



HAL
open science

Cartographie du microclimat forestier par fusion de données Optique, RADAR et LiDAR

Nicolas Ferrer

► **To cite this version:**

Nicolas Ferrer. Cartographie du microclimat forestier par fusion de données Optique, RADAR et LiDAR. Sciences de l'Homme et Société. 2023. dumas-04415163

HAL Id: dumas-04415163

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04415163>

Submitted on 24 Jan 2024

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.

Copyright

Année universitaire 2022-2023

Cartographie du microclimat forestier par fusion de données Optique, RADAR et LiDAR

Présenté par **Nicolas Ferrer**

Sous la direction de **Jean-François Girres**, maître de conférences

le **13/09/2023**

devant un jury composé de :

Thibault Catry, ingénieur de recherche à l'IRD

Jean-François Girres, maître de conférences

Sous la responsabilité de **Marianne Laslier**, maître de stage

Mémoire de stage de 2e année

Mention : Géomatique

Parcours : Géomatique

Avant-propos

EDYSAN est une unité de recherche (UMR 7058) affiliée au CNRS et à l'UPJV, axée sur l'écologie et la dynamique des systèmes anthropisés. Sous la direction de Guillaume Decocq, elle se compose de trois axes distincts. Le premier axe se concentre sur l'intensification écologique des systèmes de production agricole et forestière durables. Le deuxième axe étudie l'écologie des nouveaux écosystèmes forestiers formés à l'ère de l'Anthropocène. Le troisième axe se consacre à l'écologie historique des forêts et des paysages, en analysant les changements à grande échelle et leur impact sur la biodiversité. L'unité de recherche compte environ quarante enseignants-chercheurs, chercheurs, doctorants ingénieurs et post-doctorants, répartis entre trois laboratoires situés à Amiens.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement l'équipe d'EDYSAN de l'Université de Picardie Jules Verne à Amiens pour son accueil. Double remerciement à Mme. Marianne Laslier pour m'avoir confié ce stage et avoir su me faire confiance pour sa réalisation. Je tenais également remercier M. Etienne Lalechere pour avoir aussi suivi ce stage avec attention. Grâce à leurs aides et conseils, j'ai pu développer mes connaissances, répondre à la mission et réaliser mon mémoire. Je remercie aussi Mme. Eva Gril et M. Jonathan Lenoir pour leurs expertises tout au long du stage et leurs propositions durant les réunions. Je remercie également M. Tristan Ubaldi, stagiaire avec moi, pour son aide lors de mes débuts sur R. Je souhaite une bonne continuation à EDYSAN dans ses projets en cours et ceux à venir.

Je souhaite ensuite adresser mes remerciements au corps professoral et administratif du Master Géomatique de l'Université Paul Valéry Montpellier 3, l'Université de Montpellier et d'AgroParisTech à Montpellier pour la qualité de l'enseignement offert et leurs soutiens. Remerciement à M. Jean-François Girres pour ses enseignements et sa disponibilité.

Enfin, je tiens à remercier mes amis M. Gautier Barlette et M. Armand Blondiaux pour leurs conseils lors de la rédaction du mémoire autant sur la forme que sur le fond.

Table des matières

A.	Introduction	6
B.	La télédétection pour cartographier les microclimats forestiers : État de l’art	9
1.	Cartographie par télédétection : quelques éléments théoriques	9
1.1.	Télédétection : généralités.....	9
1.2.	Télédétection passive	10
1.3.	Télédétection active.....	11
1.3.1.	Capteurs RADAR.....	11
1.3.2.	Capteurs LiDAR.....	13
2.	Cartographier le microclimat à l’aide de données RADAR.....	14
2.1.	Caractéristiques structurales.....	15
2.2.	Influence de l'humidité	16
2.3.	Dynamique temporelle	17
3.	Combinaison de données LiDAR, Optiques et RADAR pour cartographier le microclimat.....	18
C.	Matériels et méthodes.....	21
1.	La zone d’étude et capteurs terrains	21
1.1.	Zone d’étude.....	21
1.2.	Capteurs terrains.....	22
1.3.	Données terrains	23
2.	Données RADAR Sentinel-1	24
2.1.	Description des données.....	24
2.2.	Prétraitement des données	25
2.3.	Indicateurs RADAR	26
3.	Données Optiques et LiDAR.....	27
3.1.	Données optiques	27
3.2.	Données LiDAR.....	28
4.	Méthodes et analyses.....	29
4.1.	Statistiques descriptives	29
4.2.	Régression linéaire et prédiction du microclimat.....	30
D.	Résultats	32
1.	Réponse temporelle RADAR de la forêt de Blois.....	32
2.	Réponses RADAR aux différents stade sylvicoles	35
3.	Analyse du modèle de régression linéaire.....	39
4.	Cartes de prédiction du microclimat	43
E.	Discussion	45
1.	Interprétation des résultats	45

1.1.	Les variations saisonnières de polarisations VV et VH et leurs liens avec les structures de végétation.....	45
1.2.	Variations des coefficients de rétrodiffusion selon les stades sylvicoles et les indicateurs RADAR.....	46
1.3.	Prédiction du microclimat par l'intégration de données multi-capteurs.....	48
2.	L'intérêt des données multi-capteurs pour cartographier le microclimat forestier	49
F.	Conclusion	51
	Bibliographie.....	52
	Annexes.....	55
1.	Séries temporelles	55
1.1.	Variations des polarisations RADAR au cours de l'année 2021 sur les placettes de la forêt de Blois.....	55
1.2.	Variations des polarisations RADAR au cours de l'année 2021 sur les placettes remarquables de la forêt de Blois.....	60
1.3.	Variations des polarisations RADAR au cours de l'année 2021 par mois de la forêt de Blois	64
1.4.	Variations des polarisations RADAR mensuel au cours de l'année 2021 par stades sylvicoles de la forêt de Blois	66
2.	Calculs des indicateurs	70
2.1.	Les indicateurs RADAR.....	70
2.2.	Les indicateurs Optique.....	80
2.3.	Les indicateurs LiDAR.....	83
2.4.	L'indicateur microclimatique.....	85
3.	Boxplots des indicateurs RADAR selon les stades sylvicoles.....	85
4.	Corrélation entre les indicateurs RADAR.....	96
5.	Régressions linéaires	96
6.	Prédiction du microclimat	99
	Résumé.....	106
	Abstract	106

Liste des figures

Figure 1 : Spectre électromagnétique incluant le domaine visible et le domaine des ondes radio [Durandea et al., 2002]	10
Figure 2 : Mesure de télédétection dans le domaine optique [Bacour, 2001]	10
Figure 3 : Représentation de l'angle d'incidence θ et des polarisations incidentes horizontale (champ E_h) et verticale (champ E_v) [Proisy, 1999]	12
Figure 4 : Principaux mécanismes intervenant dans la rétrodiffusion radar d'une forêt : interactions de surface (1), interactions de double-rebond (2) et interactions de volume (3) [Albinet, 2013]	13
Figure 5 : Acquisition des données LiDAR [Lenoir et al., 2022]	14
Figure 6 : Sensibilité du signal radar aux feuilles, branches et troncs selon la bande de fréquence SAR utilisée [Le Toan, 2007, modifié]	15
Figure 7 : A droite : série chronologique de phénologie VH typique sur forêt de feuillus ; à gauche : série chronologique de phénologie VV typique sur forêt de feuillus [Dostálová et al., 2016].....	17
Figure 8 : Localisation de la forêt domaniale de Blois en France métropolitaine	21
Figure 9 : Localisation des placettes où sont installé les capteurs mis en place dans la forêt domaniale de Blois afin de collecter des données microclimatiques	23
Figure 10 : La pente reliant le microclimat au macroclimat [Gril et al., 2023]	24
Figure 11 : Graph Builder utilisé pour le prétraitement de images Sentinel-1	25
Figure 12 : Relation des Indicateurs LiDAR avec la structure forestière [Gril et al., 2023]....	29
Figure 13 : Schéma des étapes de création du model de régression linéaire	31
Figure 14 : Réponse RADAR annuelle des polarisations VV et VH de la forêt de Blois en 2021. Représente les valeurs de coefficients de rétrodiffusion en polarisation VH (couleur rouge) et VV (couleur bleue) en fonction du temps.	32
Figure 15 : Coefficient de rétrodiffusion VV et VH annuel en fonction de la structure de végétation de la forêt de Blois en 2021	34
Figure 16 : Réponse RADAR mensuelle de la forêt de Blois en 2021 par stade sylvicole. En rouge la polarisation VH. En bleu la polarisation VV.	36
Figure 17 : Boxplots des indicateurs RADAR en fonction des stades sylvicoles de la forêt de Blois en 20.....	38
Figure 18 : Régressions linéaires entre les données réelles et les prédictions	42
Figure 19 : Cartes de prédiction du microclimat selon les différents capteurs et leurs combinaisons pour la forêt de Blois en 2021	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : Bandes de fréquences utilisées en radar et longueur d'ondes correspondantes [Albinet, 2013]	11
Tableau 2 : Indicateurs de télédétection Radar, Optique et LiDAR.....	19
Tableau 3: Les indicateurs RADAR pour la forêt de Blois en 2021	27
Tableau 4 : Les indicateurs NDVI pour la forêt de Blois en 2021	28
Tableau 5 : Caractéristiques du capteur LiDAR et du vol sur la forêt de Blois [Gril et al., 2023]	28
Tableau 6 : Indicateurs RADAR conservés après la corrélation de Spearman	30
Tableau 7 : Résultats des régressions linéaires en fonction des combinaisons des indicateurs RADAR, Optique et LiDAR	39

A. Introduction

Le microclimat forestier est un phénomène météorologique se produisant localement dans les forêts et qui peut différer considérablement des conditions météorologiques générales de la région environnante. Les microclimats forestiers sont influencés par différents aspects du paysage tels que la forme du terrain, la pente, l'altitude et la proximité de l'eau. Ces facteurs créent des variations dans les conditions climatiques à petite échelle. De plus, la végétation joue un rôle crucial en modifiant les conditions au sein et en dessous de son couvert (Bramer et al., 2018). La densité, la hauteur et la structure des plantes peuvent influencer la quantité de lumière, d'ombre et de vent, ce qui entraîne des variations de température, d'humidité et de disponibilité en eau. En somme, les microclimats résultent de l'interaction complexe entre la structure et la composition de la végétation, ainsi que le fonctionnement des écosystèmes (Zellweger et al., 2019).

Les arbres ont un impact significatif sur les microclimats forestiers en modifiant la température et l'humidité de leur environnement immédiat. La présence du couvert arboré agit comme un tampon régulateur des températures, créant ainsi un microclimat propre à la forêt (Gril et al., 2023). De plus, la structure végétale joue aussi un rôle essentiel dans la formation des microclimats forestiers. Selon Rita et al. (2021) : « les conditions climatiques du sous-étage forestier ont le potentiel de partiellement compenser localement le réchauffement climatique d'origine anthropique, permettant ainsi la persistance des espèces du sous-étage sur place et empêchant la thermophilisation des communautés végétales. »

Les microclimats forestiers jouent un rôle crucial pour la biodiversité et la santé des forêts. Ils ont un impact significatif sur les plantes et les animaux (Yu et al., 2015 ; Jucker et al., 2018), favorisant leur croissance, leur survie et contribuant à la résilience des écosystèmes forestiers face aux changements climatiques et aux perturbations naturelles. Ils ont une importance dans la compréhension et la préservation des forêts à l'avenir en agissant comme des sanctuaires (Lenoir et al., 2016). L'identification des microclimats et de leur interaction avec la structure forestière permettrait de cibler les zones les plus sensibles aux changements climatiques. Cela faciliterait la mise en place de stratégies de gestion plus précises et efficaces, adaptées aux besoins spécifiques de chaque zone de la forêt, contribuant ainsi à préserver la biodiversité et la santé des forêts sur le long terme.

Des études récentes ont mis en évidence l'importance croissante des données satellitaires optiques et LiDAR aéroportées pour une cartographie précise du microclimat forestier. Cela

s'inscrit dans une tendance générale soulignant l'intérêt croissant des données de télédétection pour caractériser la structure de la forêt en relation avec le microclimat (Zellweger et al., 2019). Les données LiDAR fournissent des informations cruciales sur la composition et la structure de la forêt, mais cette technologie présente également des limites. Son coût élevé pour les relevés aéroportés limite le suivi temporel. Même avec ces limitations, le LiDAR reste précieux pour l'étude de la structure forestière et a été utilisé avec succès dans diverses applications de cartographie et de modélisation des écosystèmes forestiers.

Des recherches ont souligné que les données RADAR sont sous-exploitées malgré leur potentiel pour caractériser la structure forestière en relation avec le microclimat, même si les données Sentinel-1 ont montré leur utilité dans cette tâche par rapport aux données LiDAR aéroportés (Bae et al., 2019). Ces travaux mettent en évidence l'importance des données LiDAR pour cette caractérisation, tout en soulignant le potentiel encore inexploité des données RADAR.

Les données RADAR ont en effet l'avantage de fournir une couverture spatiale globale et d'être indépendantes des conditions météorologiques, ce qui conduit à de plus grandes opportunités d'acquisition comparées aux données optiques. De plus, la gratuité des images Sentinel-1, leur très haute résolution temporelle (une image tous les 6 jours) et leur synchronicité avec les images optiques Sentinel-2, en font des données particulièrement prometteuses pour cartographier le microclimat forestier sur de larges étendues à une résolution temporelle fine.

Les données RADAR permettent d'intégrer la dynamique temporelle de modification de la structure 3D du couvert végétal, une information non disponible ou très onéreuse via le LiDAR. Ces avantages pourraient permettre une meilleure compréhension de l'impact du microclimat sur la structure de la forêt au cours du temps et cela pourrait avoir des implications importantes pour la gestion forestière.

L'objectif du stage consiste à déterminer le potentiel des données RADAR Sentinel-1 en comparaison avec les données LiDAR et optiques Sentinel-2 pour caractériser la structure forestière et établir une cartographie du microclimat forestier.

Le rapport débute par une contextualisation de l'étude dans l'introduction. Ensuite, une analyse bibliographique approfondie afin de déterminer les métriques les plus appropriées à extraire des données RADAR en vue de la cartographie du microclimat à faire. De plus, dans cet état de l'art, les différentes méthodes de télédétection et de cartographie utilisées pour évaluer et déterminer le microclimat forestier seront examinées. La section « Matériels et

méthodes » développe la zone d'étude, les capteurs et les prétraitements des données. Les résultats obtenus seront présentés dans la section du même nom, en examinant les réponses RADAR et de la prédiction du microclimat. Enfin, l'interprétation des résultats et de la pertinence de la fusion de données pour la cartographie du microclimat forestier sera discutée.

B. La télédétection pour cartographier les microclimats forestiers : État de l'art

1. Cartographie par télédétection : quelques éléments théoriques

La télédétection, qui fait appel à des capteurs à distance pour recueillir des informations, joue un rôle essentiel dans le suivi des modifications à la surface terrestre. Grâce à ces technologies, il devient possible d'obtenir des mesures précises et continues des paramètres de structure de végétation ou de densité de canopée. Les avancées récentes en matière de télédétection, notamment avec l'utilisation de drones et de satellites, ont permis d'améliorer la résolution spatiale et temporelle de ces données (Zellweger et al., 2019).

1.1. Télédétection : généralités

La télédétection est une technique utilisée pour collecter des informations sur la surface de la Terre ou d'autres objets sans avoir à être en contact direct avec eux. À partir de capteurs situés sur des plateformes aériennes ou spatiales, elle offre une vision plus large, voir globale, permettant de surveiller les changements à grande échelle. Elle peut être réalisée de manière active ou passive. Le capteur utilisé en télédétection active émet un signal et mesure son retour, tandis qu'en télédétection passive, le capteur enregistre l'énergie électromagnétique émise ou réfléchi par la cible.

L'imagerie optique (passive) et le radar (active) sont deux techniques de télédétection complémentaires qui fournissent des informations précieuses sur la surface terrestre et son environnement. Alors que l'imagerie optique utilise la lumière visible et proche infrarouge pour capturer des images, le radar utilise des ondes électromagnétiques, telles que les micro-ondes, pour mesurer les propriétés des surfaces terrestres (*Figure 1*).

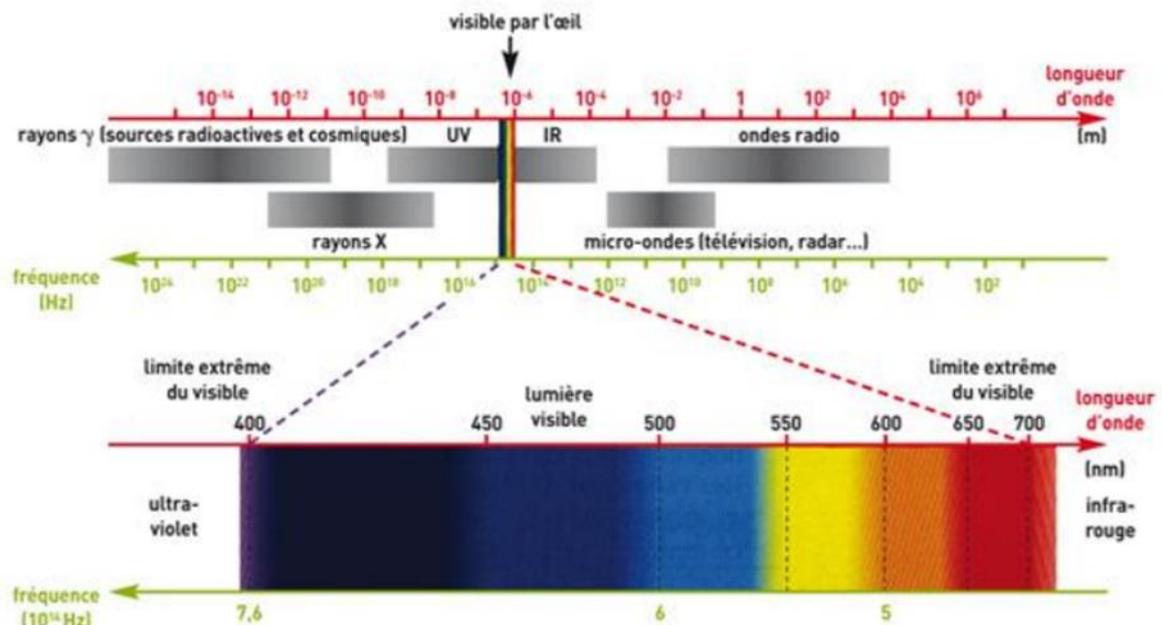


Figure 1 : Spectre électromagnétique incluant le domaine visible et le domaine des ondes radio [Durandea et al., 2002]

1.2. Télédétection passive

La télédétection passive est une méthode d'observation de la Terre qui utilise des capteurs optiques pour enregistrer le rayonnement dans certaines longueurs d'onde, sans émettre de signal. Dans ce processus, la végétation absorbe une partie du rayonnement solaire et réfléchit le reste, qui est mesuré par les capteurs optiques des satellites après avoir traversé l'atmosphère (Figure 2). Ce rayonnement réfléchi est appelé réflectance (Morin, 2021).

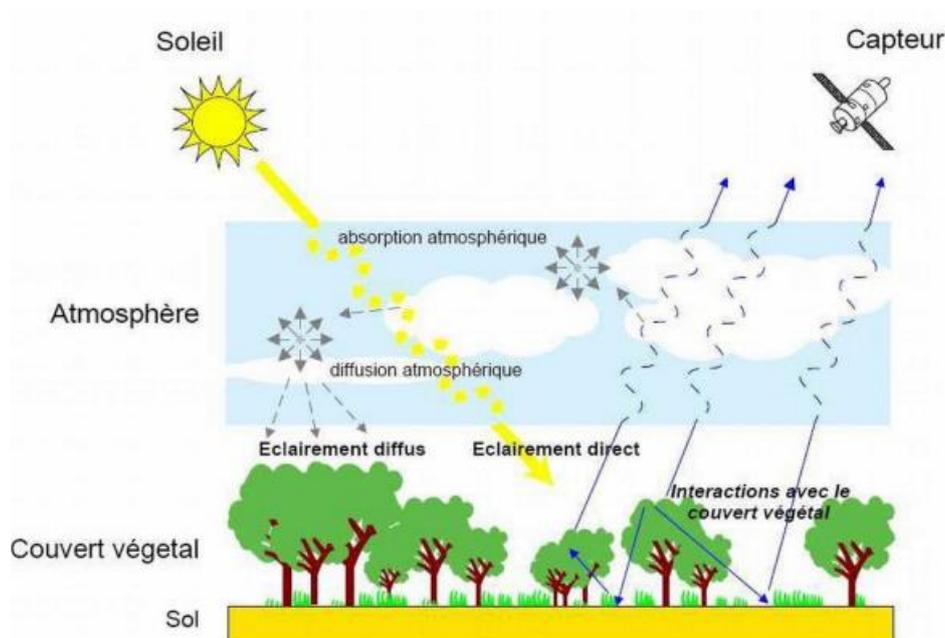


Figure 2 : Mesure de télédétection dans le domaine optique [Bacour, 2001]

Selon les capteurs, on peut mesurer la réflectance dans différentes longueurs d'ondes tels le visible (bleu, vert, rouge), mais aussi des longueurs d'onde invisible à l'œil humain telles que le proche infrarouge (PIR) et le moyen infrarouge (MIR).

Le capteur optique utilisé dans l'étude est Sentinel-2, qui est équipé d'un instrument d'imagerie multispectrale capable de capturer des images optiques à haute résolution de la surface de la Terre dans 13 bandes spectrales, allant du visible à l'infrarouge.

1.3. Télédétection active

1.3.1. Capteurs RADAR

Les ondes électromagnétiques du RADAR sont divisées en différentes bandes. Ces bandes, décrites dans le *Tableau 1*, sont classées selon leurs fréquences et leurs longueurs d'onde qui vont influencer la pénétration de l'onde RADAR dans un milieu.

Tableau 1 : Bandes de fréquences utilisées en radar et longueur d'ondes correspondantes [Albinet, 2013]

Dénomination	Fréquence (GHz)	Longueur d'onde (cm)
Ka	26,5 à 40	1,1 à 0,75
K	18 à 26,5	1,7 à 1,1
Ku	12,5 à 18	2,4 à 1,7
X	8 à 12,5	3,75 à 2,4
C	4 à 8	7,5 à 3,75
S	2 à 4	15 à 7,5
L	1 à 2	30 à 15
P	0,3 à 1	100 à 30

Les fréquences les plus élevées ont une portée plus courte et une pénétration plus faible, tandis que des fréquences plus basses ont une portée plus grande et une meilleure pénétration. De plus, la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence.

Les mesures de réflexion dépendent de plusieurs paramètres tels que la polarisation et l'angle d'incidence. L'angle d'incidence se réfère à la position de l'émission et de la réception du système RADAR, tandis que la polarisation se réfère à l'orientation (verticale ou horizontale) du champ électrique de l'onde-radar (*Figure 3*).

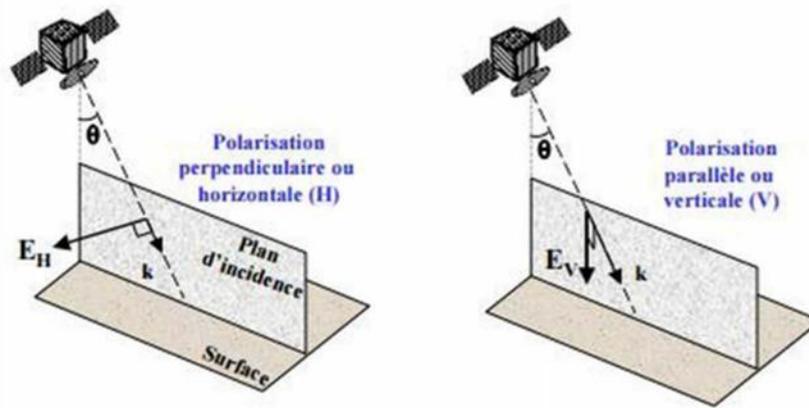


Figure 3 : Représentation de l'angle d'incidence θ et des polarisations incidentes horizontale (champ E_H) et verticale (champ E_V) [Proisy, 1999]

Les polarisations VV et VH sont utilisées par le radar Sentinel-1. La polarisation VV envoie une onde verticale et mesure la réflexion verticale, tandis que la polarisation VH envoie une onde verticale et mesure la réflexion horizontale. Ces polarisations ont chacune leurs avantages et inconvénients pour différentes applications. La polarisation VV est plus sensible à la rugosité de la surface et à l'humidité du sol, tandis que la polarisation VH est plus sensible à la structure de la surface et à la couverture végétale (Bousbih et al., 2017). En utilisant les deux polarisations en parallèle, on peut obtenir des informations complémentaires et améliorer la précision des mesures.

En RADAR, la mesure importante est le coefficient de rétrodiffusion, qui indique la capacité d'un objet à renvoyer les ondes électromagnétiques vers l'émetteur. Ce coefficient permet de comprendre les propriétés de l'objet ciblé et donc de l'identifier. Il est généralement exprimé en pourcentage, mais peut également être converti en décibels (dB) en utilisant la formule suivante :

$$\text{Rétrodiffusion (dB)} = 10 \times \log (\text{coefficient de rétrodiffusion})$$

De plus, le coefficient de rétrodiffusion ne dépend pas que de la fréquence, l'angle d'incidence et de la polarisation. D'autres paramètres qui peuvent modifier le signal rétrodiffusé comme la structure forestière (Figure 4), le type de sol ou le relief.

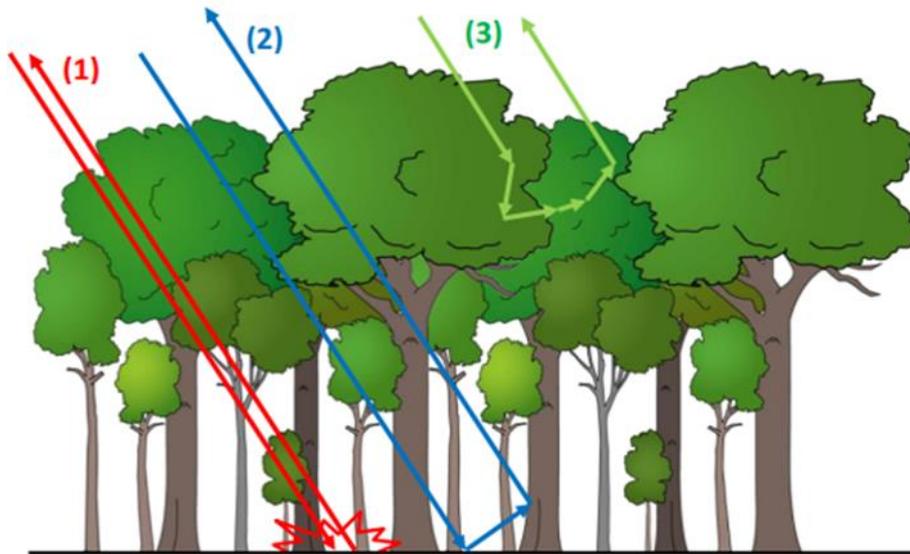


Figure 4 : Principaux mécanismes intervenant dans la rétrodiffusion radar d'une forêt : interactions de surface (1), interactions de double-rebond (2) et interactions de volume (3) [Albinet, 2013]

Le capteur utilisé dans l'étude est Sentinel-1 qui est une mission satellitaire d'observation de la Terre développée par l'Agence spatiale européenne (ESA). Le satellite Sentinel-1 est équipé d'un RADAR à synthèse d'ouverture (RSO) en Bande C. La technique du RSO permet d'améliorer la résolution spatiale des données RADAR en simulant une antenne plus grande via la mesure d'un objet depuis plusieurs points de vue et d'un traitement approprié (Ballere, 2022). Cette technique évite d'avoir à installer de grandes antennes sur les détecteurs, résolvant ainsi un défi technique pour le déploiement de systèmes RADAR.

1.3.2. Capteurs LiDAR

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une méthode d'analyse optique active qui utilise sa propre source d'énergie lumineuse, généralement un laser, pour illuminer une zone ou des cibles spécifiques (Flamant, 2019). Contrairement aux méthodes passives, le LiDAR émet activement un faisceau laser pour obtenir des mesures (Figure 5). Elle permet de créer des modèles numériques de terrain (MNT) et de végétation (MNV) à haute résolution. Les données LiDAR ont permis d'étudier la structure de la canopée, la hauteur des arbres, la densité des feuilles et la biomasse forestière. De plus, le LiDAR fournit des données précises sur la structure de la canopée, ce qui facilite l'estimation de la distribution de température et d'humidité à différentes hauteurs dans la canopée.

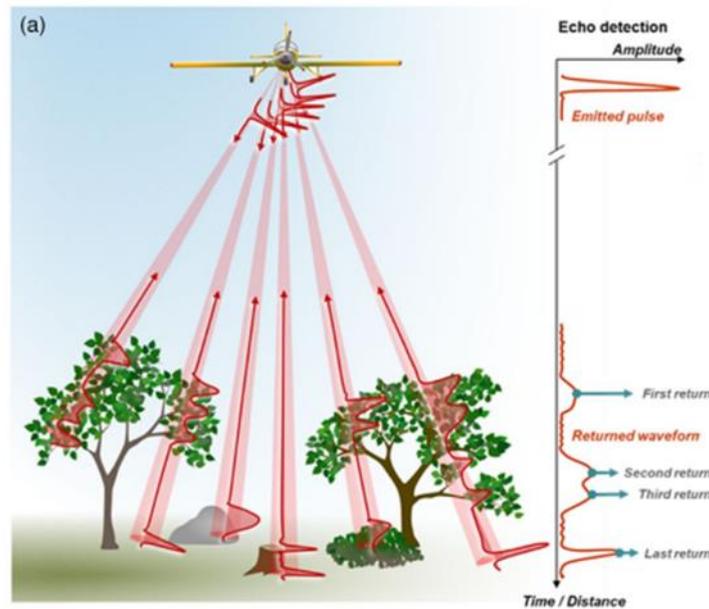


Figure 5 : Acquisition des données LiDAR [Lenoir et al., 2022]

Le LiDAR, l'optique et le RADAR présentent chacun leurs avantages et inconvénients. Le LiDAR offre une précision 3D des données de surface terrestre, mais il est coûteux et sa couverture de surface est limitée et les mesures peuvent être entravées par des nuages épais dans la basse atmosphère (Kaasalainen et al., 2015 ; Flamant, 2019). L'imagerie optique permet une collecte d'images de haute résolution, mais elle peut être affectée par les conditions météorologiques et se limite à la partie visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique. Le RADAR est capable de collecter des données de jour comme de nuit, indépendamment des conditions météorologiques, et il peut pénétrer à travers les nuages. Cependant, sa résolution spatiale est souvent plus faible que celle de l'imagerie optique et les données peuvent être sujettes aux interférences électromagnétiques (Betbeder, 2015).

2. Cartographier le microclimat à l'aide de données RADAR

Jusqu'à présent, il n'existe aucune étude ayant réussi à cartographier le microclimat forestier en utilisant des données RADAR. Cependant, la capacité du capteur à détecter la structure forestière ainsi que certains paramètres environnementaux tels que l'humidité suggère un potentiel pour ce type de capteur, en particulier pour les capteurs embarqués dans les satellites Sentinel-1.

2.1. Caractéristiques structurales

Grâce aux techniques RADAR, il devient possible de mesurer les caractéristiques du signal réfléchi par les structures de végétation. Cela permet d'obtenir des données sur la densité de la végétation ainsi que sur la biomasse, la couverture de la canopée et l'hétérogénéité structurale.

Le RADAR, au travers des différentes bandes, permettent de visualiser les structures des arbres dans les forêts sous différentes perspectives (*Figure 6*).

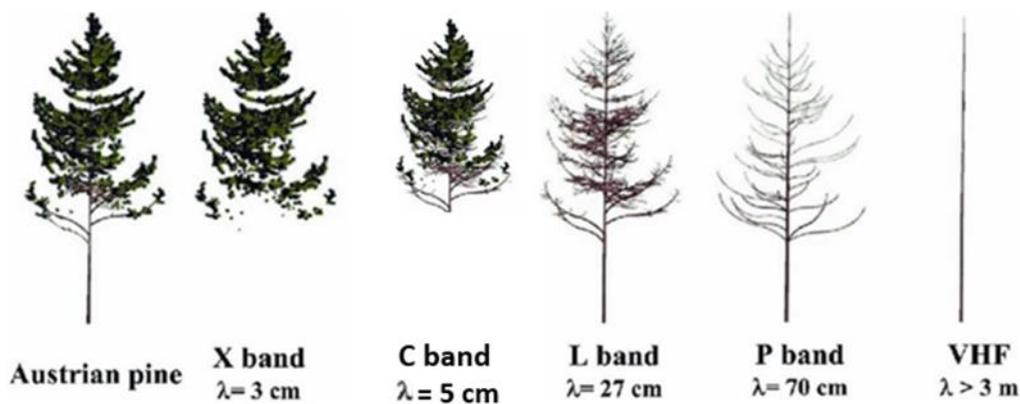


Figure 6 : Sensibilité du signal radar aux feuilles, branches et troncs selon la bande de fréquence SAR utilisée [Le Toan, 2007, modifié]

Parmi les différents satellites Radar, Sentinel-1 est un RSO satellitaire équipé en Bande C. A cette fréquence, l'onde peut pénétrer de quelques centimètres la matière végétale et nous donner des indications sur le feuillage et les petites branches que constitue la canopée.

Les données texturales issues des images RADAR sont utilisées pour évaluer la quantité de biomasse forestière, principalement représentée par les feuilles et les petites branches des arbres dans la canopée (Kuplich et al., 2011). L'analyse de texture repose sur la matrice de co-occurrence des niveaux de gris (GLCM), qui mesure la fréquence des paires de pixels dans les images RADAR selon des positions et orientations spécifiques. En réduisant la plage de niveaux de gris, la cartographie des forêts gagne en précision en évitant les confusions avec les zones non forestières et les zones forestières denses (Numbisi et al., 2019). Cette méthode permet également de détecter les zones moins denses de la forêt, telles que les coupes ou les trouées. Pour les forêts en régénération, il existe une forte corrélation entre les mesures de texture et la biomasse forestière, mais cette corrélation est moins marquée pour les forêts matures. Afin d'améliorer l'estimation de la biomasse forestière, une analyse de régression linéaire multiple

prenant en compte diverses mesures de texture (moyenne, écart-type, variance, asymétrie, kurtosis) peut être utilisée (Kuplich et al., 2011).

Bae et al. (2019) ont démontré que l'analyse des signaux de rétrodiffusion SAR (Radar à Ouverture Synthétique) offre des informations écologiquement pertinentes sur la structure du terrain et de la végétation. Le SAR a déjà eu un impact significatif dans la recherche écologique, en particulier grâce à l'utilisation répandue de capteurs en bande C et L pour cartographier la biomasse dans les régions forestières boréales et tropicales. L'utilisation de l'analyse de texture des images RADAR via la méthode GLCM se révèle être un outil efficace pour évaluer la biomasse forestière et son lien potentiel avec le microclimat forestier. En considérant la saisonnalité et les conditions environnementales, cette approche offre des informations utiles pour mieux comprendre l'impact de ces variations sur la structure forestière.

2.2. Influence de l'humidité

La détermination du coefficient de rétrodiffusion de la forêt ne repose pas uniquement sur sa structure. En effet, la constante diélectrique du feuillage et la réponse du signal à l'humidité jouent également un rôle crucial dans l'analyse des coefficients de rétrodiffusion saisonniers. Ces variations permettent de détecter le microclimat spécifique créé par les arbres au sein de la forêt.

Le signal rétrodiffusé par la canopée forestière peut varier en fonction de la météo, en particulier avec l'humidité des feuilles. La constante diélectrique des feuilles, qui dépend de leur teneur en eau, est un facteur important pour comprendre ces variations. Avec l'augmentation de l'humidité, la constante diélectrique des feuilles augmente aussi, entraînant une augmentation du coefficient de rétrodiffusion à son tour (Kornelsen et al., 2012). La polarisation VH est la plus sensible à l'humidité de la canopée forestière (Huang et al., 2018 ; Zayani et al., 2022). Cependant, lors des saisons sans feuilles, il convient de prendre en considération que l'humidité du sol a un impact plus significatif sur le coefficient de rétrodiffusion que l'humidité de la canopée (Rajeev et al., 2005). Par exemple, s'il y a de fortes précipitations en été, on pourrait voir une augmentation du coefficient de rétrodiffusion à ce moment, alors qu'il baisse de manière générale durant cette période. Inversement, si l'hiver est sec, on aura une diminution du coefficient de rétrodiffusion à cette période, alors qu'il augmente de manière générale. En analysant la dynamique temporelle de la forêt, l'observation de

changements brusques du coefficient de rétrodiffusion peut être lié à l'humidité. Les précipitations sont donc un paramètre à prendre en compte afin de comprendre les relations entre les polarisations RADAR et l'humidité (Soudani et al., 2021).

2.3. Dynamique temporelle

L'analyse au cours du temps de l'interaction entre les signaux radar et la structure de la forêt offre une meilleure compréhension de la façon dont la forêt réagit à divers changements, tels que les variations saisonnières des arbres ou les conditions météorologiques. Les données RADAR peuvent être utilisées afin de suivre les changements dans les écosystèmes forestiers en fournissant des informations sur l'évolution de la structure de la canopée et la biomasse forestière (Miltiadou et al., 2022).

En effet, dans la Bande-C, le signal RADAR correspond à une interaction de volume (*Fig. 3, 3*), où l'énergie se diffuse dans la canopée puis se réfléchit sur les feuilles et les petites branches. Cette interaction est possible en été et au printemps lorsque la forêt est feuillue. En automne et en hiver, avec la perte du feuillage, la rétrodiffusion peut avoir une interaction de double-rebond (*Fig. 3, 2*), où l'onde rebondit sur le sol et sur un tronc avant de revenir à l'antenne, amplifiant ainsi le signal (Albinet, 2013). L'onde RADAR est donc influencée par la densité et la structure de la canopée.

Dostálová et al. (2016) ont montré les variations du coefficient de rétrodiffusion en polarisation VV et VH au cours de l'année 2015 dans la partie nord de l'État fédéral du Burgenland en Autriche en fonction de la phénologie des forêts de feuillus (*Figure 7*).

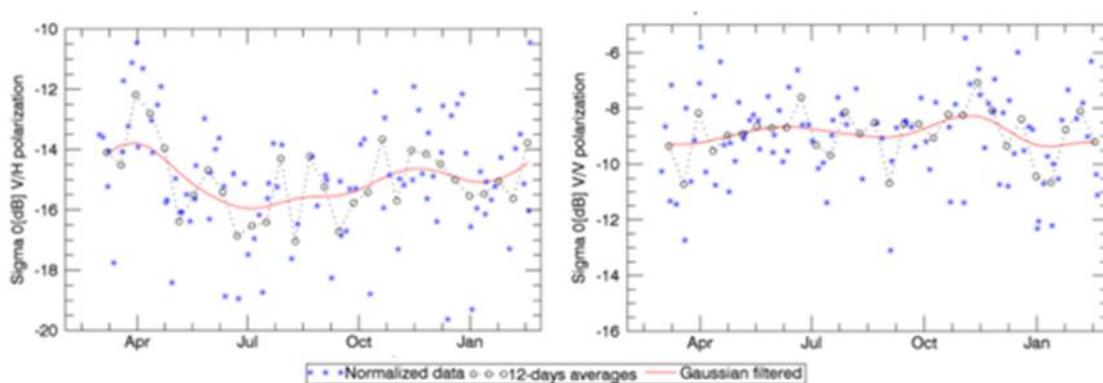


Figure 7 : A droite : série chronologique de phénologie VH typique sur forêt de feuillus ; à gauche : série chronologique de phénologie VV typique sur forêt de feuillus [Dostálová et al., 2016]

Les coefficients de rétrodiffusion en polarisation VV et VH ont un comportement temporel influencé par les caractéristiques phénologiques des arbres à chaque saison. Mais c'est la polarisation VH qui est la plus influencée, tandis que la polarisation VV reste stable toute l'année, avec une légère augmentation de la polarisation VV au printemps. Avec la sensibilité de la polarisation VH à la structure forestière au cours des saisons, il y a une baisse de la rétrodiffusion en polarisation VH au printemps avec un niveau estival bas. Puis, avec l'automne, la polarisation VH augmente jusqu'à un niveau hivernal haut. Donc, l'augmentation et la diminution de la rétrodiffusion en polarisation VH, surtout en Bande-C qui est plus sensible aux petites branches et aux feuilles, sont liées au changement saisonnier du feuillage des arbres (Dostálová et al., 2018 ; Rüetschi et al., 2018).

Les variations saisonnières du signal pourraient donc permettre de retranscrire des évolutions dans la structure de la canopée, et donc donner des informations sur les conditions microclimatiques associées.

De plus, la structure de la forêt n'est pas soumise exclusivement aux changements saisonniers. La structure peut être influencée par des changements environnementaux ou anthropiques, telles les coupes sylvicoles, et les images RADAR à haute résolution peuvent être utilisés pour les détecter. Mais il peut être difficile de distinguer les changements causés par les interventions humaines des autres facteurs tels que les conditions météorologiques ou les incendies (Dous, 2021 ; Dostálová et al., 2016).

3. Combinaison de données LiDAR, Optiques et RADAR pour cartographier le microclimat

En combinant des données LiDAR, optiques et RADAR, il est probable que la cartographie du microclimat en milieu forestier devienne plus précise et complète. Cette approche permettrait d'obtenir une vision plus détaillée des interactions avec les variables environnementales, améliorant ainsi l'évaluation du microclimat.

L'extraction des paramètres structuraux des forêts tempérées à feuilles caduques en utilisant les données Sentinel-1 en Band-C a montré des résultats cohérents, comparés aux données de terrain et de LiDAR. Cela suggère que les données Sentinel-1 sont utilisables pour cartographier les forêts. Toutefois, la méthode est limitée par la résolution spatiale des données Sentinel-1, et il est recommandé de combiner le RADAR avec d'autres sources de données,

telles que les images optiques et LiDAR pour améliorer la précision et la qualité de la cartographie (Bruggisser et al., 2021). Le *Tableau 2* regroupe les différents indicateurs de télédétection RADAR, Optique et LiDAR pris dans la littérature.

Tableau 2 : Indicateurs de télédétection Radar, Optique et LiDAR

Satellite	Nom	Formule	Auteurs
S1 - RADAR	VH	VH	Kim et van Zyl 2009
	VV	VV	
	Ratio	VV/VH	Bae et al. 2019
	Difference	VV-VH	
	Radar Vegetation Index (RVI)	$(4*VH)/(VH+VV)$	Nasirzadehdizaji et al. 2019
	Radar Forest Degradation Index (RFDI)	$(VV-VH)/(VV+VH)$	Nicolau et al. 2021
S2 - Optique	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(NIR-RED)/(NIR+RED)$	Rousel et al. 1974
	Normalized Difference Water Index (NDWI)	$(GREEN-NIR)/(GREEN+NIR)$	Abutaleb et al. 2015
	Leaf Area Index (LAI)	$(4,9*NDVI) - 0,46$	Johnson et al. 2003
LiDAR	Height of vegetation (H)	/	Bae et al. 2019
	Penetration ratio (PR)	/	
	Foliage height diversity (FHD)	/	
	GAP	/	
	Canopy surface (CSM)	/	

La combinaison de données LiDAR et RADAR est une approche prometteuse pour caractériser la structure en 3D de la végétation. Cette combinaison améliore la précision des mesures de la hauteur des arbres et de la densité de la canopée en réduisant les erreurs dues aux effets de saturation et aux ombres de la canopée. En utilisant ces deux approches, les données LiDAR et RADAR peuvent être intégrées dans un modèle commun pour obtenir une meilleure estimation de la hauteur des arbres et de la densité de la canopée forestière (Pardini et al., 2019). Cependant, il est important de noter la nécessité d'acquérir des données LiDAR et RADAR avec des caractéristiques compatibles pour garantir une fusion de données précise et efficace. La compatibilité des caractéristiques peut inclure la résolution spatiale, la couverture du spectre et la fréquence de répétition (Kaasalainen et al., 2015).

Une fusion des données optiques et RADAR a aussi été utilisée pour estimer la structure forestière en France métropolitaine (Morin, 2021). Une autre étude analyse la croissance des arbres en utilisant des séries temporelles d'images satellites en les comparant avec l'estimation des données de terrain et de LiDAR pour mesurer la hauteur des arbres et la densité du couvert forestier, cela avec des résultats cohérents (Morin, 2021). La synergie des données Sentinel optiques et RADAR permet d'obtenir une vision plus complète et précise de l'environnement en fournissant des informations sur la structure, la composition et la densité de la végétation. L'utilisation des deux types de données permet d'obtenir une meilleure classification de ces

caractéristiques que l'utilisation d'une seule source de données (Billey, 2018 ; Mercier et al., 2019).

La précision de l'estimation des attributs forestiers entre le LiDAR et le RADAR ont montré la supériorité du LiDAR à l'échelle locale. Les données RADAR multi-temporelles peuvent se substituer à une grande partie des informations disponibles à partir du LiDAR pour la modélisation de la structure forestière. De manière intéressante, Bae et al. (2019) montre que la performance du modèle RADAR pour prédire certaine composition d'espèces est meilleure que celle du LiDAR. Les résultats de l'étude sur cinq régions forestières d'Europe centrale montrent le potentiel des données RADAR pour prédire différentes composantes de la biodiversité (Bae et al., 2019).

C. Matériels et méthodes

1. La zone d'étude et capteurs terrains

1.1. Zone d'étude

Cette étude s'inscrit en parallèle du projet IMPRINT qui cherche à modéliser le microclimat forestier et son impact sur la biodiversité des sous-bois. Parmi les trois zones d'études du projet, c'est la forêt domaniale de Blois qui a été retenue.

La Forêt domaniale de Blois est une forêt publique française gérée par l'Office national des forêts (ONF). Elle se situe dans le département du Loir-et-Cher, en région Centre-Val de Loire (47°34' N, 1°15' E) et s'étend sur plus de 2750 hectares, couvrant une grande partie du territoire de la ville de Blois et de ses environs (*Figure 8*).

La Forêt domaniale de Blois se trouve dans une zone climatique tempérée, caractérisée par des hivers doux et humides et des étés modérément chauds. Les précipitations sont réparties tout au long de l'année, avec une moyenne annuelle d'environ 724 mm. La température moyenne annuelle est de 12,1 °C (fr.climate-data.org).

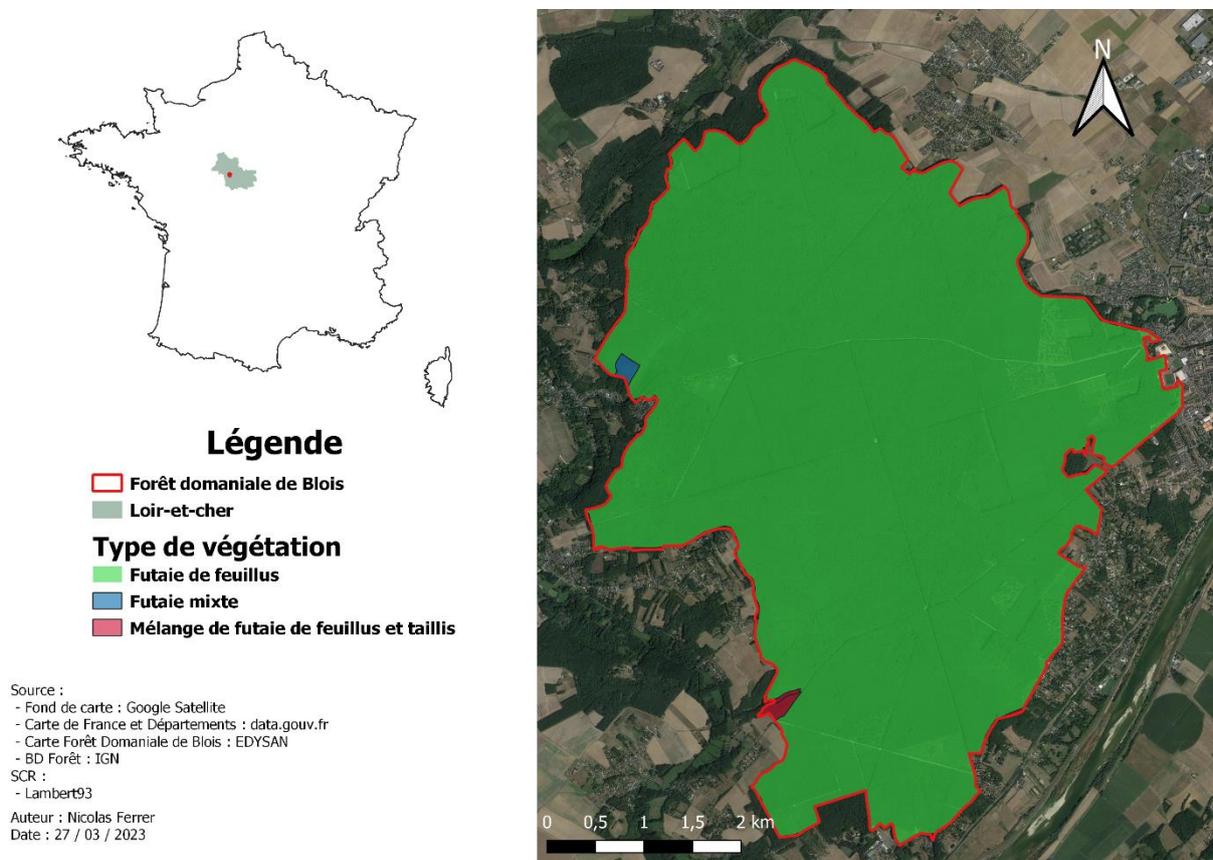


Figure 8 : Localisation de la forêt domaniale de Blois en France métropolitaine

1.2. Capteurs terrains

La collecte des données microclimatique se fait par deux types de capteurs HONEYWELL BOston (HOBO) dans chacune des 60 parcelles de la zone d'étude. Ces capteurs sont placés au centre de chaque placette. La localisation des placettes (arbre central) a été mesurée avec un GPS Trimble Geo 7X Differential Global Positioning System (DGPS) avec 50cm de précision. Les capteurs HOBO mesurent la température de l'air à 1 m au-dessus du sol et la température du sol à 8 cm de profondeur. Les capteurs de température de l'air enregistrent des données toutes les heures, tandis que les capteurs de température du sol enregistrent des données toutes les deux heures. De plus, les stades sylvicoles pour chaque placette ont été caractérisés et des relevés de biodiversité ont été réalisés. Les différents stades identifiés sont :

- Thicket : arbres en moyenne de moins de deux mètres de hauteur.
- Saplings : moins de 7.5 cm de diamètre en moyenne.
- Pole stand : entre 7.5 et 17.5 cm de diamètre en moyenne.
- Young stand : au-delà de 17.5 cm de diamètre, mais diamètre d'exploitation pas encore atteint.
- Adult stand : diamètre d'exploitation atteint.
- Old stand : peuplement qui présente des signes de sénescence.
- Seed trees : arbres semenciers, laissés après une coupe d'exploitation pour permettre la régénération.

L'ouverture du peuplement ne rentre pas en compte dans la définition de ces stades, sauf le stade semencier.

Dans la zone d'étude, il y a une placette appartenant au réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) où est installé un capteur Temperature Moisture Sensor (TMS). Ce capteur est conçu pour mesurer les conditions climatiques vécues au niveau des feuilles, des bourgeons et de ses racines. Les données de températures et d'humidité sont prises en continu tous les ¼ d'heure (*Figure 9*).

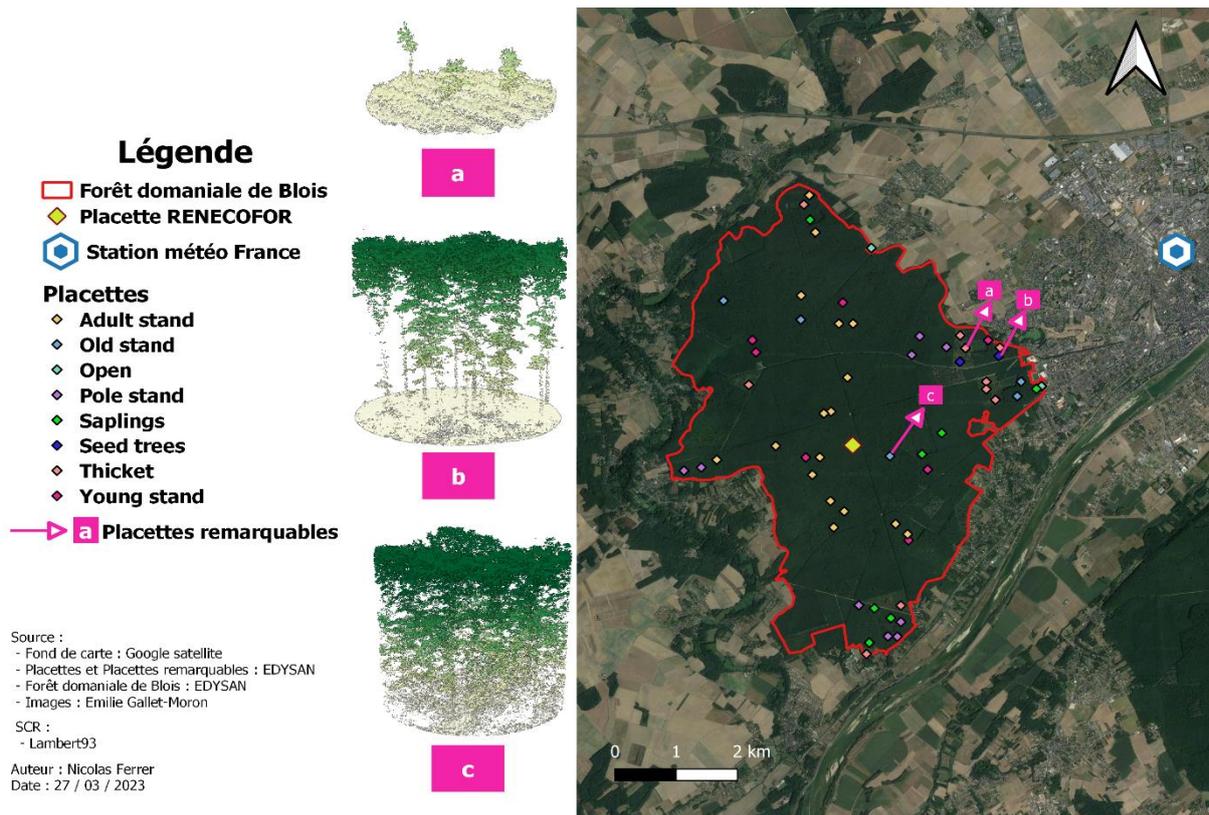


Figure 9 : Localisation des placettes où sont installé les capteurs mis en place dans la forêt domaniale de Blois afin de collecter des données microclimatiques

Enfin, les données macro-climatique sur la zone d'étude ont été mesurées via la station Météofrance, la plus proche du massif. Celle-ci donne les précipitations et les températures heure par heure tous les jours de l'année 2021.

1.3. Données terrains

Il existe un lien général entre les températures du microclimat et du macroclimat, qui est évalué à l'aide d'une régression linéaire (Figure 10). La relation entre le microclimat et le macroclimat est capturée en partie par la pente du modèle linéaire. La pente est principalement influencée par des caractéristiques structurales du peuplement qui interagissent avec les variations saisonnières de feuilles sur les arbres. Ces caractéristiques incluent le type de peuplement, la capacité de fournir de l'ombre, l'âge du peuplement, la hauteur des arbres dominants, la densité des tiges ainsi que la couverture des couches supérieure et inférieure de la végétation arbustive (Gril et al., 2023).

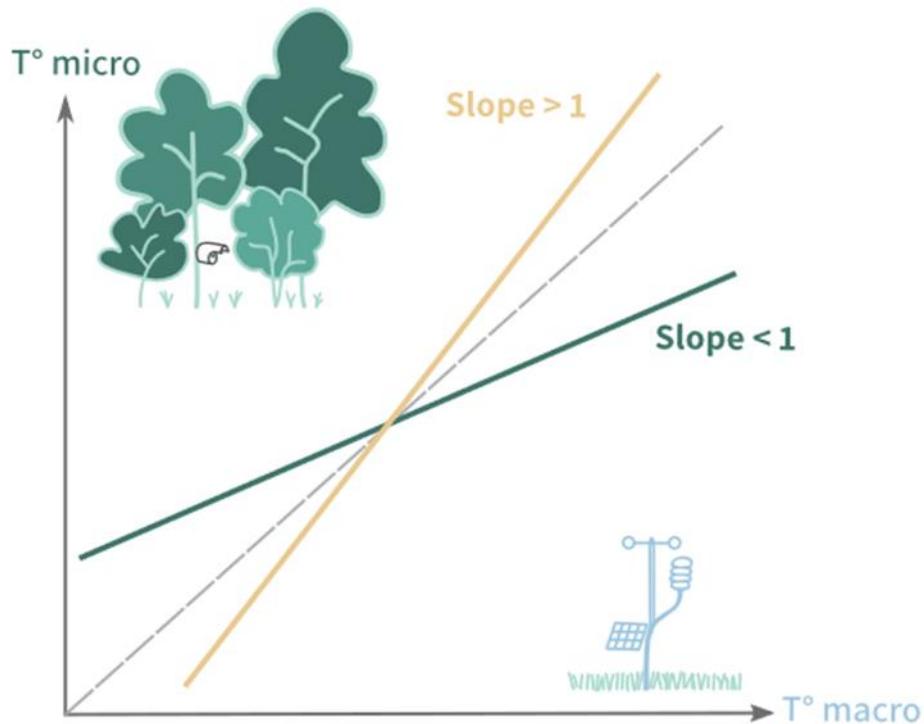


Figure 10 : La pente reliant le microclimat au macroclimat [Gril et al., 2023]

La pente, représentée par le terme « slope » ici, fonctionne de la manière suivante :

- Lorsque sa valeur est nulle, cela signifie que la température du microclimat et du macroclimat est la même.
- Si la pente est positive, le microclimat amplifie l'effet du macroclimat. C'est-à-dire que si la température macro-climatique est élevée, la température microclimatique sera encore plus élevée. Et si la température du macroclimat est faible, la température du microclimat sera encore plus faible.
- Si la pente est négative, le microclimat agit comme un « amortisseur » sur le macroclimat. C'est-à-dire que si la température du macroclimat est élevée, la température du microclimat sera plus faible. Et si la température du macroclimat est faible, la température du microclimat sera plus élevée.

2. Données RADAR Sentinel-1

2.1. Description des données

Une série temporelle de 60 images Radar Sentinel-1 sur l'année a été téléchargée. Le jeu d'images Sentinel-1 téléchargé concerne la tuile contenant la forêt de Blois. Il comprend 60 images, soit 5 images par mois pour toute l'année 2021, avec une polarisation VV et VH couvrant intégralement la forêt domaniale de Blois afin d'éviter les effets de bord. Étant donné

que le prétraitement des images est long, seules 3 images par mois ont été traitées, correspondant au début, au milieu et à la fin du mois.

Sentinel-1 est une mission d'observation de la Terre par radar développée par l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre du programme européen Copernicus. Elle se compose de deux satellites identiques, Sentinel-1A et Sentinel-1B, lancés respectivement en 2014 et 2016, en orbite polaire héliosynchrone.

Les images sont acquises en mode ascendant (du sud vers le nord) par les satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B. Les images sont produites par un radar à synthèse d'ouverture (RSO) avec une résolution spatiale de 10 m en bande C (fréquence : 4-8 GHz ; longueur d'onde : 3,8-7,5 cm) où chaque image couvre une étendue de 250 km. Chaque satellite offre une résolution temporelle de 6 jours.

2.2. Prétraitement des données

Les images ont été soumises à un prétraitement en utilisant le logiciel SNAP (Sentinel Application Platform), développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour faciliter l'exploitation des données provenant des satellites Sentinel de Copernicus. Ce logiciel open-source offre aux utilisateurs la possibilité de visualiser, traiter et analyser les données des satellites Sentinel-1.

Pour effectuer ces prétraitements, un Graphe Builder a été conçu sur le logiciel (*Figure 11*).

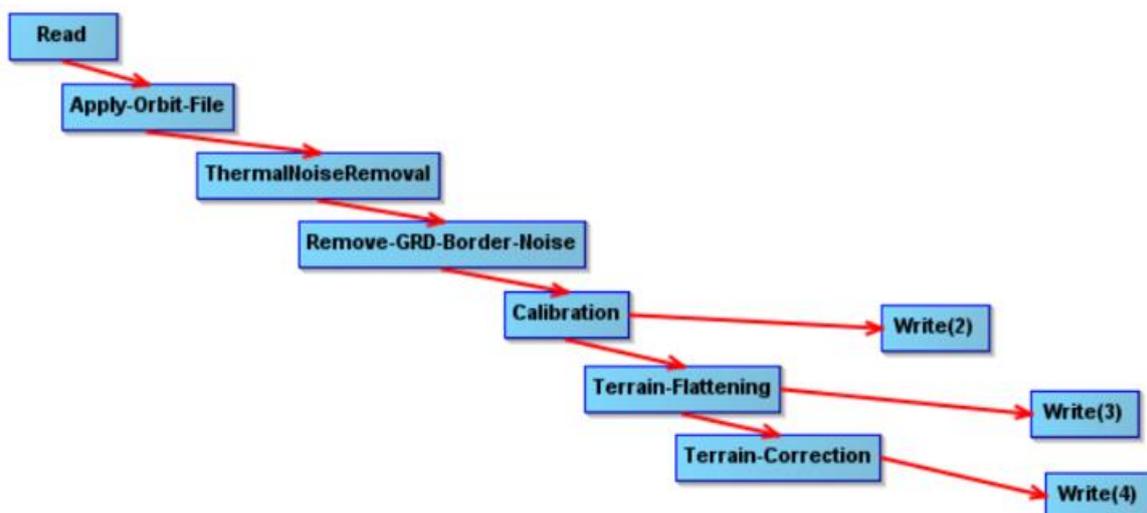


Figure 11 : Graph Builder utilisé pour le prétraitement de images Sentinel-1

Dans un premier temps, une correction de la localisation du satellite a été effectuée en utilisant le fichier d'orbite Apply-Orbit-File, afin d'améliorer la précision de la localisation du satellite lors de l'acquisition de l'image. Ensuite, le Polynomial Degree a été défini à 3 pour garantir une meilleure précision des orbites. Le ThermalNoiseRemoval a été appliqué pour réduire le bruit thermique et minimiser les discontinuités dans le signal. Le Remove-GRD-Border-Noise a été utilisé pour corriger les artefacts radiométriques en bordure d'image en supprimant le bruit de faible intensité et les données invalides. Ensuite, la calibration a été appliquée pour corriger l'intensité du signal à une mesure de référence, tandis que le Terrain-Flattening a été utilisé pour aplatir le terrain. Enfin, la correction topographique (Terrain-Correction) a été réalisée pour rectifier les effets de distorsion lors de l'acquisition de l'image, en utilisant le MNT **SRTM 3Sec** et une projection en WGS84.

Toutes les images traitées ont été enregistrées au format TIFF. Pour chaque image, la zone d'étude, la forêt domaniale de Blois, a été extraite et reprojété en Lambert93.

Dans la série temporelle, chaque pixel de la zone d'étude a deux données de rétrodiffusion en unités linéaires, la polarisation VV et la polarisation VH. Ces images sont exprimées en Gamma0 plutôt qu'en Sigma0. En effet, une calibration de Sigma0, corrigeant les effets du relief, est plus adaptée à l'étude du sol et ces propriétés bio-géophysiques. Dans le cas des forêts denses, une calibration du coefficient Gamma0, offre une valeur de rétrodiffusion variant très peu avec l'incidence et permet de différencier plusieurs types de forêts (Rudant et Frison, 2019). Par conséquent, le Gamma0 est utilisé pour notre zone d'étude, la forêt de Blois. Enfin, pour atténuer le speckle (chatoiement) dans les images RADAR, un processus de filtrage temporel en calculant des indices a été utilisé.

2.3. Indicateurs RADAR

Des indicateurs Radar permettant de caractériser la structure de la canopée ont été calculés (*Tableau 3*).

Chaque indicateur a été associé à sa médiane annuelle, estivale et hivernale, en prenant en compte la différence saisonnière entre l'été et l'hiver. Pour la polarisation VH, s'ajoute la valeur minimum et maximum mensuel et l'amplitude. Enfin, deux indices RADAR qui sont le RVI et RFDI ont été ajoutés comme indicateurs :

- RVI (Radar Vegetation Index) est un indice utilisé pour évaluer et surveiller la densité et la santé de la végétation. RVI plus élevée indique généralement une végétation plus

dense et plus saine, tandis que des valeurs plus faibles peuvent indiquer une végétation clairsemée ou stressée.

$$\mathbf{RVI} = (4 * \mathbf{VH}) / (\mathbf{VH} + \mathbf{VV})$$

- RFDI (Radar Degradation Forest Index) est un indice utilisé pour évaluer et surveiller la dégradation des forêts. Des valeurs RFDI plus élevées indiquent des niveaux plus élevés de dégradation des forêts, tandis que des valeurs plus faibles indiquent des forêts plus saines et moins dégradées.

$$\mathbf{RFDI} = (\mathbf{VV} - \mathbf{VH}) / (\mathbf{VV} + \mathbf{VH})$$

Tableau 3: Les indicateurs RADAR pour la forêt de Blois en 2021

Satellite	Nom	Indicateurs
S1 - RADAR	VH	VH_med
		med_winter_VH
		med_summer_VH
		diff_season_VH
		min_valeur_VH
		max_valeur_VH
		amplitude_VH
	VV	VV_med
		med_winter_VV
		med_summer_VV
		diff_season_VV
	VV/VH	median_ratio_VV_VH
	VV-VH	median_diff_VV_VH
	Radar Vegetation Index (RVI)	med_RVI
		med_winter_RVI
		med_summer_RVI
		diff_season_RVI
Radar Forest Degradation Index (RFDI)	med_RVI	
	med_winter_RFDI	
	med_summer_RVI	
	diff_season_RVI	

3. Données Optiques et LiDAR

3.1. Données optiques

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est un indice optique utilisé en télédétection qui réagit de manière sensible à l'activité chlorophyllienne, reflétant ainsi la vigueur et la densité de la végétation (Dous, 2020). Il est calculé en comparant les mesures de réflectance dans les bandes du visible et de l'infrarouge proche. Les valeurs du NDVI varient de -1 à 1, où des valeurs positives indiquent une végétation plus dense et en meilleure santé.

Les données du NDVI sont obtenues à partir d'images satellite Sentinel-2, avec une résolution de 10 mètres. Ces données couvrent la période de mai à octobre de l'année 2021 avec 10 dates, permettant de surveiller et d'analyser les variations de la végétation sur la période estivale. Les indicateurs suivants ont été extraits (*Tableau 4*) :

Tableau 4 : Les indicateurs NDVI pour la forêt de Blois en 2021

Satellite	Nom	Indicateurs
S2 - Optique	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	med_NDVI
		mean_NDVI
		min_NDVI
		max_NDVI
		amplitude_NDVI
		med_summer_NDVI

3.2. Données LiDAR

Les données LiDAR sur la forêt de Blois, ont été recueilli lors de deux vols le 17/06/2021 avec un Partenavia P68 Observer Islander équipé d'une trappe accueillant le système LiDAR RIEGL VQ780-II (*Tableau 5*).

Tableau 5 : Caractéristiques du capteur LiDAR et du vol sur la forêt de Blois [Gril et al., 2023]

Hauteur de vol	900 m
Longueur d'onde du laser	Proche infrarouge
Fréquence d'impulsion	2000 kHz
Densité totale moyenne	72.6 pts/m ²
Densité moyenne des points de sol	9.7 pts/m ²
Recouvrement entre bandes laser	60 %
Angle de scan	+/- 30°
Précision (Z)	4.5 cm
Erreur de géolocalisation (XY)	< 0.1 m
Diamètre de la tâche laser au sol	16.7 cm

Pour caractériser le microclimat à l'aide des données LiDAR aéroportés, trois indicateurs spécifiques ont été sélectionnés (*Figure 12*). Ces indicateurs ont été collectés sur 53 placettes situées dans la forêt de Blois car les autres placettes ne contenaient pas de points dans des rayons de 100 mètres (étant trop proches des bords). Les indicateurs ont été calculés dans un rayon de 5 mètres autour de chaque placette. Cette distance de 5 mètres est l'échelle la plus pertinente par rapport à d'autres distances telles que 10 mètres, 20 mètres ou même 100 mètres, d'après une comparaison du pouvoir explicatif (R^2) des variables sur l'effet microclimatique, ou paramètre de pente (Gril et al., 2023).

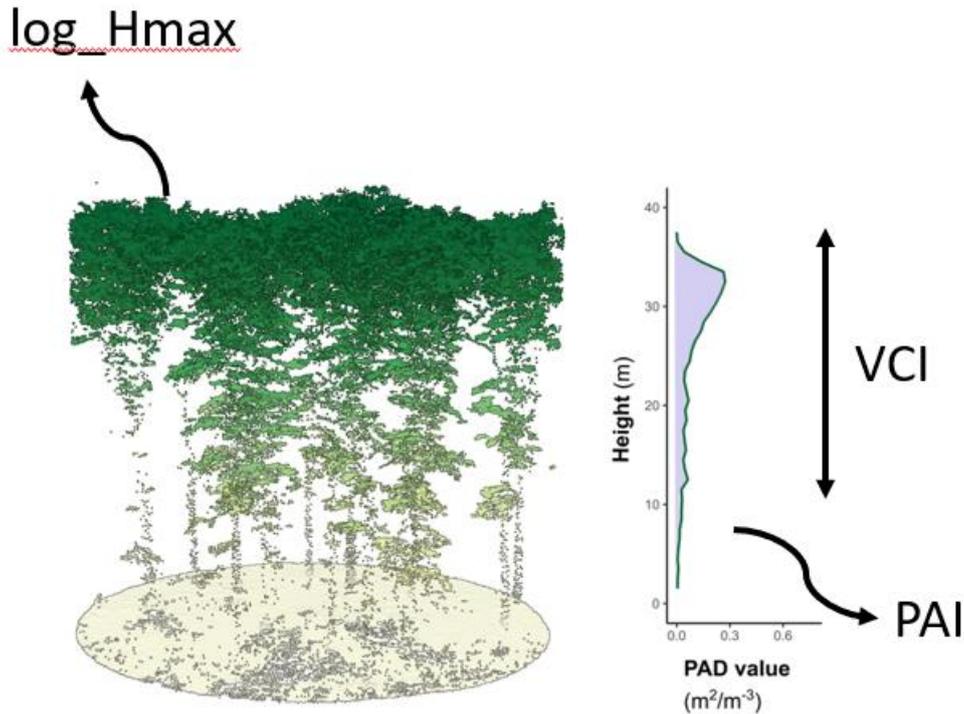


Figure 12 : Relation des Indicateurs LiDAR avec la structure forestière [Gril et al., 2023]

- Log_Hmax représente le logarithme de la hauteur maximale du peuplement forestier (Jucker et al., 2018).
- VCI (Vertical Complexity Index) est un indicateur utilisé pour évaluer la complexité verticale de la canopée forestière. Il permet de quantifier la structure et la diversité de la végétation présente dans les écosystèmes forestiers (van Ewijk et al., 2011).
- PAI (Plant Area Index) est une mesure de la densité de végétation et de la surface foliaire totale par unité de surface terrestre. Il fournit des informations sur la quantité de biomasse végétale présente et sur son interaction avec l'environnement (Lenoir et al., 2022).

4. Méthodes et analyses

Afin de réaliser les analyses des données, R Studio a été utilisé (version 4.2.2).

4.1. Statistiques descriptives

Les rasters RADAR de chaque date ont été empilés pour créer une série temporelle couvrant l'année 2021. Ensuite, les valeurs des pixels ont été extraites à partir de cette série temporelle pour chaque point de placette, et ces données ont été enregistrées. Ces données permettent de représenter les valeurs des pixels de chaque placette tout au long de l'année 2021,

en prenant en compte la polarisation, ainsi que les informations sur les catégories de végétation pour chaque placette qui ont été ajoutées.

Les différents indicateurs RADAR, LiDAR et Optique ont été utilisés pour évaluer la structure de la végétation. Pour faciliter la compréhension de ces données, des diagrammes en boîte (boxplots) ont été créés pour chaque indicateur, en les regroupant selon le stade sylvicole des placettes. Ces boxplots fournissent un outil visuel qui permet de comparer et de synthétiser les distributions de données liées à chaque indicateur.

4.2. Régression linéaire et prédiction du microclimat

La régression linéaire est une technique statistique qui permet de modéliser la relation entre une variable dépendante et des variables indépendantes, en supposant une relation linéaire. Elle est utilisée pour estimer, expliquer et prédire les effets des variables indépendantes sur la variable dépendante.

Une analyse de corrélation de Spearman a été effectuée afin de réduire le jeu de données RADAR, car les régressions linéaires ne peuvent pas tolérer des variables fortement corrélées. Les indices présentant une corrélation supérieure à 70% avec d'autres ont été éliminés afin d'obtenir le *Tableau 6*.

Tableau 6 : Indicateurs RADAR conservés après la corrélation de Spearman

Satellite	Nom	Indicateurs
S1 - RADAR	VH	VH_med
		med_winter_VH
		med_summer_VH
		min_valeur_VH
		max_valeur_VH
	VV	VV_med
		diff_season_VV
	Radar Vegetation Index (RVI)	med_RVI
		med_winter_RVI
		med_summer_RVI

Afin de mettre en œuvre la régression linéaire dans l'environnement R, il est essentiel de suivre plusieurs étapes clés (*Figure 13*).

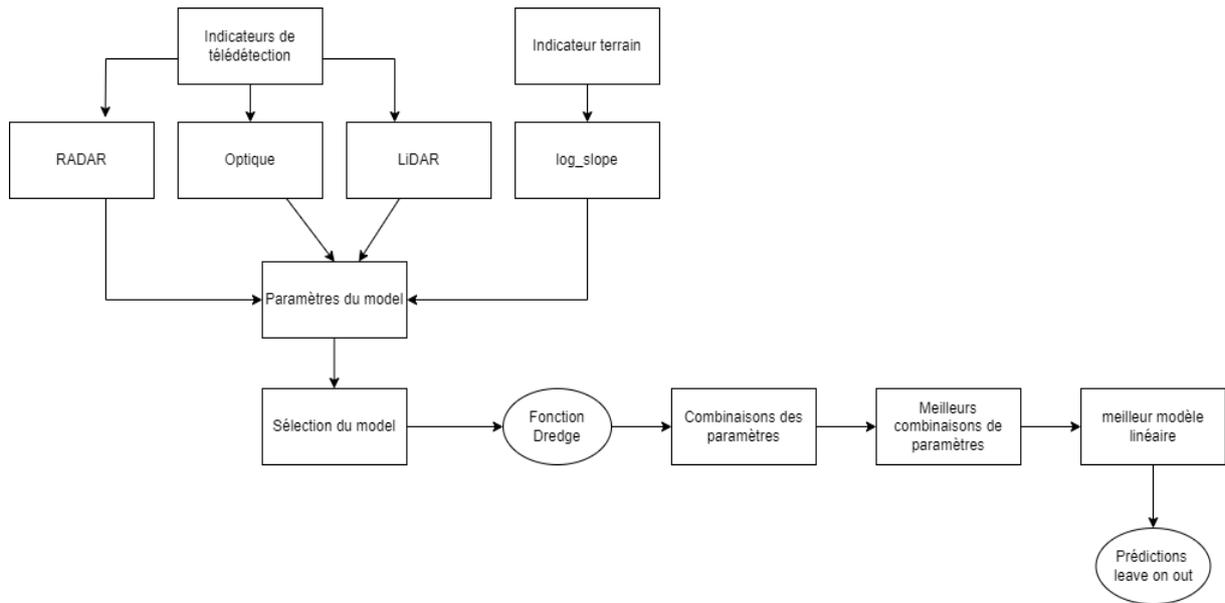


Figure 13 : Schéma des étapes de création du modèle de régression linéaire

Le modèle de régression linéaire est construit en utilisant la fonction **lm()** de R en prenant comme variable à prédire le « log_slope », qui est le logarithme du « slope », et comme variables prédictives les indicateurs des capteurs RADAR, LiDAR et Optique.

Les indicateurs provenant de chaque type de capteur sont combinés entre eux pour former des ensembles d'indicateurs prédictives spécifiques à chaque capteur. De plus, les indicateurs provenant des différents capteurs sont également combinés entre eux.

Une fois le modèle de régression linéaire construit, la fonction **dredge** de R est utilisée pour évaluer les meilleures combinaisons d'indicateurs. Cette fonction explore différentes combinaisons d'indicateurs et identifie celles qui fournissent les meilleures performances prédictives.

Pour évaluer la performance du modèle, une validation croisée est réalisée. La validation croisée est une technique qui divise les données en ensembles d'apprentissage et de test pour évaluer la capacité du modèle à généraliser sur de nouvelles données. Cela permet de s'assurer que le modèle n'est pas sûr ajusté aux données d'apprentissage.

Les indices de coefficient de détermination (R^2) et de racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont calculés pour évaluer la précision de la prédiction du « log_slope ». Le R^2 mesure la proportion de la variance totale expliquée par le modèle, tandis que le RMSE mesure la précision moyenne des prédictions du modèle par rapport aux valeurs réelles. Des valeurs élevées de R^2 et des valeurs faibles de RMSE indiquent une meilleure performance du modèle.

D. Résultats

1. Réponse temporelle RADAR de la forêt de Blois

L'analyse des séries temporelles des variations du signal RADAR pour les polarisations VV et VH tout au long de l'année 2021 a conduit à plusieurs constatations. Ces conclusions sont fondées sur les données présentées dans la *Figure 14*.

Premièrement, il est établi que la polarisation VV présente un coefficient de rétrodiffusion supérieur à celui de la polarisation VH. Concernant la polarisation VH, une diminution du coefficient de rétrodiffusion est observée pendant la période estivale, tandis qu'une augmentation est notée pendant la période hivernale. De plus, la polarisation VV suit une dynamique similaire à celle de la polarisation VH. Cela suggère que les variations du signal RADAR entre les polarisations VV et VH sont liées d'une manière ou d'une autre, bien que leurs amplitudes puissent varier.

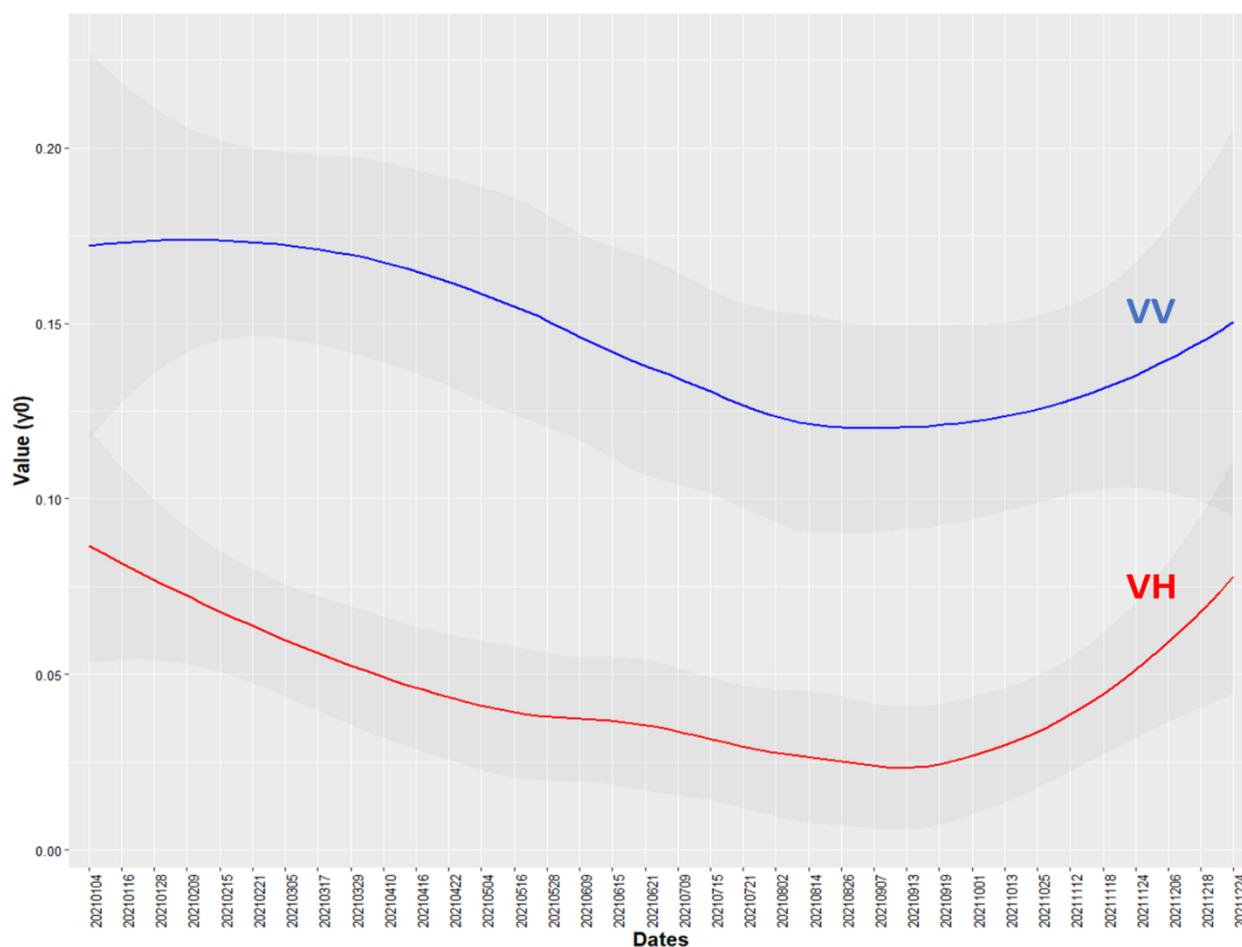


Figure 14 : Réponse RADAR annuelle des polarisations VV et VH de la forêt de Blois en 2021. Représente les valeurs de coefficients de rétrodiffusion en polarisation VH (couleur rouge) et VV (couleur bleue) en fonction du temps.

Au sein de la zone d'étude, trois placettes remarquables ont été identifiées, présentant différentes structures de végétation, allant d'un milieu ouvert à un milieu plus fermé, comme représenté dans la *Figure 15*.

Dans le milieu ouvert, les coefficients de rétrodiffusion pour les polarisations VV et VH restent stables et linéaires tout au long de l'année 2021, avec des valeurs plus faibles par rapport aux autres structures. En revanche, dans le peuplement dense sans sous-étage et le peuplement dense avec sous-étage, les coefficients de rétrodiffusion sont plus élevés pour les deux polarisations.

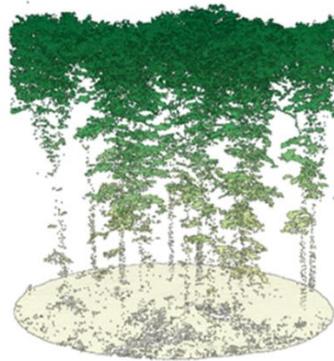
En ce qui concerne le peuplement dense sans sous-étage, on observe une forte diminution du coefficient de rétrodiffusion pour la polarisation VH après la période hivernale, atteignant son niveau le plus bas en avril, avant de remonter progressivement pendant toute la période estivale. Quant à la polarisation VV, on note une augmentation du coefficient de rétrodiffusion entre juin et août, avant de suivre une dynamique similaire à celle de la polarisation VH.

Pour la placette du peuplement dense avec sous-étage, la polarisation VH connaît une baisse progressive pendant toute la période estivale, atteignant son minimum en août, puis remontant rapidement pendant la période hivernale. En ce qui concerne la polarisation VV, elle suit une dynamique similaire à celle observée dans le peuplement dense sans sous-étages, mais l'augmentation entre juin et août est moins marquée.

Milieu ouvert



Peuplement dense sans sous-étage



Peuplement dense avec sous-étage

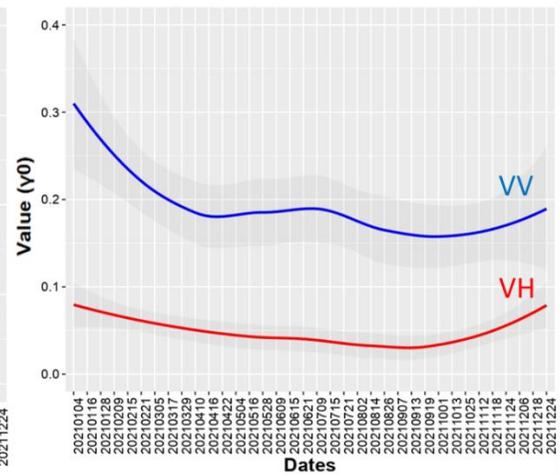
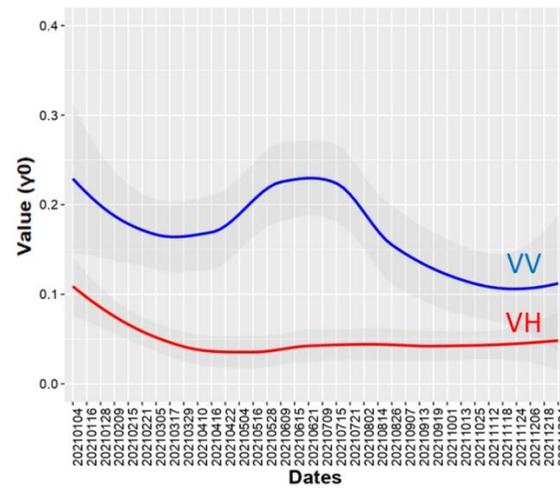
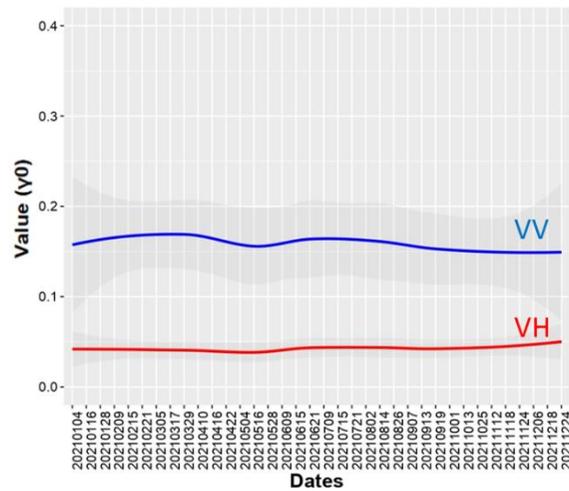
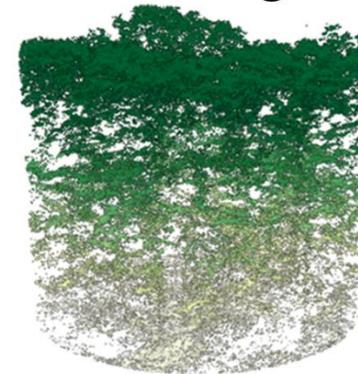


Figure 15 : Coefficient de rétrodiffusion VV et VH annuel en fonction de la structure de végétation de la forêt de Blois en 2021

2. Réponses RADAR aux différents stade sylvicoles

La forêt de Blois est une forêt domaniale gérée par l'ONF, soumise à des pratiques de gestion sylvicole et à des activités d'exploitation. Chaque stade de gestion dans une futaie régulière présente des caractéristiques spécifiques en termes de diamètre des arbres et de développement du peuplement.

L'étude des variations mensuelles du signal RADAR pour chaque étape de gestion sylvicole en 2021 dans la forêt de Blois, illustrée dans la *Figure 16*, révèle des dynamiques similaires à celles observées pour les différentes structures de végétation mentionnées précédemment (*Figure 15*).

Les stades sylvicoles « Seed trees » et « Old stand » montrent une dynamique de coefficient de rétrodiffusion des polarisations VV et VH similaire à celle du peuplement dense sans sous-étage. Cela indique que ces deux stades de gestion ont des caractéristiques de couvert végétal et de densité de végétation comparables à celles d'un milieu forestier fermé, présentant des propriétés de réflexion du signal RADAR similaires tout au long de l'année 2021. En ce qui concerne les peuplements correspondant aux stades forestiers matures, leur dynamique temporelle de polarisation VV révèle des valeurs significativement élevées par rapport aux autres stades. Deux pics de polarisation VV distincts apparaissent en hiver et en été, tandis que des creux sont observés au printemps et à l'automne. Cette caractéristique est particulièrement marquée pour les stades forestiers matures, mais moins prononcée dans les stades plus jeunes et en milieu ouvert.

Les autres stades présentent une dynamique similaire à celle du peuplement avec sous-étage en termes de rétrodiffusion. Cette similitude montre une variation saisonnière moins marquée du signal RADAR par rapport aux étapes de gestion « Seed trees » et « Old stand ».

Enfin, les coefficients de rétrodiffusion des peuplements « Open » et du milieu ouvert sont similaires. Cela indique qu'ils partagent des caractéristiques de rétrodiffusion du signal RADAR proches.

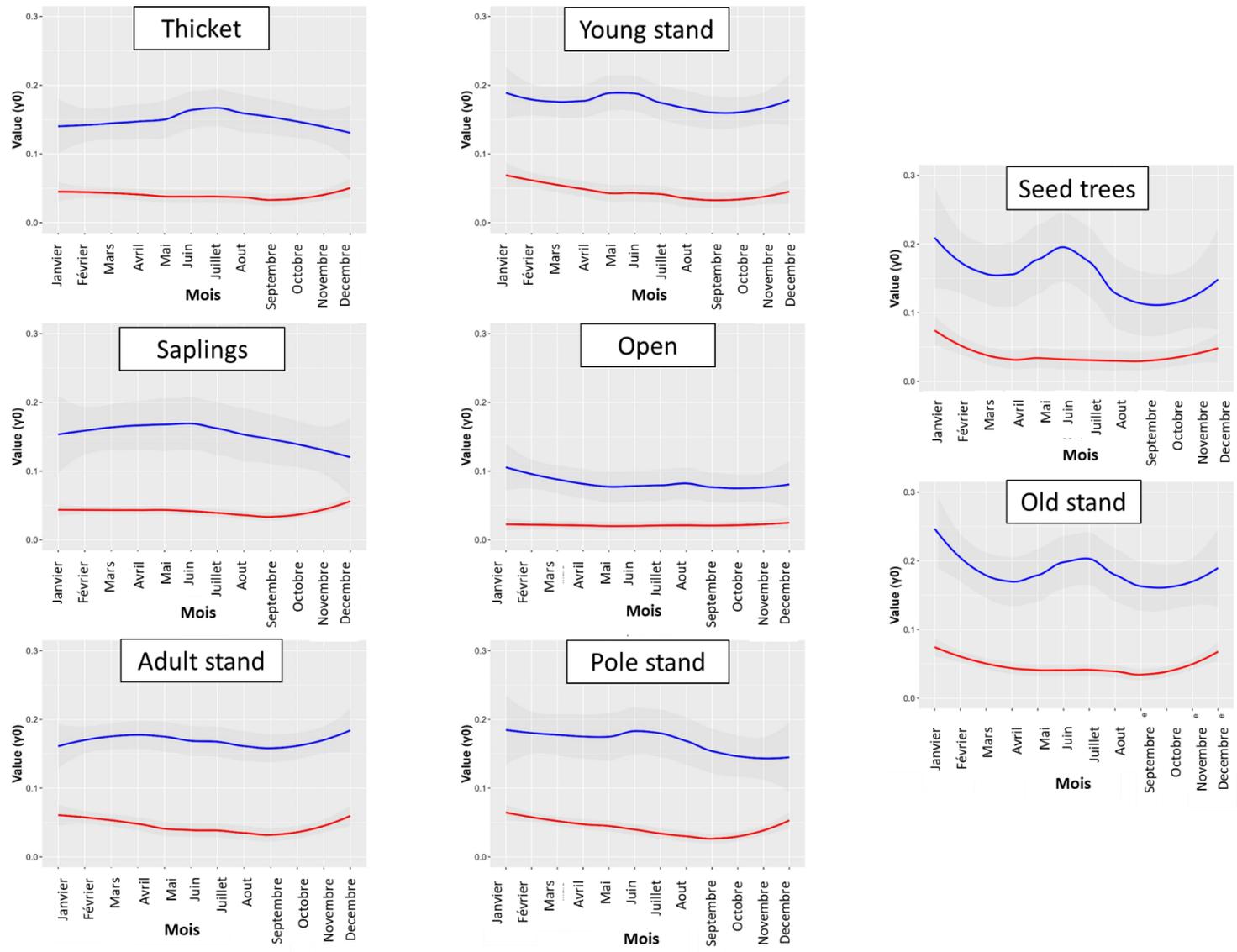


Figure 16 : Réponse RADAR mensuelle de la forêt de Blois en 2021 par stade sylvicole. En rouge la polarisation VH. En bleu la polarisation VV.

Les diagrammes *Figure 17* représente les différents stades sylvicoles au sein de la forêt de Blois. Chaque diagramme illustre la distribution de coefficients de rétrodiffusion pour chaque indicateurs RADAR du *Tableau 6*.

Le stade « open » présente généralement les coefficients de rétrodiffusion les plus bas parmi tous les indicateurs, mais il existe des exceptions pour les indicateurs « med_RVI » et « med_summer_RVI », où les coefficients de rétrodiffusion de ce stade sont plus élevés que ceux d'autres stades sylvicoles tels que « pole stand » et « adult stand ».

Concernant le stade « thicket », on observe qu'il possède les coefficients de rétrodiffusion les plus élevés pour la majorité des indicateurs RADAR, suivi de près par le stade « saplings », qui présente des coefficients plus élevés pour « VV_med », « VH_med » et « max_valeur_VH ». De plus, le stade « old_stand » présente des coefficients de rétrodiffusion plus élevés que les deux stades sylvicoles précédents pour les indicateurs « med_summer_VH », « VV_med », « VH_med » et « med_winter_VH ».

En ce qui concerne les stades « pole stand », « young stand » et « adult stand », ils sont relativement équivalents en termes de différents indicateurs. Toutefois, on remarque que le stade « young stand » présente une plus grande variabilité.

Enfin, le stade « seed trees » affiche des coefficients de rétrodiffusion bas, mais ils restent plus élevés que ceux du stade « open ». De plus, ce stade présente des coefficients de rétrodiffusion très élevés pour l'indicateur « med_summer_RVI ».

Il est important de noter que certaines métriques spécifiques, telles que « VV_med » ou « med_winter_VH », se révèlent utiles pour classer les différents stades selon une logique de succession forestière.

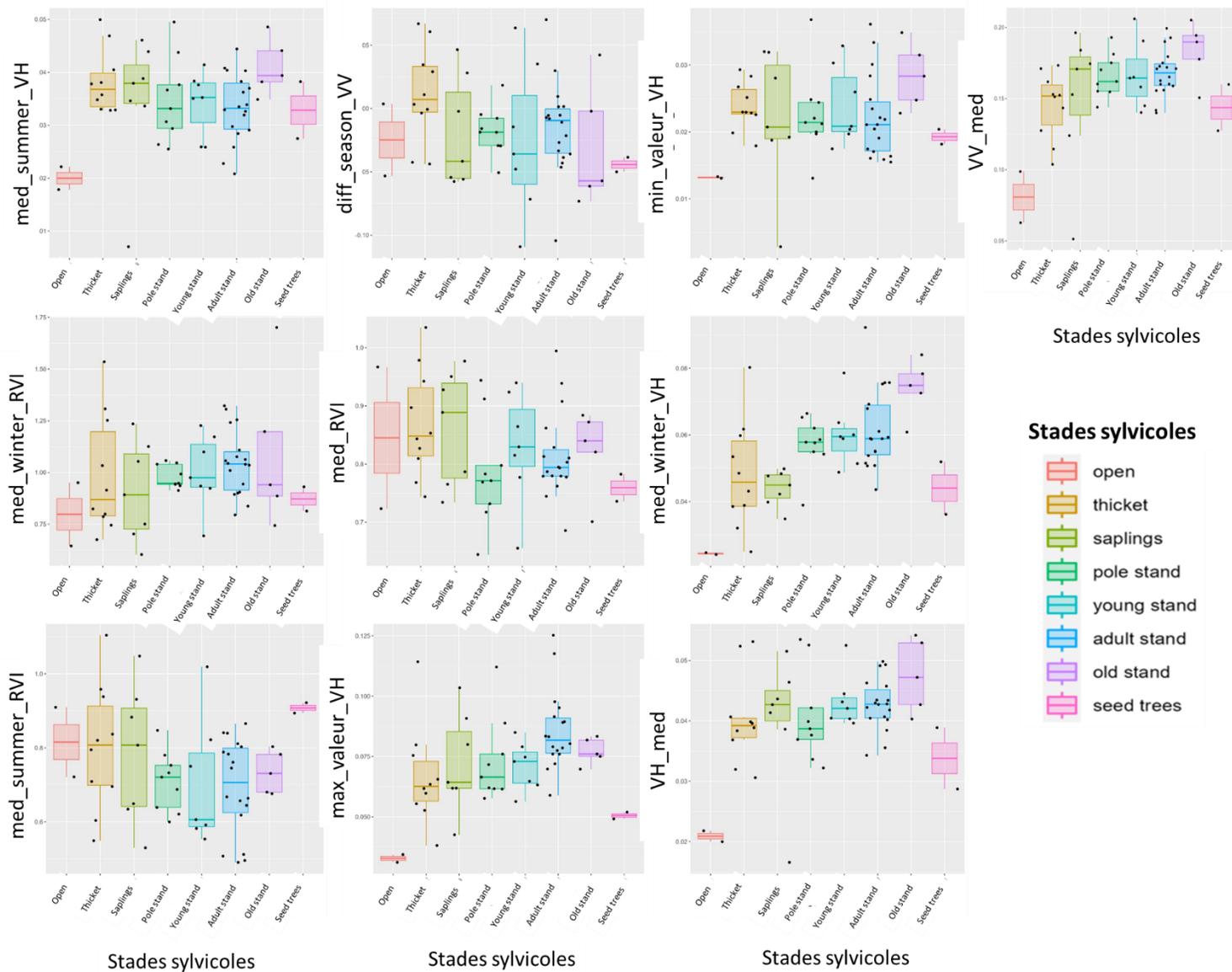


Figure 17 : Boxplots des indicateurs RADAR en fonction des stades sylvoles de la forêt de Blois en 20

3. Analyse du modèle de régression linéaire

Pour comprendre et anticiper les variations du microclimat, des régressions linéaires entre différents capteurs et leurs indicateurs pour prédire le « log_slope » ont été réalisées. Ensuite, ces prédictions sont utilisées pour évaluer la fiabilité de nos résultats en les comparant aux valeurs réelles. Cette approche nous permet de mieux comprendre les liens entre les capteurs, leurs indicateurs et le « log_slope », tout en évaluant l'exactitude de nos prédictions.

Le *Tableau 7* présente les résultats des régressions linéaires en fonction des différentes combinaisons de capteurs et d'indicateurs.

Tableau 7 : Résultats des régressions linéaires en fonction des combinaisons des indicateurs RADAR, Optique et LiDAR

Combinaison	Indicateurs	Coefficient	Degré de significativité	R ²	Corrélation	RMSE (%)
RADAR	diff_season_VV	↗	++	0,47	0,53	0,89
	med_summer_RVI	↗	++			
	med_winter_RVI	↘	+++			
	VH_med	↘	+++			
Optique	mean_NDVI	↘	.	0,44	0,2	1,19
	min_NDVI	↘	.			
LiDAR	log_Hmax_5_m	↘	+++	0,91	0,93	0,36
	PAI_5_m	↘	+++			
	VCI_5_m	↘	++			
RADAR + Optique	diff_season_VV	↗	++	0,61	0,59	0,8
	med_summer_RVI	↗	++			
	med_winter_RVI	↘	++			
	min_NDVI	↘	+++			
	VH_med	↘	+			
LiDAR + Optique	amplitude_NDVI	↘	+	0,93	0,92	0,37
	log_Hmax_5_m	↘	+++			
	mean_NDVI	↘	++			
	med_NDVI	↗	++			
	PAI_5_m	↘	+++			
	VCI_5_m	↘	.			
LiDAR + RADAR LiDAR + RADAR + Optique	diff_season_VV	↗	++	0,94	0,91	0,33
	log_Hmax_5_m	↘	+++			
	med_summer_RVI	↗	++			
	med_summer_VH	↘	++			
	med_winter_RVI	↘	+++			
	med_winter_VH	↗	++			
	PAI_5_m	↘	+++			
	VCI_5_m	↘	+			

Coefficient : Mesure l'impact et la direction de la relation linéaire entre les indicateurs et le log_slope dans le modèle de régression linéaire.

- Coefficient positif (↗) : Augmentation d'un indicateur associée à une augmentation du log_slope.
- Coefficient négatif (↘) : Augmentation d'un indicateur associée à une diminution du log_slope.

Degré de significativité : Évalue si les coefficients de régression sont statistiquement différents de zéro, indiquant une relation significative entre les indicateurs et le log_slope.

- $p\text{-value} \geq 0$: '+++' (Très significatif)
- $p\text{-value} \geq 0.001$: '++' (Significatif)
- $p\text{-value} \geq 0.01$: '+' (Modérément significatif)
- $p\text{-value} \geq 0.05$: '.' (Peu significatif)
- $p\text{-value} \geq 0.1$: '' (Très peu significatif)

R² : Mesure la qualité de l'ajustement du modèle.

*Corrélation : Évalue la relation linéaire entre les indicateurs et le log_slope.
RMSE : Mesure de la précision du modèle. Haut du formulaire.*

En analysant les différentes combinaisons d'indicateurs propres à chaque capteur, on remarque que les indicateurs LiDAR se démarquent en présentant les meilleures performances pour prédire le « log_slope ». Ils affichent un R^2 élevé de 0,91, ce qui indique une excellente adéquation du modèle, et un RMSE de seulement 0,36, témoignant d'une précision élevée dans les prédictions. En contraste, les indicateurs optiques montrent les performances les plus faibles dans la prédiction du « log_slope » avec un R^2 de 0,44 et un RMSE de 1,19.

Cependant, en ce qui concerne la combinaison d'indicateurs RADAR seule, on observe que le RMSE et le R^2 sont relativement proches de ceux obtenus avec les indicateurs optiques seuls, bien que le RADAR seul soit légèrement plus performant que l'optique seule (R^2 de 0,44). La différence significative entre les indicateurs RADAR et optiques réside dans leur degré de significativité. Si l'on compare les indicateurs RADAR seule et LiDAR seule, ils présentent une forte significativité statistique (p-value proche de 0,001), tandis que les indicateurs optiques seuls indiquent une moindre significativité statistique (p-value proche de 0,1).

Enfin, il est important de noter que tous les indicateurs présentent un coefficient négatif, à l'exception de deux indicateurs RADAR, le « diff_season_VV » et le « med_summer_RVI », qui affichent un coefficient positif.

En combinant les indicateurs provenant de différents capteurs, on remarque une amélioration significative des performances de prédiction du « log_slope ». Lorsque les indicateurs LiDAR, RADAR et Optique sont associés, le modèle obtient un R^2 de 0,94 et un RMSE de 0,33, montrant ainsi une légère augmentation de la précision par rapport à l'utilisation du LiDAR seul.

De même, la combinaison des indicateurs RADAR et Optique entraîne également une amélioration de la prédiction du « log_slope », avec un R^2 de 0,61 et un RMSE de 0,8. Bien que la précision de cette combinaison soit inférieure à celle du LiDAR seul.

Il convient de noter qu'une fois les indicateurs RADAR, LiDAR et Optique combinés, les indicateurs optiques ne sont pas retenus dans le meilleur modèle. Enfin, cette combinaison accroît le degré de significativité de chaque indicateur, avec une p-value moyenne de 0,001, renforçant ainsi leur importance dans la prédiction du « log_slope ».

La *Figure 18* présente les courbes de régression linéaire illustrant les prédictions du « log_slope » obtenues en combinant les indicateurs des divers capteurs. L'axe horizontal

représente les valeurs prédites du « log_slope », tandis que l'axe vertical représente les valeurs réelles correspondantes. Trois éléments graphiques accompagnent ces courbes : une droite de régression en noir, une droite 1:1 en vert représentant une prédiction parfaite, et un intervalle de confiance à 0,95 en rouge. Les différents points sur le graphique correspondent aux divers stades sylvicoles des placettes où le calcul du « log_slope » a été effectué.

En comparant les prédictions obtenues indépendamment par le RADAR et l'Optique, le RADAR affiche une meilleure précision. Cette conclusion se fonde sur plusieurs observations. En premier lieu, la droite de régression du RADAR est nettement plus proche de la droite 1:1, ce qui démontre une meilleure concordance entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles observées. De plus, les points de données se dispersent moins autour de la droite de régression pour le RADAR par rapport à l'Optique.

Cependant, malgré la supériorité du RADAR par rapport à l'Optique, la prédiction obtenue à partir du LiDAR demeure encore supérieure aux deux autres capteurs en termes de précision.

En ce qui concerne les combinaisons de capteurs pour la prédiction du « log_slope », les combinaisons incluant le LiDAR restent les plus performantes. Mais avec l'ajout du RADAR et de l'Optique au LiDAR, on peut observer une légère amélioration de la précision des prédictions.

De plus, la combinaison du RADAR et de l'Optique présente une amélioration de la prédiction.

Par ailleurs, lorsque nous combinons le LiDAR, le RADAR et l'Optique, les indicateurs Optique n'apportent pas de contribution supplémentaire par rapport à la combinaison du LiDAR et du RADAR. Cela suggère que l'information captée par le LiDAR et le RADAR est suffisante pour expliquer la variation du « log_slope », et l'ajout des indicateurs Optique ne semble pas apporter de gains significatifs en termes de prédiction.

Enfin, on peut observer que le stade « thicket » (fourré) présente les erreurs les plus élevées en termes de prédiction. Cette représentation graphique permet effectivement de visualiser que les prédictions sont plus difficiles à réaliser pour ce stade de végétation.

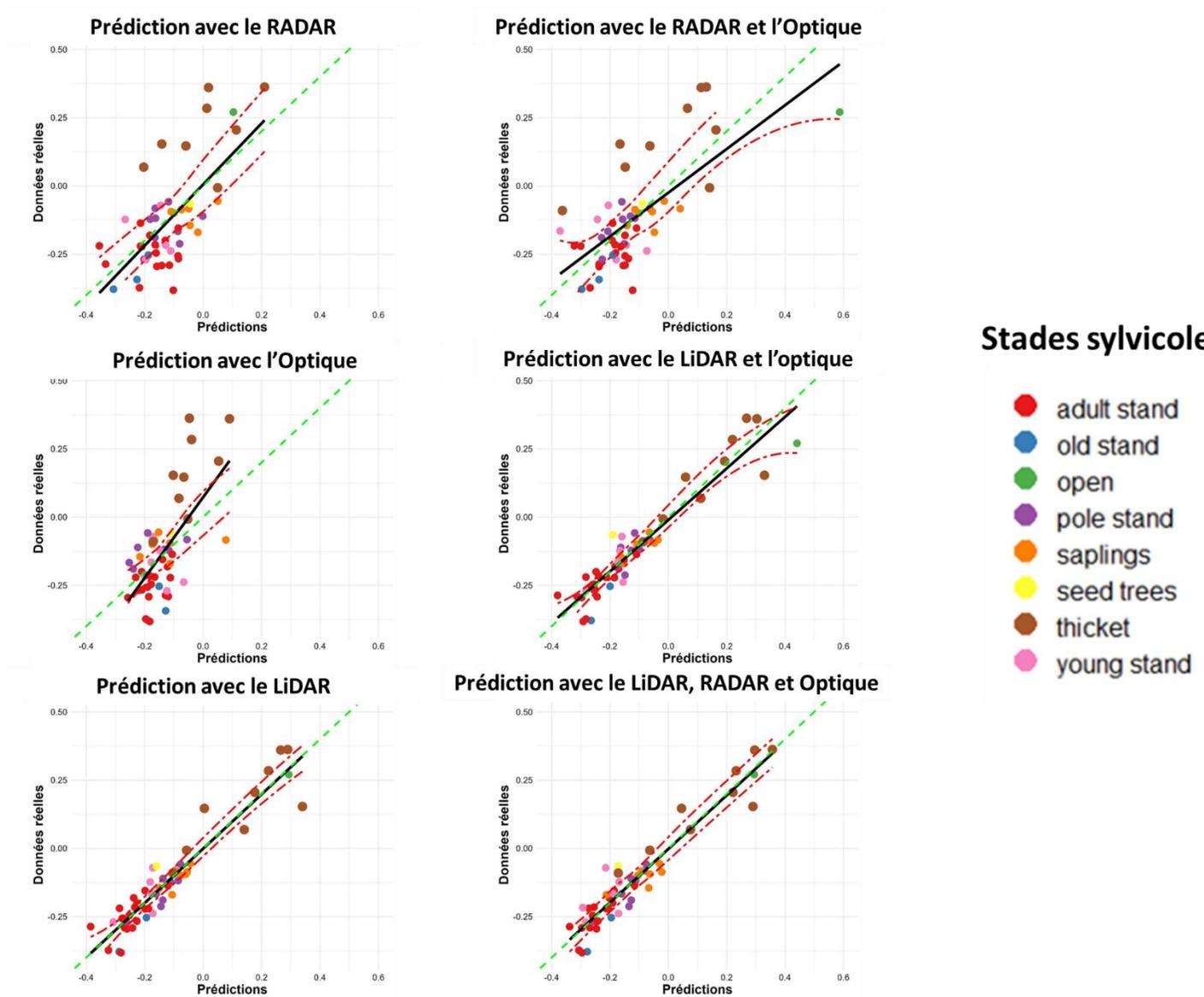


Figure 18 : Régressions linéaires entre les données réelles et les prédi

4. Cartes de prédiction du microclimat

Les cartes présentées dans la *Figure 19* démontrent que le LiDAR seul affiche des performances supérieures à celles du RADAR ou de l'Optique seuls pour la prédiction du paramètre « log_slope ». Les cartes générées par le LiDAR permettent d'identifier clairement des zones microclimatiques bien délimitées et facilement identifiables. Cependant, la combinaison des indicateurs Optique et RADAR présente également une certaine capacité à identifier des zones. Enfin, l'ajout des indicateurs LiDAR aux indicateurs RADAR et Optique améliore légèrement la qualité de la prédiction du « log_slope ».

On remarque que les capteurs sont plus performants pour prédire un « log_slope » positif que pour un « log_slope » négatif, ce qui met en évidence une différence significative dans leur efficacité. Cette observation montre que les caractéristiques microclimatiques plus marquées sont mieux détectées et captées par les capteurs. En conséquence, les zones présentant un « log_slope » important ressortent plus clairement.

Enfin, le RADAR avec l'imagerie optique permet de détecter plus ou moins efficacement des zones présentant un effet tampon prononcé. Comme le démontre la carte de prédiction « RADAR+Optique », on peut déterminer des zones où le « log_slope » est plus faible concordant avec la prédiction LiDAR. Cette approche combinée offre ainsi une occasion d'observer les variations du microclimat dans la forêt de Blois tout au long de l'année.

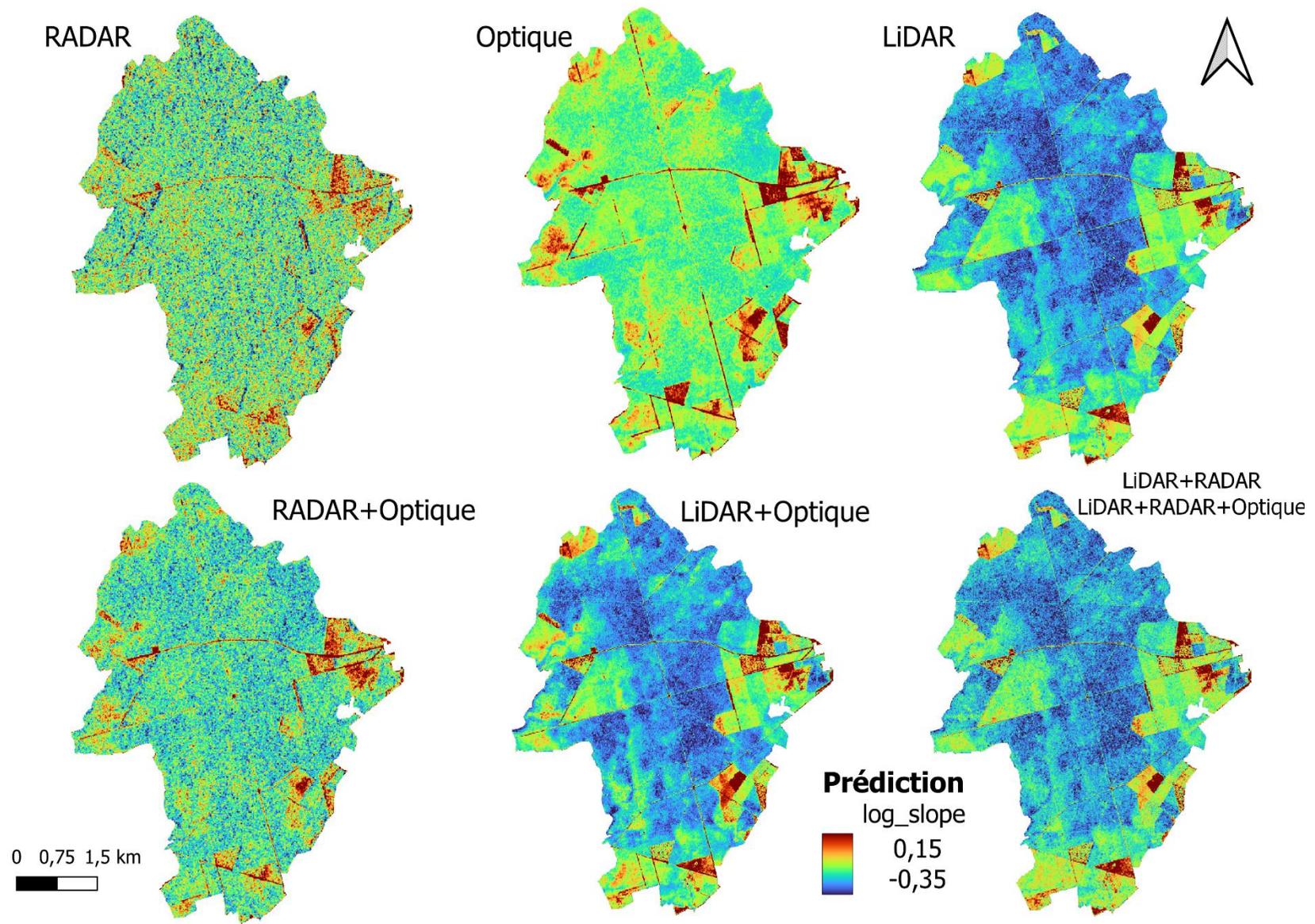


Figure 19 : Cartes de prédiction du microclimat selon les différents capteurs et leurs combinaisons pour la forêt de Blois en 2021

E. Discussion

1. Interprétation des résultats

1.1. Les variations saisonnières de polarisations VV et VH et leurs liens avec les structures de végétation

Dostálová et al. (2016) ont établi que la polarisation VV présente un coefficient de rétrodiffusion supérieur à celui de la polarisation VH. Des observations ont également démontré des variations saisonnières pour la polarisation VH, avec une diminution du coefficient de rétrodiffusion pendant l'été et une augmentation pendant l'hiver. Ces changements saisonniers sont attribués aux fluctuations dans la couverture végétale et à l'humidité. En été, la densité de végétation entraîne une réduction de la rétrodiffusion de la polarisation VH en raison de l'atténuation causée par les feuilles et les branches. En revanche, lorsque la végétation est moins dense en hiver, la rétrodiffusion de la polarisation VH augmente (Dostálová et al., 2018 ; Rüetschi et al., 2018).

Dans notre étude, la polarisation VV suit une dynamique similaire à celle de la polarisation VH, en contradiction avec les conclusions de Dostálová et al. (2018) qui indiquent que la polarisation VV reste stable toute l'année avec une légère augmentation au printemps pour une forêt de feuillus.

Dans le cas de la forêt domaniale de Blois, les variations de polarisation VV sont plus fluctuantes que celles de la polarisation VH. En été, on observe une augmentation nette de la polarisation VV pour les peuplements matures, suggérant une redistribution de l'eau du sol vers les colonnes d'eau stockées dans les arbres, notamment au pic de l'été lorsque le pompage biologique de l'eau par les feuillus est à son apogée. En résumé, la dynamique saisonnière est plus prononcée sur la polarisation VV que sur la polarisation VH, ce qui semble aller à l'encontre des observations de la littérature (Dostálová et al., 2018).

De plus, en hiver, l'eau est principalement présente dans les sols, tandis qu'en été, elle est essentiellement présente dans les arbres et leurs feuilles. Au printemps et à l'automne, l'eau est probablement mieux répartie entre ces deux compartiments, le sol et la canopée forestière. On peut envisager que la polarisation VV dans une forêt dense permette de détecter la respiration du cycle de l'eau, reflétant ainsi ces changements saisonniers et l'humidité (Soudani et al., 2021).

L'étude des dynamiques temporelles des polarisations VV et VH selon les structures de végétation suggère que les coefficients de rétrodiffusion varient en fonction de ces structures, avec des valeurs généralement plus élevées dans les peuplements dense sans sous-étage et les milieux fermés par rapport aux milieux ouverts (Numbisi et al., 2019).

1.2. Variations des coefficients de rétrodiffusion selon les stades sylvicoles et les indicateurs RADAR

L'analyse des divers stades sylvicoles révèle des variations significatives dans les coefficients de rétrodiffusion pour les indicateurs RADAR.

Les stades « open » et « seed trees » sont généralement associés aux coefficients de rétrodiffusion les plus bas parmi tous les indicateurs. Cependant, il existe des exceptions pour les indicateurs « med_RVI » et « med_summer_RVI », où les coefficients de rétrodiffusion sont plus élevés. Ces résultats suggèrent que, malgré leur caractère ouvert, ces stades peuvent présenter des propriétés de rétrodiffusion différentes pour les indicateurs utilisant le RVI. L'hypothèse est que deux mécanismes distincts peuvent conduire à des valeurs de coefficients de rétrodiffusion élevées, soit par la capacité du signal RADAR à rendre compte de la densité de la végétation (« old stand » et « adult stand »), soit par l'augmentation de la pénétration du signal dans une végétation plus clairsemée (« open » et « seed trees »). En contexte plus ouvert en été, les valeurs des coefficients peuvent donc être plus élevées, à la fois pour des stades qui correspondent au début de la succession forestière (« med_summer_RVI » pour le stade « open », par exemple), mais aussi pour des stades plus tardifs où la végétation est plus dense (« med_summer_RVI » pour le stade « saplings », par exemple). Ce mécanisme s'atténue en hiver, lorsque l'absence de couvert permet également une meilleure pénétration du signal dans la végétation plus dense des derniers stades de la succession. Dans ce cas, la hiérarchie des valeurs de coefficients est cohérente avec la volumétrie de la végétation qui augmente avec la succession des stades forestiers (depuis les stades « open » à « old stand » pour « med_winter_RVI », par exemple).

Le stade « seed trees » présente un pic estival marqué de la polarisation VV, qui atteint des valeurs significativement élevées, mais qui redescend considérablement pendant l'automne et le printemps. On peut considérer que cette variation pourrait être liée à la circulation de l'eau au sein de l'écosystème. Elle pourrait être due à une pompe efficace dans le cas des « seed trees » de plus grande taille, ainsi qu'à une meilleure capacité de pénétration du signal en raison

de l'espace environnant ouvert autour. Cette combinaison de facteurs conduit à un pic significatif de la polarisation VV.

Les stades « thicket » et « saplings » se distinguent en affichant les coefficients de rétrodiffusion les plus élevés parmi la plupart des indicateurs RADAR. Ces deux stades sylvicoles sont caractérisés par une densité végétale plus élevée en raison de leur jeunesse et de leurs faibles hauteurs d'arbres, ce qui se traduit par un enracinement en surface avec un pompage biologique de l'eau principalement au niveau superficiel. Cette particularité pourrait expliquer leurs coefficients de rétrodiffusion élevés pour les différents indicateurs.

Par ailleurs, le stade « old_stand » se distingue également en présentant des coefficients de rétrodiffusion plus élevés que les deux stades sylvicoles précédents pour les indicateurs basés principalement sur la polarisation VH. En tant que stade correspondant à une forêt mature, il affiche des caractéristiques spécifiques qui influencent ses propriétés de rétrodiffusion. La densité végétale accrue dans ce stade se traduit par une polarisation VH plus élevée, phénomène qui est particulièrement visible pendant la saison hivernale.

Quant aux stades « pole stand », « young stand » et « adult stand », ils présentent une relative équivalence en termes de différents indicateurs. Toutefois, on remarque que le stade « young stand » présente une plus grande variabilité, suggérant ainsi des fluctuations dans les propriétés de rétrodiffusion à mesure que la forêt se développe et évolue. Ces variations peuvent être liées aux changements dans la densité de végétation et la structure du couvert forestier au fil du temps.

Ces constatations multiples laissent voir une variation significative des coefficients de rétrodiffusions, découlant de diverses causes, en fonction des stades de végétation.

En ce qui concerne l'indice RVI, une tendance émerge avec des valeurs presque systématiquement plus élevées en été dans des environnements plus ouverts, tandis que des résultats plus conformes aux attentes sont observés en hiver, où cette tendance s'inverse. En ce qui concerne la polarisation VH, les différences entre les stades sylvicoles sont moins marquées durant la saison estivale, mais elles se distinguent nettement en hiver. Tout comme pour l'indice RVI, les stades les moins avancés (« open » et « saplings ») dans la succession peuvent être caractérisés par des valeurs de coefficients VH quasiment aussi élevées que le stade « old stand », alors que ce sont les stades intermédiaires (« pole stand », « young stand » et « adult

stand ») qui ont des coefficients moins élevés. Cette tendance disparaît en hiver, probablement parce que la différence de pénétration du signal entre les stades ouverts les moins avancés et les stades fermés les plus avancées s'atténue.

Selon les métriques utilisées, on constate donc parfois un compromis entre la capacité à représenter la densité de la végétation dans une forêt dense et mature, caractérisée par une volumétrie élevée mais une pénétration limitée, et la densité de la végétation lorsque de grands arbres se trouvent isolés dans un environnement ouvert, caractérisée par une volumétrie significative à un niveau local en raison de la faible végétation environnante, ce qui favorise la pénétration du signal. Dans le cas du stade « seed trees », la variabilité des coefficients pourrait également être en partie attribuée à la résolution du pixel, où un seul arbre de diamètre important peut occuper une partie importante d'un pixel de 10 mètres tout en permettant une bonne pénétration du signal en limite de l'arbre étant donné le contexte ouvert. Cela pourrait expliquer la valeur très élevée de « med_summer_RVI » pour ce stade.

En observant les différents stades sylvicoles, on peut établir des liens avec les structures de végétation (Bae et al., 2019). Cela souligne l'importance des différentes structures de végétation et des stades sylvicoles dans la compréhension des coefficients de rétrodiffusion des polarisations VV et VH, ainsi que des divers indicateurs RADAR. Le modèle optimal, intégrant à la fois les métriques RVI et VH en hiver et en été, met en lumière leur capacité à saisir des informations distinctes mais tout aussi cruciales pour caractériser ces divers stades de végétation. En conséquence, il est justifié de considérer que les modèles de classification des stades de végétation offrent des perspectives prometteuses, en prenant en compte l'ensemble de ces résultats.

1.3. Prédiction du microclimat par l'intégration de données multi-capteurs

Les résultats mettent en évidence que le LiDAR est le capteur le plus performant pour prédire le microclimat, qui est en contradiction avec Bae et al. (2019) qui tendent à mettre le RADAR et le LiDAR sur un pied d'égalité. En revanche, les indicateurs optiques affichent les performances les moins convaincantes. Quant aux indicateurs RADAR, ils se situent entre l'optique et le LiDAR, légèrement supérieurs à l'optique en termes de performance.

Il est possible d'envisager une amélioration des cartes RADAR en remettant en question l'efficacité du filtrage temporel du bruit, étant donné le caractère relativement peu convaincant

des cartes RADAR actuelles en raison de leur aspect bruité. Dans cette optique, l'ajout d'un filtrage spatial pourrait s'avérer bénéfique.

En combinant les indicateurs optiques et RADAR, on constate une nette amélioration des prédictions, ce qui est en accord avec Billey (2018) et Mercier et al. (2019). De plus, l'approche intégrée incluant différents types de capteurs tels que le LiDAR, le RADAR et les capteurs optiques, a légèrement accru la précision des prédictions, comme l'attestent Bruggisser et al. (2021).

Ces résultats soulignent l'importance cruciale d'adopter une approche faisant usage de données issues de plusieurs capteurs pour améliorer la précision des modèles de prédiction (Bruggisser et al., 2021).

2. L'intérêt des données multi-capteurs pour cartographier le microclimat forestier

L'objectif était d'évaluer le potentiel des données RADAR Sentinel-1, des données LiDAR et des données optiques Sentinel-2 pour caractériser la structure forestière et réaliser une cartographie détaillée du microclimat forestier.

La combinaison de ces différentes sources de données est prometteuse pour la caractérisation des microclimats. L'utilisation des données RADAR Sentinel-1, avec leur capacité à pénétrer les nuages, a permis d'obtenir des informations spatiales quasi-continues et fiables sur la forêt de Blois pour l'année 2021. Cette approche facilite le suivi de l'évolution de la forêt dans le temps, ce qui constitue un avantage par rapport au LiDAR, qui n'a fourni qu'une seule acquisition pour la forêt de Blois. Pour l'optique, les données sont disponibles toute l'année avec Sentinel-2 et ce sont les acquisitions NDVI pendant la période estivale qui ont été utilisées pour plus de cohérence par rapport aux données de températures acquises également en période estivale (leaf-on).

Les données optiques, RADAR et LiDAR ont des résolutions spatiales et temporelles différentes, ce qui permet de réaliser une cartographie approfondie des microclimats, couvrant une vaste étendue et permettant d'observer les changements climatiques sur des périodes courtes ou longues.

La fusion de données optiques, RADAR et LiDAR ouvre de nouvelles perspectives pour cartographier le microclimat forestier et caractériser les conditions environnementales dans les

zones boisées à une échelle fine. En combinant ces diverses sources de données, on obtient des informations plus détaillées et précises sur les microclimats au sein des forêts.

Cependant, il convient de noter que la littérature concernant l'utilisation du RADAR pour cartographier le microclimat forestier est encore limitée. Malgré sa capacité à détecter certaines caractéristiques du microclimat, telles que l'humidité de la canopée dû au cycle de l'eau, peu d'études spécifiques ont été menées jusqu'à présent.

En somme, la cartographie du microclimat forestier par la fusion de données optiques, RADAR et LiDAR offre de nombreux avantages pour mieux comprendre, gérer et conserver les écosystèmes forestiers. Cette approche fournit des informations détaillées et importantes sur les conditions environnementales, jouant un rôle essentiel dans la gestion durable des ressources naturelles et l'adaptation aux changements climatiques. Grâce à la disponibilité des données RADAR et optiques, cette méthode peut également être appliquée à d'autres forêts telles que celles de Mormal ou de l'Aigoual, où des relevés LiDAR ont déjà été effectués. À l'avenir, cette méthode pourrait être appliquée à d'autres forêts pour lesquelles aucune acquisition LiDAR n'a été réalisée.

F. Conclusion

Le projet visait à cartographier le microclimat forestier sur une forêt feuillue en combinant des données de capteurs optiques, RADAR et LiDAR. Les rasters RADAR de différentes dates ont été superposés pour créer une série temporelle de 2021, et les valeurs des pixels ont été extraites pour chaque placette. Des indicateurs issus de capteurs, sélectionnés pour leurs pertinences, ont été utilisés pour évaluer la structure de la végétation, permettant de comparer les stades sylvicoles des placettes. Une régression linéaire a été utilisée pour prédire le microclimat en utilisant ces indicateurs, montrant que les indicateurs LiDAR étaient les plus performants, suivis des données RADAR. En ajoutant les données RADAR et optiques aux données LiDAR, la précision des prédictions a légèrement augmentée. Les cartes de prédiction ont démontré que le LiDAR seul avait de bonnes performances, mais la combinaison de données RADAR et optiques a également permis de détecter les zones avec des effets tampons.

Cette fusion de données optiques, RADAR et LiDAR présente une approche intéressante pour cartographier les microclimats forestiers et caractériser les conditions environnementales dans les zones boisées sur le long terme. Cette approche combinée permet d'observer les variations du microclimat dans la forêt tout au long de l'année, fournissant ainsi des informations précieuses pour mieux comprendre et gérer les écosystèmes forestiers.

Ces avancées pourraient être améliorées par l'utilisation de modèles d'apprentissage automatique, l'adoption de technologies de télédétection plus avancées, comme l'imagerie hyperspectrale, et l'intégration de données environnementales supplémentaires. Cette approche combinée offre la possibilité de surveiller les variations du microclimat et pourrait être étendue à d'autres écosystèmes, contribuant ainsi à une gestion durable des ressources naturelles et à la compréhension des impacts du changement climatique.

Bibliographie

- Albinet, C. « Sensibilité des observables radars à la variabilité temporelle et à la configuration géométrique de forêts tempérées et tropicales à partir de mesure de proximité haute-résolution. Extension à la simulation dans la perspective de fusion de données radar-o », 2013.
- Bae, Soyeon, Shaun R. Levick, Lea Heidrich, Paul Magdon, Benjamin F. Leutner, Stephan Wöllauer, Alla Serebryanyk, et al. « Radar Vision in the Mapping of Forest Biodiversity from Space ». *Nature Communications* 10, n° 1 (18 octobre 2019): 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12737-x>.
- Ballere, Marie. « Apport des données Sentinel-1 pour le suivi continu de la forêt tropicale : cas de la Guyane », 2021.
- Betbeder, Julie. « Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques ». These de doctorat, Rennes 2, 2015. <https://www.theses.fr/2015REN20006>.
- Billey, Antoine. « Synergie des données Sentinel optiques et radar pour l'observation et l'analyse de la végétation du littoral du Pays de Brest ». Other, LETG, UMR6554, Institut Universitaire Européen de la Mer, Technopôle Brest-Iroise, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané, 2018. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02092722>.
- Bongers, Frans. « Methods to Assess Tropical Rain Forest Canopy Structure: An Overview ». In *Tropical Forest Canopies: Ecology and Management: Proceedings of ESF Conference, Oxford University, 12–16 December 1998*, édité par K. Eduard Linsenmair, A. J. Davis, B. Fiala, et M. R. Speight, 263-77. Forestry Sciences. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3606-0_21.
- Bousbih, Safa, Mehrez Zribi, Zohra Lili-Chabaane, Nicolas Baghdadi, Mohammad El Hajj, Qi Gao, et Bernard Mougenot. « Potential of Sentinel-1 Radar Data for the Assessment of Soil and Cereal Cover Parameters ». *Sensors* 17, n° 11 (novembre 2017): 2617. <https://doi.org/10.3390/s17112617>.
- Bramer, Isobel, Barbara J. Anderson, Jonathan Bennie, Andrew J. Bladon, Pieter De Frenne, Deborah Hemming, Ross A. Hill, et al. « Chapter Three - Advances in Monitoring and Modelling Climate at Ecologically Relevant Scales ». In *Advances in Ecological Research*, édité par David A. Bohan, Alex J. Dumbrell, Guy Woodward, et Michelle Jackson, 58:101-61. Next Generation Biomonitoring: Part 1. Academic Press, 2018. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2017.12.005>.
- Bruggisser, Moritz, Wouter Dorigo, Alena Dostálová, Markus Hollaus, Claudio Navacchi, Stefan Schlaffer, et Norbert Pfeifer. « Potential of Sentinel-1 C-Band Time Series to Derive Structural Parameters of Temperate Deciduous Forests ». *Remote Sensing* 13, n° 4 (janvier 2021): 798. <https://doi.org/10.3390/rs13040798>.
- Dostálová, Alena, Milutin Milenković, M. Hollaus, et Wolfgang Wagner. « Influence of Forest Structure on the Sentinel-1 Backscatter Variation- Analysis with Full-Waveform LiDAR Data », 2016.
- Dostálová, Alena, Wolfgang Wagner, Milutin Milenković, et Markus Hollaus. « Annual seasonality in Sentinel-1 signal for forest mapping and forest type classification ». *International Journal of Remote Sensing* 39, n° 21 (2 novembre 2018): 7738-60. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1479788>.
- Dous, Romain. « Evaluation de l'apport des données Sentinel-1 dans la détection d'interventions sylvicoles », s. d.
- Ewijk, Karin van, Paul Treitz, et Neal Scott. « Characterizing Forest Succession in Central Ontario using LiDAR derived Indices. » *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 77 (1 mars 2011): 261-70. <https://doi.org/10.14358/PERS.77.3.261>.

- Flamant, Pierre H. « Comprendre la science du lidar ». *Photoniques*, n° 97 (juillet 2019): 40-44. <https://doi.org/10.1051/photon/20199740>.
- Gril, Eva, Fabien Spicher, Caroline Greiser, Michael B. Ashcroft, Sylvain Pincebourde, Sylvie Durrieu, Manuel Nicolas, et al. « Slope and Equilibrium: A Parsimonious and Flexible Approach to Model Microclimate ». *Methods in Ecology and Evolution* 14, n° 3 (2023): 885-97. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14048>.
- Han, Dong, Pengxin Wang, Kevin Tansey, Xijia Zhou, Shuyu Zhang, Hui ren Tian, Jingqi Zhang, et Hongmei Li. « Linking an Agro-Meteorological Model and a Water Cloud Model for Estimating Soil Water Content over Wheat Fields ». *Computers and Electronics in Agriculture* 179 (1 décembre 2020): 105833. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105833>.
- Huang, Xiaodong, Beth Ziniti, Nathan Torbick, et Mark J. Ducey. « Assessment of Forest above Ground Biomass Estimation Using Multi-Temporal C-Band Sentinel-1 and Polarimetric L-Band PALSAR-2 Data ». *Remote Sensing* 10, n° 9 (septembre 2018): 1424. <https://doi.org/10.3390/rs10091424>.
- Jucker, Tommaso, Stephen R. Hardwick, Sabine Both, Dafydd M.O. Elias, Robert M. Ewers, David T. Milodowski, Tom Swinfield, et David A. Coomes. « Canopy Structure and Topography Jointly Constrain the Microclimate of Human-Modified Tropical Landscapes ». *Global Change Biology* 24, n° 11 (2018): 5243-58. <https://doi.org/10.1111/gcb.14415>.
- Kaasalainen, Sanna, Markus Holopainen, Mika Karjalainen, Mikko Vastaranta, Ville Kankare, Kirsi Karila, et Batuhan Osmanoglu. « Combining Lidar and Synthetic Aperture Radar Data to Estimate Forest Biomass: Status and Prospects ». *Forests* 6, n° 1 (janvier 2015): 252-70. <https://doi.org/10.3390/f6010252>.
- Kornelsen, Kurt C., et Paulin Coulibaly. « Advances in Soil Moisture Retrieval from Synthetic Aperture Radar and Hydrological Applications ». *Journal of Hydrology* 476 (7 janvier 2013): 460-89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.044>.
- Kuplich, T. M., P. J. Curran, et P. M. Atkinson. « Relating SAR image texture to the biomass of regenerating tropical forests ». *International Journal of Remote Sensing* 26, n° 21 (10 novembre 2005): 4829-54. <https://doi.org/10.1080/01431160500239107>.
- Lenoir, Jonathan, Eva Gril, Sylvie Durrieu, Hélène Horen, Marianne Laslier, Jonas J. Lembrechts, Florian Zellweger, et al. « Unveil the Unseen: Using LiDAR to Capture Time-Lag Dynamics in the Herbaceous Layer of European Temperate Forests ». *Journal of Ecology* 110, n° 2 (2022): 282-300. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13837>.
- Lenoir, Jonathan, Tarek Hattab, et Guillaume Pierre. « Climatic Microrefugia under Anthropogenic Climate Change: Implications for Species Redistribution ». *Ecography* 40, n° 2 (2017): 253-66. <https://doi.org/10.1111/ecog.02788>.
- Liao, Zhanmang, Binbin He, et Xingwen Quan. « Potential of Texture from SAR Tomographic Images for Forest Aboveground Biomass Estimation ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 88 (1 juin 2020): 102049. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102049>.
- Loussert, Perrine. « Use of remote sensing for irrigated viticulture characterization in the climate change context : application over the vineyards of Mendoza, Argentina ». Phdthesis, Université Rennes 2, 2017. <https://theses.hal.science/tel-01968041>.
- Mercier, Audrey, Julie Betbeder, Florent Rumiano, Jacques Baudry, Valéry Gond, Lilian Blanc, Clément Bourgoïn, et al. « Evaluation of Sentinel-1 and 2 Time Series for Land Cover Classification of Forest–Agriculture Mosaics in Temperate and Tropical Landscapes ». *Remote Sensing* 11, n° 8 (janvier 2019): 979. <https://doi.org/10.3390/rs11080979>.
- Mercier, Audrey, Laurence Hubert-Moy, et Jacques Baudry. « Sentinel-2 Images Reveal Functional Biophysical Heterogeneities in Crop Mosaics ». *Landscape Ecology* 36, n° 12 (1 décembre 2021): 3607-28. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01331-6>.

- Miltiadou, Milto, Vassilia Karathanassi, Athos Agapiou, Christos Theocharidis, Polychronis Kolokousis, et Chris Danezis. « A Selection of Experiments for Understanding the Strengths of Time Series SAR Data Analysis for Finding the Drivers Causing Phenological Changes in Paphos Forest, Cyprus ». *Remote Sensing* 14, n° 15 (janvier 2022): 3581. <https://doi.org/10.3390/rs14153581>.
- Morin, David. « Estimation and monitoring of wood resources in France by using high resolution time series of optical and radar images ». Phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2020. <https://theses.hal.science/tel-03098487>.
- Numbisi, Frederick N., Frieke M. B. Van Coillie, et Robert De Wulf. « Delineation of Cocoa Agroforests Using Multiseason Sentinel-1 SAR Images: A Low Grey Level Range Reduces Uncertainties in GLCM Texture-Based Mapping ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8, n° 4 (avril 2019): 179. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040179>.
- Pardini, Matteo, John Armston, Wenlu Qi, Seung Kuk Lee, Marivi Tello, Victor Cazcarra Bes, Changhyun Choi, Konstantinos P. Papathanassiou, Ralph O. Dubayah, et Lola E. Fatoyinbo. « Early Lessons on Combining Lidar and Multi-Baseline SAR Measurements for Forest Structure Characterization ». *Surveys in Geophysics* 40, n° 4 (1 juillet 2019): 803-37. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09553-9>.
- Rita, Angelo, Giuliano Bonanomi, Emilia Allevato, Marco Borghetti, Gaspare Cesarano, Valentina Mogavero, Sergio Rossi, Luigi Saulino, Maurizio Zotti, et Antonio Saracino. « Topography Modulates Near-Ground Microclimate in the Mediterranean Fagus Sylvatica Treeline ». *Scientific Reports* 11, n° 1 (14 avril 2021): 8122. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87661-6>.
- Rudant, Jean-Paul, et Pierre-Louis Frison. « Télédétection radar : de l'image d'intensité initiale au choix du mode de calibration des coefficients de diffusion beta 0, sigma 0, gamma 0 ». *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 219-220 (10 décembre 2019): 19-28. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2019.454>.
- Rüetschi, Marius, Michael E. Schaepman, et David Small. « Using Multitemporal Sentinel-1 C-Band Backscatter to Monitor Phenology and Classify Deciduous and Coniferous Forests in Northern Switzerland ». *Remote Sensing* 10, n° 1 (janvier 2018): 55. <https://doi.org/10.3390/rs10010055>.
- Sharma, R., D. Leckie, David Hill, Bill Crooks, A.S. Bhogal, P. Arbour, et S. D'eon. *Hyper-temporal Radarsat SAR data of a forested terrain. Proceedings of the Third International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images 2005*. Vol. 2005, 2005. <https://doi.org/10.1109/AMTRSI.2005.1469843>.
- Soudani, Kamel, Nicolas Delpierre, Daniel Berveiller, Gabriel Hmimina, Gaëlle Vincent, Alexandre Morfin, et Éric Dufrêne. « Potential of Synthetic Aperture Radar Sentinel-1 Time Series for the Monitoring of Phenological Cycles in a Deciduous Forest ». bioRxiv, 6 février 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.02.04.429811>.
- Yu, Xiaowei, Juha Hyypä, Mika Karjalainen, Kimmo Nurminen, Kirsi Karila, Mikko Vastaranta, Ville Kankare, et al. « Comparison of Laser and Stereo Optical, SAR and InSAR Point Clouds from Air- and Space-Borne Sources in the Retrieval of Forest Inventory Attributes ». *Remote Sensing* 7, n° 12 (décembre 2015): 15933-54. <https://doi.org/10.3390/rs71215809>.
- Zayani, H., M. Zribi, N. Baghdadi, E. Ayari, Z. Kassouk, Z. Lili-Chabaane, D. Michot, C. Walter, et Y. Fouad. « Potential of C-Band Sentinel-1 Data for Estimating Soil Moisture and Surface Roughness in a Watershed in Western France », 6104. IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883957>.
- Zellweger, Florian, Pieter De Frenne, Jonathan Lenoir, Duccio Rocchini, et David Coomes. « Advances in Microclimate Ecology Arising from Remote Sensing ». *Trends in Ecology & Evolution* 34, n° 4 (1 avril 2019): 327-41. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.12.012>.

Annexes

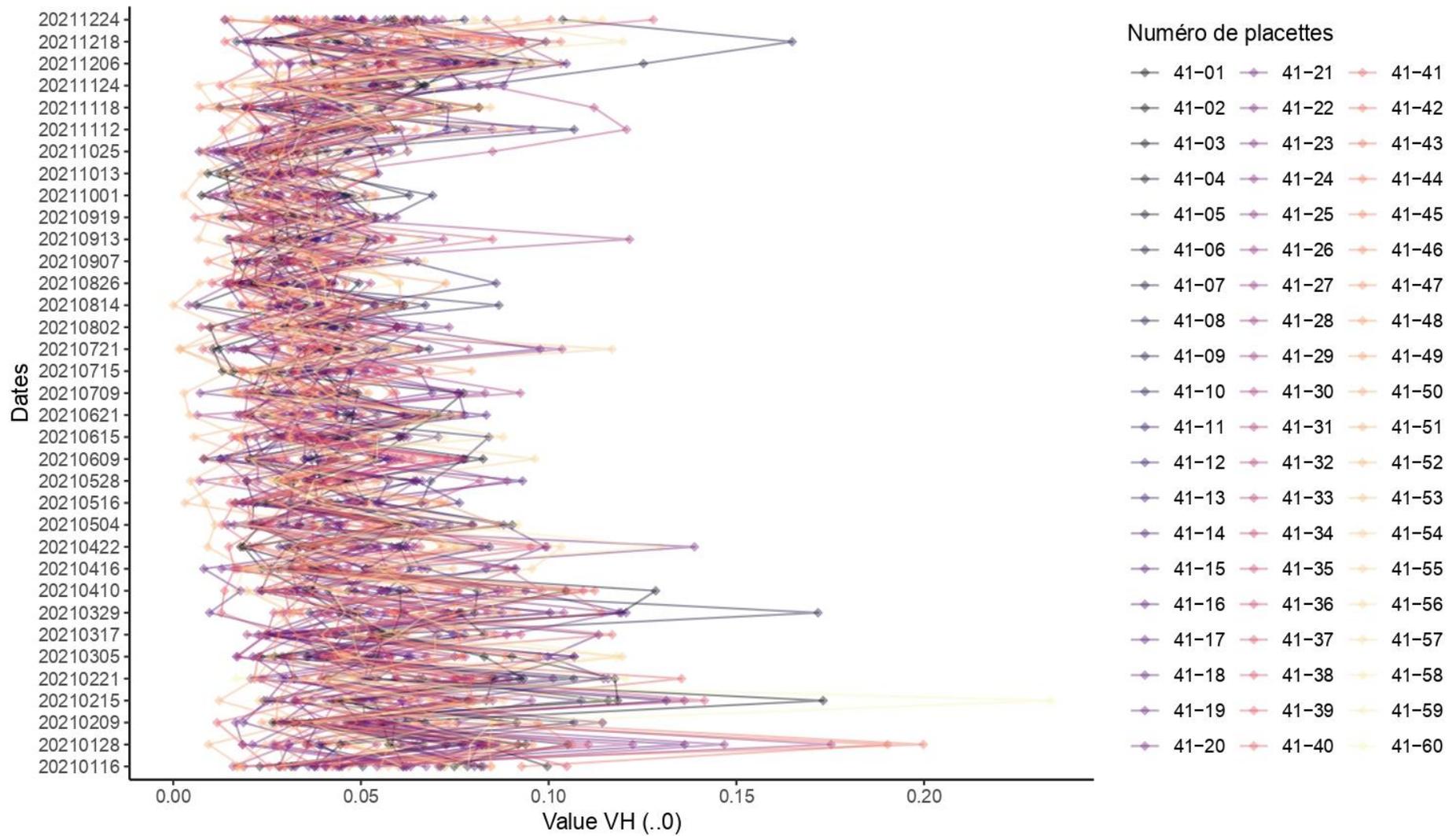
Dans le cadre de cette recherche, une série de codes R personnalisés afin d'analyser les données et de répondre aux questions de l'étude ont été développés. Ces codes sont essentiels pour comprendre et reproduire les résultats, ainsi que pour faciliter toute recherche future dans le même domaine. Pour garantir la transparence et la reproductibilité du travail, l'ensemble des codes R sont mis à disposition sur la plateforme Figshare. On peut accéder à ces ressources en suivant ce lien : <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24066009>.

Vous trouverez toutes les illustrations, graphiques et schémas produit, contribuant à l'ensemble du travail, en suivant ce lien Dropbox afin d'avoir l'intégralité des annexes : <https://www.dropbox.com/scl/fo/jeya1rptf74sm4ufgjsx6u/h?rlkey=oblaxris3umk8x47ujz8j1wm5&dl=0>.

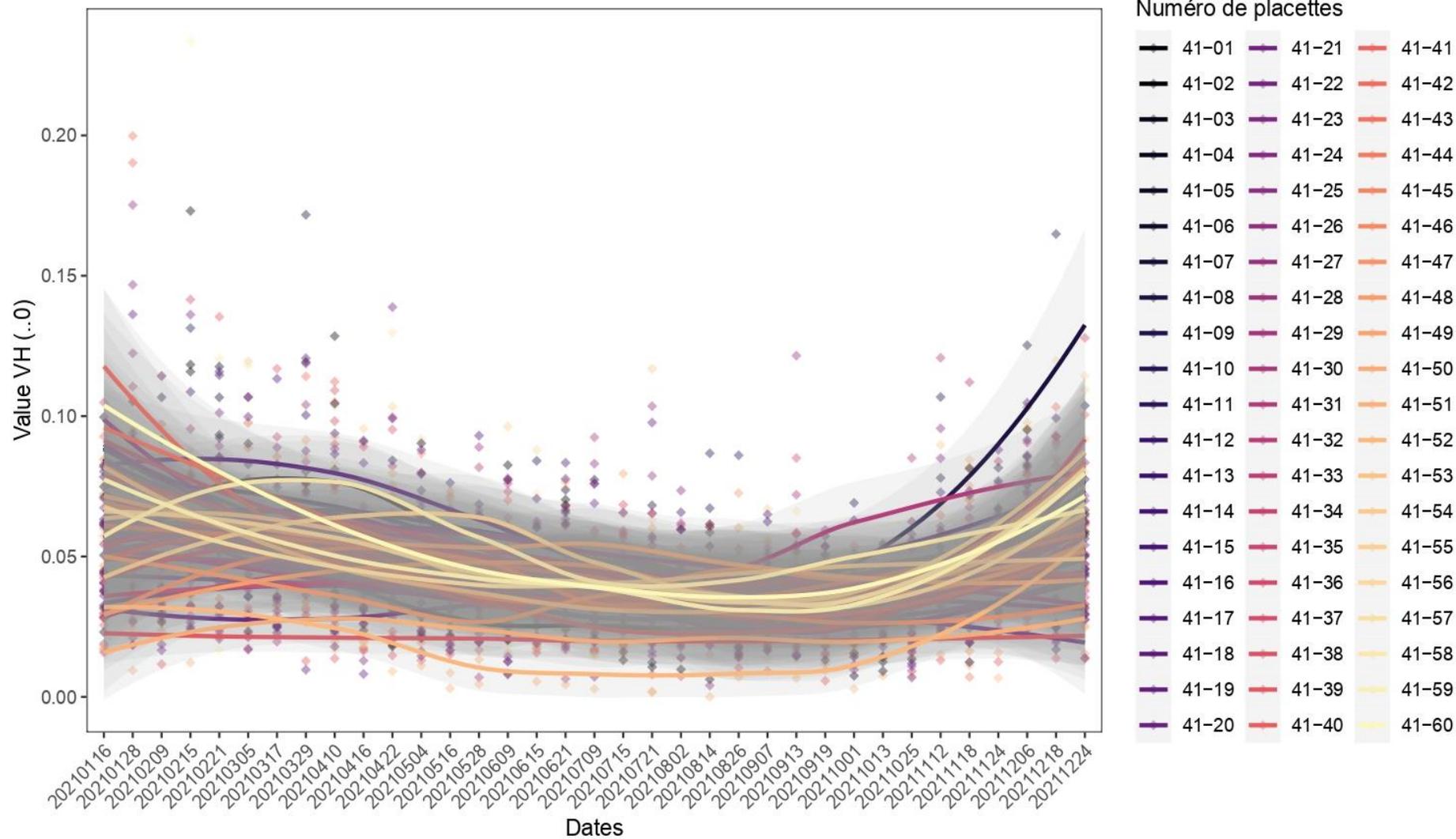
1. Séries temporelles

1.1. Variations des polarisations RADAR au cours de l'année 2021 sur les placettes de la forêt de Blois

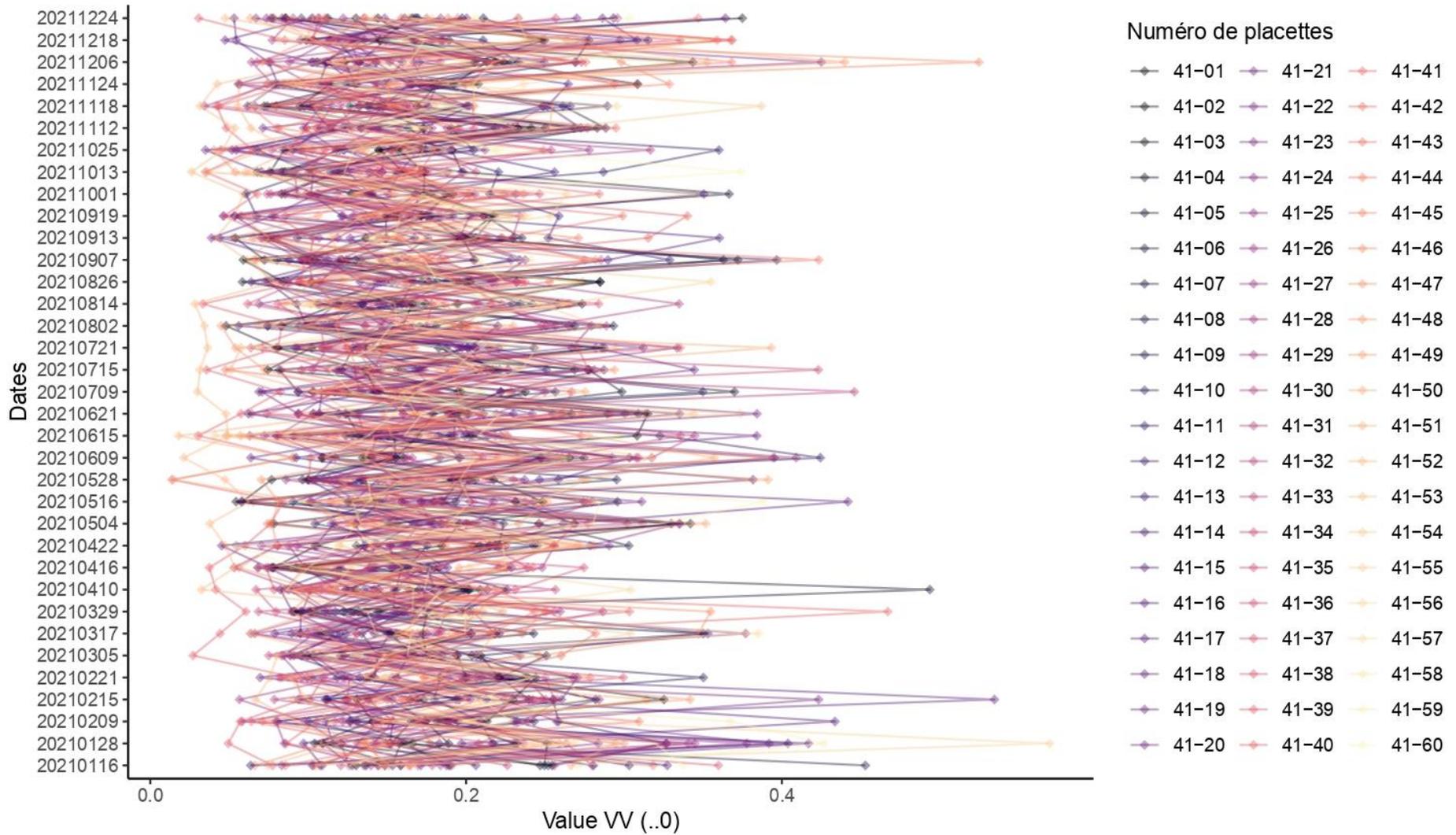
Profile VH des placettes de la forêt de Blois en 2021



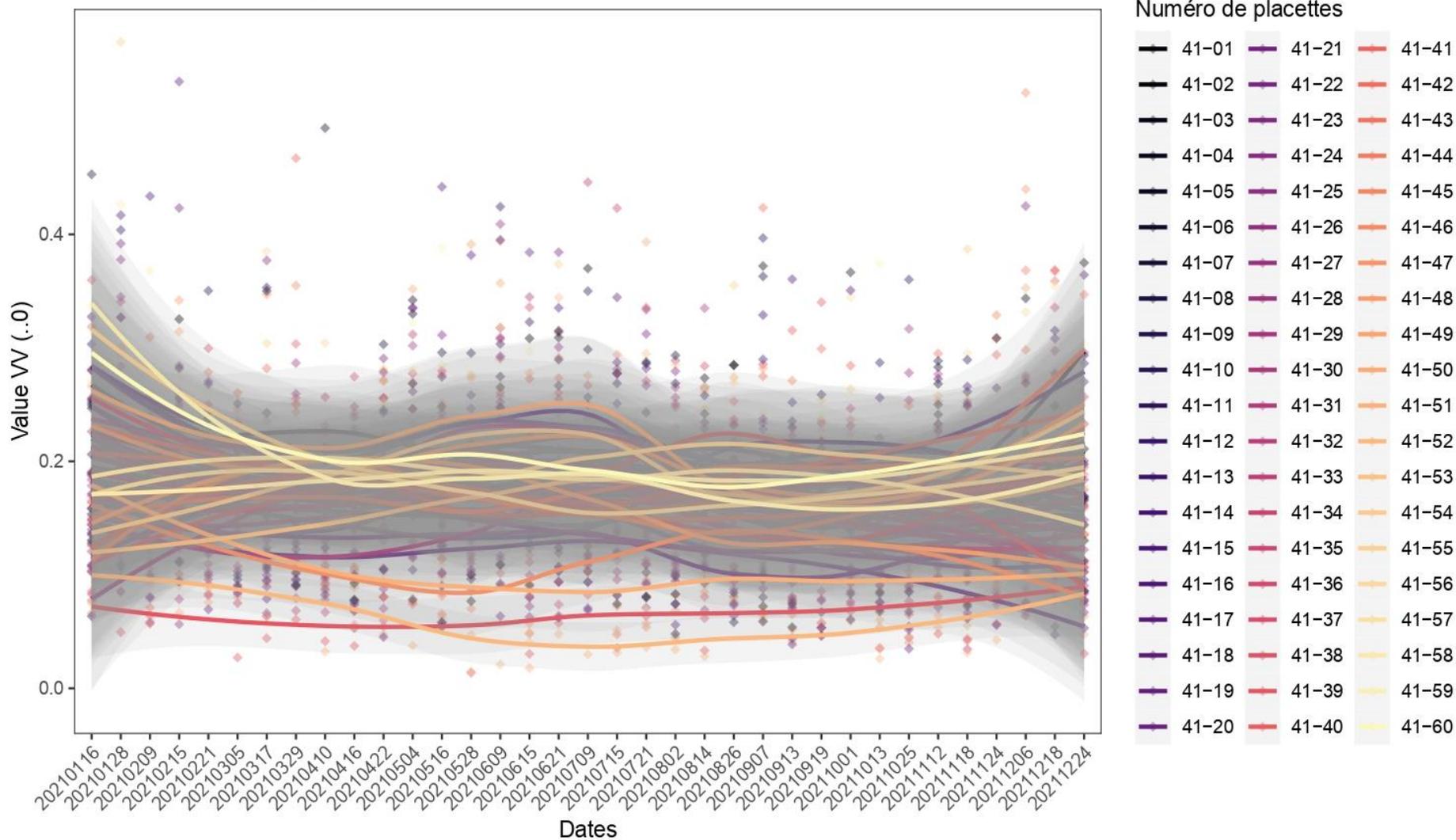
Profilé VH lissé des placettes de la forêt de Blois en 2021



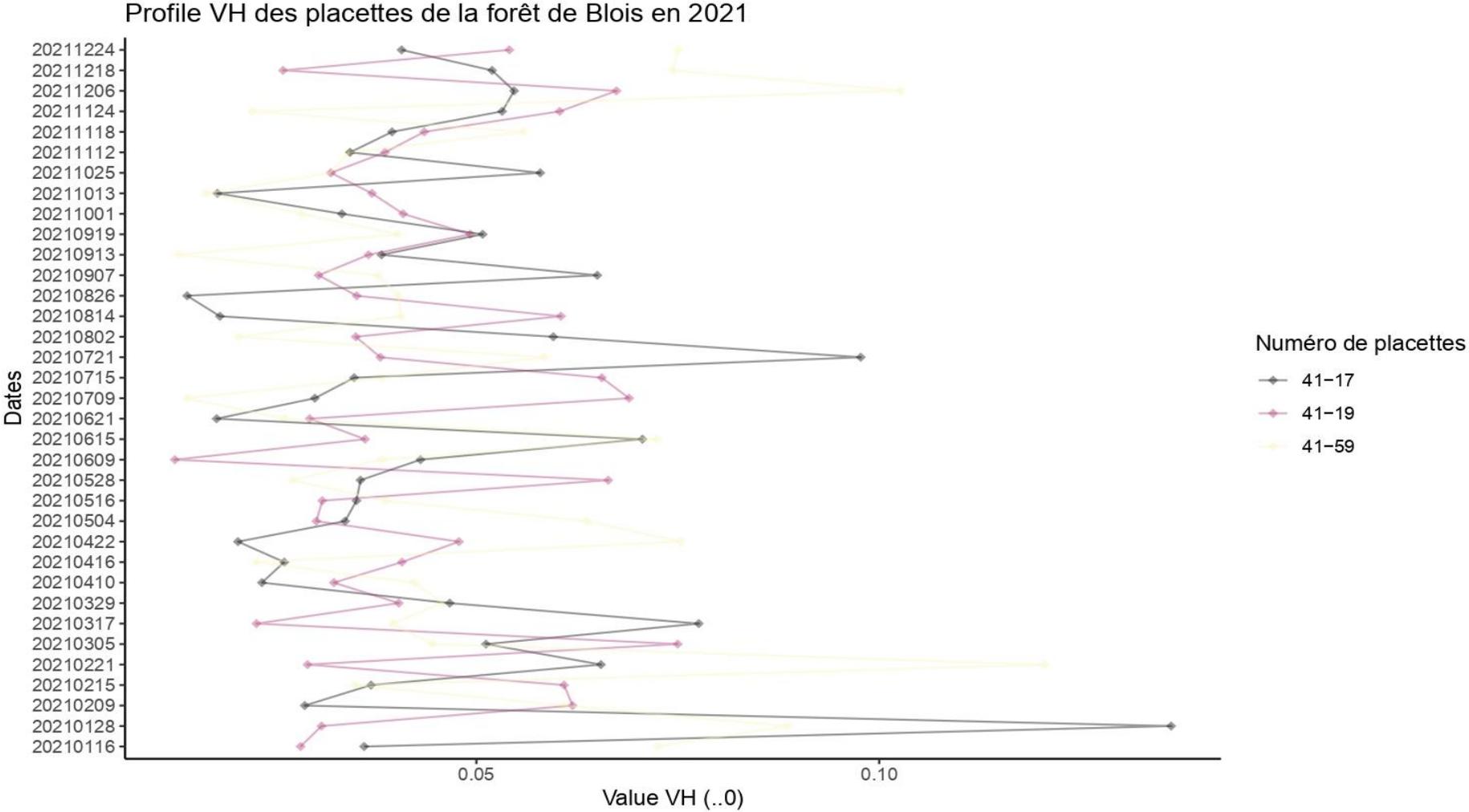
Profile VV des placettes de la forêt de Blois en 2021



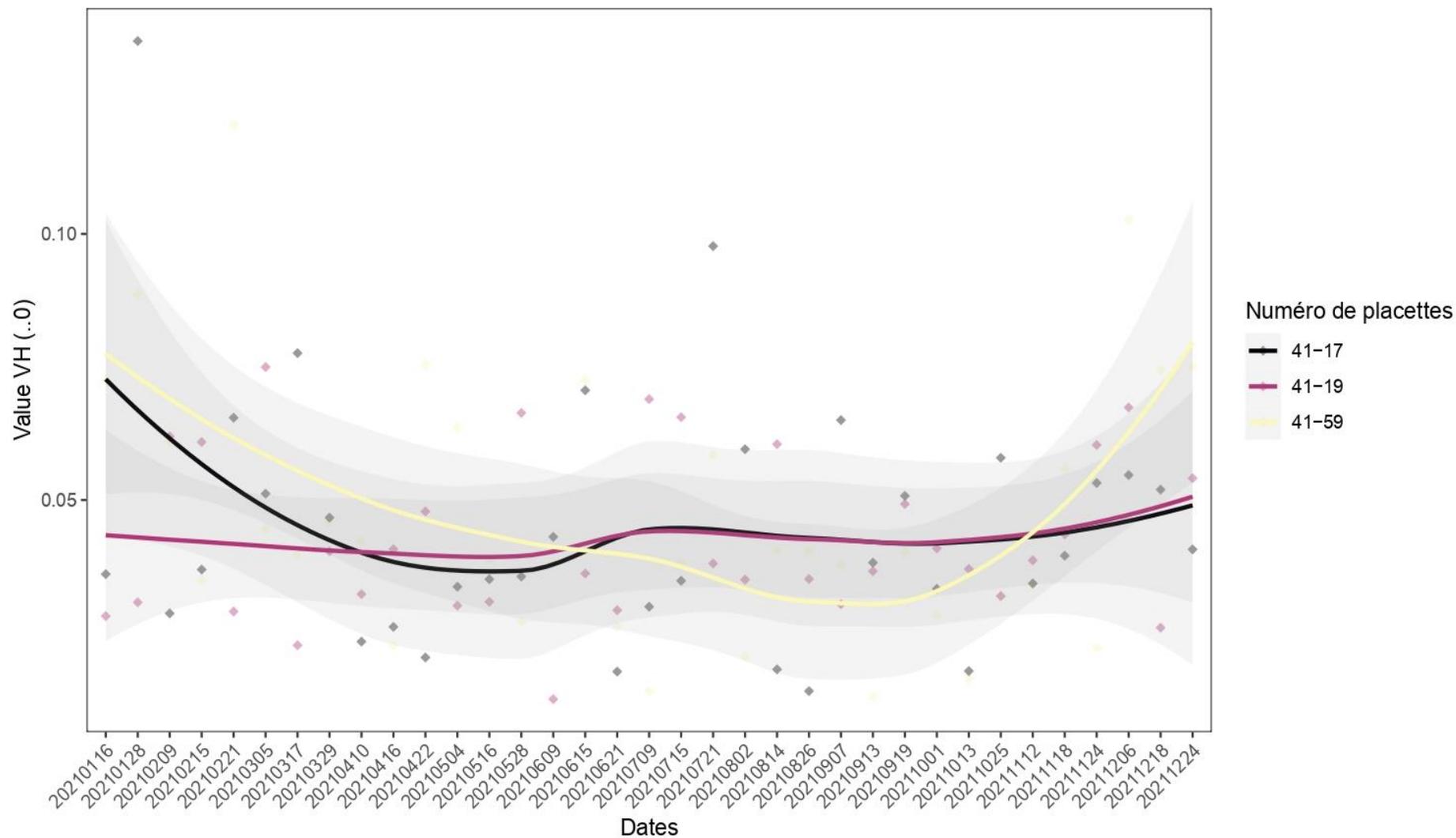
Profil VV lissé des placettes de la forêt de Blois en 2021



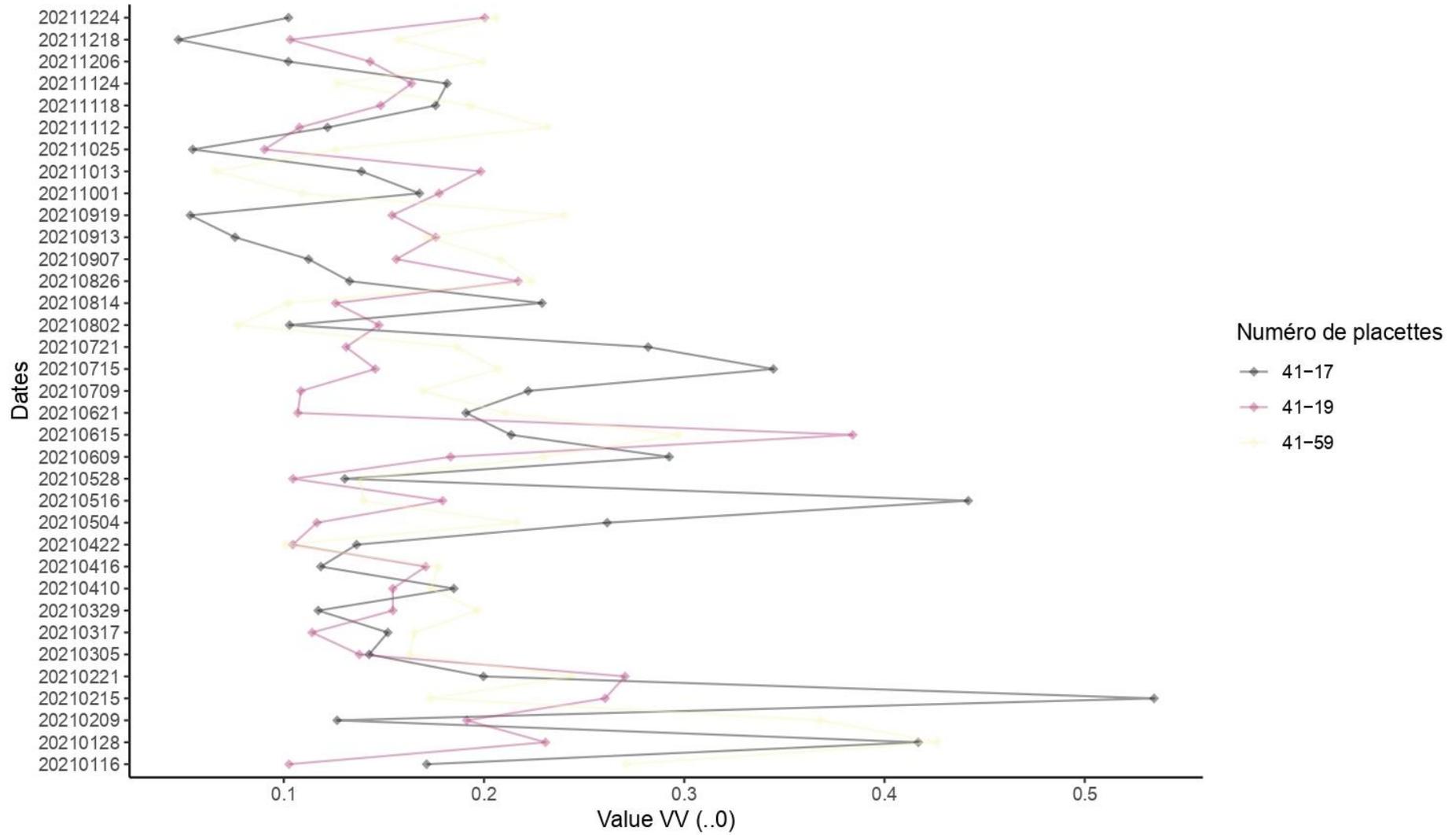
1.2. Variations des polarisations RADAR au cours de l'année 2021 sur les placettes remarquables de la forêt de Blois



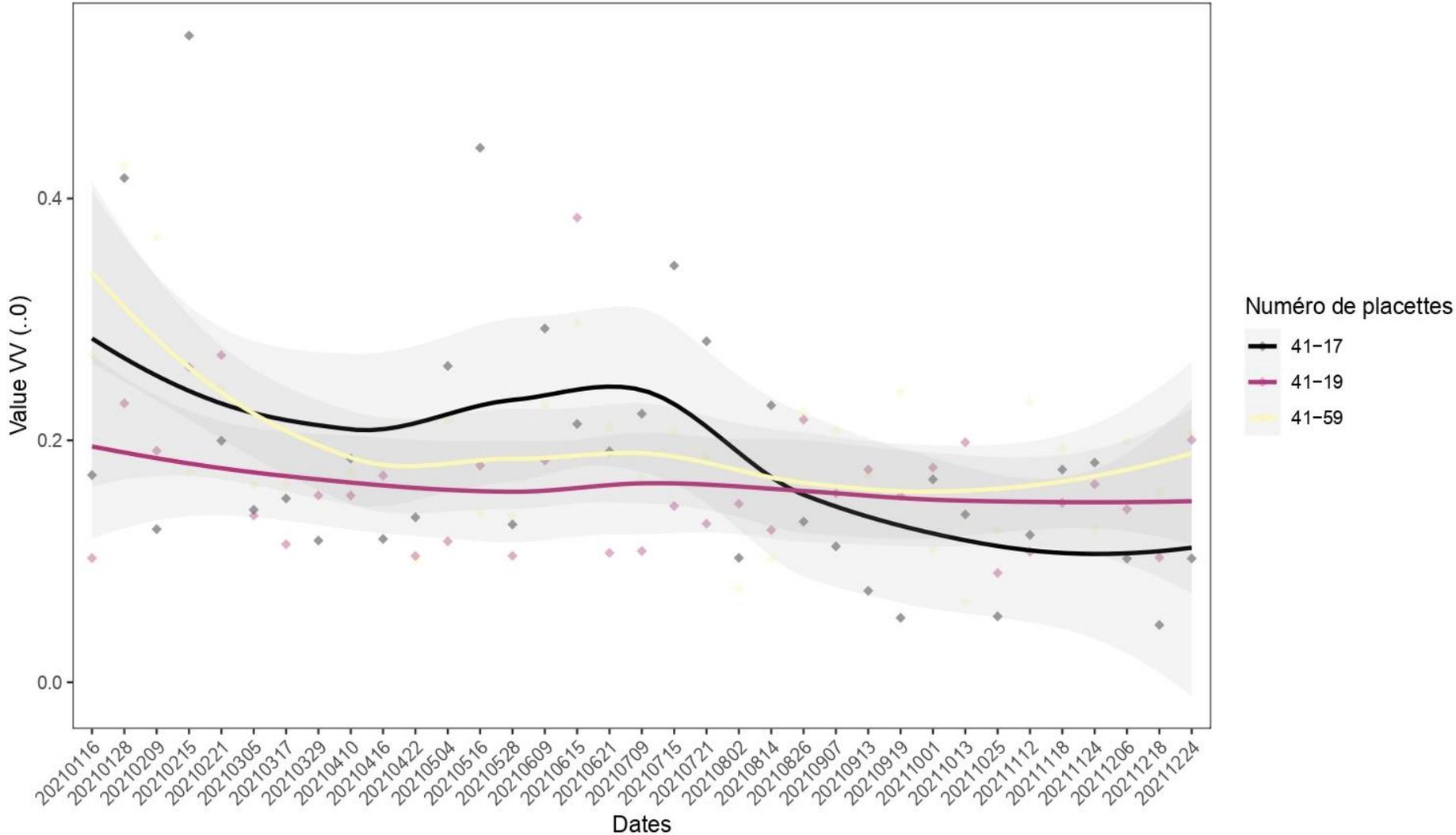
Profilé VH lissé des placettes de la forêt de Blois en 2021



Profile VV des placettes de la forêt de Blois en 2021

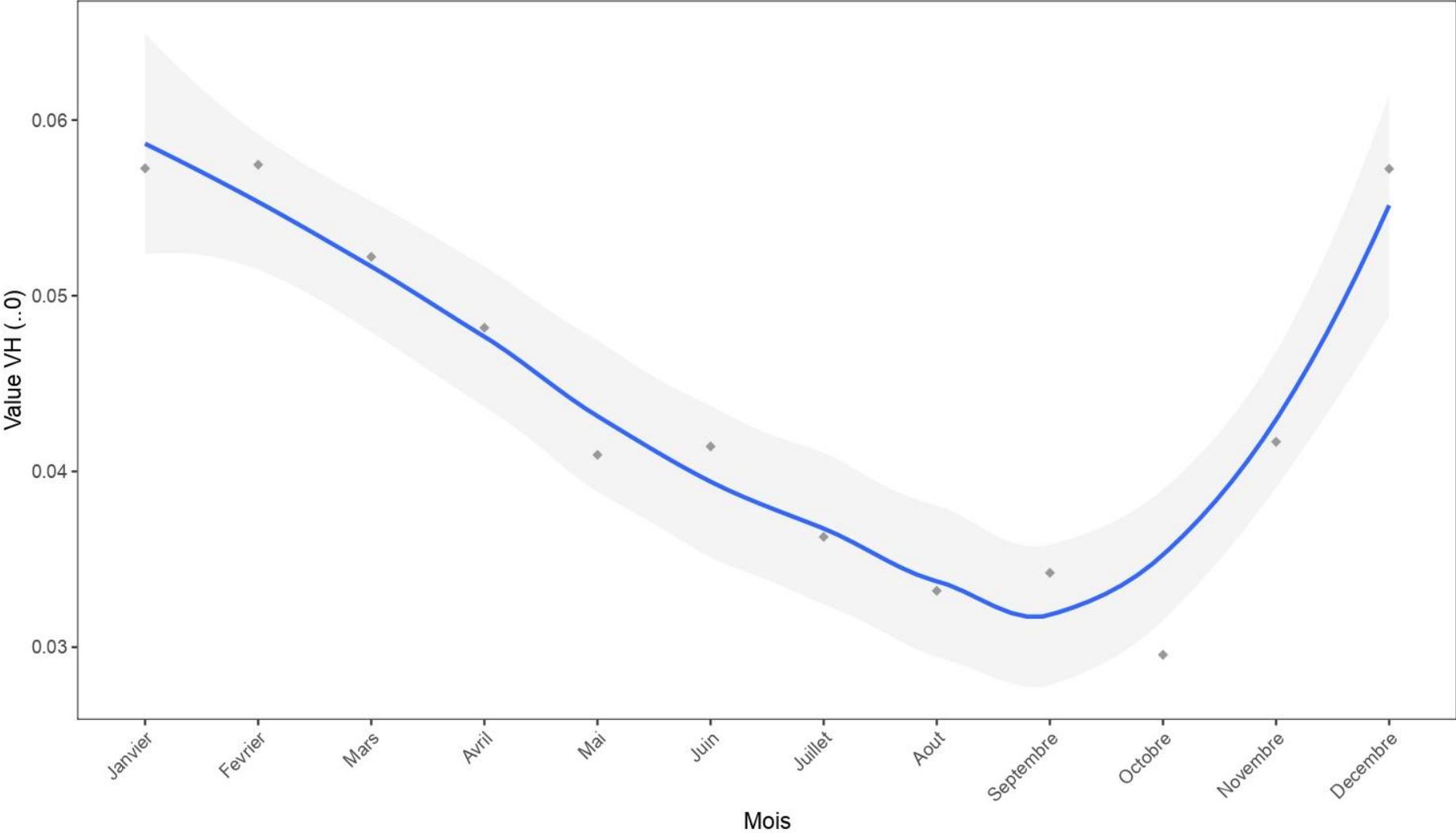


Profil VV lissé des placettes de la forêt de Blois en 2021

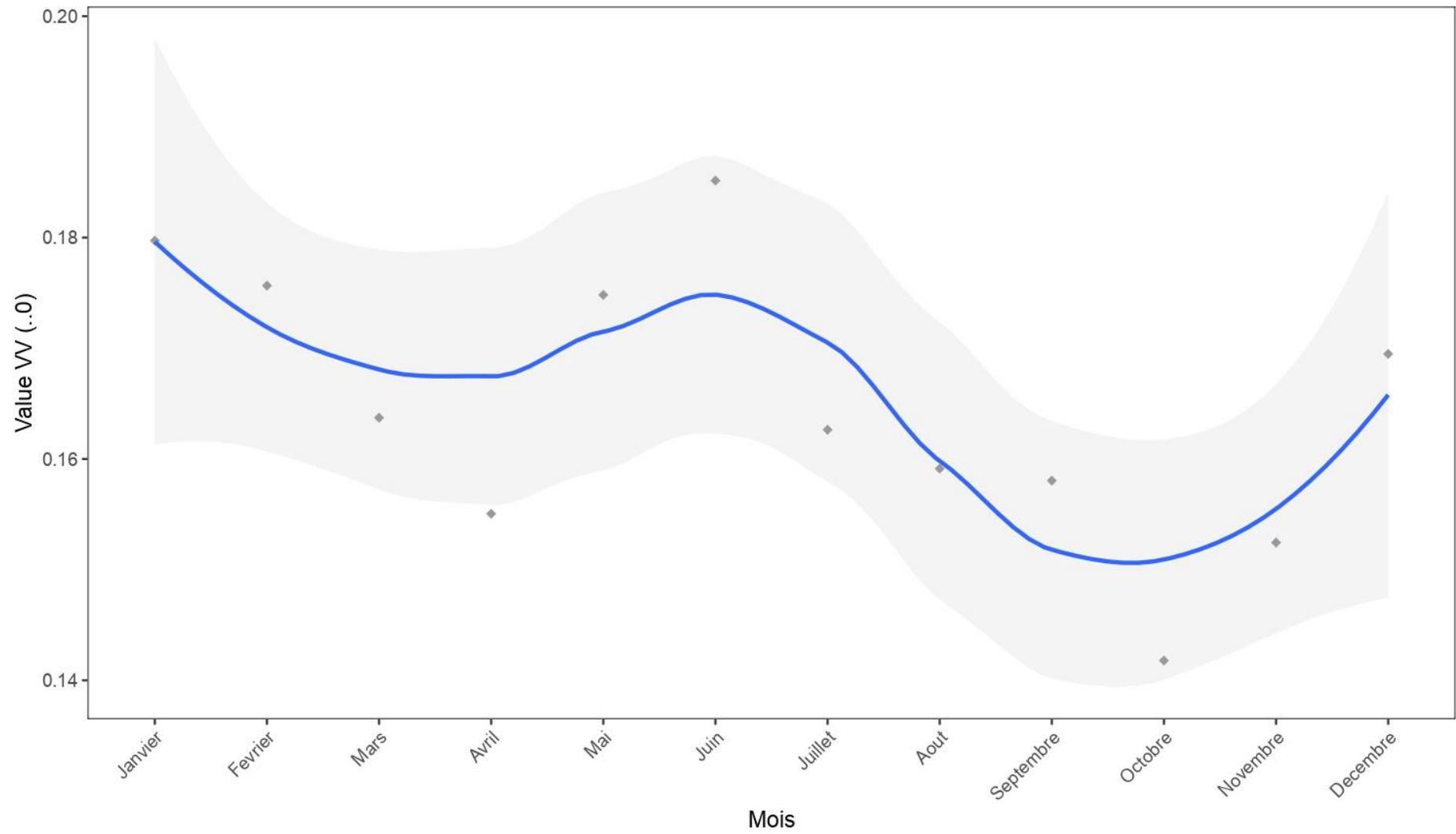


1.3. Variations des polarisations RADAR au cours de l'année 2021 par mois de la forêt de Blois

Profilé VH mensuel des placettes de la forêt de Blois en 2021

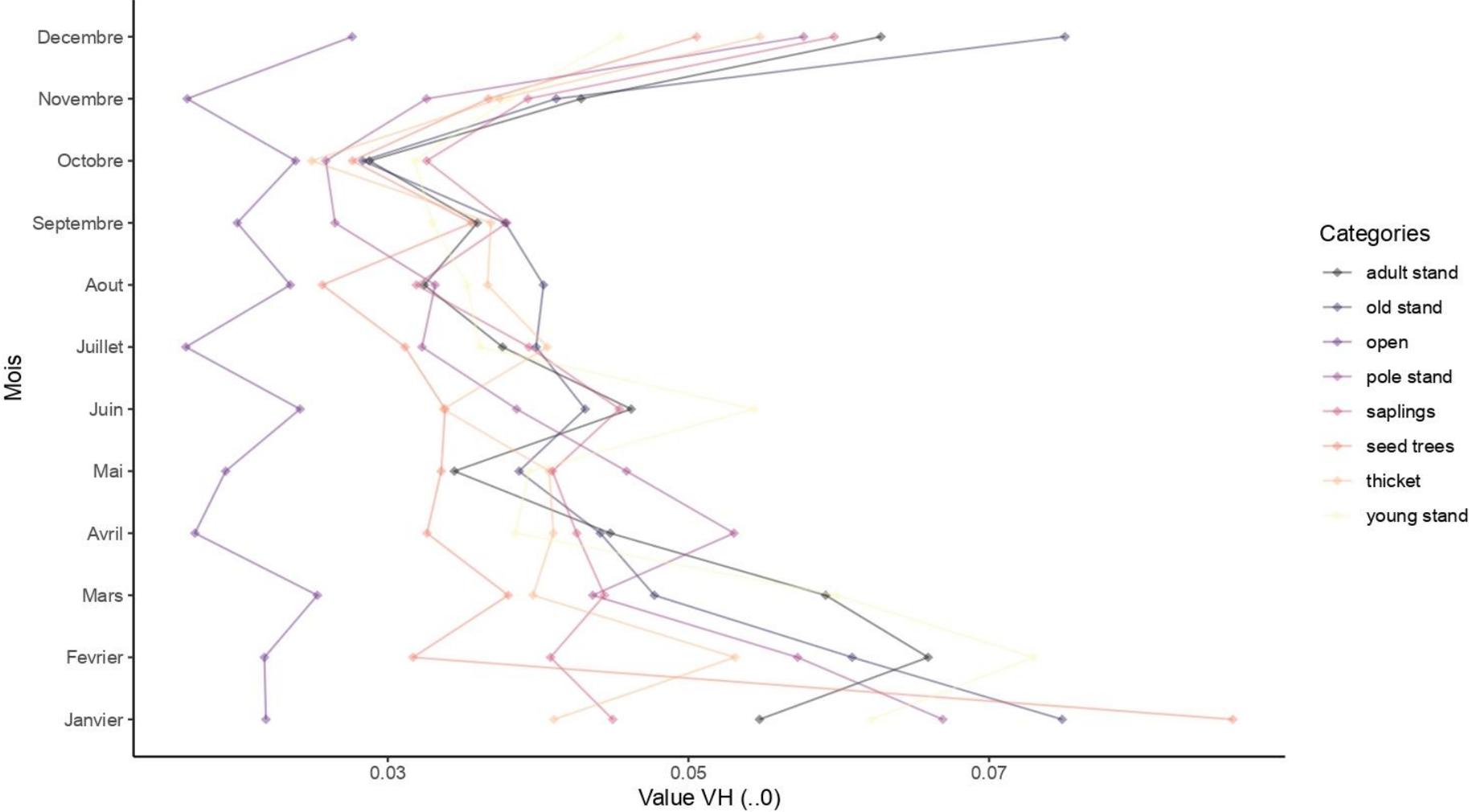


Profilé VV mensuel des placettes de la forêt de Blois en 2021

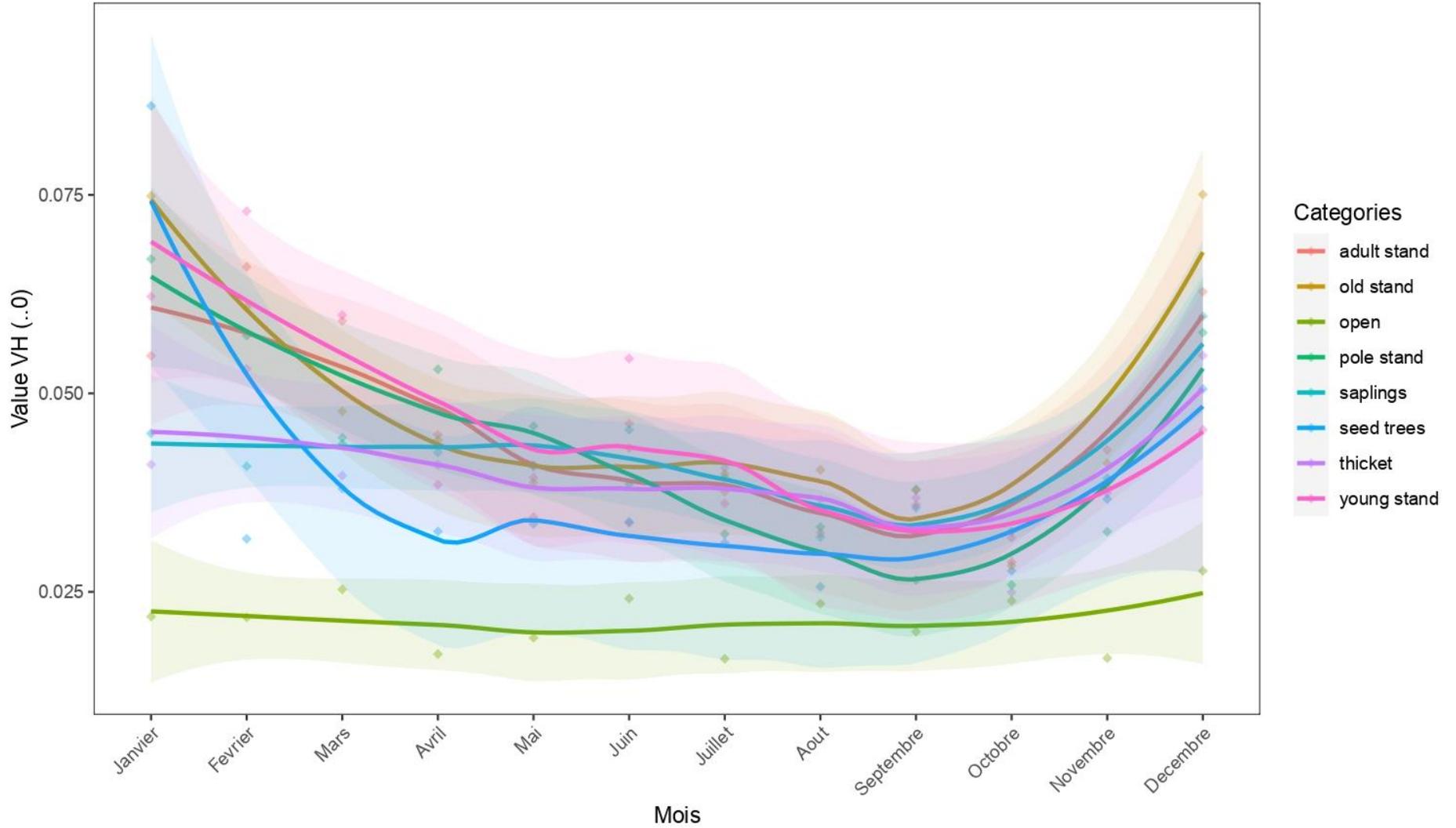


1.4. Variations des polarisations RADAR mensuel au cours de l'année 2021 par stades sylvicoles de la forêt de Blois

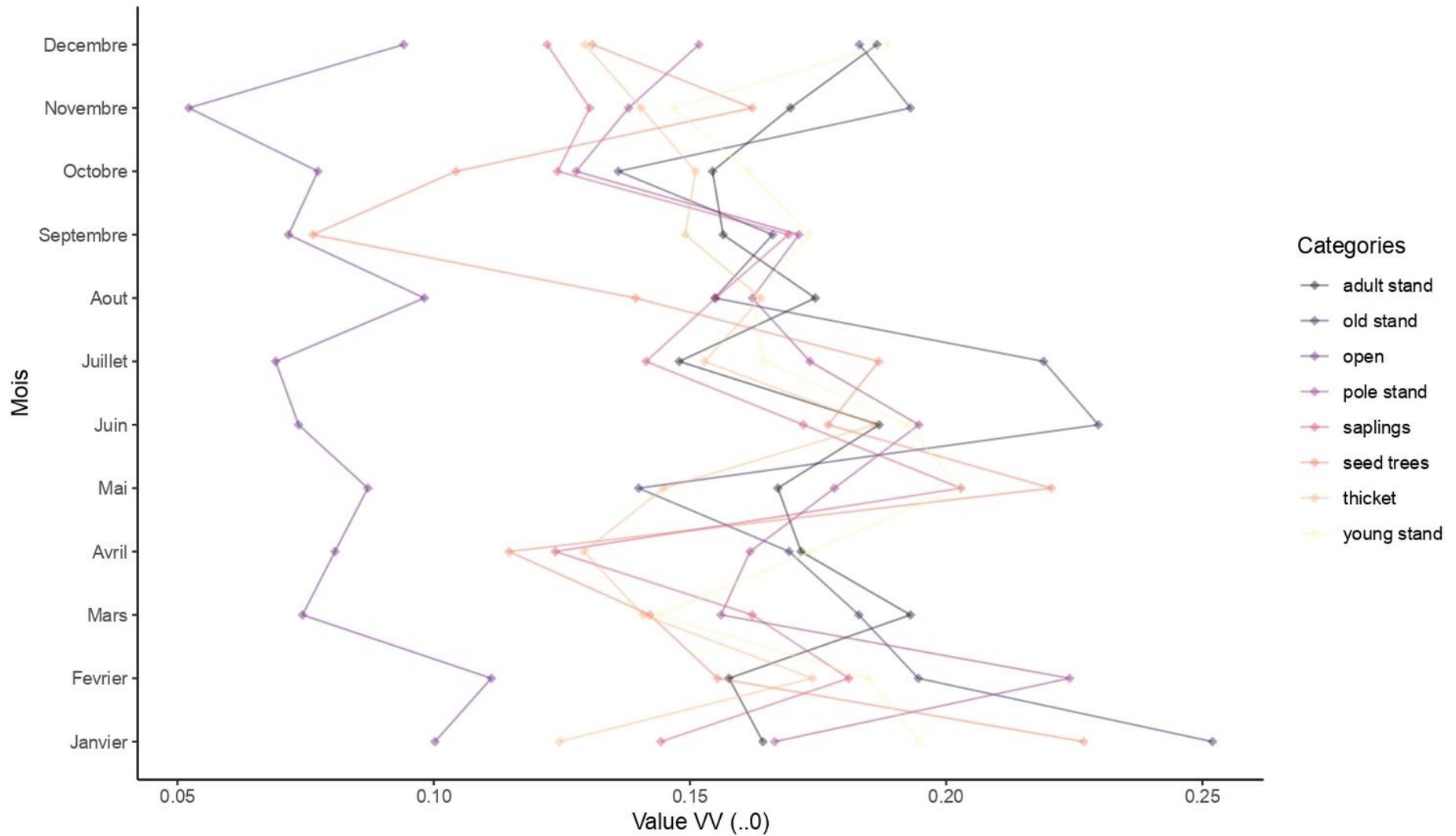
Profilé VH des catégories de végétation de la forêt de Blois en 2021



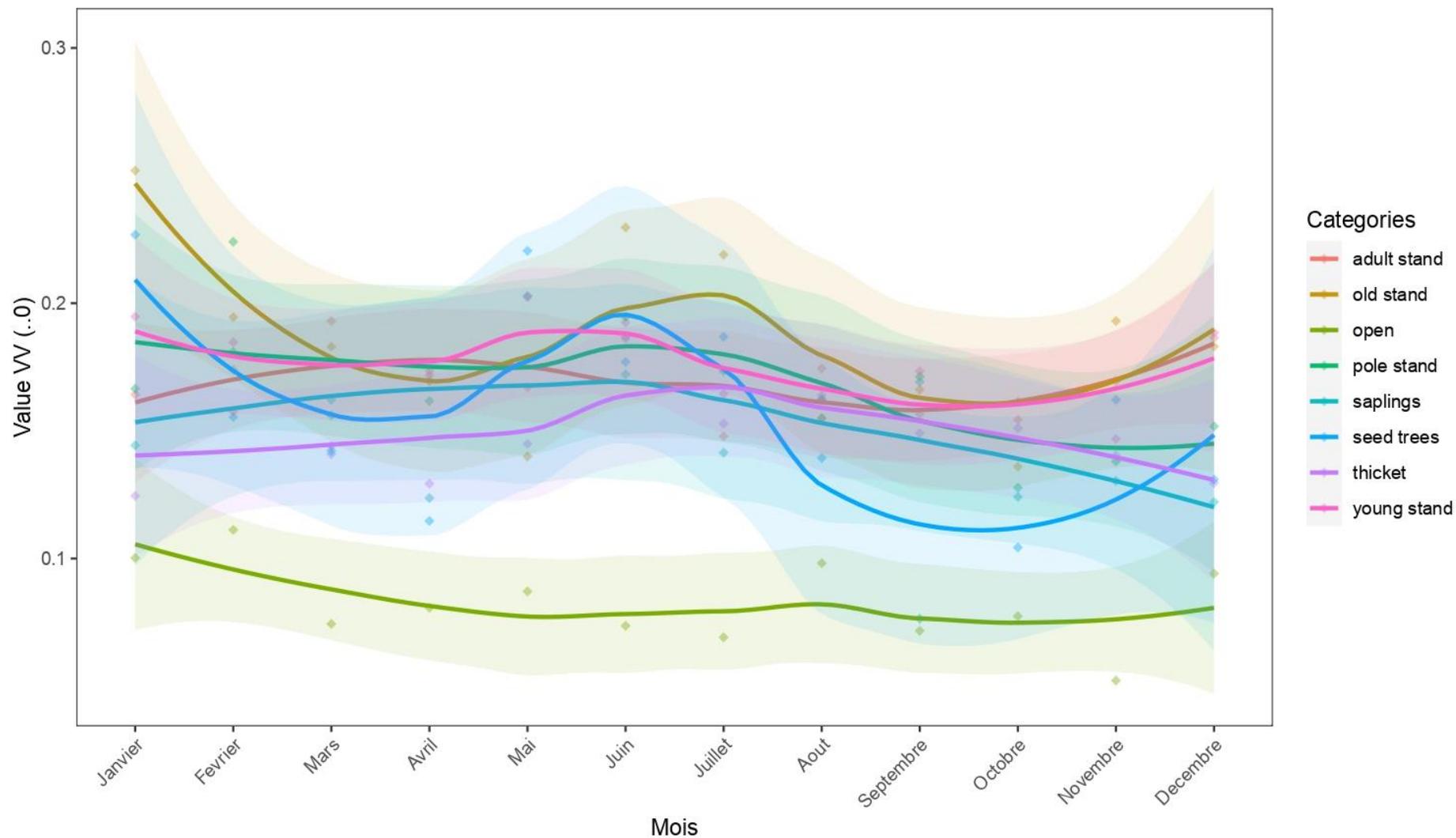
Profilé VH lissé des catégories de végétation de la forêt de Blois en 2021



Profil VV des categories de végétation de la forêt de Blois en 2021



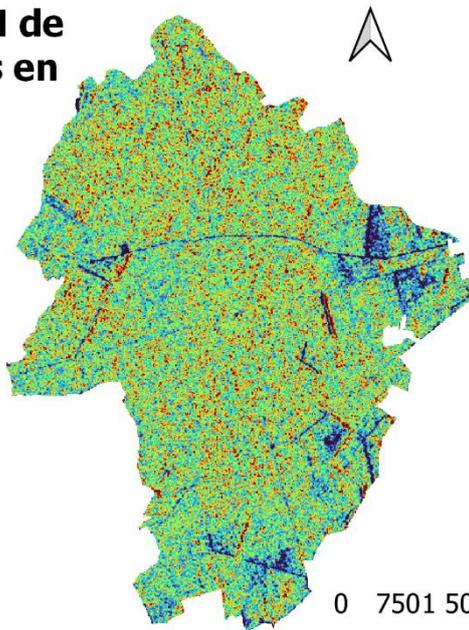
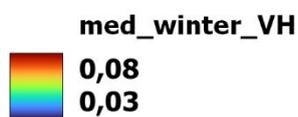
Profil VV lissé des categories de végétation de la forêt de Blois en 2021



2. Calculs des indicateurs

2.1. Les indicateurs RADAR

**med_winter_VH de
la forêt de Blois en
2021**

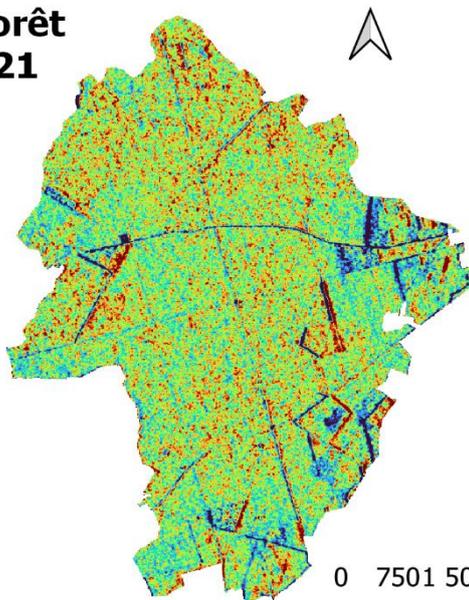
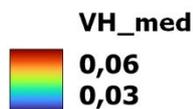


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1 500 m



**VH_med de la forêt
de Blois en 2021**

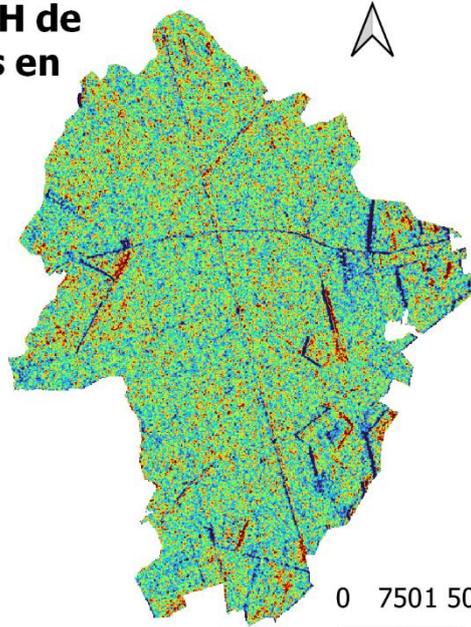


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1 500 m



med_summer_VH de la forêt de Blois en 2021

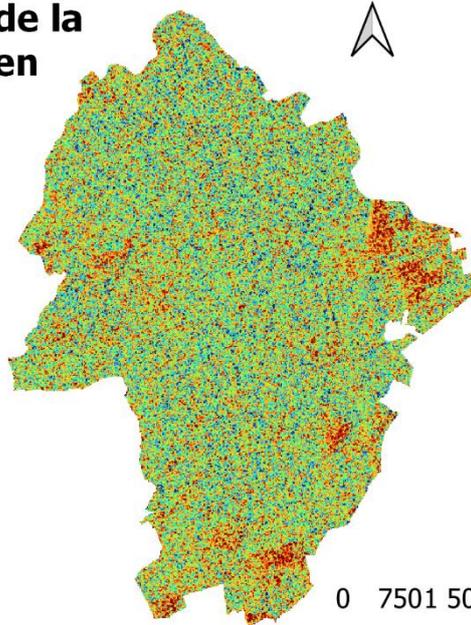


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



diff_season_VH de la forêt de Blois en 2021

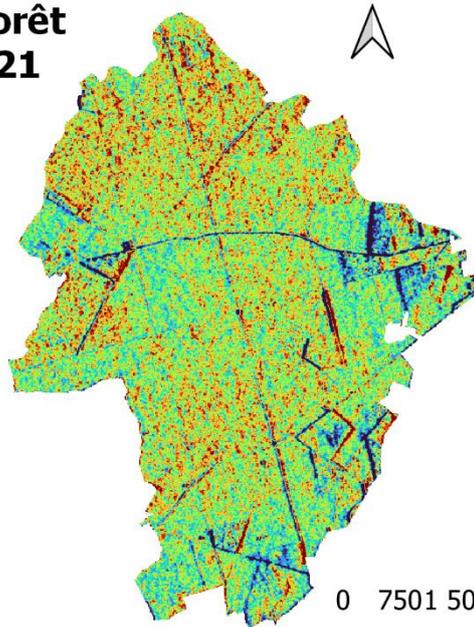
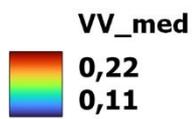


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



VV_med de la forêt de Blois en 2021

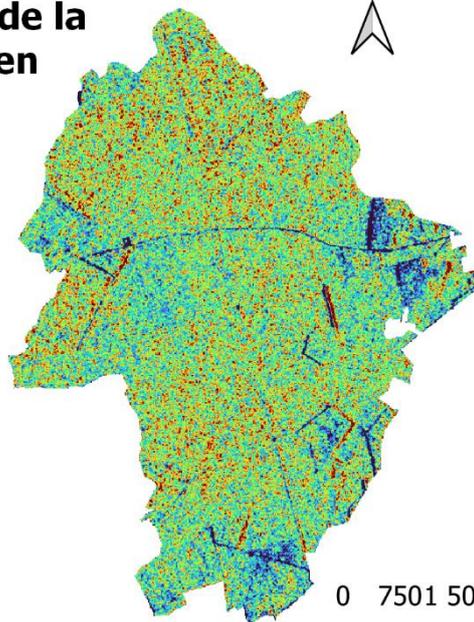
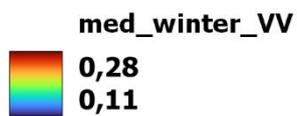


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



med_winter_VV de la forêt de Blois en 2021

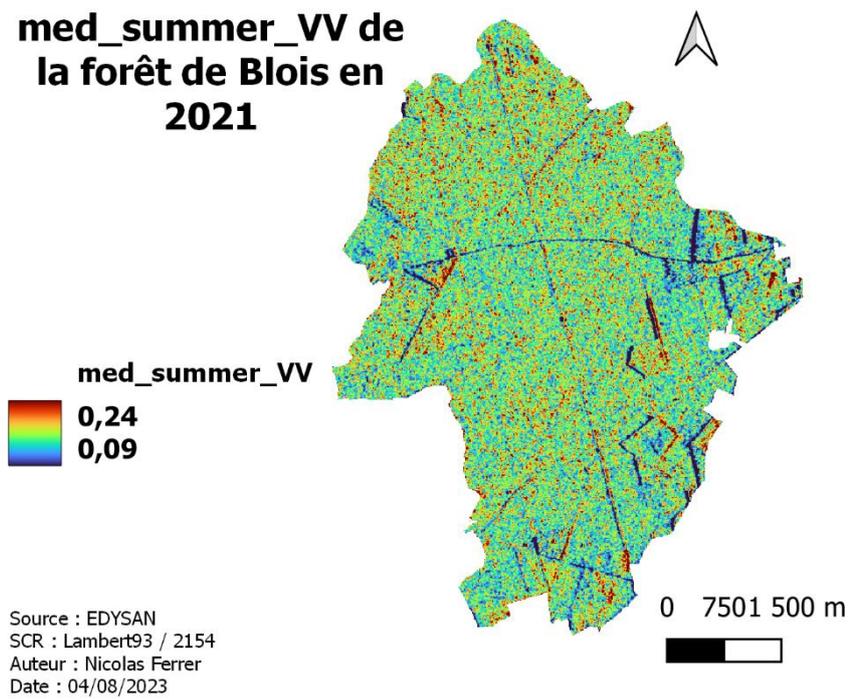


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

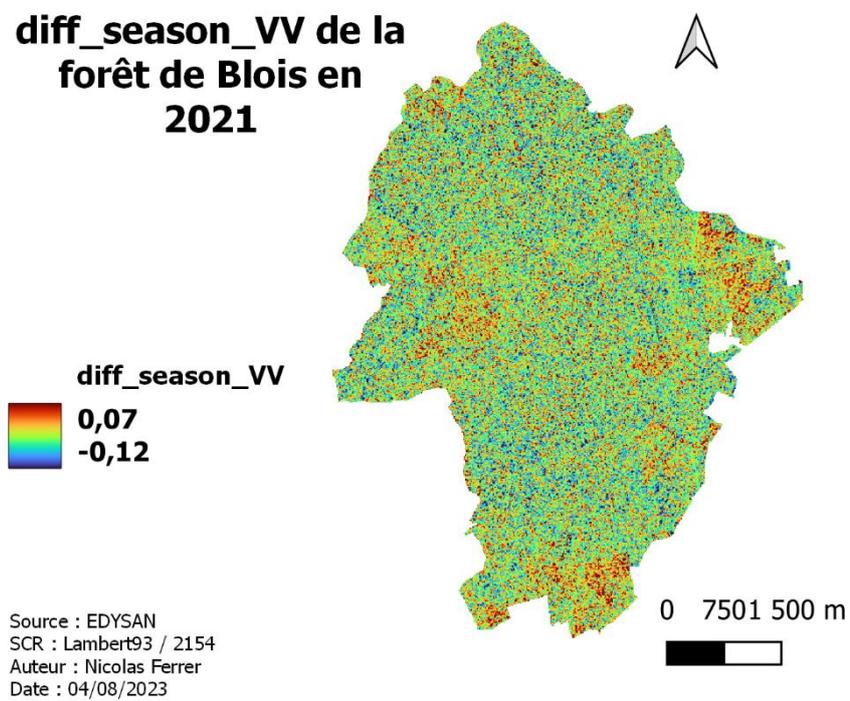
0 750 1500 m



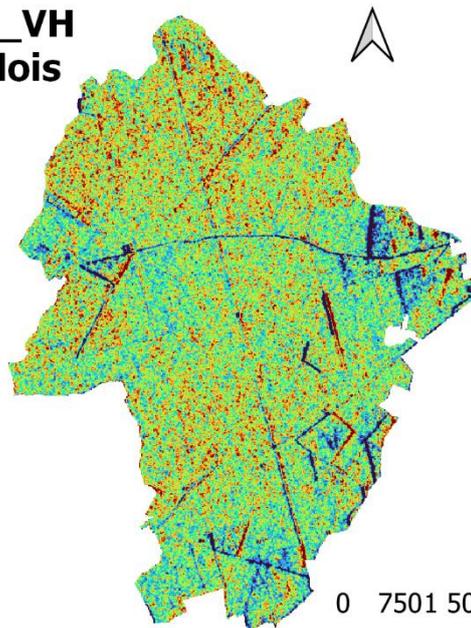
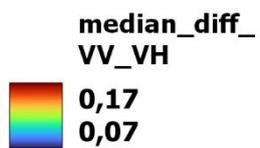
med_summer_VV de la forêt de Blois en 2021



diff_season_VV de la forêt de Blois en 2021



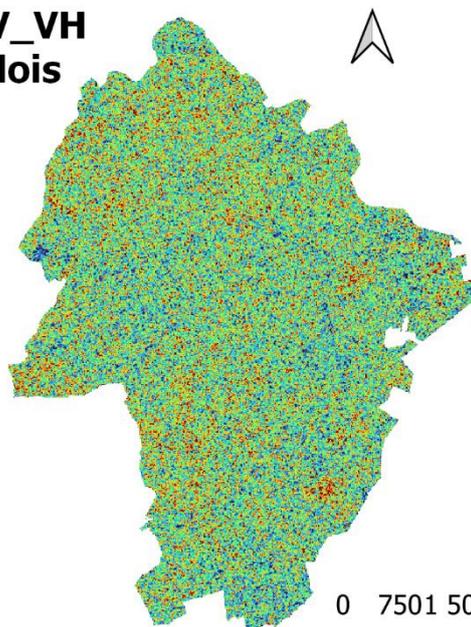
median_diff_VV_VH de la forêt de Blois en 2021



Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 7501 500 m

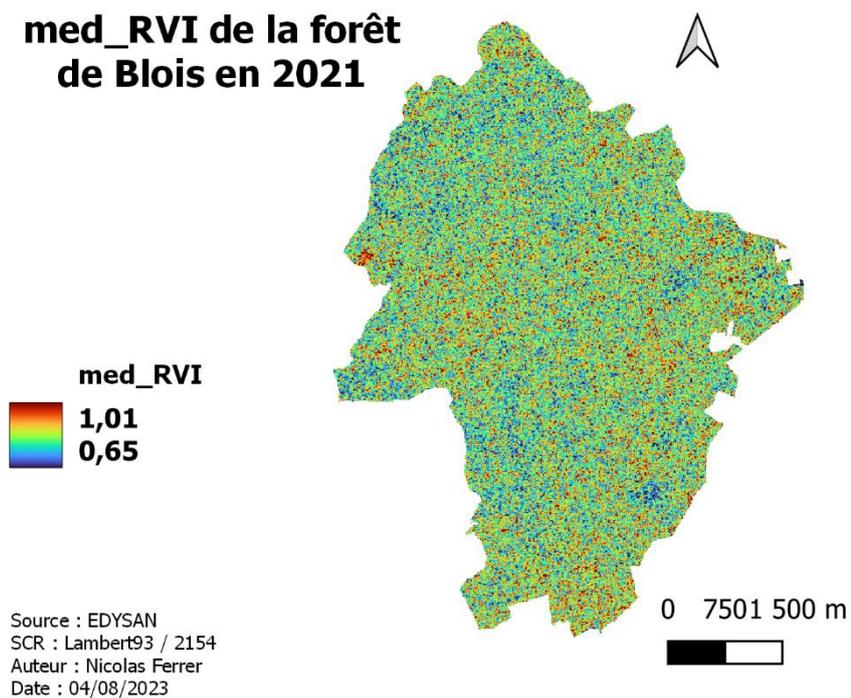
median_ratio_VV_VH de la forêt de Blois en 2021



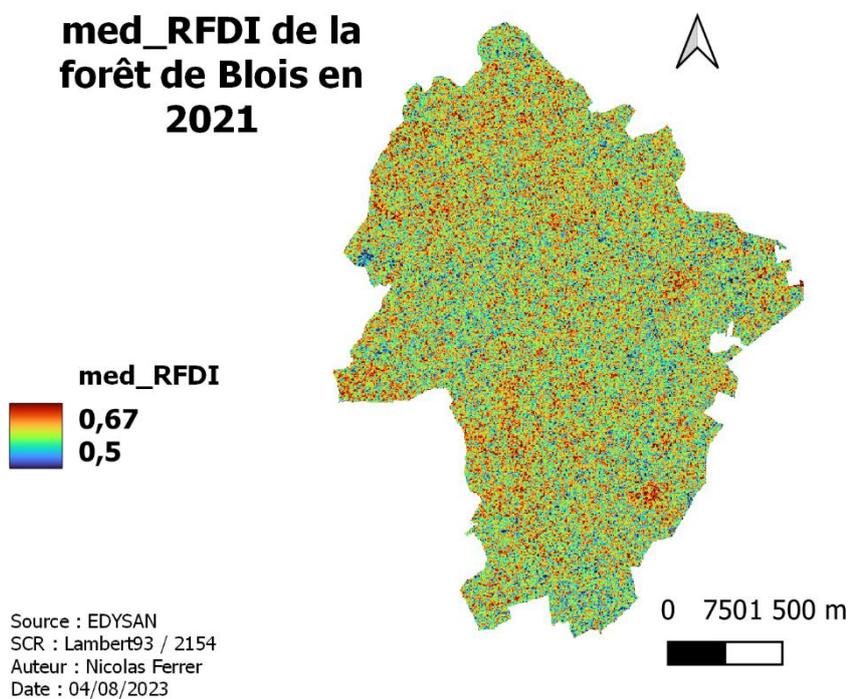
Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 7501 500 m

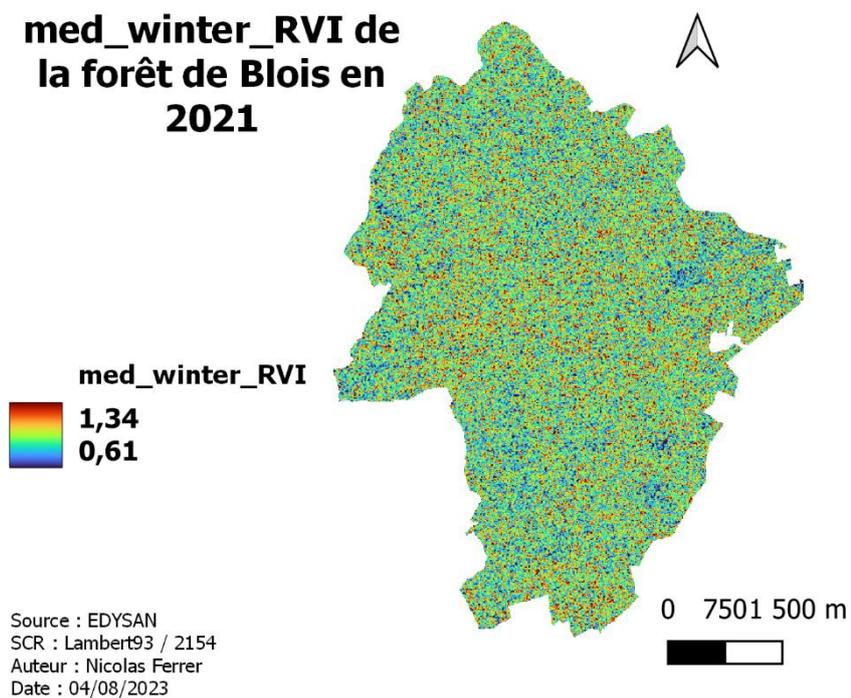
med_RVI de la forêt de Blois en 2021



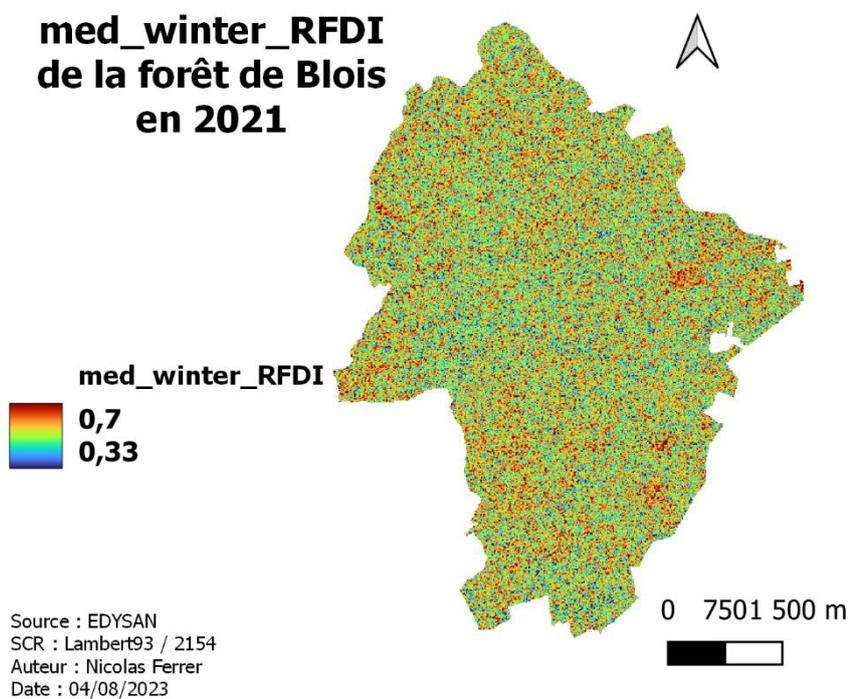
med_RFDI de la forêt de Blois en 2021



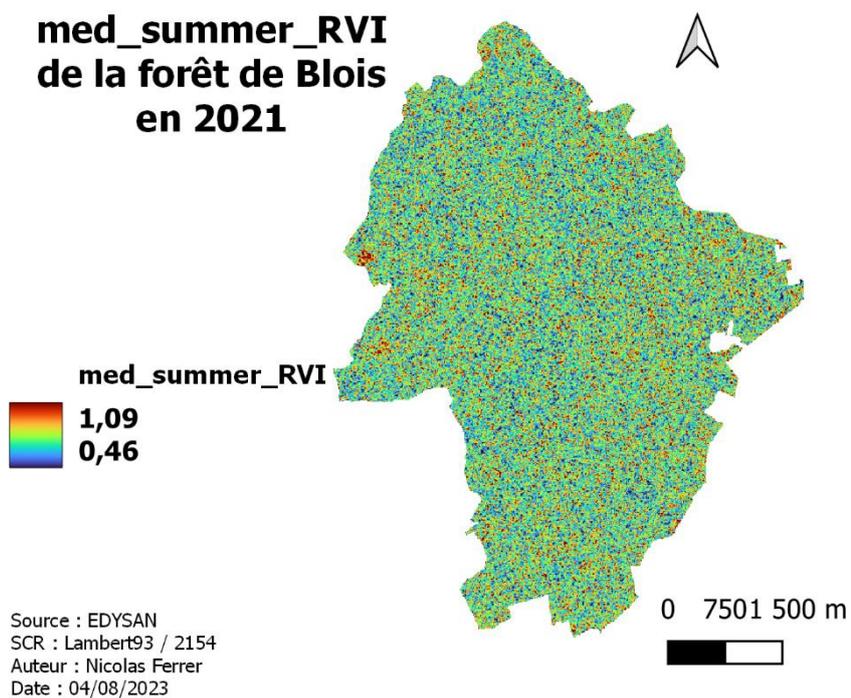
med_winter_RVI de la forêt de Blois en 2021



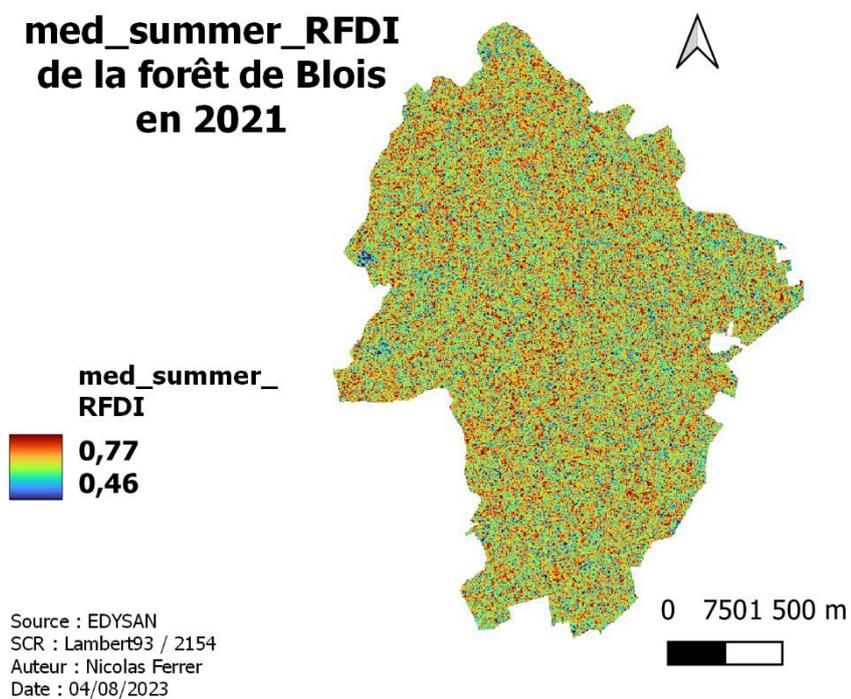
med_winter_RFDI de la forêt de Blois en 2021



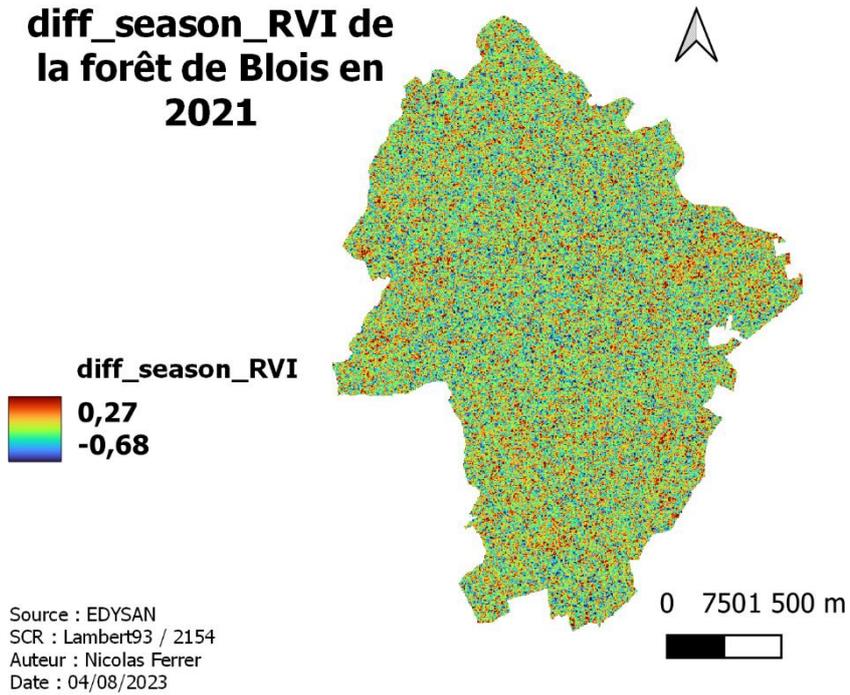
med_summer_RVI de la forêt de Blois en 2021



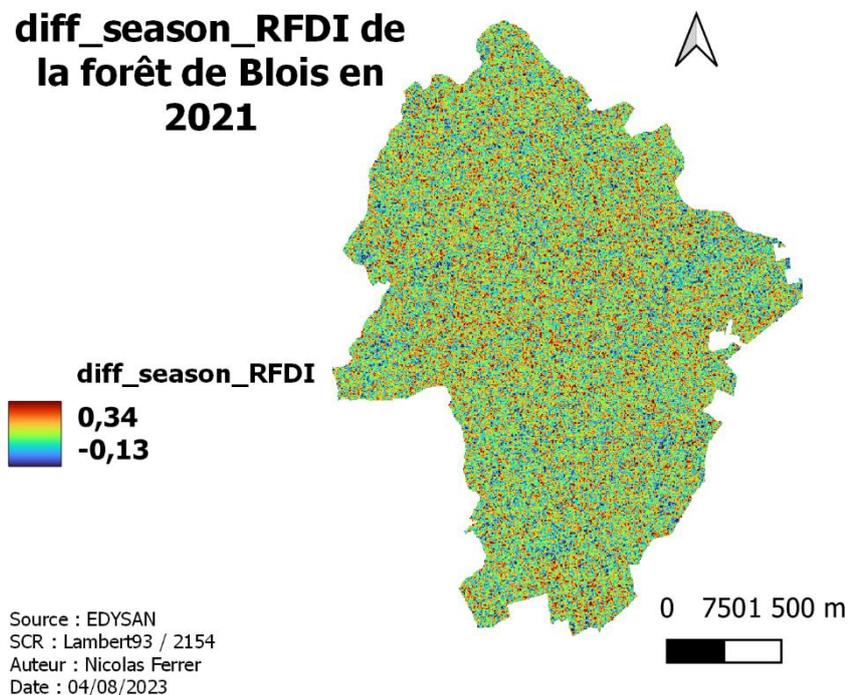
med_summer_RFDI de la forêt de Blois en 2021



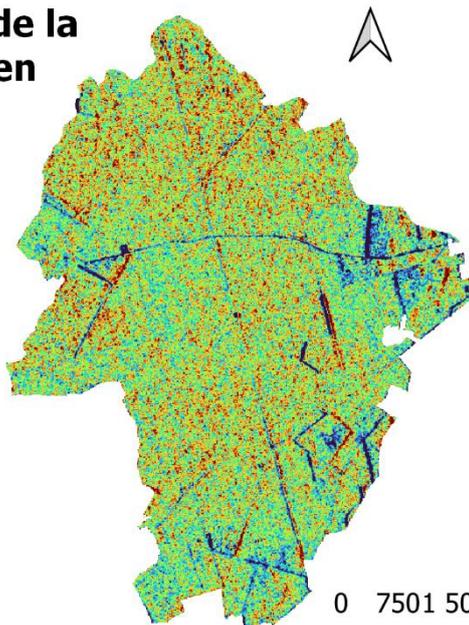
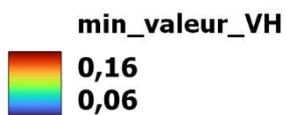
diff_season_RVI de la forêt de Blois en 2021



diff_season_RFDI de la forêt de Blois en 2021



min_valeur_VH de la forêt de Blois en 2021

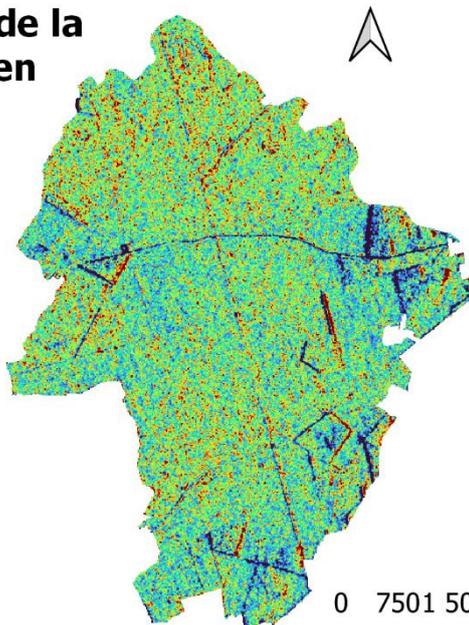


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



max_valeur_VH de la forêt de Blois en 2021

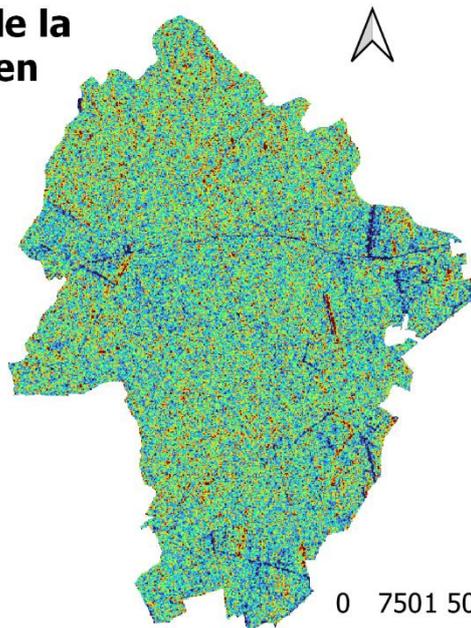


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



Amplitude_VH de la forêt de Blois en 2021



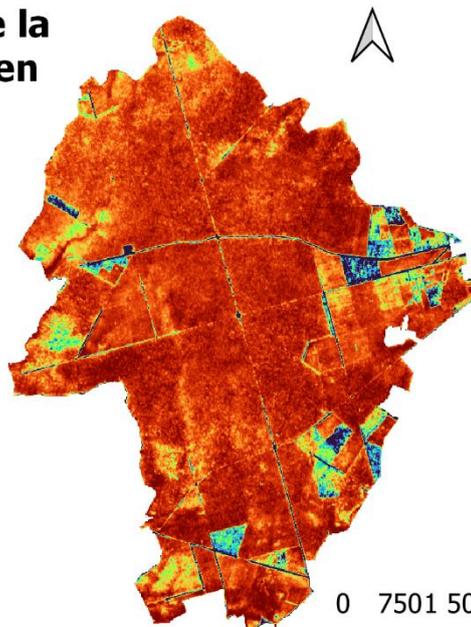
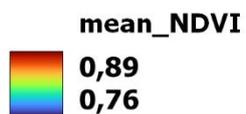
Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



2.2. Les indicateurs Optique

mean_NDVI de la forêt de Blois en 2021

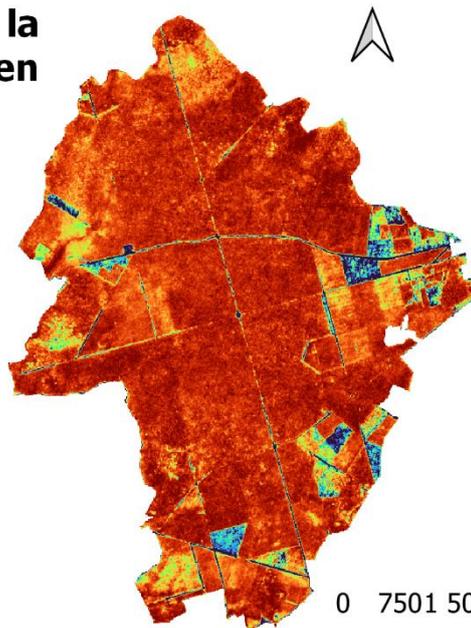
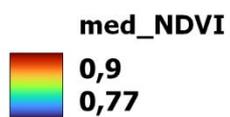


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



med_NDVI de la forêt de Blois en 2021

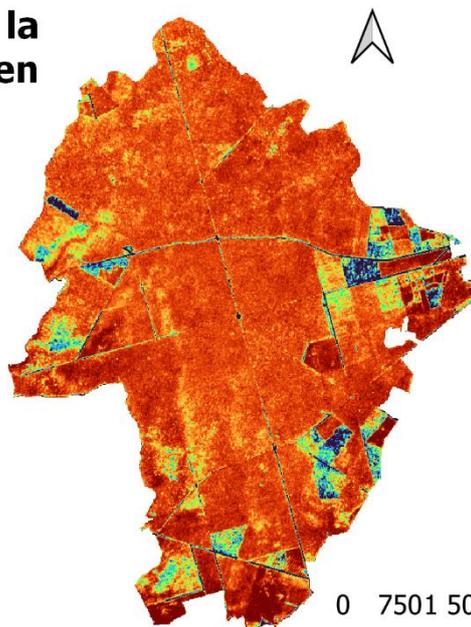
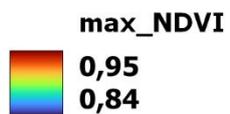


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1500 m



max_NDVI de la forêt de Blois en 2021

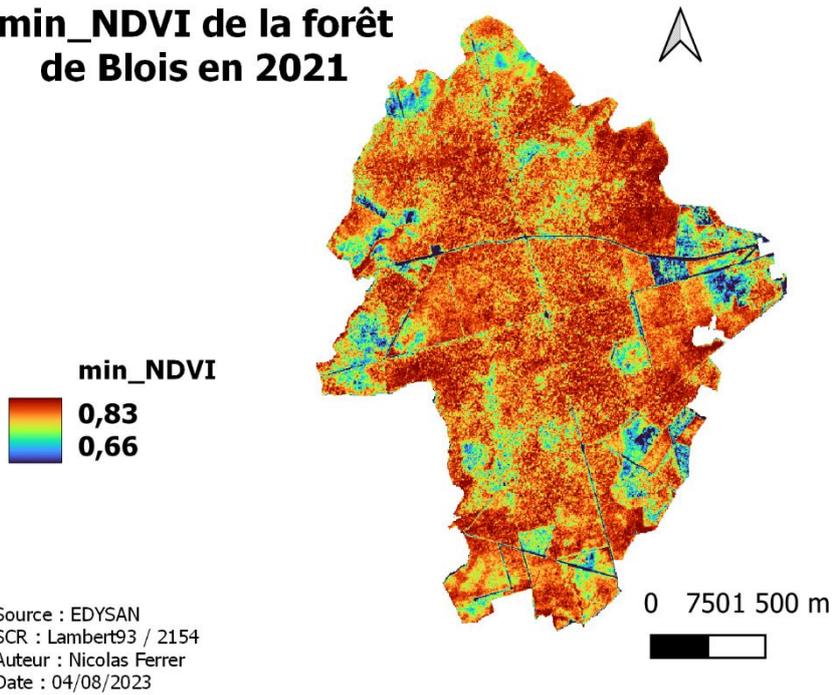


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

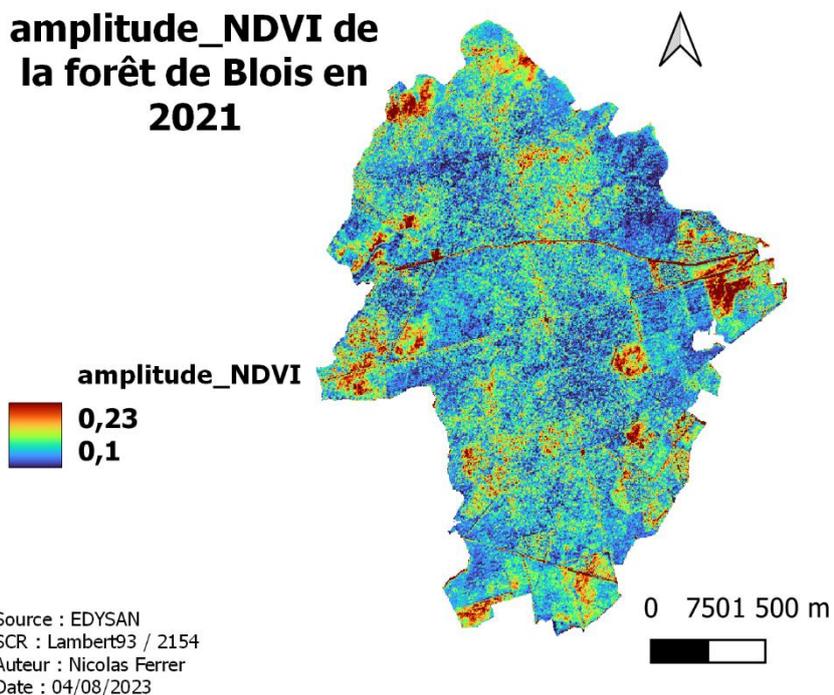
0 750 1500 m



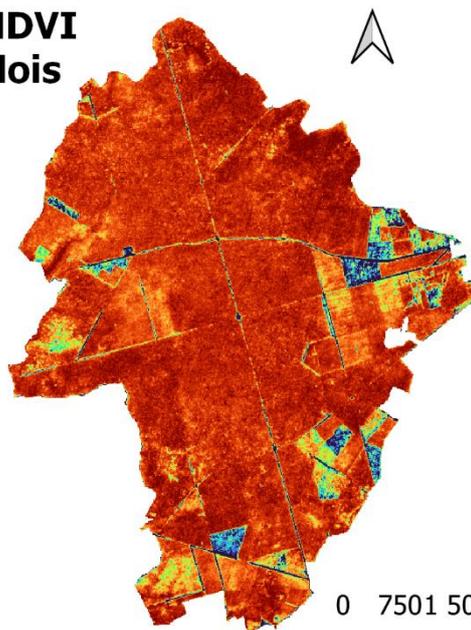
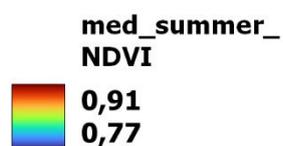
min_NDVI de la forêt de Blois en 2021



amplitude_NDVI de la forêt de Blois en 2021



med_summer_NDVI de la forêt de Blois en 2021



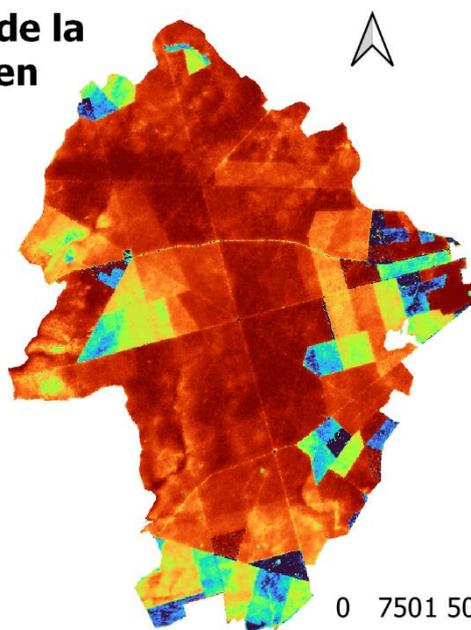
Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

0 750 1 500 m



2.3. Les indicateurs LiDAR

log_Hmax_5_m de la forêt de Blois en 2021

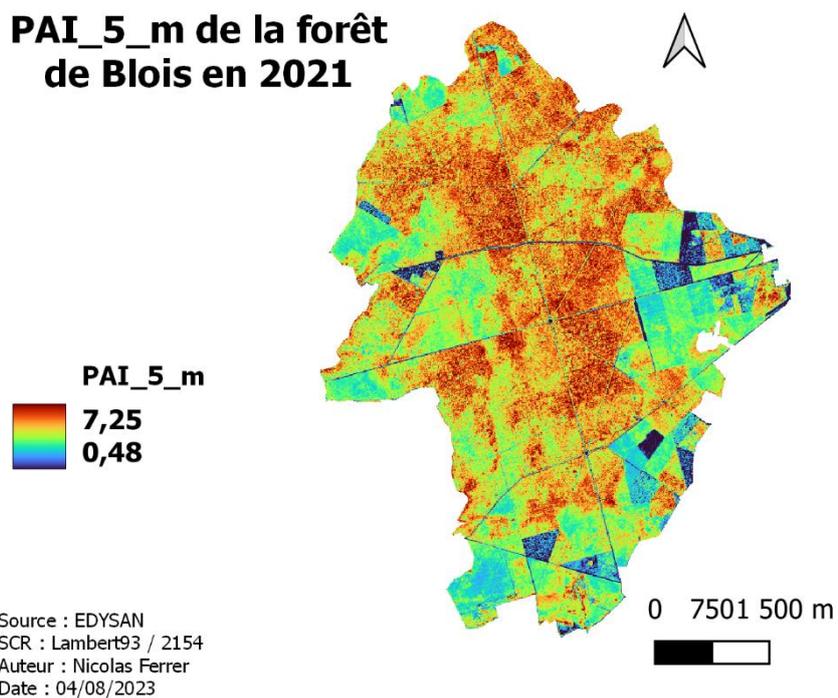


Source : EDYSAN
SCR : Lambert93 / 2154
Auteur : Nicolas Ferrer
Date : 04/08/2023

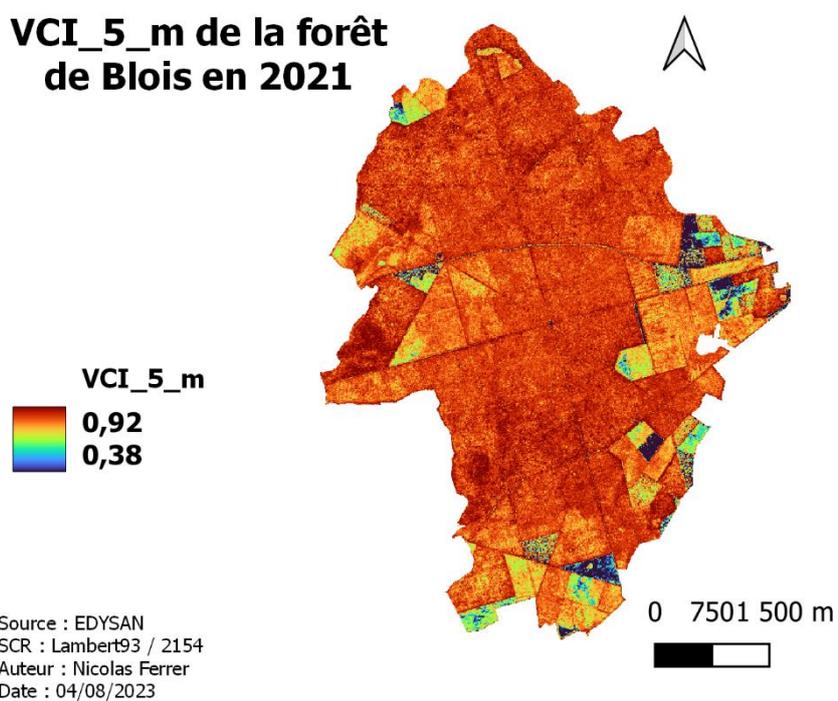
0 750 1 500 m



PAI_5_m de la forêt de Blois en 2021

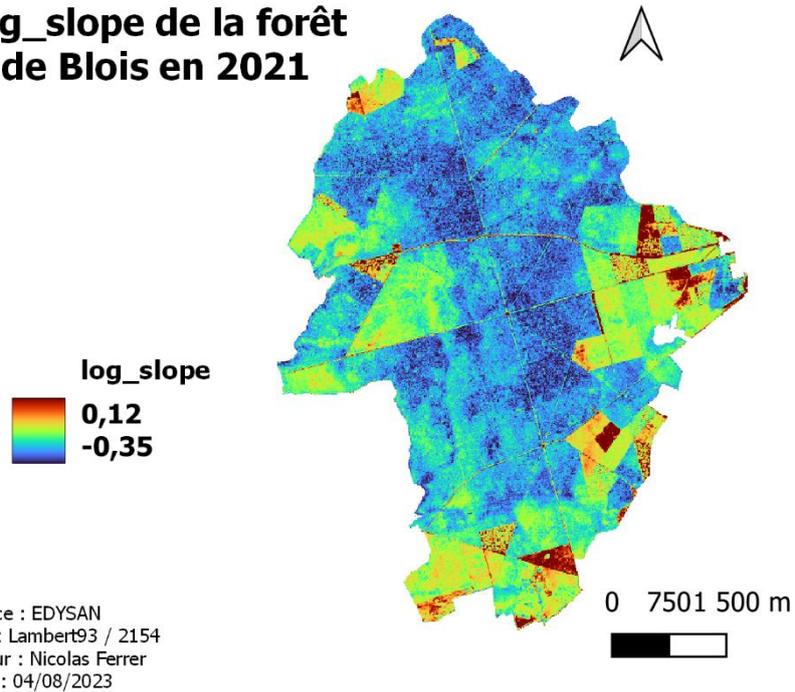


VCI_5_m de la forêt de Blois en 2021

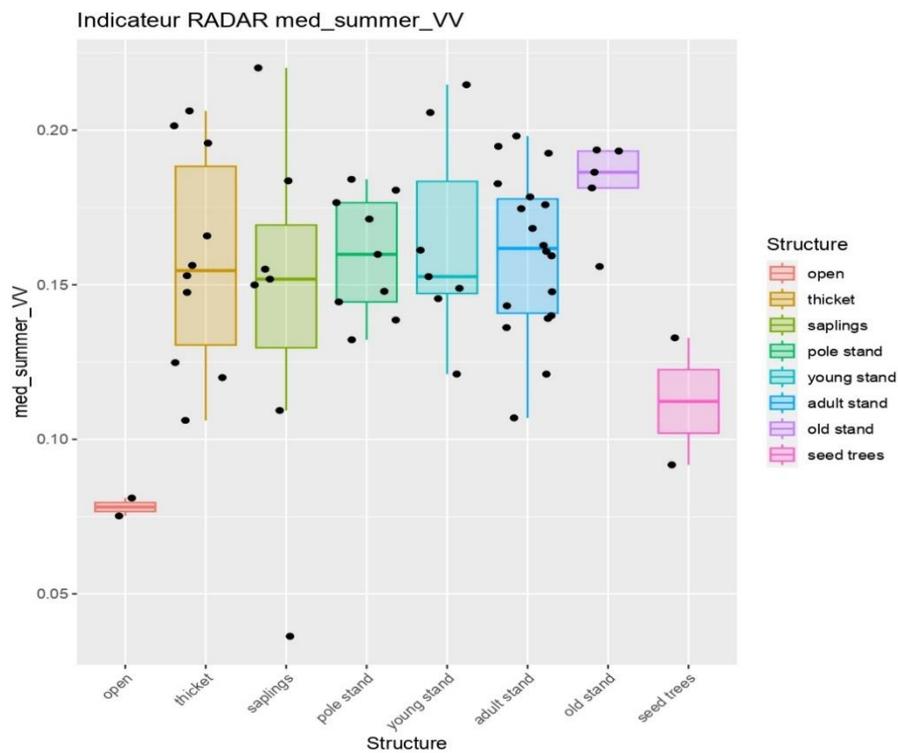


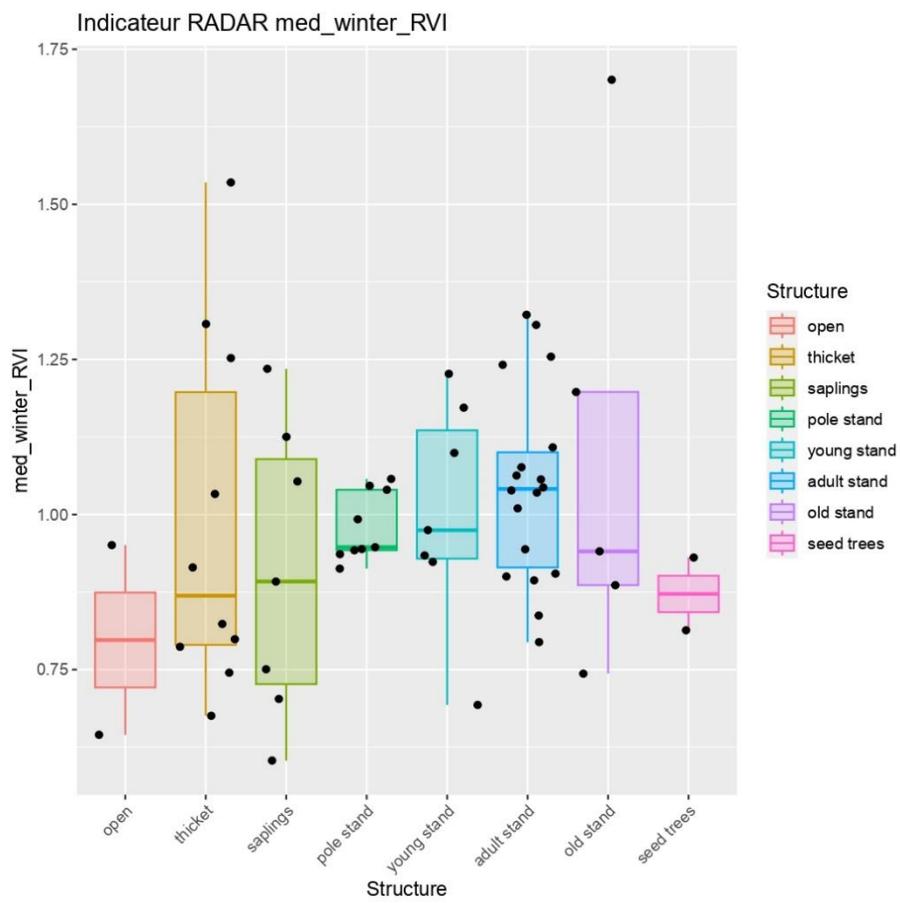
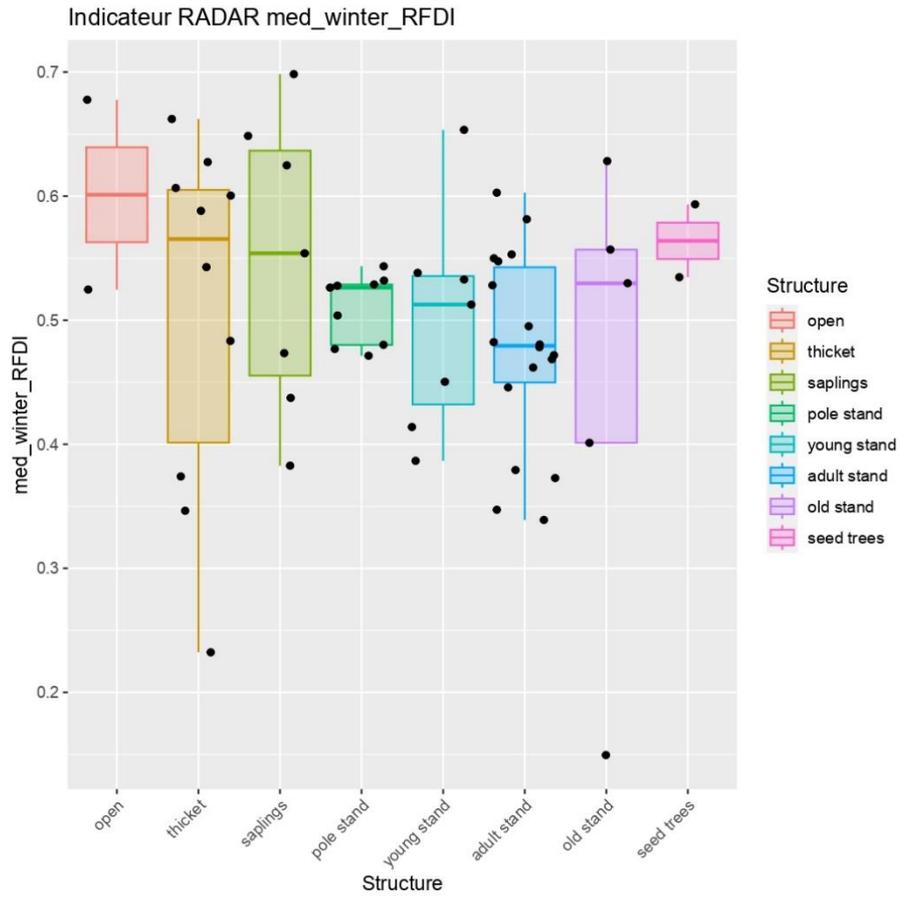
2.4. L'indicateur microclimatique

log_slope de la forêt de Blois en 2021

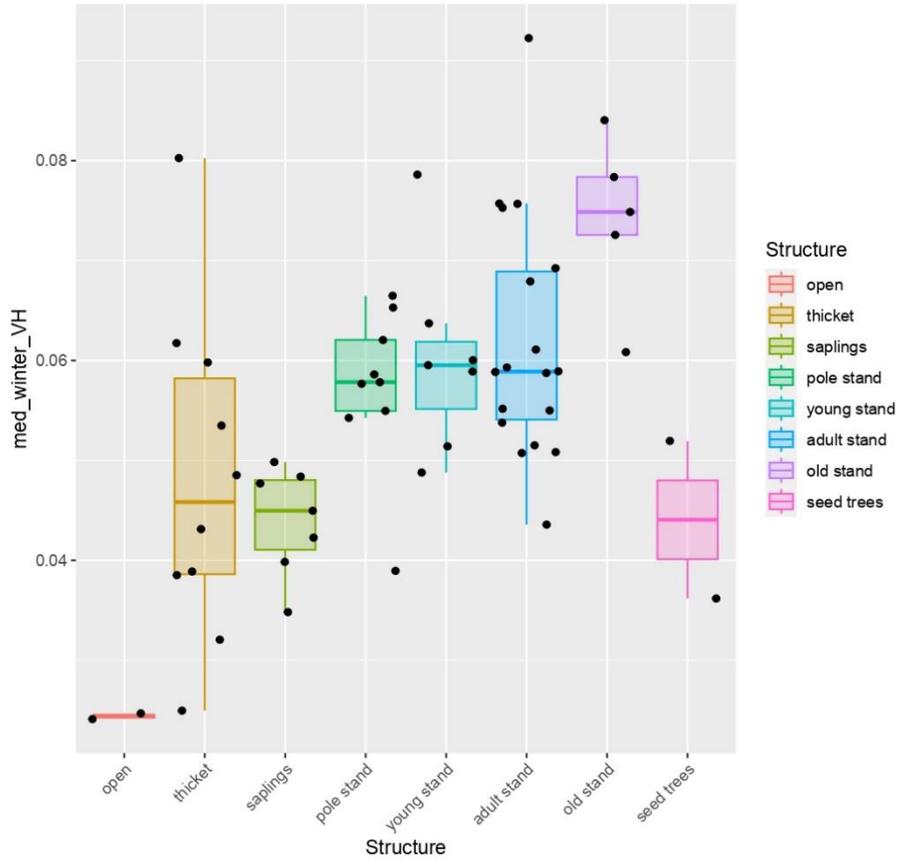


3. Boxplots des indicateurs RADAR selon les stades sylvicoles

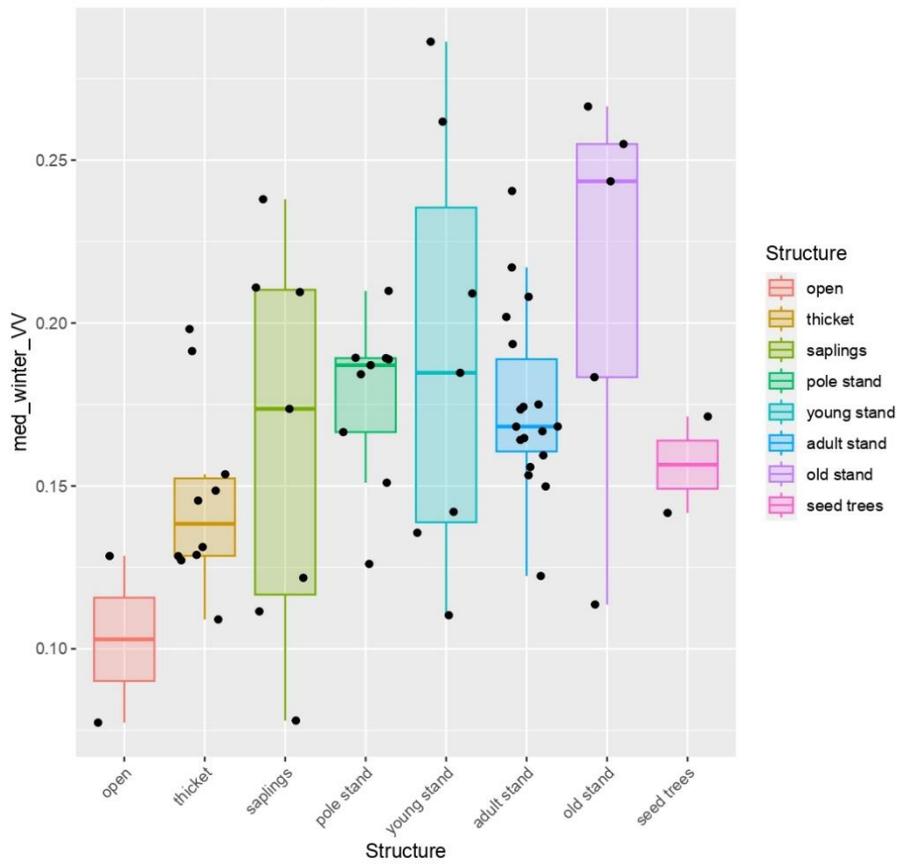




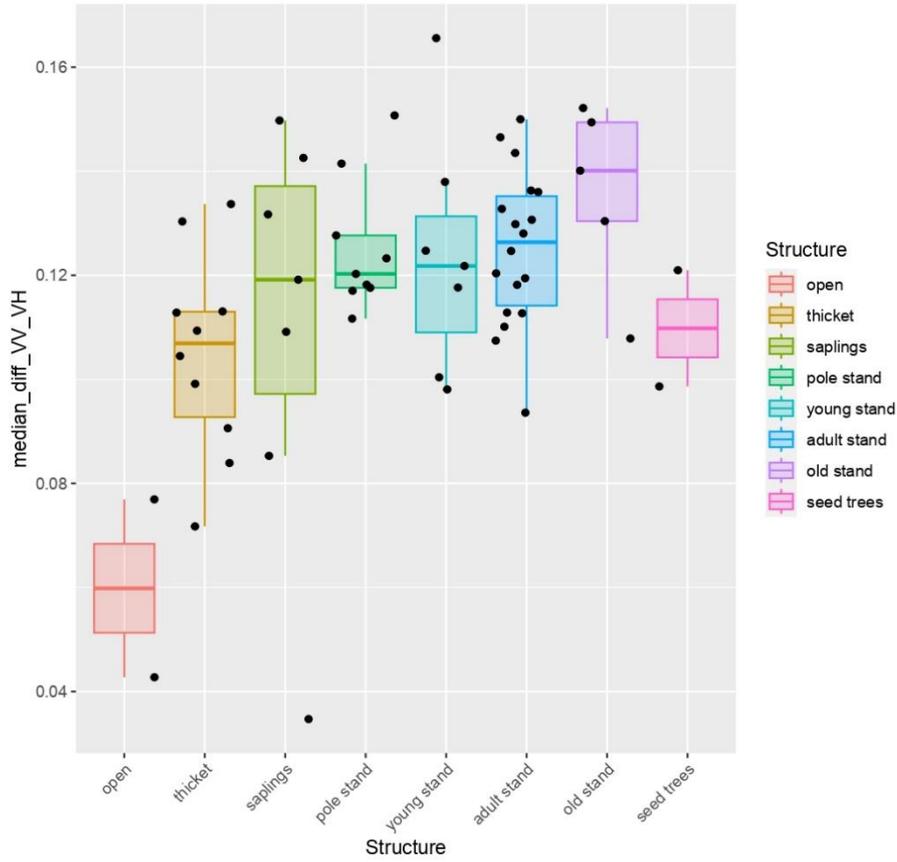
Indicateur RADAR med_winter_VH



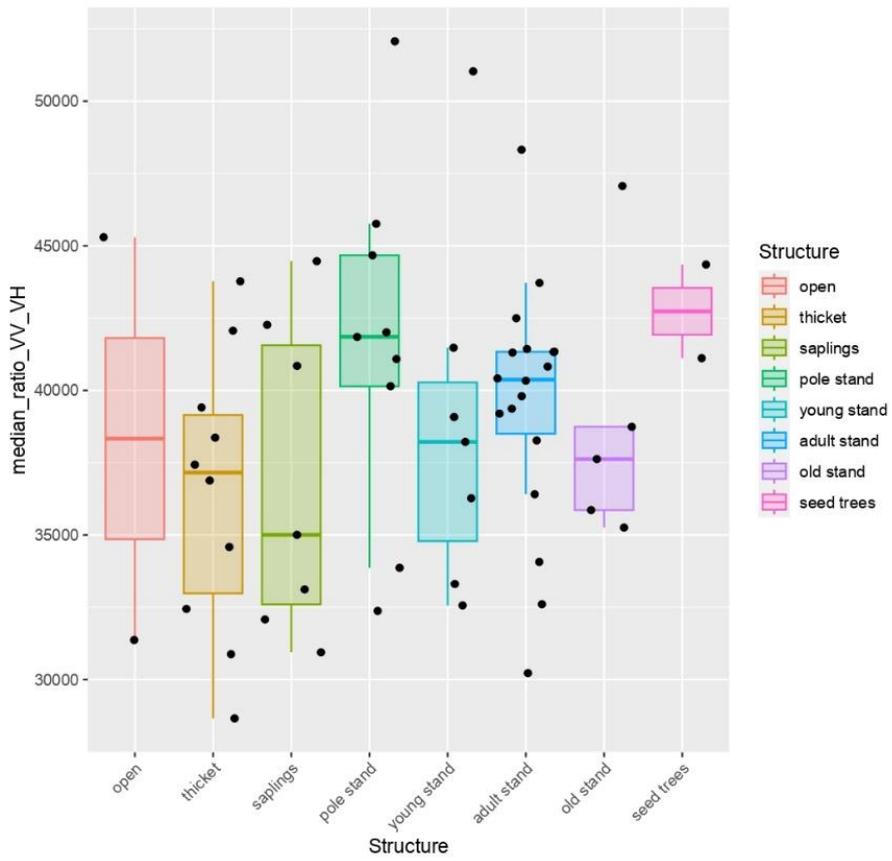
Indicateur RADAR med_winter_VV



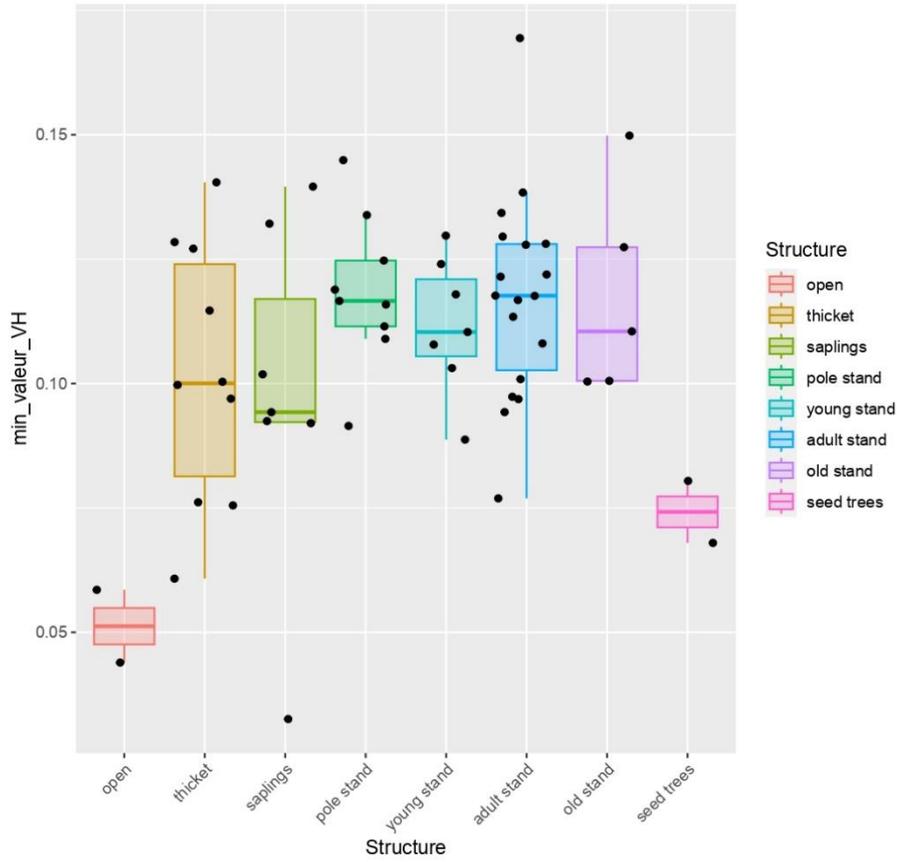
Indicateur RADAR median_diff_VV_VH



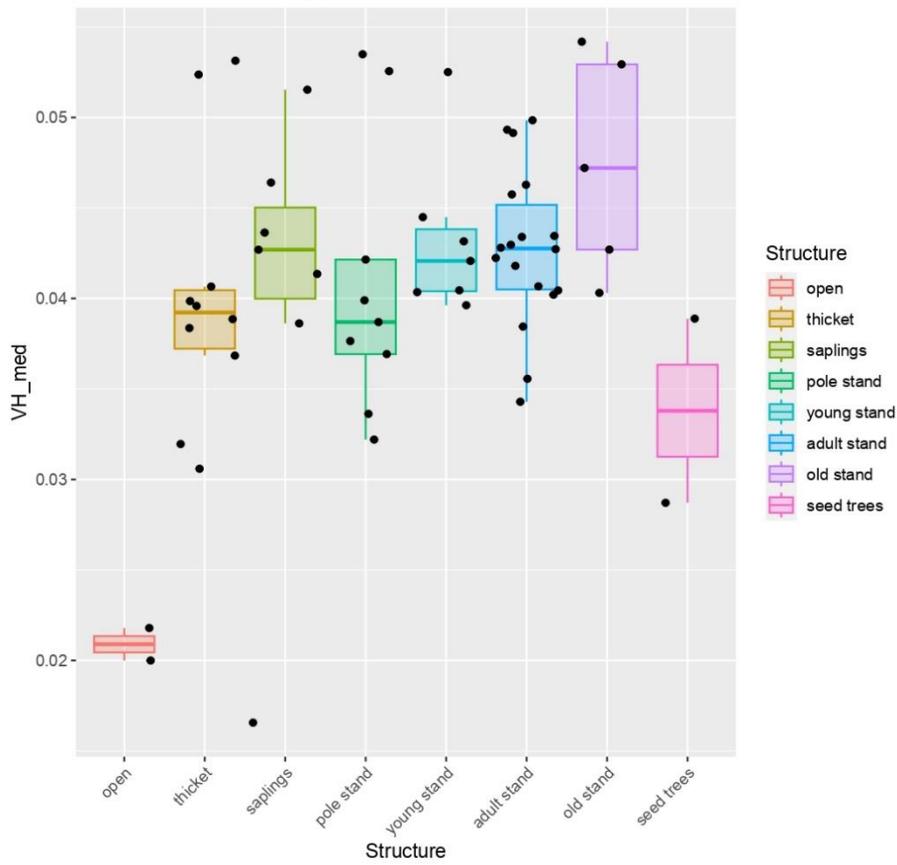
Indicateur RADAR median_ratio_VV_VH



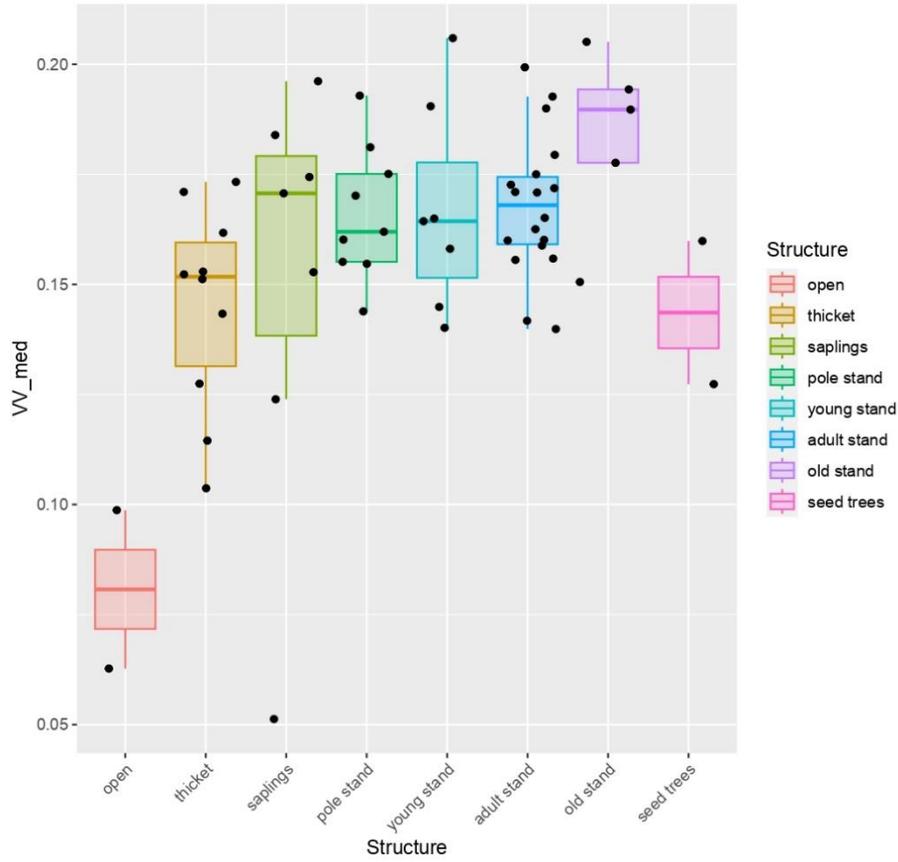
Indicateur RADAR min_valeur_VH



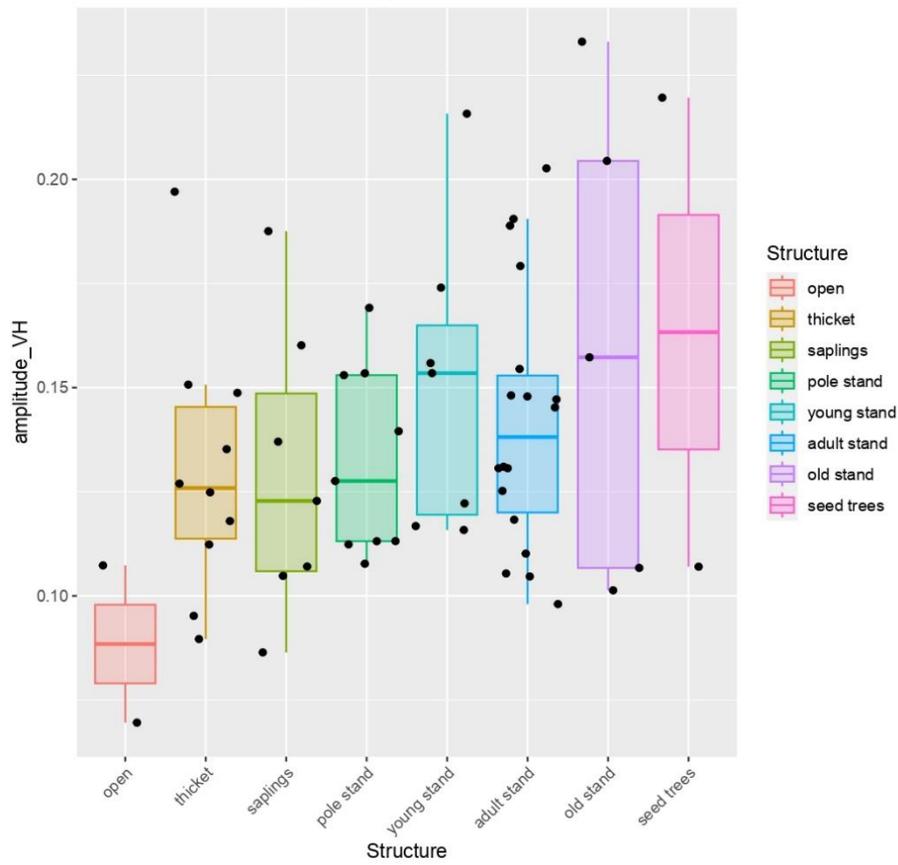
Indicateur RADAR VH_med



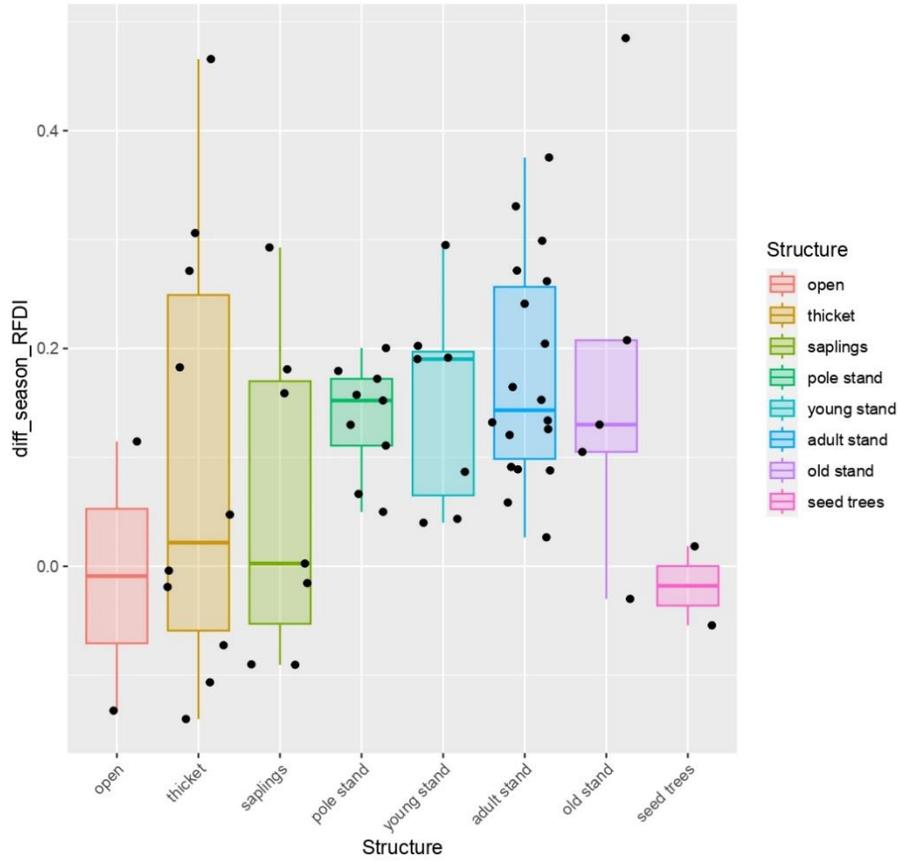
Indicateur RADAR VV_med



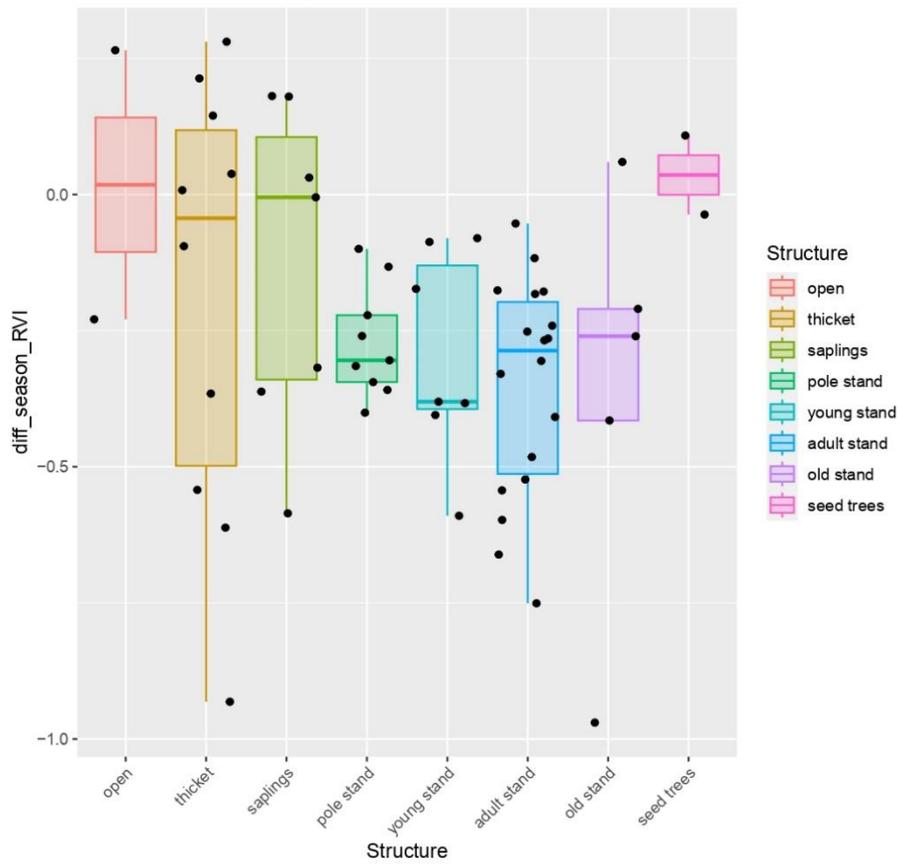
Indicateur RADAR amplitude_VH



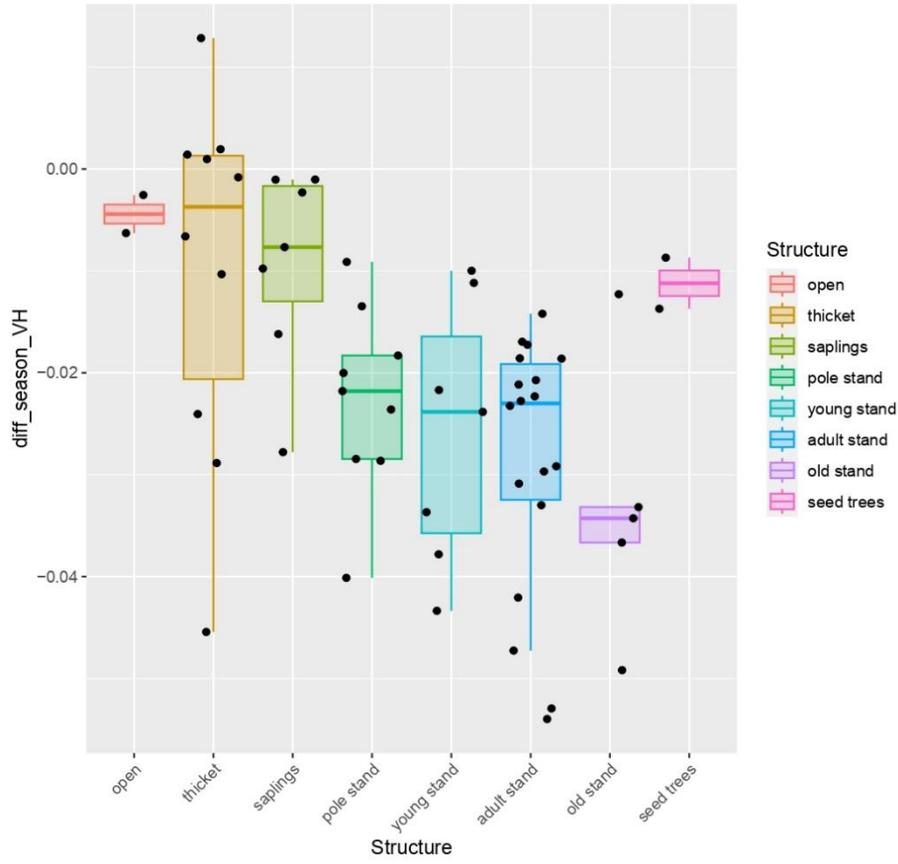
Indicateur RADAR diff_season_RFDI



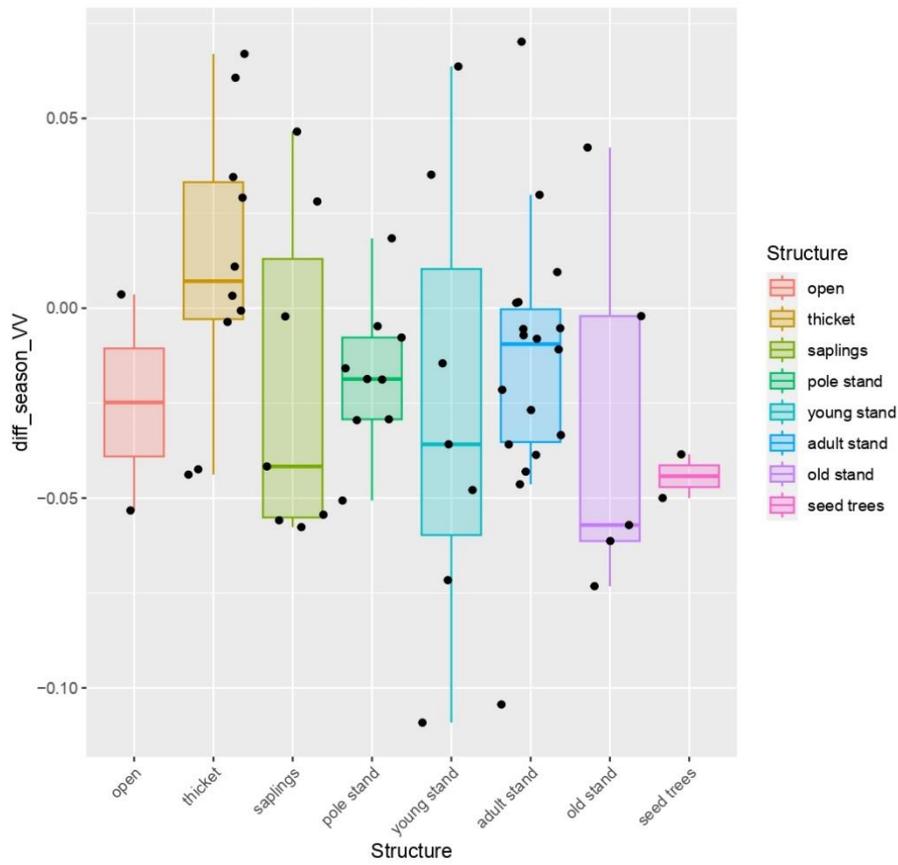
Indicateur RADAR diff_season_RVI



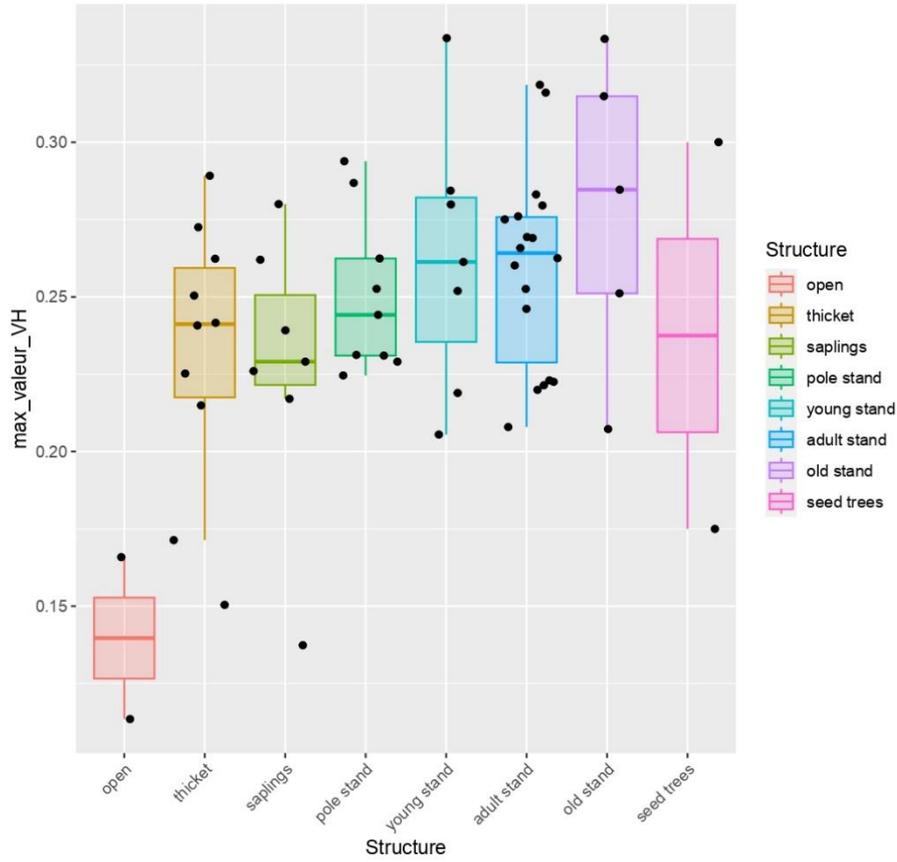
Indicateur RADAR diff_season_VH



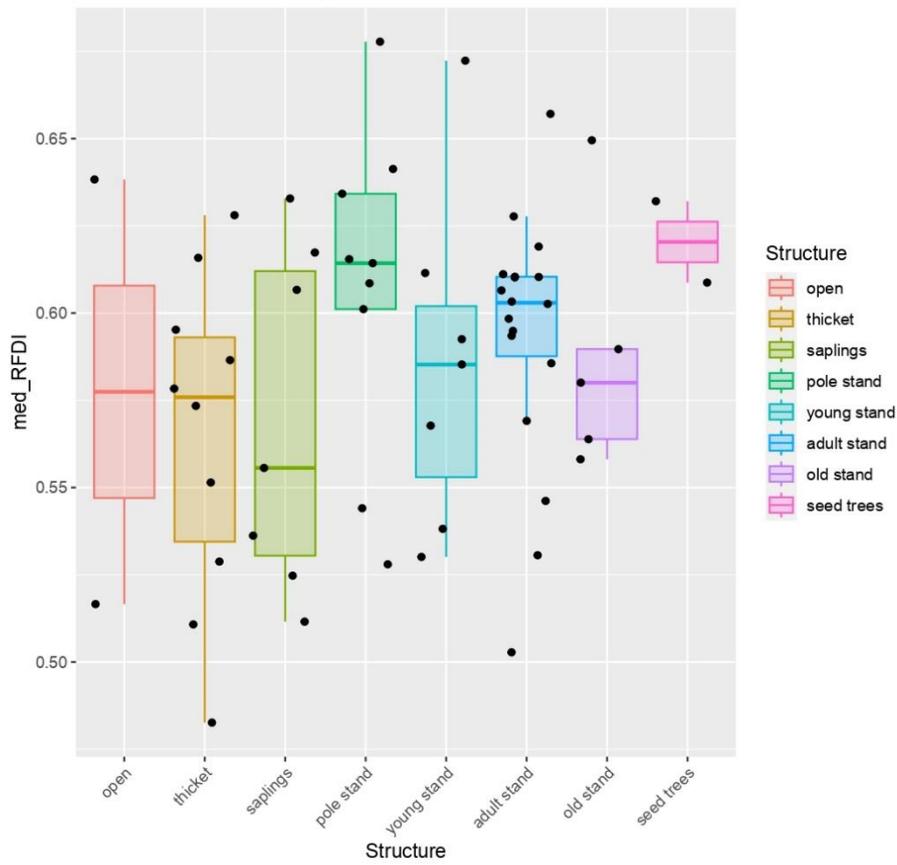
Indicateur RADAR diff_season_VV



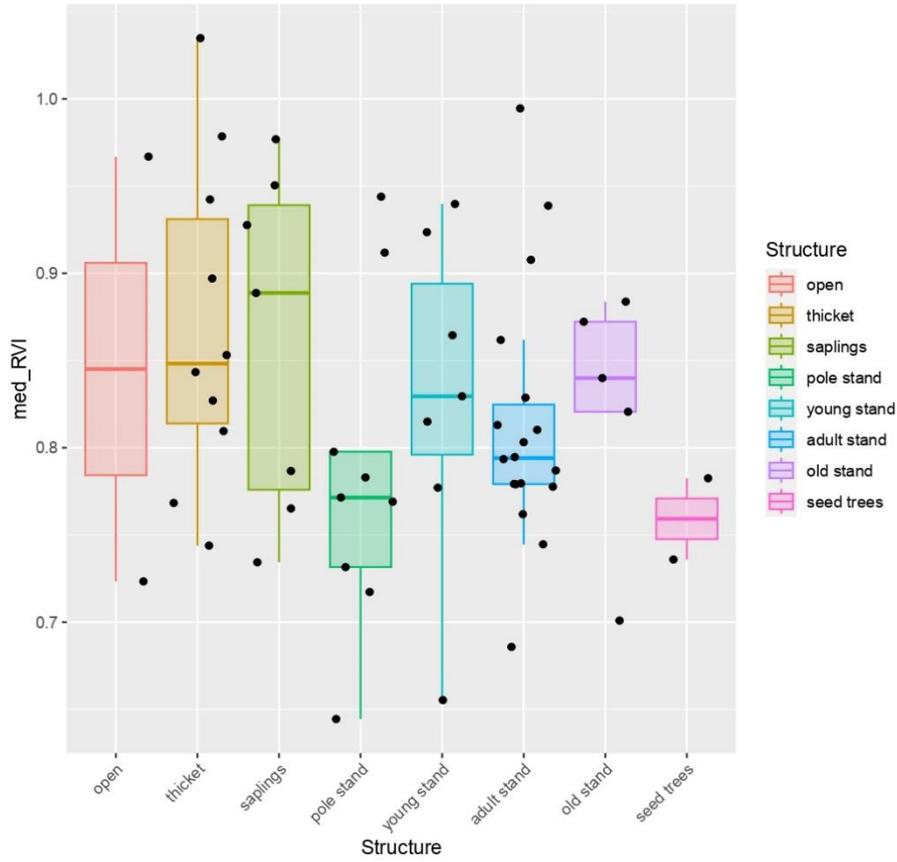
Indicateur RADAR max_valeur_VH



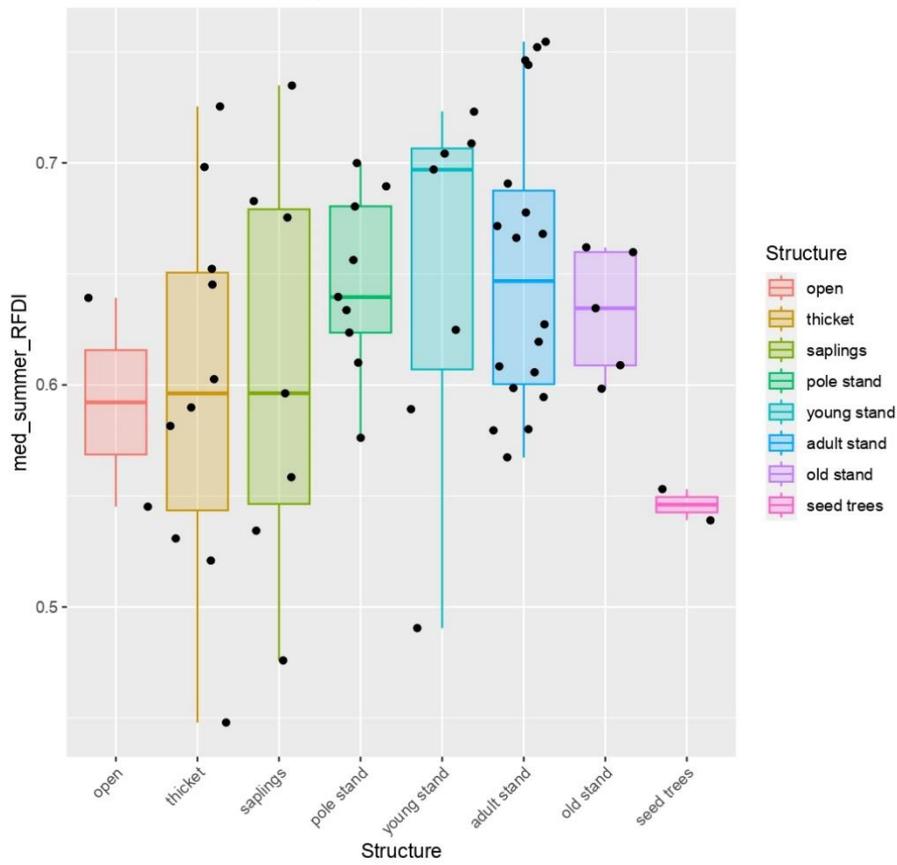
Indicateur RADAR med_RFDI



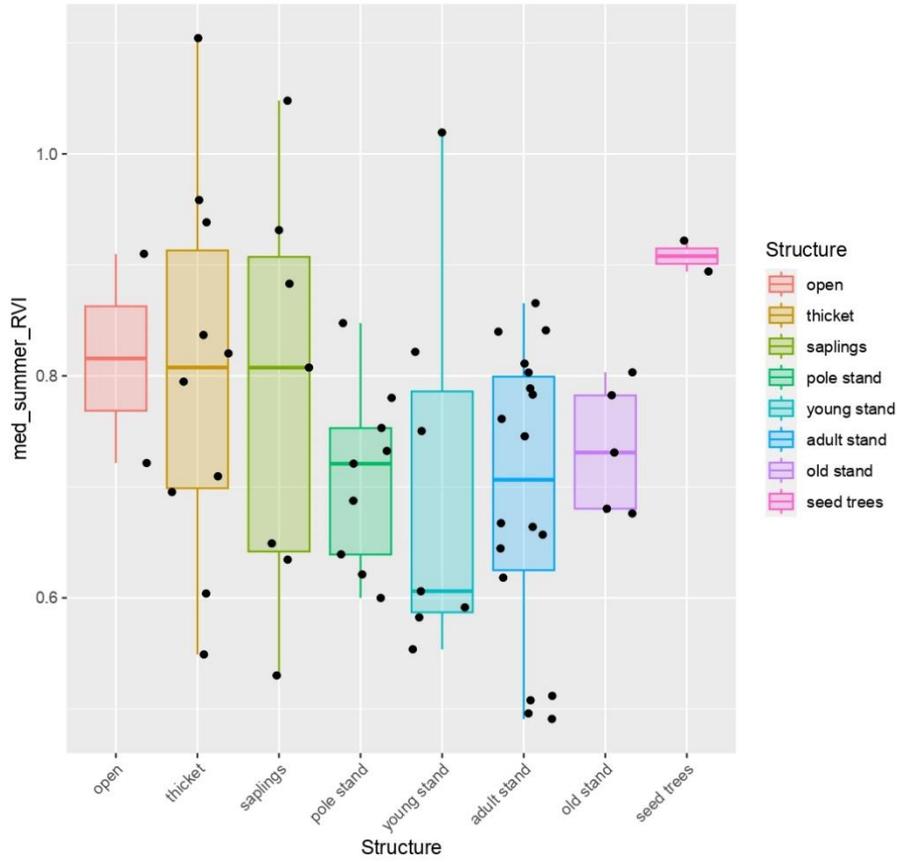
Indicateur RADAR med_RVI



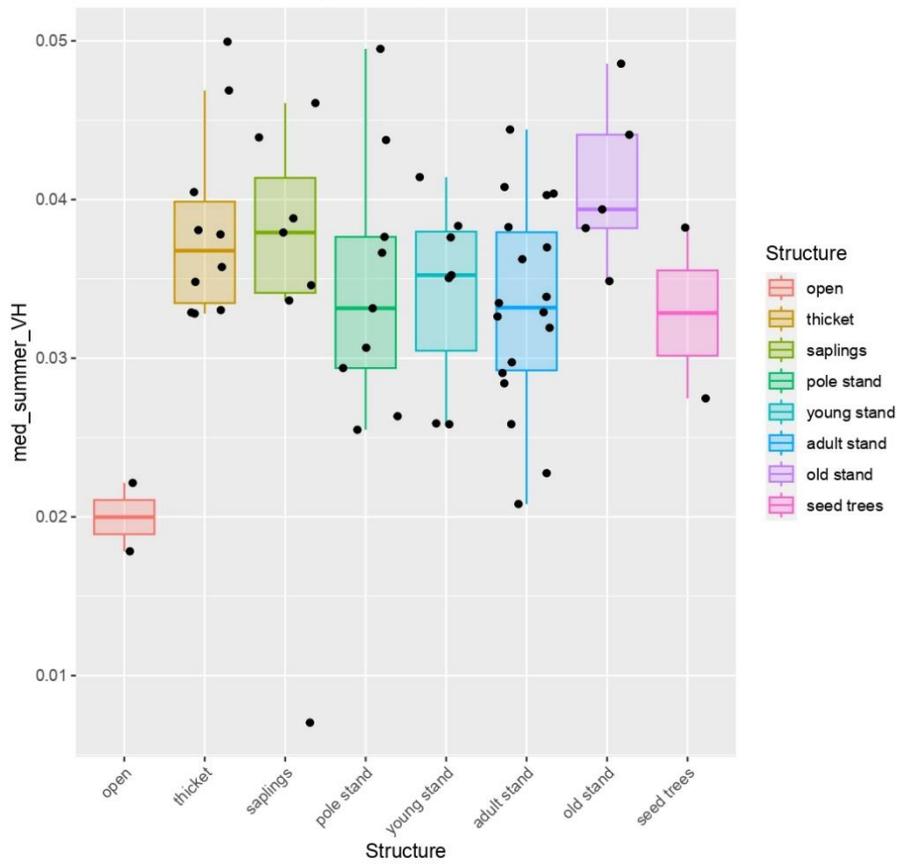
Indicateur RADAR med_summer_RFDI



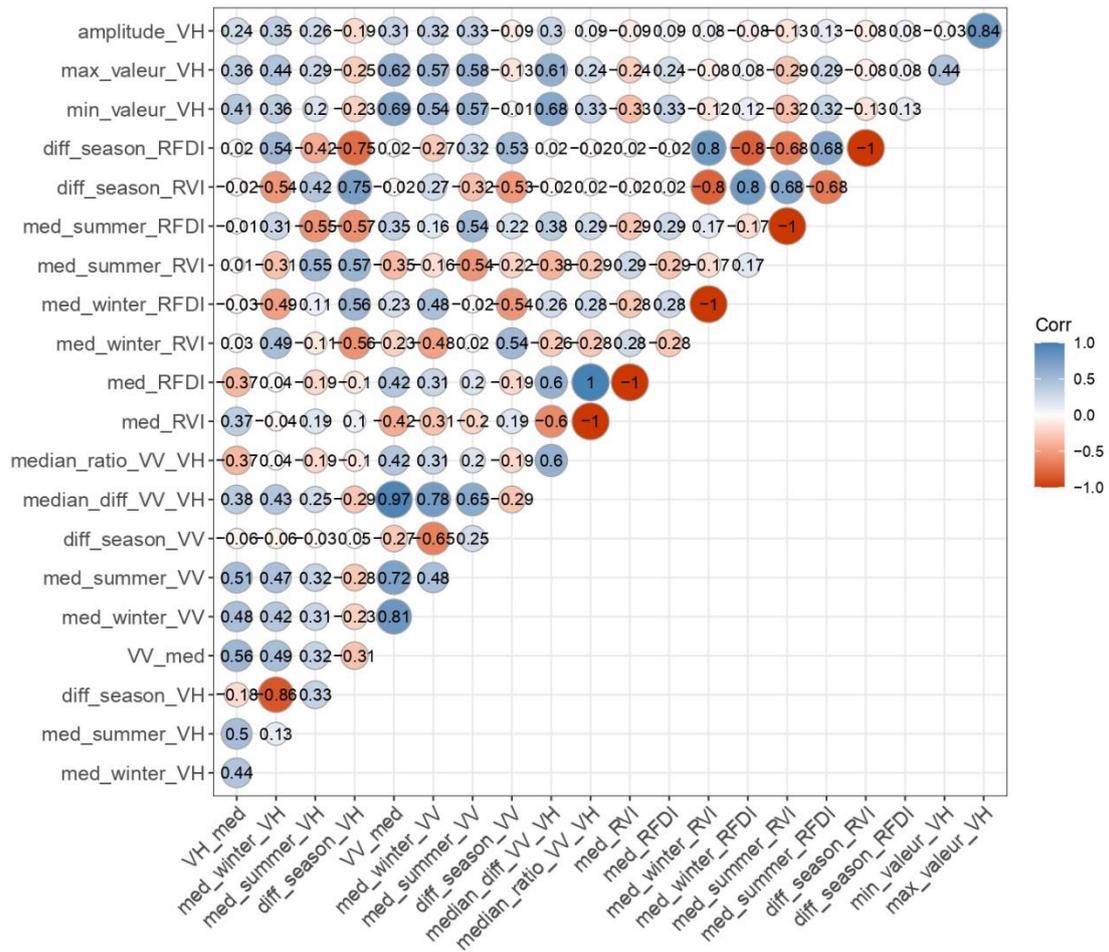
Indicateur RADAR med_summer_RVI



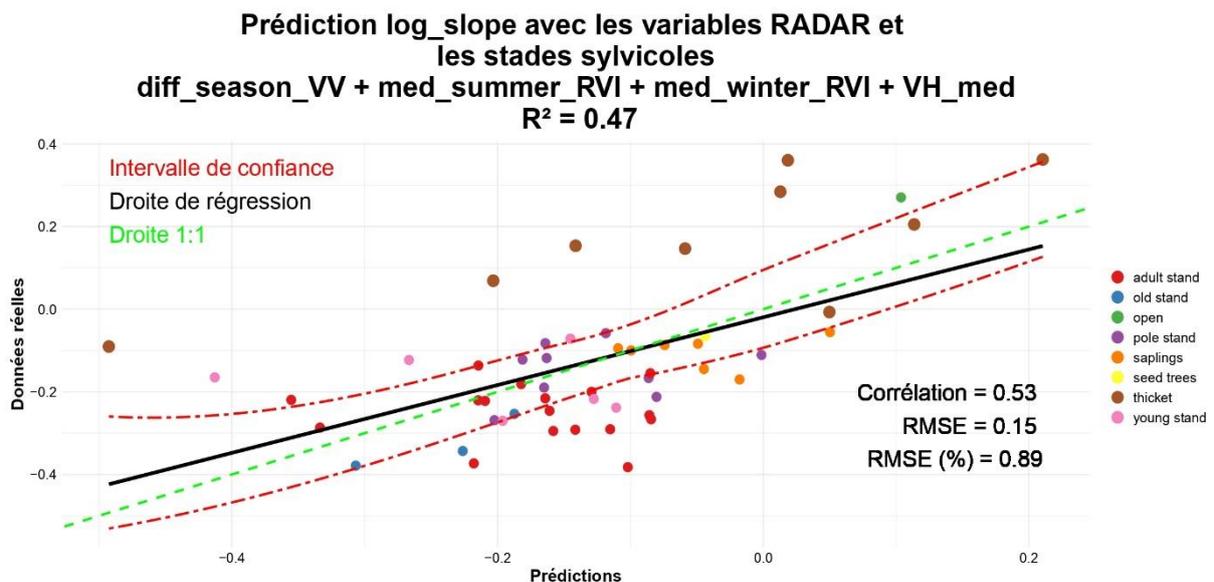
Indicateur RADAR med_summer_VH



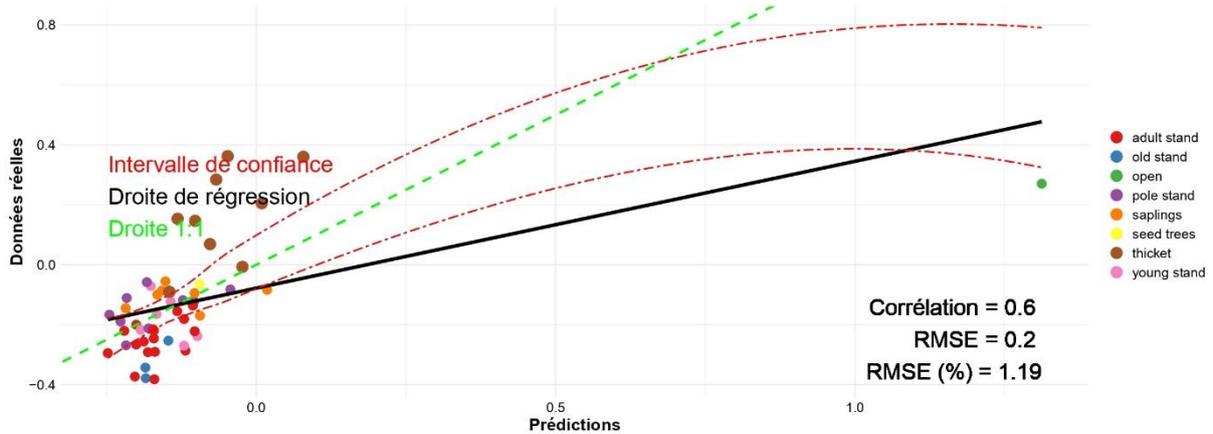
4. Corrélation entre les indicateurs RADAR



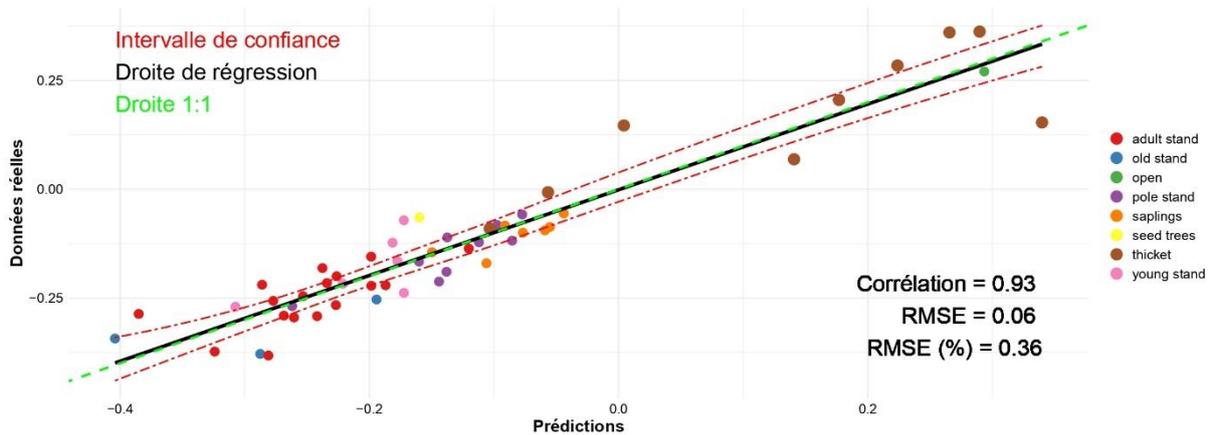
5. Régressions linéaires



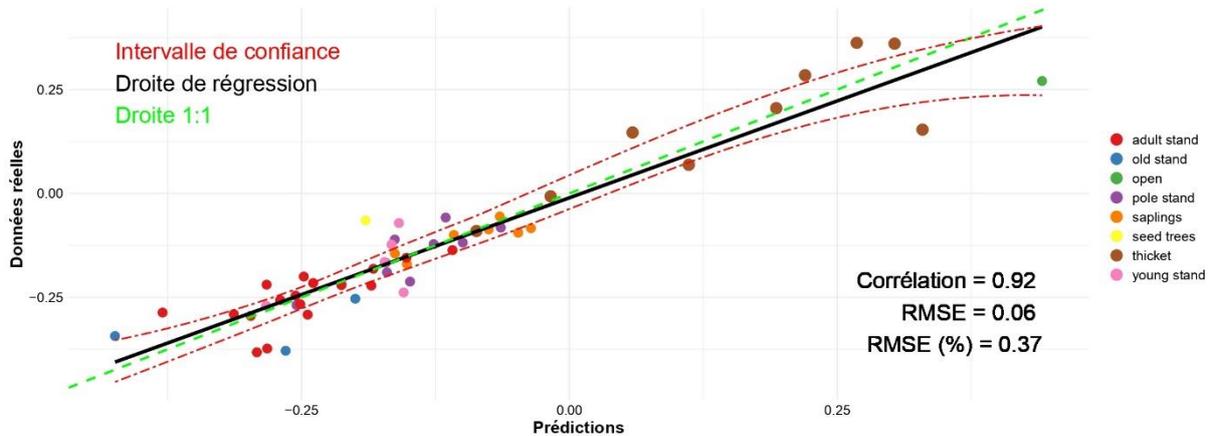
Prédiction log_slope avec les variables Optique et les stades sylvicoles
mean_NDVI + min_NDVI
R² = 0.44



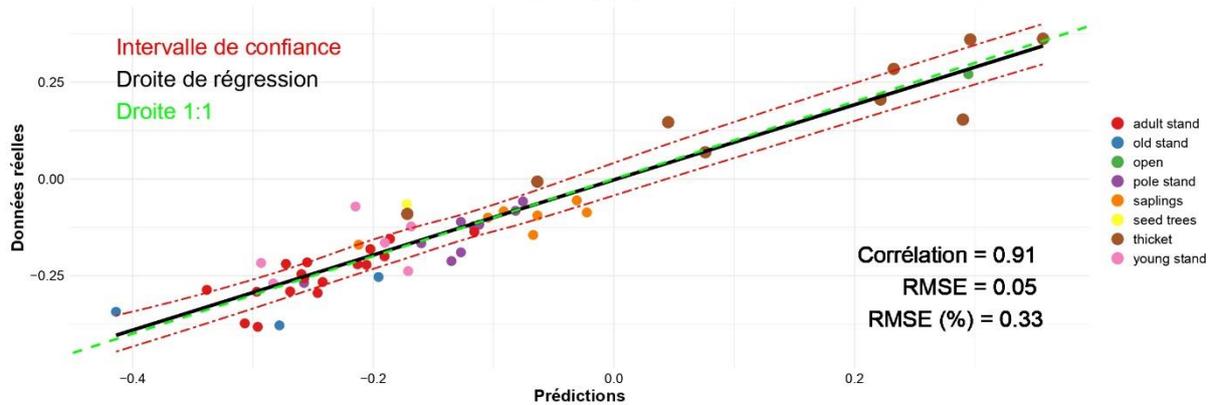
Prédiction log_slope avec les variables LiDAR et les stades sylvicoles
log_Hmax_5_m + PAI_5_m + VCI_5_m
R² = 0.91



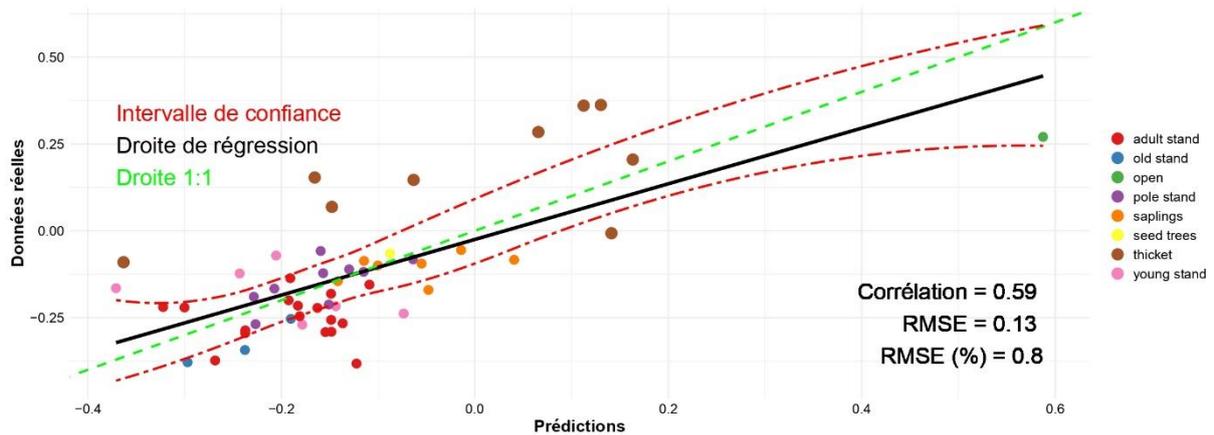
Prédiction log_slope avec les variables LiDAR et Optiques et les stades sylvicoles
amplitude_NDVI + log_Hmax_5_m + mean_NDVI + med_NDVI + PAI_5_m + VCI_5_m
R² = 0.93



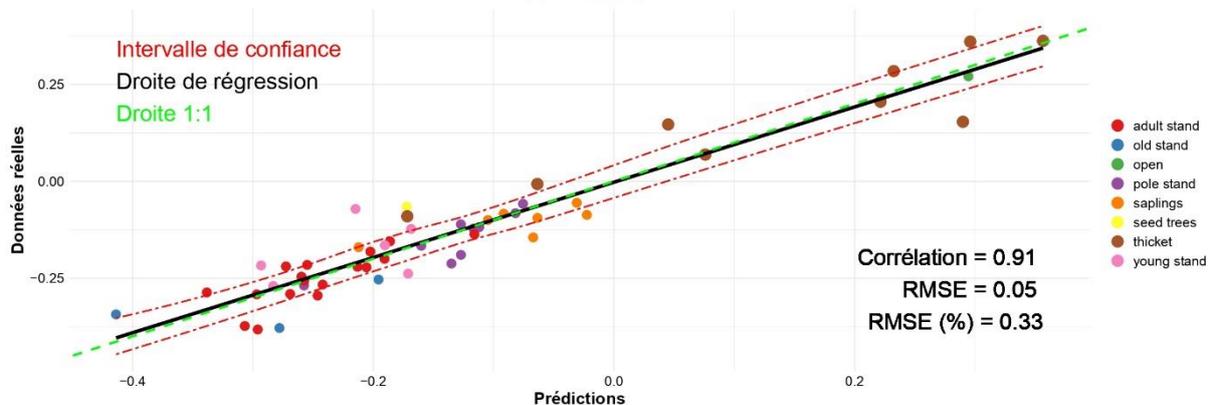
Prédiction log_slope avec les variables RADAR et LiDAR et les stades sylvicoles
diff_season_VV + log_Hmax_5_m + med_summer_RVI + med_summer_VH + med_winter_RVI + med_winter_VH + PAI_5_m + VCI_5_m
 $R^2 = 0.94$



Prédiction log_slope avec les variables RADAR et optique et les stades sylvicoles
diff_season_VV + med_summer_RVI + med_winter_RVI + min_NDVI + VH_med
 $R^2 = 0.61$

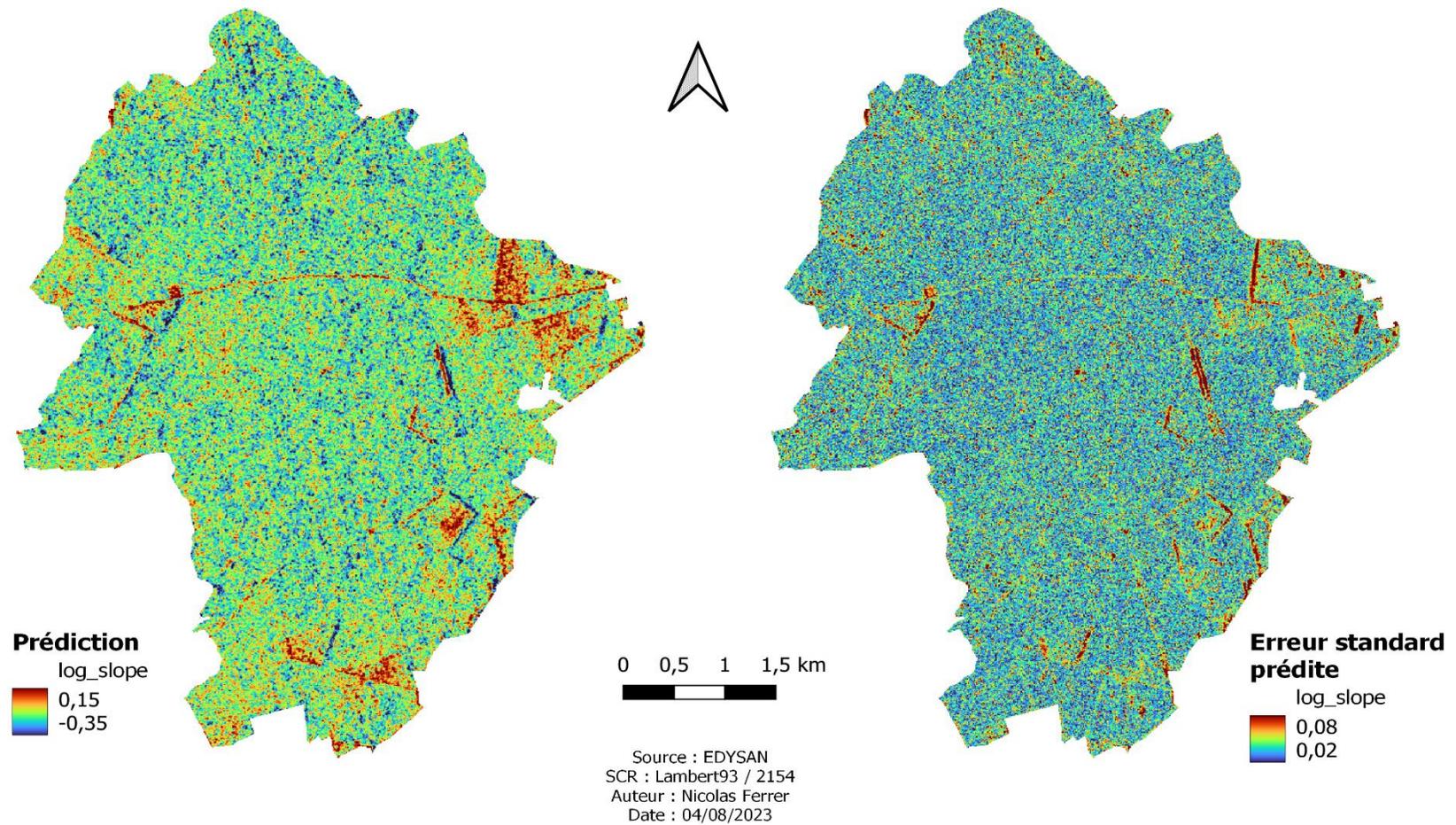


Prédiction log_slope avec les variables RADAR, LiDAR, Optique et les stades sylvicoles
diff_season_VV + log_Hmax_5_m + med_summer_RVI + med_summer_VH + med_winter_RVI + med_winter_VH + PAI_5_m + VCI_5_m
 $R^2 = 0.94$

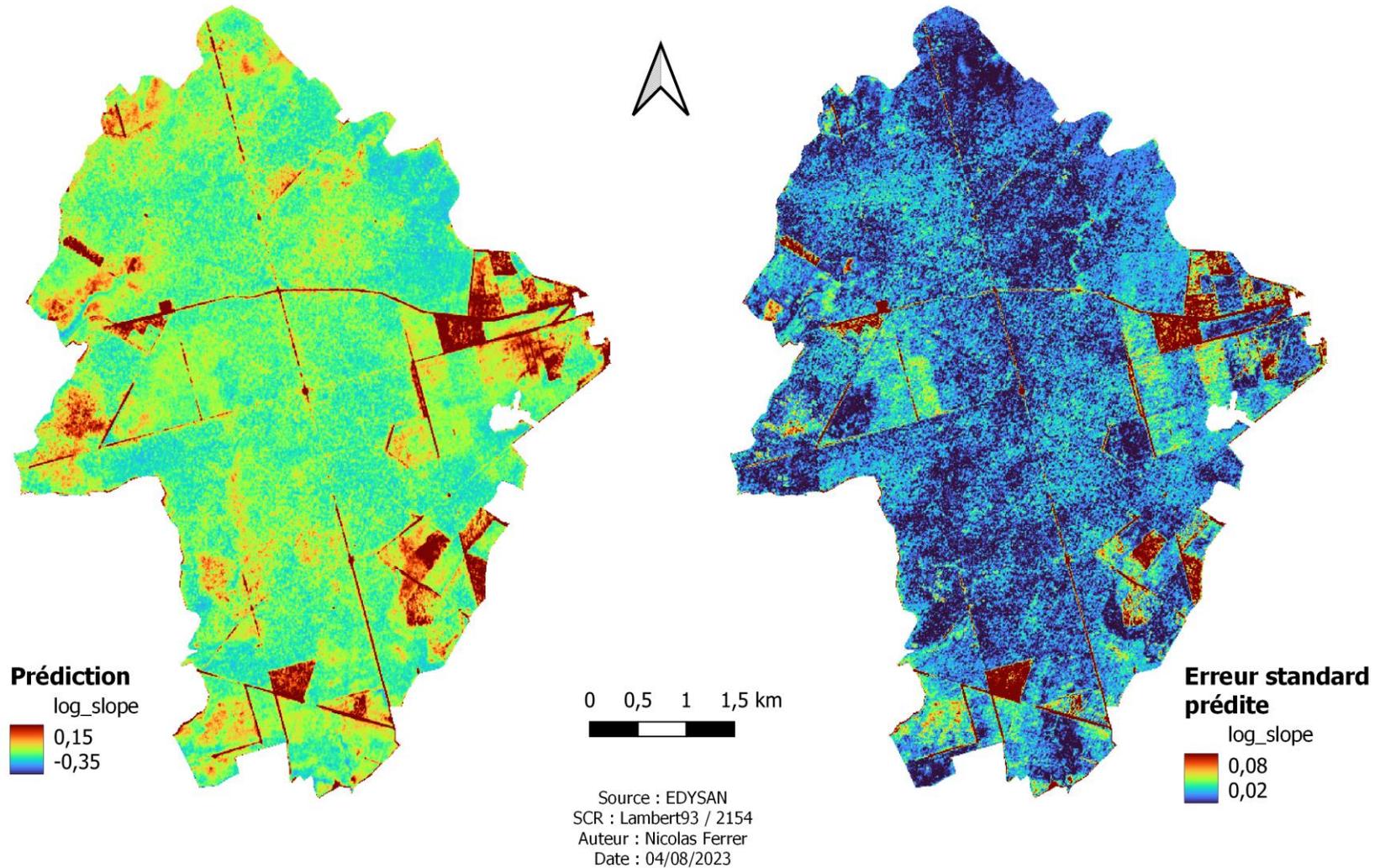


6. Prédiction du microclimat

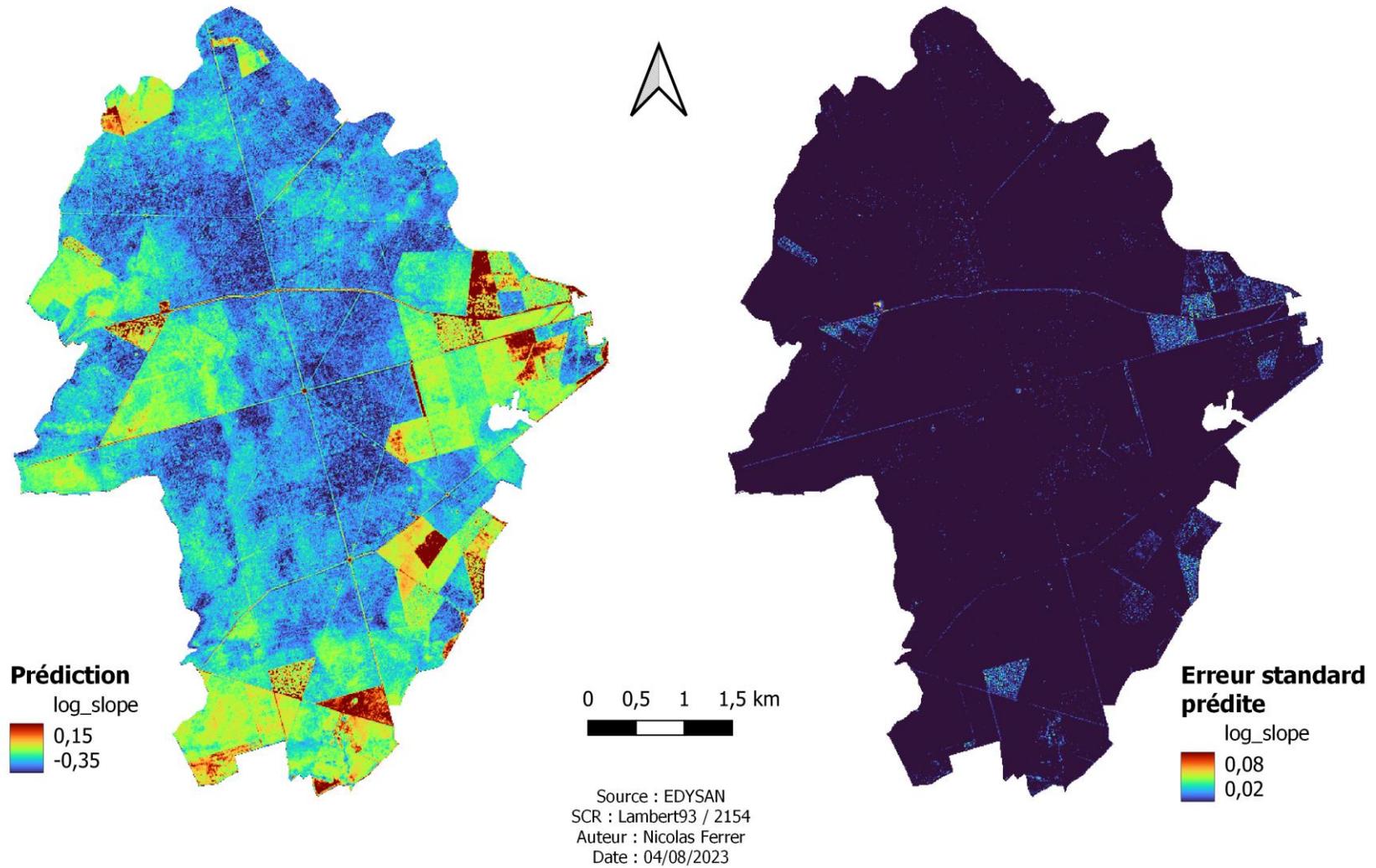
Prédiction du log_slope de la forêt de Blois en 2021 avec la combinaison des indicateurs RADAR



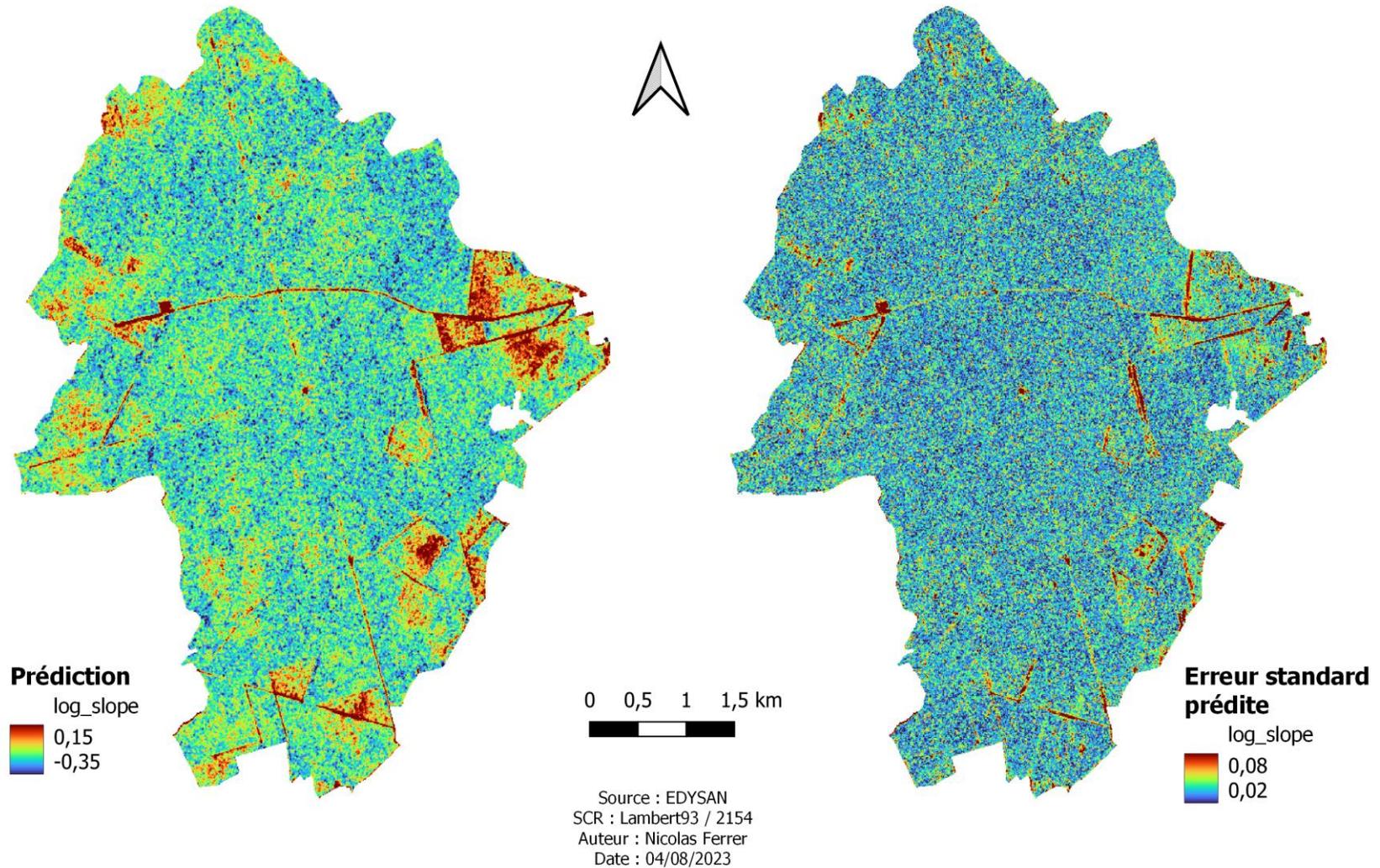
Prédiction du log_slope de la forêt de Blois en 2021 avec la combinaison des indicateurs Optique



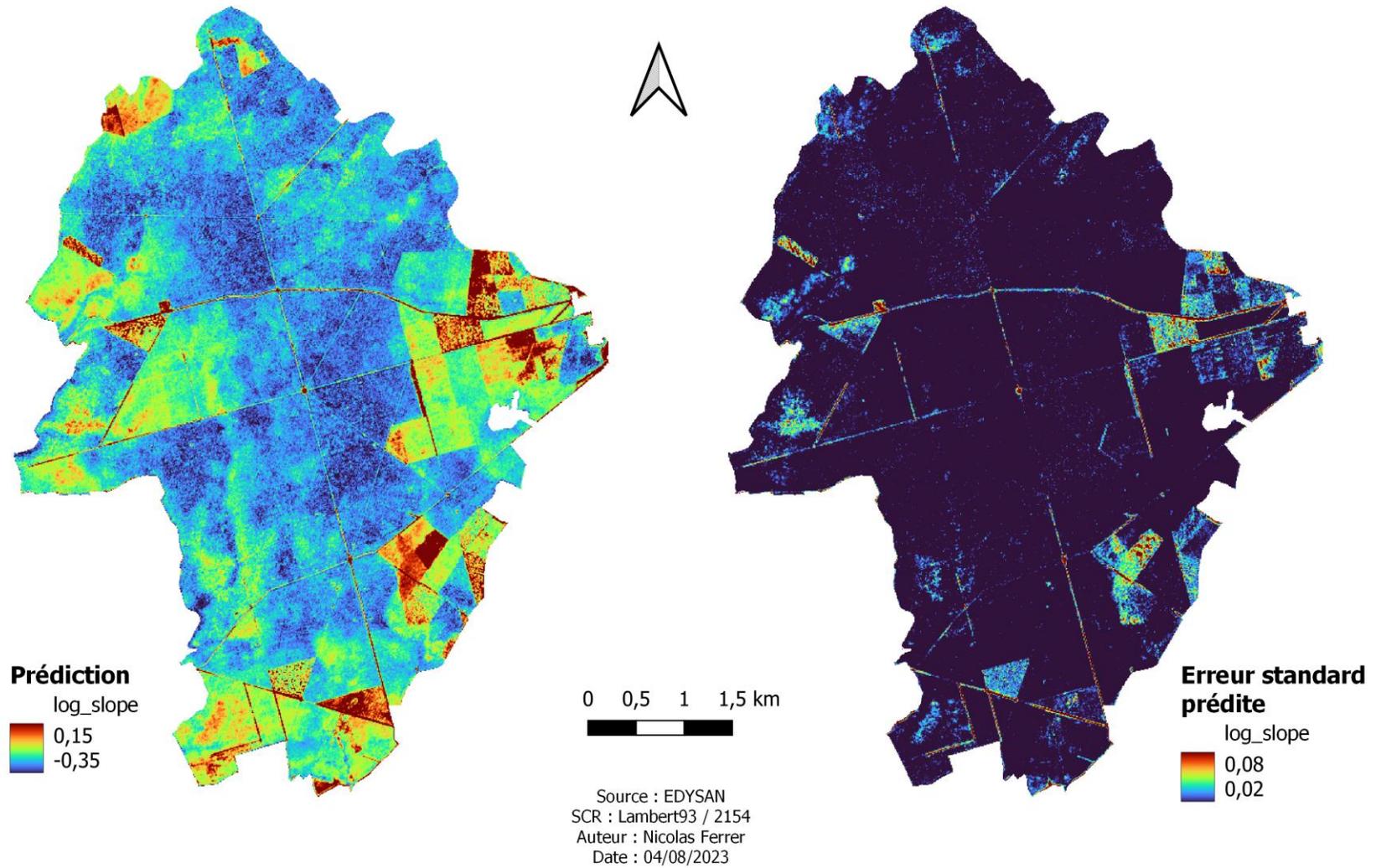
Prédiction du log_slope de la forêt de Blois en 2021 avec la combinaison des indicateurs LiDAR



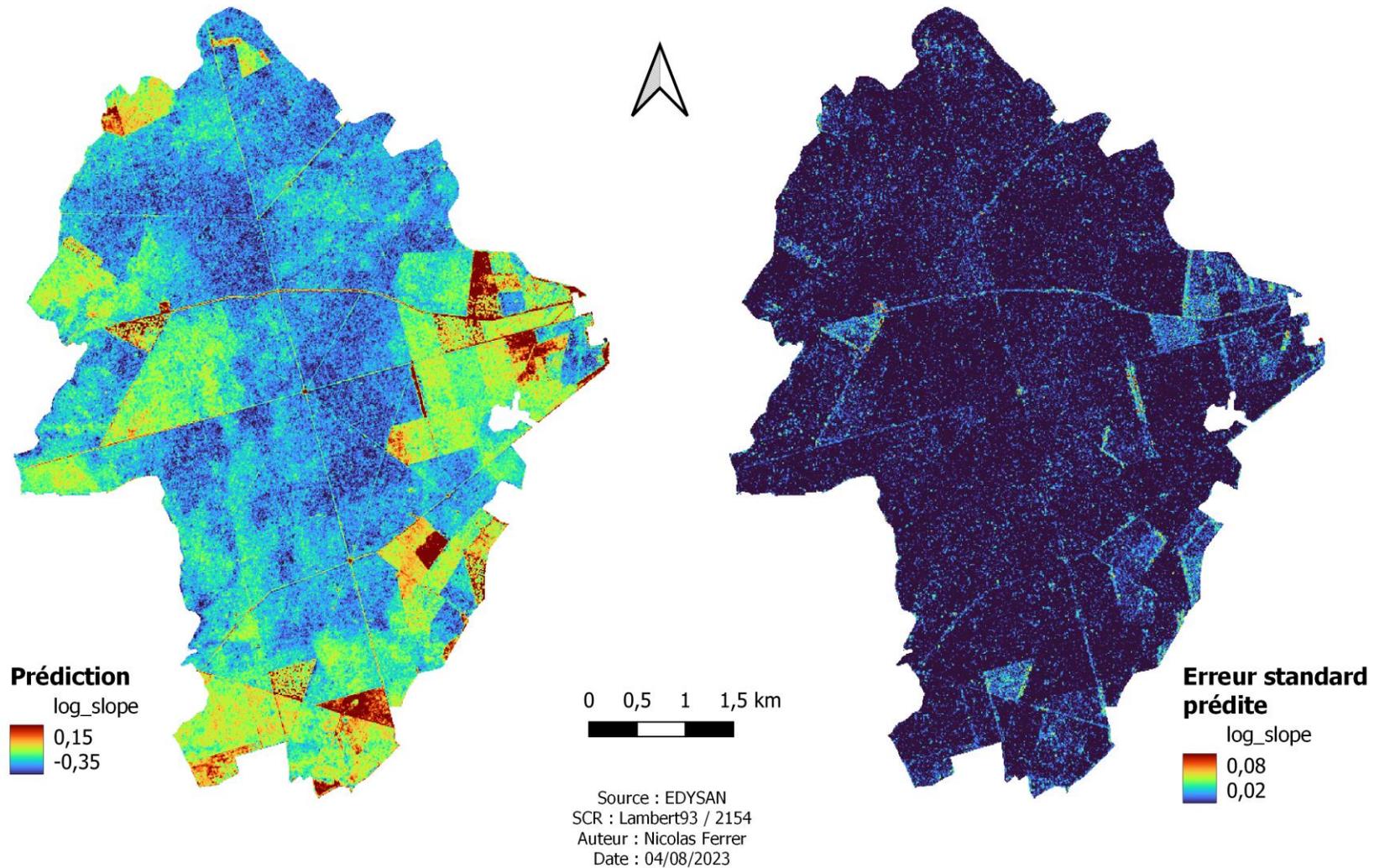
Prédiction du log_slope de la forêt de Blois en 2021 avec la combinaison des indicateurs RADAR et Optique



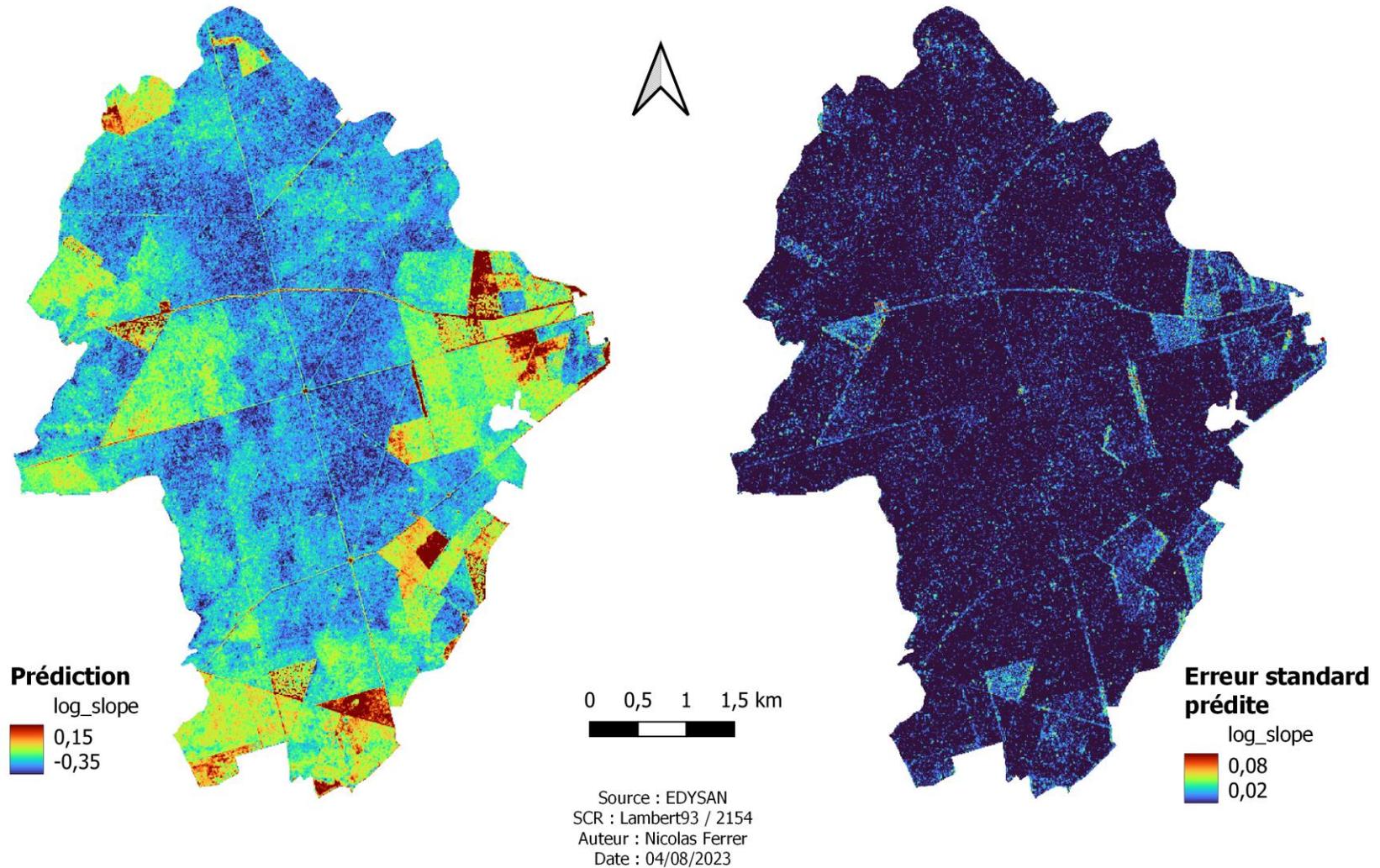
Prédiction du log_slope de la forêt de Blois en 2021 avec la combinaison des indicateurs LiDAR et Optique



Prédiction du log_slope de la forêt de Blois en 2021 avec la combinaison des indicateurs LiDAR et RADAR



Prédiction du log_slope de la forêt de Blois en 2021 avec la combinaison des indicateurs LiDAR, RADAR et Optique



Résumé

Les microclimats forestiers jouent un rôle essentiel dans la biodiversité et la résilience des écosystèmes forestiers. Ce mémoire explore la cartographie du microclimat forestier en utilisant trois types de données provenant de capteurs optiques, LiDAR et RADAR. Les résultats indiquent que les données LiDAR sont les plus performantes, suivies des données RADAR, et que la combinaison de ces données améliore les prédictions. De plus, l'analyse révèle que la polarisation VV du RADAR présente des variations saisonnières liées à la végétation et à l'humidité, tandis que les différentes structures de végétation influencent les coefficients de rétrodiffusion des polarisations VH et VV, montrant des variations significatives selon les stades sylvicoles. En fin de compte, l'intégration de données provenant de plusieurs capteurs permet d'améliorer la prédiction du microclimat, ce qui a des implications importantes pour la gestion des écosystèmes forestiers et l'adaptation aux changements climatiques.

Mots-clés : Microclimat, forêt, LiDAR, RADAR, optique, Sentinel-1, Sentinel-2, RSO

Abstract

Forest microclimates play an essential role in the biodiversity and resilience of forest ecosystems. This thesis explores the mapping of the forest microclimate using three types of data from optical sensors, LiDAR and RADAR. The results indicate that LiDAR data are the most efficient, followed by RADAR data, and that the combination of these data improves predictions. Moreover, the analysis reveals that the RADAR VV polarization shows seasonal variations related to vegetation and humidity, while the different vegetation structures influence the backscatter coefficients of the VH and VV polarizations, showing significant variations across forest stages. Ultimately, the integration of data from several sensors improves the prediction of the microclimate, which has important implications for forest ecosystem management and climate change adaptation.

Keywords : SAR, Sentinel-1, Sentinel-2, ALS, forest, microclimate, LiDAR, RADAR