



HAL
open science

Évaluation des plantes de services comme alternative aux produits phytopharmaceutiques

Rémi Ducasse

► **To cite this version:**

Rémi Ducasse. Évaluation des plantes de services comme alternative aux produits phytopharmaceutiques. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04769165

HAL Id: dumas-04769165

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04769165v1>

Submitted on 6 Nov 2024

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

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



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

Année universitaire : 2023 - 2024

Spécialité : Horticulture

Spécialisation (et option éventuelle) :

Protection des Plantes et Environnement en Horticulture

Mémoire de fin d'études

d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Évaluation des plantes de services comme alternative aux produits phytopharmaceutiques

Par Rémi DUCASSE



Soutenu à Angers le 11/09/2024

Devant le jury composé de :

Président : Nicolas Chen

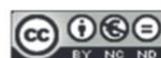
Autres membres du jury : Benjamin Yguel

Maître de stage : Bertrand Alison

Enseignant référent : Bruno Jaloux

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

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



Remerciements

Je souhaite remercier Bertrand Alison, mon maître de stage. Toujours à l'écoute, bienveillant et prêt à répondre aux innombrables questions que je me suis posées, et il y en a eu beaucoup. C'était un réel plaisir de travailler ensemble. J'espère sincèrement que nos chemins pourront se croiser à nouveau et que nous pourrions travailler ensemble à d'autres occasions. Tu m'as donné la possibilité d'orienter le stage à ma façon, en encourageant chacun de mes efforts et en me mettant en garde quand il le fallait. J'ai beaucoup appris pendant ce stage et c'est en grande partie grâce à ton aide.

Pour son aide technique en statistiques, je voudrais remercier Maxime Hervé. L'aide mémoire de statistique a été très utile pour naviguer dans ce vaste monde des tests statistiques et du code R. J'ai passé des heures avec mon écran coupé entre l'aide-mémoire et ma console de code. Je remercie aussi Louise pour son soutien, ses astuces et le partage de son expérience sur le sujet.

Je remercie également toute l'équipe de SudExpé pour son aide et son accueil dans la structure tout au long de ce stage de fin d'études. Je pense en particulier à Hélène, Estéban et Manon. J'ai aussi une pensée pour mes colocataires / collègues / amis avec qui j'ai réalisé toutes les notations de flores, de calibre, de pucerons, et d'auxiliaires qui visiblement ne voulaient pas se montrer.

Je remercie mes parents qui m'ont mis dans les meilleures conditions possibles pour travailler, et obtenir ce beau diplôme d'ingénieur. À vous, merci.

Terminer ces études dans une belle école comme la nôtre, avec une promotion PPEH Mégachile, était un vrai plaisir. Et pour cela, je veux remercier mes 11 camarades de promotion, nos enseignants, ainsi que nos responsables de spécialité Nicolas Chen, Vanessa Soufflet-Frelon et Bruno Jaloux qui ont contribué dès le premier jour à cette dynamique de groupe studieuse et détendue. C'était tout simplement incroyable de travailler dans ce cadre de la salle E137.

Enfin, je voudrais remercier Bruno aux multiples casquettes, enseignant et responsable de spécialité, bassiste et leader du fameux groupe de rock de l'école, et tuteur de stage. Merci pour l'accompagnement pendant cette année et les moments passés dans le cadre professionnel et extrascolaire. Durant ce stage, tu m'as poussé à aller plus loin et à réaliser cette analyse plus globale de mes données. Et je suis très fier de ce travail accompli, merci.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Etat de l'art.....	2
Biologie de <i>Dysaphis plantaginea</i>	2
Plantes de services	3
Freins à l'implantation de plantes de services	5
3. Hypothèses.....	6
4. Matériels et méthodes.....	6
Essai d'efficacité des PdS.....	6
Dispositif expérimental	6
Variables expérimentales.....	7
Analyse statistique	7
Analyse des conditions favorables l'efficacité des PdS	8
Freins à l'implantation de PdS.....	8
Dispositif expérimental :.....	8
Variables expérimentales	9
Analyses statistiques	9
5. Résultats	10
Essai d'efficacité des PdS.....	10
Analyse des conditions favorables à l'efficacité des PdS	11
Freins à l'implantation de PdS.....	12
6. Discussion	13
Essai d'efficacité des PdS.....	13
Discussion méthode	13
Discussion des résultats	15
Analyse des conditions favorables à l'efficacité des PdS	18
Discussion méthode	18
Discussion des résultats	19
Freins à l'implantation des PdS	19
Discussion méthode	19
Discussion des résultats	20
7. Conclusion	22
Bibliographie :.....	23
Sitographie	27
Annexes	31

Glossaire

Alternative : Le terme alternative est utilisé au sens d'alternative aux produits phytopharmaceutiques de synthèse.

Fondatrice : Première génération de pucerons aptères issus de l'éclosion des œufs au printemps.

Fondatrigne : Femelle engendrée par parthénogénèse de la fondatrice et ayant également la capacité de se reproduire ainsi.

Parthénogénèse : Type de reproduction sans intervention d'un individu mâle et donc sans fécondation.

Liste des abréviations :

AB : Agriculture biologique

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

Anses : Agence Nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

CA : Chambre d'Agriculture

CE : Commission Européenne

CLMM : Cumulative Linked Mixed Model (Modèle Mixtes à Lien Cumulatif)

COV : Composé organique volatils

DEPHY : Démonstration, d'Expérimentation et de production de références sur les systèmes de cultures économe en PHYtosanitaire

GLMM : Generalized Linear Mixed Model (modèle linéaire généralisé mixte)

IFT : Indice fréquence traitement

MASA : Ministère de l'Agriculture ou de la souveraineté alimentaire

PdS : Plantes de services

PFI : Protection Fruitière Intégrée

Projet SIMPA : Projet : Système Innovant dans la Maîtrise des Pucerons en vergers d'Arbres fruitiers.
C'est le projet dans lequel s'inscrit ce mémoire.

Liste des figures

Figure 1: Formes aptères et ailées de <i>Dysaphis plantaginea</i>	
Figure 2: Cycle biologique de <i>Dysaphis plantaginea</i>	
Figure 3: Principaux dégâts du puceron cendré du pommier,	
Figure 4: Différents types de plantes de services ayant un effet sur les ravageurs	
Figure 5: Plan d'expérience parcelle E, avec plantes de services	
Figure 6: Plan d'expérience parcelle G	
Figure 7: Plan d'essai sur la concurrence hydrique	
Figure 8 : Probabilités d'appartenance à une classe d'abondance pour chacune des modalités	
Figure 9: Fréquence d'infestations en fonction de la date	
Figure 10: Représentations des pousses selon les facteurs explicatifs non colinéaires	
Figure 11: Diamètre horaire des troncs	
Figure 12: Amplitude journalière du diamètre des troncs en fonction du temps	
Figure 13: Croissance journalière des fruits en fonction du temps	
Figure 14: Nombre d'auxiliaires dans les bandes fleuries au cours de l'infestation de <i>D. plantaginea</i>	
Figure 15: Nombre moyen de fruits pygmées par caisse	
Figure 16: « Patterns » des diamètres des troncs pour la modalité témoin et romarin	
Figure 17: Évaluation de la pratique d'implantation des plantes de services	
Figure 18: Schéma d'un système de culture adapté à l'utilisation de plantes de services	

Liste des tableaux

Tableau 1: Traitement des données de l'essai sur l'efficacité des plantes de services.....	
Tableau 2: Facteurs à étudier dans l'analyse des conditions d'efficacité des plantes de services	
Tableau 3 : Tableau analyses des données	
Tableau 4: Résultats de l'analyse des conditions favorables à l'implantation de plantes de services	

Liste des annexes

Annexe I : Pratiques culturales et expérimentales des parcelles E et G	
Annexe II : Liste des espèces semées dans les bandes fleuries en 2020.....	
Annexe III : Représentations des pousses selon les facteurs du modèle complet.....	
Annexe IV : Contributions des variables non colinéaires aux axes de l'analyse mixte	
Annexe V : Auxiliaires, fourmis et pucerons parasités observés dans les foyers de pucerons.....	
Annexe VI : Auxiliaires observés dans les parcelles élémentaires de romarins.....	
Annexe VII : Extraits du cahier de traitement	
Annexe VIII : Sorties R	

1. Introduction

Les effets délétères des produits phytopharmaceutiques ne sont plus à prouver. La biologiste américaine Rachel Carson alertait déjà sur leurs dangers dans son livre *Printemps silencieux*, publié en 1962 : pollution de l'eau et de l'air, accumulation dans le sol, chute de la biodiversité, morts des pollinisateurs, risques importants pour la santé humaine, etc. L'enjeu de diminuer leur utilisation est toujours d'actualité, ce qui s'illustre notamment par des lois et des plans limitant leur emploi. Le plan Ecophyto 2018 visait à réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques de 50% pour 2018. Le plan Ecophyto II+ réaffirme cette ambition en accélérant le retrait des substances les plus dangereuses pour la santé et l'environnement comme les néonicotinoïdes et les produits classés CMR (Cancérigène Mutagène et Reprotoxique) (MASA 2018). L'arrêté du 20 novembre 2021 dit « arrêté abeille » vient également interdire l'usage des pesticides pendant les périodes de floraison [1]. Le plan Ecophyto et l'arrêté abeille entraînent tous deux une révision des AMM et donc des retraits de produits phytopharmaceutiques (MASA 2018; 2022) .

Pour faire face aux retraits actuels et à venir des produits phytopharmaceutiques, il est essentiel de trouver des alternatives. Les réseaux DEPHY Ferme et Expé sont des réseaux de fermes et de sites d'expérimentation dont l'objectif est d'identifier des systèmes de cultures limitant les produits phytopharmaceutiques de synthèse et prônant leurs alternatives : produits de biocontrôle, lutte biologique, lutte variétale, développement de l'agroécologie, plantes de services etc. Les plantes de service (PdS) sont définies comme des « plantes qui apportent un ou plusieurs services écosystémiques à l'agrosystème » (Dijan-Caporalino et al. 2020). Les services qu'elles fournissent sont notamment l'amélioration de la fertilité du sol, la pollinisation, la régulation du climat, approvisionnement en eau etc. (Zhang et al. 2007). Elles peuvent également avoir des effets sur la régulation des bioagresseurs. Ces effets sont classés selon le mode d'action : détecter les bioagresseurs, diminuer le potentiel infectieux ou repousser les bioagresseurs. Les plantes répulsives sont des plantes qui repoussent les bioagresseurs grâce à l'émission de molécules, les composés organiques volatils, pouvant alors limiter le recours aux produits phytopharmaceutiques.

Malgré l'existence d'alternatives, certains produits retirés restent sans solution de remplacement et mènent à des impasses techniques [2,3]. La transition agroécologique reste lente et difficile. En janvier 2024, les agriculteurs français ont manifesté entre autres contre l'excès de normes environnementales en France comparés aux voisins européens et les distorsions économiques qu'elles entraînent. Ils revendiquent des revenus et des conditions de travail décentes [4]. Ces manifestations ont entraîné une mise à l'arrêt provisoire du plan Ecophyto, poussant également le gouvernement à annoncer le nouveau plan Ecophyto : Ecophyto 2030 [5]. L'objectif est de réduire l'utilisation des produits phytopharmaceutiques de 50% d'ici 2030. La nouvelle stratégie inclue le principe : « pas d'interdiction sans solution » afin de « soutenir les performances économiques » (MASA 2024). Il devient alors primordial d'apporter des alternatives viables pour les agriculteurs. La bonne intégration des méthodes alternatives comme les PdS au sein des systèmes de production est l'enjeu principal.

Le modèle biologique choisi pour l'étude des plantes de services est *Dysaphis plantaginea* (Passerini,1860) : le puceron cendré du pommier. Le pommier est l'une des cultures les plus traitées en France, avec un IFT moyen de 29,5 en 2018 contre par exemple un IFT moyen en vigne de 12,4 en 2019 [6]. Avec le carpocapse du pommier (*Cydia pomonella*) et la tavelure (*Venturia inaequalis*), le puceron cendré est considéré comme l'un des bioagresseurs ayant le plus d'impact économique sur le pommier (Béranger et al. 2016). Pour lutter contre *Dysaphis plantaginea*, il est classiquement recommandé de traiter avec un aphicide en encadrement de la floraison du pommier, comme la lambda-cyhalothrine, le flonicamide, ou le spirotétramate (CA du Languedoc et du Roussillon 2024). Ce dernier est un insecticide spécifique des piqueurs-suceurs (Acta 2022) dont le renouvellement n'a pas été demandé (CE 2022). L'Anses a ainsi annoncé sa date de retrait pour le 30 avril 2024, et sa fin d'utilisation au 31 octobre 2025 [7]. Des solutions sont donc nécessaires et attendues.



Figure 1: Formes aptères et ailées de *Dysaphis plantaginea*, observées le 14 mai 2024 (Source personnelle)

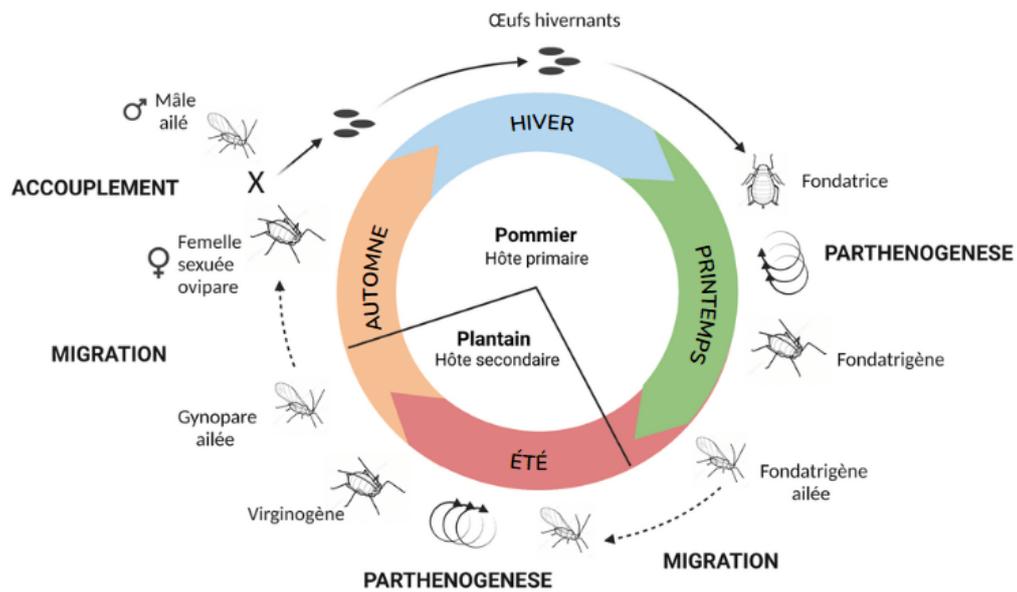


Figure 2: Cycle biologique de *Dysaphis plantaginea* décrit par (Dixon 1977) adapté de « Cell Cycle Checkpoints », par BioRender.com (2023)

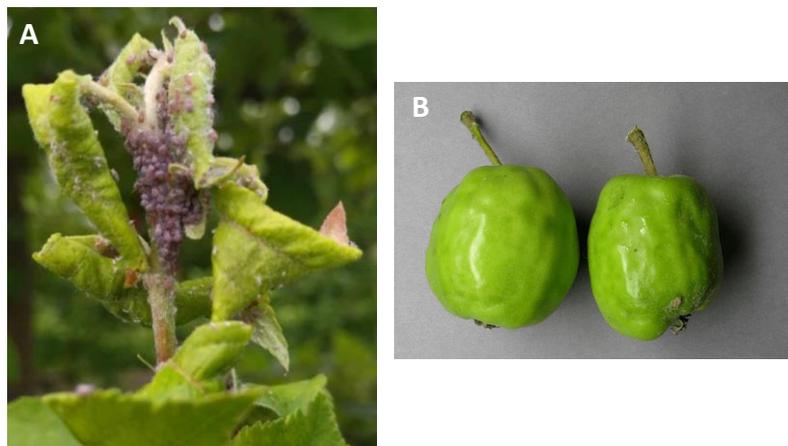


Figure 3: Principaux dégâts du puceron cendré du pommier,
 A : feuilles vrillées, observé le 14 mai 2024 (Source personnelle) ;
 B : fruits pygmées (photographie de M. Giraud, CTIFL cité dans [10])

Problématique :

Les plantes de services sont-elles une alternative pertinente pour lutter contre *Dysaphis plantaginea* ?

Questions subsidiaires :

- Les plantes de services sont-elles efficaces pour lutter contre le puceron cendré du pommier ?
- Sous quelles conditions les plantes de services sont-elles efficaces pour lutter contre le puceron cendré du pommier ?
- Est-il acceptable pour un producteur d'intégrer les plantes de services dans un système arboricole ?

2. Etat de l'art

Biologie de *Dysaphis plantaginea*

Dysaphis plantaginea (Passerini, 1860), de son nom vernaculaire puceron cendré, appartient à l'ordre des hémiptères. Il a un développement de type Hétérométabole. Il possède des pièces buccales de type piqueur-suceur et se nourrit de sève élaborée.

Le puceron cendré du pommier sous sa forme aptère est globuleux et mesure 1,5 à 3mm (Dib 2010). Les individus présentent une variabilité de couleur entre le vert olive foncé et le rose vineux (Figure 1). Il est recouvert d'une pulvérulence blanche à grisâtre [8]. Le puceron ailé mesure 1,8 à 2,4mm de longueur (Dib 2010). Il possède un abdomen avec une plaque sombre perforée à l'extrémité, des antennes longues et sombres, des cornicules longues, cylindriques et sombres, et une cauda courte [8]. Les œufs sont de couleur jaune pâle au moment de la ponte et deviennent noir brillant [9].

D. plantaginea est holocyclique [10] : c'est un cycle avec deux phases de reproduction, une première sexuée et une seconde asexuée parthénogénétique. Son cycle est diœcique, c'est-à-dire qu'il se déroule sur deux plantes hôtes différentes : *Malus domestica* l'hôte primaire et *Plantago lanceolata* son hôte secondaire privilégié [9]. Son cycle de développement est illustré en figure 2.

L'éclosion des œufs a lieu vers la mi-mars, plus précisément au bout de 140 degrés-jours au dessus de 4°C, accumulés depuis le 1 janvier (Graf et al. 2006). Les larves se développent sur les bourgeons floraux et deviennent des fondatrices. Dès lors présentes sur la face inférieure des feuilles de rosette, elles se nourrissent puis se reproduisent par parthénogénèses successives, donnant naissance à 2 à 7 générations de fondatrignes aptères (Cockfield et al. 2011). A partir de la mi-juin, les pucerons deviennent ailés et migrent vers leur hôte secondaire. A nouveau, ils se reproduisent par parthénogénèse jusqu'à la naissance de femelles appelées sexupares. Elles donneront des individus ailés mâles (sexupares andropares) et femelles (sexupares gynopares) [11]. Enfin, mi-septembre, les femelles puis les mâles retournent sur leur hôte primaire pour la reproduction sexuée (Dib 2010). La femelle ainsi fécondée dépose ses œufs près des bourgeons floraux, avant leur éclosion au printemps suivant. L'œuf est la forme diapausante du puceron et lui permet de perdurer pendant l'hiver et les conditions défavorables.

Le puceron cendré est considéré comme le puceron le plus dangereux pour le pommier dû à sa précocité dans la saison, sa grande fécondité (Béranger et al. 2016) [9]. Il engendre différents dégâts au pommier. Les principaux dégâts mentionnés sont l'enroulement des feuilles et la déformation des fruits (Figure 3). La déformation des fruits est une conséquence des piqûres effectuées par le puceron sur l'ovaire infère des fleurs ou des lésions produites durant la nouaison (Dib 2010). Il engendre une

réduction de la photosynthèse et de la teneur des feuilles en chlorophylle de 50 et 25% (Dib 2010) entraînant un jaunissement des feuilles. Une forte infestation peut entraîner une abondante production de miellat, riche en sucre et en acides aminés, et donc le développement de champignons en surface des feuilles et des fruits. Ce champignon crée un feutrage noir appelé fumagine ce qui rend les fruits impropres à la consommation et réduit également la photosynthèse [12]. Enfin, le puceron par son impact sur la remise en réserve de l'arbre, a aussi un impact sur le retour à fleurs l'année suivante et ainsi sur la production (Brown, Myers 2010; Dib 2010).

Les ennemis naturels susceptibles de réguler *D. plantaginea* sont nombreux, les principaux sont les suivants : syrphes, coccinelles, cécidomyies, cantharides, forficules, araignées ainsi que les parasitoïdes (Miñarro et al. 2005). Les Anthocoridés, les Miridés, les Carabidés, Hémérobidés et les Nabidés sont aussi cités (Guénard 2007). Les ennemis naturels du puceron cendré du pommier se manifestent qu'à des températures douces quand le cycle du puceron est déjà avancé. Seul le syrphe peut avoir une action en début de saison (Dib 2010), suivi plus tard par la coccinelle (Miñarro et al. 2005).

Les pucerons entretiennent une relation mutualiste avec les fourmis. Le mutualisme est une « interaction entre espèces se révélant être bénéfique pour les deux protagonistes » [13]. Les pucerons fournissent du miellat aux fourmis, qui leur offrent en échange protection contre leurs prédateurs. Les fourmis défendent les pucerons ou bien évacuent le miellat pour limiter l'attraction des prédateurs (Albert 2017).

Le β -farnésène est la phéromone d'alarme des pucerons. Émise par les pucerons non myrmécophiles, elle induit un comportement de fuite (Guénard 2007). Certaines plantes sont capables de produire cette molécule, et celle-ci constitue un mécanisme de défense en repoussant le puceron et attirant leurs ennemis naturels (Durieux 2008). Cette molécule a montré plusieurs fois sa capacité à repousser le puceron (Dardouri, Gautier, et al. 2019b). Un effet répulsif sur les sexupares gynopares de la génération d'automne a notamment été observé (Degrave 2020).

Méthode de lutte :

L'émergence du puceron au printemps est prédite par le modèle RIMpro. Les traitements se font à l'apparition des premières fondatrices au stade C par des traitements fractionnés d'huiles de paraffine. En AB, deux traitements à l'azadirachtine sont ensuite réalisés, un premier au stade E et un second après la floraison au stade H. En PFI, les traitements avec de l'azadirachtine sont remplacés par du flonicamide et du spirotétramate au même stade phénologique que précédemment (Alison et al. 2021 ; CA du Languedoc et du Roussillon 2024). Ce dernier étant en dérogation 120 jours, il ne sera plus utilisable.

Plantes de services

Les plantes de services sont à différencier des plantes exploitées ou cultures de rente. Elles s'intègrent à un agrosystème et n'ont pas vocation à être vendues, mais plutôt à rendre des services à l'écosystème agricole. Les plantes de services sont en particulier étudiées comme alternatives aux produits phytopharmaceutiques. Ces plantes sont souvent des plantes aromatiques. Elles émettent des molécules odorantes appelées COVs (composés organiques volatiles). Ces composés jouent un rôle dans les interactions plantes-plantes et plantes-insectes (Brilli et al. 2019). Les COVs sont issus du métabolisme spécialisé, toutes les plantes sont donc capables d'en émettre. Ils sont actifs dans différents mécanismes internes des plantes. Ils préparent les plantes aux stress biotiques et abiotiques. Les isoprénoides sont le groupe le plus abondant de COVs. Ils sont stimulés par les stress abiotiques et améliorent la résistance de la plante en éliminant directement les espèces réactives de l'oxygène ou indirectement en stabilisant les membranes (Brilli et al. 2019). Les COV sont impliqués dans les

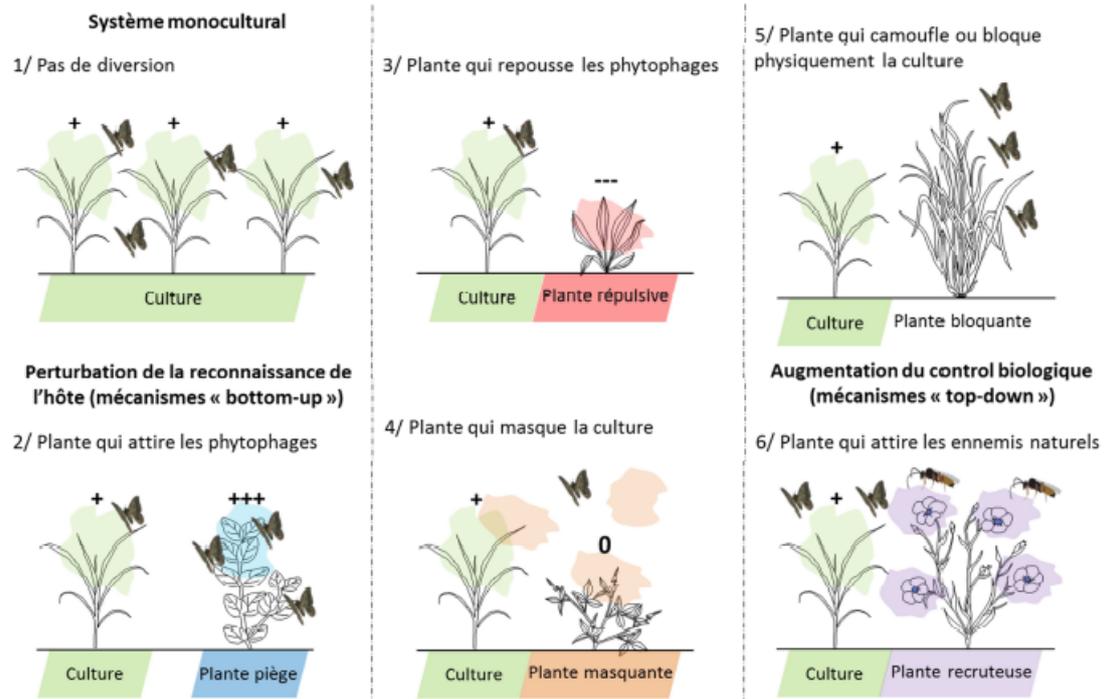


Figure 1 : Les différents types de plantes compagnes et leurs effets sur les insectes ravageurs et les ennemis naturels. Comparativement à un système monocultural (1), le nombre de ravageurs trouvant la culture va pouvoir être réduit en proposant un hôte de substitution (2), en émettant des composés répulsifs (3), en rendant la culture plus difficile à trouver (4 – 5). Le nombre d'ennemis naturels peut être augmenté avec à l'aide de plantes attractives ou leur servant de refuge et/ou de source de nourriture (6). (+ : composés attractifs, 0 : composés masquant, - : composés répulsifs).

Figure 4: Différents types de plantes de services ayant un effet sur les ravageurs (Lamy 2016)

mécanismes menant à la résistance systémique active (SAR). Il a aussi été trouvé que les plantes blessées par un herbivore émettent des molécules odorantes les HIPVs qui attirent les ennemis naturels ainsi que les parasitoïdes (Lamy 2016).

Les plantes de services régulant les ravageurs sont classées selon 2 grands modes d'action. Elles agissent soit directement sur l'installation du ravageur ou bien indirectement en attirant les ennemis naturels du ravageurs (Parker et al. 2013). Les différents types de plantes de services sont illustrés en figure 4.

Selon le premier mode d'action, on retrouve différentes sous catégories :

- Les plantes pièges : ces plantes sont plus attractives pour le ravageur ciblé que la plante initialement cultivée. Elles attirent donc les ravageurs en dehors des cultures (Parker et al. 2013).
- Les plantes barrières souvent plus grandes que la culture de rente, bloquent physiquement l'arrivée du ravageur sur l'hôte. Elles altèrent également la reconnaissance visuelle de la plante (Dijan-Caporalino et al. 2020).
- Les plantes masquantes camouflent l'odeur de la plante hôte et perturbent sa localisation (Lamy 2016).
- Les plantes répulsives émettent des molécules odorantes repoussant les ravageurs ou interférant avec leur nutrition ou leur accouplement (Parker et al. 2013).

Tous ces types de plantes de services jouent sur l'installation du ravageur sur la culture et donc sur ses ressources. Le ravageur est donc régulé par un mécanisme bottom-up (Parker et al. 2013; Han 2017). Il est possible d'associer ces plantes pour élaborer une stratégie de lutte plus complexe. Un célèbre exemple d'utilisation de plantes de services est de celui de la stratégie push-pull au Kenya contre un lépidoptère *Chilo partellus* (Swinhoe, 1885). Cette stratégie, qui associe une plante répulsive (le desmodium) en interculture avec le maïs et une plante piège (le pennisetum) qui attire le papillon en dehors du champ, a montré une réelle efficacité (Pickett et al. 2014).

Le romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) est une plante de services qui possède des propriétés répulsives en conditions de laboratoire (Dieudonné et al. 2022). Voltz spindler est la variété de romarin testée comme la plus repoussante pour le puceron (Dardouri, Gomez, et al. 2019a). La variété Green ginger a aussi montré un effet répulsif (Courteille et al. 2022). Les romarins montrent que leur caractère de répulsion varie selon leurs chémotypes. Une même espèce végétale peut avoir des variations dans son profil de COV dues à des différences génétiques, des facteurs biotiques et abiotiques, l'état nutritionnel de la plante ou bien le stade phénologique (Dardouri, Gautier, et al. 2019b). De plus, le romarin a une efficacité dépendant de son rayon d'action inférieur à 2,5m (Dijan-Caporalino et al. 2020). Les plantes répulsives émettent une multitude de COVs et ce sont leurs mélanges émis qui ont une efficacité. L'une des molécules isolée du bouquet attractif peut être répulsive (Dieudonné et al. 2022). L'équilibre et la concentration de chaque composé jouent un rôle dans le caractère attractif et répulsif d'un bouquet odorant. Dieudonné et al. 2022 ont testé un mélange de 4 variétés de romarin, dont seulement deux variétés sont répulsives, qui était plus efficace que les variétés de romarins répulsives seules. Bien que le romarin ait des propriétés répulsives, c'est également une plante à fleurs, il est donc attractif pour des pollinisateurs, notamment le syrpe qui prédate le puceron (Parker et al. 2013).

La tagète ou œillet d'inde (*Tagetes patula* L.) s'est montré répulsive pour *Aphis craccivora* Koch, 1854 (Morallo-Rejesus, Decena 1982). Il a été déterminé que les COV de plants de *Tagetes patula* en fleurs ou en stade végétatif n'étaient pas les mêmes. Par ailleurs, *Tagetes patula* cv. *Nana* a montré un effet répulsif (indirect) sur *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) en présence de sa plante hôte ici le poivron, quand elle était au stade végétatif. Tandis qu'au stade de fleurs, elle entraînerait une baisse de la fertilité de ce même ravageur (Dardouri, Gautier, et al. 2019b).

La seconde catégorie rassemble les plantes de services qui favorisent la présence des ennemis naturels des ravageurs (Dijan-Caporalino et al. 2020). Ces plantes sont souvent présentes en mélange dans des infrastructures agroécologique comme les bandes fleuries. Elles peuvent favoriser la présence

d'auxiliaires comme les coccinelles et les chrysopes et donc la régulation du puceron cendré (Wyss 1995; Dib 2010; Albert 2017). Le mécanisme écologique sous-jacent est une régulation bottom up. Les plantes à actions indirectes sont classées selon leurs stratégies :

- Les plantes attractives attirent les ennemis naturels grâce à des signaux olfactifs ou visuels colorés (Parker et al. 2013).
- Les plantes habitats apportent « un site de ponte et/ou un habitat approprié permettant aux ennemis naturels de se reproduire et/ou de se réfugier » (Dijan-Caporalino et al. 2020).
- Les plantes banques et nourricières proposent des ressources nutritives alternatives respectivement animales et végétales. Par exemple, les pucerons présents dans les bandes fleuries peuvent être une source de nourriture alternative quand d'autres ravageurs sont temporairement absents (Wyss 1995).
- Les plantes relais ou réservoir sont des plantes qui rassemblent les différentes caractéristiques citées précédemment.

Les ennemis naturels sont plus importants en polyculture due à la diversité d'habitat donnant une variété de proies et d'hôtes disponibles à différents moments. De manière générale, une plus grande diversité d'habitat peut mener à une plus large diversité d'espèces prédatrices (Wyss 1995).

Implantation des plantes de services

La principale contrainte à l'implantation d'une plante de services est économique. L'action 1 du projet SIMPA a étudié les facteurs réhibitoires pour les agriculteurs à la mise en place des plantes de services, à travers un sondage réalisé en février 2022, auprès de 102 producteurs de pommes. Les contraintes les plus réhibitoires selon les agricultures, seraient une baisse de production trop importante (cité par 32%). Toujours d'après ce sondage, les dégâts de pucerons entraînent principalement une détérioration de la qualité de la récolte et une perturbation du retour à fleurs. Ils étaient majoritairement prêts à installer des plantes de services si l'efficacité est démontrée.

Cependant, les plantes de services (non productives) peuvent dans certains cas occuper la surface adressée à la culture de rente, ce qui génère des pertes de rendement (Lamy 2016).

D'après les chiffres de la Chambres d'agriculture PACA, la main d'œuvre représente 97,7% (et 69,5% hors récolte) de charge par tonne de fruits, d'un verger de pomme variété Royal Gala®, conduit en AB (Roblin 2012). La main d'œuvre est la charge la plus importante pour une exploitation fruitière. Il est essentiel que celle-ci n'augmente pas. Le sondage révèle que 63% des producteurs observent qu'une infestation incontrôlée de pucerons génère un surcoût d'éclaircissage. Par ailleurs, l'implantation de plantes de services peut rajouter des travaux : travail du sol, plantation ou semis, taille, désherbage. Le matériel utilisé sur l'exploitation pour la culture de rente n'est pas toujours adapté à la gestion des plantes de services (Parker et al. 2013), entraînant alors des coûts d'achats supplémentaires pour adapter son matériel ou entretenir les nouvelles venues.

Enfin, la présence de plantes de services proches des cultures peut provoquer une compétition pour les ressources azotées et hydriques notamment, et donc une baisse de rendement (Parker et al. 2013; Dijan-Caporalino et al. 2020). L'enquête ne révèle pas de contraintes liées au stress hydrique comme une problématique importante. Elle a en effet été réalisée avant l'été caniculaire de 2022. Une autre temporalité de l'enquête aurait pu influencer différemment les réponses.

La région du Sud-Est étant régulièrement soumise à des sécheresses et des fortes chaleurs, la compétition hydrique entre les PdS et les pommiers pourrait poser problème.

Le stress hydrique peut avoir un impact négatif sur le calibre des fruits à la récolte (Chenafi et al. 2013). La disponibilité en eau dans le sol est grandement corrélée à la taille des fruits et rendement final (Naor et al. 1995). La taille des fruits est également dépendante de la charge de fruits de l'arbre (Naor et al. 1995). La mesure du potentiel hydrique de la tige est un bon indicateur pour évaluer le statut hydrique d'une plante. Par ailleurs, ce potentiel est corrélé à la différence entre le diamètre maximum du tronc tôt le matin et le diamètre minimale dans l'après-midi (Ortuño et al. 2009).

3. Hypothèses

Considérant les éléments bibliographiques évoqués précédemment, des hypothèses peuvent être formulées :

- Essai d'efficacité des plantes de services
 - Les plantes de services altèrent la reproduction des pucerons sur le pommier. Différents mécanismes sont possibles : les COVs repoussent le puceron cendré diminuant alors la fréquence d'attaques ; ou bien ils altèrent leur fécondité ou leur appétence pour le pommier diminuant l'intensité de l'attaque.
 - Il y a un effet attractif des plantes services sur les auxiliaires. Les populations de pucerons et d'ennemis naturels sont corrélées.
 - La variété de pommier a une influence sur les plantes de services ou les variétés ont une sensibilité différente.
- Analyse des conditions favorables d'efficacité des plantes de services : à cette étape du raisonnement, il n'y a pas d'hypothèses concernant ces conditions.
- Intégration des plantes de services dans un système arboricole
 - Les plantes de services causent une concurrence hydrique avec les pommiers.
 - Les plantes de services permettent de meilleures performances environnementales
 - Les plantes de services peuvent provoquer des surcharges de travail.

4. Matériels et méthodes

Essai d'efficacité des PdS

Dispositif expérimental

L'essai se déroule sur le site de SudExpé à Marsillargues (34). Les parcelles d'essai sont les parcelles E et G, elles constituent respectivement la parcelle d'étude avec les plantes de services (Figure 5) et la référence (Figure 6). Elles sont conduites selon les pratiques régionales en agriculture biologique (Annexe 1). On effectue cependant une impasse traitement sur l'azadirachtine en pré et post-floral, sur la parcelle E. Cette dernière est bordée de bandes fleuries.

Le facteur PdS est testé sur les variétés Opal WEB C.O.V (Opal) et Inrored Story® (Story). C'est un dispositif en bloc avec un gradient d'hétérogénéité selon l'axe Nord/Sud.

Sur la variété Opal, le facteur PdS comporte 4 modalités, trois sur la parcelle E : - tagètes sur le rang, - romarins en inter-rangs, - absence de plante de service avec traitement allégé (témoin négatif) ; et une sur la parcelle G (Figure X) : absence de plantes de services avec traitement de référence (témoin positif). Cette autre parcelle séparée de la première, est aussi conduite selon les pratiques régionales en AB mais avec un seul allègement (Annexe 1).

Sur la variété Story, la modalité « tagète sur le rang » a été remplacé par une modalité traitement avec un attractif auxiliaires : le β -farnésène (spécialité Benesemio de la société M2I).

Les tagètes de la variété « Ground control » sont plantées le 16 avril (2024) avec une densité de 10 plants/m². Les placettes de romarins sont composées de 3 variétés « Green ginger », « Voltz spindler » et « Majorca pink ». Elles ont été plantées en 2021. Le mélange fleuri, composé de 14 espèces, a été semé à l'automne 2020 avec une densité de 2,5g/m², sa composition en Annexe 2.

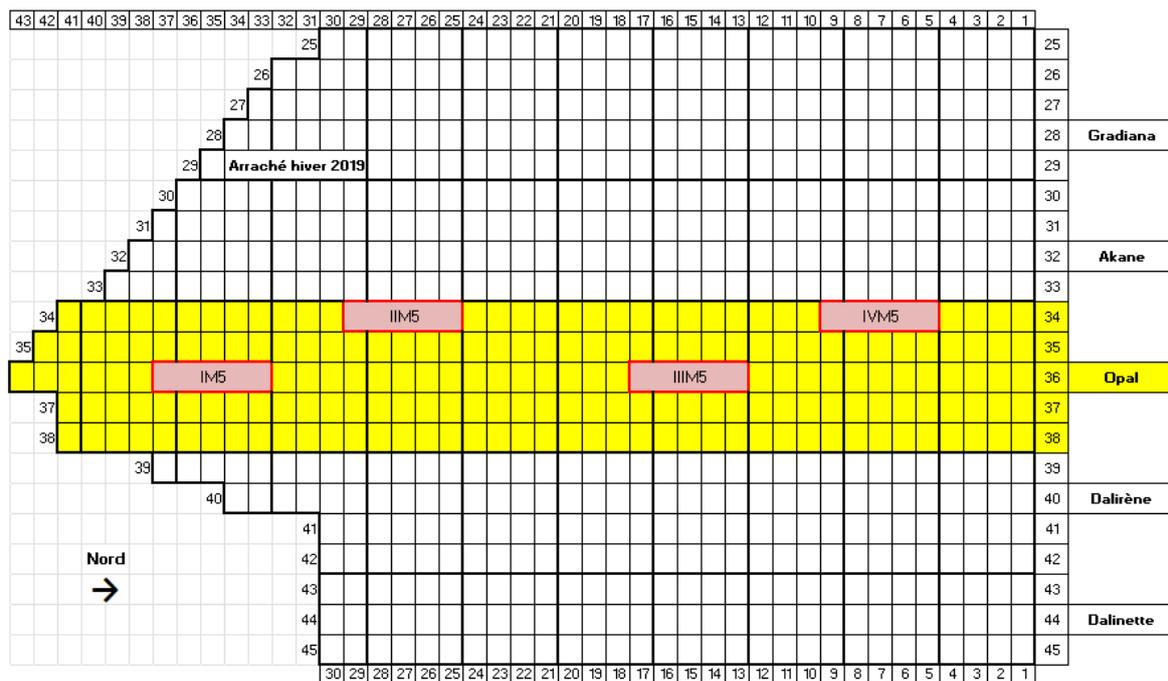


Figure 6: Plan d'expérience parcelle G,
 T5 : Traitement AB de référence, les chiffres de I à IV sont les numéros de bloc

Tableau 1: Traitement des données de l'essai sur l'efficacité des plantes de services

Facteurs	Variables explicatives à effet fixe	Variables à effet aléatoire	Test statistique	Correction du seuil de rejet α des comparaisons post-hoc
Classe d'abondance	Moda	Bloc	CLMM	FDR
% Foyer actif	Moda, Date	Bloc	GLMM (glmtmb)	FDR
Auxiliaires	Moda, Date	Bloc	GLMM (glmer)	FDR

Variables expérimentales

- Suivi de l'incidence du puceron

La mesure de l'impact du puceron commence juste avant la floraison, jusqu'à la chute de la population de pucerons.

1. Evaluation de la fréquence de foyers actifs

Une première évaluation de la pression des pucerons se fait par comptage des pousses infectées parmi 100 pousses choisies aléatoirement sur les 5 arbres de la placette élémentaire (50 pousses sur chaque face : Est et Ouest).

2. Mesure de l'intensité de l'infestation sur foyers installés

Le comptage des pucerons est effectué par observation de 12 pousses par placette élémentaire à hauteur d'homme. Ce sont les mêmes pousses qui sont suivies au cours du temps. On cherche les pousses infestées par le puceron, jusqu'à en trouver 12. Si l'ensemble des 12 pousses n'a pas été trouvé, les pousses « manquantes » sont donc considérées comme exemptes de puceron. L'évaluation du nombre de pucerons se fait par des classes d'abondance : A (aucun puceron), B (1-5 pucerons), C (6-25 pucerons), D (26-50 pucerons), E (51-125 pucerons), F (>125 pucerons) (Simon, Capowiez 2012).

En complément, on note aussi la présence de fourmis, de fumagine. Les observations ont lieu une fois par semaine.

- Relevés d'auxiliaires

En parallèle du suivi des pucerons dans les pommiers, on pourra observer les auxiliaires présents dans les foyers. Ils sont donc comptés, en même temps que les observations de foyers de pucerons. A défaut de trouver les parasitoïdes, les pucerons parasités et les momies de pucerons sont comptés.

Les auxiliaires sont également observés dans les plants de romarins et de tagètes, pendant un temps chronométré de 2 min.

Les attractifs présents dans les rangs de Story pourront encore davantage favoriser la présence des auxiliaires.

Analyse statistique

Les relevés de pucerons et d'auxiliaires sont analysés à l'aide du logiciel R (version 4.4.1).

Les tests statistiques utilisés sont indiqués Tableau 1. Le facteur Moda a pour niveaux : *Témoin Opal*, *Témoin Story*, *Romarin Opal*, *Romarin Story*, *Tagète Opal*, *Référence Opal* et *Attractif Story*.

Nous avons choisi de traiter les classes d'abondance date par date.

Tableau 2: Facteurs à étudier dans l'analyse des conditions d'efficacité des plantes de services

Critères concernant les plantes de service :		
Facteurs	Type de variables	Modalités
Variété	Qualitative nominale	<i>Inared, Opal, Regalyou, Story</i>
Date de plantation	Qualitative nominale	<i>2021</i>
Densité de plantation (plants/m ²)	Quantitative	<i>10</i>
Positionnement de la plante	Qualitative nominale	<i>rang, inter rang, bordures</i>
Vigueur	Qualitative ordinale	<i>très bonne, bon, mauvaise, très mauvaise</i>
Fertilisation des PdS	Qualitative nominale	<i>oui, partielle, non</i>
Irrigation des PdS	Qualitative nominale	<i>oui, partielle, non</i>
Critères concernant les parcelles support d'essai		
Facteurs	Type de variable	Modalités
Niveau de pression annuel (fréquence)	Qualitative ordinale	<i>nul, faible, fort, très fort</i>
Site d'essai	Qualitative	<i>CEFEL, SudExpé, Verger de Poisy</i>
Variété (Qubbaj et al. 2005)	Qualitative nominale	<i>mix, pyramidal</i>
Porte-greffe	Qualitative ordinale	<i>M25, M7, G202, M9, PI80</i>
Année de plantation (Brown, Myers 2010)	Qualitative nominale	<i>2004, 2011</i>
Densité de plantation (Brown, Myers 2010; Jaloux 2011)	Quantitative	<i>/</i>
Irrigation des pommiers	Qualitative nominale	<i>sur frondaison, micro-aspersion, goutte à goutte suspendu</i>
Fertilisation des pommiers (Brown, Myers 2010; Dib 2010)	Qualitative nominale	<i>oui, non</i>
Présence filet Alt'Carpo	Qualitative nominale	<i>oui, non</i>
Date déploiement du filet Alt'Carpo	Qualitative nominale	<i>/</i>
Date d'hivernage du filet Alt'Carpo	Qualitative nominale	<i>/</i>
Nombre de fourmis	Quantitative	<i>/</i>
Nombre d'auxiliaires	Quantitative	<i>/</i>
Météorologie (T°C, Hygrométrie relative, pluie) (Dib 2010)	Quantitatives	<i>/</i>
Conduite du verger	Qualitative	<i>AB, PFI</i>

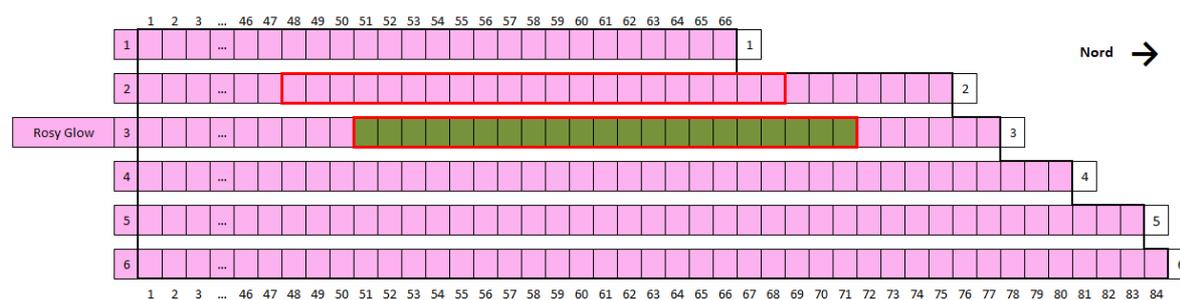


Figure 7: Plan d'essai sur la concurrence hydrique.

En vert les romarins plantés sur le rang, les zones encadrées en rouges sont celles observées.

Analyse des conditions favorables l'efficacité des PdS

On cherche à déterminer les facteurs qui influencent l'efficacité des plantes de services. Le romarin a été testé pendant 2 ans et par 3 des partenaires du projet SIMPA : le CEFEL, le Verger de Poisy et SudExpé. Il sera donc choisi pour cette étude. Les données utilisées pour cette analyse seront exclusivement celles issues du projet SIMPA. L'objectif de cette analyse plus globale est de deux ordres : augmenter la fiabilité de l'analyse et déterminer l'influence de facteurs non étudiés auparavant.

D'après les conseillers et expérimentateurs interrogés (effectif de 26) dans l'action 1 du projet SIMPA, la vigueur, la variété et le climat sont les 3 facteurs favorisant le plus les pucerons dans les vergers. Les infrastructures agroécologiques et les auxiliaires sont quant à eux les facteurs les plus influents pour limiter les pucerons dans les vergers. Ces éléments sont donc interrogés dans l'analyse. Une proposition de liste des facteurs étudiés pour l'analyse globale a été soumise, puis amendée et validée par les expérimentateurs partenaires du projet SIMPA (Tableau 2).

Chacune des parties de l'analyse sera réalisée via le logiciel R studio.

Une première étude consiste à la description approfondie des données par une analyse mixte. Cette étape comprend deux objectifs : éliminer les facteurs qui pourraient être colinéaires et faire des hypothèses. On procédera alors dans cet ordre. Limiter le nombre de facteurs facilite l'interprétation des résultats et la phase d'hypothèse.

L'objectif de cette analyse globale, en plus d'augmenter la fiabilité des résultats, est d'ajouter de nouveaux facteurs à étudier. Le risque en introduisant beaucoup de facteurs c'est que certains soient colinéaires. L'ajout de facteurs colinéaires pourraient rendre des facteurs significatifs sans effet (Zuur et al. 2010)

A la fin de l'analyse mixte, on détermine un modèle 0 ou modèle complet, comprenant les facteurs sélectionnés et les interactions de facteurs qui nous semblent les plus pertinentes. On sélectionne alors le modèle le plus pertinent. L'objectif est de trouver un compromis entre un modèle bien ajusté aux données et une bonne estimation des paramètres du modèle (Hervé 2021). Pour cela, on utilise la fonction *dredge* et le critère de sélection AIC.

S'il n'existe pas qu'un seul meilleur modèle, on combinera les meilleurs modèles avec la fonction *model averaging* pour en former un unique.

Enfin le modèle choisi, il peut être exécuté et les résultats analysés.

Freins à l'implantation de PdS

Un postulat initial est posé dans cet essai : un agriculteur voulant installer des plantes de service le ferait sur un jeune verger.

Dispositif expérimental :

Le suivi de la concurrence hydrique se réalise sur une nouvelle parcelle de Rosy Glow, plantée en 2022 selon une direction Nord/Sud et un espacement d'1m sur le rang. La parcelle est conduite en PFI (protection fruitière intégrée). Les romarins ont été plantés sur le rang, 1 an après l'installation de la culture (Figure 7). La parcelle est irriguée par goutte à goutte suspendu. On étudie le comportement de deux rangs de pommiers de 20 arbres chacun. Chaque rang correspond à une modalité. Des romarins ont été plantés en mai 2023 avec une densité de 2 plants/m² sur le premier rang. Le second rang est la modalité témoin, il n'y a donc pas de romarin.

[Tableau 3](#) : Tableau analyses des données

Variable réponse	Variabes explicatives à effet fixe	Variabes à effet aléatoire	Test statistique	Correction du seuil de rejet α des comparaisons post-hoc
Calibres	Traitement, Date	Arbre, Fruits	Anova à 2 facteurs (lmer)	FDR
Croissance des fruits	Traitement, Date	Arbre, Fruits	Anova à 2 facteurs (lmer)	FDR
Nombre de fruits pygmées	Moda	Bloc	glimm	FDR

Des mesures complémentaires sont également réalisées sur les parcelles E et G afin d'évaluer les performances environnementales, et la faisabilité technique de l'implantation des plantes de services. Pour rappel, la parcelle G est conduite selon les pratiques références régionales en AB, et la parcelle E est la parcelle avec les PdS. Dans cette comparaison seuls les rangs de la variété Opal sont pris en compte.

Variables expérimentales

La concurrence hydrique est mesurée de deux façons différentes :

- On mesure la réponse du pommier à un stress hydrique avec un dendromètre. On choisit un arbre sur chacun des deux rangs, afin les arbres soient équivalents en taille, en diamètre de tronc, en charge et en diamètre de tronc. On suit les micro-variations de croissance du tronc des deux arbres à partir de la chute physiologique (basculement des fruits) vers la début-juin.
- On étudie l'évolution du calibre des fruits au cours du cycle de production. On choisit 2 fruits par arbre, 1 sur la face Est et 1 sur la face Ouest, sur chaque arbre. Les deux rangs sont mis dans les mêmes conditions : climat, exposition, fertilisation, irrigation, taille etc. La différence entre ces deux rangs est la présence/absence de romarins sur le rang.

Performances environnementales :

- Mesure de l'IFT lié à la stratégie puceron
- Un suivi bimensuel de la présence et de la diversité d'auxiliaires est réalisé sur chacun des 4 quadrats des deux bandes fleuries, pendant un temps chronométré de 2 min. Afin de mieux comprendre, la richesse spécifique des auxiliaires, nous procédons aussi à une caractérisation de la flore sur ces mêmes quadrats : mesure du taux de recouvrement de la flore sauvage spontanée et semée. Les relevés sur romarin et tagète décrits précédemment rentrent aussi en compte dans l'évaluation des performances environnementales.

Faisabilité technique :

- L'implantation des plantes de services induits des travaux supplémentaires pour l'agriculteurs : plantation ou semis, taille, désherbage. On compte alors le nombre d'opérations effectuées dans chaque parcelle.
- Les fruits pygmées doivent être éclaircis mais ne tombent pas avec l'application de produits chimiques éclaircissants. Ils peuvent donc provoquer une charge de travail supplémentaire. Lors de l'éclaircissage de la parcelle, les fruits sont récupérés et les fruits pygmées comptés permettant d'estimer la charge de travail supplémentaire.

Analyses statistiques

Les calibres de fruits et le nombre de fruits pygmées seront traités avec le logiciel R (version 4.4.1). Les tests statistiques utilisés sont présentés Tableau 3.

Les données d'auxiliaires, des bandes fleuries et les données dendrométriques ne seront pas traitées avec des statistiques inférentielles. Ces dernières seront cependant analysées à l'aide du package R : *dendRoAnalyst*. La fonction *daily.data* permet d'obtenir des valeurs journalières de minimum, maximum de diamètre de tronc, par exemple. La fonction *phase.sc* sert à déterminer les phases de diminution (1), d'expansion (2) et de croissance du tronc (3) (Aryal et al. 2020). La phase de diminution comme son nom l'indique est la phase où le diamètre du tronc se réduit. La phase d'expansion est une phase où le diamètre du tronc augmente. La phase de croissance correspond à une augmentation au-delà du diamètre maximum du jour précédent. Dans un contexte de confort hydrique, ces trois phases s'enchaînent dans cet ordre de manière cyclique chaque jour (Aryal et al. 2020).

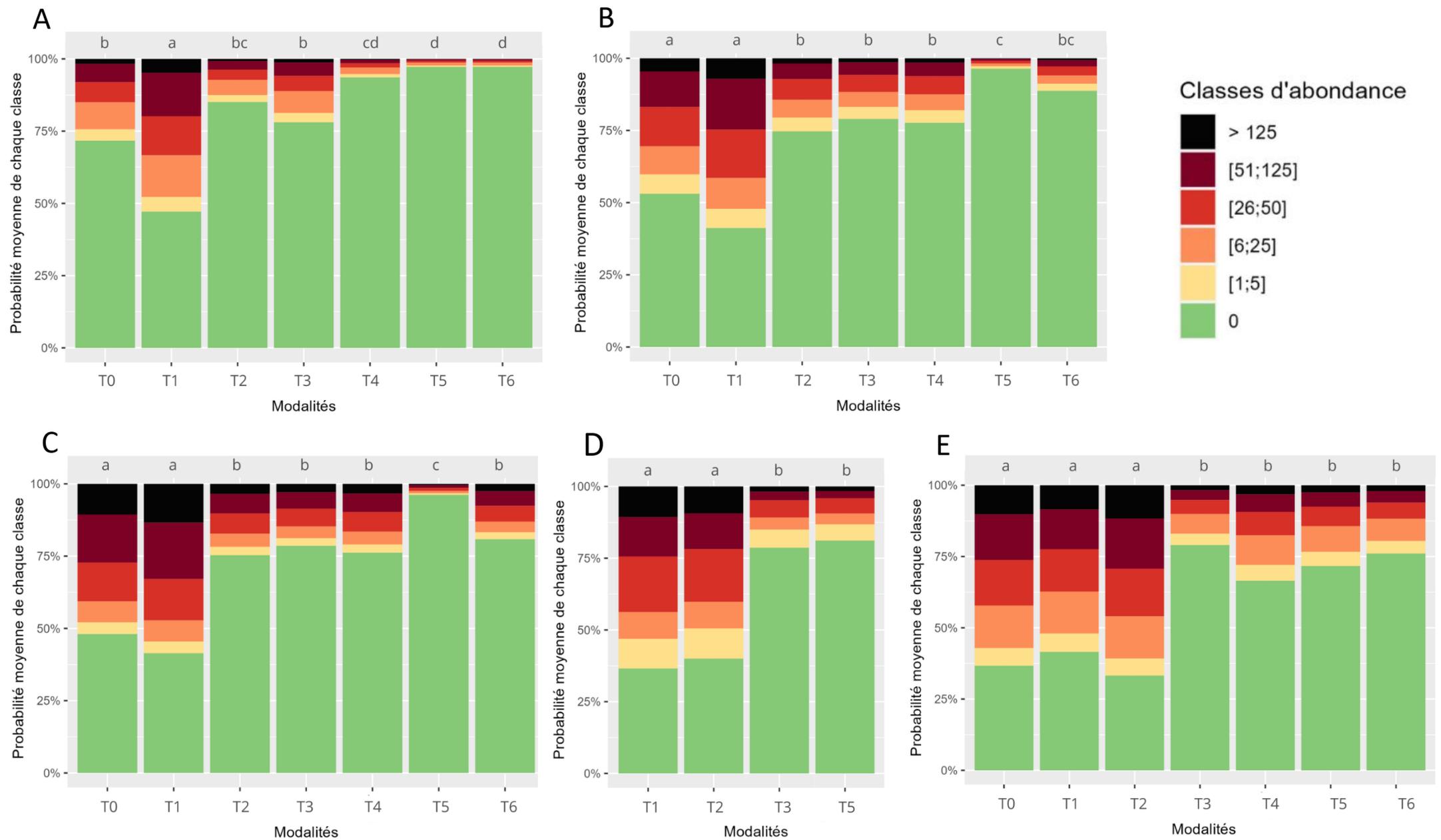


Figure 8 : Probabilités d'appartenance à une classe d'abondance pour chacune des modalités

T0 : Témoin Story, T1 : Témoin Opal, T2 : Romarin Opal, T3 : Tagète Opal, T4 : Romarin Story, T5 : Référence Opal, T6 : Attractif Story.

A : 24/04, B : 02/05, C : 10/05, D : 13/05, E : 17/05. Deux modalités avec des lettres minuscules (a, b, c et d) différentes sont significativement différentes au seuil de confiance de 95%.

5. Résultats

Essai d'efficacité des PdS

Intensité de l'infestation :

Le modèle CLMM n'a pu être ajusté que sur les 5 dates suivantes : 24/04, 02/05, 10/05, 13/05 et 17/05. Trois autres notations ont été effectuées le 04/04, le 10/04 et le 18/04. La notation du 13/05 n'a été réalisée que sur les pommiers de la variété Opal.

Pour chacune des dates analysées, le facteur Moda est significativement différent, avec respectivement pour p-value $8,279.10^{-12}$, $3,863.10^{-11}$, $1,365.10^{-10}$, $9,218.10^{-10}$ et $3,004.10^{-9}$.

A la première date de notation, seul le *Témoin Opal* est infesté. Les pousses des autres modalités ont une probabilité inférieure à 30% d'être infestées par un puceron (ne pas appartenir à la classe A).

Le 2 et 10 mai, les traitements *Témoins sur Opal* et *Story* appartiennent au même groupe statistique. Ils sont par ailleurs significativement différents de tous les autres traitements : plantes de services, référence et attractif. Il semble qu'il y ait une légère intensification de l'infestation entre ces deux dates. Il y a une probabilité de 46,9% que les pousses soient touchées par au moins un puceron pour le *Témoin Story* et de 58,6% pour le *Témoin Opal* le 02/05, contre respectivement 52,0% et 58,8% le 10/05. La probabilité d'être en classe F pour *Témoin Story* et *Opal* est respectivement de 4,5 et 7,1% le 02/05 et de 16,6 et 19,4% le 10/05 (Figure 8).

Nous pouvons noter que la modalité *Romarin Story* est toujours significativement différente du *Témoin Story*. Quelle que soit la date d'étude, l'infestation est moins forte en présence de romarin. Même à la fin de l'infestation la probabilité d'appartenir à la classe A pour le *Romarin Story* est de 79,0% contre seulement 36,7% pour le *Témoin Story*.

Le profil d'infestations des pousses de la modalité *Romarin Opal* est en revanche un peu différent. Sur les 3 premières dates, le romarin semble avoir été efficace en comparaison avec le *Témoin Opal*. Cependant, à la notation du 13/05 on remarque que la modalité *Romarin Opal* décroche complètement et devient autant infecté que son témoin. La probabilité qu'une pousse soit en classe A est alors de 35,6% pour le *Témoin Opal* et 39,7% pour le *Romarin Opal*. Cette augmentation se traduit également lors de la dernière notation.

La modalité de référence est la stratégie la plus efficace contre le puceron. Elle est toujours significativement différente du *Témoin Opal*, et reste la plus performante sur les 3 premières notations. Elle devient ensuite équivalente à la modalité *Tagète Opal* ou *Attractif Story*. Ce dernier s'est montré autant efficace que la modalité de référence lors de 3 notations sur 4.

Fréquence d'infestation :

Le facteur Moda n'est pas significatif. Il n'y a donc pas d'effet des plantes de services sur la fréquence de pousses touchées. A l'inverse du facteur Moda, la date est significative (Figure 9). Seule la date du 21/05 présente un niveau d'infestation plus élevé avec une fréquence de 18%.

Attraction des auxiliaires :

Trop peu d'auxiliaires et de pucerons parasités ont été observés pour déterminer si la date ou la modalité a eu une influence sur leur nombre. Le modèle n'a pas pu s'adapter aux données.

Il semble cependant que le nombre d'auxiliaires et de fourmis soit corrélé à l'augmentation du niveau d'infestation (Annexe V).

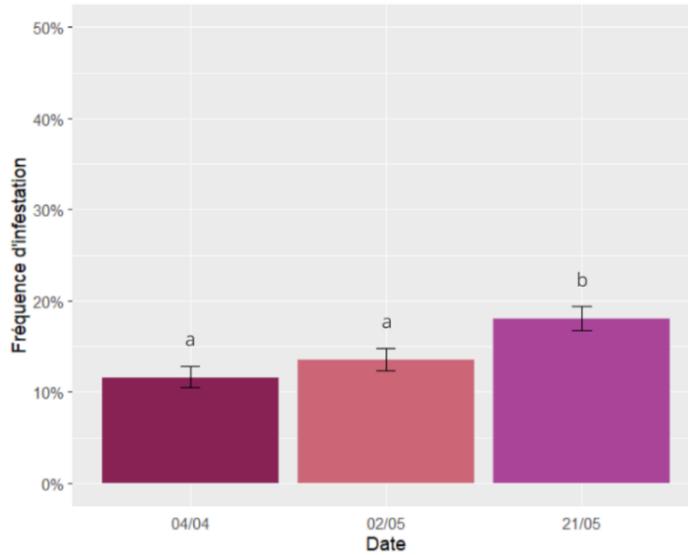


Figure 9: Fréquence d'infestations en fonction de la date
 Deux modalités avec des lettres minuscules (a, b, c et d) différentes sont significativement différentes au seuil de confiance de 95%.

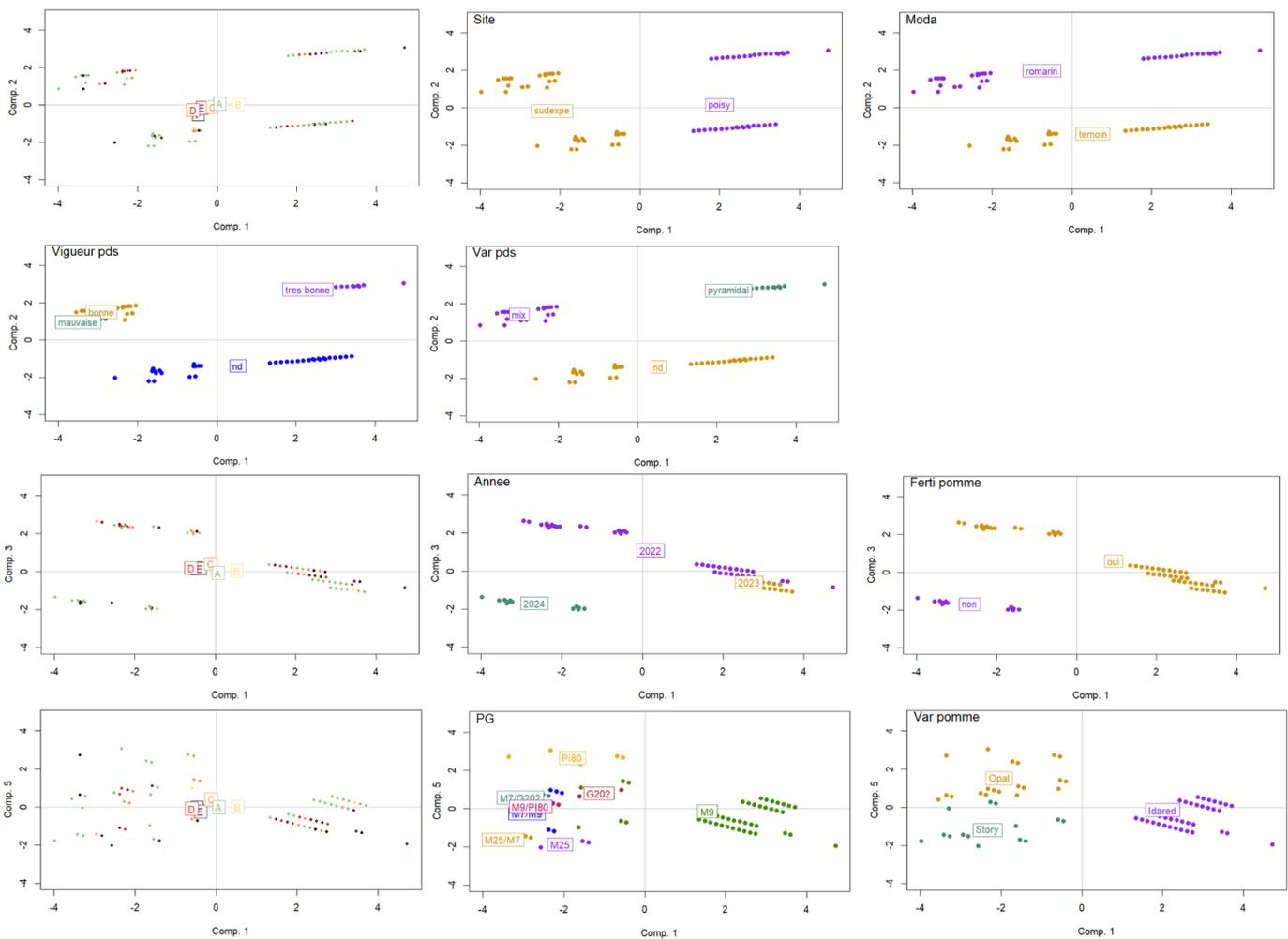


Figure 10: Représentations des pousses selon les facteurs explicatifs non colinéaires
 Site : site d'expérimentation, Moda : modalité (témoin ou romarin), Vigueur pds : vigueur des plantes de services, Var pds : variété plantes de services, Année, : année d'étude des pousses, Ferti pomme : fertilisation des pommiers, PG : porte-greffe, Var pomme : Variété des pommiers
 Les variables sont représentées selon l'axe principal n°1 et l'axe secondaire auxquelles elles contribuent le plus.

Analyse des conditions favorables à l'efficacité des plantes de services

Les axes 1 et 2 de l'analyse mixte (AM) représentent respectivement 37,75, 22,94% de la variabilité des données.

Certains facteurs comme l'irrigation des pommiers, la densité ou l'année de plantation des plantes de services se sont avérés être non pertinent puisque toutes les stations avaient les mêmes modalités (irrigation en micro-aspersion, plantes de services plantées avec une densité de 10plants/m² en 2021). Il faut donc les retirer.

On remarque que le site, la conduite et l'année de plantation des pommiers sont colinéaires. Par exemple, chaque individu appartenant à la modalité Poisy, appartiendra à la modalité PFI et à l'année de plantation de 2004. On retire alors deux des trois variables, pour l'analyse. On garde le facteur Site. Il faut considérer que ce facteur comme rassemblant les informations des deux autres. S'il y a un effet du facteur Site, cela pourrait être un effet de la conduite ou bien de l'année de plantation, de manière indifférenciée. Les coefficients de corrélation étaient de 0,99. La densité de plantation de pommiers et le site sont aussi corrélé à 0,99.

On observe également une colinéarité entre la variété de la plante de services, sa position, sa fertilisation et son irrigation. On garde également un seul facteur, le facteur plantes de services. Les coefficients de corrélation entre les trois facteurs retirés et le facteur plantes de services sont tous de 1.

Les axes 1, 2 et 3 de l'AM représentent respectivement 31,55, 18,71 et 12,58% de la variabilité des données. Pour représenter les variables, nous utilisons les axes pour lesquels elles contribuent le plus (Figure 10). Au vu des résultats de cette analyse, il est difficile de tirer des hypothèses. On remarque, cependant, que lors de l'année 2024 les pommiers n'ont pas été fertilisés et que les pousses en classe A sont omniprésentes. On peut donc faire l'hypothèse que l'absence de fertilisation à contribuer à diminuer l'intensité de l'infestation sur les pousses.

La fonction *dredge* a testé 2048 modèles différents et les a classés du meilleur au moins bon selon l'indicateur AIC. La fonction indique le poids de chaque modèle, c'est-à-dire la probabilité que ce modèle soit le meilleur. Seulement 24 modèles ont une probabilité supérieure à 0,3% d'être le meilleur modèle. Les 12 meilleurs modèles analysés ont une valeur d'AIC de 9609,9. Chacun de ces 12 modèles ont 8% de chance d'être le meilleur modèle. La colonne delta indique l'écart d'AIC entre un modèle donné et le meilleur modèle. Pour ces douze modèles l'écart est égale 0. Il n'existe donc pas un unique meilleur modèle (Annexe VIII).

Les facteurs Auxiliaires, Modalités, Porte-greffe, Pression, Variété des pommes, ainsi que les deux interactions apparaissent dans tous les meilleurs modèles (Tableau 5). Les auxiliaires, le porte greffe, la pression, la variété des pommiers et l'interaction entre la modalité et la pression sont toujours significatives.

La vigueur des plantes de services est prise en compte dans les deux-tiers des modèles. Ce facteur est significatif dans seulement 4 des 8 modèles.

La fertilisation des pommiers, le site et la variété des plantes de services apparaissent uniquement dans la moitié des 12 modèles. La variété des plantes de services a un effet significatif dans 50% des cas.

Tableau 4: Résultats de l'analyse des conditions favorables à l'implantation de plantes de services

Facteur ou interaction	Nombre de fois où le facteur ou l'interaction apparaît parmi les 12 meilleurs modèles	Nombre de fois où le facteur ou l'interaction est significative
Auxiliaires	12	12
Fertilisation des pommiers	6	0
Modalités	12	0
Porte-greffe	12	12
Pression	12	12
Site	6	0
Variété des pommes	12	12
Variété des plantes de services	6	4
Vigueur des plantes de services	8	4
Modalité : Pression	12	12
Porte-greffe : variété des pommes	12	0

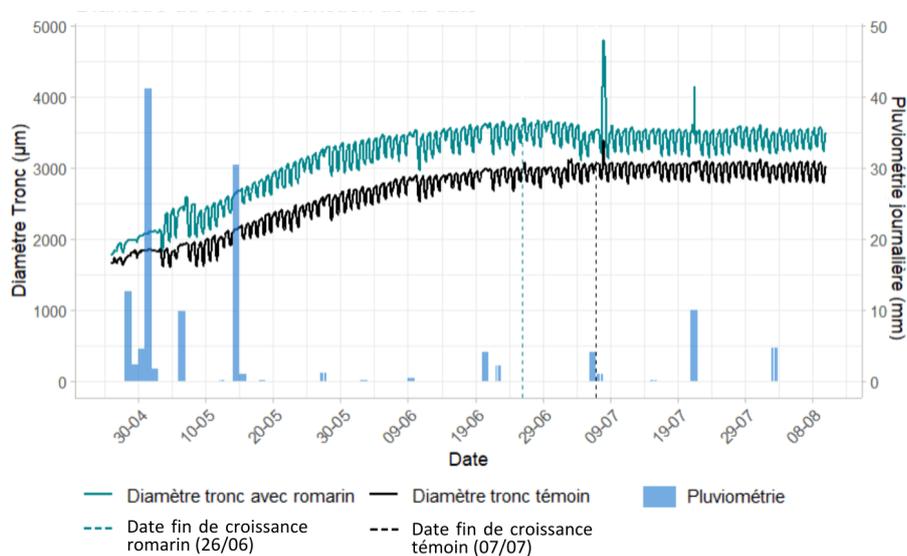


Figure 11: Diamètre horaire des troncs
Les mesures sont effectuées entre le 26 avril et le 10 août.

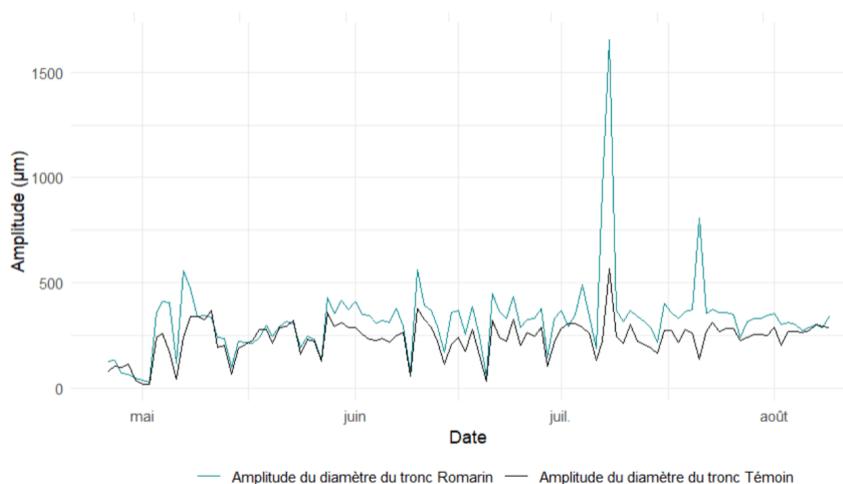


Figure 12: Amplitude journalière du diamètre des troncs en fonction du temps

Freins à l'implantation de PdS

Concurrence hydrique :

Les données dendrométriques prises en compte sont comprises entre les dates du 26 avril 2024 et du 10 août 2024.

Les mesures dendrométriques ont permis de détecter des stress subis par les arbres. Pour les deux modalités le stress survient à partir du 26 juin. Grâce à l'analyse R, nous remarquons une disparition de la phase 3, ce qui correspond à des arrêts de croissance du tronc. Cette absence de croissance est définitive pour la modalité romarin, tandis que cette phase réapparaît pour la modalité témoin. La croissance s'arrête finalement le 7 juillet pour l'arbre témoin.

La croissance du tronc est cyclique et progressive lors de confort hydrique, ce que nous pouvons observer entre le 15 et le 26 mai ou bien entre le 28 mai et le 8 juin (Figure 11). Il semble qu'il y ait une corrélation entre les précipitations et la perturbation du signal. En période de précipitation, le signal semble être lissé en début de saison confondant les phases de diminution (1) et d'expansion (2), alors qu'en fin de saison au moment où le stress hydrique peut se faire ressentir, les phases d'expansion sont particulièrement prononcées (6 et 21 juillet).

L'amplitude de croissance du diamètre du tronc est similaire pour la modalité romarin et témoin (Figure 12). Leurs courbes se confondent jusqu'au 27 mai. Après cette date, l'amplitude de croissance pour la modalité romarin semble toujours supérieure à la modalité témoin.

Concernant la taille des fruits et leur croissance, le romarin n'a pas d'effet significatif. On observe simplement une évolution significative de la taille et de la croissance en fonction du temps (p -value $< 2.10^{-16}$ pour les deux variables) (Figure 13).

Performances environnementales :

L'IFT lié à la stratégie puceron est de 2,0 pour la parcelle G et de 1,0 pour la parcelle E. Les traitements sont présentés dans l'Annexe VII.

Les bandes fleuries ont été observées du 10 avril au 28 juin. La bande fleurie Ouest est la plus fournie avec un recouvrement moyen de plus de 144%, contre 133% pour la bande Est. La flore spontanée a toujours été la plus abondante sur les deux bandes fleuries avec 81% à l'EST et 64% à l'Ouest. La bande Est présente la plus grande richesse spécifique et la plus grande diversité (indice de Shannon), avec respectivement pour valeur moyenne 21,67 et 2,39, contre 18,67 et 1,81 pour la bande Ouest.

C'est la centaurée jacée, qui est la plante semée la plus présente sur les deux bandes fleuries, avec un couvreur moyen de 49% pour la bande Est et 25% pour la bande Ouest sur la période étudiée. Les autres plantes semées étaient pratiquement inexistantes. La knautie des champs a été également observée par endroit, disséminée dans la bande fleurie mais en dehors des quadrats d'étude. La potentille rampante est l'espèce spontanée la plus couvrante avec 43% pour la bande Ouest et 29% pour la bande Est.

Les principaux auxiliaires que nous retrouvons sont les Aranae et les Apoidae, indépendamment de la bande fleurie (Figure 14). Sur toutes les dates confondues, 27,1 et 35,3% des individus observés étaient des araignées, pour respectivement la bande fleurie Ouest et Est. Les Apoidae représentent respectivement 18,6 et 20,6% des individus. Nous remarquons que les syrphes également sont omniprésents à le 11 juin sur la bande fleurie Ouest. Ils représentent 61,5% des insectes observés ce jour.

Faisabilité technique :

Il n'y a pas d'influence du facteur Moda sur le nombre de fruits pygmées par placette élémentaire (Figure 15).

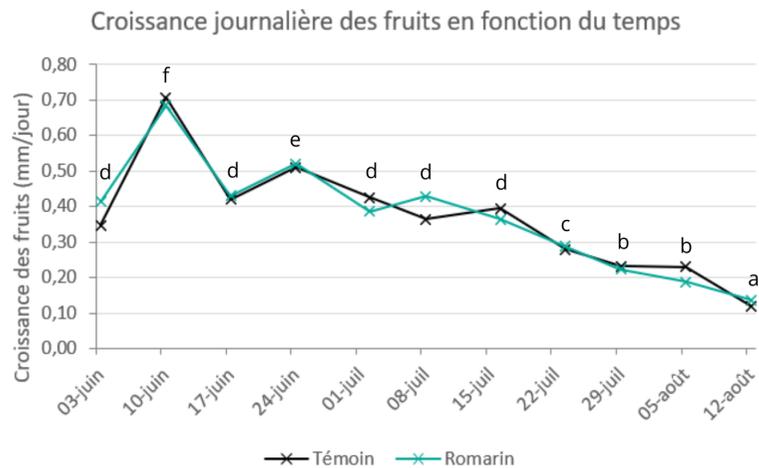


Figure 13: Croissance journalière des fruits en fonction du temps

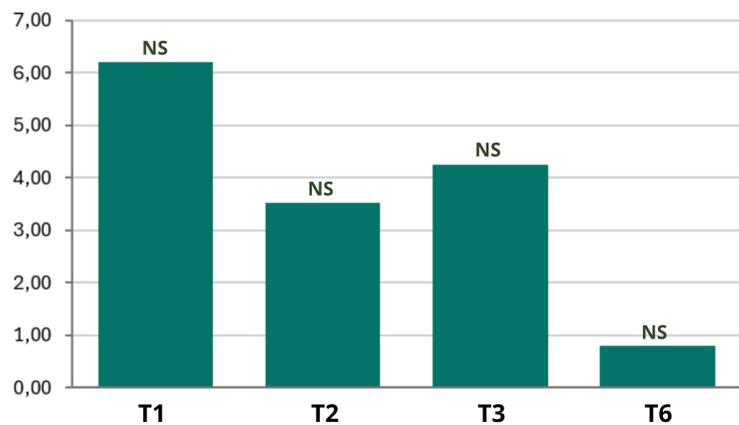


Figure 15: Nombre moyen de fruits pygmées par caisse

T1 : Témoins Opal, T2 : Romarin Opal, T3 : Tagète Opal, T6 : Attractif Story, NS : non significatif

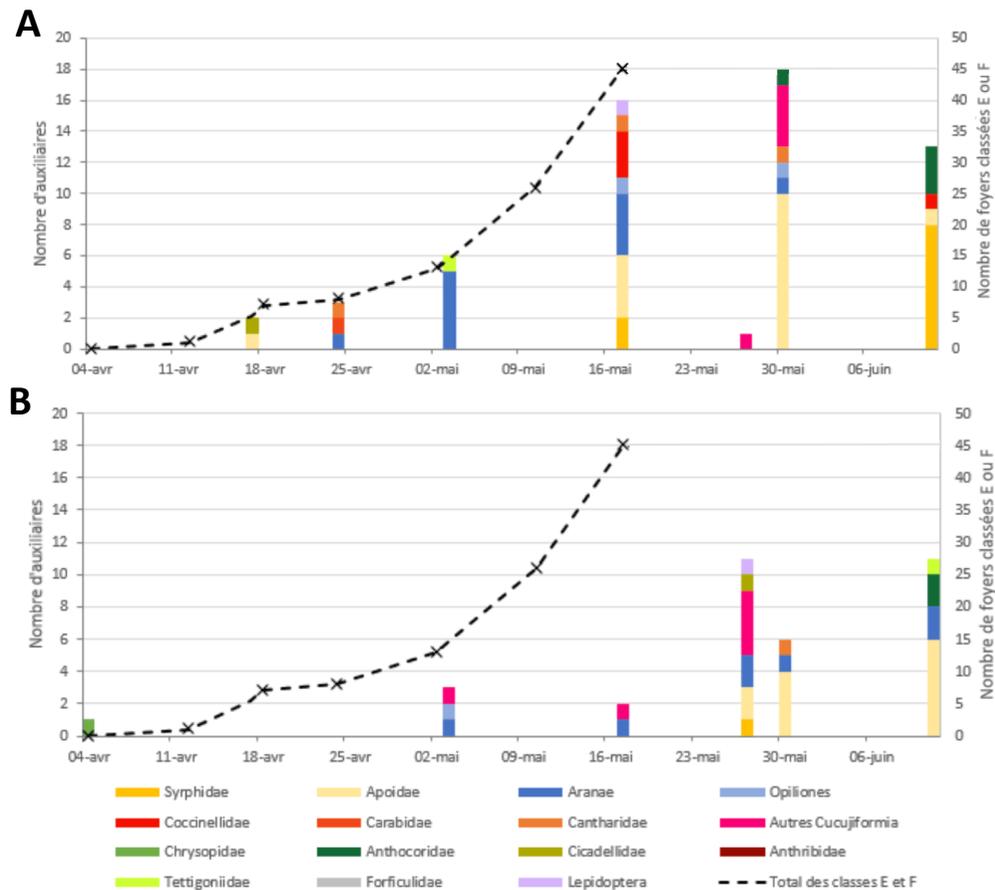


Figure 14: Nombre d'auxiliaires dans les bandes fleuries au cours de l'infestation de *D. plantaginea*

A : bande fleurie Ouest, B : bande fleurie Est

6. Discussion

Essai d'efficacité des PdS

Discussion méthode

Relevé de puceron :

Le design de l'expérimentation étant incomplet, il n'est pas possible d'étudier les interactions entre les plantes de services et la variété. Il a donc été préféré des modèles statistiques expliquant les classes d'abondance ou la fréquence d'infestation par un unique facteur rassemblant les variétés et les « traitements » en un seul facteur appelé « Moda ». La variété, le traitement et leur interaction ont probablement des effets, mais ils n'ont pas été étudiés.

De plus, il aurait été intéressant d'étudier le facteur temps pour un modèle plus complet et plus puissant. Les pousses des 3 premières notations étant pratiquement toutes notées en classe A, le modèle choisi n'a pas pu être adapté aux données. Deux modèles étaient possibles. Un premier, prenant en compte le facteur Moda, la date et leur interaction. A cela, il fallait ajouter le bloc en facteur aléatoire et la pousse en facteur de dépendance. Le deuxième modèle, prenant en compte la modalité et le bloc en facteur aléatoire, dans des analyses date à date. C'est cette dernière analyse qui a été choisie. L'indicateur AIC (Akaike Information Criterion) permet d'identifier les modèles les plus pertinents selon un « maximum de vraisemblance », et plus cet indicateur est faible, plus le modèle est pertinent (Roblès et al. 2012). Cet indicateur est utilisé dans le cas de loi explicite et si le rapport du nombre d'individus (n) par le nombre de paramètres (df) est supérieur à 40 (Hervé 2021). Dans notre cas, n/df est égal à 336 (336/1). Les indicateurs AIC valaient 2241 pour le premier modèle et entre 493 et 862 (en fonction des dates) pour le second modèle. C'est donc l'analyse date par date qui a été choisie. La notation du 13/05 n'a été réalisée que sur les arbres de la variété Opal qui semblaient la plus avancée dans l'infestation. Cette notation s'est insérée entre celle du 10/05 et du 17/05 pour densifier les observations près du vol d'émigration du puceron.

Le premier modèle, bien que moins pertinent, est plus complet. On peut toutefois se demander quels résultats sont apportés par celui-ci. On remarque que les facteurs Moda et date sont « hautement » significatifs, mais pas leur interaction. Leurs p-values sont respectivement égales à $2,2 \cdot 10^{-16}$ et $2,9 \cdot 10^{-4}$.

La méthode de comptage des pucerons avec des classes d'intensité est très utile sur le terrain. Bien moins fastidieuse qu'un comptage exhaustif, elle permet d'estimer rapidement le nombre de pucerons présents sur une pousse donnée. Avec de la pratique, cette estimation est d'autant plus facilitée. Cette méthode de comptage a notamment été utilisée dans des travaux (Grechi et al. 2008; Dib 2010; Rousselin et al. 2016). Le traitement de ces données doit cependant être réalisé avec un modèle statistique spécifique. L'intensité de puceron est mesurée par une variable qualitative ordinaire (A, B, C, etc.) et non par une variable quantitative. Ces variables peuvent être décrites comme « semi-quantitatives », car elles supposent un processus quantitatif sous-jacent (Hervé 2021). Les modèles statistiques usuels comme les GLM ou GLMMS ne seront pas pertinents. Les données de ce type doivent être analysées comme un rang dans un classement, avec un CLM(M) (Modèle (Mixtes) à Lien Cumulatif). Hervé 2021 fait des préconisations quant aux fonctions et paramètres à utiliser dans l'analyse. L'une d'elles est de représenter les probabilités ajustées d'appartenance à une classe, car plus représentatives de la variation réellement due au facteur. De ce fait, il est peu commode d'interpréter les résultats et de les transmettre de manière simple mais non déformée à un public non averti, comme des producteurs.

Par ailleurs, la faible capacité d'adaptation du modèle statistique ne permet pas d'ajuster tous les modèles biologiques. La prise en compte d'interactions entre facteurs n'est pas toujours possible. Dans notre cas, il n'était pas possible d'ajuster le modèle avec des interactions avec le facteur temps. Le dispositif expérimental étant incomplet (toutes les modalités de plantes de services n'étaient pas testées pour chaque variété de pommier), l'interaction entre la variété et les plantes de services n'était

pas étudiable non plus. L'analyse perd donc de l'information et de l'intérêt. La technique de comptage doit être repensée si l'on veut pouvoir analyser plus en profondeur.

Certaines techniques de comptage sont évoquées :

Dans le but d'étudier les comportements de migration ou de nidification, la LPO (Ligue de protection des oiseaux) fait le bilan de techniques de comptage précises et de méthodes d'estimation. Elle fait en particulier référence au comptage par motif [14]. Il consiste à compter le nombre d'oiseaux dans une zone donnée, qui constituera le « motif ». Ensuite, on compte le nombre de fois où le motif se répète. Cette technique a l'avantage certain d'être économe en temps. Toutefois, dans le contexte du puceron, les individus ne sont pas toujours répartis de manière homogène. La feuille se partage entre individus de stades de développement différents et donc de tailles différentes. La dernière technique proposée par la LPO est l'estimation globale par une simple observation.

Les estimations sont très dépendantes de l'œil de l'observateur et de son expérience. Ainsi, dans la présente situation, nous étions un groupe récurrent de 10 personnes (dont 4 étaient inexpérimentés aux premières notations) à observer le puceron. D'autres observateurs sont venus compléter l'équipe jusqu'à un total de 15 observateurs sur la saison. Les biais pourraient donc être conséquents. Par ailleurs, il y avait 8 personnes qui n'avaient pas un statut permanent dans l'entreprise (stagiaires ou apprentis) et donc pouvaient manquer d'expérience.

Les classes d'abondance, bien que manquant de précision, permettent de poser un cadre simple et pratique pour des observateurs inexpérimentés.

Favrot et Makowski 2023 se sont questionnés sur la méthode la plus exacte pour évaluer le nombre de pucerons sur la betterave, en se basant sur le modèle statistique de l'article de Laurent et al. 2022. Ils ont généré un grand nombre de données et ont ensuite évalué la précision des niveaux d'efficacité des traitements aphicides. Ils ont comparé différentes stratégies de comptage : comptage du nombre de pucerons sur 10 betteraves ; comptage du nombre de plantes infestées parmi 10 betteraves ; et comptage hybride compilant la première méthode au début de l'infestation et la seconde à la fin. La première méthode qui est la plus fastidieuse montre souvent de meilleures estimations par rapport à la seconde. La stratégie intermédiaire obtient de bons résultats et permettrait de faire un compromis précision/temps.

Aucune méthode de comptage ne permettra de concilier tous les avantages, et il convient de faire des choix en fonction de ses moyens et de ses objectifs.

La biologie du puceron implique un développement agrégatif, par foyer d'infestation. Certaines zones sont totalement saines et d'autres présentent de fortes infestations. De ce fait, la recherche des 12 pousses pour l'évaluation de l'intensité de l'infestation peut entraîner un choix de pousses sur le même arbre ou le même rameau. Les pucerons étant capables de marcher lors de fortes infestations (Brown, Myers 2010; Degrave 2020), les pousses suivies qui sont localisées aux mêmes endroits ne sont donc pas indépendantes les unes des autres. Or cette dépendance à l'arbre ou au rameau n'a pas été prise en compte dans le modèle statistique. Pour remédier à cette approximation, il aurait fallu noter à chaque observation le numéro de l'arbre sur lequel la pousse a été choisie. Il est aussi possible de faire évoluer le protocole en observant de manière aléatoire un plus grand nombre de pousses. Cette technique permettrait aussi de s'affranchir de la dépendance qui existe en suivant les mêmes pousses au cours du temps. Néanmoins, elle ne ferait plus l'évaluation de l'intensité du puceron à l'échelle d'une pousse, mais à celle de l'arbre.

Malgré sa faible capacité à diriger son vol, le puceron pourrait être repoussé vers les parcelles témoins ou dans les zones non observées de la parcelle. Il est donc plausible que le puceron soit plus abondant dans ces parties du verger que si les plantes répulsives étaient totalement absentes. Les plantes de services ayant une portée d'action limitée (Dijan-Caporalino et al. 2020), les zones périphériques des parcelles de romarins, notamment, pourraient être plus infestées que les parcelles elles-mêmes. Cet aspect n'a pas été vérifié.

Comme dans toutes expérimentations dans un espace ouvert, certains paramètres sont difficiles à maîtriser. Nous observons une hétérogénéité du matériel végétal étudié. Toutes les plantes de services n'avaient pas la même vigueur, pouvant entraîner des efficacités différentes. Enfin, tous les arbres de la parcelle n'avaient pas le même porte-greffe : M25, M7, M9, G202 et PI80, jouant sur la vigueur des rangs.

Relevé d'auxiliaires :

Les auxiliaires comptés au sein des plants de romarin ne peuvent pas être analysés ou interprétés, puisqu'aucun témoin n'a été observé.

Très peu d'auxiliaires ont été observés durant les notations. Dans les faits, ils ont seulement été notés s'ils étaient présents dans les foyers de pucerons. Les auxiliaires présents dans l'arbre en dehors des 12 pousses n'ont pas été comptabilisés, ce qui par conséquent réduit l'effectif observé.

Discussion des résultats

Intensité de l'infestation :

Le romarin a montré qu'il pouvait être efficace pour faire baisser la pression de *D. plantaginea* lors d'infestations de faible intensité. Ces résultats correspondent aux résultats de Alaphilippe et al. 2021. L'efficacité du romarin n'est pas totale, mais tend à diminuer l'impact du puceron.

Lors de notre essai, l'efficacité du romarin décroche lors de l'avant-dernière date. Il n'y avait plus de grandes évolutions dans l'infestation entre les dates du 2 et du 10 mai. Nous pensions avoir atteint le pic d'infestation. Cependant, elle a considérablement augmenté, ce qui est inhabituel.

La ré-infestation des pousses par le puceron entre le 10 et 13 mai s'est essentiellement faite sur des pousses végétatives. Pour rappel, nous étudions 12 pousses par parcelle élémentaire répétée 4 fois. 34 nouvelles pousses ont été notées en classe B ou plus, dont 24 sur le *Romarin Opal* et 10 sur la référence producteur. Ceci est équivalent à pratiquement 3 nouvelles placettes élémentaires touchées par le puceron ($34/12 \approx 2,83$). Entre ces deux dates, 73,5% des nouvelles pousses infestées sur Opal étaient végétatives, contre 51,1% sur la totalité des pousses trouvées lors de l'ensemble des notations sur cette même variété.

Nous avons fait l'hypothèse d'un regain de vigueur des pommiers les rendant plus appétants pour le puceron (Dib 2010). Néanmoins, aucune de nos observations n'a pu appuyer notre hypothèse. Ces nouvelles pousses n'ont pas été observées sur des pommiers ayant un porte-greffe plus vigoureux. La croissance végétative est dépendante des apports en eau et cette croissance à un effet positif sur l'abondance de puceron (Rousselin 2017). Or la saison a connu de forts épisodes pluvieux 60,8mm entre le 28 avril et le 1^{er} mai et 30,4mm le 14 mai, mais la temporalité de ces pluies ne correspond pas à l'observation d'augmentation soudaine du nombre de pucerons. Les observations des pousses se sont limitées à uniquement 12 individus par placette. Les placettes ayant déjà leurs 12 pousses infestées n'étaient donc plus prospectées dans leur intégralité. Une augmentation de l'infestation sur ces placettes était alors possible et serait passée inaperçue. Une observation de la fréquence d'infestation plus régulière (au lieu de l'intensité) aurait pu préciser les causes de cette recrudescence.

D'un point de vue impact sur le ravageur, les plantes de services, en particulier le romarin, ne peuvent pas être une stratégie à mettre en place à lui seul. Son effet n'est pas suffisamment fort pour satisfaire les attentes des producteurs. La modalité Référence producteur, qui a mis en place une stratégie allégée des pratiques régionales en AB, s'est montrée plus efficace. Bien que prometteur, les produits phytopharmaceutiques demeurent la solution la plus puissante.

La modalité *Tagète Opal* a montré une efficacité comparée à son témoin. Bien que statistiquement significatif, il serait surprenant que les tagètes aient eu le moindre effet sur la présence de puceron. En effet, malgré des tentatives de protection contre les escargots et les lapins (traitement au

phosphate ferrique, et grillages protégeant les plants), les plants n'ont pas tenu à ces pressions. Les tagètes ont été plantées le 16 avril et sont restées en pleine forme jusqu'au 26 avril. Elles sont donc restées 10 jours en place. Sur ce court intervalle de temps, nous n'imaginons pas qu'elles aient pu avoir un impact.

Les parcelles élémentaires de tagètes ont été désherbées et mises à nu avant leur plantation. On peut émettre l'hypothèse que cela a eu un effet sur le puceron, même si aucune source n'a été trouvée confirmant cette hypothèse. Au contraire, le nombre de pucerons peut être plus élevé dans un verger avec sol nu par rapport à un verger enherbé (Dib 2010).

Des extraits de fleurs ou de racines de *Tagetes erecta* ont des propriétés insecticides sur *Rhyzopertha dominica* (Fabricius, 1792) et *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) deux coléoptères ravageurs (Morillo-Rejesus, Decena 1982). Les tagètes pourraient donc servir comme produit alternatif aux produits phytopharmaceutiques de synthèse.

L'huile essentielle de *Tagetes minuta* L. a aussi des effets sur la reproduction des pucerons, tel que *Myzus persicae* (Tomova et al. 2005). Nous pourrions imaginer des diffuseurs d'huiles essentielles à la manière de diffuseur de phéromones pour lutter contre les pucerons. Cependant, les COV sont grandement influencés par les conditions météorologiques, ils sont très réactifs à l'environnement et peuvent se dégrader rapidement (Brilli, Loreto, Baccelli 2019). Les capsules devront assurer une bonne protection des huiles essentielles ou subir un renouvellement régulier.

Fréquence d'infestation :

L'Objectif DEPHY définit une pression tolérable pour le puceron cendré comme une pression ne dépassant pas les 15% de pousses touchées (EcophytoPIC 2019). Quelque soit la modalité, nous constatons que la pression de 15% de pousses touchées est dépassée le 21/05, avec 18% de pousses touchées en moyenne. Malgré une pression tolérable sur les deux premières notations, les stratégies avec les plantes de services ont été un échec pour faire baisser la pression à l'échelle du verger. On peut néanmoins noter que les tests statistiques donnent la stratégie de référence comme différente au seuil de confiance de 90%. Il semble donc que cette stratégie soit plus efficace.

Le développement épidémique du ravageur repose à la fois sur le comportement d'installation du puceron sur la plante hôte, sur sa capacité à se multiplier sur celle-ci et à se propager de proche en proche (Degrave 2020). Le déplacement du puceron est un élément clé de son cycle biologique. Ce dernier est marqué par 3 périodes de vol : l'émigration à la fin du printemps, les vols de dissémination sur les plantains et la ré-migration à l'automne (Dib 2010). Pour diminuer le nombre de pousses touchées par le puceron, il faut jouer sur le « stock » d'œufs, soit au début du printemps, soit à l'automne lors du vol retour. Les plantes de services ne sont pas des biocides, elles ne sont donc pas capables de détruire des œufs. Elles ne seront donc pas efficaces au printemps pour diminuer la fréquence de pousses touchées mais seulement diminuer l'intensité de l'infestation et la reproduction du puceron (voir première hypothèse et partie précédente). En revanche, elles pourraient agir à l'automne en repoussant les femelles et les mâles qui retournent sur le pommier pour la reproduction, entraînant la ponte.

Cependant, les résultats de Courteille et al. 2022 rejettent cette hypothèse d'action lors du vol retour. Les pucerons migrants ne semblent pas identifier leurs hôtes sur de longues distances, mais optent plutôt pour un comportement de dispersion (Brown, Myers 2010). Les pucerons ont une faible capacité à contrôler leur vol, leurs déplacements ont notamment été décrits comme celui du plancton aérien (Potting et al. 2005). Les facteurs déclenchant le retour du puceron cendré à l'automne ne sont pas très bien connus, mais il est lié à la combinaison de la réduction de la durée du jour, à l'état de la plante hôte et aux conditions météorologiques (Cross et al. 2006). Les pucerons sélectionnent leur hôte grâce à des signaux visuels et olfactifs (Potting et al. 2005).

Si les résultats de Courteille et al. 2022 se vérifient, ils donneraient plus de crédit à notre hypothèse selon laquelle les plantes de services auraient une action sur la fécondité des pucerons ou bien sur leur appétence pour le pommier (Dardouri, Gautier, et al. 2019).

Selon l'observation que les plantes répulsives ont une efficacité plus grande à mesure qu'elles sont proches de leur cible (Dijan-Caporalino et al. 2020), en l'occurrence les pucerons sur le pommier, nous pouvons émettre une nouvelle hypothèse : le romarin sur le rang a une plus grande efficacité que le romarin en inter-rang. Cela pourrait aussi expliquer nos résultats.

Comme expliqué précédemment, nous avons noté si les pousses infestées étaient florales ou végétatives, lors de la dernière notation de fréquence. 34,8% des pousses infestées étaient végétatives (sur 244 pousses infestées). Ces pousses peuvent être éliminées par une taille en vert à l'été, elles ont donc peu d'impact sur le pommier.

Les plantes de services ont montré une efficacité certaine en condition de laboratoire, mais il existe encore peu d'études prouvant de manière claire leur efficacité au champ (Lamy 2016; Brilli et al. 2019). En laboratoire, les COV sont souvent testés à des concentrations très élevées, bien plus que celles présentes au champ (Brilli, Loreto, Baccelli 2019). En outre, une espèce de plantes de services peut avoir une efficacité variable selon les différentes variétés et chémotypes possibles (Dardouri, Gautier, et al. 2019). Il est essentiel de pouvoir réaliser un screening en laboratoire pour déterminer le bouquet olfactif qui est le plus efficace contre le puceron cendré à un stade donné. Au vu de cette variabilité, il est difficile de comparer des résultats d'études si les variétés sont différentes.

Attraction des auxiliaires :

Il est difficile de dire si les romarins ont attiré des ennemis naturels ou non puisque les données n'ont pas pu être analysées. Cependant, la publication de Courteille et al. 2022 indique que les romarins ont attiré un nombre plus important d'araignées et de carabes, or nous avons essentiellement rencontré des araignées au sol de nos romarins (Annexe VI).

Bien qu'étant peu nombreux dans les pousses, les auxiliaires semblent être plus présents avec l'augmentation du nombre de pucerons (Annexe V). Les pucerons parasités ainsi que les fourmis semblent aussi plus abondants à mesure que le nombre de pousses en classe E et F augmente (Annexe V). Nous observons néanmoins une diminution de leurs nombres avant la fin de l'infestation, vers le 2 et 10 mai. La diminution du nombre de pucerons parasités peut s'expliquer par la chute de certaines feuilles très infestées, qui n'ont pu être comptées. En ce qui concerne les fourmis, leur densité dépend du nombre de pucerons. Plus il y en a, plus elles visitent les feuilles. Mais leurs activités diminuent passé un certain seuil (Guénard 2007).

Le β -farnésène a montré une grande efficacité contre l'augmentation du nombre de pucerons par pousse. Il a multiples rôles dans la biologie du puceron et l'action qu'il a eue sur le terrain est obscure. Cette molécule est capable d'attirer les ennemis naturels du puceron, mais c'est aussi la molécule d'alarme de ce dernier. Elle provoque un comportement de fuite, mais induit également la formation de morphes ailés (Durieux 2008). A l'inverse, chez les espèces myrmécophiles, elle induit un regroupement des individus et un comportement de défense des fourmis qui attaquent les prédateurs du puceron (Guénard 2007). Peu de prédateurs et de parasitoïdes peuvent éviter d'être attaqués par les fourmis (Guénard 2007).

En cas de présence d'auxiliaires, il devient impossible de différencier l'effet de la présence des ennemis ou de l'effet du romarin sur la régulation du puceron (Courteille et al. 2022). En l'occurrence, nous avons peu d'auxiliaires, nous pouvons donc conclure de l'effet du romarin sur l'abondance du puceron.

Analyse des conditions favorables à l'efficacité des PdS

Discussion méthode

Le projet SIMPA a permis de travailler sur la thématique de lutte du puceron cendré avec des plantes de services et de recueillir des données riches d'informations. La collaboration des différents partenaires sur les sites durant les 3 années d'expérimentation a en effet permis d'obtenir des données concernant une diversité de climats, de pression de pucerons et de plantes de services.

L'utilisation des données du projet SIMPA permet d'avoir directement accès aux données brutes des études menées. Par ailleurs, les protocoles utilisés sont les mêmes, ce qui permet des données uniformisées pour tous les critères étudiés (même poids à chacune des stations). De même, des interrogations supplémentaires peuvent apparaître, et l'accessibilité des partenaires à répondre aux questions est facilitée.

Par soucis d'uniformité, il a finalement été décidé de ne travailler que sur les résultats de deux stations au lieu de trois, puisque l'une d'entre elles avait trop dévié des protocoles fixés au départ. De plus, l'analyse mixte en amont peut être biaisée si les effectifs ne sont pas les mêmes (trop faibles ou trop importants), ce qui était le cas avec la troisième station (Hervé 2021).

Certaines variables ont été traitées de manière qualitative, comme la fertilisation, l'irrigation, ou la vigueur des plantes de services, par exemple. Il aurait été plus précis de les caractériser plus précisément. La fertilisation peut être caractérisée par la quantité d'azote apportée ou le type d'apport, par exemple. Dans notre cas, une telle précision n'aurait pas été possible car l'analyse réalisée ne s'appuie pas sur assez de données. L'ambition n'était pas d'analyser tous les paramètres d'un système de culture, mais de mettre en évidence certains leviers d'action et de faire des hypothèses quant au comportement du puceron et à l'efficacité des plantes de services.

Des données précises sur les dates de déploiement et d'hivernage des filets Alt'Carpo n'ont pas pu être obtenues. Ce facteur n'a pas été pris en compte dans l'analyse. Dans une analyse avec plusieurs plantes de services, il aurait aussi été intéressant d'étudier si le type biologique (vivace, annuelle) a une influence sur l'efficacité. Ce facteur avait par ailleurs été proposé aux partenaires. Les données sur la présence de parasitoïdes et fourmis n'étaient pas uniformes. Elles ont également été retirées.

Avec seulement deux stations étudiées, nous avons fait face à un manque de précision de nos facteurs. En effet, certains d'entre eux étaient colinéaires, et exprimaient donc la même chose. Les facteurs comme la variété de la plante de services, sa fertilisation et son irrigation étaient tous dépendants des conditions expérimentales de chacune des deux stations. Ces paramètres sont importants pour caractériser les conditions idéales d'implantation des plantes de services, qui favorisent la régulation du puceron cendré du pommier. Ils n'ont malheureusement pas pu être étudiés.

Enfin, les 12 modèles n'ont pas pu être moyennés avec la fonction *model averaging*, pour obtenir un unique modèle. Seulement les 4 premiers modèles étaient pris en compte par celle-ci. Nous avons préféré faire l'analyse individuelle de chacun des 12 modèles, possédant chacun une probabilité de 8% d'être le meilleur modèle (soit 96% de chance d'avoir le meilleur modèle en les regroupant), plutôt que 4 modèles combinés (avec une probabilité de 32% de ne pas se tromper).

La complexité des données fournies par l'analyse n'a pas permis de réaliser des comparaisons deux à deux, pour déterminer comment les modalités agissent.

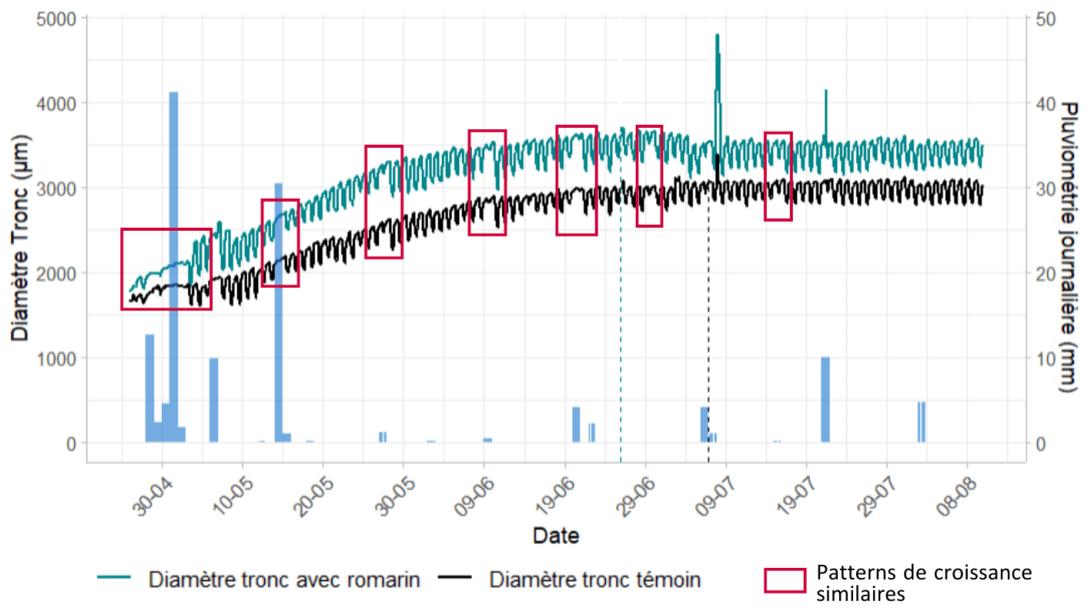


Figure 16: « Patterns » des diamètres des troncs pour la modalité témoin et romarin

Discussion des résultats

L'analyse a finalement dégagé des facteurs influençant le niveau d'infestation du puceron, mais ils n'ont pas de lien direct avec les plantes de services. Le porte-greffe, la variété des pommiers et la pression à l'échelle du verger ont une influence sur l'abondance du puceron. Le porte-greffe joue sur la vigueur du pommier et donc l'alimentation en sève, élément nutritif du puceron. Les variétés de pommiers peuvent présenter une sensibilité différente à *D. plantaginea*. Enfin, nous apprenons qu'il y a un lien entre le nombre de foyers et l'intensité de l'infestation.

La présence des auxiliaires a aussi un impact sur le puceron, mais rien d'affirme que ce soient les romarins qui les attirent.

Un résultat qui est très intéressant est la significativité de l'interaction entre la modalité (présence de romarin ou non) et la pression. Bien que l'on n'ait pas réalisé de comparaison deux à deux, nous pouvons faire l'hypothèse que les romarins sont efficaces en cas de faible ou moyenne pression.

La variété des plantes de services et leur vigueur sont significatives dans respectivement 66 et 50% des cas, et n'ont pas été pris en compte dans tous les modèles. Il n'est pas judicieux d'en tirer des conclusions.

Freins à l'implantation des PdS

Discussion méthode

Concurrence hydrique

Les mesures de dendromètre réalisées ne permettent pas de conclure avec assurance quant aux résultats. En effet, il n'y a pas de répétitions des mesures de diamètre de tronc, donc aucune moyenne calculée, ni de tests statistiques.

Cependant, les données récupérées par les deux dendromètres ne sont pas incohérentes entre elles. Nous observons clairement des « patterns » de croissance similaires (Figure 16). Cette observation soutient l'idée que le stress subi n'est pas lié à l'arbre en lui-même, mais à ce qui rassemble les deux arbres étudiés : leur environnement.

Afin de vérifier que le stress enregistré par le dendromètre est bien celui lié à une concurrence hydrique, il aurait fallu installer des sondes hydriques dans le sol afin de mesurer des potentiels hydriques. Le stress mesuré par les dendromètres peut être issu d'autres facteurs.

La mesure de la disponibilité en eau dans le sol nécessite de nombreuses mesures dans le cas d'une irrigation en goutte-à-goutte (Naor et al. 1995). Le choix de capteurs s'est donc arrêté sur des capteurs plantes.

Bandes fleuries :

Nous n'avons pas utilisé de témoin pour comparer la diversité d'auxiliaires et de plantes fleuries. Nous ne pouvons donc pas conclure concernant les effets de la bande fleurie sur leur capacité à abriter ces auxiliaires. Le premier objectif d'étude des bandes fleuries était de déterminer si elles pouvaient s'implanter facilement dans un verger.

Un temps non négligeable a été passé pour déterminer la flore présente. Une méthode pratique et précise est décrite chez Krüsi 1981. Ce sont les fleurs qui jouent essentiellement un rôle attractif pour les auxiliaires, par leurs couleurs, leur nectar, leurs odeurs. La méthode se résume à compter le nombre d'unités fleuries (une fleur, une inflorescence, une ombelle, etc.), ou bien à estimer la surface de floraison. Ainsi, nous aurions une idée précise du pouvoir attractif de ces infrastructures agroécologiques.

Evaluation du protocole établi :

L'ambition initiale du projet SIMPA et du stage était élevée : déterminer si les plantes de services sont efficaces pour lutter contre le puceron cendré du pommier, dans quelles conditions, et si l'implantation dans un verger ne génère pas de freins trop conséquents. Ces objectifs imposent à la fois des méthodes de recherche scientifique et des approches plus globales du système agronomique et de l'entreprise. Finalement, les ambitions ont été revues à la baisse et se sont résumées à étudier si les plantes de services sont une alternative efficace ou non.

La comparaison d'une parcelle conduite selon des pratiques en AB et d'une parcelle conduite selon des pratiques allégées avec des plantes de services peut permettre une meilleure acceptabilité de cette méthode alternative et innovante. Ce volet de l'expérience permet de mieux valoriser les résultats d'expérimentation et, en quelque sorte, vérifier leur acceptabilité.

Les résultats obtenus concernant la faisabilité technique ou les performances environnementales ne sont que partiels, et ne permettraient pas à un producteur de répondre à ses interrogations.

Discussion des résultats

Concurrence hydrique :

Bien que la méthode ne soit pas la plus précise, nous pouvons dire que la présence du romarin sur le rang provoque une concurrence hydrique avec le pommier ou du moins intensifie le stress hydrique estival.

Le calibre du fruit et la croissance de ce dernier ne sont pas impactés par la présence du romarin.

Performances environnementales :

D'après l'enquête de l'action 1 du projet SIMPA, les producteurs appliquent en moyenne 2,4 traitements avant la floraison et 2,1 interventions après la floraison. La majorité de ces traitements sont préventifs et systématiques. Ce qui porte l'IFT lié à la stratégie puceron à 4,5 contre 2,0 pour notre stratégie de référence et 1,0 pour la stratégie avec des plantes de services. Nos parcelles ont en effet été moins traitées que la moyenne du sondage, néanmoins nous n'avons pas eu une pression très forte. Une pression plus sévère pourrait nécessiter plus de traitements chimiques.

Certaines informations peuvent être tirées de l'analyse des bandes fleuries. Les auxiliaires arrivent tardivement dans les bandes fleuries pour réguler *D. plantaginea*. La bande fleurie Ouest semble attirer d'autant plus d'auxiliaires qu'il y a de pucerons présents sur les pousses de pommiers. Pour la bande fleurie Est, les auxiliaires arrivent après le pic d'infestation (Annexe V).

Les auxiliaires relevés dans les bandes fleuries n'étaient pas majoritairement des ennemis naturels du puceron. Seuls les syrphes et les araignées sont présents en relative abondance.

Les bandes fleuries ne répondaient pas aux attentes puisque la majorité des espèces présentes était spontanée. Aucun entretien ou renouvellement du semis n'ont été réalisés, expliquant la forte présence d'espèces végétales spontanées.

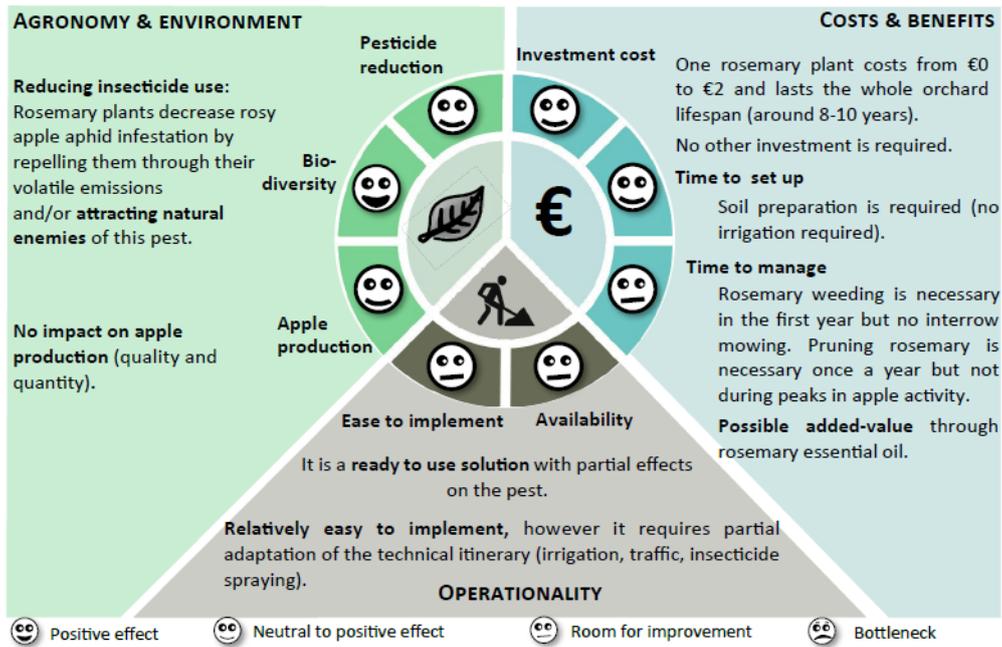


Figure 17: Évaluation de la pratique d’implantation des plantes de services (Alaphilippe et al. 2021)

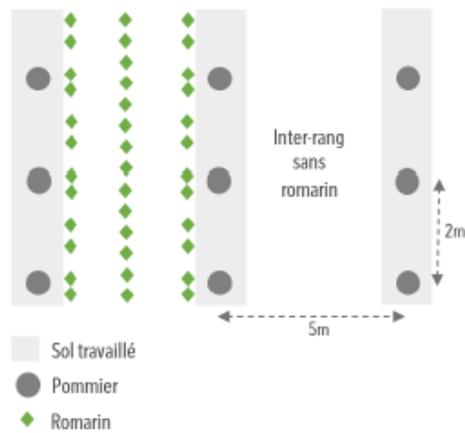


Figure 18: Schéma d’un système de culture adapté à l’utilisation de plantes de services (Courteille et al. 2022)

Evaluation de la faisabilité :

Les tagètes sont susceptibles d'attirer les limaces (Dijan-Caporalino et al. 2020). Nous avons pu observer l'appétence des escargots pour les tagètes. C'est la deuxième année que ces derniers détruisent entièrement les plantations. Il serait vain de recommencer.

En ce qui concerne le romarin, Alaphilippe et al. 2021 et Courteille et al. 2022 ont étudié la question. Les performances du romarin sont décrites dans la Figure 17.

Un plant de romarin coûte entre 0 et 2€ et dure la vie entière du verger. Quelque soit la position du romarin sur le rang ou l'inter-rang, il est nécessaire de préparer le sol et de désherber le romarin la première année de plantation pour éviter la concurrence avec les adventices. Il n'est pas possible d'appliquer d'insecticides pendant la floraison du romarin (arrêté abeille). La taille des romarins est nécessaire une fois par an, mais pas pendant la période de pic d'activité des pommiers. Enfin, pour atteindre un volume important, plusieurs années sont nécessaires.

Dans l'inter-rang, il est relativement simple à mettre en place, cependant il est nécessaire d'adapter partiellement les itinéraires techniques et en particulier le passage des machines agricoles. Pour augmenter l'efficacité du romarin, des variétés différentes, aux ports variés sont utilisés. Toutefois, une différence de croissance de ses variétés ne facilite pas leur taille indispensable aux passages des machines. Pour finir, les déchets de taille du pommier sont évacués puis broyés dans l'inter-rang. Par sa position, le romarin est une gêne à cette pratique.

Si le romarin est positionné sur le rang, sa plantation nécessite un rabattage des branches basses du pommier. Le désherbage est plus difficile, car pas d'outil adapté. Les conditions d'arrosage et d'ombrage du rang sont défavorables à son développement. Enfin, il peut gêner la réalisation des pratiques sur les pommiers, notamment l'éclaircissage et la récolte.

Le choix de la plante de services reste un problème important. Il faut trouver un compromis entre une plante efficace pour lutter contre le puceron, mais qui ne compromette pas trop le système. La position et la distance de la plante de services doivent également être déterminées en fonction du comportement du ravageur et de sa méthode de recherche de l'hôte (Parker et al. 2013). Par ailleurs, les plantes de services peuvent causer des disservices. La biodiversité apportée par les plantes répulsives ou les bandes fleuries peut mener à une diminution du contrôle biologique (Parker et al. 2013) et à l'apparition de nouveaux ravageurs ou maladies (Dijan-Caporalino et al. 2020).

L'une des craintes de l'implantation du romarin est celle de son inefficacité (traitée précédemment). Celle-ci peut causer des travaux supplémentaires pour l'agriculteur, comme l'éclaircissage des fruits pygmées. Ces derniers n'ont pas été plus nombreux quelle que soit la modalité (romarin, témoin, etc.).

Pour concilier l'efficacité et une bonne opérationnalité, Courteille et al. 2022 proposent un design alternatif avec un espacement des pommiers plus important (5m d'inter-rang). Les romarins sont plantés sur 3 rangées dans l'inter-rang, une centrale facilitant le passage des engins agricoles et 2 sur l'inter-rang en bordure des pommiers (Figure 18). Seulement, cette solution va à l'encontre des contraintes rédhibitoires exprimées par les producteurs dans l'action 1 du projet SIMPA.

Pour conclure, la plante de services idéale est celle qui peut être valorisée économiquement en plus de protéger la culture principale (Parker et al. 2013). Le romarin fait bonne figure, puisqu'il peut être valorisé en huile essentielle (Alaphilippe et al. 2021).

7. Conclusion

Avec les perspectives de retraits de produits phytopharmaceutiques et de contraintes environnementales urgentes, l'étude des plantes de services comme alternative s'impose comme un sujet de recherche dans la littérature scientifique. L'étude que nous avons réalisée s'est basée sur le puceron cendré du pommier, *Dysaphis plantaginea*, comme modèle biologique.

Dans un premier temps, l'étude s'est portée sur l'efficacité des plantes de services contre ce puceron. Les plantes de services utilisées, romarin et tagète, ont montré des résultats discordants quant à leur capacité à réguler le puceron. Le romarin est efficace pour limiter l'abondance du puceron à l'échelle des pousses. L'hypothèse toujours en vigueur est qu'il agirait sur l'appétence du pommier pour le puceron ou bien sur la capacité de ce dernier à se reproduire en présence romarin. L'étude rejette cependant l'hypothèse selon laquelle il serait répulsif contre le puceron. La tagète, symbole de la difficulté à mettre en place des plantes de services dans un système complexe, n'a pas pu avoir quelque qu'action puisqu'elle fut dévorée par les lapins et les escargots.

Dans un deuxième temps, nous avons souhaité analyser les facteurs favorisant l'efficacité des plantes de services, à l'aide d'une analyse statistique sur les données du projet SIMPA, dans lequel s'inscrit ce mémoire. Cette exploration des données a montré que le romarin avait une efficacité variable selon la pression de pucerons. Les résultats sont venus confirmer certains résultats bibliographiques, indiquant que le porte-greffe, impactant fortement la vigueur du pommier, ou la variété de pommier ainsi que la présence d'auxiliaire agissaient sur le développement du puceron. Des critères caractérisant les plantes de services, variété, positionnement sur le rang ou l'inter-rang n'ont pas pu être étudiés au vu du nombre restreint de données utilisées.

Enfin, pour savoir si cette solution est pertinente, il faut s'intéresser à sa mise en œuvre au sein de la production, ici un verger. Les réponses apportées par la présente étude ne sont pas suffisantes pour juger de la faisabilité. Cependant, nous pouvons noter que la présence de romarin sur le rang de pommier peut être la cause d'une concurrence hydrique préjudiciable à la croissance du pommier. L'implantation des plantes de services est complexe et nécessite de faire des compromis,

En définitive, l'efficacité des plantes de services sur le puceron a principalement été étudié en laboratoire, et montre des résultats prometteurs. Cependant, il manque encore des éléments dans notre compréhension des plantes de services, des COV et du comportement du puceron, pour utiliser au mieux leur potentiel sur le terrain. Par ailleurs, encore peu d'études ont évalué la faisabilité de l'implantation des plantes de services dans un verger. La pérennité d'un verger rend les choix culturaux difficiles et plus longs à observer que pour les cultures maraîchères, par exemple. La question des plantes de services comme une solution efficace, prête à l'emploi et donc pertinente reste ouverte.

Bibliographie :

ALAPHILIPPE, Aude, ALINS, Georgina, BOROWIEC, Nicolas, DAPENA DE LA FUENTE, Enrique, DARDOURI, Tarek, DEKKER, Teun, FERRAIS, Louise, FRANK, Pierre. P, GAUTIER, Hélène, GARDIN, Pauline, GOMEZ, Laurent, GOUTINES, Caroline, HANCE, Thierry, JACQUOT, Maxime, JORDAN, Marie-Odile, KRAMER JACOBSEN, Stine, LATEUR, Marc, LAVIGNE, Claire, MIÑARRO, Marco, MOREL, Karine, PARVEAUD, Claude-Éric, ROSIES, Blandine, SIEGWART, Myriam, SIGSGAARD, Lene, SIMON, Sylvaine, TASIN, Marco et VERCKEN, Élodie, 2021. API-Tree oucomes : Pesticide-free methods to control apple pests, experimentation and performance. Disponible : <https://hal.inrae.fr/hal-03352357/file/API%20Tree%20booklet%20VFeng.pdf>.

ALBERT, Laurence, 2017. Régulation naturelle du puceron cendré et aménagements agro-écologiques : l'exemple des vergers cidricoles du nord-ouest de la France. Thèse de Doctorat en Biologie et Agronomie : Institut supérieur des sciences agronomiques agro-alimentaires, horticoles et du paysage.

ALISON, Bertrand, DUVAL-CHABOUSSOU, Anne, GABELLE, Annaëlle et ZAVAGLI, Franziska, 2021. Note interne puceron cendré et contexte de l'année 2021. SudExpé.

ARYAL, Sugam, HÄUSSER, Martin, GRIESSINGER, Jussi, FAN, Zexin et BRÄUNING, Achim, 2020. "dendRoAnalyst" : A tool for processing and analysing dendrometer data. *Dendrochronologia*. décembre 2020. Vol. 64, pp. 125772. DOI 10.1016/j.dendro.2020.125772.

BAUDET, Alice, PRINGARD, Nathalie. Index acta phytosanitaire 2023. Acta editions. 2023.

BÉRANGER, Mélanie, LEJEUNE, Violaine et SELAM, Marianne. Guide pratique de défense des cultures. Acta editions. 2016.

BRILLI, Federico, LORETO, Francesco et BACCELLI, Ivan, 2019. Exploiting Plant Volatile Organic Compounds (VOCs) in Agriculture to Improve Sustainable Defense Strategies and Productivity of Crops. *Frontiers in Plant Science*. 19 mars 2019. Vol. 10, pp. 264. DOI 10.3389/fpls.2019.00264.

BROWN, Amanda et MYERS, Judith H., 2010. Temporal and spatial variability of rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* populations: is there a role of the alternate host plant *Plantago major*?. *Agricultural and Forest Entomology*. novembre 2010. Vol. 12, n° 4, pp. 333-341. DOI 10.1111/j.1461-9563.2010.00477.x.

CHAMBRES D'AGRICULTURE DU LANGUEDOC ET DU ROUSSILLON. 2024. Sud Arbo : guide de la protection raisonnée et biologique.

CHENAFI, Azzeddine, MONNEY, Philippe, CEYMANN, Maria, ARRIGONI, Eva et BOUDOUKHA, Abderrahmane, 2013. Influence de l'irrigation déficitaire sur le rendement, la qualité de pommes 'Gala' et l'économie en eau. 2013. Vol. 45.

COCKFIELD, Stephen D., BEERS, Elizabeth H., PIKE, Keith S. et GRAF, George, 2011. Biology of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Homoptera: Aphididae), on its summer hosts in eastern Washington. *The Pan-Pacific Entomologist*. octobre 2011. Vol. 87, n° 4, pp. 276-286. DOI 10.3956/2011-30.1.

COMMISSION EUROPÉENNE, 2022. *Règlement d'exécution (UE) 2022/489* [en ligne]. 25 mars 2022. Disponible à l'adresse : <https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/29434eda-ae31-11ec-83e1-01aa75ed71a1/language-fr>

COURTEILLE, Adriana, DARDOURI, Tarek, GALET, Laurent, SYLVAINE, Simon, CHAVE, Marie et LEFÈVRE, Amélie, 2022. Vers l'utilisation de plantes de service pour contribuer à la santé des cultures horticoles. DOI 10.17180/HNTS-9Q26.

CROSS, J.V., CUBISON, S., HARRIS, A. et HARRINGTON, R., 2006. Autumn control of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Passerini), with aphicides. *Crop Protection*. 2006. Vol. 26, n° 8, pp. 1140-1149. DOI 10.1016/j.cropro.2006.10.007.

DARDOURI, Tarek, GAUTIER, Hélène, BEN ISSA, Refka, COSTAGLIOLA, Guy et GOMEZ, Laurent, 2019. Repellence of *MYZUS PERSICAE* (Sulzer): evidence of two modes of action of volatiles from selected living aromatic plants. *Pest Management Science*. juin 2019. Vol. 75, n° 6, pp. 1571-1584. DOI 10.1002/ps.5271.

DARDOURI, Tarek, GOMEZ, Laurent, SCHOENY, Alexandra, COSTAGLIOLA, Guy et GAUTIER, Hélène, 2019. Behavioural response of green peach aphid *Myzus persicae* (Sulzer) to volatiles from different rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) clones. *Agricultural and Forest Entomology*. août 2019. Vol. 21, n° 3, pp. 336-345. DOI 10.1111/afe.12336.

DEGRAVE, Alexandre, 2020. STIMULRAV : Impact des stimulateurs de défense des plantes ou SDP sur un ravageur du pommier, le puceron cendré et sur ses ennemis naturels.

DIB, Hazem, 2010. Rôle des ennemis naturels dans la lutte biologique contre le puceron cendré, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera aphididae) en vergers de pommiers. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques : Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

DIEUDONNÉ, Emma, GAUTIER, Hélène, DARDOURI, Tarek, STAUDT, Michael, COSTAGLIOLA, Guy et GOMEZ, Laurent, 2022. Establishing repellent effects of aromatic companion plants on *Dysaphis plantaginea*, using a new dynamic tubular olfactometer. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2022. Vol. 170, n° 8, pp. 727-743. DOI 10.1111/eea.13194.

DIJAN-CAPORALINO, Caroline, CARAVEL, s, RHINO, Béatrice, LAVOIR, Anne-Violette, VILLENEUVE, François, FOURNET, Sylvain, GAUTIER, Hélène, CHAVE, Marie, CORTESERO, Anne-Marie et NICOT, Phillippe C., 2020. *Agrosystèmes légumiers : les plantes de service contre les bioagresseurs*. CTIFL.

DIXON, A. F. G., 1977. Aphid Ecology: Life Cycles, Polymorphism, and Population Regulation. *Annual Review of Ecology and Systematics*. novembre 1977. Vol. 8, n° 1, pp. 329-353. DOI 10.1146/annurev.es.08.110177.001553.

DURIEUX, Delphine, 2008. Contribution à l'étude des mécanismes de prédation d'*Harmonia axyridis* (Coleoptera : Coccinellidae) Responsables de sa plus grande compétitivité au sein de la guildes des aphidiphages. Mémoire de bioingénieur en Protection des végétaux : Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux. Disponible à l'adresse : <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/32717/1/m%C3%A9moire%20version%20finale.pdf>.

ECOPHYTOPIC, 2019. Recueil de fiches du projet EXPE Ecophyto Pomme. Disponible à l'adresse : https://ecophytopic.fr/sites/default/files/Compil_EXPE%20Ecophyto%20Pomme.pdf.

FAVROT, Armand et MAKOWSKI, David, 2023. Expérimentation : est-il préférable de compter les pucerons ou les plantes infestées ?. Disponible à l'adresse : <http://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/experimentation-est-il-preferable-de-compter-les-pucerons-ou-les-plantes-infestees/>.

GRAF, B., HÖPLI, H.U., HÖHN, H. et SAMIETZ, J., 2006. Temperature effects on egg development of the rosy apple aphid and forecasting of egg hatch. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. juin 2006. Vol. 119, n° 3, pp. 207-211. DOI 10.1111/j.1570-7458.2006.00411.x.

GRECHI, Isabelle, SAUGE, Marie-Hélène, SAUPHANOR, Benoît, HILGERT, Nadine, SENOUSI, Rachid et LESCOURET, Françoise, 2008. How does winter pruning affect peach tree – *Myzus persicae* interactions ? *Entomologia Experimentalis et Applicata*. septembre 2008. Vol. 128, n° 3, pp. 369-379. DOI 10.1111/j.1570-7458.2008.00720.x.

GUÉNARD, Benoît, 2007. Mutualisme fourmis pucerons et guildes aphidiphage associée : le cas de la prédation furtive. Mémoire de maîtrise en Biologie : Université du Québec à Montréal.

HAN, Peng, 2017. Bottom-up effects of fertilization and irrigation on plant-herbivorous insect-natural enemy tri-trophic interactions in agroecosystems. Thèse de doctorat en Biologie et Interactions et Ecologie : Université Nice Sophia Antipolis.

HERVÉ, Maxime, 2021. Aide-mémoire de statistique appliquée à la biologie. Disponible à l'adresse : <https://www.maximeherve.com/r-et-statistiques>.

JALOUX, Bruno, 2011. Cultures associées et contrôle des populations de pucerons, mécanismes et perspectives. Disponible à l'adresse : <https://institut-agro-rennes-angers.hal.science/hal-00745924/document>.

KRÜSI, Bertil, 1981. Phenological methods in permanent plot research : the indicator value of phenological phenomena : a study in limestone grassland in Northern Switzerland = Phänologische Methoden bei Dauerquadratuntersuchungen : der prognostische Wert phänologischer Phänomene : eine Untersuchung in Halbtrockenrasen (Mesobrometum) in der Nordschweiz. 1981. DOI 10.5169/SEALS-308658.

LAMY, Fabrice, 2016. Comprendre et manipuler la communication entre les plantes et les insectes pour protéger les cultures : vers l'élaboration d'une stratégie « Push-Pull » pour lutter contre la mouche du chou (*Delia radicum*). Thèse de Doctorat en Vie-Agro-Santé : Université de Rennes 1.

LAURENT, Anabelle, FAVROT, Armand, MAUPAS, Fabienne, ROYER, Cédric et MAKOWSKI, David, 2022. *Assessment of Non-Neonicotinoid Treatments Against Green Aphids on Sugar Beets*. SSRN Scholarly Paper. 21 juin 2022. Rochester, NY. 4137979. Disponible à l'adresse : <https://papers.ssrn.com/abstract=4137979>.

MIÑARRO, M, HEMPTINNE, J-L et DAPENA, E, 2005. Colonization of apple orchards by predators of *Dysaphis plantaginea* : sequential arrival, response to prey abundance and consequences for biological control. *BioControl*. juin 2005. Vol. 50, n° 3, pp. 403-414. DOI 10.1007/s10526-004-5527-1.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE. 2024. Stratégie Ecophyto 2030. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/strategie-ecophyto-2030>.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE. 2018. Plan Ecophyto II+.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE. 2022. Questions-réponses sur l'arrêté du 20 novembre 2021 relatif à la protection des abeilles et autres pollinisateurs vis-à-vis des produits phytopharmaceutiques.

MORALLO-REJESUS, B. et DECENA, A., 1982. The activity, isolation, purification and identification of the insecticidal principles from Tagetes. *Philipp. J. Crop Sci.* 7, p. 31-36. 1982.

NAOR, Amos, KLEIN, Isaac et DORON, Israel, 1995. Stem Water Potential and Apple Size. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. juillet 1995. Vol. 120, n° 4, pp. 577-582. DOI 10.21273/JASHS.120.4.577.

ORTUÑO, Maria Fernanda, BRITO, Juan José, GARCÍA-ORELLANA, Yelitza, CONEJERO, Wenceslao et TORRECILLAS, Arturo, 2009. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential reference equations for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science*. janvier 2009. Vol. 27, n° 2, pp. 121-127. DOI 10.1007/s00271-008-0126-z.

PARKER, Joyce E., SNYDER, William E., HAMILTON, George C. et RODRIGUEZ-SAONA, Cesar, 2013. Companion Planting and Insect Pest Control. In : *Weed and Pest Control - Conventional and New Challenges*. InTech. Disponible à l'adresse : <http://www.intechopen.com/books/weed-and-pest-control-conventional-and-new-challenges/companion-planting-and-insect-pest-control>.

PICKETT, John A, WOODCOCK, Christine M, MIDEGA, Charles Ao et KHAN, Zeyaur R, 2014. Push-pull farming systems. *Current Opinion in Biotechnology*. avril 2014. Vol. 26, pp. 125-132. DOI 10.1016/j.copbio.2013.12.006.

POTTING, R.P.J., PERRY, J.N. et POWELL, W., 2005. Insect behavioural ecology and other factors affecting the control efficacy of agro-ecosystem diversification strategies. *Ecological Modelling*. mars 2005. Vol. 182, n° 2, pp. 199-216. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2004.07.017.

QUBBAJ, T., REINEKE, A. et ZEBITZ, C. P. W., 2005. Molecular interactions between rosy apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, and resistant and susceptible cultivars of its primary host *Malus domestica*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. avril 2005. Vol. 115, n° 1, pp. 145-152. DOI 10.1111/j.1570-7458.2005.00255.x.

ROBLÈS, Bernard, AVILA, Manuel, DUCULTY, Florent, VRIGNAT, Pascal, BEGOT, Stéphane et KRATZ, Frédéric, 2012. Mesures de pertinence par les critères du "maximum de vraisemblance" de "BIC" et "AIC" appliqués à l'évaluation des paramètres stochastiques de Modèles de Markov Cachés. 2012.

ROBLIN, Chantal, 2012. Coûts de production du pommier en Agriculture biologique. Chambres d'agriculture Provence-Alpes-Côte d'Azur. Disponible à l'adresse : https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/076_Inst-Occitanie/Documents/Productions_techniques/Agriculture_biolgique/Espace_ressource_bio/Co%C3%BBtsProd-RoyalGala-2013.pdf.

ROUSSELIN, Aurélie, 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*). Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques : Université d'Avignon.

ROUSSELIN, Aurélie, SAUGE, Marie-Hélène, JORDAN, Marie-Odile, VERCAMBRE, Gilles, LESCOURRET, Françoise et BEVACQUA, Daniele, 2016. Nitrogen and water supplies affect peach tree-green peach aphid interactions: the key role played by vegetative growth. *Agricultural and Forest Entomology*. novembre 2016. Vol. 18, n° 4, pp. 367-375. DOI 10.1111/afe.12168.

SIMON, Sylvaine et CAPOWIEZ, Yvan, 2012. Rosy apple aphid dynamic on apple in spring. INRAe.

TOMOVA, Blagovesta S, WATERHOUSE, John S et DOBERSKI, Julian, 2005. The effect of fractionated Tagetes oil volatiles on aphid reproduction. 2005.

WYSS, Eric, 1995. The effects of weed strips on aphids and aphidophagous predators in an apple orchard. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. avril 1995. Vol. 75, n° 1, pp. 43-49. DOI 10.1111/j.1570-7458.1995.tb01908.x.

ZUUR, Alain F., IENO, Elena N. et ELPHICK, Chris S., 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems: *Data exploration. Methods in Ecology and Evolution*. mars 2010. Vol. 1, n° 1, pp. 3-14. DOI 10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x.

Sitographie

[1] MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION, 2021. Arrêté du 20 novembre 2021 relatif à la protection des abeilles et des autres insectes pollinisateurs et à la préservation des services de pollinisation lors de l'utilisation des produits phytosanitaires. Disponible à l'adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=s8Q4rOnDPeSNpynq3hZEDuWDIQnj8EG78BD08U7ANE>. [Consulté le 15 mai 2024].

[2] LECOQ, Raphaël, 2023. Retrait de molécules : anticiper davantage et intégrer l'impact économique. Pleinchamp. Disponible à l'adresse : <https://www.pleinchamp.com/actualite/retrait-de-molecules-anticiper-davantage-et-integrer-l-impact-economique>. [Consulté le 17 juillet 2024].

[3] MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2024. Lancement du cycle de réunions « Solutions et alternatives aux produits phytosanitaires interdits ». Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/lancement-du-cycle-de-reunions-solutions-et-alternatives-aux-produits-phytosanitaires-interdits>. [Consulté le 17 juillet 2024].

[4] MOUTERDE, Perrine, 2024. La biodiversité, grande perdante de la crise agricole. Disponible à l'adresse : <https://nouveau.europresse.com/Search/ResultMobile/5>. [Consulté le 17 juillet 2024].

[5] FOUCART, Stéphane, 2024. Plan Ecophyto, une fraude démocratique. Le Monde. [Consulté le 18 juillet 2024].

[6] BEAUFILS, Françoise, 2024. Graph'agri 2023 : Agriculture - Forêt - Pêche - Alimentation - Industries agroalimentaires - Environnement - Territoire. Agreste. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2023Integral/GraphAgri_2023_Accessible-version-integrale.pdf. [Consulté le 22 juillet 2024].

[7] E-PHY, [sans date]. Retrait des produits à base de la substance spirotétramate. Disponible à l'adresse : <https://ephy.anses.fr/actualites/retrait-produits-base-substance-spirot%C3%A9tramate>. [Consulté le 26 juin 2024].

[8] TURPEAU, Evelyne, HULLÉ, Maurice et CHAUBET, Bernard, 2015. Fiche d'identification *Dysaphis* (Pomaphis) *plantaginea* (Passerini, 1860). Encyclop'Aphid. Disponible à l'adresse : <https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/fiche-especes/pucerons/dysaphis/d.-plantaginea/fiche-d-identification>. Consulté le 17 juillet 2024].

[9] TURPEAU, Evelyne, HULLÉ, Maurice et CHAUBET, Bernard, 2010. *Dysaphis* (Pomaphis) *plantaginea* (Passerini, 1860). Encyclop'Aphid. Disponible à l'adresse : <https://www6.inrae.fr/encyclopedie-pucerons/Especes/Pucerons/Dysaphis/D.-plantaginea>. [Consulté le 10 décembre 2023]

[10] JALOUX, Bruno, 2016. *Dysaphis plantaginea* (puceron cendré). Ephytia. Disponible à l'adresse : <https://ephytia.inra.fr/fr/C/21823/Pomme-Biologie-epidemiologie>. [Consulté le 10 décembre 2023].

[11] TURPEAU, Evelyne, HULLÉ, Maurice et CHAUBET, Bernard, 2010. Cycles biologiques. Encyclop'Aphid. Disponible à l'adresse : <https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/qu-est-ce-qu-un-puceron/cycles-biologiques>. [Consulté le 18 juillet 2024].

[12] BLANCARD, D. et NEGRI, M., 2022. Fumagine. Disponible à l'adresse : <https://ephytia.inra.fr/fr/C/26553/Tropifruit-Fumagine>. [Consulté le 12 août 2024].

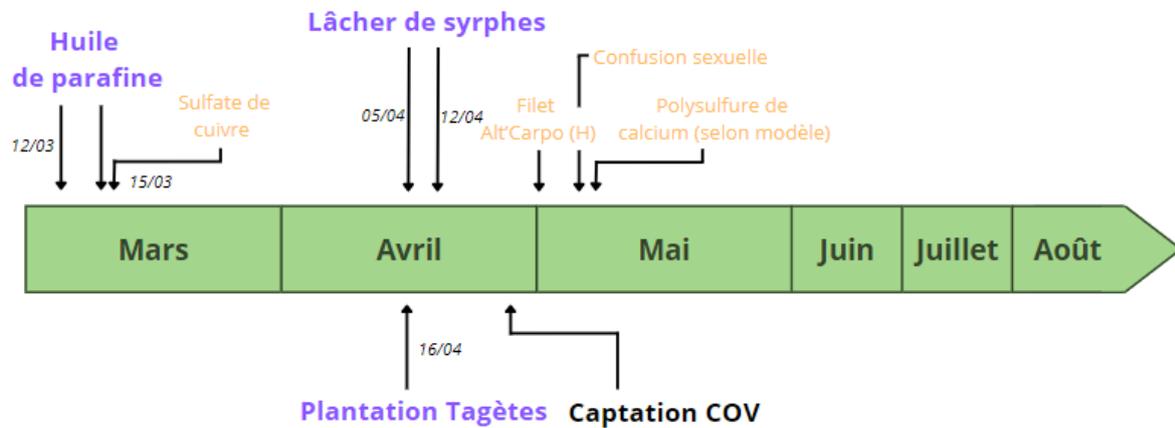
[13] CHAUBET, Bernard, 2024. Pucerons et fourmis : mutualisme. Disponible à l'adresse : <https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/pucerons-et-milieu/pucerons-et-fourmis-mutualisme>. [Consulté le 15 juillet 2024].

[14] LPO, 2014. Techniques de comptage. Disponible à l'adresse : <https://alsace.lpo.fr/index.php/techniques-de-comptage>. [Consulté le 22 juillet 2024].

ANNEXES

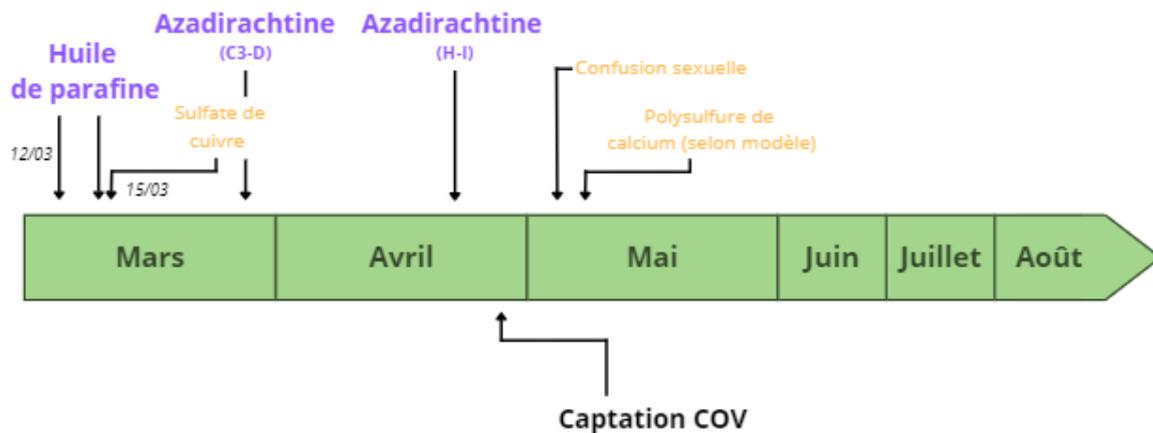
Annexe I : Pratiques culturelles et expérimentales des parcelles E et G

Pratiques culturelles parcelle SIMPA (E)



Pratiques expérimentales:

Pratiques culturelles de référence AB, parcelle REF (G)



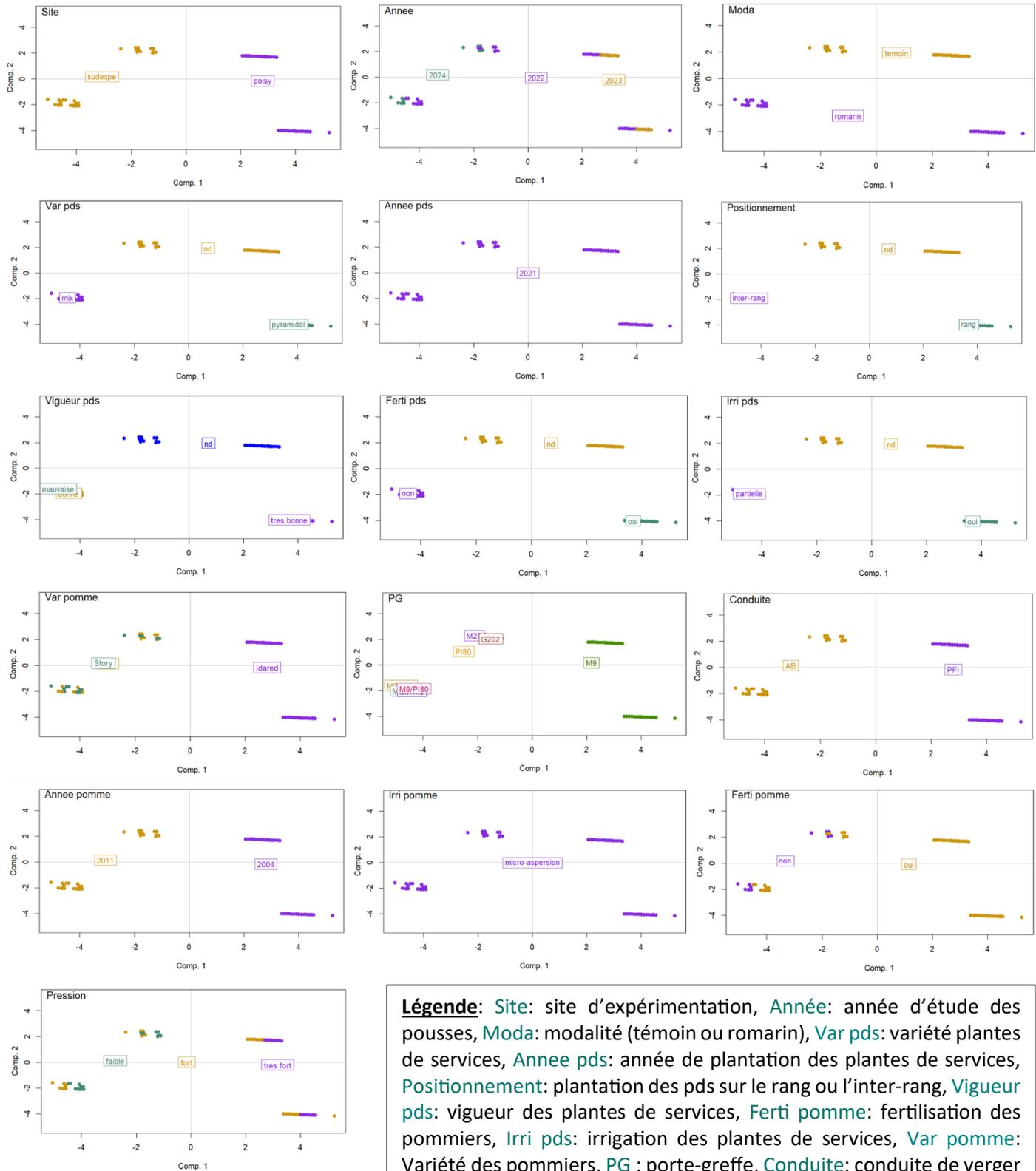
Pratiques expérimentales:

Traitements et mesures de lutte contre le **pucceron cendré** ; contre d'autres ravageurs

Annexe II : Liste des espèces semées dans les bandes fleuries en 2020

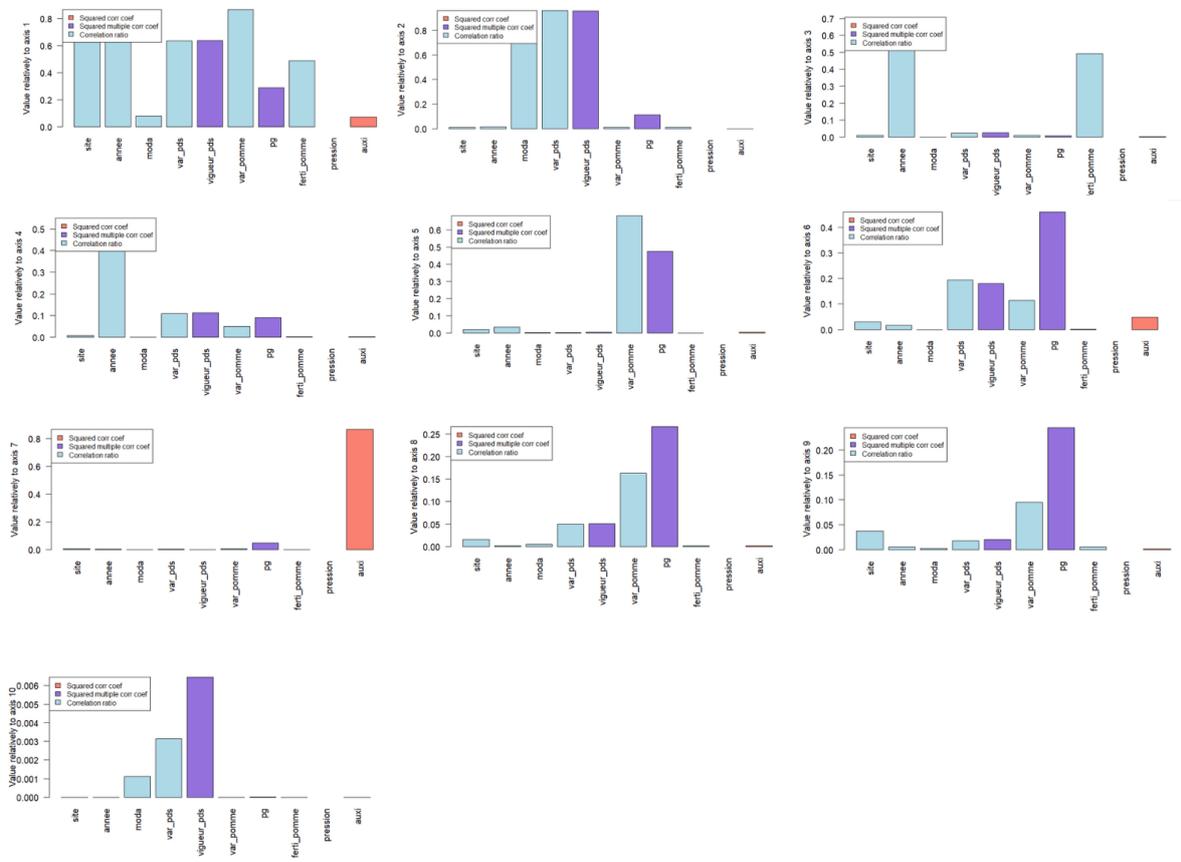
Nom d'espèces	Type biologique
<i>Agrostemma githago</i>	Annuelle
<i>Antirrhinum majus</i>	Vivace
<i>Centaurea cyanus</i>	Annuelle ou Bisannuelle
<i>Centaurea jacea</i>	Vivace
<i>Geranium pratense</i>	Vivace
<i>Geranium pyrenaicum</i>	Vivace
<i>Isatis tinctoria</i>	Bisannuelle
<i>Knautia arvensis</i>	Vivace
<i>Leontodon autumnalis</i>	Vivace
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	Vivace
<i>Papaver rhoeas</i>	Annuelle
<i>Reseda lutea</i>	Annuelle ou Vivace
<i>Silene latifolia</i> subsp. <i>alba</i>	Vivace
<i>Tragopogon pratensis</i>	Bisannuelle

Annexe III : Représentations des pousses selon les facteurs du modèle complet

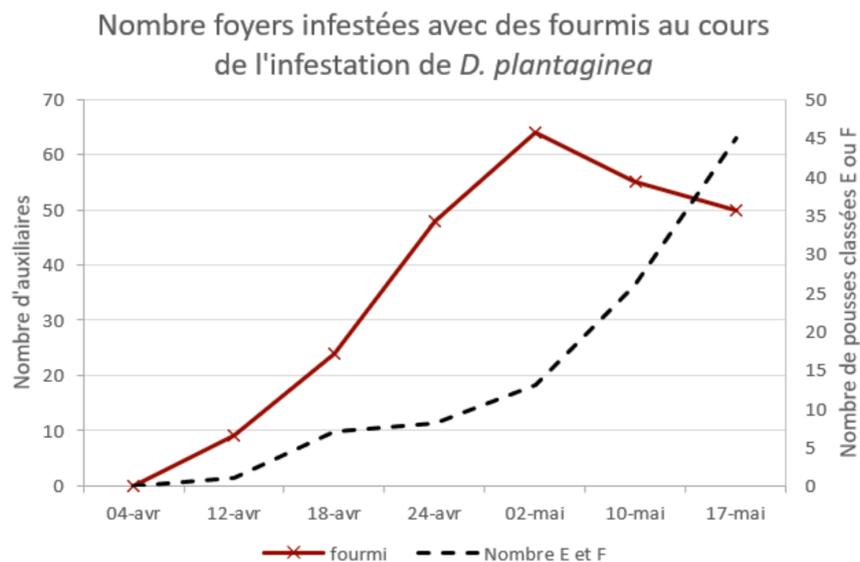
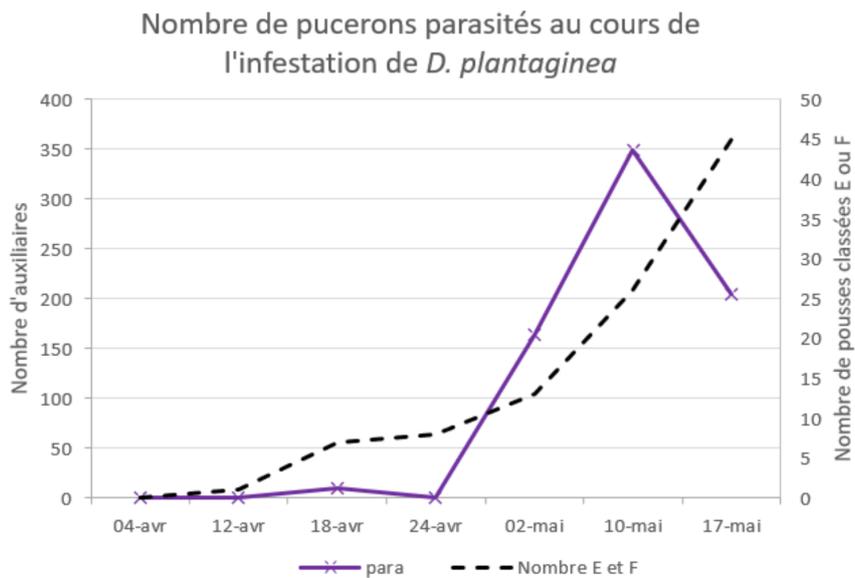
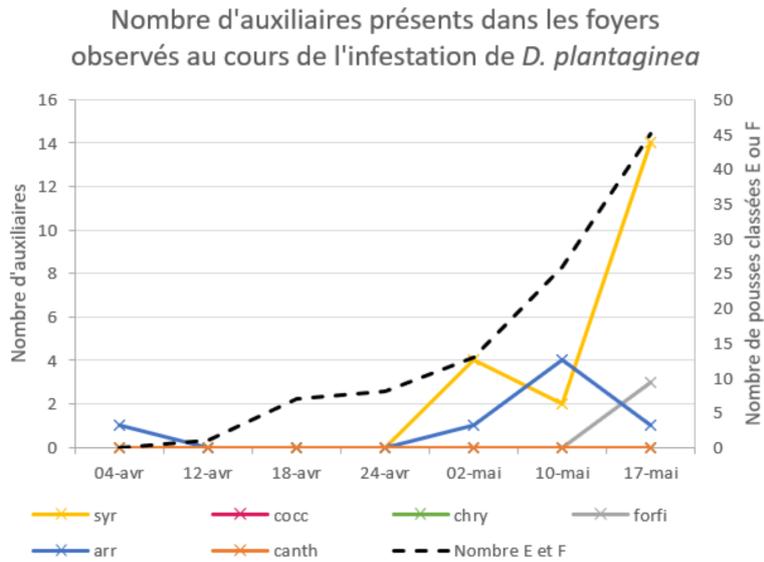


Légende: Site: site d'expérimentation, Année: année d'étude des pousses, Moda: modalité (témoin ou romarin), Var pds: variété plantes de services, Année pds: année de plantation des plantes de services, Positionnement: plantation des pds sur le rang ou l'inter-rang, Vigueur pds: vigueur des plantes de services, Ferti pomme: fertilisation des pommiers, Irri pds: irrigation des plantes de services, Var pomme: Variété des pommiers, PG : porte-greffe, Conduite: conduite de verger (AB ou PFI), Année pomme: année de plantation des pommiers, Irri pomme: Irrigation des pommiers ; Ferti pomme: fertilisation des pommiers, Pression: fréquence d'infestations dans le verger

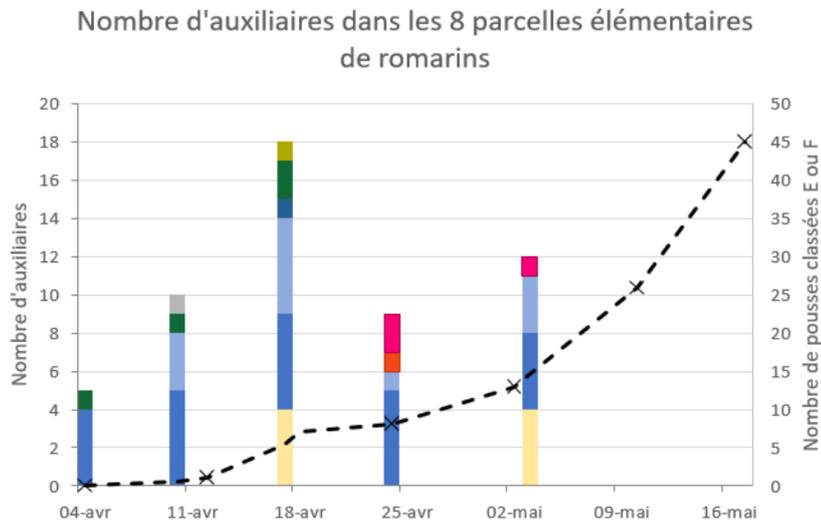
Annexe IV : Contributions des variables non colinéaires aux axes de l'analyse mixte



Annexe V : Auxiliaires, fourmis et pucerons parasités observés dans les foyers de pucerons



Annexe VI : Auxiliaires observés dans les parcelles élémentaires de romarins



Annexe VII : Extraits du cahier de traitement

Date	Parcelle	Produits	Dose appliquée	Remplissage de la cuve	Dose homologuée	IFT
15/05/2024	G Opal	Ovipron extra	18,2L	910L	2L/hL	1
15/03/2024	E Opal	Ovipron extra	18,2L	910L	2L/hL	0,5
19/03/2024	E Story	Ovipron extra	40L	2000L	2L/hL	0,5
19/03/2024	G Opal	Neemazal-T/S	2L/ha	/	2L/ha	1

Substance active ovipron = huile de paraffine

Substance active Neemazal =Azadirachtine

Annexe VIII : Sorties R

1. Classe d'abondance : CLMM appliqué à la date du 24/04

```
> modele1<-clmm(classe~moda+(1|bloc),data=data1, link=c("logit"))
> #Construction du modèle en indiquant le bloc comme un facteur à effet aléatoire et la pousse si on utilise
le modele complet
```

link <chr>	threshold <chr>	nobs <dbl>	logLik <chr>	AIC <chr>	niter <chr>	max.grad <chr>	cond.H <chr>
logit	flexible	336	-234.53	493.06	718(2876)	5.55e-05	8.8e+02

1 row

```
> Anova.clmm(modele1, type=c("II"))
Analysis of Deviance Table (Type II tests)
```

```
Response: classe
      LR Chisq Df Pr(>Chisq)
moda  63.613  6 8.279e-12 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

2. Fréquence d'infestation : GLMM

```
> modele_SIMPAfa<-glmmTMB(A~moda+date+moda:date+(1|bloc),
+                           data=data_SIMPAfa,
+                           family=beta_family(link="probit"))
> #Construction du modèle en indiquant le bloc comme un facteur à effet aléatoire
> summary(modele_SIMPAfa)
Family: beta (probit)
Formula: A ~ moda + date + moda:date + (1 | bloc)
Data: data_SIMPAfa
```

AIC	BIC	logLik	deviance	df.resid
-367.5	-311.6	206.7	-413.5	61

Random effects:

```
Conditional model:
  Groups Name      Variance Std.Dev.
  bloc  (Intercept) 0.01695  0.1302
Number of obs: 84, groups: bloc, 4
```

Dispersion parameter for beta family (): 21.6

```
Conditional model:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   -2.031e+00  2.084e-01 -9.746 < 2e-16 ***
modaM0b       -1.207e-06  2.681e-01  0.000  1.00000
modaM1        -1.479e-06  2.681e-01  0.000  1.00000
modaM2        -4.042e-06  2.681e-01  0.000  0.99999
modaM3        -5.948e-06  2.681e-01  0.000  0.99998
modaM5        -1.033e-05  2.681e-01  0.000  0.99997
modaM6        -7.396e-06  2.681e-01  0.000  0.99998
date02/05/2024  2.488e-01  2.664e-01  0.934  0.35040
date21/05/2024  8.318e-01  2.546e-01  3.268  0.00108 **
modaM0b:date02/05/2024  2.766e-01  3.688e-01  0.750  0.45321
modaM1:date02/05/2024 -1.735e-01  3.797e-01 -0.457  0.64760
modaM2:date02/05/2024 -1.449e-01  3.781e-01 -0.383  0.70161
modaM3:date02/05/2024 -6.648e-02  3.744e-01 -0.178  0.85906
modaM5:date02/05/2024 -2.488e-01  3.780e-01 -0.658  0.51042
modaM6:date02/05/2024 -1.605e-01  3.791e-01 -0.423  0.67199
modaM0b:date21/05/2024 -7.858e-03  3.478e-01 -0.023  0.98197
modaM1:date21/05/2024 -1.102e-02  3.523e-01 -0.031  0.97506
modaM2:date21/05/2024 -4.585e-01  3.612e-01 -1.269  0.20431
modaM3:date21/05/2024 -4.794e-01  3.591e-01 -1.335  0.18190
modaM5:date21/05/2024 -6.041e-01  3.651e-01 -1.655  0.09799 .
modaM6:date21/05/2024 -6.086e-01  3.737e-01 -1.629  0.10340
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

3. Auxiliaires, fourmis et pucerons parasités dans les foyers : GLMM

3. 1. Auxiliaires

```
> #Auxiliaires
> mod1<-glmer(auxi~ moda
+       + date
+       + moda:date
+       + (1|bloc)
+       ,data=data
+       ,family=poisson(link="log"))
> anova(mod1)
Analysis of Variance Table
      npar Sum Sq Mean Sq F value
moda      6  6.7105  1.11842  1.1184
date      6  1.5691  0.26151  0.2615
moda:date 36  2.7252  0.07570  0.0757
```

3. 2. Fourmis

```
> #Fourmis
> mod2<-glmTMB(four~moda
+             +date
+             +moda:date
+             +(1|bloc)
+             ,data=data
+             ,family=beta_family(link="logit"))
> Anova(mod2)
Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

Response: four
      Chisq Df Pr(>Chisq)
moda    10.9479  6  0.09000 .
date    10.9751  6  0.08915 .
moda:date  9.7238 36  1.00000
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

3. 3. Pucerons parasités

```
> #Parasitoïdes
> mod3<-glmer(para~ moda
+       + date
+       + moda:date
+       + (1|bloc)
+       ,data=data
+       ,family=poisson(link="log"))
> anova(mod3)
Analysis of Variance Table
      npar Sum Sq Mean Sq F value
moda      6 212.892  35.482 35.4821
date      6  79.405  13.234 13.2342
moda:date 36  63.875   1.774  1.7743
```

4. Analyse globale : sélection du meilleur modèle CLMM

```
>selection
Global model call: clmm(formula = puceron_cendre ~ moda + site + var_pds + vigueur_pds +
var_pomme + PG + ferti_pomme + pression + auxi + pression:moda +
PG:var_pomme + (1 | bloc), data = data1, na.action = "na.pass",
link = c("logit"))
---
Model selection table
(Int) aux frt_pmm mod PG prs sit var_pds var_pmm vgr_pds mod:prs PG:var_pmm df logLik AIC delta weight
1760 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
1792 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
2016 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
2048 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
1952 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
1984 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
1982 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
1950 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
1790 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
2046 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
1758 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
2014 + -0.7060 + + + + + + + + 23 -4781.930 9609.9 0.00 0.080
928 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
960 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
734 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
990 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
926 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
736 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
768 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
992 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
1024 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
766 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
1022 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
958 + -0.7054 + + + + + + + + 22 -4786.323 9616.6 6.78 0.003
606 + -0.7052 + + + + + + + + 20 -4790.376 9620.8 10.89 0.000
798 + -0.7052 + + + + + + + + 20 -4790.376 9620.8 10.89 0.000
862 + -0.7052 + + + + + + + + 20 -4790.376 9620.8 10.89 0.000
608 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
640 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
800 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
832 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
864 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
896 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
638 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
830 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
894 + -0.7054 + + + + + + + + 21 -4790.372 9622.7 12.88 0.000
1274 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1530 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1436 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1468 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1440 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1472 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1434 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1470 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1248 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1280 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1504 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1536 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1244 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1276 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1500 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1532 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1278 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1534 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1242 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1498 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1438 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
1246 + -0.7071 + + + + + + + + 21 -4803.153 9648.3 38.45 0.000
```

Remarque : Uniquement les 4 premiers modèles ont un delta strictement égalent à 0.

5. Calibre et croissance des fruits : Anova

5. 1. Calibre

```
> mod1<-lmer(Calibre~Trait+Date+Charge+Date:Trait+(1|Arbre/Fruit), data=data)
> Anova(mod1)
```

Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

Response: Calibre

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
Trait	1.7484	1	0.18607
Date	58145.8066	11	< 2e-16 ***
Charge	3.0712	1	0.07969 .
Trait:Date	4.1284	11	0.96601

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

5. 2. Croissance des fruits

```
> modJ<-lmer(CroissanceJ~Trait+Date+Charge+Date:Trait +(1|Arbre/Fruit), data=dataJ)
> Anova(modJ)
```

Analysis of Deviance Table (Type II Wald chisquare tests)

Response: CroissanceJ

	Chisq	Df	Pr(>Chisq)
Trait	0.0000	1	0.9951
Date	848.5918	10	<2e-16 ***
Charge	0.7214	1	0.3957
Trait:Date	11.0974	10	0.3500

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

6. Nombre de fruits pygmées : GLMM

```
> mod1<-lme(fpyg~moda, random=~1|bloc, data=data)
> anova(mod1,test="F")
```

	numDF <int>	denDF <dbl>	F-value <chr>	p-value <chr>
(Intercept)	1	9	7.044837	0.0263
moda	3	9	0.647354	0.6040

2 rows

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Protection des plantes et environnement parcours horticulture Enseignant référent : Bruno Jaloux
Auteur : Rémi Ducasse Date de naissance* : 14/07/2000	Organisme d'accueil : SudExpé Adresse : Mas de Carrière, 34590 Marsillargues
Nb pages : 22 pages Annexe(s) : 8	
Année de soutenance : 2024	Maître de stage : Bertrand Alison
Titre français : Évaluation des plantes de services comme alternative aux produits phytopharmaceutiques. Titre anglais : Evaluation of companion plants as an alternative to synthetic phytosanitary products.	
Résumé (1600 caractères maximum) : Les plantes de services semblent être une alternative à l'utilisation de produits phytopharmaceutiques de synthèse. Nous étudions si elles sont, en effet, une alternative pertinente, grâce à un modèle biologique, celui de <i>Dysaphis plantaginea</i> (Passerini, 1860), également appelé puceron cendré du pommier. Les plantes de services comme le romarin ou la tagète émettent des composés organiques volatils (COV), qui ont des propriétés répulsives ou pouvant affecter le développement du puceron cendré. Notre essai a mis en évidence que le romarin agit sur l'abondance du puceron cendré à l'échelle d'une feuille, mais il n'a pas d'impact sur la fréquence de pousses touchées. La parcelle présente une forte pression d'escargots et de lapins, à laquelle les tagètes n'ont pas survécu. Nous n'avons pas de résultats les concernant. Grâce à une analyse statistique globale, nous avons trouvé que la variété des pommiers, le porte-greffe, la pression de puceron dans le verger et la présence d'auxiliaires influencent l'abondance du puceron dans les foyers. Enfin, l'un des éléments essentiels pour que les plantes de services soient une alternative pertinente, est leur capacité à être mises en place dans un système arboricole. Cependant, les romarins induisent une concurrence hydrique avec le pommier et peuvent aussi provoquer une augmentation des interventions dans le verger.	
Abstract (1600 caractères maximum) : Companion plants are an interesting way to avoid the use of synthetic phytosanitary products. Based on the biological model of <i>Dysaphis plantaginea</i> (Passerini, 1860), the Rosy Apple Aphid (RAA), we study if companion plants are a relevant alternative. Companion plants such as rosemary or French marigold emit volatile organic compounds (VOCs), which are able to repel or limit the development of aphids. Our trial to test the efficacy of these plants shows rosemary has an effect on the abundance of RAA while there is no effect on the frequency of attacked leaves in the orchard. We did not obtain any results on French marigold due to the infestation of rabbits and snails. Through a global data analysis, we found that the variety of apple trees, rootstock, presence of natural enemies, and infestation pressure on the orchard have an effect on the abundance of RAA. Finally, the key to the adoption of companion plants is their ability to be implemented in a cultural system. However, in the context of drought in the summer in the South-East of France, rosemary in row is competing with apple trees for hydric resources. Other issues occur such as an increase in interventions in the orchards.	
Mots-clés : Puceron cendré du pommier, plantes de services, romarin Key Words : Rosy Apple Aphid, companion plants, rosemary	