Tree Density Using Landsat TM Satellite Images in Mixed Forest Stands. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, pp. 1-9. Article in Press.

Lawley, V., Lewis, M., Clarke, K., Ostendorf, B., (2016). Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review. *Ecological Indicators*, 60, pp. 1273-1283.

Piekarski, P., Zwoliński, Z., (2014). Temporal variation in vegetation indexes for pine and beech stands during the vegetation season, Szczecin Lowland, Poland. *Quaestiones Geographicae*, 33 (3), pp. 131-143.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dumé, G., Timbal, J., Lecointre, A., Dupont, P., Keller, R., (1989). Flore Forestière Française, guide écologique illustré, Plaines et collines Tome 1. Institut pour le Développement Forestier, , p 305, 565.

Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C., (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT Type III Final Report, Greenbelt, MD, USA.

Sonohat, G., Balandier, P., Ruchaud, F., (2004). Predicting solar radiation transmittance in the understory of even-aged coniferous stands in temperate forests. *Annals of Forest Science*, 61 (7), pp. 629-641.

Tison, J.-M., de Foucault, B (coords). *Flora Gallica. Flore de France (2014).* Biotope, Mèze, p 41, 769.

ANNEXE 1

L'idée de cette procédure était de comparer les valeurs du NDVI pour une même espèce entre peuplements mélangés et mono-spécifiques. Ce travail passait par une phase d'attribution de pixels pour les deux essences dans la parcelle mélangée. En utilisant les valeurs dans les parcelles mono-spécifiques, nous avons discriminé à l'aide de la calculatrice raster (Qgis) les essences dans la parcelle en mélange. Le tableau 3 reprend cette démarche.

Tableau 3. Valeurs basses et hautes du NDVI par dates d'images satellites et par parcelles. Pour la colonne des dates, la lettre « r » indique qu'il s'agit d'images corrigées du point de vue de la radiométrie. Les chiffres entre parenthèses renvoient au nombre de pixels. Le chiffre en gras correspond au plus petit nombre de pixels.

Images Rapideye 2011	Pin MONOSP P200	Pin MELANGE P216	Chêne MELANGE P216	Chêne MONOSP P214
21/03	0,20 : 0,38(940)	$\geq 0,20(1052)$	$\leq 0,18(499)$	0,08 : 0,18(1303)
21/03r	0,35 : 0,51(940)	$\geq 0,35(1074)$	$\leq 0,34(557)$	0,24 : 0,34(1314)
23/03	0,21 : 0,37(925)	$\geq 0,21(837)$	$\leq 0,17(470)$	0,06 : 0,17(1312)
23/03r	0,36 : 0,50(912)	$\geq 0,36(833)$	$\leq 0,32(436)$	0,22 : 0,32(1306)
04/05	0,35 : 0,53(942)	$\leq 0,53(273)$	$\geq 0,56(1267)$	0,56 : 0,74(1220)
04/05r	0,48 : 0,64(957)	$\leq 0,64(295)$	$\geq 0,66(1300)$	0,66 : 0,80(1052)
01/06	0,43 : 0,57(952)	$\leq 0,57(329)$	$\geq 0,61(1028)$	0,61 : 0,74(1225)
01/06r	0,55 : 0,67(957)	$\leq 0,67(338)$	$\geq 0,70(1035)$	0,70 : 0,81(1305)
02/06	0,39 : 0,50(952)	$\leq 0,50(199)$	$\geq 0,58(726)$	0,58 : 0,69(1282)
02/06r	0,52 : 0,61(942)	$\leq 0,61(187)$	$\geq 0,68(703)$	0,68 : 0,76(1139)
05/07	0,45 : 0,55(943)	$\leq 0,55(259)$	$\geq 0,60(1011)$	0,60 : 0,71(1279)
05/07r	0,57 : 0,66(956)	$\leq 0,66(290)$	$\geq 0,69(1098)$	0,69 : 0,78(1237)

30/09	0,33 : 0,47(945)	$\leq 0,47(354)$	$\geq 0,48(1295)$	0,48 : 0,65(1269)
30/09r	0,47 : 0,58(924)	$\leq 0,58(287)$	$\geq 0,59(1348)$	0,59 : 0,73(1236)

Après avoir converti en ASCII ces images, nous avons pu sous les intégrer sous R en transformant les données sources de type « matrice » au format « tableau ». Afin de pouvoir comparer les valeurs de NDVI par parcelles et par dates, nous avons arrêté à 185 pixels/image ce qui correspond au plus petit nombre commun (voir chiffre en gras Tableau 3). Les 185 pixels/image ont été tirés au sort sous le logiciel R.

Pour analyser la significativité du type de peuplement (mono-spécifique/mélange) versus le NDVI, nous avons utilisé un modèle linéaire simple par essence forestière avec la fonction « lm » de R. La sélection des modèles s'est effectuée par comparaison d'AIC avec les modèles nuls. Les résultats ont rapidement soulevé des problèmes quant aux résidus des modèles. En effet le seuillage dans la parcelle mélangée à partir des valeurs des parcelles mono-spécifiques, tronque les courbes de distribution.

Le graphe 11 illustre ce constat. En vert, il s'agit de la valeur du NDVI pour la parcelle mono-spécifique de chêne (185 pixels tirés au sort). En bleu clair, le même nombre de pixels pour les valeurs de l'indice de végétation pour les chênes dans la parcelle en mélange. Ce décalage s'observe également pour le pin en mélange (rose) et le pin non mélangé (orange).

NDVI, 185 pixels/parcelles tirés au sort, RAPIDEYE (5m) 30/09/2011

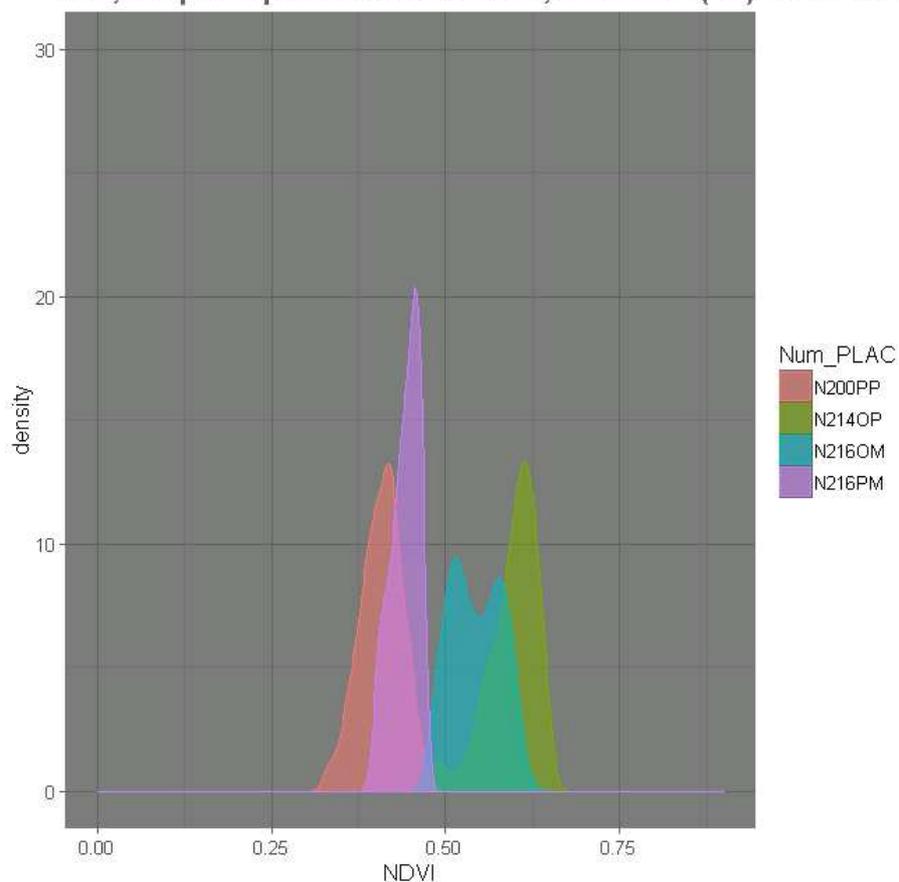
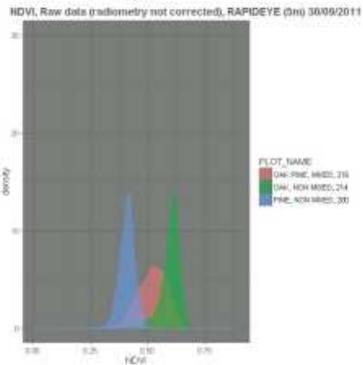
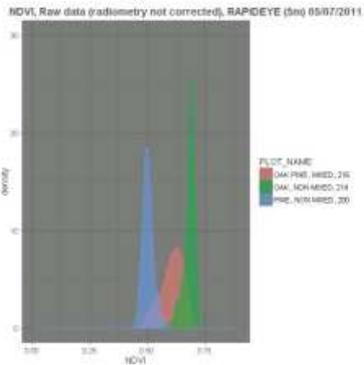
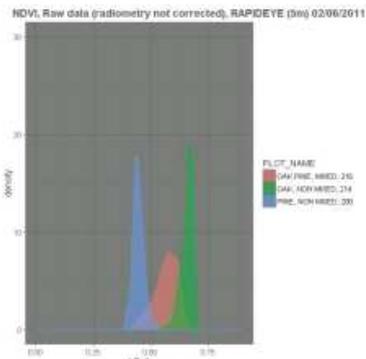
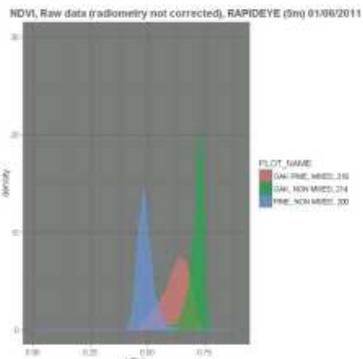
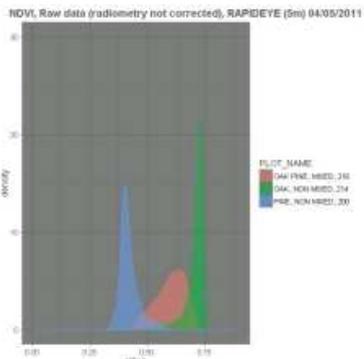
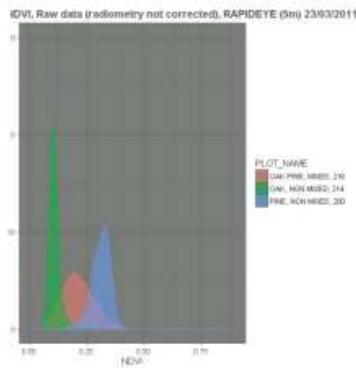
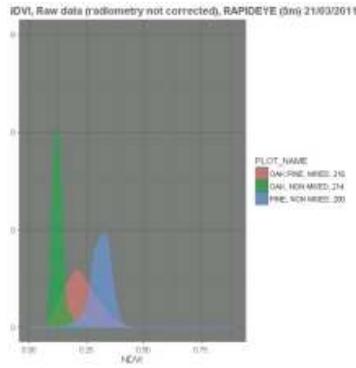
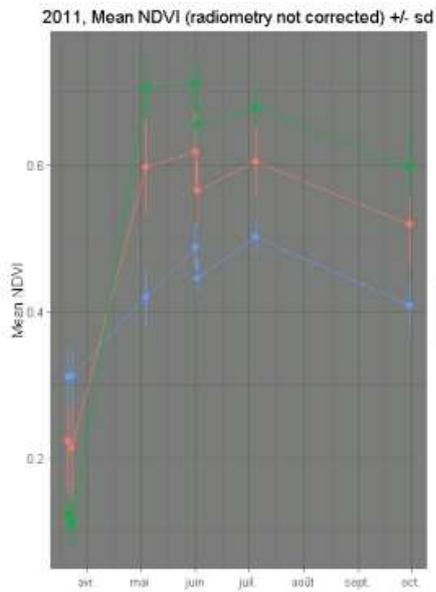
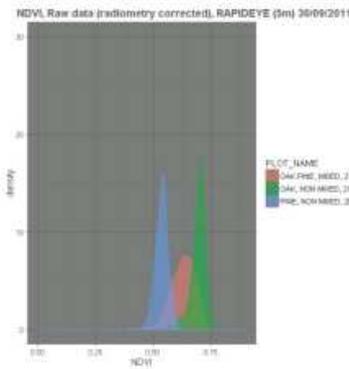
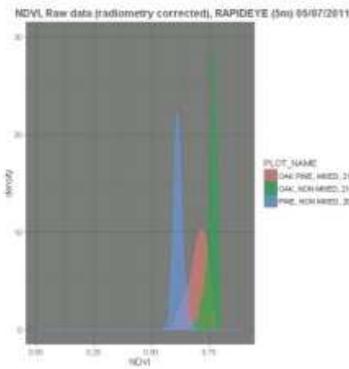
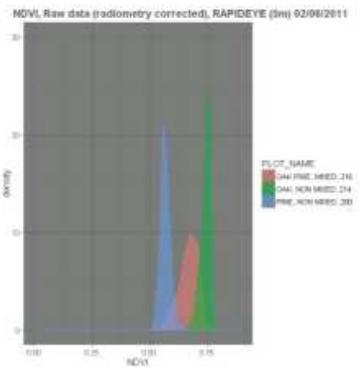
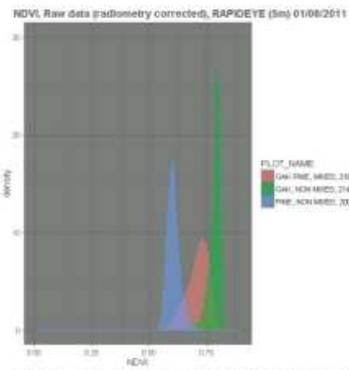
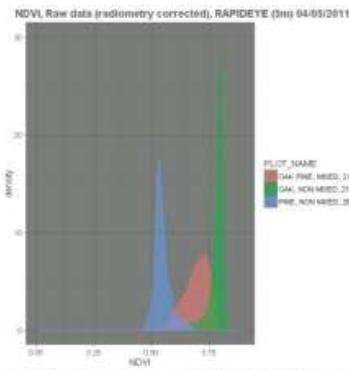
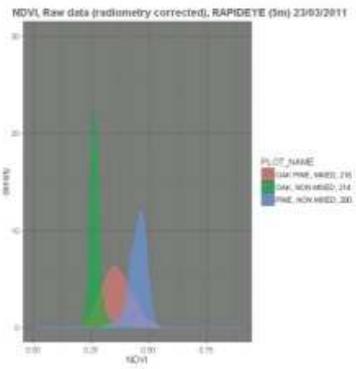
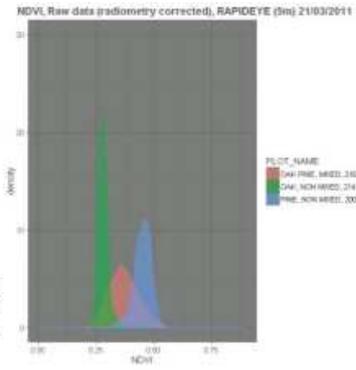
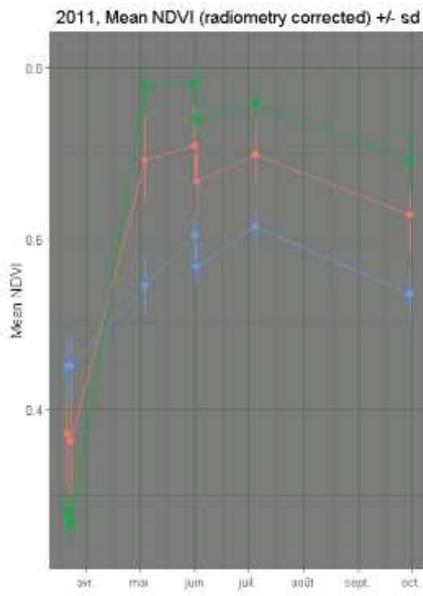


Fig 11. Distribution des valeurs du NDVI (185 pixels tirés au sort) par parcelles et par essences forestières. Orange : pin mono-spécifique (N200PP), Rose : pin en mélange (N216PM), Vert : chêne mono-spécifique (N214OP), Bleu : chêne en mélange (N216OM).

ANNEXE 2





ANNEXE 3

Script R, exemple d'importation et de conversion des données

```
a <-read.table("C:/OPTIMIX/NDVI_SP7/EXTRACT/280616/ASCII/5984_280616.txt", sep=" ", dec = ".", h = F,
NDVI=rapplly(list(a),c)
O5984_280616=data.frame(NDVI)
O5984_280616$DATE="280616"
O5984_280616$DISPOSITIF="O598"
O5984_280616$COMPOSITION="Mélange"
O5984_280616$PLACETTE="4"
#On retire les valeurs nulles
select <- is.na(O5984_280616)
#select
aeliminer<-apply(select,MARGIN=1,FUN=any)
a42 <- (O5984_280616[!aeliminer,])
summary(a42)
```

Graphe

```
#NDVI par composition et par date
p <- ggplot(pdat, aes(COMPOSITION, NDVI)) + geom_boxplot(aes(x=COMPOSITION,y=NDVI, fill=COMPOSITION),alpha = 0.25)
panel.background = element_rect(fill = "gray",
                                colour = "gray",
                                size = 0.5, linetype = "solid"),
panel.grid.major = element_line(size = 0.5, linetype = 'solid',
                                colour = "white"),
panel.grid.minor = element_line(size = 0.25, linetype = 'solid',
                                colour = "white"),
axis.text.x = element_blank(), axis.ticks = element_blank() + facet_grid(~DATE) +
scale_fill_manual(values=c("green", "red", "blue")) + labs(x="",y = "NDVI")+
ggtitle ("NDVI par type de peuplements OPTIMIX, spot7")
p
```