



HAL
open science

Recherche d'indicateurs de télédétection caractérisant l'évolution végétative d'un verger de fruits à noyaux afin de moduler la dose de produits phytosanitaires

Florian Jeumart

► To cite this version:

Florian Jeumart. Recherche d'indicateurs de télédétection caractérisant l'évolution végétative d'un verger de fruits à noyaux afin de moduler la dose de produits phytosanitaires. Informatique [cs]. 2024. dumas-04787943

HAL Id: dumas-04787943

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04787943v1>

Submitted on 18 Nov 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.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE des SCIENCES AGRONOMIQUES
de BORDEAUX AQUITAINE

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex (1)



MEMOIRE de fin d'études
pour l'obtention du titre
d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro

Recherche d'indicateurs de télédétection caractérisant l'évolution
végétative d'un verger de fruits à noyaux afin de moduler la dose
de produits phytosanitaires

Jeumart, Florian

Spécialisation : AgroTIC

Étude réalisée à : CTIFL 97 boulevard Pereire 75017 PARIS et réalisé à
SudExpé – 517 chemin du Mas d'Asport – 30800 SAINT-GILLE

The French Ministry of Agriculture

**NATIONAL SCHOOL of AGRICULTURAL SCIENCES and ENGINEERING,
BORDEAUX AQUITAINE**

1, cours du Général de Gaulle - CS 40201 – 33175 GRADIGNAN cedex, France



MASTER THESIS

Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of

Agricultural Engineer, Bordeaux Sciences Agro

Identifying remote sensing indicators for characterizing the vegetative evolution of a stone fruit orchard to modulate the dose of phytosanitary products

Jeumart, Florian

Specialisation: AgroTIC

Study completed at: CTIFL 97 boulevard Pereire 75017 PARIS and was done at
SudExpé – 517 chemin du Mas d'Asport – 30800 SAINT-GILLES

Résumé

La réduction de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques est une priorité du plan national Ecophyto II+. Adapter la dose de produits en fonction de l'évolution végétative des cultures est une piste pour réduire leur usage. Afin de qualifier la végétation, des indicateurs mesurés sur le terrain sont utilisés, le Leaf Wall Area et le Tree Row Volume. Pour les vergers de pêcheurs, les différences de conduites et les biais de ces mesures ne permettent pas d'obtenir un consensus concernant l'indicateur qualifiant le mieux la végétation. Afin de caractériser l'évolution végétative d'une parcelle, la piste de la télédétection est creusée. Le NDVI a été choisi en amont de cette étude pour réaliser la modulation de dose sur la saison 2024. Nous avons pu observer l'évolution des indicateurs NDVI, LAI, FAPAR et FCOVER d'une parcelle de nectarines sur les années 2023 et 2024. Leurs valeurs ont été utilisées afin de développer des scénarios de réduction de dose. Le FCOVER et le LAI se sont avérés être de bons candidats, bien que la facilité d'obtention du NDVI reste un avantage concernant son utilisation par des producteurs ou conseillers. Une réduction de 21% des IFT a été réalisée sans affecter la couverture phytosanitaire du verger et le rendement.

Mots clés : Télédétection – Volume foliaire – optimisation de la pulvérisation – NDVI – LAI

Abstract

Reducing the use of phytopharmaceutical products is the priority of the Ecophyto II+ national plan. Adapting product doses to the vegetative development of crops is one way of reducing their use. To qualify vegetation, we use field-measured indicators: Leaf Wall Area and Tree Row Volume. In the case of peach orchards, differences in management and biases of these measurements mean that it is not possible to reach a consensus on which indicator best qualifies vegetation. In order to characterize the vegetative evolution of a plot, remote sensing was explored. The NDVI was chosen at the start of this study as the basis for dose modulation over the 2024 season. We were able to observe the evolution of the NDVI, LAI, FAPAR and FCOVER indicators of a nectarine plot over the years 2023 and 2024. Their values were used to develop dose reduction scenarios. FCOVER and LAI proved to be good candidates, although the ease of obtaining NDVI remains an advantage for use by growers or advisors. A 21% reduction in IFT was achieved without affecting orchard coverage or yield.

Key words: Remote sensing – Leaf volume – spray optimization – NDVI - LAI

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné et aidé au cours de ce stage de fin d'étude, mais également au cours de ces trois dernières années passées à Bordeaux Sciences Agro. Ces années ont été pour moi un énorme enrichissement personnel, professionnel mais surtout relationnel.

Je voudrais remercier mes maîtres de stage ALISON Bertrand et LOUARGANT Marine de m'avoir accompagné jusqu'au bout de ce mémoire, d'une bonne humeur sans faille et d'une grande pédagogie sur un milieu que je ne connaissais pas beaucoup. J'ai grandement appris avec eux durant ces 6 mois, et ce fut un réel plaisir de travailler à leurs côtés. Merci à tous les deux pour la confiance et les responsabilités que vous m'avez accordé.

Je souhaite également remercier l'équipe pédagogique AgroTIC pour leur encadrement, leur envie de partager leurs connaissances, et pour avoir fait de cette année de spécialisation l'une de mes années scolaires les plus enrichissantes et plaisante à suivre.

Je remercie ma tutrice DJAFOUR Sarah pour nos échanges, ses conseils et son aide apportée à la rédaction de ce mémoire.

Merci à toute l'équipe de SudExpé pour ces 6 mois de stage. J'ai pris beaucoup de plaisir à faire partie, pour peu de temps, de SudExpé, à participer aux calibrages, aux notations divers et variées, à manier le diable pour transporter les caisses...mais merci également, parce qu'ils ont tous été d'une profonde gentillesse envers moi.

Merci aux autres stagiaires qui ont partagé un bout de ces 6 mois avec moi. Nos nombreux débats sur le Moyen-Âge et sur les goûts culinaires questionnables de certains vont me manquer.

Merci à tout mon entourage, à ma mère qui a relu quelques phrases de ce mémoire pendant que mon père regardait des « TikTak », aux copains de Bordeaux qui le resteront à vie, et aux copains du collège qui le sont restés. Merci les Zzob, merci le Gang, merci la Maison Of Retraite, merci Bogoss Land et merci Ferris.

Mais surtout, et elle se reconnaîtra, merci à toi de faire de moi un petit chanceux dans cette vie.

Merci à tous !

Table des matières

1.	Contexte de l'étude.....	2
1. 1	La culture de la pêche/nectarine en France	2
	La pêche est une culture d'importance à l'échelle nationale	2
	Les pêchers sont sensibles à de nombreux bioagresseurs.....	3
	La pêche/nectarine est le 2 ^{ème} fruit le plus traité en France	3
1. 2	Réglementation des produits phytosanitaires en France	4
	La dose de produits est peu adaptée aux cultures de fruits à noyaux.....	4
	L'importance de se concentrer sur la réduction des produits phytosanitaires	5
1. 3	Approche sur la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires	6
	Ecophyto II + : projet structurant afin de réduire les doses de produits.....	6
	Réduire l'IFT en adaptant la dose en fonction de la végétation.....	6
	Les indicateurs de végétation permettant de caractériser la végétation	7
	Le LWA et le TRV présentent des biais à leur utilisation	8
1. 4	La télédétection en agronomie.....	9
	Caractéristiques spectrales des plantes : comment l'imagerie satellite capte les propriétés physiologiques du végétal.....	9
	Définitions et présentation des concepts scientifiques	10
	Les indices de végétation.....	11
	L'intérêt d'utiliser la télédétection pour la gestion des cultures	12
	Les potentiels freins à leur utilisation en arboriculture	13
1. 5	Le projet ADOPA : définition du stage et de la problématique	14
	L'organisme porteur du projet.....	14
	Le projet ADOPA	15
2.	Matériel et méthode.....	17
	Protocole d'acquisition des images satellites.....	17
	Critères de recherche et d'acceptation d'un indicateur	18
	Protocole d'obtention des valeurs de NDVI	18
	Protocole de validation des indicateurs sur les données terrain.....	19
	Analyse des données.....	20
	Scénarios et modalités étudiées.....	21
	Evaluation phytosanitaire des vergers	22
	Notations avant récolte et post-récolte	23
	Evaluation économique et marge d'acceptation	24

3.	Résultats.....	24
	Résultats de l'année 2024	25
	Comparaison avec l'année 2023	30
	Mesures de drones.....	33
	Scénarios de modulation de la dose avec les indicateurs prospectés	34
	Résultats phytosanitaires et économiques de la modulation de dose en 2024.....	37
4.	Discussion.....	40
4.1	Discussion des résultats.....	40
	Discussion concernant le choix du LAI, FAPAR et FCOVER à étudier.....	40
	Discussion sur les résultats de calculs d'indicateurs de végétation	40
	Discussion sur les mesures de TRV de LWA comme indicateurs de végétation.....	42
	Discussion sur les scénarios de modulation de dose obtenus avec les indicateurs de télédétection	42
	Discussion des résultats phytosanitaires de la parcelle I9	43
4.2	Discussion de la méthode	44
4.3	Perspectives	45

Table des figures

Figure 1 : Répartition de la production de pêches et nectarines par département en 2019	2
Figure 2 : Représentation du Leaf Wall Area (LWA) en arboriculture.....	4
Figure 3 : Verger de pêcheurs conduit en gobelet (ou « double Y ») à gauche et conduit en haie fruitière (ou « palmette ») à droite.....	5
Figure 4 : Représentation du TRV (Tree Row Volume) et du LWA (Leaf Wall Area) sur verger de pêches.....	7
Figure 5 : schéma d'une coupe transversale de feuille de dicotylédone	9
Figure 6 : Spectres de réflectance de différents types de végétation verte (grass : herbes, walnut : noyer, fir : sapin) et pour une végétation herbacée jaunie (Dry, yellowed grass)	10
Figure 7 : Représentation des positions des 13 bandes spectrales du satellite Sentinel-2 ainsi que de leur résolution spatiale en mètres en fonction de la longueur d'onde en nanomètre.....	11
Figure 8 : Image satellite de SudExpé le 06 août 2024 (Copernicus Browser, 2024).....	13
Figure 9 : Image satellite de SudExpé le 24 août 2024 (Copernicus Browser, 2024).....	13
Figure 10 : Le site internet Copernicus Browser (Florian Jeumart, 2024)	17
Figure 11 : Schéma de la parcelle 19, parcelle d'intérêt du projet	19
Figure 12 : Données exportées par le logiciel SNAP Toolbox concernant les indices de végétation.....	25
Figure 13 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2024 sur la parcelle 19 conduite en gobelet associée à ses travaux.....	26
Figure 14 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2024 sur la parcelle 19 conduite en haie fruitière associée à ses travaux.....	27
Figure 15 : Graphique de l'évolution des inter-rangs enherbés associé aux travaux. L'inter-rang 6-7 est un inter-rang de la parcelle 4 (conduite en haie) et l'inter-rang 10-11 est un inter-rang de la parcelle 3 (conduite en gobelet).....	28
Figure 16 : Boxplot de l'évolution du TRV sur la saison 2024, entre le début de végétation (février) et la fin de végétation (juin) sur les 10 arbres en gobelet et 10 arbres en haie fruitière de la parcelle 19.....	29
Figure 17 : Boxplot de l'évolution du LWA sur la saison 2024, entre le début de végétation (février) et la fin de végétation (juin) sur les 10 arbres en gobelet et 10 arbres en haie fruitière de la parcelle 19.....	29
Figure 18 : Graphique de l'évolution des indicateurs TRV et LWA entre le début de végétation (février) et la fin de végétation (août) sur la parcelle 19 en 2023.	30
Figure 19 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2023 sur la parcelle 19 conduite en gobelet associée à ses travaux.....	31
Figure 20 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2024 sur la parcelle 19 conduite en haie fruitière associé à ses travaux.. ...	32
Figure 21 : Courbes de corrélation entre les mesures de volume en 3D effectuées par photogrammétrie et les valeurs d'indicateurs aux dates correspondantes.....	33
Figure 22 : Calcul des IFT (Indice de Fréquence de Traitement) des différents scénarios de modulation de la dose de produits sur la saison 2024. L'IFT du scénario avec le NDVI est calculé avec la dose appliquée par les applicateurs et non la dose du NDVI théorique.....	37
Figure 23 : NDVI mesuré depuis un satellite PlanetScope (à gauche) et NDVI mesuré depuis un satellite Sentinel-2 (à droite).	45

Table des tableaux

Tableau 1 : Exemples de bioagresseurs fréquemment observés en vergers de culture de pêche/nectarine.....	3
Tableau 2 : Explication de la modulation de dose en fonction des conduites du verger	21
Tableau 3 : Grille de réduction de la dose en fonction des valeurs de NDVI relevées	22
Tableau 4 : Enumérations des bio agresseurs pour lesquels si une pression suffisante est observée, une notation est déclenchée.....	23
Tableau 5 : résumé des protocoles déclenchés en fonction de la pression constatée lors des tours phyto	23
Tableau 6 : Grille de réduction de dose en fonction des indicateurs de végétation. Le pourcentage fait référence au pourcentage de la dose maximale autorisée et non pas au pourcentage de réduction de dose.	34
Tableau 7 : Pourcentage de modulation de la dose appliquée aux vergers en fonction des valeurs des indicateurs aux dates de traitements.....	34
Tableau 8 : Traitements effectués en 2024 sur la conduite en gobelet de la parcelle 19, associés aux doses appliquées (via NDVI) et les doses théoriquement appliquées selon les indicateurs prospectés.....	36
Tableau 9 : Résultats des notations phytosanitaires effectuées sur fruits en verger.	37
Tableau 10 : Résumé des données de notations phytosanitaires sur fruits et performances économiques de la parcelle 19 en fonction des 4 modalités.	38

Liste des abréviations

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

FAPAR : Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

FCOVER : Fraction of Vegetation Cover

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

LAI : Leaf Area Index

LWA : Leaf Wall Area

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

TRV : Tree Row Volume

Glossaire

Bioagresseur : Organismes (insectes, champignons, bactéries, etc.) qui nuisent aux cultures.

Cloque du pêcher : Maladie fongique provoquant des déformations des feuilles du pêcher.

FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) : Fraction de la radiation photosynthétiquement active absorbée par la canopée.

FCOVER : Fraction de la surface du sol couverte par une végétation verte.

Indicateur de végétation : Un indicateur de végétation décrit l'état morphologique, physiologique ou phénologique de la plante à un moment donné

Indice de fréquence de traitement (IFT) : Nombre moyen de traitements phytosanitaires appliqués sur une culture.

LAI (Leaf Area Index) : Indice de surface foliaire utilisé pour quantifier la densité de la végétation.

LiDAR : Technique de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur

Modulation de dose : Ajustement de la quantité de produits phytosanitaires en fonction de la végétation.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) : Indice de végétation normalisé utilisé pour détecter et quantifier la biomasse végétale.

Photogrammétrie : Technique d'acquisition d'images pour mesurer les dimensions et la forme d'objets.

Pulvérisation : Application de produits phytosanitaires sur une culture.

Sentinel-2 : Constellation de satellites utilisés pour la télédétection et la surveillance des terres.

TRV (Tree Row Volume) : Volume de végétation mesuré pour les cultures en trois dimensions, notamment pour les arbres.

Télédétection : Technique permettant d'observer et d'analyser des objets ou des phénomènes à distance, notamment via des satellites ou des drones.

Vergers en gobelet : Mode de conduite des arbres fruitiers où ceux-ci sont taillés en forme de Y ou en boule.

Introduction

La culture de la pêche, fruit à haute valeur ajoutée, est importante pour l'arboriculture fruitière en France. Néanmoins cette culture subit de fortes pressions de nombreux bioagresseurs et par conséquent elle nécessite de nombreux traitements phytosanitaires. Cette couverture phytosanitaire importante fait de ce fruit le deuxième fruit le plus traité (Agreste, 2021). Ces produits, en majorité des produits phytopharmaceutiques chimiques, possèdent une expression de la dose à appliquer fixe : souvent en kg/ha ou l/ha. Cette expression convient aux cultures dont la croissance s'observe sur une surface mais dans le cas des cultures évoluant en volume et en hauteur, cette expression de la dose provoque des différences de quantité de matière active déposée. De la même manière, cette dose est fixe quel que soit le stade végétatif de la culture, ce qui amène à des situations de surdosage lorsque la végétation n'est pas pleinement développée.

Dans une stratégie s'inscrivant dans le plan Ecophyto II+ voulant réduire de 50% les usages de produits phytopharmaceutiques, le projet ADOPA (Adapter la DOse de produits phytopharmaceutiques pulvérisée en fonction du stade de végétation : exemple des vergers de Pêchers et d'Abricotiers), piloté par le CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) vise à adapter la dose de produits phytopharmaceutiques en fonction du stade végétatif en arboriculture (pêchers et abricotiers). Cependant, afin de moduler la dose en fonction de cette évolution végétative, il faut pouvoir caractériser cette dernière. L'Union Européenne a choisi depuis 2018 le LWA (Leaf Wall Area) comme mode d'expression pour les fruits à pépins, les cultures légumières hautes sous abri et pour la vigne. Cet indicateur rend compte de l'aire réelle traitée. Mais pour les vergers de pêchers, la diversité des modes de conduites cause une absence de consensus concernant l'expression de la dose, et pose surtout un problème concernant l'utilisation du LWA pour les vergers conduits en « gobelet » (forme de croissance en 3 dimensions des arbres, en « boule »). Un indicateur mesuré également sur le terrain, le TRV (Tree Row Volume), semble pouvoir le remplacer, mais est une mesure très dépendante de l'opérateur qui effectue la mesure sur le terrain. Une solution étudiée dans le cadre du projet ADOPA est l'utilisation d'indicateurs calculés à partir d'images satellites. La mise à disposition d'images satellites gratuites (Sentinel-2) rendent envisageable un suivi de végétation du verger par télédétection. La littérature propose diverses méthodes de traitement d'image afin de quantifier la végétation par télédétection. Parmi les indices radiométriques, l'indicateur NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), qui mesure la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge ($NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$), est largement utilisé. Sa simplicité de calcul et sa robustesse pour détecter la végétation, voire certaines propriétés de cette végétation comme la biomasse le rendent intéressant. Cependant, l'utilisation de ce NDVI présente une limite : il atteint rapidement une valeur plafond de 0,8 malgré le fait que la végétation continue sa croissance. Par conséquent, il ne donne pas état sur toute une saison de l'évolution végétative d'une parcelle. Ce stage a pour but d'identifier des indicateurs de végétation à partir d'images satellites et de vérifier dans quelles mesures ils peuvent qualifier l'évolution de la végétation dans les vergers de pêchers afin d'optimiser la pulvérisation de produits phytosanitaires sur ces vergers.

Ce mémoire présente la démarche mise en place pour répondre à cet objectif. Nous commencerons par présenter le contexte et ce qui a donné lieu à cette étude, puis nous nous focaliserons sur les indicateurs de télédétection et leur fonctionnement. Les chapitres sur les matériels et méthodes puis sur les résultats présenteront comment les indicateurs sont choisis et étudiés sur deux années : 2023 et 2024. Leur pertinence sera étudiée face au NDVI qui est testé en expérimentation comme indicateur de pilotage de l’itinéraire technique phytosanitaire. Les scénarios de modulation de dose utilisant ces indicateurs seront comparés et leurs IFT seront calculés. Une analyse des biais et de la qualité de ces indicateurs sera réalisée. Enfin, une réflexion plus large sera proposée autour du transfert de cette solution et des perspectives autour du déploiement d’une solution adaptée aux producteurs de fruits à noyau.

1. Contexte de l’étude

1.1 La culture de la pêche/nectarine en France

La pêche est une culture d’importance à l’échelle nationale

La culture de la pêche, *Prunus persica*, est une culture représentant un poids économique en France. Plus de 11 500 hectares lui sont consacrés en France (Ministère de l’Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024). À elle seule elle représente, en prenant en compte les pêches, les nectarines (variété issue d’une mutation naturelle de la pêche à la peau lisse), les brugnons (variété dont le noyau adhère à la chair du fruit) et les pavies (variété

rustique qui sert principalement à la réalisation de pêches de conserves), plus de 233 400 tonnes produites en 2024 (Ministère de l’Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024). Un chiffre en hausse, car c’est 5% de plus qu’en 2023 et 4% en plus par rapport à la production moyenne. La superficie de cette production occupe en 2023 la quatrième place de la filière fruits en France, derrière la pomme (39 450

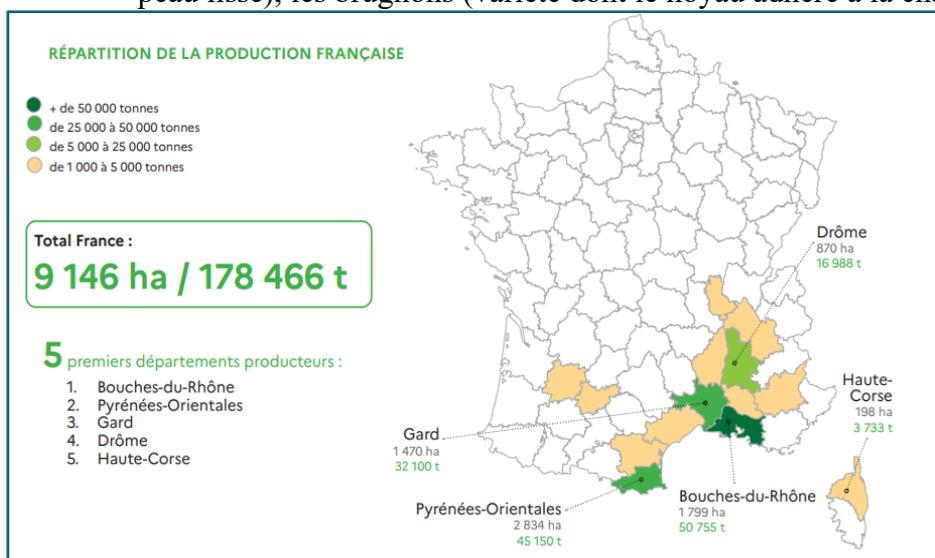


Figure 1 : Répartition de la production de pêches et nectarines par département en 2019 (FranceAgriMer, 2019)

ha), la noix (26 872 ha) et la prune (15 101 ha) (Ministère de l’Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024). En termes de production, la pêche est le deuxième fruit le plus produit sur le territoire français. (FranceAgriMer, 2024)

Mais en plus d’être une production d’une superficie fruitière importante, cette culture représente 204 488 euros de marge nette en moyenne par exploitation (réalisé sur un échantillonnage de 42 exploitations en 2021 (FranceAgriMer, 2021). Sa consommation en France est estimée à 6,1 kg / an / ménage. C’est le 5^{ème} fruit le plus acheté par les consommateurs Français (après la

pomme, les bananes, les oranges et les clémentines/mandarines) (FranceAgriMer, 2024). C'est donc une production importante en termes de rendement ainsi qu'en terme de poids économique et de surface agricole occupée.

Les pêchers sont sensibles à de nombreux bioagresseurs

La pêche/nectarine est sensible à la pression exercée par de nombreux bioagresseurs. Une partie des bioagresseurs les plus observés sur cette culture sont recensés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Exemples de bioagresseurs fréquemment observés en vergers de culture de pêche/nectarine

Nom du bioagresseur	Cloque	Puceron vert	Oïdium	Tordeuse Orientale du Pêcher	Thrips Meridionalis	Forficule	Monilia sur fruits	Cicadelle
Type d'organisme	Maladie (causée par un champignon, <i>Taphrina deformans</i>)	Insecte	Maladie (causée par des champignons du genre <i>Podosphaera</i>)	Insecte	Insecte	Insecte	Maladie (causée par un champignon, <i>Monilinia spp.</i>)	Insecte
Période de présence dans les vergers	Mars-Mai	Mars-Juillet	Mai-Juin	Mai-Septembre	Mars-Avril	Juin-Août	Mai-Fin Juin	Juin-Septembre

Les bioagresseurs listés dans ce tableau ne représentent pas tous les bioagresseurs de la pêche. De même, il ne fait pas la différence entre la pression exercée sur fruit, sur pousse ou sur l'arbre en entier. Par exemple, la Cloque du pêcher (*Taphrina deformans* (Berk.) Tul.) est une maladie fongique présente sur les feuilles de l'arbre, qui provoque la déformation et la décoloration des organes attaqués et qui les rendent inefficaces à effectuer la photosynthèse, ce qui a pour conséquence de réduire le développement de l'arbre. Lorsque la parcelle est atteinte sévèrement de cloque, on observe également des fruits cloqués, non commercialisables, affectant le rendement de l'exploitation.

Chaque bioagresseur présente une diversité de symptômes à des moments distincts dans la saison, ce qui complique la couverture phytosanitaire effectuée par les différents traitements. Il y a donc une nécessité d'effectuer plusieurs passages de pulvérisation de produits phytosanitaires afin de protéger correctement la parcelle. La météo et les températures observées font également varier la pression de ces bioagresseurs. La lutte contre ces bioagresseurs est effectuée en début et milieu du cycle végétatif.

La pêche/nectarine est le 2^{ème} fruit le plus traité en France

La pêche/nectarine représente le deuxième fruit le plus traité en France, après la pomme. Son IFT (Indice de Fréquence de Traitement) est de 18,4 en 2018 contre 31,5 pour les pommes en agriculture conventionnelle (Agreste, 2021). Aucune baisse d'IFT n'a été observé entre 2012 et 2018, bien que des plans nationaux aient été déployés afin de réduire l'utilisation de ces produits. La pêche est, en agriculture conventionnelle, un des fruits qui contiennent presque systématiquement un résidu quantifié (sur des résultats sous-estimant la quantité de résidus). Dans les plans d'analyse français réalisés entre 2017 et 2021, sur 21 fruits pris en compte en France, la pêche/nectarine arrive en troisième position pour les échantillons présentant sur 5

ans, au moins 1 résidu de pesticide (Génération futures, 2024) (annexe 2). Ces résidus inquiètent les consommateurs. Sur tous les échantillons analysés, 90,2% présentent au moins 1 résidu quantifiable. En ce qui concerne le dépassement de Limites Maximales en Résidu (LMR), elle arrive 12^{ème} sur 21 fruits. Sur 5 ans, 2,9% des échantillons ont dépassé les LMR. (Annexe 3)

En résumé : La pêche est un fruit dont la culture est importante en France. C'est le deuxième fruit le plus produit en termes de volumes et le cinquième fruit le plus acheté. Cependant, cette culture est sensible à de nombreux bioagresseurs qui, s'ils ne sont pas pris en charge, peuvent affecter grandement les rendements d'une production. De nombreux traitements phytosanitaires sont nécessaires afin d'assurer une bonne couverture du verger, ce qui en fait le deuxième fruit le plus traité en France. Ces traitements se déroulent au début et milieu du cycle végétatif.

1. 2 Réglementation des produits phytosanitaires en France

La dose de produits est peu adaptée aux cultures de fruits à noyaux

Lors des traitements phytosanitaires, une bouillie (solution à appliquer) est préparée. Elle est définie par une dose de matière active présente sous différentes formes (poudre, liquide, etc.) diluée dans un grand volume d'eau. La dose majoritairement présente sur l'étiquette des produits phytosanitaires en France est exprimée en quantité par hectare cadastral (l/ha ou kg/ha). Cette quantité est fixe peu importe le stade végétatif de la culture. Cette expression de la dose de produits phytosanitaires est adaptée aux cultures ayant une croissance qui occupent une surface de façon homogène et dont la conduite est relativement standardisée (les grandes cultures par exemple). Dans le cas de l'arboriculture, cette expression de la dose amène à de grandes différences de quantités de matière active déposée sur la culture, en fonction de la structure de la culture et de sa végétation, de la technique d'application et du volume d'eau utilisé. L'évolution de la végétation n'est pas prise en compte dans le raisonnement de la dose appliquée. Cette dose constante est facile à mettre en œuvre mais entraîne des situations de surdosage au début de la végétation. Par ailleurs, la dose inscrite est une dose maximale d'emploi, souvent vue et utilisée comme dose par défaut (Pulvarbo, 2021).



Figure 2 : Représentation du Leaf Wall Area (LWA) en arboriculture

Au niveau européen, depuis 2018, les évaluations d'efficacité des produits en vue de leur homologation doivent être conduites selon un mode d'expression unique pour les fruits à pépins, les cultures légumières hautes sous abri/serre et pour la vigne : des kg ou litres de produit pour 10 000 m² de Leaf Wall Area (LWA) (Pulvarbo, 2021) ou surface de mur foliaire. Ainsi la quantité de produit appliqué l'est en fonction de l'aire de la surface de végétation et non pas de l'aire cadastrale.

Le LWA est un indicateur de végétation facile à mesurer et à calculer, il prend en compte la hauteur traitée de la culture et la distance entre les rangs. Il s'agit de transformer la surface cadastrale en surface de mur foliaire exprimé en m^2/ha . Ainsi, le LWA permet de prendre en compte une estimation de la surface de contact. Les agences d'évaluation en Europe (l'ANSES par exemple) n'acceptent désormais que les dossiers dans lesquels les évaluations d'efficacités sont réalisées avec ce mode d'expression de la dose. Pour les cultures de fruits à noyau, le mode d'expression de la dose n'est pas homogène en raison de la diversité des formes de conduite de verger, en forme de gobelet (ou « double Y », forme plus traditionnelle ayant une croissance en volume) ou de haie fruitière (palmette) et par manque de références sur cet arbre fruitier.

L'importance de se concentrer sur la réduction des produits phytosanitaires

Dans son plan Ecophyto 2030, le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt a fixé des objectifs de réduction de l'usage des produits phytosanitaires de 50% d'ici 2030, sans toutefois interdire les produits si aucune alternative concevable n'existe. Ce plan fait suite aux Grenelles de l'Environnement, qui demandent aux Etats membres d'avoir recours à des plans d'action nationaux.

Or, d'après les données recueillies en France par Agreste en 2012, 2015 et 2018 (dates auxquelles le plan Ecophyto 2018 existait déjà et dont l'objectif était déjà de réduire de 50% les produits phytosanitaires), en pêche, le nombre moyen d'IFT et le nombre de traitement par fruit a augmenté entre 2012 et 2015, pour ensuite se stabiliser (Agreste, 2021). L'une des raisons est que la pression en bioagresseurs ne diminue pas et tend à augmenter sur certaines espèces dû à diverses causes. L'autre raison est que certains bioagresseurs sont moins bien gérés dû au retrait de matières actives efficaces, ce qui amène à utiliser plus de produits avec une efficacité moindre pour tenter de maîtriser ces bioagresseurs. Le dérèglement climatique provoque également l'extension des aires de répartition de certains bioagresseurs, des changements phénologiques, une augmentation des populations ainsi que des phénomènes de migration (Cannon, 1998).



Figure 3 : Verger de pêchers conduit en gobelet (ou « double Y ») à gauche et conduit en haie fruitière (ou « palmette ») à droite. (Florian Jeumart, 2024)

Agir sur l'optimisation de la pulvérisation et sur les doses de produit appliqués est donc un levier intéressant qui permettrait de réduire les doses de produits tout en maintenant une bonne protection du verger et de réduire la quantité de produit appliqué.

1.3 Approche sur la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires

Ecophyto II + : projet structurant afin de réduire les doses de produits

En 2008, suite aux Grenelles de l'Environnement, la France lance le plan Ecophyto 1, dont l'objectif est de réduire de 50% l'usage des produits phytosanitaires d'ici 2018. Plusieurs chiffres montrent que cet objectif n'a pas été atteint, avec une observation d'augmentation de l'utilisation de produits durant les 5 premières années du plan (Guichard et al., 2017). Pour faire suite à ce projet, le plan écopytho II+ est lancé en 2015 en prenant en compte les avancements du précédent plan tout en changeant la stratégie. L'objectif est de réduire de 50% l'usage de produits phytopharmaceutiques d'ici 2025 (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2022). Cette stratégie est financée à plus de 320 millions d'euros par an, dont 70 millions d'euros proviennent de la Redevance pour Pollutions Diffuses, payées par les distributeurs et vendeurs de produits phytosanitaires.

Réduire l'IFT en adaptant la dose en fonction de la végétation

En raison de la différence des modes de conduites dans les cultures de fruits à noyaux, aucun consensus autour de l'expression de la dose n'a encore été trouvé. En fonction de la culture, certains modes de conduites prédominent : par exemple, dans les cultures de fruits à pépins comme les pommiers, il y a majoritairement des haies fruitières, c'est-à-dire que sur un rang d'arbres, ils sont taillés de sorte que la croissance des arbres ne se fasse pas en trois dimensions mais en deux dimensions : ils ont une croissance en hauteur, ce qui en fait une haie fruitière. Les branches qui possèdent une croissance horizontale sont taillées.

Dans les vergers de pêches/nectarines, la prédominance se trouve dans les vergers conduits en « gobelet », où l'arbre possède une forme de Y, avec une croissance autant en hauteur qu'en largeur. La différence de mode de conduite change tout de la technique de taille, de récolte, au traitement. La haie fruitière permet d'augmenter la densité de plantation et de favoriser la mécanisation des travaux, tandis que le gobelet est plus traditionnel dans les vergers de pêches/nectarines et favorise la praticité pour la main d'oeuvre.

L'absence de consensus concernant l'expression de la dose dans les cultures de fruits à noyaux réside également dans le manque de références bibliographiques sur ces cultures. Le projet cri (Pulvarbo, 2021), mené entre 2015 et 2020 par le CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes), a permis d'obtenir des références pour les vergers de fruits à pépins concernant les indicateurs LWA et TRV (Tree Row Volume, utilisé pour les cultures ayant une

croissance en 3 dimensions), mais sans distinguer les différents modes de conduites. Le projet avait pour but de caractériser le développement végétatif des vergers de fruits à pépins français sur la base d'indicateurs simples à mesurer, de sélectionner les indicateurs les plus pertinents à utiliser et d'élaborer différents scénarios d'adaptation des doses.

Les indicateurs de végétation permettant de caractériser la végétation

L'obtention avec précision de l'évolution végétative d'un verger se fait par le calcul du LAI (Leaf Area Index). Cet indice est défini comme étant le ratio de la surface totale supérieure des feuilles à la surface du sol sur laquelle la végétation se développe. C'est une variable critique dans l'évaluation de processus tels que la photosynthèse et la respiration, sans dimension. Le LAI a été listé comme variable climatique essentielle par le GCOS en 2011 (Global Change Research Community) (Fang et al., 2019). En revanche, la mesure du LAI sur le terrain s'avère complexe : c'est une méthode destructive, longue et coûteuse. Son calcul nécessite de prélever un nombre de feuilles de l'arbre statistiquement significatif, et de répéter l'opération sur un échantillon d'arbres représentatif de la parcelle. Puis, une fois les feuilles collectées, la surface des feuilles doit être calculée afin d'estimer le LAI de la parcelle.

Une des solutions pour homogénéiser les modes d'expression de la dose en prenant en compte la canopée réellement traitée est d'utiliser des indicateurs de végétation comme le LWA et le TRV. La figure 4 ci-dessous montre les surfaces et volumes calculés :

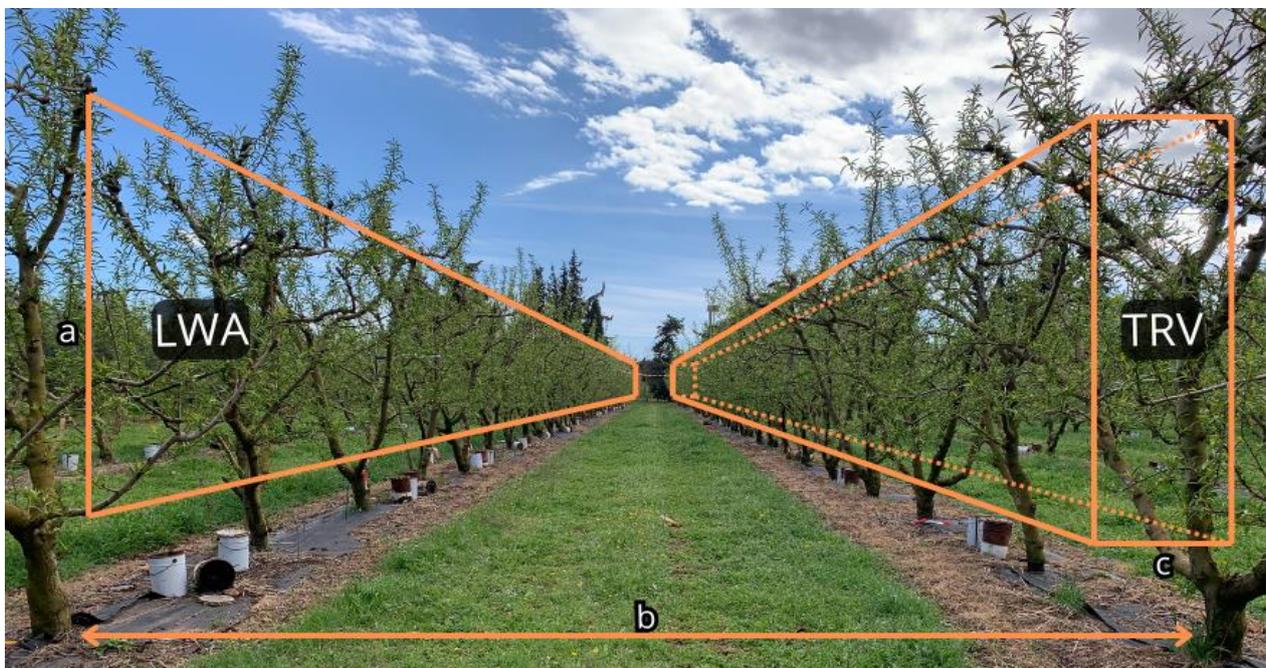


Figure 4 : Représentation du TRV (Tree Row Volume) et du LWA (Leaf Wall Area) sur verger de pêches. (Florian JEAUMART, 2024)

Le LWA mesure une surface foliaire tandis que le TRV mesure un volume. Le LWA s'exprime donc en m²/ha tandis que le TRV s'exprime en m³/ha. Le LWA se calcule à partir de la hauteur traitée de végétation et la distance entre les rangs. Le LWA se calcule de la manière suivante :

$$LWA = \frac{2 \times a \times 10\,000}{b}$$

Où :

- a est la hauteur traitée en mètres
- b est la distance inter-rang en mètres
- 10 000 m² est la valeur normalisée,

Le TRV quant à lui, prend en compte, en plus de la hauteur traitée et de la distance inter-rangs, la largeur de la frondaison. Il se calcule de la manière suivante :

$$TRV = \frac{c \times a \times 10\,000}{b} \times \frac{2}{3}$$

Où :

- a est la hauteur traitée en mètres
- b est la distance inter-rang en mètres
- c est la largeur des arbres en mètres
- 10 000 m² est la valeur standard

Un facteur de 2/3 est appliqué pour les vergers ayant une conduite en gobelet, pour respecter la forme en Y.

Ainsi, avec ces deux indicateurs, qui normalement évoluent positivement à mesure que la saison n'avance, on peut rendre compte du minimum de végétation et de la pleine végétation de la saison. Si ces deux extrêmes sont connus, il est possible en fonction des mesures moyennes récoltées sur le verger de déterminer à quel stade de végétation se trouve le verger.

Ces indicateurs rendant compte de l'évolution végétative ont l'avantage d'être relativement simples à calculer. Ils ne nécessitent que deux opérateurs, qui vont prendre les mesures de hauteur, largeur, hauteur du tronc (une unique fois seulement) et distance de l'inter-rang (une fois également). Ces mesures ne nécessitent pas de compétence particulière

Le LWA et le TRV présentent des biais à leur utilisation

Bien que ces indicateurs soient simples à calculer, ils présentent quelques biais. Le premier réside en l'erreur de lecture/interprétation des valeurs des techniciens. En effet, selon l'orientation de l'observateur vers l'arbre, ce dernier peut se tromper dans la considération de la branche la plus haute ou la plus large. Ce phénomène s'amplifie à mesure que les arbres se développent en hauteur et en largeur, avec des arbres atteignant des hauteurs de 2 à 3 mètres et des largeurs de 4 mètres dans les vergers conduits en gobelets. La deuxième limite concerne la porosité des arbres qui n'est pas prise en compte. Que ce soit le LWA ou le TRV, le calcul de l'indicateur assimile la haie fruitière à une surface pleine ou le rang de gobelet à un parallépipède plein. En réalité, cette haie présente une porosité non négligeable. C'est d'autant plus vrai pour le TRV, qui se calcule sur les arbres en gobelets et dont la porosité entre les feuilles est élevée.

Également, le LWA et le TRV prennent du temps et de la main d'œuvre pour être calculés. Un échantillon d'arbres représentant la parcelle est mesuré. Cet échantillon doit être bien situé pour éviter des effets de bordures de parcelles pouvant fausser les mesures.

Une des solutions pour résoudre ces problèmes serait donc d'utiliser un système qui mesure l'évolution végétative de toute la parcelle et qui n'est pas sujet à des erreurs d'interprétation de valeur par des observateurs. Ce peut être la télédétection, qui dépend d'indicateurs pertinents donnant l'état de l'évolution végétative du verger.

1.4 La télédétection en agronomie

Caractéristiques spectrales des plantes : comment l'imagerie satellite capte les propriétés physiologiques du végétal

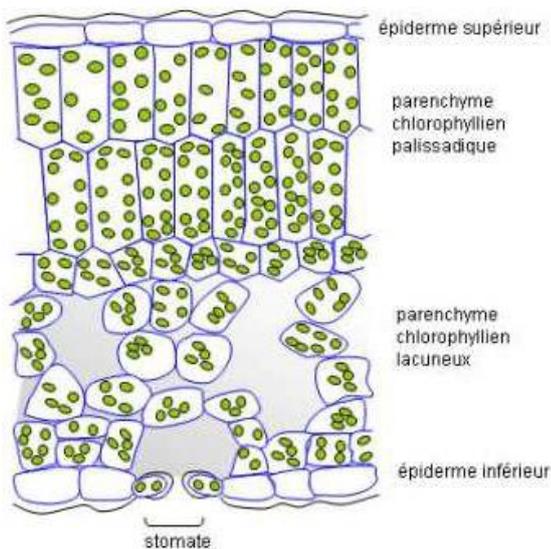


Figure 5 : schéma d'une coupe transversale de feuille de dicotylédone (Fédération France Orchidées, 2020)

Les propriétés optiques des feuilles sont directement reliées à leurs caractéristiques structurales et biochimiques. Trois éléments modifient les propriétés optiques des feuilles : la teneur en pigments (les chlorophylles, les carotènes et anthocyanes), la structure cellulaire des feuilles et la teneur en eau. La chlorophylle, par exemple, possède deux bandes d'absorption, dans le bleu, à 450 nm, et dans le rouge à 660 nm, ce qui explique un pic de réflectance dans le vert, à 550 nm. Dans le proche infrarouge (700 à 1300 nm), zone non visible à l'œil nu, la réflectance est élevée, ce qui est principalement dû à la structure cellulaire de la feuille (organisation des cellules, parois cellulaires, espaces intercellulaires, ...). La teneur en eau influence également la signature spectrale de la végétation. Plus la teneur en eau est forte, plus la

réflectance de la végétation diminue, surtout dans les longueurs d'onde 1450 nm et 1900 nm. Cette propriété est utile concernant la détection de plantes en état de stress hydrique (Université Paris 1, 2008).

Ce spectre de réflectance, spécifique de la végétation, permet de différencier facilement la végétation d'autres objets (tels que le sol) et de tenter de caractériser cette végétation (espèce, stade végétatif, stress...). Il existe également des disparités dans les signatures spectrales en fonction des espèces et variétés (Université Paris 1, 2008).

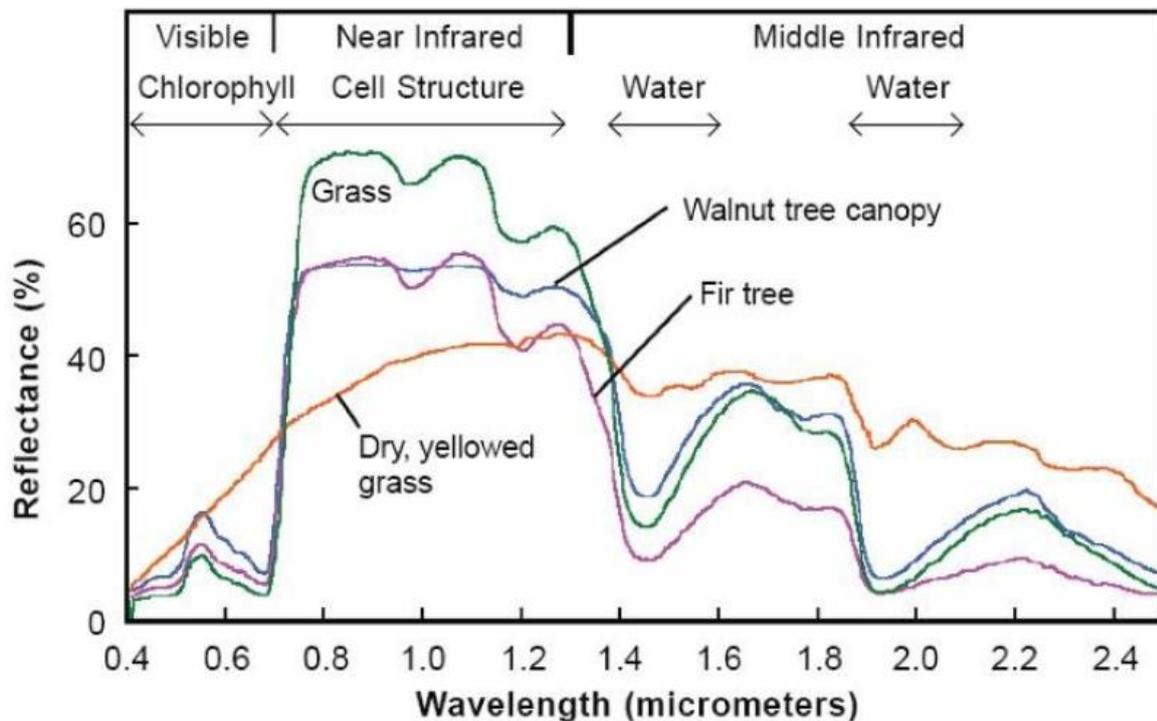


Figure 6 : Spectres de réflectance de différents types de végétation verte (grass : herbes, walnut : noyer, fir : sapin) et pour une végétation herbacée jaunie (Dry, yellowed grass) (Alleaume et al., 2013)

Définitions et présentation des concepts scientifiques

La télédétection représente l'ensemble des techniques permettant d'obtenir des informations à propos d'objets ou phénomènes à distance, en recueillant et analysant ces données sans contact direct entre l'instrument et l'objet (ESA, 2015). Plusieurs vecteurs permettent de réaliser de la télédétection, comme les satellites, les avions, et désormais les drones. Ces plateformes sont équipées de capteurs et instruments permettant l'observation de la cible. Nous évoquerons les images données par les satellites.

Les capteurs utilisés pour la télédétection captent les rayonnements électromagnétiques réfléchis par l'objet observé (par exemple, la lumière réfléchi par le sol et la végétation) ou émis dans le cas d'objets chauds. Ces informations permettent de voir la couleur et la forme de l'objet. Dans le spectre visible, la couleur d'un objet varie en fonction des longueurs d'ondes qu'il absorbe et renvoie. Par exemple, un objet blanc réfléchit la même quantité de lumière visible pour toutes les longueurs d'onde. A contrario, une feuille verte réfléchit moins de rayonnements dans les longueurs d'ondes correspondant au rouge et au bleu dans le spectre visible, ce qui fait que le surplus de lumière ayant un rayonnement dans le vert nous apparaît vert. Or, contrairement à l'œil humain, qui est sensible aux longueurs d'ondes comprises en 380 et 780 nanomètres, correspondant à la lumière visible, les instruments et capteurs d'aujourd'hui

peuvent opérer en dehors des longueurs d'ondes visibles de l'œil nu, et nous permettent d'accéder à des informations manquantes (ESA, 2015).

Les capteurs des satellites sont conçus pour recevoir les rayonnements électromagnétiques sur des bandes spectrales spécifiques. Ces bandes spectrales sont choisies pour la spécificité des informations qu'elles recueillent, par exemple pour l'étude de la végétation, l'eau ou des sols. Le nombre de bandes spectrales ainsi que leur largeur et les longueurs d'ondes qu'ils captent varient d'un capteur à l'autre. Ainsi, chaque capteur possède sa résolution spatiale et sa résolution spectrale. La résolution spatiale représente la taille de la plus petite unité observable par le capteur (10 mètres par exemple). La résolution spectrale représente le nombre et la largeur des bandes spectrales où le capteur est sensible.

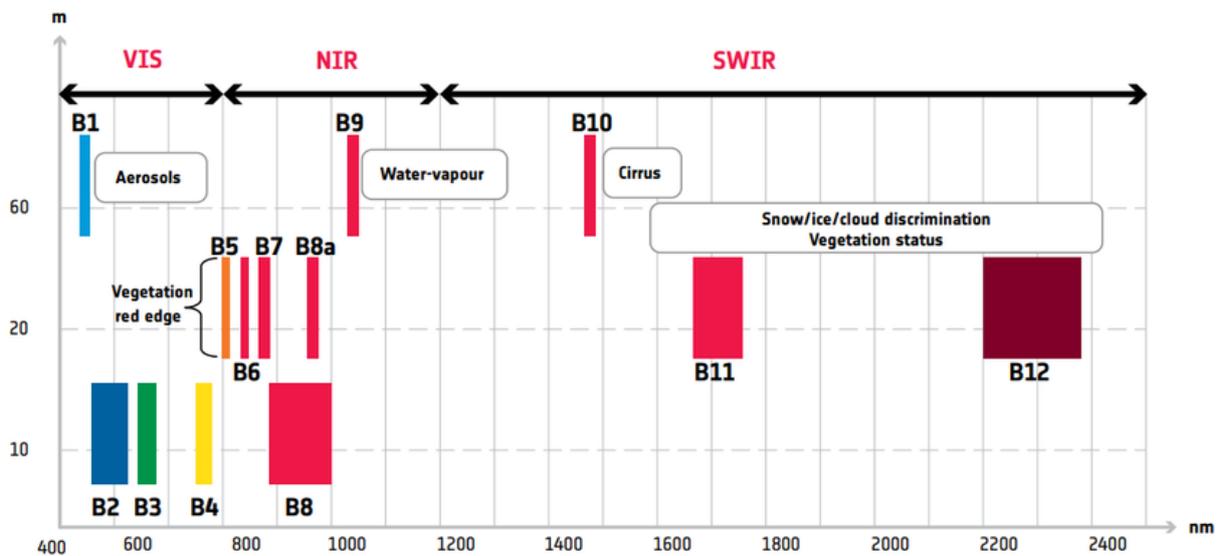


Figure 7 : Représentation des positions des 13 bandes spectrales du satellite Sentinel-2 ainsi que de leur résolution spatiale en mètres en fonction de la longueur d'onde en nanomètre (Gatti & Bertolini, 2013)

Chaque satellite Sentinel-2 comporte un capteur d'imagerie multispectral sensible à 13 bandes spectrales. Ces 13 bandes vont du visible (VIS) à l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) en passant par le proche infrarouge (NIR) (443-2190 nm). Les bandes B2, B3, B4, B8, B11 et B12 possèdent 10 mètres de résolutions spatiales, B5, B6, B7 et B8A possèdent 20 mètres de résolution et B1, B9 et B10 possèdent 60 mètres de résolution spatiale (utilisés pour la correction atmosphérique).

Les satellites, supports de capteurs, effectuent pour la plupart une rotation autour de la terre. Il balaye donc la surface de la terre, et met un certain temps à revenir à une position donnée. Pour le cas des satellites composant la constellation Sentinel-2, les satellites S2A et S2B, en orbite héliosynchrone (retrouvent les mêmes conditions d'éclairage solaire à chaque passage), mettent 5 jours à revenir au même point (appelé « période de revisite »).

Les indices de végétation

Afin de pouvoir analyser les valeurs de réflectance des bandes spectrales, des indices sont utilisés. Ils représentent les différentes combinaisons entre les bandes spectrales. Ces indices permettent d'évaluer qualitativement et quantitativement les propriétés des végétaux

(Bannari et al., 1995). Les bandes se trouvant dans le visible, le proche infrarouge et le rouge, zones dont la réflectance est caractéristique de la végétation. Parmi les indices les plus utilisés, on retrouve le NDVI (Normalised $NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$ Difference Vegetation Index). Il permet de détecter la présence de végétation verte et sa formule est la suivante :

Avec PIR la valeur de la bande dans le proche infrarouge et R la valeur de la bande dans le rouge. Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation, et ses valeurs varient entre -1 et 1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces comme la neige, l'eau ou les nuages. La normalisation des valeurs à travers cet indice permet d'éliminer les influences externes qui pourrait fausser les résultats, et également de pouvoir comparer les valeurs obtenues dans différentes conditions.

L'intérêt d'utiliser la télédétection pour la gestion des cultures

La télédétection via satellites présente de nombreux avantages dans son utilisation pour la gestion des cultures :

- La période de revisite d'un satellite (ou d'une constellation de satellites) varie entre eux, mais certains sont assez rapides pour suivre une progression. Sentinel-2 possède une période de revisite de 5 jours, ce qui signifie que pour le même endroit, une image est obtenue tous les 5 jours. MODIS lui possède une période de revisite de 1-2 jours.
- La résolution des images satellites (correspondant à la taille des pixels sur l'image) varie entre les constellations, mais certains accessibles gratuitement possèdent une résolution suffisante pour l'agronomie. Par exemple, les satellites PLANETSCOPE permettent d'obtenir des images à 3 mètres de résolution.
- Les capteurs embarqués sur les satellites permettent une analyse multispectrale de l'image, et non pas seulement une observation dans le visible. La signature spectrale de la végétation communique des informations sur la santé des cultures, leur classification, l'irrigation, etc.
- Sur le plan pratique, le satellite présente des avantages d'utilisation par rapports aux autres supports. Le drone, lorsqu'il est employé, doit avoir de bonnes conditions de vol pour opérer (vitesse de vent à ne pas dépasser par exemple). Un opérateur (télépilote) doit être présent sur place et si les parcelles se trouvent près d'une base militaire (comme c'est le cas au lieu du stage), des démarches administratives sont nécessaires pour planifier le vol. L'utilisation d'avions est également possible mais comme le drone, la planification du vol doit se préparer longtemps à l'avance et représente un certain coût.

Le satellite lui, n'a pas besoin de planification de la part de l'utilisateur. Les images sont recueillies par l'organisme en charge du satellite et mis à dispositions, pour le téléchargement et l'utilisation, sur Internet.

Les potentiels freins à leur utilisation en arboriculture

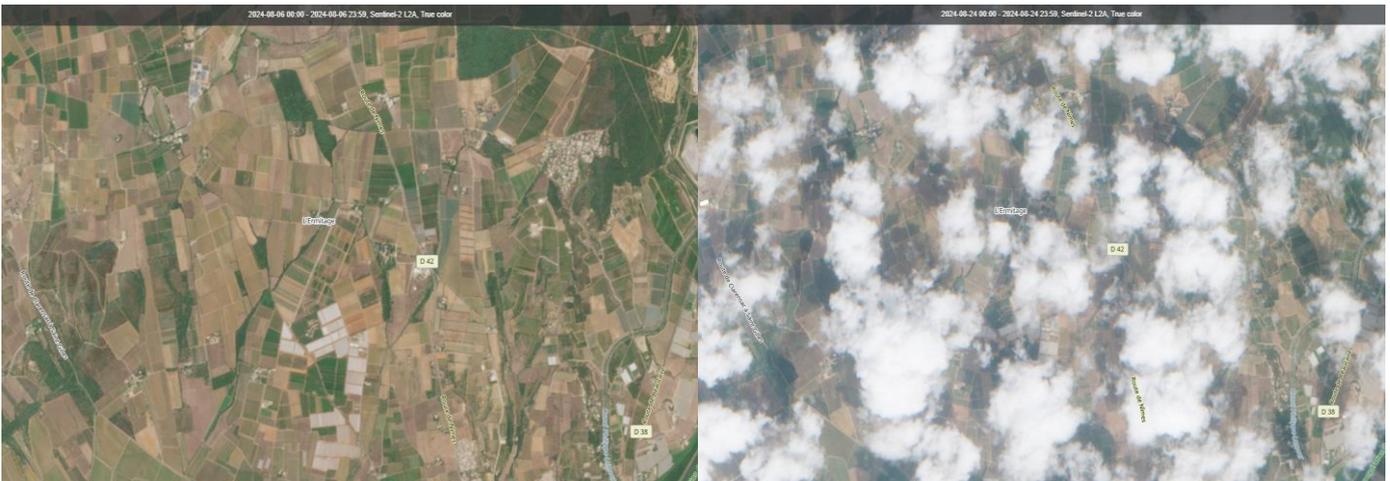


Figure 9 : Image satellite de SudExpé le 06 août 2024 (Copernicus Browser, 2024)

Figure 9 : Image satellite de SudExpé le 24 août 2024 (Copernicus Browser, 2024)

- La plupart des satellites d'observation de la terre se trouvent à une altitude entre 500 et 700 kilomètres d'altitude. Les **nuages** eux, se forment dans des altitudes entre 500 mètres et 12 kilomètres de la surface. Ils viennent donc s'intercaler pour l'observation de la terre par les satellites. La présence de ces nuages empêche les satellites d'observation d'obtenir des images utiles ou affectent négativement la qualité de ces images (Li et al., 2022). L'ombre portée par les nuages sur le sol affecte également la réflectance des objets observés. Ainsi, la surveillance de certaines zones peut être interrompue à cause de ces nuages, ou même rendu impossible dans des zones du globe où la présence de nuages est plus régulière.
- La présence d'un **inter-rang** est spécifique aux cultures plantées en rangs, comme les vignes, les vergers d'arbres fruitiers, etc. La distance entre ces rangs peut être désherbée, le sol nu ou bien enherbée. Lorsqu'il est présent, cet enherbement végétal influence forcément la réflectance mesurée de la parcelle, car la résolution des images ne permet pas de différencier les inter-rangs des arbres.
- Lorsque les producteurs souhaitent diminuer fortement la pression des bioagresseurs et/ou protéger leur verger de la grêle, ils peuvent installer des **filets**. Bien que leur coût soit relativement élevé, ils protègent la culture de la

grêle et réduisent les attaques de bioagresseurs. En revanche, du fait qu'ils se mettent entre le satellite et les feuilles, ils cachent une partie de la réflexion de la lumière et donc, les données sont altérées et/ou biaisées.

- Certains indices de végétation utilisés pour observer la végétation présentent des soucis de **saturation**. Cet indice a l'inconvénient de plafonner rapidement autour de 0,7 pour des volumes de végétations élevés et dont la croissance n'est pas encore au maximum de la saison. Cela peut être problématique pour l'étude de la croissance végétale au cours d'une saison, qui est dans notre cas critique. Les indices de végétation sont nombreux, mais ceux explorés ci-après doivent éviter de plafonner quand la végétation continue de se développer.
- Etant donné que la lumière reçue par les capteurs passe par l'**atmosphère**, la présence d'aérosols et la pollution peuvent aussi altérer les valeurs de réflectance.
- La résolution spatiale peut poser un problème également, surtout lorsque faire du cas par cas au niveau des arbres est nécessaire. Certaines constellations de satellites ont de hautes résolutions, de l'ordre du mètre, comme Planetscope qui possède une résolution de 3 mètres. Mais l'acquisition de ces images ont un certain coût. En changeant de constellation, on change également de période de revisite du même point géographique.

Tous les éléments listés précédemment sont à prendre en compte lorsque les images satellites sont utilisées afin de réaliser un suivi temporel des cultures.

1.5 Le projet ADOPA : définition du stage et de la problématique

L'organisme porteur du projet

Le CTIFL est un organisme de recherche et développement de la filière des fruits et légumes créé en 1952 dans le but d'aider l'ensemble des professionnels à faire face aux enjeux de la filière, en perpétuelle évolution. Le CTIFL met en place des programmes de recherche et d'expérimentation sur des thématiques liées à la production jusqu'à la distribution et la consommation, pour proposer des solutions concrètes et viables aux entreprises de la filière. Le siège social du CTIFL est situé à Paris mais comporte cinq centres opérationnels en France (Balandran, Carquefou, La Morinière, Lanxade et St-Rémy-de-Provence), 4 antennes (Rungis, Brindas, La Tapy et Nancy) représentant un total de 300 salariés, plus de 287 projets de recherche par an et un budget de 28 millions d'euros, financé pour la moitié par les professionnels de la filière fruits et légumes rassemblés au sein de l'interprofession (Interfel).

Les autres sources du budget proviennent de fonds publics (CASDAR, Union européenne, régions, etc.) et privés (formations, études économiques, certification de plants). Il est associé à 14 stations partenaires, et dans certaines de ces stations, un ingénieur du CTIFL y est détaché.

Le stage s'est déroulé au sein de l'unité SEPALÉ (SystèmEs de Production AgroécoLogiquEs) et de l'unité MATIC (Mécanisation, Automatisation, eT Imagerie Capteurs). Il s'est déroulé dans la station régionale de recherche appliquée et d'expérimentation en fruits et légumes, SudExpé (site de Saint-Gilles), l'une des 14 stations partenaires du CTIFL, qui est la plus grosse station d'expérimentation en fruits et légumes d'Occitanie. SudExpé possède deux sites expérimentaux : Marsillargues (34 590) et Saint-Gilles (30 800). Elle est de droit privé avec comme principaux associés les Chambres d'agriculture de l'Hérault et du Gard, la Fédération des Fruits et Légumes d'Occitanie ainsi que le CTIFL. SudExpé réalise trois types d'activités : les prestations, les projets publics ainsi que de la production de fruits et légumes. Ils mettent en œuvre des expérimentations et des programmes de recherche et développement afin d'apporter des réponses aux problématiques des producteurs.

Le stage se réalise sur le site expérimental de SudExpé à Saint-Gilles spécialisé sur la production de cultures de fruits à noyaux et plus particulièrement sur culture de la pêche/nectarine.

Le projet ADOPA

Ce stage s'inscrit dans le projet multi-partenarial « ADOPA » (Adapter la DOse de produits phytopharmaceutiques pulvérisée en fonction du stade de végétation : exemple des vergers de Pêchers et d'Abricotiers), financé par le programme Ecophyto II+. ADOPA a démarré en 2023 et est la suite du projet Pulvarbo, projet mentionné précédemment visant à adapter et optimiser la pulvérisation en vergers. Ce projet est piloté par le CTIFL et SudExpé fait partie des partenaires du projet. L'unité MATIC du centre CTIFL de Lanxade apporte son support à l'analyse des images. L'objectif du projet ADOPA est d'évaluer l'efficacité de différents scénarios d'adaptation de la dose de produits phytopharmaceutiques pulvérisés en fonction de l'évolution des stades végétatifs, sur les cultures de pêchers et d'abricotiers. Deux formes de verger sont étudiées indépendamment, la conduite traditionnelle en « gobelet » et la conduite en haie fruitière plus exceptionnelle sur ces cultures. La réalisation du projet repose donc sur :

- La caractérisation de la végétation pour chacune des formes de verger et des espèces via le calcul d'indicateurs de végétation, soit grâce à des mesures de terrain (Le LWA et le TRV), soit grâce à des mesures spatiales (imagerie satellite et drone)
- L'évaluation de l'impact de scénarios d'adaptation de la dose basé sur ces indicateurs de végétation et l'évolution des stades végétatifs en fonction des différentes formes de vergers.
- Le transfert vers la profession grâce à la mise place de scénarios d'adaptation de la dose chez des producteurs

Au travers des précédentes études d'ADOPA, le LWA a été conservé comme indicateur utilisé pour caractériser les vergers conduits en haie. Cependant, cet indicateur ne s'est pas montré efficace concernant les vergers conduits en gobelet. Le stage a pour objectifs de trouver des

indicateurs caractéristiques de la végétation, s'appuyant sur une réalité terrain observée dans les vergers de fruits à noyaux, car l'indicateur testé en expérimentation pour gérer la modulation de dose sur les vergers dits en « gobelet », le NDVI, atteint un plateau de valeurs alors que la végétation continue son évolution, et de ce fait ne donne pas une bonne idée de la croissance végétale.

Ainsi, dans le cadre de ce projet, la problématique de ce stage est :

Comment, à partir d'indicateurs de télédétection, caractériser l'évolution végétative d'un verger de fruits à noyaux afin de réduire la dose de produits phytosanitaires ?

Cette problématique se découpe en trois questions pour ce sujet :

- La problématique de recherche : quels indicateurs sont pertinents pour estimer l'évolution végétative ?

Le travail demandé est de prospecter divers indices de végétation permettant de quantifier le volume foliaire des vergers de pêches, de vérifier leur cohérence avec la vérité observée sur le terrain, et de prendre en compte leur facilité d'acquisition. Nous avons fait le choix de travailler avec les images issues de Sentinel-2 pour les raisons évoquées précédemment (période de revisite, facilité d'accès aux données, gratuité).

- La problématique technique : quels scénarios d'adaptation pour les producteurs ?

Le stage fera aussi l'objet de récolte de données qui orientent le choix de scénarios d'adaptation de la dose pour des vergers conduits en haie fruitière et des vergers en gobelet, ainsi que le choix d'optimisation de la dose, autant sur le volet phytosanitaire qu'économique. Plus spécifiquement, les scénarios d'adaptation en fonction de l'indicateur choisis seront évoqués, et leur impact sur la réduction de dose montré.

- La problématique de transfert : comment faire adopter et transférer ce système aux producteurs ?

Le stage est aussi l'occasion de réfléchir aux moyens de transférer des outils aux producteurs. Une réflexion sera ainsi menée pour proposer des méthodologies d'exploitation de logiciels existants ou si cela s'avère nécessaire de proposer de potentiels développement d'outils à mettre à disposition des producteurs ou conseillers.

Ces trois questions sont hiérarchisées par ordre de priorité.

2. Matériel et méthode

2.1 Recherche et calcul d'indicateurs d'imagerie satellites afin de caractériser la végétation de vergers de fruits à noyaux

Protocole d'acquisition des images satellites

Les images satellites représentent le support de l'analyse de ce mémoire. Il est donc primordial qu'elles répondent à certains critères.

Premièrement, l'usage des images de la constellation Sentinel-2 était imposé. Ses images sont visionnables et téléchargeables gratuitement via plusieurs sites. *Copernicus Browser* a été sélectionné comme site internet principal afin de les consulter et les télécharger. Il répond aux caractéristiques nécessaires pour sélectionner les images : visualisation simple des images, images disponibles jusque 2016, possibilité de discriminer les images en fonction du pourcentage de nuages, téléchargement des images dans des formats permettant l'analyse de ces dernières dans des logiciels spécialisés en traitement d'images satellites. Le format des images est .SAFE. C'est le format standard concernant les produits Sentinel et il permet de conserver les données brutes sans compresser et dégrader les images. Ces images contiennent les 13 bandes spectrales de Sentinel-2 ainsi que les métadonnées associées en .XML.

Afin de réaliser le suivi temporel de la végétation sur une saison, 1 image par mois est téléchargée. Les saisons concernées sont les saisons 2023 et 2024, car les mesures de végétation du TRV et LWA ont été réalisées ces années-là. La liste des images sélectionnées est présentée en annexe. Les images sont judicieusement sélectionnées pour ne contenir aucun nuage ou aucun autre artefact qui pourrait fausser les valeurs des indicateurs calculés. Elles sont également espacées dans le temps afin de permettre un suivi homogène de l'évolution végétative.

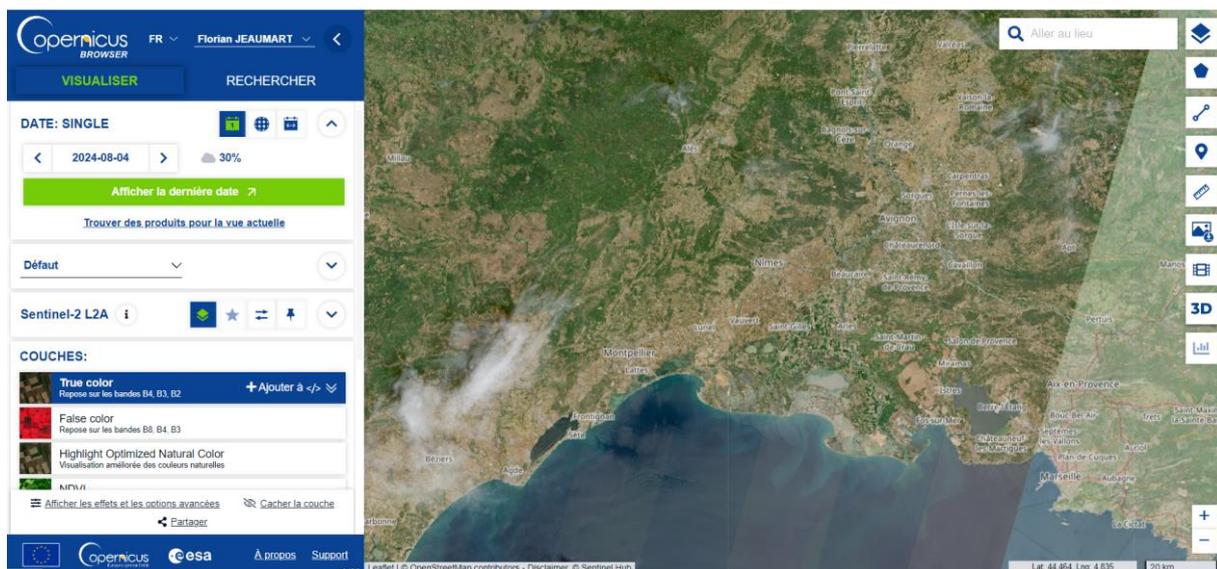


Figure 10 : Le site internet Copernicus Browser (Florian Jeaumart, 2024)

Critères de recherche et d'acceptation d'un indicateur

Tous les indices calculables sur les images de Sentinel-2 ne concernent pas la végétation. Les indicateurs choisis pour caractériser la croissance de la végétation doivent être spécifiques à la végétation. L'indicateur ne doit pas réagir avec l'atmosphère ou d'autres objets ne contenant pas d'éléments propres à la végétation. De même il doit caractériser l'évolution de la végétation à travers une saison agricole. Son évolution au cours de la saison doit donc être significative et discriminante, et montrer la même évolution que les indicateurs mesurés sur le terrain (TRV et LWA) et les mesures de photogrammétrie par drone, une technique de mesure qui consiste à déterminer la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vues photographiques de cet objet (IGN, 2021).

Il est également imposé que les indices étudiés et sélectionnés ne soient pas être créés. Ils existent déjà et possèdent des références bibliographiques les concernant. L'EVI (Enhanced Vegetation Index) ayant été déjà expérimenté par le passé, mais n'ayant pas donné de résultats satisfaisants, est écarté de l'étude.

Protocole d'obtention des valeurs de NDVI

Les valeurs de NDVI seront obtenues via la plateforme d'EOS (Earth Observation System, un programme de la National Aeronautics and Space Administration, NASA), *Crop Monitoring*. Cette plateforme automatise les prises de valeurs de l'indicateurs et permet l'exportation plus simple des valeurs. Aussi, elle permet un suivi sans traitement préalable des images.

Protocole de validation des indicateurs sur les données terrain

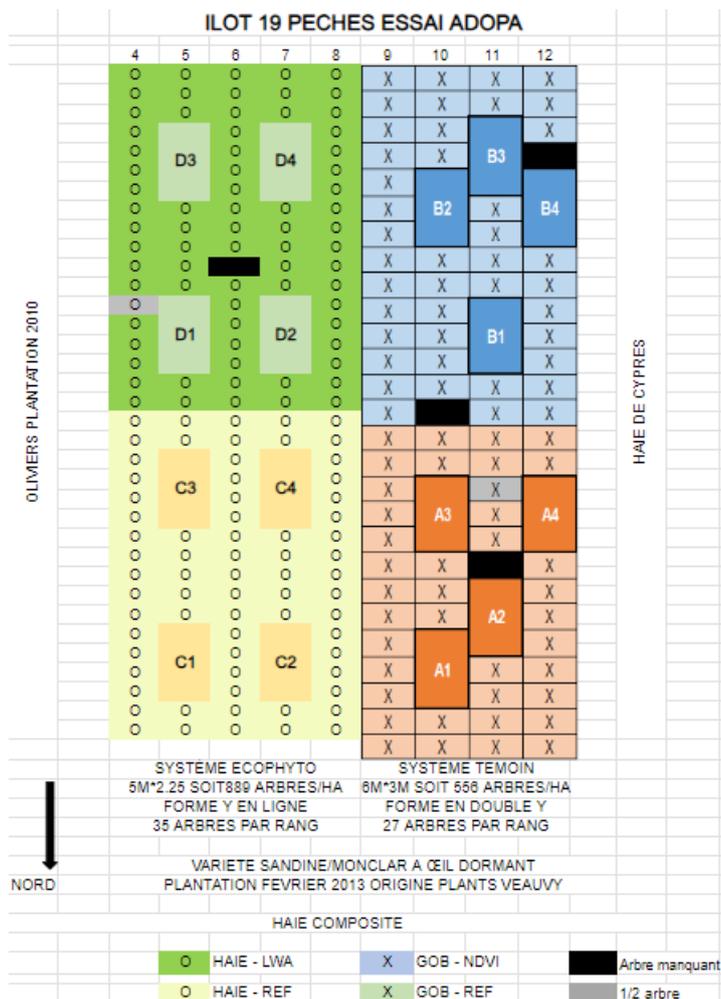


Figure 11 : Schéma de la parcelle 19, parcelle d'intérêt du projet (Comité de Pilotage d'ADOPA, 2024). HAIE – REF = haie fruitière traitée à pleine dose, HAIE-LWA = haie dont le traitement est modulé avec le LWA, GOB-REF = gobelets traités à pleine dose, GOB – NDVI = gobelets dont le traitement est modulé avec le NDVI. Le nord est situé vers le bas sur le plan.

Le site principal de l'étude compte une parcelle sur le site de SudExpé – Saint Gilles (30800) à 10 km de Nîmes. La variété support de l'essai est « Sandine », une variété de nectarine blanche, dont la parcelle a été plantée en 2013. La parcelle contient 4 modalités : elle est coupée en deux parties ; une partie côté Nord et une partie côté Sud. La moitié Nord correspond à la modalité pleine dose, où la dose appliquée sera toujours la dose maximale autorisée/préconisée. La moitié Sud correspond à la partie « modulation de dose », où la dose va évoluer en fonction de l'indicateur. Concernant les deux autres modalités, la parcelle est coupée en deux autres parties ; une partie côté Ouest, une partie côté Est. Cette séparation permet de distinguer les deux modes de conduites expérimentés dans le projet. Sur la moitié Ouest, c'est le mode de conduite en gobelet qui est réalisé, contrairement au mode de conduite en haie fruitière sur la moitié Est, qui contient une plus haute densité de plantation d'arbres. La distance d'inter-rang varie entre la partie haie fruitière et gobelet : 5 mètres pour la modalité conduite en haie fruitière et 6 mètres pour la modalité conduite en gobelets. La parcelle contient au total 11

rangs et les rangs d'étude (mesure des arbres, notations sur fruits, ...) sont les rangs centraux afin d'éviter tout effet extérieur sur les bordures du rang. Un cahier des traitements effectués au cours de la saison et des entretiens est rigoureusement tenu.

Cette parcelle est la plus représentative de l'essai, car elle est celle dont la plupart des informations nécessaires sont connues, car elle est directement présente sur le site d'expérimentation. D'autres parcelles sont également suivies chez des producteurs afin de tester les algorithmes de traitements d'images satellites.

Dans l'objectif de voir l'influence de l'enherbement sur l'indicateur, une mesure de l'enherbement est effectuée chaque semaine. Cette mesure n'a pas pour objectif d'être la plus précise possible, elle fera état de la taille moyenne de l'enherbement pour l'ensemble de la parcelle, en prenant deux uniques mesure une fois par semaine (dans la mesure du possible), une effectuée au rang 6 (modalité haie fruitière) et une autre au rang 10 (modalité gobelet).

La validation des indicateurs se fera selon les mesures faites sur le terrain. La référence principale concernant l'évolution végétative sera une mesure du TRV/LWA (en fonction de la conduite) par mois entre février et juillet.

On ne mesure que la canopée traitée donc la mesure s'effectue de la branche la plus basse à la plus haute. Les valeurs relevées sont la hauteur traitée (de la branche la plus basse à la plus haute), la largeur (évaluée à mi-hauteur de l'arbre), la taille de l'inter-rang (une seule fois) et la taille des troncs (une seule fois également).

Ces mesures permettent de calculer le LWA et le TRV, dont la formule est rappelée ci-dessous :

$$\bullet \quad LWA = \frac{2 \times \text{Hauteur traitée} \times 10\,000 \text{ m}^2}{\text{Distance inter-rang}}$$
$$\bullet \quad TRV = \frac{\text{Largeur} \times \text{Hauteur traitée} \times 10\,000 \text{ m}^2}{\text{Distance inter-rang}} \times \frac{2}{3}$$

Pour chaque parcelle, 10 répétitions sont définies (marquage aléatoire des 10 arbres, en ne gardant tout de même que des arbres représentatifs). Les mesures sont prévues entre le début de la végétation (février) et le milieu de la croissance végétative (juin) à raison d'une mesure par mois.

Durant la même période que les mesures manuelles, deux vols de drone sont effectués afin de faire des mesures de photogrammétrie. La durée entre les deux vols, de 3 mois, permet de suivre l'évolution en 3 dimensions du verger. Ces vols sont effectués par la Chambre d'Agriculture du Gard. Le recueil des données et leur traitement est effectué par leur opérateur. Les mesures de photogrammétrie permettent un diagnostic plus précis de l'évolution végétative que les mesures manuelles. Mais, du fait que ces drones soient assez chers, qu'ils appartiennent à la Chambre d'Agriculture du Gard et que le pilote du drone est le seul à pouvoir le manœuvrer, peu de vols sont réalisés. Ces vols sont réalisés sur la parcelle 19 (à SudExpé) ainsi que deux parcelles de producteurs également à Saint-Gilles.

Enfin, un suivi régulier des parcelles est effectué afin de comprendre au mieux le comportement des indicateurs vus depuis un satellite. Un suivi hebdomadaire est effectué afin de repérer les pressions phytosanitaires subies par la parcelle 19 à SudExpé. Ce suivi phytosanitaire est également l'occasion de relever les éventuels branches charpentières cassées, chutes inattendues de feuilles (qui fait partie des symptômes par exemple de certaines attaques de bio agresseurs comme le *Fusicocum*) ou dans des cas plus extrêmes, de la mort de certains arbres.

Analyse des données

La comparaison des images satellitaires avec une vérité terrain est compliquée sur vergers. En effet, pour obtenir une estimation précise du volume foliaire des vergers, il faudrait enlever l'ensemble des feuilles d'arbres et mesurer leurs surfaces sur un échantillon suffisamment grand, ce qui n'est pas faisable pour des raisons de temps de travail trop élevé et de destruction des arbres. Deux types d'analyses non destructives ont donc été mises en place sur les indices extraits des images satellitaires. Une première analyse consiste à étudier

qualitativement l'évolution des indicateurs, les données de LWA/TRV, l'évolution végétative captée par la photogrammétrie et les données de travaux sur la parcelle qui est menée. Une seconde analyse consiste à comparer ces indices avec les volumes de végétation extraits des acquisitions réalisées par drone. Ces mesures sont celles se rapprochant le plus de la vérité terrain, même si elles ne représentent pas parfaitement le volume foliaire (porosité de l'arbre non prise en compte). Une régression linéaire a été réalisée pour évaluer la relation entre les mesures de volume obtenues par photogrammétrie et les valeurs des indicateurs aux mêmes dates et sur les mêmes parcelles. La fonction « lm() » de Rstudio a été utilisée pour estimer le modèle linéaire. Une fois le modèle ajusté, le coefficient de détermination R^2 a été extrait du modèle. Nous nous focaliserons sur les indices qui s'approchent le plus de la courbe d'évolution végétative des valeurs manuelles et par drone, tout en mettant en avant l'indice qui atteint sa valeur de plateau au plus proche de la pleine végétation et qui permet une modulation de la dose étalée temporellement.

2.2 Evaluation de la performance sanitaire d'itinéraires phytosanitaires différents en utilisant un scénario d'adaptation de la dose en fonction d'indicateurs

Scénarios et modalités étudiées

Le tableau ci-dessous explique la mise en place de la modulation de dose à SudExpé sur la parcelle I9 :

Tableau 2 : Explication de la modulation de dose en fonction des conduites du verger

Modalité	SudExpé
Gobelet référence	Application de la dose maximale recommandée / ha Mouillage à 750 l/ha
Gobelet NDVI	Mesure de l'indicateur NDVI chaque mois grâce à la plateforme <i>Crop monitoring</i> . En fonction de la valeur de NDVI, calcul de la dose et du mouillage par rapport au NDVI max sur les 5 dernières années (0,85)
Haie référence	Application de la dose maximale recommandée / ha Du stade A à la récolte : mouillage à 400 l/ha
Haie LWA	Mesure de l'indicateur LWA chaque mois. En fonction de la mesure de LWA, calcul de la dose par rapport au LWA de 17 000 m ²

Lorsque l'on parle de mouillage, cela fait référence à la quantité d'eau utilisée pour appliquer le produit sur une surface donnée. Ainsi, pour un mouillage à 750 l/ha, cela signifie que les 750 litres (eau + produit phytosanitaire) sont pulvérisés sur 1 hectare. Les modalités de référence suivent un programme avec un mouillage constant à 750 l / ha et une dose de produit maximum correspondant soit à la dose maximum homologuée pour l'usage soit à la dose recommandée dans la zone ou par le fabricant.

Les indicateurs de végétation permettent de moduler le volume de mouillage et de ce fait la dose produit. L'indicateur choisi pour moduler la dose de produits sur les vergers en gobelet est le NDVI :

$$Mouillage_{NDVI} = \frac{Mouillage\ pleine\ veg \times NDVI_{calculé}}{NDVI_{ref}}$$

Le NDVI_{ref} correspond à la valeur de NDVI maximale atteinte ces 5 dernière années sur chaque parcelle expérimentale (0,85 pour les pêcheurs). Il existe une valeur plancher en dessous de laquelle quelque soit la valeur du NDVI mesuré, on ne descend pas. Il s'agit de 400 l/ha, en dessous de cette valeur pour des vergers en gobelet on postule que la performance de pulvérisation est trop altérée. Le choix du NDVI pour moduler la dose s'est effectué avant ce stage. Il a été choisi pour sa forte utilisation en agronomie et sa facilité d'accès.

Ainsi on peut définir une gamme de mouillage qui correspondent à des valeurs de NDVI mesurée et à partir desquels on peut calculer le pourcentage de la dose de produit appliquée :

Tableau 3 : Grille de réduction de la dose en fonction des valeurs de NDVI relevées

Mouillage	% de la dose produit	NDVI mesuré pêcher
400 l	53 %	≤ 0,48
450 l	60%	]0,48 ; 0,54]
500 l	67%	]0,54 ; 0,60]
550 l	73%	]0,60 ; 0,65]
600 l	80%	]0,65 ; 0,71]
650 l	87%	]0,71 ; 0,77]
700 l	93%	]0,77 ; 0,82]
750 l	100%	> 0,82

La grille sera également réalisée avec les indicateurs prospectés, permettant d'évaluer les doses appliquées si ces indicateurs avaient été utilisés durant la saison 2024.

Evaluation phytosanitaire des vergers

La pression en bioagresseurs est mesurée sur la parcelle 19. Ils permettent de rendre compte de la différence de couverture phytosanitaires des modalités. Les traitements d'adaptation de la dose sont réalisés à partir des premières mesures début février. Ils concernent tous les traitements nécessaires à la couverture phytosanitaire. De ce fait, les principaux bioagresseurs concernés par le dispositif et sur lesquels seront réalisés les notations sont les suivants :

Tableau 4 : Enumérations des bio agresseurs pour lesquels si une pression suffisante est observée, une notation est déclenchée.

Pêcher	
Maladies	Cloque, Oïdium, (Rouille), Monilia et maladies de conservation
Ravageurs	Puceron, Thrips, (TOP), forficule

Afin de suivre le plus pertinemment possible l'état sanitaire des différentes modalités du dispositif, des observations régulières sont réalisées. Par ailleurs une surveillance de type SBT (surveillance biologique du territoire) est effectuée sur tout le site expérimental de Saint-Gilles, de ce fait les périodes de sensibilité et d'expression des éventuels symptômes seront identifiées. SudExpé possède divers essais spécifiques certains bioagresseurs qui incluent des témoins non-traités. Ces témoins serviront d'indicateurs de pression, mais ne seront pas inclus au traitement statistique des données. Sur cette saison, uniquement une notation Cloque du pêcher (sur feuilles) et Thrips (sur fruits) ont été réalisées.

Cette saison étant marquée par la forte présence de Cloque et Thrips mais peu du reste (Monilia, rouille, Tordeuse Orientale du Pêcher, etc.), le tableau suivant résume le protocole suivi pour ces notations sur bioagresseurs.

Tableau 5 : résumé des protocoles déclenchés en fonction de la pression constatée lors des tours phyto

Pêcher	
Bioagresseur	Indicateur
Cloque	Nombre de foyer de cloque par arbre
Thrips	Comptage des populations avant la chute des pétales + Notation sur petits fruits du Thrips californien. Comparaison aux fruits à la récolte

Notations avant récolte et post-récolte

Pour chaque rang de la parcelle inclut dans les modalités suivies (i.e. le rang 5,6,7 et 10,11,12), 3 plateaux de 15 fruits, utilisés pour le suivi des maladies de conservation, sont réalisés. Cela représente 3 plateaux par rang. En plus de cela, 3 plateaux mélangeant des fruits du rang 5,6 et 7 et 3 plateaux mélangeant les fruits du rang 10,11 et 12 sont réalisés. Les fruits de ces plateaux sont spécialement sélectionnés afin qu'ils ne présentent aucune blessure, aucune maladie, ils ont tous la même maturité et la même dureté. Ces plateaux sont immédiatement placés dans une pièce à la température et l'humidité contrôlées (22°C et 70% d'humidité constante).

Une fois les fruits stockés, ils sont observés tous les 3 jours. La première observation permet de retirer du compte total les fruits qui présentent des blessures non vues. Par la suite, à chaque

observation, les maladies de conservation sont relevées, et les fruits en présentant sont retirés des plateaux pour éviter qu'ils ne contaminent d'autres fruits. Par ailleurs, sur certaines maladies qui se propagent dans l'espace comme le *Rhizopus*, qui produit des 'poils' s'étirant à partir du fruit, si ces poils viennent à entrer en contact avec d'autres fruits, ils sont immédiatement retirés et supprimés du décompte total.

Avec ce suivi, on peut savoir combien de temps les fruits se conservent et à quelles maladies de conservation ils sont confrontés.

Evaluation économique et marge d'acceptation

Afin de s'approcher le plus possible de la réalité à laquelle font face les producteurs, une évaluation économique est réalisée. Elle prend en compte les coûts en produits phytosanitaires, les coûts de main d'œuvre ainsi que d'utilisation du matériel. Ces coûts sont comparés entre la modalité de pleine dose et la dose modulée sur toute la saison 2024, ainsi que les pertes économiques dû à l'état des fruits. Une comparaison des différents scénarios d'adaptation de la dose permet donc d'estimer si le producteur gagne économiquement à moduler la dose de produits phytosanitaire sur ses vergers de cultures de pêches/nectarines. Par exemple, s'il gagne peu sur l'achat des produits phytosanitaires mais qu'il est assez impacté sur la quantité de fruits commercialisable, ce scénario n'est pas viable pour lui.

3. Résultats

3.1 Sélection des indicateurs de végétation à expérimenter

Les indices retenus pour cette étude sont le **LAI** (Leaf Area Index), le **FCOVER** (Fraction of Vegetation Cover) et le **FAPAR** (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation).

Le **LAI** est défini comme la moitié de la surface développée des éléments photosynthétiquement actifs de la végétation par unité de surface horizontale au sol. Il détermine l'étendue de l'interface par laquelle la canopée échange de l'énergie (comme le rayonnement solaire) et de la matière avec l'atmosphère. Il permet d'évaluer la densité de la végétation. (Weiss et al., 2020) Ses valeurs ne possèdent pas de bornes fixes, il va de 0 (aucune feuille au-dessus de la surface du sol) à 8 voire plus (forêts denses)

Le **FAPAR** correspond à la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm) absorbé par la canopée. Le FAPAR donne des informations sur la productivité primaire de la végétation. Il dépend de la structure de la canopée, des propriétés optiques des éléments végétaux et des conditions d'éclairement. Il se réfère uniquement aux parties vertes de la canopée (Weiss et al., 2020). Ses valeurs varient entre 0 (0% de la végétation absorbe de la lumière) à 1 (elle absorbe toute la lumière).

Le **FCOVER** mesure la fraction du sol couverte par une végétation verte. Il quantifie le rapport entre la biomasse et le sol. Il est calculé à partir de l'indice de surface foliaire (LAI) et d'autres variables structurelles de la canopée. Il est très linéairement lié avec la réflectance et très peu sensible à l'échelle. Comme le LAI et le FAPAR, seulement les éléments verts sont considérés. Les éléments verts considérés ici sont des feuilles dont le contenu en chlorophylle est supérieur à $15\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. (Weiss et al, 2020) Ses valeurs varient de 0 (0% du sol est couvert) à 1 (100% du sol est couvert)

Les algorithmes ont été développés par Weiss et Baret de l'INRAE d'Avignon. Ce sont des réseaux de neurones (modèle de machine learning utilisant des processus qui reproduisent la façon dont les neurones biologiques fonctionnent afin d'identifier des phénomènes, évaluer, etc.) entraînés sur des simulations basées sur le modèle de transfert radiatif PROSPECT, un modèle utilisé largement pour la compréhension et la prédiction des interactions entre les radiations électromagnétiques et les feuilles. Un autre modèle est utilisé, SAIL, un modèle simulant la réflectance de la canopée. Ils n'ont pas été entraînés sur des mesures de terrain car ils estiment qu'il y a trop d'incertitudes liées aux mesures sur le terrain.

Ces indices utilisent les bandes B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 et B12. Ces bandes, exceptées la 3, sont des bandes possédant une résolution de 20 mètres. Un redimensionnement est nécessaire afin que toutes soient à 20 mètres de résolution. Une fois calculés, les valeurs des indices, concernant la parcelle d'intérêt, sont exportées depuis le logiciel. Un fichier vectoriel en format .shp contient les parcelles d'intérêt. Le logiciel *SNAP Toolbox* exporte, pour chaque indice calculé et chaque parcelle présente dans la tuile, les données suivantes :

Id	Band	average	maximum	median	minimum	p90_threshold	p95_threshold	sigma	total
Parcelles_Adopa_3	lai	0.7770	1.0061	0.6805	0.6021	1.0057	1.0057	0.1533	4
Parcelles_Adopa_3	fcover	0.3199	0.3708	0.3151	0.2621	0.3707	0.3707	0.0390	4
Parcelles_Adopa_3	fapar	0.4631	0.5212	0.4426	0.4099	0.5211	0.5211	0.0414	4

Figure 12 : Données exportées par le logiciel *SNAP Toolbox* concernant les indices de végétation (average = moyenne, median = médiane, p90_treshold = 90ème percentile, total = nombre de pixels évalués)

3. 2 Calcul d'indicateurs d'imagerie satellite afin de caractériser la végétation des vergers sur les périodes 2023 et 2024

La parcelle présente sur le site d'expérimentation (parcelle 19) est découpée en deux petites parcelles dans les résultats suivants : la **parcelle 3** et la **parcelle 4**. La parcelle 3 représente la modalité conduite en gobelet et la parcelle 4 représente la modalité conduite en haie. Afin de constater l'évolution végétative du verger, des photos ont été mises en annexe. Elles couvrent la période du stage. De même, les stades phénologiques ont été ajoutés en annexe afin de connaître le début de la période de croissance végétative.

Résultats de l'année 2024

Parcelle 3 : Evolution du LAI/FAPAR/FCOVER/NDVI sur la campagne 2024

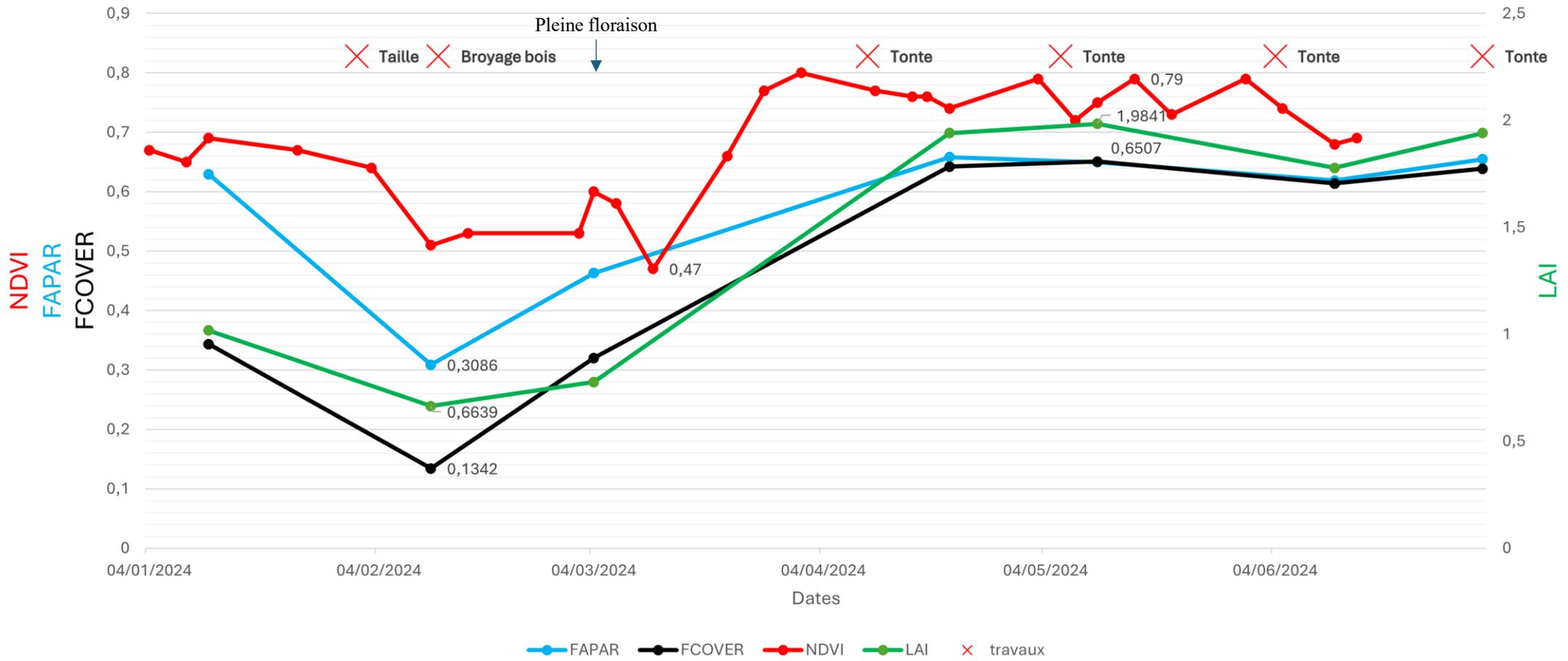


Figure 13 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2024 sur la parcelle 19 conduite en gobelet associée à ses travaux. Les indices sont sans unité.

Parcelle 4 : Evolution du LAI/FAPAR/FCOVER/NDVI sur la campagne 2024

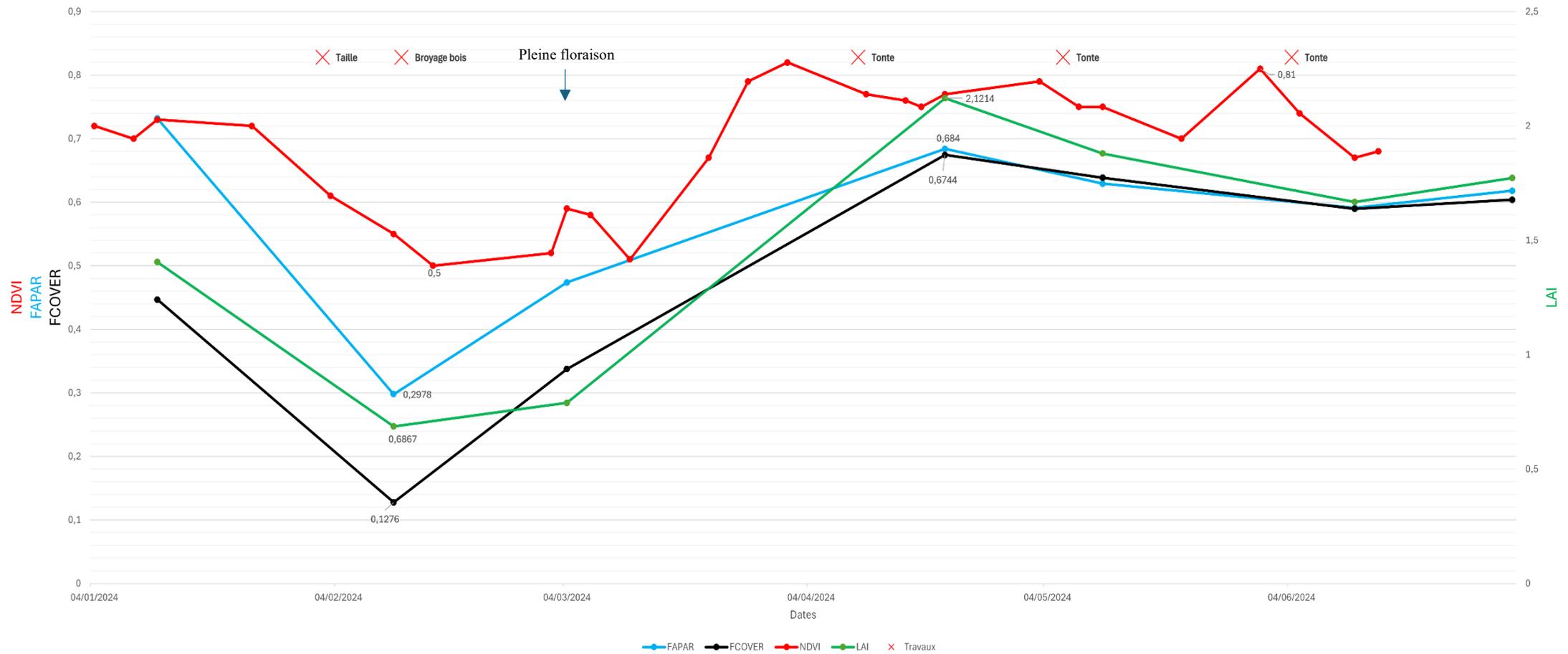


Figure 14 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2024 sur la parcelle 19 conduite en haie fruitière associée à ses travaux. Les indices sont sans unité.

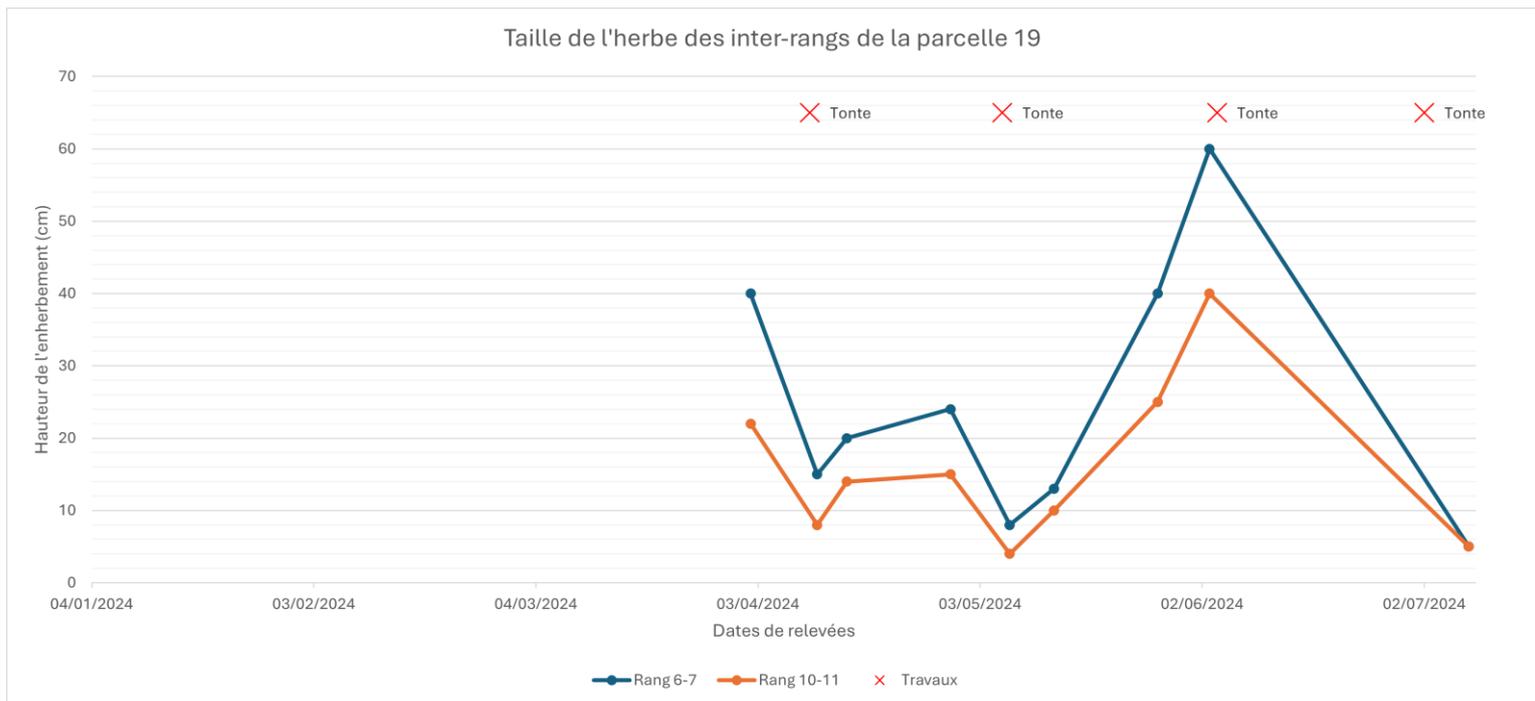


Figure 15 : Graphique de l'évolution des inter-rangs enherbés associé aux travaux. L'inter-rang 6-7 est un inter-rang de la parcelle 4 (conduite en haie) et l'inter-rang 10-11 est un inter-rang de la parcelle 3 (conduite en gobelet)

Les figures 13 et 14 montrent l'évolution des indicateurs prospectés sur la saison 2024 et sur la parcelle I9 qui est découpée en deux sous-parcelles, la 3 et la 4. L'évolution des indicateurs durant toute la saison est similaire, que l'on se trouve sur la modalité conduite en gobelet ou la modalité conduite en haie fruitière.

On observe des valeurs élevées de tous les indicateurs en janvier, lorsque les pêcheurs sont en dormance et sans feuilles, puis tous les indicateurs chutent jusqu'à leur valeur la plus basse de la saison en février (0,5 pour le LAI ; 0,13 pour le FCOVER ; 0,30 pour le FAPAR et 0,5 pour le NDVI). Le 04 mars marque la pleine floraison observée dans les parcelles. Celle-ci marque le début du développement des feuilles et dure environ 10 jours. Par la suite, on observe une croissance de ces valeurs jusqu'à leur plateau qui est obtenu fin avril. Celui-ci, pour le NDVI, est atteint au 1^{er} avril de la saison. Le fait qu'il n'y ait pas de valeur pour le LAI, FCOVER et FAPAR entre le 04 mars et le 21 avril ne nous permet pas de conclure sur le fait qu'un plateau est atteint plus ou moins tôt dans la saison par les autres indicateurs. Les valeurs se stabilisent jusqu'à la fin de leur relevé en juillet. Les chutes de valeurs de NDVI semblent concorder avec les travaux effectués sur la parcelle, à savoir les tailles et tontes. Ayant une tendance similaire, aucun des trois indicateurs (LAI, FAPAR et FCOVER) ne se démarque. En revanche, le NDVI présente de nombreuses variations et ne présente pas de tendance similaire aux autres indicateurs. Il est important de noter que la fréquence des mesures est plus élevée sur le NDVI. Toutefois, l'amplitude des trois indices est supérieure à l'amplitude du NDVI.

La figure 15 montre une chute de l'enherbement après chaque tonte dans les inter-rangs. Le niveau d'enherbement n'est donc pas considéré constant au cours de la saison. Une différence de hauteur d'enherbement est remarquée entre les deux inter-rangs, qui ne s'explique pas par une différence de conduite, car les tontes ont eu lieu au même moment à chaque fois pour les deux inter-rangs. Couplé aux figures 13 et 14, on observe une tendance similaire entre le niveau d'enherbement et les faibles variations de NDVI entre avril et juin.

TRV en m³/ha de la parcelle 19 selon les modes de conduites

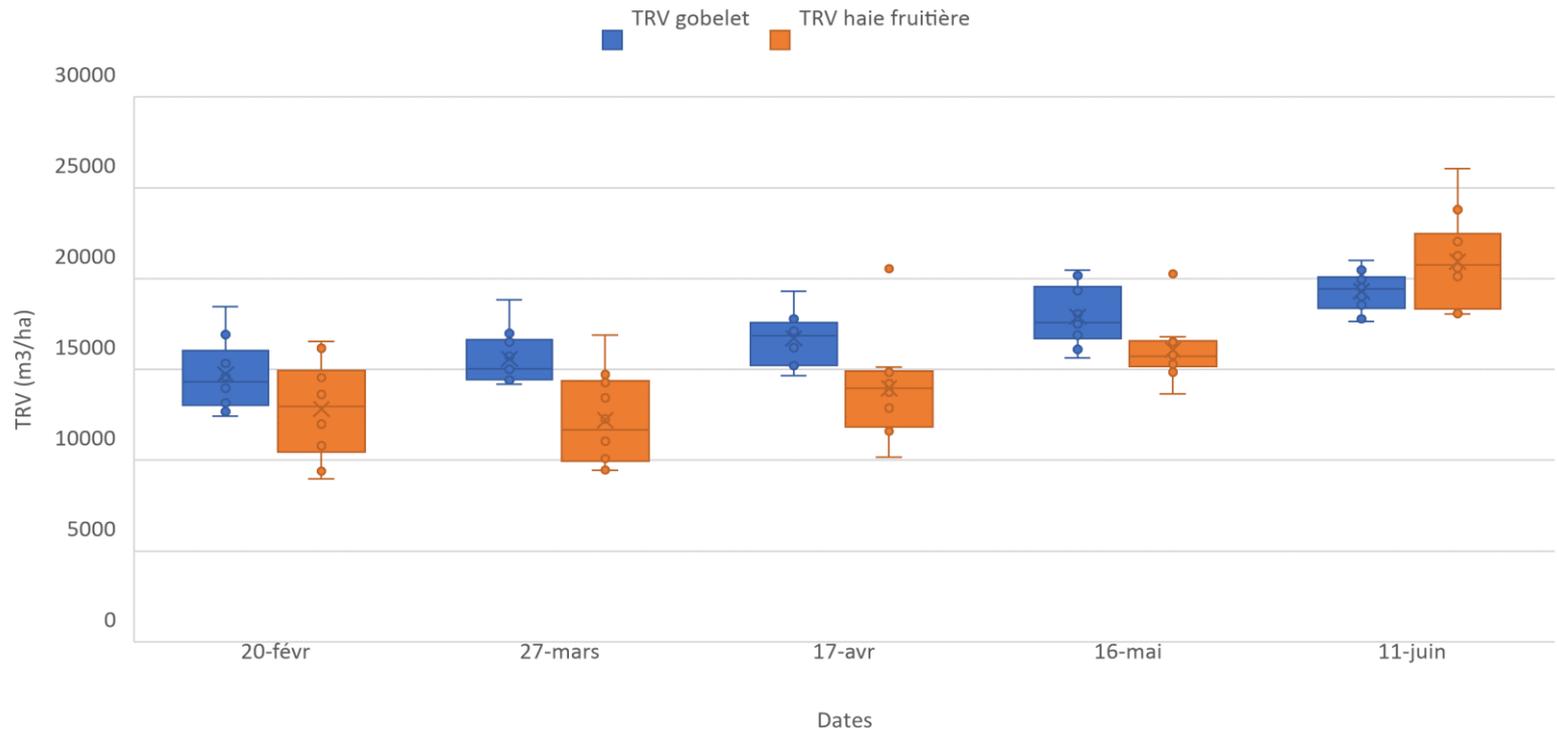


Figure 16 : Boxplot de l'évolution du TRV sur la saison 2024, entre le début de végétation (février) et la fin de végétation (juin) sur les 10 arbres en gobelet et 10 arbres en haie fruitière de la parcelle 19. Les croix dans les boîtes à moustache représentent la moyenne, la ligne horizontale centrale est la médiane

LWA en m²/ha de la parcelle 19 selon les modes de conduites

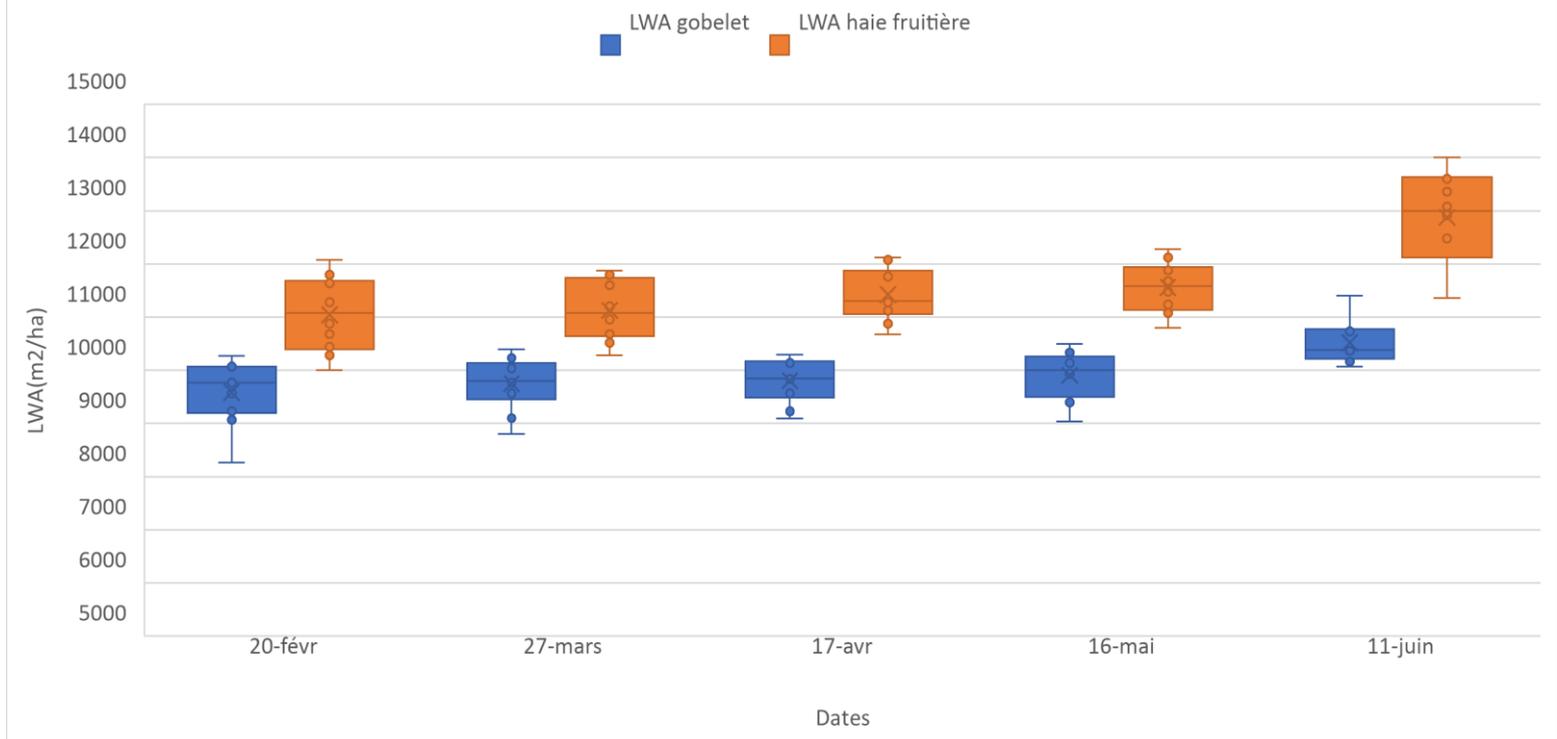


Figure 17 : Boxplot de l'évolution du LWA sur la saison 2024, entre le début de végétation (février) et la fin de végétation (juin) sur les 10 arbres en gobelet et 10 arbres en haie fruitière de la parcelle 19. Les croix dans les boîtes à moustache représentent la moyenne, la ligne horizontale centrale est la médiane

Sur la figure 16, on observe la croissance du TRV selon les deux modes de conduites, sur un nombre restreint d'individus (10 par conduite). Les tendances observées montrent une croissance du TRV dans la saison. La dispersion des valeurs est grande et est plus élevée sur les arbres conduits en haies fruitières, avec quelques valeurs qui semblent extrêmes notamment en avril et en mai pour les haies fruitières. La croissance est de + 36% pour les gobelets et + 55% pour les haies fruitières avec cet indicateur.

La figure 17 nous montre l'évolution du LWA sur ces mêmes arbres. Le LWA ne semble pas décrire de réelle croissance pour les vergers conduits en gobelet, contrairement à ceux conduits en haie fruitière. La croissance est de +5% pour les gobelets et + 18% pour les haies fruitières.

Comparaison avec l'année 2023

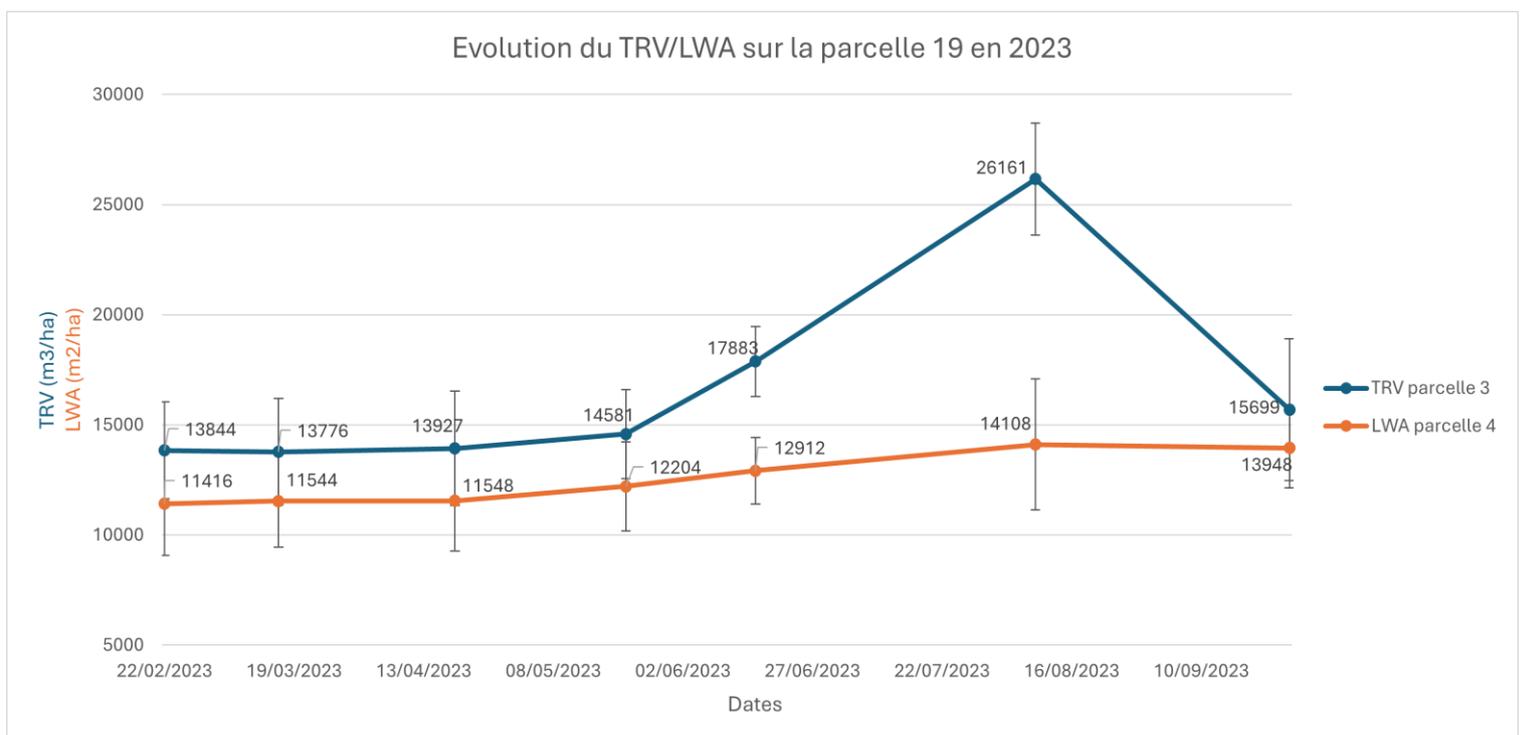


Figure 18 : Graphique de l'évolution des indicateurs TRV et LWA entre le début de végétation (février) et la fin de végétation (août) sur la parcelle 19 en 2023.

Avec le nombre de mesures effectuées en 2023 sur la même parcelle, on observe une croissance de la végétation à partir de juin jusqu'en début août, où les vergers atteignent leur pleine végétation. On peut noter toutefois une incertitude non négligeable de ces mesures de moyennes, ce qui ne permet pas de conclure significativement sur le LWA. En revanche, la tendance montre également une croissance jusqu'en début août. N'ayant pas de mesure avant début août, on ne sait pas si le maximum de la végétation est atteint plus tôt dans l'année.

On peut comparer avec les valeurs de 2023 des indicateurs tirés d'images satellites :

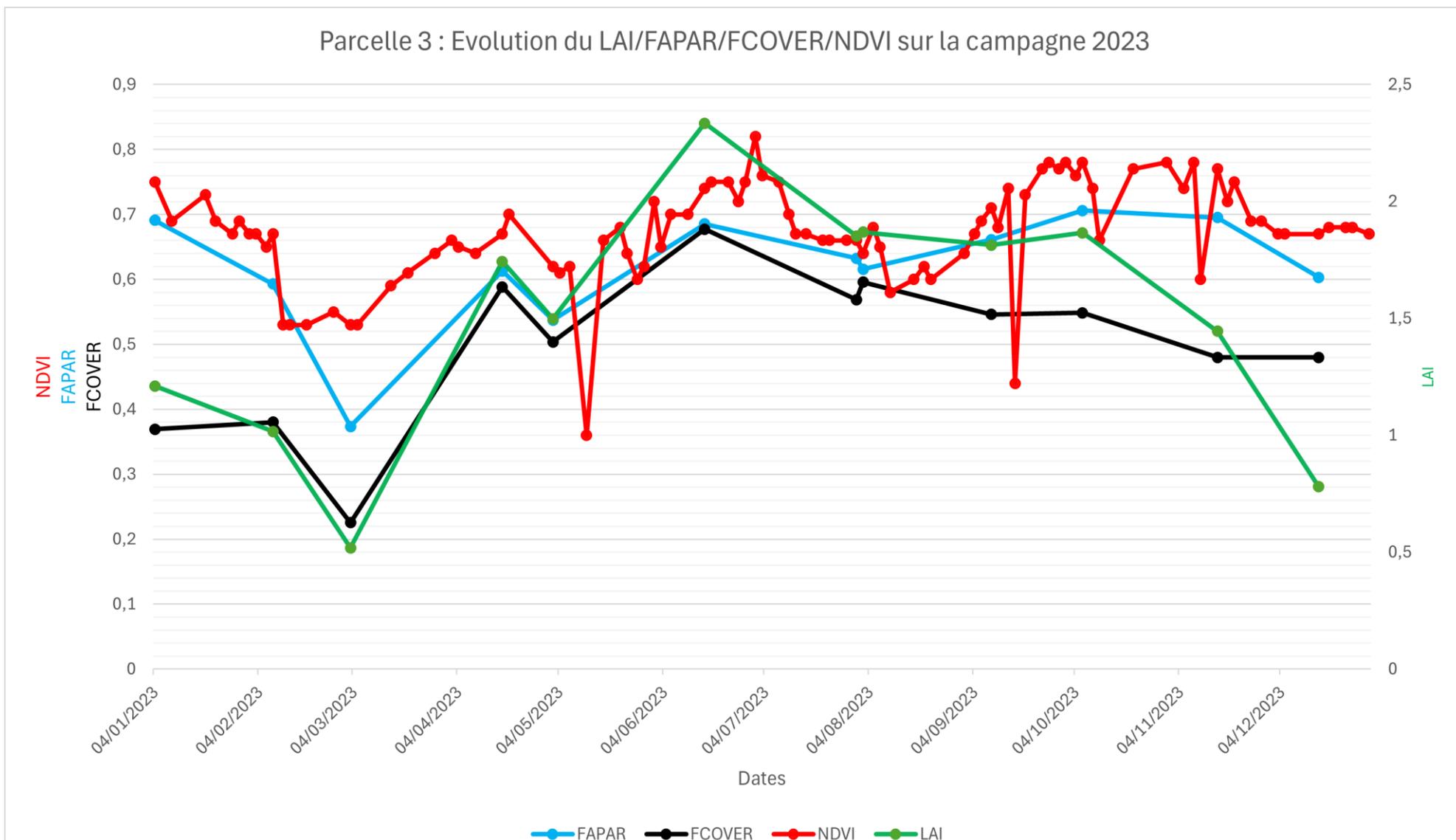


Figure 19 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2023 sur la parcelle 19 conduite en gobelet associée à ses travaux. Les indices sont sans unité.

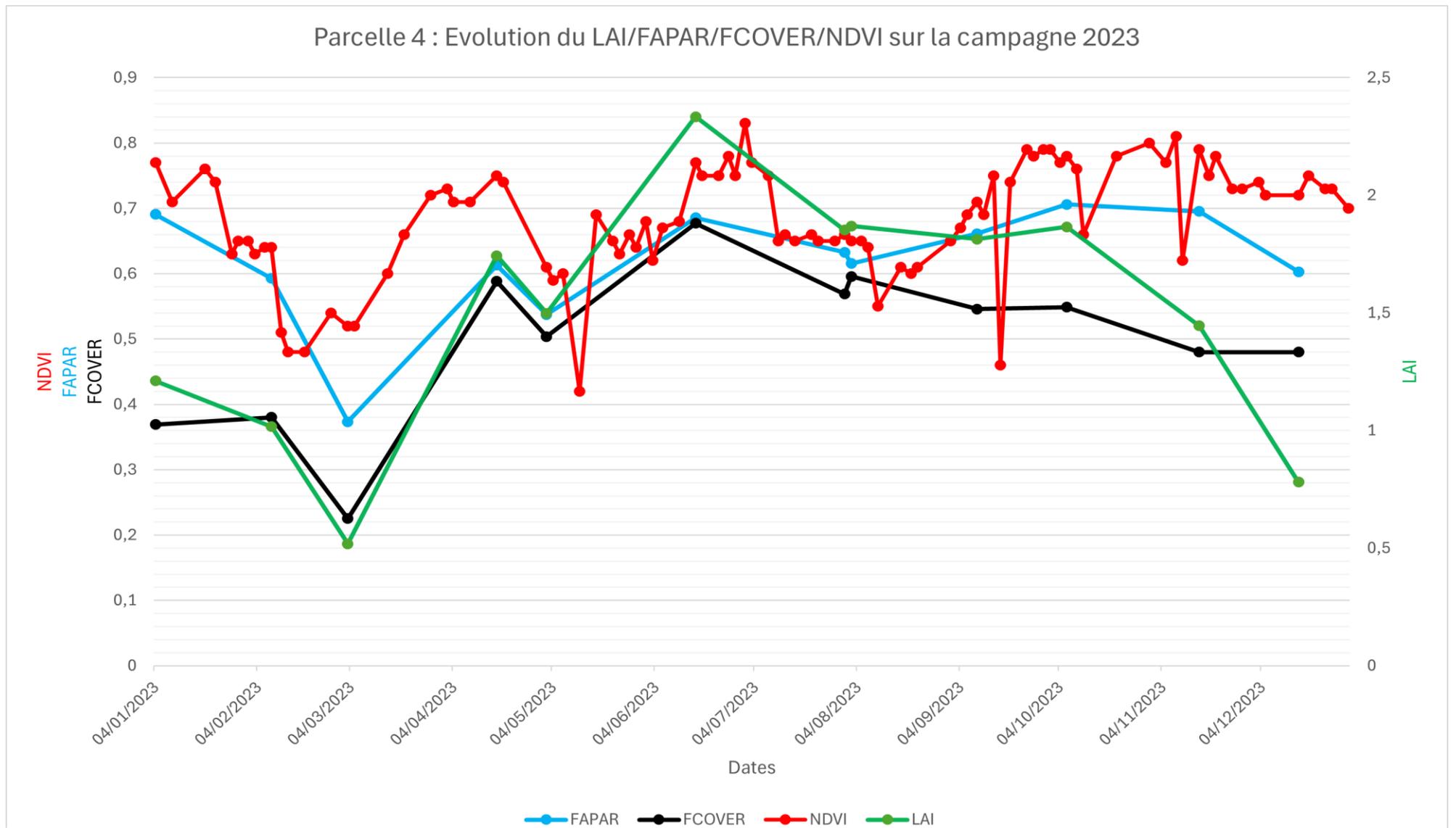


Figure 20 : Graphique de l'évolution des indicateurs NDVI, FAPAR, FCOVER et LAI au cours de la saison 2024 sur la parcelle 19 conduite en haie fruitière associé à ses travaux. Les indices sont sans unité.

Contrairement aux figures 13 et 14, ces graphiques concernant les indicateurs se basent sur toute l'année 2023. On observe les mêmes tendances entre les deux parcelles, si ce n'est que le LAI présente une meilleure amplitude aux mêmes dates (1,8 d'amplitude des valeurs entre février et juillet). Le nombre de données prises pour le NDVI est plus élevé par mois que pour les autres indicateurs. On remarque deux valeurs extrêmes auxquelles le NDVI chute. A ces dates correspondent des taux de précipitation de 2,6 et 6,2 mm. Également, le LAI semble chuter à partir d'octobre au moment de la chute des feuilles, là où les autres indicateurs restent stables.

Mesures de drones

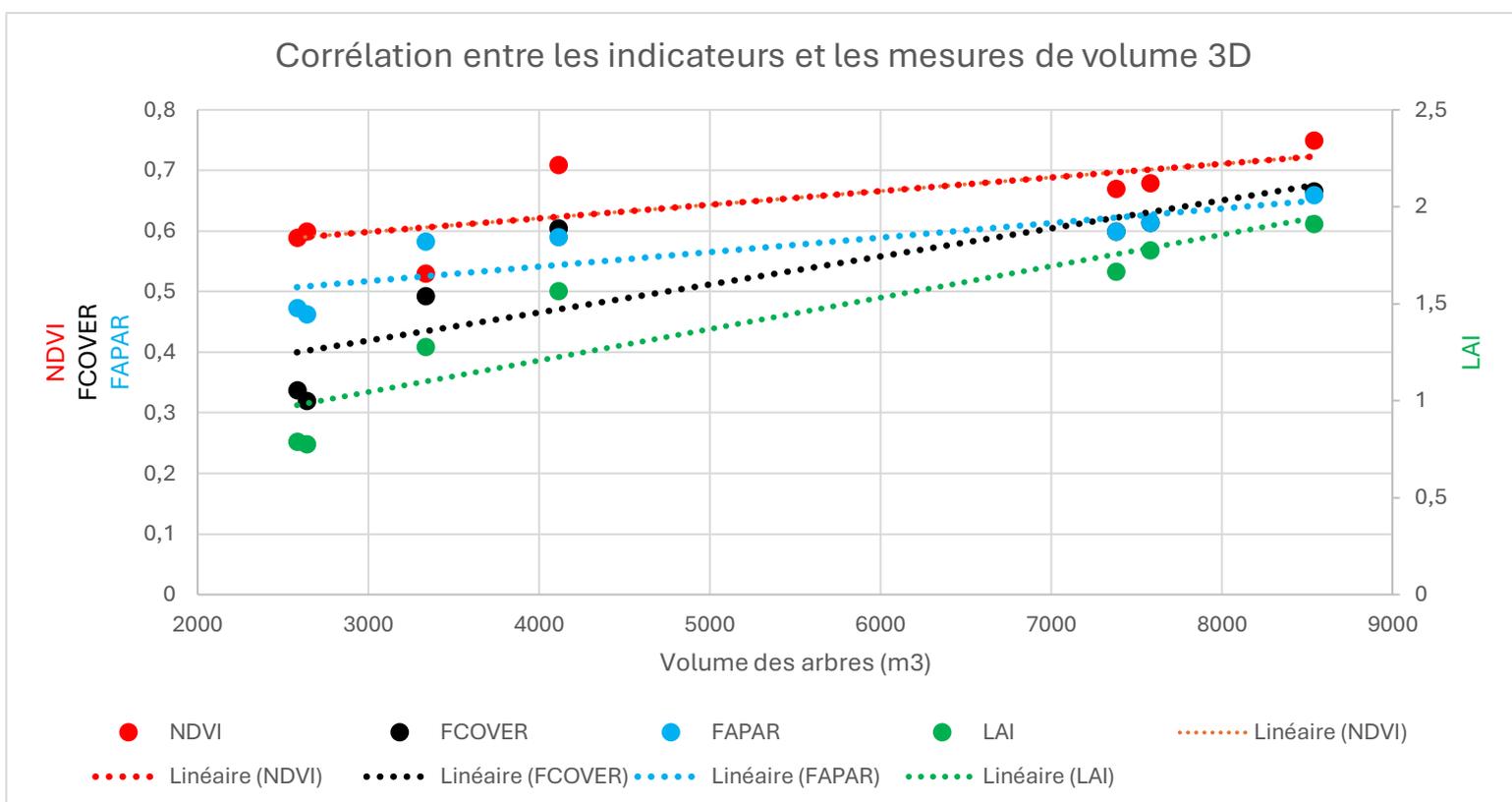


Figure 21 : Courbes de corrélation entre les mesures de volume en 3D effectuées par photogrammétrie et les valeurs d'indicateurs aux dates correspondantes.

La figure 21 montre les valeurs des 4 indicateurs corrélées au volume des vergers mesurés par photogrammétrie. 4 parcelles ont été survolées, dont la parcelle 3 conduite en gobelet et la parcelle 4 en haie. Une courbe de tendance linéaire a été sélectionnée pour chacun des indicateurs. Les coefficients de corrélation R^2 sont de : 0,57 pour le NDVI, 0,71 pour le FAPAR, 0,72 pour le FCOVER et 0,81 pour le LAI. La régression linéaire du LAI montre la plus forte corrélation avec le volume des arbres parmi les indicateurs présentés.

3.3 Evaluation de la performance sanitaire d'ITK phytosanitaire utilisant un scénario d'adaptation de la dose en fonction d'indicateurs

Scénarios de modulation de la dose avec les indicateurs prospectés

Tableau 6 : Grille de réduction de dose en fonction des indicateurs de végétation. Le pourcentage fait référence au pourcentage de la dose maximale autorisée et non pas au pourcentage de réduction de dose.

Mouillage	% de la dose produit	NDVI mesuré	LAI mesuré	FCOVER mesuré	FAPAR mesuré
400 l	53 %	≤ 0,48	≤ 0,60	≤ 0,17	≤ 0,34
450 l	60%	]0,48 ; 0,54]	]0,60 ; 0,83]	]0,17 ; 0,25]	]0,34 ; 0,39]
500 l	67%	]0,54 ; 0,60]	]0,83 ; 1,06]	]0,25 ; 0,33]	]0,39 ; 0,44]
550 l	73%	]0,60 ; 0,65]	]1,06 ; 1,29]	]0,33 ; 0,41]	]0,44 ; 0,49]
600 l	80%	]0,65 ; 0,71]	]1,29 ; 1,52]	]0,41 ; 0,49]	]0,49 ; 0,54]
650 l	87%	]0,71 ; 0,77]	]1,52 ; 1,75]	]0,49 ; 0,57]	]0,54 ; 0,59]
700 l	93%	]0,77 ; 0,82]	]1,75 ; 1,98]	]0,57 ; 0,65]	]0,54 ; 0,64]
750 l	100%	> 0,82	> 1,98	> 0,65	> 0,64

Cette grille est élaborée sur les valeurs maximums et minimums des indices de ces deux dernières années. 6 intervalles permettent de segmenter la dose de produit. Elle est ensuite utilisée pour comparer au NDVI utilisé durant la saison 2024.

Tableau 7 : Pourcentage de modulation de la dose appliquée aux vergers en fonction des valeurs des indicateurs aux dates de traitements. * = traitements où la pleine dose était appliquée pour raisons techniques, ** = valeur manquante dû au fait qu'il n'y ait pas de relevé NDVI à cette période

Dates des traitements phytosanitaires	Pourcentage de la dose appliquée avec le NDVI	Pourcentage de la dose avec le LAI	Pourcentage de la dose avec le FCOVER	Pourcentage de la dose avec le FAPAR	Pourcentage de la dose théorique avec le NDVI
07/02*	0	60	53	60	67
13/02*	0	60	53	53	60
15/02*	0	60	53	53	60
29/02	60	60	67	73	60
15/03	60	73	73	87	67
22/03	60	87	80	93	60

04/04	87	100	87	100	93
15/04	87	93	93	100	87
26/04	87	93	93	100	87
06/05	87	100	100	100	87
10/06	87	93	93	93	87
25/06	87	93	93	100	**

La valeur de NDVI qui sert à calculer le pourcentage de la dose est relevée sur la plateforme *Crop monitoring*. La colonne avec le NDVI théorique représente la même méthode de lecture des indices par dates que le LAI, FAPAR et FCOVER, c'est-à-dire en utilisant les tendances des indicateurs d'après la figure 13.

Les pourcentages en fonction de la dose maximale autorisée montrent des différences de modulation. Le LAI, FAPAR et FCOVER montrent des modulations moindres de la dose, contrairement au NDVI qui n'atteint jamais la dose maximale. En revanche, ils montrent un passage moins brusque vers la pleine dose. La modulation de dose est plus échelonnée sur ces trois indicateurs et en particulier sur le FCOVER. A noter que ces prises de valeurs d'indicateurs sont pour la plupart faites sur les courbes de tendances des indicateurs de la figure 13, et non sur de vraies données à ces dates, contrairement au NDVI qui possède une plus grande fréquence de prises de valeurs du fait de son automatisé. La différence faite entre les deux NDVI permet de montrer l'écart des NDVI considérés lors de l'application. En effet, les applicateurs ne regardent pas toujours la valeur actualisée du NDVI. La colonne des valeurs théorique montre ce qu'aurait dû être le pourcentage de dose.

Dates de traitement	Nom commercial du produit	Matière active	Cible	Dose appliquée via NDVI	Dose maximale autorisée	Unité de la dose par ha	Type	Pourcentage dose via NDVI	Pourcentage dose via LAI	Pourcentage dose via FAPAR	Pourcentage dose via FCOVER	Dose appliquée si LAI	Dose appliquée si FAPAR	Dose appliquée si FCOVER
7-févr.	Bouillie bordelaise RSR Disp.	sulfate de cuivre	cloque	6,25	25,00	kg	Fongi							
13-févr.	Merpan 80 WDG	captane	cloque	3,00	3,00	kg	Fongi							
15-févr.	Tepeki	flonicamide	pucerons	0,14	0,14	kg	insecti							
29-févr.	Syllit MAX	dodine	cloque	1,20	2,00	l	Fongi	60	0,60	0,73	0,67	1,2	1,46	1,34
29-févr.	KARATE X FLOW	lambda-cyhalothrine	thrips	0,07	0,11	l	insecti	60	0,60	0,73	0,67	0,066	0,0803	0,0737
15-mars	Carbazinc flash	zirame	cloque	1,50	2,50	kg	fongi	60	0,73	0,87	0,73	1,825	2,175	1,825
15-mars	Limocide	huile essentielle d'écorce orange	oïdium*	3,60	6,00	l	insecti	60	0,73	0,87	0,73	4,38	5,22	4,38
22-mars	sigma DG	captane	cloque	1,80	3,00	kg	fongi	60	0,87	0,93	0,80	2,61	2,79	2,4
4-avr.	Thiovit JET	Soufre 7,5	oïdium	6,53	7,50	kg	fongi	87	1,00	1,00	0,87	7,5	7,5	6,525
4-avr.	Movento	spirotétrammat	pucerons	1,31	1,50	l	insecti	87	1,00	1,00	0,87	1,5	1,5	1,305
15-avr.	Thiovit JET	Soufre 7,5	oïdium	6,53	7,50	kg	fongi	87	0,93	1,00	0,93	6,975	7,5	6,975
26-avr.	Signum	strobilurine + SDHI	oïdium**	0,52	0,60	kg	fongi	87	0,93	1,00	0,93	0,558	0,6	0,558
6-mai	Signum	strobilurine + SDHI	oïdium**	0,52	0,60	kg	fongi	87	1,00	1,00	1,00	0,6	0,6	0,6
10-juin	Coragen	anthranilamide	TOP	0,15	0,18	l	insecti	87	0,93	0,93	0,93	0,16275	0,16275	0,16275
25-juin	revysion	méfentrifluconazole	Monilia	1,57	1,80	l	fongi	87	0,93	1,00	0,93	1,674	1,8	1,674
25-juin	mandarin GOLD	esfenvalérate	TOP	0,26	0,03	l	insecti	87	0,93	1,00	0,93	0,0279	0,03	0,0279
12-juil.	luna experience	tebuconazole + fluopyram	Monilia	0,44	0,50	l	fongi	87	0,93	1,00	0,93	0,465	0,5	0,465

Tableau 8 : Traitements effectués en 2024 sur la conduite en gobelet de la parcelle 19, associés aux doses appliquées (via NDVI) et les doses théoriquement appliquées selon les indicateurs prospectés. * = la cible est officiellement « Oïdium » mais est en réalité « Thrips ». ** = la cible est officiellement « Oïdium » mais est en réalité « Rouille ». Les 3 premiers traitements n'ont pas été décidés en fonction des indicateurs, le matériel et les opérateurs n'étaient pas encore prêts à moduler la dose.

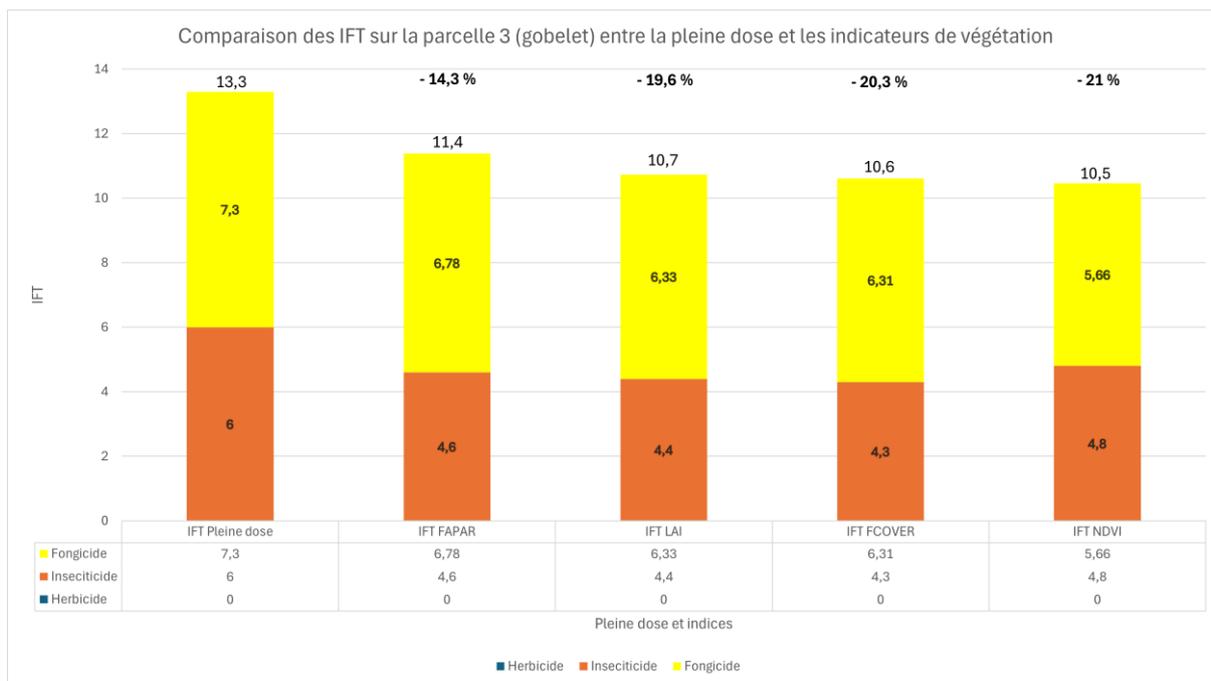


Figure 22 : Calcul des IFT (Indice de Fréquence de Traitement) des différents scénarios de modulation de la dose de produits sur la saison 2024. L'IFT du scénario avec le NDVI est calculé avec la dose appliquée par les applicateurs et non la dose du NDVI théorique.

Les IFT de produits de biocontrôles ne sont pas pris en compte dans le calcul. Le scénario de modulation de la dose qui présente le plus grande réduction d'IFT est lorsque le NDVI est utilisé, avec 21 % d'IFT en moins. Il est important de noter que les trois premiers traitements de la saison ont été réalisés à pleine dose, l'IFT devrait alors être plus bas pour les scénarios de modulation. Pour le calcul des IFT du LAI, FAPAR et FCOVER, les 3 premiers traitements de la saison ont également été considérés à pleine dose. Le FAPAR est l'indicateur qui montre la moins forte baisse avec 14 %. Le FCOVER et le LAI semblent se rapprocher des 21 % de baisse d'IFT. Donc, pour les différents scénarios simulés, la réduction de dose entre les indicateurs NDVI, LAI et FCOVER est similaire (19 à 21% de réduction par rapport à la pleine dose)

Résultats phytosanitaires et économiques de la modulation de dose en 2024

Bioagresseur concerné	Date	Pourcentage de pousses atteintes Gobelet-référence				Pourcentage de pousses atteintes Gobelet-NDVI				Pourcentage de pousses atteintes Haie-référence				Pourcentage de pousses atteintes Haie-LWA			
		S	T	M	G	S	T	M	G	S	T	M	G	S	T	M	G
Cloque du pêcher	27 mars	1,81 %				1,87 %				0,12 %				0,44 %			
Cloque du pêcher	10 avril	3,13 %				6,06 %				0,94 %				1,31 %			
Thrips Méridionalis	17 avril	75,75	15	5,25	4	75,5	13,25	6,25	5	74,5	13,25	5,75	6,5	72	13,75	8	6,25

Tableau 9 : Résultats des notations phytosanitaires effectuées sur fruits en verger. S = Sain, T = Traces, M = dégâts modérés et G = dégâts graves

Conduites	Gobelet-référence			Gobelet-NDVI			Haie-référence			Haie-LWA		
Qualité des fruits à la récolte en moyenne	85% sains	11% comm.	5% non comm.	87% sains	8% comm.	5% non comm.	77% sains	12% comm.	11% non comm.	76% sains	8% comm.	17% non comm.
Dégâts présents sur les fruits en moyenne	9,3% thrips méridio.	1,5% forficule	1,8% monilia	8% thrips méridio.	1,8% forficule	1% monilia	10% thrips méridio.	2,8% forficule	5,5% monilia	5% thrips méridio.	4,0% forficule	11,3% monilia
Pourcentage de fruits pourris après 7 jours de conservation	14%			10,6%			20%			16,4%		
Rendement en tonne/ha	44,3			44,8			26,7			24,8		
Chiffre d'affaires en €/ha	103 170			105 565			61 931			59 417		
Nombre de résidus sur les échantillons	5 résidus quantifiables			7 résidus dont un présent en quantité non quantifiable et aucun significativement différent de gobelet-référence			6 résidus quantifiés			6 résidus quantifiés donc 3 résidus significativement plus bas que la haie-référence		

Tableau 10 : Résumé des données de notations phytosanitaires sur fruits et performances économiques de la parcelle 19 en fonction des 4 modalités. Comm = Fruit commercialisable. Non comm = fruit non commercialisable. Méridio = meridionalis

Le tableau 8 montre une pression légèrement plus forte sur les vergers conduits en gobelet. En mars, le nombre de pousses de feuilles présentant de la cloque n'est pas différent au sein d'une même conduite, entre référence et dose modulée. En avril, on remarque une hausse en général de la pression en cloque, et entre les modes de conduites, une hausse de la pression sur les parcelles modulées en dose. Pour ce qui est de la pression en *Thrips meridionalis*, elle semble similaire peu importe la conduite et la modulation ou non de dose.

4. Discussion

4.1 Discussion des résultats

Discussion concernant le choix du LAI, FAPAR et FCOVER à étudier

Ces indicateurs ont été retenus pour plusieurs raisons.

Premièrement, ces indices sont reconnus et identifiés comme variables climatiques essentielles par différents organismes (GCOS mentionné précédemment). Ces indices sont censés évoluer avec l'évolution végétative, et en particulier le LAI et le FCOVER qui sont, respectivement, un indice mesurant la densité de la végétation en termes de quantité de feuilles et un indice mesurant la couverture du sol par les feuilles. Ils sont étudiés et l'algorithme intégré dans le logiciel principal concernant l'analyse des images de cette étude, *SNAP Toolbox*, a été développé par INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement). La robustesse des auteurs de l'algorithme et des créateurs du logiciel *SNAP* (ESA, European Space Agency) sont les critères primordiaux concernant l'étude de ces indicateurs. Ces indicateurs sont utilisés pour qualifier l'évolution végétative d'un verger. En perspective, les poids servant à faire fonctionner ce réseau de neurones sont ajustables afin de correspondre mieux aux vergers.

Il aurait été intéressant d'ajouter un indicateur calculé sur un autre logiciel que *SNAP Toolbox* et *Crop Monitoring*. Puisque le LAI, FAPAR et FCOVER ont la même structure (réseaux de neurones), sont calculés sur la même plateforme et ici dans cette étude, sur les mêmes images, cela permet de les comparer en limitant le nombre de biais d'autres applications et d'autres méthodes de calcul. Cependant, cela ne permet pas de rendre compte des potentiels biais de l'application *SNAP Toolbox*, puisqu'uniquement celle-ci a été utilisée.

Discussion sur les résultats de calculs d'indicateurs de végétation

Les tendances observées des indicateurs ont du sens. Le NDVI augmente pendant la saison, ce qui signifie que d'après sa formule, la réflectance du proche infrarouge augmente et celle du rouge diminue. Les feuilles absorbent plus dans le rouge que dans l'infrarouge. Plus la densité de feuilles de la canopée augmente, plus ce rapport est élevé, ce qui montre une augmentation du nombre de celles-ci, mais jusqu'au plateau de valeurs. Le NDVI est particulièrement sujet à la saturation dans les zones de végétation dense, ce qui limite sa capacité à représenter fidèlement les régions fortement végétalisées. La tendance du LAI, indicateur dont la valeur théorique augmente avec la quantité totale de feuilles au-dessus d'une unité de surface du sol, suit également l'évolution végétative du verger. Le FCOVER est semblable dans le sens où, comme le LAI, il est un indicateur de végétation par rapport à une surface donnée. Sa croissance traduit l'augmentation du recouvrement du sol par les feuilles.

Le FAPAR lui, montre aussi une augmentation au cours de la saison. L'augmentation de cet indice indique la croissance de la proportion de la lumière du soleil (entre 400 et 700 nm) qui est captée et absorbée par les feuilles afin d'effectuer la photosynthèse, ce qui permet de montrer son augmentation dans le verger.

Les tendances des indicateurs en 2023 et 2024 sont semblables. Des valeurs élevées en janvier, puis une chute en février, ensuite une croissance jusqu'à la pleine végétation, en juin-juillet (le plateau de valeurs est atteint plus tôt en 2024). En comparant les amplitudes des indices, les indicateurs LAI, FAPAR et FCOVER permettent une segmentation sur une plus longue période par rapport à celle du NDVI. Le NDVI atteint sa valeur seuil en 2-3 semaines, ce qui représente un court laps de temps durant lequel la dose est modulée. Sur le graphique des tendances 2023 (figure n°19 et 20), les trois indicateurs atteignent leur valeur maximale plus tard dans la saison. Le FAPAR et le FCOVER restent à peu près stables d'octobre à décembre. Pour le FCOVER, cela pourrait s'expliquer par la chute des feuilles qui laisse une litière résiduelle, et donc influence cet indicateur, qui calcule le recouvrement du sol par les feuilles. Le FAPAR lui semble influencé par la photosynthèse de l'herbe car il ne varie que très peu d'octobre 2023 à janvier 2024.

Ces valeurs élevées en janvier pourraient être expliquées par la présence d'herbes. A cette période, les pêchers n'ont aucune feuille et le NDVI, comme les autres indicateurs, sont sensibles à la lumière réfléchiée par les feuilles. Les températures douces en hiver (rarement en dessous de 0°C, relevés météorologiques annexe 10 et 11) et les précipitations permettent à l'enherbement de continuer à pousser. Par la suite, lors de la taille d'hiver, où les branches des arbres sont taillées, ces branches sont déposées sur les inter-rangs enherbés puis broyées. Ce broyage a pour conséquence de couper l'herbe et pourrait expliquer la chute du NDVI et des autres indicateurs. Lors des tontes plus tard dans la saison, nous n'observons pas la même chute des indicateurs lors des tontes successives. Ce pourrait être expliqué par un volume foliaire (ou le nombre de feuilles des pêchers) sur la parcelle largement supérieure à celui de l'enherbement, qui devient imperceptible lors de l'observation depuis un satellite. Cette influence diminue à mesure que les arbres croissent. Des travaux complémentaires devront être menés, par la suite, afin d'identifier jusqu'à quel moment l'enherbement impacte les indices de végétation et à partir de quel volume foliaire il devient négligeable.

Le fait que les indices atteignent des valeurs plateaux est potentiellement lié à la structure de la canopée. Étant les premières à capter les rayons du soleil, les feuilles de la canopée se développent plus rapidement (Myneni et al., 1995). Lorsque les indices atteignent leur valeur plateau cela signifierait que, en observant la canopée des arbres depuis le satellite, celle-ci s'est stabilisée dans sa croissance végétative et empêche la juste estimation de la croissance foliaire sous la canopée.

Sur les graphiques de 2023 (figure n°19 et 20), la période de récolte peut expliquer la baisse de ces indicateurs. La charge en fruits fait pencher les branches vers le sol et augmente donc la porosité perçue. De plus, une taille « en vert » avant la récolte est réalisée afin de favoriser la fructification. Également, les mois de juillet-août marquent les périodes de fortes chaleurs dans le Gard. Les fortes températures ralentissent les processus photosynthétiques et donc la croissance végétale (Berry, 1980), ce qui peut expliquer la baisse des indicateurs. La croissance des valeurs après août semble montrer le regain de végétation après la récolte et les fortes chaleurs. Le LAI semble avoir une tendance qui illustre bien la végétation sur ce

graphique : croissance de février à juillet, légère chute jusqu'en octobre puis nouvelle chute jusqu'en décembre, corrélée au moment où les arbres perdent leurs feuilles.

La fréquence de prise des données est également primordiale. Les chutes observées sur le NDVI ne sont pas toutes observées sur le LAI, FAPAR et FCOVER mais c'est essentiellement dû au volume des données. Ces trois indicateurs possèdent une donnée par mois tandis que le NDVI possède plusieurs valeurs par mois. Les données ont des dates avant, après ou pendant les chutes du NDVI. On ne peut donc pas conclure sur les chutes aux mêmes dates sur ces indicateurs. Également, l'une des raisons de cette étude est que le NDVI atteint trop tôt dans la saison une valeur plateau de 0,8. Les indicateurs LAI, FAPAR et FCOVER semblent atteindre leur plateau plus tard dans la saison. Cependant, pour en être sûr, il faudrait un échantillonnage supérieur de ces indicateurs.

Concernant la corrélation entre les mesures de volume, effectuées par photogrammétrie, et les valeurs d'indices, le nombre de répétition est faible. 7 valeurs de volume ont été recueillies à deux différentes dates. Pour réellement voir s'il y a corrélation ou non, il faudrait plus de mesures à différentes dates et sur plusieurs parcelles, par exemple une mesure par mois entre février et juillet. Cependant, c'est le LAI qui montre le meilleur coefficient R^2 d'une modélisation linéaire des valeurs, suivi du FCOVER. Ils semblent le mieux expliquer les volumes selon un modèle linéaire. Le NDVI semble le moins adapté pour quantifier des volumes de vergers.

Discussion sur les mesures de TRV de LWA comme indicateurs de végétation

Sur les figures 16 et 17, la dispersion des données sur le TRV est supérieure à la dispersion des LWA, ce qui montre que cet indicateur possède trop de variabilité. La réalité des mesures sur le terrain est que lorsque la végétation se densifie, il est plus compliqué de trouver les branches qui illustrent le mieux la hauteur, largeur et profondeur de l'arbre. Cette erreur est multipliée par 2 pour ce qui est de la largeur et la profondeur car les opérateurs doivent juger, chacun à une extrémité de l'arbre, quelle branche correspond à la plus large. Cette opération est plus simple sur les haies, qui présentent moins une structure de la végétation en 3 dimensions. On observe, comme les précédents travaux d'ADOPA/Pulvarbo, une croissance de 20-30% pour ces indicateurs entre le début de la végétation et la pleine végétation.

Discussion sur les scénarios de modulation de dose obtenus avec les indicateurs de télédétection

La grille de modulation de dose (tableau n°7) en fonction des indicateurs est obtenue à partir des valeurs des indices sur la figure n°13. On voit qu'avec ces indicateurs, le nombre d'IFT augmente, ce qui n'était pas attendu. Le postulat était que le NDVI arrivait trop rapidement à un plateau, donc à pleine dose, et que des indicateurs montrant mieux l'évolution végétative permettrait une modulation temporelle plus espacée.

A noter tout de même que les trois premiers traitements de la saison étaient fixés à pleine dose car les applicateurs n'avaient pas réalisé les préparatifs au niveau de l'équipement afin de moduler la dose. De plus, la colonne « NDVI théorique » fait référence au NDVI normalement mesuré pour ces traitements, car certains des traitements ont été réalisés à des mesures de NDVI de dates antérieures, donc non actualisées. En prenant cette colonne, les modulations de doses théoriquement effectuées avec le LAI, FAPAR et FCOVER présentent des proportions de produits inférieures ou égales. En comparant les pourcentages de dose du FCOVER, qui présente une différence de 0,2 d'IFT, avec les pourcentages de la dose théorique du NDVI, le nombre d'IFT avec le FCOVER devrait être inférieur au NDVI.

Au vu de ces données, le FCOVER et le LAI semblent être des indicateurs intéressants pour suivre l'évolution végétative, car ils présentent une certaine corrélation linéaire avec le volume des arbres, ils permettent une baisse (FCOVER) ou un maintien (LAI) d'IFT par rapport au NDVI, et ils permettent de mieux échelonner la modulation de dose sur la période des traitements.

Discussion des résultats phytosanitaires de la parcelle I9

Seules les notations sur *Thrips meridionalis* et la Cloque du pêcher ont été déclenchées dû à une certaine pression détectée. Les conditions météorologiques de cette saison étaient favorables à la cloque du pêcher. Durant sa période d'infestation (Mars-Avril), de fortes pluies ont été enregistrées avec des précipitations à 47, 92 et 33 mm en mars, ce qui résulte en des périodes longues d'humectations (annexe 10), ce qui favorise l'infestation en cloque du pêcher (Rossi et al., 2006).

On observe (tableau 8) de meilleures performances sur les arbres conduits en gobelets, ce qui rentre en contradiction avec de précédents rapports d'ADOPA affirmant que les haies fruitières diminuent la pression en bioagresseurs et diminuent les maladies de conservation (Nei Giroto, 2021). Cela proviendrait d'une meilleure aération dans les vergers conduits en haies, qui réduit l'humectation et par conséquent réduits des maladies comme le Monilia, qui se développe avec l'humidité.

Une hypothèse expliquant pourquoi nous avons obtenu des données contradictoires serait que les vergers conduits en haie sont plus productifs les premières années de plantation puis s'affaiblissent plus rapidement que les vergers en gobelet avec le temps. De plus, les vergers à SudExpé subissent chaque année différentes expérimentations et sont donc moins vigoureux, ce qui n'est pas comparable à des parcelles de producteurs. Un élément à prendre en compte est que sur cette saison, un grand volume de fruits a été perdu lors des chutes physiologiques dans toute la région, potentiellement en lien avec les températures minimales plus élevée et un ensoleillement moindre au printemps (cas de la pomme et de l'abricot) (Kondo et al., 1987).

On détecte plus de résidus en gobelet modulé qu'en gobelet à pleine dose, ce qui également est contraire aux résultats attendus. Le résidu détecté mais non quantifiable est la pyraclostrobine, une matière active du traitement Signum, le traitement utilisé contre la rouille. Le fait qu'il n'est pas détecté sur les gobelets à pleine dose peut provenir d'une contamination

de la cuve de traitement qui aurait été mal lavée lors du traitement sur la dose modulée, ou bien des échantillons de fruits prélevés pour l'analyse des résidus, qui devraient montrer la présence de ce résidu également sur les gobelets traités à pleine dose.

4.2 Discussion de la méthode

L'un des biais de cette étude réside dans le fait qu'il n'y ait pas de mesure qui représente la réalité observée sur le terrain. Le seul moyen de l'obtenir serait de défolier des arbres, aux différentes périodes de la croissance végétative, et de mesurer la surface de ces feuilles, ce qui est techniquement long et complexe. Ces valeurs permettraient de connaître l'évolution végétative réelle des vergers. Ce qui s'en approche le plus est la mesure par photogrammétrie mais le faible nombre de données ne nous permet pas de conclure.

Un autre point qui doit être questionné est le fonctionnement des indicateurs prospectés. Du fait que ce sont des réseaux de neurones, on ne peut par définition connaître les calculs effectués, là où le NDVI reste très simple et où l'on peut plus facilement comprendre pourquoi on obtient une valeur. Dans le cas des réseaux de neurones, on ne peut pas recalculer afin de comprendre les valeurs si elles nous semblent aberrantes. De plus, les algorithmes utilisent des systèmes d'éliminations de valeurs considérées extrêmes. En opposition, les formules simples de bandes spectrales d'indices comme le NDVI permettent de mieux comprendre un résultat qui nous semble incorrect ou extrême.

Ensuite, l'algorithme fonctionne selon le modèle de transfert radiatif, un modèle qui illustre la manière dont la lumière interagit avec la canopée et les feuilles. En revanche, ce modèle a pour hypothèse que la végétation observée est considérée comme homogène et sans structures spécifiques. Son utilisation dans les vergers est donc moins recommandée que sur des champs uniformes (Weiss et al, 2020). Cependant, étant donné la résolution des images utilisées, on peut se questionner sur le caractère hétérogène des vergers observés.

A prendre en compte également, le temps de traitement pour une image représente beaucoup plus de temps que pour les valeurs de NDVI. Que ce soit avec *Crop monitoring* (payant mais dont les valeurs sont quasi instantanées) ou Copernicus Browser (valeurs de NDVI obtenues rapidement), il est très facile de les obtenir. En revanche, les images satellites étant volumineuses (~ 1 gigaoctet), elles peuvent prendre un certain temps à se télécharger. Par la suite elles doivent être prétraitées (dans notre cas, un redimensionnement pour que toutes les bandes soient à 20m de résolution), ce qui prend également un temps corrélé à la puissance du processeur de l'ordinateur. Et enfin, appliquer l'algorithme, qui prend peu de temps. Il faut ajouter à cela l'utilisation du logiciel *SNAP Toolbox*, qui ne peut pas être interprété facilement par tout le monde. Toutes ces étapes sont à prendre en compte dans les perspectives d'utilisation par les conseillers ou les exploitants.

4.3 Perspectives

Il serait intéressant, afin de mesurer la réelle influence de l'enherbement, de tester ces indicateurs sur une parcelle constamment désherbée et sur une parcelle enherbée, sans vergers. Cela permettrait également de savoir si c'est l'enherbement qui provoque des valeurs d'indicateurs hausses en janvier, suivie de valeurs faibles en février après la taille et le broyage des bois dans l'inter-rang.



Figure 23 : NDVI mesuré depuis un satellite Planetscope (à gauche) et NDVI mesuré depuis un satellite Sentinel-2 (à droite). Vert foncé = 0,85, vert pale = 0,7. Plateforme : Crop monitoring. Photos prises le 27 juin 2024.

Également, l'augmentation de la précision des images satellites pourrait être un levier aux différents problèmes. Si l'herbe a une influence, des images satellites plus précises permettrait de retirer l'enherbement dans le découpage des parcelles. Également, une différence de NDVI sur la parcelle a été remarquée entre les satellites Planetscope et Sentinel-2, mais l'étude des différences n'a pas pu être menée.

Il faudrait également tester ces indicateurs sur de plus grandes parcelles, plus proches de la taille de parcelles d'exploitants. Les deux modes de conduites représentent 4 pixels de 20x20m chacun, ce qui est trop peu pour caractériser la végétation du verger. Les satellites Planetscope présentent moins de

bandes que les satellites Sentinel-2, mais ils pourraient caractériser l'évolution végétative du verger.

Concernant la problématique de transfert, l'utilisation des indicateurs LAI, FAPAR et FCOVER n'est pas recommandé directement dans les mains des producteurs, du fait du temps variable de téléchargement et traitement des images et de la prise en main fastidieuse du logiciel *SNAP*. Un processus d'automatisation du téléchargement puis de l'application des algorithmes serait beaucoup plus intéressant pour des conseillers ou producteurs. Cela a été abordé durant ce stage mais non présenté dans ce mémoire.

Enfin, l'adoption est un critère à ne pas négliger concernant ce dispositif. La prospection d'indicateurs montrant d'autres variables agronomiques, tel que la vigueur des arbres (NDVI couramment utilisé), le stress hydrique (comme le Photochemical Reflectance Index (Ballester et al., 2018)) et d'autres variables agronomiques permettrait de faire accepter un tel dispositif aux producteurs plus facilement.

5. Conclusion

Partant du constat que l'indicateur utilisé pour moduler la dose, le NDVI, atteignait rapidement une valeur plateau de 0,8 avant la pleine croissance du verger, ce stage avait pour but d'identifier des indicateurs de télédétection adaptés à la caractérisation de l'évolution végétative d'un verger de fruits à noyaux, dans l'objectif de réduire la dose de produits phytosanitaires appliqués. Pour atteindre ce but, trois objectifs étaient à remplir :

- **Rechercher des indicateurs évoluant avec le volume foliaire des vergers, calculer ces indices afin d'établir un suivi temporel et vérifier la cohérence de ces indicateurs avec les observations terrain.** Nous avons utilisé plusieurs images provenant des satellites Sentinel-2 sur l'année 2023 et 2024. Le choix des indicateurs à tester s'est porté sur le LAI, le FAPAR et le FCOVER, trois indices présents dans une interface de traitement d'images satellitaires, la *SNAP Toolbox*. Le NDVI était également relevé via la plateforme *Crop monitoring*. Le faible nombre de répétitions, et de vergers différents, ne nous permet pas de conclure fermement concernant l'indicateur à utiliser. Cependant, les valeurs de corrélation entre les mesures de volume par photogrammétrie et les tendances de ces indicateurs sur ces deux années montrent le LAI et le FCOVER comme de meilleurs choix que le FAPAR et le NDVI. Ils ont montré une meilleure corrélation face aux mesures de volume et atteignent leur valeur plateau plus tard dans la saison. Il faudra expérimenter ces indices sur un plus grand nombre de parcelles aux conduites diverses afin d'évaluer leur efficacité à caractériser le volume foliaire des arbres.
- **Orienter le choix de scénarios d'adaptation de la dose en fonction de deux types de conduites et de l'indicateur choisi pour suivre la végétation.** Les réductions de dose effectuées dans l'année via le NDVI ont été confrontés aux réductions théoriques des indicateurs prospectés. Le LAI et le FCOVER ont montré une réduction de dose similaire au NDVI. Également, une analyse des résultats concernant l'état phytosanitaires des arbres et des fruits a été réalisé. Les arbres conduits en gobelets ont montré une meilleure performance en termes de protection phytosanitaire du verger, de fruits commercialisables et de rendement. L'analyse des résidus menée sur les fruits des deux conduites montrent des résultats inattendus avec 5 résidus détectés sur les arbres dont la dose était la dose maximale autorisée, contre 7 résidus sur les arbres dont la dose était modulée par le NDVI.

- **Réflexion apportée aux problématiques de transfert du calcul des indicateurs ainsi que sur la méthode de réduction de dose.** La facilité de récupération des valeurs des indicateurs a été prise en compte. Bien que les indicateurs LAI et FCOVER semblent mieux adaptés, il faut un effort conséquent pour récupérer ces valeurs. Du téléchargement de l'image au prétraitement suivi de l'extraction de ces données sur les parcelles, la facilité d'accès de la donnée n'est pas mise en avant. La facilité d'emploi de la plateforme *Crop Monitoring* ou d'autres services gratuits permettant de récupérer les valeurs de NDVI instantanément est un argument bien plus convaincant concernant le transfert de la méthode de modulation de dose aux producteurs.

Dans une culture, et même une filière, pointée du doigt pour sa forte utilisation de produits phytosanitaires, la modulation de dose de produits phytosanitaires permet de réduire la quantité de produits phytosanitaires utilisés tout en maintenant une couverture phytosanitaire acceptable pour les producteurs. L'utilisation de la télédétection permettra de s'ajuster au mieux à l'évolution végétative des vergers.

D'autres systèmes peuvent se montrer plus efficaces, comme LiDAR HD, le service à venir d'IGN, qui a pour but d'acquérir des données LiDAR haute densité sur l'ensemble du territoire en effectuant des vols d'avions. Ces 10 points par mètre carré pourraient permettre de rendre compte plus précisément de l'évolution de la végétation du verger et de la porosité de la canopée, et cela pourrait mener vers des systèmes de modulation de dose par arbre.

Bibliographie

AGRESTE, 2021. *Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018 - IFT et nombre de traitements*. 2021.

BALLESTER, C., ZARCO-TEJADA, P. J., NICOLÁS, E., ALARCÓN, J. J., FERERES, E., INTRIGLIOLO, D. S. et GONZALEZ-DUGO, V., 2018. Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species. *Precision Agriculture*, février 2018, vol. 19, n° 1, pp. 178-193. DOI : [10.1007/s11119-017-9512-y](https://doi.org/10.1007/s11119-017-9512-y).

BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F. et HUETE, A. R., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, août 1995, vol. 13, n° 1-2, pp. 95-120. DOI : [10.1080/02757259509532298](https://doi.org/10.1080/02757259509532298).

BERRY, J. et BJORKMAN, O., 1980. Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology*, juin 1980, vol. 31, n° 1, pp. 491-543. DOI : [10.1146/annurev.pp.31.060180.002423](https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.002423).

CANNON, R. J. C., 1998. The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology*, octobre 1998, vol. 4, n° 7, pp. 785-796. DOI : [10.1046/j.1365-2486.1998.00190.xISTEX](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00190.xISTEX).

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2024. *C'est de saison : la pêche-nectarine* [en ligne]. [Consulté le 4 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/cest-de-saison-la-peche-nectarine>.

DGCCRF, Service Commun des Laboratoires DGDDI, 2024. *French results from the monitoring of pesticide residues in food* [en ligne]. 23 avril 2024. Zenodo. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://zenodo.org/records/11043852>.

ESA, 2009. *Qu'est-ce que la télédétection ?* [en ligne]. 9 décembre 2009. [Consulté le 5 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_FR/SEMP4O1P0WF_0.html.

FANG, H., BARET, F., PLUMMER, S. et SCHAEPMAN-STRUB, G., 2019. An Overview of Global Leaf Area Index (LAI): Methods, Products, Validation, and Applications. *Reviews of Geophysics*, septembre 2019, vol. 57, n° 3, pp. 739-799. DOI : [10.1029/2018RG000608](https://doi.org/10.1029/2018RG000608).

FRANCEAGRIMER, [sans date]. *Fruits frais : fiche filière* [en ligne]. [Consulté le 12 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.franceagrimer.fr/content/download/72755/document/20240112_FICHE_FILIERE_FRUITS_2024.pdf.

GUICHARD, L., DEDIEU, F., JEUFFROY, M.-H., MEYNARD, J.-M., REAU, R. et SAVINI, I., 2017. Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. *Cahiers Agricultures*, janvier 2017, vol. 26, n° 1, pp. 14002. DOI : [10.1051/cagri/2017004](https://doi.org/10.1051/cagri/2017004).

IGN, 2021. *La photogrammétrie - Institut - IGN* [en ligne]. 10 février 2021. [Consulté le 7 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.ign.fr/institut/kiosque/la-photogrammetrie>.

KONDO, S., ASARI, M. et KUMAGAI, M., 1987. Effects of Weather Conditions, Tree Vigor, and Pruning on the Early Fruit Drop of Apple. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 1987, vol. 55, n° 4, pp. 415-421. DOI : [10.2503/jjshs.55.415](https://doi.org/10.2503/jjshs.55.415).

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, [sans date]. *Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est ?* [en ligne]. [Consulté le 29 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>.

CTIFL, 2021. *Les méthodes développées dans le projet PulvArbo infos_ctifl 369* [en ligne]. [Consulté le 16 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.ctifl.fr/les-methodes-developpees-dans-le-projet-pulvarbo-infos-ctifl-369>.

LI, Z., SHEN, H., WENG, Q., ZHANG, Y., DOU, P. et ZHANG, L., 2022. Cloud and cloud shadow detection for optical satellite imagery: Features, algorithms, validation, and prospects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1er juin 2022, vol. 188, pp. 89-108. DOI : [10.1016/j.isprsjprs.2022.03.020](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.020).

MYNENI, R. B., MAGGIONI, S., IAQUINTA, J., PRIVETTE, J. L., GOBRON, N., PINTY, B., KIMES, D. S., VERSTRAETE, M. M. et WILLIAMS, D. L., 1995. Optical remote sensing of vegetation: Modeling, caveats, and algorithms. *Remote Sensing of Environment*, janvier 1995, vol. 51, n° 1, pp. 169-188. DOI : [10.1016/0034-4257\(94\)00073-VISTEX](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00073-VISTEX).

ROSSI, V., BOLOGNESI, M., LANGUASCO, L. et GIOSUÈ, S., 2006. Influence of Environmental Conditions on Infection of Peach Shoots by *Taphrina deformans*. *Phytopathology*, février 2006, vol. 96, n° 2, pp. 155-163. DOI : [10.1094/PHYTO-96-0155](https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0155).

SUN, Y., REN, H., ZHANG, T., ZHANG, C. et QIN, Q., 2018. Crop Leaf Area Index Retrieval Based on Inverted Difference Vegetation Index and NDVI. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, novembre 2018, vol. 15, n° 11, pp. 1662-1666. DOI : [10.1109/LGRS.2018.2856765](https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2856765).

UNIVERSITÉ PARIS 1, 2008. *Les propriétés optiques des feuilles - Suivi de l'environnement par télédétection* [en ligne]. [Consulté le 12 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.univ-paris1.fr/les-proprietes-optique-des-feuilles-suivi-de-l-environnement-par-telédétection>.

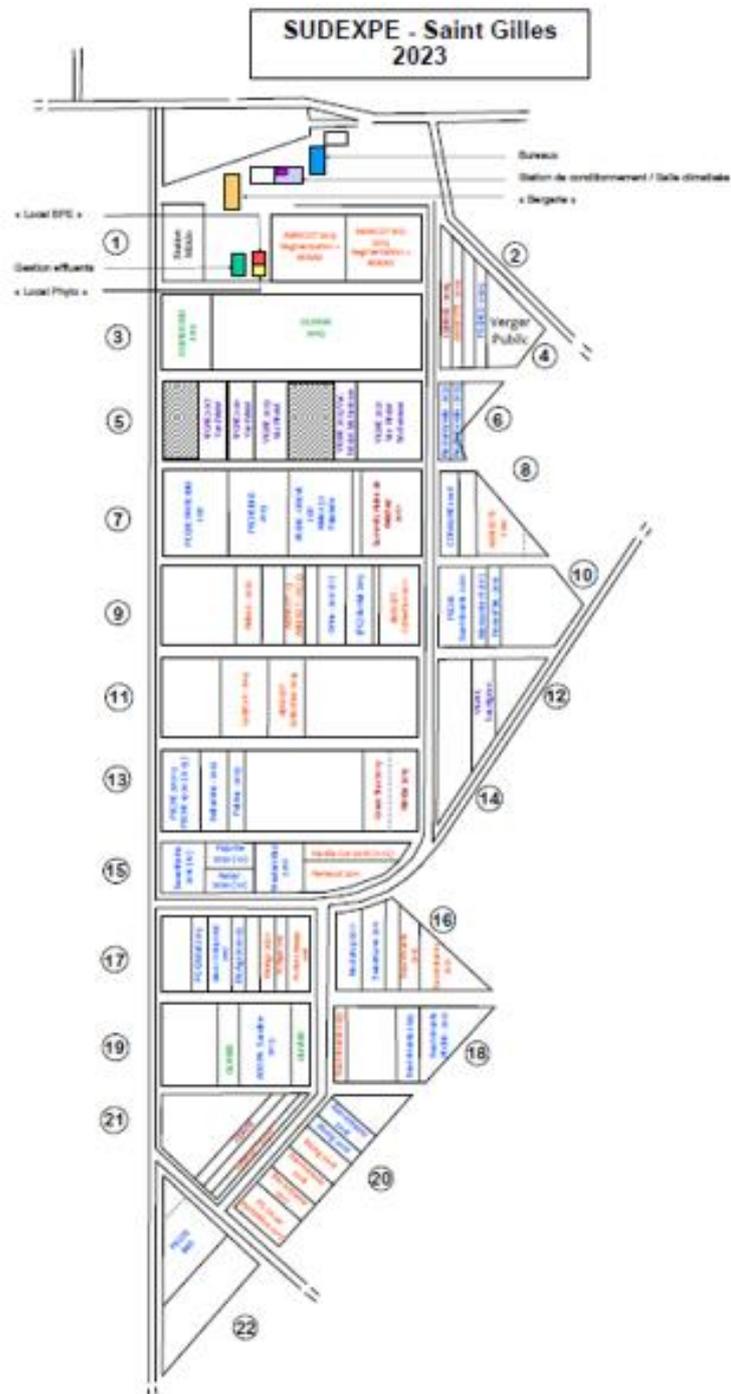
WEISS, M. et JAY, S., 2020. *S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER*. 2020.

Table des annexes

Annexe 1 : Plan des parcelles de SudExpé.....	I
Annexe 2 : Pourcentage d'échantillons avec au moins 1 résidu.....	II
Annexe 3 : Etat des lieux des résidus sur les pêches/nectarines	II
Annexe 4 : Images Sentinel-2 utilisées dans cette étude	III
Annexe 5 : Le logiciel SNAP Toolbox utilisé dans cette étude pour obtenir les valeurs de LAI, FAPAR et FCOVER	III
Annexe 6 : Evolution temporelle de la parcelle 4 (haie fruitière du 27 mars au 5 août 2024) IV	
Annexe 7 : Evolution temporelle de la parcelle 3 (gobelet, du 27 mars au 5 août 2024).....	VII
Annexe 8 : Stade physiologiques du pêcher	X
Annexe 9 : Photographie satellite de SudExpé le 12 mai 2023	X
Annexe 10 : Relevés météo de 2024 sur le site de SudExpé.....	XI
Annexe 11 : Relevés météo de 2023 sur le site de SudExpé.....	XI

Annexes

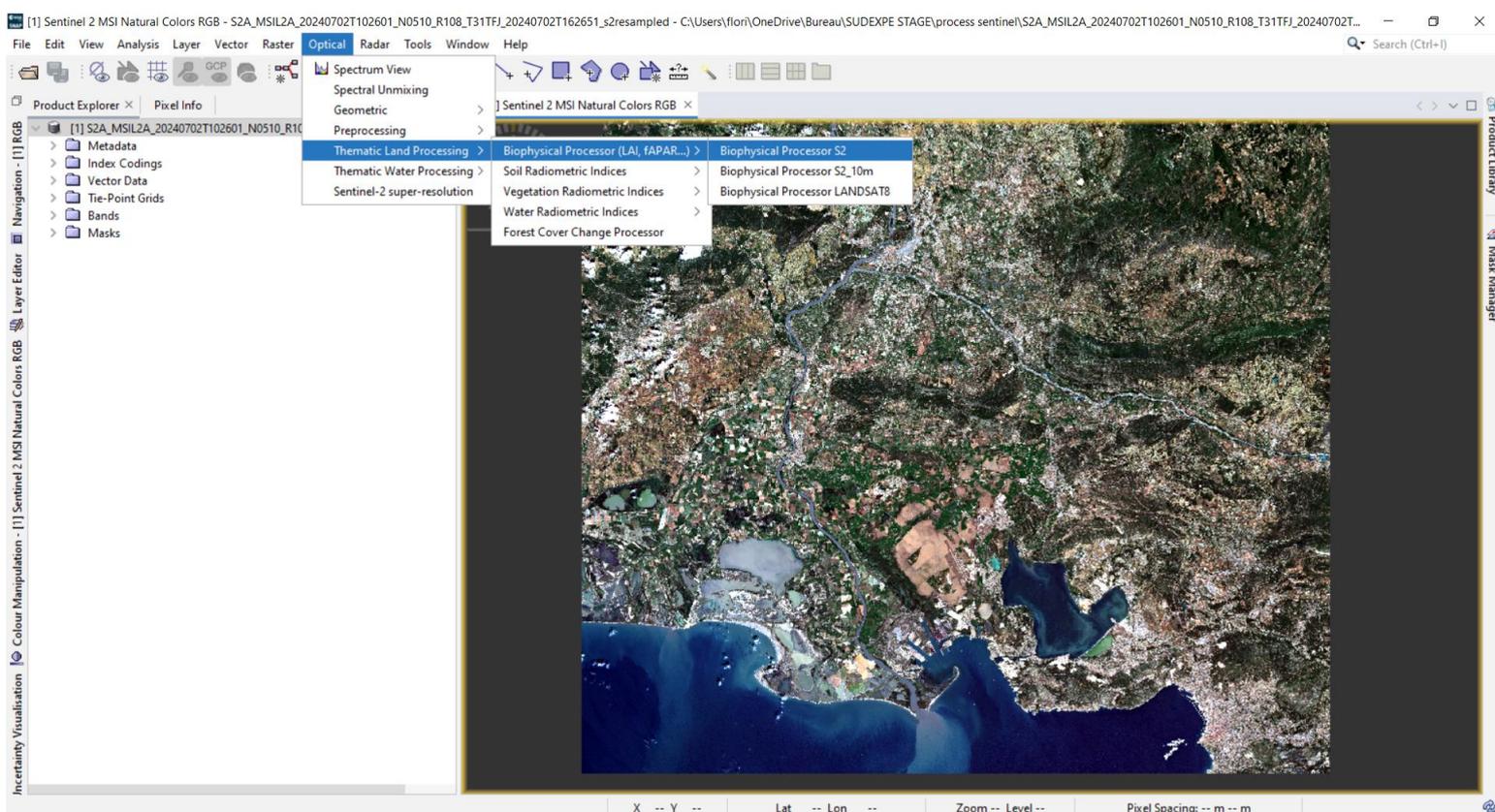
Annexe 1 : Plan des parcelles de SudExpé



Annexe 4 : Images Sentinel-2 utilisées dans cette étude

Date	Nom de l'image Sentinel-2
04/01/23	S2B_MSIL2A_20230104T103329_N0509_R108_T31TFJ_20230104T115219
08/02/23	S2A_MSIL2A_20230208T103211_N0509_R108_T31TFJ_20230208T164302
03/03/23	S2A_MSIL2A_20230303T103931_N0509_R008_T31TFJ_20230303T182400
17/04/23	S2B_MSIL2A_20230417T103629_N0509_R008_T31TFJ_20230417T121820
02/05/23	S2A_MSIL2A_20230502T103621_N0509_R008_T31TFJ_20230502T154500
16/06/23	S2B_MSIL2A_20230616T103629_N0509_R008_T31TFJ_20230616T121035
31/07/23	S2A_MSIL2A_20230731T103631_N0509_R008_T31TFJ_20230731T202459
02/08/23	S2B_MSIL2A_20230802T102609_N0509_R108_T31TFJ_20230802T143038
09/09/23	S2A_MSIL2A_20230909T103631_N0509_R008_T31TFJ_20230909T155201
06/10/23	S2A_MSIL2A_20231006T102911_N0509_R108_T31TFJ_20231006T162956
15/11/23	S2A_MSIL2A_20231115T103311_N0509_R108_T31TFJ_20231115T162859
15/12/23	S2A_MSIL2A_20231215T103431_N0510_R108_T31TFJ_20231215T135750
12/01/24	S2B_MSIL2A_20240112T104319_N0510_R008_T31TFJ_20240112T224734
11/02/24	S2B_MSIL2A_20240211T104059_N0510_R008_T31TFJ_20240211T132748
04/03/24	S2A_MSIL2A_20240304T102921_N0510_R108_T31TFJ_20240313T160152
11/05/24	S2B_MSIL2A_20240511T103629_N0510_R008_T31TFJ_20240511T121256
12/06/24	S2A_MSIL2A_20240612T103031_N0510_R108_T31TFJ_20240612T181246
02/07/24	S2A_MSIL2A_20240702T102601_N0510_R108_T31TFJ_20240702T162651

Annexe 5 : Le logiciel SNAP Toolbox utilisé dans cette étude pour obtenir les valeurs de LAI, FAPAR et FCOVER



Annexe 6 : Evolution temporelle de la parcelle 4 (haie fruitière du 27 mars au 5 août 2024)



11 avril



15 avril



29 avril



7 mai



3 juin



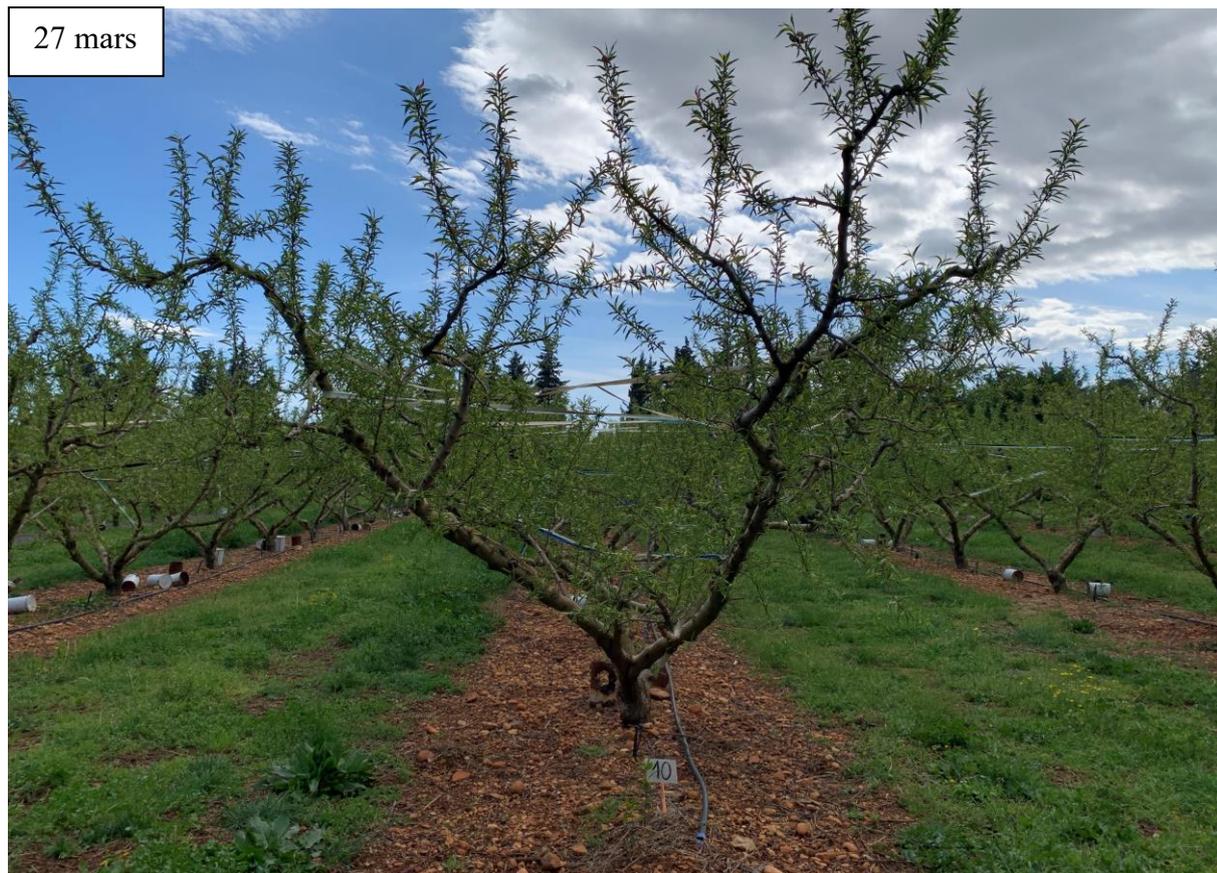
2 juillet



5 août



27 mars



2 avril



11 avril



15 avril



29 avril



7 mai



27 mai



24 juin



5 août



Annexe 8 : Stade physiologiques du pêcher

Stades phénologiques repères du pêcher

Auteurs: Anne-Lise Fabre, Bernard Bloesch et Olivier Viret, Agroscope, 1260 Nyon

0 Repos hivernal

Bourgeon d'hiver (dormance) 00 (A)



Stades

0 = Repos hivernal
5 = Apparition des inflorescences
6 = Floraison
7 = Développement des fruits
8 = Maturation des fruits

Code BBCH	Code Bagnolin
00	00
51 → 59	01 → 03
61 → 69	04 → 06
71 → 77	07 → 08
81 → 89	

Sources

• Bagnolin M., 1952. Les stades repères du pêcher. Revue suisse de viticulture et d'arboriculture 8 (16), 28.

• Lancelotti P. D., Böhöcker H., Van Den Broek L., Langenfeldt M. P., Zanon M., Viret O., Witzinger A., 1978. A uniform desmoul-codex for grape and other woody plants. Acta Hort. 175, 509-510.

• Hög S. H., Böhöcker H., Bahr L., Mader U., Schneck-Fischer V., Viret O., Witzinger A., 1990. Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien reifer und überreifer Früchte. Erwerbsforsch. Obstbau 44 (3), 200-206.

Photographies: Carole Parodi

5 Apparition de l'inflorescence

Gonflement des bourgeons 51 (B)



Eclatement des bourgeons 53 (C)



Ouverture des sépales 57 (D)



Ballonnets 59 (E)



6 Floraison

Début floraison 61



Pleine floraison 65 (F)



Floraison déclinante 67 (G)



Fin floraison 69



7 Développement des fruits

Nouaison 71 (H)



Jeune fruit 73 (I-J)



Croissance des fruits (50%) 75



Croissance des fruits (70%) 77



8 Maturation des fruits

Début coloration 81



Coloration avancée 85



Récolte maturité gustative 87-89



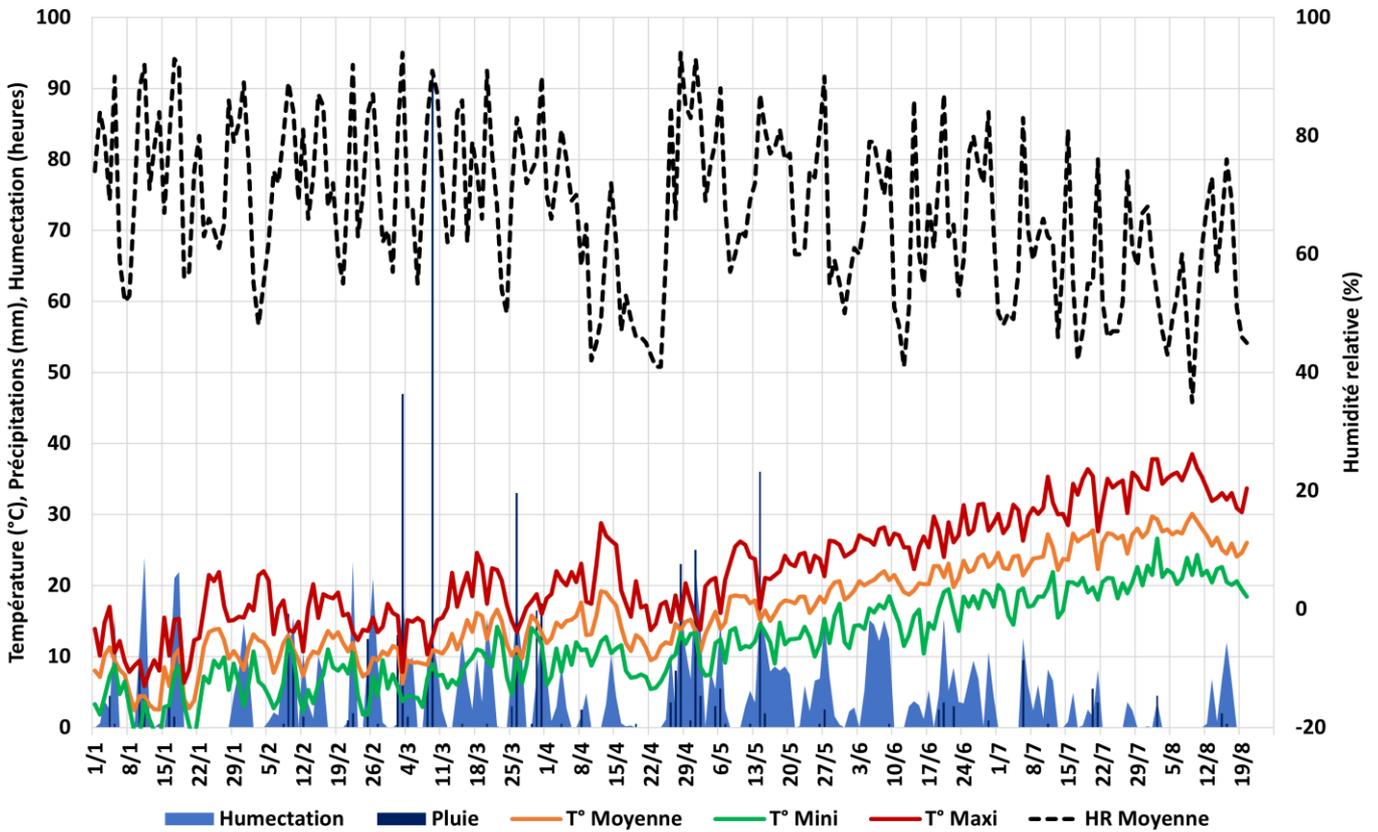
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR
#agroscope

Annexe 9 : Photographie satellite de SudExpé le 12 mai 2023



METEO 2024



METEO 2023

