



UniLaSalle Beauvais
19 rue Pierre Waguet – BP 30313
60026 Beauvais cedex



INRAE UR1115 PSH
228 Route de l'Aérodrome
Domaine St Paul – Site Agroparc
CS 40509
84914 Avignon Cedex 9

Stage de fin d'études

Effets des leviers Plantes de service et Nutrition azotée sur la régulation des pucerons et sur les performances d'un verger de pêchers

Fanny HAYES

Mémoire de Fin d'Etudes

Année
2020-2021

Promotion 160 – 5^{ème} année
Spécialité Agroécologie, Sols, Eaux et Territoires

Maîtres de stage : Julie BORG et Laurent GOMEZ
Référente UniLaSalle : Anne-Maïmiti DULAURENT

Résumé

Dans le cadre du plan Ecophyto, l'unité de recherche Plantes et Système de cultures Horticoles (PSH) de l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) d'Avignon évalue expérimentalement depuis 2013 des vergers de pêchers économes en intrants. Des travaux de recherche en situation contrôlée ont montré l'efficacité de la nutrition azotée et de certaines plantes de service pour perturber le développement des pucerons. Un essai factoriel a été mis en place en 2020 au sein d'un des vergers de pêchers économes en intrants. L'objectif de cette étude était de tester l'effet de la combinaison d'une réduction de la fertilisation azotée et de l'introduction de menthe poivrée (*mentha x piperita*) (émission de composés organiques volatils (COV)) sur les populations de pucerons. La nutrition azotée et la présence de menthe poivrée ont impacté la vigueur et la croissance des pêchers. La menthe poivrée a répondu à la différenciation des doses d'azote apportées sur le verger. Cependant, l'essai n'a pas révélé d'effet sur les populations de pucerons. Cette étude a permis d'analyser des synergies et des antagonismes possibles dans un système complexe (pêcher – menthe poivrée - COV - nutrition azotée - populations de pucerons), et contribue à élargir les connaissances sur la faisabilité de pratiques agroécologiques pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires tout en assurant les performances agronomiques des vergers.

Mots clés : verger de pêchers, pucerons, nutrition azotée, plantes de service, menthe poivrée, composés organiques volatils.

Abstract

As part of the Ecophyto plan, the Plants and cropping Systems in Horticulture research unit of the National Research Institute for Agriculture, Food and the Environment (INRAE) in Avignon has been experimentally evaluating low-input peach orchards since 2013. Research work in controlled situations has shown the effectiveness of nitrogen nutrition and certain companion plants in disrupting aphid development. A factorial trial was set up in 2020 in one of the low-input peach orchards. The objective of this study was to test the effect of the combination of reduced nitrogen fertilisation and the introduction of peppermint (*mentha x piperita*) (emission of volatile organic compounds) on aphid populations. Nitrogen nutrition and the presence of peppermint impacted the vigour and growth of the peach trees. Peppermint responded to the differentiation of nitrogen rates applied to the orchard. However, the trial did not reveal any effect on aphid populations. This study allowed to analyse possible synergies and antagonisms in a complex system (peach tree - peppermint - VOC - nitrogen nutrition - aphid populations), and contributes to broaden the knowledge on the feasibility of agroecological practices to reduce the use of phytosanitary products while ensuring the agronomic performances of the orchards.

Key words : peach orchard, aphids, nitrogen nutrition, companion plant, peppermint, volatile organic compounds.

Remerciements

Pour commencer, je souhaite remercier tout particulièrement mes maîtres de stage, Julie Borg et Laurent Gomez, qui ont su me faire confiance et me guider tout au long de mon stage. Je remercie Julie pour sa disponibilité, sa grande gentillesse et son sens de l'humour qui m'ont permis de toujours me sentir à l'aise lors de nos échanges. Je remercie également Laurent qui m'a permis de participer à une journée de visite d'un essai agroforestier aux domaines de Restinclières. Ce fut un réel plaisir de retravailler avec eux lors de ces six mois de stages. Je suis sincèrement reconnaissante pour tout ce qu'ils m'ont apporté depuis notre rencontre en 2019. Je voudrais tout particulièrement les remercier pour leurs précieux conseils qui m'ont été très utiles pour le passage des concours INRAE de cette année. Merci également pour leurs multiples corrections au cours de la rédaction de ce mémoire.

Je tiens également à remercier ma tutrice Anne-Maïmiti DULAURENT pour son accompagnement bienveillant tout au long de mon stage. J'en profite également pour la remercier du soutien qu'elle m'a toujours apporté depuis la 4^{ème} année à UniLaSalle.

Merci à l'ensemble des agents de l'Unité PSH pour leur accueil. Je voudrais remercier Mathieu Gales et Quentin Barra pour leur précieuse aide sur le verger et leur bonne humeur communicative. Un énorme merci à l'équipe du laboratoire : Patricia Laugier, Doriane Bancel, Sylvie Serino et Guy Costagliola pour leur patience et pour m'avoir soutenu dans mes multiples analyses.

Merci également aux stagiaires Tom et Thomas pour leur aide sur le verger et pour leur investissement dans le broyage des végétaux.

Je voudrais remercier tout particulièrement mes colocataires : Laurie, Maxence et Chloé et les très belles rencontres : Guillaume, Mathilde, Fausta et Estelle. Je les remercie pour tous les merveilleux moments. Merci également à tous mes amis qui sont venus me rendre visite à Avignon, notamment à Sixtine qui m'a aidé à vérifier toutes mes données.

Je tiens aussi à remercier l'équipe pédagogique d'UniLaSalle Beauvais pour toutes les connaissances que j'ai acquises au cours de mes trois années à l'école. Et un immense merci à mes parents, pour leur soutien moral et financier.

Merci au GIS Fruits pour le financement de ce stage.

Table des matières

Table des illustrations	6
Table des tableaux	8
Liste des abréviations, symboles et unités	9
Glossaire	9
Introduction	11
1 Synthèse bibliographique	13
1.1 Contexte de l'étude : plan Ecophyto et projet Ecopêche.....	13
1.2 Les pucerons des vergers de pêcher.....	14
1.2.1 Morphologies et cycles biologiques.....	14
1.2.2 Importance des dégâts.....	17
1.3 Méthodes alternatives de régulation des pucerons en verger de pêcher.....	18
1.3.1 Effets du levier Plantes de service sur la régulation des pucerons.....	19
1.3.2 Effets du levier Nutrition azotée sur la régulation des pucerons.....	22
1.4 Objectifs du stage et hypothèses de recherche.....	23
2 Matériels et méthodes	26
2.1 Présentation du dispositif expérimental.....	26
2.2 Suivi des nitrates du sol.....	28
2.2.1 Prélèvements de sol.....	28
2.2.2 Dosage des nitrates en laboratoire.....	28
2.3 Suivi de la vigueur des pêchers et de la menthe poivrée.....	29
2.3.1 Mesures et prélèvements sur les pêchers.....	29
2.3.2 Mesures et prélèvements sur la menthe poivrée.....	29
2.3.3 Dosage de l'azote total des végétaux.....	30
2.4 Détermination des COV de la menthe poivrée présents dans le verger.....	30
2.4.1 Prélèvements de COV sur le verger.....	30
2.4.2 Analyse des COV en laboratoire.....	32
2.5 Suivi des colonies de pucerons et de leurs ennemis naturels.....	32
2.5.1 Suivi de l'infestation par les pucerons et de la présence des auxiliaires.....	32
2.5.2 Détermination de la régulation biologique au verger.....	33
2.6 Bilan des variables suivies.....	34
2.7 Analyses statistiques.....	35
3 Résultats	37
3.1 Conditions climatiques lors de la campagne de mesures et de prélèvements sur le verger.....	37

3.2	Suivi de l'azote au sein du verger	38
3.3	Suivi de la croissance et de la vigueur des pêchers.....	42
3.4	Suivi de la croissance et de la vigueur de la menthe poivrée.....	45
3.5	Suivi des COV de la menthe poivrée au sein du verger.....	48
3.6	Suivi des pucerons et de leurs ennemis naturels au sein du verger	50
3.6.1	Suivi des populations de pucerons	50
3.6.2	Suivi des auxiliaires.....	52
4	Discussion.....	53
4.1	Effet de la combinaison des leviers Azote et Plante de services sur les pêchers....	53
4.2	Effet de la combinaison du levier Azote sur la menthe poivrée.....	54
4.3	Effet de la combinaison des leviers Azote et Plante de services sur la régulation des populations de pucerons	55
	Conclusion et perspectives	57
	Liste des références bibliographiques	59

Table des illustrations

Figure n° 1 : Photographies des pucerons du pêcher.	15
Figure n° 2 : Photographies de prédateurs des pucerons.	18
Figure n° 3 : Schéma illustrant la combinaison des différents moyens d'action pour lutter contre les ravageurs (Source : d'après LAGET et al., 2015).	19
Figure n° 4 : Les potentielles interactions entre la plante de service, les pucerons et la plante hôte (Source : DIEUDONNE, 2018).	21
Figure n° 5 : Nombre moyen de pucerons par pousse pour les deux niveaux d'apport d'azote à chaque date de notation. date de notation (Source : ROUSSELIN et al., 2016b).	23
Figure n° 6 : Schéma conceptuel du système et des hypothèses étudiés.	25
Figure n° 7 : Plan du verger Eco-pêche S3-Eco2.	27
Figure n° 8 : Photographie d'un pêcher de la modalité Menthe du verger Eco-pêche S3-Eco2.	28
Figure n° 9 : Photographie de l'analyseur de nitrates FIA 5000 (Flow Injection Analysis).	29
Figure n° 10 : Photographie de l'auto-analyseur CHONS (Appareil Thermo EA1112).	30
Figure n° 11 : Emplacements des différents prélèvements de COV réalisés sur le verger Eco-pêche S3-Eco2.	31
Figure n° 12 : Photographies du dispositif de prélèvement des COV sur le verger Eco-pêche S3-Eco2.	31
Figure n° 13 : Photographie du thermodésorbiteur (TD), de l'analyseur de gaz (GC) et du spectromètre de masse - ISQ (simple quadripôle) (MS).	32
Figure n° 14 : Photographie de cartes de prédation utilisées.	33
Figure n° 15 : Précipitations et températures entre le 15/03/21 et le 26/07/21.	37
Figure n° 16 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les taux d'azote des feuilles de pêcher, de la menthe et du sol entre 0 et 30 cm, correspondants à la période de mi-mai.	38
Figure n° 17 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les taux d'azote des feuilles de pêcher, de la menthe et du sol entre 0 et 30 cm, correspondants à la période de mi-mai.	39
Figure n° 18 : Quantité moyenne de nitrates du sol entre 0 et 30 cm de profondeur en fonction de la dose d'azote et de la présence ou non de menthe à différentes dates.	39
Figure n° 19 : Teneur en azote moyenne des feuilles de pêcher en fonction de la dose d'azote et de la présence ou non de menthe à différentes dates.	40
Figure n° 20 : (Teneur en azote) ^{0,42} moyenne de la menthe poivrée en fonction de la dose d'azote à différentes dates.	41
Figure n° 21 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les variables de vigueur et de croissance du pêcher, correspondants à la période de début juin.	42
Figure n° 22 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les variables de vigueur et de croissance du pêcher, correspondants à la période de début juin.	42
Figure n° 23 : Poids frais moyen des feuilles de pêcher en fonction de la dose d'azote.	43
Figure n° 24 : Croissance moyenne des pousses de pêcher au cours du temps en fonction de la modalité.	44
Figure n° 25 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les indices de vigueur et de croissance du la menthe, correspondants à la période de mi-juin.	45
Figure n° 26 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les indices de vigueur et de croissance du la menthe, correspondants à la période de mi-juin.	46

Figure n° 27 : Taux de recouvrement moyen de la menthe poivrée en fonction de la dose d'azote à différentes dates.	47
Figure n° 28 : Hauteur moyenne de la menthe poivrée en fonction de la dose d'azote à différentes dates.	47
Figure n° 29 : Proportion totale moyenne de COV de la menthe poivrée captés dans 4 litres d'air avant et après le rabattage de la menthe en fonction de la modalité et de la hauteur de prélèvement.	48
Figure n° 30 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les proportions des 4 composés de la menthe captés le 07/07	49
Figure n° 31 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les proportions des 4 composés de la menthe captés le 07/07.	50
Figure n° 32 : Evolution moyenne par arbre de l'infestation des pucerons au cours du temps et en fonction du type de puceron.....	50
Figure n° 33 : Evolution moyenne par arbre de l'infestation des pucerons au cours du temps et en fonction de la modalité.....	51
Figure n° 34 : Evolution au cours du temps de la sévérité d'infestation des 12 foyers de pucerons suivis à chaque date pour chaque modalité..	51
Figure n° 35 : A : Evolution moyenne par arbre de la présence d'auxiliaires au cours du temps et en fonction du type d'auxiliaire. B : Evolution moyenne de la présence de coccinelles en fonction du temps et de la modalité.....	52

Table des tableaux

Tableau n° 1 : Description synthétique des principales espèces de pucerons en verger de pêcher (Source : d'après SUD ARBO, 2012).....	16
Tableau n° 2 : Description synthétique des dégâts causés par les principales espèces de pucerons en verger de pêcher (Source : d'après SUD ARBO, 2012).....	17
Tableau n° 3 : Liste des espèces de plantes de services utilisées dans les expériences en milieu contrôlé et leur effet sur les pucerons tel que rapporté dans la littérature	20
Tableau n° 4 : Caractéristiques du verger Eco-pêche S3-Eco2.	26
Tableau n° 5 : Définition de l'échelle utilisée pour décrire la sévérité d'infestation des pousses des pêchers (Source : d'après GRECHI et al., 2008).....	33
Tableau n° 6 : Récapitulatif des variables étudiées. Les variables barrées sont celles qui n'ont pas pu être déterminées en raison de la gelée printanière de cette année.	34

Liste des abréviations, symboles et unités

AFDM : Analyse Factorielle de Données Mixtes ;

COV : Composé organique volatil ;

DEPHY : Démonstration, Expérimentation et Production de références sur les systèmes économes en pHYtosanitaires ;

HCPC : Hierarchical Clustering on Principal Components ou Classification Hiérarchique sur Composantes Principales ;

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires ;

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

ITK : itinéraire technique ;

NIST : National Institute of Science and Technology ;

PSH : Plantes et Système de cultures Horticoles ;

SLA : surface foliaire spécifique ;

% : pourcentage ;

°C : degré Celsius ;

arbre/ha : arbre par hectare ;

cm : centimètre ;

cm²/g : centimètre carré par gramme ;

g : gramme ;

h : heure ;

kg/ha : kilogramme par hectare ;

m : mètre ;

m² : mètre carré ;

mg : milligramme ;

ml : millilitre ;

mm : millimètre ;

MS : matière sèche ;

plant/ha : plants par hectares.

Glossaire

(d'après Larousse, 2021)

« Agroécologie : mode de production agricole prenant en compte la protection de l'environnement et le respect des ressources naturelles » ;

« Bioagresseur/ravageurs : être vivant s'attaquant aux plantes (puceron, mildiou, plante adventice, etc.) » ;

« Carottage : opération consistant à découper dans un terrain un échantillon cylindrique appelé carotte » ;

« Chémotype : composition biochimique des huiles essentielles » ;

« Clone : être vivant engendré par un parent unique, sans sexualité et par conséquent identique, d'un point de vue génétique, à son parent » ;

« Fumagine : maladie cryptogamique des plantes, due à un champignon qui se développe sur le miellat résultant des piqûres de pucerons, et qui se traduit par une croûte noire sur les feuilles » ;

« Glyphosate : herbicide chimique puissant, toxique pour l'environnement et soupçonné d'être cancérigène » ;

« Miellat : excrétion sucrée produite par certains insectes suceurs de sève, notamment les pucerons » ;

« Olfaction : fonction grâce à laquelle les odeurs sont perçues » ;

« Pathogène : qualifie ce qui provoque une maladie, en particulier un germe capable de déterminer une infection » ;

« Parthénogénèse : reproduction sans intervention d'un mâle dans une espèce, caractérisée par l'existence de deux sexes » ;

« Pesticide/produit phytopharmaceutique/produit phytosanitaire : se dit d'un produit chimique destiné à lutter contre les parasites animaux et végétaux nuisibles aux cultures et aux produits récoltés » ;

« Phytophage : se dit d'un insecte qui se nourrit de matières végétales » ;

« Planimètre : intégrateur qui permet, en suivant la frontière d'un convexe compact du plan, de mesurer son aire intérieure » ;

« Rendement : poids, volume d'une récolte rapporté à l'unité de surface, souvent exprimé en quintaux ou en tonnes par hectare » ;

« Rhizobactérie : microorganisme qui colonise les racines de certaines plantes en formant avec elles une relation symbiotique » ;

« Spectrophotométrie : technique de laboratoire permettant de doser une substance chimique en faisant traverser la substance étudiée par un rayon d'une lumière artificielle, de longueur d'onde définie » ;

« Vigueur : aptitude des végétaux à se développer ».

Introduction

La préservation de l'environnement et des ressources naturelles, tout en maintenant un niveau de production suffisant en termes de rendement et de qualité, est un des principaux objectifs auxquels l'agriculture doit répondre. Elle fait face aujourd'hui à un accroissement de l'aire de répartition des insectes ravageurs dû au réchauffement climatique (THIBORD, 2014) et au développement de résistances vis-à-vis de certains produits phytosanitaires ou de biocontrôle (BARZMAN et al., 2015; HAWKINS et al., 2019).

Les diverses exigences portées sur la production de fruits induisent le besoin d'une forte productivité par hectare pour assurer la rentabilité de la production mais aussi une qualité sanitaire des fruits irréprochable, ce qui amène à une utilisation importante de pesticides (AGRESTE, 2018a). Selon la dernière enquête statistique de la campagne 2015 sur les pratiques phytosanitaires en arboriculture, les insecticides constituent 20% à 40% des traitements en vergers de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) et les traitements appliqués sur la pêche régionale sont un peu plus nombreux qu'au plan national : 25 traitements en Paca contre 22,3 en France. La présence de nombreux pathogènes et l'utilisation réduite de mesures préventives expliquent cet écart de traitement avec la moyenne nationale (AGRESTE, 2018b). Toutes ces données ont mené à différentes directives gouvernementales et à la remise en question des pratiques intensives. Le plan Ecophyto II+ matérialise les engagements pris par le Gouvernement et a pour objectif de réduire les usages de produits phytopharmaceutiques de 50% d'ici 2025 (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021).

La réglementation et l'utilisation de plus en plus controversée des pesticides chimiques avec notamment des risques sur la santé et l'environnement, poussent les agriculteurs à adopter des pratiques plus économes en produits phytosanitaires. Ainsi, des méthodes de lutte alternatives sont recherchées et expérimentées à l'image du réseau de Démonstration, Expérimentation et Production de références sur les systèmes économes en PHYtosanitaires (réseau DEPHY) initié dans le cadre du plan Ecohyto I, qui œuvre à la réduction volontaire de l'utilisation des produits phytosanitaires par des exploitations agricoles et certains sites expérimentaux. Ce réseau est connu en moyenne par 29 % des arboriculteurs (dont 35 % sont des producteurs de pêches) (AGRESTE, 2018b). Depuis 2009, le déploiement du plan Ecophyto en PACA a permis de faire évoluer les pratiques avec une baisse des quantités de substances actives vendues (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021). Cependant, le nombre d'espèces de bioagresseurs est croissant dans le contexte du réchauffement climatique.

Les pucerons sont des ravageurs particulièrement problématiques car connus pour causer des dégâts considérables et des pertes de rendement (BLOMMERS et al., 2004; GOGGIN, 2007) en induisant des modifications physiologiques de la plante hôte (réaction à la piqûre, affaiblissement par perte de sève, infection par un virus pathogène, développement de fumagines sur le miellat des pucerons) (HULLE et al., 1998). Pour résoudre ces problèmes et lutter contre ce ravageur plusieurs stratégies alternatives sont évaluées et se développent (MAINO et al., 2019) dont la lutte biologique, le changement des pratiques culturales et la mise en place d'aménagements agroécologiques.

Des récents essais en situation contrôlée réalisés par l'unité Plantes et Système de cultures Horticoles (PSH) de l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) d'Avignon ont montré l'efficacité de la nutrition azotée (SAUGE et al., 2010) et de certaines plantes de service émettant des composés organiques volatils (COV) pour perturber le comportement du puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*) (BEN ISSA et al., 2017b; DARDOURI et al., 2019b). Pour répondre au manque de références sur l'intérêt de la combinaison de ces deux leviers en conditions réelles de verger, un essai factoriel a été mis en place en 2020 au sein d'un des vergers de pêchers économes en intrant du site de l'INRAE d'Avignon. L'objectif était de tester l'effet de la combinaison d'une réduction de la fertilisation azotée et de l'introduction de menthe poivrée (*mentha x piperita*) sur les dynamiques de populations de pucerons. Mais le retard de la plantation de menthe et de la différenciation azotée en lien avec la crise sanitaire n'a pas permis de montrer les effets de la combinaison des deux leviers sur les populations de pucerons en 2020 (CATUSSE, 2020).

1 Synthèse bibliographique

1.1 Contexte de l'étude : plan Ecophyto et projet Ecopêche

Initié en 2009, le plan "Ecophyto 2018", s'inscrivait dans le cadre de la directive européenne 2009/128 d'utilisation des produits phytopharmaceutiques compatible avec le développement durable. Il avait pour objectif de réduire de 50% en 10 ans le recours aux produits phytosanitaires en France tout en maintenant une agriculture économiquement performante (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, 2018). La mise en place d'un réseau de fermes pilotes dit réseau DEPHY a conforté la possibilité de réduire l'usage des produits phytosanitaires tout en maintenant une performance économique des exploitations. Cependant, le plan Ecophyto 2018 n'avait pas atteint les résultats escomptés sur le plan national avec une légère augmentation de 5% du recours à ces produits entre 2009 et 2013.

Dans ce contexte, le plan Écophyto II+ vient renforcer le plan précédent et a pour objectif de réduire les usages de produits phytosanitaires de 50% d'ici 2025 et de sortir du glyphosate d'ici 2022 pour l'ensemble des usages. Aujourd'hui, le principal objectif est de généraliser les techniques et systèmes économes et performants qui ont fait leurs preuves afin d'inverser la tendance à l'échelle nationale (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, 2018).

Action majeure du plan Ecophyto, le dispositif DEPHY constitue les actions 2 (FERME) et 3 (EXPE) de l'axe 1 de ce plan et vise trois finalités qui le définissent :

« *Démontrer que réduire l'utilisation de produits phytosanitaires est possible ; Expérimenter des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires ; Produire des références sur les systèmes économes en **pHY**tosanitaires* » (Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement, 2018).

Le réseau FERME, qui rassemble 3 000 exploitations agricoles volontairement engagées dans une réduction de l'usage de pesticides, affiche une baisse de l'IFT (Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires) dans l'ensemble des filières dont une baisse de 19% pour la filière arboriculture. Le réseau EXPE est destiné quant à lui, à concevoir, tester et évaluer des systèmes de culture innovants visant une forte réduction de l'usage des produits phytosanitaires (au moins 50% par rapport au conventionnel). Les 23 projets DEPHY EXPE 2 comptabilisent environ 70 sites expérimentaux et une centaine de systèmes de culture utilisant les pesticides en ultime recours (Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement, 2018).

Le projet Ecopêche 1 (2013-2018) et le projet Ecopêche 2 (2019-2023) font partie du réseau DEPHY EXPE. Le premier avait pour objectif de concevoir et d'évaluer les performances agronomiques, écologiques et technico-économiques de systèmes de culture de pêche – nectarine visant une réduction de 50% des IFT chimiques et de 30% des intrants (irrigation et fertilisation). Cependant, en vue des connaissances techniques et des contraintes pesant sur la production de pêche (forte pression des bioagresseurs et manque de leviers alternatifs), cet objectif s'est avéré très ambitieux (PLENET et al., 2019). En effet, les IFT sur pêche – nectarine restent très élevés (70^{ième} percentile de l'IFT national se situant à 23,3 IFT en 2015) (AGRESTE, 2018a).

Face à ce constat, la mise en place du projet EcoPêche 2 a pour objectif de poursuivre l'évaluation des performances multicritères de vergers de pêche-nectarine économes en produits phytosanitaires conçus et plantés dans le cadre du projet EXPE EcoPêche 1. Il a pour but d'explorer différents leviers d'action pour concevoir de nouveaux systèmes agroécologiques (ECOPHYTOPIC, 2021). Finalement, il s'agit d'évaluer les avantages et les limites de différents leviers en conditions réelles de production et de proposer aux professionnels des solutions techniques transposables au sein de leurs exploitations.

Dans le cadre du projet EcoPêche 1 et 2, l'unité de recherche PSH à l'INRAE d'Avignon évalue expérimentalement depuis 2013 les performances agronomiques de deux vergers de pêcheurs économes en intrants avec -50 % des Indices de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT) en les comparant avec un système de référence (pratiques régionales). La combinaison de leviers d'action mis en place dans les systèmes économes démontre jusqu'ici une efficacité sur les plans agronomique, écologique et économique (PLENET et al., 2019). Cependant, depuis 3 ans, la pression et les dégâts occasionnés par les pucerons sont en forte augmentation et risquent de compromettre à moyen et long termes les performances du verger. Les leviers alternatifs (biocontrôle, bandes fleuries ...) mis en œuvre pour les contrôler démontrent une efficacité insuffisante.

1.2 Les pucerons des vergers de pêcher

1.2.1 Morphologies et cycles biologiques

De la famille des Hémiptères, les pucerons (*Aphidoidea*) sont des insectes phytophages de type piqueur-suceurs et prélèvent la sève élaborée du système phloémien (GIORDANENGO et al., 2007; WALLING, 2008).

Dotées d'une grande rapidité de propagation, la plupart des espèces ont un cycle de reproduction par parthénogénèse. Les femelles fondatrices issues des œufs d'hiver pondent directement des larves femelles qui acquièrent rapidement la capacité de se reproduire. Grâce à cette multiplication très rapide, le développement des populations de pucerons est favorisé par l'apparition de résistances (BASS et al., 2014). De plus, des pucerons ailés, capables de parcourir de très grandes distances, apparaissent et colonisent rapidement de nouvelles plantes lorsqu'il y a dégradation de leur environnement ou accroissement de la densité de population (BLACKMAN et EASTOP, 1995). C'est pourquoi une bonne gestion des populations en verger passe par la connaissance des cycles de vie des différentes espèces.

Plusieurs espèces de pucerons peuvent se développer en verger de pêcheurs dont principalement : le puceron vert (*Myzus persicae*), le puceron farineux (*Hyalopterus amygdali*), le puceron noir (*Brachycaudus persicae*) et le puceron cigarier (*Myzus varians*) (cf. Figure n° 1 et Tableau n° 1).

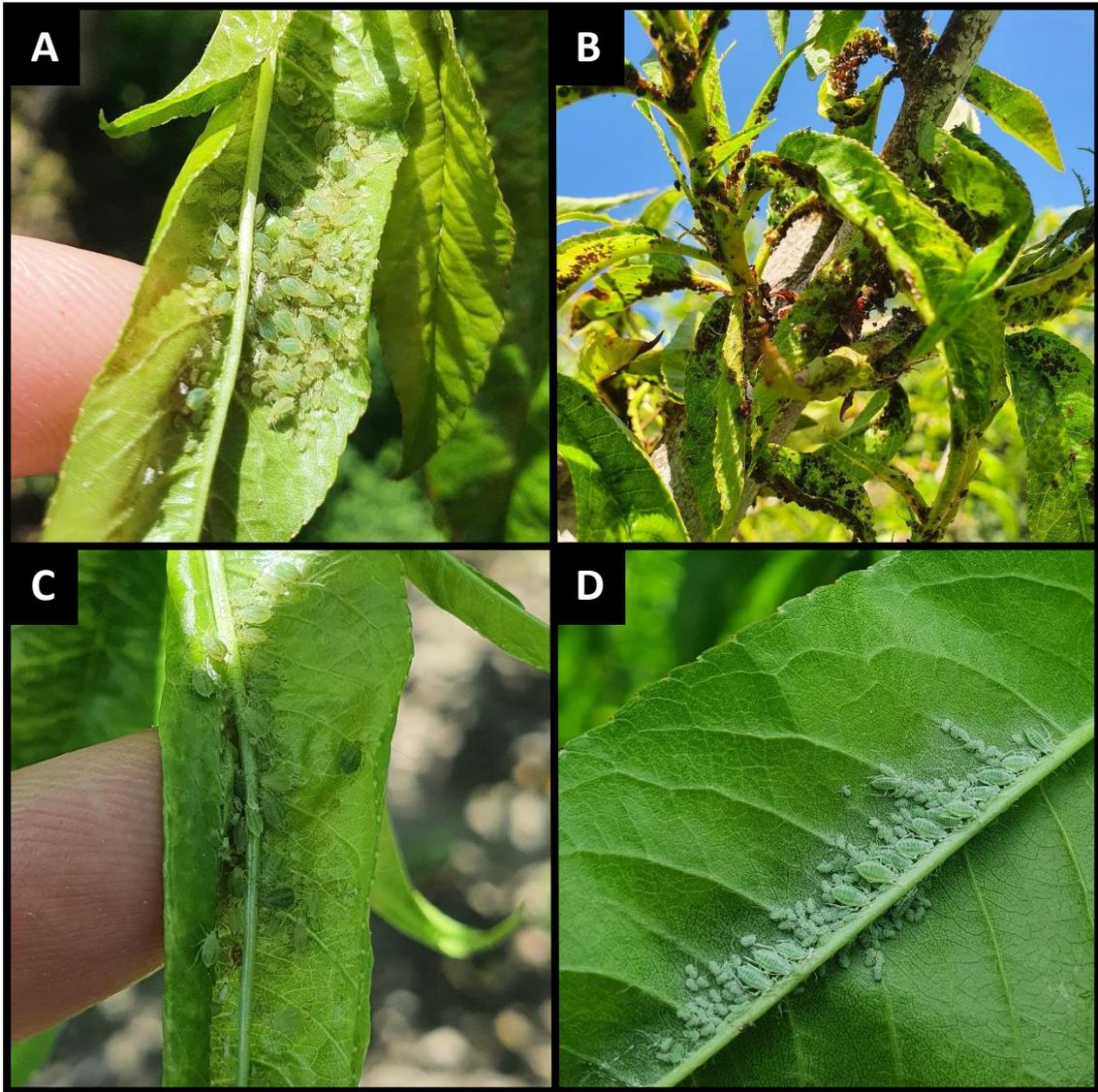


Figure n° 1 : Photographies des pucerons du pêcher. A : puceron vert (*Myzus persicae*) ; B : puceron noir (*Brachycaudus persicae*), C : puceron cigarier (*Myzus varians*) ; D : puceron farineux (*Hyalopterus amygdali*)

Tableau n° 1 : Description synthétique des principales espèces de pucerons en verger de pêcher (Source : d'après SUD ARBO, 2012).

Espèce	Morphologie	Cycle biologique			
		Hiver	Printemps	Eté	Automne
Puceron vert du pêcher <i>Myzus persicae</i>	Sur la face inférieure des feuilles. Les pucerons aptères, sont de couleur vert-jaune et mesurent 1,5 à 2,5 mm.	Hivernent à l'état d'œufs sur pêcher. Eclotions de mi-janvier à fin février (fondatrices).	4 à 5 générations, pic des infestations en mai. Individus d'abord aptères, puis ailés.	Migrent fin juin sur plantes basses de diverses familles botaniques.	Les adultes retournent vers les pêchers pour s'accoupler et pondre.
Puceron farineux du pêcher <i>Hyalopterus amygdali</i>	Sur la face inférieure des feuilles. Les pucerons aptères sont de forme allongée et mesurent 1,5 à 2,6 mm. Ils sont de couleur vert pâle couverts d'une poudre cireuse blanche.	Hivernent à l'état d'œufs sur pêcher. Eclotions fin mars.	2 à 3 générations, pic des infestations en juin-juillet. Individus d'abord aptères, puis ailés.	Persistent sur les fruitiers. Peuvent migrer sur plantes hôtes secondaires (roseaux...).	Les adultes retournent vers les pêchers pour s'accoupler et pondre.
Puceron noir du pêcher <i>Brachycaudus persicae</i>	Sur les jeunes rameaux ou, plus rarement, sur les feuilles. Les pucerons aptères sont entièrement noirs et brillants, de forme globuleuse et mesurent 1,5 à 2,2 mm.	Hivernent sous forme de femelles aptères au collet des arbres, sur racines ou branches basses.	Migrent fin mars sur jeunes rameaux (fourmis) et multiplication.	Retournent sur les racines et les parties basses de l'arbre.	Retournent sur les racines et les parties basses de l'arbre.
Puceron cigarier du pêcher <i>Myzus varians</i>	Les pucerons aptères mesurent 1,7 à 2,3 mm. De couleur vert clair, présentent des antennes et des cornicules foncés.	Hivernent à l'état d'œuf sur pêcher. Eclotions fin mars.	Génération successive sur pêcher. Migrent sur plantes hôtes secondaires (clématites). Peuvent persister sur les pêchers.	Migrent sur plantes hôtes secondaires (clématites). Peuvent persister sur les pêchers.	Les adultes retournent sur les pêchers pour s'accoupler et pondre.

1.2.2 Importance des dégâts

La variabilité des cycles biologiques des pucerons induit des incidences et des périodes d'infestation variables en verger de pêchers (cf. Tableau n° 2).

Tableau n° 2 : Description synthétique des dégâts causés par les principales espèces de pucerons en verger de pêcher (Source : d'après SUD ARBO, 2012). + : faible ; ++ : moyen ; +++ : fort.

Espèce	Fréquence	Gravité	Symptômes
Puceron vert du pêcher <i>Myzus persicae</i>	+++	+++	- Avortement des pièces florales ; - Déformations torsadées, décolorations et arrêt de croissance des pousses. - Taches bosselées sur les fruits.
Puceron farineux du pêcher <i>Hyalopterus amygdali</i>	+	+++	- Pas de déformation du limbe. - Forte production de miellat et donc apparition de fumagine (attaque des fruits, chute précoce du feuillage).
Puceron noir du pêcher <i>Brachycaudus persicae</i>	+ à ++	+	Dégâts plus importants sur les racines des jeunes plants.
Puceron cigarier du pêcher <i>Myzus varians</i>	+	+	Enroulement du limbe autour de la nervure principale (forme de cigare).

Les pucerons entraînent des modifications morphologiques importantes et nuisibles pour le développement des arbres. Ils peuvent également être des vecteurs du virus de la Sharka et donc occasionner d'importants dégâts (DROUZY et al., 2020). En effet, cette maladie entraîne un affaiblissement des arbres et rend la production impropre à la consommation. La seule méthode de lutte consiste à l'arrachage des arbres atteints. Tout cela entraîne de réels problèmes économiques pour les producteurs (FRANCIS et al., 2004; DANCEWICZ et GABRYS, 2008).

Le puceron vert du pêcher est un des ravageurs majeurs et potentiellement très dangereux pour les vergers de pêcher. En effet, malgré le développement des connaissances et des moyens de lutte contre ce puceron largement décrit dans la littérature, il reste le plus répandu en verger de pêcher (LECLANT et REMAUDIERE, 1970), et l'un des plus difficiles à combattre à cause des nombreuses résistances qu'il a accumulées. Le puceron farineux reste également difficile à combattre car rares sont les produits phytosanitaires qui se révèlent encore efficaces. Les infestations de pucerons noirs sont nettement moins préjudiciables que celles dues au puceron vert mais les dégâts produits sur les racines peuvent conduire à la mort des jeunes vergers. Enfin, le puceron cigarier n'est pas un bioagresseur majeur du pêcher mais se rencontre plus fréquemment en agriculture biologique où il reste bien contrôlé par les auxiliaires (SUD ARBO, 2012).

Les auxiliaires actifs sur les pucerons sont essentiellement des coccinelles (*Coccinellidae*), des chrysopes (*Chrysopidae*), des syrphes (*Syrphidae*) et des parasitoïdes (LECLANT et REMAUDIERE, 1970) (cf. Figure n° 2). Cette faune auxiliaire joue un rôle essentiel dans la régulation des populations de pucerons d'où l'importance de mettre en place des méthodes de lutte alternative favorisant leur présence. Cependant, face à de fortes dynamiques de populations, le taux de prédation par les auxiliaires s'avère insuffisant. Il est à noter aussi que selon les années, l'installation des auxiliaires dans les vergers arrive bien après les premières infestations de pucerons (SUD ARBO, 2012).

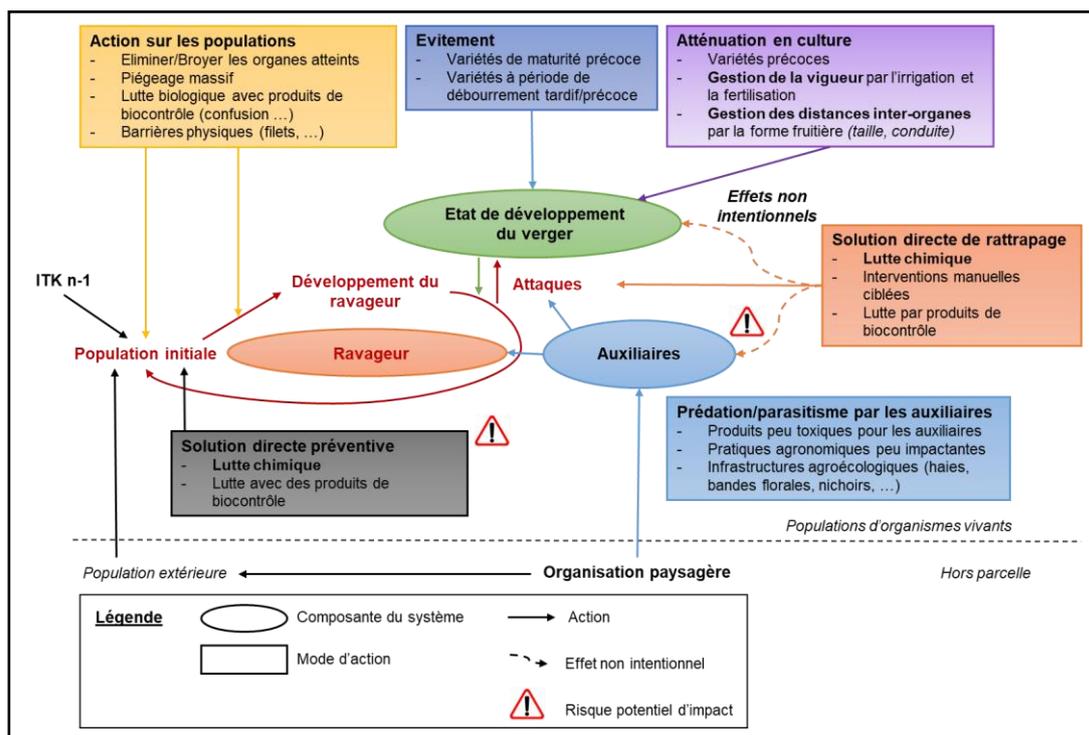


Figure n° 2 : Photographies de prédateurs des pucerons. A : larve de coccinelle ; B : larve de chrysope, C : larves de syrphes.

1.3 Méthodes alternatives de régulation des pucerons en verger de pêcher

Bien qu'un bon nombre de programmes ait étudié la sélection de pêches résistantes aux pathogènes et ravageurs (PASCAL et al., 2002; FOULONGNE et al., 2003; SAUGE et al., 2006), les pucerons restent largement contrôlés par l'usage de produits phytosanitaires. L'apparition de résistances (BARZMAN et al., 2015; HAWKINS et al., 2019), l'émergence de nouveaux bioagresseurs (HAZARIKA et al., 2009) et leurs impacts sur les auxiliaires (ELBAZ et al., 2009), l'environnement et la santé (CARVALHO, 2017) conduisent aujourd'hui à rechercher des leviers alternatifs aux pesticides, plus respectueux de l'environnement.

Ces moyens de protection tirent parti des ressources et des processus écologiques afin de réguler les populations de pucerons par des processus top-down (prédation et parasitisme) et des processus bottom-up (qualité et quantité de la ressource) tout au long de leur cycle biologique (GOGGIN, 2007; ROUSSELIN, 2017). Ils peuvent être de différente nature (REGNAULT-ROGER, 2005) et peuvent avoir une action « via la plante cultivée » (ex. limitation de la vigueur via l'alimentation hydrominérale ou stimulation des défenses des plantes), une action « via les auxiliaires » (lutte biologique classique ou par conservation), ou une action directement ciblée sur les bioagresseurs (ex. produits de biocontrôle) (LAGET et al., 2015) (cf. Figure n° 3).



1.3.1 Effets du levier Plantes de service sur la régulation des pucerons

Les composés organiques volatils (COV) sont des composés olfactifs qui interviennent tout au long du cycle biologique des insectes (WYATT, 2003) et notamment dans la localisation de la plante hôte par les pucerons (FRANCIS et al., 2004; BRUCE et al., 2005). Or les plantes produisent elles-aussi de nombreux COV (PICHESKY et al., 2006) qui leur permettent de communiquer entre elles, attirer les pollinisateurs ou encore se défendre.

Certaines plantes ont la faculté de produire des COV capables de repousser ou de perturber des ravageurs. Qualifiées de plantes de service, elles peuvent être associées aux cultures et avoir une action protectrice en induisant la présence de nouveaux COV qui modifient l'environnement olfactif et peuvent de ce fait avoir un impact sur les ravageurs (AMARAWARDANA et al., 2007; BEIZHOU et al., 2012). Elles sont considérées comme un levier prometteur pour lutter contre les bioagresseurs (SPELLMAN et al., 2006; MUTIGA et al., 2010).

Les plantes de service peuvent agir de différentes manières sur les ravageurs. Quelques études ont notamment montré une régulation des bioagresseurs via les plantes de services par l'altération des performances des ravageurs (LOPEZ et SHEPARD, 2007; BEN ISSA, 2014), par l'attraction des ravageurs avec des plantes-pièges (HOKKANEN, 1991; HUREJ, 2000), par l'attraction des ennemis naturels (BEIZHOU et al., 2012), par la répulsion des ravageurs via des plantes répulsives (D'ALESSANDRO et TURLINGS, 2006) ou encore par la stimulation des mécanismes de défense de la plante hôte (BALDWIN et al., 2002). Certaines plantes de service peuvent d'ailleurs présenter simultanément un effet répulsif sur les bioagresseurs et un effet attractif sur les ennemis naturels (SONG et al., 2010).

Cependant, il persiste encore un manque d'informations pour comprendre la complexité des mécanismes de perception des COV et leur mode d'action sur le comportement des pucerons (DOLAN et PANELLA, 2011). Plusieurs études se sont penchées sur l'analyse du comportement de différentes espèces de pucerons parallèlement à l'identification des COV émis par un panel de plantes de services en conditions contrôlées, dans le but de sélectionner des plantes de services qui agissent sur le comportement des pucerons via l'émission de COV. Le potentiel d'émission des COV et leur efficacité pour perturber les pucerons dépend des plantes de service utilisées. Par exemple, les performances du puceron *Myzus persicae* (nombre de femelles et de nymphes) sur plants de poivron sont plus affectées en présence de romarin, qu'en présence de lavande ou basilic (BEN ISSA et al., 2016). L'utilisation d'huiles essentielles de plants de menthe poivrée (*Mentha x piperita*) a également montré un effet répulsif sur cette espèce en conditions contrôlées (HORI, 1999; IKEURA et al., 2012; BEN ISSA, 2014; PASCUAL-VILLALOBOS et al., 2017). De ce fait, différentes études ont permis de définir un large panel de plantes de service potentiellement exploitables pour la régulation de différentes espèces de pucerons (cf. Tableau n° 3).

Tableau n° 3 : Liste des espèces de plantes de services utilisées dans les expériences en milieu contrôlé et leur effet sur les pucerons tel que rapporté dans la littérature (Source : BEN ISSA et al., 2016).

Common name	Latin name	Family	Aphid species	Specific action	Effect	Experiment	Source
Rosemary	<i>Rosmarinus officinalis</i>	Lamiaceae	<i>Myzus persicae</i>	Essential oil	Repellent	Field, laboratory	Hori (1998)
Lavender	<i>Lavandula latifolia</i>	Lamiaceae	<i>Myzus persicae</i>	Essential oil	Repellent	Laboratory, greenhouse	Hori (1999)
Basil	<i>Ocimum basilicum</i>	Lamiaceae	<i>Aphis citricola</i>	Intact plant	Repellent	Field	Beizhou et al. (2011)
Savoury	<i>Satureja hortensis</i>	Lamiaceae	<i>Aphis faba</i>	Intact plant	Deterrent	Field, greenhouse, wind tunnel	Basedow et al. (2006)
Thyme	<i>Thymus vulgaris</i>	Lamiaceae	<i>Myzus persicae</i>	Essential oil	Antifeedant	Laboratory	Hori (1999)
Peppermint	<i>Mentha piperita</i>	Lamiaceae	<i>Myzus persicae</i>	Plant extracts	Repellent	Field, laboratory	Ikeura et al. (2012)
Pot marigold	<i>Calendula officinalis</i>	Asteraceae	<i>Brevicoryne brassicae</i>	Intact plant	Repellent	Field	Jankowska et al. (2009)
African marigold	<i>Tagetes erecta</i>	Asteraceae	Aphid spec.	Intact plant	Repellent	Field	Castro et al. (1990)
French marigold	<i>Tagetes patula nana</i>	Asteraceae	<i>Brevicoryne brassicae</i>	Intact plant	Repellent	Field	Jankowska et al. (2009)
False yellowhead	<i>Dittrichia viscosa</i>	Asteraceae	<i>Myzus persicae</i>	Plant extracts	Antifeedant	Laboratory	Mamoci et al. (2012)
Geranium	<i>Pelargonium zonal</i>	Geraniaceae	<i>Myzus persicae</i>	Plant extracts	Insecticidal	Field	Velcheva et al. (2001)
Chives	<i>Allium schoenoprasum</i>	Alliaceae	<i>Myzus persicae</i>	Intact plant	Repellent	Laboratory	Amarawardana et al. (2007)

Il est également important de comprendre les modes d'actions des plantes de services candidates en déterminant si les COV émis agissent directement sur le comportement des pucerons ou indirectement via la plante hôte. En effet, Tarek Dardouri a réalisé une étude pour comprendre les modes d'action des COV de plantes de service perturbant l'infestation de *Myzus persicae* sur le poivron. Le basilic a montré un effet répulsif direct sur le puceron et la présence de tagète a montré un effet indirect via la plante hôte en réduisant notamment la durée d'ingestion du phloème par le puceron aboutissant à une diminution de sa fécondité (DARDOURI, 2018; DARDOURI et al., 2019a, 2021) (cf. Figure n° 4).

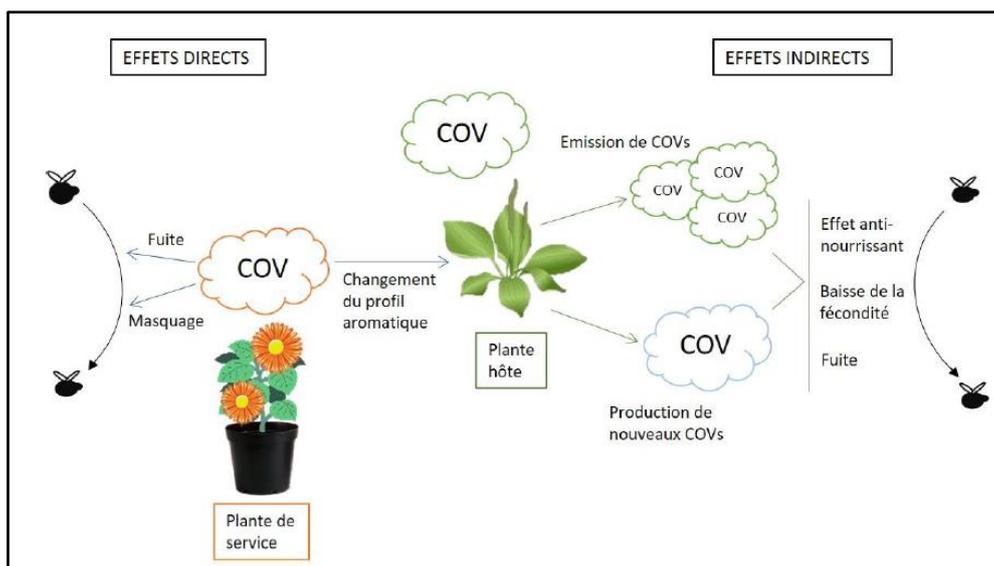


Figure n° 4 : Les potentielles interactions entre la plante de service, les pucerons et la plante hôte
(Source : DIEUDONNE, 2018).

Des études ont permis d'identifier, individuellement ou en mélange, les COV qui contribuent à la répulsion à partir de l'étude des chémotypes des espèces étudiées. En effet, des analyses chimiques ont indiqué que le romarin, efficace contre le puceron vert du pêcher, émet des COV spécifiques alors que d'autres plantes telles que le thym et la sarriette ne sont pas associées à un changement significatif dans la performance des pucerons et émettent une plus faible diversité de COV (BEN ISSA et al., 2016). Une autre étude a permis de tester individuellement 16 composés présents dans les bouquets du basilic et de la tagète. Des composés tels que le (E)- β -farnésène et l'eugénol ont de bonnes propriétés répulsives contre *M. persicae* (DARDOURI, 2018). De même, les COV émis par différents clones de romarin (l'acétate de bornyle, le camphre, l' α -terpinéol, le terpinène-4-ol et le géranyle acétone) se sont avérés répulsifs que dans le cas d'un seul clone, alors que les autres contenaient également ces cinq composés mais dans des proportions différentes. Ainsi, la présence de COV répulsifs dans un mélange n'est pas une condition suffisante pour que ce dernier soit répulsif. La concentration, la proportion, voire l'association des COV présents dans les bouquets olfactifs libérés, sont à l'origine des résultats contrastés entre les différentes plantes de service (DARDOURI, 2018; DARDOURI et al., 2019b).

Les pucerons réagissent aux signaux olfactifs des plantes non hôtes à plus d'un mètre d'eux (CHAPMAN et al., 1981). Mais l'efficacité d'une plante de services peut dépendre également de la distance à laquelle elle se situe (FROST et al., 2007). En effet, des expériences en serre ont montré que l'efficacité du romarin diminuait à partir de 1,5 m, jusqu'à devenir nulle à 2,5 m de distance de la culture. Ces résultats suggèrent donc qu'une plante de services peut être efficace en serre si elle est située à proximité de la plante à protéger (BEN ISSA et al., 2017a). L'introduction de sarriette, d'ageratum et de basilic en verger de pommier a entraîné une population significativement plus faible de pucerons (BEIZHOU et al., 2010). De plus des résultats, récemment publiés dans le cadre du projet ApiTree mené par l'INRAE de Gothenon, ont validé l'efficacité du romarin pour réduire significativement la présence du puceron cendré du pommier et augmenter significativement l'attraction de ses ennemis naturels (ALAPHILIPPE et al., 2021). L'implantation de romarin permet de lutter contre les pucerons cendrés en conditions de verger de pommiers en augmentant significativement la prédation par les auxiliaires (BEIZHOU et al., 2012).

Malgré ces résultats encourageants, il reste difficile de prédire l'efficacité des plantes de service dans les conditions d'un verger où des variables supplémentaires et des variables environnementales différentes peuvent affecter le comportement des pucerons et les émissions de COV. Ainsi, la compréhension approfondie de tous les mécanismes résultants de l'introduction des plantes de service en verger et l'optimisation de leur émission de COV d'intérêt en jouant notamment sur les conditions de culture, restent des enjeux majeurs pour envisager leur application en conditions de culture et proposer un *modus operandi* le plus performant possible

BEN ISSA et al., (2017) pensent que le levier plantes de service n'est pas suffisant lorsqu'il est utilisé seul et ne permet pas de remplacer la lutte chimique en raison de son efficacité partielle qui varie selon les conditions climatiques, la densité et la phénologie de la plante de service. Cependant, ce levier pourrait être associé à d'autres techniques de lutte intégrée (VILLENEUVE et al., 2017) telles que la gestion de la vigueur des arbres par la fertilisation azotée pour lutter plus efficacement contre les populations de pucerons en arboriculture et tendre vers l'abandon des pesticides.

1.3.2 Effets du levier Nutrition azotée sur la régulation des pucerons

L'azote est un nutriment dominant dans la croissance, le développement, la productivité et la longévité des cultures horticoles (TAYLOR et VAN, 1970). De ce fait, la fertilisation azotée est un facteur essentiel à leur productivité (BUSSI et al., 1992).

D'après PRICE, (2002) le contrôle des populations de pucerons serait plus efficace par l'utilisation de processus bottom-up. L'hypothèse « plant vigor » énonce qu'une forte vigueur des plantes maximiserait les performances des insectes (PRICE, 1991) et notamment des pucerons qui sont sensibles à la croissance et aux concentrations en azote des plantes (JORDAN et al., 2019). L'objectif serait donc de modifier la vigueur de la plante pour la rendre moins attractive pour les pucerons.

Plusieurs études ont prouvé qu'un apport azoté peut avoir un impact positif sur les performances des insectes (GLYNN et al., 2003; AQUEEL et LEATHER, 2011) jusqu'à un optimum au-delà duquel un effet négatif commence à apparaître (ZEHNDER et HUNTER, 2009; SAUGE et al., 2010). Le nombre de pucerons serait ainsi positivement corrélé avec le statut azoté des feuilles et la croissance végétative des pêchers jusqu'à un niveau intermédiaire d'azote où l'abondance des pucerons serait maximale.

L'étude du levier Nutrition azoté sur les dynamiques de croissance végétative des pêchers et l'abondance de *Myzus persicae* a permis de montrer que le développement des pucerons est favorisé par l'apport d'azote au début et au pic des infestations (ROUSSELIN et al., 2016b; a) (cf. Figure n° 5). Un traitement limité en azote retarderait ainsi l'infestation par les pucerons (FADHL, 2019). De plus, l'abondance des pucerons est positivement corrélée à la croissance végétative du pêcher (nombre de feuilles et nombre de pousses) impactée par la disponibilité en azote. En effet, une plus grande proportion de pousses à croissance rapide sur les pêchers est favorable au développement des populations pucerons qui se développent mieux que sur les rosettes (GRECHI et al., 2008).

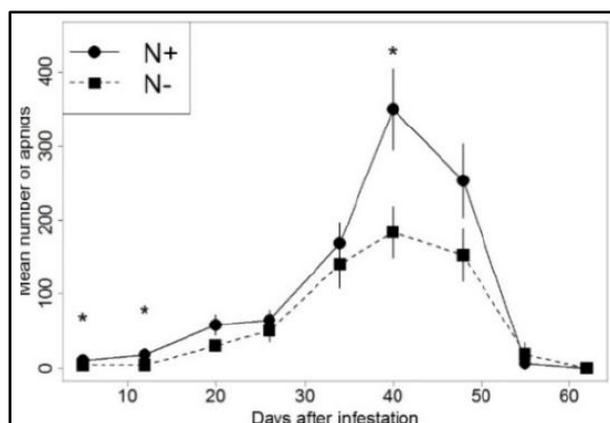


Figure n° 5 : Nombre moyen de pucerons par pousse pour les deux niveaux d'apport d'azote à chaque date de notation. Les astérisques indiquent les différences significatives (test de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0.05$). Les barres verticales représentent les erreurs standards. Taille des échantillons : $n(N-) = 19$; $n(N+) = 25$ (Source : ROUSSELIN et al., 2016b).

De plus, une variation de disponibilité en azote peut altérer de manières quantitative et qualitative les défenses de la plante contre les insectes herbivores (CHEN et al., 2010). Une augmentation de la fertilisation azotée peut réduire les concentrations en composés de défense dans la plante, ayant pour conséquence l'augmentation de l'infestation par les pucerons (JORDAN et al., 2019). En revanche, elle peut également augmenter la production de composés de défense ayant un effet inhibiteur sur les pucerons (BARTO et al., 2008). La fertilisation azotée s'avère donc être un levier intéressant à maîtriser pour lutter contre les infestations de pucerons en verger de pêchers tout en réduisant l'utilisation des pesticides.

Des travaux ont permis de modéliser l'effet de la combinaison des leviers Nutrition azotée et taille d'hiver sur la croissance foliaire et les populations de pucerons. L'analyse du modèle a montré la complexité des réponses des pêchers et des pucerons aux taux d'azote des feuilles et l'élagage d'hiver. Les simulations ont indiqué des pertes de production de fruits faibles dans une plage de valeurs réalistes d'azote foliaire et d'intensité de taille. Cependant l'influence des pratiques sur les interactions entre pêchers et pucerons pourraient entraîner des pertes plus importantes. Ce modèle est donc utile pour évaluer la pertinence des combinaisons de pratiques culturales pour une régulation bottom-up des populations de pucerons dans un contexte de production végétale intégrée (GRECHI et al., 2010).

1.4 Objectifs du stage et hypothèses de recherche

Ce stage s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés sur l'essai factoriel à deux facteurs (présence/absence d'une plante de service et quatre modalités de fertilisation azotée), installé en 2020 au sein d'un système économe en pesticides de l'essai EcoPêche de l'INRAE d'Avignon. Cet essai s'appuie sur différents travaux de recherche réalisés par PSH en situation contrôlée, qui ont montré l'efficacité de la nutrition azotée (SAUGE et al., 2010) et de certaines plantes de service via l'émission de composés organiques volatils (COV) (BEN ISSA et al., 2017b; DARDOURI et al., 2019a) sur la perturbation de *Myzus persicae*.

Le choix d'implanter de la menthe poivrée (*Mentha x piperita*) au sein de l'essai d'Eco-Pêche a été décidé à partir de différents critères. Outre son effet répulsif confirmé sur *M. persicae* en conditions contrôlées, la menthe poivrée a été choisie pour sa nature pérenne (4 à 5 ans en conditions de culture) qui facilite sa gestion en verger. Ses exigences en azote (entre 110N et 150N kg/ha) durant tout son cycle végétatif (ERCEAU et PASQUIER, 2016) font d'elle une potentielle concurrente pour le pêcher et donc une plante de service intéressante à étudier pour évaluer l'effet de son implantation sur la compétition pour la ressource en azote. Enfin, une différenciation de la fertilisation azotée ne modifie pas la composition en huiles essentielles de la menthe poivrée (CLARK et MENARY, 1980; PICCAGLIA et MAROTTI, 1993), ce qui aurait l'avantage de pouvoir étudier les mêmes COV entre toutes les modalités de menthe poivrée malgré la combinaison du facteur plante de services avec plusieurs doses d'azote.

Les interactions qui existent entre cultures et ravageurs complexifient les réponses du système induites par l'ensemble des pratiques culturales. Jusqu'à présent, peu d'études ont montré l'efficacité de ces leviers en conditions réelles de verger (CABROL, 2019; FADHL, 2019; ALAPHILIPPE et al., 2021). Et aucune étude ne s'est intéressées à l'effet de leur combinaison sur la régulation de plusieurs espèces de pucerons en verger. L'objectif de ce stage est donc de réaliser une étude systémique de l'effet combiné de la nutrition azotée et de la présence de menthe poivrée sur la régulation des populations de pucerons en conditions réelles de verger de pêchers.

L'analyse des synergies et des antagonismes possibles dans un système complexe (arbres fruitiers - plantes de service - effet COV - nutrition azotée - populations de pucerons) permettrait de comprendre comment la combinaison des leviers fertilisation azotée et introduction d'une plante de service telle que la menthe poivrée peut réduire au mieux les infestations de pucerons tout en maintenant les performances écologiques, agronomiques et économiques d'un verger de pêchers.

Pour répondre à cette problématique, cette étude a pour objectif de déterminer si la présence de menthe poivrée et la réduction des apports azotés (i) impactent le développement des pêchers, via une compétition avec la menthe pour l'azote et/ou une limitation des ressources en azote, (ii) impactent la capacité de la plante de services à émettre des COV, via une modification de son état nutritionnel et (iii) ont un effet sur la dynamique des pucerons, en condition de verger, via la répulsion ou l'attraction d'auxiliaires (activité de prédation) ; (cf. Figure n° 6). Ce travail vise aussi à documenter la faisabilité technique de la combinaison de ces deux leviers dans un verger de pêchers à faibles intrants.

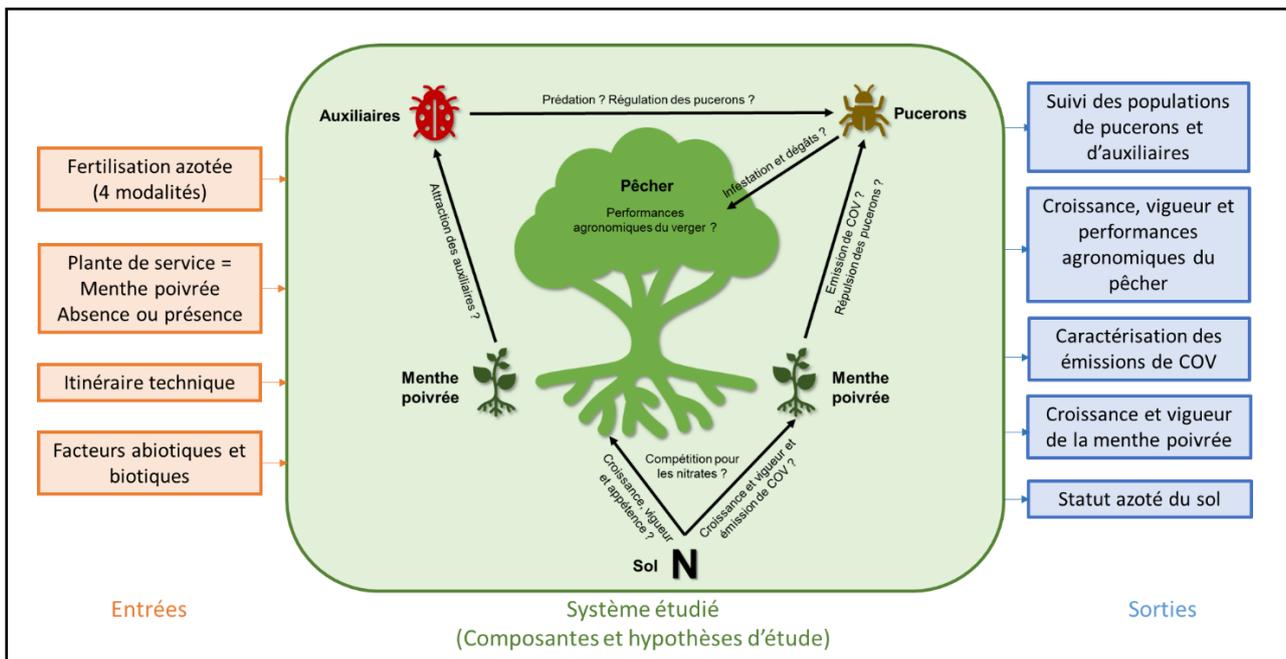


Figure n° 6 : Schéma conceptuel du système et des hypothèses étudiés.

2 Matériels et méthodes

Afin de répondre aux problématiques précédemment soulevées, des observations et des mesures réalisées en verger de pêcher ont pour objectif de caractériser :

- La dynamique de l'azote dans le sol, les arbres et la menthe poivrée.
- Le développement et la vigueur du pêcher et de la menthe poivrée.
- L'évolution des populations de pucerons ainsi que l'évolution d'auxiliaires en lien avec des mesures de COV.

Une analyse des mesures de COV couplées aux mesures écophysiologicals des pêchers et de la menthe poivrée a pour but de préciser leur zone d'action et d'étudier l'effet combiné des deux leviers sur les dynamiques de pucerons et la compétition entre le pêcher et la menthe poivrée.

2.1 Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif EcoPêche du domaine Saint Paul du centre de recherche de l'INRAE d'Avignon est composé de 3 vergers de pêchers :

- Le bloc S1-Référence conduit selon les recommandations régionales (raisonné, forme fruitière en double Y et une densité de 571 arbres/ha) ;
- Le bloc S2-Eco1 économe en produits phytosanitaires avec la même densité et la même forme fruitière que le bloc S1-Référence ;
- Le bloc S3-Eco2 économe en produits phytosanitaires avec une conduite différente décrite ci-dessous.

L'essai est installé sur le verger expérimental S3-Eco2 (cf. Tableau n° 4).

Tableau n° 4 : Caractéristiques du verger Eco-pêche S3-Eco2.

Variété	Nectarlove (nectarine blanche)
Porte-greffe	GF 677
Année plantation	2013 (9 ^{ème} feuille en 2021)
Forme arbres	Simple Y oblique
Densité (arbres/ha)	909 (distance de plantation de 5 x 2,20 m)
Système irrigation	Microaspersion sous frondaison. Pilotage par bilan hydrique et sonde TDR.
Entretien du sol sur le rang	Paillage textile jusqu'en 2019 et passage au désherbage mécanique en 2020 sur la modalité <i>Témoin</i> et plante de couverture (menthe poivrée) sur la modalité <i>Menthe</i> .
Traitements phytosanitaires	Intervention anti-monilia avant récolte à R-10 j (fongicide de synthèse ou produit de biocontrôle) selon la pression monilia. Règle : 2 traitements avec de l'huile blanche au stade hivernant et tenter l'impasse ensuite pour favoriser la régulation par les auxiliaires. En 2021 : Pression des pucerons assez forte et installation des auxiliaires tardive, donc des interventions avec des produits de biocontrôle ont été nécessaires de fin avril à début juin (sels de potassium).
Charge en fruits visée	350 fruits/arbre (soit 54 T/ha)
La fertilisation P et K	Un apport de 50 kg P ₂ O ₅ /ha fin février / début mars Trois apports de 50 kg K ₂ O/ha fin février / début mars ; début juin et début juillet.

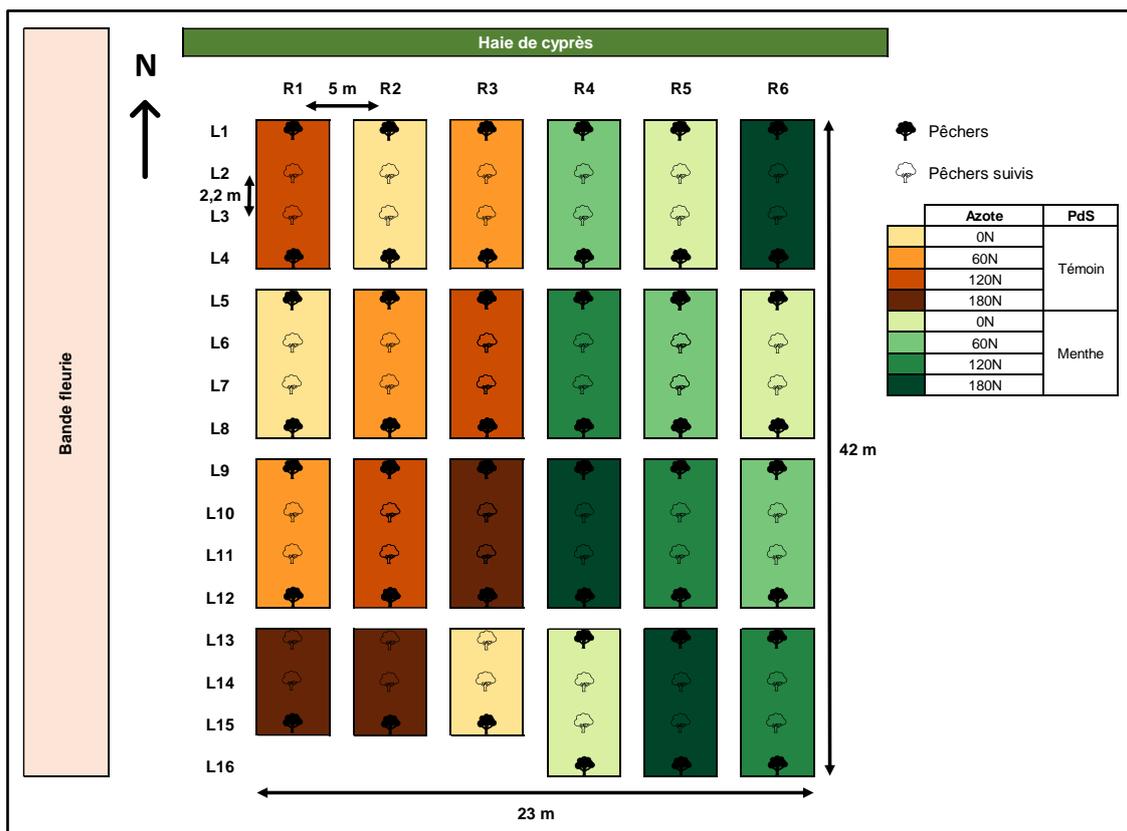


Figure n° 7 : Plan du verger Eco-pêche S3-Eco2.

Le bloc S3-Eco2 est composé de 6 rangs de 15 à 16 arbres chacun. Les inter-rangs sont enherbés avec un gazon à dominante de fétuque élevée. Pour contrôler un effet rang, notamment l'effet rang de bordure, les rangs sont chacun divisés en 4 placettes. Le dispositif est donc composé au total de 24 placettes. Chaque placette individuelle est composée de 4 arbres, mais les mesures et observations sont réalisées sur les 2 arbres centraux de chaque placette (48 arbres suivis au total) (cf. Figure n° 7). L'essai comprend une combinaison de 2 facteurs : un facteur *Azote* et un facteur *PdS*.

Le facteur *Azote* comprend 4 modalités : *0N*, *60N*, *120N* (dose de référence) et *180N* (en kg N/ha). Les apports sont fractionnés et réalisés avec du nitrate de calcium une fois par mois entre mars et juin. L'objectif est d'avoir une différenciation assez rapide et marquée du statut azoté des arbres dès la mi-avril pour pouvoir analyser son effet sur le développement des pucerons.

Le facteur *PdS* comprend 2 modalités : *Témoin* (sol nu avec un travail mécanique sur le rang, intercep le 08/07) et *Menthe* (menthe poivrée sur le rang) (cf. Figure n° 8). La menthe poivrée (*Mentha x piperita*) a été mise en place en mai 2020 avec une densité de 7 plants/m². Le facteur *PdS* n'est pas distribué aléatoirement mais dans 2 sous-blocs composés de 3 rangs adjacents pour que le paysage olfactif de la menthe soit suffisamment dense (concentrations en COV de la menthe les plus élevées possibles). Un rabattage de la menthe a été réalisé à la débrousailluse le 06/07.

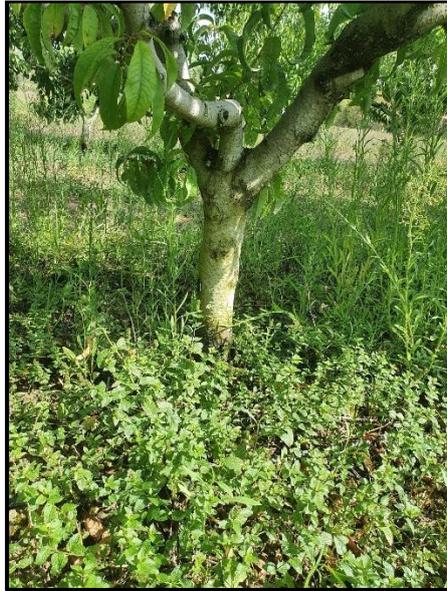


Figure n° 8 : Photographie d'un pêcher de la modalité *Menthe* du verger Eco-pêche S3-Eco2.

Ce dispositif est donc constitué de 8 modalités : *Témoin 0N*, *Témoin 60N*, *Témoin 120N*, *Témoin 180N*, *Menthe 0N*, *Menthe 60N*, *Menthe 120N* et *Menthe 180N*.

2.2 Suivi des nitrates du sol

2.2.1 Prélèvements de sol

Des prélèvements de sol ont été réalisés tous les mois entre début mars et début juillet. A chaque date, 2 carottages de sol de part et d'autre du centre de toutes les placettes (sur les côtés d'inter-rangs) ont été réalisés jusqu'à 30 cm de profondeur à l'aide d'une tarière. Et de la même façon, 2 carottes supplémentaires ont été prélevées entre 30 et 60 cm de profondeur sur les placettes des modalités *120N* et *180N*. Les 2 carottes de sol du même horizon de la même placette, ont été ensuite mélangées puis tamisées (tamis à maille de 4 mm) pour ne former qu'un seul échantillon. Pour chaque date, 36 échantillons de sol (12 placettes *0N* et *60N* x 1 horizon + 12 placettes *120N* et *180N* x 2 horizons) ont ainsi pu être analysés.

2.2.2 Dosage des nitrates en laboratoire

Une solution de sol (75 g de sol frais dans 100 ml d'eau distillée) a été préparée à partir de chaque échantillon pour estimer sa concentration en nitrates. Après décantation au moins 3 jours à 4°C, les nitrates présents dans les échantillons de sol ont été dosés par spectrophotométrie à l'analyseur de nitrates FIA 5000 (Flow Injection Analysis) (cf. Figure n° 9 et Annexe A).



Figure n° 9 : Photographie de l'analyseur de nitrates FIA 5000 (Flow Injection Analysis).

2.3 Suivi de la vigueur des pêchers et de la menthe poivrée

2.3.1 Mesures et prélèvements sur les pêchers

Afin de mesurer la dynamique de croissance des pousses des pêchers, 4 jeunes pousses vigoureuses (futurs pousses longues) ont été sélectionnées puis étiquetées sur tous les arbres centraux de l'ensemble des placettes. Au total, les longueurs de 192 pousses de pêchers (4 pousses x 48 arbres) ont été mesurées tous les 14 jours entre mi-avril et fin juillet.

En parallèle, 5 feuilles de pêcher étaient aléatoirement prélevées mûres et complètement déployées dans la partie médiane des pousses sur les faces Est d'inter-rang des arbres centraux de l'ensemble des placettes. Les 10 feuilles des arbres de la même placette étaient réunies en un même échantillon. Ainsi, 24 échantillons de feuilles de pêchers ont été prélevés tous les mois entre fin avril et mi-juillet.

Les échantillons étaient rapidement pesés afin d'en déterminer le poids frais puis placés à l'étuve à 80°C pendant plus de 48h afin d'en estimer le poids sec. La surface foliaire des feuilles de pêcher était également mesurée au planimètre (surface cumulée des 10 feuilles d'un échantillon). La surface foliaire spécifique (SLA) a ensuite été calculée comme le rapport de la surface foliaire sur le poids sec.

Des mesures permettant d'évaluer et de quantifier la production étaient prévues mais ont été abandonnées à la suite d'une gelée printanière qui a conduit à une perte totale des fruits du verger.

2.3.2 Mesures et prélèvements sur la menthe poivrée

Afin d'évaluer le lien possible entre vigueur de la menthe et émission de COV, un suivi de sa densité a été réalisé entre mi-avril et mi-juin. Le pourcentage de couverture de la menthe poivrée était estimé visuellement à l'aide de 4 quadrats de 0,25 m² répartis sur le côté Est et 4 autres sur le côté Ouest du rang de chaque placette de la modalité *Menthe*.

De plus, des prélèvements de biomasse ont été réalisés à ces mêmes dates : 2 petites et 2 grandes tiges de menthe poivrée ont été prélevées sur le côté Ouest de l'ensemble des placettes de la modalité *Menthe*, le même jour (au plus tard le lendemain) des prélèvements de COV, puis regroupées en 2 échantillons (petites tiges et grandes tiges). Ainsi, 24 échantillons de menthe (2 échantillons x 12 placettes de modalité *Menthe*) ont été prélevés une fois par mois entre mi-avril et début-juillet.

La hauteur de chaque tige de menthe, le poids frais et le poids sec de chaque échantillon (2 tiges de menthe) ont ensuite été estimés.

2.3.3 Dosage de l'azote total des végétaux

Afin de pouvoir évaluer le statut azoté des pêchers et de la menthe, tous les échantillons de végétaux (feuilles de pêcher et tiges de menthe poivrée) ont été placés à l'étuve à 80°C pendant plus de 48h. Après cette étape de séchage, ils ont été broyés à l'aide d'un vibro-broyeur à billes afin d'obtenir une poudre végétale dont les particules ne dépassaient pas 5 microns. Pour chaque échantillon, 5 mg de poudre végétale ont été introduits dans une capsule d'étain. L'azote total a ensuite été dosé par la méthode de combustion sèche de Dumas à l'aide d'un auto-analyseur CHONS (Appareil Thermo EA1112) (cf. Figure n° 10 et Annexe B).



Figure n° 10 : Photographie de l'auto-analyseur CHONS (Appareil Thermo EA1112).

2.4 Détermination des COV de la menthe poivrée présents dans le verger

2.4.1 Prélèvements de COV sur le verger

Les prélèvements de COV ont été réalisés une fois par mois entre mi-avril et début-juillet au pied de 12 pêchers (sur 6 placettes) des modalités *Témoin 0N*, *Témoin 120N*, *Menthe 0N* et *Menthe 120N* (cf. Figure n° 11). A chaque placette, 4 prélèvements ont été réalisés simultanément aux pieds des deux arbres centraux et à deux hauteurs différentes : à 40 cm et 1 m de hauteur. Les COV ont été capturés dans des cartouches (Perkin-Elmer ref. N9307005 remplies de Tenax TA® et préalablement conditionnées) couplées à des micro-pompes (PAS-500, Supelco) à un débit régulé de 0,2 L/min (cf. Figure n° 12). Chaque prélèvement a duré 20 minutes au cours desquelles 4 litres d'air passaient dans la cartouche. Les 24 prélèvements de COV ont tous été réalisés en début d'après-midi, périodes où les températures étaient les plus chaudes, afin d'optimiser la production de COV par la menthe poivrée (DEMENT et al., 1975; TINGEY et al., 1980; HOLOPAINEN et GERSHENZON, 2010).

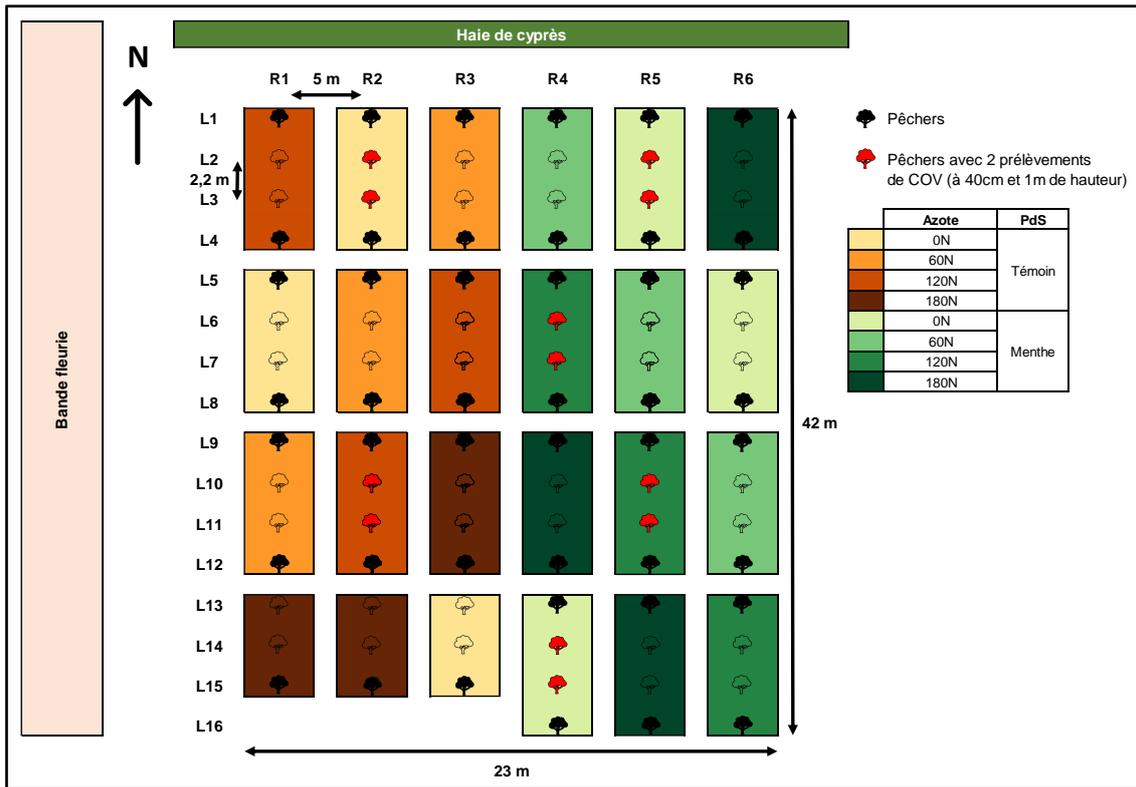


Figure n° 11 : Emplacements des différents prélèvements de COV réalisés sur le verger Eco-pêche S3-Eco2.

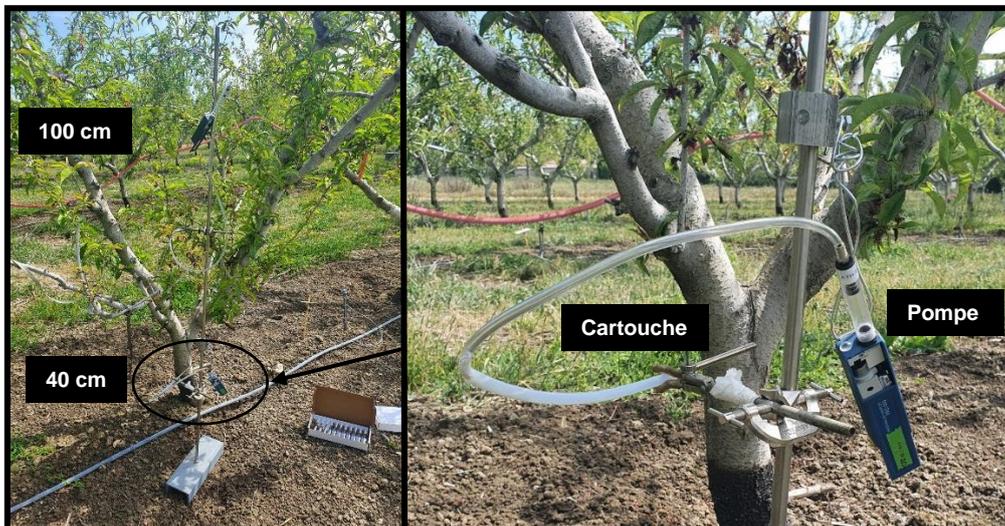


Figure n° 12 : Photographies du dispositif de prélèvement des COV sur le verger Eco-pêche S3-Eco2.

2.4.2 Analyse des COV en laboratoire

Après prélèvement sur le verger, les cartouches étaient stockées en chambre froide à 4°C avant d'être analysées par les méthodes successives de thermodésorption, chromatographie gazeuse et spectrométrie de masse en utilisant un système GC-MS Trace GC ultra/ISQ (Thermo ; simple quadripôle) associé à un désorbeur thermique Turbomatrix - 650ATD, (Perkin Elmer), et une une colonne DB-5 MS 30 m x 0,25 mm x 0,50 µm (Agilent) (cf. Figure n° 13).



Figure n° 13 : Photographie du thermodésorbeur (TD), de l'analyseur de gaz (GC) et du spectromètre de masse - ISQ (simple quadripôle) (MS).

Les fichiers bruts produits après analyse ont ensuite été traités avec le logiciel AMDIS v2.73 du National Institute of Science and Technology (NIST) pour l'identification et la quantification des COV prélevés sur le verger. Cette méthode a permis d'identifier avec confiance 10 composés dont 4 reconnus dans la littérature comme pouvant indiquer la présence de menthe poivrée : le menthone/isomenthone, le limonène, le menthol et le menthyl acetate (DARDOURI et al., 2019a; WILKINSON et al., 2020). La proportion (pourcentage relatif) de chaque COV caractéristique de la menthe et la proportion totale des COV de la menthe ont été calculées en prenant comme référence la plus grande aire de pic parmi tous les composés identifiés à chacune des dates.

2.5 Suivi des colonies de pucerons et de leurs ennemis naturels

2.5.1 Suivi de l'infestation par les pucerons et de la présence des auxiliaires

L'inspection des pêchers a été réalisée dès le mois de mars afin de pouvoir observer les premières infestations de pucerons. Les observations ont été réalisées toutes les semaines jusqu'à la fin des infestations (fin juin). A chaque date, sur les 2 arbres centraux de chaque placette, 10 rameaux (5 rameaux sur chaque face d'inter-rang de l'arbre) étaient aléatoirement choisis (soit 20 observations par placette). Pour chaque type de puceron (puceron noir, puceron vert, puceron farineux et puceron cigarier) et chaque type d'auxiliaire (coccinelle, chrysope et syrphé), le nombre de rameaux infestés et/ou abritant des ennemis naturels (larves et adultes) était noté. Un total de 480 notations (48 arbres x 10 rameaux) de type présence/absence a été réalisé chaque semaine pendant 4 mois.

Un suivi de pousses colonisées par des foyers de pucerons a été fait dès le début des infestations de pucerons verts, cigariers et farineux (de fin mai à mi-juin). Sur chacune des faces d'inter-rang des 2 arbres centraux de chaque placette, 2 pousses colonisées ont été sélectionnées, étiquetées puis suivies chaque semaine jusqu'à la fin des infestations. A chaque date d'observation, chaque foyer a été noté selon une échelle de sévérité d'infestation. (GRECHI et al., 2008) (cf. Tableau n° 5). Un total de 96 notations (48 arbres x 2 pousses) a été réalisé chaque semaine pendant 2 mois.

Tableau n° 5 : Définition de l'échelle utilisée pour décrire la sévérité d'infestation des pousses des pêchers (Source : d'après GRECHI et al., 2008).

Echelle	Nombre de pucerons	Symptômes visuels
0	0	Pas de pucerons.
1	1 à 5	Pousse légèrement infestée.
2	5 à 25	Pousse clairement infestée.
3	25 à 125	2-3 premières feuilles enroulées.
4	125 à 625	3-5 feuilles enroulées, colonisation du haut de la pousse.
5	> 625	> 5 feuilles enroulées, colonisation de la partie supérieure de la pousse.

2.5.2 Détermination de la régulation biologique au verger

Des cartes de prédation ont été mises en place dans le verger dans le but d'évaluer l'effet de la menthe poivrée et de la fertilisation azotée sur le taux de prédation des pucerons par leurs ennemis naturels.

Le niveau de prédation de chaque modalité a été obtenu lors de deux campagnes réalisées le 22/04 (à environ 1100°C cumulés depuis le premier janvier) et le 17/05 (à environ 1500°C cumulés depuis le premier janvier). Chaque carte de prédation était constituée d'un morceau de papier de verre (2,5 X 5 cm) sur lequel étaient fixés 3 pucerons verts du pois (*Acyrtosiphon pisum*) (cf. Figure n° 14). Quelques jours avant les deux campagnes, les pucerons ont été collés vivants sur les cartes avec de la colle UHU twist&glue ReNATURE sans solvant à l'aide d'un pinceau. Les cartes ont ensuite été stockées au congélateur (-20°C) jusqu'à la date de pose sur le verger. A chaque campagne, une carte a été agrafée en deux points dans le sens de la longueur sur la nervure d'une feuille située au centre d'un des deux arbres centraux de chaque placette. Les cartes ont été ramassées après 24 h d'exposition, et le nombre de pucerons prédatés de chaque carte a été relevé. Pour chacune des 2 campagnes, 24 cartes (24 placettes x 1 carte) ont ainsi été analysées.



Figure n° 14 : Photographie de cartes de prédation utilisées.

2.6 Bilan des variables suivies

Les différentes observations et mesures permettent de caractériser les dynamiques des différentes composantes du système de l'essai factoriel présent sur le verger Eco-pêche S3-Eco2 (cf. Tableau n° 6).

Tableau n° 6 : Récapitulatif des variables étudiées. *Les variables barrées sont celles qui n'ont pas pu être déterminées en raison de la gelée printanière de cette année.*

Composantes du système	Caractéristiques étudiées	Observations/Mesures étudiées
Pêcher	Croissance et développement	Poids frais des feuilles (PF) (en g)
		Surface foliaire spécifique (SLA) (en cm ² /g)
		Longueur des pousses (en cm)
		Nombre de bourgeons totaux, de bourgeons végétatifs et de bourgeons à fleur
		Nombre de fruits noués
	Diamètre des fruits (en cm)	
	Statut azoté	Teneur en azote des feuilles (en g pour 100g de MS)
		Teneur en azote des fruits (en g pour 100g de MS)
Rendement	Poids des fruits commercialisables (en kg) et répartition par calibre (en %)	
	Taux de sucre des fruits (en %Brix)	
Menthe poivrée	Croissance et développement	Densité (en %)
		Hauteur (en cm)
	Statut azoté	Teneur en azote (en g pour 100g de MS)
Emission de COV	Proportion de limonène, menthol, menthyl acetate et menthone/isomenthone (en %)	
Pucerons (<i>Myzus persicae</i> , <i>Hyalopterus amygdali</i> , <i>Brachycaudus persicae</i> et <i>Myzus varians</i>)	Dynamique d'infestation	Nombre de rameaux infestés par type de puceron (sur 10)
Auxiliaires (coccinelles, syrphes et chrysopes)	Dynamique de prédation	Nombre de rameaux abritant chaque type d'auxiliaire (sur 10)
		Nombre de pucerons prédatés par carte de prédation
Sol	Statut azoté	Teneur en nitrates entre 0-30 cm et 30-60 cm de profondeur (en kg/ha)

2.7 Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques et leurs représentations graphiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio (v.3.0.1).

Les placettes et les arbres (individus) sont caractérisés à la fois par des variables qualitatives (*Azote* et *PdS*) et quantitatives (variables quantifiant les observations et mesures étudiées). Des analyses factorielles de données mixtes (AFDM) ont donc été utilisées pour observer la variabilité des jeux de données et analyser la similitude entre les individus en prenant en compte des variables mixtes (PAGES, 2004). Les AFDM, ont été calculées à partir de la fonction *FAMD* du package *FactoMineR* qui permet de normaliser les variables quantitatives et qualitatives au cours de l'analyse afin d'équilibrer l'influence de chaque ensemble de variables. A la suite de chaque AFDM, une classification hiérarchique a été effectuée par l'approche HCPC (Hierarchical Clustering on Principal Components ou Classification Hiérarchique sur Composantes Principales), à l'aide de la fonction *HCPC* du package *FactoMineR* afin d'identifier des groupes d'observations similaires dans les jeux de données (HUSSON et al., 2010).

Cette méthode a permis de réaliser :

- Une analyse de la compétition pour l'azote sur les placettes de menthe poivrée à la période de mi-mai (aux pics d'infestations), à l'aide des variables :
 - *Azote* : 4 modalités (0N, 60N, 120N et 180N).
 - *Taux_N_H1* : Teneur en nitrates du sol entre 0 et 30 cm de profondeur (en kg/ha) du 18/05 moyennée à l'échelle de la placette.
 - *Taux_N_pecher* : Teneur en azote des feuilles de pêchers (en g pour 100g de MS) du 17/05 moyennée à l'échelle de la placette.
 - *Taux_N_menthe* : Teneur en azote de la menthe (en g pour 100g de MS) du 12/05 moyennée à l'échelle de la placette.
- Une analyse de la vigueur des pêchers à la période de début-juin (aux pics d'infestation), à l'aide des variables :
 - *Azote* : 4 modalités (0N, 60N, 120N et 180N).
 - *PdS* : 2 modalités (*Temoin* et *Menthe*).
 - *PF* : Poids frais des feuilles de pêcher (en g) du 03/06 moyenné à l'échelle de la placette.
 - *Taux_N* : Teneur en azote des feuilles de pêchers (en g pour 100g de MS) du 03/06 moyennée à l'échelle de la placette.
 - *SLA* : Surface spécifique foliaire (en cm²/g) du 03/06 moyennée à l'échelle de la placette.
 - *Long_pousse* : Longueur des pousses de pêcher (en cm) du 08/06 moyennée à l'échelle de la placette.
- Une analyse de la vigueur de la menthe poivrée à la période de mi-juin (au plus proche des pics d'infestations), à l'aide des variables :
 - *Azote* : 4 modalités (0N, 60N, 120N et 180N).
 - *Densite* : Densité de la menthe poivrée (en %) du 15/06 moyennée à l'échelle de la placette.
 - *PF* : Poids frais de la menthe poivrée (en g) du 14/06 moyenné à l'échelle de la placette.

- *Hauteur* : Hauteur de la menthe poivrée (en cm) du 14/06 moyennée à l'échelle de la placette.
- *Taux_N* : Teneur en azote de la menthe poivrée (en g pour 100g de MS) du 14/06 moyennée à l'échelle de la placette.
- Une analyse des COV de la menthe poivrée prélevés le 07/07 (après rabattage de la menthe), à l'aide des variables :
 - *Azote* : 4 modalités (0N, 60N, 120N et 180N).
 - *PdS* : 2 modalités (Témoin et Menthe).
 - *Hauteur* : 2 modalités (40cm et 100cm).
 - *Limonene*, *Menthol*, *Menthyl_acetate*, *Menthone_Isomenthone* : Proportions de limonene, menthol, menthyl acetate et menthone/isomenthone prélevées dans une cartouche (en %).

L'effet des facteurs *Azote* et *PdS* sur chaque variable à expliquer quantitative a été analysé à l'aide de tests statistiques. La normalité des données était vérifiée par un test de Shapiro-Wilk.

Lorsque la normalité était vérifiée, les données étaient analysées par une ANOVA mixte (à 2 ou 3 facteurs). Les ANOVA mixtes ont permis de comparer les moyennes de groupes d'individus classés selon deux types de variables catégorielles : des facteurs inter-sujets, qui ont des catégories indépendantes (facteurs *Azote* et *PdS*) et un facteur intra-sujet, qui a des catégories apparentées aussi appelées mesures répétées (facteur *Date*) (DATANOVA, 2021). Cette méthode a permis d'analyser comment chaque variable à expliquer évoluait au fil du temps selon la combinaison du facteur *Azote* et du facteur *PdS*. Dans le cas d'un effet d'interaction significatif, des comparaisons par paires avec un ajustement de Holm étaient réalisées à chaque niveau du facteur *Date*.

Lorsque la normalité des résidus n'était pas respectée, les données étaient transformées à l'aide de la fonction *boxcox* du package *MASS*. Si la normalité n'était toujours pas vérifiée, l'étude des effets d'interactions était alors omise et les moyennes des 8 modalités (combinaisons des 2 facteurs) étaient comparées par un test non-paramétrique de Kruskal-Wallis pour chaque date, suivi d'un test post-hoc de Dunn avec un ajustement de Holm.

3 Résultats

3.1 Conditions climatiques lors de la campagne de mesures et de prélèvements sur le verger

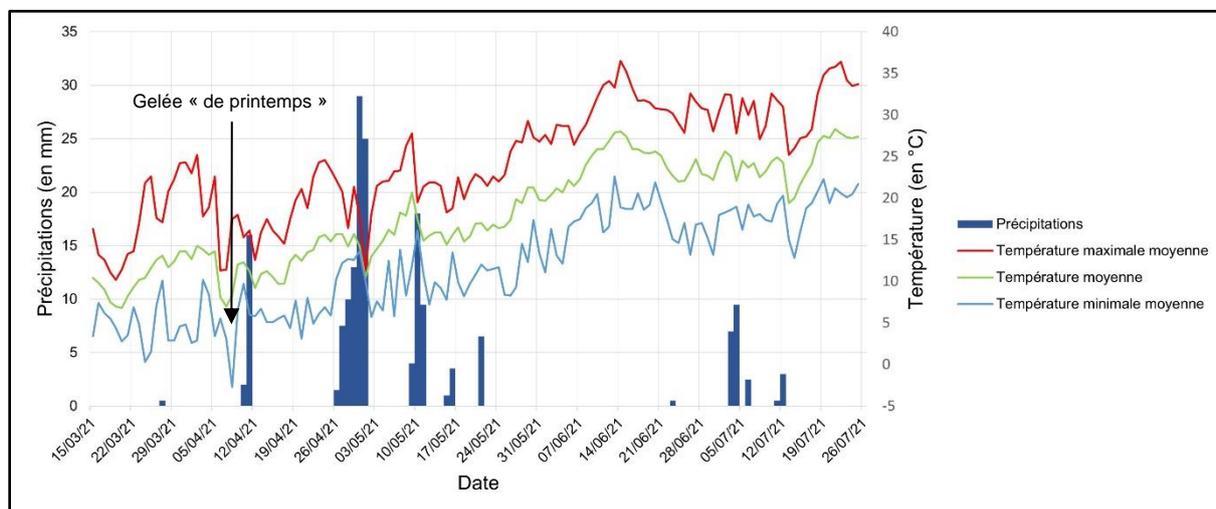


Figure n° 15 : Précipitations et températures entre le 15/03 et le 26/07.

Après un hiver doux (novembre 2020 à fin février 2021), une gelée « de printemps » a été enregistrée dans la nuit du 07 au 08 avril (-2.7 °C sous abri à Avignon-Montfavet) qui s'est avérée de forte intensité (le gel a débuté vers 2 h du matin avec des températures nocturnes atteignant -4.8 °C (indice actinothermique à 50 cm de hauteur du sol) (INRAE AgroClim, 2021) (cf. Figure n° 15). Cette gelée a occasionné des dégâts très importants pour de nombreuses cultures fruitières (principalement les fruits à noyau comme l'abricotier, l'amandier, le pêcher ...) dans la moyenne et basse vallée du Rhône avec des pertes pouvant dépasser 90 % de la production (AGRESTE, 2021).

Le gel a engendré la perte totale des fruits sur tous les systèmes du dispositif EcoPêche de l'INRAE d'Avignon. La charge visée pour le S3 était de 350 fruits par arbre (soit 54 T/ha). Des mesures sur les fruits devaient être réalisées afin de quantifier les performances agronomiques du verger (suivi de croissance et établissement d'allométrie des fruits, teneur en azote, rendements et détermination des dommages à la récolte avec le pourcentage de fruits piqués, etc ...).

Le printemps et le début d'été ont été relativement chauds avec quelques épisodes caniculaires (températures supérieures 35 °C) surtout concentrés sur fin juillet et mi-août. Deux épisodes pluvieux ont été notables pour la région, en début juillet (15 mm cumulés sur 10 jours) et début août (29 mm cumulés sur 7 jours) mais avec un bilan hydrique déficitaire sur la période de début février à fin juillet (-438 mm).

3.2 Suivi de l'azote au sein du verger

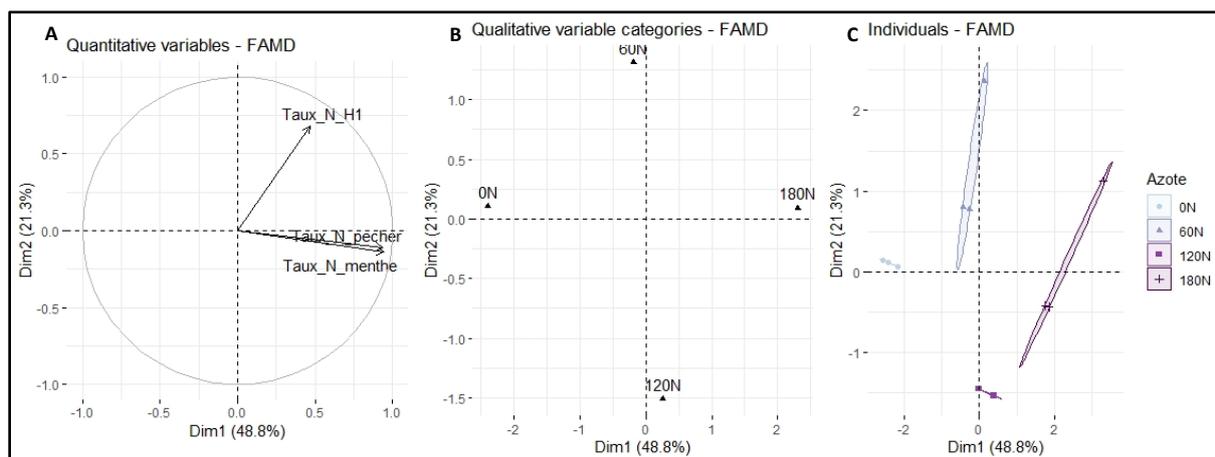


Figure n° 16 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les taux d'azote des feuilles de pêcher, de la menthe et du sol entre 0 et 30 cm, correspondant à la période de mi-mai. A : Graphique des variables quantitatives sur les dimensions 1 et 2. B : Graphique de la variable qualitative sur les dimensions 1 et 2. C : Graphique des 12 individus analysés sur les dimensions 1 et 2. Les ellipses représentent les ellipses de confiance autour des points moyens de chaque groupe.

Les deux premières dimensions de l'AFDM sur les taux d'azote des feuilles de pêcher, de la menthe et du sol entre 0 et 30 cm, correspondant à la période de mi-mai (cf. Figure n° 16) expriment 70,1% de l'inertie totale du jeu de données (respectivement 48,8% et 21,3%). Les variables *Azote*, *Taux_N_menthe* et *Taux_N_pecher* contribuent respectivement à 32,3%, 30,5% et 29,7% à la construction du premier axe. Les variables *Azote* et *Taux_N_H1* contribuent respectivement à 61,5% et 36,1% à la construction du deuxième axe.

Les taux d'azote de la menthe et des feuilles de pêcher sont fortement corrélés à l'axe 1. Les individus présentant les plus forts taux se situent donc à droite du graphique (cf. Figure n° 16.C). La dimension 1 permet de distinguer les modalités *0N* et *180N* de la variable *Azote* (*0N* à gauche et *180N* à droite du graphique des individus). Les individus qui prennent la modalité *180N* présentent en moyenne les taux d'azote de la menthe et des feuilles de pêcher les plus forts. Les individus qui prennent la modalité *0N* présentent en moyenne les taux d'azote de la menthe et des feuilles de pêcher les plus faibles. La dimension 2 permet de distinguer les modalités *60N* et *120N* de la variable *Azote* (*60N* en haut et *120N* en bas du graphique des individus). Le taux de nitrates du sol prélevé entre 0 et 30cm étant positivement corrélé à l'axe 2, les individus qui prennent la modalité *60N* présentent donc en moyenne des taux de nitrates dans le sol plus importants que ceux de la modalité *120N*.

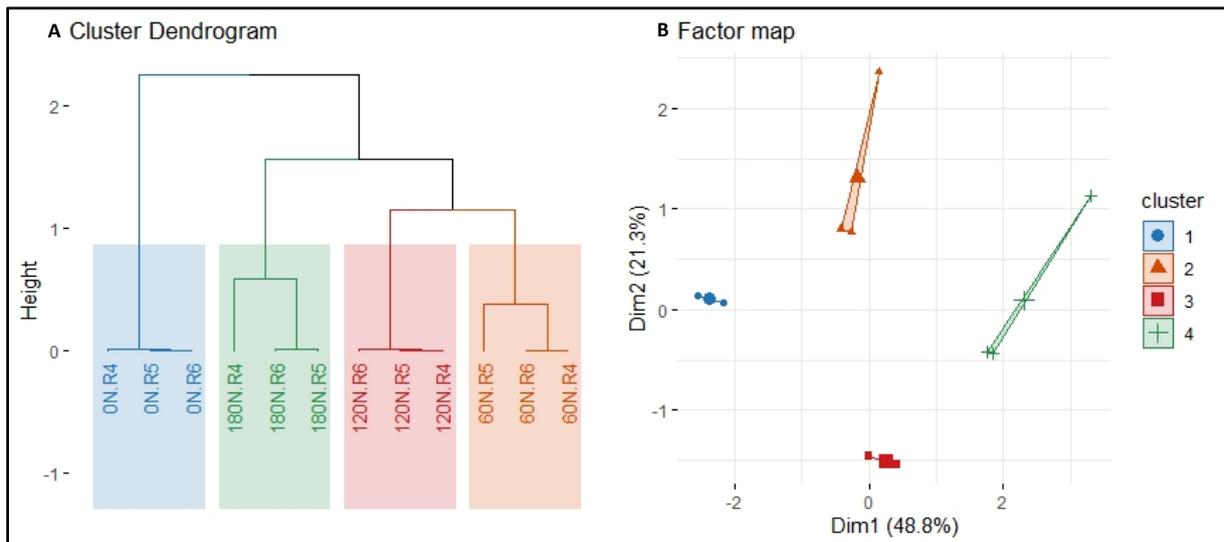


Figure n° 17 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les taux d'azote des feuilles de pêcher, de la menthe et du sol entre 0 et 30 cm, correspondants à la période de mi-mai. A : Dendrogramme. B : Représentation des classes sur les dimensions 1 et 2. Le nom des individus se compose de la modalité d'Azote et du numéro du rang.

En réalisant une HCPC sur cette AFDM (cf. Figure n° 17), 4 classes d'individus se distinguent. Les variables *Azote*, *Taux_N_menthe* et *Taux_N_pecher* sont significativement liées au découpage des classes. La classe 1 se caractérise par l'ensemble des individus de la modalité 0N, avec des taux d'azote de la menthe et des feuilles de pêcher significativement inférieurs à la moyenne. Les classes 2 et 3 contiennent respectivement l'ensemble des individus de la modalité 60N et 120N. Enfin, l'ensemble des individus de la modalité 180N se trouve dans la classe 4 caractérisée par des taux d'azote de la menthe et des feuilles de pêcher significativement supérieurs à la moyenne.

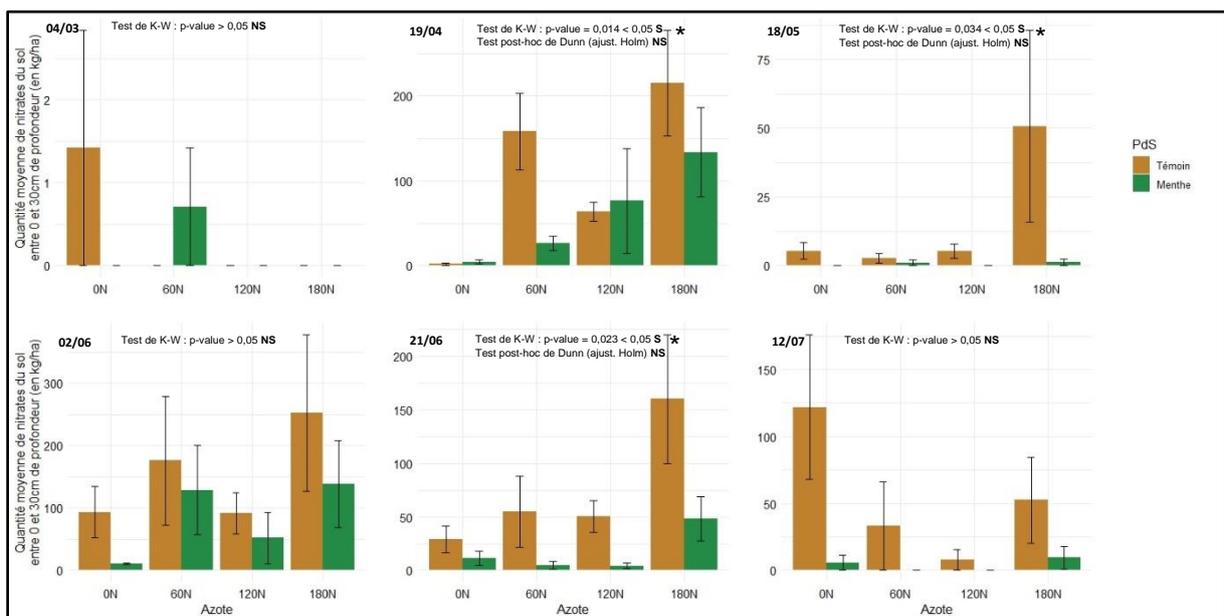


Figure n° 18 : Quantité moyenne de nitrates du sol entre 0 et 30 cm de profondeur en fonction de la dose d'azote et de la présence ou non de menthe à différentes dates. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque barre, n = 3.

Pour le 04/03, 02/06 et le 12/07, les quantités moyennes de nitrates du sol prélevé entre 0 et 30 cm ne diffèrent pas de manière significative suivant les 8 modalités testées (Tests de Kruskal-Wallis : p-value = 0,68 > 0,05 NS). Les trois autres dates (19/04, 18/05 et 21/06) présentent un effet significatif de la modalité sur la quantité de nitrates du sol prélevé entre 0 et 30 cm (Tests de Kruskal-Wallis : p-values < 0,05 *). Cependant, les tests post-hocs de Dunn avec un ajustement de Holm n'ont pas révélé de différence significative entre les 8 modalités du fait de la faible significativité des tests de Kruskal-Wallis (cf. Figure n° 18).

De même, et pour toutes des dates, le sol prélevé entre 30 et 60 cm de profondeur ne présente pas de quantités moyennes de nitrates du sol significativement différentes suivant la modalité (Tests de Kruskal-Wallis : p-value > 0,05 NS).

Il est tout de même intéressant de constater que globalement, à chaque date et pour chaque modalité d'Azote, les quantités de nitrates retrouvées dans les deux horizons du sol semblent plus importantes pour la modalité *Témoin* que pour la modalité *Menthe*.

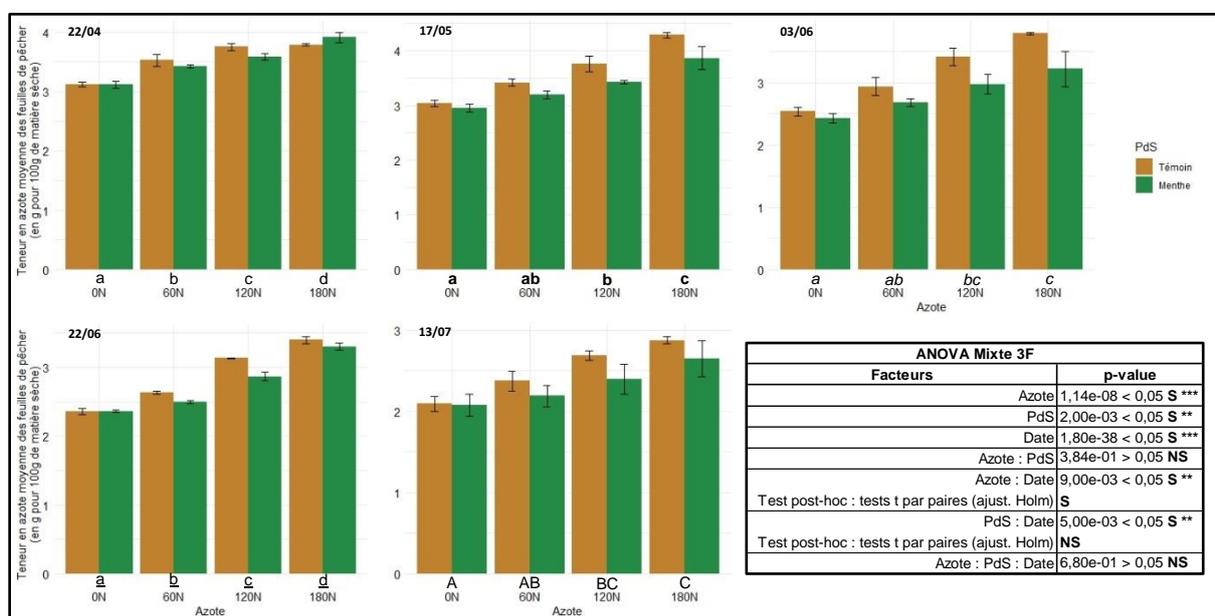


Figure n° 19 : Teneur en azote moyenne des feuilles de pêcher en fonction de la dose d'azote et de la présence ou non de menthe à différentes dates. Pour chaque date, les modalités de la variable Azote ayant des lettres différentes présentent des teneurs en azotes moyennes significativement différentes (p-value < 0,05). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque barre, n = 3 et pour chaque modalité d'azote à chaque date, n= 6.

Il n'existe pas d'interaction, à trois facteurs, statistiquement significative entre la dose d'azote apportée, la présence de menthe et le temps (ANOVA Mixte Azote:PdS:Date : p-value > 0,05 NS).

Il y a une interaction statistiquement significative entre la variable *Azote* et le temps (ANOVA Mixte *Azote:Date* : p-value = 0,005 < 0,05 **) pour la teneur en azote moyenne des feuilles de pêcher. En analysant les p-values ajustées de Holm, l'effet principal d'*Azote* est significatif à chaque date. De façon générale, il est possible d'observer une augmentation de la teneur en azote des feuilles avec une augmentation des doses d'azote apportées sur le verger. Les teneurs en azote peuvent être significativement différentes entre elles suivant la date de prélèvement des feuilles. Les comparaisons par paires montrent que la teneur en azote moyenne des feuilles de pêcher de la modalité *0N* est toujours significativement inférieure à celles de *120N* et *180N* (cf. Figure n° 19).

De plus, il y a une interaction statistiquement significative entre la variable *PdS* et le temps (ANOVA Mixte *PdS:Date* : p-value = 0,009 < 0,05 **). En revanche, en analysant les p-values ajustées de Holm, l'effet principal de *PdS* n'était pas significatif et cela pour toutes les dates. Cependant, il est possible d'observer qu'à chaque date et pour les quatre modalités d'*Azote*, la teneur en azote des feuilles a tendance à être supérieure en absence de menthe poivrée (cf. Figure n° 19).

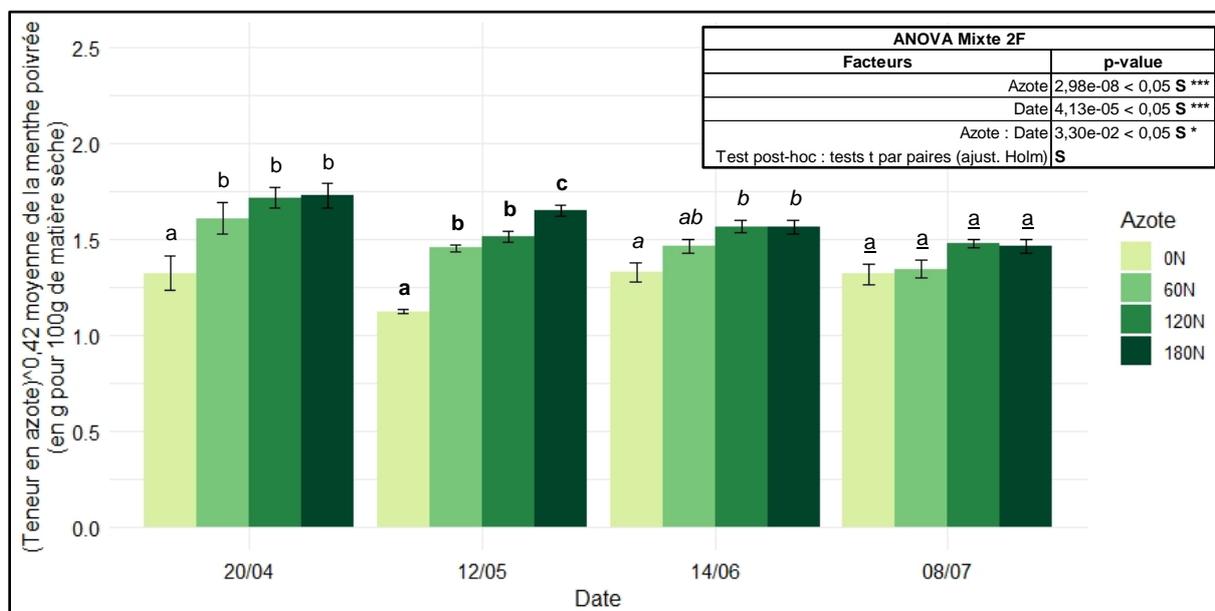


Figure n° 20 : (Teneur en azote)^{0,42} moyenne de la menthe poivrée en fonction de la dose d'azote à différentes dates. Pour chaque date, les modalités de la variable *Azote* ayant des lettres différentes présentent des teneurs en azote moyennes significativement différentes (p-value < 0,05). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque barre, n = 6.

Il y a une interaction statistiquement significative entre la variable *Azote* et le temps (ANOVA Mixte *Azote:Date* : p-value = 0,03 < 0,05 *) pour la teneur en azote moyenne de la menthe poivrée. En analysant les p-values ajustées de Holm, l'effet principal d'*Azote* est significatif à chaque date. De façon générale, il est possible d'observer une augmentation de la teneur en azote de la menthe avec une augmentation des doses d'azote apportées sur le verger. Les teneurs en azote peuvent être significativement différentes entre elles suivant la date de prélèvement de la menthe. Les comparaisons par paires montrent que la teneur en azote moyenne de la menthe de la modalité *0N* est toujours significativement inférieure à celles de *120N* et *180N* sauf pour la dernière date de prélèvement (cf. Figure n° 20).

3.3 Suivi de la croissance et de la vigueur des pêchers

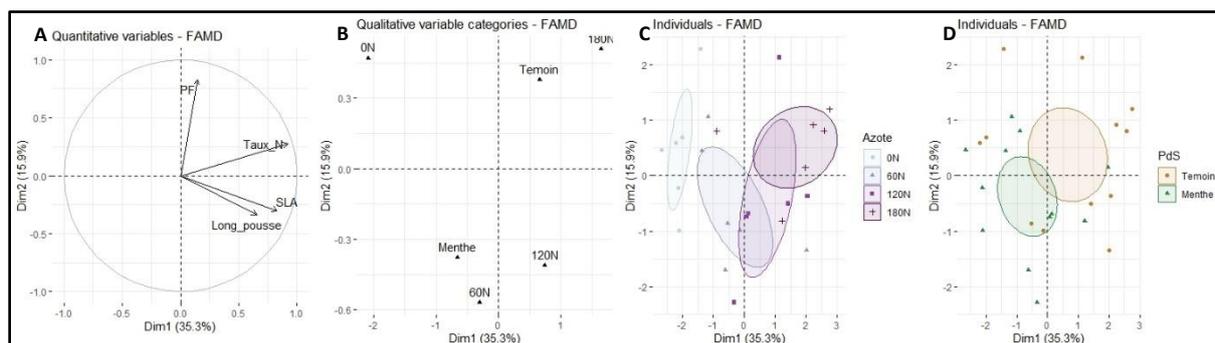


Figure n° 21 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les variables de vigueur et de croissance du pêcher, correspondant à la période de début juin. A : Graphique des variables quantitatives sur les dimensions 1 et 2. B : Graphique des variables qualitatives sur les dimensions 1 et 2. C et D : Graphiques des 24 individus analysés sur les dimensions 1 et 2. Les ellipses représentent les ellipses de confiance autour des points moyens de chaque groupe.

Les deux premières dimensions de l'AFDM sur les variables de vigueur et de croissance du pêcher, correspondant à la période de début juin (cf. Figure n° 21) expriment 51,2% de l'inertie totale du jeu de données (respectivement 35,2% et 15,9%). Les variables Azote, Taux_N et SLA contribuent respectivement à 24,1%, 30,2% et 24,4% à la construction du premier axe. La variable PF contribue à 54,1% à la construction du deuxième axe.

Les taux d'azote et la SLA des feuilles de pêcher sont fortement corrélés à l'axe 1. Les individus présentant les plus forts taux en azote et les plus grandes SLA se situent donc à droite du graphique (cf. Figure n° 21.C et 21.D). La dimensions 1 permet de distinguer les modalités 0N et 180N de la variable Azote (0N à gauche et 180N à droite du graphique des individus). Les individus qui prennent la modalité 180N présentent donc en moyenne les taux d'azote et les SLA les plus forts et inversement.

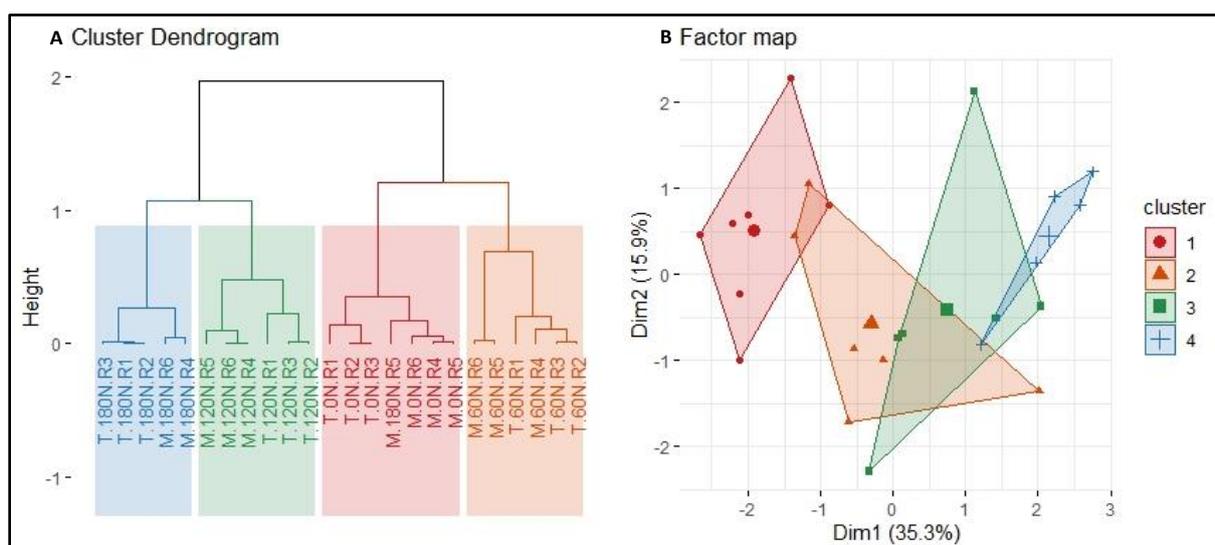


Figure n° 22 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les variables de vigueur et de croissance du pêcher, correspondant à la période de début juin. A : Dendrogramme. B : Représentation des classes sur les dimensions 1 et 2. Le nom des individus se compose des modalités de PdS et d'Azote et du numéro du rang.

En réalisant une HCPC sur cette AFDM (cf. Figure n° 22), 4 classes d'individus se distinguent. Les variables *Azote*, *Taux_N*, *SLA* et *Long_pousse* sont significativement liées au découpage des classes. 85,7% des individus de la classe 1 sont caractérisés par la modalité *0N*. Les individus de cette classe possèdent des taux d'azote des feuilles, des longueurs de pousse et des SLA significativement inférieurs à la moyenne. Les classes 2 et 3 contiennent respectivement l'ensemble des individus de la modalité *60N* et *120N*. Enfin, la classe 4 contient 83,3% des individus caractérisés par la modalité *180N*. Cette classe se différencie par des taux d'azote des feuilles, des longueurs de pousse et des SLA significativement supérieurs à la moyenne.

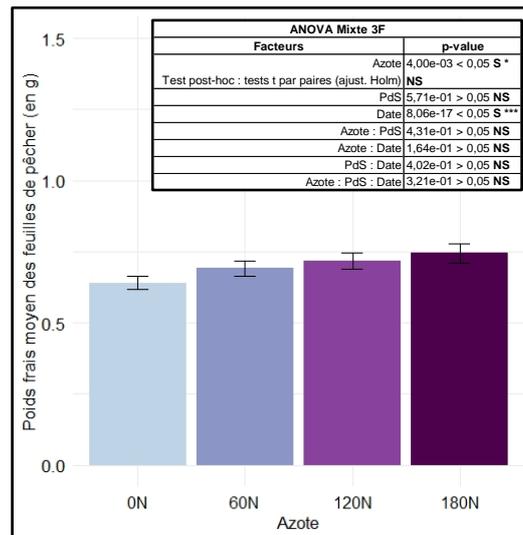


Figure n° 23 : Poids frais moyen des feuilles de pêcher en fonction de la dose d'azote. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque barre, $n = 30$.

Il n'existe pas d'interaction, à trois facteurs, statistiquement significative entre la dose d'azote apportée, la présence de menthe et le temps (ANOVA Mixte *Azote:PdS:Date* : p-value > 0,05 NS). De plus aucune interaction à deux facteurs statistiquement significative n'a été montrée (p-values > 0,05) pour le poids frais moyen des feuilles de pêcher (cf. Figure n° 23).

Il y a un effet statistiquement significatif de la variable *Azote* sur le poids frais des feuilles de pêcher (ANOVA Mixte *Azote* : p-value = 0,004 < 0,05 *). En revanche, en analysant les p-values ajustées de Holm des comparaisons par paire, aucune différence entre les modalités d'*Azote* n'était statistiquement significative. Il est tout de même possible d'observer que le poids frais des feuilles de pêcher a tendance à augmenter avec une augmentation de la dose d'azote apportée sur le verger (cf. Figure n° 23).

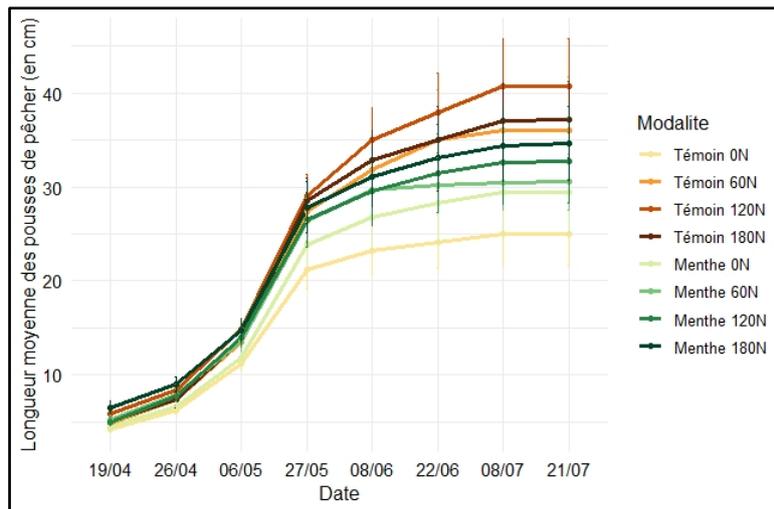


Figure n° 24 : Croissance moyenne des pousses de pêcher au cours du temps en fonction de la modalité. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque point, $n = 8$.

L'étude des différences de longueur de pousse moyenne entre la première (19/04) et la dernière mesure (21/07) permet de montrer qu'il n'existe pas d'interaction statistiquement significative entre la dose d'azote apportée et la présence ou non de menthe (ANOVA Mixte Azote: PdS : $p\text{-value} > 0,05$ NS). De plus il n'y a pas d'effet principal statistiquement significatif de la variable Azote et de la variable PdS (ANOVA Mixte Azote : $p\text{-value} > 0,05$ NS et ANOVA Mixte PdS : $p\text{-value} > 0,05$ NS) sur la différence de longueur de pousse moyenne entre le début et fin de campagne de mesure. Il est cependant possible d'observer globalement une plus grande vitesse de croissance de pousse pour les modalités *Témoin* (sauf dans le cas d'une absence de fertilisation azotée). Et que cela soit en présence ou en absence de menthe, la vitesse de croissance des pousses augmente avec une augmentation de la dose d'azote apportée (cf. Figure n° 24).

La SLA des feuilles de pêcher ne présente aucune différence significative (Tests de Kruskal-Wallis : $p\text{-value} > 0,05$ NS) entre les 8 modalités aux différentes dates de mesure. Cependant, les SLA des modalités *Témoin 0N*, *Menthe 0N* et *Menthe 60N* sont les plus faibles.

3.4 Suivi de la croissance et de la vigueur de la menthe poivrée

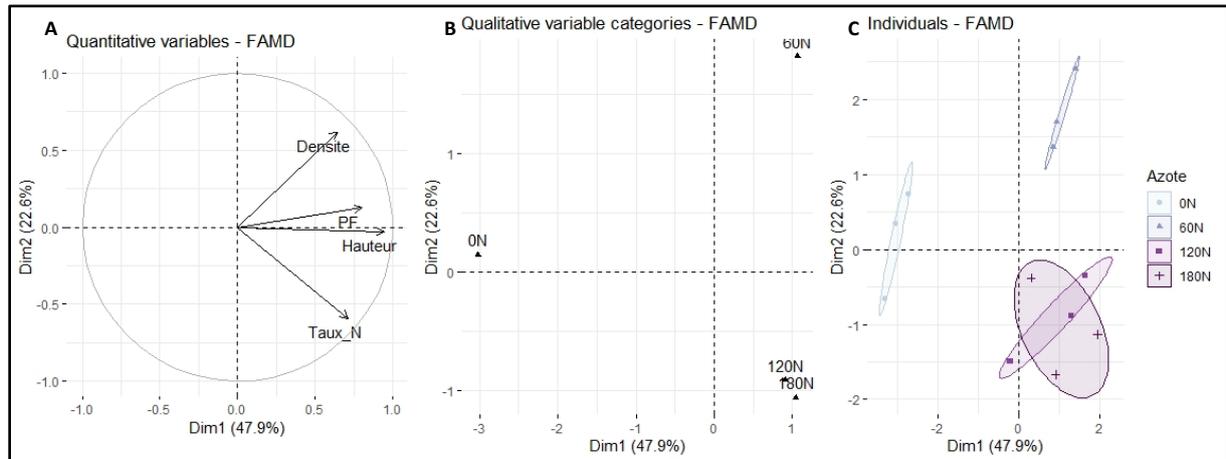


Figure n° 25 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les indices de vigueur et de croissance de la menthe, correspondants à la période de mi-juin. A : Graphique des variables quantitatives sur les dimensions 1 et 2. B : Graphique de la variable qualitative sur les dimensions 1 et 2. C : Graphiques des 12 individus analysés sur les dimensions 1 et 2. Les ellipses représentent les ellipses de confiance autour des points moyens de chaque groupe.

Les deux premières dimensions de l'AFDM sur les indices de vigueur et de croissance de la menthe, correspondants à la période de mi-juin (cf. Figure n° 25) expriment 70,5% de l'inertie totale du jeu de données (respectivement 47,9% et 22,6%). Les variables *Azote* et *Hauteur* contribuent respectivement à 27,1%, 26,6% à la construction du premier axe. La variable *Azote* contribue à 52,9% à la construction du deuxième axe.

La hauteur de la menthe est fortement corrélée à l'axe 1. Les individus présentant la menthe la plus haute se situent donc à droite du graphique (cf. Figure n° 25.C). La dimension 1 permet de distinguer la modalité *0N* de la variable *Azote* à gauche du graphique des individus. Les individus qui prennent la modalité *0N* présentent donc en moyenne les hauteurs de menthe les plus faibles. La dimension 2 permet de distinguer la modalités *60N* de la variable *Azote* en haut du graphique des individus.

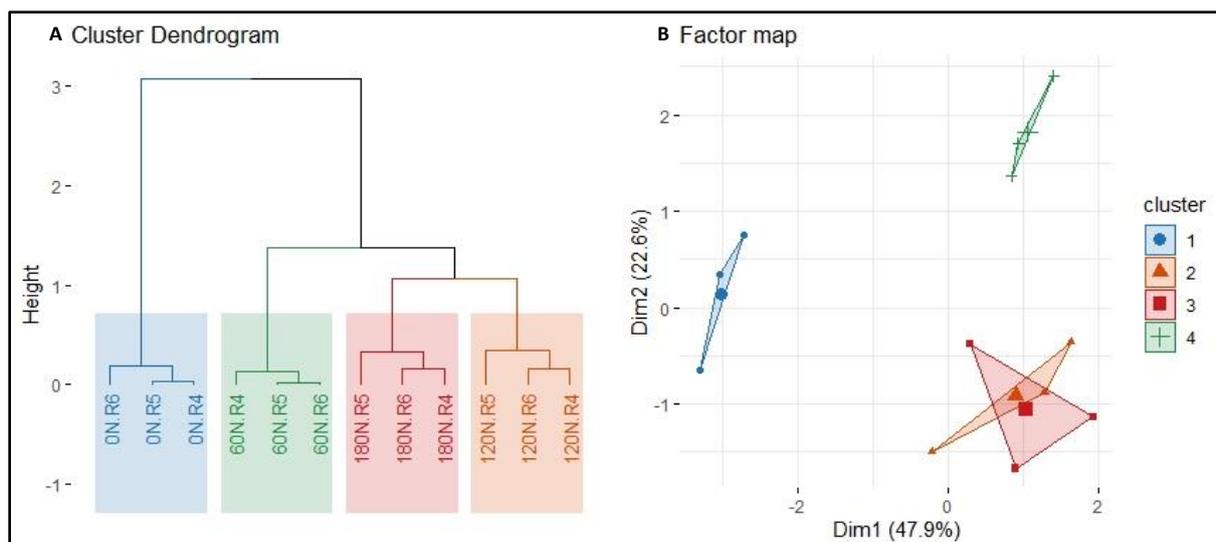


Figure n° 26 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les indices de vigueur et de croissance de la menthe, correspondants à la période de mi-juin. A : Dendrogramme. B : Représentation des classes sur les dimensions 1 et 2. Le nom des individus se compose de la modalité Azote et du numéro du rang.

En réalisant une HCPC sur cette AFDM (cf. Figure n° 26), 4 classes d'individus se distinguent. Les variables *Azote*, *Taux_N* et *Hauteur* et *Densite* sont significativement liées au découpage des classes. La classe 1 se caractérise par l'ensemble des individus de la modalité 0N, avec des taux d'azote, des poids frais, des densités et des hauteurs significativement inférieurs à la moyenne. Les classes 2 et 3 contiennent respectivement l'ensemble des individus de la modalité 120N et 180N dont les taux d'azote de la menthe sont significativement supérieurs à la moyenne. Enfin, l'ensemble des individus de la modalité 60N se trouvent dans la classe 4 caractérisée par des densités de la menthe significativement supérieures à la moyenne.

Le poids frais de la menthe ne présente aucune différence significative (Tests de Kruskal-Wallis : p-value > 0,05 NS) entre les 4 modalités de la variables *Azote* aux différentes dates de mesure.

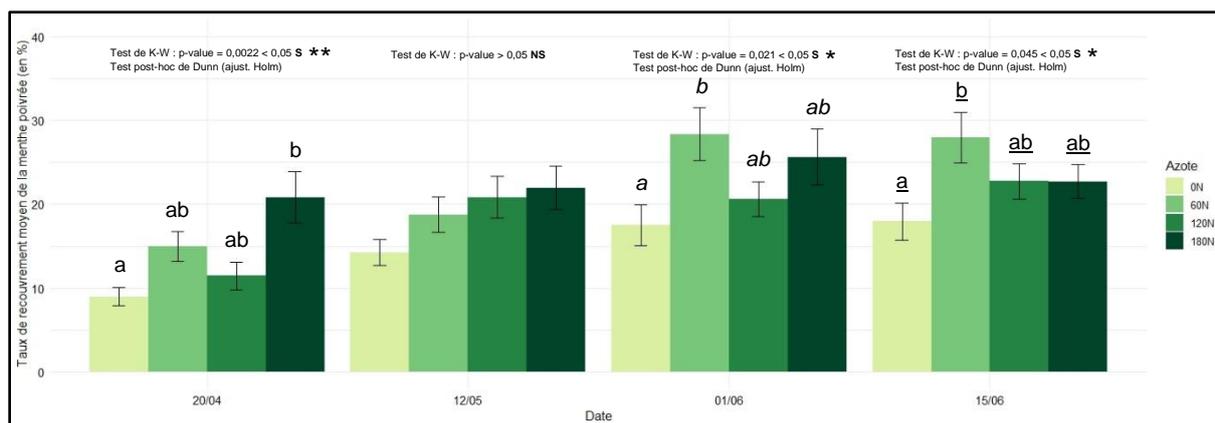


Figure n° 27 : Taux de recouvrement moyen de la menthe poivrée en fonction de la dose d'azote à différentes dates. Pour chaque date, les modalités de la variable Azote ayant des lettres différentes présentent des taux de recouvrement moyens significativement différents (p -value < 0,05). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque barre, $n = 24$.

Pour le 20/04, 12/05 et le 12/07, le taux de recouvrement de la menthe poivrée diffère de manière significative suivant la dose d'azote apportée (Tests de Kruskal-Wallis : p -values > 0,05). De manière générale, il est possible d'observer une diminution de la densité de menthe pour la modalité 0N. Les comparaisons par paires montrent que la densité de la menthe de la modalité 0N est significativement inférieure à celle de la modalité 180N le 20/04 puis à celle de la modalité 60N où la menthe poivrée est la plus dense à partir du 01/06 (cf. Figure n° 27).

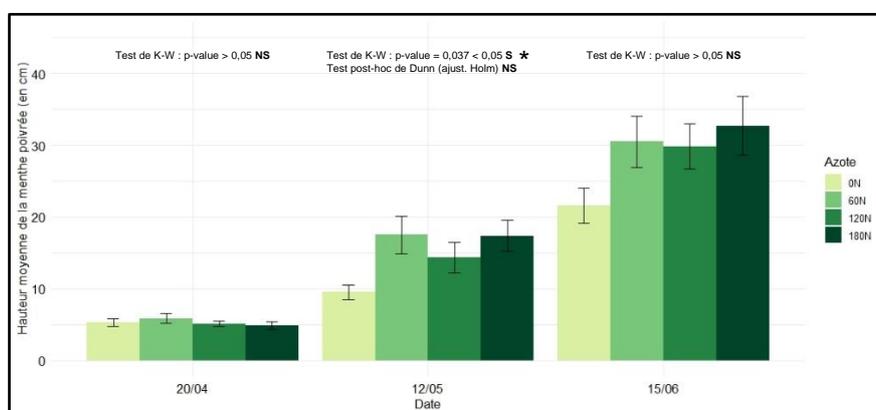


Figure n° 28 : Hauteur moyenne de la menthe poivrée en fonction de la dose d'azote à différentes dates. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque barre, $n = 12$.

Pour le 20/04 et le 15/06, la hauteur moyenne de la menthe poivrée ne diffère pas de manière significative suivant les 4 modalités de la variable Azote (Tests de Kruskal-Wallis : p -values > 0,05 NS). La date du 12/05 présente un effet significatif de la dose d'azote apportée sur la hauteur moyenne de la menthe (Tests de Kruskal-Wallis : p -value = 0,037 < 0,05 *). Cependant, le test post-hoc de Dunn avec un ajustement de Holm ne montre pas de différence significative entre les 4 modalités du fait de la faible significativité du test de Kruskal-Wallis (cf. Figure n° 28). Il est tout de même intéressant de constater globalement que la modalité 0N se différencie de plus en plus des trois autres modalités au cours du temps par une plus hauteur moyenne de la menthe plus faible.

3.5 Suivi des COV de la menthe poivrée au sein du verger

Les COV choisis pour caractériser l'émission de COV par la menthe poivrée au sein du verger n'ont été identifiés que dans les prélèvements des deux dernières dates, c'est-à-dire à partir du 14/06. Avant cette date les quantités de ces composés émises par la menthe poivrée ont été considérées comme négligeables.

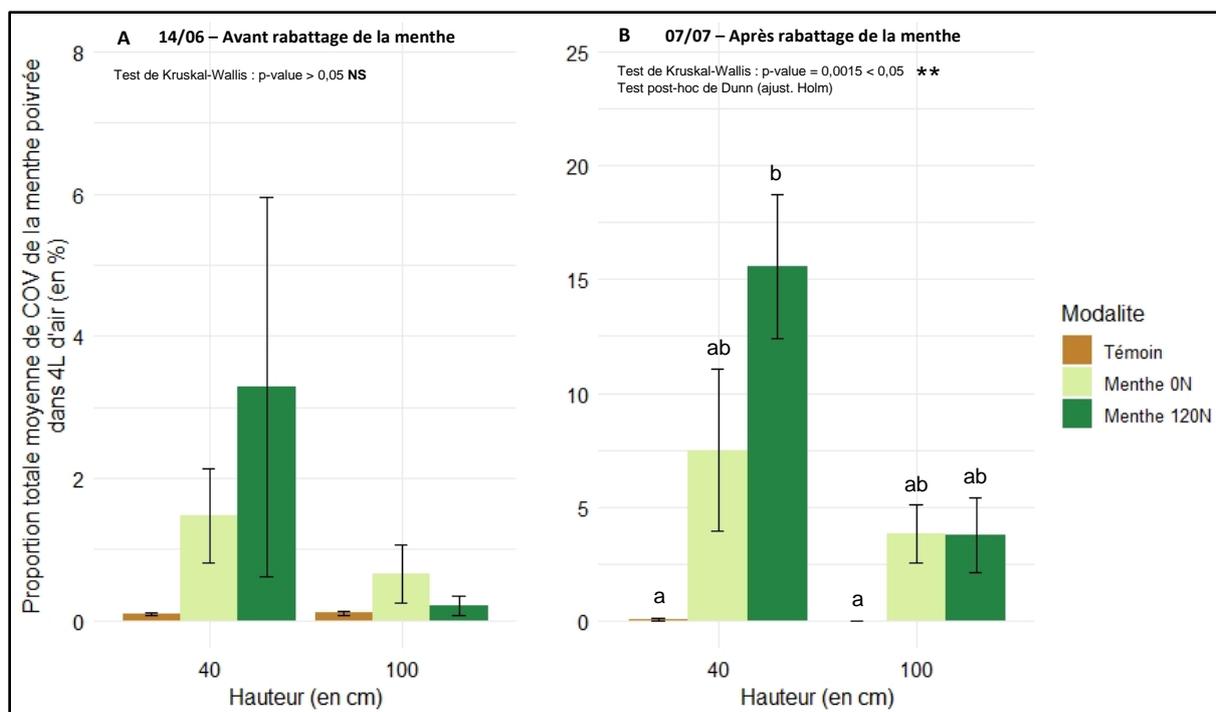


Figure n° 29 : Proportion totale moyenne de COV de la menthe poivrée captés dans 4 litres d'air avant (A) et après (B) le rabattage de la menthe en fonction de la modalité et de la hauteur de prélèvement.

Les modalités ayant des lettres différentes présentent des pourcentages moyens de COV significativement différents (p -value < 0,05). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque barre, $n = 4$.

Avant rabattage de la menthe, la proportion de COV de la menthe captée n'est pas significativement différente suivant la présence ou non de menthe poivrée au pied du pêcher, de la dose d'azote apportée et de la hauteur à laquelle les COV sont prélevés (Kruskal-Wallis : p -value > 0,05). En revanche, après rabattage de la menthe, la proportion de COV varie de manière significative suivant les modalités de prélèvement (Kruskal-Wallis : p -value = 0,0015 < 0,05 **). En effet, la proportion de COV prélevés à 40 cm de hauteur pour la modalité *Menthe 120N* est significativement plus élevée que ceux des prélèvements pour la modalité *Témoin* à 40 et 100 cm de hauteur (cf. Figure n° 29).

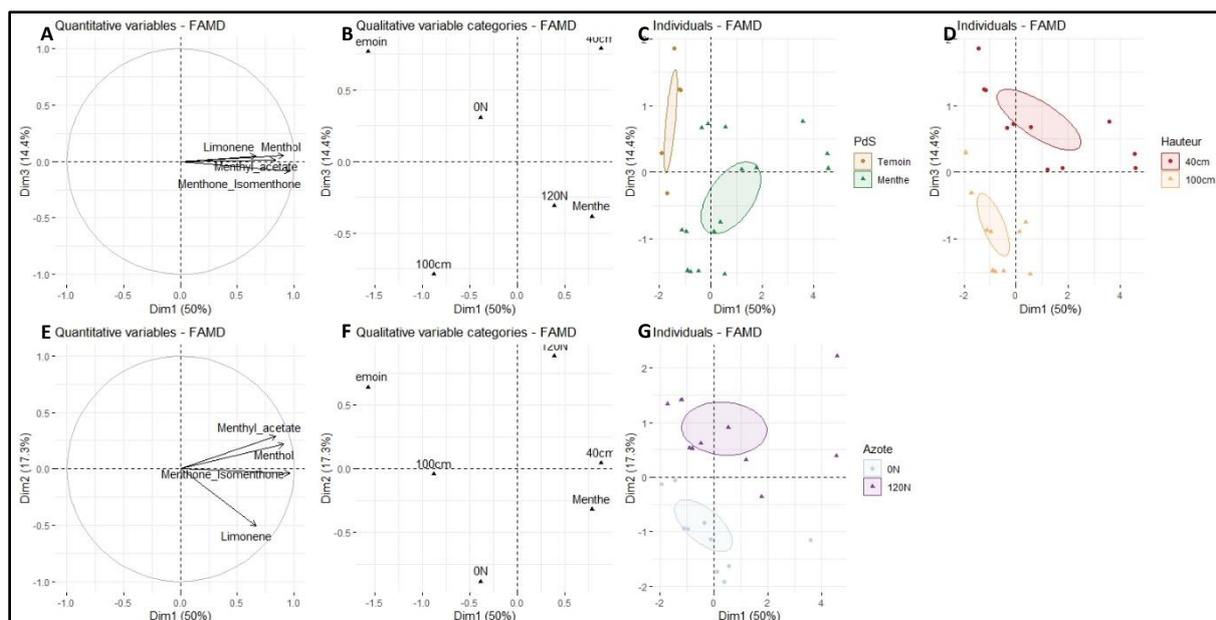


Figure n° 30 : Analyse factorielle de données mixtes réalisée sur les proportions des 4 composés de la menthe captés le 07/07. A : Graphique des variables quantitatives sur les dimensions 1 et 3. B : Graphique des variables qualitatives sur les dimensions 1 et 3. C et D : Graphiques des 24 individus analysés sur les dimensions 1 et 3. E : Graphique des variables quantitatives sur les dimensions 1 et 2. F : Graphique des variables qualitatives sur les dimensions 1 et 2. G : Graphiques des 24 individus analysés sur les dimensions 1 et 2. Les ellipses représentent les ellipses de confiance autour des points moyens de chaque groupe.

Les trois premières dimensions de l'AFDM réalisée sur les proportions des 4 composés de la menthe captés le 07/07 expriment 81,7% de l'inertie totale du jeu de données (respectivement 50%, 17,3% et 14,4%). Les variables *Menthone_Isomenthone*, *Menthol* et *Menthyl_acetate* contribuent respectivement à 26,4%, 23,5% et 19,9% à la construction du premier axe. Les variables *Azote* et *Limonene* contribuent respectivement à 53,8% et 21,1% à la construction du deuxième axe. Enfin, les variables *Hauteur* et *PdS* contribuent respectivement à 60,7% et 28,7% à la construction du troisième axe (cf. Figure n° 30).

Les COV de la menthe tels que le (iso)menthone, le menthol et le menthyl acetate sont fortement corrélés à l'axe 1. Les individus présentant les plus fortes proportions de COV de la menthe se situent donc à droite du graphique (cf. Figure n° 30.C, 30.D et 30.G). Les dimensions 1 et 3 permettent de distinguer les modalités de la variable *PdS* (*Temoin* en haut à gauche et *Menthe* en bas à droite du graphique des individus) et de la variable *Hauteur* (*40cm* en haut à droite et *100cm* en bas à gauche du graphique des individus). Les individus qui prennent les modalités *Menthe* et *40cm* présentent donc en moyenne les proportions de COV de la menthe les plus fortes. La dimension 2 permet de distinguer les modalités de la variable *Azote* (*ON* en bas et *120N* en haut du graphique des individus). Le limonène étant légèrement négativement corrélé à l'axe 2, les individus qui prennent la modalité *ON* présentent donc en moyenne des proportions en limonène plus importantes que ceux de la modalité *120N*.

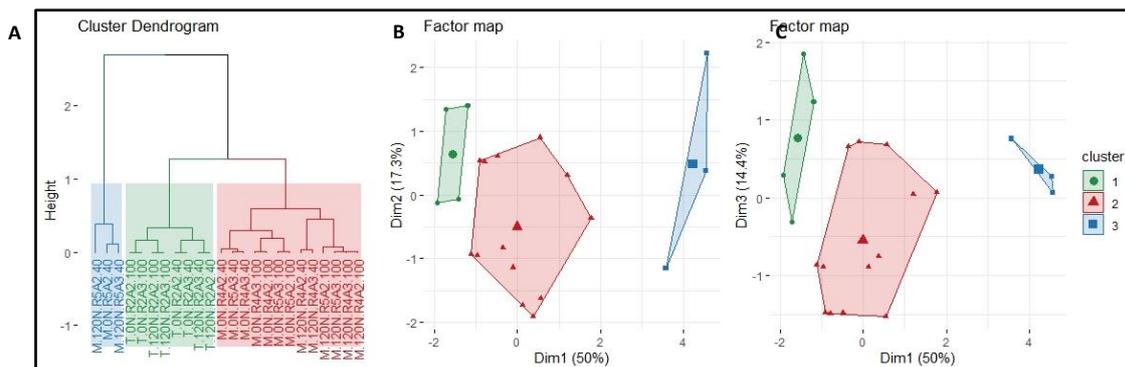


Figure n° 31 : Classification hiérarchique sur les composantes principales de l'AFDM réalisée sur les proportions des 4 composés de la menthe captés le 07/07. A : Dendrogramme. B : Représentation des classes sur les dimensions 1 et 2. C : Représentation des classes sur les dimensions 1 et 3. Le nom des individus se compose des modalités de PdS et d'Azote, du numéro du rang, du numéro de l'arbre et de la modalité de Hauteur.

En réalisant une HCPC sur cette AFDM, 3 classes d'individus se distinguent. Les variables *PdS*, *Menthol*, *Menthyl_acetate*, *Menthone_Isomenthone* et *Limonene* sont significativement liées au découpage des classes. La classe 1 se caractérise par l'ensemble des individus de la modalité *Temoin*, avec des proportions en limonène et en (iso)menthone significativement inférieures à la moyenne. La classe 2 contient 81,2% des individus de la modalité *Menthe*. Les derniers individus de la modalité *Menthe* se trouvent dans la classe 3 caractérisée par des proportions en menthol, menthyl acetate, (iso)menthone et limonène significativement supérieures à la moyenne (cf. Figure n° 31).

3.6 Suivi des pucerons et de leurs ennemis naturels au sein du verger

3.6.1 Suivi des populations de pucerons

Les principaux types de pucerons du pêcher ont été observés sur le verger avec majoritairement des pucerons noirs de mi-mars à fin mai et des pucerons cigariers de mi-mai à mi-juin. Les pucerons verts et farineux ont également été identifiés sur quelques rameaux mais sur une période plus restreinte (de fin mai à mi-juin). Les pics d'infestation ont été observés entre mi-mai et début juin (cf. Figure n° 32).

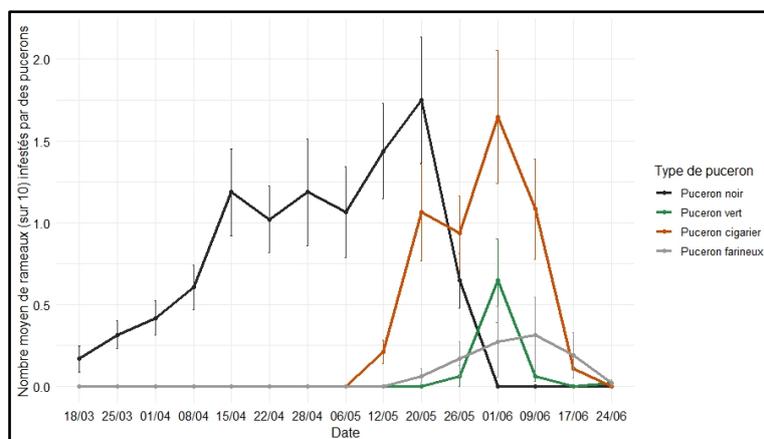


Figure n° 32 : Evolution moyenne par arbre de l'infestation des pucerons au cours du temps et en fonction du type de puceron. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Pour chaque point $n = 48$.

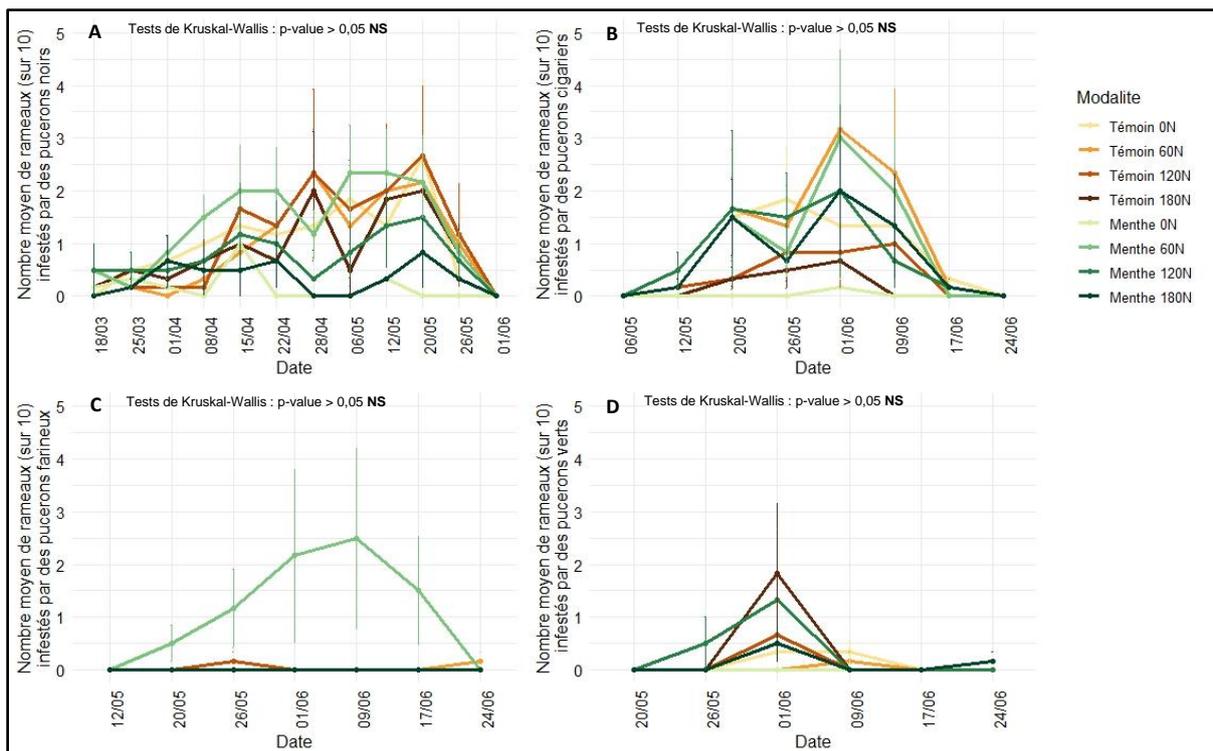


Figure n° 33 : Evolution moyenne par arbre de l'infestation des pucerons (A : puceron noir ; B : puceron cigarier ; C : puceron farineux ; D : puceron vert) au cours du temps et en fonction de la modalité. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque point $n = 6$.

Pour chaque type de puceron, à chaque date, le nombre moyen de rameaux infestés ne diffère pas de manière significative suivant la modalité (Tests de Kruskal-Wallis : $p\text{-value} > 0,05$ NS) (cf. Figure n° 33).

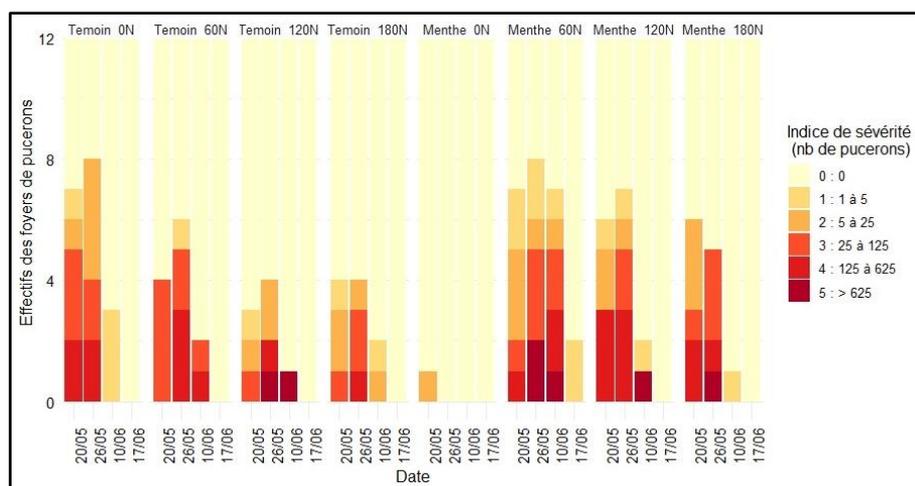


Figure n° 34 : Evolution au cours du temps de la sévérité d'infestation des 12 foyers de pucerons suivis à chaque date pour chaque modalité. Les différents indices de sévérité représentent la quantité de pucerons observée par rameau.

Des foyers de pucerons sont retrouvés dans chacune des modalités (cf. Figure n° 34). Toutes les modalités présentent des foyers avec des indices de sévérité élevée (indice > 3), sauf les pêchers de la modalité *Menthe 0N*.

3.6.2 Suivi des auxiliaires

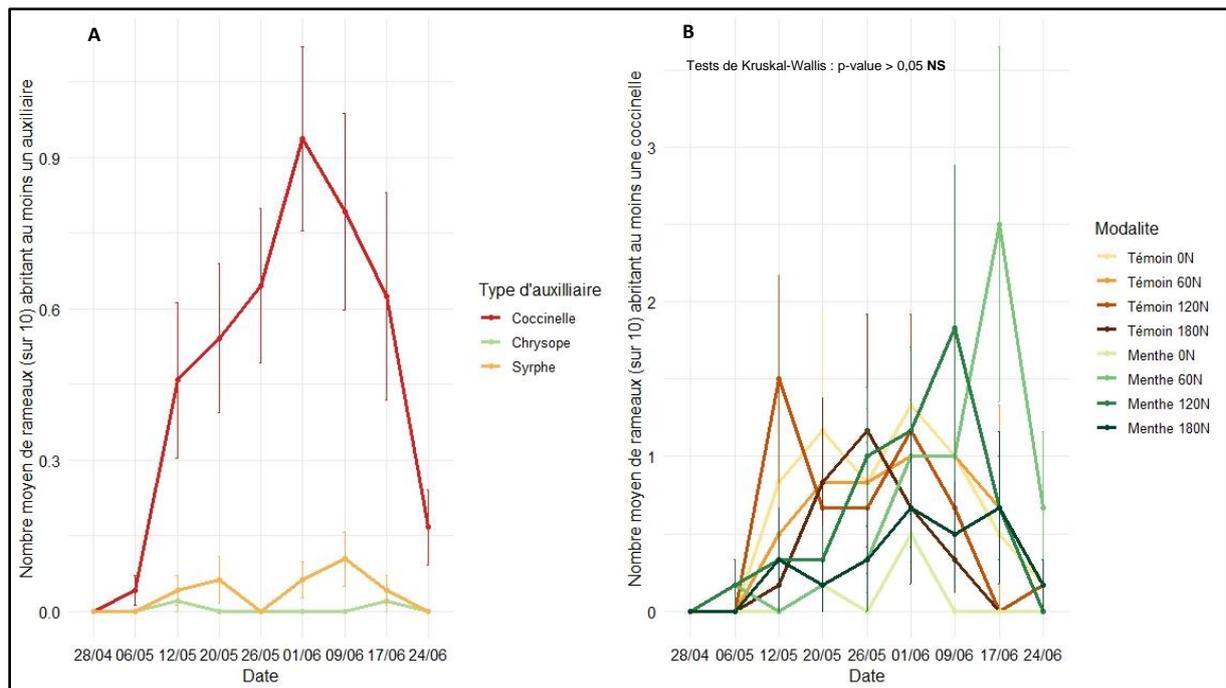


Figure n° 35 : A : Evolution moyenne par arbre de la présence d'auxiliaires au cours du temps et en fonction du type d'auxiliaire. B : Evolution moyenne de la présence de coccinelles en fonction du temps et de la modalité. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Pour chaque point, $n = 48$ (A) ou 6 (B).

Trois types d'auxiliaires ont été observés sur le verger : des chrysopes, des syrphes et majoritairement des coccinelles de début mai à fin juin (cf. Figure n° 35.A). Le nombre moyen de rameaux abritant des coccinelles ne diffère pas de manière significative suivant la modalité (Tests de Kruskal-Wallis : $p\text{-value} > 0,05$ NS) (cf. Figure n° 35.B).

De plus, la lecture des cartes de prédation n'a révélé qu'une faible proportion de pucerons prédatés et aucune différence significative (Tests de Kruskal-Wallis : $p\text{-value} > 0,05$ NS) entre les 8 modalités aux deux campagnes (le 22/04 et le 17/05/).

4 Discussion

4.1 Effet de la combinaison des leviers Azote et Plante de services sur les pêchers

Les résultats des analyses mettent en évidence un effet de la dose d'azote apportée sur la vigueur et la croissance du pêcher. En effet, les résultats suggèrent que les arbres présentant les plus forts taux d'azote foliaire, les plus grandes SLA et les plus grandes longueurs de pousses sont ceux où la dose d'azote apportée est la plus forte. La vitesse de croissance des pousses semble plus importante pour les deux plus fortes doses d'azote. Une analyse plus fine montre que la SLA, la longueur et la vitesse de croissance des pousses ne sont pas impactées significativement par le facteur *Azote*. Ce dernier montre cependant un effet significatif sur le poids frais des feuilles de pêcher et sur la teneur en azote des feuilles. Le poids frais a tendance à augmenter avec une augmentation de la dose d'azote apportée sur le verger. La teneur en azote des feuilles de la modalité *0N* est toujours significativement inférieure à celles des modalités *120N* et *180N*. Dans cet essai, les teneurs en azote des feuilles de pêcher des modalités *120N* et *180N* sont généralement situés autour de 3% d'azote total, valeur qui indique une nutrition azotée optimale pour des performances agronomiques correctes (CRISOSTO et COSTA, 2008). Même si tous les résultats n'ont pas montré d'effet significatif du facteur *Azote* sur les indicateurs de croissance et de vigueur mesurés, les tendances observées font écho aux résultats de certaines études qui montrent que la fertilisation azotée stimule souvent le développement végétatif des pêchers. Une étude a montré que la longueur et le nombre de pousses sont fortement impactés par la nutrition azotée de l'arbre (LOBIT et al., 2001), mais tous les indicateurs de croissance des arbres ne répondent pas de la même manière aux variations des doses d'azote : la croissance des pousses et la teneur en azote des feuilles sont généralement positivement corrélées aux taux d'engrais appliqués (TAYLOR et VAN, 1970) alors que les indicateurs de vigueur comme la SLA, la circonférence des troncs, la surface et le poids des feuilles sont moins sensibles à des variations de nutrition azotée (LOBIT et al., 2001). Néanmoins une non-fertilisation devrait entraîner une réduction des surfaces foliaires dans le temps (NII et al., 1993).

La variable *PdS* a également montré un effet significatif sur les teneurs en azote foliaires du pêcher qui ont tendance à être supérieures en l'absence de menthe poivrée. La vitesse de croissance des pousses des pêchers n'est pas impactée significativement par la menthe poivrée, mais il y a globalement une baisse de la vitesse de croissance des pousses en présence de menthe, qui particulièrement est marquée en l'absence de fertilisation azotée. Ces résultats pourraient être encore plus marqués l'année prochaine, avec un stockage d'azote moins important cet hiver, et un développement plus important de la menthe poivrée (donc potentiellement compétitrice). En effet, 70% de l'azote des fruits et des jeunes feuilles et 90 % de l'azote présent dans la pousse végétative printanière des pêchers proviennent des réserves remobilisés (HUETT, 1996), ce qui sous-entend que les applications d'azote exogène de cette année et la compétition pour l'azote avec la menthe ont peu de chance d'influencer la croissance du pêcher de cette saison. L'année dernière constituait la première année de mise en place du dispositif et la menthe poivrée n'était pas encore assez développée (CATUSSE, 2020).

Les modalités *Azote* et *PdS* ne semblent pas impacter les quantités moyennes de nitrates mesurées dans les deux premiers horizons du sol (horizon 0-30 cm et horizon 30-60 cm de profondeur). Il est tout de même intéressant de constater que les quantités de nitrates retrouvées dans les deux horizons du sol semblent plus importantes pour la modalité *Témoin* que pour la modalité *Menthe*. L'hypothèse selon laquelle les quantités de nitrates du sol deviendraient significativement inférieures en présence de la plante de service pourrait être vérifiée avec un plus fort développement de la menthe poivrée dans les prochaines années. La menthe poivrée pourrait donc constituer un levier intéressant pour limiter les nitrates présents dans le sol potentiellement lixiviables et qui peuvent constituer une source importante de pollution (PEDRENO et al., 1996) (ROSSI et al., 1991).

La gelée printanière de cette année a conduit à une perte totale des récoltes, ne permettant pas d'évaluer l'effet des facteurs *Azote* et *PdS* sur les performances agronomiques du verger. Il serait cependant intéressant d'évaluer l'effet de la mise en place de ces deux leviers sur la réponse du rendement et la qualité des fruits produits dans les prochaines années. La fertilisation azotée permet l'obtention d'un rendement supérieur à celui d'arbres ne recevant pas d'apports azotés (BUSSI et al., 1992; SOING et al., 1998). Des niveaux d'azote trop importants n'entraînent pas une augmentation du rendement et de la qualité des fruits mais peuvent en revanche retarder la maturation des fruits et diminuer leur teneur en sucres solubles (RUBIO AMES et al., 2020). De plus, des niveaux de fertilisation azotée élevés pourraient augmenter l'attractivité des arbres pour les pucerons (JORDAN et al., 2019). La menthe poivrée pourrait donc constituer un levier intéressant en entrant en légère compétition avec l'arbre : elle limiterait les quantités d'azote absorbées par le pêcher en situation d'apports excessifs d'azote, sans affecter les niveaux de production.

4.2 Effet de la combinaison du levier Azote sur la menthe poivrée

Les résultats des analyses mettent en évidence que la menthe répond significativement à la différenciation des doses d'azote apportées sur le verger. En effet, les valeurs de teneur en azote, de poids frais, de densité et de hauteur moyenne de la menthe de la modalité *0N* sont souvent inférieures à celles des modalités *120N* et *180N*. Les effets ne sont pas significatifs, hormis pour la densité de la menthe. La densité de la menthe de la modalité *0N* est significativement inférieure à celle de la modalité *180N* puis à celle de la modalité *60N* où la menthe poivrée devient la plus dense en fin de croissance. Ce phénomène peut être expliqué par un biais dans les mesures de densité car aux dernières dates de mesure, beaucoup d'adventices étaient présentes aux placettes des modalités *120N* et *180N* et pouvaient dépasser la menthe pour certaines. Leur présence a pu impacter la mesure de densité en minimisant la densité de la menthe sur ces placettes. Il est également intéressant de constater que la modalité *0N* semble se différencier de plus en plus des trois autres modalités au cours du temps par une hauteur moyenne plus faible de la menthe. La fertilisation azotée de la menthe semble donc essentielle pour son développement, ce qui a été déjà montré dans des études : la hauteur et le rendement de la menthe diminue avec une baisse des niveaux de fertilisation, la baisse des rendements pouvant aller de 18 à 79% en l'absence de fertilisation (JELIAZKOVA et al., 1999).

Comme la teneur en azote de la menthe et sa croissance sont affectées par la dose d'azote apportée, la fertilisation azotée pourrait aussi avoir un impact sur l'émission de COV. L'analyse des COV captés sur le verger a mis en évidence la présence de COV caractéristiques de la menthe qu'à partir du 14/06 et leurs proportions dans l'atmosphère ne diffèrent pas significativement entre les placettes. En revanche, après rabattage de la menthe du 07/07, la proportion de ces COV est significativement supérieure lorsque le prélèvement est réalisé à 40 cm de hauteur au-dessus de la modalité Menthe-120N. En effet, des taux plus élevés de fertilisation azotée, une maturité de la culture et son inflorescence permettent d'obtenir des rendements en huiles essentielles de la menthe poivrée plus importants dont notamment une augmentation de la teneur en menthone, et en menthol (HEE, 1975; JELIAZKOVA et al., 1999; SEIF SAHANDI et al., 2019).

Différents types de stress augmentent les émissions de COV, notamment les températures élevées et les dommages mécaniques des plantes. Les prélèvements réalisés en avril et en mai ne présentaient pas de traces de COV de la menthe. Les températures étant encore relativement faibles, la production de COV par la menthe poivrée n'était pas favorisée (DEMENT et al., 1975; TINGEY et al., 1980; HOLOPAINEN et GERSHENZON, 2010). De plus, certaines études montrent que des dommages artificiels effectués au niveau du feuillage permet un niveau élevé de libération de COV (PRESTON et al., 2004; MITHOFER et al., 2005; FONTANA et al., 2009; HOLOPAINEN et GERSHENZON, 2010). Cela pourrait expliquer les forts écarts de proportions de COV de la menthe poivrée entre les deux dernières dates de prélèvement. En effet, avant rabattage de la menthe, 3 à 4 % de COV de la menthe sont émis contre plus de 15 % pour le maximum de COV émis après rabattage de la menthe. La coupe des tiges de la menthe poivrée permet donc de délivrer une quantité plus importante de COV au sein du verger. Cela suggère que l'émission de COV, potentiellement répulsifs pour les pucerons, pourrait être optimisée par les coupes de la menthe réalisées avant l'installation des premiers foyers ou au démarrage des pics d'infestation si la menthe est suffisamment développée à cette période.

4.3 Effet de la combinaison des leviers Azote et Plante de services sur la régulation des populations de pucerons

Plusieurs études confirment que des niveaux élevés de fertilisation azotée des pêchers, liée à un développement végétatif plus important, favorise une infestation par les pucerons (ROUSSELIN et al., 2016a; JORDAN et al., 2019). Cependant, les résultats montrent que le niveau d'infestation par les pucerons dans le verger ne diffère pas de manière significative suivant la modalité du facteur Azote. Cette différence de résultats par rapport aux autres études peut être expliquée par le fait qu'aucune différenciation significative de croissance des pousses n'est observée. En effet la sévérité d'infestation dépendrait de la croissance individuelle des rameaux (FADHL, 2019). Les pêchers semblent être à égalité sur leur niveau d'appétence vis-à-vis des pucerons et cela malgré la mise en place d'une différenciation de fertilisation azotée au sein du verger qui n'est visible qu'au niveau des teneurs en azote des feuilles.

De plus, le facteur *PdS* ne montre pas d'effet significatif sur le niveau d'infestation au sein du verger ni sur la présence des auxiliaires et de leur fonction de prédation. Comme souligné précédemment, la menthe poivrée n'était peut-être pas assez développée au moment de l'installation des pucerons et aux pics des infestations (la densité de la menthe n'a jamais dépassé les 40% de couverture du sol au cours de la saison) ou alors elle n'était pas à un stade physiologique assez avancé pour produire des COV. La composition en COV varie avec l'âge et la position des feuilles chez *Mentha x piperita* (VOIRIN et BAYET, 1996; GERSHENZON et al., 2000). Un manque de développement de la menthe pourrait donc expliquer une absence d'émission de COV répulsifs. Avec une année supplémentaire, l'augmentation espérée de la biomasse pourrait permettre d'accroître la production de COV et de voir un effet sur les populations de pucerons.

Une autre possibilité serait que la menthe n'émet des COV que sur de faibles distances, trop faibles pour qu'elles aient un réel effet sur les pucerons. En effet, il est possible de capter une quantité de COV de menthe poivrée significativement plus importante lorsque que la menthe subit un stress (rabattage), qu'elle est fertilisée et que le prélèvement se situe près de la menthe (à 40 cm de hauteur). Il a été prouvé que l'effet de la plante de service diminue significativement à partir d'un rayon de 1,5 m autour d'elle et cela dans des conditions de serre (BEN ISSA, 2014). Or en verger, les pucerons se situent sur les rameaux des pêchers qui sont pour la plupart situés à plus de 1,5 m de hauteur. Il est donc possible que la menthe située au pied des arbres ne puisse pas avoir d'effet sur l'installation des pucerons situés juste au-dessus.

Enfin il est aussi important de noter que les COV captés et identifiés comme indices de la présence de menthe poivrée dans cet essai, ne sont pas connus dans la littérature comme des COV pouvant être répulsifs pour les pucerons contrairement au (E)- β -farnésène qui se trouve dans l'huile essentielle de menthe poivrée (CROCK et al., 1997) mais qui n'a pas été reconnu dans les prélèvements réalisés au sein du verger. De plus, sa présence dans le verger n'aurait pas forcément été gage d'efficacité car la présence de COV répulsifs dans un mélange n'est pas une condition suffisante pour que ce mélange soit répulsif. En effet, son efficacité dépend de la concentration, de la proportion, ainsi que l'association des différents COV (DARDOURI, 2018; DARDOURI et al., 2019b). Donc l'efficacité de la menthe poivrée démontrée en condition contrôlée (HORI, 1999; IKEURA et al., 2012; BEN ISSA, 2014; PASCUAL-VILLALOBOS et al., 2017; DIEUDONNE, 2018) pourrait s'avérer n'être que partielle voir nulle en présence des autres sources de COV présentes dans le verger.

Conclusion et perspectives

Le besoin de limiter l'usage des produits phytosanitaires est à l'origine du développement de systèmes horticoles innovants. Cependant, leur mise en place en conditions réelles de culture nécessite de connaître et comprendre les mécanismes sous-jacents afin d'optimiser leur potentiel. Grâce aux mesures et observations réalisées au cours de cette étude, l'efficacité de la combinaison des leviers azote et plante de service a pu être évaluée pour mieux réguler les pucerons en verger de pêchers.

Les leviers nutrition azotée et plante de service ont impacté la vigueur et la croissance du pêcher. Les plus grandes doses d'azote ont stimulé la teneur en azote foliaire et le développement végétatif des pêchers. La présence de menthe poivrée induit une baisse des teneurs en azote foliaires et de la vitesse de croissance des pousses des pêchers. Ces résultats pourraient être encore plus marqués avec un développement plus important de la menthe poivrée l'année prochaine. La menthe poivrée a elle aussi répondu à la différenciation des doses d'azote apportées sur le verger. La fertilisation azotée de la menthe semble en effet essentielle pour son développement.

Le levier nutrition azotée n'a pas impacté le niveau d'infestation par les pucerons dans le verger malgré une différenciation du statut azoté des arbres visible qu'au niveau des teneurs en azote des feuilles. La présence de menthe poivrée n'a pas montré d'effet sur le niveau d'infestation, ni sur la présence des auxiliaires et de leur fonction de prédation au sein du verger. Un manque de développement de la menthe et de son émission de COV à hauteur des pucerons pourrait expliquer ces observations.

En raison des fluctuations des facteurs abiotiques rencontrées sur le terrain, la concentration de COV pourrait ne pas suffire à perturber les populations de pucerons. Pour envisager une introduction pertinente de plantes de service dans un verger, l'optimisation de la synthèse et des émissions des COV d'intérêt en jouant notamment sur les conditions de culture pourrait être requise.

Une étude a mis en évidence l'effet de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes inoculées avec *Mentha x piperita* sur l'émission de composés organiques volatils. Les bactéries associées aux racines permettent de tripler les émissions de COV de menthe poivrée (CAPPELLARI et al., 2017). L'inoculation de ces bactéries avec les plantes de services pourrait être une piste de réflexion pour augmenter les émissions de COV sur les vergers.

La mise en place de diffuseurs de COV pourrait constituer également un moyen pour limiter les infestations en verger. Ils permettraient de répondre de manière efficace à la problématique de la synchronisation des cycles biologiques des pucerons et des plantes de service, à la problématique de la distance entre la plante de services et le pêcher ainsi qu'à la problématique d'absence de composés spécifiques. Ces diffuseurs pourraient être rapidement installés dans le verger dès les premiers signes d'infestation, à la hauteur des foyers de pucerons et contenir des mélanges de COV à des concentrations efficaces.

La production de COV est également sensible à la disponibilité en eau (DELFINE et al., 2005). Par exemple, un déficit hydrique diminue l'émission de sesquiterpènes des plants de romarin (ORMENO et al., 2007). De plus, une restriction hydrique des arbres impacte négativement l'abondance des pucerons (ROUSSELIN, 2017). Donc l'impact de la combinaison des leviers irrigation et plante de service sur les infestations de pucerons en verger de pêchers pourrait faire l'objet d'une prochaine étude.

Pour conclure, l'efficacité de l'effet combiné de la nutrition azotée et de la présence de menthe poivrée sur la régulation des populations de pucerons en conditions réelles de verger de pêchers n'a pas été confirmée. Cependant, cette étude a permis d'analyser des synergies et des antagonismes possibles dans un système complexe (arbres fruitiers - plantes de service - effet COV - nutrition azotée - populations de pucerons), et contribue à élargir les connaissances sur la faisabilité de pratiques agroécologiques conformes à une stratégie de réduction des produits phytosanitaires dans le but de proposer aux professionnels des solutions techniques transposables au sein de leurs exploitations.

Liste des références bibliographiques

AGRESTE., 2018a. Apports de produits phytopharmaceutiques en arboriculture : nombre de traitements et indicateur de fréquence de traitements. Agreste Les Dossiers [en ligne]n° 43. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos43/Dossiers_43.pdf>.

AGRESTE., 2018b. Stratégies de traitements phytosanitaires des vergers : les méthodes préventives et de lutte alternative se développent. Date de consultation : 02/06/2021. Disponible sur : <https://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/96_PK_ARBO_PACA_18_cle8ce898.pdf>.

AGRESTE., 2021. Pêche. En 2021, le gel d'avril impacte la production de pêches. Conjoncture – Infos Rapides Fruits [en ligne]n° 54. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/lraFru21054/detail/>>.

ALAPHILIPPE, A., ALINS, G., BOROWIEC, N., DAPENA DE LA FUENTE, E., DARDOURI, T., DEKKER, T., FERRAIS, L., FRANCK, P.P., GAUTIER, H., GARDIN, P., GOMEZ, L., GOUTINES, C., HANCE, T., JACQUOT, M., JORDAN, M.-O., KRAMER JACOBSEN, S., LATEUR, M., LAVIGNE, C., MINARRO, M., MOREL, K., PARVEAUD, C.-E., ROSIES, B., SIEGWART, M., SIGSGAARD, L., SIMON, S., TASIN, M., et VERCKEN, E., 2021. API-Tree outcomes: Pesticide-free methods to control apple pests, experimentation and performance. INRAE. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://hal.inrae.fr/hal-03352357>>.

AMARAWARDANA, L., BANDARA, P., KUMAR, V., PETERSSON, J., NINKOVIC, V., et GLINWOOD, R., 2007. Olfactory response of *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) to volatiles from leek and chive: Potential for intercropping with sweet pepper. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* [en ligne], volume 57, n° 1. p. 87-91. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1080/09064710500487721>>.

AQUEEL, M.A., et LEATHER, S.R., 2011. Effect of nitrogen fertilizer on the growth and survival of *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Homoptera: Aphididae) on different wheat cultivars. *Crop Protection* [en ligne], volume 30, n° 2. p. 216-221. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219410002930>>.

BALDWIN, I.T., KESSLER, A., et HALITSCHKE, R., 2002. Volatile signaling in plant–plant–herbivore interactions: what is real? *Current Opinion in Plant Biology* [en ligne], volume 5, n° 4. p. 351-354. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526602002637>>.

BARTO, K., ENRIGHT, S., EYLES, A., WALLIS, C., CHORBADJIAN, R., HANSEN, R., HERMS, D.A., BONELLO, P., et CIPOLLINI, D., 2008. Effects of Fertilization and Fungal and Insect Attack on Systemic Protein Defenses of Austrian Pine. *SpringerLink* [en ligne]p. 1392-1400. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10886-008-9550-z>>.

BARZMAN, M., BARBERI, P., BIRCH, A.N.E., BOONEKAMP, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., GRAF, B., HOMMEL, B., JENSEN, J.E., KISS, J., KUDSK, P., LAMICHHANE, J.R., MESSEAN, A., MOONEN, A.-C., RATNADASS, A., RICCI, P., SARAH, J.-L., et SATTIN, M., 2015. Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development* [en ligne], volume 35, n° 4. p. 1199-1215. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/s13593-015-0327-9>>.

BASS, C., PUINEAN, A.M., ZIMMER, C.T., DENHOLM, I., FIELD, L.M., FOSTER, S.P., GUTBROD, O., NAUEN, R., SLATER, R., et WILLIAMSON, M.S., 2014. The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Elsevier* [en ligne], volume 51, p. 41-51. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965174814000794>>.

BEIZHOU, S., JIE, Z., WIGGINS, N.L., YUNCONG, Y., GUANGBO, T., et XUSHENG, S., 2012. Intercropping With Aromatic Plants Decreases Herbivore Abundance, Species Richness, and Shifts

Arthropod Community Trophic Structure. *Environmental Entomology* [en ligne], volume 41, n° 4. p. 872-879. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1603/EN12053>>.

BEIZHOU, S., MEICHAO, W., et YUN, K., 2010. Interaction of the dominant pests and natural enemies in the experimental plots of the intercropping aromatic plants in pear orchard. *China Agriculture Science* [en ligne] Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Interaction+of+the+dominant+pests+and+natural+enemies+in+the+experimental+plots+of+the+intercropping+aromatic+plants+in+pear+orchard&author=Song+Beizhou%2C+Beijing+Agricultural+College%2C+Beijing%28China%29%2C+Department+of+Plant+Science+and+Technology&publication_year=2010>.

BEN ISSA, R.B., 2014. Etude de l'effet de plantes de service (PdS) sur l'installation d'une population du puceron *Myzus persicae* (Hemiptera Aphididae): mise en évidence du rôle des composés organiques volatils (COV). phdthesis : Université d'Avignon.

BEN ISSA, R., GAUTIER, H., COSTAGLIOLA, G., et GOMEZ, L., 2016. Which companion plants affect the performance of green peach aphid on host plants? Testing of 12 candidate plants under laboratory conditions. *Entomologia Experimentalis et Applicata* [en ligne], volume 160, p. 164-178. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/eea.12473?casa_token=1SPih6lfvecAAAAA:VUO0ZALDhWjq-RnDiMnvwJBk3u4iAuurkzX7D3qkBjKU9AttywRz3WObzq9EIJbcB8AbjStEloFfGom3>.

BEN ISSA, R., GAUTIER, H., et GOMEZ, L., 2017a. Influence of neighbouring companion plants on the performance of aphid populations on sweet pepper plants under greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Entomology* [en ligne], volume 19, n° 2. p. 181-191. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/afe.12199>>.

BEN ISSA, R., GOMEZ, L., et GAUTIER, H., 2017b. Companion Plants for Aphid Pest Management. *Insects* [en ligne], volume 8, n° 4. p. 112. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.mdpi.com/2075-4450/8/4/112>>.

BLACKMAN, R.L., et EASTOP, V.F., 1995. Aphids on the world's trees: an identification and information guide. *Bulletin of Entomological Research* [en ligne], volume 85, n° 2. p. 305-306. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.cambridge.org/core/journals/bulletin-of-entomological-research/article/abs/aphids-on-the-worlds-trees-an-identification-and-information-guide-by-blackmanrl-and-eastopvf-wallingford-oxon-cab-international-1994-viii1024-pp-hard-cover-9950-isbn-0-85198-877-6/6C6C98D6D9BE53D69A3A9DE4E84CC984>>.

BLOMMERS, L.H.M., HELSEN, H.H.M., et VAAL, F.W.N.M., 2004. Life history data of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homopt., Aphididae) on plantain and as migrant to apple. *Journal of Pest Science* [en ligne], volume 77, n° 3. p. 155-163. Date de consultation : 03/06/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/s10340-004-0046-5>>.

BRUCE, T.J.A., WADHAMS, L.J., et WOODCOCK, C.M., 2005. Insect host location: a volatile situation. *Trends in Plant Science* [en ligne], volume 10, n° 6. p. 269-274. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138505000968>>.

BUSSI, C., HUGUET, J.G., BESSET, J., et DEFRANCE, H., 1992. Incidences des techniques culturales sur la croissance et la fructification du pêcher en système d'irrigation localisée. I. Effets des facteurs mode d'entretien du sol, fertilisation azotée et densité de plantation. *Fruits* [en ligne], volume 47, n° 4. p. 485-494. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://revues.cirad.fr/index.php/fruits/article/view/35324>>.

CABROL, M., 2019. Etude de l'effet de plantes de service sur la dynamique de population du puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea*) et ses ennemis naturels.

CAPPELLARI, L. del R., CHIAPPERO, J., SANTORO, M.V., GIORDANO, W., et BANCHIO, E., 2017. Inducing phenolic production and volatile organic compounds emission by inoculating *Mentha piperita* with plant growth-promoting rhizobacteria. *Scientia Horticulturae* [en ligne], volume 220, p. 193-198.

Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423817302273>>.

CARVALHO, F.P., 2017. Pesticides, environment, and food safety. Food and Energy Security [en ligne], volume 6, n° 2. p. 48-60. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fes3.108>>.

CATUSSE, L., 2020. Nutrition azotée et plantes de services : effets sur la régulation des pucerons, les dynamiques de croissance et la multiperformance de pêcheurs. Date de consultation : 04/06/2021. Disponible sur : https://www.gis-fruits.org/content/download/4136/40653/version/1/file/Catusse_Louis_Rapport_final.pdf>.

CHAPMAN, R.F., BERNAYS, E.A., et SIMPSON, S.J., 1981. Attraction and repulsion of the aphid, *Cavariella aegopodii*, by Plant Odors. SpringerLink [en ligne]p. 881-888. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00992385>>.

CHEN, Y., OLSON, D.M., et RUBERSON, J.R., 2010. Effects of nitrogen fertilization on tritrophic interactions. Arthropod-Plant Interactions [en ligne], volume 4, n° 2. p. 81-94. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s11829-010-9092-5>>.

CLARK, R.J., et MENARY, R.C., 1980. The effect of irrigation and nitrogen on the yield and composition of peppermint oil (*Mentha piperita* L.). Australian Journal of Agricultural Research [en ligne], volume 31, n° 3. p. 489-498. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://www.publish.csiro.au/ar/ar9800489>>.

CRISOSTO, C.H., et COSTA, G., 2008. Preharvest factors affecting peach quality. In: LAYNE, D., BASSI, D. The peach : botany, production and uses. Wallingford : CABI. p. 536-549.

CROCK, J., WILDUNG, M., et CROTEAU, R.B., 1997. Isolation and bacterial expression of a sesquiterpene synthase cDNA clone from peppermint (*Mentha x piperita*, L.) that produces the aphid alarm pheromone (E)- β -farnesene. PNAS [en ligne], volume 94, n° 24. p. 12833-12838. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://www.pnas.org/content/94/24/12833.short>>.

D'ALESSANDRO, M., et TURLINGS, T.C., 2006. Advances and challenges in the identification of volatiles that mediate interactions among plants and arthropods. Analyst [en ligne], volume 131, n° 1. p. 24-32. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2006/an/b507589k>>.

DANCEWICZ, K., et GABRYS, B., 2008. Effect of extracts of garlic [*Allium sativum* L.], wormwood [*Artemisia absinthium* L.] and tansy [*Tanaceum vulgare* L.] on the behaviour of the peach potato aphid *Myzus persicae* [Sulz.] during the settling on plants. Pestycydy [en ligne]n° 3-4. p. 93-99. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-article-5fcc445a-c81f-4b87-a31a-a92cc3493d77>>.

DARDOURI, T., 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 verger Repellence towards *Myzus persicae* (Sulzer): evidence of two modes of action of the volatiles from selected living aromatic plants Influence of rosemary volatiles in the green peach aphid. These de doctorat : Avignon.

DARDOURI, T., GAUTIER, H., BEN ISSA, R., COSTAGLIOLA, G., et GOMEZ, L., 2019a. Repellence of *Myzus persicae* (Sulzer): evidence of two modes of action of volatiles from selected living aromatic plants - Dardouri - 2019 - Pest Management Science - Wiley Online Library. Pest Management Science [en ligne], volume 75, p. 2019. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.5271>>.

DARDOURI, T., GOMEZ, L., AMELINE, A., COSTAGLIOLA, G., SCHOENY, A., et GAUTIER, H., 2021. Non-host volatiles disturb the feeding behavior and reduce the fecundity of the green peach aphid,

Myzus persicae. Pest Management Science [en ligne], volume 77, n° 4. p. 1705-1713. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.6190>>.

DARDOURI, T., GOMEZ, L., SCHOENY, A., COSTAGLIOLA, G., et GAUTIER, H., 2019b. Behavioural response of green peach aphid *Myzus persicae* (Sulzer) to volatiles from different rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) clones. Agricultural and Forest Entomology [en ligne], volume 21, n° 3. p. 336-345. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/afe.12336>>.

DATANOVIA., 2021. ANOVA Mixte dans R. In : Datanovia [en ligne]. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.datanovia.com/en/fr/lessons/anova-mixte-dans-r/>>.

DELFINE, S., LORETO, F., PINELLI, P., TOGNETTI, R., et ALVINO, A., 2005. Isoprenoids content and photosynthetic limitations in rosemary and spearmint plants under water stress. Agriculture, Ecosystems & Environment [en ligne], volume 106, n° 2. p. 243-252. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880904003020>>.

DEMENT, W.A., TYSON, B.J., et MOONEY, H.A., 1975. Mechanism of monoterpene volatilization in *Salvia mellifera*. Phytochemistry [en ligne], volume 14, n° 12. p. 2555-2557. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003194227585223X>>.

DIEUDONNE, E., 2018. Etude du comportement de *Dysaphis plantaginea*, le puceron cendré du pommier, en présence de plantes aromatiques. 57 p.

DOLAN, M.C., et PANELLA, N.A., 2011. A Review of Arthropod Repellents. In: Recent Developments in Invertebrate Repellents. American Chemical Society. p. 1-19.

DROUZY, N., REGAL, S., et BOUILLOUX, M., 2020. Le pêcher en AB. [en ligne]p. 11. Disponible sur : <https://extranet-ain.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Auvergne-Rhone-Alpes/AB_Guide-protection-pecher_2020.pdf>.

ECOPHYTOPIC., 2021. Projet Ecopêche 2 [en ligne]. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-ecopeche-2>>.

ELBAZ, A., CLAVEL, J., RATHOUZ, P.J., MOISAN, F., GALANAUD, J.-P., DELAMOTTE, B., ALPEROVITCH, A., et TZOURIO, C., 2009. Professional exposure to pesticides and Parkinson disease. Annals of Neurology [en ligne], volume 66, n° 4. p. 494-504. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ana.21717>>.

ERCEAU, C., et PASQUIER, B., 2016. *Mentha x piperita* subsp. *piperita* - Diversité des aspects morphologiques, agronomiques et chimiques de variétés et clones collectés par le CNPMAI. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.cnpmai.net/wp-content/uploads/2020/03/Publication-Menthe-poivr%C3%A9-2016.pdf>>.

FADHL, M.B., 2019. Des restrictions en eau et en azote modérées et durables peuvent-elles contribuer au contrôle des infestations de pucerons en verger commercial de pêcher ? other : France. Université de Picardie Jules Verne (UPJV), FRA.

FONTANA, A., REICHEL, M., HEMPEL, S., GERSHENZON, J., et UNSICKER, S.B., 2009. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on direct and indirect defense metabolites of *Plantago lanceolata* L. Journal of Chemical Ecology, volume 35, n° 7. p. 833-843.

FOULONGNE, M., PASCAL, T., PFEIFFER, F., et KERVELLA, J., 2003. QTLs for powdery mildew resistance in peach x *Prunus davidiana* crosses: consistency across generations and environments. Molecular Breeding [en ligne], volume 12, n° 1. p. 33-50. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1023/A:1025417507358>>.

FRANCIS, F., LOGNAY, G., et HAUBRUGE, E., 2004. Olfactory Responses to Aphid and Host Plant Volatile Releases : (E)- β -Farnesene an Effective Kairomone for the Predator *Adalia bipunctata*. Journal

of Chemical Ecology [en ligne], volume 30, n° 4. p. 741-755. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1023/B:JOEC.0000028429.13413.a2>>.

FROST, C.J., APPEL, H.M., CARLSON, J.E., DE MORAES, C.M., MESCHER, M.C., et SCHULTZ, J.C., 2007. Within-plant signalling via volatiles overcomes vascular constraints on systemic signalling and primes responses against herbivores. *Ecology Letters* [en ligne], volume 10, p. 490-498. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1461-0248.2007.01043.x?casa_token=pu1vzhzb6DMAAAAA:Y63oMJXBBiYw2V1CB0x6FoQafYXbRB4o5bDIYVWkrZFNuzukEVuJS6LzXfKfUpWNLQInHs_4XKKcsa->>.

GERSHENZON, J., MCCONKEY, M.E., et CROTEAU, R.B., 2000. Regulation of Monoterpene Accumulation in Leaves of Peppermint1. *Plant Physiology* [en ligne], volume 122, n° 1. p. 205-214. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1104/pp.122.1.205>>.

GIORDANENGO, P., FEDVAY, G., et RAHBE, Y., 2007. Comment les pucerons manipulent les plantes. *BIOFUTUR* [en ligne] n° 279. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<http://academic.oup.com/jxb/article/57/4/739/558913/Salivary-secretions-by-aphids-interacting-with>>.

GLYNN, C., HERMS, D.A., EGAWA, M., HANSEN, R., et MATTSON, W.J., 2003. Effects of nutrient availability on biomass allocation as well as constitutive and rapid induced herbivore resistance in poplar. *Oikos* [en ligne], volume 101, n° 2. p. 385-397. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1034/j.1600-0706.2003.12089.x>>.

GOGGIN, F.L., 2007. Plant-aphid interactions : molecular and ecological perspectives. *Current Opinion in Plant Biology* [en ligne], volume 10, n° 4. p. 399-408. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526607000763>>.

GRECHI, I., HILGERT, N., SAUPHANOR, B., SENOUSI, R., et LESCOURRET, F., 2010. Modelling coupled peach tree-aphid population dynamics and their control by winter pruning and nitrogen fertilization. *Elsevier* [en ligne], volume 221, n° 19. p. 2363-2373. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438001000284X?casa_token=yg77_IKSynUAAAA:p64vCe8WpanuBX8K2UFcuDn6cio8wv5CDOyQv8fZSDy6Smim5yihXx-pR1U72NmuOgeNF6sD4c4>.

GRECHI, I., SAUGE, M.-H., SAUPHANOR, B., HILGERT, N., SENOUSI, R., et LESCOURRET, F., 2008. How does winter pruning affect peach tree - *Myzus persicae* interactions? *Entomologia Experimentalis et Applicata* [en ligne], volume 128, p. 369-379. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1570-7458.2008.00720.x?casa_token=P2mP790CPbsAAAAA:jYYohNRoV0nHNCrYrAIKlxKExXBrijKYeOZ9DSdZluepN5ztyNEcwSBRjxl78Xx9sNHtXtJ6jQg8uCpkA>.

HAWKINS, N.J., BASS, C., DIXON, A., et NEVE, P., 2019. The evolutionary origins of pesticide resistance. *Biological Reviews* [en ligne], volume 94, Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/brv.12440>>.

HAZARIKA, L.K., BHUYAN, M., et HAZARIKA, B.N., 2009. Insect Pests of Tea and Their Management. *Annual Review of Entomology* [en ligne], volume 54, n° 1. p. 267-284. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093359>>.

HEE, S.M., 1975. Effect of nitrogen fertilization on peppermint oil quality and content.

HOKKANEN, H.M.T., 1991. Trap Cropping in Pest Management. *Annual Review of Entomology* [en ligne], volume 36, n° 1. p. 119-138. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1146/annurev.en.36.010191.001003>>.

HOLOPAINEN, J.K., et GERSHENZON, J., 2010. Multiple stress factors and the emission of plant VOCs. *Trends in Plant Science* [en ligne], volume 15, n° 3. p. 176-184. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136013851000018X>>.

- HORI, M.**, 1999. Role of host plant odors in the host finding behaviors of aphids. *Applied Entomology and Zoology* [en ligne] Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://www.jstage.jst.go.jp/article/aez1966/34/3/34_3_293/article/-char/ja/>.
- HUETT, D.O.**, 1996. Prospects for manipulating the vegetative-reproductive balance in horticultural crops through nitrogen nutrition: a review. *Australian Journal of Agricultural Research* [en ligne], volume 47, n° 1. p. 47-66. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.publish.csiro.au/ar/ar9960047>>.
- HULLE, M., TURPEAU, E., LECLANT, F., et RAHN, M.-J.**, 1998. Les pucerons des arbres fruitiers: cycles biologiques et activités de vol. Editions Quae. 84 p. ISBN 978-2-85794-160-6.
- HUREJ, M.**, 2000. Trap plants and their application in plant protection against pests. *Progress in Plant Protection* [en ligne], volume 40, n° 1. p. 249-253. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20023124238>>.
- HUSSON, F., JOSSE, J., et PAGES, J.**, 2010. Analyse de données avec R - Complémentarité des méthodes d'analyse factorielle et de classification. 7 p.
- IKEURA, H., KOBAYASHI, F., et HAYATA, Y.**, 2012. Repellent Effect of Herb Extracts on the Population of Wingless Green Peach Aphid, *Mysus persicae* Sulzer (Hemiptera : Aphididae). *Journal of Agriculture Science*, volume 4, n° 5.
- JELIAZKOVA, EA., ZHELJAZKOV, V., CRAKER, L., YANKOV, B., et GEORGIEVA, T.**, 1999. Engrais NPK et rendements de menthe poivrée, *Mentha x piperita*. *ISHS* [en ligne], volume 502, p. 231-236. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://www.actahort.org/books/502/502_37.htm>.
- 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) - Jordan - 2020 - Pest Management Science - Wiley Online Library. *Pest Management Science* [en ligne], volume 76, p. 797-806. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ps.5583>>.
- LAGET, E., GUADAGNINI, M., PLENET, D., SIMON, S., ASSIE, G., BILLOTTE, B., BORIOLI, P., BOURGUOIN, B., FRATANTUONO, M., GUERIN, A., HUCBOURG, B., LEMARQUAND, A., LOQUET, B., MERCADAL, M., PARVEAUD, C.E., RAMADE, L., PAMES, M.H., RICAUD, V., ROUSSELIN, C., SAGNES, J.-L., et ZAVAGNI, F.**, 2015. Guide Ecophyto Fruits - Guide pour la conception de systèmes de production fruitière économes en produits phytopharmaceutiques [en ligne]. GIS Fruits et Ministère de l'Agriculture. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://hal.inrae.fr/hal-02797887>>.
- Larousse, É.**, 2021. Dictionnaire Français en ligne - Larousse [en ligne]. Date de consultation : 19/10/2021. Disponible sur : <<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais-monolingue>>.
- LECLANT, F., et REMAUDIERE, G.**, 1970. Éléments pour la prise en considération des Aphides dans la lutte intégrée en vergers de pêchers. *SpringerLink* [en ligne] Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02371625>>.
- LOBIT, P., SOING, P., GENARD, M., et HABIB, R.**, 2001. Effects of timing of nitrogen fertilization on shoot development in peach (*Prunus persica*) trees. *Tree Physiology* [en ligne], volume 21, n° 1. p. 35-42. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1093/treephys/21.1.35>>.
- LOPEZ, R., et SHEPARD, B.M.**, 2007. Arthropods associated with medicinal plants in coastal South Carolina. *Insect Science* [en ligne], volume 14, n° 6. p. 519-524. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7917.2007.00181.x>>.
- MAINO, J.L., RENTON, M., HOFFMANN, A.A., et UMINA, P.A.**, 2019. Field margins provide a refuge for pest genes beneficial to resistance management. *Journal of Pest Science* [en ligne], volume 92, n° 3. p. 1017-1026. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/s10340-019-01106-8>>.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, et Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature., 2018. Plan Ecophyto II+.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, et Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation., 2021. Ensemble, réduisons les phytos pour une agriculture performante et durable. Date de consultation : 02/06/2021. Disponible sur : <https://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BAT_Ecophyto_PACA_cle066b76.pdf>.

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation., 2021. Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est ? [en ligne]. Date de consultation : 02/06/2021. Disponible sur : <<https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>>.

Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement., 2018. Le memento du réseau DEPHY.

MITHOFER, A., WANNER, G., et BOLAND, W., 2005. Effects of Feeding Spodoptera littoralis on Lima Bean Leaves. II. Continuous Mechanical Wounding Resembling Insect Feeding Is Sufficient to Elicit Herbivory-Related Volatile Emission. *Plant Physiology* [en ligne], volume 137, n° 3. p. 1160-1168. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1065415/>>.

MUTIGA, S.K., GOHOLE, L.S., et AUMA, E.O., 2010. Effects of integrating companion cropping and nitrogen application on the performance and infestation of collards by *Brevicoryne brassicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* [en ligne], volume 134, n° 3. p. 234-244. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1570-7458.2009.00952.x>>.

NII, N., KATO, M., HIRANO, Y., et FUNAGUMA, T., 1993. Starch Accumulation and Photosynthesis in Leaves of Young Peach Trees Grown under Different Levels of Nitrogen Application. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, volume 62, n° 3. p. 547-554.

ORMENO, E., MEVY, J.P., VILA, B., BOUSQUET-MELOU, A., GREFF, S., BONIN, G., et FERNANDEZ, C., 2007. Water deficit stress induces different monoterpene and sesquiterpene emission changes in Mediterranean species. Relationship between terpene emissions and plant water potential. *Chemosphere* [en ligne], volume 67, n° 2. p. 276-284. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653506013658>>.

PAGES, J., 2004. Analyse factorielle de données mixtes. *Revue de statistique appliquée*, volume 52, n° 4. p. 93-111.

PASCAL, T., PFEIFFER, F., KERVELLA, J., LACROZE, J.P., SAUGE, M.-H., et WEBER, W.E., 2002. Inheritance of green peach aphid resistance in the peach cultivar 'Rubira'. *Plant Breeding* [en ligne], volume 121, p. 459-461. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1439-0523.2002.734333.x?casa_token=hFJE-mZwZoAAAAA:SbhYEE05KluYsX6xg945DvZAUr1jF3z8mnhHeqlmxVDOcEPEMfu2iwpFhQygDaTvKAYFanP_UICUTf_x>.

PASCUAL-VILLALOBOS, M.J., CANTO-TEJERO, M., VALLEJO, R., GUIRAO, P., RODRIGUEZ-ROJO, S., et COCERO, M.J., 2017. Use of nanoemulsions of plant essential oils as aphid repellents. *Industrial Crops and Products* [en ligne], volume 110, p. 45-57. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669017303321>>.

PEDRENO, J.N., MORAL, R., GOMEZ, I., MATAIX, J., et RAMOS, C., 1996. Nitrogen losses and yield of cauliflower. *In: RODRIGUEZ-BARRUECO, C. Fertilizers and Environment: Proceedings of the International Symposium "Fertilizers and Environment", held in Salamanca, Spain, 26–29, September, 1994.* Dordrecht : Springer Netherlands. p. 47-49.

PICCAGLIA, R., et MAROTTI, M., 1993. Characterization of several aromatic plants grown in northern Italy. *Flavour and Fragrance Journal* [en ligne], volume 8, n° 2. p. 115-122. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ffj.2730080208>>.

PICHERSKY, E., NOEL, J., et DUDAREVA, N., 2006. Biosynthesis of Plant Volatiles: Nature's Diversity and Ingenuity. *Science* [en ligne], volume 311, Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1118510>>.

PLENET, D., HILAIRE, C., BLANC, P., BORG, J., BORNE, S., BUSSI, C., GALLIA, V., GREIL, M.-L., GUIRAUD, M., HOSTALNOU, E., LABEYRIE, B., MERCIER, V., MILLAN, M., MONTROGNON, Y., MONTY, D., C., -Mouiren, PINET, C., et RUESCH, J., 2019. EcoPêche - Conception et évaluation multisite de vergers de pêche – nectarine économes en produits phytopharmaceutiques et en intrants. *Innovations Agronomiques* [en ligne], volume 76, p. 291. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://hal.inrae.fr/hal-02625136>>.

PRESTON, C.A., LAUE, G., et BALDWIN, I.T., 2004. Plant–Plant Signaling: Application of trans- or cis-Methyl Jasmonate Equivalent to Sagebrush Releases Does Not Elicit Direct Defenses in Native Tobacco. *Journal of Chemical Ecology* [en ligne], volume 30, n° 11. p. 2193-2214. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1023/B:JOEC.0000048783.64264.2a>>.

PRICE, P.W., 1991. The Plant Vigor Hypothesis and Herbivore Attack. *Oikos* [en ligne], volume 62, n° 2. p. 244-251. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.jstor.org/stable/3545270>>.

PRICE, P.W., 2002. Resource-driven terrestrial interaction webs. *Ecological Research* [en ligne], volume 17, n° 2. p. 241-247. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2002.00483.x>>.

REGNAULT-ROGER, C., 2005. New insecticides of plant origin for the third millennium? Biopesticides of plant origin [en ligne]p. 17-35. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20053061450>>.

ROSSI, N., CIAVATTA, C., et ANTISARI, L.V., 1991. Seasonal pattern of nitrate losses from cultivated soil with subsurface drainage. *Water, Air, and Soil Pollution* [en ligne], volume 60, n° 1. p. 1-10. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/BF00293961>>.

ROUSSELIN, A., 2017. Contribution des pratiques culturales (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*). p. 144.

ROUSSELIN, A., SAUGE, M.-H., JORDAN, M.-O., VERCAMBRE, G., LESCOURRET, F., et BEVACQUA, D., 2016a. Nitrogen and water supplies affect peach tree–green peach aphid interactions: the key role played by vegetative growth. *Agricultural and Forest Entomology* [en ligne], volume 18, p. 367-375. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/afe.12168?casa_token=GbnFFvBdJFMAAAAA:0mVYKNASZHIKjKv96e62-dVpv_mDEFisC7KTBqqr4NX9s1VMLnSH6HrokgmmQiWg8VkdDVQ882X86-X>.

ROUSSELIN, A., SAUGE, M.-H., VERCAMBRE, G., BEVACQUA, D., LESCOURRET, F., et JORDAN, M.-O., 2016b. Effects of nitrogen fertilization and vegetative growth on the population dynamics of the aphid, *Myzus persicae*, in the peach tree, *Prunus persica*. *ISHS*

RUBIO AMES, Z., BRECHT, J.K., et OLMSTEAD, M.A., 2020. Nitrogen fertilization rates in a subtropical peach orchard: effects on tree vigor and fruit quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [en ligne], volume 100, n° 2. p. 527-539. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.10031>>.

SAUGE, M.-H., GRECHI, I., et PoesseL, J.-L., 2010. Nitrogen fertilization effects on *Myzus persicae* aphid dynamics on peach: vegetative growth allocation or chemical defence? *Entomologia Experimentalis et Applicata* [en ligne] Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1570-7458.2010.01008.x?casa_token=bBJ4jiVvtsgAAAAA:40Qqxc-a7d5YRQKH5z_JoWrS12oXqsOpq0tnd7O-WAhwog7k4FfBXQw5i2mtR8D2BRHoLbD_SDo2MnZ>.

- SAUGE, M.-H., MUS, F., LACROZE, J.-P., PASCAL, T., KERVELLA, J., et POESSEL, J.-L.**, 2006. Genotypic variation in induced resistance and induced susceptibility in the peach-Myzus persicae aphid system. *Oikos* [en ligne], volume 113, n° 2. p. 305-313. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.2006.0030-1299.14250.x>>.
- SEIF SAHANDI, M., NAGHDI BADI, H., MEHRAFARIN, A., KHALIGHI-SIGAROODI, F., et SHARIFI, M.**, 2019. Changes in Essential Oil Content and Composition of Peppermint (*Mentha piperita* L.) in Responses to Nitrogen Application. *Journal of Medicinal Plants* [en ligne], volume 18, n° 72. p. 81-97. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<http://jmp.ir/article-1-2704-en.html>>.
- SOING, P., LOBIT, P., GENARD, M., et HABIB, R.**, 1998. Peach tree: nitrogen, growth, yield and quality. Infos CTIFL (France) [en ligne] Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Peach+tree%3A+nitrogen%2C+growth%2C+yield+and+quality&author=Soing%2C+P.+%28Centre+Technique+Interprofessionnel+des+Fruits+et+Legumes%2C+Paris+%28France%29%29&publication_year=1998>.
- SONG, B.Z., WU, H.Y., KONG, Y., ZHANG, J., DU, Y.L., HU, J.H., et YAO, Y.C.**, 2010. Effects of intercropping with aromatic plants on the diversity and structure of an arthropod community in a pear orchard. *BioControl* [en ligne], volume 55, n° 6. p. 741-751. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/s10526-010-9301-2>>.
- SPELLMAN, B., BROWN, M.W., et MATHEWS, C.R.**, 2006. Effect of floral and extrafloral resources on predation of *Aphis spiraeicola* by *Harmonia axyridis* on Apple. *BioControl* [en ligne], volume 51, n° 6. p. 715. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/s10526-005-5252-4>>.
- SUD ARBO.**, 2012. Les pucerons du pêcher, de l'abricotier et du cerisier. Disponible sur : <https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/SudA12Fiche_5_PuceronsFruitsANoyau.pdf>.
- TAYLOR, B.K., et VAN, den E.B.**, 1970. The nitrogen nutrition of the peach tree. 5. Influence of rate of application of calcium ammonium nitrate fertilizer on yield, tree growth and nitrogen content of fruit. *Australian Journal of Experimental Agriculture* [en ligne], volume 10, n° 43. p. 214-217. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.publish.csiro.au/ea/ea9700214>>.
- THIBORD, J.-B.**, 2014. Des insectes aux grandes capacités d'adaptation. *In* : Terre-net [en ligne]. Date de consultation : 02/06/2021. Disponible sur : <<https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/des-insectes-aux-grandes-capacites-d-adaptation-217-97750.html>>.
- TINGEY, D.T., MANNING, M., GROTHAUS, L.C., et Burns, W.F.**, 1980. Influence of light and temperature on monoterpene emission rates from slash pine. *Plant Physiology*, volume 65, n° 5. p. 797-801.
- VILLENEUVE, F., PICAULT, S., TROTTIN-CAUDAL, Y., et DELPORTE, M.**, 2017. La maîtrise des bio-agresseurs dans un contexte de réduction des produits phytopharmaceutiques - focus sur l'utilisation des plantes de service. *Innovations Agronomiques*, volume 61, p. 5-24.
- VOIRIN, B., et BAYET, C.**, 1996. Developmental changes in the monoterpene composition of *Mentha x piperita* leaves from individual peltate trichomes. *Phytochemistry* [en ligne], volume 43, n° 3. p. 573-580. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031942296002853>>.
- WALLING, L.L.**, 2008. Avoiding Effective Defenses: Strategies Employed by Phloem-Feeding Insects. *Plant Physiology* [en ligne], volume 146, n° 3. p. 859-866. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1104/pp.107.113142>>.
- WILKINSON, M., WHITE, I.R., HAMSHERE, K., HOLZ, O., SCHUCHARDT, S., BALLAGAMBI, F.G., LOMONACO, T., BIAGINI, D., FRANCESCO, F.D., et FOWLER, S.J.**, 2020. The peppermint breath

test: a benchmarking protocol for breath sampling and analysis using GC-MS. Journal of Breath Research [en ligne], volume 15, n° 2. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1088/1752-7163/abd28c>>.

WYATT, T.D., 2003. Pheromones and animal behaviour: communication by smell and taste. Cambridge, UK ; New York : Cambridge University Press. 391 p. ISBN 978-0-521-48068-0.

ZEHNDER, C.B., et HUNTER, M.D., 2009. More is not necessarily better: the impact of limiting and excessive nutrients on herbivore population growth rates. Ecological Entomology [en ligne], volume 34, p. 535-543. Date de consultation : 18/10/2021. Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2311.2009.01101.x?casa_token=EpuFDe_HWI8AAAAA%3A1LqBcEYOiNrgyZ5C-mSmulpY8igpeq9fhzr5Kd8Tbm2b-BeVWBqVp7Ea3xj7CDZ3Q1xzabetOdFd1z_E>.

Annexe A : Protocole d'extraction et dosage des nitrates sur poudre végétale à l'aide du FIA 5000 (document interne à l'unité PSH)

	MODE OPERATOIRE	MO-AL-08-A
	Extraction et dosage des nitrates/nitrites sur poudre végétale à l'aide du FIA 5000 (Flow Injection Analysis)	Page 1 sur 3

Avant toute utilisation de ce document, vérifier sur le réseau informatique de l'unité qu'il est toujours en vigueur.

1. Objectif :

Décrire les opérations liées au dosage des nitrates et des nitrites à partir de poudre végétale.

2. Domaine d'application :

Laboratoire d'analyses PSH.

3. Destinataires :

Toute personne devant effectuer ce dosage dans le laboratoire d'analyse de l'unité PSH.

4. Modifications apportées :

Première version du document.

Nom du rédacteur : Doriane Bancel Date et signature :	Nom du vérificateur : Emilie Rubio Date et signature :
Nom de l'approbateur: Guy Costagliola Fonction : RAQ Date et signature :	Validation par le directeur d'unité Nom : Date et signature :

5. Hygiène et sécurité :

Les solutions d'acide chlorhydrique et d'ammoniaque sont à manipuler sous la hotte pour éviter les vapeurs très toxiques qu'elles libèrent avec des gants.

La colonne de cadmium est à manipuler avec précaution étant très toxique.

6. Documents rattachés :

IN-AL-03 : Utilisation de la Base de données BASILE.

IN-AL-05 : Utilisation du FIA 5000 (Flow Inject Analysis) pour l'analyse des nitrates et des nitrites.

7. Matériels et produits nécessaires :

- solution Nitrate Standard (réf 1.19811.0500, MERCK)
- sulfanilamide (C₆H₈N₂O₂S) CAS [63-74-1]
- chlorure d'ammonium (NH₄Cl) CAS [12125-02-9]
- NED (C₁₂H₁₄N₂.2HCL) CAS 1465-25-4]
- ammoniaque 25% (NH₄OH) CAS [1336-21-6]
- acide chlorhydrique (HCl 37%) CAS [7647-01-0]
- eau ultra pure (=eau UP)

Matériel : FIA 5000 (Flow Injection Analysis), micropipettes, fioles jaugées 100 mL, 500 mL, 1 L, diluteur, vortex, plaque vibrante, hotte aspirante, système de filtration, pompe à vide (ou trompe à eau), étuve, dessiccateur, pH-mètre.

Consommables : gant jetable, colonne au cadmium (FOSS réf 50003139), Filtre à soupape (SARSTEDT réf 53.420), tubes 13 mL (SARSTEDT réf 55.518), filtres DURIEUX (fibre de verre N°28), tube jetable 10 mL.

8. Contenu :

8.1 Principe du dosage :

L'échantillon contenant nitrites et nitrates est introduit dans un flux de chlorure d'ammonium. Il traverse la colonne au cadmium qui réduit les nitrates en nitrites et entre ensuite en réaction avec une solution d'acide sulfonique pour former un composé azoté. Cette réaction de diazotation donne un composé diazoïque (soit un corps qui comprend un groupement N=N divalent lié d'une part à un carbone et d'autre part à un ion minéral électronégatif).

Lors de la réaction avec le NED (N-naphtyl éthylène dihydrochlorure) (= réaction de copulation), il y a condensation entre le diazoïque formé et l'amine secondaire pour donner un dérivé diazo-aminé absorbant à **540 nm** (couleur violacée).

Cette technique permet d'obtenir la teneur en nitrate plus nitrite.

Pour obtenir la teneur en nitrate, il suffit de soustraire la teneur en nitrite obtenue en effectuant le dosage sans passage de l'échantillon sur la colonne au cadmium.

8.2 Préparation de l'extrait à partir de poudre végétale :

Mettre à l'étuve les poudres végétales sèches pendant 48H à 70° C ou 1 H dans un dessiccateur si ces dernières étaient stockées à -20°C ou -80°C.
Peser sur Basile ou sur papier libre environ **50 mg** de poudre végétale dans un tube spécifique numéroté (SARSTEDT réf 55.518)
Ajouter **4 ml** d'eau ultra pure et agiter énergiquement au vortex.
Ajouter à nouveau **4 ml** d'eau et agiter encore au vortex.
Placer les tubes sur un portoir et agiter sur plaque vibrante une demi-heure.
Centrifuger les tubes à 5000 trs/min pendant 10 min.
Introduire un filtre à soupape (SARSTEDT réf 53.420) dans le tube échantillon.
Transférer les extraits dans un tube jetable 10 mL, si nécessaire réaliser les dilutions à l'eau UP sur le filtrat.

8.3 Préparation de la gamme et des réactifs:

-Gamme étalon :

Préparer à partir d'une solution initiale de **NO3** de chez MERCK à 1001 mg/L soit 16,15 mmol/l.
Avec ce standard commercial, préparer 5 points gammes dans des fioles de 100 mL :

Quantité de solution 1001 mg/L	154,8 µL	309,6 µL	619,2 µL	1,548 mL	3,096 mL
Concentration µmol/L	25 µM	50 µM	100 µM	250 µM	500 µM
Nom de la solution	S1	S2	S3	S4	S5

Compléter avec de l'eau UP au trait de jauge.

-Réactif 1 : (●) Chlorure d'ammonium :

Peser **75 g** de chlorure d'ammonium et dissoudre dans **500 mL** d'eau UP.
Ajuster le pH de cette solution à **8,5** avec environ 7 à 8 mL d'une solution d'ammoniaque (NH4OH).
Compléter la préparation à 1 L avec de l'eau UP.
Cette solution se conserve 2 à 3 mois à +4°C.

-Réactif 2 : (●●) Sulfanilamide :

Sous la hotte aspirante dans une fiole de 500 mL :
Préparer **300 mL** d'eau UP + **26 ml** de HCl concentré.
Peser séparément **500 mg** de sulfanilamide et le dissoudre dans le mélange eau UP+HCl.
Compléter à **500 mL avec de l'eau UP**.
Cette solution se conserve 2 mois maximum à +4°C.

-Réactif 3 : (●●●) NED :

Peser **50 mg** de NED.
Le transférer dans une fiole de 500 mL et compléter au trait de jauge avec de l'eau UP.
Bien mélanger la solution.
Cette préparation de NED doit être refaite chaque jour.

Filtrer les trois réactifs avec les Filtres DURIEUX (fibre de verre N°28) à l'aide d'une pompe à vide et du système de filtration.

8.4 Dosage des nitrates et nitrites :

Se référer au document **IN-AL-05** : Utilisation du FIA 5000 (Flow Inject Analysis) pour l'analyse des nitrates et des nitrites.

8.5 Méthode de calcul :

Volume d'extraction = 8 mL
Dilution réalisée pour le dosage = D
Prise d'essai = PE (mg)

$$\text{Concentration nitrate + nitrite } (\mu\text{mol/g MS}) = \frac{\text{concentration du filtrat } (\mu\text{mol/L}) * D * 8 * 1000}{PE \text{ (mg)} * 1000}$$

La teneur en nitrite dans les végétaux est extrêmement faible et donc négligeable, c'est pourquoi on donne les résultats en nitrate seul.

Exemple de dilution :
laitue : 1/10
tomate (feuille) : 1/10

Annexe B : Principe du dosage du carbone et de l'azote total par la méthode de DUMAS.



Dosage du Carbone et de l'Azote Total Méthode DUMAS

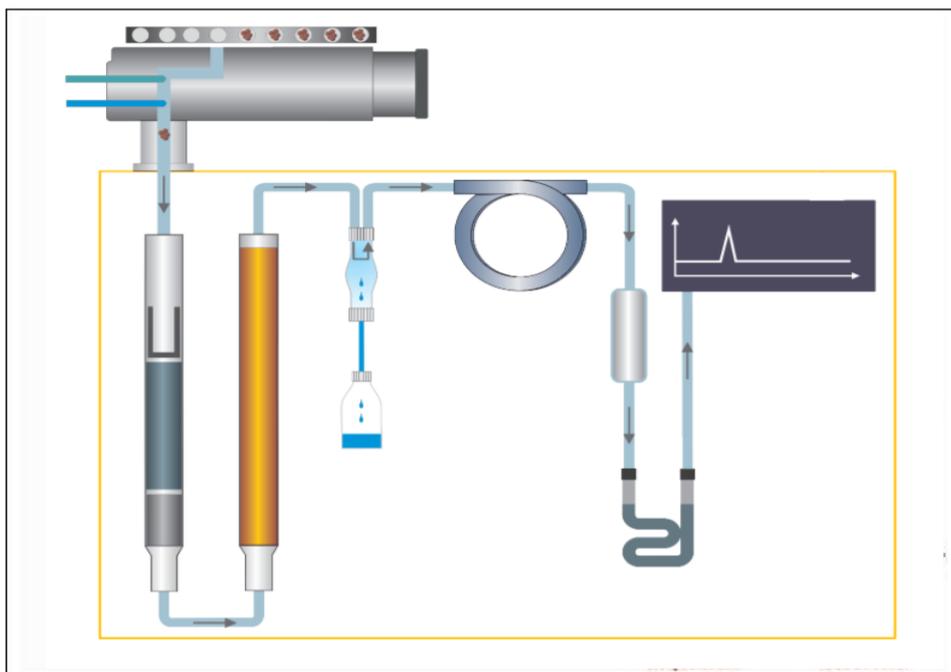
PRINCIPE Dosage du Carbone et de l'azote total dans les poudres (rappel de la documentation FISIONS)

Cette technique est basée sur les méthode classique de DUMAS. L'échantillon contenu dans une petite capsule d'étain est introduit automatiquement dans un réacteur constitué par un tube vertical en quartz maintenu à la température de 1000°C et dans lequel passe un courant d'hélium.

A l'introduction de l'échantillon, le courant d'hélium est automatiquement enrichi par une quantité déterminée d'oxygène pur, provoquant ainsi la combustion éclair de la capsule et de l'échantillon.

Les gaz de combustion entraînés par le courant d'hélium passent sur un catalyseur d'oxydation qui les transforme en CO_2 , H_2O , SO_2 , SO_3 , N_xO_y

Ces gaz passent alors sur un deuxième catalyseur (cuivre réduit) qui va réduire les oxydes d'azote en azote élémentaire, le SO_3 en SO_2 et piéger l'excès d'oxygène. A la sortie du tube, on trouve en plus du gaz vecteur hélium, les gaz N_2 , SO_2 , CO_2 et H_2O . Les produits non dosés sont piégés. Les gaz obtenus sont alors séparés dans une colonne de chromatographie et quantifiés par un détecteur à conductibilité thermique. Le signal obtenu est amplifié puis traité par l'informatique.



RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES : DUMAS J. B. A. ;1831. Procédés de l'analyse organique. Annal. Chem. Phys. (Paris) (2) 47 : 198-213

TYPE D'ÉCHANTILLON

Poudre de végétal ou de sol
broyage de qualité broyeur à billes ou ultra centrifuge BIOBLOCK si possible

QUANTITÉ MINIMALE DE MATERIEL NECESSAIRE

pesée > 5.00 mg de poudre avec notre balance

PREPARATION DE L'ÉCHANTILLON

Cette étape est déterminante en terme d'influence sur l'erreur liée au résultat. Il doit être représentatif, soigneusement broyé, homogénéisé et étuvé 24 heures à 90°C. Une comparaison de dix répétitions d'un même échantillon broyé au Danguomeau et à l'ultracentrifuge bioblock (grille 80 µm), donne deux résultats moyens non significativement différents, mais avec un écart-type plus élevé pour le broyeur à billes. (1.483 ± 0.043 et 1.459 ± 0.032).

TYPE D'ÉCHANTILLON

Poudre de végétal ou de sol
broyage de qualité broyeur à billes ou ultra centrifuge BIOBLOCK si possible

EQUIPEMENTS UTILISES



NA 1500 série 2 CARLO-ERBA actuellement **ThermoElectron** (nov 1992)

Acquisition et traitement du signal : BORWIN (1994) ver 1.22 VARIAN-JMBS sous WINDOWS 95