Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

Rapport de stage Master 2 Télédétection et Géomatique Appliquées à l'environnement

Apport de la cartographie des coupes rases par télédétection satellitaire dans la construction d'indicateurs forestiers nécessaires au pilotage de l'équilibre sylvo-cynégétique.

****

Période du stage : *Du 03/04/2018 jusqu'au 28/09/2018*

Présentation orale : *11/09/2018*

Auteur : Bambo FOFANA

Encadrement : Isabella DAMIANI

Tuteurs en entreprise : Jean Pierre HAMARD et Kenji OSE

IRSTEA (UR EFNO et UMR TETIS)

ANNEE UNIVERSITAIRE 2017/2018

UNIVERSITÉ DE VERSAILLES ST-QUENTIN-EN-YVELINES
université PARIS-SACLAY

irstea Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
UR EFNO et UMR TETIS

Résumé

L'augmentation de la population d'ongulés sauvages ces dernières décennies dans les forêts européennes en général et française en particulier a suscité une inquiétude chez les sylviculteurs. Ces ongulés sauvages notamment le Cerf et le Chevreuil font partie des grands herbivores dont l'impact (au travers de l'abroutissement et de l'écorçage) sur les essences forestières a fini par être démontré.

Les Indicateurs de Suivi Ecologique (ICE) apparus dans les années 2000 ont apporté des précisions sur l'abondance et la répartition des populations de cervidés dans les massifs forestiers. Ces indicateurs permettent de réajuster les plans de chasse pour maintenir ces animaux dans un habitat qui leur a toujours été favorable.

Les diagnostics sylvicoles actuels par enquête de terrain sont lourds en termes de mobilisation en ressources humaines et financières. Ce qui constitue une véritable difficulté pour les sylviculteurs dans l'indentification et la caractérisation des peuplements sensibles aux dégâts des cervidés.

Pour pallier ce problème, nous avons travaillé sur la construction d'indicateurs forestiers à partir de l'utilisation de l'imagerie satellitaire afin de détecter les zones d'interventions sylvicoles qui seraient plus sensibles aux dégâts des cervidés. Ce travail entre dans le cadre du projet ReForest en cours depuis 2016 dans la région Centre-Val de Loire. Ce projet a pour objectif de réunir les acteurs de la forêt (chasseurs et sylviculteurs) pour trouver ensemble et proposer des outils pertinents d'aide à la décision dans un contexte de maintien de l'équilibre sylvo-cynégétique.[1]

L'adaptation de la méthode bi-dates de détection des coupes à la problématique sylvicole a permis de retrouver un grand nombre d'interventions sylvicoles mais avec des taux de commissions élevés. L'approche série quant à elle ne permet pas de pousser plus loin le suivi des interventions sylvicoles à l'état actuel des donnes détections disponibles. Une visualisation des zones d'interventions sylvicoles est cependant envisageable à partir d'une classification supervisée de type Random Forest.

La détection des interventions sylvicoles par la méthode bi-dates doit être poursuivie dans les années à venir. La complémentarité avec d'autres méthodes et données sont des perspectives pour l'amélioration de la qualité des détections d'interventions sylvicoles.

[1] Equilibre sylvo-cynégétique : équilibre entre forêt et gibier

Remerciements

Les remerciements sont pour moi une forme de reconnaissance à l'endroit des personnes qui ont de près ou de loin apporté un soutien quel qu'il soit dans la réussite de ce travail.

Je commence par remercier mon encadrante de l'université Isabella DAMIANI, merci Madame pour vos conseils qui m'ont été d'une grande aide pour la réalisation de ce stage.
Je remercie ensuite toutes les personnes avec qui j'ai travaillé dans le cadre de ce projet aussi bien à l'équipe FONA qu'à UMR TETIS. Il s'agit de Jean Pierre HAMARD (premier encadrant à IRSTEA), de Cédric PATINAUD, Agnès ROCQUENCOURT et Tess DE BECKER pour l'équipe FONA, merci à vous de m'avoir permis de comprendre certaines notions clés en foresteries. Mes remerciements vont également à l'endroit de Kenji OSE (deuxième encadrant à IRSTEA) et Rémi CRESSON de l'URM TETIS pour m'avoir initié et formé à des outils comme OTB qui m'ont été d'une grande utilité pour réussir ce travail.
Je remercie enfin les gestionnaires forestiers qui nous ont ouvert leurs portes et ont accepté de partager avec nous des informations sur leurs inventions sylvicoles lors de nos différentes missions de validation sur le terrain. Il s'agit de Jean-Marie Hiver, Sébastien Hermeline et Antoine Breton pour la forêt privée.
Merci à tous les stagiaires de la salle Afrique à la maison de la télédétection pour vos cordialités ainsi que vos sens de l'humour. David, Mathieu, Éric, Céline, Marion et Sami merci à vous.

Tables des Matières

Tables des Matières iii

Introduction 1

I. Contexte et objectifs de l'étude 2

1. Contexte général : le projet Reforest 2
2. Problématique et objectifs du stage 2
3. Etat de l'art sur le potentiel de la télédétection dans le suivi de la forêt 6
   - 3.1. Ecosystèmes forestiers et pression animale 6
   - 3.2. Suivi de l'impact des cervidés par imagerie satellitaire 6
   - 3.3. Les applications de la télédétection en foresterie 7
4. Planification des tâches du stage, chronogramme 7

II. Mise en place de méthodes dédiées à la détection et au suivi des interventions sylvicoles par imagerie satellitaire 11

1. Exploitation des images Landsat-8 et Sentinel-2 11
   - 1.1. Programmes de mutualisation des données à l'échelle européenne et nationale 11
   - 1.2. Justification du choix des capteurs 11
2. Structuration des données et outils 13
   - 2.1. Téléchargement des images, automatisation du processus 13
   - 2.2. Organisation des données, choix des indices 14
   - 2.3. Automatisation de l'extraction des indices avec Orfeo ToolBox 15
3. La méthode Bi-dates 15
   - 3.1. Adaptation de la méthode coupe rase à la détection des interventions sylvicoles 16
   - 4.1. Création de séries temporelles 22
   - 4.2. Statistique zonale pour le suivi temporel des interventions sylvicoles 22
   - 4.3. Méthode de classification par Random Forest des images 24

III. Résultats, analyse et perspectives 26

1. De la difficulté pour valider les premiers résultats 26
   - 1.1. Données des gestionnaires publics/privés : avantages et limites 26
   - 1.2. Description des bases de données existantes 26
2. Contrôles de Terrain 28
   - 2.1. Description du protocole de contrôle 28
   - 2.2. Le problème phytosanitaire 28
3. Résultat de la méthode bi-dates 30
   - 3.1. Dates des images (période entre attaques parasitaires et stress hydrique) 30

3.2. Matrices de confusion pour les détections de la forêt privée en méthode bi-dates… 32
3.3. Interprétation des matrices et discussion 35
3.4. Proposition d'indicateurs forestiers 37
4. Perspectives 37
4.1. Les profils temporels, classification, enrichissement de base de données multi-temporelles et multi-sources 38
4.2. Détection des reprises de végétation 41
Conclusion 44
Références bibliographiques 45
Liste des figures 47
Listes des tableaux 48
Liste des annexes 48
Liste des scripts 48
Annexes 49

Introduction

Les écosystèmes forestiers représentent une composante fondamentale de l'environnement. Les pressions exercées sur les forêts peuvent être d'origine humaine ou animale et avoir des conséquences à long terme sur le renouvellement de ces ressources.

Aujourd'hui en France et particulièrement dans la région Centre-Val de Loire, les bases de données cynégétiques (ONCFS, 2017) révèlent une augmentation des populations de cervidés. Cette augmentation qui concerne le Cerf (*Cervus elaphus* L.) et le Chevreuil (*Capreolus capreolus* L.) suscite une inquiétude chez les sylviculteurs compte tenu des impacts ou dégâts que ces derniers supportent principalement au niveau de peuplements dont le processus de régénération est en cours. L'utilisation de l'imagerie satellitaire dans l'étude et le suivi des écosystèmes forestiers n'est pas nouvelle. Mais trouver une relation ne serait-ce qu'indirecte entre peuplements forestiers et population animale par télédétection est inédite.

De ce fait, notre démarche dans le cadre de cette étude a été purement exploratoire en vue d'identifier des indicateurs susceptibles d'orienter la politique cynégétique au travers de l'ajustement des Plans De Chasse (PDC), outil légal de gestion des populations de cervidés. Nous partons de la méthode de détection des coupes rases (développée par l'UMR TETIS – IRSTEA) pour explorer plusieurs pistes de traitements d'images basées sur les indices de végétation afin de mettre en évidence la nécessité d'exploiter le potentiel offert par l'imagerie satellitaire dans les nouvelles problématiques de la sylviculture (le maintien du renouvellement des ressources forestières) tout en respectant la dynamique d'équilibre entre forêt et gibier appelé aussi « équilibre sylvo- cynégétique ».

Cette équilibre entre forêt et gibier est une ambition portée par le projet « Reforest » et exécutée par IRSTEA (notre organisme d'accueil) et ses partenaires.

Une partie de mon travail a été réalisée à l'UMR TETIS[2] à la Maison de la Télédétection (Montpellier) pour des besoins d'encadrement dans le processus de traitements des images (encadrement assuré par Kenji OSE, ingénieur d'études). La seconde partie du stage a eu lieu à Nogent au sein de l'équipe FONA[3] de l'UR EFNO[4] (encadrement assuré par Jean Pierre HAMARD, ingénieur d'études) afin de transférer les données et méthodes utilisées lors de ce travail de recherche. Nous notons également les déplacements qui ont eu lieu durant le stage. Ils entrent dans le cadre des missions de terrain réalisées avec l'équipe FONA pour la validation des détections satellitaires sur le terrain.

[2] UMR TETIS - Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale
[3] FONA - Interactions Forêt ONgulés Activités humaines
[4] EFNO- Ecosystèmes forestiers

I. Contexte et objectifs de l'étude

1. Contexte général : le projet Reforest

Les forêts françaises sont des patrimoines dont chaque génération a la responsabilité de s'assurer sa pérennité tout en l'exploitant de la manière la plus rationnelle possible.
« L'évolution de la politique forestière nationale identifie l'équilibre sylvo-cynégétique comme un enjeu majeur pour les prochaines années. Les populations d'ongulés sauvages, en particulier celles de deux cervidés : le Cerf élaphe (*Cervus elaphus* L.) et le Chevreuil (*Capreolus capreolus* L.), atteignent des niveaux qui suscitent l'inquiétude des sylviculteurs en termes d'impact sur le renouvellement de la forêt. La gestion des populations d'ongulés, pilotée à l'échelle départementale, passe par des étapes de concertation entre d'une part l'administration et d'autre part les acteurs de la chasse et de la forêt. L'analyse des prélèvements réalisés par la chasse et le recours à des méthodes de suivis permettent d'acquérir des éléments de jugements sur l'abondance et la dynamique de ces populations. En revanche, la caractérisation de l'écosystème forestier en termes de sensibilité aux dommages commis par les cervidés reste à ce jour fragmentaire, imprécise, onéreuse et difficilement renouvelable pour en proposer un outil pertinent d'aide à la décision. La sensibilité des boisements demeure cependant un indicateur fondamental pour apprécier les risques encourus par les sylviculteurs. En ce sens, la méthode de détection des coupes rases par télédétection satellitaire ouvre une voie nouvelle avec l'espoir, aux échelles d'investigation souhaitées, de disposer d'un traitement de l'information en routine avec une incertitude mesurable ce qui était jusqu'ici peu envisageable », (équipe FONA, UR EFNO, 2018).

Le projet ReForest est piloté au sein d'IRSTEA par l'unité de recherche EFNO (Écosystèmes forestiers), en partenariat avec d'autres organismes publics et privés (cf. **annexe 1**).
L'équipe FONA de l'UR EFNO travaille principalement sur des thématiques comme l'adaptation du renouvellement de la forêt en présence d'ongulés sauvages dans un contexte global de changement climatique, le rôle de ces ongulés dans le fonctionnement de la biodiversité forestière. Ses chercheurs proposent des indicateurs pour assurer le bon déroulement de la régénération des forêts.

2. Problématique et objectifs du stage

La pression des cervidés sur l'écosystème forestier, particulièrement sur les jeunes peuplements en régénération a été démontrée à travers plusieurs études (Mårell *et al.*, 2012, Mårell et *al.*, 2013, Hamard et Ballon, 2011, Belantier et *al.*, 2006, Laurent, 2017). Cette pression animale sur les forêts françaises est au cœur des préoccupations des acteurs sylvicoles (propriétaires, gestionnaires et exploitants).

L'inquiétude est également partagée par les acteurs cynégétiques. Même si les visions que tous ces acteurs ont de la forêt ne convergent pas, ils s'accordent sur le fait qu'il est d'une nécessité absolue de continuer à préserver l'écosystème forestier dans toute sa diversité. Or à l'état actuel, le déséquilibre entre forêt et gibier ne fait que persister malgré l'apparition de nouveaux outils de gestion dans les années 2000, visant à apprécier l'abondance et la dynamique des populations. Il s'agit notamment des Indicateurs de Changement Ecologique (ICE) qui viennent améliorer les anciennes méthodes de comptage jugées trop imprécises avec des incertitudes non estimables. Ces indicateurs ont pour objectifs de contribuer à une gestion adaptative des populations pour atteindre les objectifs préalablement fixés. Cette gestion adaptative permettrait de calmer les tensions entre chasseurs, agriculteurs et sylviculteurs car les objectifs de gestion fixés minimiseraient les dégâts agricoles et forestiers (Morellet *et al*., 2008, ONCFS, 2017).

Pour les forestiers, les outils actuels de diagnostics sylvicoles pour l'identification et la caractérisation du niveau de sensibilité des essences forestières objectifs pour la régénération sont lourds et couteux. Ils nécessitent une importante mobilisation en ressource humaine et sont difficilement reproductibles. A ce titre nous pouvons citer l'exemple de « l'Observatoire du Donon qui a mobilisé plus d'une année de chargé de mission pour inventorier de manière la plus exhaustive possible les 2 300 peuplements potentiellement dégradables d'un massif forestier de 75 000 ha » (Flament et Hamard, 2011).

L'information sur la régénération des peuplements ainsi que sur les itinéraires sylvicoles fixés en forêts publics est détenue par l'Office National des Forêt (ONF) au travers d'une Base de Données Régénération (BDR) qui répertorie les peuplements par classe de hauteurs. Cette information est inexistante en forêt privée alors que celle-ci représente 74% de la forêt métropolitaine, et 87% de la forêt en région Centre-Val de Loire (IGN, résultat de l'inventaire 2009 à 2013, *cf*. **annexe 2,** un tableau de synthèse sur les surfaces forestière et taux de boisement en région Centre).

L'absence d'une telle information s'explique notamment par le grand nombre de propriétés qui ne sont pas soumises à la production d'un document de gestion (Plan Simple de Gestion [PSG], Règlement Type de Gestion [RTG] ou Codes des Bonnes Pratiques Sylvicoles [CBPS],). Celles qui sont soumises à une obligation de produire un document de gestion représentent 56% (CNPF, Centre-Val de Loire, 2014). Leurs documents de gestion détiennent souvent des informations sommaires, incomplètes ou difficilement exploitables pour suivre les régénérations.

En somme, l'augmentation des populations d'ongulés sauvages, les problèmes phytosanitaires, le changement climatique et la pression exercée par l'exploitation forestière sont autant d'enjeux qui méritent d'être pris en considération pour assurer une gestion durable de l'écosystème forestier. Cette dernière relève des critères définis lors de la conférence européenne d'Helsinki en 1993 qui préconisent « des interventions et une utilisation des forêts qui préservent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et

leur capacité à satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales… » (Agreste Centre, 2014).

Notre étude relève de la tâche 2 du projet ReForest et consiste à identifier et à proposer des indicateurs forestiers à partir de l'imagerie satellitaire qui, couplés à d'autres sources d'informations comme les Indicateurs de Changement Ecologique (ICE), alimenteront les discussions entre chasseurs et sylviculteurs. La finalité de ces échanges étant de proposer des outils pertinents d'aide à la décision pour le maintien de l'équilibre entre forêt et gibier.

Pour cela, nous partons de la méthode de détection des coupes rases développée par IRSTEA (UMR TETIS) en vue de l'adapter à l'identification et au suivi d'un panel d'interventions sylvicoles plus large que celui des strictes coupes rases. La validation sur le terrain est réalisée avec DE BECKER Tess, une stagiaire d'IRSTEA spécialisée en ingénierie forestière.

Le projet ReForest concerne la région Centre-Val de Loire, regroupant six départements. Pour des raisons d'accessibilité aux données sylvicoles indispensables au contrôle et à la validation sur le terrain de nos détections satellitaires d'une part et la disponibilité des images satellitaires d'autre part, nous avons défini des zones d'intérêts. Ces zones d'intérêts se localisent dans les départements de l'Eure-et-Loir (28), du Loir-et-Cher (41) et du Loiret (45) et comprennent aussi bien des forêts publiques que privées.

La **figure 1** localise ces zones d'intérêts réparties dans les trois départements.

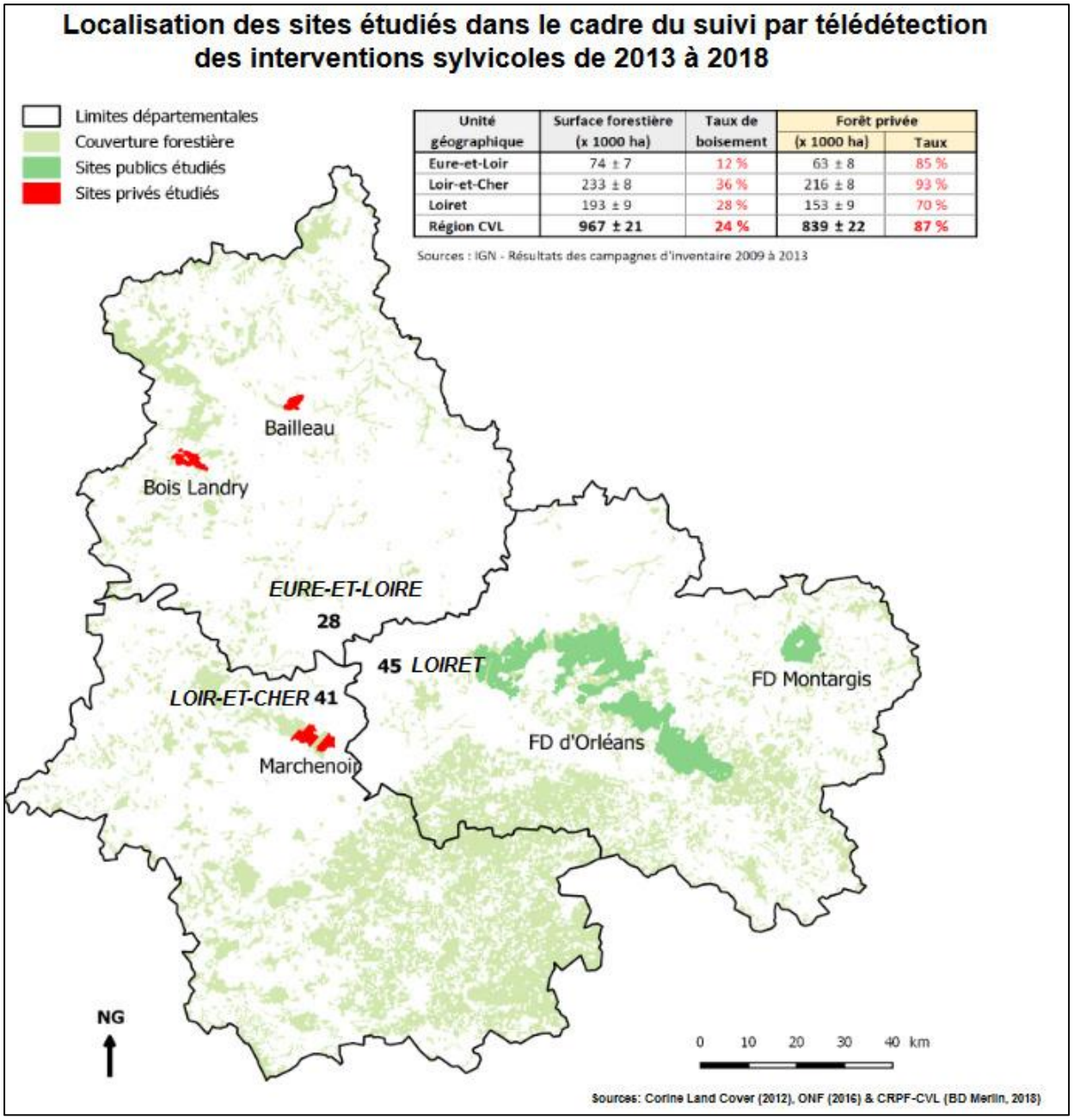

Figure 1 : Localisation des zones étudiées en forêt public et privée

3. Etat de l'art sur le potentiel de la télédétection dans le suivi de la forêt

3.1. Ecosystèmes forestiers et pression animale

Depuis quelques décennies, l'augmentation des populations de cervidés suscite une inquiétude grandissante chez les sylviculteurs. Ces inquiétudes relèvent du fait que le Cerf et le Chevreuil exercent une pression de consommation (nommée abroutissement) sur les peuplements dont la hauteur leur est accessible. Il s'agit donc principalement de jeunes peuplements. Par la consommation des rameaux des essences « objectif », l'abroutissement provoque des retards de croissance, une altération de l'architecture des jeunes arbres, voire dans les situations extrêmes leur mort. Il existe d'autres types de dommages tels que le frottis ou l'écorçage. Contrairement aux abroutissements, ces autres altérations ne sont pas nécessairement corrélées au niveau de densités des populations de cervidés et ne se restreignent pas aux jeunes peuplements (Hamard et Ballon, 2011).

Des études ont montré que même si la présence de végétation concurrente peut constituer un facteur d'échec pour la régénération par le biais de compétition à l'égard des semis, la forte augmentation des populations de Cerf et de Chevreuil des dernières décennies suscite une plus grande inquiétude chez les sylviculteurs (Belantier et *al.*, 2006, Laurent, 2017). Une étude sur la gestion adaptative à partir d'Indicateurs de Changement Écologique (ICE) a révélé à son tour que les prélèvements cynégétiques doivent se faire de manière rationnelle et équilibrée en fonction des conséquences des dégâts des animaux. Le prélèvement doit être spatialisé en fonction de la quantité d'animaux, mais aussi en fonction de la vulnérabilité des peuplements. Le processus à adopter doit être une démarche incluant tous les acteurs de la forêt (ONCFS., 2017).

Lisa Laurent a montré dans sa thèse intitulée « **Apports d'une approche écosystémique à l'étude de la dynamique des communautés végétales forestières : vers une prise en compte des interactions écologiques multiples** » (2016) que plusieurs facteurs ont favorisé l'augmentation drastique des populations de Cerf dont entre autres la baisse de la mortalité, les plans de chasses, l'extension/amélioration des habitats etc. Selon elle, une telle augmentation de la population animale mise en interaction avec la baisse des taux de prédations menace plus que jamais la régénération de peuplements ligneux d'intérêt sylvicole tels que le chêne sessile (Laurent, 2016).

L'augmentation non contrôlée des cervidés en forêt menace le renouvellement des peuplements en affectant de manière drastique la qualité des bois produits, en d'autres termes toute une économie dépendante de cette ressource.

Les avis des acteurs divergent en termes de caractérisation et d'appréciation des dégâts causés par les cervidés. La pression des grands herbivores s'exerce à plusieurs niveaux durant la croissance des arbres. Cependant, cette pression est qualifiée de dégâts dès lors qu'elle met en péril la croissance des essences forestières à travers l'abroutissement. L'itinéraire sylvicole fixé par le gestionnaire n'est donc pas atteint (Mårell *et al.*, 2012, Mårell et *al.*, 2013).

L'identification tant quantitative que spatiale des peuplements potentiellement sensibles à l'abroutissement s'avère un élément déterminant pour estimer les risques sylvicoles encourus et déterminer les décisions ad hoc pour y remédier.

3.2. Suivi de l'impact des cervidés par imagerie satellitaire

La détection par imagerie satellitaire des peuplements en régénération qui seraient sensibles aux dégâts des cervidés à travers l'abroutissement n'a pas d'antécédent. Aujourd'hui, Il n'y a pas encore de méthode clairement définie pour aborder par télédétection la sensibilité de jeunes peuplements face à la pression des cervidés. Cependant, (Ballon et Hamard, 2010) ont pu identifier par photo-interprétation l'impact très important des cervidés au travers de leurs abroutissements sur le renouvellement du taillis ou du taillis sous futaie dans le massif du Cosson. Hormis cette étude, nous n'avons pas trouvé de références dans la littérature qui abordent spécifiquement la thématique. Néanmoins, de nombreuses études et références existent sur le suivi de la forêt par imagerie satellitaire. Nous en abordons quelques-unes qui se rapprochent davantage de notre thématique.

3.3. Les applications de la télédétection en foresterie

Nous nous intéressons aux espaces forestiers et au suivi de la végétation à partir d'imagerie satellitaire en vue d'une meilleure appréhension de l'information géographique. Le développement d'algorithmes de traitements performants et l'accès de plus en plus facile aux données satellitaires peuvent rendre l'information géographique plus pertinente pour des thématiques comme la forêt. Le lancement de Sentinel-2A en mai 2015 a été décisif pour le suivi temporel des forêts à des pas de temps court. (Storey et *al.*, 2016). L'utilisation de séries temporelles à haute répétitivité et haute résolution spatiale offre ainsi une énorme potentialité de suivi des écosystèmes forestiers (Drusch *et al.*, 2012).

Ainsi, pour une meilleure compréhension de l'évolution des forêts, il est impératif que la détection du changement liée aux pratiques sylvicoles soit la plus fiable possible en termes de précision spatiale.
Les méthodes de détections des changements à partir de l'imagerie satellite varient selon les problématiques. C'est pourquoi (Mausel *et al.*, 2010) ont passé en revue l'essentiel de ces méthodes dans le cadre d'une étude des techniques de détection du changement en télédétection. Selon eux, les approches les plus récurrentes dans la littérature vont de la simple différentiation (opérations mathématiques) sur des images acquises à différentes dates plus ou moins espacées dans le temps, aux méthodes avancées de classifications et post-classifications sans oublier les analyses en composante principale communément appelées ACP ou PCA en anglais.
S'il est possible de constater assez facilement des changements d'occupations du sol qui affectent la couverture végétale dans son ensemble à partir de la télédétection, des études ont néanmoins montré que le suivi de certains de ces

changements surtout à l'échelle locale et en zones plus ou moins hétérogènes par des images satellitaires à basse résolution est très difficile voire impossible (Moody *et al*., 1995). Cependant, des études antérieures utilisant des séries chronologiques pour le calcul d'indices de végétation ont eu recours aux données de capteurs basses résolution pour des régions homogènes.
L'arrivée d'images satellites à haute et très haute résolution spatiale dans les années 2000 a constitué une révolution dans l'acquisition civile de données satellitaires qui jadis, étaient rares et très couteuses.
Aujourd'hui, selon le domaine et les applications, bon nombre d'indices ont été créés et sont utilisés pour mieux extraire l'information la plus pertinente selon une thématique donnée. Pour les applications relatives à la végétation en générale, et à la forêt en particulier, nous avons rencontré dans la littérature des indices de végétation comme l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de végétation amélioré (EVI), l'indice de végétation ajusté des effets du sol (SAVI), *etc*. (Moody *et al*., 1995, Storey et *al.*, 2016, Huete et *al.*, 1997, Baret et *al.*, 2007).
Ces indices renseignent globalement sur le développement et l'état de santé de la végétation, ils sont construits à l'aide d'expressions mathématiques et dans certains cas, ils font appel à des fonctions logarithmiques et utilisent souvent des constantes pour les corrections. Les indices de végétation peuvent être catégorisés en quatre groupes ou familles selon leurs paramètres de construction. On trouve :

- Des indices intrinsèques calculés avec des valeurs de réflectances sans facteurs externes (NDVI, NDII, RVI, *etc.*) ;
- Des indices calculés qui intègrent une constante d'ajustement des effets du sol (SAVI, LAI-SAVI, *etc*.) ;
- Un indice dont le calcul prend en compte les effets atmosphériques (ARVI, Kaufman et Tanré, 1992).
- Des indices calculés en prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère (EVI, Huete et *al*., 1999).

Pour l'études de forêts caractérisées par une canopée assez dense, l'utilisation d'indices calculés qu'avec les bandes spectrales sans ajustement des effets du sol peut s'avérer pertinente dans la mesure où la réponse du sol est le plus souvent interceptée par le feuillage (Huete et *al.*, 1991, Huete et *al.*, 1997).

La détection des coupes rases constitue une des avancées de l'utilisation de l'imagerie satellitaire qui a pour objectif de faire gagner énormément de temps aux agents de l'état qui mènent des missions de contrôles sur les défrichements et les exploitations forestières. L'équipe Geosud a développé la méthode à la demande du Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (MAAF) au vu des problématiques soulevées par les coupes illégales ou abusives. C'est une méthode de détection du changement radical d'état de la couverture végétale (passage d'un état de forte activité chlorophyllienne à un état de sol nu), le contraste est fort ; d'où le choix du NDVI comme indice de végétation. Un couple d'images acquises à des dates n et n+1 est utilisée pour calculer la différence de

NDVI sur laquelle ils appliquent une opération de seuillage basée sur les valeurs de la moyenne et de l'écart type. Cette opération permet de détecter le changement en question (Ose et Deshayes, 2015).
Cependant, une mesure de NDVI en zone de canopée dense ne renseigne pas très bien sur certaines fluctuations de la couverture végétale car cet indice est connu pour saturer vite. Dans ces cas, des études ont montré que l'indice de végétation amélioré (EVI) corrigé des effets atmosphériques adopté par la NASA pour les produits Modis est plus sensible à la structure de la canopée, aux perturbations liées aux effets atmosphériques et au sous-étage. Il utilise la réflectance de la bande bleue pour corriger le signal de fond, et peut par conséquent donner des résultats pour la détection fine de changements des états de surface ou pour démêler les « réponses spectrales complexes des couvertures végétales » denses (Baret et *al.*, 2007, Oppelt et Mauser, 2004). Une étude menée sur la détection des zones de déforestation en forêt de Roumanie a révélé que l'algorithme « BFAST » (Verbesselt et *al.,* 2010) appliqué à une série temporelle d'indices spectraux permettait de détecter le changement ou la perte d'activité photosynthétique (Buhalau, 2016).
Par ailleurs, l'Indice d'Infrarouge par différence (NDII) calculé avec les bandes proche et moyen infrarouge nous donne une idée de la teneur en eau présente dans les feuilles. En 2004 déjà, une étude faite par Fabien Dauriac dans le cadre d'une thèse intitulée « **Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt** » a montré la possibilité d'utiliser la réponse spectrale du moyen infrarouge comme indicateur de l'état hydrique des végétaux à travers l'imagerie satellitaire (Dauriac, 2004). Le NDII nous renseigne également sur les périodes de sénescences de la végétation qui se manifeste le plus souvent par un état de stress hydrique. La pression d'aspiration des feuilles étant connectée à la zone racinaire des plantes, le NDII pourrait par conséquent refléter le taux d'humidité de cette zone racinaire (Sriwongsitanon *et al.*, 2016).
Selon le peuplement (jeune ou mature, résineux ou feuillu), les canopées peuvent avoir des structures différentes avec des réponses spectrales spécifiques.
Les détections possibles avec l'imagerie vont bien au-delà du stress hydrique maintenant. De toute évidence, des études ont montré le potentiel du canal infra-rouge pour la détection des maladies ou autres attaques causées par des agents pathogènes avec des dommages variant de la perte du feuillage à la mort prématurée de certains arbres. Nous pouvons citer l'exemple des épidémies de « mort subite du chêne » dans l'ouest des Etats-Unis en forêt californienne depuis les années 1995, l'Afrique du sud et la propagation des scolytes en Europe centrale et Scandinavie (Gang et Ross, 2016).
L'indice de surface foliaire (LAI) est considéré aussi comme une variable importante dans l'étude et le suivi de la végétation en télédétection. Plusieurs approches sont utilisées pour estimer cet indice. Une des approches utilisées lors d'une étude prend en compte un modèle de transfert radiatif qui sera inversé ou non selon la transformation en réflectance souhaitée : Top Of Canopy or Top Of

Atmosphere (TOC [réflectance de surface] ou TOA [réflectance apparente]). Cette étude a été réalisée avec des images APEX prises au-dessus de la ville de Zurich en Suisse en vue de préparer l'arrivée des images Sentinel-2 (Laurent *et al.*, 2014).

Un autre indice de végétation que l'on retrouve souvent dans la littérature est l'Indice de Végétation Ajusté des effets de Sols (SAVI). Il est utilisé dans des cas où la réponse spectrale du sol est assez significative par rapport à celle de la végétation.

Il faut retenir que les indices vus ci-dessus ne constituent pas une liste exhaustive. De nombreux autres indices ont été créés pour répondre à des problématiques et des besoins spécifiques. Nous en utilisons quelques-uns dans le cadre de notre travail de recherche afin de voir lesquels sont pertinents par rapport à nos objectifs.

4. Planification des tâches du stage, chronogramme

Le stage s'est déroulé pour l'essentiel à Montpellier (UMR TETIS Maison de la télédétection) et à Nogent-sur-Vernisson (UR EFNO, Equipe FONA), site à partir duquel ont été conduites les missions de terrain nécessaires au contrôle et à la validation des détections satellitaires. Ci-dessous le chronogramme des tâches réalisées au cours de ce stage.

II. Mise en place de méthodes dédiées à la détection et au suivi des interventions sylvicoles par imagerie satellitaire

1. Exploitation des images Landsat-8 et Sentinel-2

Pour cette étude, nous avons décidé de travailler avec des images Landsat-8 afin de remonter jusqu'en 2013 et des images Sentinel-2 qui prennent la relève à partir de 2016. Aujourd'hui il existe plusieurs moyens de se procurer des images satellites selon les besoins et les niveaux de corrections souhaités.

1.1. Programmes de mutualisation des données à l'échelle européenne et nationale

L'observation de la Terre depuis l'espace se fait par des satellites qui sont configurés pour enregistrer des images et les transmettre vers une antenne de réception. D'autres instruments aéroportés comme les drones permettent de faire aussi des acquisitions. L'usage civil des données satellitaires a commencé avec la première mission de Landsat-1 en 1972 et depuis, des programmes se sont succédés. L'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ESA), à travers un programme européen de surveillance environnementale, ont décidé par initiative conjointe de lancer le programme Sentinel. Ainsi pour continuer à doter l'Europe d'une capacité autonome d'observation et de surveillance de la Terre, le Global Monitoring for Environment and Security (GMES) est devenu Copernicus en 2012. Les satellites Sentinel font partie de la constellation de satellites que le volet spatial du programme Copernicus développe et leurs données sont mises à la disposition de tous. Les Sentinel-1 embarquent à leurs bords un instrument de radar à synthèse d'ouverture qui fait des mesures en bande C aussi bien de jour que de nuit. Le Sentinel-1a a été lancé en 2014 et le Sentinel-1b en 2016. Les Sentinel-2 (a et b) qui produisent des images optiques sont la deuxième série du programme, ils ont été lancés respectivement en juin 2015 et mars 2017. Les Sentinel-3 (a et b) quant à eux fournissent des données en optique, radar et sont dédiés à l'étude de l'océan. Ils ont été lancés respectivement en février 2016 et avril 2018.

Toutes les données acquises par les satellites ou mesurées sur le terrain doivent faire l'objet d'une centralisation en vue de réaliser des traitements thématiques pour fournir des informations sur l'état de l'environnement et des ressources de manière globale.

A l'échelle nationale, une structure inter-organisme appelée « Théia » a été mise sur pied pour centraliser les données afin de faciliter le téléchargement ainsi que l'usage des images satellites avec un certain niveau de correction. C'est un pôle de données qui met non seulement des images à disposition pour tous les utilisateurs, mais qui propose aussi des formations, des algorithmes de traitement sur des thématiques qui ont trait à l'environnement, la gestion des ressources sans oublier les programmes généraux de l'aménagement du territoire. En

partenariat avec une dizaine d'organismes publics, instituts nationaux, *etc.*, qui aujourd'hui mettent tout en œuvre pour assurer le maximum de partage des connaissances et des savoir-faire, le pôle de données est devenu une richesse nationale à la disposition de tous.

1.2. Justification du choix des capteurs

Nous avons décidé de travailler avec des images Landsat-8 et Sentinel-2. Ce choix n'est pas fortuit, les caractéristiques ci-dessous des différents capteurs ont motivé notre choix.

Landsat-8 fait partie d'une génération de satellites lancés par la NASA. Il été mis en orbite en février 2013 avec à bord un instrument doté d'un capteur multispectral appelé Operational Land Imager (OLI) et un capteur thermique appelé Thermal Infrared Sensor (TIRS). En termes de données, il offre huit bandes multispectrales à 30 m de résolution, une bande panchromatique à 15 m de résolution et deux bandes thermiques à 100 m de résolution. Les bandes multispectrales y compris le panchromatique offrent des images riches et variées en termes d'informations. Donc une bonne résolution spectrale/spatiale qui est doublée d'une bonne répétitivité temporelle soit un passage au-dessus du même point au moins tous les 16 jours avec une fauchée de 185 km.

Quant à Sentinel-2A, il a été lancé en juin 2015 avec à bord un instrument multispectral MSI couvrant 13 bandes spectrales et une fauchée 290 km. Le lancement de Sentinel-2B en mars 2017 offre une bonne capacité de revisite pour les deux satellites (au moins 5 jours pour repasser au-dessus du même point). La meilleure résolution spatiale de Sentinel-2 est de 10 m et avec une bonne résolution spectrale, une fauchée de 290 km, il offre énormément de possibilités quant à l'extraction de d'informations géographiques relatives à la forêt, objet de notre étude.

Les caractéristiques quasi semblables des capteurs à bord de Landsat-8 et Sentinel-2 permettent d'avoir une archive conséquente d'images depuis 2013 et d'envisager le suivi temporel d'un site d'étude.

Le **tableau 1** liste les caractéristiques de chaque bande spectrale et indique la résolution spatiale afférente.

Tableau 1 : Résolutions spatiales et spectrales des bandes sur OLI et MSI

Bandes Spectrales et résolutions de OLI (Landsat-8)

Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution
Bande 1- Aérosols	433- 453 nm	60 m
Bande 2- Bleu	450-515 nm	30 m
Bande 3- Vert	525-600 nm	30 m
Bande 4- Rouge	630-680 nm	30 m
Bande 5- Infrarouge P	845-885 nm	30 m
Bande 6- Infrarouge M1	1560-1660 nm	30 m
Bande 7- Infrarouge M2	2100-2300 nm	30 m
Bande 8- Panchromatique	500-680 nm	15 m
Bande 9- Cirrus	1360-1390 nm	30 m

Bandes Spectrales et résolutions de MSI (Sentinel2)

Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution
Bande 1- Aérosols	433- 453 nm	60 m
Bande 2- Bleu	458-523 nm	10 m
Bande 3- Vert	543-578 nm	10 m
Bande 4- Rouge	650-680 nm	10 m
Bande 5- « Bord rouge »	698-713 nm	20 m
Bande 6- « Bord rouge »	733-748 nm	20 m
Bande 7- « Bord rouge »	773-793 nm	20 m
Bande 8- Infrarouge P	785-900 nm	10 m
Bande 8a- Infrarouge P étroit	855-875 nm	20 m
Bande 9- Vapeur d'eau	935-955 nm	60 m
Bande 10- Infrarouge Cirrus	1360-1390 nm	60 m
Bande 11- Infrarouge	1655-1665 nm	20 m
Bande 12- Infrarouge	2100-2280 nm	20 m

2. Structuration des données et outils

2.1. Téléchargement des images, automatisation du processus

Le pôle de données « Théia » centralise et applique des prétraitements comme les corrections atmosphérique et géométrique, en créant notamment des masques sur les nuages et ombres de nuages, pour l'ensemble de ses produits. Plusieurs niveaux de traitements sont disponibles. Les images sont stockées ensuite sous forme de tuiles téléchargeables par identifiant, type de capteurs, dates d'acquisitions et niveau de traitement. On peut se connecter sur le site (https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/search?collection=SENTINEL2), dessiner une zone d'intérêt puis procéder au téléchargement. Une autre méthode (automatisée) de téléchargement des images consiste à lancer une requête à partir d'une invite de commande qui fait appel à un code python développé par Olivier Hagolle, chercheur au CESBIO, spécialiste des séries temporelles, des corrections atmosphériques et de la détection des nuages.
Nous avons opté pour cette méthode automatisée. Ce choix se justifie par le volume de données à télécharger tant pour Landsat-8 que pour Sentinel-2.
Suite au paramétrage des fichiers de configuration avec nos identifiants « Théia », le code python a été placé à la racine de notre répertoire de travail pour y accéder facilement à partir d'une invite de commande (cmd sous terminal Windows). Lors de la requête en invite de commande, nous avons le choix de spécifier une zone à travers ses coordonnées géographiques ou de nommer les tuiles recherchées. Pour ce qui est des périodes, nous avons décidé de prendre des images acquises en période estivale (saison de forte activité photosynthétique en France). Cette période va de mai/juin à octobre/novembre pour certaines zones. Ci-dessous le **script 1** détail de la ligne de commande à exécuter pour le téléchargement des images Landsat-8 et Sentinel-2 avec les deux options (coordonnées et tuiles).

```
#Téléchargement des images à partir des coordonnées de notre zone d'étude sur Théia: Code Olivier Hagolle adapté

#Images Landsat8
python theia_download.py --lonmin 0.50522 --lonmax 3.18915 --latmin 47.149 --latmax 48.9666 -c Landsat
-a config_landsat.cfg -d 2017-05-15 -f 2017-10-31 -w "F:\Landsat8_Data\2016"

python theia_download.py -t MetropoleD0005H0008 -c Landsat -a config_landsat.cfg -d 2014-07-01 -f 2014-07-31 -w "F:\Landsat_Data\2016"

#Images Sentinel2
python theia_download.py --lonmin 0.50522 --lonmax 3.18915 --latmin 47.149 --latmax 48.9666 -c SENTINEL2
-a config_theia.cfg -d 2018-05-22 -f 2018-05-25 -w "F:\Sentinel2_Mai_2018"

python theia_download.py -t T31UDP -c SENTINEL2 -a config_theia.cfg -d 2018-05-10 -f 2018-05-25 -m 50 -w "F:\Sentinel2_theia_Data\T31UDP_2017"
```

Script 1 : Commande pour le téléchargement automatique des images

2.2. Organisation des données, choix des indices

A l'issue des différentes requêtes lancées pour le téléchargement, nous nous sommes retrouvés avec un volume de données de l'ordre du térabit et ce, rien que pour les archives compressées. Les fichiers téléchargés sont répartis dans deux principaux répertoires avec des sous-répertoires portant le nom du satellite et l'année d'acquisition.

L'extraction des archives a été automatisée à l'aide d'une ligne de commande exécutable sur terminal. Cela nécessite au préalable de se positionner dans le bon répertoire de travail en mode Shell ou cmd. L'exécution de la ligne de commande permet de dé-zipper toutes les archives du répertoire d'entrée ; nous procédons ensuite à la suppression des fichiers d'archives pour une meilleure gestion de nos supports de stockage. Pour aller plus dans cette logique de gestion des capacités de stockage, nous avons supprimé certains fichiers inutiles pour nos besoins (tous les fichiers CORR_ENV pour Landsat-8 et tous les fichiers SRE pour Sentinel-2) car ils n'ont pas subi de correction supplémentaire pour ce qui est des effets de pentes. Pour nettoyer les répertoires, nous avons utilisé des outils de manipulation fichiers en invite de commande. Le détail des opérations d'extraction d'archives et de nettoyage des répertoires et sous-répertoire des images Landsat-8 et Sentinel-2 est présenté ci-dessous.

```
#Extraction d'archives

for /f %i in ('dir /b /s *.zip') do "c:\program files\7-zip\7z.exe" x -y "-o%~dpi" "%i"

-Néttoyage repertoire sur terminal en supprimant les fichiers dont on a pas besoin
 pour la suite de nos opérations

D:\Sentinel> del /f /s *SENTINEL2*SRE* # pour les répertoire sentinel2
D:\Landsat> del /f /s *Landsat8*CORR_ENV*  # Pour les répertoire Landsat8
```

Script 2 : Commande pour extraire les archives et nettoyer les répertoires

Concernant le choix des indices spectraux, nous en avons ciblé cinq lors de la revue bibliographique (EVI, NDVI, NDII, SAVI et LAI-SAVI). Nous avons procédé au calcul de ces indices pour chacune de nos acquisitions afin d'explorer leurs potentiels dans la détection et le suivi des interventions sylvicoles. Après quelques visualisations des indices, nous avons fait le choix d'en retenir trois (NDVI, NDII et EVI) pour la suite des opérations. Ce choix se justifie par le fait que l'indice de Végétation Ajusté des effets de sol (SAVI) et l'Indice Foliaire modifié (LAI-SAVI) présentaient des valeurs aberrantes liées aux facteurs d'ajustement. Par ailleurs ce sont des indices qui sont mieux adaptés aux zones caractérisées par une couverture végétale peu dense et un effet de sol important. La procédure d'extraction est décrite dans la partie (**2.3.**).

2.3. Automatisation de l'extraction des indices avec Orfeo ToolBox

Le volume de données sur lequel nous travaillons, la temporalité des images (2013 à 2018) et le nombre d'indices à extraire font qu'il serait trop long en temps et assez fastidieux de vouloir travailler date par date. Il faut alors trouver une solution pour automatiser le calcul et sauvegarder les indices dans les différents sous-répertoires. Pour cela, nous utilisons l'outil Orfeo Toolbox (OTB) développé par le CNES.

OTB est un projet libre et multi-plateforme piloté par le CNES en partenariat avec la communauté OSGeo (open-source geospatial). C'est une bibliothèque de traitement d'images satellitaires, multispectrales ou radar, donc une véritable boite à outils dédiée à la télédétection. De nombreuses applications y sont disponibles : de l'ortho-rectification au pansharpening en passant par les classifications. Les outils comme BandMath permettent de faire des calculs mathématiques pour l'extraction d'indices, l'application de seuils (tous ce qu'une calculatrice raster peut faire). Mieux encore, le BandMathX permet de réaliser des opérations matricielles en intégrant la dimension vectorielle. OTB a été développé en C++ et fait appel à des librairies comme ITK, GDAL, OSSIM, OpenCV, *etc*., toutes en open source. On peut accéder aux algorithmes de plusieurs manières (Monteverdi, QGIS, Python, en ligne de commande ou en C++). Il est conçu pour traiter de gros volumes de données de manière transparente grâce au traitement par morceaux (avec une possibilité de gestion de la mémoire vive selon les besoins).

Comme nous travaillons sous Windows, nous avons développé nos codes dans un script batch « .bat » exécutable à partir d'une invite de commande (cmd ou terminal). Une boucle « for » permet d'exécuter le script sur tous les sous-répertoires du répertoire de travail. Les éléments du batch qui concernent l'extraction des indices sont présentés ci-dessous, et le détail des codes est à retrouver en **annexe 4.**

Pour chaque itération, le programme sélectionne un sous-répertoire d'image :

- Crée un dossier temporaire pour les calculs et un dossier pour les résultats ;
- Découpe toutes les images à partir d'un fichier shapefile (.shp) qu'on lui a spécifié ;
- Calcule tous les indices spectraux en appliquant le masque nuage pour les enregistrer dans le dossier des résultats créé précédemment ;
- Enfin, supprime le dossier temporaire et passe au sous-répertoire suivant.

3. La méthode Bi-dates

3.1. Adaptation de la méthode coupe rase à la détection des interventions sylvicoles (analyses bi-dates versus « coupes rases »)

Une coupe rase résulte du passage d'un état boisé d'une forêt à un état de quasi sol nu. La **figure 2** ci-dessous est un exemple de coupe rase dans la forêt des Landes.

Figure 2 : Coupe rase réalisée en forêt des Landes (Larrousiney, 09/01/08, Wikimedia Commons)

La méthode de détection satellitaire des coupes rases est née d'un besoin spécifique, celui d'alléger le travail des agents de l'Etat chargés de contrôler les coupes rases réalisées au sein de l'emprise de leur territoire de compétence. Le principe de la méthode repose sur la détection de changements apparus dans une zone forestière à partir de deux images acquises à une (ou plusieurs années) d'intervalle. Un seuil basé sur la moyenne et l'écart-type (parce que la distribution des pixels est supposée suivre une loi normale) est appliqué sur la différence du NDVI pour détecter le changement.
La **figure 3** illustre cette distribution des valeurs selon une loi normale et montre dans notre cas les deux côtés du « panneau » (perte et regain de végétation).

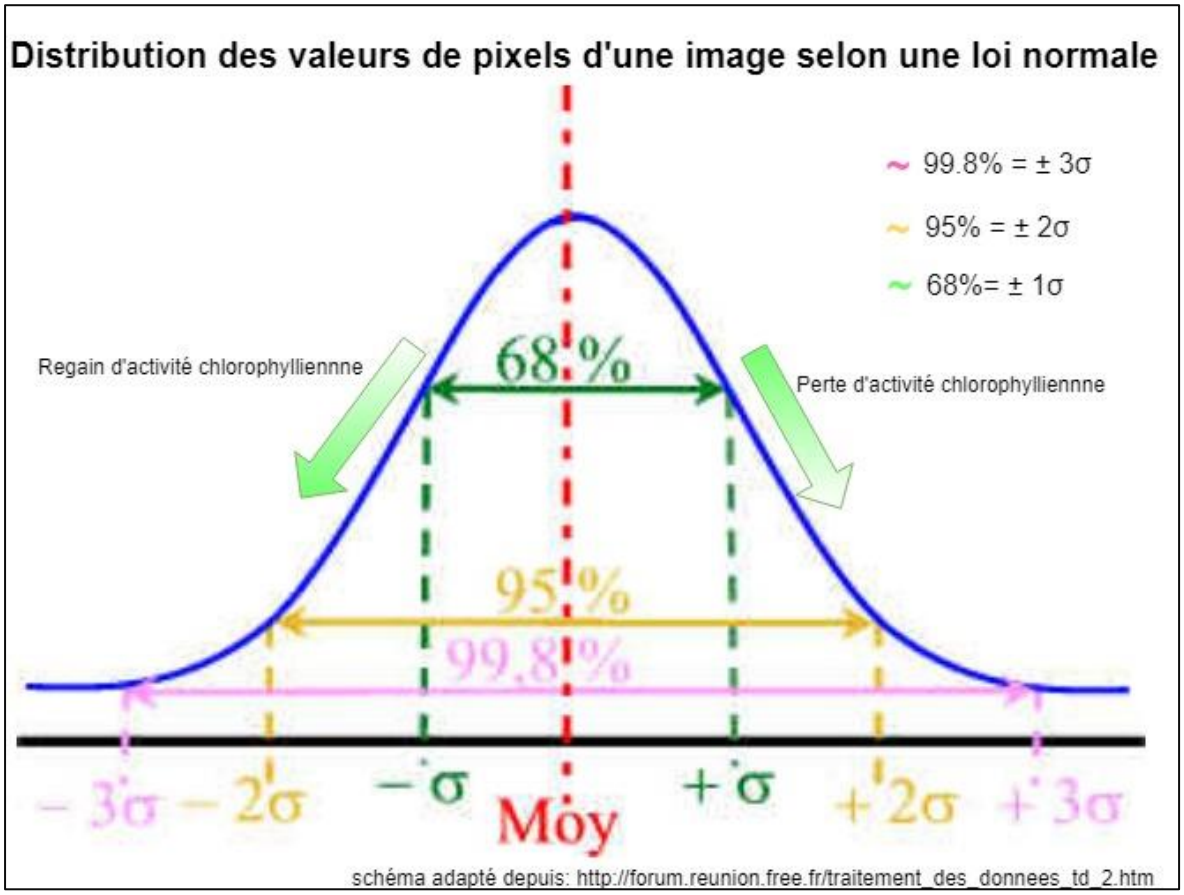

Figure 3 : Distribution normale des valeurs de pixels d'une image associée à la perte et au regain de végétation.

La méthode coupe rase utilise un filtre de lissage et ne retient que les surface supérieures ou égales à 0,5 hectare. L'analyse du changement laisse apparaitre trois niveaux de certitudes :

- Les détections faites autour de la moyenne moins l'écart-type sont dites de certitude faible (degré 1).
- Celle faites au niveau de la moyenne moins deux écart-types sont dites de certitude moyenne (degré 2).
- Et enfin celle faites autour de la moyenne moins trois écart-types sont dites de certitude forte (degré 3).

Le choix des degrés de certitudes se justifie par le fait que l'essentiel des valeurs se situe entre la moyenne et ± 3 écart-types (*cf.* **figure 3**)

Les retours en termes de fiabilité des détections sont assez satisfaisants avec 90 % de bonnes détections, alors que les inventaires réalisés par les agents de l'état ne ressentent pas plus de 70% des interventions (Ose et Deshayes, 2015). Les interventions sylvicoles ne se limitent pas aux seules coupes rases et certaines d'entre elles concernent des surfaces plus faibles ; c'est notamment le cas en sylviculture irrégulière pour laquelle les interventions se concentrent sur des surfaces de quelques ares.

En effet, dès la diffusion de la méthode coupe rase en 2015, la DRAAF de la région Centre-Val de Loire a commencé à utiliser la méthode pour réaliser des opérations de détection de coupes rases couvrant la période 2013 à 2018 sur l'ensemble des forêts de la région Centre Val-de-Loire (tableau de synthèse des détections à retrouver en **annexe 3** pour la forêt privée). Les analyses réalisées à partir de la méthode coupe rase au cours de cette période, et celles de l'UMR TETIS (pour la période 2016 à 2017) réalisée à l'échelle nationale, ont été reprises pour intégrer les ajustements que nous avons apportés à la méthode.
Nous avons réalisé un premier test de détection d'interventions sylvicoles pour la période 2017/2018 en utilisant la méthode telle qu'elle a été initialement développée par IRSTEA tout comme la DRAAF-CVL l'a faite pour réaliser ces détections de (2013 à 2018).
Le contrôle de ces détections sur le terrain et des constats relatifs à la phénologie ou à la santé de la végétation nous ont conduits à adapter la méthode en réajustant certains de ses paramètres.
Nous avons, en conséquence :

- abaissé le seuil de lissage à 0,25 hectares (opération de filtre) ;
- utilisé deux autres indices (EVI et NDII) en plus du NDVI ;
- priorisé, autant que faire se peut, les images prises au plus proche du 1er juillet de chaque année.

L'introduction de cette date de référence, réside dans le souci de réduire les effets induits par différents aléas printaniers :

- le débourrement tardif des essences ou de la végétation d'accompagnement (fougère aigle, molinie, charme, …) ;
- l'action de chenilles défoliatrices particulièrement actives au tout début du débourrement de certaines essences (Chêne notamment) ;
- les conséquences d'un gel tardif sur la destruction des premières feuilles ;

Mais également pour atténuer les risques estivaux liés aux épisodes de sécheresses ou de canicules :

- Nécroses ou brûlures du feuillage induisant une réduction de la masse foliaire active.

Enfin, pour éviter les chevauchements d'analyses bi-dates entre deux périodes consécutives, la deuxième image de la période « n » a été retenue comme première image de la période « n+1 ». En l'absence d'images disponibles, cette règle n'a pas toujours pu être respectée au moment de la migration de Landat-8 à Sentinel-2.
Pour chaque zone d'intérêt, les dates des images pour les périodes sont détaillées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 2 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles à Bailleau (28)

P1 (2013-2014) : Landsat-8	Du 10/07/2013 au 19/05/2014
P2 (2014-2015) : Landsat-8	Du 19/05/2014 au 30/06/2015
P3 (2015-2016) : Landsat-8	Du 30/06/2015 au 18/07/2016
P4 (2016-2017) : Sentinel-2	Du 04/05/2016 au 18/06/2017
P5 (2017-2018) : Sentinel-2	Du 18/06/2017 au 25/06/2018

Tableau 3 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles à Bois-Landry (28)

P1 (2013-2014) : Landsat-8	Du 10/07/2013 au 19/05/2014
P2 (2014-2015) : Landsat-8	Du 19/05/2014 au 30/06/2015
P3 (2015-2016) : Landsat-8	Du 30/06/2015 au 18/07/2016
P4 (2016-2017) : Landsat-8	Du 18/07/2016 au 19/06/2017
P5 (2017-2018) : Sentinel-2	Du 18/06/2017 au 25/06/2018

Tableau 4 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles à Marchenoir (41)

P1 (2013-2014) : Landsat-8	Du 10/07/2013 au 19/05/2014
P2 (2014-2015) : Landsat-8	Du 19/05/2014 au 30/06/2015
P3 (2015-2016) : Landsat-8	Du 30/06/2015 au 18/07/2016
P4 (2016-2017) : Sentinel-2	Du 04/05/2016 au 18/06/2017 V1 Du 12/08/2016 au 18/06/2017 V2
P5 (2017-2018) : Sentinel-2	Du 18/06/2017 au 25/06/2018

Tableau 5 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles en Forêts domaniales d'Orléans et de Montargis (45)

P1 (2013-2014) : Landsat-8	Du 01/06/2013 au 19/05/2014
P2 (2014-2015) : Landsat-8	Du 19/05/2014 au 10/08/2015
P3 (2015-2016) : Landsat-8	Du 10/08/2015 au 09/06/2016
P4 (2016-2017) : Sentinel-2	Du 10/07/2016 au 26/05/2017
P5 (2017-2018) : Sentinel-2	Du 26/05/2017 au 11/05/2018

Les nouvelles détections faites en forêts privées ont fait l'objet d'un contrôle systématique lors de la deuxième mission de terrain.

La **figure 4** représente la chaine de traitement de la méthode bi-dates de détection des interventions sylvicoles

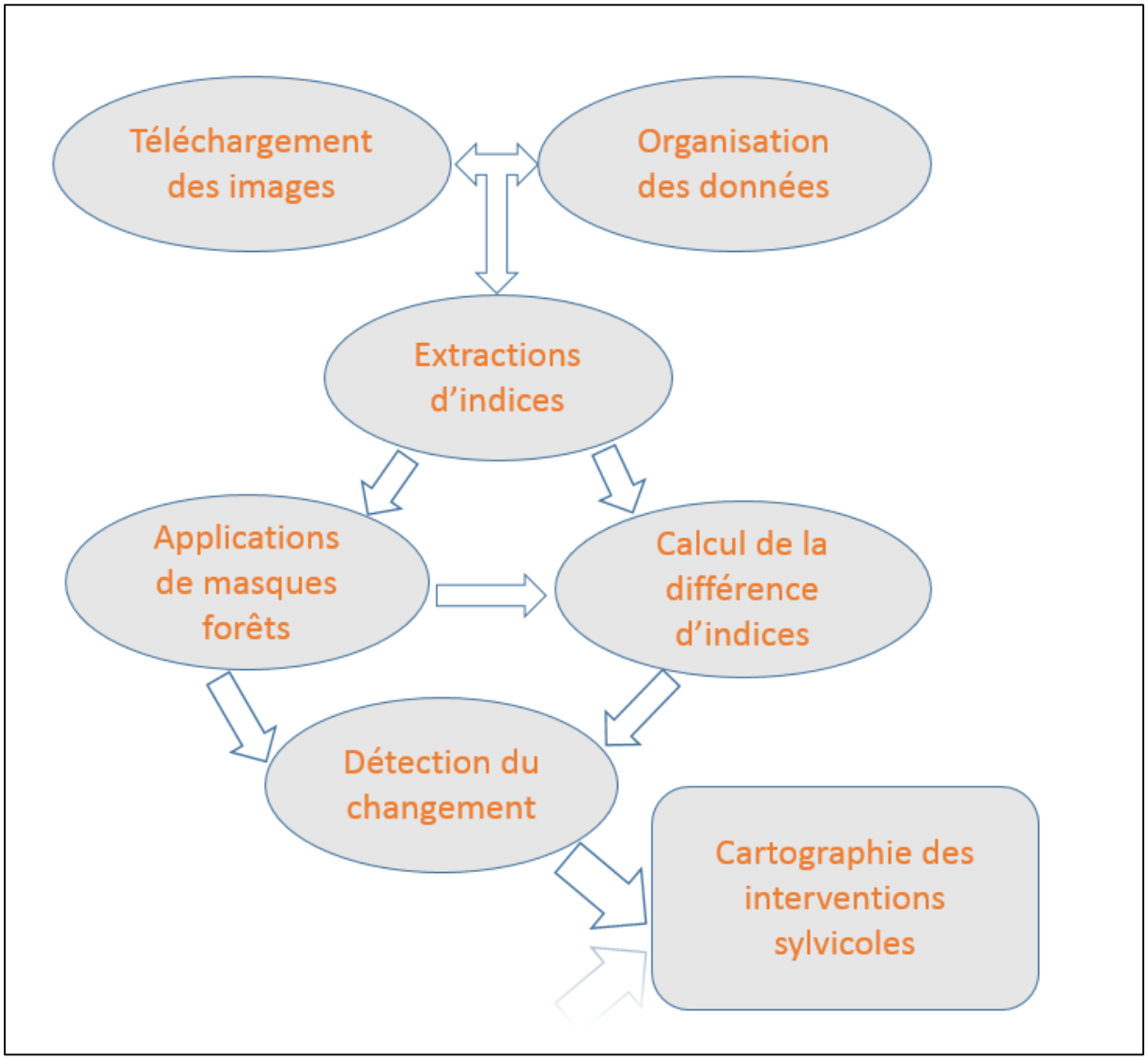

Figure 4 : Chaine de traitement de la détection des interventions sylvicoles par méthode bi-dates

4. L'approche Séries temporelles

En parallèle de l'adaptation de la méthode coupe rase, nous nous sommes intéressés à une approche temporelle du suivi des interventions sylvicoles par imagerie satellitaire. Elle part de l'hypothèse selon laquelle dans une parcelle ouverte en régénération, l'évolution des différentes interventions (de la coupe d'ensemencement à la coupe définitive) se traduit par une perte progressive de la végétation. Le profil temporel présenterait de petites fluctuations en termes de réponse spectrale de la végétation pour les interventions sylvicoles d'amplitudes faibles et atteindrait son niveau le plus bas après l'intervention de la coupe définitive (avec un niveau de détail qui dépendra de la résolution des images et de l'indice utilisé). Un regain progressif de la végétation serait observé jusqu'à la fermeture de la canopée constituée de peuplements qui seraient le produit des essences mises en régénération. On peut dire alors que la régénération s'est déroulée correctement. La **figure 5** schématise cette hypothèse théorique sur laquelle nous sommes partis.

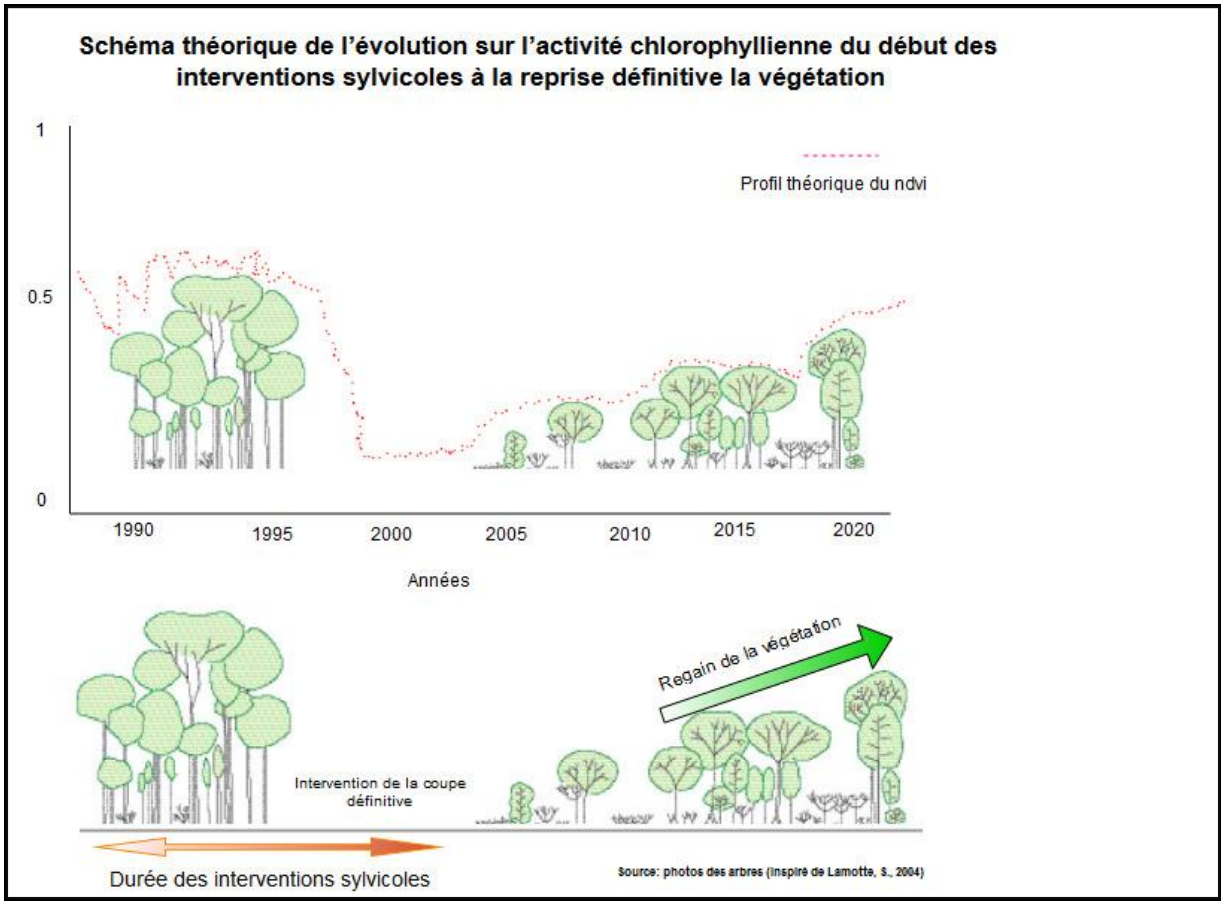

Figure 5 : Schéma théorique de l'évolution de l'activité chlorophyllienne durant le processus de régénération d'une parcelle.

4.1. Création de séries temporelles

Pour suivre l'évolution des interventions sylvicoles dans nos zones d'intérêts, nous avons commencé par la création de séries temporelles par indice. Pour mener à bien cette opération au vu du volume de données à traiter (Landsat-8 : 247 images sur 5 tuiles et Sentinel-2 : 144 images sur 9 tuiles), nous avons utilisé des commandes simples de manipulation de fichiers à partir d'une invite de commande. Ces commandes vont de la création de répertoire « mkdir » à la copie ou déplacement des fichiers (« cp » ou « move ») d'un répertoire à un autre à l'aide de boucles « for ». Les codes sont détaillés en **annexe 5**

4.2. Statistique zonale pour le suivi temporel des interventions sylvicoles

A notre avis, la meilleure manière de suivre les interventions sylvicoles dans le temps consiste à extraire des images les statistiques sur les seules zones présentant des changements. Nous disposons d'une série d'images et de polygones de zones d'intérêt à l'échelle du parcellaire et du sous parcellaire. Un outil appelé Statistique zonale dans les traitements raster de Qgis permet de réaliser cette opération. Mais encore une fois, nous nous heurtons au problème du volume de nos données, une statistique zonale réalisée image par image serait très long en temps de travail pour couvrir toutes nos zones d'intérêts. Nous avons donc décidé de fusionner les images de chaque série avec l'option de les séparer bande par bande afin de réaliser les opérations de statistiques zonales sur R (un langage open-source). Les détails des codes R pour l'extraction des statistiques (moyenne et écart-type) sont à retrouver en **annexe 6**.
Les opérations de statistiques zonales sont ainsi réalisées sur les polygones des zones d'intérêts (forêts publiques, forêts privées) à partir des séries temporelles d'indices de végétations que nous avons créées. Nos tableaux de données ont révélé, cependant, beaucoup de valeurs manquantes codées en « no-data ». Elles résultent du masque « nuage » appliqué aux images. Cela compromet donc un affichage continu des profils temporel.

Deux solutions se présentent alors pour résoudre ce problème de données manquantes :

- La première est de faire un « gap filling » c'est-à-dire une interpolation linéaire (ou autre) pour combler les données manques ;
- La seconde est de réorganiser les séries temporelles en faisant une série d'opération d'échantillonnage des polygones d'intérêts pour ne garder que ceux qui ont véritablement des données temporelles représentatives.

Nous avons opté pour la deuxième solution car interpoler reviendrait à biaiser d'une manière ou d'une autre une partie de l'information spectrale.
Nous avons donc commencé la réalisation et l'analyse visuelle des profils à partir des échantillons retenus pour les zones d'intérêts. Ces analyses ont révélé que les profils temporels réalisés avec les valeurs moyennes des pixels dans chaque

polygone ne révèlent que la saisonnalité de la végétation par rapport à notre problématique de suivi des interventions sylvicoles, en d'autres termes le suivi de variabilités dans l'activité chlorophyllienne. Plusieurs raisons sont à évoquer :

- Une intervention sylvicole peut être d'intensité faible en termes de surface ou en termes de volume de bois prélevé.
- La moyenne n'est forcément pas le meilleur indicateur de changement ou de variabilité.

Par ailleurs, l'analyse des profils réalisés avec les valeurs de l'écart-type révèle que le comportement spectral de certains polygones se démarque nettement par rapport à un ensemble qui peut être qualifié de polygones homogènes. Cependant, deux problèmes majeurs ont été rencontrés avec cette méthode d'affichage des profils temporels :

- Un problème pour l'identification des parcelles où la probabilité d'un changement est forte ;
- Nous n'avons pas pu associer une légende lisible à cause du nombre de parcelles (plus d'une centaine).

Pour mieux discriminer ou identifier ces polygones qui auraient subi une forte variabilité de leur activité chlorophyllienne, nous avons procédé à une analyse statistique de nos données NDVI (tableaux des statistiques zonales) en appliquant un algorithme de « clustering » via le logiciel R, c'est une classification de données en différents paquets homogènes (sous-ensemble ayant des caractéristiques communes). Ci-dessous les étapes de l'analyse statistique des données NDVI Landsat-8 par clustering.

- Script 3 : Lecture du tableau de données au format texte (.txt) sur R

```
#Lecture du tableau txt

tabData <- read.table("Y:/Tache2_Equilibre/06_Analyse/ONF_BDSOR/Synthese_detection_CR_BDSOR/Analyse_NDVI/Tableau_ndvi_L8_Sd_ONF_ORL.txt", header=TRUE)
```

- Script 4 : Transformation des données NDVI en matrice

```
#APPROCHE CLASSIFICATION

matDist <- sapply(tabData$Moyenne,function(moy) abs(moy-tabData$Moyenne))
rownames(matDist) <- tabData$IIDT_UG
colnames(matDist) <- tabData$IIDT_UG
```

- Script 5 : Classification (hclust) et affichage (plot hc) de l'arbre de proximité

```
matDist
hc <- hclust(dist(matDist))
plot(hc)
```

```
tabgrpS2<- data.frame(tabDataS2 grpS2<- cutree(hC1,k=8)
$Id_P, grpS2)
write.csv (tabgrpS2,
file="F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_onf_45/Tuilel8/Tabgrp_S2_Categ
ories_Class8_NDVI_ORL.csv"
```

Cet algorithme de clustering nous a permis de catégoriser nos polygones en huit groupes. Le résultat est sauvé dans un tableau où chaque polygone correspond à un groupe. Les polygones de groupe 1, 2 et 3 sont ceux où l'écart-type est fort avec une forte probabilité de la réalisation d'une intervention sylvicole. Ces polygones ont été croisés avec des tableaux de détection d'interventions sylvicoles pour construire une base d'échantillon utilisée lors de la première mission de terrain.

4.3. Méthode de classification par Random Forest des images

Toujours sur la même logique d'exploration de pistes en vue d'établir des méthodes robustes pour la détection et le suivi des interventions sylvicoles, nous avons décidé d'utiliser notre tableau des interventions sylvicoles sur Bois-Landry pour entrainer les images de la série temporelle et tester un algorithme de classification supervisée sur OTB (le Random Forest).
Les opérations de classifications numériques d'images en télédétection sont des procédures qui tentent de transformer l'information spectrale contenue dans une ou plusieurs bandes en une information thématique dans des classes bien distinctes.
La classification supervisée - ou dirigée - repose essentiellement sur le principe de réalité ou vérité terrain qui soit assez représentative des différents types de surfaces (classes d'information). La démarche de la classification peut être regroupée en trois étapes :

- L'entrainement (les polygones des interventions sylvicoles spatialisées ont été adaptés approximativement à la synthèse des détections faites par les trois indices, pour être utilisé comme base d'entrainement) ;
- La prédiction (c'est l'étape de la classification, elle a été réalisée sur toute les images de la série temporelle de Bois-Landry) ;
- Et la validation (une partie des données est toujours réservée pour la validation, une manière d'évaluer la qualité de la classification).

Les résultats des classifications peuvent être à usage cartographique, à des fins de visualisation. Nous présentons le résultat des tests de classifications dans la partie résultats.
La **figure 7** retrace la chaine de traitements avec les différentes étapes à suivre pour réaliser la classification.

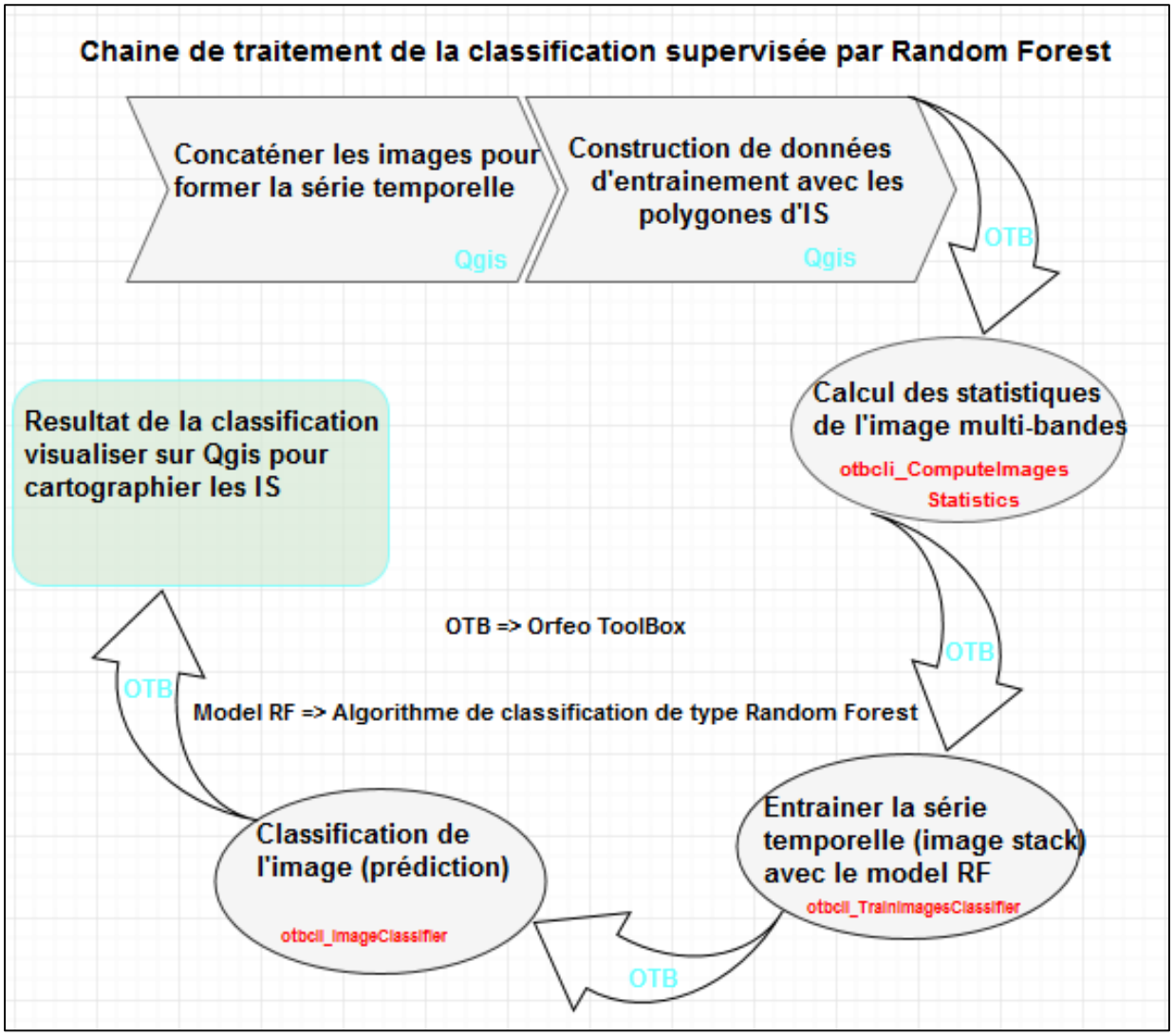

Figure 6 : Chaine de traitement de la classification supervisée réalisée sur les images Landsat-8 de Bois-Landry entre 2013 et 2016

III. Résultats, analyse et perspectives

1. De la difficulté pour valider les premiers résultats

1.1. Données des gestionnaires publics/privés : avantages et limites

La gestion des forêts domaniales est de la responsabilité première de l'ONF. L'ONF produit et centralise des données sur les forêts publiques (domaniales et communales principalement) à l'échelle nationale. Il faut cependant retenir que ces données peuvent ne pas être exhaustives pour une thématique donnée, même si elles répondent aux attendes de l'ONF. Dans ce cas, des réserves d'usage sont à observer.
Pour la forêt privée, la gestion est assurée par les propriétaires qui peuvent déléguer ce rôle à des coopératives ou engager un gestionnaire. Le Centre Régionale de Propriété Forestière (CRPF) n'intervient qu'au moment de l'agrément des documents de gestion durable spécifiques à la forêt privée et dans des actions de vulgarisation ou conseil en termes de sylviculture.
Ils organisent des formations pour informer, mais surtout superviser la sylviculture en forêts privées. Les documents ainsi que les formations sont publiés sur internet et accessibles pour tous avec également des spécificités sur les droits d'auteurs. En revanche l'archivage des données sur les interventions en forêt privées est du ressort du gestionnaire qui peut décider – ou non – de les partager ou de les communiquer.

1.2. Description des bases de données existantes

Pour la validation de nos détections, les données dont nous avons besoin doivent nous renseigner sur les dates exactes des interventions sylvicoles réalisées, leurs natures, leurs surfaces et leurs localisations aussi bien en forêts domaniales que privées.
Il se trouve que les données relatives aux interventions sylvicoles que nous a fournies l'ONF ne renseignent pas les dates précises de réalisation des interventions. Il s'agit de la base de données « Suivi des Ouverture en Régénération » (BDSOR).
La difficulté réside du fait qu'il s'écoule entre la date du martelage (action de marquage physique de la coupe pour identifier les arbres à abattre) et la date effective de réalisation de la coupe, un laps de temps qui peut varier entre une année et trois voire quatre années. Les documents fournis ne permettent pas de connaitre avec certitude la date exacte de réalisation d'une intervention sylvicole. Une intervention sylvicole peut par ailleurs être conduite sur deux saisons de végétation d'où la possibilité de détections qui s'étalent sur deux périodes.
Il en résulte ainsi une difficulté au niveau des sites d'intérêt publics que nous avons sélectionnés pour corréler nos détections satellitaires aux interventions sylvicoles effectives.

La base de données « régénération » (BDR) quant à elle porte sur les parcelles traitées en futaie régulière sur les forêts domaniales à l'échelle nationale. Elle renseigne sur les hauteurs de peuplements ; elle est mise à jour tous les deux ans. La région Centre-Val-de-Loire alimente cette base depuis de nombreuses années mais ce n'est pas le cas pour toutes les régions. C'est une base qui catégorise les peuplements en termes de hauteur et donc qui identifie certains peuplements potentiellement sensibles aux dégâts des cervidés. Dans notre étude, la BDR a été couplée à la BDSOR sans toutefois apporter de précision quant à la date exacte des interventions sylvicoles.

Pour la forêt privée, Il n'existe pas de base de données régénération spécifique qui aurait pu apporter une réponse à notre attente. Il faut donc procéder par enquêtes ou comme dans notre cas identifier des propriétés sur lesquelles, il y a possibilité de créer cette base avec l'aide du propriétaire ou du gestionnaire.

Pour résumer, l'ONF dispose de bases de données mais les informations qu'elles contiennent se sont révélées imprécises par rapport à nos exigences (variation de 1 à 4 ans sur la datation des interventions sylvicoles alors que nous aurions eu besoin d'une datation précise pour valider la pertinence des détections).

En forêt privée, l'investigation s'est focalisée sur trois propriétés qui étaient favorables à nous communiquer leur listing d'interventions sylvicoles et pour lesquelles il y avait une réelle gestion forestière. Cela étant, l'accès à des informations qui pour les plus anciennes remontent à 2013 n'est pas un exercice évident quand bien même les gestionnaires contactés soient des sylviculteurs avertis et passionnés.

2. Contrôles de Terrain

2.1. Description du protocole de contrôle (choix des parcelles, contrôle des commissions/omissions, comprendre pourquoi)

Ci-dessous le schéma global du protocole de terrain que nous avons suivi

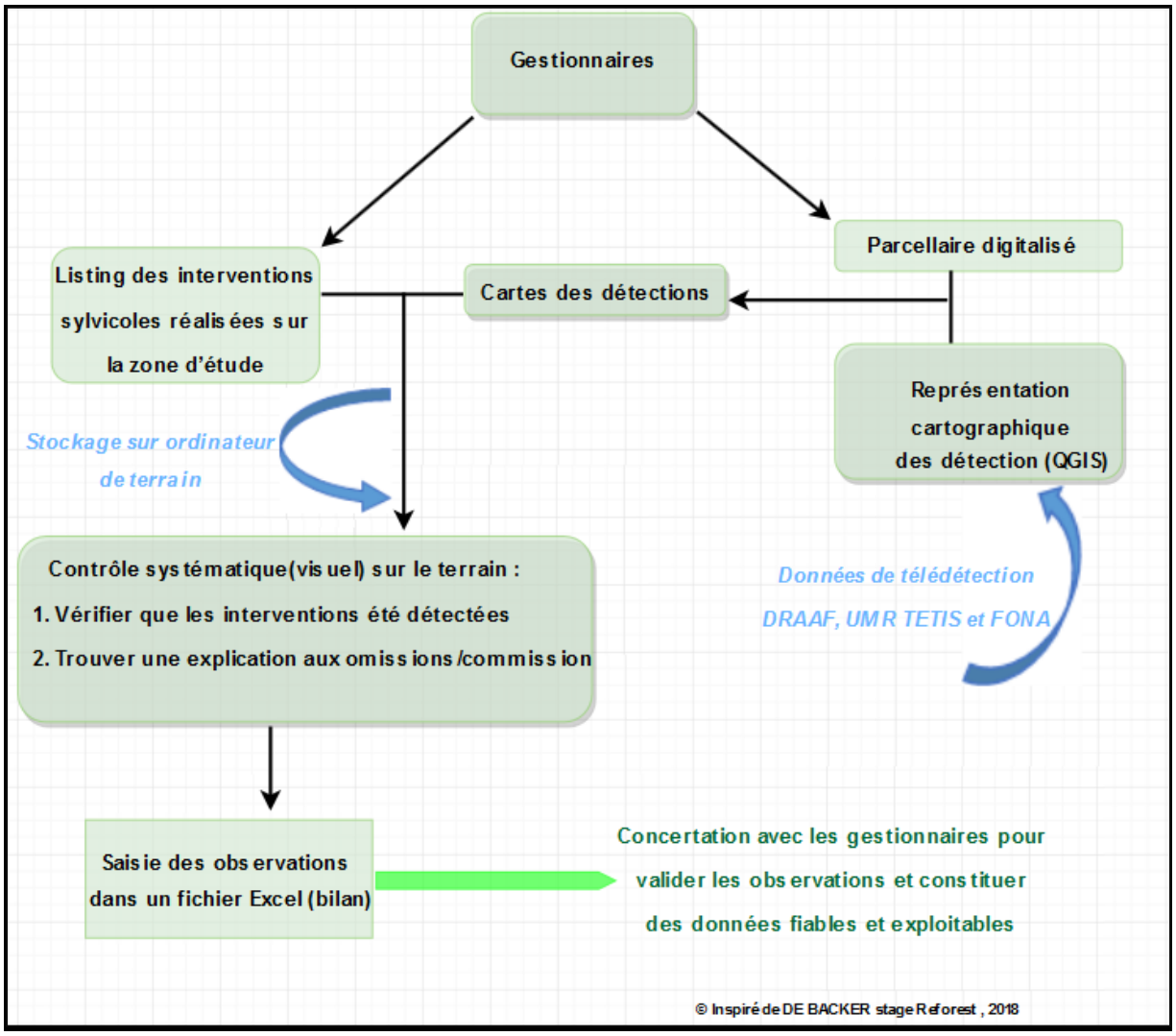

Figure 7 : Schéma du protocole de terrain lors des missions de contrôle et validation

Pour mener à bien les missions de contrôles sur le terrain, nous avons croisé les résultats des détections satellitaires avec les listes d'interventions sylvicoles qui nous ont été communiquées par les gestionnaires des trois forêts privées retenues et l'ONF.

Nous avons bâti une stratégie d'échantillonnage pour identifier les parcelles à contrôler en forêt public. Les parcelles qui présentent une forte variabilité à travers un grand écart-type du NDVI sont croisées avec le tableau qui contient les dates de martelage des interventions en prenant en compte l'incertitude de 1 à 4 ans. Sur le terrain on vérifie pour une parcelle donnée si la détection a été faite (1 à 4

ans) après le martelage, alors c'est une détection avérée. Sinon, la probable intervention est considérée comme une omission.
Pour la forêt privée, connaissant les dates d'intervention sylvicoles, nous avons pu déterminer toutes les omissions/commissions. Ces dernières ont été systématiquement contrôlées pour en comprendre les causes.
Nous avons aussi contrôlé des parcelles pour lesquelles l'ampleur des détections va bien au-delà de l'intervention ou l'inverse.
Une majorité de faux positifs est associée à un degré de certitude faible (degré 1) ; ce constat, peut être mis sur le compte du rapport signal/bruit des images de base.
L'opération de détection 2017/2018 pour l'évaluation de la méthode, ainsi que les détections de la DRAAF ont omis toutes les interventions sylvicoles dont la surface est inférieure à 0,5 ha.
Cette omission est tout à fait normale, parce que ce sont des coupes rases qu'on cherchait à travers la méthode originale. Quant aux omissions enregistrées avec la nouvelle opération de détection, nous ne saurons expliquer la véritable cause des omissions. Nous émettons cependant une hypothèse selon laquelle la nature et l'intensité des prélèvements pourraient être une des causes de ces omissions.

2.2. Le problème phytosanitaire

Lors de la première mission de contrôle des détections, nous avons pris connaissance auprès des gestionnaires de certaines informations relatives à des événements isolés comme les attaques parasitaires sur des peuplements aussi bien en forêt publique que privée (il s'agit entre autres de la maladie des bandes rouge sur le Pin Laricio, de défoliation du Chêne par des chenilles, *etc.*). Mais aussi des périodes de sécheresses qui interviennent en plein été occasionnant ainsi un état de stress hydrique et une perte d'activité chlorophyllienne chez des essences comme le Bouleau (cas de figure rencontrés en forêt domaniale d'Orléans et à Bois-Landry). Ces informations nous ont permis d'émettre l'hypothèse selon laquelle beaucoup de nos détections qui se sont avérées être des faux positifs seraient causées par ces événements isolés.

3. Résultat de la méthode bi-dates

3.1. Dates des images (période entre attaques parasitaires et stress hydrique)

Les nouvelles détections qui ont été réalisées en prenant en compte le problème phytosanitaire, l'exploration d'indices autres que le NDVI et en utilisant un seuillage de 0.25 ha se sont révélées plus prometteuses que les anciennes détections. Pour contrôler ces détections, nous avons choisi la forêt de Marchenoir et celle de Bailleau en utilisant notre protocole de terrain évoqué plus haut. Afin de faciliter le travail de terrain, Cédric Patinaud (ingénieur forestier recruté dans le cadre du projet Reforest) a réalisé les cartes de toutes les détections (avec les trois indices pour toutes les périodes) qui nous ont servi de support papier. Les tableaux 2, 3, 4 et 5 donnent les détails sur les dates des images utilisées pour les détections de chaque période. Ci-dessous quelques cartes sont présentées à titre d'exemple.

Nous nous retrouvons avec vingt cartes pour une zone, cinq périodes (P1, P2, P3, P4 et P5). Elles ont été produites afin d'avoir à notre disposition toutes les informations de détections

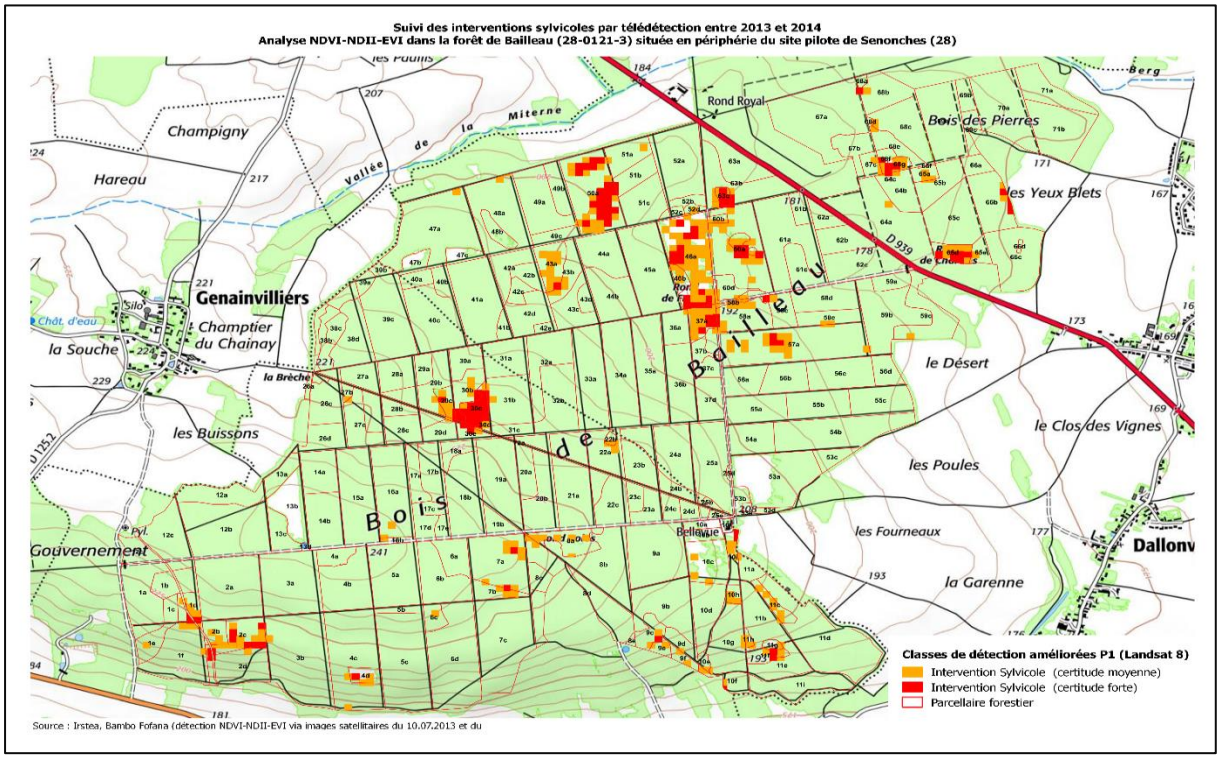

Figure 7 : Synthèse des détections de certitude 2 et 3 pour le NDVI, NDII, et EVI à Bailleau (Mise en page Cédric Patinaud IRTEA Nogent)

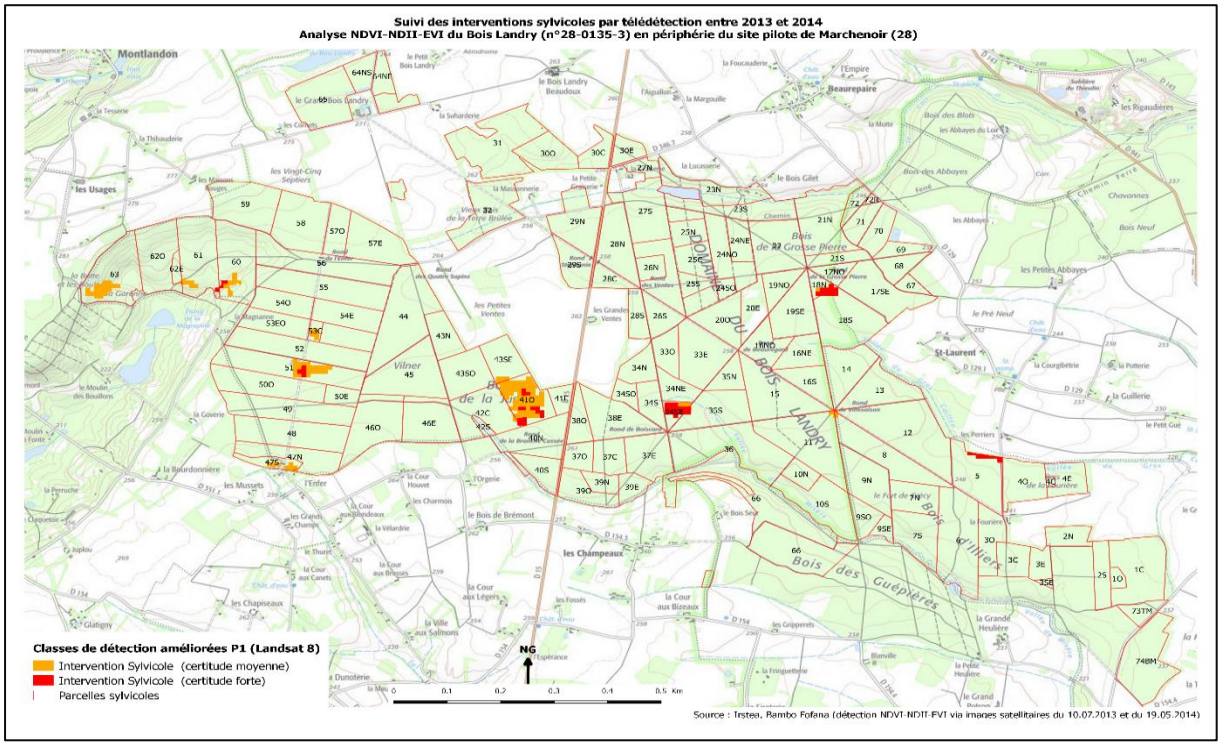

Figure 8 : Synthèse des détections de certitude 2 et 3 pour le NDVI, NDII, et EVI à Bois-Landry (Mise en page Cédric Patinaud IRTEA Nogent)

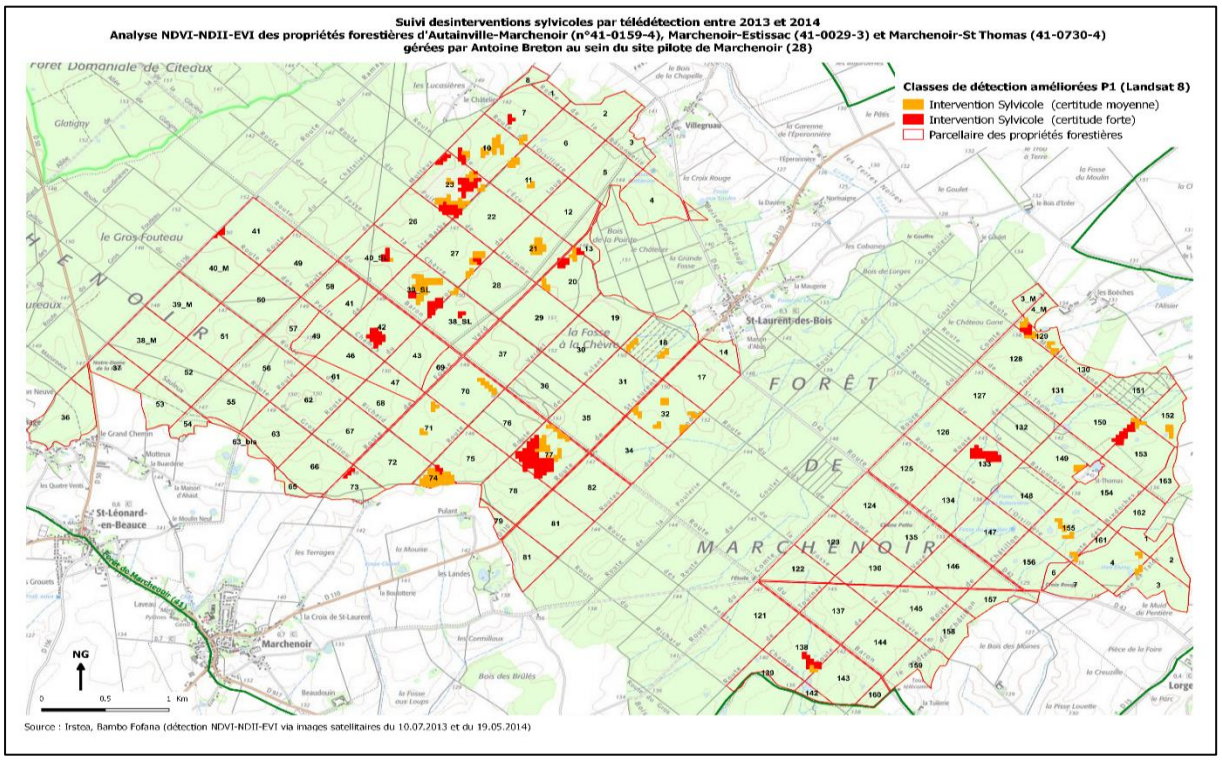

Figure 9 : Synthèse des détections de certitude 2 et 3 pour le NDVI, NDII, et EVI à Marchenoir (Mise en page Cédric Patinaud IRTEA Nogent).

3.2. Matrices de confusion pour les détections de la forêt privée en méthode bi-dates

A la suite des validations systématiques de nos détections lors de la mission de contrôle sur le terrain, nous avons consigné les résultats dans des tableaux Excel. Pour chaque zone d'intérêt, le tableau comporte une feuille d'information générale sur la propriété, une feuille sur les variables du tableau et une dernière feuille qui comporte l'ensemble des interventions sylvicoles, l'ensemble des détections, ainsi que la nature de celles-ci (détections, omissions, faux positif et artéfacts). Grace à ces tableaux, nous pouvons réaliser des matrices de confusions pour évaluer la qualité des détections.

La construction des matrices consiste à confronter nos détections de certitude (1, 2 et 3) à la réalité terrain pour chaque indice et pour chaque période par zone étudiée. Pour les trois zones en forêt privée plus la forêt d'Orléans, nous aurons à construire environ quatre-vingts matrices toutes périodes confondues. Nous n'avons pas fini la construction de toutes les matrices pour déduire une analyse synthétique des résultats par massif forestiers.

Cependant, nous sommes en mesure de présenter ci-dessous et en **annexe 7** quelques-unes de ces matrices à titre d'exemple. La fin du stage sera consacrée à la finalisation des matrices et à leur interprétation.

Tableaux 6 : Matrice de confusion des détections du NDVI à Bailleau entre (2013/ 2014)

Matrices de confusions des détections du NDVI avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Bailleau

Nombre de DN1_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	161	11	172,0	93,6	6,4
O	55	11	66,0	16,7	83,3
Total général	216,0	22,0	238,0		
prec. Utilisateur	74,5	50,0			
err. Comm	25,5	50,0			
prec. Globale	72,3				
F-score	25,0				

Nombre de DN2_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	165	7	172,0	95,9	4,1
O	62	4	66,0	6,1	93,9
Total général	227,0	11,0	238,0		
prec. Utilisateur	72,7	36,4			
err. Comm	27,3	63,6			
prec. Globale	71,0				
F-score	10,4				

Nombre de DN3_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	169	3	172,0	98,3	1,7
O	60	6	66,0	9,1	90,9
Total général	229,0	9,0	238,0		
prec. Utilisateur	73,8	66,7			
err. Comm	26,2	33,3			
prec. Globale	73,5				
F-score	16,0				

Nombre de ALL_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	152	20	172,0	88,4	11,6
O	50	16	66,0	24,2	75,8
Total général	202,0	36,0	238,0		
prec. Utilisateur	75,2	44,4			
err. Comm	24,8	55,6			
prec. Globale	70,6				
F-score	31,4				

Tableaux 7 : Matrice de confusion des détections du NDII à Bailleau entre (2013/ 2014)

Matrices de confusions des détections du NDII avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Bailleau

Nombre de DN1_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	157	15	172,0	91,3	8,7
O	45	21	66,0	31,8	68,2
Total général	202,0	36,0	238,0		
prec. Utilisateur	77,7	58,3			
err. Comm	22,3	41,7			
prec. Globale	74,8				
F-score	41,2				

Nombre de DN2_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	166	6	172,0	96,5	3,5
O	58	8	66,0	12,1	87,9
Total général	224,0	14,0	238,0		
prec. Utilisateur	74,1	57,1			
err. Comm	25,9	42,9			
prec. Globale	73,1				
F-score	20,0				

Nombre de DN3_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	163	9	172,0	94,8	5,2
O	60	6	66,0	9,1	90,9
Total général	223,0	15,0	238,0		
prec. Utilisateur	73,1	40,0			
err. Comm	26,9	60,0			
prec. Globale	71,0				
F-score	14,8				

Nombre de ALL_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	145	27	172,0	84,3	15,7
O	35	31	66,0	47,0	53,0
Total général	180,0	58,0	238,0		
prec. Utilisateur	80,6	53,4			
err. Comm	19,4	46,6			
prec. Globale	73,9				
F-score	50,0				

Tableaux 8 : Matrice de confusion des détections du EVI à Bailleau entre (2013/ 2014)

Matrices de confusions des détections du EVI avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Bailleau

Nombre de DN1_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	153	19	172,0	89,0	11,0
O	61	5	66,0	7,6	92,4
Total général	214,0	24,0	238,0		
prec. Utilisateur	71,5	20,8			
err. Comm	28,5	79,2			
prec. Globale	66,4				
F-score	11,1				

Nombre de DN2_BIN	**Détection**				
Étiquettes de lignes	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	166	6	172,0	96,5	3,5
O	63	3	66,0	4,5	95,5
Total général	229,0	9,0	238,0		
prec. Utilisateur	72,5	33,3			
err. Comm	27,5	66,7			
prec. Globale	71,0				
F-score	8,0				

Nombre de DN3_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	171	1	172,0	99,4	0,6
O	62	4	66,0	6,1	93,9
Total général	233,0	5,0	238,0		
prec. Utilisateur	73,4	80,0			
err. Comm	26,6	20,0			
prec. Globale	73,5				
F-score	11,3				

Nombre de ALL_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	140	32	172,0	81,4	18,6
O	56	10	66,0	15,2	84,8
Total général	196,0	42,0	238,0		
prec. Utilisateur	71,4	23,8			
err. Comm	28,6	76,2			
prec. Globale	63,0				
F-score	18,5				

Tableaux 9 : Matrice de confusion des détections du NDVI à Marchenoir entre (2014/ 2015)

Matrices de confusions des détections du NDVI avec les trois degrés de certitudes pour la période deux à Marchenoir

Nombre de DN1_P2	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	36	2	38,0	94,7	5,3
O	68	19	87,0	21,8	78,2
Total général	104,0	21,0	125,0		
prec. Utilisateur	34,6	90,5			
err. Comm	65,4	9,5			
prec. Globale	44,0				
F-score	35,2				

Nombre de DN2_P2	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	38	0	38,0	100,0	0,0
O	85	2	87,0	2,3	97,7
Total général	123,0	2,0	125,0		
prec. Utilisateur	30,9	100,0			
err. Comm	69,1	0,0			
prec. Globale	32,0				
F-score	4,5				

Nombre de DN3_P2	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	37	1	38,0	97,4	2,6
O	81	6	87,0	6,9	93,1
Total général	118,0	7,0	125,0		
prec. Utilisateur	31,4	85,7			
err. Comm	68,6	14,3			
prec. Globale	34,4				
F-score	12,8				

Nombre de ALL_P2	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	35	3	38,0	92,1	7,9
O	65	22	87,0	25,3	74,7
Total général	100,0	25,0	125,0		
prec. Utilisateur	35,0	88,0			
err. Comm	65,0	12,0			
prec. Globale	45,6				
F-score	39,3				

Tableaux 10: Matrice de confusion des détections du NDII à Marchenoir entre (2014/ 2015)

Matrices de confusions des détections du NDII avec les trois degrés de certitudes pour la période deux à Marchenoir

Nombre de DN1_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	33	5	38,0	86,8	13,2
O	64	23	87,0	26,4	73,6
Total général	97,0	28,0	125,0		
prec. Utilisateur	34,0	82,1			
err. Comm	66,0	17,9			
prec. Globale	44,8				
F-score	40,0				

Nombre de DN2_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	38	0	38,0	100,0	0,0
O	80	7	87,0	8,0	92,0
Total général	118,0	7,0	125,0		
prec. Utilisateur	32,2	100,0			
err. Comm	67,8	0,0			
prec. Globale	36,0				
F-score	14,9				

Nombre de DN3_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	37	1	38,0	97,4	2,6
O	79	8	87,0	9,2	90,8
Total général	116,0	9,0	125,0		
prec. Utilisateur	31,9	88,9			
err. Comm	68,1	11,1			
prec. Globale	36,0				
F-score	16,7				

Nombre de ALL_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	33	5	38,0	86,8	13,2
O	61	26	87,0	29,9	70,1
Total général	94,0	31,0	125,0		
prec. Utilisateur	35,1	83,9			
err. Comm	64,9	16,1			
prec. Globale	47,2				
F-score	44,1				

Tableaux 11 : Matrice de confusion des détections du EVI à Marchenoir entre (2014/ 2015)

Matrices de confusions des détections du EVI avec les trois degrés de certitudes pour la période deux à Marchenoir

Nombre de DN1_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	36	2	38,0	94,7	5,3
O	68	19	87,0	21,8	78,2
Total général	104,0	21,0	125,0		
prec. Utilisateur	34,6	90,5			
err. Comm	65,4	9,5			
prec. Globale	44,0				
F-score	35,2				

Nombre de DN2_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	38	0	38,0	100,0	0,0
O	83	4	87,0	4,6	95,4
Total général	121,0	4	125,0		
prec. Utilisateur	31,4	100,0			
err. Comm	68,6	0,0			
prec. Globale	33,6				
F-score	8,8				

Nombre de DN3_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	36	2	38,0	94,7	5,3
O	82	5	87,0	5,7	94,3
Total général	118,0	7,0	125,0		
prec. Utilisateur	30,5	71,4			
err. Comm	69,5	28,6			
prec. Globale	32,8				
F-score	10,6				

Nombre de ALL_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	33	5	38,0	86,8	13,2
O	65	22	87,0	25,3	74,7
Total général	98,0	27,0	125,0		
prec. Utilisateur	33,7	81,5			
err. Comm	66,3	18,5			
prec. Globale	44,0				
F-score	38,6				

Tableaux 12 : Matrice de confusion des détections du NDII par type d'intervention sylvicole à Bailleau entre (2014/ 2015)

Matrices de confusions par type d'intervention sylvicole pour la première période à Bailleau

Nombre de ALL_IS1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	Prec. Prod.	Err. Om.
Coupe d'amélioration / éclaircie	25	21	46	100,0	0,0
Total général	25	21	46	45,7	54,3
prec. Utilisateur	54,3	45,7			
err. Comm	45,7	54,3			
prec. Globale	100,0				
F-Score	45,7				

Nombre de ALL_IS2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	Prec. Prod.	Err. Om.
Coupe secondaire	1	1	2	100,0	0,0
Total général	1	1	2	50,0	50,0
prec. Utilisateur	100,0	50,0			
err. Comm	0,0	50,0			
prec. Globale	100,0				
F-Score	50,0				

Nombre de ALL_IS3	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	Prec. Prod.	Err. Om.
Balivage	5	2	7	100,0	0,0
Total général	5	2	7	28,6	71,4
prec. Utilisateur	71,4	28,6			
err. Comm	28,6	71,4			
prec. Globale	100,0				
F-Score	28,6				

Nombre de ALL_IS4	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	Prec. Prod.	Err. Om.
Coupe définitive	1	3	4	100,0	0,0
Total général	1	3	4	75,0	25,0
prec. Utilisateur	100,0	75,0			
err. Comm	0,0	0,0			
prec. Globale	100,0				
F-Score	75,0				

ALL_IS1	**Coupe d'amélioration / éclaircie**
ALL_IS2	**Coupe secondaire**
ALL_IS3	**Balivage**
ALL_IS4	**Coupe définitive**

3.3. Interprétation des matrices et discussion

L'analyse des matrices de confusion permet d'observer pour chaque indice (NDVI, NDII et EVI) et pour chaque niveau de certitude (degré 1, degré 2 et degré 3) des statistiques sur la précision des détections.

Ainsi, nous avons croisé les détections des indices avec la vérité terrain qui nous renseigne si - oui ou non - il y a eu une intervention sylvicole pour une parcelle donnée. Afin d'évaluer la qualité des détections, nous avons calculé pour chaque niveau de détection la précision producteur/utilisateur, les erreurs de commission/omission, la précision globale et le f-score.

Les erreurs de commission/omission sont considérables avec de fortes valeurs par niveau de certitude. Mais elles diminuent légèrement si on utilise à la fois les trois niveaux pour construire la matrice. Ces fortes valeurs notées pour les erreurs de commission/omission affectent la précision globale des détections ou du moins pour les cas que nous avons présenté. Les valeurs tournent autour de 70% pour la première période de détection à Bailleau (*cf.* **tableau 6 à 8**). Elles dépassent rarement les 50% pour les détections de la deuxième période à Marchenoir (cf. **tableau 9 à 11**).

Quant aux précisons producteur/utilisateur aussi appelé rappel/précision, la forte valeur de l'une entraine une faible valeur pour l'autre. Elles se traduisent par la « part de vrai retrouvé sur tout ce qui est vrai » pour le rappel et la « part de vrai sur tout ce qui a été classé comme vrai » pour la précision.

Cependant, elles ne suffisent pas pour évaluer de manière efficace la qualité de nos détections parce qu'une forte précision (précision producteur) est synonyme d'une forte commission. Un fort rappel (précision utilisateur) est synonyme d'une forte omission.

Nous avons donc calculé le « f-score » qui combine la précision et le rappel (la moyenne harmonique des deux). Les résultats du « f-score » montrent certes des valeurs faibles par rapport à celles de la précision globale, mais le « f-score » permet d'apprécier l'outil de détection à sa juste valeur.

Les valeurs du « f-score » varient selon le niveau de certitude de la détection, mais aussi selon l'indice. Globalement les scores les plus élevés sont notés avec la matrice qui prend en compte les trois degrés de certitudes et celles qui sont construites avec le NDII sauf exception. Le NDVI et l'EVI se valent quasiment en termes de score pour la précision des détections.

Les scores ne sont pas très élevés de manière générale pour l'ensemble de nos détections car ils dépassent rarement la barre de 50%. Cela est lié à la méthode de détection elle-même. Elle est développée pour détecter du changement en l'occurrence de la perte d'activité chlorophyllienne assimilée par ricochet à des interventions sylvicoles. Nous nous sommes aperçu sur le terrain, cependant, qu'une perte d'activité chlorophyllienne n'est pas forcément la résultante d'une intervention sylvicole.

D'autres facteurs comme les attaques parasitaires, le stress hydrique, *etc.* peuvent causer une fausse détection appelée « faux positif ». Le choix que nous avons fait de ramener le seuil de détection à 0,25 ha a des conséquences sur la

précision de nos détections. Nous avons augmenté par ce choix, le nombre d'artéfact ou bruit qui entre en compte dans les détections. Il y a parmi les bruits, certains qui sont propres aux images utilisées.
Il est quasi impossible de rendre deux images identiques si leur acquisition n'a pas été faite sous les mêmes conditions atmosphériques et ce malgré toutes les corrections que l'on peut introduire pour améliorer la qualité des analyses envisagées. La méthode a donc ses limites et la connaissance de certaines informations relatives au climat, aux peuplements forestiers est nécessaire pour bien interpréter les résultats des détections.

Le **tableau 12** dans la suite des tableaux de matrices nous a permis d'évaluer l'efficacité de la méthode par rapport aux différents types d'interventions sylvicoles.
Nous avons constaté que les coupes définitives enregistrent le score de détection le plus élevé avec 75 %, puis les coupes secondaires avec 50 %, les coupes d'éclaircie avec 45 % et enfin les coupes d'une plus petite ampleur comme le balivage se retrouvent avec un score de 28 %.
Nous pouvons en déduire que l'ampleur de l'intervention, la résolution spatiale de l'image, sont entre autres des facteurs qui peuvent jouer sur la qualité des détections.
Prise de manière isolée, certaines interventions peuvent être détectées au pixel près. La photo ci-dessous prise lors de notre deuxième mission de terrain au mois de juillet illustre la position exacte d'une coupe secondaire en forêt privée à Bailleau.

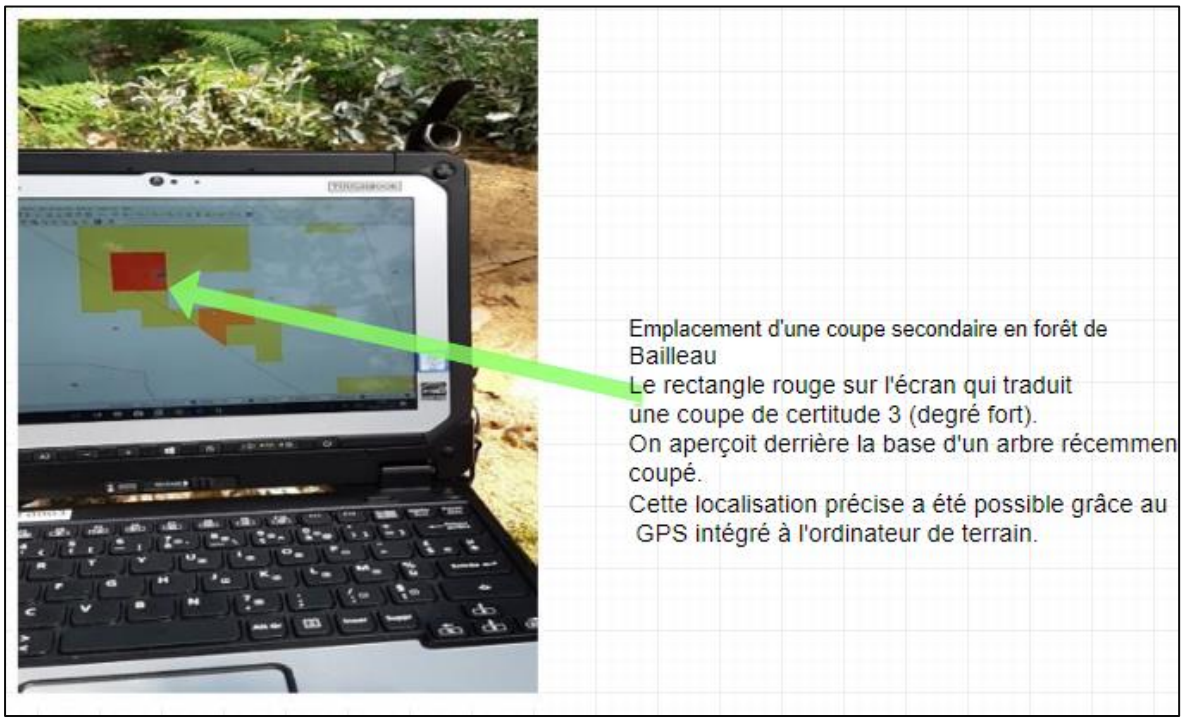

Figure 10 : Photo prise le 28 juillet 2018 à 14h 42mn en forêt privée à Bailleau (Bambo FOFANA)

3.4. Proposition d'indicateurs forestiers

Aujourd'hui la détection et le suivi des interventions sylvicoles par télédétection constituent un moyen pour les sylviculteurs de s'affranchir de démarches d'enquêtes onéreuses et peu fiables pour fournir des indicateurs standardisés en termes d'appréciation de la sensibilité des forêts à la pression de consommation exercée par les cervidés.
La méthode bi-dates de détection des coupes rases adaptée à la problématique sylvicole permet de détecter un grand nombre d'intervention sylvicole à condition de faire un bon choix quant à la sélection du couple d'image à utiliser (pas d'images trop précoces, choisir pour première image de la période Pn, la seconde image de la période Pn-1).
Nous savons que la méthode est une détection du changement de l'activité chlorophyllienne mais tout changement n'est forcément pas causé par une intervention (maladie et stress hydrique sont tout aussi des causes de changement), alors des informations comme la date exacte des interventions sont capitales pour affirmer/infirmer si la détection en question est une intervention sylvicole. L'information mise à disposition par l'ONF s'est révélée trop imprécise pour la forêt publique. En revanche pour les forêts privées retenues comme zone d'intérêt, les gestionnaires ont pu rendre, cette information disponible même si ce n'était pas toujours sous un format facilement exploitable. De 2013 à 2018, nous avons cinq périodes de détections pour les forêts de Bois-Landry, Bailleau et Marchenoir. Ces détections ont été validées lors des missions de contrôle et l'information est stockée dans les bases les données qui pourra être mise à jour si les gestionnaires continuent de nous fournir les tableaux de leurs interventions sylvicoles avec des dates précises

Nous rappelons également que le fait d'utiliser d'autres indices de végétation comme le NDII ou l'EVI, dont les résultats peuvent être recoupés avec ceux du NDVI, augmente la précision et le nombre de bonnes détections pour les interventions sylvicoles.
Ces interventions sylvicoles une fois validées, pourront être croisées avec des zones de reprise de la végétation (régénération) pour construire l'indicateur le plus fiable possible afin de définir des zones potentiellement sensibles aux dégâts que peuvent causer les cervidés. Les zones qui sont en regain de végétation peuvent être détectées avec la méthode bi-dates.
Ainsi, les autorités compétentes auront en leur possession un outil pertinent et robuste pour la détection des interventions sylvicoles (zones en pleine régénération) grâce à l'imagerie satellitaire. L'avantage de cet outil est qu'il gagne énormément en temps et en efficacité dans la caractérisation des peuplements sensibles à la pression des cervidés). L'Etat n'aura sans doute plus à mobiliser autant de ressources humaines et financières pour l'obtention d'une information crédible nécessaire au dialogue entrepris avec les acteurs de la chasse et de la sylviculture dans le cadre du projet ReForest.

4. Perspectives

4.1. Les profils temporels, classification, enrichissement de base de données multi-temporelles et multi-sources

Le résultat des profils temporels est mis dans les perspectives pour la simple raison que l'état actuel des données disponibles (en termes de détections) ne permet pas de faire un suivi temporel. D'après notre hypothèse des interventions sylvicoles, il faut plusieurs années d'observation et de collecte de données pour envisager une évaluation objective des itinéraires sylvicoles fixés.
Pour rappel, cette hypothèse serait le processus de régénération d'une parcelle est assez long, la parcelle subit une série d'interventions sylvicoles qui se traduit par une perte progressive de l'activité photosynthétique jusqu'à l'intervention de la coupe définitive. On observe ensuite une reprise progressive de la végétation jusqu'à la fermeture de la canopée dans le cas d'une sylviculture irrégulière.
Néanmoins, nous présentons quelques profils réalisés à partir des valeurs d'écart-type du NDII sur un échantillon de parcelles de la BDSOR en forêt domaniale d'Orléans et de parcelles en forêt privée (Bois-Landy). Notre choix de représentation fait que les profils deviennent trop serrés et la légende illisible au-delà d'une vingtaine de parcelles ou unités de gestions.
L'idéal serait de cibler quelques parcelles afin de pouvoir suivre les interventions sylvicoles qui s'y produisent de manière distincte. Tout en sachant que cela n'est possible qu'en poursuivant la collecte des images satellite (Sentinel-2) pour enrichir la base de données multi-temporelles.

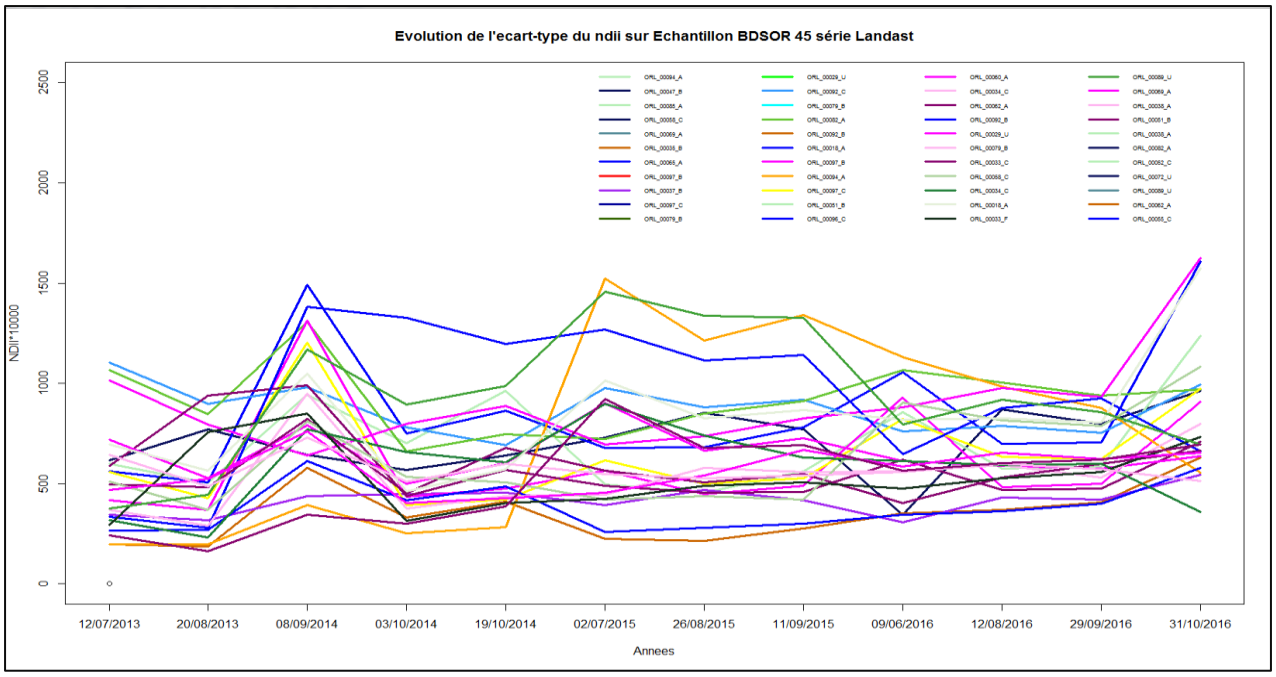

Figure 12 : Evolution temporelle du NDII sur un échantillon du BDSOR en forêt d'Orléans

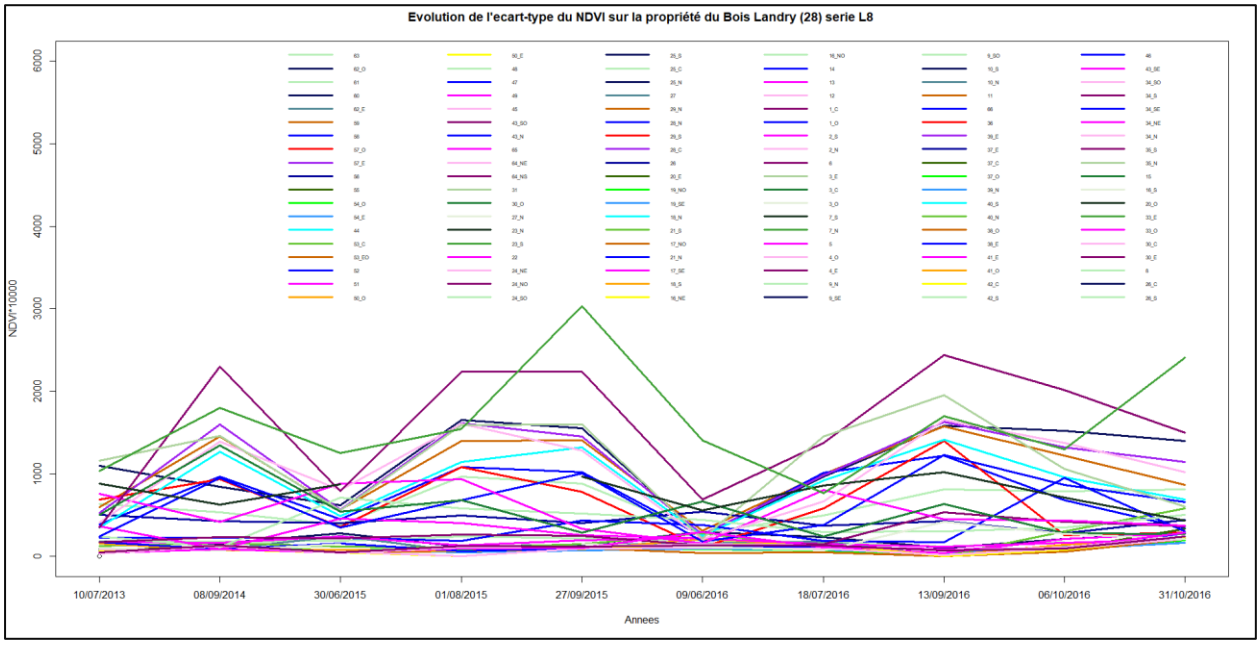

Figure 13 : Evolution temporelle du NDII sur les parcelles de la propriété du Bois-Landry

Le résultat de la catégorisation des polygones pour l'échantillonnage des parcelles en forêt est présenté sous dendrogramme pour l'étape de la classification du tableau de données. Puis sous forme d'histogramme après catégorisation par groupe. La **figures 14** présente l'histogramme des classes définies par l'utilisateur à partir de l'arbre de l'arbre de proximité interclasse proposé par le dendrogramme. Les groupes NDVI représentent les classes de parcelles selon les valeurs moyenne de l'écart-types. L'histogramme permet d'avoir une idée sur le nombre de parcelle qui auraient éventuellement subies un changement d'état de la végétation.

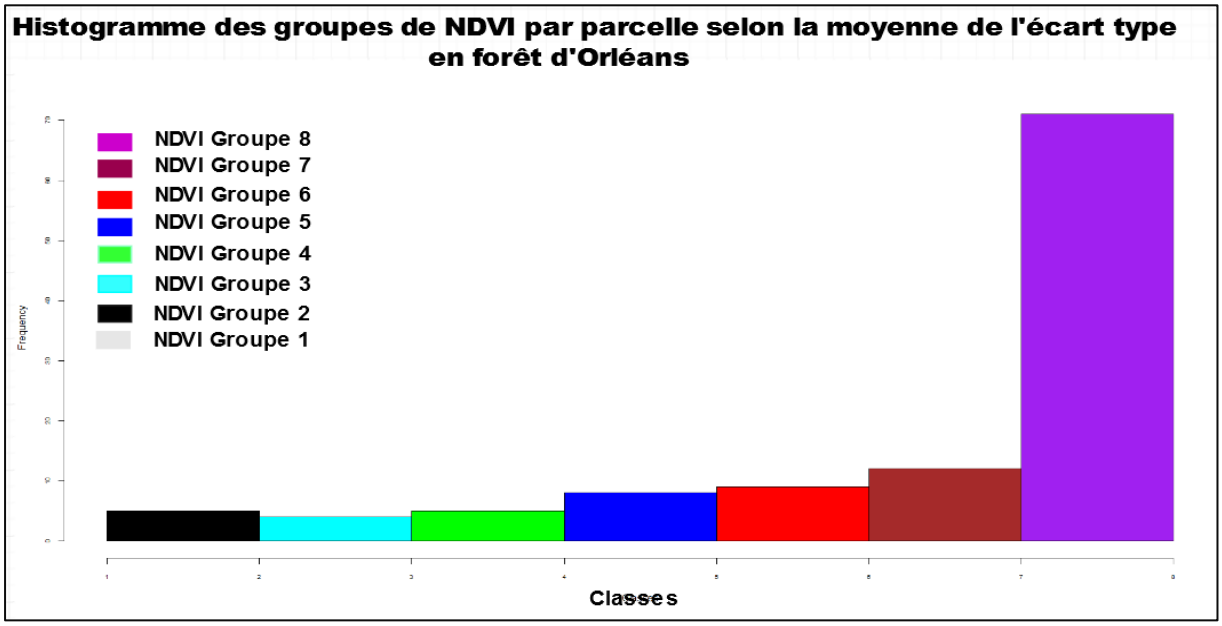

Figure 14 : Histogramme des groupes NDVI par parcelles selon les valeurs de l'écart-type moyen

Les interventions sylvicoles détectées doivent être archivées après validation afin de pouvoir retracer leur comportement spectral à travers le profil temporel de chaque parcelle analysée. La **figure15** ci-après illustre nos recommandations sur les perspectives de la création et de l'enrichissement d'une base de données des interventions sylvicoles.

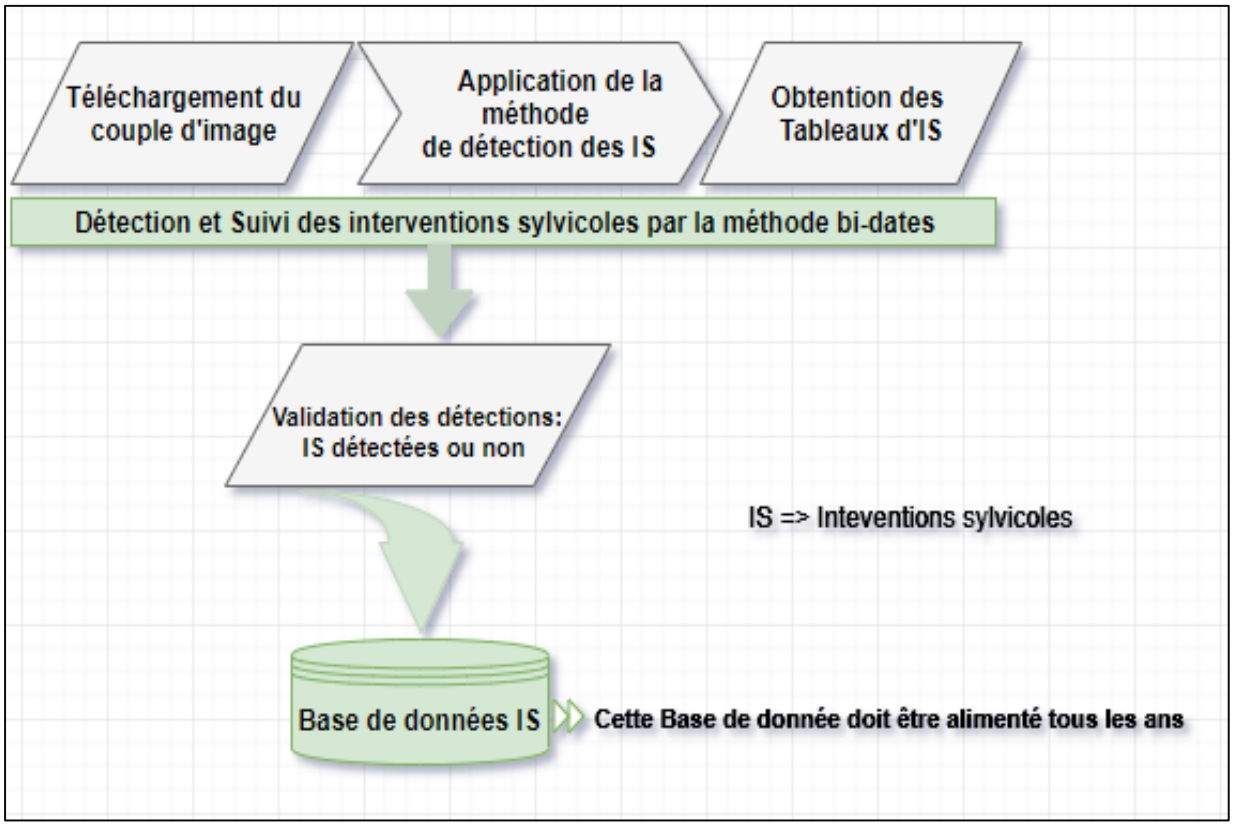

Figure 15 : Construction et enrichissement d'une base de données sur les interventions sylvicoles

Le test de classification réalisé à partir de la vérité terrain récupérée sur Bois-Landry entre dans le cadre de l'approche série temporelle et le résultat permet de visualiser pour une période donnée, l'ensemble des interventions sylvicoles réalisées dans la propriété.

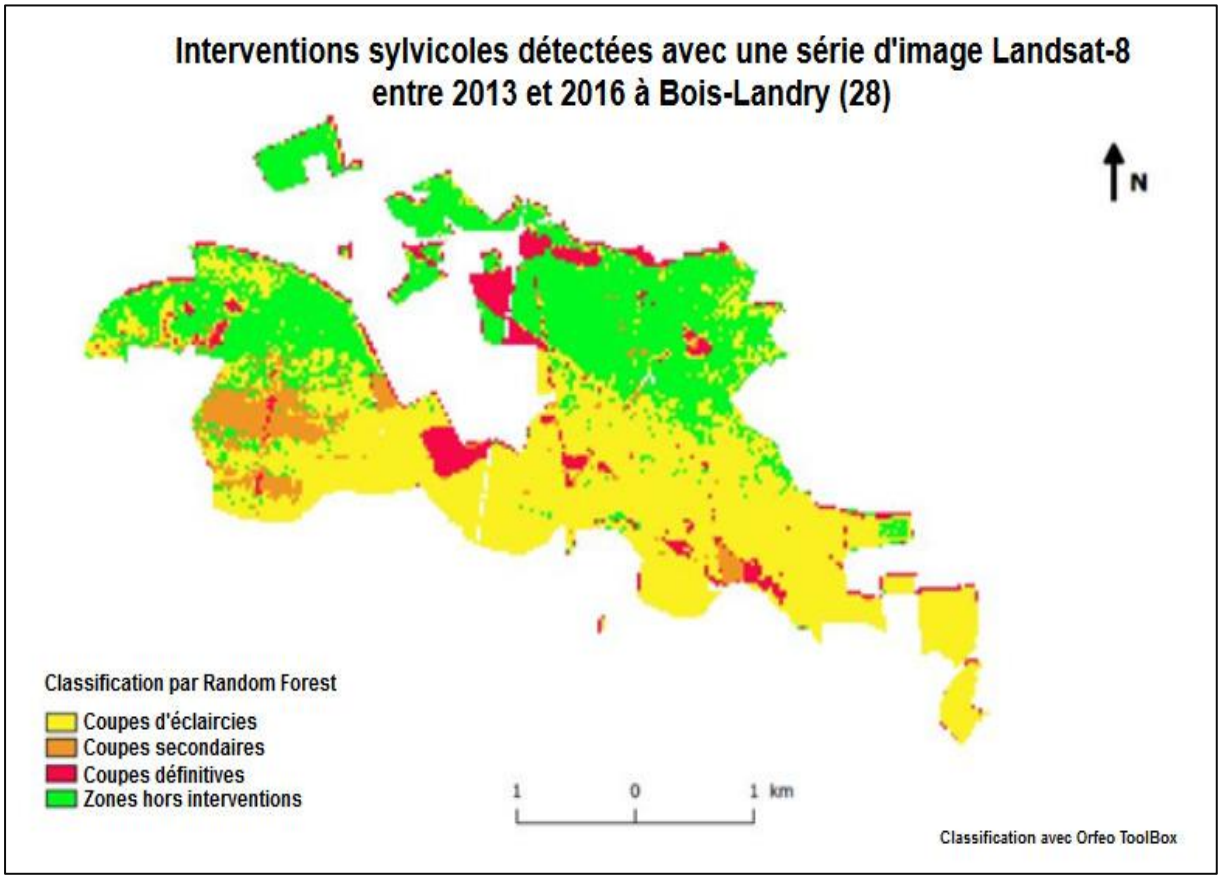

Figure 16 : Classification supervisée par Random Forest des interventions sylvicoles à Bois-Landry (2013 à 2016 avec la série d'image Landsat-8).

4.2. Détection des reprises de végétation

Jusque-là nous avons travaillé sur la détection et le suivi des interventions sylvicoles, donc sur la perte d'activité chlorophyllienne. Qui dit perte de végétation, suppose une reprise de cette végétation plus tard puisque nous nous plaçons dans un contexte de gestion durable de la forêt. Cela va aussi dans le sens de notre hypothèse sur le suivi temporel des interventions sylvicoles (*cf.* **figure 5)**.
Il nous est possible de détecter les zones où il y a une reprise de végétation avec la méthode bi-dates.
Pour cela, nous avons inversé la méthode en changeant le signe et le sens des opérateurs de l'équation du seuil pour détecter les zones en reprise de végétation.
Dans le script présenté ci-dessous, on visualise l'exemple d'un seuil permettant de détecter en #1 la perte d'activité chlorophyllienne (interventions sylvicoles ou autres) et en #2 les zones de regain de végétation à Bois-Landry pour la période 2014/2015.

```
NDVI 2014-2015 P2
STATISTICS_MAXIMUM=3679
STATISTICS_MEAN=20.19218395257
STATISTICS_MINIMUM=-5353
STATISTICS_STDDEV=328.17657914162
#1 Perte de Végétation (IS)
   ("Diff_NDVI_Mask_Final@1">=-20000 AND "Diff_NDVI_Mask_Final@1"<(20.19218395257-3*328.17657914162))*3 +
   ("Diff_NDVI_Mask_Final@1">=(20.19218395257-3*328.17657914162)AND"Diff_NDVI_Mask_Final@1"<
   (20.19218395257-2*328.17657914162))*2+("Diff_NDVI_Mask_Final@1">=(20.19218395257-2*328.17657914162)AND
   "Diff_NDVI_Mask_Final@1"<(20.19218395257-328.17657914162))

#2 Reprise de Végétation
   ("Diff_NDVI_Mask_Final@1"<=-20000 AND "Diff_NDVI_Mask_Final@1">(20.19218395257+3*328.17657914162))*3 +
   ("Diff_NDVI_Mask_Final@1"<=(20.19218395257+3*328.17657914162)AND"Diff_NDVI_Mask_Final@1">
   (20.19218395257+2*328.17657914162))*2+("Diff_NDVI_Mask_Final@1"<=(20.19218395257+2*328.17657914162)AND
   "Diff_NDVI_Mask_Final@1">(20.19218395257+328.17657914162))
```

Script 5 : Seuils de détection interventions sylvicoles, regain de végétation à Bois-Landry

L'identification des zones qui sont en reprises de végétation à partir la méthode bi-dates est une perspective qui permet d'affiner la qualité de l'information sur les peuplements en régénération. Nous savons qu'avec la méthode proposée, le suivi des interventions sylvicoles passe par la détection d'un changement d'état de la végétation, mais ce changement d'état n'étant pas spécifique qu'aux interventions sylvicoles, nous enregistrons alors des taux élevés de commissions.

Le résultat de la détection des interventions sylvicoles avec une erreur de commission élevée ouvre la voie à des études utilisant d'autres méthodes dans le cadre d'une thèse par exemple.

La combinaison de plusieurs méthodes peut affiner la qualité de détection des interventions en minimisant autant que peut se faire la détection des changements d'état de la végétation qui ne sont pas causés par les interventions sylvicoles.

Pour les problèmes phytosanitaires, Kenji OSE (URM TETIS) travaille en moment sur la détection de maladies en forêt à partir d'indices de rougeurs sur des séries temporelles.

Les résultats de cette étude peuvent être croisés avec les zones détectées par la méthode bi-dates comme ayant subies des interventions sylvicoles pour écarter les problèmes phytosanitaires liés à des maladies. Cette étude peut être une perspective pour l'amélioration de la qualité de détection des interventions sylvicoles.

Des informations sur la santé des peuplements forestiers, des événements climatiques ayant un impact sur la forêt sont proposées au travers d'un bilan annuel du département de la santé des forêts pour le compte du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation.

Le **tableau 13** est une synthèse des informations du dernier bilan en date pour la région Centre-Val de Loire. L'utilisation de ces informations à partir du croisement des placettes spatialisées du département de la santé des forêts (DSF) avec les couches de détections des interventions sylvicoles permettrait également d'affiner les résultats des détections avec la méthode bi-dates.

Tableau 13 : Bilan annuel de la santé des forêts en région Centre-Val de Loire 2017

Santé des essences	Principaux problèmes et niveau d'impact
Chêne pédonculé	Gel Station
Chêne rouvre	Gel Sécheresse en plantation
Châtaignier	Cynips Sécheresse Chancre Encre
Pin sylvestre	Sphaeropsis des pins Bupreste bleu
Pin maritime	Gel en plantation
Pin laricio	
Peuplier	

Etat de santé : = bon ; = moyen ; = médiocre
Niveau d'impact des problèmes : = faible ; = moyen ; = fort

Suivi des principaux problèmes

		2013	2014	2015	2016	2017
Toutes essences	Sécheresse estivale					
Feuillus	Défoliateurs précoces					
	Bombyx disparate					
	Oïdium des chênes					
	Dépérissements de chêne					
Peupliers	Rouilles du peuplier					
	Puceron lanigère					
Résineux	Scolytes des pins					
	Maladie des bandes rouges					
	Processionnaire du pin					

- Problème absent ou à un niveau faible
- Problème nettement présent, impact modéré
- Problème très présent, impact fort

Source: http://draaf.centre-val-de-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Bilan_phytosanitaire_Centre_VDL_2017_cle443cd5.pdf

Les informations sur la santé des essences présentent dans ce tableau doivent annuellement être prise en compte dans les analyses et la validation des détections bi-dates. Cela permettrait d'isoler éventuellement les zones affecter par ces aléas pour améliorer la qualité des détections.

Conclusion

Ce travail de recherche que nous avons mené en adoptant une démarche purement exploratoire dans le but d'aider les sylviculteurs à trouver des outils pertinents pour la construction d'indicateurs forestiers a révélé le potentiel de la télédétection face à la problématique sylvicole. Désormais il est possible d'utiliser la méthode bi-dates de détection des interventions sylvicoles pour caractériser et spatialiser les peuplements sensibles aux dégâts des cervidés. Cette information déterminante pour la régénération des essences forestières peut compléter les Indicateurs de Changement Ecologique (ICE) à la table des négociations entre acteurs sylvicoles et cynégétiques. La prise en compte de ces ensembles d'indicateurs permet de prendre en considération les préoccupations des uns et des autres et fournir ainsi aux décideurs les outils nécessaires à la définition d'une politique de gestion permettant d'atteindre l'équilibre sylvo-cynégétique.
Les problèmes phytosanitaires des peuplements qui font l'objet de réflexion, apporteront des compléments d'informations sur l'analyse des détections d'interventions sylvicoles à venir.

Sur le plan personnel, travaillé sur ce projet a été une grande satisfaction pour moi, car n'étant pas forestier de formation, j'ai eu l'opportunité d'approfondir les quelques notions que j'avais sur la thématique de l'écosystème forestière dans son ensemble (animaux et végétaux). J'ai également eu l'occasion de me rendre sur le terrain qui est un aspect très important pour un géographe, afin d'apprécier réellement ce que l'on perçoit dernière les ordinateurs.

Références bibliographiques

Agreste Centre, 2014 : Centre-Val de Loire, Ministère de l'agriculture, Bilan annuel 2013 - n° 14 mars 2014

Ballon et Hamard, 2010 : Effets passés et actuels des populations de cervidés sur les taillis avec réserves, apports de la photo-interprétation. Revue Forestière Française 62, pp. 107-125.

Bannari, et *al.*, 2009: A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, Volume 13, 1995 - Issue 1-2 Pages 95-120

Baretet *al.*, 2007: LAI, fAPAR and fCOVER CYCLOPES global products derived from Vegetation. *Remote Sensing of Environment*

Betbeder, 2015 : *« Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques »* Thèse de doctorat en Géographie, Université Rennes 2,374 p

Brondizio et Moran, 2010: Change detection techniques *International Journal* of *Remote Sensing* Volume 25, 2004 - Issue 12 Pages 2365-2401

Buhalau et Tudor, 2016: Detecting clear-cut deforestation using Landsat data: a time series analysis of remote sensing data in Covasna County, Romania between 2005 and 2015 *In Student thesis series INES NGEM01 20161*

Dauriac, 2004 : « *Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt* ». Thèse de doctorat en Hydrologie, ENGREF, AgroParisTech

Druschet *al*., 2012 : Sentinel-2 : ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ***.** 120, 25–36. Storey et al., 2016, *Remote Sensing of Environment*, Volume 186, 1 December 2016, Pages 121-122

Flament et Hamard, 2011 : « Observatoire du Donon » : Diagnostic de l'impact des cervidés sur l'avenir des peuplements forestiers – Base de travail pour la gestion. Rapport final, 88 p.

Gang et Ross, 2016 Remote Sensing of Forest Damage by Diseases and Insects, ResearchGate. DOI: 10.1201/9781315371931-9

Jensen, 2000: *Remote sensing of the environment*: An Earth resource perspective. Upper Saddle River : NJ : Prentice Hall, 2000. 544p.

Hamard et Ballon, 2011 Appréciation de l'impact des cervidés sur l'avenir des peuplements forestiers : de nouvelles méthodes de diagnostic à la disposition des gestionnaires. *Forêt entreprise* n° 197, 60-64.

Huete, et *al.*, 1997: A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440–451.

Huete et Tucker 1991: Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. *Int. J Remote Sensing* 12: 1223-1242.

Laurent et *al.*, 2017: Understory vegetation dynamics and tree regeneration as affected by deer herbivory in temperate hardwood forests. *In iForest - Biogeosciences and Forestry* 10(5): 837-844 p

Laurent, 2016 : « *Apports d'une approche écosystémique à l'étude de la dynamique des communautés végétales forestières : vers une prise en compte des interactions écologiques multiples* » – Doctorat en Ecologie, Université d'Orléans

Laurent et *al.*, 2014: Bayesian object-based estimation of LAI and chlorophyll from asimulated Sentinel-2 top-of-atmosphere radiance image *Remote Sensing of Environment* 140 (2014) 318–329

Marell et Hamard, 2013 : Diagnostics et suivis de l'impact des ongulés sur la régénération et la flore forestière. Forêt Entreprise 210 :18-22.

Marell et *al.*, 2012 : Les dispositifs de type enclos-exclos : des outils au service de la gestion et de la recherche. *Revue Forestière Française* 64 :139-150.

Morellet et *al.*, 2008 faune sauvage n° 282/octobre 2008

Moody,et Woodcock,1995: "The influence of scale and the spatial characteristics of landscapes on land-cover mapping using remote sensing", Landscape Ecology, 10(6): 363-379

ONCFS, 2015 : Fiches techniques – Indicateurs de changement écologique (ICE)

Oppelt et Mauser, 2004: Hyperspectral monitoring of physiological parameters of wheat during a vegetation period using AVIS data, *International Journal of Remote Sensing* Pages 145-159

Ose et Deshayes, 2015 : Détection et cartographie des coupes rases par télédétection satellitaire. Guide méthodologique, UMR TETIS, Irstea. 56 p + annexes.

Sriwongsitanon et *al.*, 2016 : Comparing the Normalized Difference Infrared Index (NDII) with root zone storage, Hydro. Earth Syst. Sci., 20, 3361–3377, 2016

Storey et al 2016: models of structure-related biochemicals and pigments for classification of trees. *Remote Sensing of Environment*, Volume 186, 1 December 2016, Pages 121-122

Verbesselt et *al.,* 2010: Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. Remote Sensing of Environment, 114, 106-115.

Zhou X., H. Guan., H. Xie, J. L. Wilson. 2009: Analysis and optimization of NDVI definitions and areal fraction models in remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 30 :3, pages 721-751.

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des zones étudiées en forêt public et privée

Figure 2 : Coupe rase réalisée en forêt des Landes (Larrousiney, 09/01/08, Wikimedia Commons)

Figure 3 : Distribution normale des valeurs de pixels d'une image associée à la perte et au regain de végétation.

Figure 4 : Chaine de traitement de la détection des interventions sylvicoles par méthode bi-dates

Figure 5 : Schéma théorique de l'évolution de l'activité chlorophyllienne durant le processus de régénération d'une parcelle.

Figure 6 : Chaine de traitement de la classification supervisée réalisé les images landast-8 de Bois-Landry entre 2013 et 2016

Figure 7 : Schéma du protocole de terrain lors des missions de contrôle et validation

Figure 8 : Synthèse des détections de certitude 2 et 3 pour le NDVI, NDII, et EVI à Bailleau (Mise en page Cédric Patinaud IRTEA Nogent)

Figure 9 : Synthèse des détections de certitude 2 et 3 pour le NDVI, NDII, et EVI à Bois-Landry (Mise en page Cédric Patinaud IRTEA Nogent)

Figure 10 : Synthèse des détections de certitude 2 et 3 pour le NDVI, NDII, et EVI à Marchenoir (Mise en page Cédric Patinaud IRTEA Nogent)

Figure 11 : Photo prise le 28 juillet 2018 à 14h 42mn en forêt privée à Bailleau (Bambo FOFANA)

Figure 12 : Evolution temporelle du NDII sur un échantillon du BDSOR en forêt d'Orléans

Figure 13 : Evolution temporelle du NDII sur les parcelles de la propriété du Bois-Landry

Figure 14 : Histogramme des groupes NDVI par Parcelles selon les valeurs de l'écart-type moyen

Figure 15 : Construction et enrichissement d'une base de données sur les interventions sylvicoles

Figure 16 : Classification supervisée par Random Forest des interventions sylvicoles à Bois-Landry (2013 à 2016 avec la série d'image Landsat8)

Listes des tableaux

Tableau 1 : Résolutions spatiales et spectrales des bandes sur OLI et MSI

Tableau 2 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles à Bailleau (28)

Tableau 3 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles à Bois-Landry (28)

Tableau 4 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles à Marchenoir (41)

Tableau 5 : Périodes et images utilisées pour la détection des interventions sylvicoles en Forêts domaniales d'Orléans et de Montargis (45)

Tableau 6 à 12 : Matrices de confusion sur des zones étudiées

Tableau 13 : Bilan annuel de la santé des forêts en région Centre-Val de Loire

Liste des annexes

Annexe 1 : Les partenaires de IRSTEA dans le cadre du projet ReForest

Annexe 2 : Tableau de synthèse des surfaces forestière et taux de boisement en région Centre-Val de Loire

Annexe 3 : Résumé des périodes de détections et des dates d'images pour chaque massif étudié lors du stage (*DRAAF et UMR TETIS*)

Annexe 4 : Présentation des codes qui ont permis l'extraction des indices de végétations.

Annexe 5 : Détails des commandes effectués pour l'organisation des données et la création de séries temporelle

Annexe 6 : Détails de la statistique zonale réalisée sur R à partir des Polygones de nos zones d'intérêts

Annexe 7 : D'autres matrices de confusion pour Bailleau, Bois-Landry et Marchenoir

Liste des scripts

Script 1 : Commande pour le téléchargement automatique des images

Script 2 : Lignes de commande pour extraire les archives et nettoyer les répertoires

Script 3 : Lecture du tableau de données au format texte (.txt) sur R

Script 4 : Classification (hclust) et affichage (plot hc) de l'arbre de proximité

Script 5 : Classification (hclust) et affichage (plot hc) de l'arbre de proximité

Script 6 : Seuils de détection interventions sylvicoles, regain de végétation à Bois-Landry

Annexes

Annexe 1 : Les partenaires de IRSTEA dans le cadre du projet ReForest.

Le projet Reforest est piloté au sein d'IRSTEA (Nogent-Sur-Vernisson) par l'unité de recherche EFNO, en partenariat avec les organismes publics et privés suivants : ArboCentre, le Centre Régional de la Propriété Forestière d'Ile-de-France et du Centre-Val de Loire (CRPF), la Délégation Interrégionale de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS), la Fédération Régionale des Chasseurs du Centre-Val de Loire (FRCCVL), Géo-Hyd (Antea Group) et l' Office National des Forêts (ONF). A ces acteurs principaux, sont également associées la DRAAF Centre-Val de Loire, les 6 Directions Départementales des Territoires (DDT) et les 6 Fédérations Départementales des Chasseurs (FDC) de la région Centre-Val de Loire (18, 28, 36, 37, 41, 45).

Annexe 2 : Tableau de synthèse des surfaces forestière et taux de boisement en région Centre-Val de Loire

Unité géographique	Surface forestière (x 1000 ha)	Taux de boisement	Forêt privée		Nbre d'unités cynégétiques	
			(x 1000 ha)	Taux	Massif	Sous-Massif
Cher	184 ± 9	25 %	155 ± 9	84 %	13	77
Eure-et-Loir	74 ± 7	12 %	63 ± 8	85 %	6	13
Indre	133 ± 9	19 %	120 ± 10	90 %	5	22
Indre-et-Loire	151 ± 8	24 %	133 ± 9	88 %	25	118
Loir-et-Cher	233 ± 8	36 %	216 ± 8	93 %	11	43
Loiret	193 ± 9	28 %	153 ± 9	70 %	14	35
Région CVL	**967 ± 21**	**24 %**	**839 ± 22**	**87 %**	**74**	**308**

Sources : IGN - Les résultats des campagnes d'inventaire 2009 à 2013 et FDCs - SDGS

Annexe 3 : Résumé des périodes de détections et des dates d'images pour chaque massif étudié lors du stage (*DRAAF et UMR TETIS*).

	Version initiale		Version améliorée	
	Période et satellite	**Dates des images**	**Période et satellite**	**Dates des images**
Bailleau	P1 2013-2014 : Landsat 8	04/08/13 et 08/09/14	P1 2013-2014 : Landsat 8	10/07/13 et 19/05/14
	P2 2014-2015 : Landsat 8	08/09/14 et 27/09/15	P2 2014-2015 : Landsat 8	19/05/14 et 30/06/15
	P3 2015-2016 :Landsat 8	30/06/15 au 18/07/16	P3 2015-2016 :Landsat 8	30/06/15 et 18/07/16
	P4 2016-2017 : Sentinel 2	12/08/16 et 18/06/17	P4 2016-2017 : Sentinel 2	04/05/16 et 18/06/17
	P5 2017-2018 : Sentinel 2	18/06/17 et 26/06/18	P5 2017-2018 : Sentinel 2	18/06/17 et 25/06/18
Bois Landry	P1 2013-2014 : Landsat 8	04/08/13 et 08/09/14	P1 2013-2014 : Landsat 8	10/07/13 et 19/05/14
	P2 2014-2015 : Landsat 8	08/09/14 et 27/09/15	P2 2014-2015 : Landsat 8	19/05/14 et 30/06/15
	P3 2015-2016 : Landsat 8	30/06/15 au 18/07/16	P3 2015-2016 :Landsat 8	30/06/15 et 18/07/16
	P4 2016-2017 : Sentinel 2	12/08/16 et 18/06/17	P4 2016-2017 : Landsat 8	18/07/16 et 19/06/17
	P5 2017-2018 : Sentinel 2	18/06/17 et 19/05/18	P5 2017-2018 : Sentinel 2	18/06/17 et 25/06/15
Marchenoir	P1 2013-2014 : Landsat 8	04/08/13 et 08/09/14	P1 2013-2014 : Landsat 8	10/07/13 et 19/05/14
	P2 2014-2015 : Landsat 8	08/09/14 et 27/09/15	P2 2014-2015 : Landsat 8	19/05/14 et 30/06/15
	P3 2015-2016 : Landsat 8	30/06/15 au 18/07/16	P3 2015-2016 : Landsat 8	30/06/15 et 18/07/16
	P4 2016-2017 : Sentinel 2	12/08/16 et 18/06/17	P4 2016-2017 : Sentinel 2	04/05/16 et 18/06/17
			P4 2017-2018 : Sentinel 2	12/08/16 et 18/06/17
	P5 2017-2018 : Sentinel 2	18/06/17 et 19/05/18	P5 2017-2018 : Sentinel 2	18/06/17 et 25/06/18

Annexe 4 : Présentation des codes qui ont permis l'extraction des indices de végétations.

```
TITLE Landsat8 Indices processing
COLOR 0F
REM param-1 : repertoire images
REM ------------------------------
REM vector file reference
REM ------------------------------

SET vecref=F:/Zone_interet_28_41_45/Zone28_41_45.shp

REM Liste des repertoires images
REM ------------------------------
SET LandsatData=%1
FOR %%i IN (%LandsatData%) DO (SET basename=%%~ni)
ECHO %basename%
SET dirimg=%cd%\%1
ECHO %dirimg%
REM Temporary directory
REM ------------------------------
IF NOT EXIST (%dirimg%\temp_process) MKDIR %dirimg%\temp_process
REM Output directory
REM ------------------------------
IF NOT EXIST (%dirimg%\temp_process) MKDIR %dirimg%\Traitement_Indices
DIR /s/b %dirimg%\*.tif > %dirimg%\list_img.txt

REM Clip files (extent from vector file)
REM ------------------------------

FOR /f %%i in (%dirimg%\list_img.txt) DO (CALL otbcli_ExtractRoi -in %%i ^
                                  -out %dirimg%\temp_process\%%~ni_clip.tif ^
                                 -mode fit -mode.fit.vect %vecref%)
FOR %%i IN (%dirimg%\temp_process\*PENTE*_clip.tif) DO (SET filename=%%~nxi)
ECHO %filename%
REM Radiometrics Indices

REM NDVI
REM ------------------------------

CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%filename%  %dirimg%\temp_process\%basename%_NUA_clip.tif
^
                 -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_NDVI.tif int16 ^
                 -exp "((im1b5!=-10000 && im1b4!=-10000) && ((im1b5+im1b4)!=0) && im2b1==0)?10000*
                 (im1b5-im1b4)/(im1b4+im1b5):-30000"
REM EVI
REM ------------------------------

CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%filename%  %dirimg%\temp_process\%basename%_NUA_clip.tif
^
            -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_EVI.tif     int16 ^
                        -exp "((im1b5!=-10000 && im1b4!=-10000 && im1b2!=-10000) &&
im2b1==0)?10000*2.5*(im1b5-im1b4)/(im1b5+6*im1b4-7.5*im1b2+1):-30000"

REM SAVI
REM ------------------------------

CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%filename%  %dirimg%\temp_process\%basename%_NUA_clip.tif
^
        -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_SAVI.tif int16 ^
        -exp "((im1b5!=-10000 && im1b4!=-10000) &&im2b1==0)?15000*(im1b5+im1b4)/(im1b5+im1b4+0.5):-
30000"
REM NDII
REM ------------------------------

CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%filename%  %dirimg%\temp_process\%basename%_NUA_clip.tif
^
                 -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_NDII.tif int16 ^
                 -exp "((im1b5!=-10000 && im1b6!=-10000) && ((im1b5+im1b6)!=0) && im2b1==0)?10000*
                 (im1b5-im1b6)/(im1b5+im1b6):-30000
```

```
REM PSRI-NIR
REM ------------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%filename%  %dirimg%\temp_process\%basename%_NUA_clip.tif
^
 -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_PSRI-NIR.tif int16 ^
-exp "((im1b5!=-10000 && im1b4!=-10000 && im1b2!=-10000) && im2b1==0)?10000*(im1b4-   im1b2)/(im1b5):-
30000"




REM LAI-SAVI
REM ------------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%filename%  %dirimg%\temp_process\%basename%_NUA_clip.tif
^
                -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_LAI-SAVI.tif int16 ^
                -exp "((im1b5!=-10000 && im1b4!=-10000) && im2b1==0)?(-10000*log(0.371+1.5*
                (im1b5-im1b4))/(im1b5+im1b4+0.5))/2.4: -30000"
DEL %dirimg%\temp_process\*.tif
RMDIR %dirimg%\temp_process
```

Extraction d'indices avec des images Landsat-8 à partir d'un batch sous Windows

```
TITLE S2 Indices processing

COLOR 0F

REM param-1 : repertoire images
REM ------------------------------
REM vector file reference
REM ------------------------------
SET vecref=F:/Zone_interet_28_41_45/Zone28_41_45.shp
REM Liste des repertoires images
REM ------------------------------
SET test=%1
FOR %%i IN (%test%) DO (SET basename=%%~ni)
ECHO %basename%
SET dirimg=%cd%\%1
ECHO %dirimg%
EM Temporary directory
REM ------------------------------
IF NOT EXIST (%dirimg%\temp_process) MKDIR %dirimg%\temp_process
REM Output directory
REM ------------------------------
IF NOT EXIST (%dirimg%\temp_process) MKDIR %dirimg%\Traitement_Indices
DIR /s/b %dirimg%\*.tif > %dirimg%\list_img.txt
REM Clip files (extent from vector file)
REM ------------------------------
FOR /f %%i in (%dirimg%\list_img.txt) DO (CALL otbcli_ExtractRoi -in %%i ^
                                        -out %dirimg%\temp_process\%%~ni_clip.tif ^
                                          -mode fit -mode.fit.vect %vecref%)

REM Superimpose to 10m resolution
CALL otbcli_Superimpose  -inr %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif -inm
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B5_clip.tif -out
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B5_10m_clip.tif
CALL otbcli_Superimpose  -inr %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif -inm
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B6_clip.tif -out %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B6_10m_clip.t

CALL otbcli_Superimpose  -inr %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif -inm
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B11_clip.tif -
out%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B11_10m_clip.tif

REM Radiometric Indices
REM NDVI
REM ------------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B8_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif %dirimg%\temp_process\%basename%_CLM_R1_clip.tif ^
                -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_NDVI.tif int16 ^
                 -exp "((im1b1!=-10000 && im2b1!=-10000) && ((im1b1+im2b1)!=0) && im3b1==0)?10000*
                       (im1b1-im2b1)/(im1b1+im2b1):-30000
REM EVI
REM ------------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B8_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B2_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_CLM_R1_clip.tif ^
                -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_EVI.tif int16 ^
                 -exp "((im1b1!=-10000 && im2b1!=-10000 && im3b1!=-10000) && im4b1==0)?10000*2.5*
                       (im1b1-im2b1)/(im1b1+6*im2b1-7.5*im3b1+1):-30000"
REM SAVI
REM ------------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B8_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif %dirimg%\temp_process\%basename%_CLM_R1_clip.tif ^
                -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_SAVI.tif int16 ^
                 -exp "((im1b1!=-10000 && im2b1!=-10000) && im3b1==0)?15000*
                       (im1b1-im2b1)/(im1b1+im2b1+0.5):-30000"
REM NDII
REM ------------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B8_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B11_10m_clip.tif %dirimg%\temp_process\%basename%_CLM_R1_clip.tif ^
                -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_NDII.tif int16 ^
                 -exp "((im1b1!=-10000 && im2b1!=-10000) && ((im1b1+im2b1)!=0) &&    im3b1==0)?10000*
                      (im1b1-im2b1)/(im1b1+im2b1):-30000"
REM PSRI-NIR
REM ------------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B2_clip.tif %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B8_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_CLM_R1_clip.tif ^
                -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_PSRI-NIR.tif int16 ^
```

```
-exp "((im1b1!=-10000 && im2b1!=-10000 && im3b1!=-10000) && im4b1==0)?10000*(im1b1-im2b1)/(im3b1):-
30000"

REM LAI-SAVI
REM -----------------------------
CALL otbcli_BandMath -il %dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B8_clip.tif
%dirimg%\temp_process\%basename%_FRE_B4_clip.tif %dirimg%\temp_process\%basename%_CLM_R1_clip.tif ^
                -out %dirimg%\Traitement_Indices\%basename%_LAI-SAVI.tif int16 ^
                 -exp "((im1b1!=-10000 && im2b1!=-10000) && im3b1==0)?(-10000*log(0.371+1.5*
                       (im1b1-im2b1))/(im1b1+im2b1+0.5))/2.4:-30000"

DEL %dirimg%\temp_process\*.tif
RMDIR %dirimg%\temp_process
```

Extraction d'indices avec des images Sentinel-2 à partir d'un batch sous Windows

Annexe 5 : Détails des commandes effectués pour l'organisation des données et la création de séries temporelle

```
#Création de répertoires Sur terminal
mkdir .\EVI_2017_S2 .\NDVI_2017_S2 .\SAVI_2017_S2 .\NDII_2017_S2
mkdir .\EVI_2013_L8 .\NDVI_2013_L8 .\SAVI_2013_L8 .\NDII_2013_L8

#Manipulation de fichiers (copy, move) organisation des données de la série temporelle
#Données par année Landsat8
for /f %i in ('dir /s /b *MetropoleD0007H0007*EVI.tif *MetropoleD0007H0007*NDVI.tif *MetropoleD0007H0007*SAVI.tif *MetropoleD0007H0007*NDII.tif')
do copy "%~fi" "F:\Landsat_data\Tuiles_2015_L8\MetropoleD0007H0007_2015"
for /f %i in ('dir /s /b *MetropoleD0005H0007*EVI.tif *MetropoleD0005H0007*NDVI.tif *MetropoleD0005H0007*SAVI.tif *MetropoleD0005H0007*NDII.tif')
do copy "%~fi" "F:\Landsat_data\Tuiles_2015_L8\MetropoleD0005H0007_2015"

#Données pour toute la série avec les différentes Tuiles Landsat8
for /f %i in ('dir /s /b *MetropoleD0006H0007*EVI.tif') do copy "%~fi" "F:\Landsat_Data\Serie_Tuiles\MetropoleD0006H0007\Serie_EVI"
for /f %i in ('dir /s /b *MetropoleD0006H0007*NDII.tif') do copy "%~fi" "F:\Landsat_Data\Serie_Tuiles\MetropoleD0006H0007\Serie_NDII"
for /f %i in ('dir /s /b *MetropoleD0006H0007*SAVI.tif') do copy "%~fi" "F:\Landsat_Data\Serie_Tuiles\MetropoleD0006H0007\Serie_SAVI"
for /f %i in ('dir /s /b *MetropoleD0006H0007*NDVI.tif') do copy "%~fi" "F:\Landsat_Data\Serie_Tuiles\MetropoleD0006H0007\Serie_NDVI"

#Données par année Sentinel2
for /f %i in ('dir /s /b *MetropoleD0007H0007*EVI.tif') do copy "%~fi" "F:\Sentinel2_theia_Data\MetropoleD0007H0007_2017"

#Données pour toute la série avec les différentes Tuiles Sentinel2
for /f %i in ('dir /s /b *T30TYT*EVI.tif') do copy "%~fi" "F:\Traitements\Sentinel2\Sentinel2_Serie_Tuiles\T30TYT\Serie_EVI"
for /f %i in ('dir /s /b *T30TYT*NDII.tif') do copy "%~fi" "F:\Traitements\Sentinel2\Sentinel2_Serie_Tuiles\T30TYT\Serie_NDII"
for /f %i in ('dir /s /b *T30TYT*NDVI.tif') do copy "%~fi" "F:\Traitements\Sentinel2\Sentinel2_Serie_Tuiles\T30TYT\Serie_NDVI"
for /f %i in ('dir /s /b *T30TYT*SAVI.tif') do copy "%~fi" "F:\Traitements\Sentinel2\Sentinel2_Serie_Tuiles\T30TYT\Serie_SAVI"
```

Annexe 6 : Détails de la statistique zonale réalisée sur R à partir des Polygones de nos zones d'intérêts.

```
library(sp)
library(raster)
library(rgdal)
library(rgeos)
library(maptools)
library(gdalUtils)
library(ggplot2)

setwd("F:/Traitements/Landsat8/Indices_Spectraux")
Echantillon_ONF_45<-
readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileL8_MetropoleD0006H0007/Echantillon_ONF_45.shp"
)
Echantillon_28<-readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/Bois_Landry_Limite_parcelle.shp")
Echantillon_41<-readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_41/Echantillon_41.shp")
Echantillon_45<-readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_45/Echantillon45.shp")
BDSOR_ONF45<-
readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileL8_MetropoleD0006H0007/BDSOR_ORL_MON_2011_2017
/BDSOR_ORL_MON_2011-2017.shp")
Echantillon_S2_Borde<-
readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileS2_T31TDN/Echantillon_S2_ONF_Bordes.shp")

#lire les images multibandes Landsat8
ndvi_multi_l8<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/Tuile18_MetropoleD0006H0007/Serie_NDVI/NDVI_Merge.tif
")
ndii_multi_l8<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/Tuile18_MetropoleD0006H0007/Serie_NDII/NDII_Merge.tif
")
evi_multi_l8<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/Tuile18_MetropoleD0006H0007/Serie_EVI/EVI_Merge.tif")
savi_multi_l8<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/Tuile18_MetropoleD0006H0007/Serie_SAVI/SAVI_Merge.tif
")

#Foret privees
evi_l8_28<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileL8_MetropoleD0005H0007/Serie_EVI/EVI_Merge.tif"
)
ndii_l8_28<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileL8_MetropoleD0005H0007/Serie_NDII/NDII_Merge.ti
f")
ndvi_l8_28<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileL8_MetropoleD0005H0007/Serie_NDVI/NDVI_Merge.ti
f")
savi_l8_28<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileL8_MetropoleD0005H0007/Serie_SAVI/SAVI_Merge.ti
f")

#extraire les valeurs depuis les polygones forêts domaniales
Tab_BDSOR45<-extract(evi_multi_l8, BDSOR_ONF45, fun=mean)
Tab1_ONF45<-extract(ndvi_multi_l8, Echantillon_ONF_45, fun=sd)
TabFPub45sup05<-extract(ndvi_multi_l8, Echantillon45_05)
TabFPub45sup10<-extract(ndvi_multi_l8, Echantillon45_10)
TabFPub45sup15<-extract(ndii_multi_l8, Echantillon45_15)
#extraire les valeurs depuis les polygones forets privees
TabCRPF28<-extract(ndvi_l8_28, Echantillon_28, fun= sd)
TabCRPF41<-extract(ndvi_l8_41, Echantillon45_15)
TabCRPF45<-extract(ndvi_l8_45, Echantillon45_15)
#Sauvegarde du tableau de donn?es
write.csv(TabCRPF28, file=
"F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileL8_MetropoleD0005H0007/Tableau_ndvi_L8_Sd_CRPF_Bois_L
andry.csv", quote = TRUE)
write.csv(Tab_BDSOR45, file=
"F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileL8_MetropoleD0006H0007/Tableau_evi_Sd_BDSOR45.csv",
quote = TRUE)
#TabFPI45<- extract(ndii_multi_l8, FPriv45, na.rm=TRUE)
# create an empty matrix to store the mean spectra
ms0 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon45_05$IIDT_UG)), ncol = nlayers(ndvi_multi_l8))
ms <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon_28$Fornom)), ncol = nlayers(ndvi_l8_28))
ms1 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon45_10$IIDT_UG)), ncol = nlayers(ndvi_multi_l8))
ms2 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon45_15$IIDT_UG)), ncol = nlayers(ndii_multi_l8))
```

```
#calculer les moyennes pour chaque polygone et chaque bande
for (i in as.numeric(unique(Echantillon45_05$IIDT_UG))){
  df=as.data.frame(TabFPub45sup05[i])
  ms0[i,] <- colMeans(df)
}
for (i in as.numeric(unique(Echantillon_28$Fornom))){

  df=as.data.frame(TabCRPF28[i])


  ms[i,] <- colMeans(df)
}

for (i in as.numeric(unique(Echantillon45_10$IIDT_UG))){
  df=as.data.frame(TabFPub45sup10[i])
  ms1[i,] <- colMeans(df)
}

for (i in as.numeric(unique(Echantillon45_15$IIDT_UG))){
  df=as.data.frame(TabFPub45sup15[i])
  ms2[i,] <- colMeans(df)
}
#faire le graphe
# Specify the row- and column names
rownames(ms) <- unique(Echantillon_28$Fornom)
colnames(ms) <- c(1:10) #ajouter les dates

rownames(TabCRPF28) <- (Echantillon_28$Id_Parcell)
colnames(TabCRPF28) <- c(1:10) #ajouter les dates

rownames(Tab1BDSOR45) <- (BDSOR_ONF45$IIDT_UG)
colnames(Tab1BDSOR45) <- c(1:12) #ajouter les dates

#create a vector of color for the land use land cover classes and will resuse it for other plotting
mycolor <- c("#B6EFB6","#080E5B","#B6EFB6","#080E5B","#518996",'#CC6600',  'blue','red','purple',
             '#336600','green','#3399FF','cyan', '#66C633','#CC6600',  'blue', 'magenta',   'orange',
             "#B6EFB6",'blue','magenta', '#FFB6F1','#87036E',  'blue', 'magenta', '#FFB6F1','#87036E',
             "#ADD39D","#1B7D34","#E5F0DA","#142F1B","#3FA136",'magenta', '#FFB6F1','#87036E')

# First create an empty plot
plot(1, ylim=c(0, 6000), xlim = c(1,10), xlab = "Annees", ylab = "NDVI*10000", xaxt='n')
plot(1, ylim=c(0, 3000), xlim = c(1,12), xlab = "Annees", ylab = "SAVI*10000", xaxt='n')

# Custom X-axis
#dates<-c('12/07/2013',  '20/08/2013','08/09/2014','03/10/2014',   '19/10/2014','02/07/2015',
 #        '26/08/2015','11/09/2015',      '09/06/2016',    '12/08/2016','29/09/2016','31/10/2016')

dates<-c('10/07/2013',   '08/09/2014','30/06/2015','01/08/2015',   '27/09/2015','09/06/2016',
         '18/07/2016','13/09/2016',       '06/10/2016',    '31/10/2016')
axis(1, at=1:10, lab=(dates))

#add the other spectra
for (i in 1:nrow(TabCRPF28)){
  lines(TabCRPF28[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col = mycolor[i])
}

for (i in 1:nrow(Tab1BDSOR45)){
  lines(Tab1BDSOR45[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col = mycolor[i])
}

for (i in 1:nrow(ms2)){
  lines(ms2[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col = mycolor[i])
}
# Title
title(main=paste("Evolution de l'ecart-type du NDVI sur la propri?t? du Bois Landry (28) serie L8 "))
title(main=paste("Evolution de l'ecart-type du savi sur Echantillon BDSOR 45 série Landast"))

#Legend
legend("bottomright", rownames(TabBDSOR45), cex=0.5, col= mycolor, ncol= 5, lty = 1, lwd =3, bty = 'n')
legend("topright", rownames(TabCRPF28), cex=0.5, col= mycolor, ncol= 6, lty = 1, lwd =3, bty = 'n')
write.csv(ms0,  file=  "F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/Tableau_Ug_Onf_Sup05ha.csv",  quote  =
TRUE)
```

Scripts R pour la Statistique zonale et les profils temporels du NDVI sur les images Landsat-8

```
library(sp)
library(raster)
library(rgdal)
library(rgeos)
library(maptools)
library(gdalUtils)
library(ggplot2)

#Lecture des fichiers de formes
Echantillon45 <-
readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileS2_T31UDP/Echantillon_45_S2.shp")
Echantillon_28<-
readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/T31UCP/Bois_Landry_Limite_parcelle.shp")
Echantillon_41<-readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_41/Echantillon_41.shp")
Echantillon_45<-readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_45/Echantillon45.shp")
Echantillon_S2_Borde<-
readOGR("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileS2_T31TDN/Echantillon_S2_ONF_Bordes.shp")
#lire les images multibandes
#Serie Echantillon ONF 45
evi_multi_s2_45<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileS2_T31UDP/Serie_EVI/EVI_Merge.tif")
ndii_multi_s2_45<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileS2_T31UDP/Serie_NDII/NDII_Merge.tif")
ndvi_multi_s2_45<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileS2_T31UDP/Serie_NDVI/NDVI_Merge.tif")
#Serie Echantillon 28
evi_muti_s2_28<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileS2_T31TDN/Serie_EVI/EVI_Merge.tif")
ndii_multi_s2_28<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/T31UCP/Serie_NDII/NDII_Merge.tif")
ndvi_multi_s2_28<-
brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileS2_T31UCP/Serie_NDVI/NDVI_Merge.tif")
#Serie Echantillon 41
evi_muti_s241<- brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_41/T31UCP/Serie_EVI/EVI_Merge.tif")
ndii_multi_s241<- brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_41/T31UCP/Serie_NDII/NDII_Merge.tif")
ndvi_multi_s241<- brick("F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_41/T31UCP/Serie_NDVI/NDVI_Merge.tif")
#extraire les valeurs depuis les polygones forêts domaniales
TabFPub45<-extract(ndii_multi_s245, Echantillon_45, fun=mean)
TabFPub45Ert <-extract(ndvi_multi_S2,Echantillon_S2_Borde,fun=sd)
TabFPub45sup05<-extract(ndvi_multi_s245, Echantillon45_05)
TabFPub45sup15<-extract(ndvi_multi_s245, Echantillon45_15)
TabFPub45sup20<-extract(ndvi_multi_s245, Echantillon45_20)

#extraire les valeurs depuis les polygones forets privees
TabCRPF28S2<-extract(ndvi_multi_s228, Echantillon_28, fun= sd)
TabCRPF41<-extract(ndvi_multi_s241, Echantillon_41)

#Sauvegarde du tableau de donn?es
write.csv(TabCRPF28S8, file=
"F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/TuileS2_T31UCP/Tableau_ndvi_S2_Sd_CRPF_Bois_Landry.csv",
quote = TRUE)
write.csv(TabFPub45Ert, file=
"F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/TuileS2_T31TDN/Tableau_ndvi_S2_Sd_ONF_45_Bordes.csv", quote
= TRUE)

# create an empty matrix to store the mean spectral
#Forest ONF 45
ms0 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon45$IIDT_UG)), ncol = nlayers(ndii_multi_s2_45))
ms  <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon45$IIDT_UG)), ncol = nlayers(ndii_multi_s2_45))
ms1 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon45_15$IIDT_UG)), ncol = nlayers(ndvi_multi_s2_45))
ms2 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon45_20$IIDT_UG)), ncol = nlayers(ndvi_multi_s2_45))
#Forets privees
ms3 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon_28$Fornom)), ncol = nlayers(ndvi_multi_s2_28))
ms4 <- matrix(0, nrow = length(unique(Echantillon_41$Fornom)), ncol = nlayers(ndvi_multi_s2_41))

#######################################################
for (i in as.numeric(unique(Echantillon45$IIDT_UG))){
  df=as.data.frame(TabFPub45[i])
  ms0[i,] <- colMeans(df)
}

for (i in as.numeric(unique(Echantillon45_05$IIDT_UG))){
  df=as.data.frame(TabFPub45sup05sd[i])
  ms[i,] <- colfun(df)
}
```

```
#######################################################
for (i in as.numeric(unique(Echantillon45_15$IIDT_UG))){
  df=as.data.frame(TabFPub45sup15[i])
  ms1[i,] <- colMeans(df)
}
#######################################################
for (i in as.numeric(unique(Echantillon45_20$IIDT_UG))){
  df=as.data.frame(TabFPub45sup20[i])
  ms2[i,] <- colMeans(df)
}
write.csv(ms2, file= "F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_ONF_45/T31UDP/TableauS2_Ug_Onf_Sup20ha.csv",
quote = TRUE)
#######################################################
for (i in as.numeric(unique(Echantillon_28$Fornom))){
  df=as.data.frame(TabCRPF28[i])
  ms3[i,] <- colMeans(df)
}
#write.csv(ms3, file= "F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_28/T31UCP/TableauS2_CRPF.csv", quote =
TRUE)

#######################################################
for (i in as.numeric(unique(Echantillon_41$Fornom))){
  df=as.data.frame(TabCRPF41[i])
  ms4[i,] <- colMeans(df)
}
write.csv(ms4, file= "F:/Zone_interet_28_41_45/Echantillon_CRPF_41/T31UCP/TableauS2_CRPF.csv", quote =
TRUE)

#######################################################
#faire le graphe
# Specify the row- and column names
rownames(TabCRPF28S2) <- unique(Echantillon_28$Id_Parcell)
colnames(TabCRPF28S2) <- c(1:5) #ajouter les dates

rownames(TabFPub45Ert) <- unique(Echantillon45$IIDT_UG)
colnames(TabFPub45Ert) <- c(1:5) #ajouter les dates

rownames(ms1) <- unique(Echantillon45_15$IIDT_UG)
colnames(ms1) <- c(1:5) #ajouter les dates

rownames(ms2) <- unique(Echantillon45_20$IIDT_UG)
colnames(ms2) <- c(1:5) #ajouter les dates

rownames(ms3) <- unique(Echantillon_28$Fornom)
colnames(ms3) <- c(1:6) #ajouter les dates

rownames(ms4) <- unique(Echantillon_41$Fornom)
colnames(ms4) <- c(1:7) #ajouter les dates

#create a vector of color for the land use land cover classes and will resuse it for other plotting
mycolor <- c('red','purple','#000099','#336600','green','#3399FF','cyan', '#66C633', "#B2182B",
"#D6604D", "#F4A582","#FDDBC7", "#D1E5F0", "#92C5DE", "#4393C3", "#2166AC",'#CC6600',  'blue',
'magenta',   'orange', 'yellow')
# First create an empty plot
plot(0, ylim=c(-8000, 10000), xlim = c(1,8), xlab = "Annees", ylab = "NDII*10000", xaxt='n')

dates<-
c('04/05/2016','12/08/2016','22/08/2016','08/09/2016','21/09/2016','11/10/2016','31/10/2016','26/05/2017
','18/06/2017',  '22/08/2017',    '29/08/2017','16/10/2017')
#dates<-c('22/08/2016', '21/09/2016','26/05/2017', '18/06/2017','27/08/2017', '29/08/2017')
axis(1, at=1:8, lab=(dates))

#add the other spectra
for (i in 1:nrow(ms0)){
  lines(ms0[i,],type = "l", lwd =3, lty = 1, col= 'red')#, col = mycolor[i]
}

for (i in 1:nrow(TabFPub45Ert)){
  lines(TabFPub45Ert[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col ='green') #mycolor[i]
}

for (i in 1:nrow(ms1)){
  lines(ms1[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col = mycolor[i])
}
```

```
for (i in 1:nrow(ms2)){
  lines(ms2[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col = mycolor[i])
}

for (i in 1:nrow(ms3)){
  lines(ms3[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col = mycolor[i])
}

for (i in 1:nrow(ms4)){ lines(ms4[i,], type = "l", lwd =3, lty = 1, col = mycolor[i])
}

# Title
title(main=paste("Evolution des valeurs Moyennes du ndvi entre 2016 et 2017 ZI ONF 45"))

#Legend
legend("topright", rownames(ms3), cex=0.8, col= mycolor, ncol= , lty = 1, lwd =3, bty = 'n')
legend("bottomright", rownames(ms), cex=0.8, col= mycolor, ncol= , lty = 1, lwd =3, bty = 'n')
```

Scripts R pour la Statistique zonale et les profils temporels du NDVI sur les images Sentinel-2

Annexe 8 : Matrices de confusion pour Bailleau, Bois-Landry et Marchenoir.

Matrices de confusions des détections du NDVI avec les trois degrés de certitudes pour la période cinq à Bailleau

Nombre de DN1_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	158	14	172,0	91,9	8,1
O	50	16	66,0	24,2	75,8
Total général	208,0	30,0	238,0		
prec. Utilisateur	76,0	53,3			
err. Comm	24,0	46,7			
prec. Globale	73,1				
F-score	33,3				

Nombre de DN2_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	170	2	172,0	98,8	1,2
O	64	2	66,0	3,0	97,0
Total général	234,0	4,0	238,0		
prec. Utilisateur	72,6	50,0			
err. Comm	27,4	50,0			
prec. Globale	72,3				
F-score	5,7				

Nombre de DN3_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	172		172,0	100,0	0,0
O	63	3	66,0	4,5	95,5
Total général	235,0	3,0	238,0		
prec. Utilisateur	73,2	100,0			
err. Comm	26,8	0,0			
prec. Globale	73,5				
F-score	8,7				

Nombre de ALL_BIN	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	155	17	172,0	90,1	9,9
O	49	17	66,0	25,8	74,2
Total général	204,0	34,0	238,0		
prec. Utilisateur	76,0	50,0			
err. Comm	24,0	50,0			
prec. Globale	72,3				
F-score	34,0				

#1

Matrices de confusions des détections du NDII avec les trois degrés de certitudes pour la période cinq à Bailleau

Nombre de DN1_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	155	17	172,0	90,1	9,9
O	48	18	66,0	27,3	72,7
Total général	203,0	35,0	238,0		
prec. Utilisateur	76,4	51,4			
err. Comm	23,6	48,6			
prec. Globale	72,7				
F-score	35,6				

Nombre de DN2_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	172		172,0	100,0	0,0
O	60	6	66,0	9,1	90,9
Total général	232,0	6,0	238,0		
prec. Utilisateur	74,1	100,0			
err. Comm	25,9	0,0			
prec. Globale	74,8				
F-score	16,7				

Nombre de DN3_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	172		172,0	100,0	0,0
O	61	5	66,0	7,6	92,4
Total général	233,0	5,0	238,0		
prec. Utilisateur	73,8	100,0			
err. Comm	26,2	0,0			
prec. Globale	74,4				
F-score	14,1				

Nombre de ALL_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	150	22	172,0	87,2	12,8
O	46	20	66,0	30,3	69,7
Total général	196,0	42,0	238,0		
prec. Utilisateur	76,5	47,6			
err. Comm	23,5	52,4			
prec. Globale	71,4				
F-score	37,0				

#2

Matrices de confusions des détections du EVI avec les trois degrés de certitudes pour la période cinq à Bailleau

Nombre de DN1_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	150	22	172,0	87,2	12,8
O	52	14	66,0	21,2	78,8
Total général	202,0	36,0	238,0		
prec. Utilisateur	74,3	38,9			
err. Comm	25,7	61,1			
prec. Globale	68,9				
F-score	27,5				

Nombre de DN2_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	171	1	172,0	99,4	0,6
O	66	0	66,0	0,0	100,0
Total général	237,0	1,0	238,0		
prec. Utilisateur	72,2	0,0			
err. Comm	27,8	100,0			
prec. Globale	71,8				
F-score	0,0				

Nombre de DN3_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	170	2	172,0	98,8	1,2
O	66	0	66,0	0,0	100,0
Total général	236,0	2,0	238,0		
prec. Utilisateur	72,0	0,0			
err. Comm	28,0	100,0			
prec. Globale	71,4				
F-score	0,0				

Nombre de ALL_P5	**Détection**				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	142	30	172,0	82,6	17,4
O	52	14	66,0	21,2	78,8
Total général	194,0	44,0	238,0		
prec. Utilisateur	73,2	31,8			
err. Comm	26,8	68,2			
prec. Globale	65,5				
F-score	25,5				

#3

Matrices de confusions des détections du NDVI avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Marchenoir

Nombre de DN1_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	32	6	38,0	84,2	15,8
O	57	30	87,0	34,5	65,5
Total général	89,0	36,0	125,0		
prec. Utilisateur	36,0	83,3			
err. Comm	64,0	16,7			
prec. Globale	49,6				
F-score	48,8				

Nombre de DN2_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	37	1	38,0	97,4	2,6
O	81	6	87,0	6,9	93,1
Total général	118,0	7,0	125,0		
prec. Utilisateur	31,4	85,7			
err. Comm	68,6	14,3			
prec. Globale	34,4				
F-score	12,8				

Nombre de DN3_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	37	1	38,0	97,4	2,6
O	81	6	87,0	6,9	93,1
Total général	118,0	7,0	125,0		
prec. Utilisateur	31,4	85,7			
err. Comm	68,6	14,3			
prec. Globale	34,4				
F-score	12,8				

Nombre de ALL_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	31	7	38,0	81,6	18,4
O	57	30	87,0	34,5	65,5
Total général	88,0	37,0	125,0		
prec. Utilisateur	35,2	81,1			
err. Comm	64,8	18,9			
prec. Globale	48,8				
F-score	48,4				

#4

Matrices de confusions des détections du NDII avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Marchenoir

Nombre de DN1_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	33	5	38,0	86,8	13,2
O	53	34	87,0	39,1	60,9
Total général	86,0	39,0	125,0		
prec. Utilisateur	38,4	87,2			
err. Comm	61,6	12,8			
prec. Globale	53,6				
F-score	54,0				

Nombre de DN2_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	37	1	38,0	97,4	2,6
O	71	16	87,0	18,4	81,6
Total général	108,0	17,0	125,0		
prec. Utilisateur	34,3	94,1			
err. Comm	65,7	5,9			
prec. Globale	42,4				
F-score	30,8				

Nombre de DN3_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	36	2	38,0	94,7	5,3
O	74	13	87,0	14,9	85,1
Total général	110,0	15,0	125,0		
prec. Utilisateur	32,7	86,7			
err. Comm	67,3	13,3			
prec. Globale	39,2				
F-score	25,5				

Nombre de ALL_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	32	6	38,0	84,2	15,8
O	51	36	87,0	41,4	58,6
Total général	83,0	42,0	125,0		
prec. Utilisateur	38,6	85,7			
err. Comm	61,4	14,3			
prec. Globale	54,4				
F-score	55,8				

#5

Matrices de confusions des détections du EVI avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Marchenoir

Nombre de DN1_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	26	12	38,0	68,4	31,6
O	43	44	87,0	50,6	49,4
Total général	69,0	56,0	125,0		
prec. Utilisateur	37,7	78,6			
err. Comm	62,3	21,4			
prec. Globale	56,0				
F-score	61,5				

Nombre de DN2_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	37	1	38,0	97,4	2,6
O	76	11	87,0	12,6	87,4
Total général	113,0	12,0	125,0		
prec. Utilisateur	32,7	91,7			
err. Comm	67,3	8,3			
prec. Globale	38,4				
F-score	22,2				

Nombre de DN3_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	38		38,0	100,0	0,0
O	79	8	87,0	9,2	90,8
Total général	117,0	8,0	125,0		
prec. Utilisateur	32,5	100,0			
err. Comm	67,5	0,0			
prec. Globale	36,8				
F-score	16,8				

Nombre de ALL_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	26	12	38,0	68,4	31,6
O	42	45	87,0	51,7	48,3
Total général	68,0	57,0	125,0		
prec. Utilisateur	38,2	78,9			
err. Comm	61,8	21,1			
prec. Globale	56,8				
F-score	62,5				

#6

Matrices de confusions des détections du NDVI avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Bois-Landry

Nombre de DN1_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	70	11	81,0	86,4	13,6
O	32	10	42,0	23,8	76,2
Total général	102,0	21,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,6	47,6			
err. Comm	31,4	52,4			
prec. Globale	65,0				
F-score	31,7				

Nombre de DN2_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	80	1	81,0	98,8	1,2
O	37	5	42,0	11,9	88,1
Total général	117,0	6,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,4	83,3			
err. Comm	31,6	16,7			
prec. Globale	69,1				
F-score	20,8				

Nombre de DN3_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	80	1	81,0	98,8	1,2
O	37	5	42,0	11,9	88,1
Total général	117,0	6,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,4	83,3			
err. Comm	31,6	16,7			
prec. Globale	69,1				
F-score	20,8				

Nombre de ALL_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	69	12	81,0	85,2	14,8
O	30	12	42,0	28,6	71,4
Total général	99,0	24,0	123,0		
prec. Utilisateur	69,7	50,0			
err. Comm	30,3	50,0			
prec. Globale	65,9				
F-score	36,4				

#7

Matrices de confusions des détections du NDII avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Bois-Landry

Nombre de DN1_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	75	6	81,0	92,6	7,4
O	33	9	42,0	21,4	78,6
Total général	108,0	15,0	123,0		
prec. Utilisateur	69,4	60,0			
err. Comm	30,6	40,0			
prec. Globale	68,3				
F-score	31,6				

Nombre de DN2_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	79	2	81,0	97,5	2,5
O	40	2	42,0	4,8	95,2
Total général	119,0	4,0	123,0		
prec. Utilisateur	66,4	50,0			
err. Comm	33,6	50,0			
prec. Globale	65,9				
F-score	8,7				

Nombre de DN3_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	80	1	81,0	98,8	1,2
O	37	5	42,0	11,9	88,1
Total général	117,0	6,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,4	83,3			
err. Comm	31,6	16,7			
prec. Globale	69,1				
F-score	20,8				

Nombre de ALL_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	73	8	81,0	90,1	9,9
O	29	13	42,0	31,0	69,0
Total général	102,0	21,0	123,0		
prec. Utilisateur	71,6	61,9			
err. Comm	28,4	38,1			
prec. Globale	69,9				
F-score	41,3				

#8

Matrices de confusions des détections du EVI avec les trois degrés de certitudes pour la première période à Bois-Landry

Nombre de DN1_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	67	14	81,0	82,7	17,3
O	29	13	42,0	31,0	69,0
Total général	96,0	27,0	123,0		
prec. Utilisateur	69,8	48,1			
err. Comm	30,2	51,9			
prec. Globale	65,0				
F-score	37,7				

Nombre de DN2_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	79	2	81,0	97,5	2,5
O	40	2	42,0	4,8	95,2
Total général	119,0	4,0	123,0		
prec. Utilisateur	66,4	50,0			
err. Comm	33,6	50,0			
prec. Globale	65,9				
F-score	8,7				

Nombre de DN3_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	80	1	81,0	98,8	1,2
O	39	3	42,0	7,1	92,9
Total général	119,0	4,0	123,0		
prec. Utilisateur	67,2	75,0			
err. Comm	32,8	25,0			
prec. Globale	67,5				
F-score	13,0				

Nombre de ALL_P1	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total généra	prec. Prod.	err. Om.
N	65	16	81,0	80,2	19,8
O	26	16	42,0	38,1	61,9
Total général	91,0	32,0	123,0		
prec. Utilisateur	71,4	50,0			
err. Comm	28,6	50,0			
prec. Globale	65,9				
F-score	43,2				

#9

Matrices de confusions des détections du NDVI avec les trois degrés de certitudes pour la période deux à Bois-Landry

Nombre de DN1_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	81	0	81,0	100,0	0,0
O	39	3	42,0	7,1	92,9
Total général	120,0	3,0	123,0		
prec. Utilisateur	67,5	100,0			
err. Comm	32,5	0,0			
prec. Globale	68,3				
F-score	13,3				

Nombre de DN2_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	81	0	81,0	100,0	0,0
O	39	3	42,0	7,1	92,9
Total général	120,0	3,0	123,0		
prec. Utilisateur	67,5	100,0			
err. Comm	32,5	0,0			
prec. Globale	68,3				
F-score	13,3				

Nombre de DN3_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	76	5	81,0	93,8	6,2
O	38	4	42,0	9,5	90,5
Total général	114,0	9,0	123,0		
prec. Utilisateur	66,7	44,4			
err. Comm	33,3	55,6			
prec. Globale	65,0				
F-score	15,7				

Nombre de ALL_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	75	6	81,0	92,6	7,4
O	35	7	42,0	16,7	83,3
Total général	110,0	13,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,2	53,8			
err. Comm	31,8	46,2			
prec. Globale	66,7				
F-score	25,5				

#10

Matrices de confusions des détections du NDII avec les trois degrés de certitudes pour la période deux à Bois-Landry

Nombre de DN1_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	77	4	81,0	95,1	4,9
O	35	7	42,0	16,7	83,3
Total général	112,0	11,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,8	63,6			
err. Comm	31,3	36,4			
prec. Globale	68,3				
F-score	26,4				

Nombre de DN2_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	81	0	81,0	100,0	0,0
O	38	4	42,0	9,5	90,5
Total général	119,0	4,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,1	100,0			
err. Comm	31,9	0,0			
prec. Globale	69,1				
F-score	17,4				

Nombre de DN3_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	75	6	81,0	92,6	7,4
O	38	4	42,0	9,5	90,5
Total général	113,0	10,0	123,0		
prec. Utilisateur	66,4	40,0			
err. Comm	33,6	60,0			
prec. Globale	64,2				
F-score	15,4				

Nombre de ALL_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	71	10	81,0	87,7	12,3
O	33	9	42,0	21,4	78,6
Total général	104,0	19,0	123,0		
prec. Utilisateur	68,3	47,4			
err. Comm	31,7	52,6			
prec. Globale	65,0				
F-score	29,5				

#11

Matrices de confusions des détections du EVI avec les trois degrés de certitudes pour la période deux à Bois-Landry

Nombre de DN1_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	80	1	81,0	98,8	1,2
O	39	3	42,0	7,1	92,9
Total général	119,0	4,0	123,0		
prec. Utilisateur	67,2	75,0			
err. Comm	32,8	25,0			
prec. Globale	67,5				
F-score	13,0				

Nombre de DN2_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	81	0	81,0	100,0	0,0
O	41	1	42,0	2,4	97,6
Total général	122,0	1,0	123,0		
prec. Utilisateur	66,4	100,0			
err. Comm	33,6	0,0			
prec. Globale	66,7				
F-score	4,7				

Nombre de DN3_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	74	7	81,0	91,4	8,6
O	37	5	42,0	11,9	88,1
Total général	111,0	12,0	123,0		
prec. Utilisateur	66,7	41,7			
err. Comm	33,3	58,3			
prec. Globale	64,2				
F-score	18,5				

Nombre de ALL_P2	Détection				
Terrain	NON	OUI	Total général	prec. Prod.	err. Om.
N	73	8	81,0	90,1	9,9
O	35	7	42,0	16,7	83,3
Total général	108,0	15,0	123,0		
prec. Utilisateur	67,6	46,7			
err. Comm	32,4	53,3			
prec. Globale	65,0				
F-score	24,6				

#12