



HAL
open science

Evaluation de l'apport des données Sentinel-1 dans la détection d'interventions sylvicoles

Romain Dous

► **To cite this version:**

Romain Dous. Evaluation de l'apport des données Sentinel-1 dans la détection d'interventions sylvicoles. Ingénierie de l'environnement. 2021. hal-03463598

HAL Id: hal-03463598

<https://hal.inrae.fr/hal-03463598v1>

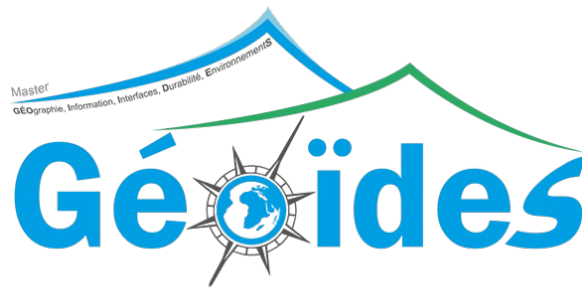
Submitted on 2 Dec 2021

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License



Évaluation de l'apport des données Sentinel-1 dans la détection d'interventions sylvicoles

Romain DOUS

Stage de Master 2 (du 01/03/2020 au 27/08/2020)

Master Sciences Humaines et Sociales mention Géographie, Aménagement, Environnement, Développement

Parcours GEOIDES : GEOgraphie Information Interface Durabilité Environnements

Soutenance le 09/09/2021

Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine – Université Grenoble Alpes

INRAE - Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

Encadrants : Jean-Pierre HAMARD - Kenji OSE

Équipes : UR EFNO ; UMR TETIS

Référent de Stage : Pauline DUSSEUX

Examineur : Sylvain BIGOT



INRAE



Table des matières

Remerciements :.....	7
Avant-propos :.....	7
Abréviations :.....	8
A. Introduction :.....	9
B. Matériels et Méthodes :.....	13
1. La zone d'étude et les parcelles forestières étudiées :.....	13
1.1. Zone d'étude :.....	13
1.3. Parcelle de référence :.....	14
2. Les données satellitaires Sentinel-1 :.....	15
2.1. Description des données utilisées :.....	15
2.2. Élimination de certaines acquisitions Sentinel-1 :.....	16
2.3. Correction des données « pixel » par leur voisinage :.....	17
3. Observation des polarimétries VV et VH au sein de la parcelle de référence :.....	19
3.1. Utilisation de moyenne mobile regroupant 7 valeurs :.....	19
3.2. Observations des fluctuations des polarimétries VV et VH :.....	19
3.3. Étude de la corrélation entre les polarimétries VV et VH :.....	19
3.4. Observation des différences entre acquisitions au cours des séries temporelles :.....	20
4. Tests statistiques de comparaison entre jeux de données de parcelles et test d'une méthode de détection de coupe :.....	21
4.1. Comparaison des 2 jeux de données de parcelles :.....	21
4.1.1. Origine des tests et cas de figures :.....	21
4.1.2. Calculs statistiques et tests de comparaison de moyennes :.....	21
4.2. Établissement d'un protocole de détection de coupe par l'utilisation de sommes cumulées :.....	22
4.2.1. Présentation générale de la méthode :.....	22
4.2.2. Présentation des indices et données utilisés :.....	23
4.2.3. Réalisation de la somme cumulée :.....	24
4.2.4. Détermination d'un seuil de détection :.....	24
4.2.5. Obtention des résultats, modèle nul et mesures de performance :.....	26
C. Résultats :.....	28
1. Fluctuations des valeurs de polarimétries pour la parcelle de référence :.....	28
2. Vérification de la corrélation entre les valeurs de VV et les valeurs de VH :.....	31
3. Différences entre acquisitions au cours des séries temporelles :.....	32
4. Résultats des comparaisons des jeux de données de parcelles :.....	33
5. Observations préliminaires des sommes cumulées :.....	34
6. Résultats de détection par l'utilisation des sommes cumulées :.....	35
D. Discussion :.....	37
1. Interprétation des résultats d'observations :.....	37
2. Analyse des résultats des tests et possibilités d'améliorations :.....	37
3. Critiques globales supplémentaires :.....	39
E. Conclusion :.....	40
Bibliographie :.....	42
Annexes :.....	46

Liste des figures :

Figure 1 : Localisation du Parc National des Cévennes en France métropolitaine.....	12
Figure 2 : Localisation des parcelles sélectionnées au sein du Parc National des Cévennes afin de constituer les jeux de données de parcelles.....	13
Figure 3 : Localisation et emprise de la parcelle de référence située en forêt privée de l'Aigoual.....	14
Figure 4 : Visualisation des 2 types de briques réalisées et équations correspondantes de correction des valeurs de pixel	17
Figure 5 : Conditions d'utilisations des tests de Wilcoxon, de Student et de la correction de Welch.....	21
Figure 6 : Séries temporelles des valeurs de VV pour les pixels 5 (gauche), 50 (milieu) et 700 (droite) de la parcelle de référence.....	28
Figure 7 : Séries temporelles des valeurs de VH pour les pixels 115 (gauche), 580 (milieu) et 712 (droite) de la parcelle de référence.....	29
Figure 8 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles des données brutes de VV et de VH pour les pixels présents au sein de la parcelle de référence.....	30
Figure 9 : Série temporelle des différences acquisitions à acquisitions des valeurs de VV pour le pixel 1400 de la parcelle de référence.....	32
Figure 10 : Variations des valeurs du ratio VH/VV au cours de la série temporelle pour la parcelle de référence.....	33
Figure 11 : Evolution des valeurs des sommes cumulées pour le ratio VH/VV au cours de la série temporelle pour la parcelle de référence.....	34
Figure 12 : Représentation de la distribution du pourcentage de pixels avec intervention dans chaque parcelle avec utilisation d'une détection sur le RFDI et au seuil de 0,4796875.....	35

Liste des Équations :

(1) Équation de correction par moyenne non pondérée.....	18
(2) Équation de correction par moyenne pondérée.....	18
(3) Équation du RVI Version de Y. Kim et J.J. van Zyl 2004.....	23
(4) Équation du RVI Version de Nasirzadehdizaji et al. 2009.....	23
(5) Équation du RFDI Version initiale.....	23
(6) Équation du RFDI Version de Nicolau et al. 2021.....	23
(7) Équation de la somme cumulée.....	24
(8) Précision générale (accuracy A).....	27
(9) Précision coupe (recall R).....	27
(10) Précision surcoupe (précision P).....	27
(11) F-score (F).....	27

Liste des Tableaux :

Tableau 1 : Listes des valeurs des seuils et leurs origines pour les indices VH/VV, RVI et RFDI.....	25
Tableau 2 : Résultats des tests comparant les jeux de données de parcelles sur les statistiques zonales des différentes parcelles étudiées.....	33
Tableau 3 : Résultats des tests comparant les jeux de données de parcelles sur les proportions de pixels suivant une loi normal au sein des différentes parcelles étudiées.....	33
Tableau 4 : Résumé des meilleurs performances obtenues avec la combinaison RFDI, Brique Moyenne Pondérée et seuil de 0,1098633.....	36

Liste des Annexes :

Annexe 1 : Comparaison des surfaces des jeux de données parcellaires utilisés dans cette étude.....	45
Annexe 2 : Détection de la coupe rase subie par la parcelle de référence via l’outil Coupe Rase.....	46
Annexe 3 : Observation de la coupe rase subie par la parcelle de référence.....	47
Annexe 4 : Exemples de visualisation des images Sentinel-1 sur la parcelle de référence.....	48
Annexe 5 : Calendrier des acquisitions conservées.....	49
Annexe 6 : Visualisation des briques réalisées et des calculs de modifications de la valeur du pixel central associé.....	50
Annexe 7 : Ensemble des fonctions R utilisées dans cette étude.....	51
Annexe 8 : Origine incertaine du RFDI.....	52
Annexe 9 : Détails de la méthode de dichotomie permettant de déterminer le seuil.....	53
Annexe 10 : Détails des résultats de corrélations entre les valeurs de VV et de VH pour la parcelle de référence.....	54
Annexe 11 : Tableaux des résultats de détections des coupes avec le modèle nul et avec la méthode de détection des coupes par l’utilisation des sommes cumulées.....	58
Annexe 12 : Tableaux des résultats de performance pour les combinaisons liées à l’utilisation des sommes cumulées.....	59

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Jean-Pierre Hamard et Monsieur Kenji Ose pour m'avoir accepté comme stagiaire, aidé et conseillé pendant toute la durée de ce stage qui m'a permis d'apprendre beaucoup de choses. Je remercie également Hilaire Martin pour son aide et son soutien.

Également, je remercie Baptiste Algoet et Julie Braconnier de l'EP PNC ainsi que Romain Ribière et Noémie Gontard du PNRA pour les données et leurs avis aux cours des réunions. Je remercie aussi Monsieur Mårell Anders pour son aide durant le stage et sa future correction de mon oral. Je remercie Pauline Dusseux pour ses conseils et son aide pour finaliser mon rapport.

Enfin, je remercie beaucoup Raffaele Gaetano pour la mise à disposition de la chaîne de traitements moringa, Thibault Catry pour l'aide sur Sentinel-1, Lucile Sautot pour la formation Python Qgis, Philippe Guillemard pour son aide dans la création de mon compte INRAE et l'accès à la VM et Sylvie Le Roux pour son efficacité inébranlable.

Avant-propos :

Mon stage s'est déroulé au sein de l'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) à la Maison de la Télédétection (MTD) de Montpellier.

J'ai été encadré par Jean-Pierre HAMARD, ingénieur de recherche de l'UR EFNO (Écosystèmes Forestiers) et par Kenji OSE, ingénieur d'études de l'UMR TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale).

Abréviations :

CNES : Centre National d'Études Spatiales

UR EFNO : Unité de Recherche « Écosystèmes Forestiers - Nogent-sur-Vernisson »

ESA : Agence Spatiale Européenne (ou *European Space Agency*)

FN : Faux Négatif (omission)

FP : Faux Positif (commision)

GRD : *Ground Range Detected*

HH : transmission et réception horizontales (données de polarimétrie)

HV : transmission horizontale et réception verticale (données de polarimétrie)

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

IW : *Interferometric Wide swath*

MTD : Maison de la Télédétection

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée (ou *Normalized Diffrence Vegetation Index*)

ONF : Office National des Forêts

EP PNC : Établissement Public du Parc National des Cévennes

PNRA : Parc Naturel Régional de l'Aubrac

ReForest : garantir le Renouveau de la ressource FORESTière en assurant l'équilibre forêt-gibier

RFDI : *Radar Forest Degradation Index*

RSEOM : Recherche et Suivi de l'Équilibre entre les Ongulés sauvages et les les forêts anciennes / Milieux ouverts herbacés

RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture

RVI : *Radar Vegetation Index*

SAR : *Synthetic Aperture Radar*

UMR TETIS : Unité Mixte de Recherche « Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale »

VV : transmission et réception verticales (données de polarimétrie)

VH : transmission verticale et réception horizontale (données de polarimétrie)

VP : Vrai Positif

VN : Vrai Négatif

A. Introduction :

En France, la gestion cynégétique est un élément crucial pour une gestion durable des forêts et des cervidés sauvages (Côté et al. 2004). Hors, depuis les années 80, les populations d'espèces telles que le Chevreuil européen (*Capreolus capreolus L.*) ou le Cerf élaphe (*Cervus elaphus L.*) ont plus que quadruplé (Klein et al. 2008, Saint-Andrieux et Barboiron 2017).

Quels que soient les objectifs ou les fonctions assignés à une forêt, la gestion forestière passe par une phase de renouvellement des arbres récoltés par régénération naturelle ou artificielle (Ponge et al. 1994, Alazard et al. 2013). Cette étape est indispensable au renouvellement d'une forêt (Martinot-Lagarde 1969).

Toutefois, les cervidés ont tendance à se nourrir de l'apex des jeunes arbres (Gill 2001). Ce phénomène est appelé l'abroutissement. Cette consommation induit, chez les essences touchées, une perte de croissance, une altération de l'architecture de l'axe principal voire la mortalité pure et simple (Ballon et al. 1999). Ainsi, les forêts perturbées par ces animaux vont se renouveler plus lentement et difficilement que dans un cycle sylvicole où les cervidés sont absents ou en faible concentration (Reimoser et Gossow 1996).

Le suivi et la gestion des populations de cervidés permettent d'assurer la protection et le bon renouvellement des forêts (Klein et al. 2008). Néanmoins, aujourd'hui, la connaissance des populations passe principalement par l'analyse des plans et tableaux de chasse et, parfois, par la collecte d'indicateurs de changement écologique (ICE) (Beaudesson et al. 2015, Pellerin et al. 2016). Cependant, ces méthodes se focalisent principalement sur l'étude des populations au travers du concept de densité-dépendance.

Il existe, par ailleurs, des méthodes d'évaluation de l'impact des cervidés à l'échelle de parcelles de quelques hectares en cours de régénération. Elles s'apparentent à des approches d'expertise particulièrement lourdes et ne peuvent être mises en œuvre qu'au cas par cas dans des situations conflictuelles entre chasseurs et sylviculteurs. En revanche, des indicateurs permettant de caractériser la sensibilité effective des forêts (surface et distribution spatiale des parcelles en cours de renouvellement) à la présence des cervidés à l'échelle de massifs, de départements voire de régions font défaut (De Backer 2019). Pourtant, de tels indicateurs pourraient être utilisés afin de connaître les zones potentiellement dégradables par la dent du gibier et guider des opérations de suivis ou de gestion de ces zones (Fofana 2019). Dans tous les cas, des indicateurs de sensibilité des boisements sont essentiels pour permettre aux sylviculteurs de connaître les risques qu'ils encourent.

Au vue des étendues à couvrir, le suivi des forêts est très demandeur en ressources humaines (Samalens 2009). Il nécessite la formation d'experts capables de reconnaître et de distinguer sur le terrain des zones dégradables en relation avec les interventions sylvicoles effectuées (Bouriaud 2020).

Dans ce contexte, la télédétection satellitaire offre une nouvelle voie d'investigation intéressante permettant de cartographier de vastes étendues avec peu de personnels (CNPf 2019). De plus, certains satellites fournissent régulièrement des images permettant de réaliser des cartographies dynamiques (Demaze 2008, Morin 2020). Si elles étaient appliquées en sylviculture, ces données pourraient, en théorie, servir à réaliser des cartes des secteurs géographiques et des parcelles d'intérêt potentiellement sensibles à la pression de consommation du gibier.

De telles parcelles sont avant tout celles concernées par des interventions sylvicoles ayant pour finalité un renouvellement de la forêt (Guignabert 2018). Les coupes rases sont un bon exemple de telles interventions. Elles consistent en effet à récolter tous les arbres présents dans une parcelle. Très marquées dans le paysage, il est actuellement possible d'en détecter avec des images satellitaires via l'outil Coupe Rase¹ développé par Kenji OSE et Rémi CRESSON en 2019 (Ose & Cresson 2019).

Cet outil utilise des images optiques issues du programme Copernicus de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Le couple de satellites Sentinel-2, lancés en 2015 et 2017, fournissent ces images dans 13 bandes spectrales, allant du bleu à l'infrarouge, avec une résolution spatiale de 10 mètres tous les 5 jours. Ces images ont été choisies car elles sont gratuites, facilement accessibles² et ont des résolutions suffisamment sensibles pour permettre la détection de modifications au sein d'une forêt. Grâce à la régularité dans la prise de ces images, des séries temporelles permettant le suivi de l'état des forêts peuvent être réalisées. Pour cela l'indice de végétation par différence normalisée ou *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) est utilisé. Cet indice est calculé à partir des données rouges et infrarouges des images Sentinel-2. Il est sensible à l'activité chlorophyllienne et, de ce fait, à la vigueur et à la quantité de végétation. Via l'outil, les coupes rases sont ainsi repérées au sein des forêts en détectant des chutes brutales du NDVI au cours des séries temporelles.

Toutefois, le projet « garantir le **Renouvellement** de la ressource **Forestière** en assurant l'équilibre forêt-gibier » (ReForest) mené par l'INRAE entre 2016 et 2019 en a montré quelques limites (De Backer 2019, Fofana 2019). En effet, l'analyse des images optiques via l'utilisation de l'outil Coupe Rase est entachée d'artefacts, tels que l'absence de détection de certaines coupes rases ou des détections s'apparentant à des phénomènes climatiques ou sanitaires provoquant des pertes foliaires.

C'est dans ce contexte que se situe le projet Recherche et Suivi de l'Équilibre entre les Ongulés sauvages et les forêts anciennes / Milieux ouverts herbacés (RSEOM). Ce projet se focalise sur les sites du Parc National des Cévennes (EP PNC) et du Parc Naturel Régional de l'Aubrac (PNRA). Il a pour but de développer un outil d'aide à la décision en milieux forestiers vis à vis des problématiques liées aux populations de cervidés. L'objectif est de baser cet outil sur l'outil Coupe Rase en améliorant ses capacités. Pour cela, 2 étapes sont réalisées.

- La première consiste à évaluer rigoureusement la précision de l'outil Coupe Rase en terme de détection des coupes rases et à déterminer sa capacité à détecter d'autres types d'interventions sylvicoles et d'autres événements affectant les peuplements forestiers, comme les accidents climatiques ou sanitaires. Cette étape est réalisée par les équipes des 2 parcs.

1 : <https://coupesrases.irstea.fr/>

2 : <https://www.theia-land.fr/>

Leur travail se divise en 3 parties et se focalise uniquement sur leur parc respectif. Premièrement, en récupérant les enregistrements d'interventions sylvicoles réalisées entre 2017 et 2020 auprès des sylviculteurs, ces équipes peuvent comparer ces informations avec les détections réalisées avec l'outil Coupe Rase. A partir de cela, elles peuvent chiffrer le taux de bonnes détections de l'outil et examiner ses capacités à faire plus que détecer des coupes rases.

Deuxièmement, les équipes se chargent de mener des enquêtes. Dans le cas où l'outil fournirait des détections non signalées par les sylviculteurs, elles tentent de trouver sur le terrain une explication à ce faux signalement. Également, chaque intervention signalée est vérifiée soit sur le terrain soit via une analyse visuelle des images Spot 6-7.

Troisièmement, à partir des connaissances acquises sur l'outil, ses qualités et ses défauts, les équipes proposent des pistes d'amélioration techniques de l'outil.

- Menée par l'INRAE, la deuxième étape d'amélioration des capacités de l'outil Coupe Rase repose sur l'ajout, aux données initialement utilisées, de nouvelles données issues d'images satellitaires du programme Copernicus. Les données ainsi choisies sont celles des images radar fournies par les satellites Sentinel-1, mis en orbite en 2014 et 2016. Elles ont été choisies pour les mêmes raisons que les images Sentinel-2 pour l'outil Coupe Rase. De plus, dans la littérature, certains auteurs ont réussi à détecer des coupes rases ou des incendies en utilisant notamment des données Sentinel-1 (Rauste et al. 2016, Reiche et al. 2018). L'objectif est ici d'utiliser ces données pour améliorer la puissance de l'outil en escomptant obtenir une meilleure caractérisation des interventions sylvicoles.

Afin de réaliser cette étape, il faut déterminer la possibilité de détecer tous types d'interventions sylvicoles au sein des parcs à partir des images Sentinel-1 seulement. A partir des informations d'interventions sylvicoles réalisées entre 2017 et 2020 récupérées par les équipes des parcs, le but est d'élaborer une méthode permettant d'identifier ces interventions sans erreur de détection avec les images Sentinel-1. L'hypothèse est, qu'à minima, les images Sentinel-1 peuvent servir de complément aux images Sentinel-2 pour distinguer les fausses détections, comme celles liées à des accidents climatiques ou sanitaires ; de celles véritablement liées à des interventions et de caractériser l'intervention ainsi détecée. L'objectif de cette étude est de valider ou non cette hypothèse et, également, d'établir si les images Sentinel-1 peuvent discriminer entre elles la nature des interventions sylvicoles (coupes rases, coupes d'ensemencement, coupes jardinatoires, éclaircies, travaux, ...).

La récupération des informations d'interventions sylvicoles auprès des sylviculteurs peut être longue et difficile du fait de diverses contraintes logistiques et administratives. L'équipe du Parc National des Cévennes ayant pu fournir ces informations entre 2017 et 2020, le PNC sera l'unique site étudié dans ce rapport.

De plus, la priorité a été donnée aux interventions réalisées entre 2019 et 2020 pour des raisons de temps de prospection mais également de qualité des informations. Plus la donnée est ancienne, plus des incertitudes dans la datation des données fournies par les gestionnaires surviennent.

L'objectif de cette étude est de déterminer dans quelle mesure des images Sentinel-1 peuvent être utilisées afin de détecer ou de caractériser les interventions sylvicoles survenues entre 2019 et 2020 au sein du Parc National des Cévennes.

Cette étude est séparée en 2 parties principales :

La première vise à étudier le comportement des données issues des images Sentinel-1 en cas de coupe et à déterminer si des observations peuvent suffire à repérer des interventions sylvicoles. Il s'agit d'un ensemble d'analyses visuelles consistant à (1) observer les fluctuations des valeurs de polarimétrie issues des images Sentinel-1 séparément pour chaque pixel ; (2) vérifier l'existence ou non d'une corrélation entre ces valeurs sur les séries temporelles des données disponibles entre 2017 et 2020 ; et (3) établir s'il est possible ou non de réaliser des comparaisons uniquement entre 2 images pour détecter des interventions entre 2019 et 2020.

La seconde partie est composée de tests consistant à explorer différentes méthodes pouvant potentiellement être utilisées pour détecter des interventions sylvicoles. Ces méthodes visent respectivement à (4) repérer des différences entre les parcelles ayant subi une intervention sylvicole et celles n'en ayant pas subi entre 2019 et 2020 ; et (5) évaluer si des détections sont réalisables grâce à l'utilisation de sommes cumulées (Ruiz-Ramos et al. 2020).

B. Matériels et Méthodes :

1. La zone d'étude et les parcelles forestières étudiées :

1.1. Zone d'étude :

L'étude a été réalisée sur le Parc National des Cévennes (Figure 1). Situé entre les départements de la Lozère et du Gard, ce parc a une superficie de 2 035 km² et regroupe 118 communes. L'espace forestier représente 72 % du territoire (Febvre et al. 2018). Les informations concernant de l'EP PNC ont été fournies directement par les équipes du parc dans le cadre du projet RSEOM.

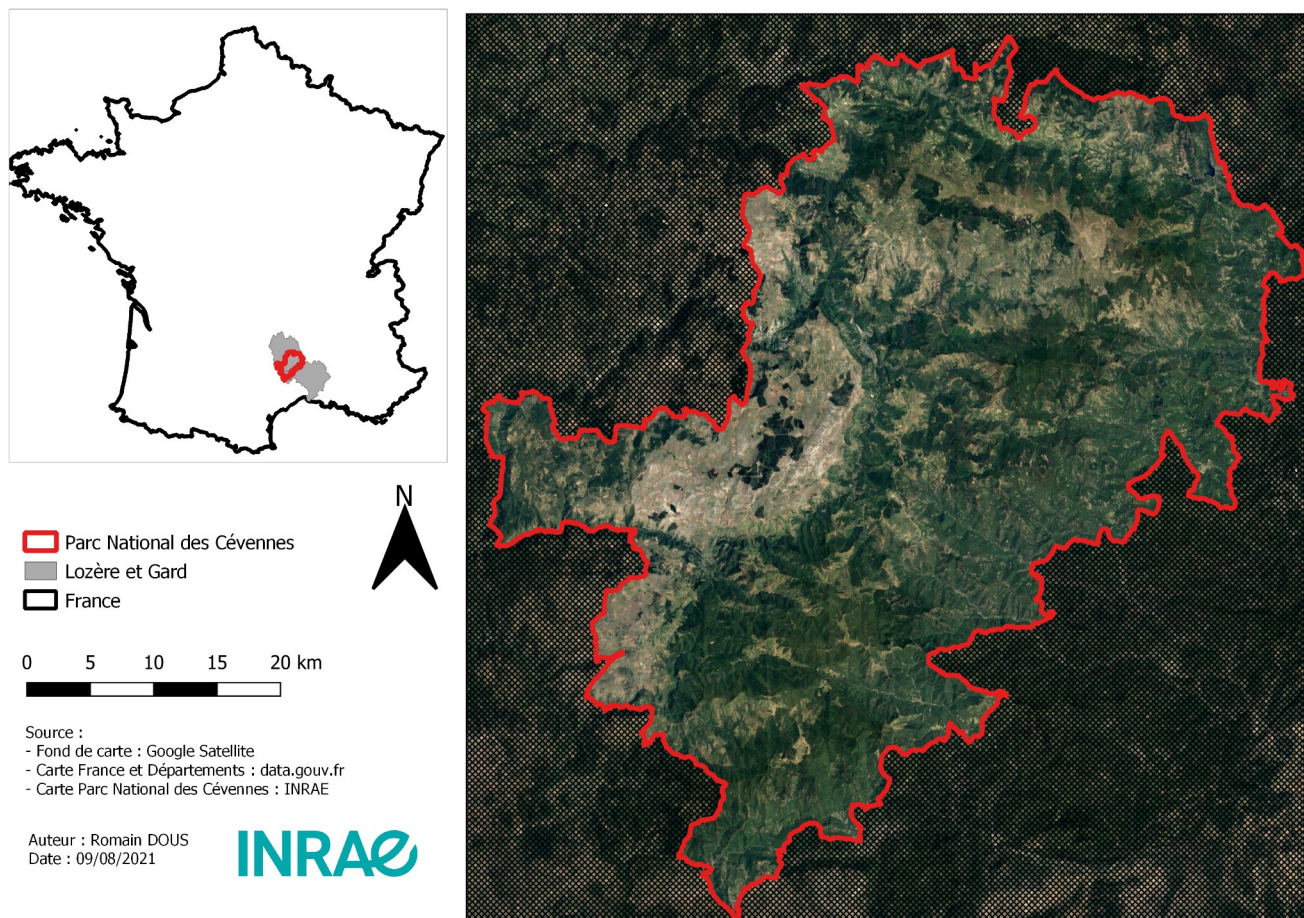


Figure 1 : Localisation du Parc National des Cévennes en France métropolitaine.

1.2. Constitution des jeux de données utilisés durant l'étude :

Les équipes du parc ont fourni des informations sur 1 829 parcelles utilisées pour la production de bois, dont 86 gérées par des propriétaires privés et 1 743 par l'Office National des Forêts (ONF). Entre 2017 et 2020, seules 349 de ces parcelles ont subi une intervention sylvicole et, seulement 149 entre 2019 et 2020. Deux jeux de données de parcelles ont été constitués à partir de cette information (Figure 2).

Le premier contient les informations des 149 parcelles ayant subi une intervention sylvicole entre 2019 et 2020 dont le début et la fin de la période d'intervention. Il est désigné comme « jeu des parcelles avec interventions ». Pour les parcelles où les données de fin d'intervention n'ont pas été renseignées car l'intervention était encore en cours, il a été établi que la date de fin d'intervention serait le 31 décembre 2021 afin de faciliter les analyses.

Le second jeu de données contient les informations de 149 parcelles n'ayant pas subi d'intervention sylvicole entre 2019 et 2020. Il est désigné comme « jeu des parcelles sans intervention ». La surface fut le critère de sélection de ce deuxième jeu de parcelles. Ainsi, chaque parcelle du premier jeu de données présente une parcelle de surface similaire dans le second jeu de données (Annexe 1). Les critères de ressemblance entre les parcelles des 2 jeux de données tels que l'essence majoritaire, le gestionnaire ou le dénivelé n'ont pas été pris en compte du fait de la faible diversité des parcelles disponibles.

Dans l'ensemble de l'étude, les pixels compris dans une bordure de 15 m des parcelles n'ont pas été étudiés afin d'éviter des effets de lisière (Fieller & Pearson 1961). Cette distance a été choisie car il s'agit de l'arrondi à l'entier supérieur de la diagonale d'un carré de 100 m² (surface d'un pixel sur une image Sentinel-1).

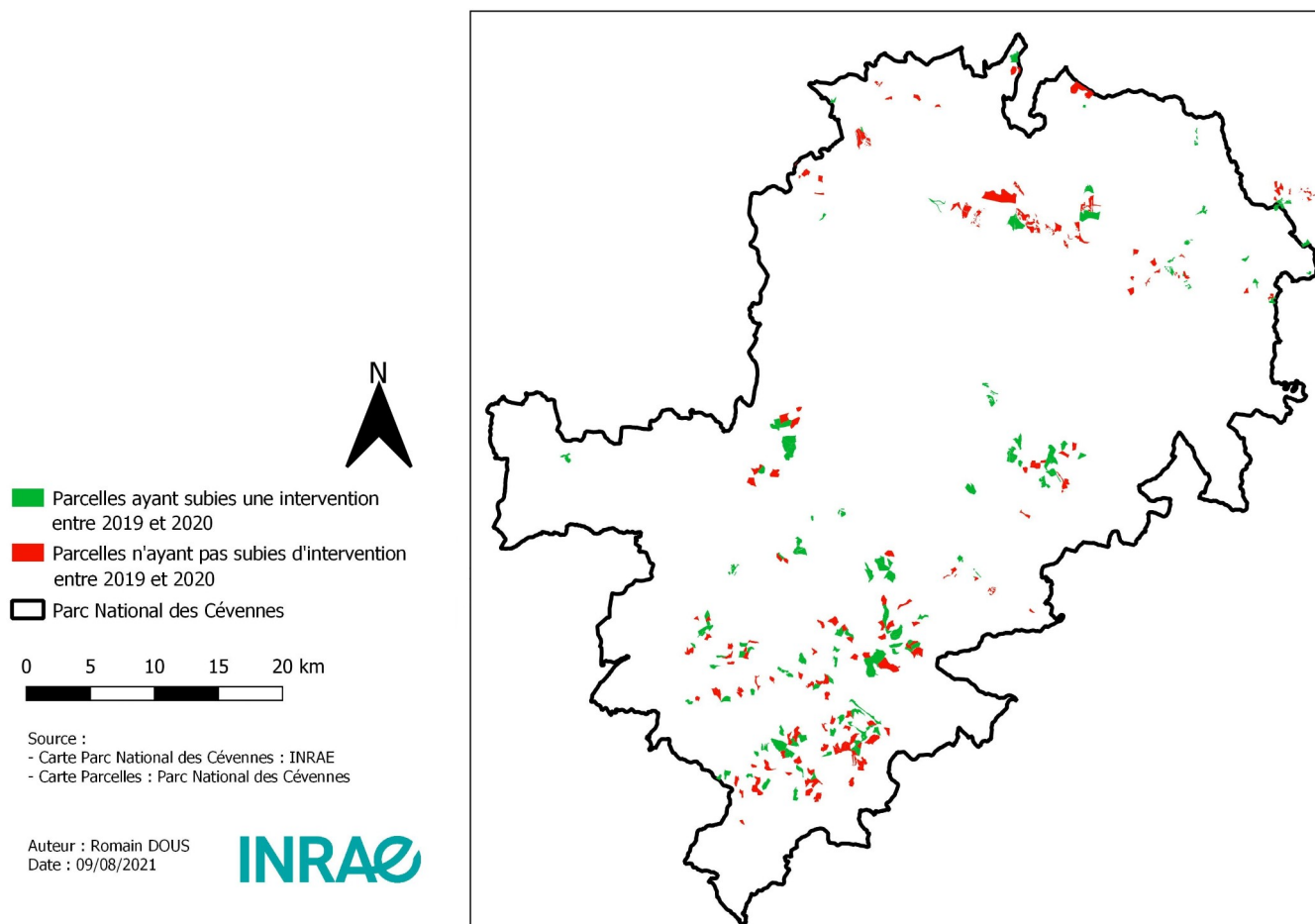


Figure 2 : Localisation des parcelles sélectionnées au sein du Parc National des Cévennes afin de constituer les jeux de données de parcelles.

1.3. Parcelle de référence :

La première partie de cette étude repose sur l'observation des conséquences d'une intervention sylvicole sur les valeurs des pixels des images Sentinel-1. Il a été décidé de réaliser ces observations uniquement sur une parcelle de référence ayant subi l'intervention sylvicole la plus forte en terme d'intensité et d'étendue. Ce choix part du principe qu'une intervention de forte intensité doit provoquer un signal visible sur les images Sentinel-1.

Sur les 149 parcelles ayant subi une intervention sylvicole, seules 3 ont fait l'objet d'une coupe rase dont une seule pour laquelle l'intervention couvrait l'intégralité de sa surface. C'est elle qui a été choisie comme référence.

Il s'agit de la parcelle 2 de la partie privée de la forêt de l'Aigoual (Figure 3). La coupe qu'elle a subi a été effectuée entre mars et août 2020 et a été détectée grâce à l'outil Coupe Rase (Annexe 2). Elle est également visible en utilisant des images Spot 6 (Annexe 3). Aucune autre intervention n'a été recensée sur cette parcelle au cours de la période étudiée. Elle est majoritairement composée de Pin noir. Sa surface est de 22 ha, hors bordure périphérique, correspond à un ensemble de 1 551 pixels.

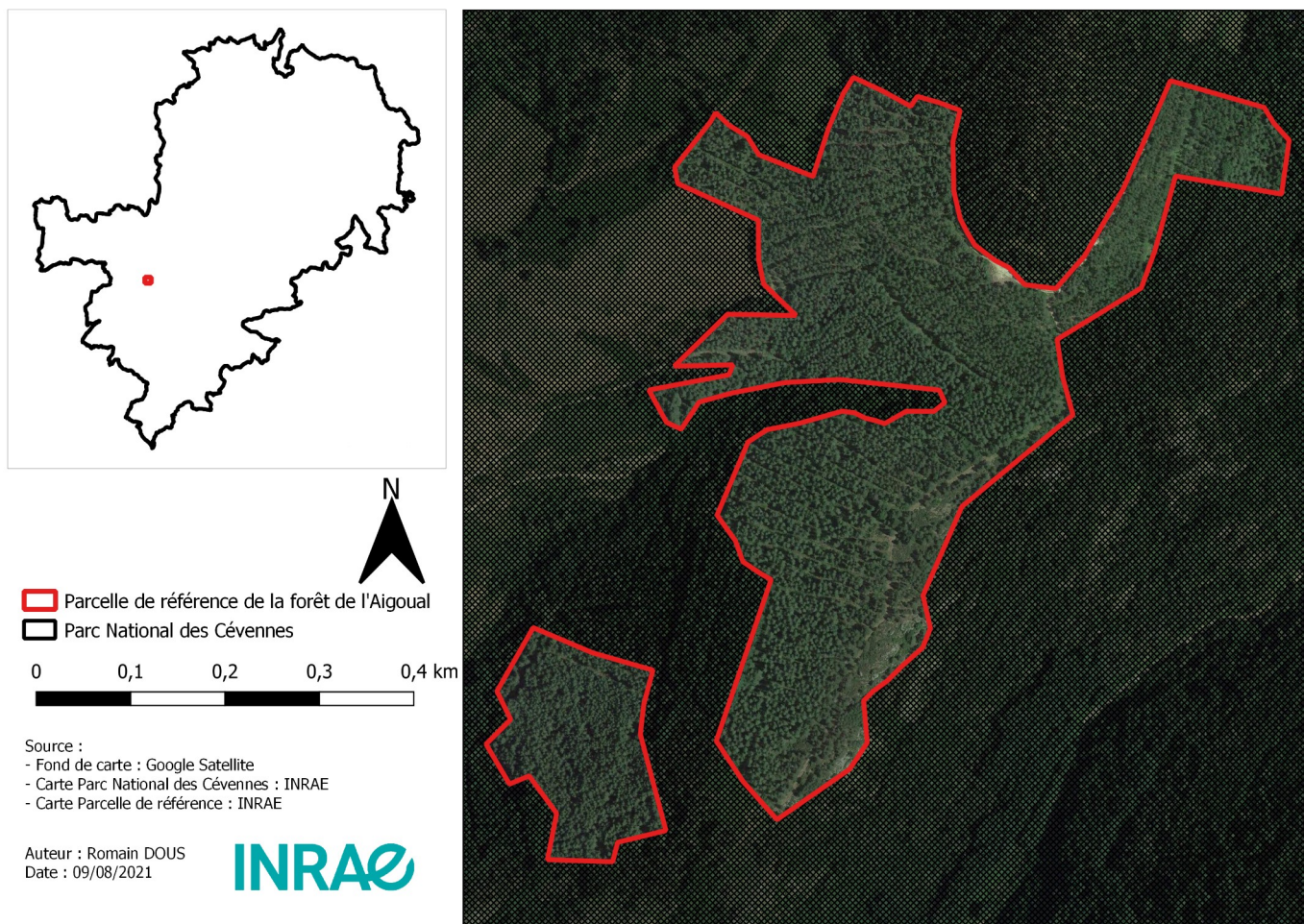


Figure 3 : Localisation et emprise de la parcelle de référence située en forêt privée de l'Aigoual.

2. Les données satellitaires Sentinel-1 :

2.1. Description des données utilisées :

Les images Sentinel-1 utilisées sont des acquisitions radar de rétrodiffusion *Ground Range Detected* (GRD). Les données GRD correspondent à des quantités de rayonnements micro-ondes réfléchis par les éléments présents à la surface du sol. Ces éléments sont appelés réflecteurs. Les données GRD sont dépendantes du sens d'émission d'un émetteur et du sens de réception du capteur. Le sens est soit vertical, soit horizontal.

Ces images sont acquises en mode ascendant par les satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B et sont disponibles sur le site du CNES ou le site de l'ESA ^{1,2}. Il s'agit d'images produites par un radar à synthèse d'ouverture (RSO), ou *Synthetic Aperture Radar* (SAR), à la résolution spatiale de 10 m en bande C (fréquence : 4-8 GHz ; longueur d'onde : 3,8-7,5 cm). Chaque satellite a une résolution temporelle d'environ 12 jours. La résolution spatiale des images est dépendante du mode du capteur lors de l'acquisition. Dans le cas présent, il s'agit du mode *Interferometric Wide Swath* (IW) où, chaque image a la même emprise de 250 km. Les satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B parcourent des orbites différentes et l'emprise de leurs images respectives ne se chevauchent que partiellement. Dans cette étude, seules les données Sentinel-1B ont été utilisées car pour ce satellite, une seule image suffit pour couvrir la zone d'étude. Ainsi, entre 2017 et 2020, une série temporelle de 112 images S1-B constitue l'ensemble des données disponibles sur le site d'étude.

Enfin, les images Sentinel-1 présentent une double polarimétrie VV et VH (Annexe 4). L'abréviation VV désigne un rayonnement émis de manière verticale et réceptionné dans le même sens tandis que l'abréviation VH indique que la réception se fait dans le sens horizontal.

Le prétraitement de ces images a été réalisé sur Python 3.9.6 via la chaîne de traitement Moringa développée par Raffaele Gaetano (UMR TETIS) et qui utilise une méthode de correction du bruit, ou *gap-filling*, par interpolation temporelle sur une année ^{3,4} (Cresson et al. 2019). En effet, les données Sentinel-1 non pré-traitées présentent des pixels bruités dus aux propriétés physiques et électromagnétiques des réflecteurs interceptés par ces pixels. Ce phénomène de bruit est appelé chatoiement ou *speckle* en anglais. Le *gap-filling* par interpolation temporelle permet de corriger ces pixels bruités à partir des informations disponibles sur l'ensemble des images disponibles. Pour un pixel donné, si les informations relatives à ce pixel sont bruitées pour une acquisition, des informations de «correction» seront générées en analysant les valeurs de ce pixel et de ses voisins sur le reste des acquisitions disponibles.

L'intégralité des données post-prétraitements est enregistrée sous forme d'images TIFF. Chaque pixel localisé dans la zone d'étude y est lié à 2 données de rétrodiffusion en unité linéaire : une série temporelle décrivant la variation de ses valeurs de VV et une série temporelle décrivant la variation de ses valeurs de VH.

2.2. Élimination de certaines acquisitions Sentinel-1 :

Pour certains des tests réalisés, il a été évalué qu'il serait pertinent de les mener sur une sélection réduite des acquisitions disponibles.

La période d'activité chlorophyllienne s'étend globalement de début mai à fin août. Dans le cas du traitement des images Sentinel-2, le NDVI est sensible aux pertes foliaires hivernales des feuillus. Afin d'éviter de confondre des coupes et les pertes foliaires hivernales, seule la période de développement de la végétation est conservée pour les détections de coupes rases avec les acquisitions Sentinel-2.

Afin d'utiliser des jeux de données synchrones avec ceux retenus pour les analyses Sentinel-2, les acquisitions Sentinel-1 obtenues en dehors de la période de développement végétal peuvent être soustraites de l'ensemble des 112 acquisitions. De plus, cela permet de ne pas prendre en compte d'éventuelles perturbations des forêts liées aux effets saisonniers et particulièrement à la période hivernale (Guccione et al. 2016, Vaca & van der Tol 2018, Ose & Cresson 2019).

1 : <https://peps.cnes.fr>

2 : <https://scihub.copernicus.eu/>

3 : <https://www.python.org/downloads/release/python-396/>

4 : <https://gitlab.irstea.fr/raffaele.gaetano/moringa>

De la même manière, les données Sentinel-1 GRDH sont sensibles à l'eau stockée dans la canopée des forêts, notamment dans le cas des forêts de résineux. Les acquisitions produites durant un jour de pluie ou le lendemain d'un jour de pluie peuvent être retirées (de Jong 2000, Vaca et Van der Tol 2018) (Annexe 5).

2.3. Correction des données « pixel » par leur voisinage :

Les prétraitements par *gap-filling* permettent de corriger, à l'échelle du pixel, des phénomènes de bruits perturbant le signal et donc les valeurs de polarimétrie VV et VH. Des bruits résiduels peuvent malgré tout subsister. Pour diminuer leurs effets, les valeurs des pixels de la zone d'étude ont été corrigés par la prise en compte de celles de leurs 8 pixels voisins.

Cette procédure est un filtre avec un kernel 3*3. Elle est désignée par le terme de « correction briquée ». Chaque pixel est associé à un élément appelé « brique ». Ainsi, la valeur de chaque pixel est remplacée par la valeur de la brique lui étant associée (Figure 4).

Potentiellement, une correction briquée, permet donc d'obtenir des résultats de détection avec moins d'erreurs que les résultats obtenus à partir de données non corrigées (Ose et Cresson 2019).

Deux catégories de briques ont été créées (Annexe 6). Les briques de la première catégorie présentent une valeur obtenue par une moyenne non pondérée (Figure 4-Équation 1). La valeur de la brique est égale à la moyenne de l'ensemble des 9 pixels qu'elle contient.

Pour la seconde catégorie, les briques présentent une valeur obtenue par une moyenne pondérée (Figure 4-Équation 2). La valeur de la brique est une moyenne de l'ensemble des 9 pixels qu'elle contient mais où le pixel central correspond à 50 % des informations utilisées pour calculer cette moyenne et les 8 pixels voisins à 50 % des informations restantes. De cette façon, chaque pixel voisin correspond à 6,25 % des informations utilisées pour calculer la valeur du pixel. Cette seconde brique a été conçue pour accorder plus de poids au pixel central de la brique car il s'agit du pixel dont la valeur va être modifiée.

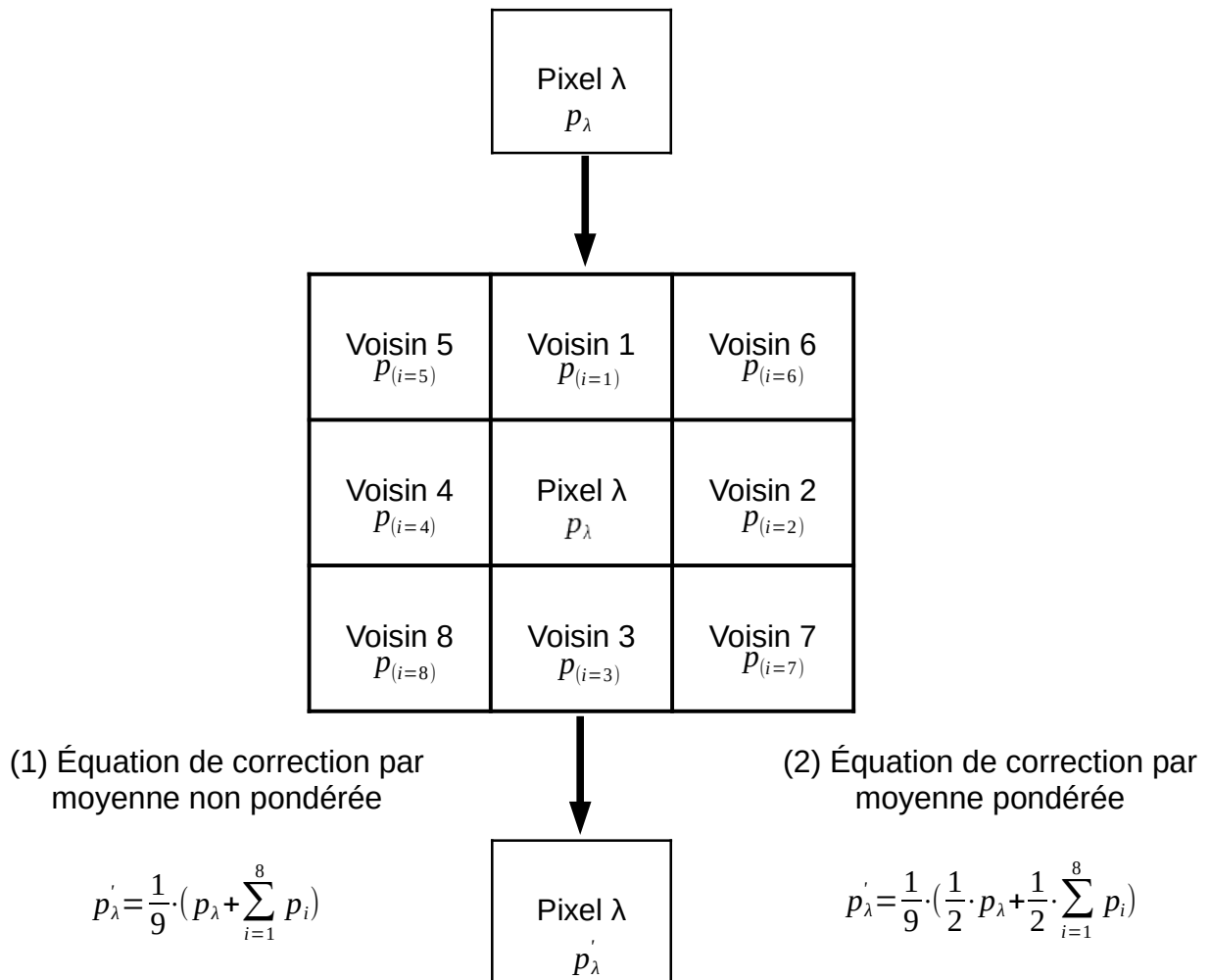


Figure 4 : Visualisation des 2 types de briques réalisées et équations correspondantes de correction des valeurs de pixel. La valeur p_λ du pixel λ est remplacée par la valeur p'_λ calculée grâce à la valeur du pixel λ et de ses voisins ayant chacun une valeur de p_i .

3. Observation des polarimétries VV et VH au sein de la parcelle de référence :

3.1. Utilisation de moyenne mobile regroupant 7 valeurs :

Les courbes représentatives des séries temporelles des valeurs brutes des polarimétries VV et de VH de chaque pixel ne sont pas facilement lisibles et interprétables. Pour mieux observer les fluctuations de ces valeurs, il a été décidé d'utiliser des moyennes mobiles. Il s'agit de moyennes statistiques permettant de lisser les valeurs sur une courbe la rendant ainsi plus simple à décrypter (Annexe 7). Dans cette étude, les moyennes mobiles ont été calculées sur des sous-ensembles de 7 acquisitions d'où la constitution de 106 sous-échantillons.

3.2. Observations des fluctuations des polarimétries VV et VH :

L'objectif des observations des séries temporelles des valeurs des polarimétries VV et de VH est d'identifier les types de fluctuations survenant au niveau d'une période de coupe vis à vis du reste de la série temporelle. Ces observations ont été réalisées sur les pixels inclus dans la parcelle de référence. Six pixels exemples ont été sélectionnés parmi les 1551 disponibles durant cette étape pour résumer l'ensemble des observations réalisées et représenter les fluctuations fréquemment observées. Cette analyse a été effectuée sur les valeurs brutes des polarimétries VV et de VH et sur les valeurs modifiées par l'utilisation de moyennes mobiles.

3.3. Étude de la corrélation entre les polarimétries VV et VH :

L'objectif de l'étude de la corrélation entre les polarimétries VV et VH est de déterminer si, oui ou non, ces 2 polarimétries doivent être traitées indépendamment au vue des données à disposition. Cette partie a été réalisée également sur les pixels de la parcelle de référence.

Pour chaque pixel, un indice de corrélation entre les polarimétries VV et VH a été calculé (Annexe 7). Deux indices ont été utilisés : l'indice de Pearson, qui s'applique uniquement lorsque les valeurs des polarimétries VV et VH au cours de la série temporelle suivent une loi normale ; et l'indice de Kendall, dans le reste des cas (Fieller et Pearson 1961). Ces indices fournissent une valeur entre -1 et 1. Une valeur de -1 indique une corrélation négative et une valeur de 1, une corrélation positive. Une valeur de 0 signifie qu'il n'y a aucune corrélation positive ou négative entre les 2 séries.

Pour chaque pixel, le calcul de la corrélation impliquait 2 valeurs : une estimation de la corrélation entre les valeurs de VV et les valeurs de VH ; et une p-value. Seules les estimations liées à des p-values de moins de 0,05 ont été conservées car considérées statistiquement comme valides.

La corrélation des polarimétries VV et VH de chaque pixel de la parcelle de référence a été évalué sur 8 scénarios différents :

- corrélation sur la série temporelle complète (112 acquisitions) avec les données brutes.
- corrélation sur la série temporelle complète (106 acquisitions) avec les moyennes mobiles.
- corrélation sur la série temporelle de la période de coupe (15 acquisitions) de la parcelle de référence avec les données brutes.
- corrélation sur la série temporelle de la période de coupe (9 acquisitions) de la parcelle de référence avec les moyennes mobiles.
- corrélation sur la série temporelle de la période hors coupe (97 acquisitions) de la parcelle de référence avec les données brutes.
- corrélation sur la série temporelle de la période hors coupe (91 acquisitions) de la parcelle de référence avec les moyennes mobiles.
- corrélation sur la série temporelle complète (41 acquisitions) avec les données brutes mais en retirant les acquisitions hors périodes de développement végétal (entre mai et août de chaque année).
- corrélation sur la série temporelle complète (17 acquisitions) avec les données brutes mais en retirant les acquisitions hors périodes de développement végétal ainsi que les acquisitions réalisées durant ou après des jours de pluie.

Pour les 2 derniers scénarios, des similaires utilisant des moyennes mobiles n'ont pas été effectués car les acquisitions sont parfois éloignées de un ou plusieurs mois. Il n'aurait donc pas été pertinent de regrouper ces acquisitions entre elles. Pour chaque scénario, les résultats de corrélation ont été étudiés à vue via des histogrammes de la distribution des valeurs de corrélation.

3.4. Observation des différences entre acquisitions au cours des séries temporelles :

L'observation des différences entre acquisitions au cours des séries temporelles a pour objectif de déterminer s'il est possible de se contenter de comparer les valeurs de polarimétrie entre 2 acquisitions successives pour détecter une intervention sylvicole. Cette observation a été réalisée sur les pixels inclus dans la parcelle de référence en traçant, pour chaque pixel, la série temporelle des différences entre la valeur de polarimétrie, VV ou VH, d'une acquisition et la valeur de polarimétrie de l'acquisition précédente. Par conséquent, la première acquisition de la série temporelle est omise dans ces observations.

4. Tests statistiques de comparaison entre jeux de données de parcelles et test d'une méthode de détection de coupe :

4.1. Comparaison des 2 jeux de données de parcelles :

4.1.1. Origine des tests et cas de figures :

Des comparaisons entre les 2 jeux de données de parcelles ont été effectuées. Ces tests révéleront si des différences significatives entre des valeurs statistiques, telle que la moyenne, existent entre les parcelles avec ou sans intervention. Ainsi, l'idée est ici de mettre en avant ces différences afin de détecter le phénomène d'intervention à l'échelle d'une parcelle. Cela repose sur la possibilité que les interventions sylvicoles réalisées vont provoquer de fortes variations des valeurs de VV et de VH sur, au moins, une partie des pixels de chacune des parcelles concernées. Ainsi, ces variations vont permettre de distinguer les parcelles.

Dans cette partie de l'étude, 3 cas de figure de comparaison entre les 2 jeux de données de parcelles ont été testés. Le premier correspond à des calculs sur le jeu de données d'acquisitions incluant toutes les acquisitions et sans modification des valeurs des pixels par utilisation d'une brique. Ce cas est désigné sous le terme de cas « **total** ». Le second correspond à des calculs sur le jeu de données d'acquisitions constitué uniquement avec la période de développement végétal et sans les acquisitions survenues durant ou après un jour de pluie et sans modification des valeurs des pixels par utilisation d'une brique. Ce cas est désigné sous le terme de cas « **réduit** ». Le troisième correspond à des calculs sur le jeu de données d'acquisitions constitué uniquement avec la période de développement végétal et sans les acquisitions survenues durant ou après un jour de pluie et avec modification des valeurs des pixels par utilisation d'une brique modifiant les valeurs des pixels avec une moyenne pondérée. Ce cas est désigné sous le terme de cas « **réduit briqué** ».

4.1.2. Calculs statistiques et tests de comparaison de moyennes :

Des statistiques dites zonales ont été calculées pour chacune des parcelles des 2 jeux de données de parcelles. Le terme zonale désigne le fait que l'ensemble des pixels de chaque parcelle est pris en compte dans les statistiques calculées. Les statistiques zonales sont : la moyenne, la médiane, le maximum, le minimum, l'écart-type et la normalité.

A la suite, la proportion de pixels suivant une loi normale de chaque parcelle a été calculée. La normalité des valeurs a été mesurée grâce à un test de Shapiro (Annexe 6). Ces tests partent de l'idée que la normalité d'une série temporelle puisse être perturbée lors d'un phénomène d'intervention.

Des tests de comparaison permettant de savoir si les moyennes de 2 ensembles sont statistiquement différentes ont été effectués entre les jeux de données de parcelles pour chaque statistique précédemment évoquée.

Deux types de tests ont été réalisés (Figure 5). Dans le cas de comparaisons entre 2 jeux de données ne suivant pas une loi normale, un test non paramétrique appelé le test de Wilcoxon a été appliqué. Dans le cas contraire, si les 2 jeux de données ont une variance égale, un test t de Student a été effectué sinon, une correction dites de Welch a été réalisée pour ce test t (Rochon et al. 2012). Pour chacun de ces tests, une valeur de p-value est fournie et permet l'interprétation des résultats. Si la p-value du test est strictement inférieure à 0,05 alors les jeux de données comparés présentent des moyennes significativement différentes (Annexe 7).

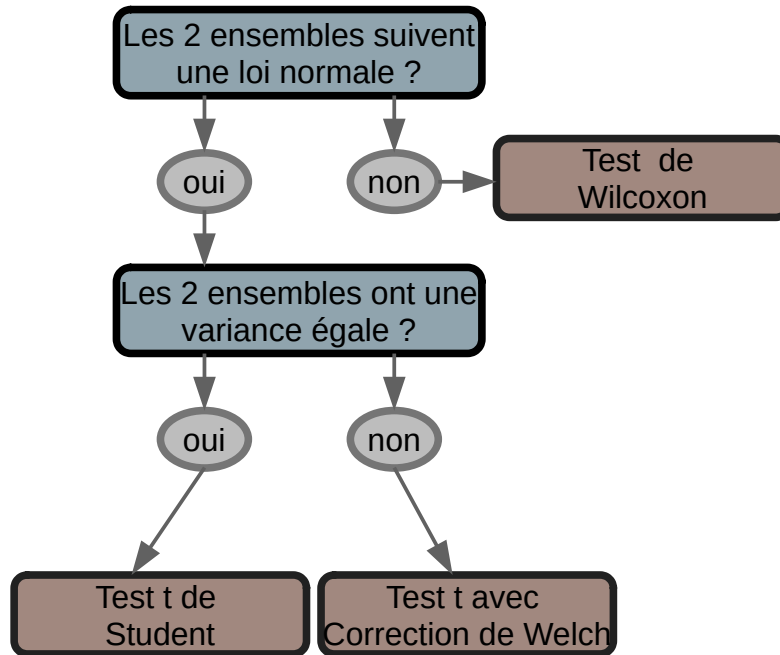


Figure 5 : Conditions d'utilisations des tests de Wilcoxon, de Student et de la correction de Welch.

4.2. Établissement d'un protocole de détection de coupe par l'utilisation de sommes cumulées :

4.2.1. Présentation générale de la méthode :

Au vu des fluctuations des valeurs de VH et de VV observées sur les pixels de la parcelle de référence dans le Chapitre 3.2, il semble que les phénomènes d'interventions sylvicoles puissent être observés sur les séries temporelles des valeurs VH et VV de certains pixels touchés. En effet, des diminutions ou des augmentations progressives des valeurs de polarimétrie semblent se produire à partir du début de l'intervention sylvicole jusqu'à atteindre soit un point dont la valeur est inférieure au minimum du reste de la série temporelle, soit un point dont la valeur est supérieure au maximum du reste de la série temporelle.

En s'inspirant des méthodes de détection de coupes développées par Ruiz-Ramos et al. 2020 basées sur l'utilisation de sommes cumulées, l'idée est ici de développer une méthode permettant de détecter toutes interventions sylvicoles en repérant ces phénomènes de diminution ou d'augmentation (Ruiz-Ramos et al. 2020). Pour ce test, il est supposé que seules les interventions sylvicoles provoquent ces phénomènes.

Il est présumé ici qu'un phénomène d'intervention sylvicole provoque des modifications visibles sur les valeurs de polarimétrie sur, au moins, 3 acquisitions consécutives soit un mois. Cela vise à éviter des confusions de détection entre les interventions et des phénomènes aléatoires pouvant perturber le signal détecté par Sentinel-1 et provoquer des modifications fortes et brutales des valeurs de polarimétrie. Ce nombre d'acquisitions a été choisi car l'intervention sylvicole la plus courte recensée est d'un mois (01/01/2020 - 31/01/2020).

4.2.2. Présentation des indices et données utilisés :

Différents indices ont été développés afin de détecter des perturbations au sein des forêts à partir de données RSO. Deux indices ont été utilisés dans cette étude (Annexe 7).

Le *Radar Vegetation Index* (RVI) est un indice développé par Y. Kim et J.J. van Zyl en 2004 (Yunjin Kim & van Zyl 2004). Il est notamment sensible à la structure du couvert végétal et à la biomasse présente sur un pixel. Cet indice présente des valeurs allant de 0 à 1, 1 correspondant à un état de développement du couvert végétal maximal. Une version du RVI adaptée aux données de polarimétrie double a été proposée en 2019 (Nasirzadehdizaji et al. 2019). C'est cette dernière version qui est utilisée dans cette étude.

(3) Équation du RVI
Version de Y. Kim et J.J. van Zyl 2004

$$RVI = \frac{8 HV}{HH + VV + 2 HV}$$

(4) Équation du RVI
Version de Nasirzadehdizaji et al. 2019

$$RVI = \frac{4 VH}{VH + VV}$$

Le *Radar Forest Degradation Index* (RFDI) est un indice initialement calculée avec des polarimétries HH (émission horizontale – réception horizontale) et HV (émission horizontale – réception verticale) (Annexe 8). Il est techniquement sensible à la densité des forêts. Cet indice présente une valeur entre 0 et 1. Les valeurs inférieures à 0,3 correspondent à un état dense tandis que les valeurs supérieures à 0,6 à un état peu dense. Une version du RFDI adaptée aux données de polarimétrie double a été proposée en 2021 (Nicolau et al. 2021). C'est cette dernière version qui est utilisée dans cette étude.

(5) Équation du RFDI
Version initiale

$$RFDI = \frac{HH - HV}{HH + HV}$$

(6) Équation du RFDI
Version de Nicolau et al. 2021

$$RFDI = \frac{VV - VH}{VV + VH}$$

Pour cette partie de l'étude, 5 indices différents ont été utilisés : les valeurs de VV, les valeurs de VH, le ratio VH/VV, le RVI et le RFDI. L'objectif était d'explorer le maximum de possibilités en tentant de détecter des interventions à partir de toutes les données disponibles.

Les valeurs de VV et les valeurs de VH ont été traitées séparément au vu de résultats de l'étude de la corrélation entre ces valeurs présentées au Chapitre 3.3. Ces résultats montrent que, malgré l'existence de corrélations entre les valeurs de VH et de VV, notamment en période de coupe, cette corrélation est très rarement totale.

Toutes les acquisitions ont été utilisées. En effet, retirer des acquisitions auraient agrandi l'écart de temps entre les acquisitions restantes de façon non constante. Cela aurait faussé le fait d'analyser des successions de 3 acquisitions.

Pour ce qui est des valeurs des pixels, les tests suivants ont été réalisés en utilisant séparément les valeurs des pixels non modifiées, les valeurs des pixels modifiées selon une brique utilisant une moyenne non pondérée ; et les valeurs des pixels modifiées selon une brique utilisant une moyenne pondérée.

4.2.3. Réalisation de la somme cumulée :

La somme cumulée est une méthode permettant de mettre en avant des changements importants dans une série temporelle. Dans le cas présent, il s'agit que la somme cumulée des différences entre les valeurs d'un pixel pour toutes les acquisitions et la médiane de celles-ci. Cette méthode permet de centraliser les valeurs autour de zéro. Ici, contrairement à Ruiz-Ramos et al. 2020, la médiane est utilisée plutôt que la moyenne. Ce choix provient du fait qu'une médiane est moins influencée par les valeurs extrêmes, potentiellement liées à des phénomènes aléatoires. Le calcul de la somme cumulée est donc le suivant :

$$(7) \text{ Équation de la somme cumulée } SC_t$$
$$t \in [1; 112]$$
$$p = [p_1; \dots; p_{112}] \quad SC_t = \sum_{i=1}^t (p_i - med(p))$$

t représente le nombre d'acquisitions prises en compte dans le calcul. p_i la valeur d'un pixel pour l'acquisition i . p l'ensemble des valeurs possibles de p_i . med signifie « médiane ». SC_t est la valeur de la somme cumulée de l'acquisition 1 à l'acquisition t . Par exemple, dans le cas du calcul de la somme cumulée pour l'acquisition $t = 10$, i prendra l'ensemble des valeurs de 1 à t donc de 1 à 10.

Des sommes cumulées ont été réalisées sur les valeurs des parcelles. Dans ce cas, la valeur p_i de la parcelle correspond à la médiane de l'ensemble des valeurs non modifiées des pixels présents dans cette parcelle.

Des observations préliminaires des sommes cumulées du ratio VH/VV ont été réalisées en amont sur la parcelle de référence afin de valider cette méthode.

4.2.4. Détermination d'un seuil de détection :

Il a été décidé de déterminer un seuil à partir duquel des interventions seraient détectées. Ainsi, une détection se produit lorsque 3 sommes cumulées successives supérieures à ce seuil ou inférieures à l'opposé de ce seuil sont repérées. Ce choix a été fait grâce aux observations décrites dans le Chapitre 4.2.1. La détection correspond à la date de l'acquisition liée à la première de ces 3 sommes cumulées.

Au moins un seuil a été calculée pour chaque indice évoqué dans le Chapitre 4.2.2. Chaque seuil a été calculé en utilisant les données des parcelles car il n'y a pas de jeux de données de validation à l'échelle des pixels.

L'objectif du calcul était de maximiser le nombre de détections correctes et de minimiser le nombre de détections incorrectes sur les parcelles des jeux de données de parcelles. Ce calcul repose sur une méthode de dichotomie avec d'un seuil initiale de 2 pour les seuils liés à VV et à VH et 1 pour les seuils liés aux autres indices (Annexe 9).

Une détection était considérée comme correcte dans 2 cas : soit, dans le cas des parcelles avec intervention, si la détection se trouvait entre le début et la fin de l'intervention enregistrée ; soit, dans le cas des parcelles sans intervention, si la détection intervenait avant le 1^{er} janvier 2019.

Un principe sous-jacent est que l'intervention sylvicole doit être le seul évènement détecté. Si plusieurs successions distinctes de 3 sommes cumulées sont détectées, seule la première est prise en compte dans le cas où la détection concerne un parcelle avec intervention. Si, la détection liée à cette succession s'avère incorrecte cela signifie qu'un phénomène confondant avec une intervention s'est produit.

Selon ce même principe, la procédure présente vise à limiter toutes les confusions de détection entre les interventions et d'autres phénomènes. C'est pourquoi, dans le cas où la détection concerne une parcelle sans intervention, seule la dernière succession est prise en compte si plusieurs ont été détectées. Si, la détection liée à cette succession s'avère incorrecte cela signifie qu'un phénomène confondant avec la coupe s'est produit.

Afin d'éviter un phénomène de sur-apprentissage, seuls 70 % des parcelles du jeu de données de parcelles avec intervention étaient sélectionnées de manière aléatoire et utilisées dans le calcul du seuil (Moore 2001, Hawkins 2004). Prendre 100 % des parcelles aurait spécialisé le seuil uniquement pour des interventions survenues sur ces parcelles. Hors, l'objectif est ici d'obtenir un seuil non spécialisé permettant potentiellement de détecter tous types d'interventions sylvicoles.

En s'inspirant des méthodes de validation croisée à k blocs, le calcul du seuil a été répété 30 fois avec une nouvelle sélection aléatoire de parcelles à chaque itération (Kearns et al. 1997, Moore 2001). En calculant la moyenne des 30 seuils ainsi obtenus, un seuil hypothétiquement optimal a été déterminé.

Dans le cas des seuils associées aux valeurs de VV et aux valeurs de VH, le même seuil a été restitué à chaque itération. C'est pourquoi, le seuil utilisé pour détecter des interventions sylvicoles à partir des valeurs de VV est 0,765625. Dans le cas des valeurs de VH, ce seuil est 0,96875.

Dans le cas des seuils associés aux ratios, au RVI et au RFDI, 3 seuils différents ont été calculées au cours de 30 itérations. Quatre seuils ont donc été utilisés pour détecter des interventions sylvicoles avec les sommes cumulées calculées à partir de ces indices : les 3 seuils calculés et un seuil « optimal » issu de la moyenne des 3 seuils précédents. L'ensemble des seuils sont indiqués dans le Tableau 1.

Indice	Valeur du seuil	Origine
VH/VV	0,4796875	Optimal
VH/VV	0,52734375	Calculée
VH/VV	0,4375	Calculée
VH/VV	0,41015625	Calculée
RVI	0,09916992	Optimal
RVI	0,1171875	Calculée
RVI	0,12109375	Calculée
RVI	0,06591797	Calculée
RFDI	0,178776	Optimal
RFDI	0,2636719	Calculée
RFDI	0,1098633	Calculée
RFDI	0,2421875	Calculée

Tableau 1 : Listes des valeurs des seuils et leurs origines pour les indices VH/VV, RVI et RFDI. L'origine représente le fait que l'indice est directement issu des itérations « Calculé » ou issu de la moyenne des autres indices « Optimal ».

4.2.5. Obtention des résultats, modèle nul et mesures de performance :

A partir de chacun de ces seuils, des détections sont ensuite réalisées à l'échelle des pixels et des parcelles.

A l'échelle des pixels, des détections sont réalisées séparément avec les valeurs brutes des pixels et les valeurs modifiées. Néanmoins, chaque cas est présenté comme une échelle différente. Les résultats sont présentés ici vis à vis des parcelles du jeux de données. Un « vrai positif » correspond à une parcelle avec intervention entre 2019 et 2020 contenant au moins un pixel où une détection correcte a été réalisée. Un « faux positif » correspond à une parcelle sans intervention entre 2019 et 2020 contenant au moins un pixel où une détection incorrecte a été réalisée.

A l'échelle des parcelles, les valeurs brutes des pixels sont utilisées pour calculées les valeurs des parcelles. Les résultats sont présentés en comptant le nombre de vrais positifs et le nombre de faux positifs. Un « vrai positif » correspond à une détection correcte sur une parcelle avec intervention entre 2019 et 2020. Un « faux positif » correspond à une détection incorrecte sur une parcelle sans intervention entre 2019 et 2020.

Cinquante-six combinaisons d'échelle, d'indice et de seuils ont ainsi été testées. Afin de comparer ces détections à une référence de détection neutre, un « modèle nul » a été réalisé. Ce modèle part du principe qu'à chaque acquisition, un pixel a 50 % de chance d'être considéré comme en état « coupé ». Ainsi, en recherchant les successions de 3 acquisitions où le pixel est dans cet état, il est possible de réaliser des détections d'interventions similaires à la procédure évoquée dans la partie précédente. En réalisant cela pour tous les pixels et en suivant la détermination des vrais et faux positifs évoqués précédemment à l'échelle des pixels, cela permet de déterminer des valeurs de référence pour les vrais positifs et les faux positifs. L'utilisation d'un seuil n'est pas nécessaire ici.

Les résultats des détections des 56 combinaisons peuvent ainsi être comparés à une référence afin de déterminer si une combinaison fournie un résultat meilleur ou non qu'un modèle nul.

Des mesures de performances inspirées des travaux de Ruiz-Ramos et al. 2020 sont réalisées afin de faciliter les comparaisons entre le modèle nul et les résultats des combinaisons. Elles permettent aussi de déterminer plus facilement la combinaison offrant les meilleurs résultats. Ces mesures de performances sont les suivantes :

(8) Précision générale (accuracy A) :

$$A = \frac{VP + VN}{(VP + VN + FP + FN)}$$

VP : vrai positif
VN : vrai négatif
FP : faux positif
FN : faux négatif

(9) Précision coupe (recall R) :

$$R = \frac{VP}{(VP + FN)}$$

(10) Précision surcoupe (precision P) :

$$P = \frac{VP}{(VP + FP)}$$

(11) F-score (F) :

$$F = \frac{2 \cdot R \cdot P}{(R + P)}$$

C. Résultats :

1. Fluctuations des valeurs de polarimétries pour la parcelle de référence :

L'observation des fluctuations des séries temporelles des valeurs de VV et de VH est grandement facilitée par l'utilisation des moyennes mobiles. Leur utilisation permet de mettre en avant 3 types de fluctuations principales dans les variations des valeurs de VV et de VH au moment de l'intervention sylvicole. Les Figures 6 et 7 illustrent 6 pixels exemples représentant ces 3 types de fluctuations :

→ 1^{er} type : pas de variations significatives. C'est le cas du pixel 5 (Figure 6) et du pixel 712 (Figure 7). Ici, les valeurs présentes durant la période de coupe ne semblent pas spécialement différentes des variations observables sur le reste de la série temporelle.

→ 2^{ème} type : diminution de la valeur. C'est le cas du pixel 700 (Figure 6) et du pixel 580 (Figure 7). Ici, les valeurs de VV ou de VH de la période de coupe diminuent progressivement et atteignent des minima plus bas que précédemment dans la série temporelle.

→ 3^{ème} type : augmentation de la valeur. C'est le cas du pixel 50 (Figure 6) et du pixel 115 (Figure 7). Ici, les valeurs de VV ou de VH de la période de coupe augmentent progressivement et atteignent des maxima supérieurs à ceux précédemment observées dans la série temporelle.

Il est présumé que le phénomène de coupe est bien à l'origine des 2 derniers types de fluctuations identifiés. La recherche des diminutions ou augmentations progressives atteignant respectivement un nouveau minimum ou maximum se pose comme une piste pour la détection des interventions sylvicoles avec les images Sentinel-1.

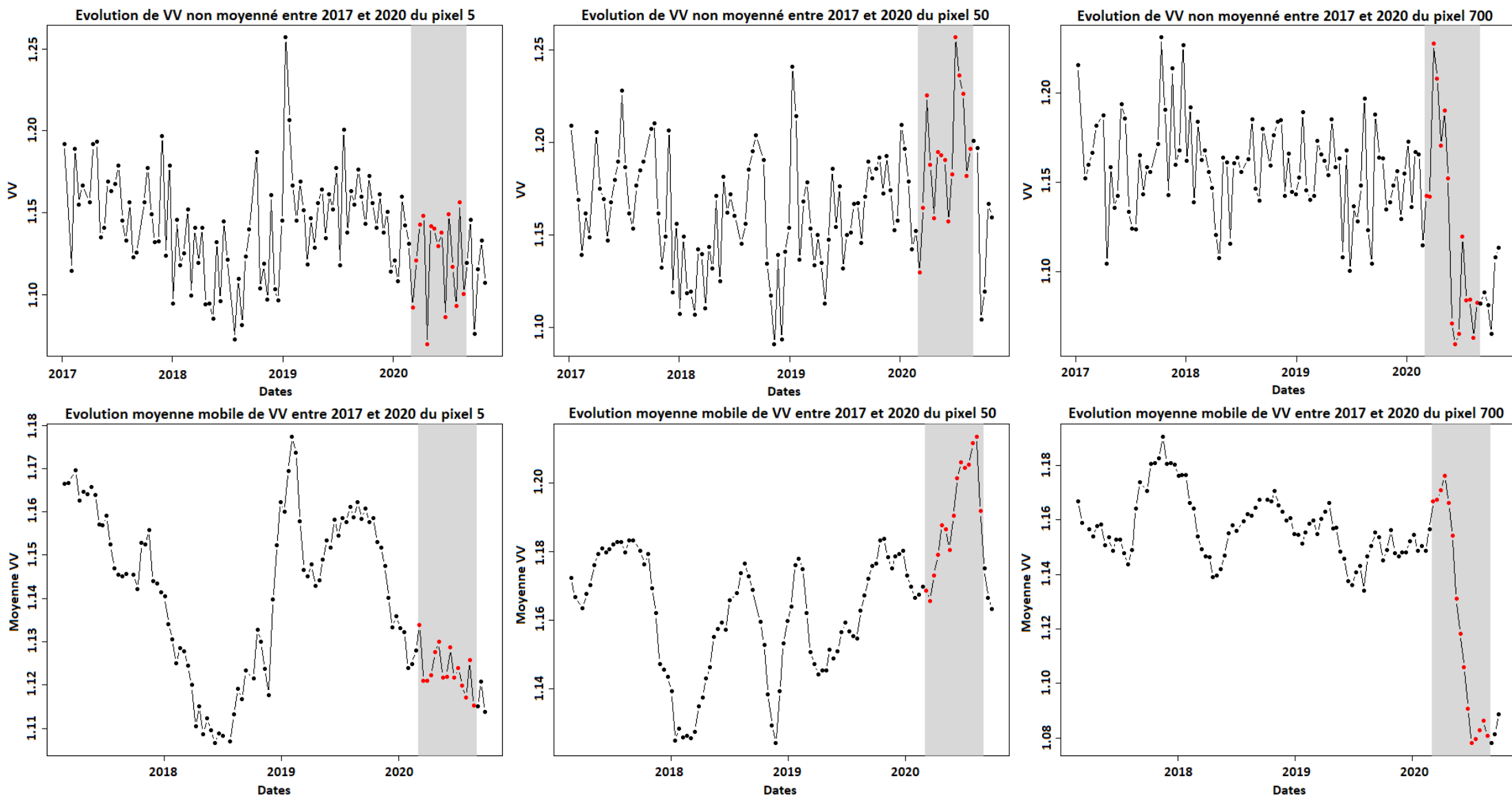


Figure 6 : Séries temporelles des valeurs de VV pour les pixels 5 (gauche), 50 (milieu) et 700 (droite) de la parcelle de référence. Les graphiques du haut représentent les valeurs brutes de VV et les graphiques du bas les moyennes mobiles. La zone grise représente la période de coupe de la parcelle et les points rouges les acquisitions Sentinel-1 réalisées durant cette période.

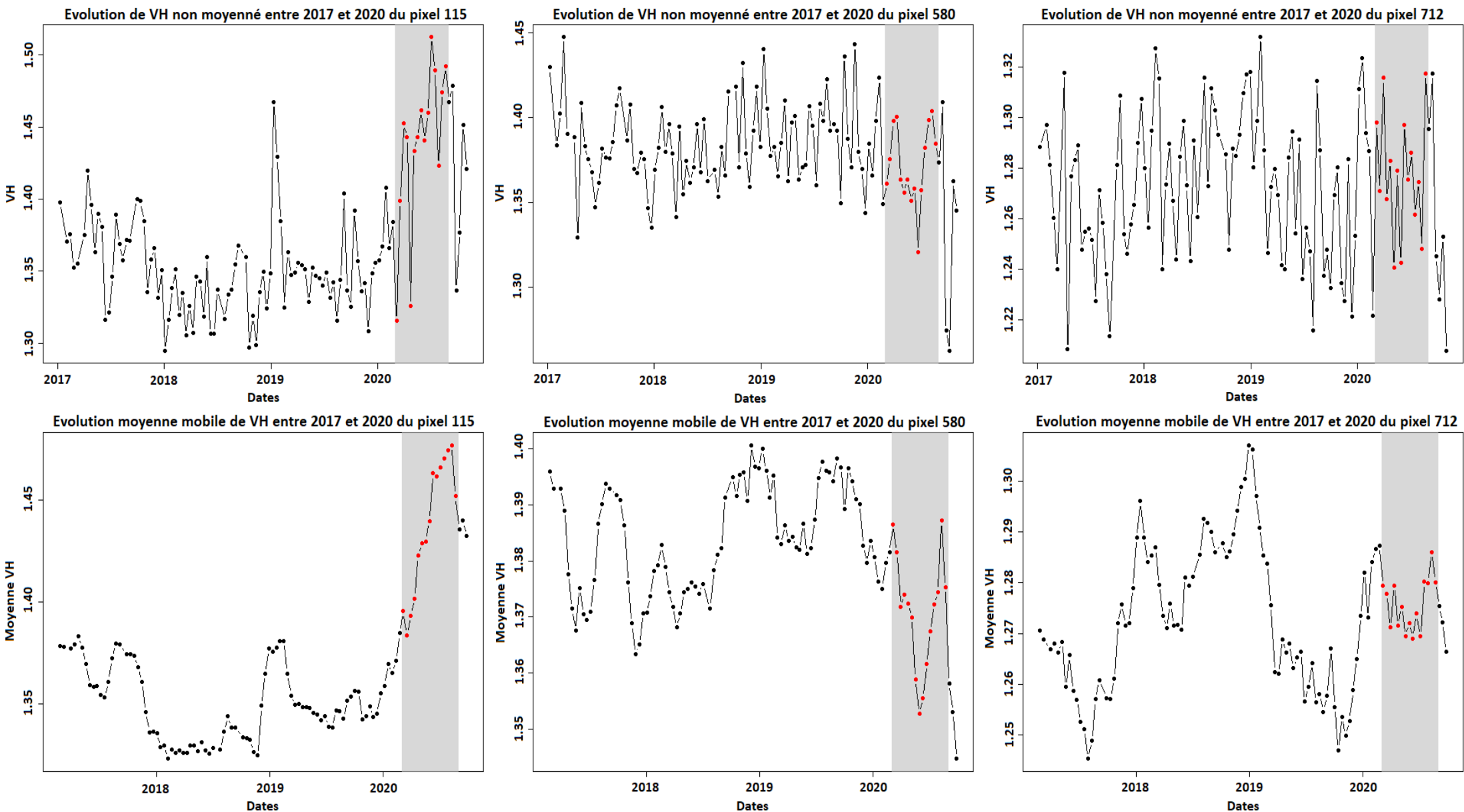


Figure 7 : Séries temporelles des valeurs de VH pour les pixels 115 (gauche), 580 (milieu) et 712 (droite) de la parcelle de référence. Les graphiques du haut représentent les valeurs brutes de VH et les graphiques du bas les moyennes mobiles. La zone grise représente la période de coupe de la parcelle et les points rouges les acquisitions Sentinel-1 réalisées durant cette période.

2. Vérification de la corrélation entre les valeurs de VV et les valeurs de VH :

Le détail des histogrammes et des estimations conservées pour chaque scénario est en Annexe 10 et sur la Figure 8. Dans aucun des scénarios, l'entièreté des corrélations n'a été conservée (cf Annexe 10).

Trois faits sont néanmoins notables. Premièrement, dans tous les scénarios, la majorité des pixels présente une corrélation positive ou négative entre leur valeur de VV et de VH, même faible. Cette corrélation est toutefois rarement totale. Par exemple, dans le cas présenté dans la Figure 8, la majorité des pixels a une corrélation de 0,25 mais aucun ne présente une corrélation de 1. Deuxièmement, c'est principalement durant la période de coupe que les maxima de cohérence entre VV et VH sont atteints. Troisièmement, en retirant les acquisitions hors période de développement végétal, la majorité des données restantes sont faiblement corrélées.

Ces résultats démontrent que des corrélations, positives ou négatives, existent entre les valeurs de VV et de VH pour des pixels affectés par une intervention sylvicole. Elles sont rarement totales montrant ainsi qu'il est pertinent de s'intéresser à ces valeurs de façon distincte.

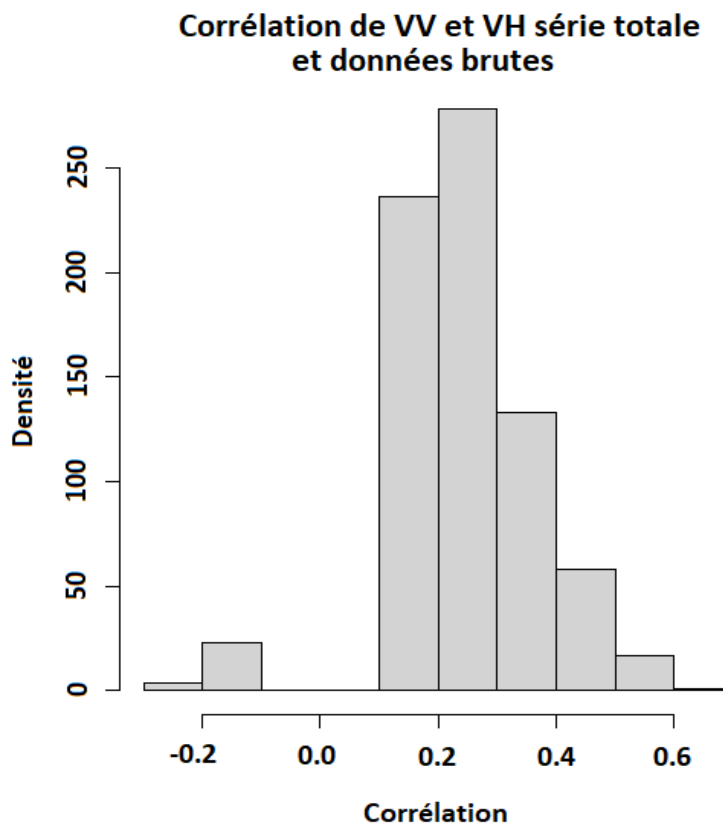


Figure 8 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles des données brutes de VV et de VH pour les pixels présents au sein de la parcelle de référence. Ici, aucune acquisition n'a été retirée. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 48,36 %.

3. Différences entre acquisitions au cours des séries temporelles :

La Figure 9 représente l'évolution des différences entre 2 acquisitions se suivant au cours de la série temporelle pour le pixel 1400 de la parcelle de référence. Visuellement, les différences les plus importantes ne semblent pas se situer durant la période de coupe. Ceci constitue une observation applicable pour de nombreux pixels de la parcelle de référence. Dans le cas de l'exemple, la différence la plus importante se situe entre la 30^{ème} (27/01/2018) et la 31^{ème} acquisition (08/02/2018).

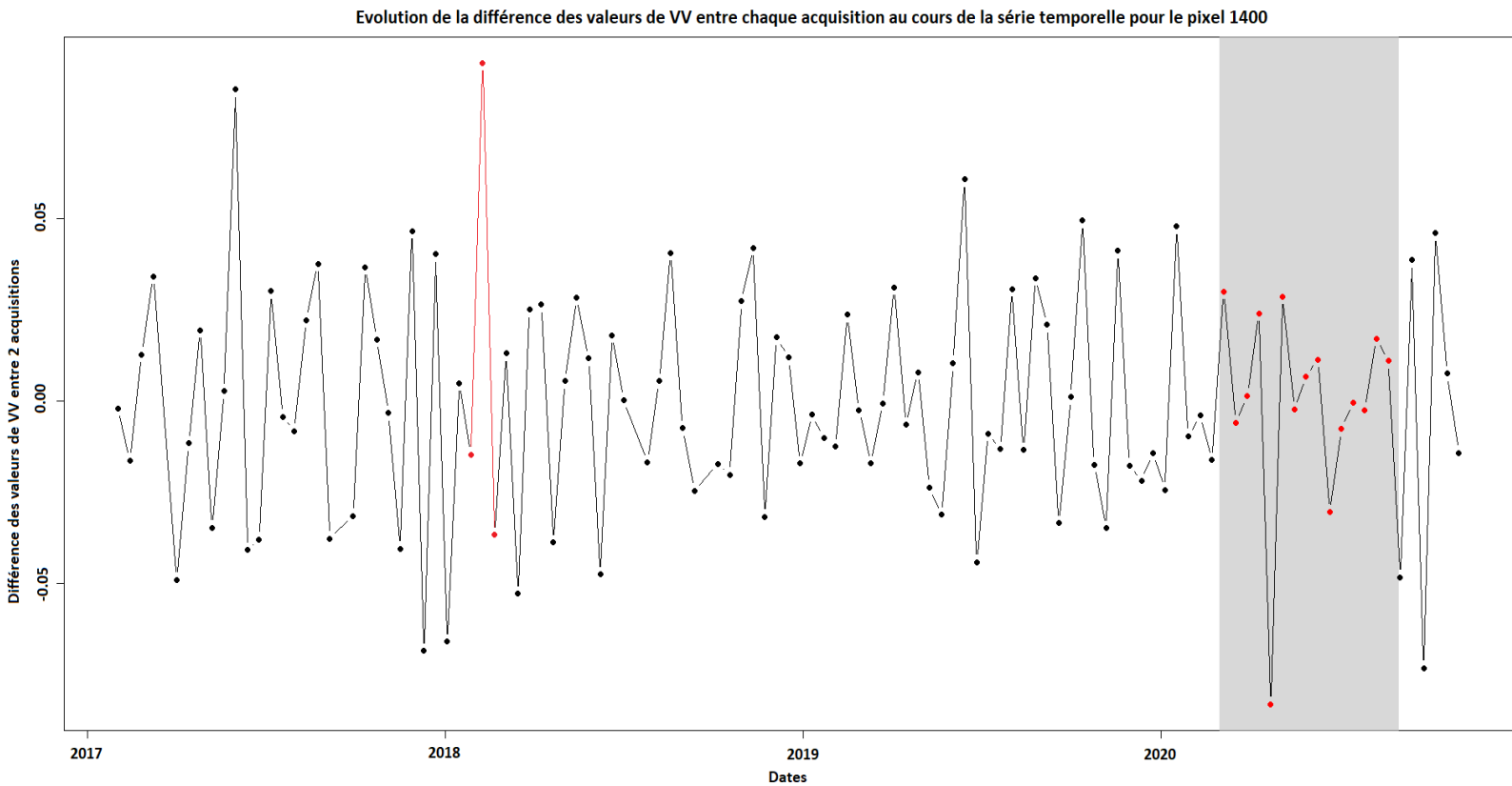


Figure 9 : Série temporelle des différences acquisitions à acquisitions des valeurs de VV pour le pixel 1400 de la parcelle de référence. La zone grise représente la période de coupe de la parcelle et les points rouges les acquisitions Sentinel-1 réalisées durant cette période.

4. Résultats des comparaisons des jeux de données de parcelles :

Le Tableau 2 permet d'apprécier les résultats des tests de Wilcoxon et des tests t de Student et ceux avec une correction de Welch, désignés par « Test de Welch », réalisés sur les statistiques zonales des parcelles.

Deux points importants sont notables sur ce tableau. Premièrement, sur l'ensemble des tests réalisés sur le cas « **total** », seules les tests sur les médianes et les écarts types des valeurs de VV ne sont pas significatifs. Cela signifie que, dans ces cas, il n'y a pas de différences significatives entre le jeu de parcelles avec interventions et le jeu de parcelles sans intervention. Deuxièmement, pour les cas « **réduit** » et « **réduit briqué** », seuls les tests sur la normalité des valeurs de VH sont significatifs. Cela signifie qu'ici les jeux de parcelles avec et sans intervention sont significativement différents. C'est à partir de cette observation que les tests sur la normalité des pixels ont été réalisés.

Total						
Statistiques	Moyenne	Médiane	Maximum	Minimum	Écart	Normalité
VV test	Test de Student	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
VV résultat	0,01979	0,05413	1,43E-12	0,004838	0,4866	1,01E-06
VH test	Test de Wilcoxon	Test de Student	Test de Student	Test de Student	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
résultat	0,009353	0,0191	7,64E-14	0,02012	0,3515	1,50E-05
Réduit						
Statistiques	Moyenne	Médiane	Maximum	Minimum	Écart	Normalité
VV test	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
VV résultat	0,1692	0,1743	0,2264	0,6843	0,7513	0,06801
VH test	Test de Welch	Test de Welch	Test de Wilcoxon	Test de Student	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
résultat	0,06289	0,09604	0,232	0,2197	0,4041	0,03309
Réduit Briqué						
Statistiques	Moyenne	Médiane	Maximum	Minimum	Écart	Normalité
VV test	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
VV résultat	0,05599	0,06868	0,2741	0,2396	0,9578	0,08068
VH test	Test de Welch	Test de Welch	Test de Wilcoxon	Test de Student	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
résultat	0,06289	0,09174	0,1836	0,2474	0,4003	0,04159

Tableau 2 : Résultats des tests comparant les jeux de données de parcelles sur les statistiques zonales des différentes parcelles étudiées. Les valeurs numériques représentent ici les valeurs de p-value. L'explication des termes de ce tableau se trouve dans le Chapitre Partie 4.1.1. du Matériel et Méthodes. Les résultats inférieurs à 0,05 ont été surlignés en orange.

Le Tableau 3 présente les résultats des tests de Wilcoxon des comparaisons des proportions des pixels suivant une loi normale pour les parcelles des jeux de données. Aucun différence significative entre le jeu de parcelles avec intervention et le jeu de parcelles sans intervention n'a été mise en avant par cette méthode.

	Total	Réduit	Réduit Briqué
VV Test	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
VV résultat	0,3836	0,8888	0,8234
VH Test	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon	Test de Wilcoxon
VH résultat	0,2931	0,8166	0,866

Tableau 3 : Résultats des tests comparant les jeux de données de parcelles sur les proportions de pixels suivant une loi normal au sein des différentes parcelles étudiées. Les valeurs numériques représentent ici les valeurs de p-value. Les termes utilisés sont les mêmes que ceux du Tableau 2.

5. Observations préliminaires des sommes cumulées :

Les valeurs des pixels étaient ici les valeurs du ratio VH/VV. La Figure 10 représente les variations de la valeur p_i du ratio VH/VV de la parcelle au cours de la série temporelle ainsi que l'écart à la médiane à chaque acquisition i . La Figure 11 représente les sommes cumulées SC_t suivant l'équation (7) du ratio VH/VV pour la parcelle de référence. Chaque point représente une valeur de SC_t .

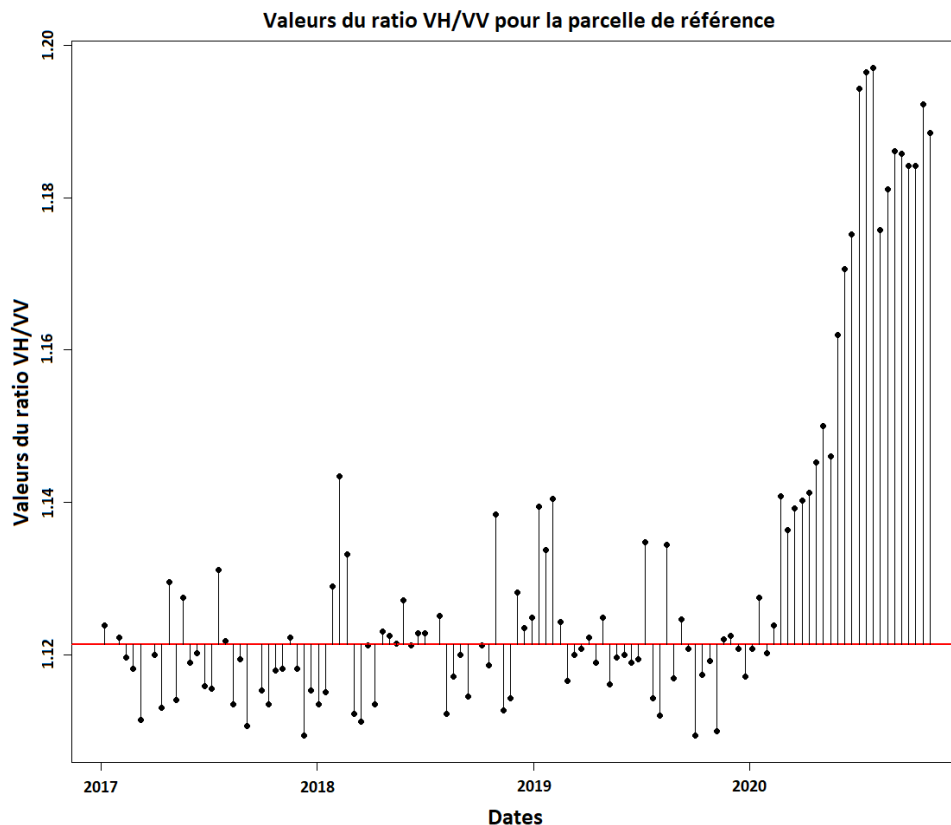


Figure 10 : Variations des valeurs du ratio VH/VV au cours de la série temporelle pour la parcelle de référence. Chaque point représente une valeur du ratio. La ligne rouge représente la médiane de l'ensemble des valeurs du ratio. Chaque ligne noire représente l'écart en une valeur du ratio et la médiane.

L'observation de la Figure 10 permet de constater un phénomène d'augmentation de la valeur du ratio VH/VV à partir du début de la coupe rase (mars 2020). Cette augmentation se retrouve sur la Figure 11. Également, les variations les plus faibles sont lissées autour de zéro dans le cas de la somme cumulée. La fluctuation la plus visible est la fluctuation la plus forte et continue, synchronisée avec l'intervention sylvicole. Ces figures confirment que les sommes cumulées peuvent permettre l'observation de changements importants et la diminution de l'influence des variations non causées par l'intervention.

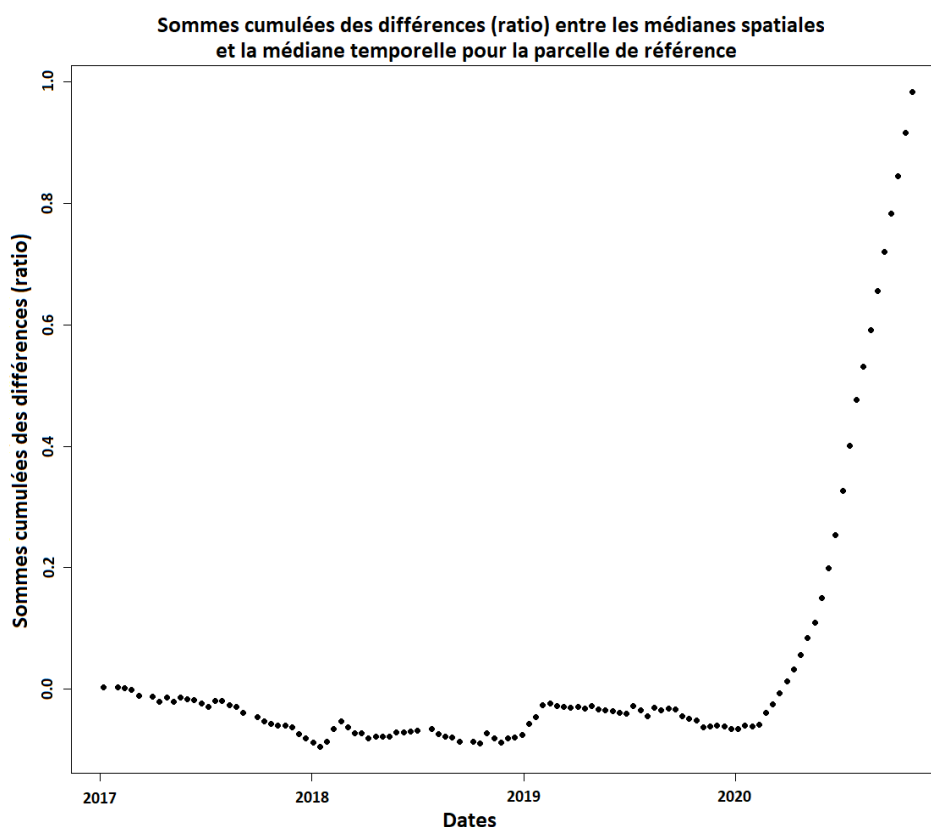


Figure 11 : Evolution des valeurs des sommes cumulées pour le ratio VH/VV au cours de la série temporelle pour la parcelle de référence.

6. Résultats de détection par l'utilisation des sommes cumulées :

Les résultats bruts des 56 combinaisons de seuils, d'indices et d'échelles ainsi que ceux du modèle nul sont présentés en Annexe 11. En excluant les combinaisons liées à l'échelle parcelle, seules 4 des 42 combinaisons restantes ne présentent pas un taux de faux positifs de 149. Ce nombre signifie qu'une intervention a été détectée entre 2019 et 2020 pour l'entièreté des parcelles sans intervention entre 2019 et 2020. Pour ces combinaisons, le résultat de faux positifs le plus faible est de 139. Pour ce qui est des résultats de vrais positifs, le meilleur résultat des 42 combinaisons précédentes est de 143 (combinaison : RFDI, Brique Moyenne Pondérée, seuil de 0,1098633). Le moins élevé est de 76 (combinaison : VH, Brique Moyenne Normale, seuil de 0,96875).

Les performances du modèle nul sont les suivantes : $A = 0,265 \pm 0,014$; $R = 0,530 \pm 0,033$; $P = 0,346 \pm 0,014$; et $F = 0,419 \pm 0,020$. Les résultats de performances sur les combinaisons sont présentés en Annexe 12. Au vu du F-score, excepté les combinaisons avec l'échelle parcelle, 41 des 42 restantes ont un taux de détection meilleur que le modèle nul. La seule combinaison n'ayant pas un F-score supérieur à celui du modèle est la combinaison VH, Brique Moyenne Normale et seuil de 0,96875. Il s'agit également de la combinaison avec les performances les plus faibles. Les meilleures performances sont celles obtenues avec la combinaison RFDI, Brique Moyenne Pondérée et seuil de 0,1098633 affiché dans le Tableau 4.

Mesures	Échelle	Brique Moyenne Pondérée
	Indice	VH/VV
	Seuil	0,1098633
Précision générale A		0,48
Précision coupe R		0,96
Précision surcoupe P		0,49
F-score		0,649

Tableau 4 : Résumé des meilleures performances obtenues avec la combinaison RFDI, Brique Moyenne Pondérée et seuil de 0,1098633.

Enfin, la Figure 12 représente le pourcentage de pixels où une intervention est détectée pour chaque parcelle. Les 2 jeux de données de parcelles y sont comparés. Deux informations sont principalement remarquables. Premièrement, presque 120 parcelles du jeu de parcelles avec intervention présentent un pourcentage de pixels où une intervention est détectée compris entre 0 et 5 %. Deuxièmement, visuellement, il est constatable que les parcelles du jeu de parcelles sans intervention présentent un pourcentage de pixels où une intervention est détectée en moyenne et en médiane bien supérieur aux autres parcelles.

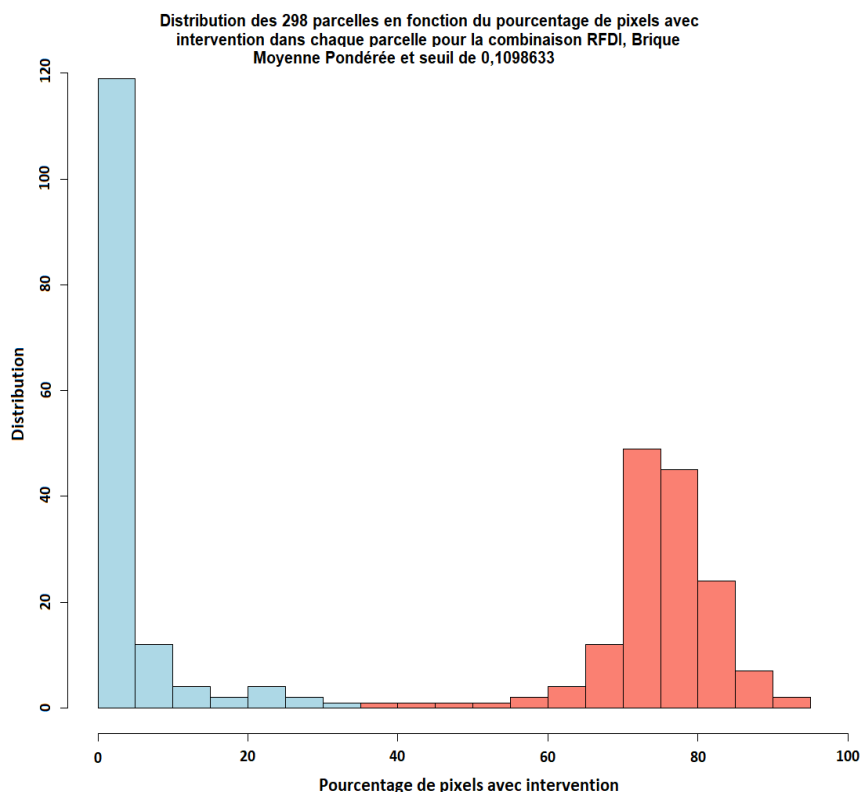


Figure 12 : Représentation de la distribution du pourcentage de pixels avec intervention dans chaque parcelle avec utilisation d'une détection sur le RFDI et au seuil de 0,4796875. Les valeurs des pixels ont été modifiées par l'utilisation d'une brique avec moyenne pondérée. La zone rouge représente le jeu de données de parcelles sans intervention entre 2019 et 2020. La zone bleue représente le jeu de données de parcelles avec interventions entre 2019 et 2020.

D. Discussion :

1. Interprétation des résultats d'observations :

Sur la parcelle de référence, l'observation des fluctuations des valeurs de polarimétrie a montré que ces valeurs pouvaient présenter des variations continues jusqu'à un maximum ou un minimum respectivement supérieur ou inférieur à ceux du reste de la série temporelle. Cette observation a guidé le protocole développé dans cette étude. De même, le fait que rares sont les cohérences entre les valeurs de VV et de VH supérieures à 0,5, a confirmé l'intérêt d'étudier les valeurs de polarimétrie séparément.

La méthode de comparaison de 2 acquisitions à la suite n'est pas une méthode envisageable pour détecter des interventions. Sur la parcelle de référence, le fait que des différences entre 2 acquisitions plus importantes soient observées en dehors de la période de coupe est éliminatoire. Comparer des acquisitions une à une pourrait mener à des erreurs.

2. Analyse des résultats des tests et possibilités d'améliorations :

Malgré tout, grâce aux résultats de cette étude, il semble envisageable d'utiliser les données Sentinel-1 pour détecter des interventions sylvicoles sur le site de l'EP PNC, notamment en complémentarité des données Sentinel-2.

En effet, 3 points en faveur de l'utilisation de ces données ont été mis en avant :

- En premier, l'étude de la normalité des parcelles semble être une piste potentielle quant à la distinction des parcelles avec et sans intervention. Cette piste s'oriente vers un maintien de l'échelle parcelle.

Afin d'explorer plus en profondeur cette piste, plusieurs possibilités peuvent ainsi être envisagées. L'une d'elles consisterait à classer les parcelles en utilisant un modèle. Le modèle se servirait des informations de normalités et classerait les parcelles en 2 groupes distincts. Cette manipulation pourrait être répétée afin de générer les 2 groupes dont la comparaison par un test de Wilcoxon offre la p-value la plus faible. Ainsi, un groupe serait le groupe des parcelles « avec interventions » et l'autre, celui des parcelles « sans intervention ».

Une telle procédure serait très probablement entachée de nombreuses erreurs. Des parcelles sans intervention pourraient être classées dans le groupe des parcelles avec interventions. Toutefois, cela pourrait permettre de mieux visualiser les parcelles présentant des valeurs dont les fluctuations sont confondantes avec une intervention sylvicole. Cela pourrait être utilisé pour soit, découvrir quel phénomène survenu sur ces parcelles est à l'origine de la confusion, soit évaluer un potentiel taux d'erreurs dans les détections intrinsèques aux données utilisées.

- En second, les détections via l'utilisation des sommes cumulées sont loin d'être rédhitoires. Tout d'abord, les rapports préalables de l'EP PNC sur la précision de l'outil Coupe Rase ont montré que seules 7 parcelles avec interventions ont été détectées avec les données Sentinel-2 (Braconnier 2021). Ce résultat est donc bien inférieur à la majorité des combinaisons testées ici. Néanmoins, ce résultat n'est pas entaché de faux positifs, à l'inverse des résultats présents. Malgré tout, il serait intéressant de tester les différentes combinaisons de cette étude sur uniquement ces 7 parcelles. Cela permettrait de voir dans quel cas une parcelle est détectée ou non.

Cette partie constitue la suite directe du projet. Il est crucial d'identifier clairement quelles parcelles avec interventions ne sont pas détectées pour les différentes combinaisons. Il s'agit de la piste la plus pertinente pour tenter de réaliser un protocole de caractérisation des interventions. Cette piste pourrait permettre de distinguer les parcelles par type ou par intensité d'interventions.

- En troisième, les résultats obtenus sont encourageants vis à vis des méthodes. En effet, le fait d'avoir obtenu des détections meilleures qu'un modèle nul et un taux de vrais positifs élevé laisse une piste majeure d'amélioration : la diminution du taux de faux positifs. Cette piste viserait à utiliser les images Sentinel-1 de façon autonome aux images Sentinel-2. Le complément des images Sentinel-1 serait ainsi l'ajout de nouvelles détections en plus de la caractérisation de celles détectées avec Sentinel-2. Trois possibilités sont envisageables ici.

Premièrement, les données de cohérence interférométrique SAR (InSAR) Sentinel-1 peuvent être utilisées. Il s'agit de données contenant l'information de la distance satellite-réflécteur contenue dans une image Sentinel-1 (Massonnet et Feigl 1998). Ces données sont sensibles à la hauteur des réflecteurs (Augier 2011, Li et al. 2020). Si la hauteur d'un élément reste constante entre 2 acquisitions, alors la donnée InSAR sera aussi constante. Elles peuvent être ainsi utilisées pour détecter des interventions sylvicoles en permettant de repérer des chutes de la hauteur dues à la perte des arbres (Kumar et Krishna 2019). Des auteurs comme Akbari et Solberg 2020 ont déjà mis en avant la possibilité d'utiliser les données de cohérence (InSAR) en complément des SAR pour la détection de coupes rases (Akbari et Solberg 2020). Toutefois, ces données sont sensibles aux modifications normales de la canopée causées par les vents et la perte foliaire (Askne et Santoro 2005, Thiel et Schmulius 2016). Enfin, il s'agit de données lourdes et dont le prétraitement peut s'avérer long.

Deuxièmement, le code actuel permettant les détections peut être modifié voire amélioré. En effet, de nombreuses possibilités sont encore à tester. Parmi elles, le fait de remplacer la médiane par une autre statistique semble une première piste. Cela nécessiterait de recréer des combinaisons mais l'utilisation de la moyenne, par exemple, permettrait de se rapprocher de la méthode développée par Ruiz-Ramos et al. (Ruiz-Ramos et al. 2020). En changeant le processus de détection actuel, des résultats offrant une réduction des faux positifs pourraient être trouvés.

Troisièmement, les ambitions de détections pourraient être revue à la baisse. Les méthodes actuelles sont calibrées pour tenter de détecter tous types d'interventions. Cela inclut des interventions sylvicoles de faibles intensités qui demeurent parfois non visibles par photo-interprétation (Braconnier 2021). Elles peuvent être confondues avec des phénomènes aléatoires non sylvicoles résultant d'accidents climatiques ou sanitaires. Il serait intéressant de répéter les méthodes développées en excluant les parcelles ayant subies ces types d'interventions. Cela permettrait de calibrer les méthodes sur la détection de coupes les plus fortes, diminuant certes le taux de vrais positifs des méthodes mais, potentiellement, le taux de faux positifs également.

3. Critiques globales supplémentaires :

Une autre critique du travail effectué ici est proposable. Les conditions de détections sur les parcelles avec interventions peuvent être considérées comme restrictives. Ici, seules les détections comprises dans la période de coupe sont correctes. Or, dans d'autres études, les détections peuvent être également réalisées sur la période post-intervention (Ose et Cresson 2019, Akbari et Solberg 2020). Cela augmente les chances de détection. Néanmoins, ces études font le focus à détecter des coupes rases uniquement. Les coupes rases ont un impact dans la durée important. Cet impact est visible sur des données Sentinel-2 (Ose et Cresson 2019, De Petris et al. 2020). Ce n'est pas forcément le cas pour toutes les interventions (López-Amoedo et al. 2021). Il est donc nécessaire d'établir, en premier lieu, l'impact sur la durée de tous les types d'interventions et si cet impact est visible sur les données utilisées.

Enfin, il serait pertinent de refaire les observations réalisées sur la parcelle de référence sur d'autres parcelles, notamment celles sans intervention. Il s'agirait d'un travail long et fastidieux. Malgré tout, cela permettrait de mieux comprendre les fluctuations des valeurs de polarimétrie et, potentiellement, d'identifier les causes des faux positifs.

E. Conclusion :

L'objectif initial de cette étude était d'établir précisément le potentiel des images Sentinel-1 dans l'amélioration des détections réalisées avec les images Sentinel-2. Cet objectif n'a pas été atteint. Il était ardu d'envisager une méthode d'amélioration sans connaître précisément les capacités des images Sentinel-1. De plus, les méthodes déjà proposées dans la littérature n'étaient pas parfaitement satisfaisantes car, soit non applicables aux données disponibles, soit focalisées sur les coupes rases uniquement. L'intérêt était ici porté sur tous les types d'interventions sylvicoles.

Une part importante de cette étude a consisté à comprendre et à visualiser les données utilisées afin de développer des méthodes de détection. Il était également primordiale de définir le comportement des fluctuations des valeurs de polarimétrie en période de coupe.

Beaucoup de temps a également été consacré aux données en elles-mêmes. Leur prétraitement ou leur tri ont été plus longs que prévus et accompagnés de nombreuses discussions dont certaines sont encore ouvertes aujourd'hui. Le travail prévu n'est donc pas terminé et de multiples manipulations, modifications et corrections restent à faire.

Au final, les méthodes de détection des interventions sylvicoles au sein de l'EP PNC avec les images Sentinel-1 développées dans cette étude sont entachées d'erreurs. Cependant, elles offrent des bases solides afin de, soit développer de meilleures méthodes de détection, soit d'aider à caractériser les interventions sylvicoles détectées avec l'utilisation des images Sentinel-2.

Une des suites du projet va consister à développer des méthodes de caractérisation des interventions en fonction de la répartition des pixels au sein d'une parcelle. En effet, qu'il s'agisse des images Sentinel-1 ou des images Sentinel-2, un protocole de caractérisation a été développé en parallèle de cette étude. Ce protocole repose sur une idée simple : les interventions sylvicoles n'ont pas le même impact sur le paysage. Les interventions permettant un renouvellement faciliter de la forêt auront tendance à avoir plus d'impact sur le paysage que les autres.

Deux types d'interventions sont à l'origine de cette idée. Elles sont considérées comme des extrêmes en termes d'impact sur le paysage. Les coupes rases ont un impact fort et provoquent des trouées de plusieurs hectares au sein d'une parcelle. Hypothétiquement, elles toucheront de nombreux pixels sur les images Sentinel et ces pixels seront regroupés. Par opposition, les éclaircies sont des interventions consistant à retirer uniquement quelques arbres ou groupes d'arbres au sein d'une parcelle. Elles peuvent toucher plusieurs hectares mais sont dispersées sur un territoire. Hypothétiquement, elles toucheront peu de pixels sur les images et ces pixels seront dispersés.

Ces 2 hypothèses constituent les extrêmes d'un gradient. Ce gradient viserait à caractériser le taux de dispersion des pixels détectés comme « avec interventions » au sein d'une parcelle. Dans cette idée, plus les pixels avec interventions seront nombreux et plus ils seront regroupés, plus la valeur sur le gradient sera élevée. Ainsi, plus la valeur du gradient sera élevée, plus la probabilité que l'intervention détectée soit une intervention permettant un renouvellement faciliter de la forêt sera élevée.

Via cette méthode, la caractérisation des interventions détectées ne sera pas nominative. Il ne sera pas possible de distinguer des interventions selon leurs noms officiels en sylviculture. Néanmoins, elle permettra de repérer, selon des probabilités, les parcelles les plus sensibles à l'abrutissement des cervidés. Cela offrira ainsi un bon outil d'aide à la décision en milieux forestiers vis à vis des problématiques liées aux populations de cervidés à destination des acteurs sylvicoles et cynégétiques.

Bibliographie :

- Akbari V, Solberg S (2020) *Clear-Cut Detection and Mapping Using Sentinel-1 Backscatter Coefficient and Short-Term Interferometric Coherence Time Series*. IEEE Geosci Remote Sensing Letters. 5 p.
- Alazard P, Trichet P, Danjon F (2013) *Reconstitution de la forêt par régénération artificielle*. Cahiers de la Reconstitution. 12 p.
- Askne J, Santoro M (2005) *Multitemporal repeat pass SAR interferometry of boreal forests*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 43 vol, 1219–1228.
- Augier A (2011) *Etude de l'éruption d'avril 2007 du Piton de la Fournaise (île de la Réunion) à partir de données d'interférométrie RADAR et GPS, développement et application de procédures de modélisation*. Thèse de doctorat, Université de Blaise Pascal - Clermont-Ferrand 2. TEL archives ouvertes (00997945v2). 422 p.
- Ballon P, Guibert B, Hamard J-P, Guillon N (1999) *Sensibilité de quelques essences forestières de reboisement à l'abrutissement par le Chevreuil (Capreolus capreolus)*. Revue Forestière Française, 20 p.
- Beaudesson PP, Brossier P, Apert A (2015) *Prélèvements intensifs et soutenus pour la maîtrise des populations de cervidés dans des forêts allemandes*. Forêt entreprise. 225 vol. 12-16.
- Bouriaud O (2020) *Réponses de la productivité des forêts aux fluctuations météorologiques: biais et surestimations des estimations de terrain*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud. TEL archives ouvertes (03123055f). 52 p.
- Braconnier J (2021) *Suivi des peuplements forestiers sensibles à l'abrutissement du Parc national des Cévennes : Évaluation d'une approche par télédétection satellitaire*. Rapport de stage, AgroParisTech Nancy. Parc National des Cévennes. 94 p.
- Chankhihort D, Lim B-M, Lee G-J, Choi S, Kwon S-O, Lee S-H, Kang J-T, Nasridinov A, Yoo K-H (2017) *A Visualization Scheme with a Calendar Heat Map for Abnormal Pattern Analysis in the Manufacturing Process*. International Journal of Contents. 13 vol. 21–28.
- CNPF (2019) *Dossier la télédétection au service de la gestion forestière*. 247 vol. 67 p.
- Côté SD, Rooney TP, Tremblay J-P, Dussault C, Waller DM (2004) *Ecological Impacts of Deer Overabundance*. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 35 vol. 113–147.
- Cresson R, Ienco D, Gaetano R, Ose K, Tong Minh DH (2019) *Optical image gap filling using deep convolutional autoencoder from optical and radar images*. In: *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, Yokohama, Japan, p 218–221.
- De Backer T (2019) *Contribution à la validation d'indicateurs forestiers nécessaires au pilotage de l'équilibre sylvo-cynégétique*. Apports de la télédétection satellitaire. Rapport de stage, Bordeaux Sciences Agro. IRSTEA. 43 p.

- De Petris S, Berretti R, Guiot E, Giannetti F, Motta R, Borgogno-Mondino E (2020) *Detection And Characterization of Forest Harvesting In Piedmont Through Sentinel-2 Imagery: A Methodological Proposal*. Annals of Silvicultural Research. 45 p.
- Demaze MT (2008) *Le monitoring de la forêt amazonienne par télédétection*. TEL archives ouvertes (00315775). 15 p.
- Febvre V, Bec R, Chaléat A, Baconnet M (2018) *Les forêts anciennes du Parc National des Cévennes : état des lieux*. 8 p.
- Fieller E, Pearson E (1961) *Tests for rank correlation coefficients. II*. Biometrika. 48 vol. 29 p.
- Fofana B (2019) *Apport de la cartographie des coupes rases par télédétection satellitaire dans la construction d'indicateurs forestiers nécessaires au pilotage de l'équilibre sylvo-cynégétique*. Rapport de stage, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. IRSTEA. 69 p.
- Gill RMA (2001) *The impact of deer on woodlands: the effects of browsing and seed dispersal on vegetation structure and composition*. Forestry. 74 vol. 209–218.
- Guccione P, Lombardi A, Giordano R (2016) *Assessment of seasonal variations of radar backscattering coefficient using sentinel-1 data*. In: *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE, Beijing, China, 3402–3405.
- Guignabert A (2018) *Etude des processus de régénération naturelle du pin maritime en contexte de dune forestière gérée: influence de la sylviculture, du climat et des interactions biotiques*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux. TEL archives ouvertes (02121792). 212 p.
- Hawkins DM (2004) *The Problem of Overfitting*. Journal of Chemical Information and Computer Sciences. 44 vol. 1–12.
- de Jong J (2000) *Rain Storage in Forests Detected with ERS Tandem Mission SAR*. Remote Sensing of Environment. 72 vol. 170–180.
- Kearns M, Hill M, Ron D (1997) *Algorithmic Stability and Sanity-Check Bounds for Leave-One-Out Cross-Validation*. Neural Comput. 21 p.
- Klein F, Rocquencourt A, Ballon P (2008) *Pour un meilleur équilibre sylvo-cynégétique - Des pratiques favorables aux cervidés*. Brochures ONCFS Cemagref. 54 p.
- Köhl M, Baldauf T, Plugge D, Krug J (2009) *Reduced emissions from deforestation and forest degradation (REDD): a climate change mitigation strategy on a critical track*. Carbon Balance and Management. 4 vol. 10 p.
- Kumar P, Krishna AP (2019) *InSAR-Based Tree Height Estimation of Hilly Forest Using Multitemporal Radarsat-1 and Sentinel-1 SAR Data*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 12 vol. 5147–5152.
- Li X, Zhou Y, Gong P, Seto KC, Clinton N (2020) *Developing a method to estimate building height from Sentinel-1 data*. Remote Sensing of Environment. 240 vol. 8 p.

- López-Amoedo A, Álvarez X, Lorenzo H, Rodríguez JL (2021) *Multi-Temporal Sentinel-2 Data Analysis for Smallholding Forest Cut Control*. *Remote Sensing* 13 vol. 32 p.
- Martinot-Lagarde P (1969) *Traitement des peuplements*. *Revue Forestière Française*. 468–469.
- Massonnet D, Feigl KL (1998) *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*. *Reviews of Geophysics*. 36 vol. 441–500.
- Mitchard ETA, Saatchi SS, White LJT, Abernethy KA, Jeffery KJ, Lewis SL, Collins M, Lefsky MA, Leal ME, Woodhouse IH, Meir P (2012) *Mapping tropical forest biomass with radar and spaceborne LiDAR in Lopé National Park, Gabon: overcoming problems of high biomass and persistent cloud*. *Biogeosciences*. 9 vol. 179–191.
- Moore AW (2001) *Cross-validation for detecting and preventing overfitting*. School of Computer Science Carnegie Mellon University. 63 p.
- Morin D (2020) *Estimation et suivi de la ressource en bois en France métropolitaine par valorisation des séries multi-temporelles à haute résolution spatiale d'images optiques (Sentinel-2) et radar (Sentinel-1, ALOS-PALSAR)*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III. TEL archives ouvertes (03098487). 147 p.
- Nasirzadehdizaji R, Balik Sanli F, Abdikan S, Cakir Z, Sekertekin A, Ustuner M (2019) *Sensitivity Analysis of Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Parameters to Crop Height and Canopy Coverage*. *Applied Sciences*. 9 vol. 18 p.
- Nicolau AP, Flores-Anderson A, Griffin R, Herndon K, Meyer FJ (2021) *Assessing SAR C-band data to effectively distinguish modified land uses in a heavily disturbed Amazon forest*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 94 vol. 13 p.
- Ose K, Cresson R (2019) *Clear-Cuts Detection Services for The Monitoring Needs of the French Ministry of Agriculture*. In: *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, Montpellier, France, 4284–4287.
- Pellerin M, Labarrere C, Michallet J, Chevrier T, Richard E, Guibert B (2016) *Vers une nouvelle gestion du grand gibier : les indicateurs de changement écologique, Actes du colloque tenu à Chambord (Loir-et-Cher) les 20 et 21 mai 2015*, ONCFS-Fondation François Sommer-FNC, Paris, France. 171 p.
- Ponge J-F, André J, Bernier N, Gallet C (1994) *La régénération naturelle : connaissances actuelles. le cas de l'épicéa en forêt de macot (Savoie)*. *Revue Forestière Française*. 25 p.
- Rauste Y, Antropov O, Mutanen T, Hame T (2016) *On Clear-Cut Mapping with Time-Series of Sentinel-1 Data in Boreal Forest*. *Living Planet Symposium*. 740 vol. 115 p.
- Reiche J, Verhoeven R, Verbesselt J, Hamunyela E, Wielaard N, Herold M (2018) *Characterizing Tropical Forest Cover Loss Using Dense Sentinel-1 Data and Active Fire Alerts*. *Remote Sensing*. 10 vol. 18 p.
- Reimoser F, Gossow H (1996) *Impact of ungulates on forest vegetation and its dependence on the silvicultural system*. *Forest Ecology and Management*. 88 vol. 107–119.

- Rochon J, Gondan M, Kieser M (2012) *To test or not to test: Preliminary assessment of normality when comparing two independent samples*. BMC Medical Research Methodology. 12 vol. 11 p.
- Ruiz-Ramos J, Marino A, Boardman C, Suarez J (2020) *Continuous Forest Monitoring Using Cumulative Sums of Sentinel-1 Timeseries*. Remote Sensing. 12 vol. 23 p.
- Saatchi S (2019) *SAR Methods for Mapping and Monitoring Forest Biomass Chapter 5*. 41 p.
- Saatchi SS, Harris NL, Brown S, Lefsky M, Mitchard ETA, Salas W, Zutta BR, Buermann W, Lewis SL, Hagen S, Petrova S, White L, Silman M, Morel A (2011) *Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents*. Proceedings of the National Academy of Sciences. 108 vol. 9899–9904.
- Saint-Andrieux C, Barboiron A (2017) *Tableaux de chasse ongulés sauvages saison 2016-2017*. Faune sauvage. 316 vol. 8 p.
- Samalens J-C (2009) *Stratégies d'échantillonnage des dommages forestiers à l'échelle du paysage - Application aux forêts cultivées de pin maritime (Pinus pinaster, Ait.)*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies - Bordeaux 1. TEL archives ouvertes (02823537).
- Thiel C, Schmullius C (2016) *The potential of ALOS PALSAR backscatter and InSAR coherence for forest growing stock volume estimation in Central Siberia*. Remote Sensing of Environment. 173 vol. 258–273.
- Vaca CC, van der Tol C (2018) *Sensitivity of Sentinel-1 to Rain Stored in Temperate Forest*. In: *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, Valencia, 5330–5333
- Yunjin Kim, van Zyl J (2004) *Vegetation effects on soil moisture estimation*. In: *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004*. IEEE, Anchorage, AK, USA, 800–802.

Annexes :

Annexe 1 : Comparaison des surfaces des jeux de données parcellaires utilisés dans cette étude

Mesures	Parcelles avec Interventions	Parcelles sans Intervention	Écart
Moyenne	19,41 ha	19,46 ha	0,05 ha
Médiane	16,31 ha	16,31 ha	0 ha
Minimum	1,79 ha	1,76 ha	0,03 ha
Maximum	181,67 ha	180,62 ha	1,05 ha

Tableau 1 Annexe 1 : Tableau de comparaison entre les surfaces moyennes, médians, minimums et maximums présents dans chaque des jeux de données parcellaires utilisées. Chaque valeur est en hectare (ha). Le terme « Intervention » désigne ici uniquement les interventions sylvicoles survenues entre 2019 et 2020.

Annexe 2 : Détection de la coupe rase subie par la parcelle de référence via l’outil Coupe Rase (<https://coupesrases.irstea.fr/>)

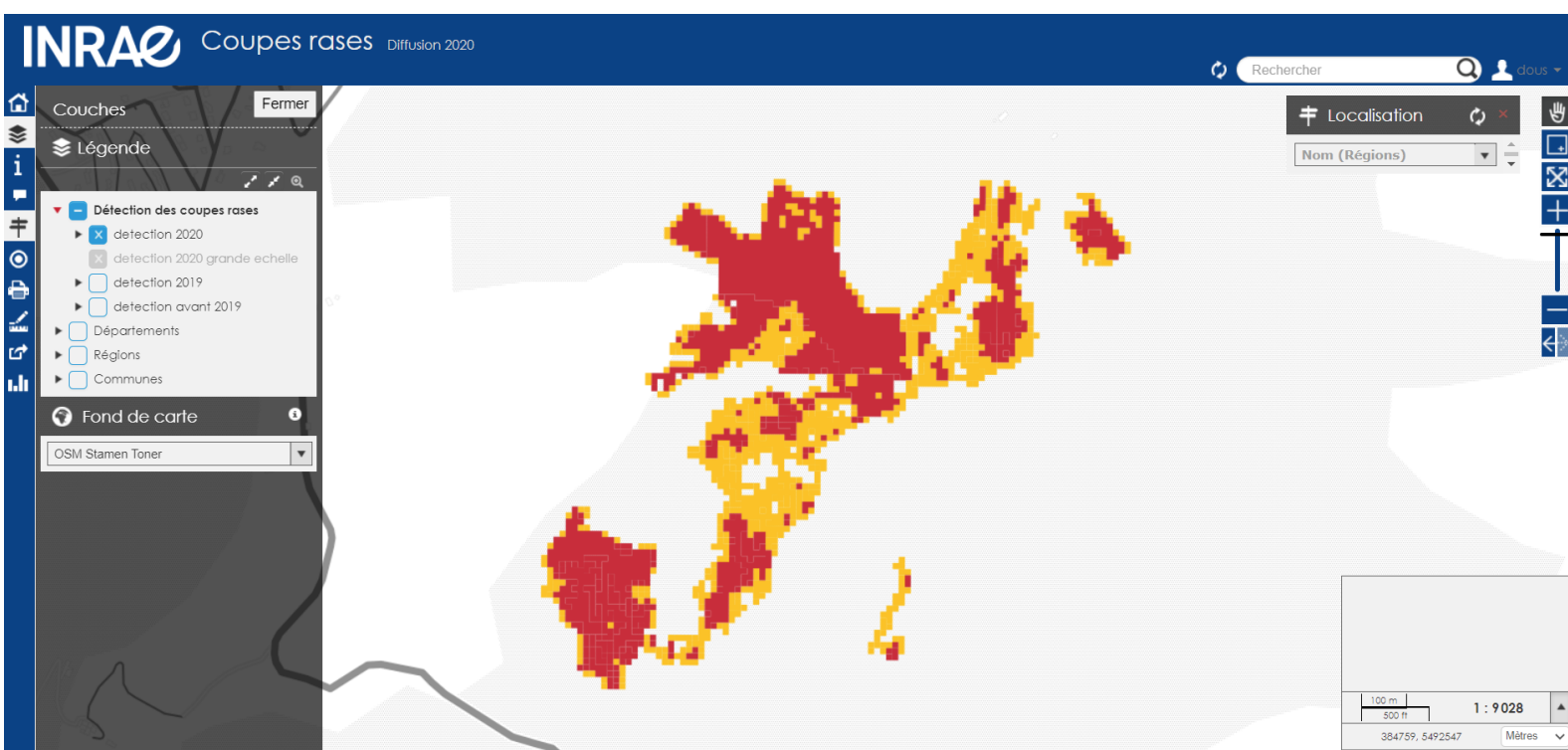


Figure 1 Annexe 2 : Impression d’écran de l’outil Coupe Rase focalisé sur la parcelle de référence choisie pour cette étude. L’outil Coupe Rase détecte des coupes rases via les fluctuations du Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) calculées avec les données Sentinel-2. Les zones rouges correspondent aux zones ayant une forte probabilité d’être en coupe. Les zones oranges correspondent aux zones ayant une probabilité moyenne d’être en coupe.

Annexe 3 : Observation de la coupe rase subie par la parcelle de référence.

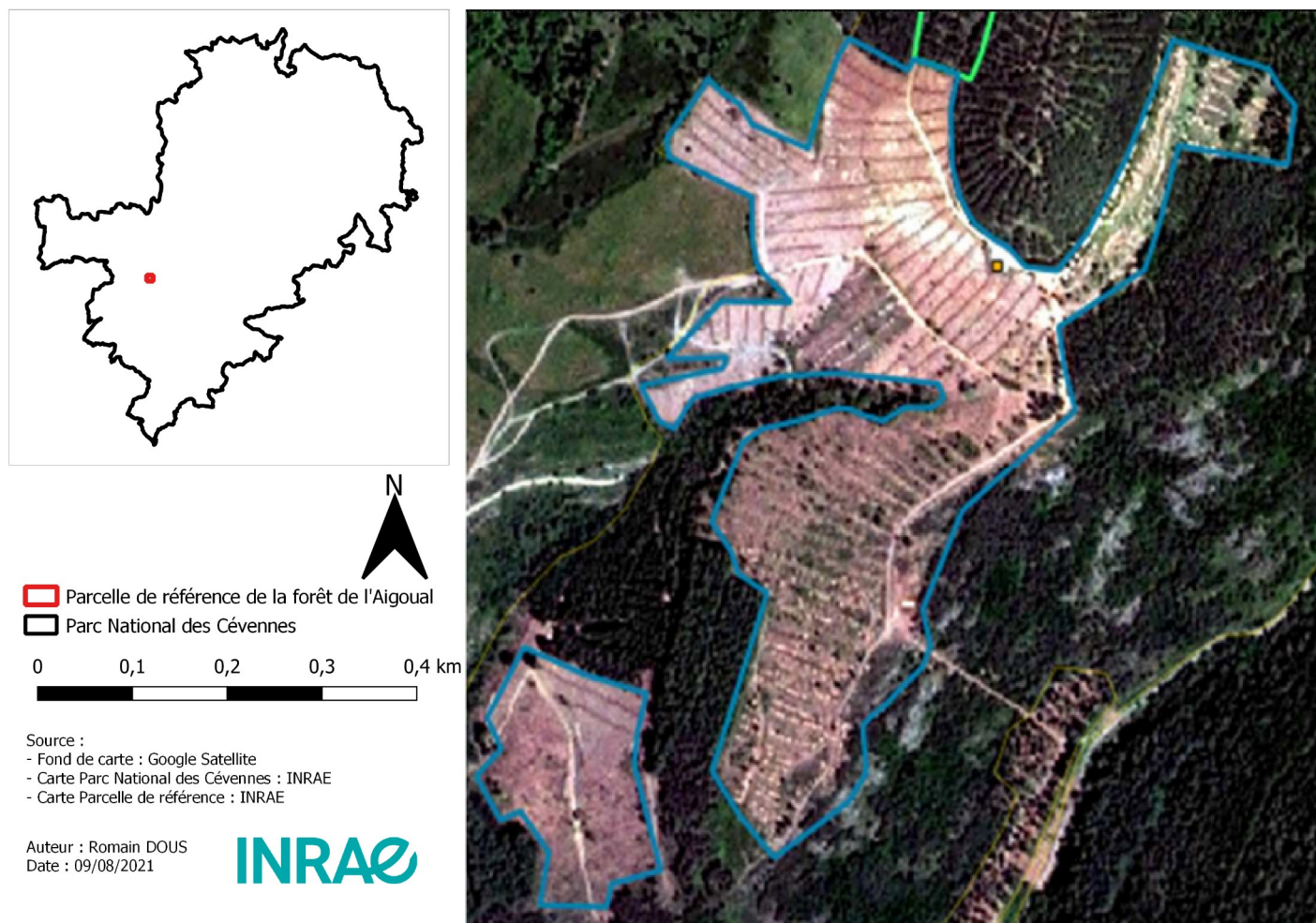
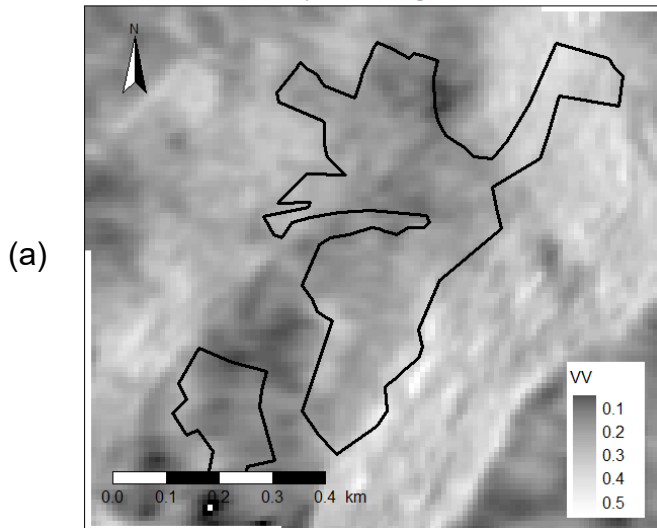


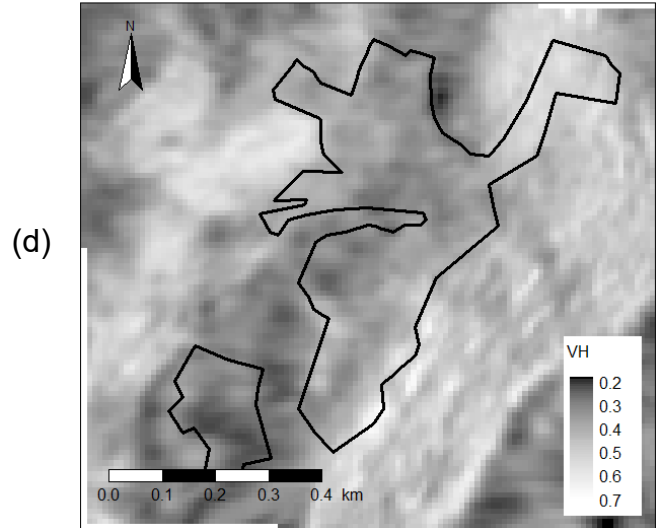
Figure 1 Annexe 3 : Observation de l'état de la parcelle de référence après la coupe rase subie entre mars et août 2020. Image Spot 6 extraite adaptée à partir de (Braconnier 2021) .

Annexe 4 : Exemples de visualisation des images Sentinel-1 sur la parcelle de référence.

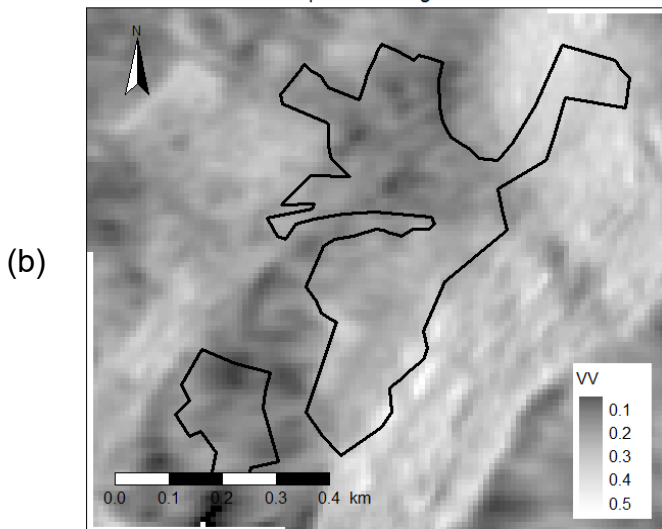
Parcelle 2 de la zone privée de l'Aigoual - VV - 2020-02-22



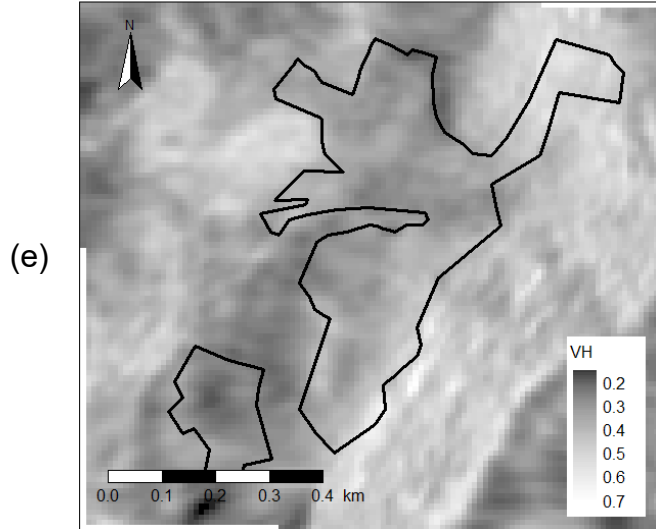
Parcelle 2 de la zone privée de l'Aigoual - VH - 2020-02-22



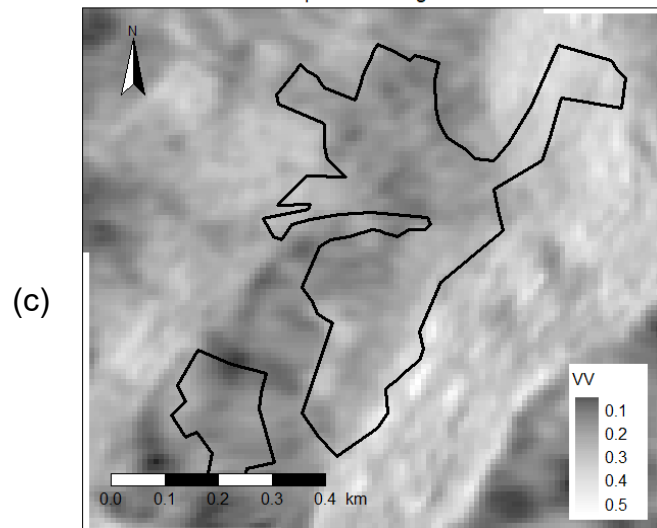
Parcelle 2 de la zone privée de l'Aigoual - VV - 2020-03-05



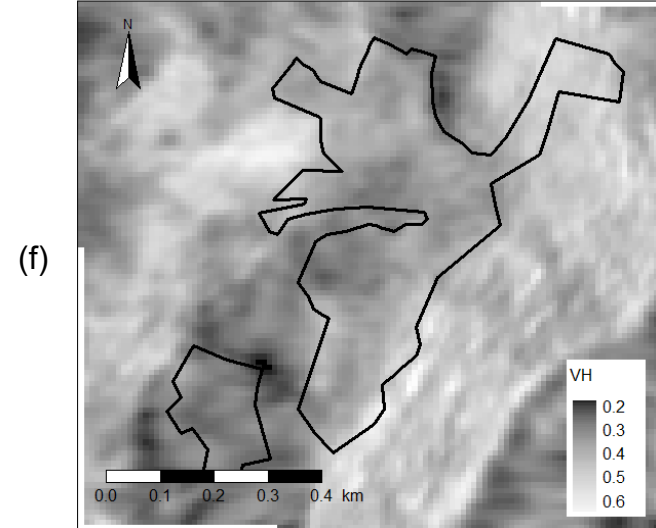
Parcelle 2 de la zone privée de l'Aigoual - VH - 2020-03-05



Parcelle 2 de la zone privée de l'Aigoual - VV - 2020-03-17



Parcelle 2 de la zone privée de l'Aigoual - VH - 2020-03-17



Figures Annexe 4 : Ensembles de cartes permettant la visualisation partielle des images Sentinel-1 centrée sur la parcelle de référence. Les cartes (a)(b)(c) représentent les valeurs de VV aux acquisitions du 22/02/2020 ; du 05/03/2020 ; et du 17/03/2020 respectivement. Les cartes (d)(e)(f) représentent les valeurs de VH aux acquisitions du 22/02/2020 ; du 05/03/2020 ; et du 17/03/2020 respectivement.

Annexe 5 : Calendrier des acquisitions conservées.

Dans le cas du jeu de données d'acquisitions avec uniquement avec la période de développement végétal et sans les acquisitions survenus durant ou après un jour de pluie (soit 17 acquisitions conservées).

Dates avant et après le retrait de l'hiver et des jours de pluie (quand la pluie a lieu la veille)

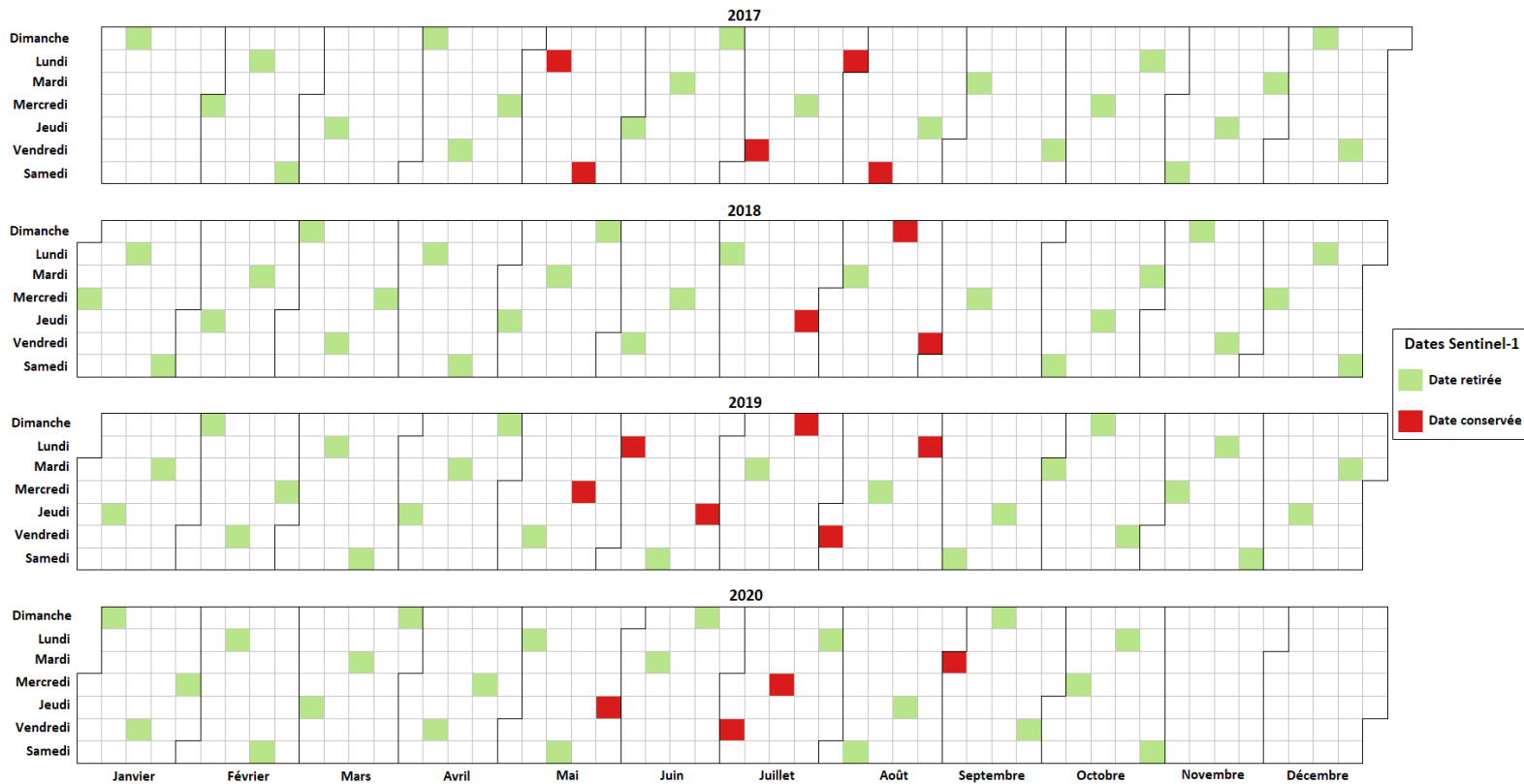


Figure 1 Annexe 5 : Calendrier des acquisitions Sentinel-1 et des retraits effectués dans le cas du jeu de données constitué uniquement avec la période de développement végétal et sans les acquisitions survenus durant ou après un jour de pluie. Les cases en rouge représente les acquisitions conservées dans ce jeu de donnée et les cases en verte les acquisitions retirées. Chaque acquisition, peu importe la couleur, a été placé le jour exact de sa réalisation. L'heure n'est pas prise en compte dans cette étude.

La Figure 1 Annexe 5 a été réalisée sur R 4.0.2 grâce à la fonction *calendarHeat* (<https://rdrr.io/github/jbryer/makeR/man/calendarHeat.html>). (Chankhihort et al. 2017)

Annexe 6 : Visualisation des briques réalisées et des calculs de modifications de la valeur du pixel central associé.

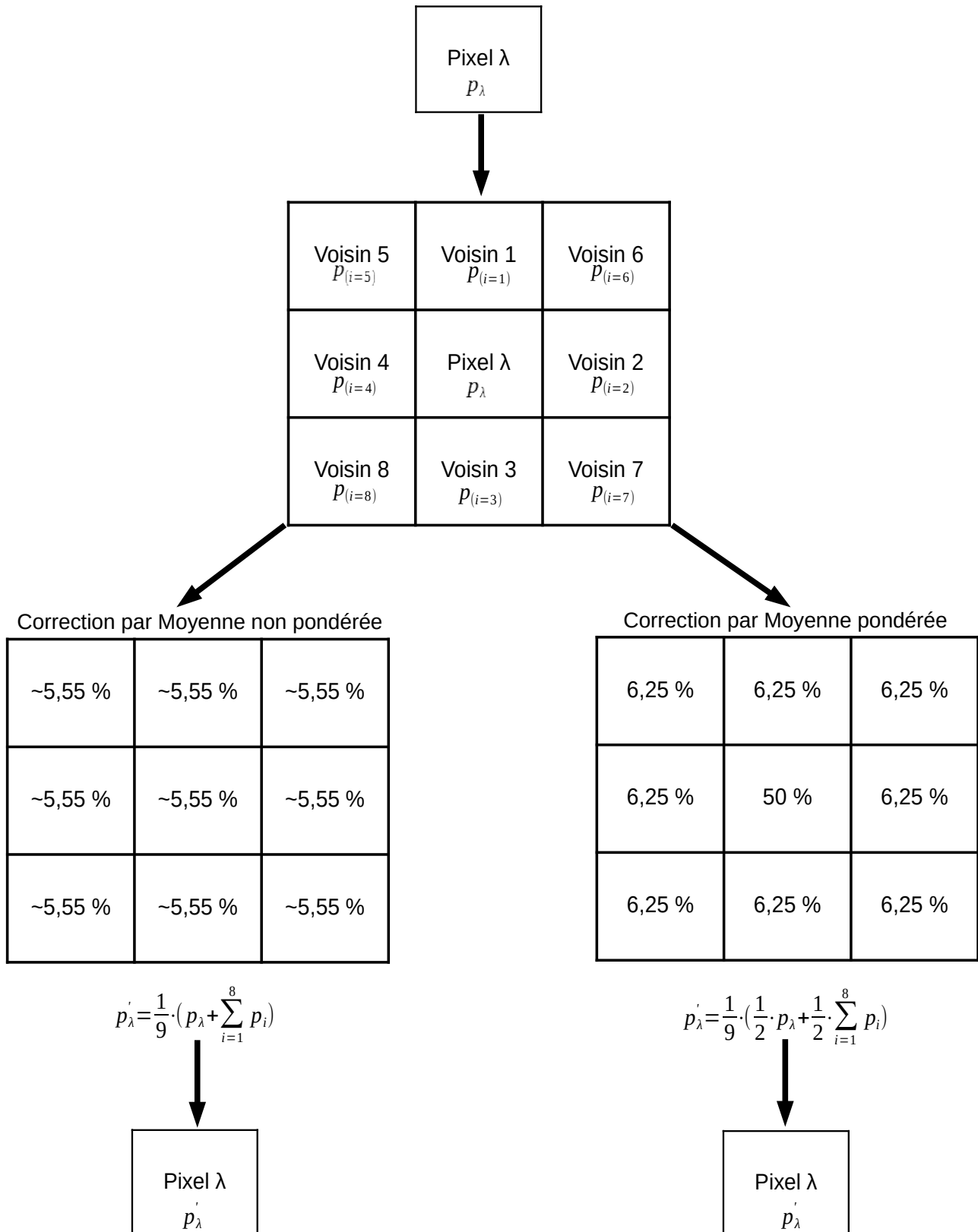


Figure 1 Annexe 6 : Visualisation des briques réalisées. La valeur p_λ du pixel λ est remplacée par la valeur p'_λ calculée grâce à la valeur du pixel λ et de ses voisins ayant chacun une valeur de i . A gauche est indiqué la procédure de calcul de la nouvelle valeur du pixel λ avec une correction par moyenne non pondérée. A droite est indiqué la procédure de calcul de la nouvelle valeur de pixel λ avec une correction par moyenne pondérée.

Annexe 7 : Ensemble des fonctions R utilisées dans cette étude.

1) Version de R utilisée :

Dans cette étude, la version 4.0.2 (<https://www.r-project.org/>) a été utilisée via l'interface Rstudio 1.3.959 (<https://www.rstudio.com/>). Toutes les fonctions utilisées sont présentes par défaut sur R 4.0.2.

2) Fonctions créées sous R :

```
moyenne_mobile = function(emprise, data){  
  espace = floor(emprise/2)  
  debut = ceiling(emprise/2)  
  moy_mob = sapply(X = debut:(length(data)-espace),function(x) mean(data[(x-espace):(x+espace)]))  
  return(moy_mob)  
}
```

Code 1 Annexe 7 : Fonction codée pour calculer la moyenne mobile des séries temporelles des valeurs de VV et de VH de chaque pixel étudié. L'entrée *emprise* correspond à la taille de n des sous-échantillons. L'entrée *data* correspond à l'ensemble N de toutes les données d'acquisitions.

```
calcul_RVI = function(VH,VV){  
  resultat_RVI = 4*(VH)/(VV+VH)  
  return(resultat_RVI)  
}
```

Code 2 Annexe 7 : Fonction codée pour calculer la valeur de RVI d'un pixel. L'entrée *VV* correspond à la valeur VV du pixel et l'entrée *VH* correspond à la valeur VH du pixel. Cette fonction est basée sur le calcul de Nasirzadehdizaji et al. 2019.

```
calcul_RFDDI = function(VH,VV){  
  resultat_RFDDI = (VH-VV)/(VV+VH)  
  return(resultat_RFDDI)  
}
```

Code 3 Annexe 7 : Fonction codée pour calculer la valeur de RFDI d'un pixel. L'entrée *VV* correspond à la valeur VV du pixel et l'entrée *VH* correspond à la valeur VH du pixel. Cette fonction est basée sur le calcul de Nicolau et al. 2021.

3) Fonctions prédéfinies sous R :

Les tests de comparaison de moyenne ont été effectués avec les fonctions, présentes par défaut, *t.test* pour les tests de Student et de Welch et *wilcox.test* pour le test de Wilcoxon. La normalité et la variation ont été testé respectivement avec les fonctions *shapiro.test* et *var.test*. Les tests de normalité ont été effectué avec la fonction *shapiro.test*. Les indices de corrélation ont été calculés et la fonction *cor.test*. Les figures ont été réalisées via la fonction *plot*.

Annexe 8 : Origine incertaine du RFDI

La version du RFDI qui est utilisée dans cette étude est celle proposée par Nicolau et al. en 2021 (Nicolau et al. 2021) qui fait lui-même référence à Mitchard et al. 2012 et Saatchi 2019 pour l'équation initiale du RFDI (Mitchard et al. 2012, Saatchi 2019).

Cependant, Mitchard et al. 2012 évoquent Saatchi et al., 2011 pour l'équation initiale du RFDI. Cette citation n'apparaît pas dans la bibliographie de l'article de 2012. Il est néanmoins possible de présumer qu'il s'agit de l'article « *Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents* » (Saatchi et al. 2011). Mais, force est de constater que cette article n'évoque ni le RFDI ni le calcul initial du RFDI évoqué par Nicolau et al. en 2021. De plus, le protocole d'étude de la dégradation des forêts mis en place dans l'étude de Saatchi et al. en 2011 se base sur Köhl et al. 2009 qui n'évoque pas non plus le RFDI ou son calcul (Köhl et al. 2009).

Saatchi 2019 ne cite pas plus d'article que ceux évoquer précédemment ou uniquement d'autres citant eux-même Mitchard et al. 2012 ou Saatchi et al. 2011 (Saatchi 2019).

Annexe 9 : Détails de la méthode de dichotomie permettant de déterminer le seuil.

Étape 1 : sélection aléatoire de 70 % des parcelles du jeu de parcelles avec interventions.

Étape 2 : initialisation d'un seuil de base à 1 et d'un seuil de remplacement à la moitié du seuil de base soit 0,5. (ou 2 et 1 dans le cas de VV et de VH).

Étape 3 : Détection des successions de 3 sommes cumulées selon les conditions évoquées dans le Chapitre 4.3.4. dans le cas du seuil de base et dans le cas du seuil de remplacement.

Étape 4 : Calcul d'un score pour chaque cas. Ce score est égale à la différence entre le nombre de détections correctes et le nombre de détections incorrectes.

Étape 5 : Détermination du meilleur cas :

→ si le score avec le seuil de base est supérieur ou égal au score avec le seuil de remplacement alors le seuil de base est conservé et le nouveau seuil de remplacement est remplacé par la différence entre le seuil de base et la moitié de la moitié du seuil de base.

→ si le score avec le seuil de base est inférieur au score avec le seuil de remplacement alors le seuil de remplacement devient le nouveau seuil de base et le nouveau seuil de remplacement est calculé en divisant le nouveau seuil de base par 2.

S_b : score obtenu avec le seuil de base

S_r : score obtenu avec le seuil de remplacement

Si $S_b \geq S_r$:

$$S_b = S_b$$

$$S_r = (S_b - (\frac{S_b}{2}))$$

Si $S_b < S_r$:

$$S_b = S_r$$

$$S_r = (\frac{S_b}{2})$$

Étape 6 : Répéter les étapes 3, 4 et 5 (cela fournit un test composée de 10 itérations).

Résultat : Un seuil maximisant le nombre de détections correctes et minimisant le nombre de détections incorrectes.

Annexe 10 : Détails des résultats de corrélations entre les valeurs de VV et de VH pour la parcelle de référence.

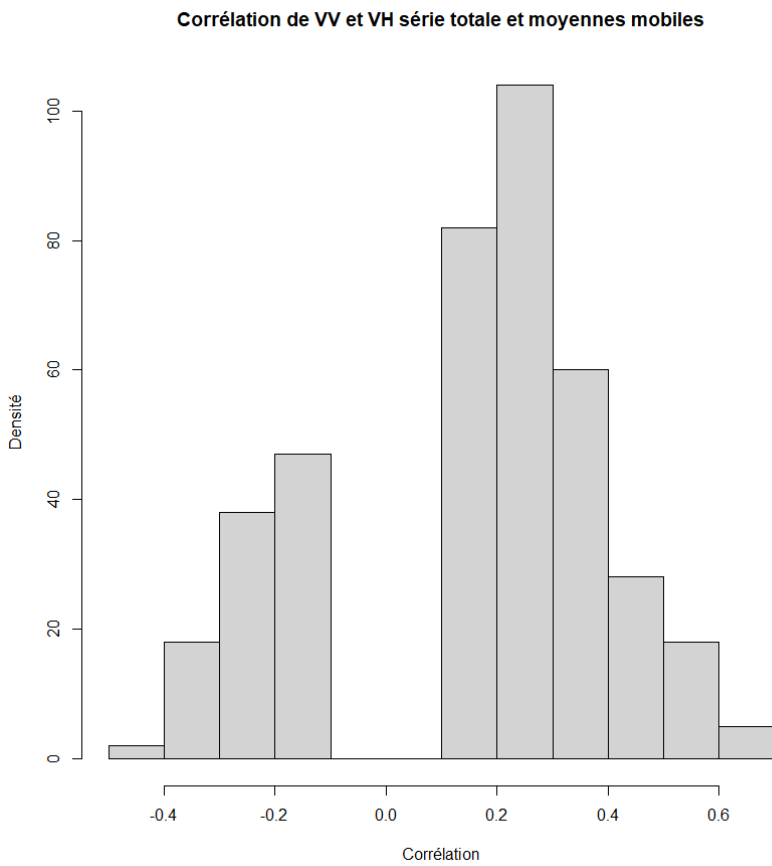


Figure 1 Annexe 10 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles des moyennes mobiles de VV et de VH au sein de la parcelle de référence. Ici, 6 acquisitions ont été retirée. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 62,67 %

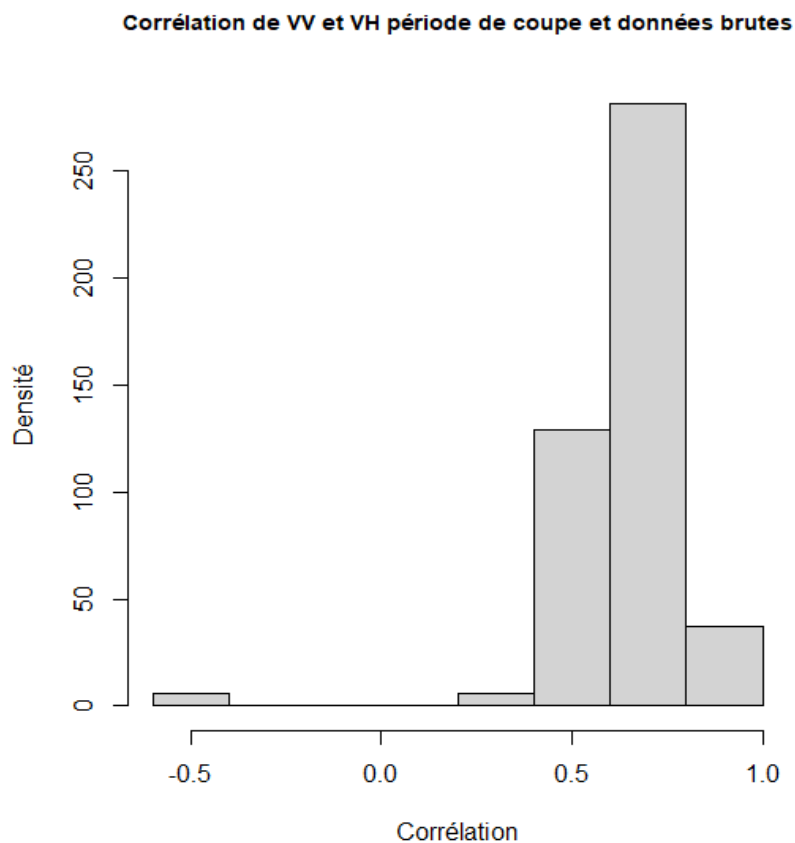


Figure 2 Annexe 10 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles durant la période de coupe des données brutes de VV et de VH au sein de la parcelle de référence. Ici, 15 acquisitions ont été conservées. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 29,59 %

Corrélation de VV et VH période de coupe et moyennes mobiles

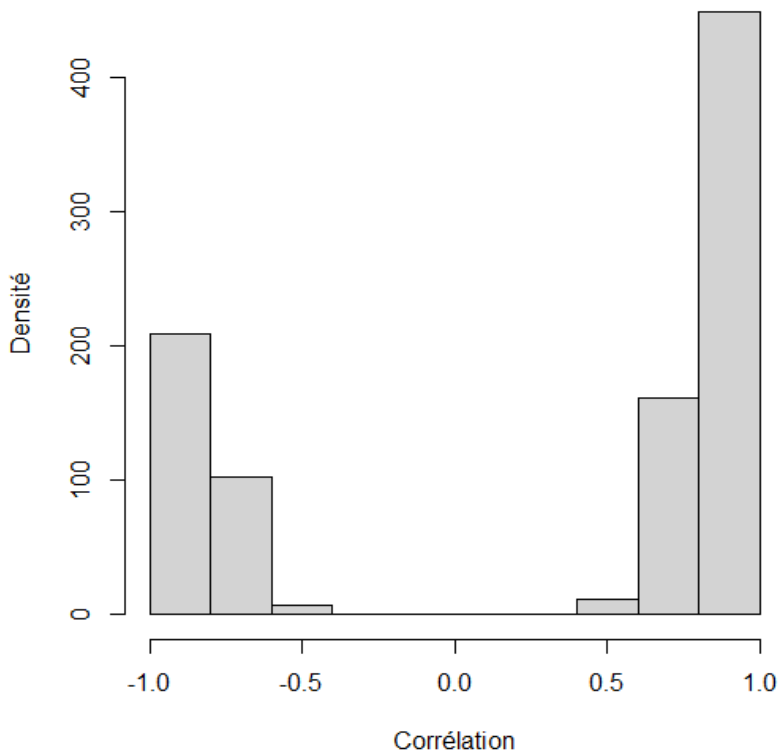


Figure 3 Annexe 10 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles durant la période de coupe des moyennes mobiles de VV et de VH au sein de la parcelle de référence. Ici, 9 acquisitions ont été conservées. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 60,61 %

Corrélation de VV et VH hors période de coupe et données brutes

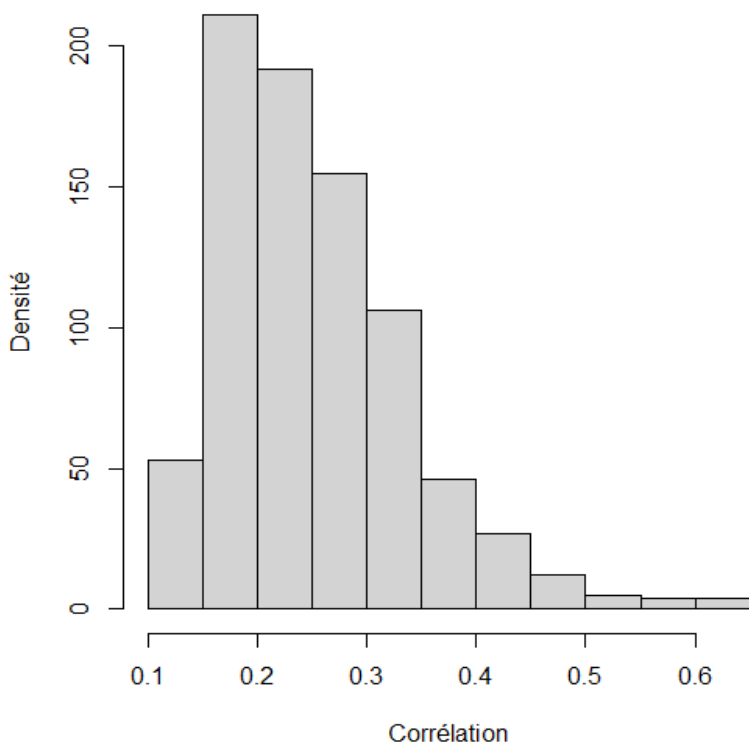


Figure 4 Annexe 10 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles hors de la période de coupe des données brutes de VV et de VH au sein de la parcelle de référence. Ici, 97 acquisitions ont été conservées. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 52,55 %

Corrélation de VV et VH hors période de coupe et moyennes mobiles

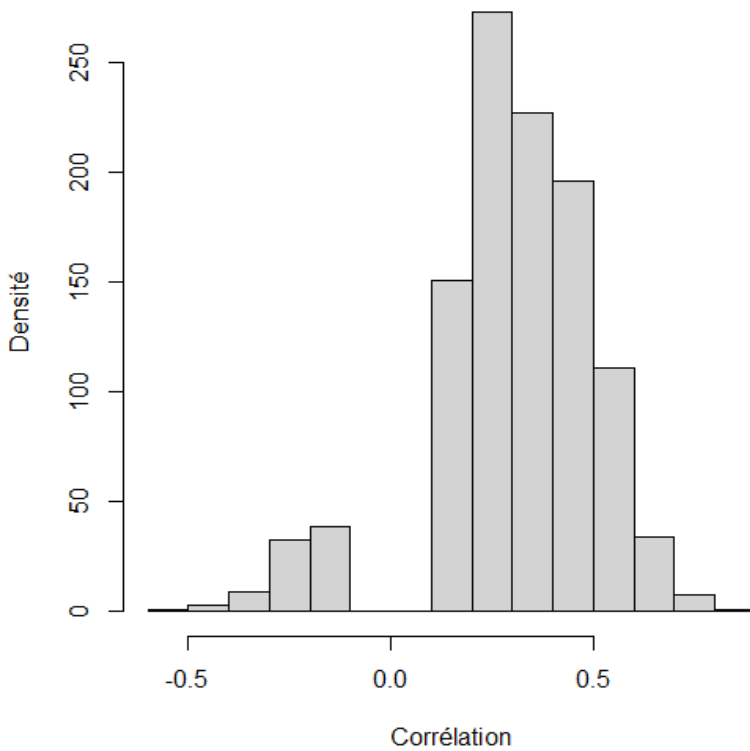


Figure 5 Annexe 10 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles hors de la période de coupe des moyennes mobiles de VV et de VH au sein de la parcelle de référence. Ici, 91 acquisitions ont été conservées. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 70,02 %

Corrélation de VV et VH série réduite et données brutes

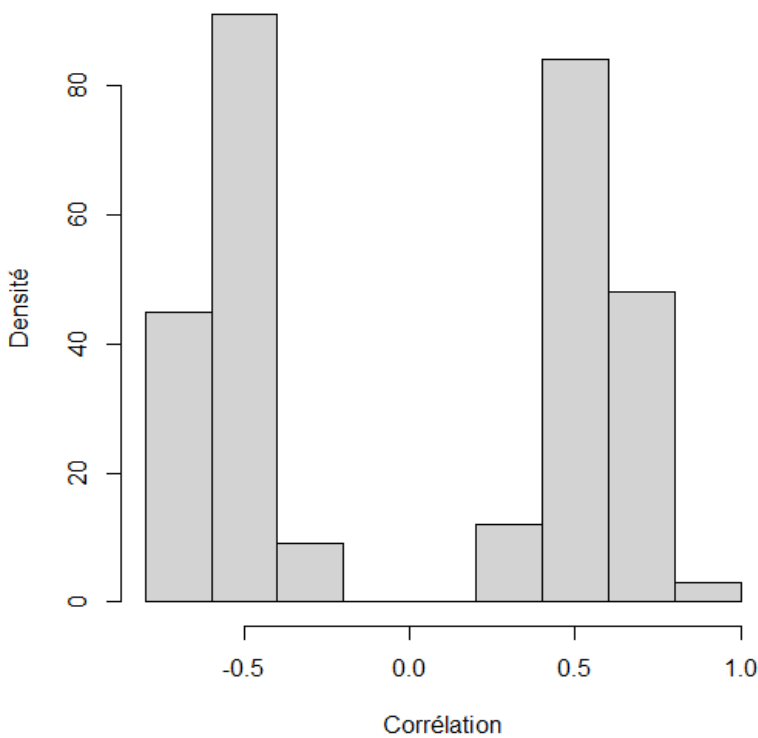


Figure 6 Annexe 10 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles des périodes de développement végétal des données brutes de VV et de VH au sein de la parcelle de référence. Ici, 41 acquisitions ont été conservées. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 28,63 %

Corrélation de VV et VH développement végétal et données brutes

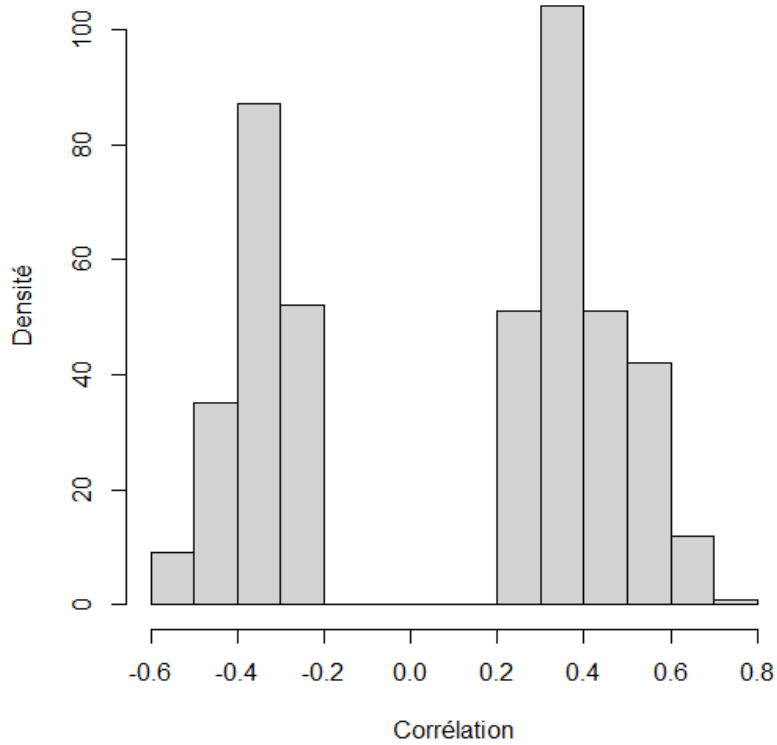


Figure 7 Annexe 10 : Histogramme des corrélations entre les séries temporelles des périodes de développement végétal et sans les acquisitions survenues durant ou après un jour de pluie des données brutes de VV et de VH au sein de la parcelle de référence. Ici, 17 acquisitions ont été conservées. Corrélations conservées (p-value < 0,05) : 18,83 %

Annexe 11 : Tableaux des résultats de détections des coupes avec le modèle nul et avec la méthode de détection des coupes par l'utilisation des sommes cumulées.

Modèle Nul	
Vrais Positifs	Faux Positifs
79 ± 5	149

Tableau 1 Annexe 11 : Résultats des détections obtenues avec l'utilisation du modèle nul.

Indice	Seuil	Parcelle		Pixel		Brique Moyenne Normale		Brique Moyenne Pondérée	
		Vrais Positifs	Faux Positifs	Vrais Positifs	Faux Positifs	Vrais Positifs	Faux Positifs	Vrais Positifs	Faux Positifs
VH/VV	0,4796875	1	2	134	149	133	149	133	149
VH/VV	0,52734375	2	2	134	149	124	149	136	149
VH/VV	0,4375	1	3	138	149	142	149	137	149
VH/VV	0,41015625	1	4	139	149	141	149	138	149
RVI	0,09916992	1	2	135	149	139	149	138	149
RVI	0,1171875	2	2	133	149	127	149	134	149
RVI	0,12109375	1	1	133	149	125	149	130	149
RVI	0,06591797	5	11	142	149	141	149	141	149
RFDI	0,178776	1	4	140	149	141	149	137	149
RFDI	0,2636719	1	0	129	149	120	149	122	149
RFDI	0,1098633	5	18	140	149	142	149	143	149
RFDI	0,2421875	1	1	133	149	125	149	130	149
VH	0,96875	0	2	96	149	76	139	85	145
VV	0,765625	0	2	106	149	87	143	99	147

Tableau 2 Annexe 11 : Résultats des détections obtenues avec l'utilisation de la méthode de détection par l'utilisation des sommes cumulées et des dépassements de seuils. Le terme *Parcelle* désigne le nombre de parcelles détectées en réalisant des détections directement à l'échelle parcellaire et modification des valeurs des pixels. Le terme *Pixel* désigne le nombre de parcelles détectées en réalisant des détections à l'échelle des pixels sans modification des valeurs des pixels et en comptant le nombre de parcelles contenant au moins 1 pixel détecté comme en coupe. Le terme *Brique Moyenne Normale* désigne la même chose que le terme *Pixel* mais avec modifications des valeurs de pixels par une moyenne normale. Le terme *Brique Moyenne Pondérée* désigne la même chose que le terme *Pixel* mais avec modifications des valeurs de pixels par une moyenne pondérée.

Annexe 12 : Tableaux des résultats de performance pour les combinaisons liées à l'utilisation des sommes cumulées

Mesures	Échelle	Parcelle	Pixel	Brique Moyenne Normale	Brique Moyenne Pondérée	Parcelle	Pixel	Brique Moyenne Normale	Brique Moyenne Pondérée
	Indice	VH/VV	VH/VV	VH/VV	VH/VV	VH/VV	VH/VV	VH/VV	VH/VV
	Seuil	0,4796875	0,4796875	0,4796875	0,4796875	0,52734375	0,52734375	0,52734375	0,52734375
Précision générale A		0,497	0,449	0,446	0,446	0,5	0,449	0,416	0,456
Précision coupe R		0,007	0,899	0,893	0,893	0,013	0,899	0,832	0,913
Précision surcoupe P		0,333	0,473	0,472	0,472	0,5	0,473	0,454	0,477
F-score		0,012	0,62	0,617	0,617	0,026	0,62	0,588	0,627
	Seuil	0,4375	0,4375	0,4375	0,4375	0,41015625	0,41015625	0,41015625	0,41015625
Précision générale A		0,493	0,463	0,477	0,46	0,49	0,466	0,473	0,463
Précision coupe R		0,007	0,926	0,953	0,919	0,007	0,933	0,946	0,926
Précision surcoupe P		0,25	0,481	0,488	0,479	0,2	0,483	0,486	0,481
F-score		0,013	0,633	0,645	0,63	0,013	0,636	0,642	0,633
	Indice	RVI	RVI	RVI	RVI	RVI	RVI	RVI	RVI
	Seuil	0,09916992	0,09916992	0,09916992	0,09916992	0,1171875	0,1171875	0,1171875	0,1171875
Précision générale A		0,497	0,453	0,466	0,463	0,5	0,446	0,426	0,449
Précision coupe R		0,007	0,906	0,933	0,926	0,013	0,893	0,852	0,899
Précision surcoupe P		0,333	0,475	0,483	0,481	0,5	0,472	0,46	0,473
F-score		0,012	0,624	0,636	0,633	0,026	0,617	0,598	0,62
	Seuil	0,12109375	0,12109375	0,12109375	0,12109375	0,06591797	0,06591797	0,06591797	0,06591797
Précision générale A		0,5	0,446	0,419	0,436	0,48	0,477	0,473	0,473
Précision coupe R		0,007	0,893	0,839	0,872	0,034	0,953	0,946	0,946
Précision surcoupe P		0,5	0,472	0,456	0,466	0,313	0,488	0,486	0,486
F-score		0,013	0,617	0,591	0,607	0,061	0,645	0,642	0,642
	Indice	RFDI	RFDI	RFDI	RFDI	RFDI	RFDI	RFDI	RFDI
	Seuil	0,178776	0,178776	0,178776	0,178776	0,2636719	0,2636719	0,2636719	0,2636719
Précision générale A		0,49	0,47	0,473	0,46	0,503	0,433	0,433	0,409
Précision coupe R		0,007	0,94	0,946	0,919	0,007	0,866	0,866	0,819
Précision surcoupe P		0,2	0,484	0,486	0,479	1	0,464	0,464	0,45
F-score		0,013	0,639	0,642	0,63	0,013	0,604	0,604	0,581
	Seuil	0,1098633	0,1098633	0,1098633	0,1098633	0,2421875	0,2421875	0,2421875	0,2421875
Précision générale A		0,456	0,47	0,477	0,48	0,5	0,446	0,419	0,436
Précision coupe R		0,034	0,94	0,953	0,96	0,007	0,893	0,839	0,872
Précision surcoupe P		0,217	0,484	0,488	0,49	0,5	0,472	0,456	0,466
F-score		0,058	0,639	0,645	0,649	0,013	0,617	0,591	0,607
	Indice	VH	VH	VH	VH	VV	VV	VV	VV
	Seuil	0,96875	0,96875	0,96875	0,96875	0,765625	0,765625	0,765625	0,765625
Précision générale A		0,499	0,322	0,289	0,299	0,499	0,356	0,312	0,34
Précision coupe R		0	0,644	0,51	0,57	0	0,711	0,584	0,664
Précision surcoupe P		0	0,392	0,353	0,37	0	0,416	0,378	0,402
F-score		NA	0,487	0,418	0,449	NA	0,525	0,459	0,501

Tableau 1 Annexe 12 : Résumé des tests de performances réalisés sur l'ensemble des échelles, indices et seuils testés. Le terme Pixel désigne le nombre de parcelles détectées en réalisant des détections à l'échelle des pixels sans modification des valeurs des pixels et en comptant le nombre de parcelles contenant au moins 1 pixel détecté comme en coupe. Le terme Brique Moyenne Normale désigne la même chose que le terme Pixel mais avec modifications des valeurs de pixels par une moyenne normale. Le terme Brique Moyenne Pondérée désigne la même chose que le terme Pixel mais avec modifications des valeurs de pixels par une moyenne pondérée. Les meilleures performances sont surlignées en orange.

Résumé :

Le contrôle de la dynamique des populations de cervidés est un enjeu crucial de la gestion des forêts métropolitaines. Les méthodes de suivis actuelles de ces populations ne permettent pas de prévenir les dégâts qu'elles causent aux jeunes reboisements. De nouvelles méthodes sont en développement. Elles se basent sur la détection d'interventions sylvicoles (coupes de récolte) à partir de données satellitaires Sentinel-2. L'objectif est de repérer les parcelles forestières pour lesquelles, la nouvelle cohorte de jeunes arbres présente un risque de consommation par les cervidés. Ces outils sont cependant calibrés pour détecter des coupes rases qui ne constituent pas les seules méthodes de renouvellement de la forêt. Leur précision est critiquable et ils ne sont pas adaptés pour repérer et différencier ces autres types d'interventions. Les données satellitaires Sentinel-1 offrent une opportunité d'amélioration de ces outils.

Cette étude présente une exploration des données Sentinel-1 et différentes tentatives de détection d'interventions sylvicoles. L'objectif est d'évaluer la capacité de ces données à compléter les données Sentinel-2. Cette étude se divise en 2 parties principales et se focalise sur les forêts du Parc National des Cévennes. La première est constituée d'observations réalisées pour comprendre et identifier les fluctuations des données Sentinel-1 en cas de coupe rase sur le site d'étude. La seconde est composée de différents tests menés afin de mettre en avant des différences entre des zones avec et sans interventions et de tenter de détecter ces interventions via différents indices.

Les observations montrent que les interventions provoquent des augmentations ou diminutions progressives de la polarimétrie des données Sentinel-1. Les premiers tests ont démontré l'existence de différences significatives entre la normalité des espaces forestiers ayant subis une intervention et ceux n'en n'ayant pas subis. Les seconds se basent sur l'utilisation de sommes cumulées de polarimétries. Ils ont révélé la possibilité de détecter des interventions avec les données Sentinel-1 sur le site d'étude.

Toutefois, ces résultats sont entachés d'erreurs et de nombreuses zones sans intervention sont détectées comme en ayant subies. Il est donc nécessaire d'améliorer les méthodes développées dans cette étude. Malgré tout, elles offrent de bonnes bases de travail pour envisager leur utilisation en complément des données Sentinel-2 comme facteur de distinctions des interventions.

Abstract :

Deer populations control is an important part of french forestry. Current monitoring programs are not optimized for deers' damage forecast. New solutions appear using Sentinel-2 data based cuts detection tools. The main goal of this novelties is to locate the forest areas where new trees will be seed. However, these tools mainly detect clear-cuts and their precision is not perfect. Also, they are not able to detect or to distinguish different types of cuts. Sentinel-1 data seems to be a good improvement solution.

This study presents a data mining and several cuts detection methods for Sentinel-1 datas. Its goal is to definite how they can complement Sentinel-2 datas. There are 2 parts in this study and focus on the Cévennes National Park. the first one, an visuel analysis of Sentinel-1 datas' variations is made to apprehend how Sentinel-1 datas oscillate during a clear cut in the study site. The second is divided into 2 types of tests : some to show differences between cut and uncut areas ; and the others to directly detect all type of cuts in the study sites using cumulative sums.

Data mining shows that Sentinel-1 datas start to decrease or to increase with cuts. First tests reveal that data normality is different between cut and uncut areas. Last tests expose the fact that many types of cuts can be spot using Sentinel-1 data. Nevertheless, cuts detections come with a large number of false detections of uncut places. Therefore, it's necessary to improve the methods developed for this study. Finally, they are a solid work basis for distinguishing detected cuts from Sentinel-2.