

Mémoire de stage

présenté par

Louis Catusse

Master Agrosociences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt
Parcours « De l'Agronomie à l'Agroécologie »

Nutrition azotée et plantes de services : effets sur la régulation des pucerons, les dynamiques de croissance et la multiperformance de pêchers

Pour l'obtention du diplôme de
Master Agrosociences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt

Stage réalisé à l'INRAE PACA, Unité Plantes et Systèmes de culture Horticoles (PSH)

Enseignant responsable du stage : Marie-Odile BANCAL

Maîtres de stage : Julie BORG
Daniel PLENET

Soutenu le 01/09/2020

Engagement de non plagiat



Les paramètres nécessaires sont manquants ou erronés.

Engagement de non plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

③ **Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

④ Engagement :

Je soussigné(e) Louis CATASSE
Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Aix-en-Provence le 17/08/20
Signature :

Cet engagement de non plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier le GIS Fruits pour avoir entièrement financé mon stage. Merci également à Hélène Gautier de m'avoir donné l'opportunité d'effectuer mon stage au sein de l'unité Plantes et Systèmes de Culture Horticoles (PSH) de l'INRAE.

Je tiens vivement à remercier Julie Borg, Quentin Barra et Daniel Plénet pour leur bienveillance, leur pédagogie et leur encadrement. Merci à Julie et Daniel de m'avoir accordé leur confiance pour la réalisation de ce stage. Merci également pour leur disponibilité, leurs conseils et les plusieurs corrections de ce rapport. Merci à Quentin pour sa bonne humeur contagieuse qui m'a accompagnée sur le verger pour la réalisation des mesures. Merci à eux trois pour le temps qu'ils m'ont accordé, leur écoute et leur partage de connaissances.

Merci à Marie-Odile Bancal, en tant que tutrice de stage, pour avoir réalisé les premières corrections du rapport et m'avoir conseillé sur sa structure.

Je souhaite également remercier l'équipe du laboratoire, Céline, Doriane, Patricia et Sylvie pour m'avoir formé à la préparation des échantillons et pour avoir réalisé les analyses de laboratoire.

Merci à Aline, Emilie et Mathieu qui ont su rendre les journées au bureau plus agréables. Merci également à Aline et Emilie pour les moments en dehors du bureau, me faisant apprécier mon passage par Avignon.

Mes remerciements au personnel de PSH. Merci à chacun.e pour leur gentillesse et leur aide qui ont fait que ce stage a pu se passer dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier les auteur.e.s de sites web en libre accès dédiés au partage de connaissances et de tutoriels sur les analyses de données statistiques.

Ce stage de master a reçu un soutien financier du GIS Fruits. Le rapport de stage sera accessible sur le site du GIS (<https://www.gis-fruits.org/>) et une communication des résultats sera faite lors de séminaires organisés par le GIS Fruits.

Nous tenons aussi à remercier Pascale Guillermin (Enseignante Chercheure à IRHS-AgroCampus Ouest) et Natacha Sautereau (ingénieure à l'ITAB) pour l'intérêt et le soutien qu'elles ont porté à la thématique de ce stage, même si les conditions particulières de l'année ont conduit à moins d'interactions que prévues.

Résumé

Le projet Ecopêche, faisant parti du dispositif DEPHY ECOPHYTO EXPE, vise à concevoir et évaluer des systèmes de vergers de pêcheurs conciliant une forte réduction des produits phytopharmaceutiques (PPP) sans pénalisation des performances de production sur plusieurs sites expérimentaux. L'INRAE d'Avignon gère un dispositif en comparant deux systèmes économes (Eco) en PPP et en intrants à un système de référence (REF) conduit selon les recommandations régionales de la production fruitière intégrée. Les résultats observés depuis 2013 sur le site INRAE Avignon montrent la possibilité de la double performance sur les systèmes économes : forte réduction de pesticides et maintien des performances technico-économiques. Cependant, depuis deux campagnes, la gestion des populations de pucerons devient problématique du fait de l'absence de solutions alternatives efficaces. Des études réalisées en conditions contrôlées ont donné des résultats encourageants pour de nouveaux leviers de régulation des populations de pucerons : le statut azoté des arbres et l'introduction de plantes de service. L'objectif est donc de tester ces leviers et leur interaction en verger. Parallèlement, des méthodes rapides et non destructives pour caractériser le statut azoté des arbres sont testées afin d'ajuster la fertilisation azotée en fonction des besoins réels des arbres et pour pouvoir piloter le levier de régulation des pucerons au cours d'une saison.

Une expérimentation factorielle au sein d'un des deux systèmes économes en PPP a été menée sur le site INRAE Avignon en 2020 pour tester les effets de la combinaison d'une différenciation de la nutrition azotée et l'introduction de menthe poivrée comme plante de service (PdS) sur les populations de pucerons et le fonctionnement des arbres au sein du verger. Le dispositif croise un facteur «PdS» à 2 modalités (témoin avec sol nu sur le rang vs menthe poivrée plantée sur le rang des arbres) et un facteur «Azote» à 4 modalités (0N, 60N, 120N et 180 kg N/ha). Les gammes de réponse des pêcheurs concernant la croissance végétative et la croissance des fruits, le rendement et la qualité des fruits ont été évaluées en fonction des différentes modalités expérimentales. Des mesures non destructives de l'azote foliaire par spectroscopie proche infrarouge et par le chlorophylle-mètre SPAD 502 ont été réalisées afin de construire un modèle de prédiction de la nutrition azotée de l'arbre en les comparant aux mesures de l'azote foliaire total obtenues par dosage en laboratoire. A noter cependant que la mise en œuvre du protocole a été perturbée par l'épidémie liée au Covid-19, surtout sur la période avril à mi-mai 2020.

Les stratégies de réduction des PPP de synthèse au sein des systèmes économes ont été atteints (réduction de plus de 80% des pesticides de synthèse par rapport au système REF). Néanmoins, 2020 est la première année pour laquelle les performances agronomiques des systèmes Eco ont été sensiblement inférieures par rapport au système de référence. Ces baisses de rendements sont en partie dues aux dégâts liés aux infestations de pucerons de l'année précédente mais surtout à des dégâts engendrés par un très fort épisode de gel qui a plus impacté les vergers « économes » du fait de leur position spatiale. De ce fait, les performances technico-économiques mesurées en 2020 ne sont pas représentatives d'un effet « système ». L'expérimentation factorielle n'a pas révélé d'effet de la menthe poivrée ou des niveaux de nutrition azotée sur les populations de pucerons. Les raisons de l'inefficacité de ces leviers pour cette première année d'essai peuvent venir du retard de la plantation de la menthe et de la différenciation des apports azotés par rapport aux premières infestations de pucerons. Les effets de la différenciation des doses d'azote ont été marqués sur les états de nutrition azotée des arbres et sur la croissance des organes végétatifs annuels, particulièrement entre les arbres non fertilisés et ceux ayant reçu 180 kg N/ha. Néanmoins, les rendements n'ont pas été affectés par les états de nutrition azotée notamment suite à une forte variabilité des charges en fruits au sein du dispositif. Les estimations de l'azote foliaire par SPIR ont présenté des corrélations trop faibles avec les mesures de l'azote foliaire total pour obtenir des prédictions de qualité. Une nouvelle campagne de mesures spectroscopiques sur un large gradient de niveaux azotés devrait consolider les prédictions du modèle.

La poursuite de l'expérimentation factorielle la saison prochaine devrait permettre d'évaluer à une échelle bi-annuelle les effets de la nutrition azotée et du développement des menthes sur le statut azoté et le fonctionnement des arbres, la régulation des populations de pucerons et la performance agronomique du verger.

Mots clés : *Prunus persica*, nutrition azotée, croissance végétative, spectroscopie proche infrarouge, pucerons, plantes de service, *Mentha piperita*

Abstract

The Ecopêche project which is part of the DEPHY ECOPHYTO EXPE scheme, aims to design and evaluate peach orchard systems that combine a strong reduction in phytopharmaceutical products (PPP) without penalizing production performance on several experimental sites. The INRAE Avignon includes one of these trials, that compares two economical systems (Eco) in PPP and in inputs with a reference trial (REF) based on regional integrated production standards. The results observed since 2013 on the INRAE Avignon site show the possibility of double performance on Eco systems: strong reduction of pesticides and maintenance of technical-economic performance. However, for the past two campaigns, the management of aphid populations has become problematic due to the lack of effective alternative solutions. Studies carried out under controlled conditions have given encouraging results for new levers to regulate aphid populations: the nitrogen status of trees and the introduction of service plants. The objective is therefore to test these levers and their interaction in orchards. At the same time, rapid and non-destructive methods to characterize the nitrogen status of trees are being tested in order to adjust nitrogen fertilization according to the real needs of the trees and to be able to control the aphid control lever during a season.

A factorial experiment within one of the two PPP saving systems was conducted at the INRAE Avignon site in 2020 to test the effects of the combination of nitrogen nutrition differentiation and the introduction of peppermint as a service plant (PdS) on aphid populations and tree functioning within the orchard. The device crosses a 2-modality "PDS" factor (control with bare soil on the row vs. peppermint planted on the row of trees) and a 4-modality "Nitrogen" factor (0N, 60N, 120N and 180 kg N/ha). Peach tree response ranges for vegetative and fruit growth, yield and fruit quality were evaluated for the different experimental modalities. Non-destructive measurements of foliar nitrogen by near infrared spectroscopy and the SPAD 502 chlorophyll meter were performed in order to build a model for predicting tree nitrogen nutrition by comparing them with the measurements of total foliar nitrogen obtained by laboratory determinations. It should be noted, however, that the implementation of the protocol was disrupted by the Covid-19 epidemic, especially during the period April to mid-May 2020.

The strategies for reducing synthetic PPP within the Eco systems have been achieved (with the aim of 80% reduction of synthetic pesticides compared to the REF system). Nevertheless, 2020 is the first year for which the agronomic performance of Eco systems has been significantly lower than the reference system. These yield reductions are partly due to the damage caused by aphid infestations from the previous year but mainly to damage caused by a very strong frost episode which had a greater impact on Eco systems due to their spatial position. As a result, the technical-economic performances measured in 2020 are not representative of a "system" effect. The factorial experimentation did not reveal any effect of peppermint or nitrogen nutrition levels on aphid populations. The reasons for the ineffectiveness of these levers in this first year of the trial may be due to the delay in planting mint and the differentiation of nitrogen inputs compared to the first aphid infestations. The effects of nitrogen rate differentiation were marked on the nitrogen nutrition status of the trees and on the growth of the annual vegetative organs, particularly between unfertilized trees and those having received 180 kg N/ha. Nevertheless, yields were not affected by the nitrogen nutrition status of the trees, particularly due to the high variability of fruit loads within the system. Foliar N estimates by SPIR correlated too poorly with total foliar N measurements to make quality predictions. A new campaign of spectroscopic measurements over a wide gradient of nitrogen levels should consolidate the model predictions.

The continuation of the factorial experimentation next season should make it possible to evaluate on a bi-annual scale the effects of nitrogen nutrition and mint development on the nitrogen status and functioning of the trees, the regulation of aphid populations and the agronomic performance of the orchard.

Key words: *Prunus persica*, nitrogen nutrition, vegetative growth, near infrared spectroscopy, aphids, service plants, *Mentha piperita*

Table des matières

Résumé.....	4
Introduction	1 - 10
1. Contexte de l'étude : le Projet Ecopêche.....	1
1.1 Présentation de la filière pêche-nectarine.....	1
1.2. Le plan EcoPhyto	1
1.3. Présentation du projet Ecopêche	2
1.4. Résultats du projet Ecopêche 1.....	3
2. Dégâts causés par les pucerons	3
3. Méthodes alternatives de régulation des pucerons.....	5
3.1. Effets de Plantes de Service émettant des Composés Organiques Volatils.....	5
3.2. La conduite de l'arbre : levier par la fertilisation azotée	6
4. Rôle de la nutrition azotée sur l'arbre.....	7
4.1. Effet de la nutrition azotée sur les arbres fruitiers	7
4.2. Méthodes de mesures des concentrations en azote.....	8
5. Hypothèses de recherche.....	9
Matériels et Méthodes	11- 15
1. Essai Ecopêche.....	11
1.1. Indicateurs et analyse des performances des systèmes.....	11
2. Essai factoriel croisant nutrition azotée et plantes de service	12
2.1. Description du dispositif expérimental	12
2.2. Mesures des quantités de nitrates dans le sol et de l'azote foliaire.....	14
2.3. Mesure de l'indice réfractométrique des fruits	15
2.4. Autres mesures du dispositif	15
3. Analyses statistiques.....	15
Résultats	16 - 35
I) Conditions de réalisation de la campagne 2020.....	16
II) Résultats Ecopêche – Performances globales des systèmes.....	17
1. Evolution de la présence de bioagresseurs.....	17
2. Indicateurs physiologiques	17
2.3. Performances environnementales.....	18
2.4. Performances agronomiques.....	19
III) Expérimentation factorielle - fertilisation azotée et plantes de service	21
1. Disponibilité des nitrates au sein du verger	21
1.1. Analyse de la variabilité des quantités de nitrates dans le sol au sein du verger	21

1.2. Quantités de nitrates en fonction des Doses N.....	22
2. État physiologique des arbres	23
2.2. Indicateurs de l'état de nutrition azotée des arbres.....	23
2.3. Indicateurs de la vigueur et de la croissance des arbres	24
2.4. Indicateurs des dynamiques de croissance des fruits	26
3. Effets de l'état de vigueur de l'arbre sur les pucerons	26
4. Effets possibles de la différenciation de FA sur les performances agronomiques.....	27
4.1. Variabilité spatiale des rendements et des Indices réfractométriques.....	27
4.2. Effets de la Fertilisation azotée sur les rendements	28
5. Effets des états de nutrition azotée sur la croissance des arbres, les composantes du rendement et les infestations de pucerons.....	29
5.1. Réponses des indicateurs de croissance des arbres à la nutrition azotée.....	29
5.2. Réponse des niveaux d'infestations de pucerons aux indicateurs de nutrition azotée et de croissance des arbres	30
5.3. Réponses des composantes du rendement aux indicateurs de croissance des arbres.....	31
6. Evaluation des méthodes non destructives de mesures de l'azote foliaire par rapport aux dosages de laboratoire de l'azote total des feuilles.....	32
Discussion	35 - 38
1. Comparaison des systèmes de culture	35
1.1. Performances environnementales.....	35
1.2. Indicateurs de croissance et agronomiques	35
2. Essai factoriel – fertilisation azotée et plantes de service	35
2.1. Différenciation de la FA et statut azoté des arbres	35
2.2. Effets de la PdS sur la disponibilité en azote et les infestations de pucerons	36
2.3. Effet de la nutrition azotée sur les infestations de pucerons	36
2.4. Réponses des indicateurs de croissance des arbres à la nutrition azotée.....	37
2.5. Mesures non destructives du statut azoté des arbres.....	37
2.6. Effets la nutrition azotée et de la croissance végétative sur les indicateurs de production des fruits.....	38
Conclusion	39 - 40
Bibliographie	41 - 43

Liste des figures

Figure 1 : Cycle biologique du puceron vert du pêcher	4
Figure 2 : Méthodes possibles pour contrôler les populations de pucerons en mobilisant les processus de régulations bottom-up et top-down en verger de pêchers.....	5
Figure 3 : Plan du dispositif expérimental sur le S3-Eco2, croisement Doses d'azote et PdS.....	13
Figure 4 : Précipitations et moyennes de Température journalière de février à juillet 2020 à Avignon	16
Figure 5 : Evolution du nombre de rameaux infestés de pucerons par système.....	17
Figure 6 : Evolution des moyennes de longueurs de pousses par système (en cm)	18
Figure 7 : Répartition des IFT par système pour la campagne 2020.....	19
Figure 8 : Evolution des quantités de nitrates (en kg de N-NO ₃) de l'Horizon 1 (0-30cm) par dose N au sein de chaque bloc	21
Figure 9 : Distribution de l'irrigation et de la pluviométrie au sein du système 3-Eco 2	22
Figure 10 : Evolution des quantités de nitrates (en kg de N-NO ₃) par dose N dans les horizons 1 (0-30cm).....	22
Figure 11 : Evolution des teneurs en azote foliaire par dose N.....	23
Figure 12 : Moyenne des teneurs en azote foliaire par dose N le 22/07/2020	23
Figure 13 : Biomasse des gourmands enlevés le 25/06 par dose N (en g de MS).....	24
Figure 14 : Evolution des longueurs de pousses par dose N	25
Figure 15 : Moyenne des différences de longueurs de pousses par dose N	25
Figure 16 : Evolution des surfaces foliaires spécifiques (SLA en cm ² /g) par dose N.....	25
Figure 17 : Evolution du diamètre des fruits pour chaque dose d'azote	26
Figure 18 : Evolution du nombre de rameaux infestés de pucerons par arbre sur le S3 entre le 14/04 et le 03/06	26
Figure 19 : Présence de pucerons cigariers et farineux sur rameaux par dose N le 03/06/20	27
Figure 20 : Comparaison des rendements brut totaux entre rangs	28
Figure 21: Comparaison des indices réfractométriques entre rangs.....	28
Figure 22 : Rendements commercialisables par dose N (t/ha).....	28
Figure 23 : Poids moyen d'un fruit (en g) par dose N.....	28
Figure 24 : Indices réfractométriques moyens par dose N sur l'ensemble des récoltes.....	29
Figure 25 : Régression entre les rendements bruts totaux	29
Figure 26 : Contribution des variables aux principales dimensions de l'ACP.....	30
Figure 27 : Regroupement des variables et individus de l'ACP	30
Figure 28 : Contribution des variables aux principales dimensions de l'ACP.....	31
Figure 29 : Regroupement des variables et individus de l'ACP	31
Figure 30 : Contribution des variables aux principales dimensions de l'ACP.....	32
Figure 31 : Regroupement des variables et individus de l'ACP	32
Figure 32 : Évolution des mesures par SPAD par dose N.....	33
Figure 33 : Régression linéaire des valeurs SPAD du 20/07 en fonction des teneurs en N foliaire (en g/100g MS).....	33
Figure 34 : Régression linéaire entre données obtenues par SPIR et teneurs en azote foliaire mesurées en laboratoire selon un modèle construit avec un lissage des spectres pour 5 dimensions sur l'ensemble des dates de mesures.....	34

Liste des tableaux

Tableau 1: Résumé des effets de niveaux de fertilisation azotée par rapport à une dose optimale d'environ 110-120 kg N/ha sur la croissance végétative et la production de fruits du pêcher.....	8
Tableau 2 : Principaux éléments structurels et objectifs généraux des systèmes du dispositif Ecopêche 1 de l'INRAE d'Avignon	11
Tableau 3 : Synthèse des indicateurs de performance agronomique sur l'essai système Ecopêche pour les années 2019 et 2020 sur les essais systèmes de l'Inrae Avignon	19

Liste des acronymes

ACP : Analyse en composantes principales
COV : Composé organique volatil
Eco : Système économes en produits phytopharmaceutiques
ETP : Évapotranspiration
FA : Fertilisation azotée
IFT : Indice de fréquence de traitement
ITk : Itinéraire technique
N : Azote
PIR : Proche infrarouge
PdS : Plante de service
PSH : Plantes systèmes de culture horticoles
PPP : Produits phytopharmaceutiques
REF : Système de référence
RdD : Règles de décision
RMSE : Root Mean Square Error
SdC : Système de Culture
SPAD : Soil plant analysis development
SPIR : Spectroscopie par Proche Infrarouge

Introduction

1. Contexte de l'étude : le Projet Ecopêche

1.1 Présentation de la filière pêche-nectarine

La production de pêche-nectarine représente la 2^{ème} production de fruits commercialisés en frais en France avec 212 000 t/an en moyenne sur les années 2014-2018 (Agreste 2019 ; Ahmadi 2018).

Le recours aux produits phytopharmaceutiques (PPP) est encore considérable concernant la production de pêches par rapport aux autres fruits à noyaux. L'indice de fréquence de traitement (IFT) de la filière pêche-nectarine était de 23,3 en 2015, en se basant sur l'IFT de référence soit le 70^{ème} percentile des surfaces françaises ayant un IFT inférieur ou égal à ce nombre. Il s'agit d'un des IFT les plus élevés concernant la production de fruits, après l'IFT de référence de la pomme (39,87 en 2015) mais bien supérieurs aux IFT de l'abricot et de la prune avec 14,41 et 12,53 respectivement en 2015 (Agreste 2018).

Les vergers de pêcheurs font l'objet de fortes pressions parasitaires liées à de nombreux bioagresseurs expliquant ces IFT importants. Les maladies de conservation, principalement induites par les monilioses poussent à un recours quasi systématique de fongicides qui sont appliqués sur les fruits avant récolte et pouvant laisser des résidus dans les fruits. Ces maladies peuvent induire des pertes de rendement de l'ordre de 10 à 30 % (Cotte et al, 2009). D'autres maladies comme les cloques, l'oïdium et des ravageurs comme la tordeuse orientale, les pucerons ou les thrips poussent à l'utilisation de produits phytopharmaceutiques (PPP) afin de garantir une production suffisante et des fruits conformes aux normes de commercialisation. Les diverses exigences portées sur la production de pêches induisent le besoin d'une forte productivité par hectare pour assurer la rentabilité de la production mais aussi une qualité sanitaire des fruits irréprochable entraînant une généralisation du recours aux PPP (Plénet et al., 2019 ; Agroscope Occitanie et Agreste 2019).

1.2. Le plan EcoPhyto

Initié en 2008, le plan EcoPhyto 1 visait à réduire de 50 % l'utilisation de PPP dans un délai de 10 ans. Un dispositif phare a été la création du Réseau DEPHY qui a mis en application des stratégies de réduction des PPP tout en essayant de maintenir une performance économique des exploitations. Les essais de conception de systèmes économes en PPP sont menés par un réseau de fermes pilotes et un réseau de stations expérimentales.

Le réseau DEPHY EXPE initié en 2011 a eu pour objectif la mise en place de projets expérimentaux testant des systèmes économes en PPP sur cinq ou six ans. Ces expérimentations sont conduites via des partenariats reliant les institutions engagées dans la recherche agronomique (instituts techniques, chambre d'agriculture, INRAE...) (Réseau DEPHY 2018).

Le suivi du plan est fait par un ensemble d'indicateurs comprenant l'intensité de recours comme avec le nombre de doses unités et l'IFT en produits de synthèse, la quantité de substances actives vendues, le risque d'impact et l'évolution des pratiques (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation 2019). « L'IFT comptabilise le nombre de doses de référence utilisées par unité de surface au cours d'une campagne culturale » (Réseau DEPHY 2018). Il se calcule en se référant à la dose utilisée / dose homologuée d'usage définie par la cible et l'espèce.

Les premiers résultats du réseau DEPHY sur la période 2009-2015 ont confirmé que des réductions de l'utilisation de PPP étaient possibles tout en maintenant des niveaux de production performants. Néanmoins, sur cette même période le recours à ces produits avait augmenté d'environ 5 % au niveau national, montrant que la généralisation du plan à l'ensemble du monde agricole avait été un échec. Le plan EcoPhyto 2 lancé en 2016 a repris les éléments socle du premier plan tel le réseau DEPHY, tout en initiant de nouvelles actions et de nouveaux objectifs. Le principal défi de ce plan consiste à valoriser et déployer à l'échelle nationale les techniques et systèmes économes et performants (SCEP) qui ont été testés chez quelques agriculteurs ou en stations expérimentales (Réseau DEPHY 2018).

1.3. Présentation du projet Ecopêche

Le projet Ecopêche 1 (2013-2018) et le projet Ecopêche 2 (2019-2023) sont portés dans le cadre du réseau DEPHY EXPE. Le projet Ecopêche 1 avait pour objectif de « concevoir et évaluer des vergers de pêche-nectarine conciliant une forte réduction des PPP sans pénalisation des performances technico-économiques » (Plénet et al. 2019). Les objectifs initiaux visaient une réduction de 50% des IFT chimiques et de 30% des intrants (irrigation et d'engrais) Cet objectif était très ambitieux pour l'époque, du fait des nombreuses pressions des bioagresseurs sur la production des fruits et le manque de leviers alternatifs (Plénet et al. 2019).

Pour évaluer les SdC conciliant performances agronomiques, économiques et environnementales, des essais systèmes ont été réalisés sur huit sites grâce à sept partenaires (INRAE PSH, INRAE UERI Gotheron, INRAE Bordeaux, CTIFL, SEFRA, Sud Expé SERFEL et Sud Expé Sica CENTREX). Ces sites sont situés dans les principaux bassins de production et permettent d'expérimenter des SdC variés sous des conditions de milieu et des conduites différentes.

L'expérimentation système s'appuie sur « la formalisation et l'analyse d'un ensemble de Règles de Décision (RdD) qui donnent lieu à des Itinéraires Techniques (ITk) » (Havard et al., 2017). Ainsi, les essais systèmes évaluent la faisabilité technique et la cohérence du système, à savoir l'ensemble des interventions culturales et les résultats techniques de chaque parcelle, chaque année (Réseau DEPHY 2018). Il s'agit aussi de vérifier si l'essai répond aux attentes du pilote et s'il remplit les objectifs attendus en termes de performance sur la réduction des pesticides et sur la production (Ahmadi 2018).

L'itinéraire technique a des répercussions sur le potentiel agronomique des années suivantes mais aussi sur les fonctions écologiques et la production de services écosystémiques. Aussi, les essais systèmes s'étalent sur des périodes de temps long (plusieurs années) afin d'évaluer l'ensemble des effets induits par la combinaison de pratiques du SdC (Havard et al. 2017).

Alors que, les expérimentations factorielles permettent d'étudier l'effet d'un ou de quelques facteurs sur une ou plusieurs variables à expliquer, les essais système comme ceux d'Ecopêche sont plus adaptées pour évaluer la capacité d'un système de culture à satisfaire les objectifs qui lui sont assignés (Havard et al., 2017).

Le projet Ecopêche 2 se positionne dans la continuité des premiers objectifs pour évaluer des performances multicritères sur toute la durée de vie des vergers (6 à 8 années de pleine production). Ce pas de temps long permet de prendre en compte la variabilité du climat et des pressions de bioagresseurs, mais aussi les effets cumulatifs spécifiques aux plantes pérennes (perte de vigueur, dégradation de l'état sanitaire, augmentation possible des auxiliaires avec la baisse des produits phytosanitaires...).

Dans chaque expérimentation, deux ou trois SdC ont été testés, caractérisés par des orientations stratégiques. Chaque dispositif expérimental comprend un système de référence (REF) qui correspond aux préconisations actuelles pour la conduite d'un verger conventionnel dans chacune des régions. La priorité est donnée aux performances agronomiques et technico-économiques dans un mode de production raisonnée.

Les dispositifs comprennent des systèmes économes (ECO) ayant pour objectif de limiter l'impact environnemental tout en essayant de préserver les marges économiques et en assurant la production de fruits de bonne qualité (Plénet et al., 2019).

Les principaux leviers d'action mobilisés dans ces systèmes Eco consistent à intégrer des combinaisons de méthodes alternatives. Des méthodes de prophylaxie visant à atténuer le développement des bioagresseurs ont été déployées. Les régulations biologiques par conservation sont également favorisées par des aménagements structurels du verger via l'insertion d'Infrastructure AgroEcologique (IAE) comme des haies composites ou des bandes fleuries. L'utilisation de produits de biocontrôle est aussi privilégiée pour réduire l'usage de PPP de synthèse. Les traitements sont également déclenchés selon un seuil d'acceptabilité des risques supérieur à celui des vergers en conventionnels (Plénet et al., 2019).

Des indicateurs agro-physiologiques sont calculés à partir de mesures de routine pendant la campagne permettent de réaliser un diagnostic du fonctionnement du verger (Annexe 1). Les indicateurs agronomiques et socio-économiques sont calculés en fin de campagne après les récoltes (Plénet et al., 2019).

1.4. Résultats du projet Ecopêche 1

Les résultats des expérimentations multisites du projet Ecopêche 1 de 2013 à 2018 ont prouvé qu'il « était possible de réduire fortement les IFT hors produits de biocontrôle (-52 % en moyenne) sans trop pénaliser l'état sanitaire des arbres et en maîtrisant les pertes de fruits à la récolte » (Plénet et al., 2019).

Par exemple sur le site d'Avignon, la réduction des PPP sur les systèmes économes a dépassé les objectifs fixés d'une réduction de l'IFT chimique de 50 % par rapport au système de référence. Les IFT chimiques sont passés de 21,2 sur S1 REF à 6,9 et 6,4 sur S2-Eco1 et S3-Eco2 respectivement. Une réduction des intrants (fertilisants et eau d'irrigation) a également été permise (Plénet et Borg 2019). Cette réduction des pesticides a été accompagnée d'un maintien voire d'une amélioration des rendements des systèmes économes. Les rendements commercialisables ont augmenté entre 6 % et 28 % sur les systèmes économes par rapport au système de référence, sur la période 2015-2019. Ces bonnes performances agronomiques accompagnées des économies faites sur les intrants ont entraîné une baisse des coûts de production et par conséquent une augmentation des chiffres d'affaire par ha sur ces systèmes (Plénet et Borg 2019).

Les analyses de la gestion des systèmes montrent que la diminution des produits phytopharmaceutiques substitués par des techniques alternatives permet de contrôler les dégâts causés par les bioagresseurs sans une augmentation accrue des risques. Cependant, des verrous techniques persistent dans le cadre de la gestion de certains bioagresseurs qui peuvent entraîner des dégâts sévères dans des conditions de pressions parasitaires importantes. Ces verrous concernent notamment la gestion de la cloque, des pucerons ou des maladies de conservation. Certaines combinaisons de leviers à effet partiel comme l'utilisation de produits de biocontrôle et les stratégies favorisant les régulations biologiques manquent d'efficacité dans des conditions de développement favorables aux bioagresseurs.

Sur le site d'Avignon, les deux systèmes économes ont été affectés 2018 puis en 2019 par de fortes attaques de pucerons farineux (*Hyalopterus amygdali*) et de pucerons cigariers (*Myzus varians*) (entre 91 et 97% de dégâts en 2019), alors que l'attaque a pu être contrôlée sur le système de référence par l'utilisation d'un insecticide au début de l'infestation en avril.

Ces infestations de pucerons difficiles à contrôler sur les systèmes économes montrent que de nouveaux leviers de lutte contre les bioagresseurs doivent être intégrés dans les stratégies de gestion des systèmes économes en pesticides. De meilleurs critères de prédiction des niveaux de pression parasitaire doivent être développés. D'autre part, l'utilisation de certaines méthodes innovantes en verger pourraient permettre de débloquer ces verrous techniques si leur efficacité venait à être confirmée (Plénet et al., 2019).

Le projet Ecopêche 2 va plus loin dans la réduction des IFT chimiques et des intrants tout en continuant l'analyse des de la multiperformance des vergers à leur stade adulte. Les nouveaux objectifs visent à évaluer la faisabilité d'une réduction d'au moins 75 % des IFT hors produits de biocontrôle sur les systèmes économes. Les règles de décision de l'utilisation de PPP de synthèse sont plus strictes afin d'utiliser ces produits qu'en dernier recours. Enfin l'introduction de nouveaux leviers d'action pourra être testée afin d'évaluer de nouvelles combinaisons de méthodes de lutte alternative contre les bioagresseurs (Ruesch 2018).

L'unité PSH de l'INRAE d'Avignon teste depuis plusieurs années des méthodes alternatives favorisant la régulation du puceron vert du pêcher (*Mysus persicae*). Les effets de Plantes de Service (PdS) émettant des Composés Organiques Volatiles (COV) ou de niveaux différenciés de Fertilisation Azotée (FA) ont notamment été évalués à travers plusieurs expérimentations. Le choix de ces stratégies de régulations « bottom-up » a été fait pour pallier l'absence de résistance végétale ou la plus faible efficacité des autres leviers de protection la comme les régulations biologiques par les ennemis naturels ou par les produits de biocontrôle. Plusieurs résultats semblent encourageants pour une régulation biologique des pucerons dans une stratégie de lutte agroécologique. Les effets de ces méthodes doivent pour autant être vérifiés en conditions réelles des vergers de pêchers.

2. Dégâts causés par les pucerons

Afin d'optimiser l'efficacité des traitements alternatifs contre les infestations de pucerons, il est nécessaire de mieux connaître leur cycle biologique. Ces connaissances sur leurs dynamiques de développement permettent d'adapter les modalités de traitement et d'estimer leur efficacité dans la régulation des populations.

Les pucerons sont considérés comme un des bioagresseurs majeurs du pêcher. Ce sont des insectes piqueurs-suceurs qui peuvent engendrer plusieurs dégâts sur les arbres et leurs fruits. La performance des pucerons est liée à l'accessibilité et à la qualité nutritionnelle de la sève phloémienne. Le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* Sulzer, est une espèce holocyclique dioécique en climat tempéré (fig. 1). Le pêcher constitue l'hôte primaire du puceron qui réalise une majeure partie de son cycle dessus. La reproduction sexuée automnale, l'hivernation sous forme d'œufs et plusieurs cycles de reproduction asexuée au printemps se font sur le pêcher. Les éclosions des fondatrices ont lieu entre mi-janvier et mi-février puis quatre à cinq générations se succèdent produisant des individus aptères puis ailés. Le pic des infestations a généralement lieu en mai. Les conditions favorables à son développement sont notamment liées à une vigueur excessive des arbres, des températures printanières élevées ou des périodes de sécheresse. A la fin du printemps, les virginipares de *M.persicae* migrent vers ses hôtes secondaires herbacés sur lesquels elles passent l'été. Il s'agit d'une espèce de puceron très polyphage, avec plusieurs centaines de plantes hôtes. Les sexupares ailées assurent ensuite la migration vers les pêchers à l'automne où elles donnent naissance aux morphes sexués (Rousselin 2017).

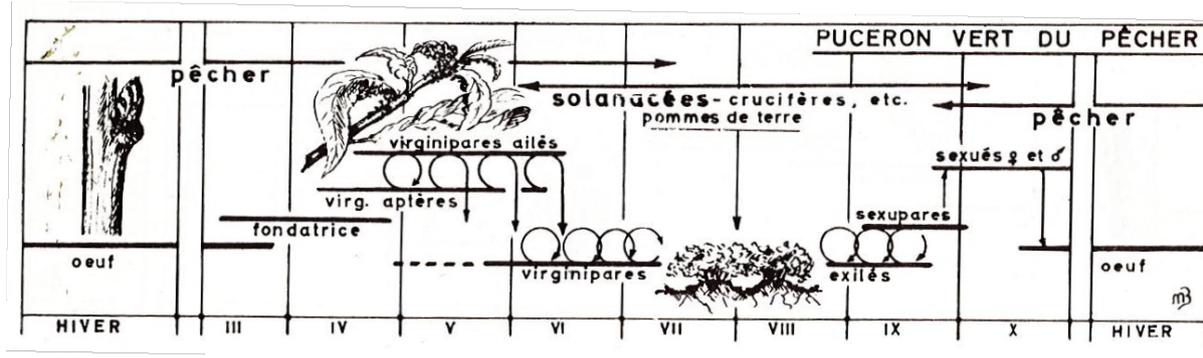


Figure 1 : Cycle biologique du puceron vert du pêcher

Source : Rousselin 2017 depuis (ACTA 1979)

Les pucerons peuvent affecter la vigueur de l'arbre suite aux prises alimentaires de sève phloémienne. Les piqûres peuvent entraîner des déformations d'organes comme des enroulements des feuilles. Les attaques peuvent aussi provoquer des chloroses, le développement d'infestations fongiques sur le miellat (fumagines) ou encore la perte des feuilles. Ces dégâts peuvent réduire les réserves en carbone de l'arbre et affecter son développement sur le long-terme. Les pucerons peuvent également infliger des dégâts sur la qualité des fruits et leurs calibres et réduire la floribondité de l'année suivante. D'autre part, les pucerons sont également vecteurs de virus pouvant affecter les pêchers comme notamment le virus de la sharka (Rousselin et al. 2017 ; Dedryver et al., 2010). La sharka dont le plum pox virus (PPV) est son agent causal, est une maladie virale de quarantaine qui fait l'objet d'une lutte obligatoire. Le virus affecte les fruits et entraîne leur dépréciation, rendant les pêches non commercialisables. La gestion de la maladie se fait par l'arrachage des arbres infectés (Delaygue et al., 2016).

Les pucerons farineux du pêcher (*Hyalopterus amygdali*) réalisent deux à trois générations après les éclosions fin mars. Les pics des infestations sont situés en juin-juillet. Ces pucerons persistent sur les arbres mais peuvent aussi migrer sur des plantes hôtes secondaires comme les roseaux. La majorité de leur cycle est réalisé sur les fruitiers. Leurs dégâts peuvent être aussi considérables que ceux de *M.persicae* bien que ces pucerons ne génèrent pas d'enroulement des feuilles. Peu de produits s'avèrent efficaces pour contrôler les pucerons farineux en mode de production Bio. Les pucerons farineux colonisent la face inférieure des feuilles et peuvent entraîner l'arrêt de la croissance des pousses qui peut être préjudiciable pour l'arbre. Les attaques abondantes sont accompagnées d'une forte production de miellat qui favorise l'apparition de fumagine et provoque la chute précoce des feuilles voire compromet la floraison l'année suivante et affecte les fruits (Chambre d'agriculture Occitanie 2012).

Les pucerons cigariers du pêcher (*Myzus varians*) génèrent moins de dégâts sur les arbres car ces derniers sont mieux contrôlés par les auxiliaires. Ces pucerons provoquent un enroulement du limbe qui peut néanmoins ralentir la croissance des feuilles (Chambre d'agriculture Occitanie 2012).

3. Méthodes alternatives de régulation des pucerons

La conduite de l'arbre peut modifier la croissance de la plante et les dynamiques des pucerons au sein d'un verger ce qui correspond à une régulation bottom-up. Ces régulations sont opposées à celles top-down qui visent à réguler les populations de ravageurs via des niveaux trophiques supérieurs (prédation et parasitisme) (Figure). Rousselin et al. (2017) considèrent que les régulations bottom-up, qui sont moins étudiées dans la littérature, pourraient montrer une efficacité supplémentaire dans le contrôle des infestations de pucerons sur pêchers.

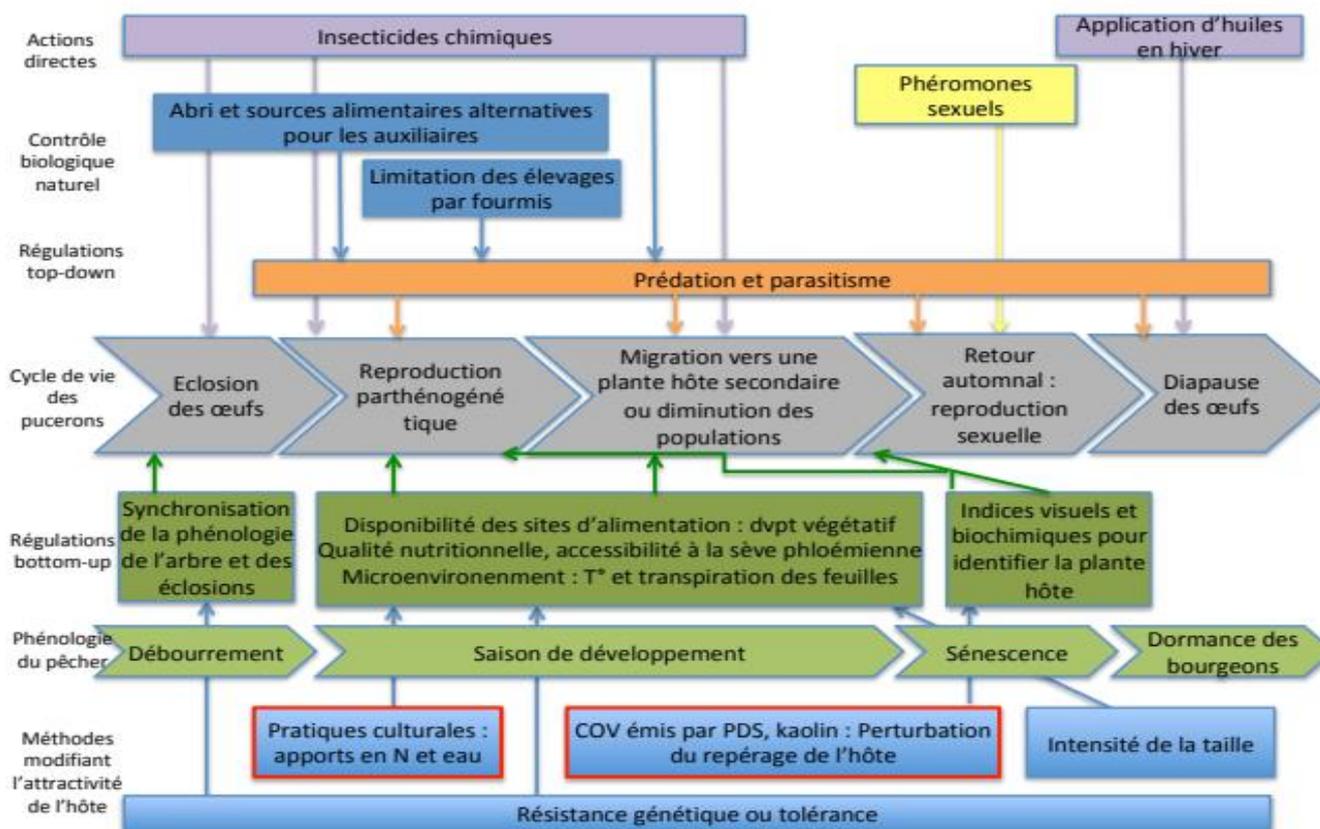


Figure 2 : Méthodes possibles pour contrôler les populations de pucerons en mobilisant les processus de régulations bottom-up et top-down en verger de pêchers

(Les méthodes bottom-up citées dans ce rapport correspondent aux cadres bleus encadrés en rouge. Il s'agit des pratiques culturales avec la fertilisation azotée et l'émission de COV à partir de l'introduction de Pds)

Source : d'après Rousselin 2017

3.1. Effets de Plantes de Service émettant des Composés Organiques Volatils

Des modifications structurelles au sein du verger peuvent apporter des solutions alternatives aux pesticides pour le contrôle des populations de pucerons. L'introduction de plantes de service (PdS) dans les rangs du verger peut notamment introduire des effets de régulation des pucerons via différents mécanismes.

Les composés organiques volatils (COV) sont des métabolites secondaires émis par certaines plantes pour attirer les pollinisateurs ou se défendre. La famille des lamiacées dont fait partie la menthe poivrée (*Mentha piperita*) émet des COV qui peuvent modifier le comportement des pucerons ou la détection des plantes hôtes. Ces COV font notamment partie de la famille des terpènes ou des benzénoïdes (Dardouri 2018).

Les COV émis par des PdS peuvent avoir des effets répulsifs et inhibiteurs des prises alimentaires sur la plante hôte par *M.persicae*. Ces effets inhibiteurs ont pour principe de perturber le comportement alimentaire de *M.persicae*, en réduisant la durée d'ingestion du phloème qui a pour conséquence une baisse de la fécondité (Ben Issa et al., 2017; Dardouri 2018).

Dardouri (2018) a aussi confirmé que les COV émis par le basilic et le tagète en laboratoire perturbent le comportement alimentaire de *M.persicae*. Ces effets n'ont cependant pas été démontré pour la menthe poivrée en pots.

L'expérimentation de Hori (1999) avec l'émission en laboratoire d'Huile Essentielle (HE) de menthe poivrée a montré que les COV émis par les huiles entraînaient une diminution des prises alimentaires due à un effet inhibiteur sur les sens gustatifs et olfactifs des pucerons. Les effets répulsif et inhibiteur des HE de menthe poivrée sur les prises alimentaires ont également été démontrés. D'autres résultats sur les effets répulsifs de menthe ont montré que des extraits de menthe poivrée avaient des effets variables en fonction des conditions sur les élevages de pucerons (Ikeura et al., 2012).

L'efficacité des COV sur la réduction des effectifs de pucerons diminue avec la distance entre la PdS et la plante hôte. Les résultats de Ben Issa et al. (2017) ont montré que l'efficacité de répulsion de PdS entourant des plants de poivrons sous serre est largement réduite à partir de 1,50m.

Les expérimentations intégrant des PdS en vergers sont rares. Des effets répulsifs et inhibiteurs de prises alimentaires ont bien été confirmés pour certaines plantes comme le basilic sur le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*) en verger de pommiers, ce qui encourage l'utilisation de PdS en conditions extérieures. Une expansion spatiale plus faible des colonies de pucerons et un nombre inférieur de feuilles comprenant de fortes abondances de pucerons ont également été observés (Cabrol 2019).

Les PdS peuvent aussi avoir une influence sur la présence d'auxiliaires au sein du verger et sur leur rôle de régulation ce qui reste cependant difficile à évaluer (Cabrol 2019).

Selon Jado et al. (2019), les fleurs de menthe poivrée procurant du nectar favorisent les régulations biologiques de *M.persicae* en conditions de laboratoire par le parasitoïde *Aphidius colemani*. La disponibilité en ressources florales apportées par la menthe entraîne un taux de parasitisme par *A.colemani* supérieur grâce à une augmentation de sa longévité et de sa fécondité potentielle.

Il semble nécessaire de vérifier si la menthe poivrée présente un effet sur les dynamiques de populations de plusieurs espèces de pucerons en conditions extérieures d'un verger de pêchers. D'autre part, l'introduction de PdS dans le rang du verger peut entraîner des effets connexes sur la présence d'auxiliaires, ou sur la consommation en ressources comme l'eau et l'azote aux dépens des arbres. Les effets de l'introduction de PdS au sein du verger sur les régulations des pucerons et sur la multiperformance du verger doivent être mesurés afin d'estimer l'intérêt de ce levier à l'échelle du système de culture.

3.2. La conduite de l'arbre : levier par la fertilisation azotée

Plusieurs études ont montré que l'abondance des pucerons *M.persicae* est reliée au niveau de développement et au taux de croissance du pêcher (Rousselin et al. 2016 ; Jordan et al, 2019). Grechi et al. (2008) ont démontré que la croissance des pousses de pêchers qui peut être augmentée par l'intensité de la taille, est positivement corrélée avec le taux d'infestation de *M.persicae*. D'autre part des restrictions en fertilisation azotée (FA) ont un effet négatif sur les performances d'alimentation de *M.persicae*, principalement via une réduction de la croissance végétative. La sévérité des infestations de pucerons *M.persicae* augmente aussi avec la biomasse foliaire de l'arbre et sa complexité d'architecture du fait d'un nombre de bourgeons en développement plus important (Jordan et al., 2019).

Sauge et al., (2010) ont également montré que les abondances de pucerons *M.persicae* sur pêchers en pots, soumis à différentes doses de fertilisation, étaient maximales pour des concentrations d'azote foliaire intermédiaires (entre 28 et 42 mg.g⁻¹ de MS). Par conséquent, les abondances de pucerons verts du pêcher ne semblent pas suivre des réponses linéaires aux stress abiotiques.

Il semblerait que les abondances de *M.persicae* soient reliées à la quantité des sites d'alimentation qui est augmentée par la fertilisation azotée. La qualité de la sève phloémienne qui peut être modifiée en fonction de la fertilisation semble également impacter les populations de pucerons (Rousselin et al., 2016). Une augmentation de la FA peut modifier la concentration et les profils d'acides aminés de la sève phloémienne et réduire les concentrations en polyphénols, composés de défense, ayant pour conséquence l'augmentation du taux d'infestation *M.persicae* (Jordan et al., 2019). Dans leur expérience, Jordan et al. (2019) ont montré que *M.persicae* préféraient les pousses avec le plus fort taux de croissance probablement car celles-ci reçoivent les plus forts flux de nutriments et d'eau.

D'autre part, dans l'expérience de Rousselin et al. (2016), les infestations des pucerons verts du pêcher étaient supérieures sur les arbres les plus irrigués. Ainsi, des conditions de stress hydrique semblent restreindre les performances de *M.persicae* malgré une vigueur de l'arbre importante caractérisée par un développement végétatif égal par rapport à des conditions sans stress.

Le contrôle de la vigueur de la plante via la fertilisation azotée et l'irrigation peut représenter un levier important dans la gestion des attaques de pucerons. Pour autant, le manque d'études sur d'autres espèces de pucerons ne permet pas de conclure de l'efficacité de ce levier en conditions réelles de vergers.

4. Rôle de la nutrition azotée sur l'arbre

4.1. Effet de la nutrition azotée sur les arbres fruitiers

La nutrition azotée joue un rôle considérable pour le développement et la croissance du pêcher et la qualité des fruits. Les effets de restrictions d'apport azoté sur les arbres doivent donc être analysés afin de mesurer les possibles combinaisons de bénéfices ou antagonismes entre régulation de pucerons et multi-performance du verger.

L'azote est utilisé par les rameaux, les feuilles et les fruits qui agissent comme des organes puits pendant la période de développement végétatif. L'azote est notamment utilisé par ces puits annuels pour la synthèse d'ADN et de protéines et l'activité photosynthétique. L'apport d'azote participe à la vigueur de l'arbre en favorisant sa croissance végétative au printemps et en été. Des apports azotés au cours d'une campagne participent à l'obtention de charge en fruits et d'Indice réfractométrique (IR) supérieurs (Bussi et al., 1992 ; Soing et al., 1998) et à une augmentation du poids des bois de taille par rapport à des arbres ne recevant pas d'apport azoté (Rubio-Covarrubias et al., 2009). Néanmoins, des différenciations apports azotés allant de 72 kg N/ha à 290 kg N/ha n'entraînaient pas de différence significative du rendement des pêchers sur trois ans d'étude (Rubio-Covarrubias et al., 2009).

Les arbres fruitiers disposent d'un pool de réserves azotées endogènes qui est remobilisé l'année n+1. Les feuilles jouent un rôle important en automne dans la constitution des réserves azotées pour l'arbre car 75 à 80 % de l'azote foliaire est restitué aux racines et au tronc avant leur sénescence (Policarpo et al. 2002 ; Rufat et DeJong 2001). Ces réserves en N peuvent être réutilisées au printemps suivant et favoriser la floraison et la fructification (Habib 1983). Muñoz et al. (1993) ont démontré que seulement 7 % de l'azote utilisé pour la croissance des pêchers en pots pendant la floraison venait de l'engrais azoté tandis que le reste provenait des réserves en N dans les organes anciens. Néanmoins, ces réserves en N sont insuffisantes pour maintenir des niveaux de rendements viables (Rufat et DeJong 2000). L'apport d'azote pendant une campagne est consommé par les feuilles puis par les fruits jusqu'à la phase de durcissement du noyau (Policarpo et al., 2012). Pour une variété de pêche tardive comme la « O Henry » cueillie début août, un niveau de FA de 0 kg/ha entraîne une concentration de 2.39% d'azote dans les feuilles soit 31.5% de l'azote total de l'arbre tandis qu'une FA de 200 kg/ha apporté début printemps entraîne un taux de N foliaire de 2.99% en août soit 44% de l'azote total de l'arbre à cette période (Rufat et DeJong 2000). Nii et al. (1993) ont mesuré qu'une non fertilisation azotée pendant deux ans entraînait un niveau d'azote foliaire total de 2,5% et une réduction de la taille des feuilles et donc une diminution de la Surface foliaire spécifique (SLA).

D'autre part, la consommation en N des pêchers est aussi influencée par les conditions climatiques locales et l'accès en eau. Des conditions climatiques favorables augmentent la consommation en N par les arbres (Policarpo et al., 2002).

Des stratégies de réduction et d'optimisation des apports azotés ont été récemment adoptées dans les vergers. Ces stratégies visent à fractionner les doses afin d'optimiser les apports en fonction des besoins des arbres en N. Ces applications plus régulières et moins abondantes permettent de limiter les pertes en nitrates par lessivage et lixiviation dans le sol et limitent les pollutions des eaux de surfaces et souterraines. Des stress modérés en N sont donc souvent pilotés dans les vergers (Jordan 2015). Une fertilisation régulière lors de la phase végétative du pêcher permet de stimuler la croissance des pousses et leur nombre à partir du printemps (Lobit et al. 2001).

Habib (1987) a démontré qu'une limitation de la fourniture en nitrates n'entraîne pas une modification des croissances en matière sèche (MS) des pêchers. Des réductions en ressource azotée peuvent néanmoins affecter la croissance des rameaux secondaire et réduire le taux d'émergence des feuilles et la longueur des entre-nœuds en fonction de la position des rameaux sur les branches principales (Lobit et al., 2001 ; Médiène et al., 2002). De plus, une réduction des doses azotées peut avoir des conséquences négatives sur le développement de

l'arbre au printemps suivant. Une non fertilisation azotée entraîne une réduction de la croissance du diamètre des troncs sur deux ans (Rubio-Covarrubias et al. 2009).

Le niveau de FA impacte directement la croissance de l'arbre, l'intensité de floraison, le nombre de fruits. Le poids des fruits peut être indirectement impacté par des carences en azote qui réduisent le nombre de fruits par arbre faisant augmenter leur taille (Rufat et DeJong 2001). Un niveau sub-optimal de FA n'entraîne pas une amélioration du rendement ni de la qualité des fruits mais peut retarder la maturation des fruits, diminuer les taux de sucres solubles des fruits (Ames et al, 2020), réduire la coloration rouge des fruits (Crisosto et Costa 2008), augmenter l'attractivité des arbres pour les pucerons (Jordan et al., 2019). Des niveaux élevés de fertilisation azotée peuvent également entraîner des pollutions environnementales. De plus, des fruits issus d'arbres ayant des concentrations en N foliaire au-delà de 2.6% étaient plus susceptibles de développer de la moniliose par rapport à des fruits issus d'arbres aux concentrations en N foliaire inférieures à ce seuil (Daane et al., 1995 ; Crisosto et Costa 2008).

Les résultats de Daane et al. (1995) montrent qu'une fertilisation de 112 kg N/ha pour des nectarines « Fantasia » entraînaient des concentrations d'azote foliaire de 3% pour un rendement de 207 kg/arbre et un poids par fruit de 166g. Ces rendements et poids moyen par fruit étaient équivalents à ceux des arbres recevant des niveaux de FA de 196, 200 ou 364 kg/ha. Tandis que l'aspect visuel rouge des fruits pour la dose de 112 kg N/ha était significativement supérieur (80% du fruit) aux doses de FA supérieures. Selon Daane et al. (1995), des teneurs en N foliaire total supérieures à 3% indiquent un excès de FA pour la variété « Fantasia ». Selon Rubio-Covarrubias et al. (2009) les rendements les plus élevés étaient atteints dès une application de 72 kg N/ha pendant trois ans par rapport à une non fertilisation. Des apports de 145 et 290 kg N /ha produisaient des rendements similaires à ceux de la dose de 72 kg N/ha. Le poids moyen par fruit était le plus important pour la dose de 145 kg N/ha.

	Apports azotés faibles	Apports azotés sub-optimaux
Effets sur la croissance végétative	Baisse de l'azote foliaire total (environ 2,4%) Réduction du taux d'émergence des feuilles et de la longueur des entre-nœuds Baisse des dynamiques de croissance végétative sur le long-terme	Augmentation de l'azote foliaire total (+ de 3%) Augmentation des cinétiques de croissance des pousses et de rameaux secondaires (Anticipés) Augmentation de la durée de vie des feuilles et de la biomasse des gourmands
Effets sur la qualité et la production de fruits	Baisse des rendements après 2 ans de non fertilisation	Maturité retardée, baisse des sucres solubles, aspect visuel moins rouge Stagnation des rendements par rapport à une dose optimale Augmentation de la taille des fruits par rapport à une faible dose en N

Tableau 1: Résumé des effets de niveaux de fertilisation azotée par rapport à une dose optimale d'environ 110-120 kg N/ha sur la croissance végétative et la production de fruits du pêcher

4.2. Méthodes de mesures des concentrations en azote

Une utilisation optimale de la F.A. passe d'abord par une évaluation précise des besoins et des carences des végétaux. Synchroniser la disponibilité en N avec les besoins azotés des fruits permet de protéger l'environnement sans sacrifier la production. Plusieurs techniques permettent d'évaluer la détection de carences azotées au sein de la plante. Un des objectifs portés à travers ce stage est de trouver une méthode facile d'usage qui permettent d'estimer le taux d'azote de l'arbre avec précision et de réaliser un suivi dynamique de la nutrition azotée au cours de la saison.

La teneur en azote foliaire est la mesure communément employée pour estimer le niveau de nutrition azotée d'un pêcher à un moment t. Cependant la teneur en N foliaire peut varier en fonction de la position de la feuille dans la canopée, de son âge, du microenvironnement lumineux et la période de la saison. D'autre part, les protocoles d'échantillonnage des feuilles et de mesures de l'azote foliaire en laboratoire demandent du temps et fournissent les résultats postérieurement (Wang et al., 2017).

Les mesures par SPAD (Soil Plant Analysis Development) qui estiment la teneur en chlorophylle des feuilles par une valeur numérique peuvent présenter un intérêt pour évaluer rapidement les niveaux d'azote foliaire des pêchers. Dans leur expérience, Neilsen et al. (1995) ont prouvé qu'il existait une corrélation entre les mesures

par SPAD et les mesures des concentrations en N foliaire sur quatre variétés de pommiers jusqu'à mi-juillet lorsque les absorptions d'azote diminuent ($R^2 = 0,44$ à $0,89$). Rubio-Covarrubias et al. (2009) ont montré des coefficients de détermination (R^2) entre mesures SPAD et les variations de quantités de fertilisation azotée allant de $0,75$ à $0,87$ en fonction des années. La moyenne du niveau de corrélation des mesures SPAD sur trois ans était de $0,80$ contre $0,73$ pour des mesures de l'azote foliaire total (Rubio-Covarrubias et al. 2009). La teneur en chlorophylle des feuilles peut être corrélée à la teneur en N foliaire car les protéines photosynthétiques représentent plus de la moitié de la teneur en azote dans les feuilles. Néanmoins, ces deux méthodes de mesures étaient moins bien corrélées sur les mesures des arbres ayant reçu des apports azotés élevés (290 kg N/ha) reflétant que ces méthodes ne permettent pas d'identifier des excès de nutrition azotée des arbres (Rubio-Covarrubias et al. 2009).

Les mesures de SPAD variaient fortement en fonction des doses d'azote, des variétés, de la date de mesure ce qui ne permet pas d'établir des standards absolus (Neilsen et al., 1995 ; Guénette 2003). Néanmoins, les variations des résultats des mesures par SPAD sont également dues aux variations de l'épaisseur des feuilles faisant augmenter l'estimation de la teneur en chlorophylle (Jifon et al., 2005). Ces variations d'épaisseur dépendent non seulement de l'âge des feuilles mais aussi de leur date d'apparition dans la saison (Neilsen et al., 1995).

Des mesures hyperspectrales des feuilles permettent d'établir des schémas de réflectance qui peuvent être reliés au statut azoté de l'arbre. Les mesures par spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) calculent la lumière réfléchi par la feuille dont le spectre est lié à sa composition chimique (Bastianelli et al. 2010). Ce type de mesures permet également de gagner du temps en réalisant les mesures directement sur le terrain et en fournissant les résultats immédiatement (Gómez-Casero et al. 2007). Néanmoins les mesures par spectromètre en conditions extérieures avec des conditions lumineuses variables et les différentes méthodes de régression peuvent entraîner des biais d'analyse (Wang et al., 2017).

Gómez-Casero et al. (2007) ont démontré que les courbes de réflectance de feuilles d'olivier dans les longueurs d'onde du Proche Infrarouge de 710 à 900 nm permettaient d'établir des estimations de nutrition azotée précises à $99,2 \%$. Cette corrélation semble être liée aux variations de concentrations chlorophylliennes foliaires induites par les doses de fertilisation azotée qui ont été réalisées sur une période de plus de dix ans. Ces analyses de la réflectance de la végétation sont possibles grâce à des contrastes entre les différentes longueurs d'ondes dans le PIR et le Rouge (Rouse et al., 1974 ; Elmore et al., 2000).

Wang et al. (2017) ont calculé que des mesures spectroscopiques de terrain des réflectances de feuilles de poiriers permettaient une bonne estimation des concentrations en N foliaire en mai par rapport à juin marquant le début des phases reproductives. La région spectrale du PIR a été identifiée comme la plus corrélée à l'estimation des niveaux d'azote. Une régression partielle des moindres carrés (PLSR) fournissait les meilleures estimations de concentration de N foliaires avec un $R^2 > 0,85$.

5. Hypothèses de recherche

Les effets de différenciations de la fertilisation azotée et de l'introduction de menthe poivrée comme PdS sur la régulation de plusieurs espèces de pucerons autre que *Myzus persicae* à l'échelle d'un système ont été peu étudiés jusqu'à présent. De plus, les effets de la combinaison de ces deux leviers sur la régulation des populations de pucerons doivent être évalués. L'introduction de ces leviers peut aussi avoir un impact sur les performances d'un système économe en intrants et en pesticides.

Avant que la période de confinement liée à l'épidémie de Covid-19 ne vienne perturber le déroulement de l'expérimentation, les objectifs de cette expérimentation visaient à répondre à une problématique centrale : Quelle est le meilleur compromis entre modification de la fertilisation azotée et introduction de PdS afin de réduire les infestations de pucerons en verger de pêcheurs tout en maintenant un niveau de performances maximal ?

Cette problématique soulevait les questions suivantes : (i) la différenciation de la FA en verger entraîne-t-elle différentes dynamiques de populations de pucerons et une différenciation des dégâts ? (ii) L'introduction de menthe poivrée dans le verger émettant des COV entraîne-t-elle une diminution des infestations de pucerons ? (iii) la combinaison de ces deux leviers favorise-t-elle un meilleur contrôle des populations de pucerons ? (iv) cette combinaison de leviers impacte-t-elle les performances agronomiques, environnementales du verger ? Existe-il un compromis entre fertilisation azotée, insertion de PdS, régulation de pucerons et performances des vergers ?

Cependant, la période de confinement a retardé le repiquage de la menthe poivrée au sein du verger. Initialement prévu début avril, le repiquage a été réalisé entre le 18 et le 20/05. La menthe était alors peu développée les mois d'été, limitant l'émission de COV. Tandis que des colonies de pucerons étaient déjà installées sur les arbres à partir d'avril. Les effets des COV sur les pucerons ainsi que les effets de la compétition de la menthe sur l'arbre ont été fortement réduits. Cette évolution des conditions de l'expérimentation a amené à adapter la problématique testée. Ainsi, les objectifs expérimentaux ont davantage été axés sur le levier azote.

Suite aux épisodes de gel ayant eus lieu fin mars, la charge en fruits a été négativement affectée. Les dégâts du gel sur la charge en fruits des arbres étant très hétérogène au sein du verger et entre les systèmes, les objectifs de rendement ne seront pas pris en compte dans les comparaisons des performances des systèmes.

Les nouveaux objectifs de l'expérimentation visent à évaluer les gammes de réponse du pêcher à différentes quantités de doses d'azote au cours du temps.

Il s'agit en particulier de caractériser les effets de la différenciation des niveaux d'azote sur la vigueur des arbres et sur la croissance des fruits et d'évaluer si ces effets peuvent indirectement impacter l'incidence de pucerons en verger.

D'autre part, des méthodes de mesures des teneurs en azote des arbres seront comparées afin d'évaluer la fiabilité des mesures de terrain non destructives par rapport à celles de laboratoire. Cette comparaison vise à vérifier la corrélation entre mesures spectrales de réflectance de feuilles et SPAD et analyses en laboratoire de la teneur en azote total des feuilles suite à plusieurs dates de prélèvement.

Résumé des principaux objectifs de l'expérimentation

Expérimentation système :

- Evaluer les performances environnementales et agronomiques des SdC Economes en intrants par rapport au SdC de Référence

Expérimentation factorielle :

- Mesurer les effets de la différenciation de fertilisation azotée (FA) sur les dynamiques d'absorption d'azote, de croissance des arbres et sur les performances de production du pêcher
- Evaluer l'effet de la différenciation de FA et de l'introduction de PdS sur les niveaux d'infestation de pucerons par arbre
- Evaluer la fiabilité de l'estimation des statuts azotés des arbres entre plusieurs méthodes non destructives par rapport aux teneurs en azote foliaire mesurées par dosages en laboratoire

Matériels et Méthodes

1. Essai Ecopêche

Le verger de l'essai Ecopêche de l'INRAE du Domaine St-Paul d'Avignon a été planté en 2013 avec la variété commerciale NECTASWEET Nectarlove (cov). L'essai comprend trois parcelles dont chacune correspond à un système. Le S1-Ref correspond au système de référence. Le S2-Eco1 et le S3-Eco2 sont les deux systèmes économes faisant l'objet des stratégies de réduction des produits phytopharmaceutiques (objectif de -50% des IFT chimique) et des intrants (-20 à -30% d'irrigation et de fertilisation).

Ces deux systèmes se distinguent principalement par la densité de plantation des arbres qui passe de 571 arbres/ha à 909 arbres/ha entre le S2 et le S3 et par une taille en simple Y sur le S3 (tableau 2). Les règles de décisions et les leviers pratiqués varient également entre les systèmes.

	S1 : REFérence (Raisonné)	S2 : ECONome 1 Forme en volume	S3 : ECONome 2 Forme haie fruitière
Orientations stratégiques : production, qualité, environnement,...	Intensification raisonnée : haut rendement, bonne qualité commerciale, temps de travail maîtrisé	Minimisation des pertes économiques, haute qualité gustative, réduction utilisation intrants eau et N	Minimisation des pertes économiques, haute qualité gustative, réduction utilisation intrants eau et N Entrée rapide en prod.
Variété porte-greffe	Nectarlove GF 677	Nectarlove GF 677	Nectarlove GF 677
Forme des arbres	Double Y	Double Y aéré	Simple Y oblique
Densité (arbres/ha)	571	571	909
Infrastructures agro-écologiques (IAE)	Haie de cyprès + gazon	Haie composite + gazon + bandes fleuries	Haie composite + gazon + bandes fleuries
Système d'irrigation	Micro-jets au sol	Goutte à goutte enterré	Goutte à goutte enterré
Entretien du sol sur le rang	Désherbage chimique	Paillage avec bâche horticole	Paillage avec bâche horticole

Tableau 2 : Principaux éléments structurels et objectifs généraux des systèmes du dispositif Ecopêche 1 de l'INRAE d'Avignon

Source : Auvinet 2016

Les résultats sur la période de production de fruits de 2015 à 2019 ont montré que les IFT hors produit de biocontrôle avaient diminué de 67 et 70% sur les systèmes S2-Eco1 et S3-Eco2 par rapport au système S1-REF, tout en maintenant des rendements corrects.

Les autres intrants (fertilisation et irrigation) ont également été diminués sur les deux systèmes économes. Ces résultats ont dépassé l'objectif de réduction des IFT de 50 % et ont presque atteint celui de réduction de 30 % de l'irrigation et de la fertilisation.

Le système S3-Eco2 a bénéficié d'une montée en production plus rapide sur les premières années par rapport aux autres systèmes grâce à l'effet densité de plantation. Ainsi, le système S3-Eco2 a montré de meilleures performances agronomique et économique sur Ecopêche. Néanmoins, ces performances se sont estompées en 2019 suite à l'attaque de pucerons farineux et cigariers mais également du fait que les arbres, entrés en pleine production depuis 2017, sont aujourd'hui en compétition par l'augmentation de la densité (Plénet et Borg 2019).

En 2019, les essais systèmes d'Avignon ont été poursuivis selon les nouveaux objectifs définis dans Ecopêche 2, avec en particulier l'objectif de ne plus utiliser d'insecticides de synthèse même en dernier recours. Les stratégies visant une forte réduction des IFT ont assuré un niveau correct de protection sanitaire du verger contre les bioagresseurs excepté pour les pucerons.

1.1. Indicateurs et analyse des performances des systèmes

Les performances de chaque système sont évaluées selon différents indicateurs sélectionnés en fonction des objectifs retenus par système. Ces indicateurs visent à analyser l'intensité d'utilisation des intrants et d'évaluer les performances des systèmes en caractérisant leur fonctionnement agronomique, la productivité, la qualité des fruits ou les résultats technico-économiques (Plénet et al., 2019) (Annexe 1).

Les mesures permettant de calculer les indicateurs sont réalisées en routine depuis 2014 sur 12 arbres par système. Le système S3-Eco2 qui a fait l'objet de l'expérimentation factorielle bénéficie de nouvelles mesures afin de calculer les indicateurs en fonction des nouveaux objectifs retenus. Les mesures de routines ont été maintenues sur ce système selon les mêmes modalités que le S2-Eco afin de continuer les comparaisons des essais systèmes à partir des mêmes indicateurs (arbre ayant reçu les niveaux de fertilisation de 120 kg N/ha notamment) (Annexe 2).

2. Essai factoriel croisant nutrition azotée et plantes de service

2.1. Description du dispositif expérimental

Afin de mesurer les effets de deux leviers testés (Différenciation de la fertilisation azotée et insertion de PdS), une expérimentation factorielle a été mise en place au sein du système S3-Eco2. Ce type d'expérimentation permet d'étudier l'effet d'un ou de quelques facteurs sur une ou plusieurs variables à expliquer, comme la croissance végétative ou le rendement.

Le système S3-Eco2 se différencie de l'autre système économe par sa densité d'arbres plus élevée avec 909 arbres/ha avec des distances de plantation de 5x2,20m. La parcelle est composée de 6 rangs de 15 à 16 arbres. Le pilotage de l'irrigation est calculé par bilan hydrique complété par les informations fournies par des capteurs d'humidité du sol (sonde TDR - time domain reflectometer) et des mesures de potentiel hydrique des tiges ; l'objectif est d'apporter une irrigation de -10 à -20% du bilan hydrique (kc.ETP – Pluie). La charge en fruits visée était de 380 fruits/arbre (soit un objectif de rendement compris entre 55 à 60 T/ha).

Les traitements contre les infestations de pucerons sont passés par l'utilisation à deux reprises d'un produit de biocontrôle (huile blanche) au stade hivernant. Une impasse de traitement a ensuite été faite afin de favoriser les régulations spontanées par les auxiliaires.

L'essai factoriel comprend deux facteurs étudiés. Le facteur « Plante de Service » a deux modalités : témoin (sol nu) et menthe poivrée plantée sous le rang des arbres. Le facteur « Fertilisation Azotée » comprend quatre niveaux : 0N, 60N, 120N et 180N (en kg N/ha) Les apports de nitrate de calcium ont été effectués à partir de mi-avril 2020. Ils ont été fractionnés en cinq doses à une fréquence de 20 jours entre les doses. Ils ont été réalisés le 17/04 - le 07/05 - le 27/05 - le 17/06 - le 07/07. Lorsqu'une date d'un apport correspond à celle d'un prélèvement de sol, l'apport d'engrais a été réalisé après le prélèvement. La quantité de nitrate de calcium apportée pour chaque date était de 0.0 kg par placette pour la dose 0N, 0.568 kg pour la dose 60N, 1,135 kg pour 120 N, 1.703 kg pour la dose 180N.

La disposition des placettes a été faite de manière aléatoire au sein des blocs expérimentaux constitués par les rangs des arbres. Une analyse statistique préliminaire sur l'indicateur de croissance des sections des troncs des arbres mesurées lors de l'hiver 2020 a été réalisée afin de vérifier que la répartition des placettes n'entraîne pas de biais initial concernant l'état de croissance des arbres. C'est aussi un bon indicateur de l'homogénéité ou non du sol au sein de la parcelle car la section des troncs reflète la vigueur cumulée des arbres depuis la plantation et donc les effets possibles d'une hétérogénéité spatiale liée au sol et au microclimat au sein de la parcelle. Chaque modalité (placette) est répétée trois fois au sein du système (fig. 3).

Le facteur fertilisation azotée a été réparti par placette de quatre arbres. Chaque rang est constitué de quatre placettes comprenant chacune une dose d'azote différente. Un facteur bloc a été introduit afin de contrôler l'effet d'un rang, notamment des rangs de bordure (la dimension de la parcelle obligeait d'utiliser les rangs de bordure pour installer le dispositif). Un bloc comprend un rang Témoin et son opposé avec PdS. Ainsi le bloc 1 comprend les rangs 1 et 6, le B2 les rangs 2 et 5 et le B3 les rangs 3 et 4.

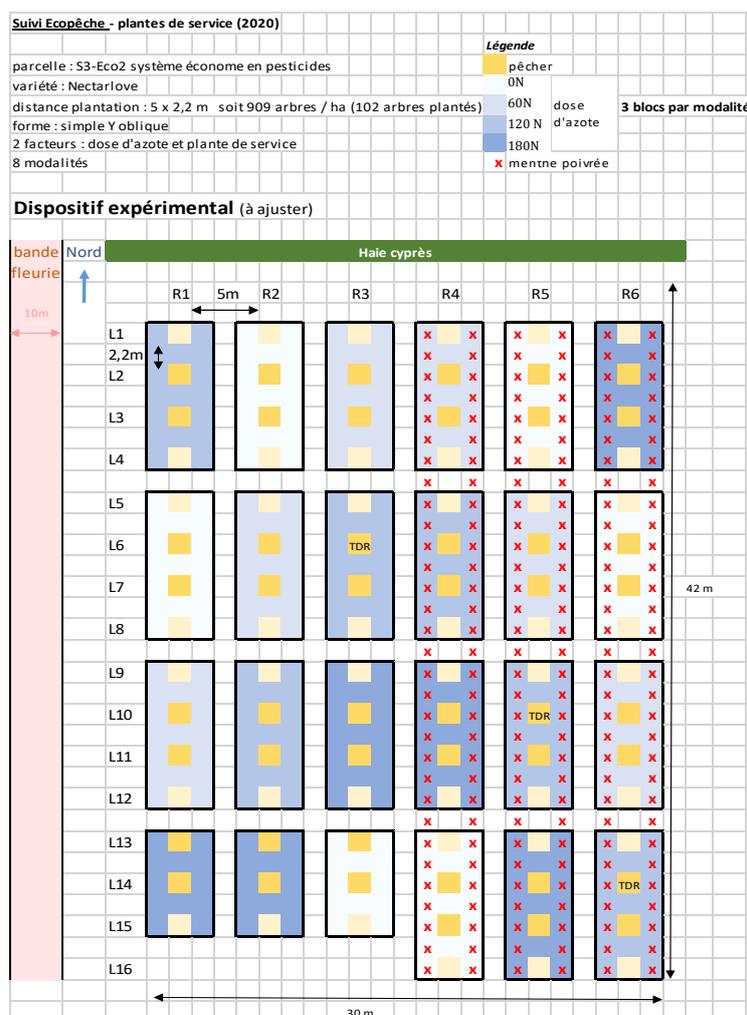


Figure 3 : Plan du dispositif expérimental sur le S3-Eco2, croisement Doses d'azote et PdS
 Source : Plénet et Borg, document interne

Les observations des pucerons ont été réalisées à partir des premières infestations début mars sur 10 rameaux mixtes aléatoires sur les deux arbres centraux de chaque placette. Le nombre de rameaux infestés par arbre était retenu (un rameau mixte porte des feuilles et fruits).

Les pieds de menthe achetés en pépinière ont été repiqués sur trois rangs consécutifs (R4 à R6) du système 3 entre le 18 et le 20/05/2020. La menthe a été plantée à une densité de 11 pieds au m² autour des arbres. Lors du repiquage les plants étant inférieurs à 10 cm de longueur, ces derniers se sont développés lors de la saison. La plantation de ces plants sur le rang permet une proximité directe aux pêcheurs. Les menthes ont été repiqués sur des rangs voisins pour entraîner un effet répulsif regroupé par bloc sur les pucerons afin de pouvoir analyser le paysage olfactif lié au COV au sein du verger si nécessaire. Les plants devraient à terme recouvrir le rang en se multipliant par reproduction végétative via leurs stolons.

Le type d'arrosage des arbres a été modifié, passant d'irrigation par goutte à goutte de surface à une irrigation par micro-asperseurs sur le rang afin d'irriguer les menthes sur l'ensemble du rang. Cette modification du système d'irrigation a aussi été réalisée sur le Témoin sol nu pour ne pas inclure de biais lié au système d'irrigation.

Le choix de la menthe poivrée (*Mentha piperita*) comme plante de service a été décidé à partir de différents critères. La menthe poivrée a été sélectionnée comme PdS car ses huiles essentielles ont montré un effet répulsif en conditions contrôlées (Hori 1999b ; Ikeura et al, 2012b). Néanmoins, l'effet répulsif des COV émis par la plante entière sur *M.persicae* n'a pas été confirmé (Dardouri 2018).

De plus, la menthe poivrée est une plante pérenne, elle se maintient quatre à cinq ans en conditions de culture en verger, ce qui en facilite la gestion par rapport à des plantes annuelles. D'autre part, la menthe poivrée a des exigences en azote importantes pour un niveau de croissance maximal, avec des niveaux de fertilisation

optimaux pour 150 kg N.ha^{-1} , ce qui permettrait d'identifier plus facilement les effets de compétition azotée avec les pêchers à partir d'un certain niveau de réduction de la fertilisation.

De plus, des variations des niveaux de FA ne semblent pas modifier la composition d'HE de menthe poivrée (Clark et Menary 1980 ; Piccaglia et Marotti 1993). L'hypothèse émise est qu'une variation des doses azotées n'aurait pas de conséquence sur l'émission de COV par la menthe poivrée. La menthe a également des besoins en eau réguliers, ce qui serait compatible avec la conduite du verger.

La menthe poivrée présente plusieurs fonctions supplémentaires à l'émission de COV qui devraient être évalués au cours des prochaines campagnes. La PdS devrait couvrir le sol et permettrait de réduire le développement d'adventices sur le rang. La menthe poivrée peut présenter un autre service en augmentant le nombre d'auxiliaires dans le verger, ce qui pourrait favoriser les régulations biologiques des pucerons et d'autres bioagresseurs (Jado et al., 2019).

D'autre part, la menthe poivrée pourrait faire l'objet d'une valorisation commerciale ce qui représenterait un service supplémentaire pour les producteurs adoptant cette pratique.

2.2. Mesures des quantités de nitrates dans le sol et de l'azote foliaire

Les quantités de nitrates (N-NO_3) dans le sol ont été mesurées suite à des prélèvements de sol réalisés tous les 20 jours. Les apports d'engrais ont souvent été réalisés à la suite des prélèvements de sol. Un premier carottage était réalisé au sein de l'horizon 0-30 cm sur le rang de chaque placette sur le S3. Un deuxième échantillon sur l'horizon 30-60 cm était réalisé sur le S1-Ref et sur les doses 120N du S3-Eco2. Un mélange de trois carottes était réalisé pour faire un échantillon sur le S1-Ref. Deux carottes étaient réalisées pour un échantillon par placette sur le S3-Eco. La quantité en nitrates des échantillons était mesurée à l'aide de l'appareil Nitrachek 404 qui fonctionne par réflectométrie (Agroressources 2019). 50g de terre fraîche tamisée des échantillons était mélangée à 100 ml d'eau déminéralisée. Les flacons étaient laissés à décanter à 4°C pendant deux jours. Les concentrations en nitrates étaient pour être ensuite mesurées au Nitrachek dans le surnageant.

L'état de nutrition azotée de l'arbre a été évalué à l'aide de plusieurs méthodes. Les teneurs en azote total et en carbone foliaires ont été mesurés au laboratoire par un analyseur élémentaire selon la méthode de Dumas (Labomoderne 2012).

La teneur en azote foliaire a également été estimée par des mesures de terrain non destructives. Le SPAD 502 Minolta mesure la teneur en chlorophylle des feuilles par réflectance dans les longueurs d'onde entre 650 et 940nm (rouge et infrarouge) (Guénette 2003). Le SPAD fournit des valeurs sans unité qui augmentent proportionnellement au taux de chlorophylle (Westcott et Wraith 1995). Une relation entre la teneur en chlorophylle et la teneur en azote foliaire peut ensuite être calculée. Le SPAD constitue une méthode d'estimation rapide et facile d'utilisation.

Les mesures par spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR) ont été réalisées sur le terrain à l'aide du spectromètre MATRIX-F de la marque *Bruker*. Le spectromètre mesure le rayonnement réfléchi et émis par les feuilles pour des longueurs d'onde de 350 à 2500 nm. La mesure de la réflexion pour une longueur d'onde est directement liée à l'absorption à cette même fréquence. Les spectres sont affichés à l'aide du logiciel OPUS et sont ensuite convertis en données utilisables sur RStudio.

Des analyses sont ensuite réalisées pour étudier les corrélations entre les spectres de réflectance et les teneurs en azote foliaire. Des classifications hiérarchiques ascendantes ont été réalisées pour identifier les regroupements de spectres au sein du système.

Les mesures spectroscopiques et par SPAD ont été réalisées environ tous les 15 jours à partir du 22 mai jusqu'au 20 juillet. Dix feuilles étaient récoltées sur les deux arbres centraux de chaque placette et immédiatement passées sous le SPIR. Une placette regroupe deux spectres par date qui ont été mesurés sur cinq feuilles d'un premier arbre central puis sur 5 feuilles du deuxième arbre. Les feuilles étaient sélectionnées sur le centre de rameaux mixtes tous orientés à l'Est. Les mesures de teneur en chlorophylle par SPAD étaient ensuite réalisées sur les mêmes feuilles utilisées pour les mesures de spectres.

Les mesures de surface foliaire et de pesées des échantillons de feuilles (masse fraîche et masse sèche après étuve à 80°C) étaient ensuite réalisées en laboratoire. La SLA (Specific Leaf Area) et la masse surfacique des feuilles étaient ensuite calculées suite aux données mesurées. Les échantillons de feuilles ont été séchés puis

broyés afin d'analyser les teneurs en C et N des feuilles en laboratoire par la méthode de Dumas.

2.3. Mesure de l'indice réfractométrique des fruits

L'IR des fruits fait référence à la mesure des degrés Brix qui correspond à la teneur en sucres solubles des fruits. L'IR est mesuré à partir d'un réfractomètre digital qui détermine l'indice de réfraction de la lumière à partir du jus de pêche (Plénet et al., 2019). Deux mesures par fruit étaient réalisées, si la différence entre deux mesures excédait 1% de Brix, une troisième mesure était réalisée. Les degrés Brix étaient mesurés pour trois fruits par calibre pour chaque calibre disponible par placette et à chaque cueille.

2.4. Autres mesures du dispositif

L'ensemble des autres mesures réalisées sur les deux arbres centraux des placettes afin de caractériser les dynamiques de croissance de l'arbre, les statuts azotés et hydriques des arbres et du sol, le rendement et la qualité des fruits, les infestations de pucerons et autres bioagresseurs sont répertoriées en Annexe 2.

3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R Studio.

Une analyse de la normalité de distribution était d'abord réalisée à l'aide du test de Shapiro-Wilk et de l'étude des graphes vérifiant les hypothèses de validité de la normalité des résidus. Les données étaient transformées pour corriger les distributions non normales. L'analyse des variances était ensuite réalisée. Une différence significative était acceptée sous le seuil alpha de 0,05 d'erreur admise. Si les données suivaient une loi normale, les analyses de variances entre modalités étaient d'abord comparées par le test de Student puis comparées deux à deux à l'aide du test *post-hoc* de Tukey.

Si la normalité des résidus n'était pas vérifiée ou que l'échantillon était trop faible ($n < 30$), le test de Kruskal-Wallis était utilisé pour étudier les différences entre modalités. Les analyses de variances entre modalités étaient comparées deux à deux à l'aide du test de Wilcoxon.

Les analyses multivariées ont été réalisées par analyses en composantes principales (ACP) à partir des moyennes des mesures pour chaque placette du S3-Eco2.

Les analyses des spectres de réflectance des feuilles combinent une Anova et une ACP permettant de créer des sous-groupe en fonction des dates de mesures et du facteur dose N. Des classifications ascendantes hiérarchiques ont ensuite été représentées afin d'identifier les regroupements de spectres.

Résultats

I) Conditions de réalisation de la campagne 2020

Conditions climatiques

Le stade floraison (50% des fleurs ouvertes sur 12 arbres par système) a été atteint le 08/03/20 sur les trois systèmes.

La campagne 2020 a été marquée par des conditions climatiques hivernales douces (9,5 de température moyenne entre janvier et mars contre 7,8°C pour la moyenne des années 1981 à 2010 à Avignon) (Source INRAE AgroClim). La nuit du 24 au 25 mars a été marquée par une gelée d'une forte intensité débutant vers minuit et atteignant une température de -3°C à 5h. Le gel a fortement affecté le taux de nouaison sur les systèmes Ecopêche. Néanmoins, l'intensité des dégâts s'avère très hétérogène au sein des systèmes. Les arbres les plus à l'abri du vent ont été les plus affectés. Ainsi, le S2-Eco1 et une partie du S3-Eco2 qui ont les zones les plus protégées du vent par les haies composites ont été les plus touchés. Les pertes de rendements ont été estimées à près de 50% sur S1-REF mais de 70 à 90% en fonction des arbres sur les systèmes Eco. Cependant, aucune mesure des taux de nouaison par système n'a pu être réalisée cette année, notamment à cause du confinement qui a limité les observations réalisables au mois d'avril.

Le printemps et le début de l'été ont été marqués par des températures relativement chaudes (20,2°C en température moyenne entre avril et juillet contre 19°C sur la période de 1981 à 2010).

Le bilan hydrique entre janvier et juillet a été nettement déficitaire (-610 mm entre janvier et juillet 2020, contre -414mm sur la même période pour la moyenne des années de 1981 à 2010). Une faible pluviométrie est à l'origine de ce déficit hydrique.

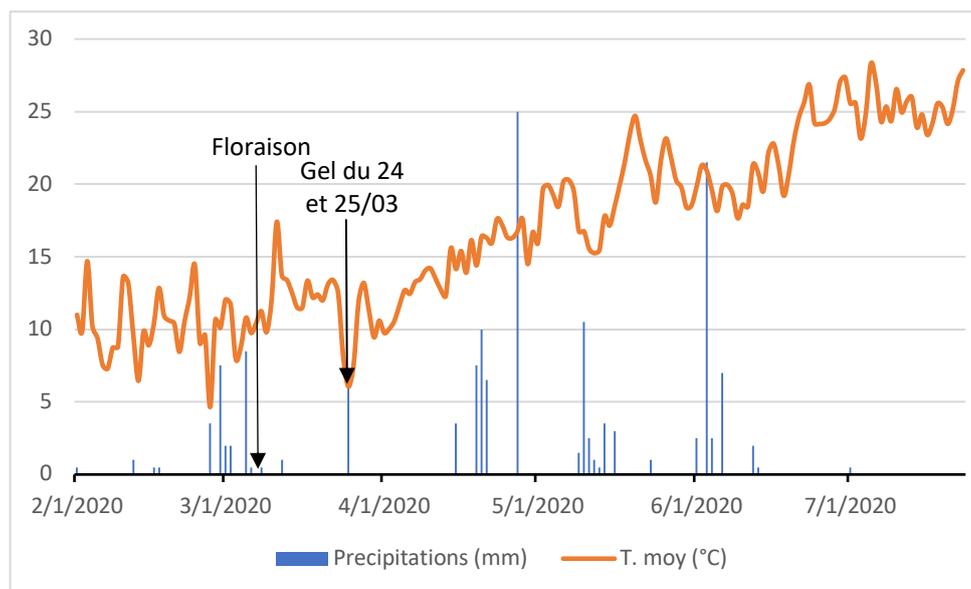


Figure 4 : Précipitations et moyennes de Température journalière de février à juillet 2020 à Avignon

Itinéraires techniques

Certaines interventions de protection du verger ont été impactées par les mesures prises à la suite du confinement dans le cadre de l'épidémie de la Covid-19. L'approvisionnement de certains produits pendant le confinement a été impossible et a eu comme conséquences la réalisation d'impasses pour quelques interventions. Les produits de confusion sexuelle pour contrôler la reproduction des tordeuses orientales du pêcher n'ont pas été disponibles ce qui a rendu compliqué la maîtrise de la tordeuse lors de cette saison du fait de l'efficacité modérée des produits de biocontrôle sur les systèmes Eco. Le manque de disponibilité du produit de biocontrôle (BNA Pro, lait de chaux) pour lutter contre la cloque n'a permis qu'une intervention complétée de micro-doses de cuivre lors de la période de floraison. Ceci s'est avéré insuffisant et les systèmes économes ont été impactés par une assez forte attaque de cloque nécessitant ensuite des passages avec du soufre pour éviter la multiplication des contaminations secondaires (le soufre ayant une action de dessiccation des foyers).

II) Résultats Ecopêche – Performances globales des systèmes

1. Evolution de la présence de bioagresseurs

La stratégie classique de contrôle des pucerons sur le S1-REF a été efficace avec aucune infestation notée sur la campagne 2020. Cette stratégie passe par deux interventions insecticides, une avant la floraison contre les fondatrices et l'autre un mois et demi après, lorsque les premiers foyers commencent à s'installer.

Sur les systèmes Eco, le traitement insecticide avant floraison a été substitué par deux interventions utilisant de l'huile blanche qui est un produit de biocontrôle. Aucune intervention en curatif n'a ensuite été réalisée.

Les premières infestations ont débuté à partir d'avril avec l'installation de pucerons noirs (*Brachycaudus persicae*) plus prononcées sur le S3-Eco2 (fig. 5). Des foyers de pucerons cigariers (*Myzus varians*) sont ensuite apparus dès fin avril mais avec une pression faible. Des infestations de pucerons farineux (*Hyalopterus amygdali*) ont entraîné un nouveau pic mi-juin sur les deux systèmes Eco avec environ 2 rameaux sur 10 touchés par arbre (observation de 10 rameaux par arbre choisis aléatoirement à chaque date).

Excepté sur quelques arbres de bordures, les infestations ont été beaucoup moins sévères par rapport à 2019 où plus de 9 rameaux étaient touchés par arbre lors des pics d'infestations sur les deux systèmes Eco.

Les infestations de tordeuses orientales (TOP) du pêcher ont également été supérieures sur les systèmes économes. Les moyennes des incidences de TOP sur 10 rameaux aléatoires à chaque date de mesures indiquent des différences significatives entre les systèmes Eco et le S1-REF, avec la moyenne la plus forte sur le S2-Eco1 (2,56 rameaux touchés sur 10 sur l'ensemble des dates, contre 1,79 rameaux touchés sur le S3-Eco2 et 1,51 rameaux touchés sur le S1 REF ; Wilcoxon test S1-S2 : $P = 2,1 \times 10^{-14}$; S1-S3 : $P = 0,1$; S2-S3 : $P = 1,4 \times 10^{-06}$). Les infestations de TOP ont donc été moins contrôlées sur les systèmes économes, en particulier sur le S2-Eco1.

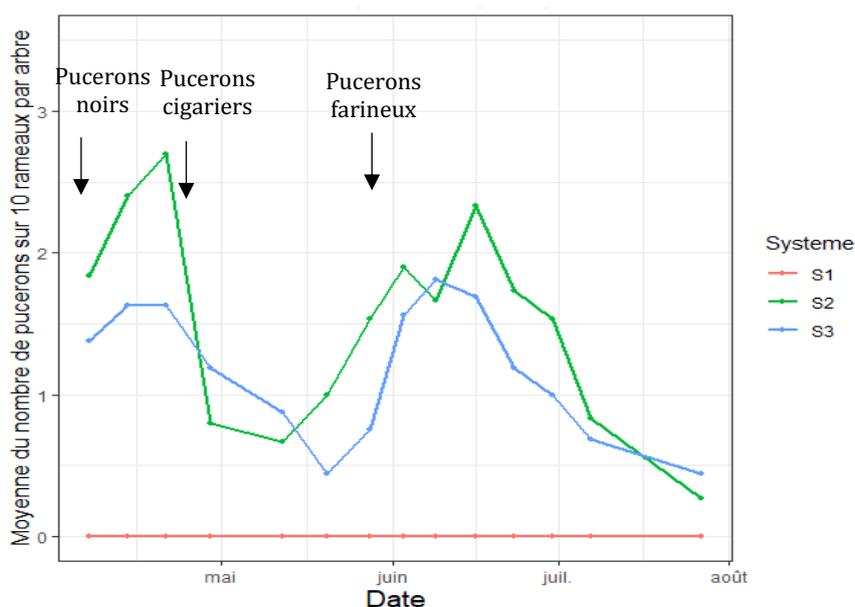


Figure 5 : Evolution du nombre de rameaux infestés de pucerons par système

Le nombre de pucerons par système correspond à la moyenne du nombre de rameaux infestés sur 10 rameaux par arbre sur 12 arbres par système, ayant reçu des niveaux de fertilisation azotée de 150N sur le S1-REF et 120N sur les systèmes Eco.

2. Indicateurs physiologiques

La floribondité a été fortement réduite sur les rameaux des systèmes Eco notamment à cause des fortes attaques de pucerons de 2019. Les nombres de fleurs par mètre de rameaux sont significativement inférieurs sur les systèmes Eco par rapport au S1-REF (50,8 fleurs en moyenne par mètre de rameau sur le S1-REF contre 18,7 et 19,1 sur le S2-Eco1 et le S3-Eco2 ; Kruskal-Wallis p-value < 2.2×10^{-16}).

La croissance des longueurs de pousses est un indicateur représentatif des dynamiques annuelles de croissance végétative de l'arbre. Les longueurs de pousses entre systèmes augmentent fortement entre mai et juin puis stagnent pour les trois systèmes (fig. 6). Il existe une différence des valeurs moyennes de longueurs de pousses sur l'ensemble des dates. La moyenne des longueurs de pousses du S2-Eco1 (50,5 cm) sont supérieures par

rapport à celles du S1-REF (45,3 cm) et du S3-Eco2 (43,2) (Kruskal-Wallis, p-value = 0,00015). Néanmoins, les cinétiques de vitesses de croissance caractérisées par les différences de longueurs des pousses entre chaque date de mesure ne montrent pas de différences significatives entre systèmes (Kruskal-Wallis, p-value = 0.71), bien que les longueurs des pousses du S2 montrent une tendance supérieure aux autres à partir de juin.

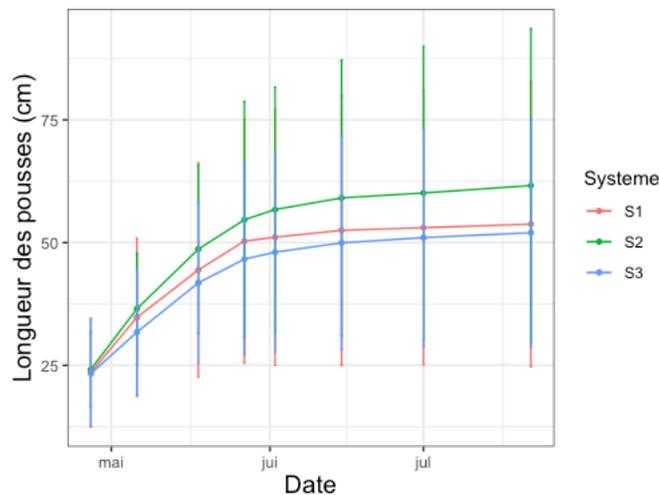


Figure 6 : Evolution des moyennes de longueurs de pousses par système (en cm)

Les longueurs de pousses correspondent aux moyennes de longueurs de 4 pousses par arbre sur 12 arbres par système (en cm). Les barres verticales représentent les écarts-types pour chaque mesure.

2.3. Performances environnementales

Les besoins en azote estimés à 150 kg N/ha pour atteindre les objectifs de rendement ont été réduits à 120 kg N/ha sur les systèmes Eco. Il n'y a peu eu d'apports en phosphore et potassium notamment suite à des difficultés pour se fournir en engrais fin mars. Les doses d'azote n'ont pas été revues suite au gel de mars induisant une modification des objectifs de rendements afin de favoriser une forte croissance végétative et ainsi préparer le potentiel de rendement de l'année prochaine par la production de nombreuses pousses.

Les quantités d'eau d'irrigation ont été réduites de 34% sur S2-Eco1 par rapport aux doses apportés sur S1-REF entre fin mars et fin juillet. Les quantités d'eau ont été réduites de seulement 18% sur le S3-Eco2 afin de permettre l'installation de la menthe poivrée.

Les potentiels hydriques des tiges au midi solaire entre les systèmes ont présenté des valeurs supérieures à -14 bars jusqu'à mi-juillet excepté pour la modalité 0N du S3-Eco2 fin juin, indiquant un niveau d'alimentation hydrique satisfaisant (Annexe 3). Les potentiels hydriques ont tendance à diminuer à partir de mi-juillet, particulièrement sur le S1-REF et le S3-Eco2 suite à la réduction des apports d'eau dans la période de pré-récolte (deux à trois semaines avant les premières cueilles) pour maîtriser le développement de maladies de conservation.

L'objectif de réduction de 80% de l'IFT chimique par rapport au S1-REF a été atteint sur les deux systèmes Eco, avec une réduction de -95%. L'IFT chimique a été en partie substitué par le recours à des produits de biocontrôle. La seule dose rattachée à l'IFT chimique fait référence à un traitement fongicide à base de cuivre qui est autorisé en Agriculture Biologique mais qui n'est pas considéré comme un produit de biocontrôle par le Ministère en charge de l'Agriculture. Ainsi, l'IFT total comptabilisant l'IFT chimique et celui de biocontrôle atteint 12,58 doses sur les systèmes Eco contre 17,1 doses sur le système de référence (fig. 7).

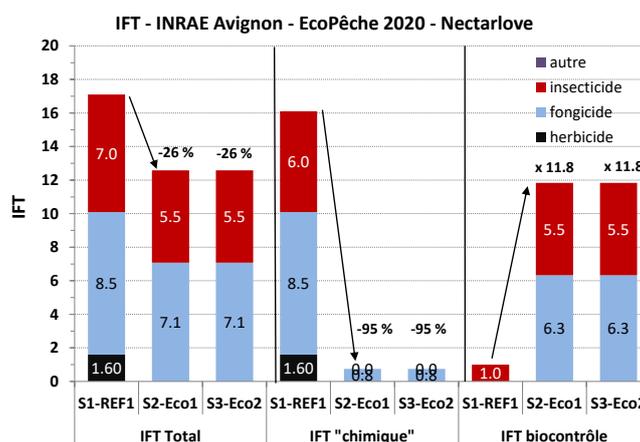


Figure 7 : Répartition des IFT par système pour la campagne 2020

Source (Plénet 2020, document interne)

2.4. Performances agronomiques

Les rendements bruts et commercialisables des systèmes Eco sont significativement inférieurs à ceux du S1-REF (Wilcoxon p-value : S1-S2 = 1,6e-05 ; P : S1-S3 = 3,2e-04 pour les rendements bruts totaux). Les rendements bruts totaux (avec les fruits tombés au sol juste avant récolte) du S2-Eco1 et du S3-Eco2 étaient respectivement de 10,5 et 13,7 t/ha soit une baisse de 78 et 75% par rapport à 2019. Le rendement brut total du S1-REF était lui de 33,8 t/ha soit une baisse de 32% par rapport aux rendements de 2019 (Tableau 3).

	S1-REF			S2-ECO1			S3-ECO2			S2-ECO1	S3-ECO2
	2019	2020	2020 vs 2019 en %	2019	2020	2020 vs 2019 en %	2019	2020	2020 vs 2019 en %	en % REF	en % REF
Résultats à l'échelle de l'arbre											
Poids Moyen 1 Fruit (g)	162,9	208,0	28%	152,9	232,1	52%	147,1	185,5	26%	12%	-11%
% Fruits tombés au sol	7,1	22,9	222%	7,9	33,6	326%	7,2	27,6	283%	47%	21%
Poids total pertes fruits (kg/arbre)	13,7	25,0	82%	15,4	10,7	-30%	12,4	8,1	-35%	-57%	-68%
Indicateurs de performance agronomique / ha											
Nbre d'arbres/ha	571			571			909			0%	59%
RDT brut (t/ha) (avec fruits tombés sol)	49,5	33,8	-32%	47,0	10,5	-78%	54,4	13,7	-75%	-69%	-59%
RDT brut récolté (t/ha)	46,0	26,1	-43%	43,3	7,3	-83%	50,5	10,1	-80%	-72%	-61%
Pertes de fruits récoltés (t/ha)	7,8	6,9	-11%	8,8	2,9	-67%	11,3	3,8	-66%	-58%	-45%
% perte fruits récoltés	17,2	26,4	54%	20,6	42,0	104%	22,9	41,8	83%	59%	58%
Rdt commercialisable (t/ha)	38,1	19,2	-50%	34,4	4,4	-87%	39,2	6,3	-84%	-77%	-67%
%Aplus	80,2	95,9	20%	78,0	97,9	26%	64,7	90,5	40%	2%	-6%
Rdt Com. A et plus (t/ha)	30,5	18,4	-40%	26,7	4,3	-84%	25,2	5,7	-77%	-76%	-69%
IR pondéré/masse (% Brix)	14,0	15,8	13%	13,1	18,4	40%	12,2	18,7	54%	16%	18%

Tableau 3 : Synthèse des indicateurs de performance agronomique sur l'essai système Ecopêche pour les années 2019 et 2020 sur les essais systèmes de l'Inrae Avignon (Moyennes sur 12 arbres pour S1-REF et S2-Eco, sur 6 arbres pour S3-Eco2)

Source : D'après Plénet et Borg (2019)

Les poids moyens d'un fruit (PMFR) sont supérieurs à ceux de 2019 sur l'ensemble des systèmes et plus particulièrement sur le S2-Eco1 (+ 52%).

Les pourcentages de pertes en fruits récoltés sur les systèmes Eco sont 59 et 58% supérieurs par rapport à celui du S1-REF. Alors que les pertes en fruits récoltés en 2019 étaient à peu près équivalentes entre les systèmes (entre 17.2% sur le S1-REF à 22.9% sur le S3-Eco2 par rapport à la totalité des fruits récoltés). Ces pertes sont en partie dues à de fortes augmentations des fruits pourris (plus de 17 kg par arbre sur S2 et S3 contre 8,9 kg sur S1-REF) et à une augmentation des fruits piqués (+94% et +100% sur S2 et S3 par rapport à S1-REF). Lors des observations sur fruits avant récolte, la moyenne du nombre de fruits piqués par des Tordeuses était

significativement supérieure sur les systèmes Eco par rapport au S1-REF avec des moyennes de fruits infestés sur dix fruits choisis aléatoirement de 0,37 et 0,28 sur S2-Eco1 et S3-Eco2 contre 0,12 sur le S1-REF sur l'ensemble des dates (Wilcoxon test, p-value : S1-S2 = $7,1e-4$; S1-S3 = $1,6e-2$). L'augmentation du nombre d'infestations par des tordeuses orientales du pêcher sur les systèmes économes peut-être due à la non utilisation de confusion sexuelle sur ces systèmes qui fait partie des interventions de substitution à l'utilisation d'insecticide chimique sur le système de référence.

Les indices réfractométriques (IR) pondérés par la masse de fruits produits ont augmenté sur les trois systèmes par rapport à 2019 et plus particulièrement sur les systèmes Eco (+40 et 54% sur S2 et S3) certainement suite aux très faibles charges sur les arbres de ces systèmes.

L'analyse des performances économiques des systèmes n'est pas évoquée ici à cause de la variabilité exceptionnelle des rendements obtenus pour cette année.

Bien que les objectifs de performances environnementales sur les systèmes Eco aient été tenus, l'année 2020 marque la plus mauvaise campagne depuis le début d'Ecopêche concernant les performances agronomiques de ces systèmes. Les causes de ces baisses de rendements sont évoquées en Discussion.

III) Expérimentation factorielle - fertilisation azotée et plantes de service

1. Disponibilité des nitrates au sein du verger

1.1. Analyse de la variabilité des quantités de nitrates dans le sol au sein du verger

L'évolution des concentrations en nitrates est hétérogène en fonction des blocs et des dates (fig. 8). Les concentrations au sein du bloc 1 sont les plus fortes en début d'apport puis deviennent inférieures à celles du B3 à partir du 17/06. Cette variabilité de la distribution des nitrates au sein du dispositif expérimental nécessite de « pondérer » les interprétations qui vont suivre concernant l'effet des facteurs testés.

Cependant, aucune différence significative entre les médianes de Nitrates par Rang n'a été perçue (Kruskal-Wallis, p-value = 0,47).

Malgré qu'une différence significative existe entre les quantités de nitrates entre Menthe et Témoin sur l'ensemble des dates (Kruskal-Wallis, p-value = 0.03) ; la fonction de compétition en Azote entraînée par la Menthe ne peut être envisagée jusqu'à juillet car les pieds de menthe ont été seulement plantés la semaine du 18/05 et étaient encore très peu développées (2 tiges par plant de 5 à 10 feuilles). Cette différence entre la menthe et le témoin semble donc due à la variabilité spatiale des quantités de nitrates entre les rangs du verger. Toutefois, la variable PdS n'entraîne pas de différence des quantités de nitrates pour la dernière date de prélèvement le 21/07 (Kruskal-Wallis, p-value = 0,35).

La différenciation des quantités de nitrates pour le facteur dose N est marquée dès la mesure du 04/05 (fig. 8).

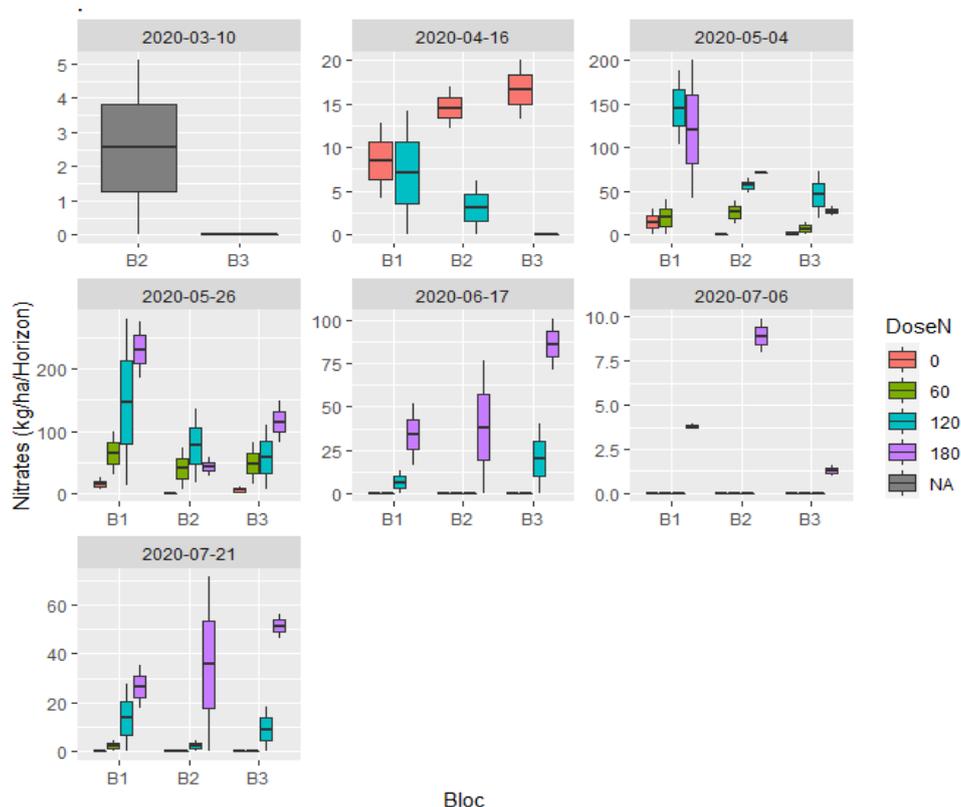


Figure 8 : Evolution des quantités de nitrates (en kg de N-NO₃) de l'Horizon 1 (0-30cm) par dose N au sein de chaque bloc

(Les quantités de nitrates par Dose N par Bloc correspondent aux moyennes des prélèvements sur les placettes d'une même dose N des deux rangs composant un Bloc. Les valeurs NA correspondent à la première date de mesure lorsque les doses N n'étaient pas encore attribuées spatialement au sein du verger)

L'évolution des quantités de nitrates, une fois comparée à celle des précipitations et de l'irrigation (fig. 9), ne semble pas montrer des pertes d'azote par lessivage et lixiviation. Les baisses des quantités de nitrates sont à peu près régulières entre les dates de mesures excepté pour le prélèvement du 26/05.

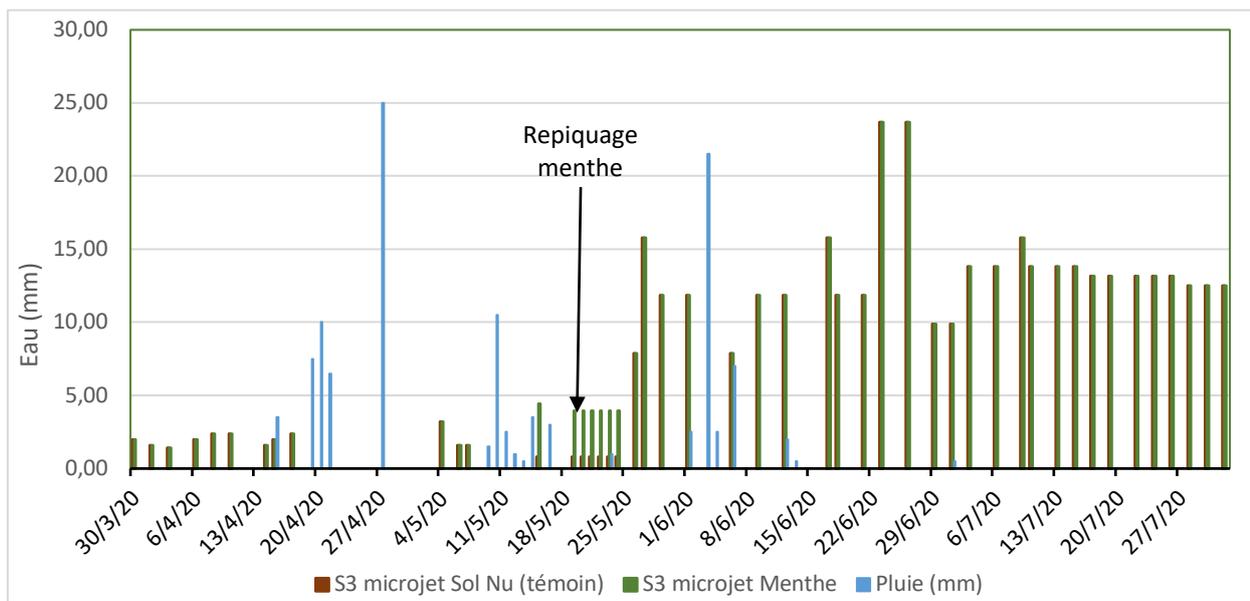


Figure 9 : Distribution de l'irrigation et de la pluviométrie au sein du système 3-Eco 2

1.2. Quantités de nitrates en fonction des doses N

On remarque sur la figure ci-dessous que les quantités de nitrates au sein de l'horizon 1 atteignent un pic lors du prélèvement du 26/05, soit 20 jours après l'apport 2, signifiant que l'azote apporté pour certaines doses n'avait pas encore été entièrement consommé avant l'apport suivant du 26/05. Cela peut être principalement dû au fait que la dose de l'apport azoté 17/04 était doublée par rapport aux autres dates (fig. 10).

Les différenciations d'apports en nitrates sont bien marquées par des niveaux de concentration plus élevés pour les doses 120 et 180N à partir du 04/05. Les quantités de nitrates augmentent jusqu'à fin mai pour toutes les doses excepté 0N puis diminuent en juin. Les apports de nitrates de calcium correspondant à la dose 60N sont consommés presque entièrement avant les prochains apports à partir de juin.

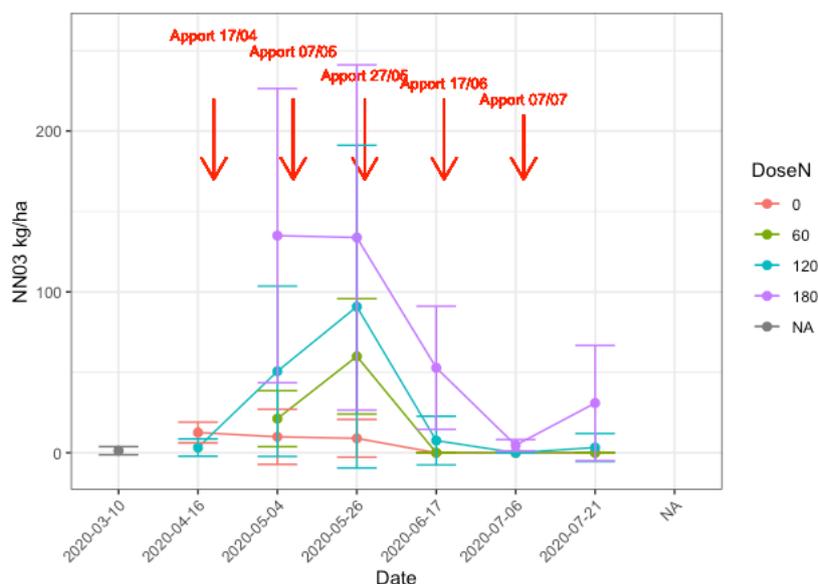


Figure 10 : Evolution des quantités de nitrates (en kg de N-NO₃) par dose N dans les horizons 1 (0-30cm). Les quantités de nitrates par dose N correspondent aux moyennes des prélèvements sur le rang de chaque placette pour l'Horizon 1. L'horizon 2 était prélevé pour la dose 120N à chaque date et pour la dose 180N le 21/07. Les valeurs NA correspondent à la première date de mesure lorsque les doses N n'étaient pas encore attribuées spatialement au sein du verger. Les barres verticales représentent les écarts-types.

L'évolution des concentrations en nitrates au sein de l'horizon 2 est similaire à celle de l'horizon 1 avec une moyenne maximum lors du prélèvement du 27/05. Néanmoins, les concentrations sont nettement inférieures sur la dose 120N avec une moyenne maximum de 63 kg/ha pour l'Horizon 2 contre 129 kg/ha pour l'horizon 1. Ainsi les pertes de nitrates en profondeur par lixiviation semblent réduites avec la dose 120N. Le prélèvement sur la dose 180N le 21/07 montre cependant qu'une partie des nitrates est encore présente dans l'horizon 2 pour cette dose, avec une moyenne de 18 kg/ha. Ainsi il semblerait que les apports différenciés de FA tous les 20 jours ont été absorbés de manière régulière entraînant peu de migration des nitrates vers l'horizon 30-60cm.

2. État physiologique des arbres

2.2. Indicateurs de l'état de nutrition azotée des arbres

Les teneurs en azote foliaire (en g/100 g de MS de feuilles) par dose N (fig. 11) suivent une tendance similaire à celle de l'évolution des quantités de nitrates dans le sol (fig. 10). Les teneurs en N les plus élevées excepté pour la dose 0N sont situées vers fin mai.

La teneur en azote foliaire pour la dernière date de prélèvement le 20/07 est significativement différente entre doses N (fig. 13). Seules les doses 120 et 180N n'ont pas de teneurs en N différents à cette date. Les moyennes des teneurs d'azote foliaire de 2,2% pour la dose 0N et autour de 3% pour les doses 120 et 180N sont cohérentes avec les résultats de Nii et al. (1993) et de Rufat et DeJong (2001) avec respectivement 2,5% et 2,4% d'azote foliaire total pour une non fertilisation des pêchers et 2,99% de teneur en N foliaire pour un apport de 200 kg N/ha (Rufat et DeJong, 2001).

La différenciation de la FA a donc bien un effet sur le statut azoté des feuilles de pêcher et donc sur la nutrition azotée des arbres. La vérification de l'effet dose N sur l'état nutritionnel des arbres au sein du S3 permet de poursuivre les analyses des effets des doses N sur les indicateurs de croissance des arbres.

Figure 11 : Evolution des teneurs en azote foliaire par dose N

Les teneurs en azote foliaire (en %) correspondent aux dosages labo du N foliaire total. Le taux de N pour une date par dose N correspond à la moyenne des échantillons de feuilles entre chaque placette d'une même dose. Les barres verticales représentent les écarts-types.

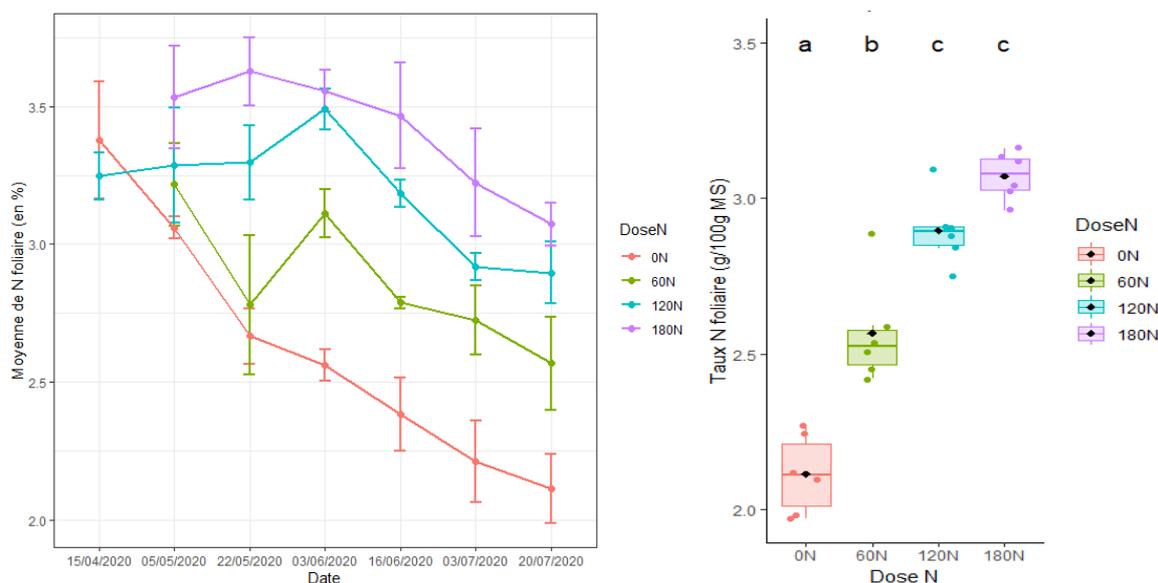


Figure 12 : Moyenne des teneurs en azote foliaire par dose N le 22/07/2020
Les doses N ayant une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P < 0,05$)

2.3. Indicateurs de la vigueur et de la croissance des arbres

2.3.1. Analyse de la variabilité des sections de troncs et de la biomasse des gourmands au sein du dispositif

La croissance des sections de troncs calculé à partir des circonférences est un indicateur qui représente l'état de vigueur des arbres par son accroissement annuel (Barden et al., 2002). Les différences de sections de troncs entre le 23/01 et le 20/07/2020 sont homogènes entre les rangs (Kruskal test, p-value=0,39) avec une moyenne maximale de différence de section sur le rang 1 avec 0,09 cm² contre une moyenne minimale sur le rang 4 avec 0,07 cm².

Malgré une variabilité des biomasses des gourmands enlevés lors de la taille en vert le 25/06 entre les rangs, il n'existe pas de différence significative entre rangs (p-value Anova = 0,31) (fig. 1 Annexe 4) ni entre menthe et témoin (p-value Anova = 0,11). La croissance des gourmands peut alors être considérée comme homogène entre les rangs. Les effets de la variabilité spatiale au sein du système sur la vigueur des arbres semblent réduits, validant l'absence d'une confusion entre hétérogénéité spatiale au sein du bloc et localisation des modalités. Le dispositif expérimental permet d'étudier le facteur dose N dans la suite des analyses des indicateurs de croissance, même si les effets de la variabilité spatiale sont à prendre en compte.

2.3.2. Indicateurs des dynamiques de croissance des arbres par dose N

Sections de troncs

L'effet des doses N sur les différences de sections de troncs entre le 23/01 et le 20/07/2020 n'a pas été démontré car aucune différence significative n'a été perçue entre doses N (Kruskal-Wallis, p-value = 0,55) malgré une forte variabilité notamment pour la dose 180N avec des sections variant de 0,055 cm² pour la placette du rang 4 à 0,118 cm² pour celle du rang 5.

Biomasse des gourmands par dose N

La croissance des gourmands a été affectée par la différenciation de FA. La quantité de MS des gourmands est significativement inférieure pour la dose 0N par rapport aux autres doses (Tukey p-values : 0N-60N = 0,0268 ; 0N-120N <0,001 ; 0N-180N <0,001).

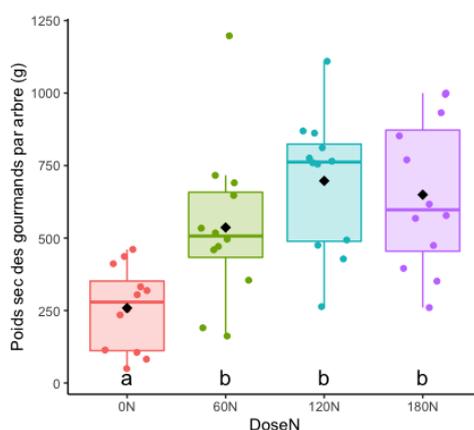


Figure 13 : Biomasse des gourmands enlevés le 25/06 par dose N (en g de MS)
Les lettres indiquent des différences significatives entre les doses N (p-value < 0,05)

Evolution de la longueur des pousses par dose N

L'évolution de la longueur des pousses et du nombre de feuilles par pousse en fonction des doses N montre une augmentation rapide pour les premières dates de mesures en mai (fig. 14). La croissance des longueurs de pousses et la formation de nouvelles feuilles stagnent à partir de mai, excepté pour les pousses qui sont considérées comme des gourmands.

La différence des moyennes de longueurs de pousses entre doses N montre que les doses 60, 120 et 180N ont une croissance supérieure à la dose 0N sur l'ensemble des dates. La dose 180N entraîne les plus fortes croissances avec 5,1cm de différence de longueur entre date de mesure (Wilcoxon test 0N-180N, p-value = 1,8e-07) (fig. 15). La différence des moyennes de la formation de feuilles par pousse est seulement significativement supérieure pour la dose 180N par rapport à la dose 0N (Wilcoxon test 0N-180N, p-value =

4,3e-3). La dose 180N entraîne une formation moyenne de 2,1 feuilles entre dates de mesures contre 1,6 feuilles pour la dose 0N.

Figure 14 : Evolution des longueurs de pousses par dose N

Les longueurs de pousses par dose N pour une date correspondent aux moyennes de longueurs de 4 pousses par arbre sur les deux arbres centraux sur chaque placette ayant une dose N similaire. Les barres verticales représentent les écarts-type.

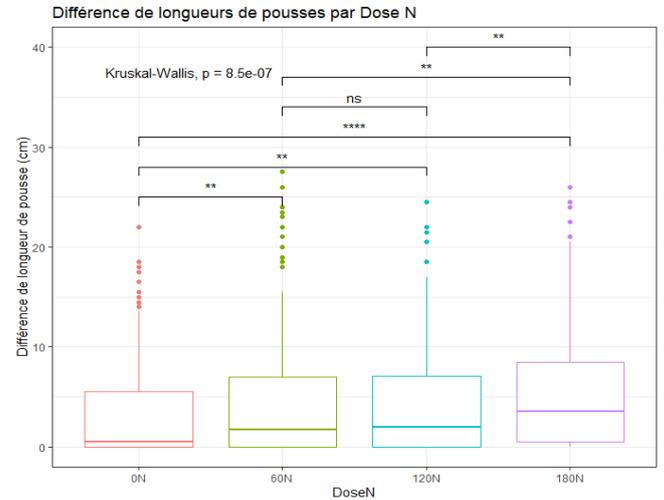
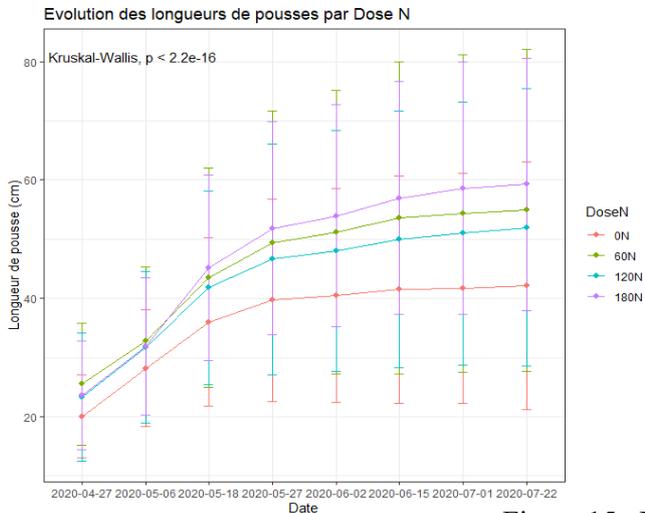


Figure 15 : Moyenne des différences de longueurs de pousses par dose N

Les moyennes des différences de longueurs de pousses (en cm) par Dose N correspondent à la différence moyenne des longueurs entre chaque date de mesure sur l'ensemble de la saison sur tous les arbres ayant reçu une Dose N équivalente

Evolution de la SLA par dose N

La surface foliaire spécifique (SLA) représente le rapport entre la surface des feuilles et leur poids. Il s'agit d'un indicateur de la croissance des feuilles au cours de la saison.

Les SLA (en $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) semblent suivre les dynamiques d'azote foliaire avec un pic des valeurs début mai pour les doses 0 et 60N et fin mai pour les doses 120 et 180N (fig. 16). Mais les doses N n'ont pas entraîné de différence significative des SLA sur l'ensemble des dates (Kruskal-Wallis, p-value = 0,51).

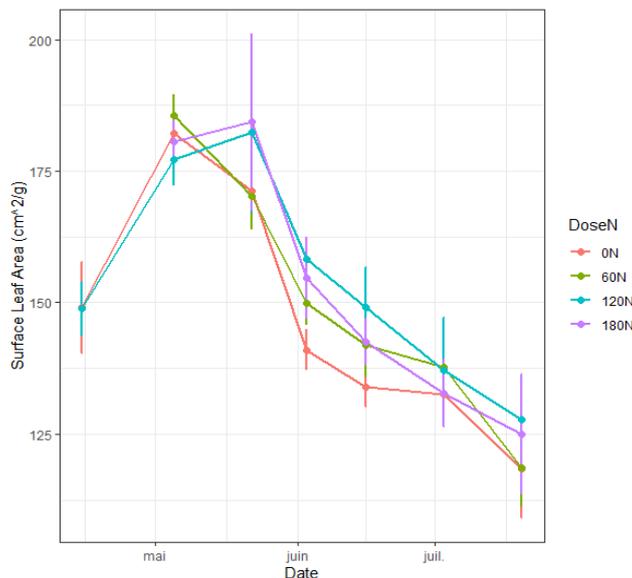


Figure 16 : Evolution des surfaces foliaires spécifiques (SLA en cm^2/g) par dose N

Les SLA (cm^2/g) par dose N correspondent aux moyennes des valeurs mesurées sur 60 feuilles sur l'ensemble des placettes pour une même dose N. Les barres verticales représentent les écarts-types.

2.4. Indicateurs des dynamiques de croissance des fruits

Bien qu'il n'existe pas de différence significative des croissances des fruits entre doses N, on remarque que les doses 0N et 60N ont des diamètres légèrement plus élevés entre mai et début juillet (fig. 17). Les doses N n'ont pas eu d'effet significatif sur les différences de diamètre de fruits entre chaque mesure (Kruskal-Wallis, p-value = 0.64).

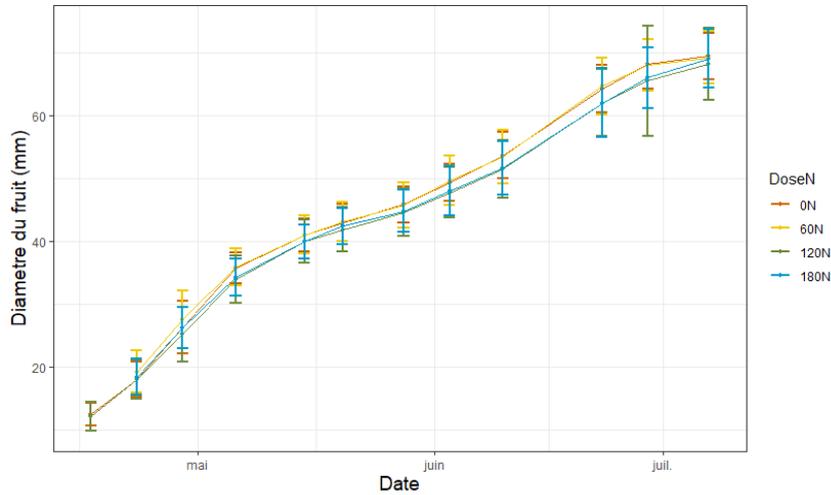


Figure 17 : Evolution du diamètre des fruits pour chaque dose d'azote

Le diamètre des fruits (en mm) par Dose N correspond à la moyenne de 42 fruits sur l'ensemble des placettes pour une même dose N. Les barres verticales représentent les écarts-type.

3. Effets de l'état de vigueur de l'arbre sur les pucerons

Effets de la différenciation de FA sur les infestations de pucerons

Les premières infestations de pucerons au sein du système ont débuté à partir d'avril avec des pucerons noirs (fig. 18). Les pucerons étaient sur des arbres au bout du rang 2. Des pucerons cigariers sont ensuite apparus à partir de fin avril avec une pression faible. A partir de fin mai, une forte pression a été exercée par les pucerons cigariers et farineux sur les premiers arbres du Rang 6 de bordure. Le pic des infestations a eu lieu vers le 3 juin avec en moyenne 2,5 rameaux touchés par arbre bien que les niveaux d'infestations étaient très hétérogènes au sein du verger. Les infestations se sont propagées le long du rang 6 et vers les milieux des rangs 5 et 4. La pression d'infestation de pucerons a ensuite diminué fin juin.

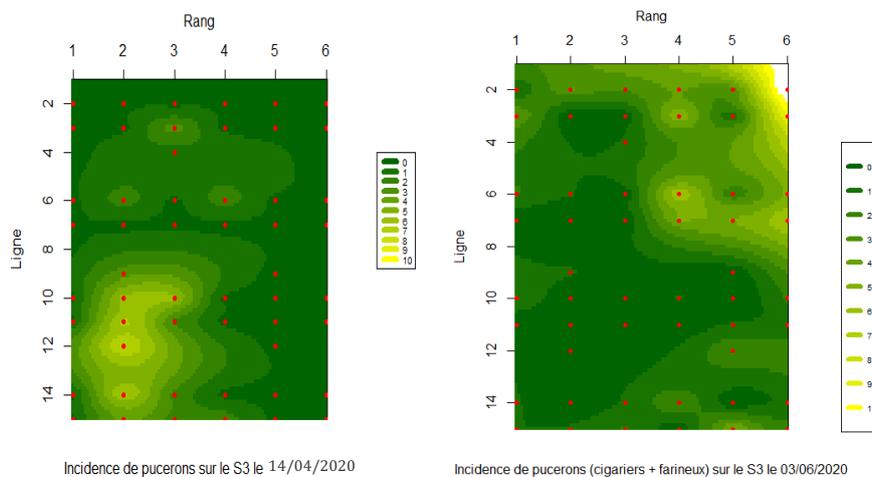


Figure 18 : Evolution du nombre de rameaux infestés de pucerons par arbre sur le S3 entre le 14/04 et le 03/06

Le nombre de pucerons par arbre correspond à la valeur du nombre de rameaux infestés sur 10 rameaux par arbre sélectionnés aléatoirement

Source : Borg 2020, document interne

Les variations de doses N n'ont pourtant pas eu d'effet sur la présence de pucerons par arbre lors du pic d'infestation le 03/06 (Kruskal-Wallis, p-value = 0,68) (fig. 19). La menthe poivrée n'a également pas eu d'effet sur les incidences de pucerons le 03/06 (Kruskal-Wallis, p-value = 0,65) (Annexe 4 fig. 2).

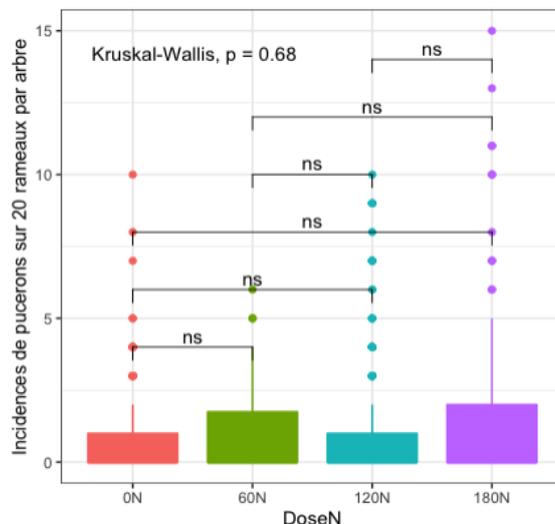


Figure 19 : Présence de pucerons cigariers et farineux sur rameaux par dose N le 03/06/20

L'incidence de pucerons correspond aux nombres de rameaux infestés sur 20 rameaux sélectionnés aléatoirement sur chaque placette par dose N

4. Effets possibles de la différenciation de FA sur les performances agronomiques

4.1. Variabilité spatiale des rendements et des Indices réfractométriques

Une forte variabilité spatiale des rendements est observable sur la figure 20. Les rendements bruts totaux des rangs 1 et 2 sont les plus faibles avec 8,1 et 8,8 t/ha contre 16,6 t/ha pour le rang 6 qui a produit les plus gros rendements. Mais seuls les rendements entre les rangs 1 et 6 montrent une différence significative (Kruskal-Wallis, p-value = 0,092) (fig. 20).

D'autre part, les rangs n'ont pas entraîné de différence significative sur la répartition des indices réfractométriques (IR) bien qu'il existe une forte variabilité au sein du verger (fig. 21). Les rangs 1 et 2 ont les moyennes d'IR les plus élevées tandis qu'il s'agit des rangs où les rendements étaient les plus faibles. Cette hétérogénéité entre rangs peut induire une confusion avec l'effet PdS qu'il faudra prendre compte dans les analyses suivantes.

Figure 20 : Comparaison des rendements brut totaux entre rangs

Les rendements bruts totaux en T/ha (avec fruits tombés avant récolte) correspondent à la moyenne des rendements sur toutes les placettes composant un rang

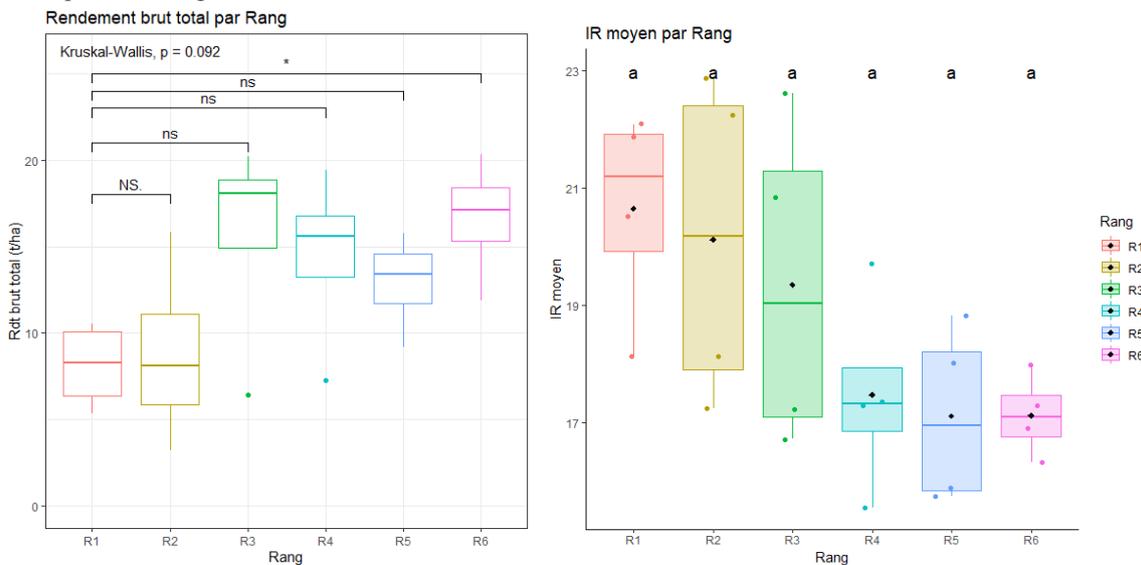


Figure 21: Comparaison des indices réfractométriques entre rangs

Les IR par rang correspondent aux moyennes de deux mesures par fruit sur 3 fruits par calibre par placette sur les deux cueilles. Les doses N ayant une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P < 0.05$)

4.2. Effets de la Fertilisation azotée sur les rendements

Rendements et poids moyens des fruits par dose N

Bien que les moyennes des rendements bruts et commercialisables augmentent avec les doses N, les différenciations de FA n'entraînent pas de différence significative entre doses (Kruskal-Wallis, p -value = 0,31 pour les rendements commercialisables par dose N) (fig. 22), certainement à cause de la forte hétérogénéité du dispositif. Une forte hétérogénéité des rendements par dose N est en revanche perceptible certainement dû à l'effet rang vu précédemment. Les pourcentages des calibres par dose N ne semblent pas non plus être impactés par les doses N (Annexe 5).

Les doses N n'ont également pas d'effet sur le poids moyen d'un fruit (Kruskal-Wallis, p -value = 0,87) (fig. 23).

Le poids moyen d'un fruit par arbre (PMFR) est faiblement expliqué par le nombre de fruits par arbre ($R^2 = 0,12$; p -value = 0,09) même si le poids semble diminuer lorsque le nombre de fruits augmente.

Figure 22 : Rendements commercialisables par dose N (t/ha)

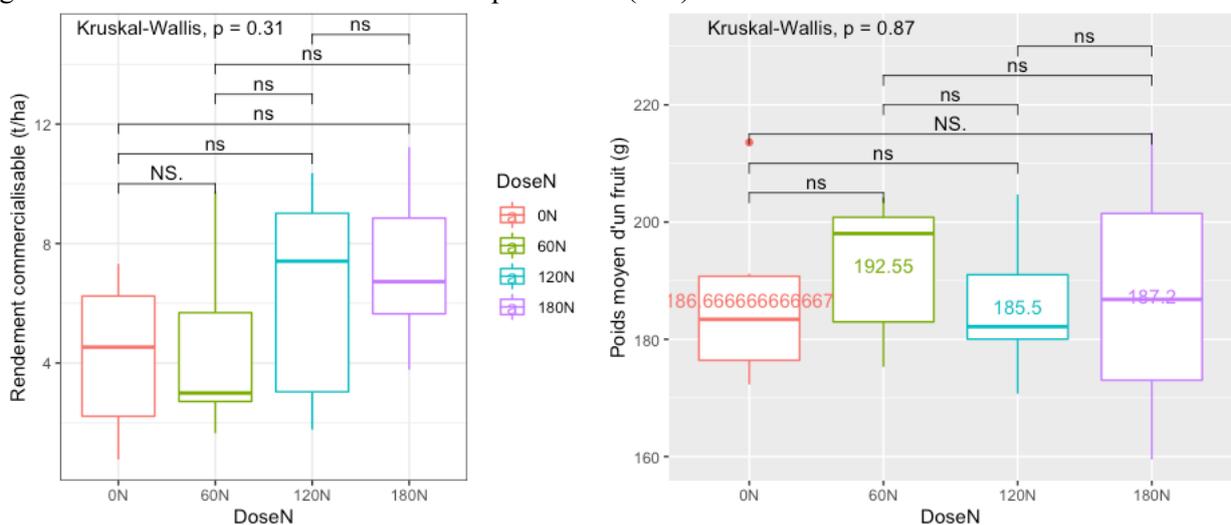


Figure 23 : Poids moyen d'un fruit (en g) par dose N

Le poids moyen a été calculé sur l'ensemble des cueilles, les chiffres au sein des boxplot indiquent les moyennes par

Comparaison des Indices Réfractométriques par dose N

Les différenciations de FA entraînent des indices réfractométriques (IR) moyens différents entre doses d'azote. La dose 60 N présente des IR moyens significativement supérieurs par rapport aux autres doses (Kruskal-Wallis, $p\text{-value} = 3,2\text{e-}12$) (fig. 24).

D'autre part, une corrélation significative ($p\text{-value} = 1.56\text{e-}4$) est perceptible entre les IR moyens des fruits par placette et le rendement brut total par placette. Bien que la corrélation linéaire est faible certainement suite au faible nombre de répétitions qui réduit la puissance du test, les concentrations en sucre des fruits estimées par l'IR semblent augmenter lorsque les rendements par arbre diminuent (fig. 25).

En revanche, l'IR ne semble pas corréllé au poids moyen d'un fruit (Anova $p\text{-value} = 0,26$).

Figure 24 : Indices réfractométriques moyens par dose N sur l'ensemble des récoltes

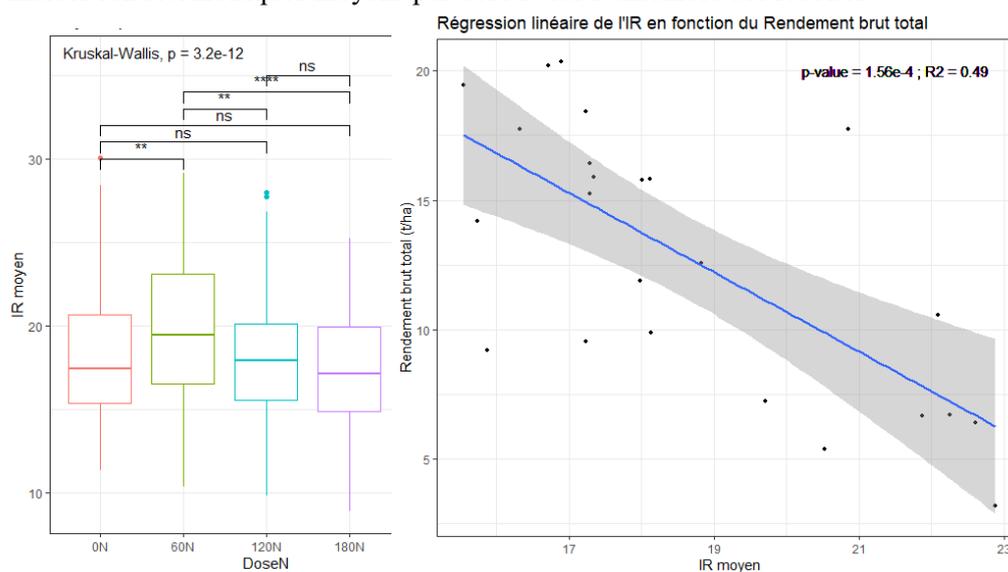


Figure 25 : Régression entre les rendements bruts totaux (avec fruits tombés avant récolte) et l'indice réfractométrique moyen des fruits

5. Effets des états de nutrition azotée sur la croissance des arbres, les composantes du rendement et les infestations de pucerons

5.1. Réponses des indicateurs de croissance des arbres à la nutrition azotée

Des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées pour évaluer les corrélations entre plusieurs variables sur les indicateurs de croissance, de production ou encore sur les niveaux d'infestation de pucerons. Les ACP permettent d'étudier les corrélations entre variables en fonction de leur participation

Pour analyser les effets des variables et leur contribution aux dimensions de l'ACP, les individus ont été catégorisés par placette (intégrant les modalités PdS (Menthe ou Témoin), Rangs (1 à 6) et dose N).

Les noms affichés sur les résultats des ACP correspondent aux variables suivantes :

- « Nitrates » : Moyenne des quantités de nitrates N-N03 (kg/ha) sur l'ensemble des dates au sein de l'horizon 0-30cm du sol
- « Taux_N » : Teneur en N total (%) des feuilles par placette pour la date du 20/07
- « SPAD » : Moyenne des mesures SPAD des feuilles pour la date du 20/07
- « SLA » : Moyennes des surfaces foliaires spécifiques sur un échantillon de 20 feuilles par placette ($\text{cm}^2/\text{g MS}$) pour la date du 20/07
- « Diff-circonf » : Différences de circonférences (cm) des arbres entre le 20/07/20 et le 23/01/20
- « PS_gourmds_arb » : Moyenne du Poids Sec des gourmands (g) par placette, taillés le 25/06/20
- « Diff_long_pousse » : Moyennes par placette des différences de la longueur des pousses (cm) entre le 22/07 et le 20/04/20
- « Diff_diam_fruit » : Moyenne par placette des différences de diamètre des fruits (mm) sur l'ensemble des dates

- « Incidence_pucerons » : Moyenne par placette du nombre de rameaux sur 20 infestés par des pucerons (cigariers et farineux) lors du pic du 03/06
- « Nb_FR_arbre » : Moyenne du nombre de fruits par placette
- « PdsTot_Fr_arb » : Moyenne du Poids total des fruits arbre par placette
- « IR_moy » : IR moyen de deux mesures sur trois fruits par calibre par placette

Une première ACP a pour but d'analyser les corrélations entre la FA, l'indice de nutrition azotée le plus représentatif qui est le taux de N foliaire total et les indicateurs de croissance de l'arbre et des fruits.

Les variables participant le plus à la dimension 1 sont la teneur en N foliaire, les quantités de nitrates dans le sol et la biomasse des gourmands enlevés (fig. 26), vérifiant que les variations d'azote foliaire sont corrélées aux quantités de nitrates apportés par fertilisation. Les variables participant le plus à la dimension 2 sont la SLA, la biomasse des gourmands et les taux de nitrates. Les différences de diamètre des fruits contribuent très peu aux deux premiers axes du graphique. Les différences de longueurs de pousses suivent également l'axe expliquée par la teneur en N foliaire mais en y contribuant moins.

Les individus sont en partie rassemblés par dose N (fig. 27). Les groupes sont plus distincts pour les doses 0N et 60N.

Les individus les plus corrélés aux quantités de nitrates, aux teneurs en azote foliaire et indicateurs de croissance sont principalement les individus des doses 120N et 180N ce qui confirme le lien entre nutrition azotée et croissance végétative élevée. Certaines variables caractérisant la croissance de l'arbre sont plus corrélées aux teneurs en azote foliaire comme les différences de longueurs de pousses. Les croissances des diamètres de fruits semblent être peu corrélés à l'état de nutrition azotée mais aussi aux autres indices de croissance. La SLA est également peu corrélée aux autres indices de croissance végétative.

Le regroupement des individus n'ayant pas été fertilisé (dose 0N) à l'opposé des indices de croissance végétative, indique que les plus faibles niveaux de nutrition azotée de ces arbres ont été marqués par une baisse de leur croissance.

Figure 26 : Contribution des variables aux principales dimensions de l'ACP analysant les corrélations entre indices de nutrition azotée et de croissance végétative

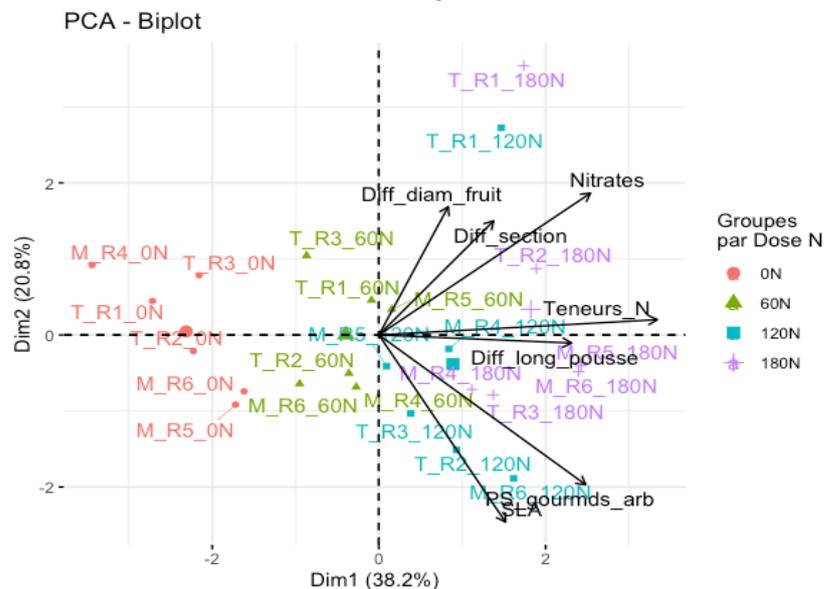
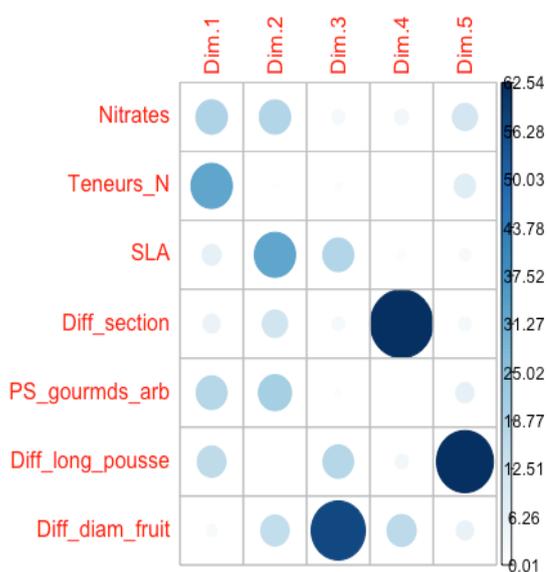


Figure 27 : Regroupement des variables et individus de l'ACP analysant les corrélations entre indices de nutrition azotée et de croissance végétative

5.2. Réponse des niveaux d'infestations de pucerons aux indicateurs de nutrition azotée et de croissance des arbres

La seconde ACP vise à représenter les contributions des variables sur les liens entre indicateurs de nutrition azotée et de croissance avec les niveaux d'infestation de pucerons. Certaines variables de l'ACP précédente

participant peu à l'explication des deux premières dimensions comme les différences de diamètre de fruits ont été supprimées. Les différences de section de tronc ont également été supprimées car leur dynamique de croissance a été moins soumise aux variations de fertilisation et sont une variable non directement affectée par les infestations de pucerons.

Les variables participant le plus à la première dimension sont la teneur en azote foliaire (28%) et le PS des gourmands (28%). Les variables participant le plus à la dimension 2 sont l'Incidence des pucerons (38%), la SLA (24%) et les différences de longueurs de pousses (22%) (fig. 28).

Les différences de longueurs de pousses semblent corrélées aux niveaux d'incidence des pucerons (fig. 29). Les incidences sont par contre peu corrélées aux teneurs en N. La SLA, étant opposé aux incidences de pucerons mais participant également à la dimension 2, de faibles valeurs de surfaces foliaires spécifiques peuvent être corrélées à des niveaux d'incidences élevés.

Les individus restent en partie groupés par dose N, en particulier pour la dose 0N qui regroupe les indices de croissance végétative les plus faibles en lien avec leur niveau d'azote foliaire (fig. 29). Les individus les plus corrélés à une forte incidence de pucerons sont les placettes 180N du Rang 6 et 120N du Rang 4. La placette 180N du rang 6 était celle ayant le pic d'infestation le plus sévère en juin par rapport aux autres placettes. Il s'agit de la placette en début de rang la plus proche de la haie composite. Tandis que la placette 120N du rang 4 est située au milieu du rang.

Figure 28 : Contribution des variables aux principales dimensions de l'ACP analysant les corrélations entre indices croissance végétative et infestations de pucerons

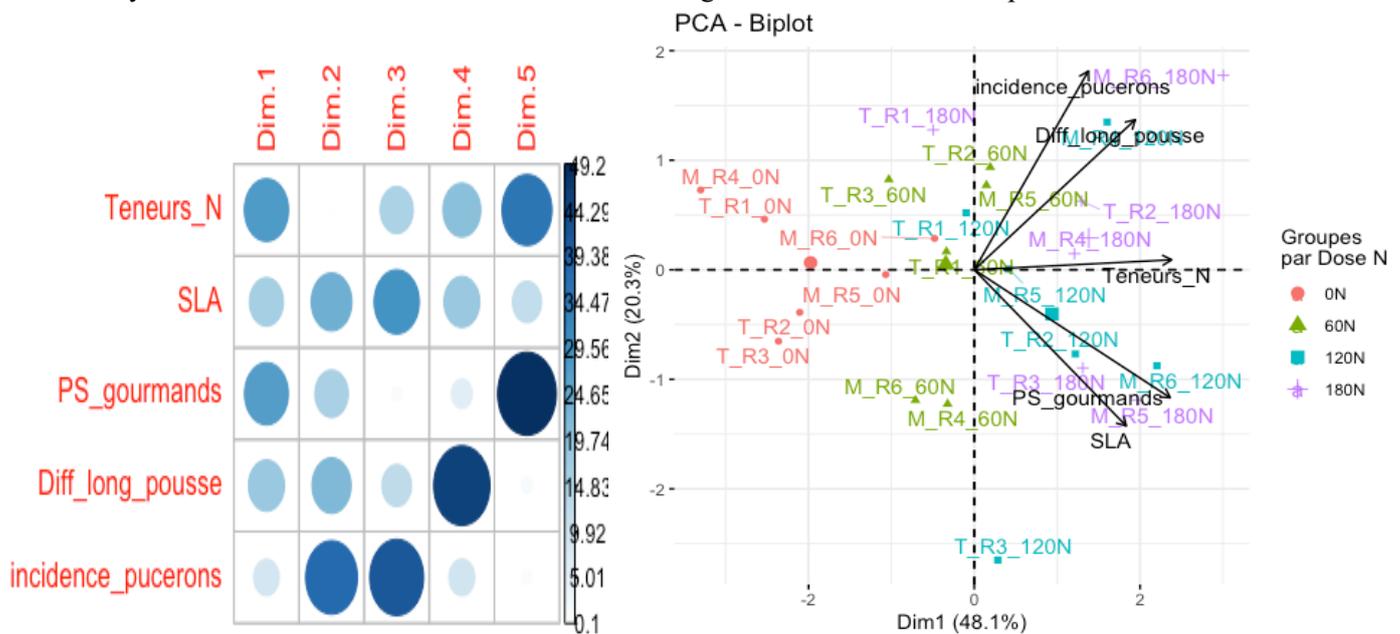


Figure 29 : Regroupement des variables et individus de l'ACP analysant les corrélations entre indices de croissance végétative et infestations de pucerons

5.3. Réponses des composantes du rendement aux indicateurs de croissance des arbres

Pour identifier les variables corrélées à partir des indicateurs de croissance végétative et les composantes de rendement (Nombre de fruits par arbre et Poids moyen d'un fruit par arbre), la variable Teneur en N foliaire a été supprimé pour éviter une redondance avec certaines variables caractérisant la croissance végétative car la teneur en N foliaire n'a pas d'effet direct sur les composantes du rendement mais plutôt sur la croissance des arbres. Les indicateurs de croissance végétative portant sur la surface foliaire ou la croissance des pousses ont été retenus car ces organes participent à la synthèse de carbone pour l'arbre qui participe aux réserves utilisées pour la production de fruits.

Les variables participant le plus à la première dimension sont le nombre de fruits par arbre avec 31% de contribution et l'indice réfractométrique des fruits avec 29%. Les variables participant le plus à la dimension 2 sont le poids moyen d'un fruit (27%), le PS des gourmands enlevés et les différences de section de troncs

avec 19% chacun et les différences de longueur de pousses avec 16% de contribution (fig. 30).

L'IR moyen et le nombre de fruits par arbre contribuent chacun fortement à expliquer la dimension 1, mais ces deux variables étant opposées sur l'axe, cela signifie que l'IR moyen est fort pour des nombres de fruit par arbre faibles.

Le poids moyen d'un fruit (PMFR) est davantage corrélé aux différences de section des arbres. Les autres indicateurs de croissance végétative ont des directions plus proches sur le cercle de corrélation (fig. 31). La faible participation de la différence de diamètre des fruits aux premiers axes limite les possibilités de corrélation avec d'autres variables.

Les individus par groupe étant très dispersés, il ne semble pas y avoir de corrélation entre les états de vigueur de l'arbre et les composantes du rendement (fig. 31). Cependant, une tendance semble apparaître pour plusieurs individus des Rang 1 et 2 pour différentes Doses N, qui sont regroupés vers la variable IR moyen signifiant que les fruits de ces placettes ont des IR élevés. D'autre part, les placettes du groupe 0N restent toujours opposés aux flèches des variables de croissance végétative ce qui indique que la non fertilisation entraîne bien des croissances des arbres plus faibles par rapports aux arbres des placettes fertilisées.

Figure 30 : Contribution des variables aux principales dimensions de l'ACP analysant les corrélations entre indices croissance végétative et composantes du rendement

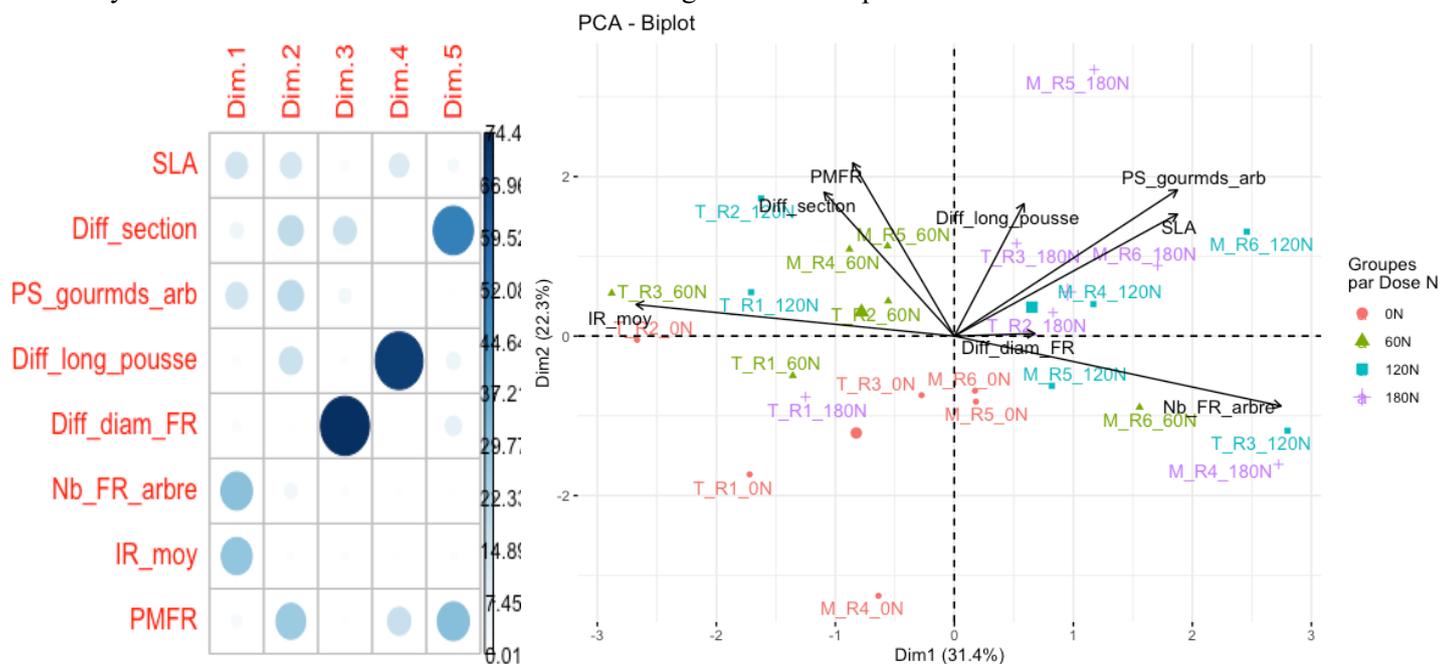


Figure 31 : Regroupement des variables et individus de l'ACP analysant les corrélations entre indices de croissance végétative et composantes du rendement

6. Evaluation des méthodes non destructives de mesures de l'azote foliaire par rapport aux dosages de laboratoire de l'azote total des feuilles

Les mesures par spectroscopie et par SPAD ont été réalisées au cours de la saison entre fin mai et fin juillet pour évaluer l'évolution des états de nutrition azotée en fonction des doses N. Les valeurs SPAD ont progressivement augmenté au cours de la saison, indiquant une augmentation de la concentration en chlorophylle et/ou de la masse surfacique (inverse de la SLA qui décline au cours du temps comme montré fig. 16) dans les feuilles pour toutes les doses N. L'augmentation des valeurs SPAD était progressive en fonction des doses N (fig. 32). Pour la dose 120N, les valeurs SPAD oscillent entre 34,7 (mi-mai), 39,2 (mi-juin) et 42,9 (mi-juillet). Les valeurs SPAD commencent à se différencier statistiquement entre les doses N à partir de juin comme les teneurs en N foliaires. Le SPAD ne montre une distinction des valeurs sur l'ensemble des dates seulement entre la non fertilisation et les autres doses.

Une distinction des valeurs SPAD est bien marquée lors de la dernière date de mesure le 20/07 (fig. 33). A cette période, les mesures par SPAD semblent bien estimer les états azotés des arbres par une corrélation marquée avec les teneurs en N foliaire obtenues par analyses en laboratoire ($p\text{-value} = 3,28 \text{ e-}07$; $R^2 = 0,70$).

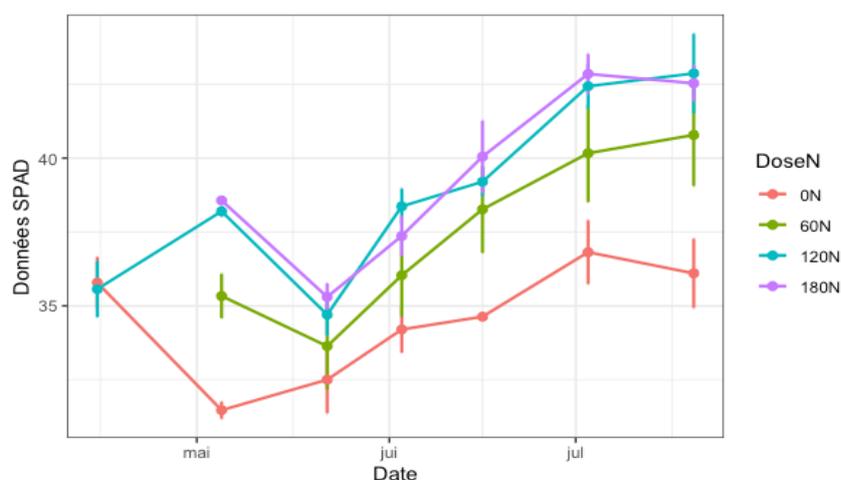


Figure 32 : Évolution des mesures par SPAD par dose N

Les courbes représentent les moyennes des valeurs SPAD par dose N pour chaque date de mesure. Les barres verticales représentent les écarts-type.

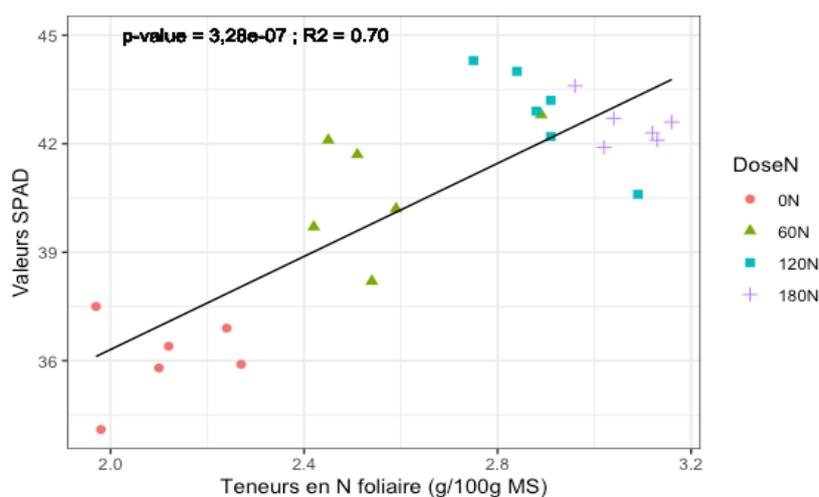


Figure 33 : Régression linéaire des valeurs SPAD du 20/07 en fonction des teneurs en N foliaire (en g/100g MS)

Néanmoins, les données issues des mesures SPAD sur l'ensemble des dates ont une faible corrélation avec les valeurs des teneurs en N foliaire obtenues en laboratoire (10% de corrélation). La corrélation entre données SPAD et teneurs en N foliaire augmente avec les états de nutrition azotée élevés. Les corrélations entre valeurs SPAD et teneurs en azote foliaire augmentent avec les doses N en passant de 22% pour la dose 0N, à 46%, 74% et 83% respectivement pour les doses 60N, 120N et 180N. Les mesures pour la modalité 0N sont beaucoup plus dispersées par rapport aux autres dates (Annexe 6 fig. 1). Les moyennes de SPAD supérieures à 40 pour les doses 60N et plus en juillet sont cohérentes avec les résultats des données SPAD de Rubio-Covarrubias et al. (2009) donnant des moyennes de 42,2 et 40,4 sur deux ans pour un apport de 72 kg N/ha sur pêchers.

L'analyse des spectres de réflectance par proche infrarouge montre d'abord deux regroupements des spectres par date, le premier entre les dates du 22/05 et du 03/06 et le deuxième entre les trois autres dates ultérieures (Annexe 6 fig. 2). Nous nous concentrerons sur l'analyse des effets des doses N sur les spectres de réflectance sur les dernières dates de mesures qui ont montré les différenciations les plus marquées pour les teneurs en N foliaire et les valeurs SPAD.

Sur les trois dernières dates de mesures (le 16/06, le 03/07 et le 20/07), les spectres sont principalement regroupés par date pour une dose d'azote. Par contre, le facteur dose N n'entraîne pas de regroupement de spectres pour plusieurs dates (Annexe 6 fig. 3).

Plusieurs modèles mettant en relation les spectres aux données des dosages labo de l'azote foliaire ont été représentés. Les différents modèles sont basés sur une transformation des spectres (spectres bruts, lissés, ligne de base corrigé).

La correction de la ligne de base avec le lissage des spectres donne le meilleur modèle sur l'ensemble des dates de mesures de la campagne. Le coefficient de direction (R^2) du modèle prenant en compte les spectres et les teneurs en N foliaire était de 53% pour une erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP) de 0,286 pour un modèle basé sur 5 dimensions (fig. 34). Le modèle n'est pas amélioré si on ne sélectionne les données que sur les trois dernières dates de mesures alors que les teneurs en azote foliaire étaient davantage différenciées entre les doses N.

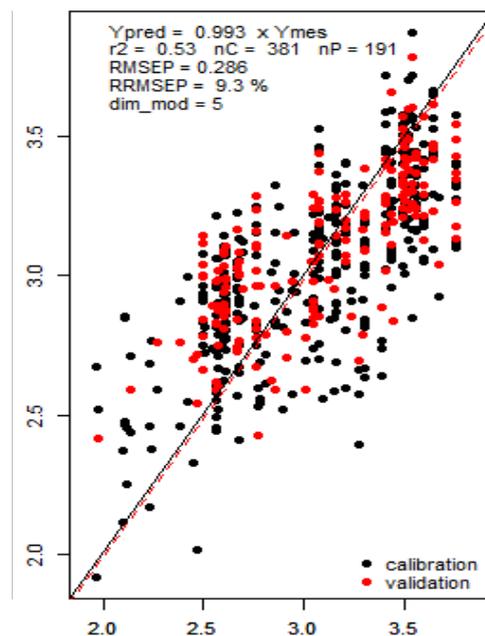


Figure 34 : Régression linéaire entre données obtenues par SPIR et teneurs en azote foliaire mesurées en laboratoire selon un modèle construit avec un lissage des spectres pour 5 dimensions sur l'ensemble des dates de mesures

Source : Borg, 2020, document interne

Les modèles mettant en relation les spectres aux indices SPAD fournissent de meilleur taux de corrélation que les modèles intégrant les dosages d'azote foliaire. La correction de ligne de base à partir des spectres bruts donne le meilleur modèle avec un coefficient de direction (R^2) de 69% et un RMSEP de 1.644 pour un modèle comprenant huit dimensions. Le modèle n'est pas amélioré si on ne sélectionne les données que sur les trois dernières dates de mesures (Annexe 6 fig. 4).

Discussion

1. Comparaison des systèmes de culture

1.1. Performances environnementales

Les analyses de performances environnementales des systèmes montrent que les objectifs de réduction sur les systèmes économes ont été atteints avec une réduction supérieure à -80% des IFT de synthèse et des réductions de l'ordre de 20 à 30% des intrants par rapport au système de référence. Seules les quantités d'irrigation ont été moins réduites sur le S3-Eco2 (-18% par rapport aux doses du S1-REF), afin de permettre une bonne installation des pieds de menthe au cours de la saison.

Cependant, l'année 2020 constitue la première année où les deux systèmes économes ont eu des performances agronomiques et économiques inférieures à celle du système de référence (Plénet et al., 2019 ; Plénet et Borg 2020).

La nette réduction des IFT chimique sur les systèmes Eco (-95%) a été en partie permise par une substitution par certains produits de biocontrôle. Les règles de décision visant une non utilisation de PPP de synthèse remplacés par des produits de biocontrôle et des seuils d'intervention plus souples sur les systèmes Eco ont permis de faire l'impasse sur certaines interventions. La non utilisation de pesticides de synthèse sur les systèmes Eco concernant la régulation des pucerons, avec seulement l'utilisation d'huile blanche au stade hivernant a entraîné des infestations nettement supérieures sur les systèmes Eco par rapport au système REF. Mais les infestations de pucerons n'ont pas été aussi marquées par rapport à celles de l'année précédente avec 15% des pousses touchées lors du pic d'infestation début juin contre plus de 90% en pour le pic de 2019.

1.2. Indicateurs de croissance et agronomiques

Les indicateurs de croissances de pousses ne montrent pas de différences marquées entre les systèmes.

Les rendements bruts et commercialisables sont nettement inférieurs sur le S2-Eco1 et le S3-Eco2 par rapport au S1-REF. Ces différences de rendements sont reliées à des charges en fruits inférieures sur les arbres des deux systèmes Eco. Ces différences de charges ont été induites par les floribondités inférieures sur les deux systèmes Eco suite aux attaques de pucerons de 2019 (Turpeau et al., 2010). Ces attaques ont pu également réduire les réserves en nutriments faite en automne suite à la perte des feuilles après les infestations (Jordan 2015). De plus, le gel de fin mars 2020 a davantage réduit le taux de nouaison des fruits sur les rangs les plus abrités du vent sur les deux systèmes Eco. D'autre part, les stratégies de protection visant à très fortement réduire l'usage de PPP de synthèse et les impasses sur des interventions sur les systèmes Eco ont entraîné des dégâts supplémentaires par rapport au S1-REF. Les pourcentages de pertes en fruits récoltés étaient de 42% sur les systèmes Eco contre 26% sur le S1-REF. Les infestations des fruits par des tordeuses orientales du pêcher ont été nettement supérieures sur les systèmes Eco du fait de l'impasse sur les produits de confusion de sexuelle sur ces systèmes suite à l'impossibilité d'approvisionnement pendant le confinement. Les poids moyen d'un fruit ont augmenté sur les trois systèmes par rapport à 2019, certainement dû à la très faible charge en fruits par rapport à 2019 comme l'indique Rufat et DeJong (2001). En revanche, les faibles charges en fruits ont pu être à l'origine de l'augmentation du nombre de fruits pourris en partie dû aux monilioses. La croissance des fruits étant plus rapide avec des charges faibles, les fruits se fissurent davantage favorisant le développement des monilioses (Xu et al., 2001). Le manque d'efficacité du produit de biocontrôle à base de levures vivantes sur les systèmes Eco en substitution du fongicide de synthèse sur S1-REF peut également être à l'origine des plus fortes pertes de fruits pourris sur les systèmes Eco (5,4% de pertes sur le S1-REF contre 6,1% sur S2-Eco1 et 13,9% sur S3-Eco2). La forte augmentation du nombre de fruits pourris sur le S3-Eco2 peut également provenir des doses d'irrigation qui ont été moins réduites par rapport au S2-Eco1 et des différences de systèmes d'irrigation (goutte à goutte sur S2 vs microjet sur S3) qui peuvent modifier le microclimat du verger.

2. Essai factoriel – fertilisation azotée et plantes de service

2.1. Différenciation de la FA et statut azoté des arbres

Le niveau d'azote foliaire a suivi l'augmentation des apports en azote. Le niveau de nutrition azotée des arbres a donc été affecté par la différenciation des apports en azote de la même année. L'évolution des quantités de nitrates retrouvées au sein de l'horizon 30-60 cm indique une assez faible migration des nitrates de l'horizon supérieur (0-30 cm) vers l'horizon 30-60cm même sur les doses de fertilisation élevées à l'exception de la date

du 27 mai. Ceci semble indiquer l'absence de lixiviation des nitrates au cours de période de croissance végétative. De même, les suivis des concentrations en nitrates dans l'horizon 0-30 cm semblent indiquer que les quantités d'azote apportées par la fertilisation ont été pratiquement absorbées au fur et à mesure des apports. L'augmentation des quantités de nitrates dans le sol pour les plus fortes doses d'apport semble montrer que l'offre était supérieure à la demande pour la dose 180 kg N/ha voire aussi pour la dose 120 kg N/ha. Les évolutions des quantités de nitrates dans le sol pourraient être comparées à celles de l'an prochain afin de les relier aux indicateurs de nutrition azotée mais également d'évaluer les mises en réserve en N des arbres pour chaque dose N.

Les dynamiques des teneurs en azote foliaire ont montré que les teneurs étaient les plus fortes au moment où les concentrations en nitrates dans le sol étaient encore élevées vers le 20 mai. Les quantités d'absorption de l'azote ont ensuite augmenté à partir de juin. Les teneurs en azote foliaire pour les doses 120 et 180N étaient maximales vers la fin mai avec environ 3,5% d'azote total puis ont diminué pour atteindre environ 3% le 20 juillet, démontrant une redistribution de l'azote foliaire vers les autres organes végétatifs et les fruits (Lobit et al. 2001 ; Policarpo et al. 2002). Les teneurs en azote foliaire le 20 juillet étaient respectivement de 2,11%, 2,57%, 2,90% et 3,07% pour les doses 0N, 60N, 120N et 180N. Les niveaux de teneurs en N foliaire autour de 3% d'azote total indiquent un état de nutrition azotée optimal pour le maintien des performances des arbres signifiant que les doses 120 et 180N permettaient un état de nutrition azotée correct (Crisosto et Costa 2008). La baisse significative de la teneur en azote foliaire pour les doses 0N montre que la nutrition azotée de ces arbres a été directement affectée par l'arrêt de la FA cette année. Les carences en N et la baisse des indicateurs de vigueur des arbres devraient être davantage marquées pour cette dose dans la poursuite de l'expérimentation l'an prochain.

2.2. Effets de la PdS sur la disponibilité en azote et les infestations de pucerons

Même si les quantités de nitrates dans le sol présentaient une différence sur l'ensemble des dates pour le facteur PdS, la menthe n'a pas modifié la disponibilité en azote pour les arbres comme l'indique les teneurs en N foliaire. Cette différence des quantités de nitrates est due à la variabilité inter-rangs au sein du dispositif. Les rangs avec PdS n'ont pas entraîné de différence sur les teneurs en azote foliaire et sur les indicateurs de croissance des arbres. Par exemple, le facteur Menthe n'a pas concurrencé la dynamique de croissance des gourmands ou des pousses. Or la longueur et le nombre de pousses sont fortement impactés par l'état de nutrition azotée de l'arbre (Lobit et al., 2001). La menthe ne semble pas avoir eu d'effet compétitif sur la vigueur de l'arbre en général du fait de son faible développement encore à la période de la taille en vert fin juin.

La menthe n'a pas eu d'effet sur les infestations de pucerons. Ayant été plantés tardivement (mi-mai), les pieds de menthe n'étaient pas assez développés pour avoir un effet répulsif sur les pucerons qui étaient déjà installés sur certains arbres. Les émissions de COV et les effets répulsifs potentiels de la menthe pourront être mesurés sur les vols retour des pucerons à l'automne et sur les infestations de la saison suivante dont les premiers foyers seront à surveiller dès leur apparition. Il serait également intéressant de mesurer les dégâts causés par les infestations de pucerons de cette année sur la floribondité et la croissance des pousses lors de la prochaine saison.

2.3. Effet de la nutrition azotée sur les infestations de pucerons

Bien que plusieurs études confirment qu'un fort développement végétatif des pousses lié à des niveaux élevés de fertilisation azotée favorise un nombre de pucerons verts du pêcher plus important par arbre (Jordan et al., 2019 ; Rousselin et al., 2016) ; les infestations de pucerons au sein du dispositif n'ont pas été corrélées aux différents statuts azotés des arbres. Cette différence de résultats par rapport aux autres études peut être expliquée par le fait que les différenciations des doses N n'ont débuté qu'à partir de mi-avril alors que les premières infestations de pucerons noirs et cigariers avaient déjà été constatées sur le verger. De plus, la différenciation de l'azote foliaire entre doses N n'est observée qu'à partir de mi-mai. Ensuite, ces espèces de pucerons n'ont pas fait l'objet d'études concernant les effets de la croissance végétative sur leur développement contrairement au puceron vert du pêcher. Enfin, les infestations de cette année étaient davantage localisées, contrairement à l'année 2019 où les niveaux d'infestations de pucerons étaient plus ou moins homogènes au sein du S3-Eco2, les infestations de cette année étaient davantage localisées. Les infestations les plus sévères ont été observées sur les rangs de bordure, qui sont les plus accessibles pour les vols retour de pucerons verts à l'automne venant de l'extérieur du verger et les vols de dissémination au printemps.

2.4. Réponses des indicateurs de croissance des arbres à la nutrition azotée

Tous les indicateurs de croissance des arbres n'ont pas répondu de la même manière aux variations des doses d'azote. La croissance des pousses et des gourmands ou le nombre de feuilles par pousse ont été davantage affectés par l'augmentation des doses N que la surface foliaire spécifique ou la circonférence des troncs indiquant que ces organes sont moins sensibles à des variations de la nutrition azotée (Lobit et al., 2001). Une différenciation des circonférences des troncs pourrait être observée lors de la campagne suivante car l'azote foliaire est principalement remobilisé avant la sénescence des feuilles à l'automne (Policarpo et al. 2002). La surface des feuilles et leur poids répondent moins aux variations de la nutrition azotée de l'arbre et peuvent être influencées par d'autres variables (ensoleillement, état hydrique, âge) (DeJong et Doyle 1985). Néanmoins une non fertilisation devrait entraîner une réduction des surfaces foliaires dans le temps (Nii et al., 1993).

La poursuite des mesures sur les indicateurs de croissance des arbres permettrait de préciser les réponses de chaque organe aux variations de fertilisation. Les croissances des diamètres des troncs pourraient par exemple se différencier l'an prochain entre la dose 0N et les autres doses (Rubio-Covarrubias et al., 2009).

2.5. Mesures non destructives du statut azoté des arbres

Les deux méthodes de mesures des spectres de réflectance émis par les feuilles (SPAD et SPIR) permettent de donner une estimation rapide de la nutrition azotée au cours du temps sans entraîner une destruction des feuilles ni des préparations chronophages des échantillons requises pour les analyses des dosages en laboratoire.

Les mesures SPAD qui affichent directement un indice de la teneur en chlorophylle des feuilles ont procuré une estimation moyennement corrélée aux teneurs en N foliaire déterminées en laboratoire, même si ces mesures permettent d'évaluer les variations de l'azote foliaire au cours du temps pour des apports azotés très différenciés. Ces mesures permettent toutefois de prédire un état de la nutrition azotée au cours du temps. Les corrélations étaient les meilleures pour des concentrations foliaires élevées. Néanmoins, les données SPAD n'ont pas exprimé de différence entre les doses élevées de N (120 et 180N) reflétant leur manque de précision pour identifier un excès de la nutrition azotée à partir de la teneur en chlorophylle des feuilles (Rubio-Covarrubias et al., 2009). La qualité prédictive des états de nutrition azotée varie au cours du temps mais semble meilleure en fin de période de croissance végétative. Les valeurs SPAD pour la dose 120N qui a entraîné des niveaux de teneurs en N foliaire corrects, oscillent entre 34,7 mi-mai et 42,87 mi-juillet. Selon Rubio-Covarrubias et al. (2009), les valeurs SPAD pour des apports de 72 et 145 kg N/ha étaient en moyenne de 40,5 et 42,5 en juillet pour des pêchers âgés de 3 ans. Néanmoins, ces valeurs ne peuvent pas être généralisées à d'autres variétés de pêchers car la teneur en chlorophylle et la couleur des feuilles est particulière à chaque variété (Guénette 2003). Les mesures SPAD permettent d'évaluer l'état azoté d'un arbre notamment lorsque les teneurs en N foliaires sont élevées, ainsi cette méthode apporterait aux producteurs un moyen facile d'usage pour analyser les besoins en azote des arbres dans la saison tout en prenant en compte la variabilité des états de nutrition azotée au sein du verger.

Les mesures par SPIR ont été assez variables en fonction des teneurs en azote foliaire obtenues par les analyses en laboratoire. Les teneurs en N foliaire les plus élevées fournissent les meilleures corrélations entre SPIR et dosages au laboratoire. Néanmoins, la fiabilité des estimations de N foliaire à partir des spectres diminue pour des feuilles ayant reçu de faibles doses d'azote (0 et 60N). Les mesures par SPIR présentent un potentiel pour modéliser les dynamiques de l'azote des feuilles mais aussi du taux de N dans les autres organes au cours d'une saison et également pour réaliser des prévisions en fonction de la quantité d'apport azoté. Cependant, la fluctuation des teneurs en azote foliaire au cours du temps ne permet pas d'identifier précisément les excès de nutrition azotée (Rubio-Covarrubias et al., 2009).

La robustesse des mesures par SPIR pour évaluer le niveau de nutrition azotée pour une large gamme de doses de FA pourrait être améliorée avec une nouvelle campagne de mesures l'an prochain en conservant ces niveaux de différenciation des apports azotés. Néanmoins, des apports élevés en azote (>200 kg N/ha) entraînent peu de variation de l'azote foliaire entre les années ce qui réduirait les gammes de résultats des SPIR (Rubio-Covarrubias et al., 2009). D'autre part, la précision des mesures de l'état azoté à partir de mesures de réflectance peut être affectée par plusieurs facteurs comme la masse surfacique des feuilles (Jifon et al., 2005) ou encore d'autres nutriments retrouvés dans les feuilles comme le Fer et le Manganèse qui peuvent modifier la teneur en chlorophylle (Atkinson 1997). Les protocoles de mesures SPAD et SPIR devraient être normalisés

comme lors des mesures de l'expérimentation dans le cadre d'une généralisation de l'utilisation de ces méthodes d'estimation de l'état azoté.

2.6. Effets la nutrition azotée et de la croissance végétative sur les indicateurs de production des fruits

Bien que les différences de diamètre des fruits entre les doses n'étaient pas significatives, les tendances montrant des diamètres plus gros sur les dernières dates de mesures des fruits pour les doses 0 et 60N pourraient être dues aux charges en fruits par arbre qui sont légèrement plus faibles pour ces arbres (Rufat et DeJong 2001 ; Rubio-Covarrubias et al., 2009).

Les doses N n'ont donc pas entraîné de différence de rendements au sein du dispositif. Une forte variabilité des rendements a par contre été constatée entre les rangs, certainement suite aux pertes en fruits très hétérogènes induites par le gel. Les rendements étaient notamment plus faibles sur les deux premiers rangs qui sont les plus à l'abri du vent. Daane et al. (1995) indiquent qu'une non fertilisation de pêchers sur huit ans entraînait des baisses de rendements par rapport aux arbres fertilisés. Mais la FA n'est pas le seul facteur qui affecte les rendements. Les rendements sont directement déterminés par la charge en fruits par arbre et par la densité d'arbre par parcelle. La réponse à la FA dépend également de l'offre du sol en matière organique et des réserves en N et C de l'arbre (Jordan 2015). Néanmoins, des apports en azote supérieurs à 112 kg/ha par an avec des conditions d'éléments nutritifs du sol favorables n'entraînaient pas d'augmentation des rendements (Daane et al., 1995). Ainsi, les effets de la différenciation des apports azotés sur les rendements pourraient être constatés après plusieurs années d'expérimentation.

Les doses 60N ont montré des indices réfractométriques moyens supérieurs par rapport aux autres doses, en particulier par rapport à la dose 180N. Bien qu'une tendance semblant montrer que des rendements élevés par arbre entraîneraient une diminution des IR moyens, les rendements entre les doses 60 et 180 N ne sont pas significativement différents. Néanmoins, plusieurs études indiquent que des niveaux sub-optimaux de fertilisation azotée (>110 kg N/ha) peuvent réduire la vitesse de maturation des fruits et donc réduire leur concentrations en sucres (Daane et al., 1995 ; Ames et al., 2020).

Conclusion

L'essai système a été particulièrement impacté cette année pour différentes raisons. Les performances agronomiques des systèmes économes ont été réduites par les fortes infestations de pucerons de 2019 mais également par le gel de printemps, ce qui a compromis l'analyse des dégâts infligés par les pucerons. Les niveaux d'IFT de synthèse ont été drastiquement réduits (-95%) mais les pertes en fruits récoltés ont été fortement marquées sur les systèmes économes. Ces pertes sont en partie expliquées par les faibles charges en fruits des arbres sur ces systèmes mais aussi par les impasses sur des interventions dont certaines ont été imposées suite aux conséquences du confinement due à l'épidémie de Covid-19. Le maintien d'une nutrition élevée pour favoriser la croissance végétative devrait rétablir les performances agronomiques des systèmes économes l'année suivante si le contrôle des bioagresseurs est assuré.

Au sein de l'expérimentation factorielle testant les leviers bottom-up visant à contrôler les infestations de pucerons sur un système économe ; l'introduction de menthe poivrée comme plante de service sur le rang et la différenciation des statuts azotés des arbres au sein du dispositif n'ont pas produit d'effet sur les populations de pucerons. Cette inefficacité de la menthe et de la variation de la fertilisation azotée sur ces premiers mois d'expérimentation est certainement due au retard dans l'initiation de l'expérimentation suite au confinement. L'introduction de la menthe dans le verger a été retardée entraînant un faible développement encore en juillet. De même, les différenciations des statuts azotés des arbres n'ont été marquées qu'à partir de mai alors que les premières populations de pucerons noirs et cigariers étaient déjà installées.

La différenciation des apports de fertilisation azotée a permis d'évaluer les dynamiques de l'absorption d'azote par les arbres dont le pic se situait vers le début du mois de juin.

Les états de l'azote foliaire ont également été affectés par la différenciation de la fertilisation. Les mesures des états de nutrition azotée par des méthodes rapides faites sur le terrain par SPAD 502 et par SPIR ont bien représenté les dynamiques des teneurs en azote foliaire au cours de la saison. Néanmoins, ces méthodes n'étaient pas suffisamment corrélées aux mesures de l'azote foliaire obtenues par dosage en laboratoire en particulier pour des arbres aux statuts azotés faibles. Pour le moment le SPAD semble la méthode non destructive la plus simple d'utilisation tout en donnant une bonne estimation des états de nutrition azotée. Néanmoins, les valeurs SPAD obtenues ne sont pas généralisables pour d'autres variétés de pêcheurs et ne permettent pas d'identifier des excédents de nutrition azotée. La poursuite de l'expérimentation devrait fournir des échantillons plus larges avec des gammes de variation de nutrition azotée plus prononcées ce qui devrait améliorer la précision des modèles obtenus par SPIR et permettre de comparer les valeurs obtenues par SPAD à celle de cette année pour différents niveaux de nutrition azotée.

Les effets de la différenciation des doses d'azote sur les indicateurs de croissance végétative ont été davantage marqués sur certains organes annuels. Les croissances des troncs pourraient être marquées dès la saison prochaine. Les effets de la FA sur les rendements pourraient apparaître à plus long terme car les rendements sont indirectement impactés par la nutrition azotée qui réduit la croissance de l'arbre et ses réserves en N et C. La dose 120N a présenté de bons indicateurs de croissance des arbres. Les quantités d'azote dans le sol pour cette dose étaient régulièrement absorbées par les arbres et les valeurs des teneurs en azote foliaire correspondaient aux valeurs optimales citées dans la littérature. Ainsi, si les arbres recevant ces apports de 120 kg N/ha continuent à produire de bonnes performances l'an prochain ; les résultats de l'expérimentation pourraient représenter un argument favorable aux réductions de la fertilisation azotée pour des producteurs ayant des vergers dans des conditions de culture similaires.

La poursuite de l'expérimentation testant ces deux leviers bottom-up sur les infestations des pucerons s'attachera à évaluer s'il existe un compromis entre régulation des pucerons et performances du verger sur le long terme. Il sera notamment nécessaire de mesurer l'émission des COV par les menthes. Pour évaluer les effets de ces deux leviers sur les pucerons, des mesures des vols retours des pucerons à l'automne et du développement des premiers foyers en fin d'hiver devront être réalisées afin de mieux évaluer la dispersion et le développement de chaque espèce de pucerons. Les pucerons cigariers et farineux qui sont les plus problématiques sur le verger d'Avignon font l'objet de peu de recherches alors qu'un manque de connaissances réside sur le développement de ces pucerons en verger et sur l'efficacité des deux leviers testés. D'autre part, la variabilité spatiale des résultats au sein du dispositif, en particulier sur les performances agronomiques des

arbres et sur les infestations de pucerons, nécessite d'intégrer les effets de la disposition des placettes au sein du verger dans la suite des analyses.

Bibliographie

- Agreste. 2019. « Au 1er septembre 2019, production de pêches en-dessous de la moyenne et chiffre d'affaires national en hausse sur un an - Pêche Septembre - n°2019-129 ».
- Agreste, L Cretin, et A Triquenot. 2018. « Apports de produits phytopharmaceutiques en arboriculture : nombre de traitements et indicateur de fréquence de traitements. Agreste Les Dossiers, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, août 2018, n° 43, 27 p. »
- Agroressources. 2019. « Nitracheck, pour tester l'azote rapidement ». *Agro-Ressources vente de matériel pour l'agriculture* (blog). 2019. <https://www.agroressources.com/nitracheck-pour-tester-lazote-rapidement/>.
- Agroscope Occitanie, et Agreste. 2019. « Pratiques culturales phyto-fruits 2015 Pêchers ».
- Ahmadi, K. 2018. « Effets des pratiques économes en produits phytosanitaires et en intrants sur l'élaboration de la qualité des fruits et leur sensibilité aux monilioses en pré et post-récolte dans les vergers de pêche-nectarine ». Mémoire de stage. INRA PSH.
- Ames, Z. Rubio, J. Brecht, K. et Mercy A. Olmstead. 2020. « Nitrogen Fertilization Rates in a Subtropical Peach Orchard: Effects on Tree Vigor and Fruit Quality ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100 (2): 527-39. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10031>.
- Atkinson, D. 1997. « The optimisation of the supply of mineral nutrients to fruit trees through diagnosis ». *Acta Horticulturae*, no 448 (octobre): 307-16. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.448.56>.
- Bastianelli, D. Bonnal, L. Juin, H. Mignon-Grasteau, S. Davrieux, F. et Carré, B. 2010. « Prediction of the Chemical Composition of Poultry Excreta by near Infrared Spectroscopy ». *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 18 (1): 69-77. <https://doi.org/10.1255/jnirs.864>.
- Ben Issa R, Gautier H. et Gomez L. 2017. « Influence of Neighbouring Companion Plants on the Performance of Aphid Populations on Sweet Pepper Plants under Greenhouse Conditions: Effectiveness of Companion Plant under Greenhouse ». *Agricultural and Forest Entomology* 19 (2): 181-91. <https://doi.org/10.1111/afe.12199>.
- Bussi, C., J. G. Huguet, J. Besset, et H. Defrance. 1992. « Soil management, nitrogen fertilization and tree density in peach-trees orchard irrigated with microaspersion ». *Fruits (France)*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR9600684>.
- Cabrol, M. 2019. « Etude de l'effet de plantes de service sur la dynamique de population du puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea*) et de ses ennemis naturels. » Mémoire de stage. INRA PSH.
- Chambre d'agriculture Occitanie. 2012. « Les pucerons du pêcher, de l'abricotier et du cerisier - SudArbo, Fiches Techniques 2012 ».
- Clark, R. J., et R. C. Menary. 1980. « The Effect of Irrigation and Nitrogen on the Yield and Composition of Peppermint Oil (*Mentha Piperita* L.) ». *Australian Journal of Agricultural Research* 31 (3): 489-98. <https://doi.org/10.1071/ar9800489>.
- Crisosto, C. H., et G. Costa. 2008. « Preharvest Factors Affecting Peach Quality. » In *The Peach: Botany, Production and Uses*, édité par D. Layne et D. Bassi, 536-49. Wallingford: CAB. <https://doi.org/10.1079/9781845933869.0536>.
- Daane, Kent M., R. Scott Johnson, Themis J. Michailides, Carlos H. Crisosto, Jeff W. Dlott, Hugo T. Ramirez, Glenn Y. Yokota, et Dave P. Morgan. 1995. « Excess Nitrogen Raises Nectarine Susceptibility to Disease and Insects ». *California Agriculture* 49 (4): 13-18. <https://doi.org/10.3733/ca.v049n04p13>.
- Dardouri, Tarek. 2018. « Implication des composés organiques volatils dans la capacité des plantes de service à perturber le comportement et les performances de *Myzus persicae* (Sulzer), le puceron vert du pêcher ». Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Dedryver, C-A, Le Ralec, A. et Fabre, F. 2010. « The Conflicting Relationships between Aphids and Men: A Review of Aphid Damage and Control Strategies ». *Comptes Rendus Biologies* 333 (6-7): 539-53. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.03.009>.
- DeJong, T. M., et J. F. Doyle. 1985. « Seasonal Relationships between Leaf Nitrogen Content (Photosynthetic Capacity) and Leaf Canopy Light Exposure in Peach (*Prunus Persica*) ». *Plant, Cell & Environment* 8 (9): 701-6. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11611823>.
- Delaygue, O, A Blin, C Trontin, et S Dallot. 2016. « Plus pox virus - la Sharka, bilan de surveillance en 2016. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. »
- Elmore, Andrew J, John F Mustard, Sara J Manning, et David B Lobell. 2000. « Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index », 16.

- Gómez-Casero, M. Teresa, Francisca López-Granados, José M. Peña-Barragán, Montserrat Jurado-Expósito, Luis García-Torres, et Ricardo Fernández-Escobar. 2007. « Assessing Nitrogen and Potassium Deficiencies in Olive Orchards through Discriminant Analysis of Hyperspectral Data ». *Journal of the American Society for Horticultural Science* 132 (5): 611-18. <https://doi.org/10.21273/JASHS.132.5.611>.
- Grechi I, Sauge M-H, Sauphanor B, Hilgert N, Senoussi R et Lescourret F. 2008. « How Does Winter Pruning Affect Peach Tree- *Myzus Persicae* Interactions? » *Entomologia Experimentalis et Applicata* 128 (3): 369-79. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2008.00720.x>.
- Guénette. C. 2003. « Evaluation du potentiel de l'Infrarouge spatial pour la détection hâtive du stress nutritif chez les végétaux en grandes cultures - Application à la culture de la pomme de terre » Université Laval.
- Habib, R. 1983. « La formation des réserves azotées chez les arbres fruitiers - Revue bibliographique ». In , 117-40.
- Habib R. 1987. « Effet de la disponibilité en nitrate sur le comportement de jeunes pêcheurs en culture hydroponique ». *Agronomie* 7 (2): 101-9. <https://doi.org/10.1051/agro:19870205>.
- Havard, M, A Alaphilippe, V Deytieux, V Estorgues, B Labeyrie, D Lafond, J.M Meynard, et al. 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 culture innovants, GIS Relance Agronomique, 172 pages. »
- Hori, M. 1999a. « Antifeeding, Settling Inhibitory and Toxic Activities of Labiate Essential Oils against the Green Peach Aphid, *Myzus Persicae* (Sulzer) (Homoptera : Aphididae) ». *Applied Entomology and Zoology* 34 (1): 113-18. <https://doi.org/10.1303/aez.34.113>.
- Hori, M. 1999b. « Role of host plant odors in the host finding behaviors of aphids », *Appl. Entomol. Zoo.*, n° 34 (3): 293-98.
- Ikeura, H. Kobayashi, F. et Hayata, Y. 2012a. « Repellent Effect of Herb Extracts on the Population of Wingless Green Peach Aphid, *Myzus Persicae* Sulzer (Hemiptera: Aphididae) ». *Journal of Agricultural Science* 4 (5). <https://doi.org/10.5539/jas.v4n5p139>.
- Ikeura, H. 2012b. « Repellent Effect of Herb Extracts on the Population of Wingless Green Peach Aphid, *Myzus Persicae* Sulzer (Hemiptera: Aphididae) ». *Journal of Agricultural Science* 4 (5). <https://doi.org/10.5539/jas.v4n5p139>.
- Jado, Rana Hasan, Salah-Eddin Araj, Barakat Abu-Irmaileh, Morgan W. Shields, et Steve D. Wratten. 2019. « Floral Resources to Enhance the Potential of the Parasitoid *Aphidius Colemani* for Biological Control of the Aphid *Myzus Persicae* ». *Journal of Applied Entomology* 143 (1-2): 34-42. <https://doi.org/10.1111/jen.12556>.
- Jifon, John L., James P. Syvertsen, et Eric Whaley. 2005. « Growth Environment and Leaf Anatomy Affect Nondestructive Estimates of Chlorophyll and Nitrogen in Citrus Sp. Leaves ». *Journal of the American Society for Horticultural Science* 130 (2): 152-58. <https://doi.org/10.21273/JASHS.130.2.152>.
- Jordan, M-O. 2015. « C Depletion and Tree Dieback in Young Peach Trees: A Possible Consequence of N Shortage? » *Annals of Forest Science* 72 (5): 529-37. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0466-9>.
- Jordan M-O, Sauge M-H et Vercambre G. 2019. « Chemical and Growth Traits of the Peach Tree May Induce Higher Infestation Rates of the Green Peach Aphid, *Myzus Persicae* (Sulzer) ». *Pest Management Science* 76 (2): 797-806. <https://doi.org/10.1002/ps.5583>.
- Labomoderne. 2012. « Analyseur d'azote méthode de Dumas ». 2012. https://www.labomoderne.com/gammes/pdf/labomoderne2012_p0545.pdf.
- Lobit, P., P. Soing, M. Genard, et R. Habib. 2001. « Effects of Timing of Nitrogen Fertilization on Shoot Development in Peach (*Prunus Persica*) Trees ». *Tree Physiology* 21 (1): 35-42. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.1.35>.
- Médiène, S, L Pagès, Jordan M-O, Le Bot J, et Adamowicz S. 2002. « Influence of nitrogen availability on shoot development in young peach trees [*Prunus persica* (L.) Batsch] », 2002, Springer-Verlag édition.
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2019. « Plan EcoPhyto II+ ».
- Muñoz, N, J Guerri, F Legaz, et E Primo-millo. 1993. « Seasonal uptake of 15 N-nitrate and distribution of absorbed nitrogen in peach trees ». 1993. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00013023>.
- Neilsen, Denise, Eugene J. Hogue, Gerald H. Neilsen, et Peter Parchomchuk. 1995. « Using SPAD-502 Values to Assess the Nitrogen Status of Apple Trees ». *HortScience* 30 (3): 508-12. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.3.508>.
- Nii, Naosuke, Maki Kato, Yuki Hirano, et Tooru Funaguma. 1993. « Starch Accumulation and Photosynthesis in Leaves of Young Peach Trees Grown under Different Levels of Nitrogen Application. » *Engei Gakkai Zasshi* 62 (3): 547-54. <https://doi.org/10.2503/jjshs.62.547>.

- Piccaglia, R., et M. Marotti. 1993. « Characterization of Several Aromatic Plants Grown in Northern Italy ». *Flavour and Fragrance Journal* 8 (2): 115-22. <https://doi.org/10.1002/ffj.2730080208>.
- Plénet, D, C Hilaire, Ph Blanc, J Borg, S Borne, C Bussi, V Gallia, et al. 2019. « EcoPêche. Conception et évaluation multisite de vergers de pêche – nectarine économes en produits phytopharmaceutiques et en intrants ».
- Plénet, D. et Borg J. 2019. « EcoPêche : Conception et évaluation multisite de vergers de pêche – nectarine économes en produits phytosanitaires et en intrants », 28.
- Policarpo, Michelangelo, Luigi Di Marco, Tiziano Caruso, et Paola Gioacchini. 2002. « Dynamics of Nitrogen Uptake and Partitioning in Early and Late Fruit Ripening Peach (*Prunus Persica*) Tree Genotypes under a Mediterranean Climate », 8.
- Réseau DEPHY. 2018. « Le Memento du réseau DEPHY - Version pour le réseau EXPE ». ECOPHYTO DEPHY.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, et D.W. Deering. 1974. *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration.
- Rousselin, A. 2017. « Contribution Des Pratiques Culturelles (Irrigation et Fertilisation Azotée) à La Gestion Des Populations de Pucerons En Verger Fruitier: Cas Des Systèmes Pêcher - Puceron Vert Du Pêcher (*Prunus Persica* - *Myzus Persicae*) et Pommier - Puceron Cendré (*Malus Domestica* - *Dysaphis Plantaginea*) », 144.
- Rousselin, A, Bevacqua D, Sauge M-H, Lescourret F, Mody K, et Jordan M-O. 2017. « Harnessing the Aphid Life Cycle to Reduce Insecticide Reliance in Apple and Peach Orchards. A Review ». *Agronomy for Sustainable Development* 37 (5). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0444-8>.
- Rousselin, A, Sauge M-H, Jordan M-O, Vercambre G, Lescourret F., et Bevacqua D.. 2016. « Nitrogen and Water Supplies Affect Peach Tree-Green Peach Aphid Interactions: The Key Role Played by Vegetative Growth: Peach-Aphid System Responses to Cultural Practices ». *Agricultural and Forest Entomology* 18 (4): 367-75. <https://doi.org/10.1111/afe.12168>.
- Rubio-Covarrubias, Oswaldo A., Patrick H. Brown, Steven A. Weinbaum, R. Scott Johnson, et Raul I. Cabrera. 2009. « Evaluating Foliar Nitrogen Compounds as Indicators of Nitrogen Status in *Prunus Persica* Trees ». *Scientia Horticulturae* 120 (1): 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.09.007>.
- Ruesch, J, et CTIFL. 2018. « Conception et évaluation multisite de vergers de pêche-nectarine très économes en produits phytosanitaires - EcoPêche 2. - Dossier Projet Réseau Dephy Expe EcoPhyto ».
- Rufat, J., et T. M. DeJong. 2001. « Estimating Seasonal Nitrogen Dynamics in Peach Trees in Response to Nitrogen Availability ». *Tree Physiology* 21 (15): 1133-40. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.15.1133>.
- Sauge, Marie-Hélène, Isabelle Grechi, et Jean-Luc Poëssel. 2010. « Nitrogen Fertilization Effects on *Myzus Persicae* Aphid Dynamics on Peach: Vegetative Growth Allocation or Chemical Defence?: Peach Nitrogen Fertilization And *Myzus Persicae* dynamics ». *Entomologia Experimentalis et Applicata* 136 (2): 123-33. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2010.01008.x>.
- Soing, P, P. Lobit, M. Genard, et R. Habib. 1998. « Peach tree: nitrogen, growth, yield and quality ». *Infos CTIFL (France)*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR2000003660>.
- Turpeau, E, M Hullé, et B Chaubet. 2010. « Encyclop'Aphid : l'encyclopédie des pucerons - Dégâts directs ». INRAE. 2010. <https://www6.inrae.fr/encyclopedie-pucerons/Pucerons-et-agriculture/Degats/Degats-directs>.
- Wang, J, C Shen, N Liu, X Jin, X Fan, C Dong, et Y Xu. 2017. « Non-Destructive Evaluation of the Leaf Nitrogen Concentration by In-Field Visible/Near-Infrared Spectroscopy in Pear Orchard » 17 (538).
- Westcott, M. P., et J. M. Wraith. 1995. « Correlation of leaf chlorophyll readings and stem nitrate concentrations in peppermint ». *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26 (9-10): 1481-90. <https://doi.org/10.1080/00103629509369385>.

Annexe 1

Tableau 1 : Les indicateurs de performances des systèmes EcoPêche

Source : Ahmadi 2018

Indicateurs de performances choisis		Unités	Abréviations
Indicateurs des pratiques : pression environnementale	IFT chimique	IFT/ha	IFT ch.
	IFT chimique par tonnes commercialisables	IFT/t com	IFT/tcom
	Quantité eau irrigation	m ³ /ha	Eau Irr
	Apport N minéral	kg/ha	N min
	Apport P2O5	kg/ha	P2O5
	Apport K2O	kg/ha	K2O
Indicateurs agronomiques	Rendement commercialisable en frais	t/ha	Rdt Com
	Pertes	t/ha	Pertes
	% de calibre <i>A et plus</i>	%	% <i>A et plus</i>
Indicateurs de qualité	% Brix - IR	%Brix	IR
Indicateurs sociotechniques	Heures totales	h/ha	h.HR
	Heures hors récolte	h/ha	h .tot
Indicateurs économiques	Chiffre d'affaire bord verger	€/ha	PB
	Charge de production	€/ha	Charges
	Marge partielle	€/ha	Marge

Annexe 2

Tableau 2 : Variables mesurées pour calculer les indicateurs de performances de l'expérimentation factorielle

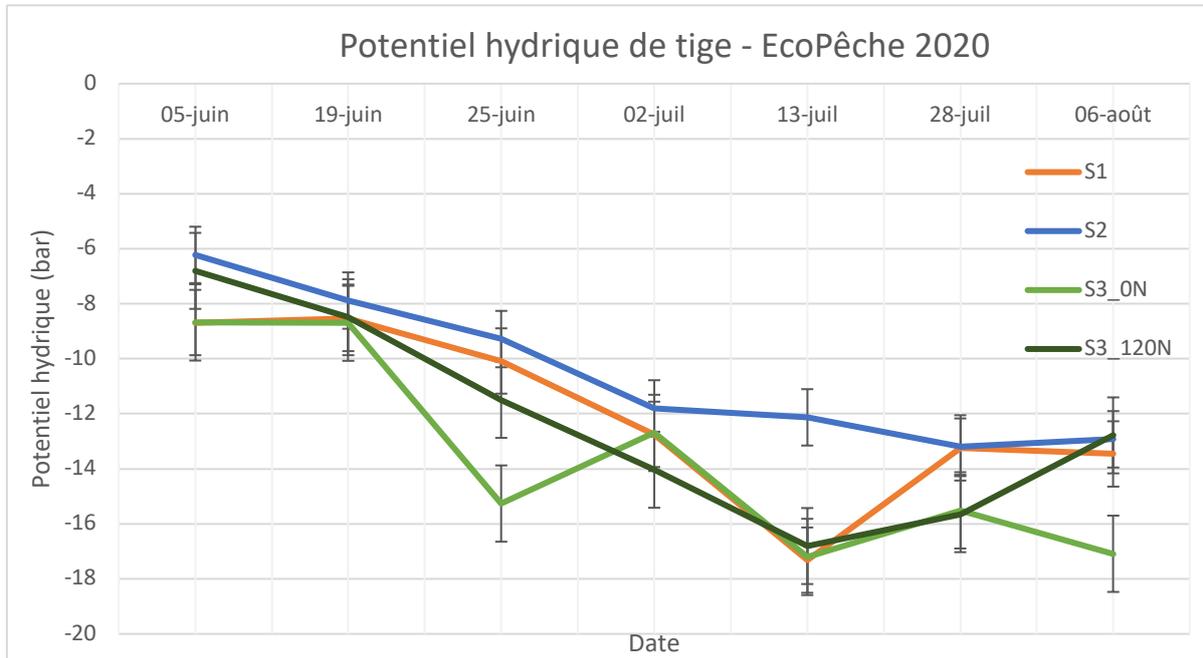
Les variables écrites en vert correspondent aux mesures initialement prévues avant le confinement qui n'auront pas pu être réalisées cette année.

Indicateurs de performances		Individus suivis	Variables mesurées	Date et fréquence des mesures
Dynamique de croissance	Croissance des arbres	2 arbres centraux / placette	Circonférence des troncs (cm)	1x en février, 1x Post-Récolte (fin juillet), 1x mi-novembre, 1x février 2021
	Croissance des arbres	1 arbre / placette	Poids du bois de taille (kg) et nombre de gourmands	Taille en vert, fin-juin
	Floribondité	Arbres modalité 120 N 4 RM / arbres	Nb bourgeons à fleurs et stades de développement des fleurs	Tous les 3-4j en mars à partir du début de la floraison jusqu'à atteindre 50% de fleurs ouvertes
	Croissance végétative	4 jeunes pousses / arbre sur 2 arbres centraux / placette	Longueur des pousses (cm) Nb de feuilles déployées	Tous les 14 jours à partir de début mai jusqu'à début septembre
	Croissance des fruits	4 fruits / arbres sur 2 arbres centraux / placette	Diamètre (mm)	Tous les 7 jours à partir du 10 avril jusqu'à la récolte
	Croissance végétative	5 feuilles / arbres sur 2 arbres centraux / placette	Surface foliaire au planimètre (cm ²) Poids frais (g) Poids sec (g)	Tous les 14 jours à partir de mi-avril à fin juillet, 1x fin août, 1x mi-octobre
Statut azoté		5 feuilles / arbres sur 2 arbres centraux / placette	Teneur en azote des feuilles par analyses en laboratoire par réfractométrie	Tous les 14 jours à partir de mi-mai à fin juillet, 1x fin août, 1x mi-octobre
	Statut azoté et biomasse	1 arbre / placette	% MS bois taille en vert	Taille en vert, fin-juin
Statut hydrique	Potentiel hydrique	4 feuilles / modalité pour 6 modalités (doses N et PdS)	Potentiel hydrique des tiges sur des pousses	A partir de fin mai, tous les 14 jours
Teneur en nutriments et humidité du sol		1 carotte horizon 0-30cm / placette 1 carotte horizon 30-60cm modalité 120N	Teneur en C, N total, NO ₃ , % humidité	1x / mois à partir de mi-mars Horizon 30-60cm 1x mi-mars, 1x fin de l'essai
	Teneur en eau du sol	4 sondes TDR sur modalités 120N x PdS ou Témoin	Humidité %	Mesures en continu

Rendement et qualité	Récolte	2 arbres / placette	Masse de fruits commercialisable (kg/arbre) Répartition par calibre (%) et (kg), poids moyen des fruits (g) Taux de sucre (%Brix) pour 2 fruits / calibre	A chaque cueille (juillet)
	Suivi Post-Récolte	Modalité 180 N, 4 plateaux x 32 fruits / arbre	Comptage du nb de fruits pourris par jour (%)	2 répétitions à chaque cueille, observation des fruits mis en conservation entre 20 et 24°C, pendant 20 jours
Suivi des principaux bioagresseurs et auxiliaires	Suivi des bioagresseurs	10 rameaux aléatoires / arbre sur les 2 arbres centraux / placette 10 fruits aléatoires / arbre	Présence / Absence	Toutes les semaines à partir de mi-mars jusqu'à juillet pour les rameaux A partir de juin pour les fruits
	Suivi des pucerons	2 pousses colonisées / arbre sur les 2 arbres centraux / placette Note globale par arbre	Gradient de présence de pucerons allant de 0 à 5	A partir des premières infestations (mi-mars)
	Suivi des vols retour de pucerons	5 RM aléatoires / modalités PdS vs Témoin	Incidence des pucerons adultes sur 5 RM aléatoires	1 x semaine de mi-septembre à mi-décembre
	Suivi des lombrics	2 fosses sur le rang / modalité PdS vs Témoin 2 fosses sur l'inter-rang	Nb de lombrics et identification des familles	1x début mars 1x automne
	Suivi forficules	1 piège sur un arbre par placette modalités 0 et 120N	Nb de forficules	1x semaine à partir de fin juin
	Suivi régulation biologique	2 cartes de prédation / arbre pour modalité PdS vs Témoin	Nb et espèces d'auxiliaires	1x en mai
Suivi adventices		2 quadrats de 0,25m ² * 2 arbres par placette	% de couverture par quadrat Identification des espèces	1x / mois d'avril à juin
Statut azoté, biomasse et couverture du sol des PdS		2 quadrats de 0,25m ² /placette 2 plants prélevés / placette	% de couverture par quadrat % humidité foliaire % azote foliaire	1x / mois de juin à novembre
Emission de COV par les PdS		1x placette PDS x 4 modalités N	Prélèvement de COV, identification et quantification des COV	1 fois / mois d'avril à novembre

Annexe 3

Figure 1 : Moyennes des potentiels hydriques de tige au midi solaire entre systèmes de l'essai EcoPêche
Comprenant les modalités 0N et 120 N pour le SE-Eco2. Les valeurs hydriques supérieures à -14 bars indiquent un niveau d'alimentation hydrique satisfaisant.



Annexe 4

Figure 1 : Quantités de masse sèche des gourmands enlevés par rang (en g de MS/arbre)

Le PS des gourmands (en g de MS/arbre) par rang correspond aux moyennes des PS des gourmands enlevés le 25/06 sur les deux arbres centraux de chaque placette par rang. Les doses N ayant une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P=0,05$).

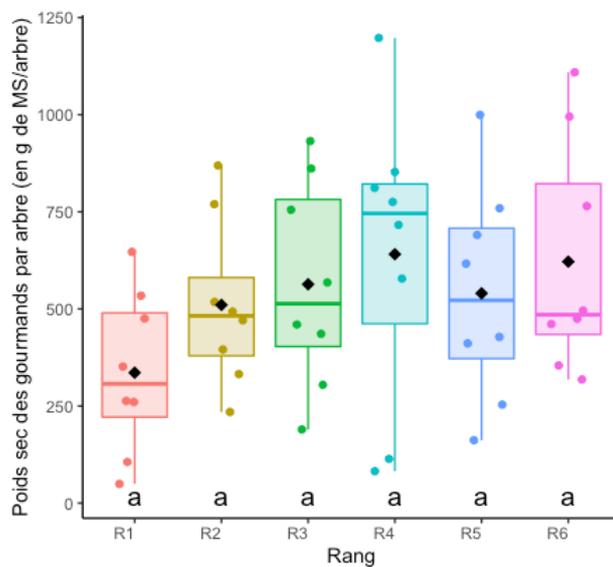
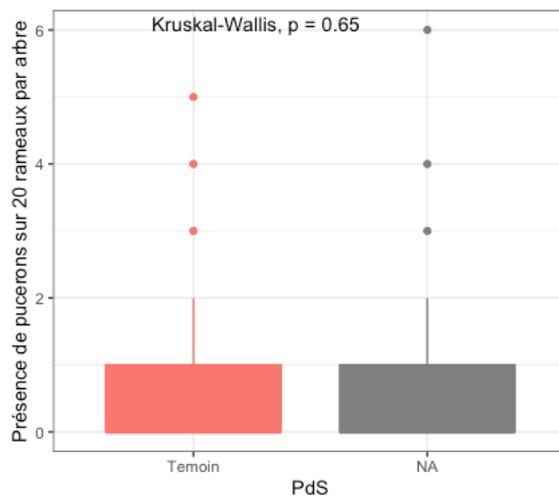


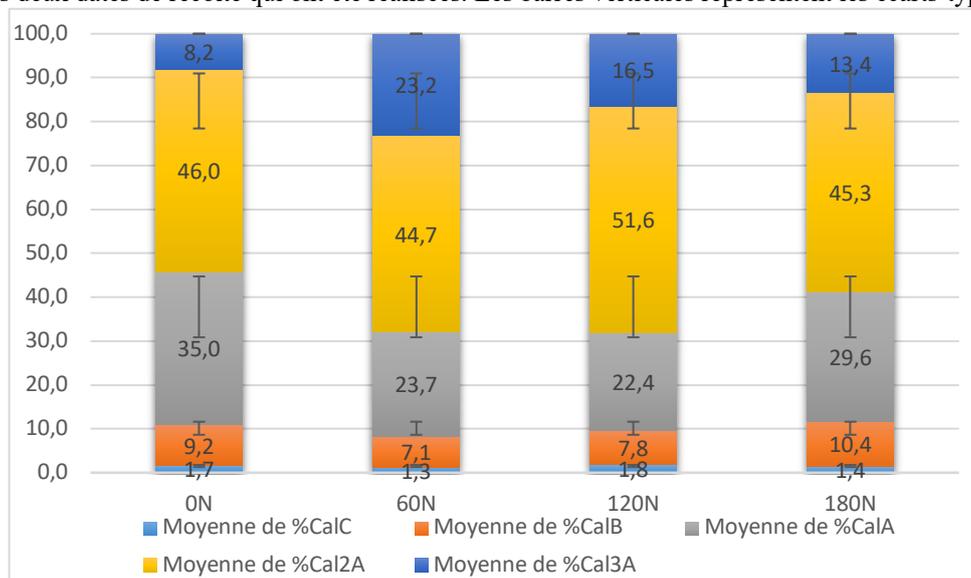
Figure 2 : Incidence de pucerons cigariers et farineux sur rameaux en fonction de la PdS le 03/06/20



Annexe 5

Figure 1 : Répartition des calibres par Dose N sur le S3 (en %)

Les calibres par dose N correspondent à la moyenne des calibres des fruits sur chaque placette regroupée par dose N sur les deux dates de récolte qui ont été réalisées. Les barres verticales représentent les écarts-types.



Annexe 6

Evaluation des méthodes non destructives de mesures de l'azote foliaire par rapport aux dosages de l'azote total des feuilles réalisés en laboratoire

Figure 1 : Régression des données SPAD en fonction des teneurs en N foliaire (en %) par dose N
Les teneurs en N indiquent les données issues des dosages réalisés en laboratoire de l'azote foliaire total en %. Les teneurs en N ont été analysées à partir des échantillons de feuilles qui ont servi aux mesures SPAD pour chaque date.

Source : Borg 2020, document interne

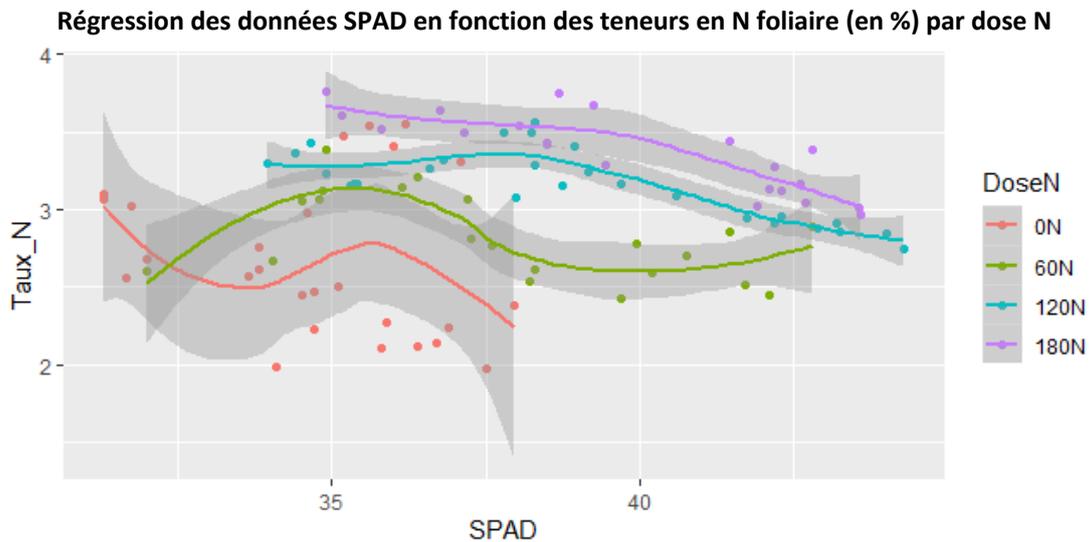


Figure 2 : Disposition des spectres de réflectance des feuilles par SPIR en fonction des dates de mesures et des doses N

L'analyse combine une Anova et une ACP en affectant les sous-groupes des facteurs date et dose N. Un spectre moyen est calculé pour chaque niveau de facteur (Date x Dose N).

Source : Borg 2020, document interne

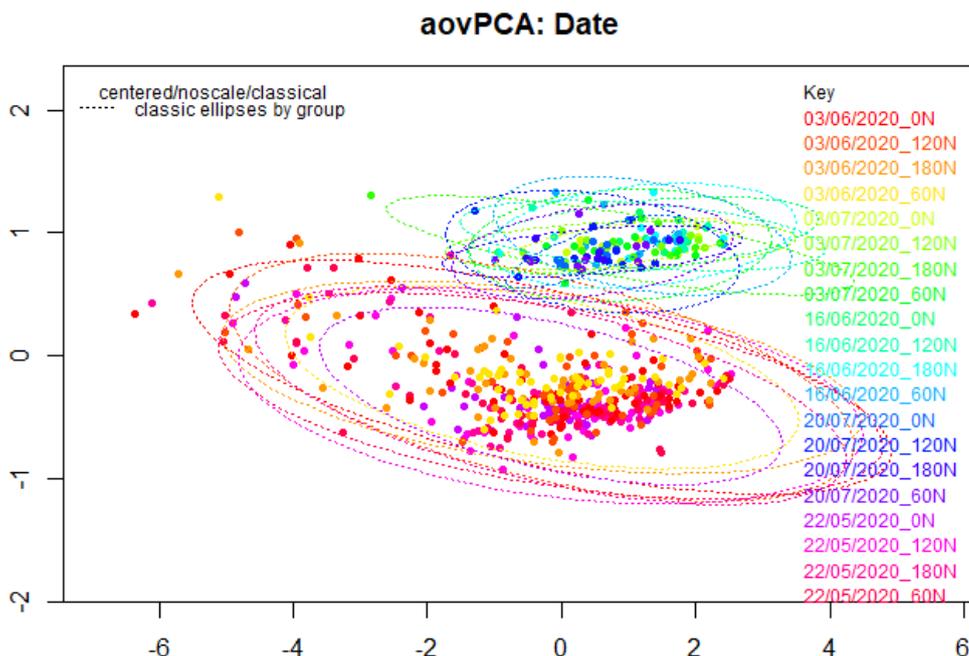


Figure 3 : Classification ascendante hiérarchique des spectres de réflectance des feuilles par SPIR en fonction des facteurs date et dose N
Source : Borg, 2020, document interne

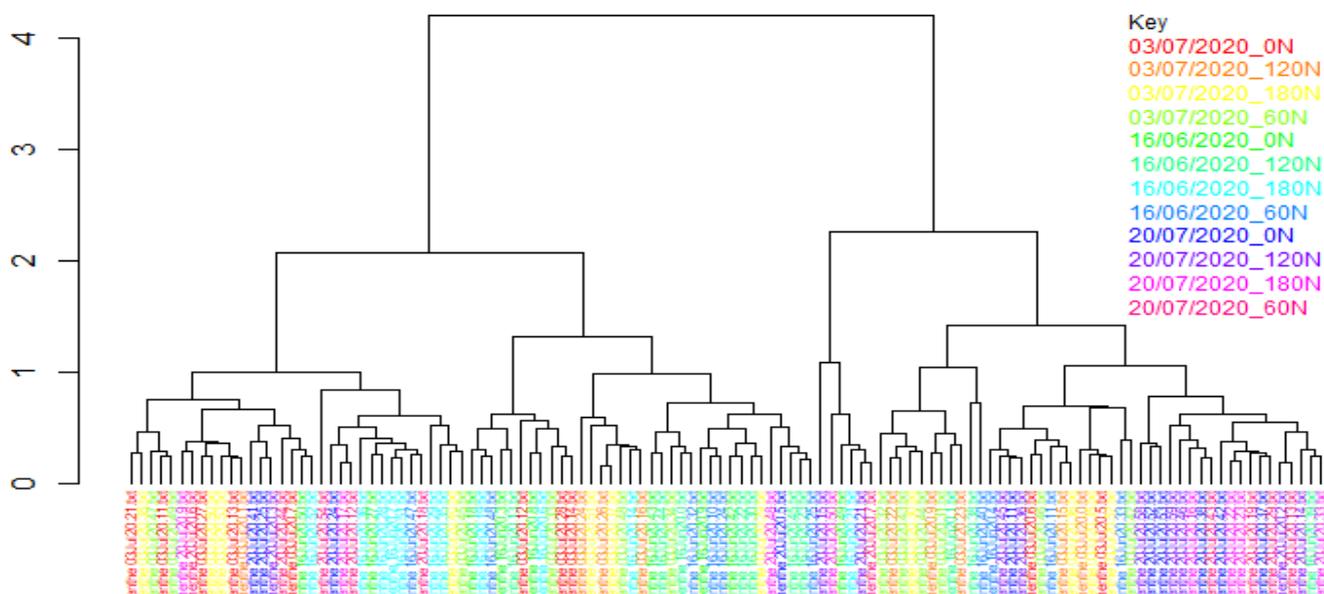


Figure 4 : Régression linéaire entre données obtenues par SPIR et valeur SPAD selon un modèle intégrant les spectres bruts pour 8 dimensions sur l'ensemble des dates de mesures
Source : Borg, 2020, document interne

