



**HAL**  
open science

# Suivi et analyses des performances de systèmes de culture économes en produits phytosanitaires et en intrants en vergers de pêche-nectarine et pommiers

Thomas Soudet

## ► To cite this version:

Thomas Soudet. Suivi et analyses des performances de systèmes de culture économes en produits phytosanitaires et en intrants en vergers de pêche-nectarine et pommiers. *Agronomie*. 2021. hal-03601945

**HAL Id: hal-03601945**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03601945>**

Submitted on 8 Mar 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

<p><b>AGROCAMPUS OUEST</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CFR Angers <input type="checkbox"/> CFR Rennes</p> <p><b>l'institut Agro</b> agriculture • alimentation • environnement</p> 	 université <b>angers</b>  UNIVERSITÉ DE NANTES	
<p><b>Année universitaire : 2020- 2021.</b></p> <p><b>Mention : Biologie végétale</b></p> <p><b>Parcours :</b></p> <p>Filières de l'horticulture et innovations (FHI).....          .....</p>	<p><b>Mémoire de Fin d'Études</b></p> <p><input type="checkbox"/> d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>	

**Suivi et analyses des performances de systèmes de culture économes en produits phytosanitaires et en intrants en vergers de pêche – nectarine et pommiers.**

Par : Thomas SOUDET

*Soutenu à Angers le 09/09/2021*

**Devant le jury composé de :**

Président : Béatrice TEULAT Juré : Etienne CHANTOISEAU  
 Maître de stage : Julie BORG et Daniel PLENET  
 Enseignant référent : Pascale GUILLERMIN

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST



Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

<p><b>AGROCAMPUS OUEST</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CFR Angers   <input type="checkbox"/> CFR Rennes</p> <p><b>l'institut Agro</b> agriculture • alimentation • environnement</p> 	 <p>université <b>angers</b></p>  <p>UNIVERSITÉ DE NANTES</p>	
<p><b>Année universitaire : 2020- 2021.</b></p> <p><b>Mention : Biologie végétale</b></p> <p><b>Parcours :</b></p> <p>Filières de l'horticulture et innovations (FHI)..... .....</p>	<p><b>Mémoire de Fin d'Études</b></p> <p><input type="checkbox"/> d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>	

**Suivi et analyses des performances de systèmes de culture économes en produits phytosanitaires et en intrants en vergers de pêche – nectarine et pommiers.**

Par : Thomas SOUDET

*Soutenu à Angers le 09/09/2021*

**Devant le jury composé de :**

Président : Béatrice TEULAT  
 Maître de stage : Julie BORG et Daniel PLENET  
 Enseignant référent : Pascale GUILLERMIN

Juré : Etienne CHANTOISEAU

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST



Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

## Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

### Confidentialité

Non  Oui si oui :  1 an  5 ans  10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible <sup>(1)</sup>.

Date et signature du maître de stage <sup>(2)</sup> : 14/09/2021

(ou de l'étudiant-entrepreneur)

**A la fin de la période de confidentialité**, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

### Droits d'auteur

L'auteur <sup>(3)</sup> **Nom Prénom** --SOUDET Thomas-----

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif)  accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 14/09/2021

### Autorisation de diffusion par le responsable du master ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui  Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement<sup>(4)</sup>

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

14/09/2021

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

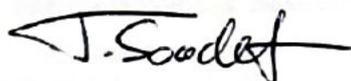
(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

## ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné (e), SOUDET Thomas, déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :



## REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier dans un premier temps Julie pour sa gaité, sa confiance et son soutien. Toujours là pour nous aider, je suis vraiment heureux de l'avoir eu en tant que maître de stage. Elle a su rapidement me mettre rapidement en confiance et m'a permis de donner le meilleur de moi-même durant ce stage.

Merci à Pascale Guillermin et Daniel Plénet pour leurs conseils avisés et pertinents, qui m'ont permis de grandement améliorer la qualité de mon rapport.

Merci à Quentin, mon préféré, pour ses bonnes blagues, son professionnalisme exemplaire (j'insiste là-dessus) et surtout pour m'avoir défendu tout au long du stage (je ne l'oublierai jamais). Un grand merci à l'équipe de choc, que j'aurai voulu rencontrer plus tôt. Il s'agit évidemment de Guillaume, Mathis et Timothée. Je n'ai jamais autant apprécié les pauses café qu'avec vous. J'ai apprécié venir travailler (plus ou moins) à vos côtés.

Désolé Fanny pour tout ce que tu as subi durant ce stage. Tu as été une super coéquipière. Sans toi ce stage n'aurait pas été aussi bien.

Merci à Tom pour les croissants et les pains aux chocolats, ils étaient très bons. Même si tu n'es pas resté longtemps, c'était vraiment sympa de travailler avec toi et surtout très amusant.

Merci à Mathieu et Patrick, même si nous ne nous sommes presque pas vus, votre aide sur le terrain aura été précieuse.

Merci Estelle de m'avoir fait confiance sur R, ça a été un plaisir de pouvoir t'aider. De même pour Laurie j'ai vraiment apprécié te connaître et t'apporter mon aide même si ce n'était pas dans un super contexte de ton côté. C'était tout de même très enrichissant.

Merci à Guillaume (un autre Guillaume) pour ton soutien, ta positivité, ta vision des choses. Tu es vraiment quelqu'un de super.

-Thomas-

## Table des matières

Introduction.....	11
1. Etat de l'art .....	23
1.1. La conception de systèmes de cultures bas intrants.....	23
1.1.1 Les expérimentations système .....	23
1.1.2 La démarche de conception d'un système de culture.....	25
1.2 Leviers d'actions mobilisables .....	27
1.3 Une méthode innovante d'analyse des leviers d'actions et des prises de décisions .....	27
1.3.1 Partial Least Squares Path-Modeling, (PLS-PM) .....	27
2. Matériel et méthodes.....	29
2.1 Présentation du site expérimental .....	29
2.1.1 Le site d'Avignon.....	29
2.1.2. Evolution des enjeux et des objectifs.....	31
2.2 Collecte des données et mesures des indicateurs de développement agro-physiologique .....	33
2.2.1 Description et choix des indicateurs de performance.....	35
2.3 Méthode d'analyse.....	37
2.3.1 Analyse des données expérimentales de 2021 du site Inrae Avignon PSH.....	37
2.3.2 Analyse multicritère de la performance des systèmes de 2015 à 2021 .....	39
2.3.3 Choix des variables de l'analyse PLS-PM .....	39
3. Résultats .....	43
3.1. Suivi des expérimentations .....	43
3.1.1. Le bilan hydrique .....	43
3.1.2 Bilan de la fertilisation.....	43
3.1.3 Bilan des produits phytosanitaires .....	43
3.1.4 Croissance des troncs .....	45
3.1.5 Croissance végétative.....	45
3.1.6 Quantification du statut azoté .....	47
3.2. Analyse PLS-PM des leviers d'action, prises de décisions et indicateurs de performances.....	49
3.2.1 Modèles globaux de l'analyse pluriannuelle .....	49
3.2.2 Relations entre leviers d'actions, bioagresseurs et pertes.....	51
3.3 Bilan du projet Ecopêche de 2015 à 2021 .....	53
3.3.1 Rendement commercialisable.....	53
3.3.2 Chiffre d'affaires.....	53
3.3.3 Pourcentage de pertes .....	53
3.3.4 Suivis des bioagresseurs .....	55
3.4. Discussion .....	57
3.4.1. Bilan pluriannuel des performances agronomiques .....	57

3.4.2. Bilan pluriannuel des performances économiques .....	57
3.4.3. Bilan pluriannuel des performances environnementales .....	59
3.5. Critique de l'analyse PLS-PM .....	59
3.5.1. Choix des indicateurs.....	59
3.5.2. Perspectives de l'analyse PLS-PM dans le cadre de l'analyse des systèmes agronomiques..	61
Conclusion .....	63
Bibliographie .....	65

## Liste des abréviations

**BIO** : Agriculture Biologique  
**ECO** : Système économe  
**IFT** : Indice de Fréquence de Traitement  
**LMR** : Limite maximale de résidus  
**OAD** : Outil d'aide à la décision  
**PLS** : Partial Least Squares  
**PLS-PM** : Partial Least Squares Path-Modeling  
**RDD** : Règles De Decision  
**RMSEP** : Root Mean Square Error of Prediction  
**SdC** : Système de Culture  
**REF** : Système de référence

## Glossaire

**IFT** : L'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) est un indicateur qui rend compte du nombre de doses de produits phytosanitaires appliqués par hectare pendant une campagne culturale, en prenant pour chaque traitement la valeur correspondant à la dose appliquée multiplié par la surface traitée, divisée par la dose homologuée la plus faible pour l'espèce fruitière considérée (doses/ha) multiplié par la surface de la parcelle, soit une valeur de 1 pour 1 traitement appliqué en plein à la dose homologuée (Syngenta, 2021).

**Indicateur** : Une grandeur qui fournit une information au sujet d'une variable ou d'un système plus complexe, afin d'aider un utilisateur dans son action (prise de décision, modélisation,...) (Riley, 2001).

**Méthode alternative ou moyen de lutte alternatif(ve)** : Moyen d'action contre les bioagresseurs autre que la lutte chimique, comprenant le contrôle génétique, les méthodes culturales, la lutte biologique, la lutte biotechnique, la lutte physique et les produits appartenant à la catégorie «produits divers» (Laget et al., 2015 ). Méthodes à « faible risque » d'après le règlement 107/2009 de l'utilisation des produits de biocontrôle.

**Outils d'aide à la décision** : On regroupe sous ce terme OAD d'autres catégories d'outils et/ou de méthodes qui, en apportant de l'information sur l'état du système et/ou des référentiels, vont contribuer à l'analyse des risques et aider à la prise de décision par les agriculteurs (Ephytia, 2016)

**Prophylaxie** : Ensemble des mesures physiques, variétales, culturales tendant à empêcher l'apparition de bioagresseurs ou à en minimiser les effets (Henry A *et al.*, 2012).

**Système de culture** : On peut définir un système de culture comme l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une ou plusieurs parcelles gérées de manière identique au fil des années. Chaque système se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession et par les itinéraires techniques (RDD), appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés (Havard M, 2017).

**Reconception** : Il s'agit de recombinaison des techniques de protection des cultures disponibles afin de maîtriser les bioagresseurs durablement dans les systèmes de culture économes en pesticides (Henry A *et al.*, 2012).

**Règles de décision** : Formalisation explicite et argumentée d'une démarche et de choix s'appuyant sur des indicateurs précis conduisant à une décision dans le but d'atteindre un objectif fixé (Henry A *et al.*, 2012).

## Table des illustrations

<b>Figure 1.</b> Étapes de l'expérimentation système (Havard M, 2017) .....	22
<b>Figure 2.</b> Étapes de conception-évaluation des systèmes de culture .....	24
(Plénet et Simon, 2015).....	24
<b>Figure 3.</b> Bilan hydrique et quantités d'eau apportées par l'irrigation sur les 3 systèmes (S1 à S3) à l'Inra d'Avignon en 2021.....	42
<b>Figure 4.</b> Quantités d'éléments fertilisants apportées sur les différents systèmes à l'Inra Avignon pour la campagne 2021.....	42
<b>Figure 5.</b> IFT chimiques par système en 2021.....	42
<b>Figure 6.</b> Evolution de la circonférence moyenne des troncs entre 2015 et 2021 .....	44
<b>Figure 7.</b> Longueur moyenne des pousses par système en 2021 .....	44
<b>Figure 8.</b> Nombre moyen de feuilles par système en 2021 .....	44
<b>Figure 9.</b> Quantité d'azote mesurée au SPAD.....	46
<b>Figure 10.</b> Analyses Anova/ACP des spectres infrarouge selon la date ou la dose d'azote .....	46
<b>Figure 11.</b> Modèle global de l'impact de la météo, des leviers d'actions, des bioagresseurs, des caractéristiques du verger et du sol sur le pourcentage de pertes .....	48
<b>Figure 12.</b> Modèle global de l'impact de la météo, des leviers d'actions, des bioagresseurs, des caractéristiques du verger et du sol sur les performances économiques .....	48
<b>Figure 13.</b> Modèle des relations entre les leviers d'actions, les bioagresseurs fongiques, insectes ravageurs et le pourcentage de pertes (fruits piqués et fruits pourris).....	50
<b>Figure 14.</b> Modèles de l'impact du climat sur les bioagresseurs fongiques et insectes ravageurs .....	50
<b>Figure 15.</b> Evolution du rendement commercialisable en frais entre 2015 et 2021 .....	52
<b>Figure 16.</b> Evolution du chiffre d'affaires entre 2015 et 2021 .....	52
<b>Figure 17.</b> Evolution du % de perte entre 2015 et 2021 .....	52

## Table des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Synthèse personnelle des leviers d'actions mobilisés contre la tordeuse orientale du pêcher, les pucerons, le thrips californien et les forficules (d'après Biodimestica, (sans date) ; Dib H, (2010) ; Mandrin J.F <i>et al.</i> , 2007 ; Said X, (sans date) ; SudArbo, (sans date) ; Itab, 2002 ; Prophylaxie-Arbo, 2010 ; SudArbo, 2012 ; SudArbo, 2019).....	26
<b>Tableau 2.</b> Synthèse personnelle des leviers d'actions mobilisés contre la cloque du pêcher, la monilia et l'oïdium sur pêcher (d'après Biodimestica, (sans date) ; Dib H, (2010) ; Mandrin J.F <i>et al.</i> , 2007 ; Said X, (sans date) ; SudArbo, (sans date) ; Itab, 2002 ; Prophylaxie-Arbo, 2010 ; SudArbo, 2012 ; SudArbo, 2019).....	26
<b>Tableau 3.</b> Récapitulatif des analyses effectuées .....	36
<b>Tableau 4.</b> Evolution du pourcentage de dégâts par système pour les pucerons, la cloque, la tordeuse orientale, la moniliose et l'oïdium entre 2019 et 2021. ....	54

## Table des annexes

<b>Annexe 1 :</b> Leviers d'actions mobilisables en arboriculture.....	70
<b>Annexe 2 :</b> Niveau d'efficacité des leviers d'action mis en œuvre pour contrôler les bioagresseurs sur le site Inrae Avignon .....	71
<b>Annexe 3 :</b> Organisation des systèmes REF, ECO1 et ECO2 site Inrae Avignon PSH.....	72
<b>Annexe 4 :</b> Protocole d'échantillonnage .....	73
<b>Annexe 5 :</b> Liste des indicateurs de performances et objectifs visés (Ecopêche 1 et 2) .....	74



## Introduction

Cultures importantes du climat méditerranéen, ce sont des fruits d'été par excellence. Colorés, juteux et savoureux, nous parlons bien sûr des pêches et nectarines qui font partie des fruits préférés des français (Hilaire et Giaque, 2003) puisque positionnés en 5<sup>e</sup> position des fruits les plus consommés (Interfel, (sans date)). Au niveau mondial, la pêche est la 3<sup>e</sup> culture arboricole en climat tempéré derrière la pomme et la poire (Bassi D *et al.*, 2016). En France, elle est située juste derrière la pomme et représente près de 10 % de la production de fruits (Interfel, 2017).

La France avec 5 % de la production se classe en 4<sup>e</sup> position à l'échelle européenne loin derrière les 3 principaux pays producteurs que sont la Grèce (23%) l'Italie (32%) et l'Espagne (37%) le plus gros producteur européen en 2020 (Bernadette L et Bouchard-Aerts V, 2020). Entre 2015 et 2017, la production en frais hors transformation en France s'élevait à près de 255 000 tonnes (Interfel, (sans date)). Trois régions assurent la majorité de la production : l'Occitanie (48,6%), Provence-Alpes-Côte d'Azur (30,4%) et Auvergne-Rhône-Alpes (14,4%) (Loiseau R, 2021). Ses exigences pédo climatiques expliquent qu'on la retrouve majoritairement autour du bassin méditerranéen et sur des sols filtrants. Les fruits sont surtout commercialisés en frais dans des circuits de distribution fortement orientés vers la grande et moyenne distribution et les grossistes avec une gestion logistique en flux tendus (Plénet D *et al.*, 2019).

Cette culture est soumise à de nombreuses pressions : demande de fruits de qualité et 0 défaut de la part des consommateurs, pressions biotiques et abiotiques et fluctuations du marché. La concurrence est forte. Les coûts de production en France sont plus élevés que pour une majorité des pays producteurs au sein de l'Europe mais aussi ailleurs dans le monde (Hilaire et Giaque, 2003 ; Plénet D *et al.*, 2019). La variation du prix du cours au kg fragilise davantage les revenus des producteurs, ce qui se répercute également sur le prix de vente (Loiseau R, 2021). Or le prix d'achat est un des 3 critères majeurs d'achat par les consommateurs (Hilaire et Giaque, 2003).

Cette culture est également parmi les plus intensives avec une utilisation de produits phytosanitaires très importante juste derrière la production de pomme en termes d'IFT ou Indice de Fréquence de Traitement avec en moyenne un IFT de 22 majoritairement dû à l'utilisation de fongicides (59 %) et d'insecticides (36 %) (Labeyrie B *et al.*, 2018 ; Plénet D *et al.*, 2019). L'utilisation accrue de produits phytosanitaires vise à stabiliser et assurer la production et de répondre aux exigences (calibre, pas de défauts...) et aux attentes des consommateurs (Hilaire et Giaque, 2003). Ce fort IFT s'explique par une pression de ravageurs importante (tordeuse orientale, pucerons, thrips, etc.) et de maladies (cloque, oïdium, monilioses, etc.) qui sont variables



selon les spécificités des variétés (Simon *et al.*, 2007). De plus, l'absence de sources de résistance chez les variétés actuelles accentue l'importance de modes de conduite pour rendre les vergers moins sensibles aux bioagresseurs. Un autre problème sanitaire majeur touche les cultures de pêches-nectarine. Il s'agit de la sharka qui aboutit à l'arrachage systématique des arbres atteints (Plénet D *et al.*, 2019). Les maladies de conservation liées aux monilioses peuvent occasionner d'importantes pertes de récolte (10 à plus de 50 %) et nécessitent des traitements avant récolte pouvant être générateurs de résidus dans les fruits qui tout en respectant les limites maximales des résidus (LMR) sont dommageables pour l'image des fruits auprès des consommateurs (Plénet D *et al.*, 2019).

Cette intensification de la culture, bien que profitable du point de vue économique, est en revanche très impactante du point de vue environnementaux et sociaux rejetant de grandes quantités de produits toxiques dans les écosystèmes et exposant les exploitants et les consommateurs. Cette pression de la concurrence et les contraintes sanitaires ont favorisé la baisse des surfaces et des quantités produites ces dernières années. Les surfaces en vergers ont régressé de moitié depuis 2000 (- 53 % des surfaces entre 2000 et 2014) pour atteindre 9 500 ha en 2016, soit une production estimée à 207 000 tonnes (FranceAgrimer, 2015).

En 2016, 80,4 % des ménages avaient déclaré avoir acheté des pêches et nectarines (Chiron G, 2017). Depuis les années 1990, la consommation des ménages a été très fluctuante, cependant on observe une tendance à la baisse de la consommation apparente (2% par an en moyenne) avec une baisse de la quantité achetée en moyenne par les ménages (-1,3 % entre 1990 et 2015) ainsi qu'en termes de fréquence d'achat (-1,8 %) (Sauphanor *et al.*, 2009a ; FranceAgriMer, 2015, Plénet D *et al.*, 2019). Cette tendance semble se maintenir notamment sur une période allant de 2014 à 2020, ce qui fragilise le secteur d'autant plus que la filière repose majoritairement sur le marché intérieur (Loiseau R, 2021, Hilaire et Giaque, 2003, Marché de Rungis, (sans date)).

La pêche constitue une référence en termes d'image positive ce qui est moins le cas pour la nectarine sauf au niveau de praticité et de l'homogénéité de la qualité qui serait plus stable chaque année (Hilaire et Giaque, 2003). En effet, la qualité des pêches est souvent jugée inégale par les consommateurs qui malgré tout continuent à beaucoup l'apprécier (Hilaire et Giaque, 2003). Ces dernières décennies le contexte économique tend à privilégier les critères de qualité ayant un fort impact sur la valeur marchande (calibre, aspect visuel et conservation des fruits) plutôt que la qualité gustative (Plénet *et al.*, 2010) et tend à augmenter l'inadéquation avec la demande actuelle des consommateurs pour des fruits sains et de qualité (Serrurier, 2015).



En effet, la valeur gustative des fruits est un critère important pour les consommateurs. Cette divergence dans les critères de sélection favorise le mécontentement des consommateurs, ils sont moins enclins à en acheter (Hilaire et Giaque, 2003). L'intérêt environnemental prend également une place de plus en plus importante dans les choix de consommation des ménages. Des stratégies de valorisation de la qualité des fruits ainsi que celle de la production dans une démarche environnementale ont été mises en place dans cette optique (Plénet *et al.*, 2010). De plus, les pratiques agroécologiques sont davantage mises en avant et introduites dans les systèmes de production en misant davantage sur les services écosystémiques que sur l'utilisation des produits phytosanitaires, de plus en plus remplacés par des produits de biocontrôle lorsque cela est possible.

Pour répondre aux attentes et à ces nouveaux enjeux, le plan Ecophyto a été mis en place. Plusieurs plans Ecophyto se sont succédés entre 2008 et 2018. L'objectif initial du plan Ecophyto 1 était de réduire de près de 50 % les IFT d'ici 2018. A mi-parcours, une première réévaluation de leviers utilisés aboutit au plan Ecophyto 2, dans le but de mieux répondre à cet objectif. Pour autant, il n'a pas été atteint notamment dans les fermes n'appartenant pas au réseau DEPHY, du fait d'un éventuel manque de communication et donc de connaissances techniques encore limitées sur les méthodes alternatives aux produits phytosanitaires et des contraintes (bioagresseurs, exigences des normes commerciales, absence de variétés résistantes, faible nombre de leviers alternatifs disponibles, marché très concurrentiel...) de la culture de pêches-nectarines ainsi qu'un fort besoin d'accompagnement (Plénet D *et al.*, 2019). Faisant suite au plan Ecophyto 2, le plan Ecophyto II+ a été lancé en 2018 dans le but d'atteindre l'objectif de réduire de 50 % l'utilisation des produits phytosanitaires d'ici 2025 (Agriculture.gouv, 2021).

Depuis, les connaissances concernant les solutions alternatives ont été améliorées. Le développement, la diffusion et l'utilisation des produits de biocontrôle doivent être un axe d'amélioration important afin d'obtenir des alternatives viables capables de répondre aux exigences de cette culture (Labeyrie B *et al.*, 2018). Dans le but d'améliorer l'état des connaissances, le réseau DEPHY a été mis en place afin d'apporter des ressources techniques et scientifiques visant à reconcevoir nos systèmes de production (Labeyrie B *et al.*, 2018). Il s'appuie sur différents modules dont les réseaux FERME et EXPE et le système d'information AGROSYST (Labeyrie B *et al.*, 2018). C'est de cette démarche Ecophyto qu'est né le projet Ecopêche.



Les objectifs du projet EcoPêche ont été de concevoir et d'évaluer les performances multicritères (agronomique, qualité des fruits, écologique et technico-économique) de systèmes de culture (SdC) de pêche – nectarine visant à réduire fortement l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (-50 % des IFT hors produits de biocontrôle) et si possible des autres intrants (eau d'irrigation, engrais) tout en assurant une production suffisante et rentable. Le projet Ecopêche 1 s'est déroulé entre 2013 et 2018 sur sept sites différents implantés dans les 3 bassins de production principaux, entre 2010 et 2013.

Une approche multisite a été privilégiée pour analyser la diversité des règles d'action mises en œuvre pour s'adapter aux contraintes des contextes locaux et pour évaluer la robustesse des résultats dans différentes conditions de milieu. Ces 5 années d'expérimentations, nous renseignent maintenant sur le comportement d'un jeune verger de pêcheurs-nectarines en conduite de production potentielle lorsque les IFT sont réduits d'une valeur allant de 30 à 50 %. Afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un verger plus ancien et sur de nouveaux leviers d'actions, le projet Ecopêche 2 a été lancé en 2019. Différents travaux ont été produits tout du long et suite au projet Ecopêche 1, ils visent à synthétiser et analyser les résultats obtenus. Pour le projet Ecopêche 1, un total de 16 systèmes ont été étudiés. Ce sont des systèmes de références (REF) traité selon les normes du cahier des charges de l'Agriculture Raisonnée conventionnelle et des systèmes économes en intrants et produits phytosanitaires (ECO) et biologiques (BIO).

Certains ravageurs sont problématiques car difficiles à contrôler en cas de grosse infestation et occasionnent de nombreux dégâts, la cloque du pêcheur, le monilia, les pucerons et notamment les pucerons cendrés, farineux et cigariers, la mouche du fruit ainsi que les adventices très concurrentielles pour les arbres (Labeyrie B *et al.*, 2018). La gestion de l'enherbement sans produits phytosanitaires peut s'avérer problématique mais est un moyen de diminuer les IFT. Le taux de satisfaction avoisine les 75 % en système BIO et ECO pour la gestion de l'enherbement. En revanche, ce taux est supérieur pour le système ECO (80 %) concernant la gestion des bioagresseurs alors qu'il varie entre 60 et 70 % pour le système BIO (Labeyrie B *et al.*, 2018). Des niveaux très satisfaisants sont cependant davantage observés pour le système ECO du fait des pertes très importantes en BIO pouvant atteindre 60 % du système de référence (Plénet D *et al.*, 2019). Les objectifs de réduction des IFT ont été atteints dans l'ensemble. Ils sont en moyenne de – 51 % en ECO et -70 % en BIO.



Les fongicides représentent les produits phytosanitaires majoritaires sur l'ensemble des systèmes et notamment en système ECO ou ils représentent près de 70 % des IFT contre près de 95 % en BIO (Labeyrie B *et al.*, 2018). En moyenne, les rendements obtenus en système ECO sont relativement proches de ceux du système de référence. C'est en système BIO qu'on observe une forte baisse des rendements qui représentent environ  $\frac{1}{3}$  du système REF (Labeyrie B *et al.*, 2018). Concernant les chiffres d'affaires, malgré des rendements inférieurs, le système BIO réussi à atteindre le niveau du système ECO de part des prix de ventes supérieurs. La pêche est une espèce pour laquelle le niveau de rendement et donc le chiffre d'affaires est très associé aux IFT (Labeyrie B *et al.*, 2018).

En 2019, un premier bilan du projet Ecopeche 2 sur le site Inrae Avignon PSH, montre une diminution de 85 % et 89 % des IFT chimique pour les systèmes ECO 1 et 2 respectivement par rapport au système REF qui sont majoritairement dus aux fongicides. Les systèmes ECO 1 et 2 diffèrent par les combinaisons de leviers utilisées. Concernant les performances économiques des systèmes, les systèmes ECO 1 et 2 assurent des rendements commercialisables (t/ha) similaires au système REF. Il n'y a pas de différence significative concernant la qualité organoleptique des fruits (% Brix). En revanche, la tenue en conservation des fruits est bien meilleure pour le système REF. En effet, on observe 0 % de fruits pourris après 13 jours de conservation, contre 3 % pour le système ECO 2 et 3 % pour ECO 1 (Plénet *et al.*, 2019).

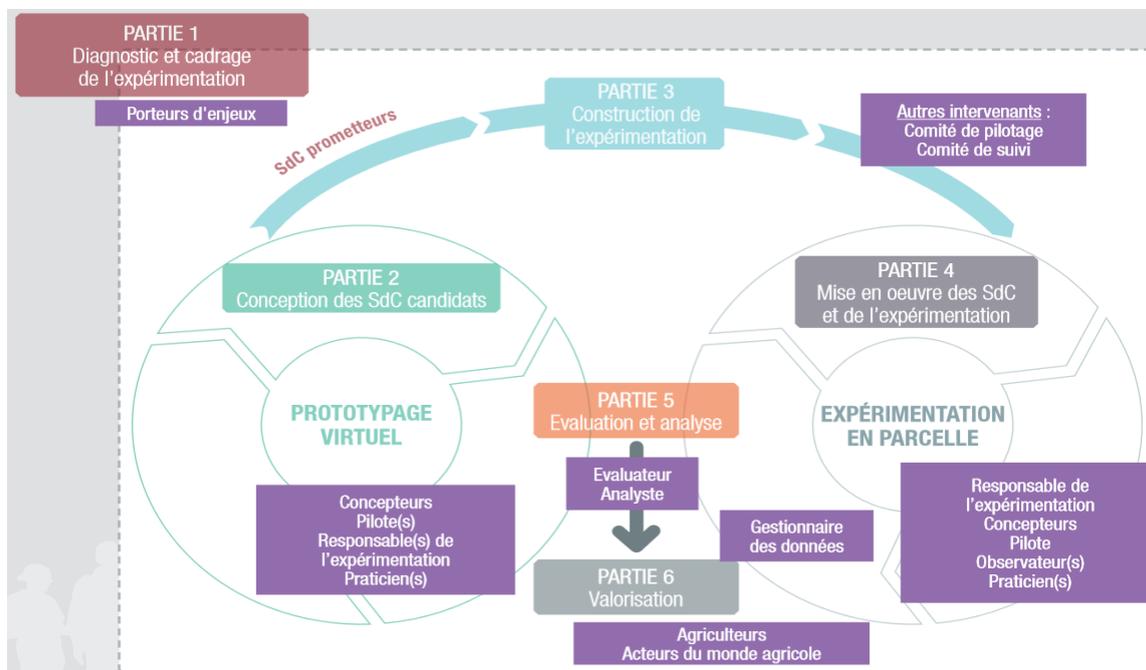
Les leviers d'actions et prises de décisions ont permis de répondre aux objectifs initiaux et donc d'aboutir à un système de culture viable sur le long terme économiquement tout en ayant une faible utilisation d'intrants et une diminution de 80 % de ses IFT hors produits de biocontrôles. Cependant, d'une année à l'autre, les niveaux de pression peuvent varier de manière importante, augmentant les IFT. Il convient de réfléchir davantage à l'optimisation des règles de décision notamment en prenant en compte le contexte climatique. C'est en ce sens que la problématique de ce travail fait suite à celle du projet Ecopêche 1 en cherchant à connaître l'impact et donc l'efficacité des moyens techniques et décisionnels employés dans chacun des systèmes étudiés depuis la mise en place du projet Ecopêche 1.

L'objectif de cette étude est de participer à une expérimentation système dans le cadre du projet Ecopêche 2, conduite à l'INRAE Avignon et d'en analyser les résultats actuels mais aussi passés, basée sur une analyse multicritère des performances des différents systèmes de culture afin de réaliser une évaluation des différentes prises de décisions qui ont pu évoluer d'une année à l'autre, et leur(s) répercussion(s) sur l'évolution des systèmes. Chaque système se caractérise par



des choix de leviers et prises de décisions. Peu d'essais systèmes ont été dédiés à la reconception de vergers avec un suivi dans le temps (Simon *et al*, 2012). Les prises de décisions et leur évolution dans le temps vont se répercuter sur l'évolution du ou des systèmes étudiés. Ainsi, la réalisation d'études dans le temps, devient nécessaire si nous voulons apporter des informations nouvelles afin d'optimiser les prises de décisions.

Ainsi, dans un premier temps, nous analyserons les résultats expérimentaux de 2021 menés sur le site Inrae Avignon PSH sur les 3 systèmes étudiés (REF, ECO 1 et ECO 2) afin de mettre en évidence ou non un effet système sur les résultats de performances. Nous utiliserons l'approche PLS-PM pour réaliser une analyse plus globale portant sur l'impact des règles de décisions mises en place entre 2015 et 2020 (Ecopêche 1 et 2) des facteurs climatiques et biotiques sur les performances des systèmes. Nous tenterons de déterminer si cette méthode est adaptée à l'analyse de données issues d'expérimentations systèmes. Enfin, nous analyserons et mettrons en lien avec les données de PLS-PM, les données recueillies liées aux indicateurs de performances sur les trois systèmes étudiés entre 2015 et 2021, afin d'identifier d'éventuelles correspondances avec nos modèles de PLS-PM et de voir si les systèmes atteignent leurs objectifs. Si les objectifs ne sont pas atteints, quels en sont les causes ? Comment expliquer les écarts de performances observés, notamment en lien avec la pression des bioagresseurs. Quelles répercussions ont l'évolution des prises de décision sur l'évolution des performances des systèmes ?



**Figure 1.** Étapes de l'expérimentation système (Havard M, 2017)

## 1. Etat de l'art

### 1.1. La conception de systèmes de cultures bas intrants

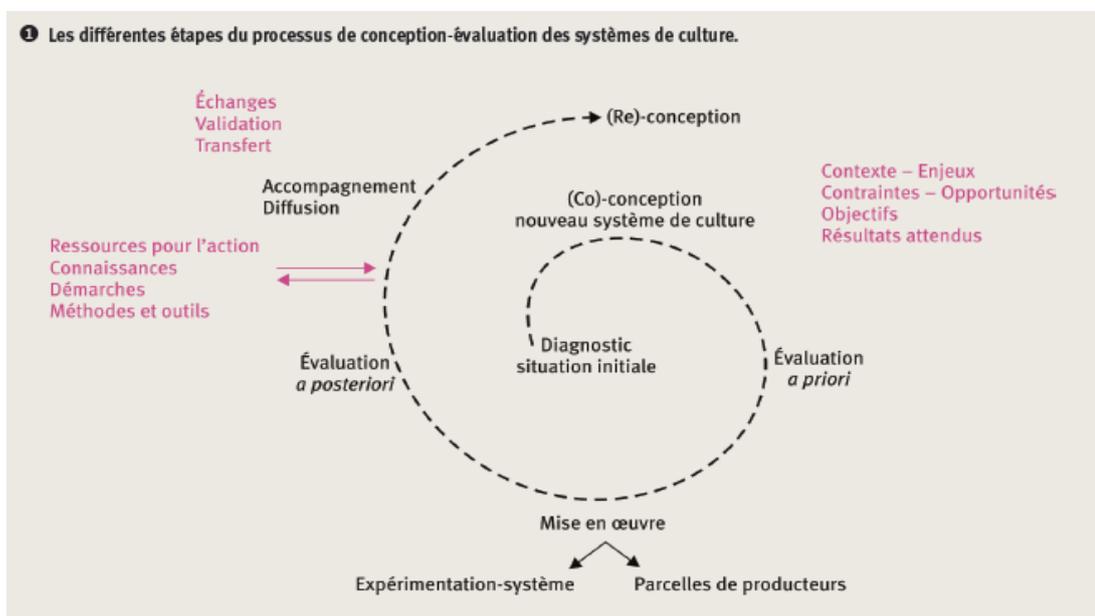
#### 1.1.1 Les expérimentations système

On peut définir un système de culture comme l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une ou plusieurs parcelles gérées de manière identique au fil des années (Havard M, 2017). Chaque système de culture possède ses propres caractéristiques qui sont, la nature des cultures, les itinéraires culturaux qui y sont appliqués et les éléments structurels (matériel végétal, densité de plantation, équipements avec les abris, palissage...) (Havard M, 2017). L'expérimentation système consiste à concevoir et évaluer un (ou des) système(s) de culture cohérent(s). Elle peut avoir un ou plusieurs objectifs (Havard M, 2017) :

- Tester la faisabilité technique et la cohérence agronomique des décisions prises,
- Analyser les capacités du système à atteindre et améliorer les objectifs fixés,
- Évaluer la contribution du système au développement durable (performances environnementales, sociales et économiques), améliorer les connaissances sur l'effet d'un système sur l'agroécosystème.

L'expérimentation système peut être découpée en 6 étapes (Figure 1). Les expérimentations système permettent d'améliorer le niveau des connaissances. Ces informations sont ensuite valorisables auprès des acteurs du conseil, de la formation, de la recherche, des agriculteurs. Elles permettent également le développement d'une expertise sur de nouvelles techniques ou combinaisons de techniques (règles de décision, organisation du travail, conduite de l'observation...) (Havard M, 2017).

Le système de culture intègre deux angles complémentaires. Le premier correspond au système de culture réalisé soit à l'ensemble des interventions culturelles et des résultats techniques pour chaque parcelle, chaque année. Le second correspond au système décisionnel défini par le protocole de l'expérimentation (Havard M, 2017). Il comprend les objectifs et les attentes de nature agronomiques, économiques, environnementales et sociales. Les stratégies qui orientent la construction des règles de décision. Les règles de décision qui vont piloter la mise en œuvre de chaque intervention technique. Les systèmes du fait de l'évolution des objectifs dans le temps peuvent subir des réadaptations, au fur et à mesure que les essais apportent des informations et que le contexte de mise en place du système évolue (Lauri, 2014).



**Figure 2.** Étapes de conception-évaluation des systèmes de culture  
(Plénet et Simon, 2015)

### 1.1.2 La démarche de conception d'un système de culture

La démarche de conception-évaluation de SdC peut être décomposée en cinq étapes interdépendantes (Figure 2) (Plénet et Simon., 2015).

- **Diagnostic de la situation initiale** : Cette étape doit permettre de définir le contexte de production, les contraintes et atouts des zones de production concernées.
- **Co-concevoir de nouveaux systèmes de culture** : Il s'agit de hiérarchiser les objectifs du nouveau SdC afin de répondre aux enjeux associés et donc de définir les stratégies à employer. L'objectif est aussi de définir les règles de décision (RDD) qui permettent d'adapter les choix techniques, de définir des méthodes de raisonnement quant à la gestion des intrants (Laget *et al.*, 2015).
- **Mise en œuvre opérationnelle des systèmes de culture** : Lorsque les risques liés au nouveau système ont été évalués et sont en accord avec la pérennité de l'exploitation, alors le système peut être expérimenté dans les conditions des exploitations agricoles avec un suivi technique permettant de suivre les nouvelles variables (gestion des ravageurs...) qui peuvent être difficiles à caractériser.
- **Évaluation des systèmes de culture** : Le système va être évalué selon trois dimensions qui sont : sa faisabilité technique, sa capacité à atteindre les résultats techniques et économiques souhaités et sa performance globale par rapport aux critères sociaux, économiques et environnementaux du développement durable. La qualité des fruits dans la cadre de la production fruitière est un facteur déterminant de la viabilité du nouveau système car en dépend la pérennité de l'exploitation (Plénet *et al.*, 2010, Lauri, 2014).
- **Reconception/ Expérimentation** : Si le système ne correspond pas aux objectifs fixés (boucle de reconception).
- **Diffusion, transfert et accompagnement des producteurs** : L'idée est de diffuser un cadre de réflexion autour des ressources mobilisables afin que le producteur puisse concevoir le système le plus adapté avec ses objectifs (Plénet et Simon., 2015).

**Tableau 1.** Synthèse personnelle des leviers d’actions mobilisés contre la tordeuse orientale du pêcher, les pucerons, le thrips californien et les forficules (d’après Biodimestica, (sans date) ; Dib H, (2010) ; Mandrin J.F *et al.*, 2007 ; Said X, (1996) ; SudArbo, (sans date) ; Itab, 2002 ; Prophylaxie-Arbo, 2010 ; SudArbo, 2012 ; SudArbo, 2019)

Ravageurs	Tordeuse orientale du pêcher	Pucerons	Thrips californien	Forficules
Taille en vert			X	
Lutte par conservation ou lâché	X	X	X	X
Confusion sexuel	X			
Prophylaxie	X			
Gestion de l’enherbement			X	X
Gestion de l’irrigation		X	X	
Barrière physique (glu, argile...)		X		X
Gestion de la fertilisation		X	X	
Plantes répulsives		X		

**Tableau 2.** Synthèse personnelle des leviers d’actions mobilisés contre la cloque du pêcher, la monilia et l’oïdium sur pêcher (d’après Biodimestica, (sans date) ; Dib H, (2010) ; Mandrin J.F *et al.*, 2007 ; Said X, (1996) ; SudArbo, (sans date) ; Itab, 2002 ; Prophylaxie-Arbo, 2010 ; SudArbo, 2012 ; SudArbo, 2019)

Maladie	Cloque du pêcher	Monilia	Oïdium
Gestion de l’enherbement		X	
Prophylaxie	X	X	X
Gestion de la fertilisation		X	
Gestion des fonds de cueille			
Gestion charge de l’arbre		X	
Taille en vert		X	X
Gestion de l’irrigation	X	X	X
Traitement thermique post-récolte		X	

## 1.2 Leviers d'actions mobilisables

De nombreux leviers d'actions sont mobilisables afin de compenser plus ou moins la réduction des produits phytosanitaires (Labeyrie B *et al.*, 2018 ; Plénet D et Borg J, 2019). L'ensemble de ces leviers d'actions sont catégorifiés et décrits dans l'Annexe 1. Dans les tableaux 1 et 2 sont répertoriés un ensemble de leviers utilisés contre les principaux bioagresseurs rencontrés sur le verger Inrae PSH Avignon. Ces leviers ont été testés expérimentalement et sont utilisés par les producteurs. Globalement, ces leviers ont été jugés comme permettant de réduire les IFT chimiques. L'efficacité des leviers employés sur le site Inrae Avignon est présenté dans l'Annexe 2. Concernant la lutte par conservation et les plantes répulsives, les résultats peuvent être assez variables selon les sites.

## 1.3 Une méthode innovante d'analyse des leviers d'actions et des prises de décisions

L'expérimentation système sert à évaluer l'effet ou les effets de la combinaison de leviers d'actions sur les performances du ou des systèmes étudiés. On étudie ainsi la capacité d'un système à répondre aux objectifs attendus. L'analyse qui en découle porte alors sur des règles de décisions, visant à répondre à une problématique globale, ce qui est plus complexe à analyser que dans le cas d'essais factoriels classiques portant davantage sur des questions bien précises (Havard M, 2017). Il est alors nécessaire de trouver de nouvelles méthodes d'analyse.

### 1.3.1 Partial Least Squares Path-Modeling, (PLS-PM)

La complexification des jeux de données issues des expérimentations système, rend leur analyse plus difficile. Les méthodes habituelles (ANOVA, régression...) ne sont plus adaptées, car le plus souvent la distribution des données ne respecte plus les règles de normalité, les rendant inutilisables. La modélisation structurelle des moindres carrés partiels (**Partial Least Squares Path-Modeling, PLS-PM**) est une méthode de structuration de tableaux de données complexes qui se base sur des relations linéaires entre les variables. La PLS-PM s'utilise notamment lorsque l'hypothèse que la distribution de l'échantillon suive une loi normale ne peut être vérifiée. Elle se base sur une approche de modélisation par équation de modélisation structurelle ou Path Modeling, basée sur le critère des moindres carrés partiels ou PLS. Le modèle structural de l'approche PLS-PM est un ensemble de relations causales hypothétiques reliant différents blocks de variables. Cette approche permet d'analyser des relations entre les variables. Ainsi, cette méthode se révèle intéressante dans le cadre de l'analyse des leviers d'actions permettant d'identifier des corrélations entre évolution des leviers dans le temps et répercussions sur un ou plusieurs ensembles de variables (agronomiques, économiques...). Cette méthode a déjà été utilisée pour expliquer l'évolution de variables agronomiques liée à des conditions climatiques, pédologiques (Yutong H *et al.*, 2018 ;



Liangxia Duan *et al.*, 2020). Cette méthode repose sur le principe de variables latentes qui sont représentées par chacun des blocks de variables. Une variable latente, est une variable qui n'est pas directement mesurée mais déduite d'autres variables observées.

La mise en place d'un modèle structural suit 3 étapes, la description du schéma interne des variables latentes, la description du schéma externe des variables latentes et l'estimation des paramètres du modèle. La spécification du schéma interne s'effectue à l'aide d'une matrice servant à définir les interactions entre les variables latentes. Ensuite, la spécification du schéma externe associe des variables mesurées ou variables manifestes aux variables latentes. Ainsi dans un tableau de données, comprenant un ensemble de variables, chaque bloc représente une variable latente composé de X colonne(s) du tableau. Y sont associé les variables manifestes qui sont les données inscrites dans la ou les colonnes composant le bloc. L'association de ces variables suit le plus souvent un mode réflexif, c'est-à-dire que les variables mesurées sont le reflet de la variable latente. Par la suite, des coefficients vont être associés aux différentes relations entre les variables latentes. Ils correspondent au modèle hypothétique (Sanchez G, 2013).

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Présentation du site expérimental

#### 2.1.1 Le site d'Avignon

Trois systèmes types, sont étudiés dans le cadre du projet Ecopêche 2 sur le site Inrae Avignon PSH. Un système de référence (REF) et 2 systèmes économes en produits phytosanitaires et en intrants (ECO). Le système BIO, n'est pas présent sur le site Inrae PSH Avignon. Le système de référence (REF) correspond à une conduite d'un verger conventionnel respectant le cahier des charges de l'Agriculture Raisonnée (charte de la certification Haute Valeur Environnementale niveau 2). Les systèmes économes (ECO 1 et ECO 2) visent à limiter l'impact environnemental en réduisant l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et d'intrants, tout en essayant de préserver les marges économiques et la qualité des fruits.

L'organisation des 3 systèmes est présentée dans l'Annexe 3. Chaque bloc est composé de 6 rangs de 10 arbres (S1 et S2) ou 16 arbres (S3). Ainsi, pour palier à un rendement plus faible sur le système ECO 2, la densité d'arbre a été augmentée. Les systèmes REF et ECO 1 sont dans la continuité de ceux étudiés lors du projet ECOPECHE 1 (2013-2018). Le système ECO 2 permet ici l'étude de 2 modalités à savoir les modalités plantes de services et azote. En effet, 3/6 rangs sont en travail du sol sous 4 modalités d'azotes (0N, 60N, 120N et 180N). Chaque modalité (croisement des 2 facteurs) sera répétée 3 fois (1 répétition = 1 placette de 4 arbres). Les arbres de



la modalité 120N – Témoin servent au suivi de l'effet système (comparaison avec S1 REF et S2-ECO1). Les autres rangs sont enherbés avec une plante de service, la menthe poivrée, dans le but d'étudier son potentiel effet répulsif sur les pucerons et également divisé en 4 modalités d'azote.

### 2.1.2. Evolution des enjeux et des objectifs

Face à l'évolution des enjeux sociaux, environnementaux et économiques, les objectifs ont été réévalués tout du long des 2 projets Ecopêche. Au début du projet Ecopêche 2, des objectifs plus ambitieux que ceux du projet Ecopêche 1 ont été définis. Le premier de ces objectifs est le "zéro résidu de pesticides". La présence de résidus de pesticides sur les fruits et les légumes ainsi que dans l'environnement étant de plus en plus décriée par les consommateurs, il offre un gage de qualité notamment pour la santé. Pour cela, l'utilisation de pesticides n'est effectuée seulement en dernier recours si les conditions deviennent ingérables (Plénet D et Borg J, 2019). Les herbicides ne sont plus utilisés et remplacés par différentes alternatives. Une bâche tissée pour le système 2-ECO 1, un travail mécanique du sol ou une plante de service, la menthe poivrée servant entre autres de plante couvre sol pour le système 3-ECO 2. Afin de se rapprocher d'une diminution de 75 % des IFT, les actions de lutttes sont davantage menées en prévention pour limiter un développement trop important des bioagresseurs. La confusion sexuelle a été introduite contre la tordeuse orientale couplée à l'utilisation de produits de biocontrôle durant les pics de vols de 1<sup>re</sup>, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> génération (mai, juin et juillet). Contre le thrips, une intervention est menée avec du talc au stade floraison. Contre les pucerons, la stratégie repose sur l'application d'huile blanche au stade hivernant afin de tenter une impasse de traitement par la suite et de favoriser au maximum les mécanismes de régulation par les auxiliaires (Plénet D et Borg J, 2019).

De la glue est utilisée en piège mécanique contre les forficules et est posée sur les troncs des arbres sur les systèmes économes mais également sur le système REF du fait de la faible efficacité des insecticides sur ce bioagresseur. La cloque peu problématique est contrôlée en préventif avec des produits de biocontrôles durant le stade de débourrement. La même logique est utilisée contre l'oïdium. Contre la moniliose qui occasionne plus de pertes, une réduction hydrique de l'ordre de 10 à 20 % et une conduite des arbres en Y améliorant l'aération sont utilisées dans le but de réaliser des impasses de traitement (Plénet D et Borg J, 2019). Enfin, de nouveaux leviers d'actions sont étudiés (plantes de services, optimisation de la pulvérisation en lien avec les formes fruitières, intégration des possibilités de traitement post-récolte comme l'eau chaude, les UV, etc.) (Plénet D *et al.*, 2019). Enfin, les outils d'aide à la décision (OAD) sont davantage utilisés afin d'améliorer la précision et donc l'efficience des apports en intrants via l'utilisation de la ferti-



irrigation par goutte à goutte enterré, avant le basculement vers un goutte à goutte de surface moins contraignant (Plénet D et Borg J, 2019).

## 2.2 Collecte des données et mesures des indicateurs de développement agro-physiologique

Le protocole ayant permis de récolter les différents indicateurs est présenté dans l'Annexe 4. Ce protocole vise à recueillir tout au long de la campagne 2021 un ensemble de données permettant de caractériser les performances agro-physiologiques du verger dans l'objectif de définir l'état nutritionnel, sanitaire et physiologique des arbres dans les trois systèmes testés sur le site Inrae d'Avignon.

Afin d'évaluer et de comparer les différents systèmes dans le cadre du projet Ecopêche 2 et d'analyser l'évolution des prises de décisions, différentes variables vont être mesurées. Comme pour le projet Ecopêche 1 sont mesurés la pression des bioagresseurs (pucerons, thrips, cloque, tordeuse orientale, oïdium, rouille, moniliose, forficules), la vigueur des arbres (croissance des troncs, masse fraîche et sèche des feuilles ainsi que la surface foliaire), le statut hydrique et azoté des arbres, le diamètre des fruits (croissance des fruits), le taux de nouaison. A cela, s'ajoute des mesures sur la densité de recouvrement des adventices. Par rapport à Ecopêche 1, des mesures liées à l'azote et à la menthe ont été ajoutées. Elles correspondent à la hauteur et la densité de recouvrement de la menthe, leur taux d'azote, aux prélèvements de sol (azote, statut hydrique), aux mesures de potentiel hydrique des arbres. A cela vont s'ajouter d'autres variables relatives aux performances agronomiques, économiques et sociale des systèmes (Rendements, chiffre d'affaires, coûts de production, les IFT (totaux, chimiques, Verts), les apports d'intrants...). Ces variables vont jouer un rôle d'indicateur. Ces indicateurs vont permettre de comprendre le fonctionnement du verger et suivre son développement afin d'évaluer la performance et la durabilité de chacun des systèmes. L'ensemble de ces indicateurs sont présentés dans l'Annexe 5.



### 2.2.1 Description et choix des indicateurs de performance

Ces indicateurs sont classés en plusieurs catégories (Annexe 5) :

- **Les Indicateurs d'utilisation des intrants et des performances environnementales** correspondent aux indicateurs des pratiques effectuées au verger. Ils permettent d'estimer la pression exercée par l'utilisation de produits phytosanitaires et d'intrants sur l'environnement. Les IFT chimique (fongicides, insecticides, herbicides, autres) ne prennent pas en compte les produits de biocontrôle. Les IFT Vert ne comptabilisent que les produits de biocontrôle.
- **Les Indicateurs agro-physiologiques** permettent un diagnostic du fonctionnement du verger, de son état nutritionnel et de caractériser la montée en production d'un jeune verger, c'est-à-dire de voir comment évolue les arbres et donc le verger dans le temps du point de vue physiologique.
- **Les Indicateurs agronomiques** regroupent les résultats en terme quantitatif à la récolte (Rendements...).
- **Les indicateurs de la qualité des fruits** regroupent les résultats liés aux qualités nutritionnelles et organoleptiques des fruits (% Brix, concentration en minéraux...).
- **Les indicateurs sociaux, techniques et de santé** comprennent les indicateurs liés à la charge de travail liée aux différentes tâches à effectuer dans les vergers (taille d'hiver et d'été, conduite, éclaircissage, récolte, nombre d'heures de travail...). Ainsi que la quantité de résidus en produits phytosanitaires en tant qu'indicateur santé.
- **Les indicateurs économiques** sont calculés à partir des autres indicateurs décrits dans les paragraphes précédents et sont standardisés sur la base d'un référentiel de prix. Le prix de vente varie fortement dans le temps, un prix fixé par calibre a été choisi correspondant à la moyenne des prix donnés par les sites. Les charges opérationnelles de mécanisation ne sont pas encore calculées et ne sont donc pas intégrées aux résultats actuels dans le calcul du coût et de la marge.

**Tableau 3.** Récapitulatif des analyses effectuées

<b>Indicateurs agronomiques</b>	<b>Variables</b>	<b>Analyse statistique</b>	<b>Hypothèse</b>
<b>Croissance végétative</b>	Longueur des pouces et des gourmands	Test de Kruskal Wallis	H0 : la variabilité intra-système est du même ordre de grandeur que la variabilité inter-système, effet peu probable des systèmes
	Nombre de feuilles		
<b>Croissance des arbres</b>	Section des troncs		
<b>Teneur en azote des feuilles</b>	SPAD		
<b>Suivi bioagresseurs</b>	Dégâts / bioagresseur	Calcul d'un indice moyen par système et par bioagresseur : note du pourcentage de rameau touchés par arbre par rapport au potentiel d'infestation maximal observable (10 rameaux touchés/arbre).	
<b>Statut hydrique et azoté</b>	m <sup>3</sup> d'eau apporté	Pas d'analyse statistique associée : permet de comprendre les différences obtenues dans les analyses précédentes entre les systèmes.	
	Modélisation (Anova/ACP)		
<b>IFT</b>	IFT chimiques		
	IFT verts		
	IFT / bioagresseur		
<b>Intrants</b>	N, P205, K20		
<b>Indicateurs de performances</b>	Rendement commercialisable en frais, % perte, chiffre d'affaires	Permet de voir l'évolution des performances des systèmes dans le temps, l'efficacité des prises de décisions.	
<b>Performances</b>	Rendement commercialisable en frais, % perte, chiffre d'affaires, coût de production	Analyse PLS-PM, évaluation de l'impact des leviers d'actions ainsi que des conditions climatiques, sur les performances en termes de rendement commercialisable en frais, de chiffre d'affaires, de coûts de travail et de % de perte entre 2015 et 2020.	
<b>Leviers d'actions</b>	Méthodes alternatives (Nombre de leviers, aération des arbres, (% diminution irrigation, % diminution fertilisation)		
<b>Données climatiques</b>	Température		
	Pluviométrie		
	Vent		
<b>Caractéristiques du verger</b>	Age du verger, densité de plantation		
<b>Donnée pédologique</b>	Biodisponibilité de l'azote		

## 2.3 Méthode d'analyse

L'ensemble des analyses effectuées est récapitulé dans le tableau 3. Le schéma d'analyse consiste en la réalisation d'une analyse des suivis expérimentaux de 2021 effectuée sur le verger Ecopêche Inrae Avignon PSH. Des analyses statistiques seront effectuées sur ces résultats afin de comparer la variabilité inter-système des variables mesurées pour mettre en évidence ou non un effet système. Le test statistique utilisé est un test de Krustal Wallis non paramétrique avec un risque de première espèce fixé à 5 %. Le test est réalisé par date et par facteur. L'hypothèse nulle  $H_0$  est que la variabilité intra-système est du même ordre de grandeur que la variabilité inter-système. Une analyse PLS-PM portera sur des variables mesurées durant 5 années (2015-2020) comprenant donc les projets Ecopêche 1 et 2. Cette analyse aura pour but d'identifier la nature des interactions (faibles, fortes, positives, négatives) existantes entre les règles de décision, le climat, les caractéristiques du verger (âge, densité), des données pédologiques, la pression des bioagresseurs et certains indicateurs de performances (% pertes, rendements, chiffres d'affaires, coûts de production). Enfin, l'analyse portera sur une synthèse et comparaison des performances des systèmes étudiés sur les sites Inrae Avignon entre 2015-2021. Les résultats de cette partie seront mis en relation avec ceux obtenus dans les modèles de PLS-PM des données issues des expérimentations allant de 2015 à 2020 sur le site Inrae Avignon PSH afin de voir si des liens peuvent être établis entre les modèles et les performances observées.

Du fait d'aléas climatiques (fort épisode de gel début avril), il n'y aura aucune récolte en 2021. De plus, la récolte 2020 ayant également été très impactée par le gel au printemps, elles ne seront pas analysées. Les données liées aux indicateurs de performances ne seront pas analysées statistiquement. Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R Studio (R Core Team, 2014), version 4.0.4 et les packages FactoMineR (Husson *et al.*, 2013), ade4 (Chessel *et al.*, 2004). Les analyses PLS-PM ont été effectuées à l'aide des packages plsrm (Sanchez G, 2016), Mixomix (Rohart F *et al.*, 2017), plsdeplot (Gaston S, 2016).

### 2.3.1 Analyse des données expérimentales de 2021 du site Inrae Avignon PSH

Les données expérimentales de 2021 sont représentées par système (REF, ECO 1 et 2), sous forme de valeurs moyennes (moyenne des longueurs de pousses, moyenne du nombre de feuilles, azote moyen dans les feuilles, dégâts moyens par bioagresseurs), de valeur brute (circonférence des troncs, apports en azote, phosphore et potassium), de somme (somme de l'irrigation et de la pluie) (Tableau 3).



### 2.3.2 Analyse multicritère de la performance des systèmes de 2015 à 2021

Les données liées aux indicateurs de performances sont représentées par année (de 2015 à 2021) et par système (REF, ECO 1 et 2) sous forme de somme (somme des IFT chimiques et verts), de valeur brute par année par système (Rendement, Chiffre d'affaires, % de pertes). Les critères d'évaluation concernent les performances économiques, sociales et environnementales des systèmes entre 2015 et 2021 (Tableau 3).

### 2.3.3 Choix des variables de l'analyse PLS-PM

Les variables ont été classées en variables à expliquer et en variables explicatives. Les variables à expliquer correspondent aux variables de performances regroupées dans le sous-groupe « Performances ». Elles correspondent aux pourcentages de perte en fruits (pertes totales, fruits pourris, fruits piqués), aux rendements, chiffres d'affaires et coûts de production. Les pertes en fruits reflètent bien le niveau de pression des bioagresseurs sur un système, leur vulnérabilité face aux bioagresseurs et au climat qui peut leur être plus ou moins favorable. Cela reflète également le niveau d'efficacité des leviers d'action mis en place. Les rendements attendus ne sont pas forcément atteints. Il devient intéressant de se pencher sur les causes pouvant amener à cela afin de tenter de les identifier et de les expliquer. Concernant les chiffres d'affaires et coûts de productions, nous voulions voir dans quelle mesure le climat, la pression des bioagresseurs, l'évolution des leviers impactaient ces indicateurs économiques. Nous n'avons pas mis les IFT chimiques dans ces données car nous partons du principe que les IFT chimiques correspondent davantage à un choix de traiter ou non.

Concernant les variables explicatives, elles sont classées en 5 sous-groupes :

**Production Situation** qui correspond aux données météorologiques. Il comprend des données sur la pluviométrie. D'après la bibliographie une pluviométrie importante favoriserait les ravageurs fongiques. Nous avons intégré des variables permettant de caractériser/quantifier la pluviométrie (pluviométrie en hiver, nombre de jours de pluie au printemps/été, nombre de jours de pluies fortes au printemps/été). Des variables sur le vent. Le vent serait défavorable aux bioagresseurs fongiques et insectes ravageurs. Nous avons donc intégré des variables sur le nombre de jours avec du vent et le nombre de jours avec vent fort. Enfin, des données de température. La température va impacter le développement des arbres. Les épisodes de fortes gelées sont délétères à la production de fruits. Nous avons intégré des variables sur la présence de gelée à différents stades de développement de l'arbre (nombre de gelées durant le débourrement, floraison, nouaison, heures de froid en hiver). Un climat chaud serait favorable aux bioagresseurs. Nous avons ajouté des variables permettant d'évaluer la température pendant les périodes critiques (printemps/été), (température moyen 2 mois après la floraison, fortes chaleurs en été). Ces données ont pour la



plupart été jugées comme étant de bons indicateurs dans la bibliographie (Erez M, 2000 ; Garin *et al.*, 2016 ; Minas *et al.*, 2018).

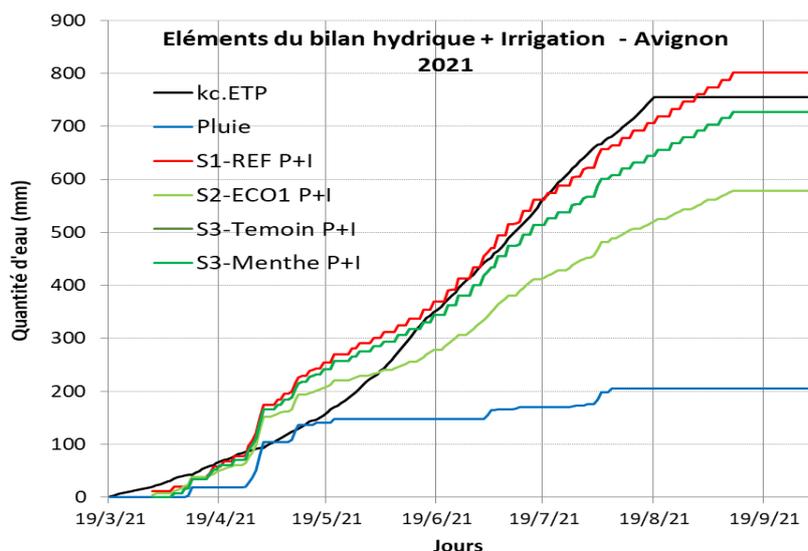
**MethodesAlter**, qui correspond aux méthodes alternatives utilisées que nous avons jugées relativement efficaces d'après des données de notation des leviers. Nous avons les % d'azote et d'irrigation apportés en moins par rapport au système de référence, l'aération des arbres dont l'efficacité diffère de manière importante selon le système. Les valeurs représentent le niveau d'efficacité du levier (de 1 à 3 le plus efficace). Enfin, un indicateur nombre de levier est également utilisé afin de rendre compte du fait qu'un ensemble de leviers jugés peu efficaces pris séparément, peut avoir un impact significatif une fois combinés.

**Bioagresseurs**, qui correspond aux données sur les dégâts occasionnés par les principaux bioagresseurs fongiques et insectes ravageurs rencontrés sur le verger (cloque, oïdium, pucerons, thrips, monilia, tordeuse orientale).

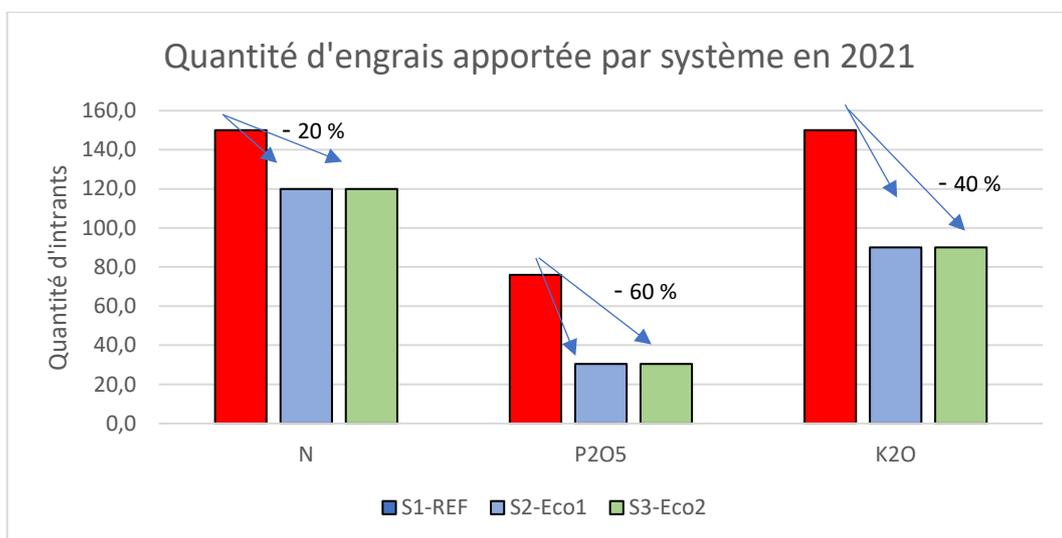
**Caract\_Verger**, qui rassemble des données liées à l'âge du verger et à sa densité de plantation, ces caractéristiques ayant un impact sur la capacité de production du verger (Plénet D et Borg. J, 2019).

**Datasol**, qui ne comprend qu'une seule variable sur la biodisponibilité de l'azote dans le sol. Nous savons que le sol a un rôle important sur le niveau de santé de l'arbre et donc de sa capacité à se défendre, sa vigueur, etc.

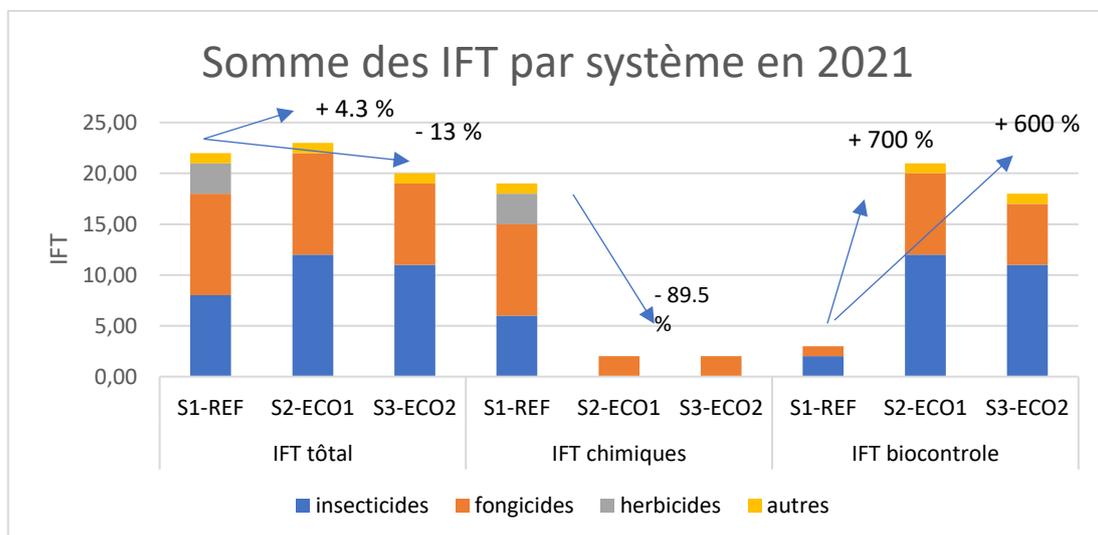
Nous avons réalisé une première analyse globale regroupant l'ensemble des sous-groupes évoqués plus haut. Ces modèles généraux permettent de donner une vue d'ensemble des relations entre les catégories de variables et d'identifier les relations les plus fortes et de déterminer quel(s) sous-groupe(s) a ou ont le plus de répercussion(s) sur les variables de performances. Deux modèles seront générés l'un pour les données de performances liées aux pertes, l'autre pour les données de performances agro-économiques (rendements, coûts de production et chiffres d'affaires). Une analyse plus précise portant sur les bioagresseurs, les pertes en fruits et les leviers d'actions a été réalisée pour voir dans quelle mesure l'évolution des leviers d'actions et le niveau de pression des ravageurs se répercutent sur les pertes en fruits d'une année sur l'autre. Enfin, une analyse des effets du climat sur les bioagresseurs. Dans cette analyse, le système de référence n'est pas pris en compte du fait qu'il est moins sujet aux variations du climat car traité chimiquement. Cette analyse a pour objectif de clarifier les questions suivantes. Un climat favorable entraîne-t-il plus de pertes ? Et ce dans quelle mesure ? Le climat est-il un facteur clef pour expliquer le niveau de pression des bioagresseurs sur le site Inrae Avignon ?



**Figure 3.** Bilan hydrique et quantités d'eau apportées par l'irrigation sur les 3 systèmes (S1 à S3) à l'Inra d'Avignon en 2021.



**Figure 4.** Quantités d'éléments fertilisants apportées sur les différents systèmes à l'Inra Avignon pour la campagne 2021



**Figure 5.** IFT chimiques par système en 2021

### 3. Résultats

#### 3.1. Suivi des expérimentations

##### 3.1.1. Le bilan hydrique

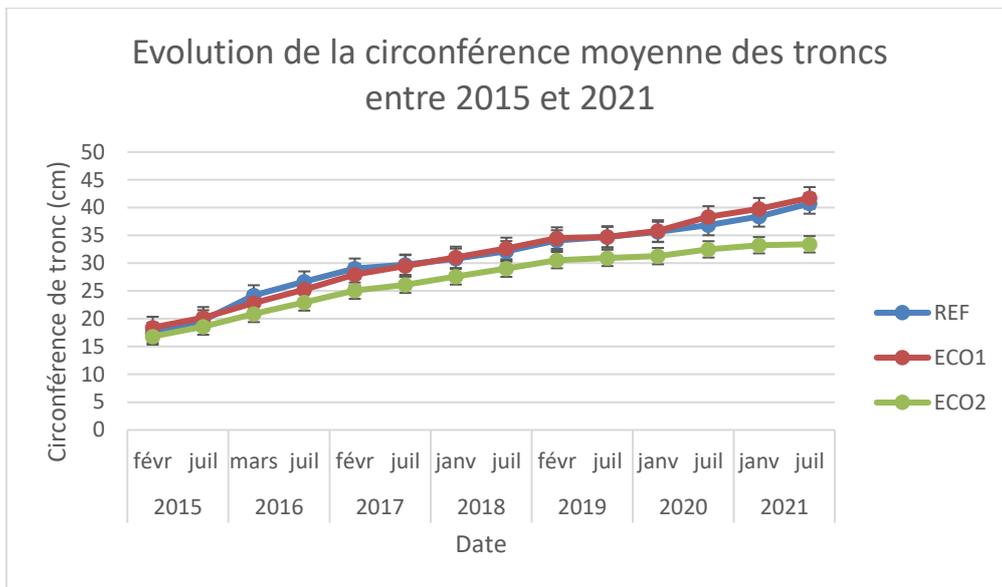
Les apports d'eau d'irrigation couvrent le déficit calculé par bilan hydrique  $Kc.ETP - P$  sur la période du 19 avril au 19 août 2021 pour le système S1-REF1 (Figure 3). L'été 2021 est pour l'instant sec nécessitant d'irriguer souvent. Malgré tout, les objectifs ont été atteints sur les systèmes économes où les quantités d'irrigation ont été réduites de 27 % sur S2-Eco1 et - 8% seulement pour le S3-Eco2, où l'irrigation a été maintenue à un niveau élevé afin de favoriser l'implantation de la menthe poivrée. La réduction obtenue sur les systèmes S2 et S3 a débutée en avril et s'est poursuivie en juillet. L'objectif de cette réduction hydrique est entre autres de limiter le développement du monilia en évitant la formation de microfissures à la surface des fruits trop volumineux et d'améliorer la teneur en sucre des fruits qui serait plus concentrée. Une réduction de l'irrigation de 30 % est envisagée lorsque la menthe poivrée sera bien installée sur le système 3-ECO 2. Par la suite, il ne sera pas possible de réduire davantage l'irrigation sur les systèmes économes, du fait de trop grandes baisses de performances observées suite à une réduction de l'irrigation de près de 50 % par rapport au système REF.

##### 3.1.2 Bilan de la fertilisation

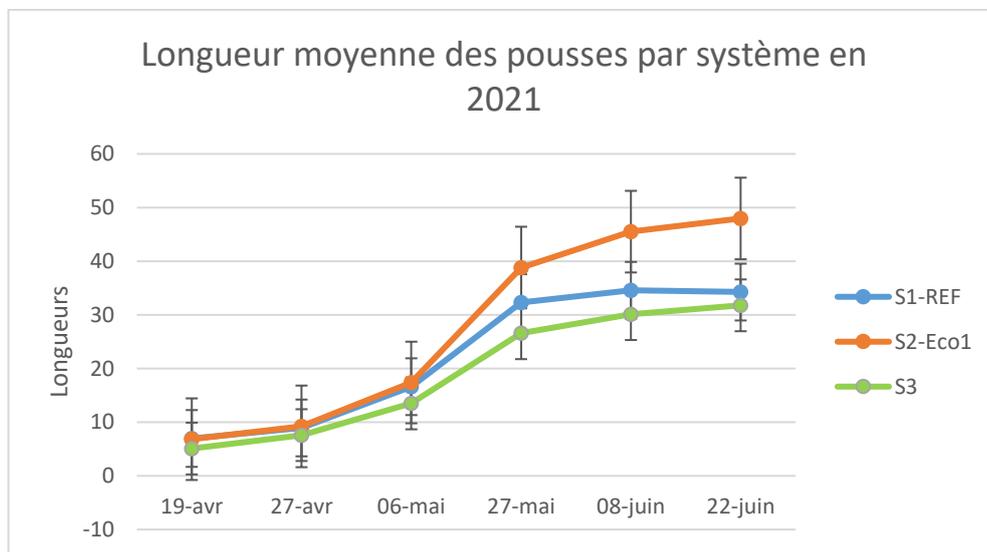
Sur le système de référence (Figure 4), les quantités biodisponibles d'azote ont été de 150 kg N/ha (S1-REF1). Les quantités d'azote ont été apportées manuellement pour totaliser 120 kg N/ha sur les systèmes ECO 1 et ECO 2. Les apports en phosphore ont été de 76 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha sur S1-REF et de 30,5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha sur les systèmes ECO 1 et ECO 2. Les quantités apportées sur S2-Eco1 et S3-Eco2 ont été réduites de 60 %. Les apports de potassium de 150 kg K<sub>2</sub>O/ha sur S1-REF ont été réduits de - 40% sur S2 et S3 avec un apport de 90 kg K<sub>2</sub>O/ha.

##### 3.1.3 Bilan des produits phytosanitaires

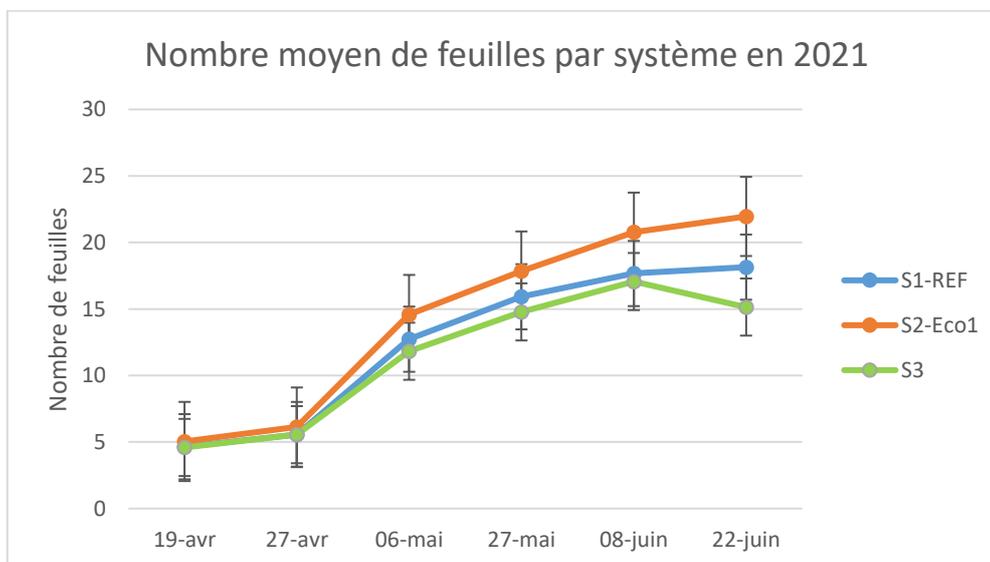
Hors produits de biocontrôles, une baisse de près de 90 % des IFT chimique a été réalisée entre le système S1-REF et les systèmes ECO. Les IFT chimiques s'élevant à 22 pour le système S1-REF avec près de la moitié des IFT dû aux produits fongicides avec un IFT de 10 contre 8 pour les insecticides et enfin 3 pour les herbicides. Concernant les systèmes ECO, les IFT hors produits de biocontrôles sont seulement de 2 et sont dû aux fongicides. Pour compenser la diminution en produits chimiques, les produits de biocontrôles, ont fortement été augmentés dans les systèmes ECO (Figure 5).



**Figure 6.** Evolution de la circonférence moyenne des troncs entre 2015 et 2021



**Figure 7.** Longueur moyenne des pousses par système en 2021



**Figure 8.** Nombre moyen de feuilles par système en 2021

### 3.1.4 Croissance des troncs

Du fait du faible nombre de répétition (2 répétitions/arbre/année), l'analyse statistique inclue les données de circonférences de troncs depuis 2015. Les différences de circonférences de troncs moyennes entre 2015 et 2021 ne sont pas significatives entre les systèmes (chi-squared = 3,3956 ; p-value = 0,1831). Entre 2015 et 2021, la circonférence moyenne des troncs est restée semblable entre les systèmes 1 REF et systèmes 2-ECO1. En juillet 2016, la circonférence moyenne des troncs était légèrement supérieure dans le système 1 REF par rapport au système 2-ECO1 (29.725cm contre 29.508cm). Depuis juillet 2017, la circonférence moyenne des troncs est légèrement supérieure dans le système 2-ECO1 par rapport au système 1 REF. Concernant le système 3-ECO2, la croissance des troncs est largement inférieure aux deux autres systèmes du fait de l'augmentation de la densité de plantation, augmentant la compétition entre les arbres (Figure 6).

### 3.1.5 Croissance végétative

La croissance en longueur des pousses entre les systèmes se différencie statistiquement entre le 19/04/21 et le 22/06/21 (Figure 7) (le 19/04/21 ; chi-squared = 18,599 ; p-value =  $9,145 \cdot 10^{-5}$ ), (le 22/06/21 ; chi-squared = 19,96 ; p-value =  $4,631 \cdot 10^{-5}$ ). C'est sur le système 2 que l'on retrouve une croissance des pousses plus importante (Figure 7). Sur le système ECO 2, l'attaque de pucerons a ralenti la croissance courant mai-juin et on observe une ré-émergence de feuilles à partir de la fin juin et du mois de juillet après le départ des pucerons (Figure 8). Le nombre de feuilles suit la même tendance avec un nombre de feuilles légèrement plus important pour le système 2 (le 19/04/21 ; chi-squared = 5,8871 ; p-value = 0,005268) (le 22/06/21 ; chi-squared = 48,898 ; p-value =  $2,41 \cdot 10^{-11}$ ). On note une baisse du nombre de feuilles pour le système 3 ECO 2 en juin du fait de la pression exercée par les pucerons occasionnant des chutes de feuilles plus ou moins importantes selon le niveau d'infestation des arbres. Concernant les surfaces foliaires, il ressort une différence statistique entre les systèmes (le 22/06/21 ; chi-squared = 13,955 ; p-value = 0,0009327), ainsi que pour la masse sèche des feuilles (le 22/06/21 ; chi-squared = 14,05 ; p-value = 0,0008893)

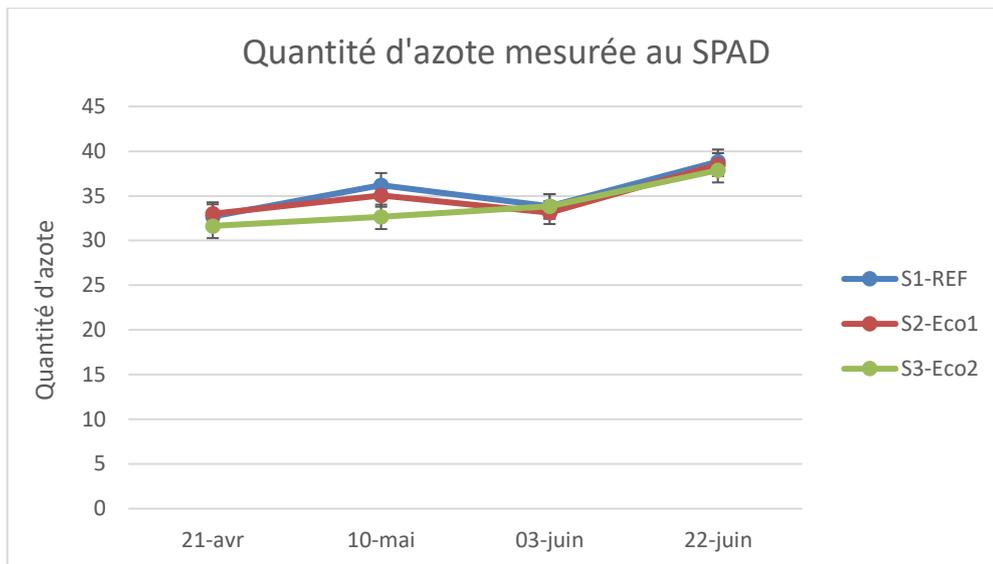


Figure 9. Quantité d'azote mesurée au SPAD

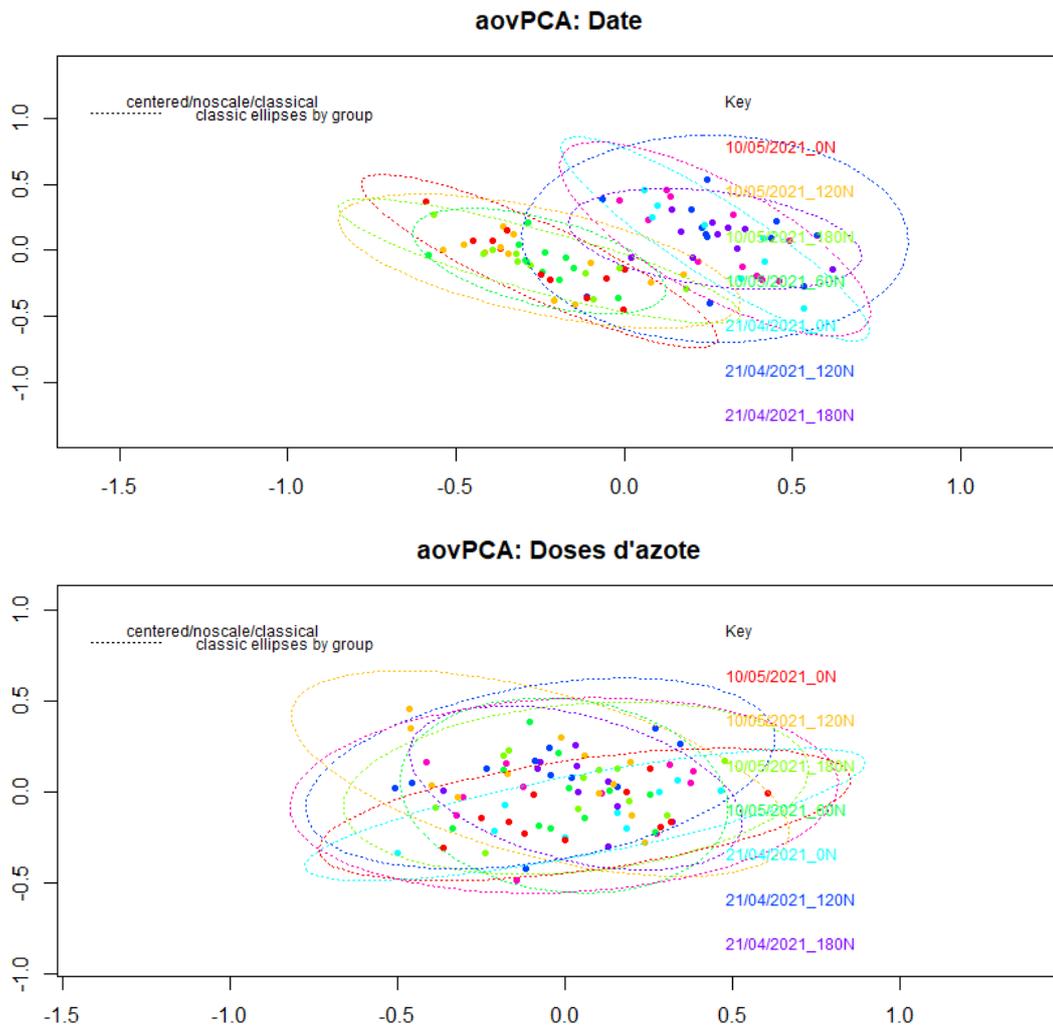


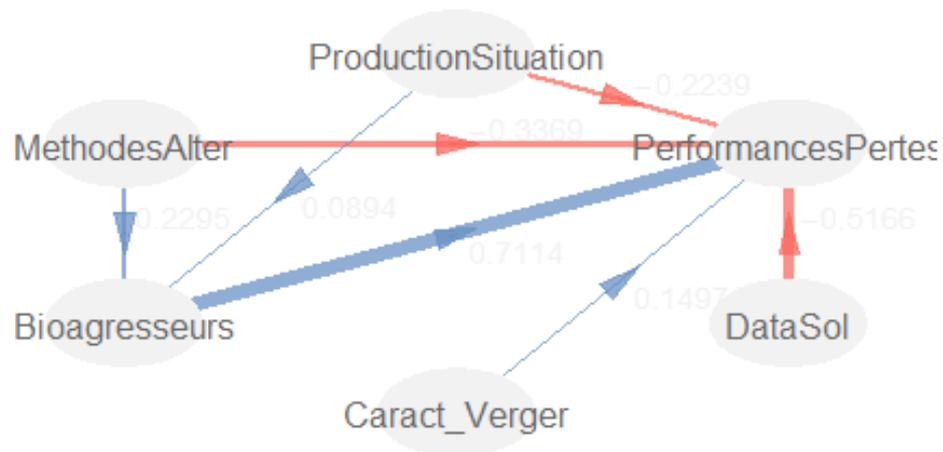
Figure 10. Analyses Anova/ACP des spectres infrarouge selon la date ou la dose d'azote

### 3.1.6 Quantification du statut azoté

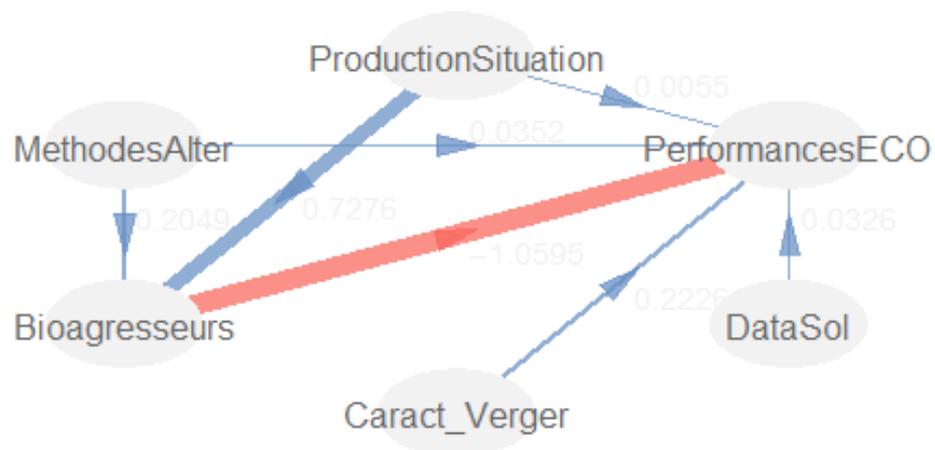
Malgré les différenciations des apports d'engrais azotés, il ne ressort pas de différences statistiques entre les systèmes (Figure 9) pour un indicateur de l'état chlorophyllien (chlorophyll meter, SPAD Minolta) qui est généralement assez bien corrélé avec la teneur en azote des feuilles (Plénet. D et Borg. J, 2019), (le 22/06/21 ; chi-squared = 0,12716 ; p-value = 0,9384). Fin juin, les teneurs en N ne montrent pas de différences d'azote entre les systèmes S1-REF (38,8 N/kg de MS foliaire) par rapport à S2-Eco1 (38.5 N/kg) et S3-Eco2 (37.9 g N/kg de M S de feuilles) même si les teneurs sont dans ou proche des teneurs considérées comme optimales (30 à 35 g N/kg) pour une alimentation azotée satisfaisante pour les 3 systèmes (Plénet. D et Borg. J, 2019). Il est à noter que cette année, étant donné l'absence de fruits, les arbres n'ont pas eu besoin de puiser dans leurs réserves d'azote pour assurer la croissance des fruits, expliquant des taux plus élevés.

En complément des analyses en laboratoire, la méthode de spectroscopie infrarouge a également été utilisée car plus rapide et moins coûteuse. L'objectif de l'analyse des données SPIR ou spectroscopie proche infra-rouge est de construire et valider un modèle de prédiction des doses d'azote foliaire. Pour cela, ont été mis en relation, les spectres PIR avec les dosages d'azote foliaire au laboratoire et avec les indices SPAD. On observe des regroupements différents selon le facteur date. Le premier regroupement correspondant aux mois d'avril/mai et le second aux mois de juin/juillet (Figure 10). L'absorption de l'azote semble avoir été différente entre les mois d'avril/mai et juin/juillet, à moins qu'un autre facteur en soit la cause. En revanche, il ne ressort pas de regroupement particulier selon le facteur dose d'azote (Figure 10) ainsi que pour l'interaction Dose\*Azote, non représentée ici. Un regroupement par date et par dose d'azote avait également été observé en 2020.

La sélection du modèle de prédiction passe par la comparaison de différents modèles basée sur la transformation ou non des spectres (spectres bruts, ligne de base corrigée, spectres lissés, dérivé primaire et dérivé secondaire). Le meilleur modèle est sélectionné sur la base de 2 critères : le coefficient de corrélation le plus élevé ( $R^2$ ) et la plus faible erreur quadratique moyenne (RMSE). Le modèle le plus intéressant est obtenu avec le spectre de la dérivé première, bien que le  $R^2$  soit seulement de 0,56 et la RMSEP de 0,27 (modèle à 5 dimensions). L'intégration d'un plus grand nombre de dimensions n'améliore pas davantage la qualité de prédiction du modèle. En l'état, ce modèle ne permet pas de réaliser des prédictions de bonne qualité et nécessite davantage de données pour en améliorer la fiabilité.



**Figure 11.** Modèle global de l'impact de la météo, des leviers d'actions, des bioagresseurs, des caractéristiques du verger et du sol sur le pourcentage de pertes (trait bleu : corrélation positive ; trait rouge : corrélation négative ; trait fin : corrélation faible ; trait épais : corrélation forte)



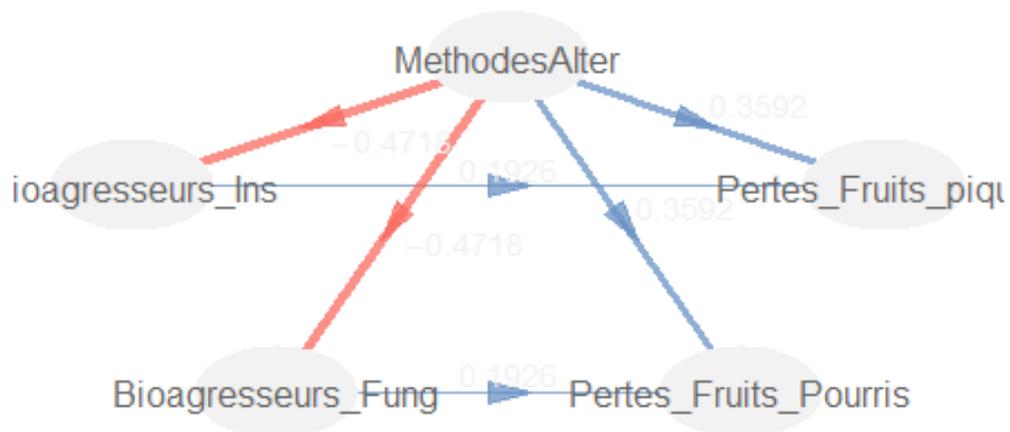
**Figure 12.** Modèle global de l'impact de la météo, des leviers d'actions, des bioagresseurs, des caractéristiques du verger et du sol sur les performances économiques (trait bleu : corrélation positive ; trait rouge : corrélation négative ; trait fin : corrélation faible ; trait épais : corrélation forte)

## 3.2. Analyse PLS-PM des leviers d'action, prises de décisions et indicateurs de performances

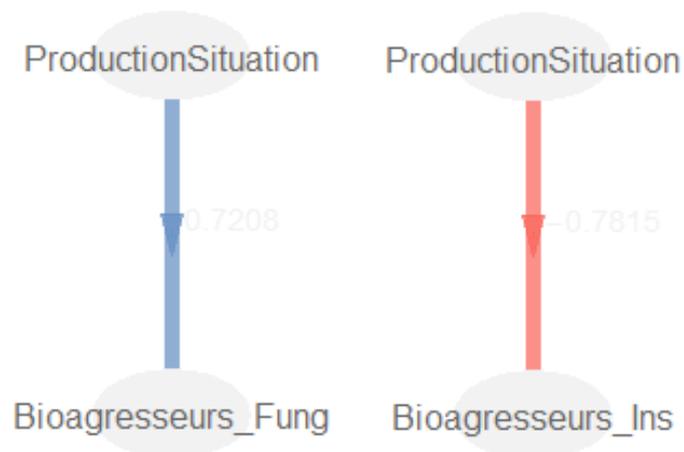
### 3.2.1 Modèles globaux de l'analyse pluriannuelle

Ce sont les bioagresseurs qui ont le plus d'impact sur les pertes (Figure 11). L'impact est fort et positif, l'augmentation des bioagresseurs va dans le sens de l'augmentation des pertes. Le climat et les leviers d'actions auraient un impact plus restreint sur les pertes mais celui-ci est négatif. Ce résultat peut indiquer que les règles de décisions ont permis de contenir le niveau de pression des bioagresseurs, puisque le niveau de pression n'a pas beaucoup fluctué entre 2015 et 2020. Dans l'ensemble, le climat ne semble pas impacter tant que ça les pertes en fruits. En effet, si les règles de décision permettent de contrôler suffisamment les bioagresseurs, alors le climat ne va pas tant que ça impacter l'abondance en bioagresseurs. En revanche, ce serait davantage des erreurs de prises de décision qui pourraient fortement augmenter la pression en bioagresseurs. Les effets de l'âge du verger et de la densité de plantation sont négligeables ici. En effet, ces facteurs ont plutôt un impact sur les performances économiques et la quantité de fruits produits. Étrangement les leviers d'actions favoriseraient les bioagresseurs alors qu'ils diminueraient les pertes. Cependant, cet impact est faible et peut montrer comme expliqué plus haut que les bioagresseurs ont peu fluctué entre 2015 et 2020 et que les changements de stratégies ont pu être bénéfiques. L'impact de la biodisponibilité de l'azote dans le sol repose sur une seule variable ce qui augmente fortement son poids. Davantage de variables de sol seraient à implémenter.

Dans le second modèle (Figure 12) les bioagresseurs ont un impact fort et négatif sur les performances économiques, baissant les rendements, le chiffre d'affaires et augmentant les coûts de production du fait de l'augmentation des IFT. Le climat et les leviers d'actions auraient un impact positif mais faible sur ces performances agroéconomiques. En effet, le climat n'est pas un facteur limitant à la production de fruits via la présence de l'irrigation notamment qui compense le manque d'eau. Les leviers d'actions sélectionnés pour les modèles jouent davantage un rôle dans la gestion des bioagresseurs que dans l'amélioration de la productivité, ce qui peut expliquer ce résultat. Il serait judicieux de sélectionner d'autres variables si cela est l'objectif comme la quantité d'azote apportée. On voit qu'ici le climat a un impact beaucoup plus fort sur les bioagresseurs. Si on suit la même logique disant que ce sont surtout les erreurs de prises de décisions qui impactent les bioagresseurs et non le climat, il est difficile d'expliquer le résultat de ce modèle. Là-dessus, il nous manque encore des informations sur la manière dont sont calculés les coefficients. L'âge et la densité de plantation auraient également peu d'impact. Or, augmenter la densité permet d'augmenter la production. L'âge d'un arbre impacte également sur sa capacité à produire. Nous n'avons pas réussi à faire ressortir ce phénomène avec notre modèle.



**Figure 13.** Modèle des relations entre les leviers d’actions, les bioagresseurs fongiques, insectes ravageurs et le pourcentage de pertes (fruits piqués et fruits pourris) (trait bleu : corrélation positive ; trait rouge : corrélation négative ; trait fin : corrélation faible ; trait épais : corrélation forte)

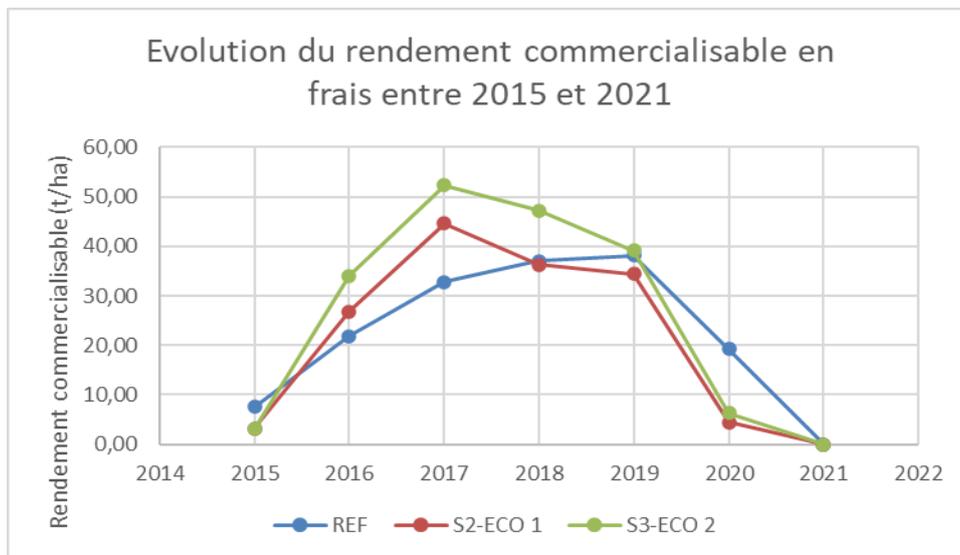


**Figure 14.** Modèles de l’impact du climat sur les bioagresseurs fongiques et insectes ravageurs (trait bleu : corrélation positive ; trait rouge : corrélation négative ; trait fin : corrélation faible ; trait épais : corrélation forte)

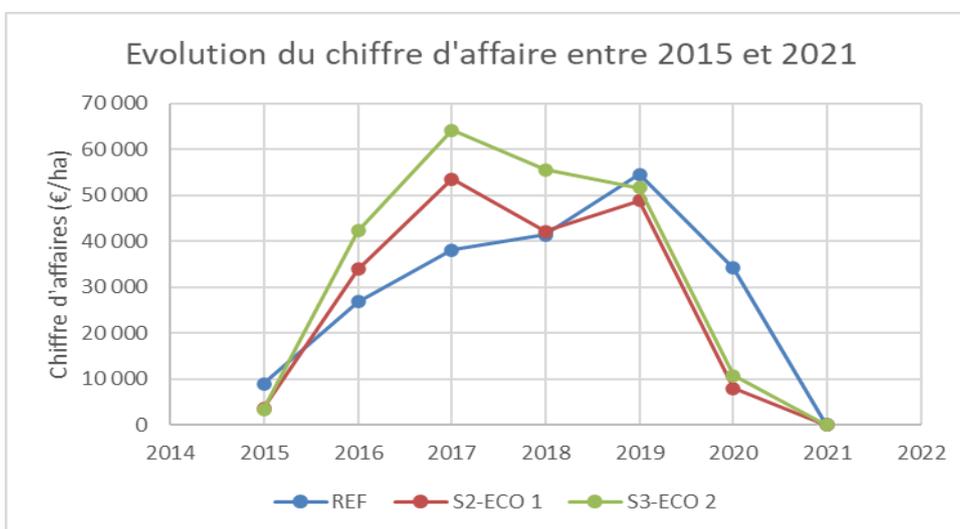
### 3.2.2 Relations entre leviers d'actions, bioagresseurs et pertes

Le modèle suivant représente plus précisément l'impact des bioagresseurs fongiques et insectes ravageurs sur les pertes en fruits pourris et fruits piqués ainsi que les répercussions des leviers sur ces bioagresseurs (Figure 13). On observe que contrairement aux modèles précédents, les leviers d'actions ont un impact négatif sur les bioagresseurs fongiques et insectes ravageurs et semblable pour les 2 groupes de bioagresseurs et d'intensité moyenne (-0,4718 et - 0,4716). La variabilité des modèles peut venir du fait que l'attribution des coefficients des interactions entre les sous-groupes prend en compte les autres relations du modèle. Mais sur ce point nous manquons encore d'informations. Ces résultats montreraient que l'évolution des règles de décisions ont permis de diminuer davantage la pression des bioagresseurs entre 2015 et 2020. Etrangement, on peut constater que les leviers d'actions agissent positivement sur les pertes (fruits piqués et pourris). Difficile ici d'expliquer cette variabilité. Les impacts respectifs des bioagresseurs fongiques sur les pertes en fruits pourris et des insectes ravageurs sur les fruits piqués sont faibles et égaux (0,1926). Ceci est contradictoire avec nos précédents modèles. Il est possible que cet impact ne ressorte pas dans le cadre de nos données et de la bonne gestion des bioagresseurs grâce aux leviers d'actions mis en place des bioagresseurs sur les pertes qui augmenteraient peu.

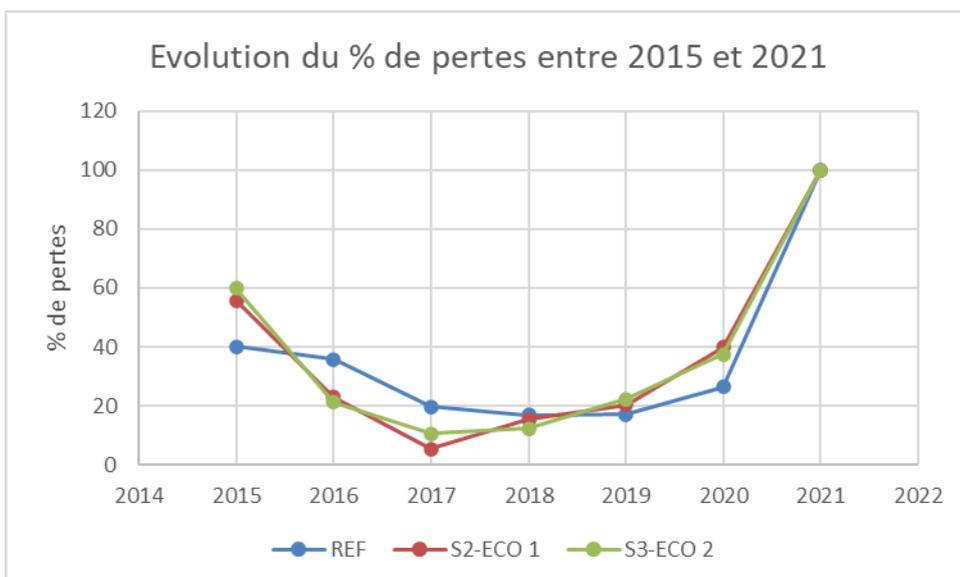
Globalement sur les modèles précédents, le climat n'avait pas un impact très important sur les bioagresseurs. En regardant les deux derniers modèles (Figure 14) ou le système 1 a été retiré de l'analyse du fait qu'il soit moins impacté par le climat car traité chimiquement, le climat a un impact plus important mais différent sur les bioagresseurs fongiques et insectes ravageurs. Celui-ci aurait un impact positif sur les bioagresseurs fongiques (0,7208) et négatif sur les insectes ravageurs (- 0, 7815). Ainsi un climat plus chaud et humide serait favorable aux bioagresseurs fongiques, ce qui est semblable à la bibliographie. Pour les insectes ravageurs cela pourrait être moins avantageux. Au vu de la variabilité entre les modèles, il est difficile de dire si le climat a réellement un fort impact sur l'incidence des bioagresseurs ou non, ce qui indiquerait que les résultats étaient biaisés par la présence du système de référence dans les modèles.



**Figure 15.** Evolution du rendement commercialisable en frais entre 2015 et 2021



**Figure 16.** Evolution du chiffre d'affaires entre 2015 et 2021



**Figure 17.** Evolution du % de perte entre 2015 et 2021

### 3.3 Bilan du projet Ecopêche de 2015 à 2021

#### 3.3.1 Rendement commercialisable

Pour les systèmes ECO 1 et 2, les stratégies mises en place et l'augmentation du nombre de leviers mobilisés ont permis d'augmenter de manière significative les rendements entre 2015 et 2017 passant de moins de 10 t/ha pour les 2 systèmes à plus de 40 t/ha pour le système 2-ECO 1 et plus de 50 t/ha pour le système 3-ECO 2, vu l'augmentation de la densité de plantation. A partir de 2018, il s'ensuit une baisse de rendement pour les 2 systèmes, l'augmentation de la densité pour le système 3-ECO 2 n'a pas permis de contrecarrer la baisse de rendement alors que le verger passe en phase mature, ce levier semble surtout utile en phase juvénile. En 2019, des attaques importantes de bioagresseurs et des impasses de traitements ont induits des baisses des rendements dans les systèmes ECO 1 et 2. Comme dans le second modèle de PLS-PM, les bioagresseurs ont un impact important sur les performances. Cependant, on voit que cela est dû aux impasses en 2019 sans pour autant très fortement diminuer les rendements. L'impact des bioagresseurs est moins fort que lors de l'entrée en production du verger montrant un meilleur contrôle des ravageurs avec les règles de décisions mises en place à partir de 2019, même si l'âge du verger joue sur sa résistance aux attaques. L'effondrement des rendements en 2020 et 2021 sur l'ensemble des systèmes est dû aux gelées tardives. (Figure 15).

#### 3.3.2 Chiffre d'affaires

L'évolution du chiffre d'affaires suit la même logique que celle des rendements (Figure 16). Globalement, les décisions prises entre 2015 et 2019 ont permis d'augmenter de manière importante le chiffre d'affaires dans les systèmes ECO 1 et 2, malgré une augmentation des coûts de production par rapport au système 1 REF. Cette augmentation a été bien maîtrisée et n'a pas induit de coup supplémentaire trop important, assurant de bons résultats économiques.

#### 3.3.3 Pourcentage de pertes

Les produits de biocontrôles et les stratégies de traitements ont dans l'ensemble permis de réduire drastiquement les pertes entre 2015 et 2018 dans les systèmes ECO 1 et 2, en raison d'une meilleure maîtrise des règles de gestion de la protection. A partir de 2018, on observe une augmentation des dégâts dans tous les systèmes. Une moins bonne gestion des traitements va induire une augmentation des dégâts qui peut se maintenir dans le temps comme pour les pucerons et la cloque (Figure 17). Nos modèles ne permettent pas d'évaluer l'impact des impasses. Or, toutes les impasses n'ont pas menées à une forte augmentation des bioagresseurs. Il serait intéressant d'évaluer dans quelles conditions les impasses sont délétères.

**Tableau 4.** Evolution du pourcentage de dégâts par système pour les pucerons, la cloque, la tordeuse orientale, la moniliose et l'oïdium entre 2019 et 2021.

Années	Système	Bioagresseurs				
		Pucerons	Cloque	Tordeuse	Moniliose	Oïdium
2019	REF	3,67	0,00	0,00	0,50	0,00
2019	ECO 1	91,00	1,00	0,00	0,33	0,00
2019	ECO 2	97,33	11,00	0,00	0,33	0,67
2020	REF	0,00	1,67	21,00	12,33	0,00
2020	ECO 1	27,00	44,00	33,67	14,67	0,33
2020	ECO 2	21,13	49,81	25,28	15,47	0,94
2021	REF	0,00	10,48	0,00	0,00	0,00
2021	ECO 1	13,21	60,71	0,00	0,00	0,00
2021	ECO 2	11,06	42,62	0,00	0,00	0,00

#### 3.3.4 Suivis des bioagresseurs

Concernant la pression des bioagresseurs, on observe que l'année 2019 est marquée par une attaque sévère de pucerons sur les systèmes S2 et S3 occasionnant des dégâts sur plus de 90 % des rameaux observés sur ces 2 systèmes. La cloque a été peu présente cette année-là et davantage sur le système 3. Concernant la tordeuse orientale, l'oïdium et la moniliose, les dégâts ont pratiquement été nuls sur l'ensemble des systèmes. En 2020, le niveau de pression des pucerons a fortement régressé. Plus qu'un quart environ des rameaux observés était atteint sur les systèmes S2 et S3. En revanche, la tendance s'est inversée pour les autres bioagresseurs dont les dégâts ont été plus importants sur les 3 systèmes. La cloque a fortement augmenté pour atteindre près de la moitié des rameaux observés sur les systèmes S2 et S3. Cette progression s'explique par une impasse de traitement lors de la période critique du cycle d'infestation, ce qui a engendré l'implantation massive du bioagresseur. Bien qu'absente en 2019, la tordeuse a occasionné des dégâts similaires sur les systèmes REF et S3 et davantage sur le système 2 avec 33 % des rameaux observés touchés. Pour la moniliose, l'ensemble des systèmes a été touché de manière relativement homogène mais les dégâts restent tout de même assez faibles. Pour l'oïdium, il n'y a pas de différence notable avec l'année précédente (Tableau 4).

Enfin, l'année 2019 aura été marquée par la cloque qui a nettement progressé dans le système 2 avec près de 60 % des rameaux observés touchés et le système 1 bien que celui-ci reste peu impacté. Une fois installé, il semble difficile de lutter contre la cloque, cette année n'étant pas propice à ce bioagresseur. Malgré des dégâts sévères sur certains arbres, les attaques de pucerons étaient très localisées. Ainsi, peu de rameaux ont été touchés. Les attaques de tordeuse orientale sont restées extrêmement faibles et uniquement sur les systèmes 1 et 3. La confusion sexuelle montre une certaine efficacité. Concernant l'oïdium et la moniliose, il n'y a pas eu d'observation cette année compte tenu de l'absence de fruits (Tableau 4). Les actions préventives se sont montrées efficaces contre ces pathogènes. L'année 2021 a été relativement sèche au printemps et en été malgré quelques épisodes de fortes pluies, ce qui a limité le risque de développement des bioagresseurs fongiques. On observe que les stratégies de lutte mises en place dans les systèmes ECO ont permis de limiter les dégâts liés aux bioagresseurs. La régulation naturelle des pucerons dans les systèmes ECO a commencé à être efficace à partir du mois de juin du fait d'un temps d'installation des populations d'auxiliaires plus long notamment en raison des gelées tardives. Ces 3 années ont été assez semblables du point de vue climatique, il est difficile de faire ressortir un effet du climat. Comme le montre le modèle 2 de la PLS-PM, les leviers d'actions semblent avoir un certain impact puisque des impasses de 2020 ont induit des fortes augmentations des dégâts.



### 3.4. Discussion

#### 3.4.1. Bilan pluriannuel des performances agronomiques

Les objectifs de rendements fixés entre 40 et 45 t/ha n'ont pas été atteints chaque année pour les systèmes REF et ECO 1. En raison de l'augmentation de la densité de plantation sur le système ECO 2, il a atteint plus rapidement les objectifs de production. Les objectifs ne sont clairement pas atteints en 2020 et 2021 du fait des conditions sanitaires et des gelées de 2021. Néanmoins, tous les systèmes ont permis d'atteindre des niveaux de productivité proches du système de références en 2019 et les années précédentes. Cependant, on observe une baisse notable du rendement en 2019 dans le système 3 par rapport aux années précédentes. Malheureusement, nous ne pourrions pas vérifier si cette tendance se maintient en 2021 comme ce fut le cas également en 2020. La réduction de l'irrigation d'environ 25 % a été atteinte pour l'ensemble des systèmes sans impacter les performances des systèmes. Ce levier semble donc intéressant en observant les faibles dégâts liés à la moniliose, confirment l'intérêt de la régulation hydrique à des phases clés de la croissance des fruits pour réduire la sensibilité. Concernant les produits phytosanitaires, les objectifs ont été atteints tout en assurant un maintien des pertes à des niveaux acceptables entre 2015 et 2019.

Globalement sur les 5 années d'expérimentation, sans tenir compte de l'année 2020 et 2021, les stratégies de gestion mises en œuvre sur les systèmes économes ont assuré un niveau correct de protection du verger, excepté pour les pucerons sur les systèmes économes engendrant de légères baisses de production (rendement, calibre et qualité) impactant ainsi certains indicateurs agronomiques et qui se répercute les années suivantes ; toutefois, sans grande incidence. Il est possible qu'il y ait une faible pression des bioagresseurs sur le site Inrae d'Avignon du fait d'une densité assez réduite de vergers de pêche-nectarine dans la microrégion (Plénet D et Borg. J, 2019). Ainsi, une partie des performances des systèmes économes semble donc bien liée aux stratégies de gestion. Certaines méthodes alternatives ont une forte efficacité comme la bâche horticole tissée qui permet de contrôler efficacement les adventices sur le rang, l'aération des arbres et des fruits. C'est aussi le cas de la glue contre les forficules et de la confusion sexuelle contre la tordeuse orientale. Sur ces 5 dernières années, c'est un évènement climatique (gelées) qui a engendré le non-respect des objectifs en 2020 et 2021.

#### 3.4.2. Bilan pluriannuel des performances économiques

Des chiffres d'affaires proches de la valeur du système de référence ont été obtenus, ce qui correspond aux objectifs visés. L'objectif de maîtrise du temps de travail a été atteint tout au long



des projets Ecopêche 1 et 2 ; cependant, cette diminution est due à l'incapacité d'effectuer certaines tâches et ne reflète donc pas une année normale comme en 2019. Ainsi, malgré quelques erreurs décisionnelles, la gestion actuelle du verger semble concluante et viable sur le long terme permettant de répondre aux attentes économiques et sociales des producteurs.

### 3.4.3. Bilan pluriannuel des performances environnementales

Sur le volet environnemental, les systèmes ECO répondent aux objectifs visés voir vont au-delà par la diminution conséquente des IFT chimiques, ce qui limite fortement la présence de résidus de pesticides dans l'environnement et sur les fruits. La gestion des intrants et notamment l'utilisation d'un système de ferti-irrigation permet de diminuer les pertes en eaux et surtout en azote, limitant la possibilité de lessivage et lixiviation des composés azotés (Plénet. D et Borg. J, 2019). Sur la faune auxiliaire, le système 3 sous couvert de menthe poivrée prend l'avantage du fait que cette plante a été caractérisée comme attractive pour de nombreux auxiliaires à savoir les coccinelles, les syrphes, les punaises entre autres (CTIFL, 2020). Combiné à la présence d'une haie favorisant la biodiversité, ce système offre un cadre favorable à l'installation d'un nombre élevé d'insectes qu'ils soient auxiliaires ou ravageurs qui doit être vérifié. Également, le non-travail du sol ou l'absence de bâche tissée permet le développement d'une flore d'adventices riche dont certaines plantes telle que la Vergerette du Canada auraient des propriétés attractives similaires voire supérieures à la menthe poivrée (CTIFL, 2020).

## 3.5. Critique de l'analyse PLS-PM

### 3.5.1. Choix des indicateurs

La robustesse du modèle établie via l'analyse PLS-PM repose principalement sur le choix des variables. Parmi les variables sélectionnées, toutes n'étaient pas basées sur des références bibliographiques attestant de leur pertinence. C'est notamment le cas pour certaines variables météorologiques portant sur le vent et la pluviométrie. De ce fait, ne pouvant nous baser sur des seuils jugés comme pertinents et issus de données bibliographiques. Ainsi, ces variables ont été fixées sur des connaissances générales. Aussi, il est difficile de savoir si les seuils fixés sont suffisamment pertinents dans le cadre de l'analyse PLS. Le nombre de variables dans un sous-groupe joue sur le poids de chaque variable. Moins il y en a plus chaque variable pèsera dans l'impact global du sous-groupe. La classification des variables est également très importante. Certaines variables peuvent à la fois être à expliquer ou bien explicatives, selon le point de vue dans lequel nous nous mettons. La réussite de l'analyse nécessite donc de classer les variables en fonction de la ou des questions agronomiques à laquelle ou auxquelles nous souhaitons répondre. La simple modification d'un sous-groupe d'un modèle à un autre peut engendrer de nombreux



changements sur la nature des interactions entre l'ensemble des sous-groupes. Les modèles ne semblent pas très stables ; il est donc important de prendre du recul face aux résultats. Il est également envisageable d'inclure des données pluri-sites à condition de fournir des informations précises sur les environnements et les caractéristiques des vergers afin d'avoir tous les éléments pour comprendre les logiques derrière les prises de décisions et d'analyser les résultats.

### 3.5.2. Perspectives de l'analyse PLS-PM dans le cadre de l'analyse des systèmes agronomiques

L'analyse PLS-PM est une approche intéressante du fait qu'elle permet de visualiser des relations entre différents sous-groupes de données. Le nombre limité de données rend son utilisation bien moins intéressante pour le moment. Notre analyse s'est portée sur un nombre d'années relativement faibles. D'une année à l'autre, des différences peuvent s'observer en raison d'évènements exceptionnels influant fortement sur les résultats de l'analyse. Augmenter le nombre d'années permettrait de limiter l'influence de ce genre d'évènements sur les résultats. De plus, il est parfois difficile de connaître les réflexions derrière les prises de décision ce qui rend l'interprétation des résultats plus difficile. Par exemple, il y a eu une augmentation du nombre d'heure d'éclaircissage en 2019, en partie en raison de la formation de certaines personnes à cette pratique.

Par la suite, il serait nécessaire afin d'améliorer la robustesse des modèles et donc de l'analyse, de renseigner pour chaque décision prise, les choix qui y ont menés. Il serait intéressant d'établir une base de données avec un ensemble de variables catégorisées et définies comme pertinentes. Cet outil offre donc des perspectives pour comprendre les relations entre variables et donc les mécanismes et interactions sous-jacents. Ce type d'analyse de par la représentation des variables sous forme de blocs permet de facilement rendre compte de l'impact global d'une modalité sur les autres. Cela devient particulièrement intéressant pour des études à grande échelle (paysage, pratiques agricoles, biodiversité...). Du point de vue agronomique, dans le cadre de nos données, il est encore difficile de faire ressortir des résultats très probants. Il ressort surtout la nécessité de multiplier les leviers d'actions afin de combiner les effets et améliorer la protection du verger. Les impasses aux moments des périodes critiques de chaque bioagresseurs peuvent grandement favoriser leur développement. Les actions préventives montrent également un grand intérêt et peuvent amener à se passer de traitement par la suite. Du point de vue de la recherche, la complexification des données expérimentales, par l'introduction d'un nombre de modalités importants, rend l'analyse de ces données plus complexe.



Vinzi *et al.*, 2010 ont proposé un ensemble de thématiques de recherche dans le cadre de l'analyse PLS-PM. Ces thématiques portent sur l'amélioration du traitement des données ; notamment, la possibilité d'imposer des contraintes sur les coefficients du modèle (poids extérieurs, charges, coefficients de trajet) afin d'inclure toute information disponible a priori ainsi que toute hypothèse (ex. égalité des coefficients entre différents groupes, conjectures sur les paramètres du modèle) dans la phase d'estimation du modèle, préciser les relations de rétroaction entre les variables latentes afin d'étudier la causalité mutuelle, identifier les données aberrantes.

## Conclusion

Les résultats obtenus dans le cadre du projet Ecopêche sont encourageants pour la filière pêche/nectarines. Cette culture, sensible aux aléas climatiques et à de nombreux bioagresseurs, est très impactante économiquement et environnementalement. Ainsi, les résultats obtenus montrent qu'il est possible de diminuer les intrants (fertilisation et irrigation) et les IFT chimiques de près de 80 % tout en assurant la viabilité économique du verger dans le temps. Cependant, les résultats obtenus montrent également que les systèmes économes en intrants et en produits phytosanitaires sont davantage sensibles aux variations climatiques et à l'évolution du niveau de pression des bioagresseurs et notamment les pucerons. Ce ravageur se montre de plus en plus virulent et peut causer des baisses de performances l'année suivant une grosse infestation et des impacts sur la vigueur de l'arbre à plus long terme. Des impasses au niveau des traitements et des prises de décisions mal adaptées (mauvaise période d'application...) auront davantage de répercussions que sur un système traité chimiquement. Malgré une grande efficacité de certains leviers d'action, nombre d'entre eux, ont une efficacité relativement faible comme les méthodes de contrôle cultural par atténuation et n'ont un réel impact qu'en étant associés à de nombreux autres leviers. Il ressort donc la nécessité d'améliorer nos connaissances sur l'efficacité de différentes combinaisons de leviers d'action, de trouver de nouveaux leviers ainsi que des alternatives à certains leviers qui se révèlent peu performants. Il semble également nécessaire d'améliorer le partage de connaissance entre les différents sites expérimentaux afin d'avoir une vision plus globale de ce qui semble fonctionner selon les conditions propres à chaque site et avec les producteurs.



## Bibliographie

Bassi D., Mignani I., Spinard A., Tura D. (2016). PEACH (*Prunus persica* (L.) Batsch). In: Simmonds M.S. J., Preedy., Victor R. (éd.), *Nutritional Composition of Fruit Cultivars*. Chapter 23. San Diego: Academic Press. pp. 535-571.

Bernadette L., Bouchard-Aerts V. (2020). Production de pêches 2020 proche du faible niveau de 2018 ; cours en forte hausse depuis le début de campagne. *Agreste Infos rapides*. n° 2020-0123.

Biodimestica. (sans date). *Maladies Cryptogamiques au Verger*.

Chiron G. (2017). *La pêche et la nectarine en 2016*. FranceAgrimer.

CTIFL. (2020). Réduction des intrants en arboriculture : l'emploi des plantes couvre-sol. N°366, Novembre 2020.

Dib H. (2010). Rôle des ennemis naturels dans la lutte biologique contre le puceron cendré, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera aphididae) en vergers de pommiers. Doctorat sciences agronomiques. Université d'Avignon, 2010. Français. pp. 253.

Duan L., Xie H., Li Z. (2020). Use of partial least squares regression to identify factors controlling rice yield in Southern China. *Agronomy Journal*. 2020 ;112 :1502–1516.

Erez M. (2000). *Temperature Fruit Crops in Warm Climates*. Institute of Horticultur. 10.1007/978-94-017-3215-4.

FranceAgrimer. (2015). *Études économiques fruits, légumes et pommes de terre réalisées et/ou financées par FranceAgriMer*. FranceAgrimer.

Garin P., Rollin D., Maton L., Rnaudo J.D., Richard-Ferroudji A., Calballero Y. (2016). *Agronomie environnement et sociétés*. Juin 2015, Volume 5.

Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., Lafond D., Meynard J.M., Petit M.S., Plenet D., Picault S., Faloya V., (2017). *Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation "système" pour les cultures assolées et pérennes*, GIS PICléG, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de cultures innovantes, GIS Relance Agronomique, 172 pages.

Henry A., Toupe. A.L., Deytieux V., Reau R. (2012). *Recueil et analyse critiques des règles de décision pour la protection des cultures*. Hilaire C., Giauque P. (2003). *Le pêcher*. Eds. CTIFL, 281 p.

Interfel. (2017). *Plan de filière fruits et légumes*. Interfel.

Itab. (2002) *Le contrôle des maladies du pêcher en agriculture biologique*. pp. 4.

Labeyrie B., Sagnes J.L., Castel L., Dubreuil N., Kreiter P., Millan M., Plenet P., Simon S., Zavagli F., Rougier M., Emonet E., Longis S., Brun V. (2018). *Réseau DEPHY EXPE : Synthèse des résultats à l'échelle nationale-filière Arboriculture*. Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto, 64 p.



- Laget E., Guadagnini-Palau M., Plénet D., Simon S., Assié G., Billote B., Borioli P., Bourguin B., Fratantuono M., Guérin A., Hucbourg B., Lemarquand A., Loquet B., Mercadal M., Parveaud C-E, Ramade L., Rames M-H., Ricaud V., Rousselou C., Sagnes J-L., Zavagli F., 2015. Guide pour la conception de systèmes de production fruitière économes en produits phytosanitaires. GIS Fruits - Ministère de l'agriculture, Paris, 264 p.
- Lauri I.P.E., Navarrete M., Parrot L., Simon S. (2014). Conception de systèmes horticoles innovants : bases biologiques, écologiques et socio-économiques. INRA.
- Loiseau R. (2021). La pêche et la nectarine en 2020. Bilan de campagne. FranceAgrimer.
- Mandrin J.F., Lichou J., Neyrand S., Amosse C., Vibert J. (2007). Le thrips californien sur pêcher *frankliniella occidentalis* pergande. Infos-Ctifl-n° 230.
- Minas I.S., Tanou G., Molassiotis A. (2018). Environmental and orchard bases of peach fruit quality. *Scientia Horticulturae* 245 (2018) 307-322.
- Plénet D., Simon S. (2015). Une démarche de conception et d'évaluation de systèmes de culture pour des vergers plus durables. *Sciences Eaux & Territoires*. 2015. Vol. Numéro 16, n° 1, pp. 58.
- Plénet D., Borg J. (2019). Conception et évaluation multisite de vergers de pêche – nectarine économes en produits phytosanitaires et en intrants. Campagne 2019.
- Plénet D., Hilaire C., Blanc Ph., Borg J., Borne S., Bussi C., Gallia V., Greil M.L., Guiraud M., Hostalnou E., Labeyrie B., Mercier V., Millan M., Montrognon Y., Monty D., Mouiren C., Pinet C., Ruesch J.. (2019). EcoPêche : Conception et évaluation multisite de vergers de pêche – nectarine économes en produits phytosanitaires et en intrants. *Innovations Agronomiques* 76 (2019), 291-310.
- Prophylaxie-Arbo. (2010). La prophylaxie, élément clé de la protection des vergers (2010).
- Riley J. (2001). The indicator explosion: local needs and international challenges. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 87(2) : 119-120.
- Said X. (1996). *Alter Agri*. La cloque du pêcher : seul le cuivre... ? N° 20. p. 8-10. pp. 3.
- Sanchez G. (2013). *PLS Path Modeling with R*. Trowchez Editions. Berkeley, 2013.
- Sauphanor B., Simon S., Boisneau C., Capowiez Y., Rieux R., Bouvier J. C., Toubon J. F., 2009a. Protection phytosanitaire et biodiversité en agriculture biologique. Le cas des vergers de pommiers. *Innovations agronomiques* 4: 217-228.
- Serrurier M. (2015). Évolution du verger espagnol de fruits à noyau. Eds. CTIFL, 43 p.
- Simon S., Sauphanor B., Lauri P.E. (2007). Control of fruit tree pests through manipulation of tree architecture. *Pest Technology* 1 : 33-37.
- Simon S., Alaphilippe A., Brun L., Gros C. (2012). Performances agronomiques et environnementales en verger de pommiers : 8 années d'expérimentation système. In : *Journées Techniques Légumes & Cultures Pérennes Biologiques*. 11 décembre 2012. pp. 4 p.
- SudArbo. (pas de date). Thrips californien. Fiche technique 9.
- SudArbo. (2012). Les pucerons du pêcher, de l'abricotier et du cerisier. Fiche technique 2012.



SudArbo. (2019). Guide de la protection raisonnée et biologique en Languedoc-Roussillon.

Vinzi V.E., Chinn W.W., Henseler J., Wang H. (2010). Handbooks of Partial Least Squares.

Yutong H., Xiaorong W., Mingde H., Wei F., Jing Z., Zhe W. (2018). Partial Least Squares Regression for Determining Factors Controlling Winter Wheat Yield. Agronomy Journal, Volume 110, Issue 1, 2018.

## Sitographie

Agriculture.gouv (2021) Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est ?. <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest> (Consulté le 16 avril 2021).

Ephytia 2016. Fiche 4 - Outils d'aide à la décision (OAD), choix de produits. <http://ephytia.inra.fr/fr/C/21468/Guide-Eco-Fruits-Outils-d-aide-a-la-decision-OAD-choix-de-produits> (Consulté le 05 aout 2021).

Interfel (sans date). Pêche, Nectarine. [https://www.lesfruitsetlegumesfrais.com/fruits-legumes/fruits-a-noyaux/peche-nectarine/choisir-la-peche-et-la-nectarine\\_](https://www.lesfruitsetlegumesfrais.com/fruits-legumes/fruits-a-noyaux/peche-nectarine/choisir-la-peche-et-la-nectarine_) (Consulté le 18 mars 2021).

Marché de Rungis (sans date). Pêches nectarines. <https://www.rungisinternational.com/tendances/peches-nectarines/> (Consulté le 16 avril 2021).

Syngenta 2021. Comprendre et calculer l'Indicateur de Fréquence de Traitement. <https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/proteger-eau-et-air/article/comprendre-et-calculer-ift> (Consulté le 05 aout 2021).

## ANNEXE I : Leviers d'actions mobilisables en arboriculture

Catégories de leviers	Leviers	Objectif(s)
Lutte physique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Argile, Glu, Talc</li> <li>- Désherbage mécanique</li> <li>- Paillage</li> </ul>	Réduire l'usage des produits chimiques de synthèse
Lutte biotechnique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Confusion sexuelle</li> <li>- Piégeage massif</li> </ul>	Réduire l'usage des produits chimiques de synthèse en diminuant la pression des bioagresseurs
Lutte biologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par conservation</li> <li>- Par lâcher inondatif</li> <li>- Micro-organisme</li> </ul>	Régulation naturelle des ravageurs par augmentation de la biodiversité fonctionnelle (haies composites, bandes fleuries, nichoirs à oiseaux), ou par lâcher d'auxiliaires
Contrôle cultural par atténuation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aération des arbres, fruits</li> <li>- Eclaircissage</li> <li>- Egourmandage</li> <li>- Maitrise de la vigueur</li> </ul>	Diminuer sa charge en fruit, sa vigueur, favoriser la circulation de l'air...
Suppression des organes contaminés	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prophylaxie (ramassage des feuilles, du bois, des fruits pourris...)</li> </ul>	Réduire l'inoculum dans la parcelle d'une année sur l'autre
Gestion de l'irrigation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction de l'irrigation</li> </ul>	
Matériel végétal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variété résistante</li> <li>- Variété tolérante</li> </ul>	Variétés résistantes et/ou tolérantes à certains bioagresseurs
Efficiences	<ul style="list-style-type: none"> <li>- OAD</li> <li>- Raisonnement</li> <li>- Réduction des doses</li> </ul>	Limiter au maximum les doses à utiliser
Produits alternatifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stimulateurs de défense des plantes (SDN)</li> <li>- Phytothérapie</li> </ul>	Augmenter les capacités de défense des arbres

## ANNEXE II : Niveau d'efficacité des leviers d'action mis en œuvre pour contrôler les bioagresseurs sur le site Inrae Avignon

Systèmes_Nom essai	Campagne	Age verger	contrôle génétique			lutte physique						lutte biotechn		lutte biologique				contrôle cultural par			contrôle	contrôle cultural par atténuation						Intr odu	efficience			Produits alternatifs					
			variété résistante / tolérante	pg résistant / interm / hauteur greff	diversité variétale et ou spécifique	désherbage mécanique	fauche dirageons	paillage rang	alt'carpo	filet floraison	argile, talc	glu	confusion sexuelle	piégeage massif	par conservation	par lacher inoculatif	par lacher inondatif	micro-organismes (Bt, virus)	broyage des feuilles	gestion irrigation		suppression organes contaminés	variétés précoces	aération des arbres	gestion gibrobroyage	couvre sol	aération des fruits		maîtrise de la vigueur	Eclaircissage manuel et taille	égourmandage	volailles	réduction de dose	utilisation d'OAD (modèles)	raisonnement	Stimulateurs de Défense des Plantes (SDN)	Phytothérapie (tisanes, extraits de plantes,...)
REF1	2016	4	0	1	0	0		0	0		0	0	3	0	1	0	0	0		0	1		1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	
ECO1	2016	4	0	1	0	0		3	0		0	2	3	0	2	0	0	2		3	2		1	1	0	1	2	1	1	0	1	0	2	0	0	0	
ECO2	2016	4	0	1	0	0		3	0		0	2	3	0	2	0	0	2		3	2		2	1	0	2	2	1	1	0	1	0	2	0	0	0	
REF1	2017	5	0	1	0	0		0	0		0	0	3	0	1	0	0	0		0	0		1	0	0	1	1	1	2	0	0	0	1	0	0	0	
ECO1	2017	5	0	1	0	0		3	0		0	3	3	0	2	0	0	2		3	2		1	1	0	1	2	1	2	0	0	0	2	0	0	3	
ECO2	2017	5	0	1	0	0		3	0		0	3	3	0	2	0	0	2		3	2		2	1	0	2	2	1	2	0	0	0	2	0	0	0	
REF1	2018	6	0	1	0	0		0	0		0	2	3	0	1	0	0	0		0	0		1	1	0	1	1	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0
ECO1	2018	6	0	1	0	0		3	0		0	3	3	0	2	0	0	3		2	2		1	1	0	1	2	1	2	0	1	0	2	0	0	0	3
ECO2	2018	6	0	1	0	0		3	0		0	3	3	0	2	0	0	3		2	2		2	1	0	2	2	1	2	0	1	0	2	0	0	0	3
REF1	2019	7	0	1	0	0		0	0		0	3	3	0	1	0	0	0		0	0		1	1	0	1	1	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0
ECO1	2019	7	0	1	0	0		3	0		2	3	3	0	2	0	0	3		2	2		1	1	0	1	2	1	2	0	2	0	2	0	0	0	3
ECO2	2019	7	0	1	0	0		3	0		2	3	3	0	2	0	0	3		2	2		2	1	0	2	2	1	2	0	2	0	2	0	0	0	3
REF1	2020	8	0	1	0	0		0	0		0	3	3	0	1	0	0	0		0	0		1	1	0	1	1	1	2	0	1	0	1	0	0	0	0
ECO1	2020	8	0	1	0	0		3	0		2	3	3	0	2	0	0	3		2	2		1	1	0	1	2	1	2	0	2	0	2	0	0	0	3
ECO2	2020	8	0	1	0	0		3	0		2	3	3	0	2	0	0	3		2	2		2	1	0	2	2	1	2	0	2	0	2	0	0	0	3

0 : absence de levier ; 1 : efficacité faible (ne permet pas de réduire IFT tout seul) ; 2 : plus ou moins efficace (réduction IFT dans certains cas et pas d'autres) ; 3 : bonne efficacité (réduction d'IFT)

### ANNEXE III : Organisation des systèmes REF, ECO1 et ECO2 site Inrae Avignon PSH

INRA PSH	Systèmes			
<b>ESSAI</b> <b>Nectarlove</b>	<b>1</b>	<b>S1 : REFérence</b>  (Raisonné)	<b>S2 : ECO</b> nome 1  Forme en volume	<b>S3 : ECO</b> nome 2  Forme haie fruitière
<b>Variété</b>		Nectarlove	Nectarlove	Nectarlove
<b>Porte-greffe</b>		GF 677	GF 677	GF 677
<b>Forme arbres</b>		Double Y	Double Y aéré	Simple Y oblique
<b>Densité (arbres/ha)</b>		571	571	909
<b>Système irrigation</b>		Micro-aspersion	Goutte à goutte enterré et/ou de surface	Goutte à goutte enterré et/ou de surface  Microjet depuis 2020
<b>Entretien sol du rang</b>		Désherbage chimique rang	Paillage textile	Travail mécanique du sol depuis 2020 ou présence de Menthe

## ANNEXE IV : Protocole d'échantillonnage

Indicateurs agronomiques	Individus suivis	Variables mesurées	Fréquence des mesures	
<b>Dynamique de croissance</b>	<b>Croissance végétative</b>	- 12 arbres par système (REF, ECO1) - 24 arbre système ECO2 - 4 pousses par arbre - 2 gourmands par arbre	Longueur des pousses et gourmands (cm) Nombre de feuilles (Nb)	Mesures au verger tous les 14 jours, jusqu'à la récolte
	<b>Croissance des fruits</b>	12 arbres par système : - 4 fruits par arbre	Diamètre des fruits (cm)	Mesures au verger tous les 7 jours, jusqu'à la récolte
	<b>Croissance des arbres</b>	12 arbres par système : - Circonférence des troncs	Section des troncs (cm <sup>2</sup> )	Mesures au verger : janvier, juste après la récolte (fin juillet) et en fin de saison (fin octobre)
<b>Dynamique de la mise en place de la surface foliaire et de la quantité d'azote prélevée</b>	- 12 arbres par système (REF et ECO1) - 7 feuilles par arbre - 48 arbres systèmes ECO2 - 5 feuilles par arbre	Surface moyenne d'une feuille (cm <sup>2</sup> ) Masse surfacique (mg/cm <sup>2</sup> ), Teneur en chlorophylle (SPAD) Teneur en carbone et azote (g/100g MS)	Prélèvements tous les 14/30 jours	
<b>Statut hydrique et azoté</b>	<b>Statut hydrique</b>	Dendromètres sur 5 arbres par système	Croissance journalière des charpentières Amplitude de Contraction Diurne (ACD) (µm)	Suivi des variations micro morphométriques une à plusieurs fois par semaine
	<b>Statut azoté</b>	Teneur en azote des feuilles (feuilles prélevées une fois par mois, même échantillon que pour mesurer la surface foliaire)		
<b>Suivi des ravageurs et des maladies</b>	<b>Bioagresseurs au verger</b>	-12 arbres système REF et ECO1 -10 rameaux par arbre -48 arbres système ECO2	Notation de l'intensité des dégâts par bioagresseurs	Observations au verger tous les 7 jours
	<b>Suivi Monilia avant récolte</b>	12 arbres par système	Nombre de fruits tombés ou pourris	Avant la première récolte et à chaque récolte
	<b>Suivi Monilia après récolte</b>	12 arbres par système	Nombre de fruits pourris	Observation des fruits mis en conservation une fois par jour pendant 15 jours après la récolte
<b>Rendement et qualité des fruits</b>	12 arbres par système	Masse de fruits commercialisable en frais (kg/arbre), répartition en calibre, poids moyen des fruits (g), taux de sucre (% Brix) par calibre	A chaque cueille	
<b>Prélèvement de sol</b>	-3 prélèvements à (0-30cm) et (30-60cm) (REF) -24 prélèvements à (0-30cm) et 12 à (30-60 cm) (ECO2)	Masse fraîche et sèche (g), Quantité d'azote (mg/L), % HO2	1 fois par mois	

En gris, les mesures n'ayant pu être faites du fait de la perte totale des fruits suite au gel du 07 avril

## ANNEXE V : Liste des indicateurs de performances et objectifs visés (Ecopêche 1 et 2)

	Indicateurs de performances	Abréviations	Unités	En % du système de référence (Objectifs pour Ecopêche 2)
<b>Indicateurs des pratiques : pression environnementale</b>	IFT chimique	IFT ch.	IFT/ha	-75 % par rapport au système REF
	IFT chimique par tonnes commercialisables	IFT ch.	IFT/t comm.	
	IFT herbicides	IFT h.	IFT/ha	-100% herbicides
	Quantité d'eau d'irrigation par tonnes commercialisable	Eau irr.	m <sup>3</sup> /ha	-10 à 20% d'eau
	Quantité eau irrigation	Eau irr.	M <sup>3</sup> /t comm.	
	Apport azote minéral	N min.	kg/ha	-10 à -20% quantité de fertilisants (REF et ECO2)
	Apport P2O5	P2O5	kg/ha	
	Apport KO2	KO2	kg/ha	
Quantité de fertilisant par tonnes commercialisable	N min. / P2O5 / KO2	Unités/t com.		
<b>Indicateurs agronomiques</b>	Rendement commercialisable en frais	rdt com.	t/ha	10% de rendement
	Pertes	Pertes	t/ha	+5 à 10% de pertes
<b>Indicateurs de qualité</b>	% Brix - IR	IR	% Brix	+ 10% IR
	% calibre A et plus	% A et plus	%	+ % Calibre A et plus
<b>Indicateurs sociotechniques</b>	Heures hors récolte	h. HR. tot	h/ha	+ ou -10% du temps de travail
	Heures totales	h.tot.	h/ha	
	Heures totales par tonne commercialisable	h.tot./ HR. tot	H/t com.	
<b>Indicateurs économiques</b>	Chiffre d'affaires bord verger	PB	€/ha	Améliorer la rentabilité du système
	Charge de production	Charge	€/ha	
	Marge partielle	Marge	€/ha	
	Indicateur Eco par tonne de fruits commercialisable	PB / Charge / Marge	€/t com.	



    université angers UNIVERSITÉ DE NANTES	Diplôme : Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Filières de l'Horticulture et Innovations (FHI)
Auteur(s) : Thomas SOUDET Date de naissance* : 16/02/1996	Organisme d'accueil : Inrae Avignon PSH Adresse : 228, route de l'Aérodrome, CS 40 509
Nb pages : 76                      Annexe(s) : 5	Domaine Saint Paul, Site Agroparc, 8914 Avignon Cedex 09
Année de soutenance : 2021	Maître de stage : Julie BORG et Daniel PLENET
Titre français : Suivi et analyses des performances de systèmes de culture économies en produits phytosanitaires et en intrants en vergers de pêche – nectarine et pommiers. Titre anglais : Monitoring and analysis of the performance of cropping systems that save on plant protection products and inputs in peach orchards – nectarine and apple trees.	
Résumé : Après 8 années d'expérimentation, les systèmes économies du projet Ecopêche ont répondu aux objectifs en termes de réduction d'intrants et de produits phytosanitaires tout en assurant un niveau de rendement satisfaisant. Les connaissances acquises tout au long du projet ont permis d'améliorer les prises de décisions et les combinaisons de leviers d'actions à mettre en œuvre. On observe cependant des baisses de rendement pour les systèmes ECO. La densification du système 3-ECO 2 montre qu'il est possible de combler ces baisses en augmentant le nombre d'arbres à l'hectare. Il est encore difficile de conclure sur l'intérêt de l'utilisation de menthe poivrée combinée à la réduction des quantités d'engrais azotés. L'analyse PLS-PM semble montrer une certaine efficacité des règles de décision et offre de nouvelles perspectives pour le projet Ecopêche et les projets futurs en lien avec l'expérimentation système. L'utilisation de ce genre d'analyse ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse de données expérimentales complexes dans le but d'améliorer notre compréhension des relations entre les variables et ainsi que l'ensemble des mécanismes et interactions présents au sein des systèmes étudiés.	
Abstract: After 8 years of experimentation, the economical orchards of the Ecopêche project have met the objectives in terms of reduction of inputs and phytosanitary products were maintained while ensuring a satisfactory level of yield. The knowledge acquired throughout the project has made it possible to improve decision-making and combinations of action levers to be implemented. However, there are reductions in efficiency for ECO systems. The densification of this system shows that it is possible to compensate these declines by increasing the number of trees per hectare. It is still difficult to conclude on the value of the use of peppermint combined with the reduction of nitrogen fertilisers. PLS-PM analysis appears to show some effectiveness of decision rules and seems to offer new perspectives for the Ecopêche project and future projects related to system experimentation within the systems studied. The use of this kind of analysis opens up new perspectives for the analysis of complex experimental data with the aim of improving our understanding of the relationships between variables and the set of mechanisms and interactions present within systems studied.	
Mots-clés : Systèmes �conomies, Performances, Expérimentation système, Règles de décision, PLS-PM Key Words : Efficient systems, Performance, Cropping system experimental trials ; Decision rules, PLS-PM	

\* El ment qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires