



HAL
open science

Etude des dynamiques annuelles des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels en verger de pommiers conduit en agriculture biologique, en lien avec le contexte agroforestier et les infrastructures dites agroécologiques

Marion Dohen

► To cite this version:

Marion Dohen. Etude des dynamiques annuelles des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels en verger de pommiers conduit en agriculture biologique, en lien avec le contexte agroforestier et les infrastructures dites agroécologiques. ISA Lille. 2021, pp.1-120. hal-04157705

HAL Id: hal-04157705

<https://hal.inrae.fr/hal-04157705>

Submitted on 10 Jul 2023

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.



JUNIA ISA Lille
48 boulevard Vauban
59046 Lille cedex



UMR ABSys – Agrosystèmes Biodiversifiés
Centre de recherche INRAE
2 Place Viala – Bât. 27
34000 Occitanie Montpellier

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur diplômé de l'Institut
Supérieur d'Agriculture – JUNIA

Etude des dynamiques annuelles des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels en verger de pommiers conduit en agriculture biologique, en lien avec le contexte agroforestier et les infrastructures dites agroécologiques



Par Marie DOHEN

Promotion ISA 54

Octobre 2021

Année académique 2020-2021

Maître de stage : Pierre-Éric LAURI

Enseignant référent : Jérôme MUCHEMBLED

Résumé

Trouver des méthodes alternatives afin de réduire l'usage des pesticides dans les vergers de pommiers est primordial. Le contrôle biologique des ravageurs constitue un des services écosystémiques pour lequel les attentes sont les plus fortes. Il peut être favorisé par l'intégration d'infrastructures agroécologiques (bandes fleuries, haies, etc.), mises en œuvre dans le cadre de la lutte par conservation, et l'agroforesterie. La parcelle GAFAM conduite en agriculture biologique et bas intrants, aspire à cultiver du pommier entre une strate haute (noyer à bois) et une strate basse (bandes enherbées et fleuries). Le tout est bordé de haies. **Le contexte agroforestier et la présence d'un cortège d'infrastructures agroécologiques impactent-ils les mécanismes de régulation biologique des principaux ravageurs du pommier que sont le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*), le puceron vert (*Aphis pomi*) et le carpocapse (*Cydia pomonella*) ?** Les suivis des dynamiques de ces ravageurs et de leurs ennemis naturels sont réalisés sur un échantillon de 45 pommiers en fonction d'un gradient de distance aux noyers. Les résultats obtenus montrent que la dynamique de distribution des ennemis naturels n'est pas liée à la proximité des noyers mais dépend de la dynamique de distribution des pucerons. La dynamique d'infestation des pucerons serait davantage liée à l'impact des noyers sur leurs préférences microclimatiques plutôt qu'à l'impact des noyers sur leurs ennemis naturels et le contrôle biologique connexe. La proximité des noyers n'influence pas significativement l'incidence de la première génération de *C. pomonella*, mais le suivi de la deuxième génération compléterait ces résultats. Le cortège d'IAE est peuplé par une diversité d'invertébrés mais le rôle précis de cette diversité végétale sur les auxiliaires et leur action de régulation biologique des ravageurs doit être approfondi. Ces résultats doivent être nuancés au regard du dispositif expérimental et de la méthodologie employée.

Mots-clés : Pommiers – Agroforesterie – Lutte biologique par conservation – Pucerons - Carpocapse

Abstract

Finding alternative methods to reduce the use of pesticides in apple orchards is critical. Biological pest control is one of the ecosystem services for which expectations are highest. It can be promoted by the integration of agroecological infrastructures (flowering strips, hedges, etc.), implemented in the context of conservation biological control, and agroforestry. The GAFAM plot, conducted in organic agriculture and low inputs, aspires to grow apple trees between a high stratum (walnut trees) and a low stratum (grassy and flowering strips). The whole is lined with hedges. **Do the agroforestry context and the presence of a cortège of agroecological infrastructures affect the biological control mechanisms of the main apple pests such as the rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*), the green apple aphid (*Aphis pomi*) and the codling moth (*Cydia pomonella*)?** The dynamics of these pests and their natural enemies are tracked on a sample of 45 apple trees according to a distance gradient to walnut trees. The results show that the distribution dynamics of natural enemies are not related to the proximity of walnut trees but depends on the distribution dynamics of aphids. The dynamics of aphid infestation are thought to be more related to the impact of walnut trees on their microclimatic preferences than to the impact of walnut trees on their natural enemies and related biological control. Proximity to walnut trees does not significantly influence the incidence of the first generation of *C. pomonella*, but the monitoring of the second generation would complement these results. The cortège of agroecological infrastructures is populated by a diversity of invertebrates but the precise role of this plant diversity on the natural enemies and their biological control of pests needs to be deepened. These results must be qualified in terms of the experimental design and methodology used.

Keywords: Apple trees – Agroforestry – Conservation biological control – Aphids – Codling moth

Remerciements

Je remercie particulièrement mon maître de stage Monsieur LAURI Pierre-Eric, ingénieur de recherche hors-classe et directeur adjoint de l'UMR ABSys, pour m'avoir encadrée, conseillée, rassurée, soutenue et suivie tout au long de l'avancement du stage ainsi que pour m'avoir accordé du temps pour répondre à mes nombreuses interrogations. Merci également pour tous ces échanges enrichissants et variés que nous avons pu partager.

De plus, je remercie, Monsieur MUCHEMBLED Jérôme, enseignant chercheur à JUNIA ISA Lille et mon professeur référent, pour ses conseils lors de la rédaction de ce mémoire. Egalement, je tiens à remercier Madame SAHMER Karin, enseignante chercheuse à JUNIA ISA Lille, pour m'avoir aidée et guidée lors de la phase d'analyses statistiques de mes résultats.

Je tiens à remercier Madame SIMON Sylvaine et Madame MOREL Karine pour leur aide lors de la phase d'identification des insectes récoltés dans les pièges de type pots barber et assiettes colorées.

Puis, je remercie l'ensemble de l'équipe de l'UMR ABSys, pour m'avoir accordé la permission d'accéder aux informations, aux protocoles et aux matériels nécessaires à la réalisation de mes missions et de mon mémoire.

Merci à l'ensemble des acteurs du projet ALTO pour tous les échanges, les discussions et les débats: notamment Monsieur LAURI Pierre-Eric, Madame SIMON Sylvaine, Monsieur RICARD Jean-Michel, Madame ALAPHILIPPE Aude ; ainsi qu'aux partenaires FRANCK Pierre et THOMAS Cécile pour m'avoir donné accès au matériel nécessaire à la création des cartes de prédation.

Aussi, je remercie l'ensemble des stagiaires rencontrés tout au long de cette période, pour leur accueil, leur sympathie, leur bonne humeur et leur soutien tout au long de ce stage. Sans eux, l'ambiance au travail n'aurait pas été la même. Egalement, je remercie ma petite sœur pour m'avoir fait partager sa joie de vivre et m'avoir ainsi soutenue dans mes efforts.

Enfin, mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenue, encouragée et aidée. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Sigles et abréviations

A. pomi : *Aphis pomi*

AB : Agriculture Biologique

AE : AgroEcologie

ALTO : système en Arboriculture et Transition agrOécologique

BE : Bande Enherbée

BF : Bande Fleurie

COV : Composés Organiques Volatiles

C. pomonella : *Cydia pomonella*

c.-à-d. : c'est-à-dire

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

D. plantaginea : *Dysaphis plantaginea*

et *al.* : Et (les) autres

GAFAM : Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean

ha : hectare(s)

IAE : Infrastructure AgroEcologique

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires

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

kg : kilogramme(s)

MEA : Millenium Ecosystems Assessment

mm : millimètre(s)

NA : Non disponible (Not Available)

p. ex. : par exemple

PFI : Production Fruitière Intégrée

SAU : Surface Agricole Utile

UERI : Unité Expérimentale Recherches Intégrées

UMR ABSys : Unité Mixte de Recherche ABSys – Agrosystème Biodiversifiés

Sommaire

Introduction	1
1. Cadre de l'étude.....	2
1.1. Présentation de l'entreprise d'accueil	2
1.2. Présentation du projet exploratoire ALTO	2
2. Contexte, état de l'art et problématique.....	3
2.1. Les enjeux de la pomiculture.....	3
2.1.1. Quelques rappels taxonomiques sur le pommier	3
2.1.2. Etat des lieux de la production de pommes	3
2.1.3. Une dépendance accrue aux pesticides pour faire face aux attaques des ravageurs..	4
2.1.4. A la recherche d'un système de production de pommes plus durable	12
2.2. L'agrobiodiversité : une alternative pour répondre à ces enjeux.....	13
2.2.1. L'agriculture : une relation contrariée avec la biodiversité	13
2.2.2. Services écosystémiques de régulation biologique et intérêts des auxiliaires	14
2.2.3. La lutte biologique par conservation : connaissances et perspectives.....	17
2.3. La diversification des IAE au sein des vergers : clé d'une régulation biologique efficace ?	19
2.3.1. La biodiversité en arboriculture fruitière et ses spécificités	19
2.3.2. L'intégration d'IAE innovantes : le cas des vergers agroforestiers	20
2.3.3. Les limites de l'impact de la diversification parcellaire sur la régulation biologique	22
2.4. Question de recherche	23
3. Méthodologie et moyens mis en œuvre.....	24
3.1. Description de la parcelle étudiée	24
3.1.1. Situation géographique, climatique et pédologique de la parcelle étudiée	24
3.1.2. Le dispositif expérimental : historique, matériel végétal et organisation/design	24
3.1.3. Itinéraire technique de la parcelle étudiée.....	26
3.2. Variables étudiées et protocoles suivis	27
3.2.1. Méthodes et protocoles de suivi des ravageurs (pucerons et carpocapse)	27
3.2.2. Description du complexe d'ennemis naturels sur la période d'infestation.....	29
3.3. Analyse des données et statistiques	31
4. Résultats.....	33
4.1. Suivis des ravageurs (pucerons et carpocapse)	33
4.1.1. Cas du puceron cendré (<i>Dysaphis plantaginea</i>)	33
4.1.2. Cas du puceron vert (<i>Aphis pomi</i>)	36
4.1.3. Cas du carpocapse (<i>Cydia pomonella</i>)	39

4.2.	Suivi du service de prédation	42
4.2.1.	Suivi de la prédation des œufs de carpocapse	42
4.2.2.	Suivi de la prédation du puceron <i>Acyrtosiphon pisum</i>	43
4.3.	Suivi du complexe d'arthropodes (notamment des ennemis naturels)	44
4.3.1.	Dans les colonies de <i>D. plantaginea</i>	44
4.3.2.	Dans les colonies de <i>A. pomi</i>	45
4.3.3.	Dans les pommiers (en incluant les auxiliaires comptés dans les foyers)	46
4.3.4.	Dans les IAE de type BE, BF, haies et peupliers conduits en TCR.....	47
5.	Discussion et perspectives.....	49
5.1.	Influence de la proximité des noyers sur les dynamiques des pucerons	49
5.1.1.	Une faible infestation de la parcelle GAFAM en général	49
5.1.2.	Une dynamique d'infestation rythmée par la prédation et migration des pucerons	49
5.1.3.	Un facteur bloc impactant peu la dynamique des communautés d'arthropodes.....	50
5.1.4.	Une dispersion des colonies inversée entre le puceron cendré et le puceron vert ...	51
5.1.5.	Une distinction entre dissémination des foyers et dynamique au sein des foyers....	52
5.1.6.	Des auxiliaires dans les foyers peu impactés par le contexte agroforestier	52
5.1.7.	Un potentiel de prédation des pucerons bien présent dans la parcelle GAFAM	53
5.1.8.	Limites éventuelles, perspectives, ouvertures possibles et recommandations	53
5.2.	Influence de la proximité des noyers sur l'incidence du carpocapse	54
5.2.1.	Une infestation modeste pour la première génération de carpocapse.....	54
5.2.2.	Une incidence du carpocapse allant en crescendo au cours du temps	54
5.2.3.	Une non-significativité du contexte agroforestier mais une tendance possible.....	55
5.2.4.	Une incidence supérieure dans le bloc 2	55
5.2.5.	Un potentiel de prédation des œufs de carpocapse bien présent.....	55
5.2.6.	Limites éventuelles, perspectives, ouvertures possibles et recommandations	55
5.3.	Diversité végétale et invertébrés présents dans la parcelle	56
5.4.	Validité des modèles statistiques utilisés	57
5.5.	Limites du dispositif expérimental en général	58
5.6.	Perspectives générales et communes aux suivis des deux ravageurs	58
	Conclusion.....	60
	Références bibliographiques	61
	Liste des annexes	76
	Annexes.....	78
	Tables des figures	110
	Table des tableaux.....	112

Introduction

Avec près de 1.6 millions de tonnes produites en 2019, la France est le troisième producteur européen de pommes, derrière la Pologne et l'Italie (France Agrimer, 2020 ; Agreste(a), 2020). Toutefois, les vergers de pommiers actuels sont gérés intensivement. Ils sont composés d'une densité de plantation importante et d'un unique cultivar. Ce contexte peu diversifié rend difficile la gestion des maladies et des ravageurs. La productivité et la qualité esthétique des fruits sont ainsi maintenues au détriment d'une dépendance croissante vis-à-vis des intrants externes et plus particulièrement des pesticides. Les pommes sont notamment l'un des fruits les plus traités en France (Agreste, 2018).

Cette dépendance est aujourd'hui remise en question en raison des risques sur la santé des consommateurs, de la pollution de l'environnement, de la perte de la biodiversité, ou encore des phénomènes de résistance. Différents concepts ont été développés ouvrant la voie vers des systèmes de production de pommes plus durables : la production fruitière intégrée, la production biologique et l'agroécologie. Ils regroupent un objectif commun : produire en s'appuyant sur les services écosystémiques. Dans les vergers de pommiers du Sud-Est, le contrôle biologique des bioagresseurs, comme le puceron ou encore le carpocapse, constitue un des services pour lesquels les attentes sont les plus fortes. Il est issu de l'action conjointe d'ennemis naturels dits auxiliaires et a pour conséquence de réduire l'abondance des ravageurs en-dessous d'un seuil de nuisibilité. Toutefois, il n'est naturellement pas toujours suffisant pour descendre sous ce seuil.

L'hypothèse sur laquelle portent de nombreux travaux actuels est que l'augmentation de la diversité fonctionnelle végétale ou encore la diversification des strates productives et non-productives des cultures sont des moyens efficaces pour optimiser les régulations biologiques. On parle d'IAE (Infrastructures AgroEcologiques) telles que les haies, les BF (Bandes Fleuries), les BE (Bandes Enherbées), etc. Elles sont mises en œuvre dans le cadre de la lutte biologique par conservation. Cette piste est envisagée dans les vergers qui, par leur pérennité et leur complexité, sont plus susceptibles d'abriter une faune auxiliaire stable et diversifiée. De plus, l'agroforesterie, associant sur une même parcelle des espèces ligneuses, arbustives et herbacées, contribuerait à une diversification spatiale et temporelle des vergers et serait donc une stratégie de culture potentiellement pertinente.

Dans ce contexte, l'UMR ABSys (Unité Mixte de Recherche ABSys - Agrosystèmes Biodiversifiés) propose, à travers ce stage, d'évaluer l'impact du contexte agroforestier, et en parallèle celui du cortège d'IAE, sur les mécanismes de régulation biologique du puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*), du puceron vert (*Aphis pomi*) et du carpocapse (*Cydia pomonella*). Elle s'appuie sur le dispositif de recherche GAFAM (Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean https://umr-absys.cirad.fr/content/download/4149/31272/version/1/file/Livret+ALTO+Restincli%C3%A8res_Fr+1_6.03.2020.pdf). Ce dernier, conduit en Agriculture Biologique (AB) et bas niveaux d'intrants, vise à cultiver du pommier entre une strate haute composée de noyer à bois (10-15 m) et une strate basse composée à la fois d'une BE de légumineuses (sainfoin) et d'une BF (phacélie). Le tout étant bordé de différentes haies.

Une première partie de ce rapport comprendra une description rapide de l'unité d'accueil. Une deuxième partie traitera du contexte de l'étude en explicitant des notions essentielles comme les enjeux de la pomiculture, les notions de services écosystémiques, d'IAE, de lutte par conservation, et enfin d'agroforesterie. Elle amènera à la problématique de ce stage. Une troisième partie présentera la méthodologie et les moyens mis en œuvre pour obtenir les résultats souhaités. Une quatrième partie abordera l'analyse des résultats obtenus via les études statistiques réalisées. Enfin, une discussion permettra d'interpréter de manière scientifique et argumentée les résultats et les perspectives qu'ils dégagent avant de terminer par la conclusion de cette étude.

1. Cadre de l'étude

1.1. Présentation de l'entreprise d'accueil

Ce stage est proposé par l'UMR ABSys. Cette UMR est rattachée à INRAE, au Cirad, à Montpellier SupAgro et au Ciheam-IAMM. Le siège de l'unité est localisé à Montpellier, plus précisément sur le Campus de la Gaillarde (Montpellier SupAgro). Au 1er janvier 2021, 51 personnes travaillent au sein de l'unité de façon permanente dont une partie sur des terrains tropicaux. L'objectif global de l'UMR ABSys consiste à accompagner la transition écologique des agrosystèmes structurés autour des plantes pérennes en suivant une démarche scientifique centrale relevant de l'agronomie systémique et de l'agroécologie (voir figure 1). Ainsi les agrosystèmes de plantes pérennes sont appréhendés dans une large gamme d'environnements méditerranéens et tropicaux. L'orientation scientifique générale est basée sur l'hypothèse que la biodiversité dans les agrosystèmes est une clé de la transition agroécologique et notamment que la plurispécificité végétale est un levier majeur de l'intensification écologique des systèmes de cultures pérennes (HCERES, 2020).

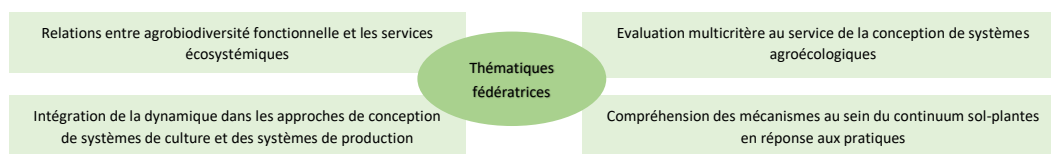


Figure 1 : Les grandes thématiques fédératrices de l'UMR ABSys (HCERES, 2020)

1.2. Présentation du projet exploratoire ALTO

Ce stage s'insère dans le programme multi-sites ALTO (Systèmes en Arboriculture et Transition agrOécologique), en réponse à l'appel à projet Ecophyto2 EXPE. Il est coordonné par Sylvaine Simon, UERI Gotheron. Son objectif général est de développer de nouveaux systèmes de production de fruits très bas intrants, voire sans pesticides, en proposant une démarche interdisciplinaire et multi-acteurs générique. Il part de l'hypothèse qu'il est nécessaire de repenser l'agroécosystème, sa composition, sa diversité et son agencement, les choix techniques et les pratiques afin de produire des fruits en s'appuyant en priorité sur les services écosystémiques dont la régulation biologique (voir figure 2).

- 1 **INTENSIFICATION ECOLOGIQUE** : Pour augmenter la résilience et l'autonomie du système vis-à-vis des bioagresseurs (effet barrière et dilution, push-pull, matériel végétal fruitier peu sensible aux bioagresseurs, abondance et diversité des auxiliaires et des décomposeurs, etc.).
- 2 **OPTIMISATION DE L'AGENCEMENT SPATIAL ET TEMPOREL** : Pour le partage des ressources et pour organiser le travail dans un espace multi-espèces voire multi-strates.
- 3 **APPROCHE FONCTIONNELLE GÉNÉRIQUE DE RECONCEPTION** : Pour utiliser les fonctions des plantes à associer et les traits de vie des bioagresseurs et des auxiliaires.
- 4 **DEMARCHE DE CO-CONCEPTION** : Pour créer une dynamique associant les acteurs de la filière et pouvoir concevoir, faire évoluer et évaluer les dispositifs expérimentaux et plus largement interagir avec différents publics (dont le réseau FERME).

Figure 2 : Les bases de reconception des vergers d'après le projet ALTO (Cuypers et al., 2019).

Ce projet exploratoire s'appuie sur trois dispositifs expérimentaux. Les dispositifs de INRAE à Gotheron (Drôme) et du CTIFL Balandran (Gard) visent à évaluer les services écosystémiques (dont la régulation naturelle), respectivement dans un prototype dit "pommier centré" conçu *de novo* implanté en février 2018 (0 IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement) total) et un verger AB en place à diversifier pas à pas (0 IFT hors biocontrôle et cuivre). Le troisième dispositif appelé GAFAM (sur lequel repose ce stage), mis en place en 2016, vise à analyser les interactions inter-strates pour le partage des ressources dans l'espace et le temps dans un agroécosystème composé de pommiers associés à des noyers forestiers (AB, biocontrôle privilégié) sur le site agroforestier de Restinclières (Hérault, INRAE UMR ABSys). Le but étant de concevoir des systèmes diversifiés multi strates.

2. Contexte, état de l'art et problématique

2.1. Les enjeux de la pomiculture

2.1.1. Quelques rappels taxonomiques sur le pommier

Le projet dans lequel s'insère ce stage porte sur une espèce fruitière pérenne tempérée majeure aux niveaux national et mondial, le pommier. Il s'agit d'un arbre fruitier appartenant à la famille des Rosacées, à la sous-famille des Pomoïdées et au genre *Malus*. Les pommiers sont des plantes pérennes, c.-à-d. (c'est-à-dire) implantés pour une à plusieurs décennies, par opposition aux cultures dites annuelles dont le cycle de culture et de vie est de quelques mois seulement au cours d'une même année. Le genre *Malus* comprend 25 à 30 espèces suivant les botanistes et plusieurs sous-espèces. L'espèce la plus importante, sur le plan de l'alimentation humaine, est le pommier domestique, *Malus domestica* (Trillot et al., 2002 ; Ricard et al., 2012).



Figure 3 : Fleurs du *M. domestica*



Figure 4 : Fruits du *M. domestica*

M. domestica est un arbre hermaphrodite à feuilles caduques. Selon les variétés, il mesure de 2 à 15 mètres. Il fleurit en avril dans le Sud-Est de la France et ses fleurs sont blanches ou roses, parfois rouges et groupées en petites ombelles (voir figure 3). La floraison est souvent décorative. Les fruits obtenus sont généralement acides (pommes à cidres) ou sucrés (pommes à couteau ou de table) et de couleurs variables : ils peuvent être entièrement rouges, verts ou jaunes, ou être bicolores et porter, p. ex. (par exemple), des rayures rouges sur fond jaune ou vert (voir figure 4) (Rieger, 2006 ; Trillot, 2002 ; Inspection.canada.ca, 2014).

2.1.2. Etat des lieux de la production de pommes

2.1.2.1. La pomme, un fruit à succès

L'Europe est l'un des premiers bassins de production et consommation de pommes au monde. Avec près de 1.6 millions de tonnes produites en 2019, la France est le troisième producteur européen de pommes, derrière la Pologne et l'Italie (voir tableau 1) (France Agrimer, 2020 ; Agreste(a), 2020).

Tableau 1 : La production européenne de pommes (France Agrimer, 2020).

en milliers de tonnes	2016	2017	2018	2019	variation 2018 / moyenne triennale
Pologne	4 035	2 870	4 810	2 710	-31 %
Italie	2 272	1 704	2 264	2 195	+6 %
France	1 515	1 424	1 477	1 652	+12 %
Allemagne	1 033	597	1 093	912	0 %
Espagne	495	480	476	542	+12 %
Hongrie	498	530	782	452	-25 %
Roumanie	327	230	425	319	-3 %
Portugal	263	314	267	307	+9 %
Pays-Bas	317	228	267	285	+5 %
Grèce	259	231	301	275	+4 %
Total UE 28	11 834	9 251	13 275	10 556	-8 %

Il s'agit du fruit rencontrant le plus de succès auprès des Français, devant l'orange et la banane. Les Français en consomment environ 20 kg (kilogrammes) chaque année (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2019). En France, la pomme est principalement cultivée dans les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur (23 % de la production nationale en 2019), Pays de la Loire (17 %), Occitanie (21 %) et Nouvelle-Aquitaine (21 %) (Agreste(b), 2020).

2.1.2.2. Une production de pommes en proie à l'intensification

Au cours des dernières décennies, et surtout après la fin de la Seconde Guerre mondiale, la productivité de la pomme (c.-à-d. le rendement par unité de surface) a augmenté de façon appréciable (voir figure 5) en raison de l'optimisation du système de production qui combine divers éléments.

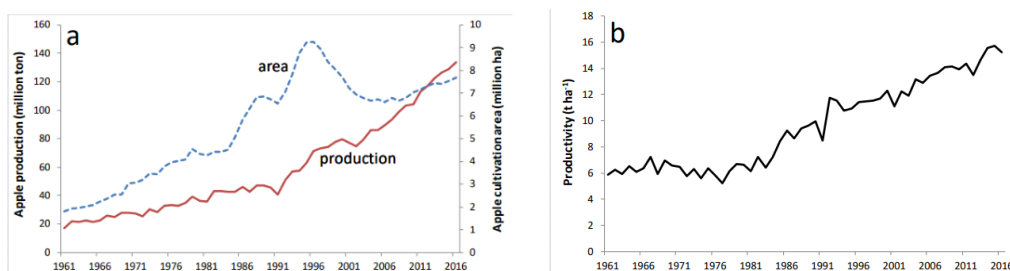


Figure 5 : Progress in apple production (million ton) and cultivation area (million ha) (a), and apple productivity (t ha⁻¹) (b) in total world from 1961 to 2016 (FAO, 2018)

Ces éléments de croissance reposent sur : (i) l'utilisation d'un matériel végétal hautement performant avec p. ex. la sélection génétique de nouveaux cultivars et/ou porte-greffes à haute qualité esthétique et à longue durée de conservation (Brown et Maloney, 2003) ; (ii) une modification des techniques de culture avec l'optimisation de la conception et de la gestion des vergers (disposition des arbres, densité des plantes, système de soutien, etc.) et l'optimisation de la formation des arbres (définie comme les orientations globales imposées aux branches et à l'arbre) et de l'élagage (définie comme la coupe de certaines branches de l'arbre) (Barritt, 1992 ; Robinson, 2003). Ainsi, les vergers de pommiers sont gérés intensivement, le plus souvent concentrés dans l'espace, dans des bassins de production où ils sont dominants ou en quasi-monoculture, et composés d'une densité de plantation importante et de quelques cultivars seulement (Aubertot et *al.*, 2005 ; Lauri et *al.*, 2019). Le plan de plantation est généralement uniforme, homogène et symétrique, souvent associé à une stratégie dite « sans mauvaises herbes » (ou « sol nu ») éradiquant toute végétation sur le sol du verger (voire aux alentours). Ces systèmes simplifiés et donc pauvres en interactions biotiques (interactions entre les êtres vivants au même moment dans un même lieu), ont transformé les écosystèmes cultivés en de simples matrices essentiellement abiotiques (milieux dépourvus d'êtres vivants en raison des conditions extrêmes qui y règnent), supports de ce que l'homme y apporte (Chevassus-au-Louis, 2012). Ils dépendent désormais des herbicides pour limiter la concurrence pour l'eau et les nutriments mais également des traitements phytosanitaires pour lutter contre les ravageurs et les maladies (Lauri et *al.*, 2020).

2.1.3. Une dépendance accrue aux pesticides pour faire face aux attaques des ravageurs

2.1.3.1. *La pomme, un des fruits les plus traités aux pesticides*

Le contexte peu diversifié des vergers de pommiers actuels, associé à la permanence des arbres hôtes (cycle long), avec le maintien et le développement d'un inoculum de pathogènes année après année, rend difficile la gestion des maladies et des ravageurs (Aubertot et *al.*, 2005 ; Castel et *al.*, 2019). Les bioagresseurs y rencontrent en effet des conditions particulièrement stables et favorables (Aubertot et *al.*, 2005). Entre la floraison et la récolte, les pommiers subissent de nombreuses attaques qui peuvent mettre en péril la récolte ou rendre les fruits impropres à la consommation. Certains ravageurs sont fréquents ; d'autres sont occasionnels, voire rares en vergers (voir en annexe 1 p 78) (Trillot, 2002).

La recherche d'un fruit sans défaut visible pour satisfaire aux normes de qualité commerciales notamment en circuits longs amène les producteurs à traiter fréquemment (Sauphanor et *al.*, 2009 ; Pissonnier et *al.*, 2016). De la pointe verte à la récolte, durant une période de six à huit mois, les vergers de pommiers sont ainsi soumis à des régimes de lutte antiparasitaire et de lutte contre les maladies, fondés sur l'utilisation de pesticides. De ce fait, bien qu'ils ne couvrent que 1 % de la SAU (Surface Agricole Utile), les vergers sont responsables de la consommation de 21 % des insecticides en France (Codron et *al.*, 2003 ; Aubertot et *al.*, 2005). Les enquêtes de pratiques culturales montrent encore des IFT en 2015, de 33.1 en pomme et de 20.3 en pêche (Agreste, 2018 [in] Castel et *al.*, 2019). La pomme et la pêche présentent les IFT totaux moyens les plus élevés tandis que les IFT moyens d'autres cultures se situent aux alentours de 8 pour la cerise et la banane et entre 10.5 et 11.8 pour la prune et l'abricot (Agreste, 2018). Dans les vergers de pommiers du Sud-Est, les insecticides ciblent particulièrement le carpocapse des pommes (*C. pomonella*) et le puceron cendré (*D. plantaginea*) (Thomas et *al.*, 2016).

2.1.3.2. *Biologie de deux grands ravageurs des vergers de pommiers du Sud-Est*

2.1.3.2.1. *Le cas des pucerons*

2.1.3.2.1.1. *Distribution et importance*

Ils se développent principalement sur la face inférieure des feuilles pour accéder aux vaisseaux de sève. Ils peuvent transmettre des particules virales (Sharka notamment) et rejettent un abondant miellat (partie de la sève ingérée sous forme de liquide sucré) sur lequel se développe des maladies fongiques comme la fumagine (Kennedy et *al.*, 1962 ; Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012). En arboriculture fruitière, plusieurs dizaines sont potentiellement nuisibles (SudArbo, 2012 ; Ricard et *al.*, 2012). Les principales espèces rencontrées dans les vergers de pommiers sont notamment : le puceron vert non migrant du pommier (*A. pomi*), le puceron cendré du pommier (*D. plantaginea*), le puceron lanigère du pommier (*E. lanigerum*) et le puceron vert migrant du pommier (*R. insertum*) (voir tableau 2) (Hullé, 1998 ; Leclant 2000 ; SudArbo, 2012 ; Ricard et *al.*, 2012).

Tableau 2 : Principaux pucerons nuisibles aux pommiers français (sources : Hullé et *al.*, 1998 ; SudArbo, 2012 ; Leclant, 2000)

Nom scientifique	Nom commun	Hôtes primaires	Hôtes secondaires	Type de cycle
<i>Aphis pomi</i>	P. vert non migrant du pommier	Pommier, Poirier	Non	Holocycle monœcique
<i>Dysaphis plantaginea</i>	P. cendré du pommier	Pommier	Plantain	Holocycle hétérocécique
<i>Eriosoma lanigerum</i>	P. lanigère du pommier	Pommier	Non	Holocycle monœcique
<i>Rhopalosiphum insertum</i>	P. vert migrant du pommier	Pommier, Poirier, Aubépine	Graminées	Holocycle hétérocécique

2.1.3.2.1.2. Quelques éléments de biologie

En climat tempéré, la plupart des espèces de pucerons présentent un cycle dit holocycle : elles réalisent un cycle biologique complet comprenant une génération d'insectes sexués (mâle, femelle) alternant avec une ou plusieurs générations se multipliant par parthénogenèse. La parthénogenèse survient lorsque l'ovocyte parvient à se développer sans avoir subi de fécondation préalable (reproduction asexuée). Plus particulièrement, la parthénogénèse du puceron aboutit à une descendance uniquement composée de femelles : on parle de parthénogenèse thélytoque. Au cours de l'année qui, le plus souvent, recouvre un cycle évolutif complet, plusieurs générations polymorphes apparaissent : de l'œuf d'hiver naît une fondatrice femelle, généralement aptère (sans ailes) et très féconde, qui engendre des fondatrignes aptères et parfois des fondatrignes ailées (Leclant, 2000).

Selon les espèces, deux cas sont à envisager. Dans un premier cas, un certain nombre de générations de fondatrignes aptères et ailées se développent sur le même hôte que celui sur lequel la fondatrice a évolué. Des plantes hôtes d'une seule famille botanique sont alors nécessaires pour la réalisation de leur cycle biologique ; les fondatrignes ailées peuvent coloniser, au cours de vols de dissémination, d'autres plantes de la même espèce ou d'espèces apparentées sur lesquelles elles donnent naissance à de nouvelles colonies : tel est le cas des espèces monœciques. Les insectes de la dernière génération à reproduction parthénogénétique sont appelés sexupares. Ils engendrent les sexués. Dans un second cas, les fondatrignes ailées ne peuvent pas se reproduire sur la plante hôte sur laquelle elles sont nées, ou même sur les plantes d'espèces voisines très différentes de celles sur lesquelles l'œuf fécondé a été pondue (vols d'émigration). Des plantes hôtes d'au moins deux familles botaniques différentes sont nécessaires pour leur cycle biologique. On parle de pucerons diœciques ou hétérocéciques. Les individus appartenant aux générations qui se développent sur les nouvelles espèces hôtes sont appelées virginogènes ; ils sont aptères ou ailés. Sur ces hôtes apparaissent aussi les sexupares et souvent les mâles qui seront nécessairement ailés (Leclant, 2000).

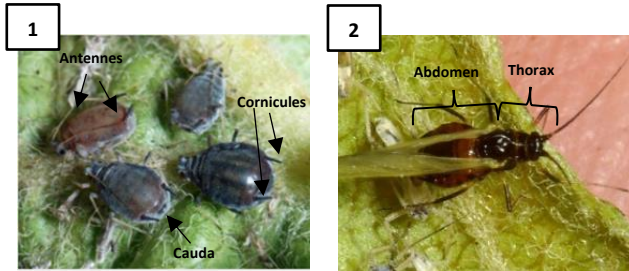
L'étude présentée dans ce rapport se concentre sur deux pucerons en particulier : *D. plantaginea* et *A. pomi*, tous deux présents sur la parcelle expérimentale.

2.1.3.2.1.3. Focus sur le puceron cendré du pommier (*D. plantaginea*)

Ce puceron migrant est le plus dommageable sur pommier et l'un des tous premiers ravageurs de cette culture (Trillot, 2002 ; Blommers et *al.*, 2004 ; SudArbo, 2012). L'absence d'un contrôle efficace de *D. plantaginea*, peut entraîner des pertes économiques pouvant atteindre environ 80 % (Qubbaj et *al.*, 2005).

2.1.3.2.1.3.1. Description et caractéristiques morphologiques

Les pucerons cendrés adultes aptères mesurent entre 2.5 et 3 mm (millimètres) de longueur. Ils sont globuleux et ont une couleur allant du rose terne au gris bleuâtre foncé voire violacé, recouverts de quantités variables d'une pubescence blanchâtre voire grisâtre (voir figure 6). Leurs cornicules⁽¹⁾ sont longues et marron foncé. Le cauda⁽²⁾ est très court, fortement conique. Leurs antennes sont généralement aussi longues que le corps. Les pucerons cendrés adultes ailés ont un abdomen gris rougeâtre avec une vaste tache dorsale foncée (Leclant, 2000 ; Ephytia(a), 2018 ; INRAE HYPPZ(a), NA).



(1) Cornicules : tubes pairs portés dorsalement par l'abdomen des pucerons (absents chez certains genres comme Eriosoma), très caractéristique de ce groupe. Ils sécrètent des substances cireuses agissant comme phéromone d'alarme ou servant de matériaux de couverture. Aussi appelé "tubes de miel" ou corniches. (2) Cauda : processus charnu à l'extrémité de l'abdomen de la femelle adulte du puceron et servant à l'épandage du miellat. Aussi appelé « queue » (INRAE HYPPZ, NA).

Figure 6 : Pucerons cendrés aptères (1) et ailés (2) (Influentialpoints.com(a), NA)

2.1.3.2.1.3.2. Cycle biologique

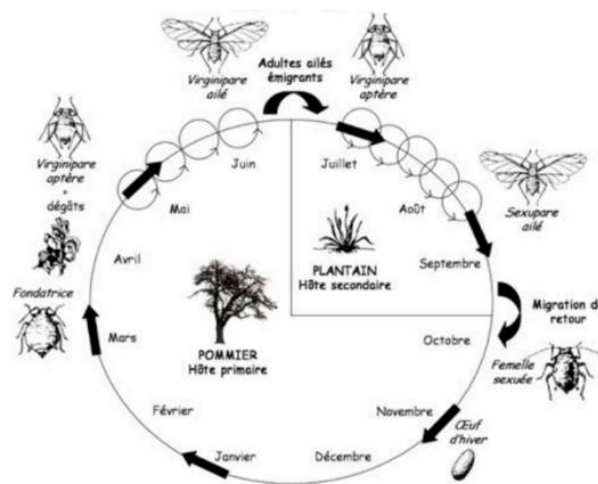


Figure 7 : Cycle de développement de *D. plantaginea* (© Delphine Bourdais, dans Nicolas et al., 2013)

Le puceron cendré effectue un holocycle hétéroécique (voir figure 7). Les œufs, pondus sur l'hôte primaire en hiver (notamment le pommier *Malus* sp.), dans des crevasses sous l'écorce des branches ou à la base des bourgeons, éclosent dès le début du printemps lorsque les premiers organes végétaux apparaissent à peine (gonflement des bourgeons), avant la floraison. De ces œufs émergent au printemps les fondatrices. Ces fondatrices se nourrissent de bourgeons et de feuilles externes de rosette. Elles vont engendrer par parthénogenèse plusieurs générations (6 à 9 générations/an) de fondatrigenes aptères. Ces générations de pucerons virginipares aptères se succèdent sur l'hôte primaire (Bonnemaison, 1959 ; Leclant, 2000 ; Trillot et al., 2002 ; Ricard et al., 2012 ; Ephytia(a), 2018 ; INRAE HYPPZ(a), NA).

Leur nombre augmente rapidement de façon asexuée en mai et juin et de grandes colonies peuvent se former et se développer à la face inférieure des feuilles ou sur les rameaux (voir figure 8). Les femelles virginipares aptères peuvent donner naissance chacune à environ 70 à 80 larves qui deviendront des femelles parthénogénétiques (Bonnemaison, 1959 ; Leclant, 2000 ; Trillot et al., 2002 ; Ricard et al., 2012 ; Ephytia(a), 2018 ; INRAE HYPPZ(a), NA).



Figure 8 : Colonie de pucerons cendrés aptères

En fin de printemps, entre le 15 juin et le 15 juillet, des individus ailés, dits émigrants ailés, sont produits, se dispersent et assurent la migration vers l'hôte secondaire, souvent une plante herbacée estivale (notamment le plantain (*Plantago* sp.)). Des colonies virginipares aptères se multiplient rapidement sur ce second hôte, jusqu'à ce que des virginipares ailées apparaissent à partir d'une certaine densité de population, pour aller coloniser des nouveaux habitats (alternance virginipares ailées et virginipares aptères sur le 2nd hôte). La reproduction se poursuit sur les pommiers jusqu'en août, même après le développement des formes ailées, si de nouvelles pousses sont disponibles sur les arbres. A la fin de l'été voire début de l'automne, se développent des sexupares aptères puis naissent des sexupares ailées. Les formes ailées se développent sur le plantain, le quittent fin septembre pour s'installer à nouveau sur l'hôte primaire. On parle notamment de gynopares ailés qui vont migrer vers l'hôte primaire et donner naissance à des femelles ovipares aptères. Des mâles ailés se dispersent ensuite du plantain à la pomme. Ils rejoignent ainsi les femelles sur les arbres pour l'accouplement et la fécondation. Les femelles aptères vont ainsi pondre des œufs (4 à 5 œufs) noirs et brillants, isolément à la base des bourgeons ou dans les anfractuosités/écorce du bois de deux ou trois ans (bois plus ancien). Ces derniers hiverneront à l'état d'œuf avant d'éclore lors du gonflement des bourgeons et de donner naissance à des fondatrices pour un nouveau cycle. La distinction visuelle entre les œufs de différentes espèces de pucerons est impossible (Bonnemaison, 1959 ; Leclant, 2000 ; Trillot et al., 2002 ; Ricard et al., 2012 ; Ephytia(a), 2018 ; INRAE HYPPZ(a), NA).

D. plantaginea se développe à des températures faibles par rapport à d'autres pucerons comme *A. pomi* ou *R. insterum*. Son point zéro de développement est à 4.5°C contre 5.9°C pour *A. pomi* et 5.5°C pour *R. insterum*. Son optimum de température pour la reproduction est d'environ 15°C (de même pour *R. insterum*) contre 20°C pour *A. pomi* (Graf et al., 1985).

2.1.3.2.1.3.3. Symptômes et dégâts



Figure 9 : Feuilles infestées par *D. plantaginea* (Ephytia(a), 2018)



Figure 10 : Fruits impactés par *D. plantaginea* (AHDB, 2021)

Très nuisible, ce puceron provoque, par le prélèvement d'une grande quantité de sève élaborée, une réaction du végétal à la salive sécrétée lors de l'insertion du stylet et ainsi de graves déformations des organes végétaux. Sur feuilles et pousses, les premiers signes de dommages surviennent au début du printemps, lorsque les feuilles externes de la rosette des formes infestées présentent une légère décoloration jaunâtre/verdâtre avant de se courber. À mesure que de plus grandes colonies se développent, les feuilles infestées sont fortement recourbées et enroulées vers le bas et déformées (voir figure 9). De manière générale, cela engendre l'affaiblissement de l'hôte, l'arrêt de la croissance des pousses, une chute des feuilles ou encore une déformation des rameaux. Les fruits, quant à eux, restent nombreux, petits et bosselés : la chute physiologique est contrariée (voir figure 10). Leur peau peut être irrégulière, ridée et parfois cireuse (Trillot et al., 2002 ; Ricard et al., 2012 ; Ephytia(a), 2018 ; INRAE HYPPZ(a), NA). La croissance de l'arbre peut se retrouver ainsi diminuée de même que la production de l'année de l'infestation ainsi que la production des années suivantes (Bonnemaison, 1959 ; De Berardinis et al., 1994 ; Wilkaniec et Trzcinski, 1997 ; Blommers et al., 2004).

2.1.3.2.1.4. Focus sur le puceron vert non migrant (*Aphis pomi*)

Ce puceron peut être dangereux sur le pommier notamment en cas de pullulation (SudArbo, 2012).

2.1.3.2.1.4.1. Description et caractéristiques morphologiques

Les pucerons verts adultes aptères (fondatrices) mesurent entre 1.5 et 2.0 mm de longueur. Leur corps est ovale, assez globuleux, relativement arrondi et de couleur verte (voir figure 11). Leurs cornicules et les cauda sont noires. Ils présentent des tubercules marginaux sur tous les segments abdominaux. Leurs pattes et leurs antennes sont plus pâles, avec les extrémités brun sombre. Les pucerons verts adultes ailés ont leur thorax noir. Leur abdomen est vert avec trois paires de taches latérales noires circulaires sur les segments abdominaux antérieurs et une tache semi-circulaire devant et derrière chaque cornicule (Leclant, 2000 ; Ephytia(b), 2016 ; INRAE HYPPZ(b), NA).

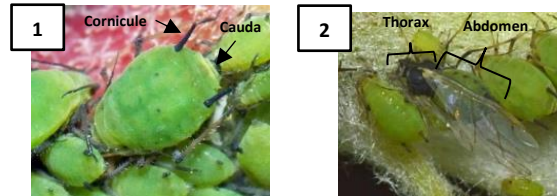


Figure 11 : Pucerons verts aptères (1) et ailés (2) (Influentialpoints.com(b), NA)

2.1.3.2.1.4.2. Cycle de développement

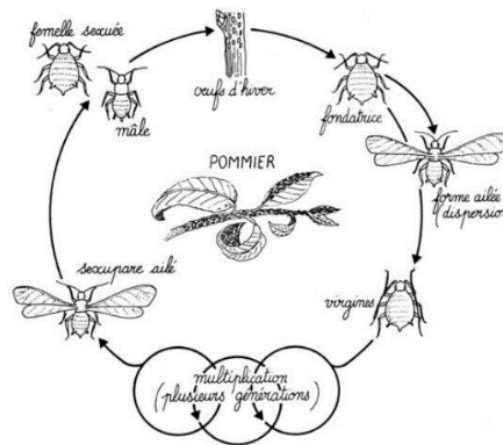


Figure 12 : Cycle de développement de *A. pomi* (Marc, 2004)

A. pomi effectue un holocycle monœcique (voir figure 12). Après avoir hiverné à l'automne et l'hiver sous forme d'œufs sur l'hôte primaire, les fondatrices aptères émergent lors du débourrement des bourgeons de l'hôte au printemps. Elles engendrent, au printemps, par parthénogénèse des virginipares aptères qui se succéderont de façon parthénogénétique (voir figure 13) jusqu'à l'apparition d'une génération de femelles sexupares à l'automne. Cette génération engendre des individus sexués et ailés qui réalisent l'unique reproduction sexuée du cycle biologique et pondent des œufs sur l'hôte. En parallèle, dès la fin avril, des générations de virginipares ailées apparaissent, lors de l'augmentation de la densité des colonies, pour se propager en colonisant de nouveaux hôtes et assurer la propagation du puceron dans le verger. Elles vont pour cela se disperser et déposer des larves sur d'autres arbres ; les vents légers facilitent leur déplacement et peuvent les entraîner à plusieurs dizaines de kilomètres. Les fortes chaleurs freinent leur développement d'où une recrudescence en septembre-octobre. En octobre et novembre, des femelles ovipares ailées et des mâles aptères apparaissent. Après accouplement, chaque femelle pond ses œufs sur les rameaux, de préférence au sommet des tiges de l'année. Ces œufs sont parfois regroupés en très grand nombre à la différence de ceux des autres pucerons (Carroll et Hoyt, 1984 ; Leclant, 2000 ; Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Ephytia(b), 2016 ; INRAE HYPPZ(b), NA).



Figure 13 : Feuilles infestées par *A. pomi* (Ephytia(b), 2016)

2.1.3.2.1.4.3. Symptômes et dégâts

Ces pucerons sont surtout nuisibles dans les pépinières et jeunes vergers très vigoureux et très poussants (période de croissance prolongée des pousses). Dans les vergers de production, l'arrêt d'élongation des pousses durant la deuxième quinzaine de juin, entraîne la régression rapide des colonies. Elles ne se maintiennent que sur les gourmands dont la croissance se poursuit. Les piqûres d'alimentation des fondatrices et de leur descendance peuvent parfois provoquer une déformation des feuilles et des pousses, pouvant entraîner une diminution voire l'arrêt de la croissance des rameaux, et parfois, leur déformation. Ces pucerons sont souvent groupés sur les pousses en gaines compactes pouvant atteindre plusieurs centaines d'individus. Ils envahissent la face inférieure des feuilles terminales qui s'enroulent et se recroquevillent légèrement. En quantité limitée, ils peuvent avoir une action favorable en limitant la pousse (Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Ephytia(b), 2016 ; INRAE HYPPZ(b), NA).

2.1.3.2.1.5. Relation mutualiste entre pucerons et fourmis

Les pucerons myrmécophiles comme *D. plantaginea* et *A. pomi* établissent une relation mutualiste avec les fourmis (voir figure 14). En effet, les fourmis se nourrissent du miellat produit par les pucerons et, en contrepartie, les protègent contre leurs ennemis. Il s'agit notamment des fourmis noires des jardins *Lasius niger*. Ainsi, en présence de fourmis, le taux d'attaque des prédateurs actifs et des parasitoïdes est fortement diminué. Le bénéfice pour les populations de pucerons est lié à l'effet négatif des fourmis sur l'abondance des ennemis naturels de ces espèces, mais aussi à la réduction de la compétition entre espèces de pucerons. Les fourmis ont donc un impact très positif sur l'abondance des pucerons, ce qui a pour conséquence une augmentation des dégâts sur les cultures. La présence et les interactions des fourmis sont donc des éléments à considérer dans le développement de la lutte biologique (Stadler et *al.*, 2005 ; Guenard, 2007 ; Stewart-Jones et *al.*, 2008 ; Miñarro et *al.*, 2010 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Nagy et *al.*, 2013 ; 2015).



Figure 14 : Relation mutualiste Fourmis/*D. plantaginea* (influentialpoint.com(a), NA)

2.1.3.2.2. Le cas des tordeuses

De nombreux lépidoptères sont des ravageurs des vergers et comprennent des mineuses, des arpeuteuses, des noctuelles et des tordeuses. Ce sont ces dernières qui provoquent le plus de dégâts. Les tordeuses sont appelées ainsi car les chenilles de nombreuses espèces enroulent et tordent, à l'aide de fil de soie, les feuilles des plantes dont elles se nourrissent (Ricard et *al.*, 2012).

2.1.3.2.2.1. Distribution et importance

Les tordeuses appartiennent essentiellement à la famille des Tortricidae. Une quarantaine d'espèces existent dans les vergers français. Les plus communes ont été regroupées en catégories (voir tableau 3). Etant donné l'ampleur de leurs dégâts, ce sont des ravageurs de première importance faisant l'objet de nombreux travaux destinés à la protection du verger, que ce soit par lutte insecticide, biologique ou par confusion sexuelle (Ricard et *al.*, 2012).

Tableau 3 : Les catégories de tordeuses (Ricard et *al.*, 2012).

Type de tordeuse	Dégâts occasionnés
Tordeuses des bourgeons	Occasionnent des dégâts sur les bourgeons à fleurs et les jeunes fruits.
Tordeuses de la pelure	Attaquent fleurs et jeunes fruits au printemps puis les fruits en fin de saison.
Tordeuses carpophages	Attaquent les fruits en cours de saison.
Tordeuses xylophages	Attaquent le tronc et les branches charpentières.

Les adultes de la plupart des espèces ont une activité crépusculaire. Selon les espèces, les œufs sont pondus sous les feuilles ou sur les feuilles, mais également sur les fruits (*Cydia* sp. et *Anarsia lineatella*) ou encore au niveau des troncs et des branches (*G. molesta*). Les chenilles ont un stade baladeur de quelques jours et leurs dégâts présentent des symptômes très variables selon les stades et les espèces. La chenille hiverne dans un *hibernaculum* ou cocon soyeux tissé sous divers abris et entre en diapause parfois dès juillet selon les espèces (Ricard et al., 2012). L'étude présentée dans ce rapport se concentre sur une tordeuse carpophage en particulier : le carpocapse du poirier et du pommier (*C. pomonella*), présent sur la parcelle expérimentale.

2.1.3.2.2.2. Focus sur le carpocapse (*C. pomonella*)

Le carpocapse est le ravageur entraînant le plus de dégâts aux pomiculteurs dans le Sud de la France (Sauphanor et al., 2006). Il est également présent sur poirier, noyer et cognassier, parfois sur prunier et abricotier (Trillot et al., 2002). Les pertes de production sur les fruits à pépins peuvent atteindre près de 80 % lorsque de fortes infestations se produisent (Botto et Glaz, 2009).

2.1.3.2.2.2.1. Description et caractéristiques morphologiques

L'adulte mesure 16 à 19 mm d'envergure. Il y a une tache ovale caractéristique très apparente, brune, bordée de deux lignes d'un brun doré brillant, à reflets mordorés, sur les ailes antérieures grises. Les ailes postérieures sont brun rougeâtre, finement ciliées. La larve mesure 16 à 20 mm. La tête est brun foncé, le corps rose pâle à rougeâtre. Elle présente des fausses-pattes abdominales et des pattes anales. L'œuf mesure 1 mm de diamètre. Il est circulaire, aplati, légèrement bombé en son centre. Par ailleurs, il est pondu isolément à la face supérieure des feuilles, sur le fruit ou sur le rameau. Il est tout d'abord blanc laiteux, puis, après quelques jours, on note la présence d'un anneau rougeâtre périphérique. La chrysalide mesure 10 à 12 mm. Brun jaune à brun foncé, elle est contenue dans un cocon soyeux (voir figure 15) (Walgenbach, 2014 ; Ephytia(c), 2015 ; INRAE HYPPZ(c)).



Figure 15 : *C. pomonella* à différents stades du cycle de vie : adulte (1), œuf (2), larve (3), chrysalide (4) (Walgenbach, 2014)

2.1.3.2.2.2.2. Cycle de développement

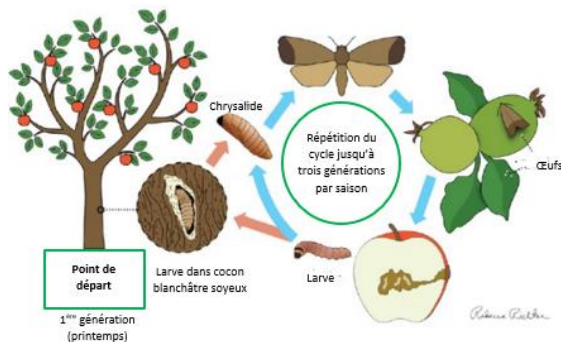


Figure 16 : Schématisation d'une génération de *C. pomonella* (Ritcher et al., 2021)

Les adultes de première génération apparaissent de fin avril à fin mai (selon les régions) et ont une longévité moyenne de 15 à 18 jours. Leurs vols peuvent être perturbés par le vent ou la pluie. Ils s'accouplent au crépuscule à une température supérieure à 15°C puis pondent sur les feuilles, les rameaux ou les jeunes fruits. La fécondité moyenne est de l'ordre de 30 à 50 œufs. La durée d'évolution de l'œuf est de 18 jours à 15°C et 6 jours à 25°C. Les œufs éclosent à la fin du mois de mai (INRAE HYPPZ(c), NA ; Trillot et al., 2002 ; Ricard et al., 2012 ; Walgenbach et al., 2014).

Le développement de la larve dure 20 à 30 jours (cinq stades larvaires). Elle mesure 1.8 mm de long au départ pour atteindre une longueur de 16 à 20 mm avant la diapause. Elle connaît d'abord un

« stade baladeur » (de 2 à 5 jours) et recherche alors un fruit. C'est à ce stade qu'il faut la surveiller car elle est encore à l'extérieur du fruit et donc visible. Après quelques morsures d'exploration, elle pénètre dans un fruit, au point de contact de deux fruits, ou d'une feuille et d'un fruit, ou au niveau du pédoncule, ou de l'œil. Elle creuse des galeries pour se nourrir de la pulpe et des pépins. Au cinquième stade (après 18 à 40 jours), elle quitte le fruit et tisse un cocon dans un abri. Elle peut alors suivre deux évolutions : soit, elle se nymphose et donne un papillon de deuxième génération (1 à 2 semaines), soit vers la fin de l'été, lorsque les jours raccourcissent, elle entre en diapause pour passer l'hiver au repos (voir figure 16). Les larves dont la croissance se termine d'août à octobre entrent toutes en diapause. Pour cela, elles hivernent au cinquième stade dans un cocon blanchâtre soyeux tissé dans les anfractuosités de l'écorce ou dans divers abris au niveau du sol. La chrysalide se forme en avril et se développe en 20 à 28 jours (INRAE HYPPZ(c), NA ; Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Walgenbach et *al.*, 2014).

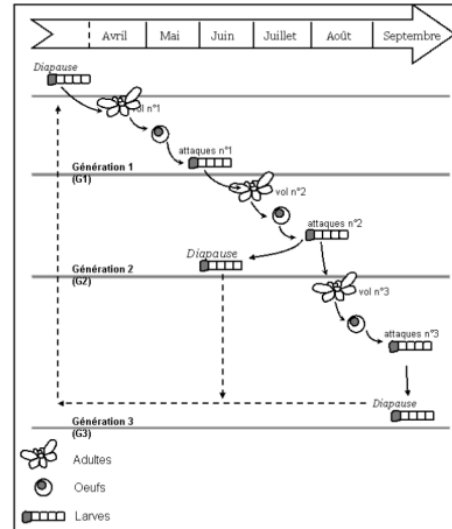


Figure 17 : Schématisation de l'enchaînement dans le temps des générations de *C. pomonella* dans le sud de la France (Boivin et Sauphanor, 2017)

Deux à trois générations d'adultes (voir figure 17) peuvent apparaître selon les régions (une ou deux en France, parfois trois dans le Midi sous climat méditerranéen). La première génération peut donner naissance à deux types de populations : la deuxième génération de l'année ou la première génération de l'année suivante (INRAE HYPPZ(c), NA ; Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Walgenbach et *al.*, 2014).

2.1.3.2.2.3. Symptômes et dégâts



Figure 18 : Point de pénétration d'une larve au niveau de la cavité de l'œil (Iriis, 2021)

Au stade baladeur de la larve (pouvant durer deux jours), de légères morsures en surface sont présentes sur les fruits. Le point de pénétration de la larve se situe ensuite souvent au contact de deux fruits, d'un fruit et d'une feuille, ou dans la cavité de l'œil (voir figure 18). Autour du trou d'entrée de la jeune larve, la zone rongée, suivie d'une galerie en spirale, est prolongée par une galerie aboutissant directement aux pépins dévorés par la larve. Les fruits attaqués présentent des traces qui les rendent non commercialisables. On a également une chute des fruits (INRAE HYPPZ(c) ; Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Walgenbach, 2014).

2.1.3.3. Vers une résistance de ces ravageurs aux pesticides

L'emploi répété des mêmes substances pour contrôler les infestations favorise l'apparition et le développement de populations résistantes à ces pesticides. Concernant les insecticides, le carpocapse du pommier constitue un bon exemple de bioagresseur capable de développer rapidement une résistance croisée à des substances actives appartenant à des familles chimiques différentes (Aubertot et *al.*, 2005). Le premier cas de résistance a été celui à l'arsénite rapporté par Hough en 1928 aux Etats-Unis. Depuis, de nouveaux cas sont signalés dans presque toutes les principales régions pomicoles du monde. En Europe, ce phénomène a été détecté pour la première fois dans les années 1990 avec l'émergence de la résistance au diflubenzuron en Italie et dans le Sud-Est de la France (Waldner, 1993 ; Sauphanor et *al.*, 1994 ; Damos et *al.*, 2015). Des échecs de contrôle de ce même ravageur ont été observés en Suisse et en Espagne (Charmillot et *al.*, 1999 ; Ioriatti et *al.*, 2007 ; Damos et *al.*, 2015). Actuellement, le spectre de résistance de certaines de ces populations a considérablement augmenté

pour inclure les avermectines, benzoylurées, benzoylhydrazines, néonicotinoïdes, organophosphates, lactones macrocycliques, pyréthroïdes (Ioriatti et al., 2007 ; Gund et al., 2012 ; Damos et al., 2015) et aussi les biopesticides, comme le virus de la granulose (CpGV) (Sauphanor et al., 2006 ; Voudouris et al., 2011 ; Gund et al., 2012 ; Damos et al., 2015). Certaines populations de pucerons ont développé une résistance à divers insecticides organophosphorés et carbamate à la suite d'une application répétée sur le long terme dans des vergers conventionnels (Delorme et al., 1997 ; Marchetti et al., 2009 ; Smirle et al., 2010 ; Tamas et al., 2014).

2.1.3.4. Vers une éradication de la faune auxiliaire des vergers

L'intensification de la production agricole (basée sur la productivité de monocultures), associée à une perte d'habitats et à l'utilisation de pesticides, a été identifiée comme une cause majeure du déclin mondial de la diversité des invertébrés (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019 ; Wagner, 2020). Ses effets secondaires sur les organismes vivants peuvent être directement liés à leur mortalité et/ou à la diminution de leur fécondité, ou indirectement lié à la réduction de la biomasse (c.-à-d. proie ou hôte) ou à la suppression de la plante hôte dans le réseau trophique (Simon et al., 2009). Pour rappel, les réseaux trophiques regroupent l'ensemble des chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la biomasse circulent (Ricard et al., 2012).

L'impact de l'application des produits phytosanitaires en verger a été étudié sur les arthropodes dits auxiliaires ou ennemis naturels. Des effets négatifs sont, p. ex., observés sur les araignées de la frondaison (prédateur généraliste s'attaquant à une très grande variété de ravageurs) dans de nombreux travaux, avec des effectifs parfois réduits de moitié entre verger traité et témoin non traité ou des gradients d'abondance décroissants entre AB, Production Fruitière Intégrée (PFI) et agriculture conventionnelle. Cette tendance est la même pour les carabes, les traitements phytosanitaires pouvant directement affecter leur abondance et leur diversité (Bouvier, 2004 ; Markó et al., 2009 ; Ricard et al., 2012).

Cette perte de diversité peut conduire à une réduction des services écosystémiques comme la régulation naturelle des ravageurs agricoles par l'activité d'ennemis naturels ou auxiliaires (prédateurs et parasitoïdes) (Rusch et al., 2016). Il s'agit là d'un cercle vicieux, puisque cela engendre alors un accroissement de la dépendance aux intrants artificiels pour la production alimentaire (Pretty, 2008 ; Tilman et al., 2002). Les produits phytosanitaires sont alors considérés comme le principal recours permettant de protéger les cultures contre les insectes bioagresseurs et garantissant des récoltes régulières, en quantité et qualité, en adéquation aux exigences du marché (Thomas et al., 2016).

2.1.4. A la recherche d'un système de production de pommes plus durable

Au cours des dernières décennies, de nombreuses initiatives ont été développées qui ouvrent la voie vers un système de production de pommes plus durable (Lauri et al., 2020). Repenser les systèmes de culture de la pomme en visant à améliorer la durabilité à long terme des vergers nécessite une reconsidération du matériel végétal, de la conception temporelle des vergers et des pratiques de gestion (Lauri et al., 2019). Le concept de « durabilité » qui a été défini comme étant « *la capacité de rendre le développement durable afin qu'il réponde aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres besoins* » (Brundtland, 1987) a été la pierre angulaire de plusieurs initiatives dans le domaine de l'agriculture. Trois systèmes de culture de pommes ont ainsi été développés : (i) la production Fruitière Intégrée (PFI) ; (ii) l'Agriculture Biologique (AB) et (iii) l'Agroécologie (AE) (Lauri et al., 2020 ; Pitchers, 2021) (voir en annexe 2 p 78).

La PFI est « *une production économique de fruit de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires indésirables et l'utilisation de produits*

phytopharmaceutique afin d'améliorer la sécurité de l'environnement et la sécurité alimentaire » (OILB, 1997). Dans l'esprit de la protection raisonnée, toute idée de traitement systématique est abandonnée (Trillot et al., 2002 ; Damos et al., 2015). La PFI est maintenant considérée comme la norme dans les vergers de pommiers conventionnels en Europe où la lutte intégrée est obligatoire depuis 2009 (Damos et al., 2015 ; Lauri et al., 2020 ; Pitchers, 2021).

L'AB est définie comme un système de production qui soutient la santé des sols et des écosystèmes. Il repose sur des processus écologiques, la biodiversité et des cycles adaptés aux conditions locales, plutôt que sur l'utilisation d'intrants aux effets néfastes. Bien que la zone de production de pommes soit en pleine expansion (Granatstein et al., 2016), l'AB est encore moins développée que la PFI en Europe (Kienzle et Kelderer, 2017). Une des principales différences entre la PFI et l'AB est que l'AB vise à gérer le système de vergers dans son ensemble en interdisant les intrants synthétiques et leurs dérivés et en utilisant des substances naturelles (composés organiques) et adoptant de méthodes alternatives telles que le désherbage mécanique et la mise en place de la lutte biologique.

Finalement, l'AE désigne la combinaison de l'agronomie, de l'écologie et d'autres sciences comme la zoologie, la botanique et la physiologie des plantes, et leurs applications pour résoudre des problèmes agronomiques et environnementaux. Elle répond à un intérêt croissant de la production de pommes car elle ouvre la voie à la conception de nouveaux systèmes de production en optimisant les interactions entre le pommier, les autres plantes du système et en s'appuyant sur les services écosystémiques (voir paragraphe 2.2.2) (Simon et al., 2017).

La préservation et la promotion de la biodiversité dans le paysage agricole pourrait être un enjeu clé pour répondre à la fois à des problèmes écologiques et agronomiques (Simon et al., 2009). Dans cette optique, ces trois modes de production (PFI, AB, et AE) reposent notamment sur trois grands objectifs que sont : (i) produire en s'appuyant sur les fonctionnalités des écosystèmes ; (ii) maximiser la biodiversité fonctionnelle ; (iii) renforcer les régulations biologiques dans les agroécosystèmes (Wezel et al., 2014 ; Malézieux et Reboud, 2015 ; Deguine et al., 2016 ; Lauri et al., 2020). Les solutions préconisées se tournent vers la biodiversité et s'appuient donc sur la connaissance des ravageurs et des auxiliaires du verger, de leurs cycles biologiques et de leur dynamique de développement.

2.2. L'agrobiodiversité : une alternative pour répondre à ces enjeux

2.2.1. L'agriculture : une relation contrariée avec la biodiversité

La biodiversité désigne l'ensemble des êtres vivants ainsi que les écosystèmes dans lesquels ils vivent. C'est un terme complexe qui inclut les aspects taxonomiques, fonctionnels, spatiaux et temporels de la diversité des organismes dans des systèmes vivants hiérarchiquement emboîtés. Il regroupe donc la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité des écosystèmes (Ricard et al., 2012 ; Le Roux et al., 2008). La recherche de synergies entre agriculture et biodiversité est une préoccupation récente, liée à des éléments de contexte global et à l'émergence dans les années 90, à la suite de la conférence de Rio, d'approches nouvelles de cette relation (Le Roux et al., 2008).

Face au constat de disparition d'espèces à un rythme supérieur à tous ceux connus au cours des époques géologiques (Herzog et al., 2012 ; Watson et al., 2005), les scientifiques ont privilégié le nombre d'espèces présentes dans les écosystèmes, c.-à-d. la dimension quantitative de la biodiversité (Le Roux et al., 2008). Or, d'après de nombreux travaux expérimentaux et théoriques, l'impact des espèces sur le fonctionnement des écosystèmes dépendrait plus des fonctions que ces espèces remplissent dans l'écosystème que de leur nombre en tant que tel (Le Roux et al., 2008). A l'inverse, l'effet de l'abondance relative des espèces et de leur répartition sont moins connus (Ricard et al.,

2012). La notion de « services » rendus par la biodiversité a été ainsi popularisée par le MEA (Millenium Ecosystem Assessment) (2005). L'ensemble des organismes d'un écosystème assure en effet plusieurs fonctions écologiques qui peuvent concourir à remplir un service considéré comme utile à l'homme (Ricard *et al.*, 2012). Cette notion de services semble devoir faciliter l'évaluation de la biodiversité, en particulier à travers le coût des atteintes qui lui sont portées. Mais le risque demeure d'adopter une vision trop restrictive des services rendus par les écosystèmes (Le Roux *et al.*, 2008).

2.2.2. Services écosystémiques de régulation biologique et intérêts des auxiliaires

2.2.2.1. Les services écosystémiques de régulation biologique

Les services écosystémiques sont les conditions et les processus au travers desquels les écosystèmes naturels, et les espèces qui les composent, soutiennent et contribuent à la vie humaine (Zhang *et al.*, 2007). Différentes classifications de ces services sont proposées dans la bibliographie, l'une des plus reconnues est celle proposée par le MEA en 2005. Les services y sont classés en quatre grandes catégories : services d'approvisionnement (p. ex. la production d'aliments et de fibres), de support (p. ex. la production d'oxygène atmosphérique ou la formation des sols), de régulation (p. ex. le contrôle des bioagresseurs ou encore de la pollinisation) et services culturels (p. ex. le loisir ou la valeur esthétique des écosystèmes (voir figure 19) (Zhang *et al.*, 2007). Dans le domaine agricole et à l'échelle du système de culture, en dehors du service fondamental d'approvisionnement (dit de production), ce sont surtout les services qui vont affecter directement le recours aux intrants qui suscitent le plus d'intérêt. Parmi ceux-ci, le contrôle biologique des ravageurs, la pollinisation et la fertilité du sol sont les services pour lesquels les attentes sont les plus fortes, en raison principalement d'un contexte législatif et sociétal imposant une réduction des intrants fertilisants et phytosanitaires (Zhang *et al.*, 2007 ; Wezel *et al.*, 2009 ; Ricard *et al.*, 2012).

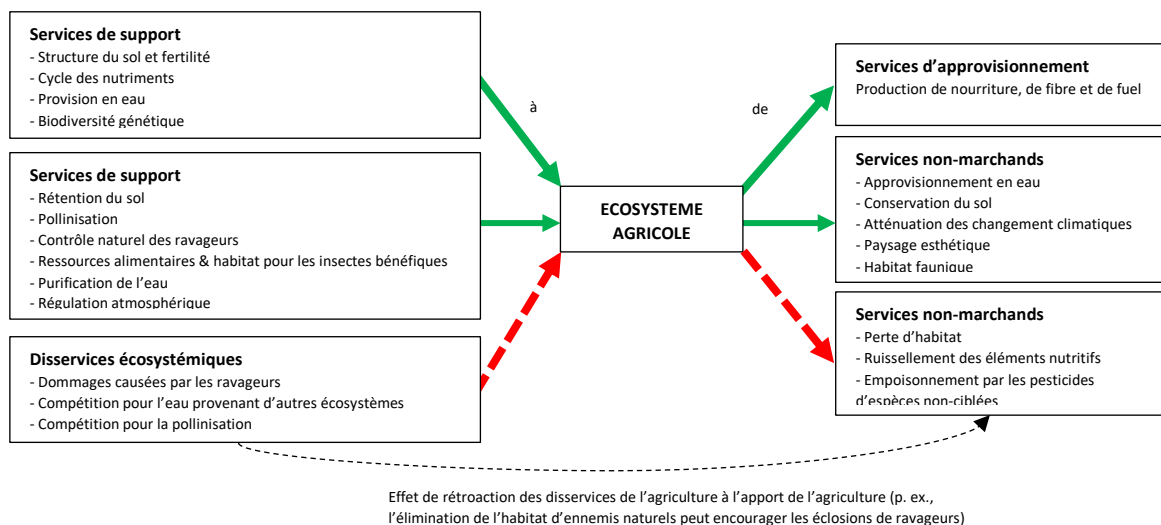


Figure 19 : Services écosystémiques et services à l'agriculture et à partir de l'agriculture (Zhang *et al.*, 2007).
Les flèches pleines indiquent les services écosystémiques, tandis que les flèches pointillées indiquent des disservices écosystémiques

La régulation « naturelle » des populations ou contrôle biologique « naturel » est issue de l'action conjointe de parasites, prédateurs et pathogènes qui a pour conséquence de réduire l'abondance d'un organisme en dessous du niveau qu'elle devrait avoir en leur absence. Dans le cas d'un ravageur de cultures, le contrôle biologique sous-entend une notion de seuil qui correspond à une densité de ravageur au-dessus de laquelle les dégâts provoqués occasionnent des pertes économiquement dommageables. Bien souvent, ce contrôle existe « naturellement » sans qu'on le perçoive, de sorte que lorsqu'une perturbation se produit (effet indirect d'un traitement phytosanitaire, etc.), un organisme phytophage devient alors un ravageur problématique (Ricard *et al.*, 2012).

2.2.2.2. La place des auxiliaires des cultures

2.2.2.2.1. Rappel : la biologie des auxiliaires des cultures

Les espèces de macro-organismes présents dans les cultures, qu'ils soient auxiliaires ou ravageurs, peuvent être regroupés selon trois grands types de régimes alimentaires (voir tableau 4).

Tableau 4 : Les types de régimes alimentaires des macro-organismes présents dans les cultures (Boyer et al., 2017).

Type de régime alimentaire	Regroupement de macro-organismes
Espèces phytophages	Consommation exclusive des végétaux. Nuisibilité en cas d'attaque des plantes cultivées. Faculté d'alimentation se limitant à quelques espèces botaniques, parfois à une seule espèce, voire à un organe parvenu à un stade de développement bien défini.
Espèces zoophages	<p>Consommation exclusive d'animaux. Les auxiliaires des cultures sont donc tous a minima zoophages car ils sont justement utilisés pour leur capacité à se nourrir d'insectes ou d'acariens phytophages nuisibles.</p> <p>Auxiliaires généralistes : Présentant un très large spectre de proies ou d'hôtes. Ne se focalisant pas uniquement sur un groupe d'espèces. Certains de ces auxiliaires peuvent même consommer ou parasiter d'autres auxiliaires des cultures (hyperparasitisme).</p> <p>Auxiliaires spécialistes : Présentant un spectre de proies ou d'hôtes beaucoup plus restreint. Ils se focalisent généralement sur un groupe d'espèces voire sur une seule espèce ou même sur un stade précis de développement de cette espèce (œuf, larve, nymphe ou adulte).</p>
Espèces polyphages	Combinant un régime alimentaire phytophage et zoophage qui peut varier selon leur stade de développement (stade larvaire ou adulte), leur sexe ou encore la phénologie et la disponibilité des proies.

Tous les stades d'un ravageur sont susceptibles d'être successivement attaqués par une ou plusieurs espèces d'arthropodes (insectes et arachnides). Selon leur mode d'action, ces dernières sont généralement subdivisées en deux grandes catégories :

- (i) Les prédateurs : Ils recherchent activement leurs proies de façon mobile en les chassant, en les capturant à l'affût, ou en les piégeant (dans une toile d'araignée p. ex.). Ils tuent leurs proies en les ingérant plus ou moins complètement ou en les vidant de leur contenu et en ne laissant que le tégument vide. Le stade prédateur peut être l'adulte et/ou la larve. Selon les espèces, l'adulte possède soit le même régime alimentaire que la larve soit se contente d'ingérer des substances sucrées (nectar, miellat) ou du pollen. Les larves sont généralement mobiles et consomment un nombre élevé de proies (Boyer et al., 2017).
- (ii) Les parasitoïdes : Ils se développent au stade larvaire à l'intérieur d'un organisme hôte qu'ils utilisent comme ressource alimentaire et qu'ils finissent inévitablement par tuer. Au stade adulte, ils quittent leur hôte. Les modalités de parasitisme sont différentes selon les espèces. Les parasitoïdes les plus fréquents appartiennent principalement à une famille de diptères (les tachinaires) et à de nombreuses familles d'hyménoptères. De taille souvent inférieure à celle de leur hôte, ils sont difficiles à observer sur le terrain. En revanche, il subsiste souvent des traces nettement visibles de l'activité parasitaire (tégument vide de l'hôte portant un orifice bien découpé de sortie de l'endoparasite) (Boyer et al., 2017).

2.2.2.2.2. Les ennemis naturels des pucerons et du carpocapse

2.2.2.2.2.1. Action possible des auxiliaires sur les pucerons

L'accomplissement d'un cycle sur un ou plusieurs hôtes entraîne des conséquences importantes en termes de régulation par les auxiliaires : une espèce de puceron monœcique aura une relation beaucoup plus longue dans le temps avec ses ennemis naturels qu'une espèce hétérocécique qui pourra échapper à une partie du cortège d'auxiliaires qui l'attaque du fait de la rupture liée au changement d'hôte (Ricard et al., 2012). Les prédateurs et parasites du puceron cendré sont nombreux. Ils peuvent jouer un rôle régulateur des populations de pucerons à différents stades de développement et époques de leur cycle (Ricard et al., 2012 ; Trillot et al., 2002).

2.2.2.2.2.1.1. Les prédateurs du puceron

Les prédateurs du puceron appartiennent à plusieurs ordres d'arthropodes et de nombreuses études leur ont été consacrées. Les plus présents et les plus efficaces en vergers sont les coléoptères (par ex. les coccinelles au stade larvaire et adulte), les diptères (par ex. les larves de syrphes et de cécidomyie), les neuroptères (par ex., les larves de chrysopes et d'hémérobe) et les hétéroptères (par

ex., les punaises prédatrices) (Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Boyer et *al.*, 2017). Les stratégies de prédation diffèrent selon les auxiliaires. Beaucoup recherchent activement leurs proies, provoquant ainsi des réactions de défense des pucerons (dispersion de la colonie, protection par les fourmis mutualistes). C'est le cas p. ex. des coccinelles et des larves de chrysopes. D'autres, au contraire, ont un comportement dit furtif, leur permettant de s'installer au sein des colonies de pucerons sans les déranger. C'est le cas p. ex. des larves de cécidomyies (Ricard et *al.*, 2012).

La plupart des auxiliaires prédateurs plus ou moins spécialistes des pucerons sont densités dépendants, c.-à-d. que les populations de l'auxiliaire augmentent de façon synchrone avec les populations du ravageur. Les prédateurs plus généralistes sont susceptibles de jouer un rôle important dans la régulation des pucerons à des moments clés. Les araignées, p. ex., sont présentes dans les vergers de pommiers en automne et très tôt au printemps et peuvent consommer les adultes sexuels au moment de la ponte des œufs d'hiver et les « fondatrices » justes écloses en fin d'hiver, réduisant ainsi le nombre de foyers de pucerons (Ricard et *al.*, 2012).

La faune arthropode du sol (carabes, staphylins et araignées), joue probablement un rôle dans la régulation des populations de pucerons des vergers, mais les études sur le sujet sont peu nombreuses. Toutefois, certains de ces prédateurs généralistes sont également des ravageurs (forficules sur fruits à noyaux) ou des prédateurs intra-gilde (Reduviidae sur larves de coccinelles) (Ricard et *al.*, 2012).

2.2.2.2.1.2. Les parasitoïdes du puceron

Les parasitoïdes de pucerons sont représentés par quatre familles, essentiellement des insectes de l'ordre des Hyménoptères. Il existerait une centaine d'espèces d'hyménoptères parasitoïdes de pucerons en France et appartenant aux familles des Aphelinidae (genre *Aphelinus*), des Braconidae de la sous famille des Aphidiinae et des Encyrtidae. Quelques espèces de diptères de la famille des Cécidomyies sont également des parasites des pucerons. Les larves des parasitoïdes se développent à l'intérieur des pucerons, jusqu'à leur mort. Elles se nymphosent dans la momie. L'adulte s'échappe alors de son hôte en laissant un trou de sortie caractéristique. Les parasitoïdes ont plusieurs générations par an, ce qui leur permet d'être actifs pendant toute la saison (Ricard et *al.*, 2012).

2.2.2.2.2. Action possible des auxiliaires sur les tordeuses

Le carpocapse et les tordeuses en général sont attaquées à différents stades de leur cycle de vie par une grande diversité d'ennemis naturels, tels que les parasitoïdes et les prédateurs généralistes. Peu d'entre eux sont vraiment spécifiques (Ricard et *al.*, 2012).

2.2.2.2.2.1. Les prédateurs du carpocapse

2.2.2.2.2.1.1. Prédation des larves diapausantes et formes hivernantes

Parmi la faune du sol, plusieurs espèces de fourmis, de coléoptères (Staphylinidae, Cleridae, Cantharidae et Elateridae), ainsi que de forficules, sont des prédateurs de larves en recherche d'abri pour faire leur diapause. Les carabes consomment des larves matures dites L5 en fin d'été lorsqu'elles sont au sol à la recherche d'un abri. Les araignées du sol sont des prédateurs avérés du carpocapse au printemps (juste au moment de l'émergence de la première génération) et en fin d'été (juste au moment de l'émergence de la seconde génération). Plusieurs familles sont impliquées, dont principalement celle des Lycosidae, spécialisée dans la chasse à courre. Au stade adulte, ce sont essentiellement les vertébrés qui interviennent comme les oiseaux (sitelles, pics, fauvettes, rouges-gorges, mésanges, etc.) et les chauves-souris (Ricard et *al.*, 2012).

2.2.2.2.2.1.2. Prédation des œufs

De juin à août, les œufs sont pondus sur les feuilles à proximité des fruits ou même sur les fruits. Pendant 2 semaines environ et avant leur éclosion, ils sont exposés à l'action des prédateurs et des parasitoïdes. Des expériences d'exposition d'œufs de carpocapse montrent une prédation parfois importante (entre 12 et 86 %) de la part de plusieurs espèces de punaises : Miridae et Anthocoridae. Les forficules sont également capables de consommer des œufs. Enfin, deux prédateurs généralistes inféodés généralement aux colonies de puceron consomment des œufs de carpocapse : les coccinelles *Harmonia* sp. et les punaises *Pilophorus* sp. Le taux de prédation augmente progressivement au cours de la saison et dépend de la phytoprotection locale, celui-ci étant plus élevé en agriculture biologique qu'en agriculture conventionnelle (Ricard et al., 2012).

2.2.2.2.2.2. Les parasitoïdes du carpocapse

Plus d'une centaine de parasitoïdes sont répertoriés à travers le monde rien que sur le carpocapse. Aucun n'est vraiment spécifique et ces insectes ont plusieurs hôtes appartenant aux tordeuses, teignes et pyrales. Parmi les espèces spécialisées, seules quelques-unes peuvent produire un taux de parasitisme significatif. Toutefois, les études en verger du complexe parasitaire en Europe montrent un niveau de parasitisme bas compris entre 5 et 20 % seulement. Le niveau de parasitisme est très souvent lié à la pression des applications phytosanitaires (Ricard et al., 2012). En France, dans la région d'Avignon p. ex., les 2 principaux parasitoïdes sont *Ascogaster quadridentatus* (Braconidae) et *Pristomerus vulnerator* (Ichneumonidae). Le niveau de parasitisme est de l'ordre de 1 % en verger conventionnel et de 4 % en verger AB. Il atteint 31 % en verger non traité. A l'action de ces parasitoïdes de larves et de chrysalides, vient s'ajouter celle des parasitoïdes généralistes trichogrammes (9 espèces s'attaquent au carpocapse) qui parasitent les œufs. Ces derniers peuvent avoir une action très élevée, mais irrégulière (20 à 80 %) (Ricard et al., 2012).

Une synthèse des principaux groupes d'arthropodes rencontrés dans les vergers et ayant au moins un représentant prédateur ou parasitoïde du puceron et/ou du carpocapse est disponible en annexe 3 p 79. Le contrôle biologique « naturel » des bioagresseurs n'est cependant pas toujours suffisant et différents moyens sont alors envisagés pour renforcer la présence et/ou l'action des organismes auxiliaires. Se développe alors la notion de lutte biologique (Ricard et al., 2012 ; Boyer et al., 2017).

2.2.3. La lutte biologique par conservation : connaissances et perspectives

2.2.3.1. Qu'est-ce que la lutte biologique par conservation ?

La lutte biologique regroupe un ensemble de méthodes basées sur l'utilisation d'organismes auxiliaires ou de leurs produits afin de prévenir ou réduire les dégâts causés par des organismes nuisibles ou comme agent de contrôle des ravageurs. Elle se base sur la relation entre la cible (p. ex. ravageur d'une plante cultivée) et un agent de lutte (parasitoïdes, prédateurs et/ou pathogènes). Elle n'a pas pour objectif d'éradiquer complètement un ravageur ou une maladie, mais de permettre le maintien de ces derniers dans une proportion acceptable (Index acta biocontrôle, 2019 ; Deguine et al., 2016 ; Ricard et al., 2012). On distingue la lutte biologique, dite « classique », la lutte biologique par lâchers augmentatifs et la lutte biologique par conservation (voir annexe 4 p 79).

Le travail présenté dans ce rapport se concentre exclusivement sur la lutte biologique par conservation, méthode la plus favorable au maintien d'une biodiversité fonctionnelle et pérenne dans sa fonction de gestion des ravageurs (Waage, 1991). Elle peut être combinée avec d'autres méthodes de lutte pour réguler plus efficacement les bioagresseurs (Ephytia(d), 2016). Sur le terrain, sa mise en place s'appuie sur trois techniques : (i) suppression dans la mesure du possible, ou à défaut forte réduction des traitements insecticides sur les plantes cultivées et des applications d'herbicides dans

les agroécosystèmes ; (ii) insertion de biodiversité végétale dans les agroécosystèmes, en constituant des habitats défavorables pour les ravageurs et/ou des habitats favorables pour les auxiliaires, p. ex. couverture végétale permanente au sol, plantes pièges pour les ravageurs, plantes refuges pour les auxiliaires ; (iii) adaptation des pratiques culturales à la fois pour la gestion des plantes cultivées et pour la gestion des nouveaux habitats (voir annexe 5 p 80) (Deguine et *al.*, 2016).

Les IAE sont une des composantes essentielles mises en œuvre dans le cadre de cette lutte (Deguine et *al.*, 2016). Il s'agit d'un habitat semi-naturel d'un agroécosystème dans ou autour duquel se développe une végétation spontanée essentiellement composée d'espèces bisannuelles, pluriannuelles ou pérennes, ou un couvert semé dit « de service » et intentionnellement non récolté. Elle peut avoir diverses formes : (i) linéaire comme les alignements d'arbres et leurs bandes herbeuses au bord ou dans les parcelles, les lisières forestières, haies, talus, murets, bords de fossé, de ruisseaux, etc. ; (ii) surfacique comme les prairies inondables, pré vergers, parcours, friches, bosquets, zones humides, etc. ; (iii) ponctuelle comme les mares, sources, arbres isolés, rochers, etc. C'est le lieu de vie permanent ou intermittent, permettant reproduction, alimentation, refuge, estivation ou hibernation de groupes biologiques appartenant aux six règnes du vivant (archées, bactéries, protistes, fonge, flore, faune) à proximité ou dans les cultures (Sarhou, 2016).

2.2.3.2. Le rôle des IAE sur les populations d'ennemis naturels

L'aménagement d'IAE et d'espaces semi-naturels permet d'influencer positivement les ennemis naturels (Nicholls et *al.*, 2001 ; Thies et *al.*, 2003 ; Bianchi et *al.*, 2006 ; Tschardtke et *al.*, 2007 ; Chaplin-Kramer et *al.*, 2011 ; Sarhou et *al.*, 2014 ; Laubertie et *al.*, 2016 ; Boyer et *al.*, 2017).

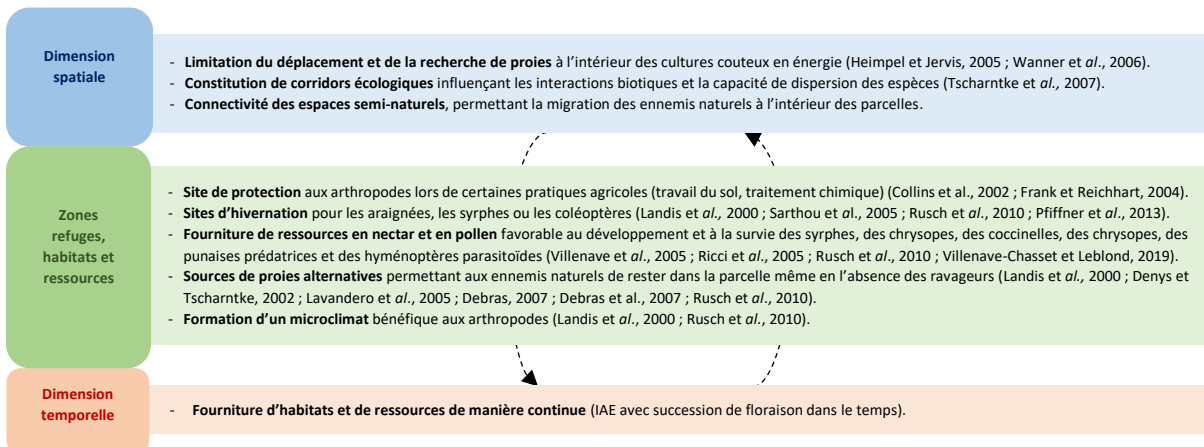


Figure 20 : En quoi les IAE favorisent-elles les ennemis naturels ?
Les flèches en pointillées symbolisent l'interaction entre les trois grands piliers concernés par les IAE

Ces infrastructures sources de diversité végétale peuvent servir de zones de refuges et d'habitats pour les arthropodes (Landis et *al.*, 2000 ; Collins et *al.*, 2002 ; Frank et Reichhart, 2004 ; Rusch et *al.*, 2010 ; Sarhou et *al.*, 2005, 2014 ; Sarhou, 2016 ; Pfiffner et *al.*, 2013). Elles peuvent également être sources de pollen, de nectar (Villenave et *al.*, 2005 ; Ricci et *al.*, 2005 ; Rusch et *al.*, 2010 ; Pfiffner et *al.*, 2013 ; Villenave-Chasset et Leblond, 2019) et de proies alternatives (Landis et *al.*, 2000 ; Denys et Tschardtke, 2002 ; Bianchi et *al.*, 2006 ; Griffiths et *al.*, 2008 ; Rusch et *al.*, 2010 ; Ricard et *al.*, 2012) à condition que les plantes choisies correspondent aux préférences des insectes concernés (morphologie de la fleur et qualité du nectar) (Heimpel et Jervis, 2005 ; Stang et *al.*, 2006 ; Pfiffner et *al.*, 2013) mais encore que ces plantes relais soient attractives pour des proies alternatives non inféodées à la culture en place. Ces proies alternatives vont créer des interactions qui vont jouer sur les relations entre un ravageur et ses ennemis naturels. Elles favorisent les populations de prédateurs,

en améliorant leur croissance, leur fécondité et donc leur abondance (Ricard et *al.*, 2012 ; Simon et *al.*, 2010, 2017 ; Albert et *al.*, 2017 ; Demestihias et *al.*, 2017) (voir figure 20).

Afin d'assurer la continuité de la présence des ennemis naturels, leur fournir des habitats et des ressources de manière continue dans le temps et dans l'espace est primordial. Il est alors pertinent, dans un premier temps, d'aménager une diversité d'IAE dont les floraisons vont se succéder dans le temps. Cette réflexion peut être menée lors de l'intégration de BF dans les vergers en privilégiant p. ex. des espèces à floraison précoce qui conditionnent la présence des ennemis naturels lors du début de l'infestation (Welch and Harwood, 2014). C'est d'autant plus le cas avec les pucerons qui se multiplient précocement de manière exponentielle via la parthénogénèse (Trillot et *al.*, 2002 ; Albert et *al.*, 2016). Dans un second temps, il est pertinent de maintenir une proximité entre ces différentes IAE et la culture en place : la distance aux IAE pouvant influencer l'abondance des araignées (Miliczky et Horton, 2005), des syrphes (Bowie, 1999) et des hyménoptères parasitoïdes (Lavandero et *al.*, 2005). De plus, en fonction de leur taille et de leur densité, les IAE peuvent également constituer des barrières qui limitent la dispersion et la propagation de certaines espèces ou agit comme élément de dilution, ce qui réduit la densité de la plante hôte (Josso et *al.*, 2013 ; Schroth et *al.*, 2000).

Les comportements d'évitement et de dissimulation des proies, de recherche et d'attaque de prédateurs sont conditionnées par les complexités des habitats. Une structure complexe favorise p. ex. la persistance des prédateurs et réduit la prédation intra-guilde (le fait qu'un prédateur puisse se nourrir d'un autre prédateur, alors que ceux-ci ont pour cible une proie commune et sont donc en compétition), ce qui peut avoir un impact favorable sur le contrôle des ravageurs (Ricard et *al.*, 2012 ; Snyder, 2019). Ainsi, la combinaison des aménagements à l'échelle de la parcelle (IAE) et du paysage (habitats semi-naturels) est une stratégie prometteuse pour influencer positivement les ennemis naturels à condition d'aboutir aux combinaisons temporelles et spatiales les plus avantageuses.

2.3. La diversification des IAE au sein des vergers : clé d'une régulation biologique efficace ?

2.3.1. La biodiversité en arboriculture fruitière et ses spécificités

Les vergers sont, du fait de leur nature et de leur constitution, des habitats riches en biodiversité, comparativement aux cultures annuelles (Ricard et *al.*, 2012 ; Simon et *al.*, 2010 ; 2012 ; 2017). Tout d'abord, leur pérennité facilite la conservation des assemblages de plantes vivaces (c.-à-d. couvre-sol végétal, bordures de haies, etc.) et donc la permanence du réseau trophique. De plus, leur structure multi-strates composée d'une strate arborée (pommier) mais aussi d'une strate herbacée dans les inter-rangs (BE) augmente la disponibilité en ressources et/ou en habitats pour les organismes vivants, entretient les réseaux trophiques au profit des ennemis naturels des ravageurs, et, par conséquent, la lutte biologique pour la conservation (voir en annexe 6 p 80) (Landis et *al.*, 2000 ; Simon et *al.*, 2017). A l'inverse, la longévité de la plante hôte des ravageurs (pommier) est contraignante : un ravageur peut être dommageable au cours de la saison actuelle mais aussi au cours des années suivantes. P. ex. le carpocapse complète son cycle de vie dans le verger et constitue des populations ou inoculum abondant au fil des ans (Simon et *al.*, 2017).

Les vergers permettent de manipuler spatialement la diversité végétale et la complexité des habitats par la gestion de la densité des arbres, de l'architecture individuelle des arbres, de la couverture végétale dans l'inter-rang, et enfin des plantes en bordure (p. ex., bordures de haies) (Simon et *al.*, 2010). Il est souvent difficile de démêler la dimension temporelle et spatiale pour une culture pérenne comme les vergers (voir figure 21) (Dambreville et *al.*, 2013 ; Simon et *al.*, 2017).

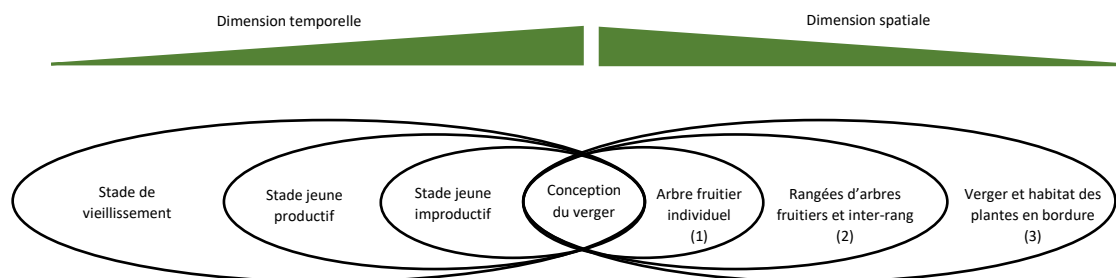


Figure 21 : Principales dimensions à considérer lors de la conception d'un verger système (Simon et al., 2017)
 (1) cultivars/porte-greffe et architecture des arbres ; (2) rangées et allées d'arbres ; (3) vergers dans son intégralité, y compris les arbres fruitiers, les couvre-sols, les haies qui bordent le verger et tout autre habitat semi-naturel

La lutte par conservation est envisagée dans les vergers qui, par leur pérennité et leur complexité, sont plus susceptibles d'abriter une faune auxiliaire stable et diversifiée (Simon et al., 2010). Un intérêt croissant concerne la diversification des strates productives et non productives comme levier de réduction du recours aux intrants. Cette diversification favoriserait les auxiliaires et la régulation des ravageurs des cultures, assurerait un effet barrière aux maladies, et augmenterait la productivité du système (Snyder et al., 2006 ; Michaelides et al., 2018). Ces systèmes multi-strates s'inspirent de l'agroforesterie, qui recherche une synergie entre les strates d'arbres et de cultures annuelles.

2.3.2. L'intégration d'IAE innovantes : le cas des vergers agroforestiers

2.3.2.1. L'agroforesterie : qu'est-ce que c'est ?

L'agroforesterie est « l'ensemble des pratiques, associant arbres, cultures et/ou animaux sur une même parcelle agricole en bordure ou en plein champ » (Association Française d'Agroforesterie, 2020 ; Den herder et al., 2017) et permettant « de diversifier et maintenir la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales de l'ensemble des utilisateurs de la terre » (Geves, 2020). Les types d'agroforesterie ont été classés par Nair (1985) en trois catégories : (i) l'agrosylviculture regroupe des « systèmes qui favorisent la juxtaposition des arbres selon différentes répartitions spatiales et temporelles, dans des cultures agricoles qui sont supportées par des terres arables » ; (ii) le sylvopastoralisme regroupe des « systèmes qui assurent la cohabitation des arbres et des animaux domestiques (élevage) dans des pâturages » ; (iii) l'agrosylviopastoralisme regroupe toutes les dimensions abordées par les deux termes précédents. Le travail actuel repose sur un système dit agrosylvicole.

2.3.2.2. Les apports de l'arbre en milieu agricole

L'agroforesterie n'est pas une simple juxtaposition d'arbres et de culture mais un système mixte et original qu'il faut gérer de manière dynamique, pour produire, mais aussi pour protéger l'environnement. En agrosylviculture, p. ex., les arbres plantés dans des parcelles cultivées vont bouleverser les conditions locales, microclimatiques et biotiques du milieu. La lumière, l'eau, l'azote, les communautés bactériennes des sols, etc. seront autant de paramètres pouvant être fortement modifiés (Dupraz et al., 2008). Les bénéfices engendrés par ce système sont multiples (voir figure 22).

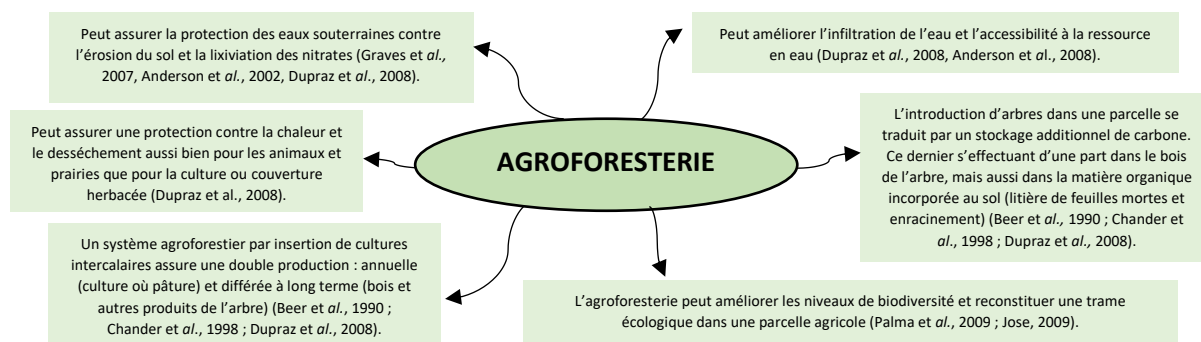


Figure 22 : Les bénéfices engendrés par les systèmes agroforestiers

2.3.2.3. L'impact de l'agroforesterie sur les mécanismes de régulation biologique

L'introduction d'arbres dans les zones de cultures intensives permet de diversifier les habitats (zones de refuge, zones de chasses et d'alimentation, zones d'hivernage ou d'estivage, sites de reproduction, etc.) et donc participe au maintien des espèces menacées par l'intensification agricole (Palma *et al.*, 2007 ; Jose *et al.*, 2009). Selon la taille des arbres introduits et leur volume, ils peuvent être à la fois barrière physique pour certaines espèces et corridor de déplacement pour d'autres (Jose, 2009). Egalement, ce système entraîne la formation d'un microclimat (Gosme *et al.*, 2016) plus ou moins favorable aux différents arthropodes.

Ces systèmes agroforestiers associant sur une même parcelle des espèces ligneuses, arbustives et herbacées, contribuent à la diversification spatiale et temporelle des systèmes agricoles. D'après la méta-analyse de Pumarino *et al.* (2015) : (i) l'utilisation des pratiques agroforestières augmente l'abondance des insectes auxiliaires ; (ii) l'abondance des ravageurs et les dégâts liés aux ravageurs et aux maladies sur plantes sont plus faibles sur plantes pérennes qu'en système non agroforestier. De ce fait, ils constituent une stratégie de culture potentiellement pertinente pour accroître la biodiversité, optimiser les régulations biologiques et la stabilité des agroécosystèmes (Altieri, 1995 ; 1999 ; Stamps et Linit, 1998 ; Sarthou et Smits, 2006 ; Hatt *et al.*, 2018 ; Sarthou et Simon, 2018) permettant de diminuer, voire de supprimer, l'usage des pesticides. Toutefois, la plupart des études testant l'impact des pratiques agroforestières sur les bioagresseurs sont réalisées sur café, cacao et maïs, majoritairement en Afrique de l'Est et de l'Ouest, etc. (climat tropical). Un plus large panel de cultures, de régions et de types de systèmes agroforestiers doit être étudié pour compléter les connaissances actuelles et prendre en compte la diversité des contextes, des conceptions et des pratiques (Pumarino *et al.*, 2015 ; Andres *et al.*, 2016).

2.3.2.4. Vers des vergers diversifiés multi-strates

Dans les vergers biologiques et agroécologiques typiques, les pommiers représentent dans la plupart des cas la strate supérieure, c.-à-d. en plein soleil, tandis que toutes les autres plantes (BE) occupent les strates inférieures sous les pommiers. Cependant, des systèmes plus complexes peuvent combiner les pommiers dans diverses strates : grands arbres (p. ex., noyers et arbres à bois) surpassant le pommier, avec des arbustes (p. ex., cassis) et éventuellement des plantes annuelles (p. ex., rotation maïs-soja) dans le sous-étage. Ces systèmes sont identifiés comme étant « polycultures ligneuses multifonctionnelles » (Lovell *et al.*, 2018) et appartiennent à l'agroforesterie.

La possibilité de cultiver des pommiers entre une strate haute composée d'arbres à bois (p. ex. noyer à bois) et une strate basse composée à la fois d'une BE et d'une BF reste à explorer. Tout d'abord, l'agroforesterie, en plus d'être une source de diversification des habitats pour les arthropodes des vergers, peut influencer la culture de pommiers en place via la compétition pour la lumière et la formation d'un microclimat plus doux pour les pommiers et leurs fruits. Ces effets sur la température et l'hygrométrie (Gosmes *et al.*, 2016) peuvent entraîner un changement d'architecture et de croissance des fruitiers (Pitchers, 2021) qui est susceptible d'influencer le développement des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels selon leurs préférences microclimatiques, le tout impactant le contrôle biologique des ravageurs. De plus, Staton *et al.* (2021) ont mis en avant que les pommiers évoluant au-dessus d'un sous-étage fleuri présentent : (i) des ennemis naturels plus tôt dans la saison, (ii) moins de colonies de pucerons, (iii) moins de fruits endommagés par les pucerons et (iv) plus de pollinisateurs par rapport aux pommiers situés au-dessus de sous-étage fauchés. Dans les allées de cultures arables, la richesse taxonomique et la diversité spécifique (indice de Shannon) des ennemis naturels terrestres étaient significativement supérieur à proximité des sous-étages fleuris, comparé à proximité des sous-étages fauchés, tôt dans la saison. Cette combinaison permettrait donc d'obtenir

un système multi-strate (Lauri et Simon, 2019), a priori favorable aux ennemis naturels et donc au contrôle biologique des ravageurs (Pumariño et *al.*, 2015). Toutefois, les systèmes intégrés en arboriculture fruitière sont actuellement peu documentés, et encore moins en climat tempéré (Lauri et Simon, 2019).

Une des questions centrales est de savoir si la diversification parcellaire est un moyen efficace pour optimiser les régulations biologiques et améliorer le contrôle des ravageurs. De nombreuses incertitudes persistent encore à ce jour.

2.3.3. Les limites de l'impact de la diversification parcellaire sur la régulation biologique

Il semble acquis que l'augmentation de la diversité fonctionnelle végétale ou encore la diversification des strates productives et non-productives augmentent l'abondance du nombre d'espèces d'ennemis naturels dans les vergers via la mise en place d'IAE. Cela favoriserait la régulation biologique et permettrait de réduire la pression des ravageurs : le prédateur voyant sa densité augmenter, exerce davantage de pression sur le ravageur (interaction proie-proie négative appelée également compétition apparente) (Snyder et *al.*, 2006 ; Letourneau et *al.*, 2011 ; Ricard et *al.*, 2012 ; Boyer et *al.*, 2017). Dans le cas des vergers de pommiers, plusieurs études ont mis en avant le potentiel des IAE, plus particulièrement la proximité d'un mélange fleuri, de favoriser les ennemis naturels et ainsi d'améliorer la régulation biologique du puceron (Wyss, 1995 ; Miñarro and Prida, 2013 ; Pfiffner et *al.*, 2013 ; Alignier et *al.*, 2014 ; Albert et *al.*, 2016 ; 2017 ; Cahenzli et *al.*, 2019 ; Staton et *al.*, 2021).

Cependant, de nombreuses incertitudes persistent sur les relations entre pratiques agricoles, processus écologiques et services écologiques (Duru et *al.*, 2015). L'effet de la diversité végétale et de la conservation des habitats sur les populations d'arthropodes (ravageurs et auxiliaires) relève de phénomènes nombreux et complexes (Russell, 1989 ; Landis et *al.*, 2000 ; Simon et *al.*, 2009). Leur influence positive sur les populations d'ennemis naturels ne résulte pas systématiquement en une meilleure régulation des ravageurs (Bischoff et *al.*, 2016). Les effets de la diversité végétale peuvent se révéler aussi bien bénéfiques que préjudiciables pour la culture (Solomon, 1981 ; Gruys, 1982 ; Bugg et Waddington, 1994 ; Rieux, 1994 ; Boller et *al.*, 2004 ; Simon et *al.*, 2009 ; 2010). En effet, la gestion et l'aménagement des parcelles peuvent favoriser l'ensemble de la biodiversité, dont les ennemis naturels mais aussi les ravageurs (Landis et *al.*, 2000). Les effets positifs sur les ennemis naturels et les processus écologiques de régulation peuvent de ce fait être atténués par des effets positifs (directs ou indirects) sur les populations de ravageurs (Thies et *al.*, 2005 ; Bianchi et *al.*, 2006 ; Rusch et *al.* 2010 ; Chaplin-Kramer et *al.*, 2011). La présence de proies alternatives peut également provoquer une diversion et une dilution des proies. Dans ce cas, le prédateur se tourne davantage vers une ou plusieurs autres cibles, ce qui est favorable au ravageur (interaction proie-proie positive) (Ricard et *al.*, 2012). D'après l'étude d'Albert et *al.* (2017) menée sur des vergers de pommiers, il a été démontré que les haies en bordure influencent (de manière directe et indirecte) positivement les colonies de pucerons cendrés ainsi que les populations d'ennemis naturels. On parle notamment de disservice écosystémique : l'augmentation de la régulation biologique ne permet pas de compenser l'augmentation des ravageurs, ce qui se traduit par une augmentation des dégâts sur les cultures.

De plus, la régulation biologique varie en fonction des caractéristiques de chaque site : culture en place, pratiques culturales, contexte pédoclimatique, structure et composition du paysage (intra et extra-parcellaire) (Le Roux et *al.* 2008 ; Malézieux, 2012 ; Shennan, 2008 ; Veres et *al.*, 2013). Les réponses en termes de prédation peuvent se révéler contradictoires en fonction du site (Wyss, 1995 ; Vogt et Weigel, 1999 ; Simon et *al.*, 2009). Il est donc logique que certaines études scientifiques se contredisent. C'est la principale difficulté de la lutte biologique par conservation : il n'y a pas, ou peu, de solutions génériques. Elle doit être adaptée spécifiquement à chaque contexte (Caporali, 2010).

L'enjeu premier de la lutte biologique par conservation consiste donc à identifier les combinaisons de paramètres permettant de favoriser efficacement et durablement les populations d'ennemis naturels. Si la recherche scientifique apporte aujourd'hui des solutions visant à les favoriser, elle doit maintenant mieux comprendre les interactions et les processus écologiques qui interviennent à l'échelle de la parcelle et du paysage. Des inconnues persistent encore dans les mécanismes impliqués. Il est suggéré de concentrer les efforts de recherche futurs sur la mesure de la dynamique des populations plutôt que les dénombrements statiques afin de mieux caractériser la relation entre complexité du paysage et services de régulation biologique (Chaplin-Kramer et *al.*, 2011).

2.4. Question de recherche

Les vergers de pommiers sont des cultures pour lesquelles il est important de trouver des méthodes alternatives de protection afin de réduire l'usage des produits phytosanitaires. Le contrôle biologique des ravageurs comme *D. plantaginea*, *A. pomi* et *C. pomonella* constitue un des services écosystémiques pour lesquels les attentes sont les plus fortes. Pour favoriser les auxiliaires naturellement présents et potentiellement efficaces contre ces ravageurs, la lutte biologique par conservation est envisagée. Elle vise à diversifier les vergers en y intégrant des IAE de type haies, BE, BF, rangées d'arbres (sources d'abris, de nourriture, de sites d'hivernation, etc. pour les auxiliaires) tout en raisonnant les pratiques culturales (applications, taille, etc.). L'agroforesterie serait une stratégie de culture potentiellement pertinente pour optimiser les régulations biologiques dans un verger. Toutefois, l'effet de la diversité végétale et de la conservation des habitats sur les ravageurs et auxiliaires relève de phénomènes nombreux et complexes pouvant se révéler aussi bien bénéfiques que préjudiciables pour les pommiers et impliquant des mécanismes généralement peu documentés. L'efficacité de ces assemblages est difficilement prévisible et dépend de nombreux facteurs environnementaux.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le dispositif de recherche GAFAM sur le domaine de Restinclières. Ce dispositif conduit en AB et bas niveaux d'intrants, vise à cultiver du pommier entre une strate haute composée de noyer à bois (10-15 m) et une strate basse composée à la fois d'une BE de légumineuses (sainfoin) et d'une BF (phacélie). Le tout est bordé de différentes haies. Ainsi, ce stage va tenter de répondre à la problématique suivante : **Le contexte agroforestier et la présence d'un cortège d'IAE (BF, flore spontanée, haies semi-naturelles en bordure) impactent-ils les mécanismes de régulation biologique des principaux ravageurs du pommier que sont le puceron cendré (*D. plantaginea*), le puceron vert (*A. pomi*) et le carpocapse (*C. pomonella*) ?** Deux hypothèses peuvent être étudiées : (i) la proximité des noyers influence les dynamiques des communautés d'arthropodes (ravageurs et ennemis naturels) présentes sur les pommiers réduisant directement et/ou indirectement la pression des ravageurs ; (ii) la diversité végétale installée au niveau des inter-rangs (BE et BF) favorise la diversité des invertébrés et plus particulièrement des auxiliaires et les services écosystémiques connexes, la pression des principaux ravageurs du pommier va notamment varier selon les stades de floraison des espèces végétales présentes.

Pour mener cette étude, sont réalisés sur le terrain (en relation avec les partenaires d'INRAE Gotheron et du Ctifl Balandran dans le cadre du projet ALTO): (i) une analyse des dynamiques et de la sévérité d'infestation des pucerons cendrés et verts sur pousses en croissance, et un suivi de l'incidence de la première génération de carpocapse sur fruits, sur des pommiers répartis selon un gradient de distance aux noyers ; (ii) parallèlement, un inventaire de la faune auxiliaire, décrite par groupes fonctionnels, sur trois cercles spatiaux : dans les colonies de pucerons, sur le pommier, et dans la parcelle ; et une analyse des phénomènes de régulation biologique des bioagresseurs étudiés.

3. Méthodologie et moyens mis en œuvre

3.1. Description de la parcelle étudiée

3.1.1. Situation géographique, climatique et pédologique de la parcelle étudiée

L'ensemble de l'étude sur laquelle repose ce stage dépend d'une seule parcelle. Il s'agit de la parcelle GAFAM (ou parcelle A1) se situant au l'extrémité Sud du Domaine de Restinclières (voir en annexe 7 p 80), à 16 km au Nord de Montpellier, dans le département de l'Hérault et plus particulièrement dans la commune de Prades-le-Lez (43° 42' 12.168" N, 3° 51' 29.872" E). D'une taille de 0,2 (hectares), elle est située à une altitude de 70 mètres au-dessus du niveau de la mer, au cœur d'un environnement semi-naturel, et avoisine d'autres parcelles agroforestières. L'horizon de surface (0 à 40 cm) est argilo-limoneux (granulométrie de type : 19 % d'argile, 59 % de limon et 22 % de sable). Le climat est de type méditerranéen sec, caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de 750 mm, mais avec de fortes disparités selon les saisons. L'automne, et particulièrement ses épisodes cévenols ainsi que le printemps engendrent une plus forte pluviométrie (Lauri, 2021).

3.1.2. Le dispositif expérimental : historique, matériel végétal et organisation/design

En février 1995, des noyers hybrides (*Juglans nigra* x *Juglans regia* NG23) sont plantés en rangs sur le site pour réaliser des essais d'agroforesterie. Les rangs de noyers sont alors espacés de 13 mètres et les noyers au sein d'un même rang sont espacés de 4 mètres. En 2007, les rangs de noyers ne sont plus complets à la suite de la destruction des arbres chétifs en faveur des plus développés. Certains noyers sont donc espacés de plus de 4 mètres sur un même rang (multiple de 4 mètres). Ils sont dans leur 27^{ème} année de croissance en 2021 et sont destinés à la production de bois (voir en annexe 8 p 81). Ne produisant que très peu de noix, ils ne sont pas infestés par *C. pomonella*. En mars 2016, des pommiers (*Malus domestica* Borkh. Cv., variété Dalinette, sur porte-greffe Geneva® G202 C.O.V) sont plantés dans la parcelle de noyers. La variété Dalinette est caractérisée par une résistance à la Tavelure et une faible sensibilité au feu bactérien et à l'oïdium (voir en annexe 9 p 81) tandis que le porte-greffe est caractérisé par une tolérance au puceron lanigère, au feu bactérien et au phytophthora (voir en annexe 10 p 81). Au total, 149 pommiers sont répartis sur 10 rangs : 141 de la variété Dalinette, 7 de la variété Story et 1 porte-greffe. La variété Story est la variété pollinisatrice. Les pommiers étudiés sont dans leur 6^{ème} année de croissance en 2021.

Les pommiers sont disposés par rapport aux noyers selon trois traitements : ceux plantés dans les rangs de noyers (agroforesterie intra-rangs ; AFR), ceux plantés entre les rangs de noyers (agroforesterie inter-rangs ; AFIR) et ceux plantés à plus de 15 mètres des noyers (pour former le groupe témoin ; AC) (voir tableau 5, tableau 6 et figure 23). Les pommiers sont espacés de 1,3 mètre sur un même rang. Les rangs AFIR sont situés à 6,5 mètres des rangs de noyers. Tous les rangs de la parcelle sont orientés est-ouest.

Parmi les 149 pommiers, 45 ont été sélectionnés en 2017 pour réaliser les suivis. Leur sélection est fonction de la section du tronc (liée à la vigueur des arbres) et de l'environnement lumineux (Pitchers, 2021). Ils sont répartis selon deux blocs (voir tableau 6 et figure 23) afin de mettre en avant l'existence ou non d'un gradient parcellaire pouvant impacter les conclusions observées concernant l'influence ou non de la proximité des noyers sur les pommiers. Le bloc 1 compte 22 arbres sélectionnés (10 AC ; 6 AFIR ; 6 AFR) et le bloc 2 compte 23 arbres sélectionnés (5 AC ; 9 AFIR ; 9 AFR). La directive de l'étude est de réaliser les suivis d'arthropodes sur ces 45 arbres, afin de pouvoir faire, à terme, une analyse pluriannuelle.

Tableau 5 : Les différentes modalités agroforestières. Codification d'après Pitchers, 2021.

Traitement Code	Agroforesterie intra-rangs	Agroforesterie inter-rangs	Témoin
Signification	AFR	AFIR	AC
	AgroForestry Row	AgroForestry Inter-Row	Agricultural Control

Tableau 6 : Composition des blocs du dispositif expérimental. Codification d'après Pitchers, 2021.

Bloc	1			2		
	AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Composition sur les 149 pommiers disponibles	18	40	25	8	46	12
Composition sur les 45 pommiers sélectionnés	10	6	6	5	9	9
Localisation	Nord-Est ←			→ Sud-Ouest		

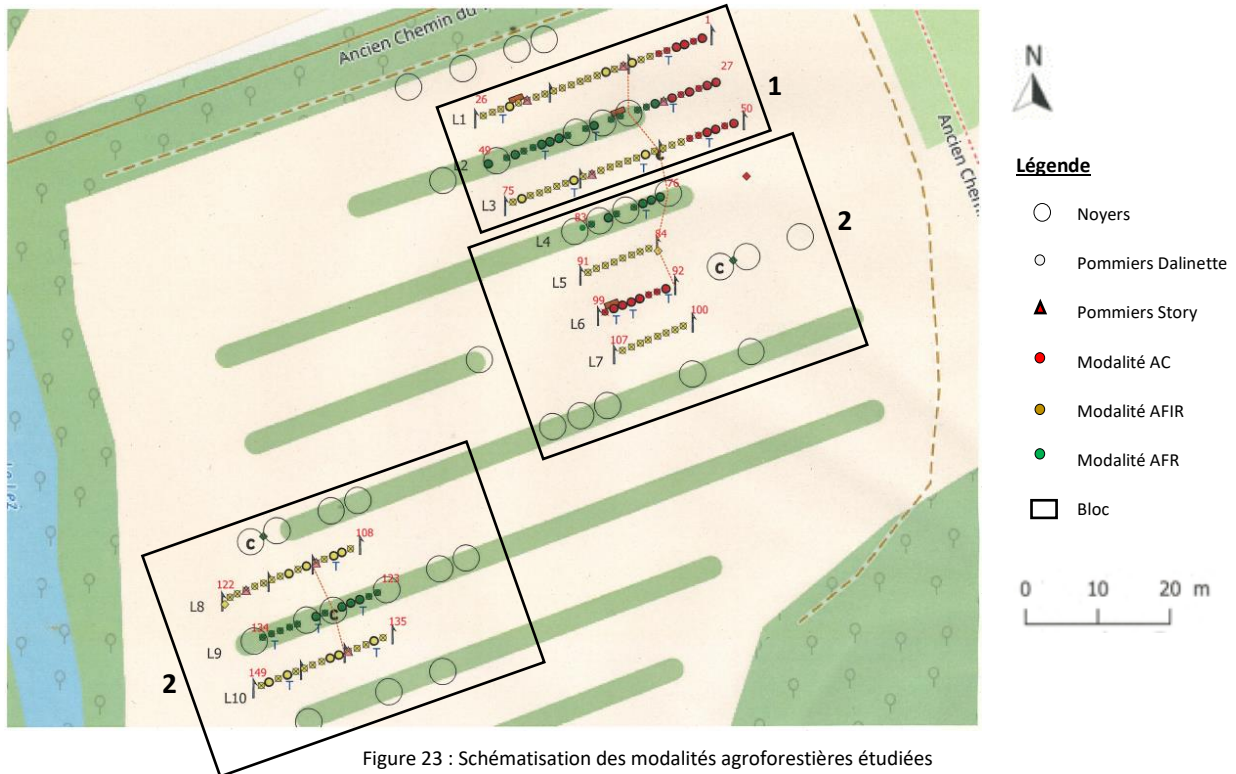


Figure 23 : Schématisation des modalités agroforestières étudiées

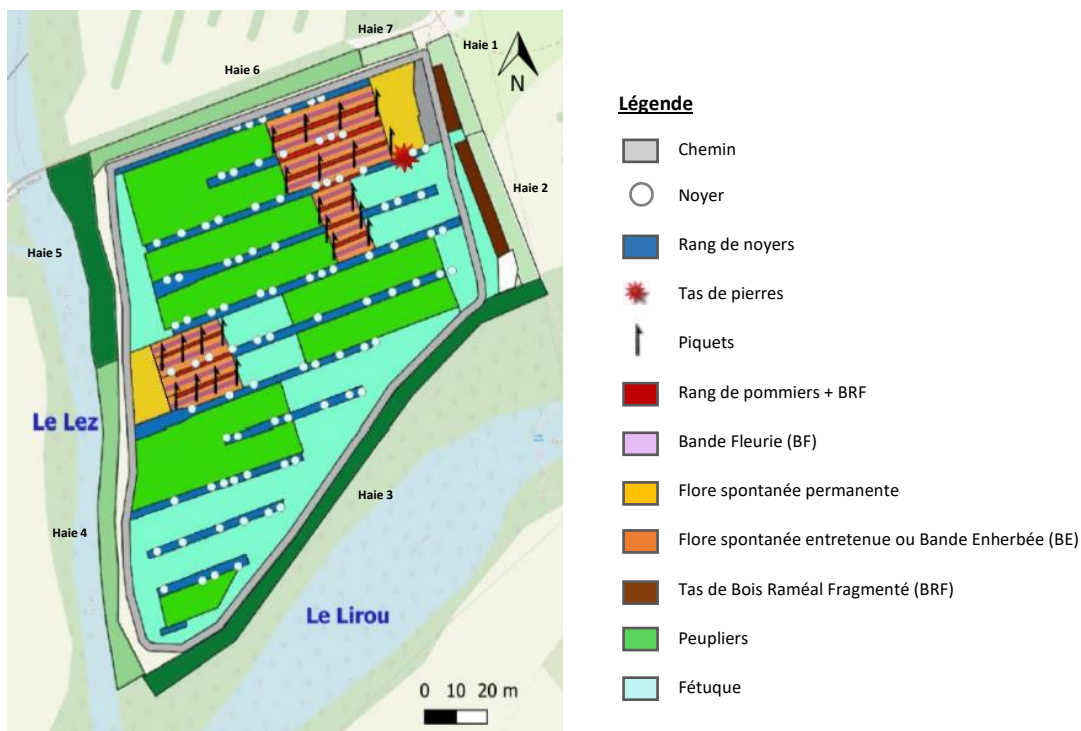


Figure 24 : Schématisation des différentes IAE présentes sur la parcelle étudiée

La parcelle est également constituée de différents aménagements susceptibles de favoriser la biodiversité (voir figure 24) :

- Des peupliers sont présents sur la parcelle en TCR (Taillis Courte Rotation) ;
- La BE présente entre les rangs de pommiers était composée de luzerne jusqu'à son remplacement par du sainfoin en 2019. C'est maintenant une flore spontanée composée de diverses graminées et astéracées qui s'y développe ;
- Une BF (plantes attractives d'auxiliaires) a été semée à la volée en octobre 2020, après un travail superficiel du sol. Elle mesure 1.15 mètre de large et est composée de 5 espèces : Phacélie, Souci officinal, Cosmos, Bleuet et Œillet d'Inde. Elle est implantée de chaque côté des tous les rangs de pommiers et divise donc en deux la BE originellement implantée. En avril 2021, seule la phacélie est présente sur cette BF et quelques individus de *souci officinal* ;
- Deux îlots (au nord-est et à l'ouest) sont constitués d'une flore spontanée permanente plus diversifiée et ne nécessitent pas d'entretien ;
- Le reste de la strate herbacée du site est constitué de fétuque (graminée), plantée en 2010 dans le cadre d'un essai d'enherbement de l'inter-rang des noyers.

Cette parcelle est située à la confluence du Lez et du Lirou. De ce fait, les faces ouest et sud-est du site sont bordées de cours d'eau qui permettent le développement d'arbres rivulaires. Les faces nord et nord-est sont bordées de différentes haies. Cette diversité de haies (composition, hauteur) constitue une grande IAE et forme un réseau avec l'environnement semi-naturel présent sur le domaine. La végétation à l'intérieur de la parcelle est diversifiée et constitue également plusieurs IAE.

3.1.3. Itinéraire technique de la parcelle étudiée

La conduite technique de la parcelle respecte le cahier des charges de l'AB (préconisations du CETA Hérault-Vidourle dans lequel le dispositif GAFAM est inclus) et l'expérimentation est également conduite avec des niveaux très bas d'intrants. En 2019, l'IFT de la culture était de deux. Pour 2020, à la suite de l'arrêt des activités pendant la période de confinement, l'IFT était seulement de un. Pour l'année 2021, l'IFT sera similaire à celui de 2019. Les peupliers en TCR sont recépés tous les 4 voire 5 ans et transformés en BRF (Bois Raméal Fragmenté). Les rangs de pommiers sont recouverts de ce BRF afin de limiter le développement des adventices au pied des arbres et de maintenir l'hydratation tout au long de la saison de croissance. La flore spontanée de la BE est fauchée deux fois dans la saison. Les deux îlots évoqués précédemment ne nécessitent pas d'entretien. Les pommiers sont irrigués au goutte-à-goutte (via deux tuyaux de part et d'autre des pommiers et des goutteurs espacés de 50 cm) et sont organiquement fertilisés. Ils n'ont pas subi d'opération de taille depuis 2016, excepté l'enlèvement de quelques branches débordant sur l'inter-rang ou touchant le sol (voir tableau 7).

Tableau 7 : Synthèse des opérations techniques réalisées sur la parcelle GAFAM depuis septembre 2020

Date	Opération
15/09/2020	Préparation des bandes enherbées : griffage
07/10/2020	Préparation des bandes enherbées : rotovator
08/10/2020	Semis bandes enherbées : cosmos, bleuet, phacélie, tagète, souci + Passage Rouleau GEVES
08/10/2020	Pose de Keraphos 6-7-7 ⁽¹⁾ (250g/pied) + BRF sur rangs 8-9-10
09/10/2020	Débroussaillage et pose de BRF sur rangs 5-6-7
13/01/2021	Taille minimale (branches tombantes sur le sol ou encombrement spatial) et rattachage des pommiers
14/01/2021	
15/01/2021	Pose des protections anti-lapin et ratissage des feuilles sur bandes enherbées
17/02/2021	Elagage des branches retombantes des noyers au-dessus des pommiers
12/03/2021	Pose de Keraphos 6-7-7 sur rangs 285g/pied et plantation de 5 variétés de romarins (2 pieds/pommier).
16/03/2021	1 ^{er} passage d'Ovispray ⁽³⁾ (2.5L/HL donc 0.025L/L), 4 et ½ pleins 1 ^{ère} irrigation lancée de 2h30 (surtout pour les romarins)
31/03/2021	Traitement Oviphyt ⁽²⁾ (2L/HL donc 0.020L/L), 4 et ½ passages
20/04/2021	Nettoyage autour des romarins très enherbés avec 10 % de mortalité (varié selon les blocs).
21/04/2021	Mise du Kéraphos (285g/pied) et replantation de romarins où des mortalités ont été constatées Mise de BRF sur toutes les lignes
25/05/2021 et 26/05/2021	Débroussaillage des bandes enherbées (non-fauchage du sainfoin et des luzernes feuillées)
17/06/2021, 18/06/2021, 19/06/2021 et 21/06/2021	Eclaircissage des tous les arbres à 5 fruits/cm ² de section de tronc

(1) Keraphos 6-7-7 est un engrais organique (base animale et végétale). (2) Oviphyt est une huile blanche insecticide et acaricide avec un large spectre d'homologation. Elle est notamment préconisée dans les traitements d'hiver et de printemps d'arbres fruitiers tels que les pommiers, poiriers, pruniers, cerisiers, ou encore dans la lutte contre les cochenilles sur agrumes. Elle cible notamment les acariens, les phytoptes et le stade hivernant des ravageurs (cclsite.fr, 2021). (3) Ovispray est une huile minérale paraffinique insecticide et acaricide préconisée dans les mêmes traitements que Oviphyt (cclsite.fr, 2021 ; E-Phy anses, 2021).

3.2. Variables étudiées et protocoles suivis

Les différentes variables étudiées peuvent être représentés schématiquement à l'aide de cercles s'emboîtant les uns dans les autres et aux diamètres plus ou moins importants selon l'échelle à laquelle on se place (voir figure 25). Le cercle central étant le pommier voire la pousse infestée ou non par les bioagresseurs. L'idée ici est d'avoir une représentation globale de l'interaction auxiliaires-ravageurs au sein du pommier en lien avec le contexte agroforestier en élargissant au parallèle le cercle d'étude au-delà du pommier vers les IAE environnantes.

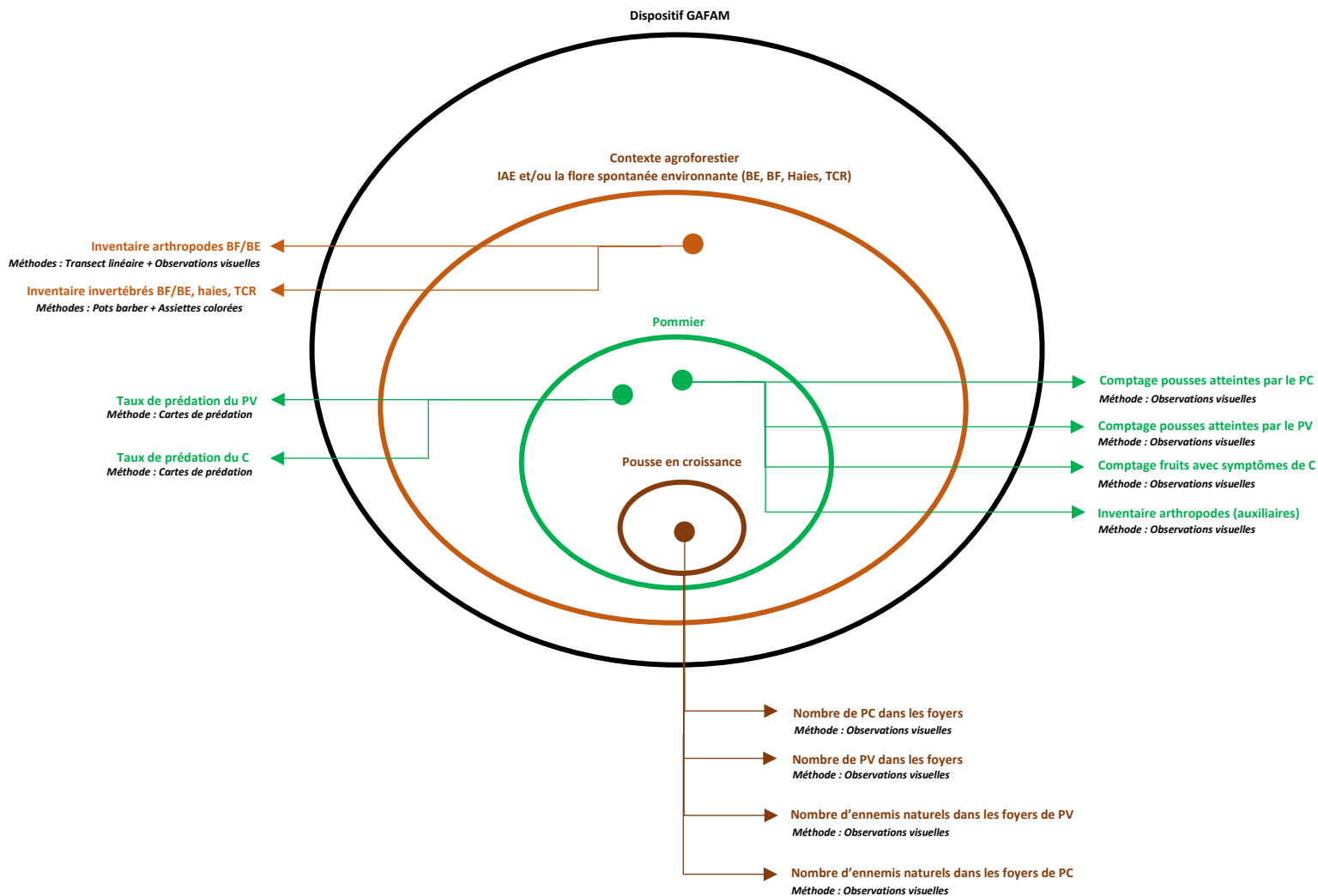


Figure 25 : Synthèse de l'ensemble des variables suivies et protocoles étudiés

PC : Pucerons Cendrés ; PV : Pucerons Verts ; C : Carpopapse ; BE : Bandes Enherbées ; BF : Bandes Fleuries ; TCR : Taillis Courte Rotation

3.2.1. Méthodes et protocoles de suivi des ravageurs (puçerons et carpocapse)

3.2.1.1. Incidence de *D. plantaginea* et *A. pomi* à l'échelle du pommier

Il s'agit d'évaluer le pourcentage de pousses de l'année en cours présentant au moins un puceron selon la méthode visuelle et non-destructive formalisée par Simon S. (2010). Les observations sont réalisées très tôt (avant et/ou juste après floraison) et fréquemment (tous les quatre jours puis toutes les semaines) pendant la période d'infestation printanière. Pour chacun des 45 pommiers sélectionnés, 50 pousses sont échantillonnées aléatoirement à chaque date d'observation (25 face Nord et 25 face

Sud). En cas de volume de couvert insuffisant (inférieur à 50 pousses), 25 pousses en croissances sont échantillonnées (15 face Nord et 15 face Sud).

3.2.1.2. Incidence de *D. plantaginea* et *A. pomi* au niveau des pousses

Il s'agit d'évaluer la dynamique d'infestation des pucerons au niveau des foyers, de décrire le complexe d'ennemis naturels dans les colonies de pucerons sur la période d'infestation et d'identifier les phases du cycle biologique des pucerons (phases d'expansion, de pic et de migration) selon la méthode visuelle et non-destructive formalisée par Simon S. et Capowiez Y. (2010). Les pousses infestées par les pucerons sont repérées très tôt (avant et/ou juste après floraison) et marquées au fur et à mesure de leur apparition sur les pommiers. Elles sont ensuite observées fréquemment (tous les quatre jours puis toutes les semaines) pendant la période d'infestation printanière. L'objectif étant de suivre l'évolution du nombre de pucerons et d'ennemis naturels le plus exactement possible au sein-même des foyers. Le nombre maximum de foyers étudiés par pommier est de trois. Pendant la phase de migration les pucerons ailés sont également enregistrés (noter leur présence permet de marquer le début de cette migration). Les ennemis naturels (auxiliaires par groupe fonctionnel) et les pucerons parasités (momies) si présents sont comptés en nombre exact. Les fourmis et tout autre arthropodes sont également enregistrées et leur stade est précisé (toutes les formes ne sont pas actives).

Les comptages du nombre de pucerons par foyer ainsi que les comptages du nombre de pousses par pommier présentant au moins un puceron (paragraphe 3.2.2.1.) sont réalisés en même temps. Ils sont effectués à 17 reprise pour *D. plantaginea* du 25/03/2021 au 08/06/2021 et à 14 reprises pour *A. pomi* du 06/04/2021 au 08/06/2021 (voir en annexe 11 p 82).

3.2.1.3. Suivi de l'incidence de la première génération de carpocapse sur fruits

Il s'agit d'évaluer le pourcentage de pommiers présentant au moins un fruit avec des symptômes de carpocapse ainsi que le pourcentage d'inflorescences avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse. Cette opération est réalisée deux fois selon les projections par modélisation fournies par le CTIFL (voir en annexe 12 p 82) : le 17/06/2021 et le 18/06/2021 pour le suivi du début de la première génération (à 50 % d'éclosions) et le 04/07/2021 pour le suivi de la fin de la première génération (à 100 % d'éclosions). Il est important de prendre en compte le fait que entre ces deux observations, les fruits symptomatiques ont été retirés et un éclaircissage manuel a eu lieu afin que tous les arbres aient 5 fruits/cm² de section de tronc.

3.2.1.4. Evaluation du service de prédation sur la parcelle GAFAM



Figure 26 : Carte de prédation exposant des œufs de *C. pomonella*

Des proies sentinelles de type œufs de *C. pomonella* et pucerons verts du pois (*Acyrtosiphon pisum*) sont exposées sur la parcelle selon le protocole standardisé par Thomas C et al. (2016). Les œufs de *C. pomonella* visent les auxiliaires oophages (espèces se nourrissant exclusivement d'œufs) tandis que *A. pisum* visent les auxiliaires entomophages (organismes se nourrissant d'insectes). Pour cela, les cartes de prédation sont le support sur lequel les proies sont installées (voir figure 26). Les *A. pisum* y sont déposés au nombre de trois sur un trait de colle IHU[®] tandis que des échantillons de 10 œufs de *C. pomonella* repérés sur la feuille de ponte y sont collés avec la colle "SADER[®] tous travaux" en tube (voir tableau 8). Les cartes sont conservées à - 20 °C jusqu'à la date de pose sur le terrain.

Les cartes sont installées dans la frondaison des 45 arbres sélectionnés à deux périodes de l'année: à environ 1100°C cumulés depuis le premier janvier pour la première session et à environ 1500°C

cumulés pour la deuxième session (voir tableau 9 et en annexe 13 p 82). Les œufs de *C. pomonella* sont ainsi exposés au tout début de la génération 1 (entre 0 et 10 % d'éclosion) tandis que les *A. pisum* sont exposés lors de la phase d'expansion du nombre de pucerons dans les colonies.

Tableau 8 : Récapitulatif du matériel utilisé pour les cartes de prédation (Thomas et al., 2016)

	<i>Acrythosiphon pisum</i> (1)	<i>Cydia pomonella</i> (2)
Stade	Puceron aptère	Œuf
Colle utilisée	UHU® liquide « twist & glue – nature »	SADER® tube Loisirs et déco « Tous travaux »
Nombre de proies par carte	3	10

(1) Les *A. pisum* sont fournis par l'insectarium de l'unité PSH (Plantes et systèmes de cultures horticoles). Ils sont installés sur des plants de fèves de 4 semaines pour générer le développement de nouvelles cartes de prédation. (2) Les œufs de carpocapse sont obtenus directement dans cette même unité où ils réalisent un élevage de carpocapses permettant l'obtention quotidienne d'œufs (collecte de feuilles de ponte après mises en contact avec les adultes qui se reproduisent dans une cage).

Tableau 9 : Nombre de cartes par session (N) et dates de pose et de collecte des cartes en 2021

	N	Session 1		Session 2	
		Pose	Collecte	Pose	Collecte
<i>A. pisum</i>	45	03/05/2021 (1 196°.j)	04/05/2021 (1 211°.j)	31/05/2021 (1 703°.j)	01/06/2021 (1 722°.j)
<i>C. pomonella</i>	45	03/05/2021 (1 196°.j)	07/05/2021 (1 264°.j)	31/05/2021 (1 703°.j)	04/06/2021 (1 785°.j)

La lecture des cartes se fait à l'œil nu pour *A. pisum* (directement sur le terrain) tandis que les œufs de *C. pomonella* sont comptés à la loupe binoculaire (conservation au laboratoire à -20°C en attendant la lecture). Le taux de prédation des cartes de *A. pisum* se détermine par comptage en notant le nombre d'individus restant sur la carte. La prédation des œufs de *C. pomonella* peut également être quantifiée en notant les œufs intacts présents sur la carte.

3.2.2. Description du complexe d'ennemis naturels sur la période d'infestation

3.2.2.1. Les groupes taxonomiques des arthropodes évalués

Pour certains arthropodes, la détermination de l'espèce est une tâche très complexe, nécessitant du temps, du matériel adapté et de très bonnes connaissances entomologiques. Face aux contraintes techniques, temporelles et humaines de l'étude, une approche fonctionnelle est privilégiée. Elle consiste à regrouper les espèces ayant des fonctions écologiques similaires (pollinisateurs, prédateurs, parasites et parasitoïdes, phytophages, détritivores, etc.). Un intérêt supérieur est ainsi porté aux fonctions des arthropodes plutôt qu'à leur identification. Si au sein d'un même genre, toutes les espèces réalisent une fonction similaire, il n'est pas nécessaire de déterminer l'espèce puisque la fonction est déjà connue. C'est le même raisonnement qui s'applique si au sein d'une famille, tous les genres réalisent une fonction similaire, etc. On retrouve cette approche fonctionnelle dans de nombreuses études sur la régulation biologique, notamment en verger de pommiers (Albert et al., 2016). Elle accorderait plus de confiance aux données, en limitant le risque d'erreur lors de l'identification et serait plus adaptée pour décrire la dynamique des communautés (Ricard et al., 2012). Pour avoir un ordre d'idée de la redondance écologique sur le site d'étude, les inventaires des arthropodes présents dans et autour de la parcelle GAFAM précisent le nombre d'arthropodes observés ainsi que leur stade biologique (adulte, larve, chenille, nymphe, etc.) en plus de leur fonction (voir annexe 14 p 83). La classification des arthropodes se base notamment sur les livres de Ricard et al. (2012) et de Boyer et al. (2017). Le support photographique des différents spécimens rencontrés permet également d'avoir l'expertise de SIMON Sylvaine et MOREL Karine, toutes deux partenaires du projet ALTO et spécialisées dans l'identification et la classification des arthropodes ainsi que de les comparer à différentes sources Internet, notamment <http://www.galerie-insecte.org/>.

3.2.2.2. Les complexes d'ennemis naturels dans les colonies de pucerons

Les ennemis naturels sont comptés en nombre exact sur les pousses infestées marquées (foyers) en même temps que le comptage des pucerons. Le stade de développement des arthropodes observés est précisé (toutes les formes ne sont pas actives). Les différentes observations des foyers de pucerons se sont concentrées sur la présence de : syrphes (œufs ; larves ; adultes), coccinelles (œufs ; larves ; nymphes ; adultes), chrysope (œufs ; adultes ; larves) ; hémérobes (œufs ; adultes ; larves),

hyménoptères parasitoïdes (adultes) ; cantharides (adultes) ; forficules (larves ; adultes) ; araignées (adultes) (voir en annexe 15 p 84).

3.2.2.3. Les complexes d'arthropodes sur les pommiers

Les arthropodes sont comptés en nombre exact sur les pommiers en même temps que l'évaluation du nombre de pousses présentant au moins un puceron. Leur inventaire repose sur celui évoqué précédemment (voir en annexe 14 p 83). Il s'agit d'identifier les ennemis naturels des pucerons et du carpocapse (syrphes, araignées, punaises prédatrices, coléoptère prédateurs) ainsi que tout autre groupe d'arthropodes du site (abeilles, bourdons, diptères, guêpes, etc.) pour étendre les suivis aux autres fonctions (pollinisation, décomposition, etc.). Cela permet également d'identifier les autres ravageurs (coléoptère phytophages, cicadelles, punaises phytophages, etc.). Finalement, le nombre d'arthropodes présents sur le pommier est additionné au nombre d'ennemis naturels présents sur ses pousses infestées (foyers). Cela permet d'avoir une image globale du complexe d'arthropodes sur le pommier, en considérant notamment qu'un arthropode présent dans un foyer se déplace de part et d'autre sur le pommier (et vice-versa).

3.2.2.4. Les complexes d'arthropodes dans les IAE de type BE, BF, haies et peupliers

3.2.2.4.1. Evaluation de la fréquentation des fleurs par les arthropodes

Les arthropodes fréquentant les BE et BF (voir figure 27) sont comptés en nombre exact via une méthode active, non sélective, non destructive et non attractive : la marche le long d'un transect linéaire. Il s'agit d'avancer lentement le long du transect (passage) en balayant du regard ces couverts et de faire l'inventaire des arthropodes les fréquentant (voir en annexe 16 p 85). Leur inventaire repose sur celui évoqué précédemment (voir en annexe 14 p 83). Il s'agit d'identifier les ennemis naturels des pucerons et du carpocapse (syrphes, araignées, punaises prédatrices, coléoptère prédateurs, etc.) ainsi que tout autre groupe d'arthropodes du site (abeilles, bourdons, diptères, guêpes, etc.) pour étendre les suivis aux autres fonctions (pollinisation, décomposition, etc.). Cela permet également d'identifier les autres ravageurs (coléoptère phytophages, cicadelles, punaises phytophages, etc.). Les fleurs présentes faisant l'objet d'une visite par l'un des groupes précédents sont également identifiées.



Figure 27 : Inter-rang (BE et BF) dans la parcelle GAFAM

Tableau 10 : Date de réalisation des marches le long d'un transect linéaire

Suivi des bandes enherbées et bandes fleuries		Période de floraison de la phacélie
Date 1	30/03/2021	Période de levée
Date 2	07/04/2021	Pré-floraison voire début floraison
Date 3	14/04/2021	Floraison
Date 4	03/05/2021	Floraison
Date 5	19/05/2021	Post-floraison voire grenaison

13 transects sont établis sur la parcelle au niveau des inter-rangs de pommiers (voir annexe 17 p 85). Chacun des transects est composé d'une BE et d'une BF. Les suivis ont été réalisés à cinq reprises du 30/03/2021 au 19/05/2021 durant toute la période de développement phénologique de la BF, plus particulièrement de la phacélie. Il s'agit de la plus grande période d'attractivité pour les insectes pollinisateurs notamment, du fait de la production importante de nectar et de pollen (voir tableau 10).

3.2.2.4.2. Détermination des invertébrés présents au sol

Pour recenser les invertébrés se déplaçant à la surface du sol (carabiques, staphylins, araignées, etc.), le piégeage au sol de type pot Barber (voir figure 28) est utilisé (méthode passive, non sélective, non attractive et destructive). Les pots utilisés sont de formes coniques pouvant contenir un volume de 130 ml (6



Figure 28 : Pot Barber utilisé

cm de diamètre et 10 cm de hauteur). Les pièges sont posés quelques jours avant l'ouverture des pots « piègeurs », afin de permettre au milieu perturbé par la pose de rétablir son fonctionnement normal. Ils sont remplis au tiers par un liquide non attractif (eau saturée en sel et mouillant de type liquide vaisselle non-odorant). Ils sont enterrés et affleurent à la surface du sol pour ne pas gêner le déplacement des auxiliaires et éviter le contournement des arthropodes. Une distance de 10 mètres minimum est préconisée entre les différents pièges installés afin d'éviter les biais liés à leur proximité. Les individus piégés sont transvasés grâce à un tamis dans un pot contenant de l'alcool à 70 % afin de les conserver jusqu'à l'identification, qui est réalisée au laboratoire, à l'aide d'une loupe binoculaire. 25 pots sont installés dans la parcelle : sept dans au cœur des BE, huit au cœur des BF, sept aux pieds des différentes haies en bordure et trois dans les ilots de peupliers conduits en TCR (voir en annexe 18 p 85). Ils sont posés le 17/05/2021 au matin et récupérés après 5 jours pleins le 21/05/2021 en fin de journée. Cette période est située dans la phase d'expansion du nombre de pucerons dans les colonies.

3.2.2.4.3. Détermination des diptères et hyménoptères parasitoïdes présents sur la parcelle



Figure 29 : Support utilisé pour les assiettes colorées

Les insectes aériens sont comptés en nombre exact via une méthode passive, destructive, attractive et sélective : les assiettes colorées. Le support utilisé est composé de deux étages, un étage supérieur au-dessus du niveau maximum de hauteur du couvert et un autre inférieur au pied du couvert (voir figure 29). Chacun des deux étages supporte un triplet composé d'une assiette de chaque couleur (jaune, bleu, blanc). Les assiettes sont disposées en triangle équilatéral. Les couleurs jaune, bleu et blanche sont les plus couramment retenues car elles couvrent une gamme diversifiée de longueurs d'ondes du spectre visuel, correspondent en partie aux couleurs des fleurs et maximisent les possibilités de capturer une grande gamme de pollinisateurs. Ainsi, les diptères (syrphes, mouches, moustiques, taons, tipules, etc.) et hyménoptères (abeilles, frelons, bourdons, etc.) seront attirés par le jaune et les coléoptères (coccinelles, scarabéidés, etc.) par le blanc et le bleu. Trois supports ont été installés dans la parcelle : un au cœur du bloc 1 et deux dans le bloc 2. Ce dernier étant plus étalé spatialement, cela permet d'avoir une plus grande représentativité de la parcelle (voir en annexe 19 p 85). Ils sont installés au niveau de la BE et BF à proximité (1 m maximum) de la ligne d'arbre et au milieu de l'inter-rang. Ils sont posés le 17/05/2021 au matin et retirés après deux jours pleins soit le 19/05/2021 en fin de journée. Ces dates sont situées dans la phase d'expansion du nombre de pucerons dans les colonies.

3.3. Analyse des données et statistiques

Différents graphiques et tableaux croisés dynamiques sur Excel Office 365 ProPlus ont permis d'organiser, de classer, de sélectionner et de représenter les données. Des analyses statistiques sont ensuite réalisées sur le logiciel R Studio 1.4.1 en vue de comprendre les possibles relations entre les variables, mettre en avant des phénomènes et tendances, etc. La liste de l'ensemble des variables étudiées est disponible en annexe 20 p 86. Les variables continues comme le numéro de l'arbre, le rang et la date ou les facteurs nominaux comme le traitement et le bloc sont potentiellement explicatifs. Dans le cadre de ce stage, seuls les facteurs traitement et bloc et la variable date sont pris en compte comme variables explicatives.

Trois types de GLM (Modèles Linéaires Généralisés) ont été utilisés pour analyser les données (voir tableau 11). Il suffit d'employer la fonction `glm()` du package "stats" qui est chargé par défaut, à chaque ouverture de session R. Pour ces modèles, les conditions de normalité et d'homoscédasticité des résidus ne sont pas demandées. Toutefois, l'absence de surdispersion ou de sousdispersion est à vérifier.

Tableau 11 : Les différents types de GLM utilisés pour l'analyse des données

	Lien	Distribution d'erreur	Nature des réponses observées	Particularités	Exemple
GLM 1	Logit	Poisson	Comptages	Les données de type comptage ne sont pas distribuées selon une loi Normale, mais selon une loi de Poisson. Et compte tenu de cette loi de distribution, la variance des résidus n'est pas constante mais proportionnelle aux comptages moyens prédits par le modèle.	Nombre de pucerons dans les foyers, nombre d'auxiliaires dans les foyers, etc.
GLM 2	Logit	Binomiale	Binaires	Les modèles linéaires classiques ne sont pas adaptés pour analyser des variables à expliquer de type "binaire", les erreurs ne pouvant pas suivre une loi normale de moyenne nulle et de variance constante.	Présence de symptômes de carpocapse : oui/non, etc.
GLM 3	Logit	Binomiale	Proportions	Les proportions sont des variables numériques continues, mais qui sont un peu particulières, car elles sont bornées entre 0 et 1. C'est cette spécificité qui rend l'emploi de modèles linéaires classiques caduc.	Proportion de pousses par pommier présentant au moins un puceron, proportion d'inflorescences par pommier présentant au moins un fruit avec des symptômes de carpocapse, proportion de pucerons prédatés par carte de prédation, etc.

Il y a surdispersion lorsque : déviance résiduelle/degrés de liberté ≥ 1.5 . Il y a sousdispersion lorsque : deviance résiduelle/degrés de liberté ≤ 0.5 . Quelles que soient les GLM réalisés, les effets globaux des variables explicatives sont obtenus à l'aide d'un modèle statistique de type paramétrique : l'Analyse de la Variance (ANOVA). Elle permet de comparer les moyennes de k séries statistiques (échantillons) indépendantes qui diffèrent selon les modalités d'un ou plusieurs critères (facteurs). L'ANOVA permet de déterminer si les différences entre les moyennes des groupes sont statistiquement significatives. L'hypothèse nulle H_0 veut que les moyennes de population soient toutes égales.

Dans le cas des GLM avec une distribution d'erreur « binomiale », en cas d'absence de surdispersion, la fonction `Anova(modèle, type = II)` est privilégiée. En cas de surdispersion, il est nécessaire d'utiliser une autre structure d'erreur, telle que la structure "quasibinomiale" et les effets globaux des variables explicatives (traitement, bloc et date) sont ainsi obtenus à l'aide de la fonction `Anova(modèle, test = "F")`. Dans le cas des GLM avec une distribution d'erreur « poisson », en cas d'absence de surdispersion ; la fonction `Anova(modèle, test=F)` est privilégiée. En cas de surdispersion, il est nécessaire d'utiliser une autre structure d'erreur, telle que la structure "quasipoisson" et les effets globaux des variables explicatives (traitement, bloc et date) sont également obtenus à l'aide de la fonction `Anova(modèle, test = "F")`.

Dans le cas où H_0 est rejetée, un test post-hoc paramétrique de comparaison multiple des moyennes dit test de Tukey est réalisé avec le script suivant : `glht(modèle, linfct=mcp (variable explicative="Tukey"))`. Il permet de déterminer si les moyennes sont différentes et d'estimer l'importance de leurs différences. Il effectue toutes les comparaisons deux à deux et les résultats sont donnés sous forme de groupes homogènes. L'hypothèse nulle H_0 veut que les moyennes appartenant au même groupe ne soient pas significativement différentes (la différence entre les moyennes est égale à 0). La fonction `clld()` via le package `multcomp` permet, dans le cadre du test de Tukey, d'indiquer par des lettres la significativité des comparaisons. Lorsque deux modalités partagent une même lettre, cela signifie que leurs moyennes ne sont pas significativement différentes. A l'inverse, lorsque deux modalités ne partagent pas de lettres en commun, alors cela signifie que leurs moyennes sont significativement différentes.

Pour l'ensemble des tests, une p-value est considérée comme significative si elle est inférieure à un risque α de 0.01. C.-à-d. que dans 1 % des cas, lorsque H_0 est vraie, l'expérimentateur se trompera et la rejettera. Ou bien, dans 99 % des cas, l'expérimentateur ne la rejettera pas. La liste de l'ensemble des modèles utilisés est disponible en annexe 21 p 86.

4. Résultats

4.1. Suivis des ravageurs (puçerons et carpocapse)

4.1.1. Cas du puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*)

44 pommiers parmi les 45 sélectionnés ont présenté des pucerons cendrés durant la période d'observation s'étalant du 25 mars 2021 au 8 juin 2021 (98 % des pommiers sélectionnés).

4.1.1.1. Dynamique de l'incidence du puceron cendré à l'échelle du pommier

La variable étudiée est le pourcentage de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré (tous stades confondus : ailés ou aptères). Elle a été suivie à 17 reprises sur la période d'infestation printanière (du 25/03/2021 au 08/07/2021).

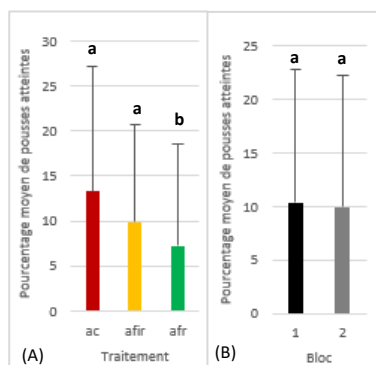


Figure 30 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

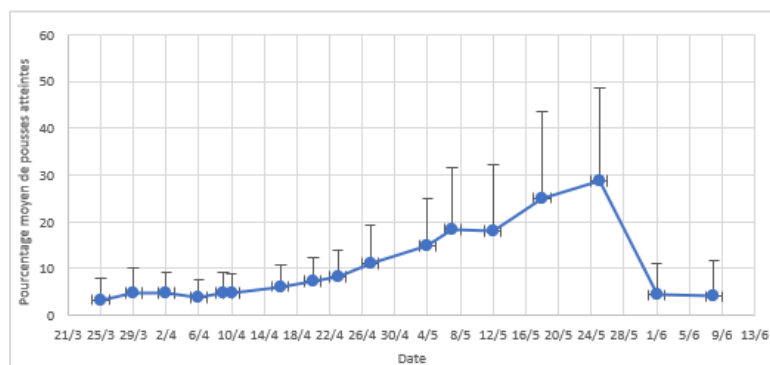


Figure 31 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Tous facteurs confondus (traitement, bloc et date), le pourcentage moyen de pousses infestées par pommier est de l'ordre de 10 % (voir en annexe 22 p 88). Toutes dates confondues, il existe une différence significative entre les pourcentages de pousses infestées en fonction du traitement agroforestier (p -value = $9.563e-16$) mais aucune en fonction du bloc (p -value = 0.1988). Les pommiers en AFR présentent un pourcentage de pousses infestées par le puceron cendré significativement inférieur à ceux en AC et AFIR (en moyenne 7.2 % en AFR contre 9.2 % en AFIR et 13.3 % en AFIR) (voir figure 30). Or, l'existence d'une interaction significative entre les facteurs traitement agroforestier et bloc (p -value = $5.437e-12$) suggère une non prise en compte de cet effet. Il existe également une différence significative entre les pourcentages de pousses infestées en fonction de la date de suivi (p -value < $2.2e-16$). Ce pourcentage croît du 06/04/2021 au 25/05/2021. Il y a un pic au 25/05/2021 (28.7 % de pousses infestées en moyenne par pommier). Après cette date, le pourcentage de pousses infestées par pommier chute (voir figure 31).

En particulier, sur l'ensemble de la période d'infestation suivie, une seule date met en avant l'existence d'une différence significative entre ces pourcentages en fonction du facteur traitement agroforestier. Il s'agit du 25/05/2021 (p -value = 0.004239). Dans ce cas-là, les pommiers en AC présentent un pourcentage de pousses infestées par le puceron cendré significativement supérieur aux pommiers en AFR (voir figure 32). Or, l'existence d'une interaction significative (p -value = 0.007219) entre les facteurs traitement agroforestier et bloc à cette même date suggère une non prise en compte de cet effet. Qu'importe la date de suivi, ce pourcentage ne diffère pas significativement en fonction du bloc (voir en annexe 23 p 88). Le récapitulatif des p -values obtenues à chacune des dates est disponible en annexe 24 p 89.

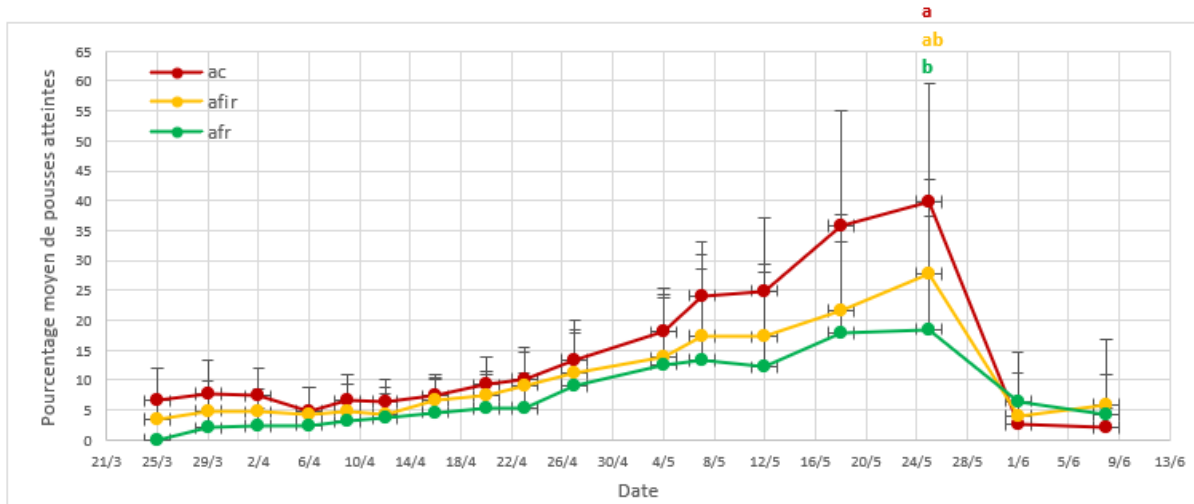


Figure 32 : Dynamique du pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré en fonction du traitement

4.1.1.2. Dynamique de l'incidence du puceron cendré à l'échelle de la pousse

La variable étudiée est le nombre de pucerons cendrés (tous stades confondus : ailés et aptères) par foyer. Elle a été suivie à 17 reprises sur la période d'infestation printanière (du 25/03/2021 au 08/07/2021).

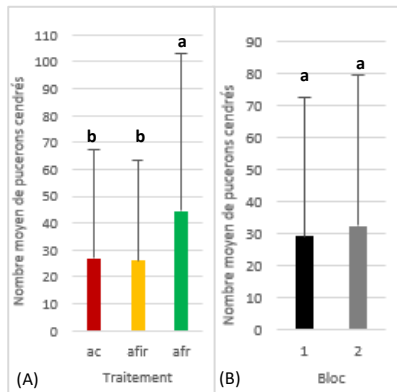


Figure 33 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) par foyer toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

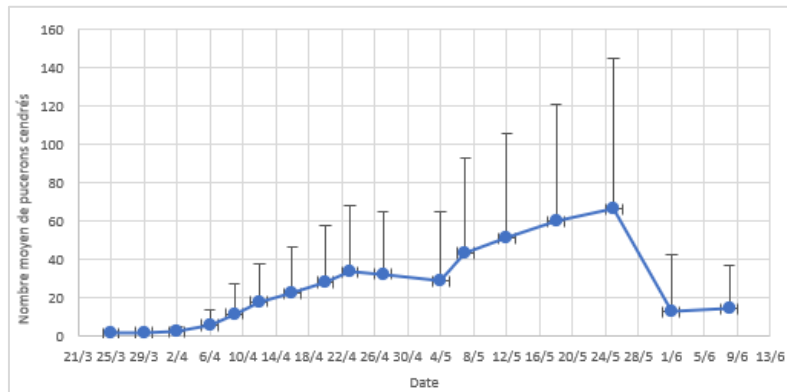


Figure 34 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) par foyer en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Tous facteurs confondus (traitement, bloc et date), le nombre moyen de pucerons cendrés par foyer est de l'ordre de 31, le minimum est de 0 et le maximum atteint est de 401 (voir en annexe 25 p 89). Toutes dates confondues, il existe une différence significative entre les effectifs obtenus par foyer en fonction du traitement agroforestier (p -value = $5.885e-11$) mais pas en fonction du bloc (p -value = 0.4615). Les pommiers en AFR présentent un nombre de pucerons cendrés par foyer significativement supérieur par rapport à ceux en AC et AFIR (en moyenne 44 en AFR contre 27 en AC et 26 en AFIR) (voir figure 33). Il existe également une différence significative entre les nombres de pucerons cendrés par foyer en fonction de la date de suivi (p -value = $< 2.2e-16$). Ce nombre croît du 06/04/2021 au 25/05/2021 malgré une légère décroissance au 04/05/2021. Il y a un pic atteint au 25/05/2021 (66 pucerons en moyenne par foyer). Après cette date, les effectifs chutent (voir figure 34).

En particulier, sur l'ensemble de la période suivie, il existe un effet traitement agroforestier significatif au 29/03/2021 (p -value = 0.007936), au 27/04/2021 (p -value = 0.001688), au 04/05/2021

(p-value = 1.039e-05) ainsi qu'au 07/05/2021 (p-value = 0.002043). Au 27/04/2021 et au 04/05/2021, les pommiers en AFR ont des effectifs significativement supérieurs à ceux des groupes AFIR et AC. Au 29/03/2021 et au 07/05/2021, les pommiers du groupe AFR ont un nombre de pucerons cendrés par foyer significativement supérieur aux pommiers du groupe AFIR (voir figure 35). Qu'importe la date de suivi, cet effectif ne diffère pas significativement en fonction du bloc (voir annexe 26 p 90). Le récapitulatif des p-values et boxplots obtenus à chacune des dates sont disponible en annexes 27 p 90 et 28 p 91.

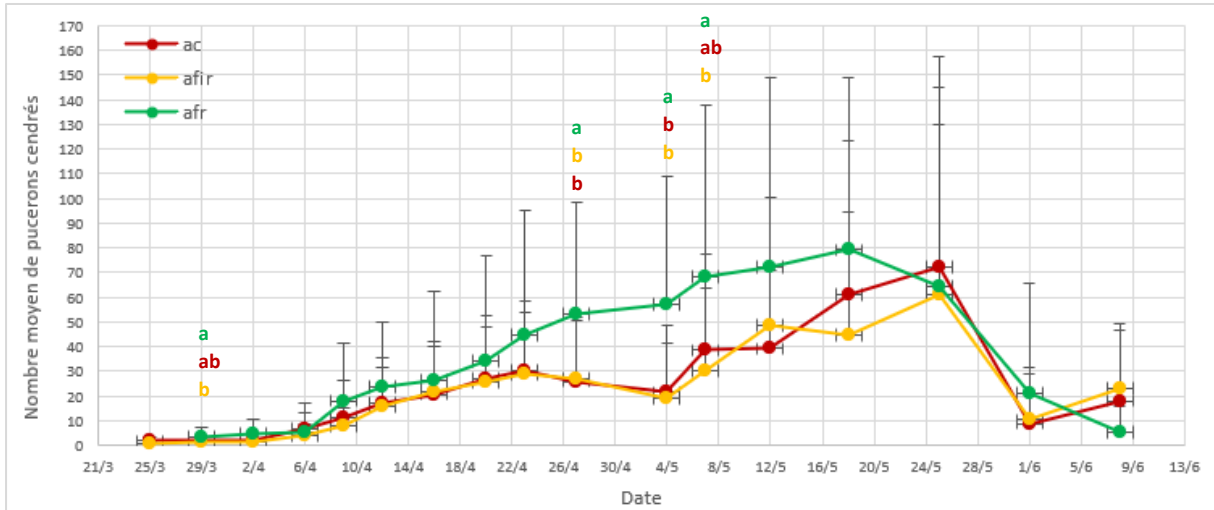


Figure 35 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) par foyer en fonction du traitement

4.1.1.3. Suivi des foyers de pucerons cendrés disparus sur la période d'infestation

La variable étudiée est le pourcentage de foyers de pucerons disparus sur la période de suivi de l'infestation.

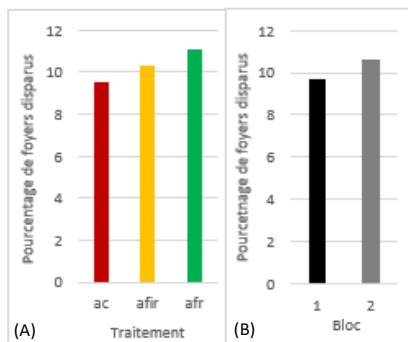


Figure 36 : Pourcentage de foyers de pucerons cendrés disparus toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

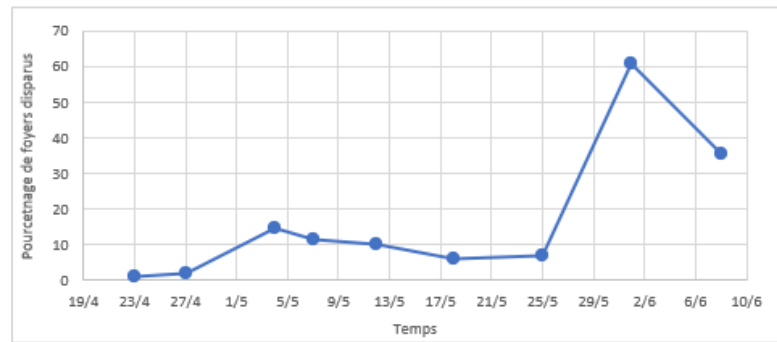


Figure 37 : Pourcentage de foyers de pucerons cendrés disparus en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Toutes dates confondues, les pommiers en AFR sont ceux pour lesquels le pourcentage de foyers de pucerons cendrés disparus est le plus élevé (11 % en AFR contre 10.2 % en AFIR et 9.5 % en AC). Toutefois, cette différence reste faible (< 1.5 %) (voir figure 36(A)). Les pommiers situés dans le bloc 2 sont ceux pour lesquels ce pourcentage est le plus élevé (10.6 % pour le bloc 2 contre 9.7 % pour le bloc 1). De même, cette différence reste faible (< 1 %) (voir figure 36(B)). Le suivi de l'évolution de ce pourcentage au cours du temps (traitements et blocs confondus) montre que les premiers foyers sont disparus aux alentours du 23/04/2021. Ce pourcentage connaît un léger pic aux alentours du 04/05/2021 (14.4 %) et un pic plus prononcé aux alentours du 01/06/2021 (60.9 %) (voir figure 37). En particulier, sur l'ensemble de la période suivie, deux pics sont présents aux alentours du 04/05/2021 et au 01/06/2021 qu'importe le facteur étudié (voir figure 38). Le premier pic est notamment plus précoce et court dans le temps pour les pommiers en AC tandis qu'il est plus tardif et plus prolongé

dans le temps pour les pommiers en AFIR et AFR (voir figure 38(A)). Qu'importe la date de suivi, le facteur bloc n'influence pas ce pourcentage (figure 38(B)).

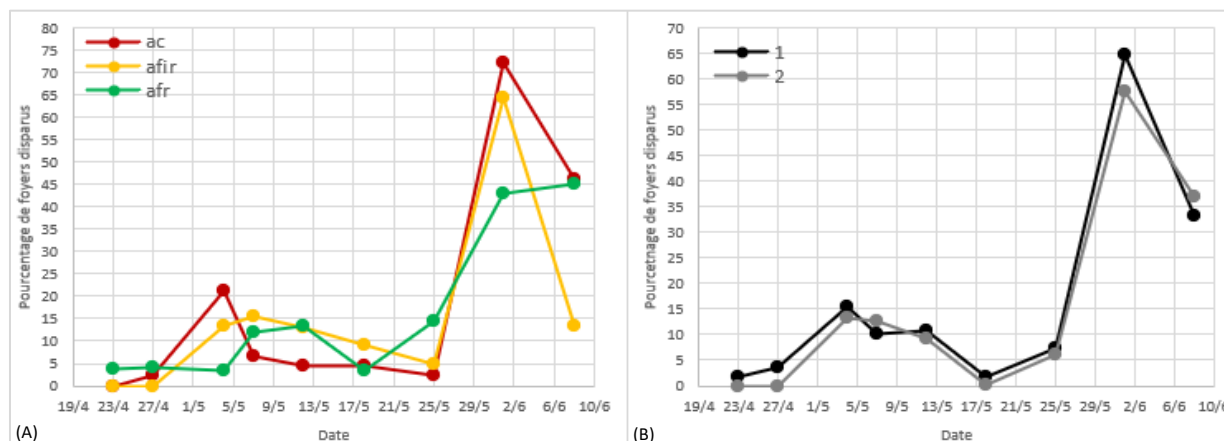


Figure 38 : Dynamique du pourcentage de foyers de pucerons cendrés disparus en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

4.1.2. Cas du puceron vert (*Aphis pomi*)

43 pommiers parmi les 45 sélectionnés ont présenté des pucerons verts durant la période d'observation s'étalant du 6 avril 2021 au 8 juin 2021 (95 % des pommiers sélectionnés).

4.1.2.1. Dynamique de l'incidence du puceron vert à l'échelle du pommier

La variable étudiée est le pourcentage de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert (tous stades confondus : ailés ou aptères). Elle a été suivie à 14 reprises sur la période d'infestation printanière (du 06/04/2021 au 08/07/2021).

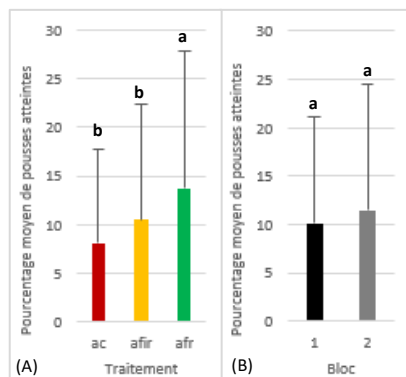


Figure 39 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

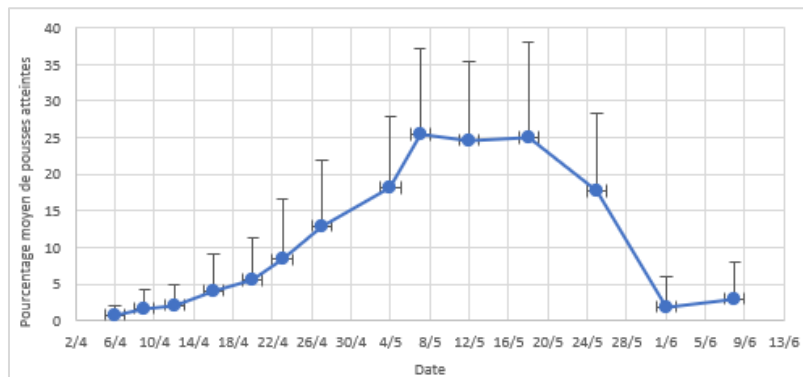


Figure 40 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Tous facteurs confondus (traitement, bloc et date), le pourcentage moyen de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert est de l'ordre de 11 % (voir en annexe 29 p 92). Toutes dates confondues, il existe une différence significative entre les pourcentages de pousses infestées en fonction du traitement agroforestier appliqué (p -value = $1.569e-13$) mais aucunes en fonction du bloc (p -value = 0.708816). Les pommiers en AFR présentent un pourcentage de pousses infestées par le puceron vert significativement supérieur à ceux en AC et AFIR (en moyenne 13.8 % en AFR contre 8.1 % en AC et 10.5 % en AFIR) (voir figure 39). Or, l'existence d'une interaction significative entre les facteurs traitement agroforestier et bloc (p -value = 0.003417) suggère une non prise en compte de cet effet traitement. Il existe également une différence significative entre les pourcentages de pousses

infestées en fonction de la date de suivi (p -value < $2.2e-16$). Ce pourcentage croît du 06/04/2021 au 07/05/2021. Il y a un plateau entre le 07/05/2021 et le 18/05/2021 (25 % de pousses infestées en moyenne par pommier). Après cette date, le pourcentage de pousses infestées par pommier chute (voir figure 40).

En particulier, sur l'ensemble de la période d'infestation suivie, il existe un effet significatif du facteur traitement agroforestier au 07/05/2021 (p -value = 0.003663), au 12/05/2021 (p -value = 0.006618) ainsi qu'au 01/06/2021 (p -value = 0.009033). Dans ces cas-là, les pommiers en AFR présentent un pourcentage de pousses infestées par le puceron vert significativement supérieur aux pommiers du groupe AC (voir figure 41(A)). Il y a uniquement un effet significatif du facteur bloc au 01/06/2021 (p -value = 0.008472). Dans ce cas-là, les pommiers du bloc 2 présentent un pourcentage de pousses infestées par le puceron vert significativement supérieur aux pommiers du bloc 1 (voir figure 41(B)). Le récapitulatif des p -values obtenus à chacune des dates est disponible en annexe 30 p 92.

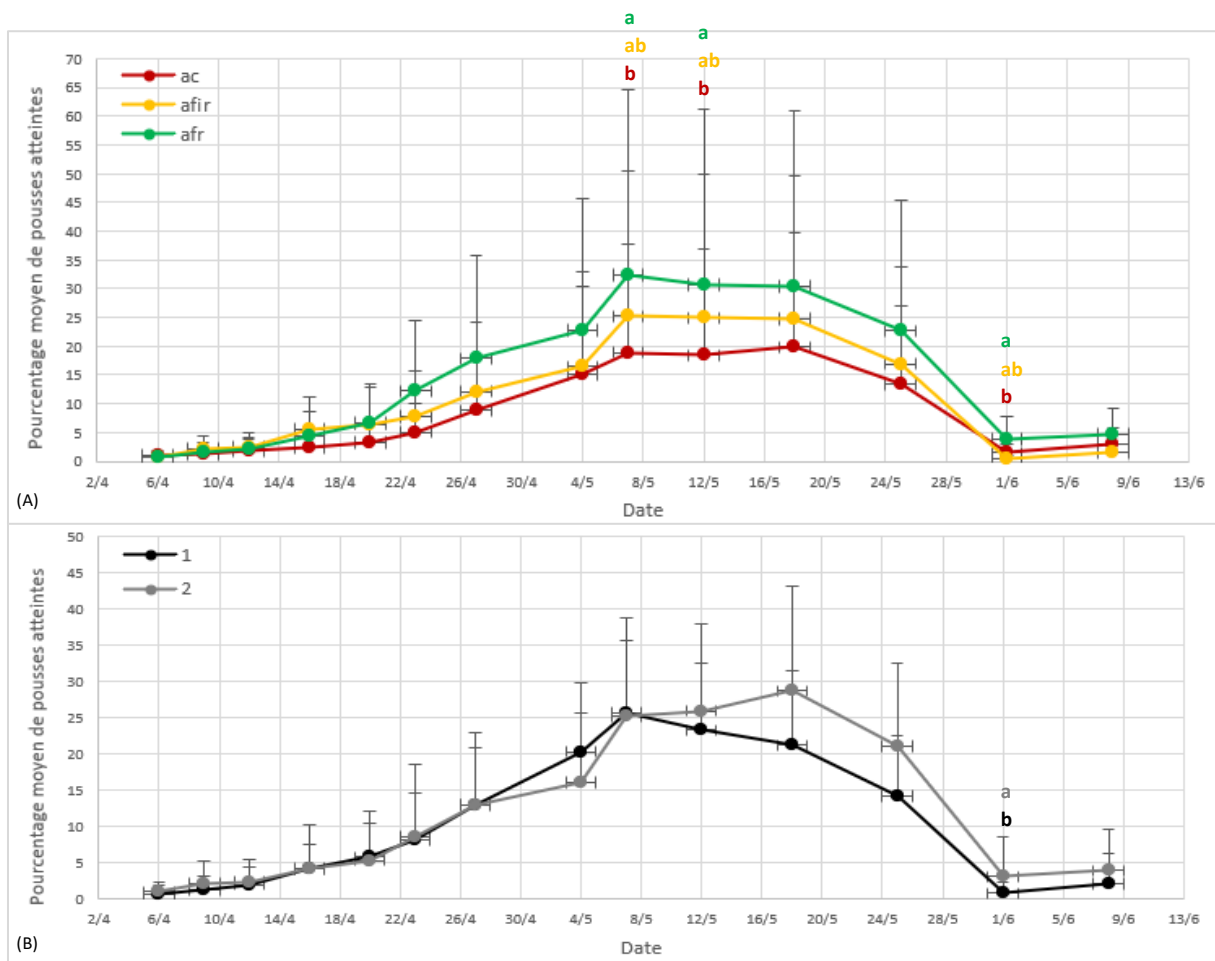


Figure 41 : Dynamique du pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

4.1.2.2. Dynamique de l'incidence du puceron vert à l'échelle de la pousse

La variable étudiée est le nombre de pucerons verts (tous stades confondus : ailés et aptères) par foyer. Elle a été suivie à 14 reprises sur la période d'infestation printanière (du 06/04/2021 au 08/07/2021).

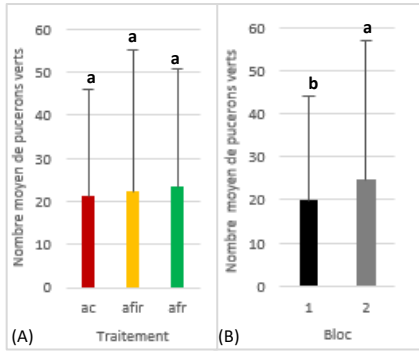


Figure 42 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) par foyer toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

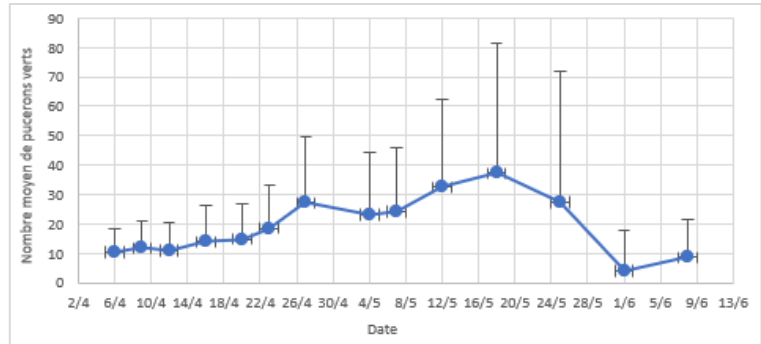


Figure 43 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) par foyer en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Tous facteurs confondus (traitement, bloc et date), le nombre moyen de pucerons verts par foyer est de l'ordre de 22, le minimum est de 0 et le maximum atteint est de 315 (voir en annexe 31 p 93). Toutes dates confondues, il existe une différence significative entre les effectifs obtenus par foyer en fonction du bloc (p -value = 0.0002916) mais pas en fonction traitement agroforestier (p -value = 0.7521246). Les pommiers dans le bloc 2 présentent un nombre de pucerons verts par foyer significativement supérieur par rapport à ceux du bloc 1 (en moyenne 24.6 pour le bloc 2 et 19.8 pour le bloc 1) (voir figure 42). Il existe également une différence significative importante entre les nombres de pucerons verts par foyer en fonction de la date de suivi (p -value < $2.2e-16$). Ce nombre croît du 06/04/2021 au 18/05/2021 malgré une légère décroissance au 04/05/2021. Il y a un léger pic atteint au 27/04/2021 (27 pucerons en moyenne par foyer) et un pic plus prononcé au 18/05/2021 (37 pucerons en moyenne par foyer). Après cette date, les effectifs chutent (voir figure 43).

En particulier, sur l'ensemble de la période d'infestation suivie, il y a un effet bloc significatif uniquement au 18/05/2021 (p -value = 0.009441). Dans ce cas-là, les pommiers du bloc 2 présentent un nombre de pucerons verts par foyer significativement supérieurs à ceux du bloc 1 (voir figure 44). Qu'importe la date de suivi, cet effectif ne diffère pas significativement en fonction du traitement agroforestier (voir en annexe 32 p 93). Le récapitulatif des p -values et boxplots obtenus à chacune des dates sont disponible en annexes 33 p 94 et 34 p 95.

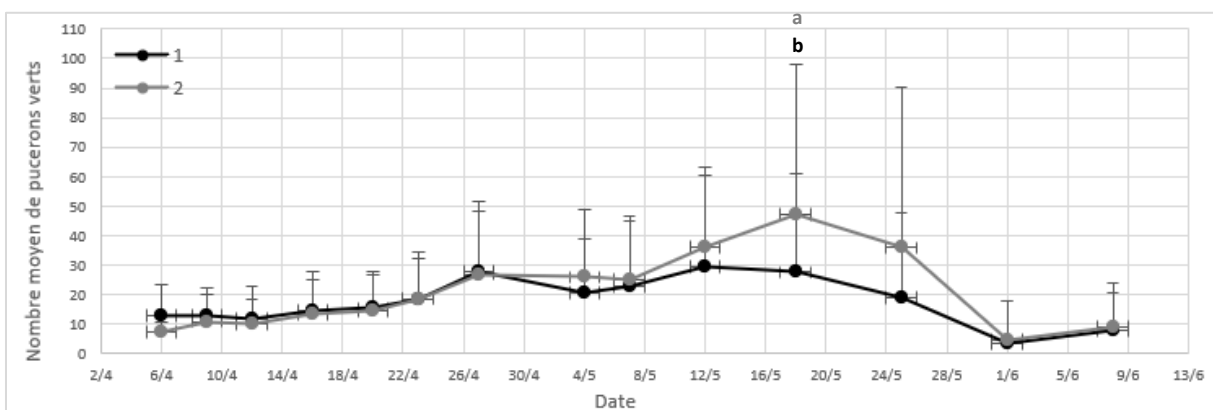


Figure 44 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) par foyer en fonction du bloc

4.1.2.3. Suivi des foyers de pucerons verts disparus sur la période d'infestation

La variable étudiée est le pourcentage de foyers de pucerons verts disparus sur la période de suivi de l'infestation.

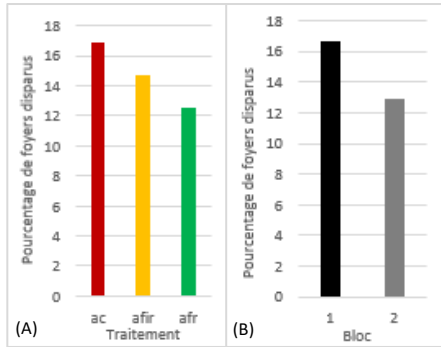


Figure 45 : Pourcentage de foyers de pucerons verts disparus toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

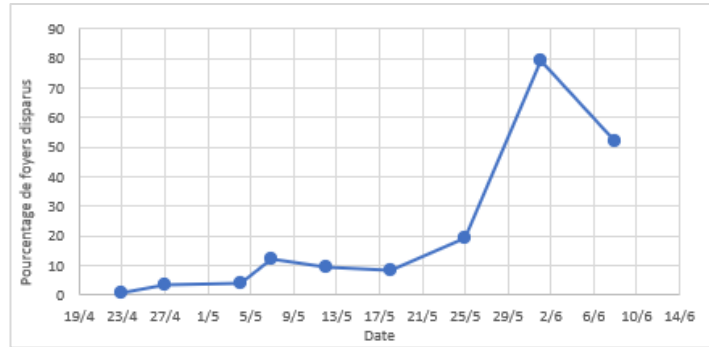


Figure 46 : Pourcentage de foyers de pucerons verts disparus en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Toutes dates confondues, les pommiers en AC sont ceux pour lesquels le pourcentage de foyers de pucerons verts disparus sont les plus élevés (17.9 % en AC contre 14.7 % en AFIR et 12.6 % en AFR). Toutefois, cette différence reste faible (< 5 %) (voir figure 45(A)). Les pommiers du bloc 1 sont ceux pour lesquels ce pourcentage est le plus élevé (16,6 % pour le bloc 1 contre 13 % pour le bloc 2). De même, cette différence reste faible (< 5 %) (voir figure 45(B)). Le suivi de l'évolution de ce pourcentage au cours du temps (traitements et blocs confondus) montre que les premiers foyers ont disparus aux alentours du 23/04/2021. Ce pourcentage connaît un léger pic aux alentours du 07/05/2021 et un pic plus prononcé aux alentours du 01/06/2021 (voir figure 46). En particulier, sur l'ensemble de la période suivie, deux pics sont présents aux alentours du 07/05/2021 et au 01/06/2021 qu'importe le facteur étudié (voir figure X). Le premier pic de disparition est notamment plus prononcé mais moins allongé dans le temps pour les pommiers en AFR (voir figure 47(A)) et pour ceux du bloc 2 (voir figure 47(B)).

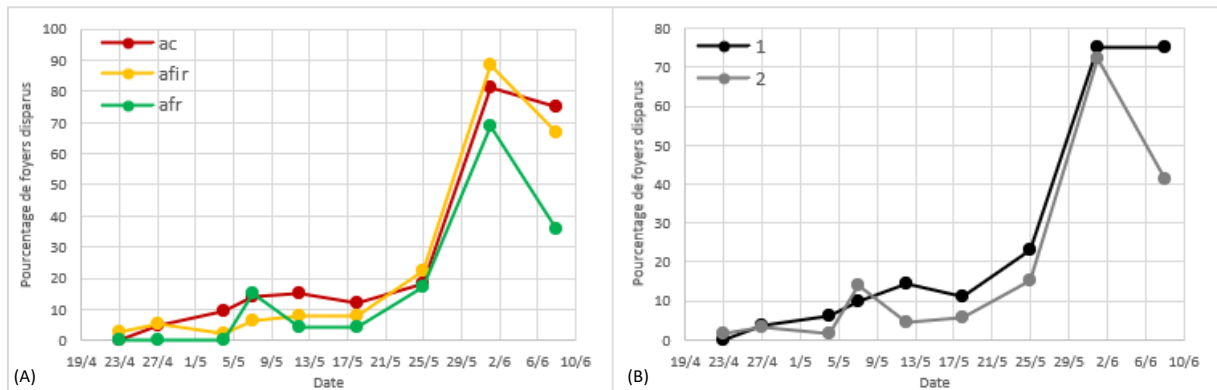


Figure 47 : Dynamique du pourcentage de foyers de pucerons verts disparus en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

4.1.3. Cas du carpocapse (*Cydia pomonella*)

4.1.3.1. Suivi de la première génération de carpocapse sur fruits

4.1.3.1.1. Suivi de l'incidence du carpocapse à l'échelle de la parcelle

La variable étudiée est le pourcentage de pommiers présentant au moins un fruit avec symptôme(s) de carpocapse parmi les 45 sélectionnés. Elle a été mesurée le 17/06/2021 (50 % d'éclosion de G1) et le 05/07/2021 (90-100 % d'éclosion de G1).

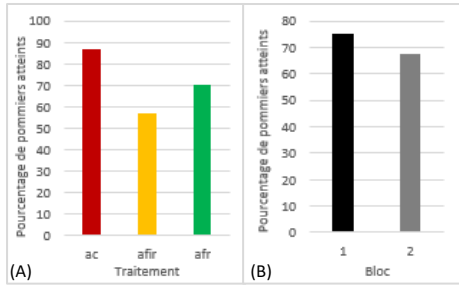


Figure 48 : Pourcentage de pommiers présentant au moins un fruit avec symptôme(s) de carpocapse toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

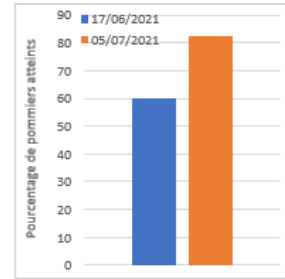


Figure 49 : Pourcentage de pommiers présentant au moins un fruit avec symptôme(s) de carpocapse en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

A l'échelle de la parcelle, toutes dates confondues, près de 71 % de pommiers présentent des symptômes de carpocapse. Les pommiers les plus touchés sont ceux du groupe AC (87 % de pommiers atteints) et les pommiers les moins touchés sont ceux du groupe AFIR (57 % de pommiers atteints) (voir figure 48(A)). Les pommiers les plus touchés sont ceux du bloc 1 (75 % de pommiers atteints dans le bloc 1 contre 67 % dans le bloc 2) (voir figure 48(B)). Les pommiers les plus touchés sont ceux étudiés au 17/06/2021 (82.2 % de pommiers atteints au 05/07/2021 contre 60 % au 17/06/2021) (voir figure 49). Le test glm binomial appliqué sur la présence de symptôme (oui/non) par pommier, pour en avoir une analyse statistique, ne met en avant aucun effet significatif du facteur bloc (p -value = 0.78091) sur la présence de symptôme(s) dans les pommiers. Il y a cependant un effet quasiment significatif du facteur traitement agroforestier (p -value = 0.01144) : il y a quasiment significativement plus de pommiers AC qui présentent des symptômes de carpocapse comparé à ceux en AFIR. Il y a également un effet quasiment significatif de la date (p -value = 0.01348) : il y a quasiment significativement plus de pommiers qui présentent des symptômes de carpocapse au 05/07/2021.

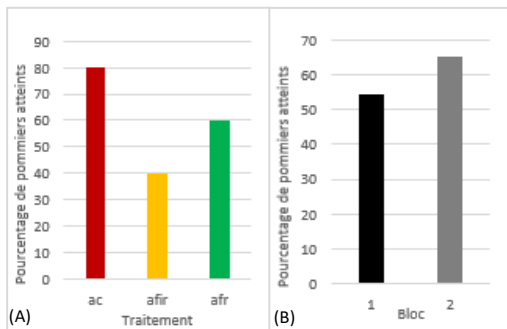


Figure 50 : Pourcentage de pommiers avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 17/06/2021

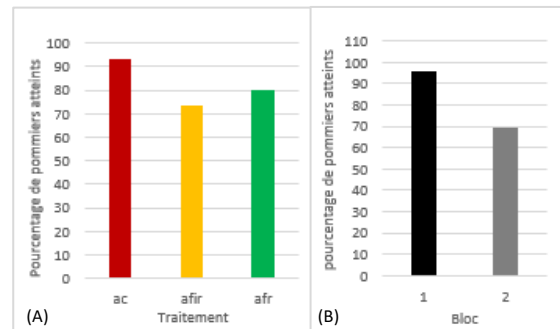


Figure 51 : Pourcentage de pommiers avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 05/07/2021

Au 17/06/2021, les pommiers les plus touchés par le carpocapse sont ceux en AC (80 % de pommiers atteints en AC contre 60 % en AFR et 40 % en AFIR) (voir figure 50(A)). C'est la même tendance au 05/06/2021 (93.3 % de pommiers atteints en AC contre 80 % en AFR et 73.3 % en AFIR) (voir figure 51(A)). Au 17/06/2021, les pommiers les plus touchés par le carpocapse sont ceux du bloc 2 (65.2 % de pommiers atteints dans le bloc 2 contre 54.5 % dans le bloc 1) (voir figure 50(B)). C'est la tendance inverse au 05/07/2021 (95.4 % de pommiers atteints dans le bloc 1 contre 69.7 % dans le bloc 2) (voir figure 51(B)). Qu'importe la date, les tests glm binomial réalisées ne mettent en avant aucun effet significatif des facteurs traitement agroforestier (au 17/06/2021, p -value = 0.03957 ; au 05/07/2021, p -value = 0.2070) et bloc (au 17/06/2021, p -value = 0.17784 ; au 05/07/2021, p -value = 0.2106) sur la présence de symptômes dans les pommiers.

4.1.3.1.2. Suivi de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier

La variable étudiée est le pourcentage d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse. Elle a été mesurée le 17/06/2021 (50 % d'éclosion de G1) et le 05/07/2021 (90-100 % d'éclosion de G2).

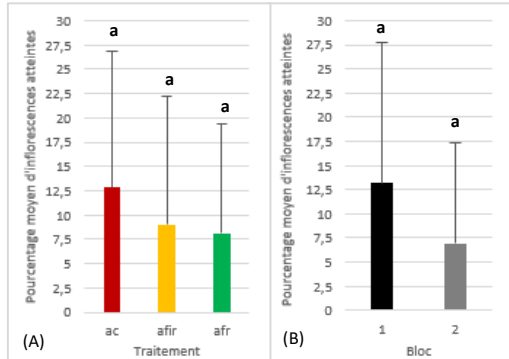


Figure 52 : Pourcentage moyen (+ écart-type) d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

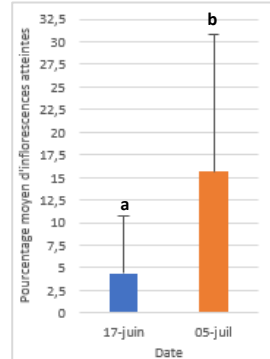


Figure 53 : Pourcentage moyen (+ écart-type) d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse (traitements et blocs confondus) en fonction de la date

Toutes dates confondues, le pourcentage d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse est de l'ordre de 10 % (voir en annexe 35 p 96). Il existe quasiment des différences significatives entre le pourcentage d'inflorescences avec au moins un fruit atteint par le carpocapse en fonction du traitement agroforestier (p-value = 0.01436) : ce pourcentage est quasiment significativement supérieur pour les pommiers en AC comparé à ceux en AFR (voir figure 52(A)). De même, il existe quasiment des différences significatives entre ces pourcentage en fonction du bloc dans lequel se situe le pommier (p-value = 0.01531) : ce pourcentage est quasiment significativement supérieur pour les pommiers du bloc 1 (voir figure 52(B)). La date de suivi influence significativement ce pourcentage (p-value = 1.019e-10) : il est en moyenne trois fois plus important au 05/07/2021 par rapport au 17/06/2021 (15,6 % contre 4,4 %) (voir figure 53 et en annexe 36 p 96).

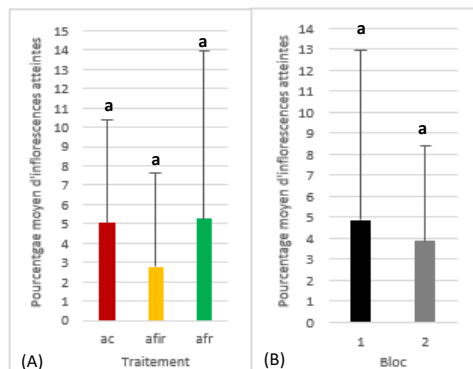


Figure 54 : Pourcentage moyen (+ écart-type) d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 17/06/2021

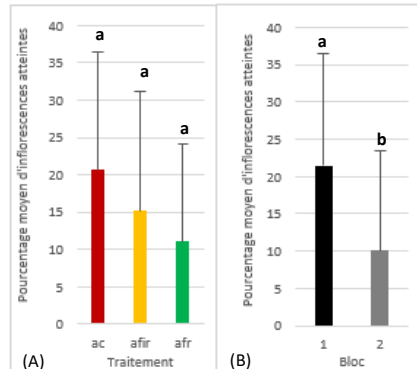


Figure 55 : Pourcentage moyen d'inflorescences (+ écart-type) par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 05/07/2021

Au 17/06/2021, il n'y a pas d'effet significatif des facteurs traitement agroforestier (p-value = 0.1992) et bloc (p-value = 0.7909) sur le pourcentage d'inflorescences avec au moins au fruit présentant des symptômes de carpocapse (voir figure 54 et en annexe 37 p 96). Au 05/07/2021, il n'y a pas d'effet significatif du traitement agroforestier (p-value = 0.059723) sur ce pourcentage mais il existe une différence significative de ce pourcentage en fonction du bloc dans lequel se situe le pommier (p-value = 0.004918). Les pommiers du bloc 1 ont un pourcentage d'inflorescences atteintes

significativement supérieur à ceux du bloc 2 (en moyenne 21.5 % pour le bloc 1 contre 10.1 % pour le bloc 2) (voir figure 55 et en annexe 38 p 96).

4.2. Suivi du service de prédation

4.2.1. Suivi de la prédation des œufs de carpocapse

La variable étudiée est le taux de prédation des œufs de carpocapse. Les cartes de prédation ont été relevées à deux reprises : le 07/05/2021 et le 04/06/2021.

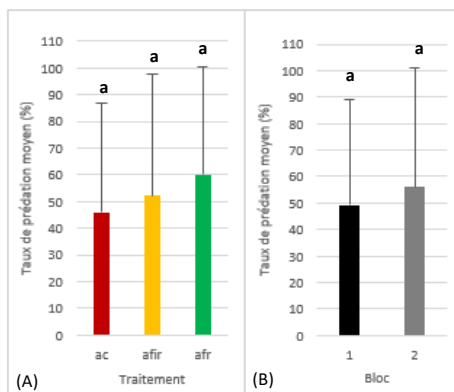


Figure 56 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des œufs de carpocapse toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

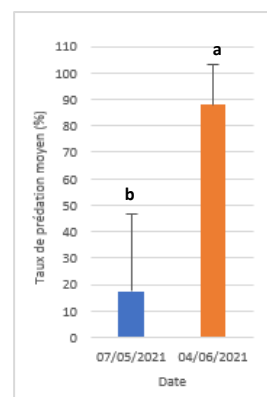


Figure 57 : Taux de prédation moyen (+ écart type) des œufs de carpocapse (traitements et blocs confondus) en fonction de la date

Toutes dates confondues, le taux de prédation moyen à l'échelle de la parcelle est de l'ordre de 52.8 % (voir en annexe 39 p 97). La date de relevé influence significativement ces taux (p -value < $2e-16$) : ils sont significativement plus importants au 04/06/2021 comparé au 07/05/2021 (en moyenne 88 % contre 17.5 %) (voir figure 54 et en annexe 40 p 97). Il n'y a pas d'effet significatif du traitement agroforestier (p -value = 0.05773) et du bloc (p -value = 0.38361) sur ces taux (voir figure 56).

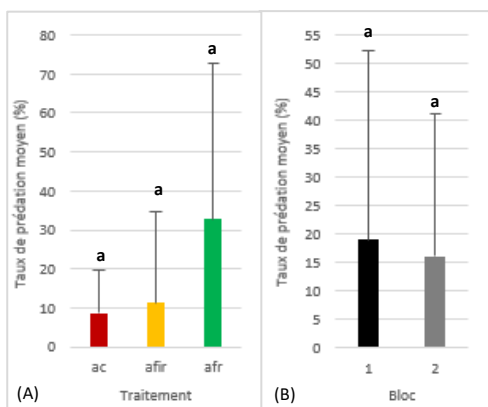


Figure 58 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des œufs de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 07/05/2021

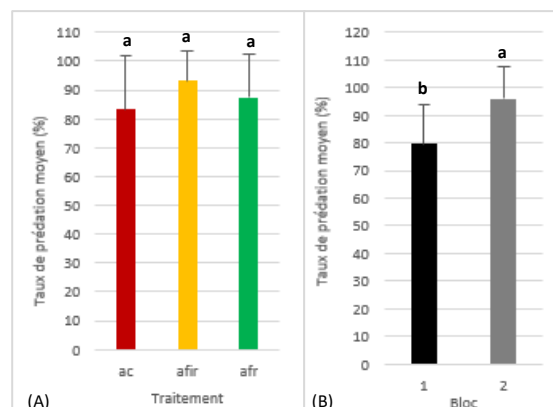


Figure 59 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des œufs de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 04/06/2021

Au 07/05/2021, les pommiers en AFR présentent un taux de prédation supérieur aux deux autres modalités (32.7 % pour AFR contre 11.3 % pour AFIR et 8.6 % pour AC). Il existe quasiment une différence significative entre les taux de prédation des œufs de carpocapse en fonction du traitement agroforestier (p -value = 0.01555) : ce taux est quasiment significativement supérieur pour les pommiers du groupe AFR comparé aux pommiers du groupe AC. Il n'existe pas de différence significative en fonction du bloc (p -value = 0.34283) dans lequel se situe le pommier (voir figure 58 et en annexe 41 p 97).

Au 04/06/2021, il n'existe pas de différences significatives entre les taux de prédation des pucerons en fonction du traitement agroforestier (p -value = 0.4102120). Il existe une différence significative entre les taux de prédation des pucerons en fonction du bloc (p -value = 0.0008895). Les pommiers du bloc 2 ont un taux de prédation significativement supérieur à ceux du bloc 1 (en moyenne 96.1 % pour le bloc 2 contre 80 % pour le bloc 1) (voir figure 59 et en annexe 42 p 97).

4.2.2. Suivi de la prédation du puceron *Acyrtosiphon pisum*

La variable étudiée est le taux de prédation des pucerons *Acyrtosiphon pisum*. Les cartes de prédation ont été relevées à deux reprises : le 04/05/2021 et le 01/06/2021.

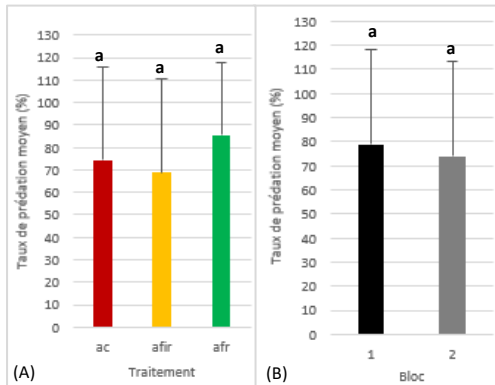


Figure 60 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons *Acyrtosiphon pisum* toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

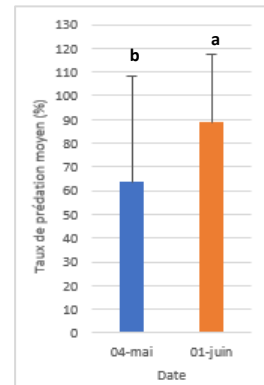


Figure 61 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons *Acyrtosiphon pisum* (traitements et blocs confondus) en fonction de la date

Toutes dates confondues, le taux de prédation moyen à l'échelle de la parcelle est de l'ordre de 76.3 % (voir en annexe 43 p 98). La date de relevé influence significativement ces taux (p -value = 0.0007788) : ils sont significativement plus importants au 01/06/2021 comparé au 04/05/2021 (en moyenne 88.8 % contre 63.7 %) (voir figure 61 et en annexe 44 p 98). Toutefois, il n'y a pas d'effet significatif du traitement agroforestier (p -value = 0.1498409) et du bloc (p -value = 0.0411933) sur ces taux (voir figure 61).

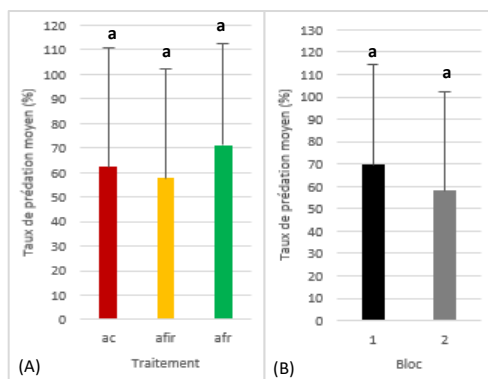


Figure 62 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons *Acyrtosiphon pisum* en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 04/05/2021

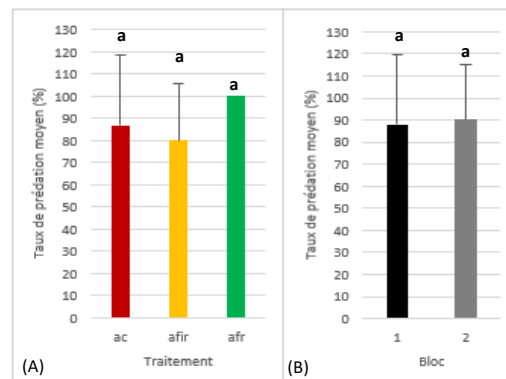


Figure 63 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons *Acyrtosiphon pisum* en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 01/06/2021

Au 04/05/2021, il n'existe pas de différences significatives entre les taux de prédation des œufs de carpocapse en fonction du traitement agroforestier (p -value = 0.6746) et en fonction du bloc (p -value = 0.3574) (voir figure 62 et en annexe 45 p 98). Au 01/06/2021, il n'existe pas de différences significatives entre les taux de prédation des pucerons en fonction du traitement agroforestier (p -value = 0.02591) et en fonction du bloc (p -value = 0.85809) (voir figure 63 et en annexe 46 p 98). Les pommiers en AFIR ne présentent pas d'écart-type puisque la totalité des pucerons ont été prédatés.

4.3. Suivi du complexe d'arthropodes (notamment des ennemis naturels)

4.3.1. Dans les colonies de *D. plantaginea*

La variable étudiée est le nombre d'ennemis naturels (tous taxons et tous stades confondus : œufs, larves, nymphe, adulte) par foyer de pucerons cendrés. Elle a été suivie à 17 reprises sur la période d'infestation printanière (du 25/03/2021 au 08/07/2021).

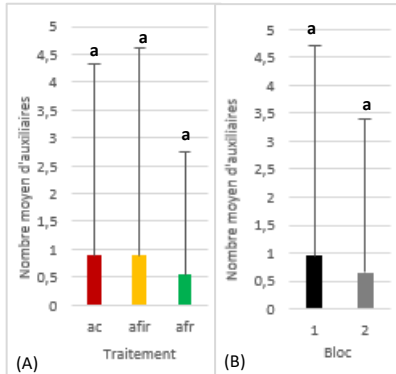


Figure 64 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

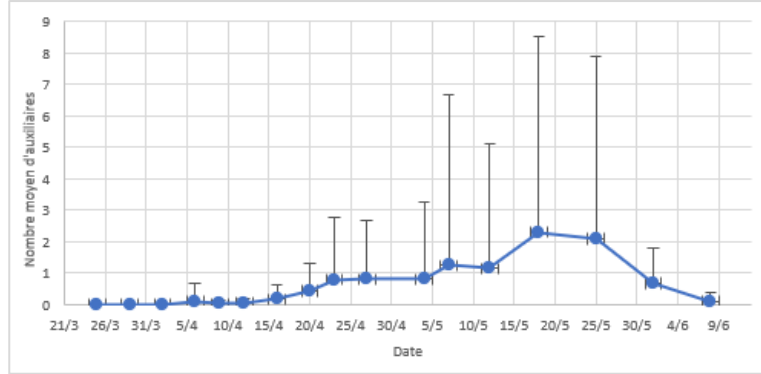


Figure 65 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Tous facteurs confondus (traitement, bloc et date), le nombre moyen d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés est de l'ordre de 0.8, le minimum est de 0 et le maximum atteint est de 50 (voir en annexe 47 p 99). Toutes dates confondues, il n'existe pas de différence significative entre les effectifs obtenus par foyer en fonction du traitement agroforestier (p -value = 0.03307) et en fonction du bloc (p -value = 0.08988) (voir figure 64). La date de suivi impacte significativement le nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés (p -value < 2.2e-16). Ce nombre est quasiment nulle du 23/03/2021 au 16/04/2021. Une phase de croissance s'étend du 16/04/2021 au 18/05/2021. Il y a un léger pic entre le 18/05/2021 et le 25/05/2021 (2.1 auxiliaires en moyenne par foyer). Après cette date, les effectifs chutent (voir figure 65).

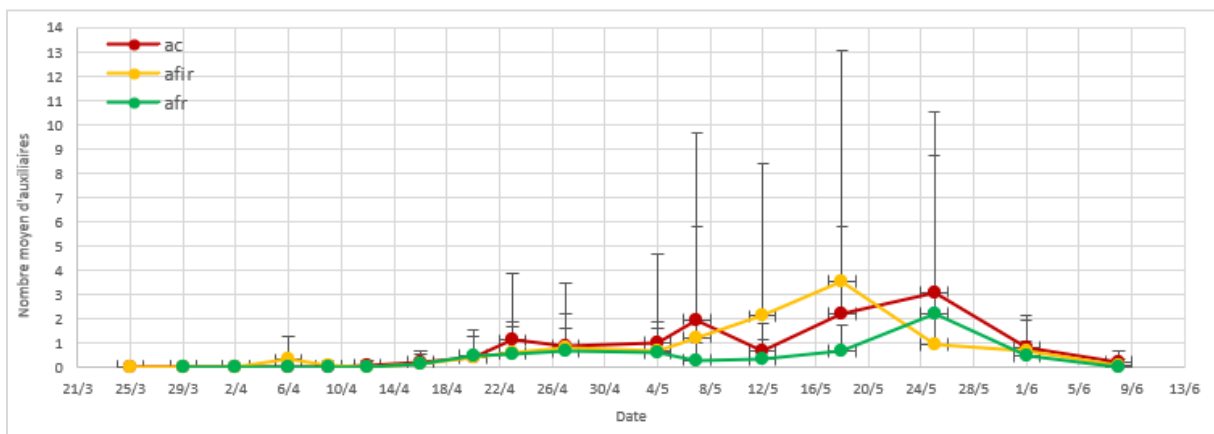


Figure 66 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés en fonction du traitement

En particulier, sur l'ensemble de la période d'infestation suivie, aucune date ne met en avant l'existence d'un effet significatif du facteur traitement agroforestier (voir figure 66) et du bloc (voir en annexe 48 p 99) sur le nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés. Qu'importe le traitement agroforestier ou le bloc dans lequel se situent les pommiers, les effectifs ne changent pas. Le récapitulatif des p -values obtenus à chacune des dates est disponible en annexe 49 p 99.

Plus spécifiquement, sur toute la période suivie, les coccinelles et les syrphes sont les ennemis naturels du puceron (prédateurs aphidiphages) les plus observés dans les foyers de pucerons cendrés (respectivement 24.1 % et 19 % des arthropodes observés). Les fourmis représentent 55.7 % des arthropodes observés (voir en annexe 53 p 101). Cette tendance est similaire qu'importe le traitement agroforestier appliqué aux pommiers et qu'importe le bloc dans lequel se situent les pommiers. Toutefois, le nombre de fourmis observé croit lorsque la proximité pommiers-noyers augmente tandis que, à l'inverse, le nombre de coccinelles décroît. Il n'y a aucune différence entre les blocs (voir en annexe 54 p 101). Les syrphes apparaissent dans les foyers de pucerons cendrés aux alentours du 16/04/2021. Ils ont notamment une phase de croissance de leurs effectifs jusqu'au 18/05/2021. Le 18/05/2021 constitue un pic. Après cette date, leurs effectifs chutent. Les coccinelles apparaissent dans les foyers de pucerons cendrés aux alentours du 20/04/2021. Elles ont notamment une phase de croissance de leurs effectifs jusqu'au 25/05/2021. Le 25/05/2021 constitue un pic. Après cette date, leurs effectifs chutent (voir en annexe 55 p 102).

4.3.2. Dans les colonies de *A. pomi*

La variable étudiée est le nombre d'ennemis naturels (tous stades confondus : œufs, larves, nymphes, adultes) par foyer. Elle a été suivie à 14 reprises sur la période d'infestation printanière (du 06/04/2021 au 08/07/2021).

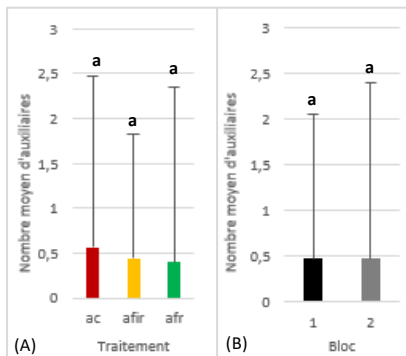


Figure 67 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons verts toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc

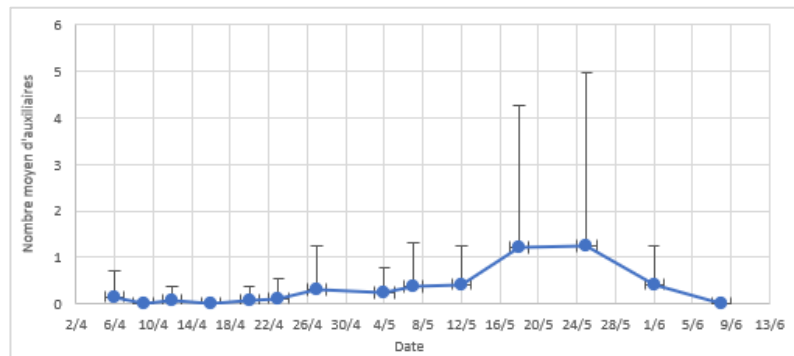


Figure 68 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons verts en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

Tous facteurs confondus (traitement, bloc et date), le nombre moyen d'auxiliaires par foyer de pucerons verts est de l'ordre de 0.5, le minimum est de 0 et le maximum atteint est de 31 (voir en annexe 50 p 100). Toutes dates confondues, il n'existe pas de différence significative entre les effectifs obtenus par foyer en fonction du traitement agroforestier (p -value = 0.07625) et en fonction du bloc (p -value = 0.45837) (voir figure 67). La date de suivi impacte significativement le nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons verts (p -value < 2.2×10^{-16}). Ce nombre est quasiment nulle du 25/03/2021 au 16/04/2021. Une phase de croissance s'étend du 16/04/2021 au 18/05/2021. Il y a un léger pic entre le 18/05/2021 et le 25/05/2021 (1.2 auxiliaire en moyenne par foyer). Après cette date, les effectifs chutent (voir figure 68).

En particulier, sur l'ensemble de la période d'infestation suivie, aucune date ne met en avant l'existence d'un effet significatif du facteur traitement agroforestier (voir figure 69) et du bloc (voir en annexe 51 p 100) sur le nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons verts. Qu'importe le traitement agroforestier ou le bloc dans lequel se situe les pommiers, les effectifs ne changent pas. Le récapitulatif des p -values obtenus à chacune des dates est disponible en annexe 52 p 100.

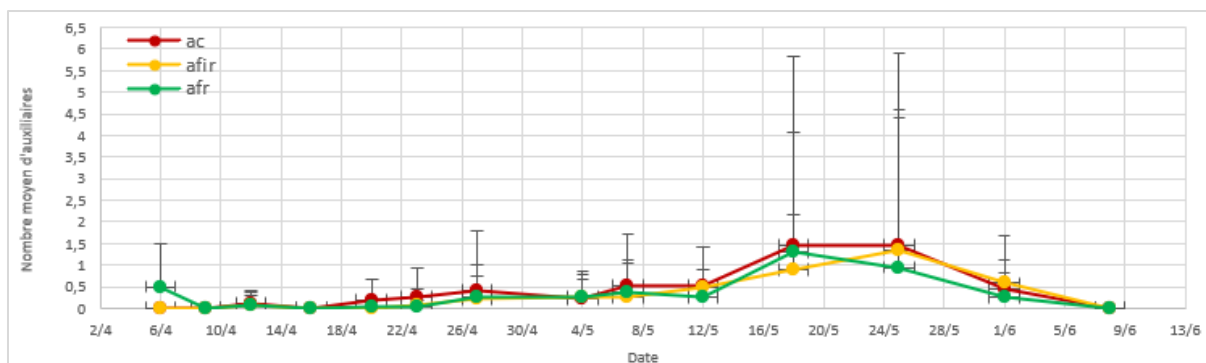


Figure 69 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyers de pucerons verts en fonction du traitement

Plus spécifiquement, sur toute la période suivie, les coccinelles et les syrphes sont les ennemis naturels du puceron (prédateurs aphidiphages) les plus observés dans les foyers de pucerons verts (respectivement 23.1 % et 23.5 % des arthropodes observés). Les fourmis représentent 48.5 % des arthropodes observés (voir en annexe 56 p 102). Cette tendance est similaire qu'importe le traitement agroforestier appliqué aux pommiers et qu'importe le bloc dans lequel se situent les pommiers. Toutefois, le nombre de fourmis observé croît lorsque la proximité pommiers-noyers augmente tandis que, à l'inverse, le nombre de coccinelles décroît. Il n'y a aucune différence entre les blocs (voir en annexe 57 p 103). Les syrphes apparaissent dans les foyers de pucerons verts aux alentours du 23/04/2021. Ils ont notamment une phase de croissance de leurs effectifs jusqu'au 18/05/2021. Le 18/05/2021 constitue un pic. Après cette date, leurs effectifs chutent. Les coccinelles apparaissent dans les foyers de pucerons verts aux alentours du 04/05/2021. Elles ont notamment une phase de croissance de leurs effectifs jusqu'au 25/05/2021. Le 25/05/2021 constitue un pic. Après cette date, leurs effectifs chutent (voir en annexe 58 p 103).

4.3.3. Dans les pommiers (en incluant les auxiliaires comptés dans les foyers)

Au sein des pommiers, sur toute la période suivie, les coccinelles et les syrphes (prédateurs aphidiphages) sont les ennemis naturels du puceron dominants en terme quantitatif dans les pommiers (voir en annexe 59 p 104). Ils représentent respectivement près de 43.5 % et 9.6 % des arthropodes observés. Les fourmis représentent près de 32.7 % des arthropodes observés sur les pommiers. Cette tendance est similaire qu'importe le traitement agroforestier appliqué aux pommiers et qu'importe le bloc dans lequel se situent les pommiers (voir en annexe 60 p 104). Toutefois, le nombre de fourmis dans les pommiers croît lorsque la proximité pommiers-noyers augmente tandis que le nombre de coccinelles décroît.

En particulier, la dynamique des coccinelles (voir figure 70(A)) et des syrphes (voir figure 70(B)) n'est pas impactée par les différents traitements agroforestiers. Toutefois, les fourmis sont davantage présentes dans les pommiers du groupe AC comparé aux pommiers des groupes AFIR et AFR notamment du 22/04/2021 au 12/05/2021 (voir figure 70(C)). La dynamique de ces trois arthropodes n'est pas impactée par le bloc (voir en annexe 62 p 105).



Figure 70 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de (A) coccinelles (tous stades confondus), (B) syrphes (tous stades confondus) et (C) fourmis dans les pommiers en fonction du traitement

4.3.4. Dans les IAE de type BE, BF, haies et peupliers conduits en TCR

4.3.4.1. Via la méthode de la marche le long d'un transect linéaire

Le suivi de la fréquentation des inter-rangs (BF et BE) et plus particulièrement des fleurs par les arthropodes via la méthode de la marche le long d'un transect linéaire a été réalisée à cinq reprises du 14/03/2021 au 19/05/2021. Sur l'ensemble de la période suivie, les araignées (prédateurs généralistes) et les syrphes (prédateurs aphidiphages) sont les ennemis naturels dominants en terme quantitatif dans les inter-rangs et représentent respectivement 11.6 % et 6.5 % des arthropodes observés. Les abeilles (auxiliaires pollinisateurs) représentent 17.9 % des arthropodes observés. Les coléoptères phytophages (herbivores et ravageurs anecdotiques), les pucerons (phytophages, herbivores et ravageurs), les sauterelles (phytophages, herbivores et ravageurs anecdotiques) représentent respectivement 18.9 %, 11.8 % et 5 % des arthropodes. Les fourmis représentent 10.1 % des arthropodes observés (voir en annexe 63 p 106).

De manière générale, le nombre d'arthropodes observés dans les inter-rangs est très faible au 14/03/2021 puis augmente au cours du temps. Plus particulièrement, le nombre d'abeilles observées croît très fortement le 03/05/2021 et le 19/05/2021. C'est la même tendance pour les coléoptères phytophages et prédateurs. Le 03/05/2021 constitue un pic du nombre de bourdons observés, le 30/03/2021 un pic du nombre de cicadelles observées et le 14/04/2021 un pic du nombre de diptères observés. Le nombre d'araignées et de fourmis observées reste relativement stable au cours du temps (voir en annexe 64 p 106).

Les fleurs les plus fréquentées dans les inter-rang sont la phacélie constitutive de la BF (fréquentée par 39.8 % des arthropodes observés) et d'autres issues de la flore spontanée (BE) telles que l'euphorbe (fréquentée par 10.7 %), le sainfoin (fréquenté par 7.6 %), le pissenlit (fréquenté par 3.9 %) et l'orge (fréquentée par 3.9 %) (voir en annexe 65 p 107). La phacélie est majoritairement fréquentée par les abeilles (37.7 % des arthropodes observés sur la phacélie), les coléoptères phytophages (37.6 %), les syrphes (7.5 %), les bourdons (4.9 %) et les araignées (4.6 %). L'euphorbe est majoritairement fréquentée par les pucerons (58.7 % des arthropodes observés sur l'euphorbe), les diptères (13.8 %), les fourmis (6.1 %), les araignées (5.6 %) et les syrphes (4.6 %). Le sainfoin est majoritairement fréquenté par les pucerons (35.7 %), les abeilles (25 %), les coléoptères phytophages 14.3 % et les syrphes (12.9 %) (voir en annexe 66 p 107).

4.3.4.2. Via la méthode des assiettes colorées

Des assiettes colorées ont été installées sur la parcelle du 17/05/2021 au 19/05/2021. Les araignées (prédateurs généralistes) et les hyménoptères parasitoïdes sont les ennemis naturels dominants en terme quantitatif dans les assiettes colorées et représentent respectivement 9 % et 3.8 % des arthropodes observés dans les assiettes colorées. Les abeilles (auxiliaires pollinisateurs) et autres diptères (généralement neutres ou détritivores) représentent respectivement 2.8 % et 36.4 % des arthropodes collectés. Les coléoptères phytophages (herbivores et ravageurs anecdotiques), les pucerons (phytophages, herbivores et ravageurs) et les cicadelles (phytophages, herbivores et ravageurs occasionnels) représentent respectivement 3.8 %, 26 % et 3.6 % des arthropodes collectés. Les fourmis représentent 8.5 % des arthropodes collectés (voir en annexe 67 p 108). Cette tendance est plus ou moins similaire qu'importe le bloc dans lequel se situent les assiettes colorées (voir en annexe 68 p 108).

4.3.4.3. Via la méthode des pots Barber

Des pots Barber ont été installés sur la parcelle du 17/05/2021 au 21/05/2021. Les araignées (prédateurs généralistes) sont les ennemis naturels du puceron dominants en terme quantitatif dans les pots Barber et représentent 16.5 % des arthropodes collectés. Les abeilles (auxiliaires pollinisateurs) et autres diptères (généralement neutres ou détritivores) représentent respectivement 3.1 % et 6.1 % des arthropodes collectés. Les coléoptères phytophages (herbivores et ravageurs anecdotiques), les pucerons (phytophages, herbivores et ravageurs) et les cicadelles (phytophages, herbivores et ravageurs occasionnels) représentent respectivement 2.4 %, 4.5 % et 3 % des arthropodes collectés. Les fourmis, acariens et collemboles représentent respectivement 47.1 %, 3.3 % et 5.2 % (voir en annexe 69 p 109). Cette tendance est plus ou moins similaire qu'importe les IAE dans lesquels sont placés les pots Barber (dans les BE et BF, aux pieds des haies, aux pieds des peupliers conduits en TCR) (voir en annexe 70 p 109).

5. Discussion et perspectives

La finalité principale de ce stage est d'évaluer l'influence de la proximité des noyers sur les dynamiques des communautés d'arthropodes (ravageurs et ennemis naturels) présentes sur les pommiers. L'hypothèse étant que cette proximité réduit directement et/ou indirectement la pression des ravageurs. En parallèle, une seconde finalité de ce stage est d'évaluer l'influence de la diversité végétale installée au niveau des inter-rangs sur la diversité des invertébrés et plus particulièrement des auxiliaires et les services écosystémiques connexes. L'hypothèse étant que cette diversité végétale favorise la diversité des auxiliaires et leur action de régulation biologique des ravageurs.

5.1. Influence de la proximité des noyers sur les dynamiques des pucerons

5.1.1. Une faible infestation de la parcelle GAFAM en général

Sur toute la période d'infestation printanière, 98 % des pommiers sélectionnés sont infestés par le puceron cendré et 95 % par le puceron vert. En moyenne 10 % des pousses présentent au moins un puceron cendré (28.7 % de pousse atteintes en moyenne au pic d'infestation) et 11 % des pousses présentent au moins un puceron vert (25 % de pousses atteintes en moyenne au pic d'infestation). Si tous les pommiers, ou presque, sont infestés, le pourcentage de pousses infestées par pommier reste relativement modeste. D'après différents échanges avec notamment Philippe Blanc, technicien du Centre d'Etudes Techniques Agricoles (CETA) Hérault Vidourle, et des partenaires du programme ALTO, les infestations par les pucerons sont relativement faibles sur la parcelle GAFAM (conduite en AB et avec des niveaux très bas d'intrants) pour une année où la pression en Occitanie est élevée et où l'infestation est difficile à gérer pour d'autres vergers biologiques et conventionnels.

5.1.2. Une dynamique d'infestation rythmée par la prédation et migration des pucerons

De manière générale, les dynamiques d'infestation du puceron cendré et du puceron vert sont relativement similaires. Du 06/04/2021 au 25/05/2021 a lieu la phase d'expansion par parthénogénèse du puceron cendré tandis que du 06/04/2021 au 18/05/2021 a lieu celle du puceron vert. Les 25/05/2021 et 18/05/2021 correspondent respectivement au pic d'infestation du puceron cendré et du puceron vert.

A partir du 25/05/2021, l'infestation des pucerons cendrés chute. Cette phase de décroissance peut davantage être liée à ce vol de migration vers l'hôte secondaire (Leclant, 2000 ; Trillot et al., 2002 ; Ricard et al., 2012), les premiers ailés apparaissant le 25/05/2021. Elle peut également être liée à un phénomène de prédation. En effet, un pic du nombre d'auxiliaires et notamment des coccinelles et syrphes dans les foyers de pucerons et dans les pommiers se situe aux alentours du 25/05/2021. Ce sont deux auxiliaires extrêmement voraces ayant un « effet de nettoyage » : une larve de syrphe peut consommer jusqu'à 400 pucerons en 8 jours et une larve de coccinelle jusqu'à 3 000 pucerons en une dizaine de jours (Albert et al., 2016 ; Boyer et al., 2017). Enfin, cette décroissance peut être liée à une température de l'air élevée et défavorable à la reproduction du puceron cendré. Les températures moyennes journalières sur la parcelle A2 (avoisinant la parcelle A1 étudiée ici) atteignent les 15°C aux alentours du 23/04/2021 et dépassent les 20°C aux alentours du 25/05/2021 (voir en annexe 71 p 109). Or, Graf et al. (1985) ont mis en évidence un optimum de température pour la reproduction du puceron cendré aux alentours de 15°C. Il semble toutefois difficile de déterminer la part respective de chacune de ces hypothèses. A partir du 18/05/2021, l'infestation des pucerons verts chute. Cette phase de décroissance peut davantage être liée à un phénomène de prédation (action des coccinelles et syrphes notamment) comme évoqué précédemment. Elle peut également être liée à une température de l'air élevée et défavorable à la reproduction du puceron vert, d'autant plus que l'optimum de

température pour leur reproduction est d'environ 20°C (Graf et *al.*, 1985) et que cette température est dépassée aux alentours du 25/05/2021 (voir en annexe 71 p 109).

Une légère décroissance du nombre de pucerons par foyer a lieu du 27/04/2021 au 04/05/2021. Elle coïncide avec le premier léger pic du pourcentage de foyers disparus par pommier aux alentours du 04/05/2021 et du 07/05/2021 ainsi qu'avec la première légère vague du nombre d'ennemis naturels par foyers de pucerons du 16/04/2021 au 15/05/2021. Le tout, précédant l'apparition des premiers pucerons cendrés ailés et la disparition générale des foyers de pucerons verts et se situant dans la phase d'expansion des effectifs des coccinelles et des syrphes, peut davantage être lié à un phénomène de prédation.

Le nombre d'ennemis naturels dans les foyers de pucerons et dans les pommiers chute à partir du 25/05/2021 tout comme celui des pucerons. Les populations d'ennemis naturels semblent très inféodées à leurs proies, ici les pucerons. En effet, la plupart des auxiliaires prédateurs plus ou moins spécialistes des pucerons sont densités dépendants, c'est-à-dire que les populations de l'auxiliaire augmentent de façon synchrone avec les populations du ravageur (Ricard et *al.*, 2012). Les ennemis naturels, face à une faible ressource en pucerons vont préférer quitter les arbres voire la parcelle pour accéder à des milieux plus riches en ressources (Capowiez, 2012). La figure 71 résume bien l'action de prédation des coccinelles et des syrphes sur les pucerons et cette relation de dépendance entre auxiliaires et ravageurs.

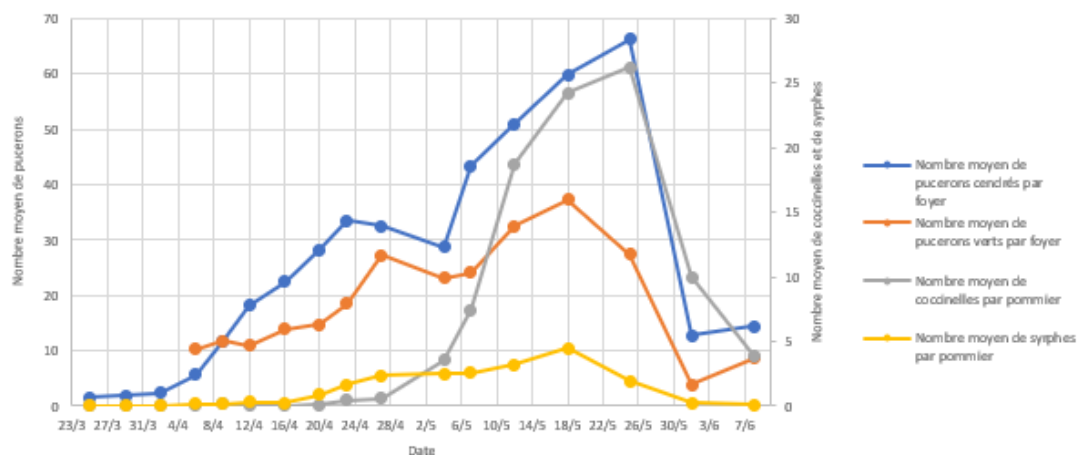


Figure 71 : Nombre moyen d'auxiliaires (coccinelles et syrphes, tous stades confondus) dans les pommiers et de pucerons dans les foyers en fonction de la date (traitements et blocs confondus)

5.1.3. Un facteur bloc impactant peu la dynamique des communautés d'arthropodes

De manière générale, le facteur bloc n'influence pas significativement les dynamiques d'infestation des pommiers par le puceron cendré ainsi que le nombre d'ennemis naturels dans les foyers et dans les pommiers. Il influence légèrement les dynamiques d'infestation des pommiers par le puceron vert. En effet, toutes dates confondues, il existe une significativité du facteur bloc sur le nombre de pucerons verts par foyer (effectifs supérieurs dans le bloc 2 comparé au bloc 1). Or, seule une date (le 18/05/2021) sur 14 confirme cette significativité ce qui ne permet pas de justifier de l'impact significatif de ce facteur en général. De même, il existe une significativité du facteur bloc sur le pourcentage moyen de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert pour une date (le 01/06/2021) sur 14 (pourcentages supérieurs dans le bloc 2 comparé au bloc 1) mais pas toutes dates confondues. Cela ne permet pas de justifier de l'impact significatif de ce facteur en général. Cette non-significativité du facteur bloc renforce les conclusions observées concernant l'influence ou non de la proximité des noyers sur les dynamiques des communautés d'arthropodes (ravageurs et ennemis naturels) présentes dans les pommiers.

5.1.4. Une dispersion des colonies inversée entre le puceron cendré et le puceron vert

Toutes dates confondues, le pourcentage moyen de pousses infestées par le puceron cendré et par le puceron vert est significativement différent selon les modalités agroforestières appliquées. Un phénomène inverse de l'impact du contexte agroforestier sur ces pourcentages est observé entre les deux pucerons. Les pommiers des groupes AC et AFIR ont un pourcentage de pousses infestées par le puceron cendré significativement supérieur aux pommiers du groupe AFR. A l'inverse, les pommiers du groupe AFR ont un pourcentage de pousses infestées par le puceron vert significativement supérieur aux pommiers des groupes AFIR et AC. Cette significativité est confirmée pour une seule date (le 25/05/2021) sur 17 en ce qui concerne le puceron cendré et elle est confirmée pour trois dates (le 17/04/2021, le 12/05/2021 et le 07/05/2021) sur 14 en ce qui concerne le puceron vert.

Ce phénomène peut dans un premier temps s'expliquer par les bouleversements microclimatiques liés à la proximité des noyers (Dupraz et *al.*, 2008), ces derniers pouvant entraîner la formation d'un microclimat plus doux pour les pommiers via une réduction de l'amplitude de l'augmentation quotidienne de la température (Gosme et *al.*, 2016 ; Pitchers, 2021). Ces effets sur la température et l'hygrométrie sont susceptibles d'influencer directement le développement des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels selon leurs préférences microclimatiques. *A. pomi* étant plus mobile pendant l'infestation printanière (présence constante d'aîlés dans les foyers d'où une dispersion et prospection dans le verger dès la fin avril via des virginipares ailées) (Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012), il pourrait y avoir un effet du microclimat sur les choix d'arbres à fréquenter. La hausse des températures (voir en annexe 71 p 109), associée à l'absence d'ombrage des noyers sur les pommiers en AC sur lesquels les foyers de *A. pomi* sont initialement installés en début d'infestation favoriserait leur dissémination d'un pommier à l'autre (les aîlés prospectent pour trouver les sites les plus favorables, les pommiers AFR). A l'inverse, *D. plantaginea* étant moins mobile pendant l'infestation printanière (apparition des émigrants ailés de fin juin à début juillet en vue de la migration vers l'hôte secondaire) (Trillot et *al.*, 2002 ; Ricard et *al.*, 2012), la hausse des températures et l'absence d'ombrage des noyers sur les pommiers en AC sur lesquels les foyers de *D. plantaginea* sont initialement installés favoriserait leur dissémination mais d'une pousse à l'autre au sein de ces pommiers (les aptères prospectent pour trouver les sites les plus favorables mais à une échelle plus réduite que les pucerons verts ailés).

Ce phénomène pourrait également s'expliquer par l'action de prédation des auxiliaires. En effet, toutes dates confondues, le pourcentage de coccinelles observées est supérieur dans les pommiers en AC (voir en annexes 54 p 101, 57 p 103, 60 p 104) et un pic général de cet auxiliaire se situe aux alentours du 25/05/2021 (voir en annexes 55 p 102, 58 p 103 et en annexe 61 p 105). Or, les larves de coccinelles, du fait de leur recherche active de proies, peuvent provoquer des réactions de défense des pucerons et notamment une dispersion de leurs colonies (Ricard et *al.*, 2012). Etant donnée la supposée mobilité réduite des pucerons cendrés, ces derniers se disperseraient d'une pousse à l'autre sur les pommiers en AC où ils se trouvent initialement installés tandis que les pucerons verts, étant donné leur plus grande mobilité, se disperseraient des pommiers en AC vers d'autres pommiers (où le nombre de prédateurs s'y trouve réduit, pommiers AFR). Toutefois, la grande variabilité des effectifs de coccinelles observés dans les pommiers, les courbes d'effectifs moyens presque confondues pour chacun des traitements (voir en figure 70 p 47) ainsi que l'absence de tests statistiques axés sur cet auxiliaire rendent cette interprétation difficilement recevable.

Ce phénomène reste discutable pour deux raisons. La première est l'existence d'une interaction significative entre les facteurs traitements et blocs pour les analyses toutes dates confondues du pourcentage moyen de pousses infestées par le puceron cendré et le puceron vert ainsi que pour l'analyse séparément par date du pourcentage moyen de pousses infestées par le puceron cendré. Cette interaction risque de biaiser l'interprétation des résultats. La seconde est que les observations

réalisées dans le cadre de ce stage n'ont pas pris en compte des foyers conjuguant les pucerons cendrés et les pucerons verts (quelques foyers de ce type ont toutefois été perçus mais très rarement). Un phénomène d'évitement pourrait alors être envisagé : si l'un des pucerons précède l'autre, le second prend simplement la place qui reste et l'interprétation des résultats est alors biaisée. Dans le cas présenté ici, les pucerons verts plus précoces (premiers foyers apparus aux alentours du 25/03/2021) auraient pu initialement envahir davantage les pousses des pommiers du groupe AC et les pucerons verts plus tardifs (premiers foyers apparus aux alentours du 06/04/2021) occuperaient les pommiers où davantage de pousses sont libérées : les pommiers en AFR notamment.

5.1.5. Une distinction entre dissémination des foyers et dynamique au sein des foyers

Toutes dates confondues, le nombre de pucerons cendrés par pommier est significativement différent selon les modalités agroforestières appliquées. Les pommiers en AFR ont un nombre de pucerons cendrés par foyer significativement supérieur aux pommiers en AC et AFIR. Cette significativité est confirmée pour quatre dates (le 29/03/2021, le 27/04/2021, le 04/05/2021 et le 07/05/2021) sur 17. Ainsi, les pommiers en AC ont plus de pousses infestées par le puceron cendré (voir paragraphe 5.1.4.) mais ont moins de pucerons cendrés par foyer. La situation d'ombrage (pommiers en AFR et AFIR) favoriserait directement la reproduction des pucerons cendrés par parthénogénèse dans les foyers, ces derniers profitant des conditions microclimatiques plus douces apportées par les noyers.

En revanche, les pommiers en AFR ont plus de pousses infestées par le puceron vert (voir paragraphe 5.1.4.) mais qu'importe le contexte agroforestier appliqué aux pommiers, le nombre de pucerons verts par foyer ne varie pas. La dissémination des foyers de pucerons verts dans la parcelle est donc plus impactée par le contexte agroforestier que la dynamique au sein même des foyers. Et la dynamique des pucerons verts au sein même des foyers est moins impactée par le contexte agroforestier que celle des pucerons cendrés. Cela peut s'expliquer par le fait que l'optimum de température pour la reproduction de *D. plantaginea* est plus faible que pour celle de *A. pomi* (respectivement 15°C contre 20°C) (Graf et al., 1985). Les pucerons verts pourraient se reproduire à des températures plus importantes que le puceron cendré et donc possiblement en l'absence d'ombrage.

Ce phénomène peut également s'expliquer par l'action de prédation des auxiliaires. En effet, comme évoqué précédemment, toutes dates confondues, le pourcentage de coccinelles observées est supérieur dans les pommiers des groupes AC et un pic général de cet auxiliaire se situe aux alentours du 25/05/2021. Or, les larves de coccinelles, du fait de leur recherche active de proies, peuvent provoquer une dispersion des colonies de pucerons cendrés situées dans les pommiers en AC (Ricard et al., 2012). Qui dit dispersion dit également réduction des effectifs de pucerons cendrés au sein-même de leurs colonies. Les pucerons verts envahissant davantage les pousses des pommiers en AFR sont moins concernés par cet effet de dispersion des colonies par les larves de coccinelles moins présentes. Toutefois, la grande variabilité des effectifs de coccinelles observés dans les pommiers, les courbes d'effectifs moyens presque confondues pour chacun des traitements (voir en figure 70 p 47) ainsi que l'absence de tests statistiques axés sur cet auxiliaire rendent cette interprétation difficilement recevable.

5.1.6. Des auxiliaires dans les foyers peu impactés par le contexte agroforestier

Le nombre d'ennemis naturels dans les foyers de pucerons n'est significativement pas différent selon les modalités agroforestières appliquées et les blocs étudiés. Autant pour les pucerons, il y aurait un effet faible mais possible du contexte agroforestier, autant pour les auxiliaires, leur dynamique ne

semble liée qu'à leurs proies. Cela renforce l'affirmation suivante : la plupart des auxiliaires prédateurs plus ou moins spécialistes des pucerons sont densités dépendants (Ricard et *al.*, 2012). C'est donc la même tendance observée pour la dynamique des effectifs des pucerons dans les foyers et celle des auxiliaires dans les foyers (croient et chutent au même moment).

5.1.7. Un potentiel de prédation des pucerons bien présent dans la parcelle GAFAM

Toutes dates confondues, le taux de prédation moyen du puceron *A. pisum* est de l'ordre de 76.3 % ce qui est relativement important et souligne la présence d'auxiliaires entomophages (organismes se nourrissant d'insectes) et possiblement d'ennemis naturels du puceron sur la parcelle. Il n'est significativement pas différent selon le contexte agroforestier mais significativement supérieur au 01/06/2021 comparé au 04/05/2021 (88.8 % contre 63.7 %). Au 04/05/2021, c'est le début de la phase d'expansion de l'infestation des pucerons en période de pleine floraison de la bande-fleurie. Le nombre d'auxiliaires présents sur la parcelle croît mais n'a pas encore atteint son maximum. Or, le pic d'infestation des pucerons ainsi que celui des effectifs d'auxiliaires dans les foyers est atteint juste avant le 01/06/2021. Un équilibre écologique se serait mis en place depuis le 04/05/2021, et donc une stabilité des services écosystémiques engendrant une plus grande prédation au 01/06/2021.

5.1.8. Limites éventuelles, perspectives, ouvertures possibles et recommandations

D'abord, *A. pomi* aurait pu être confondu avec une espèce de la même famille *Aphis spiraecola* (puceron de la spirée) provoquant les mêmes types de dégâts sur pommiers (Agnello et *al.*, 2018). Ces dernières années, *A. spiraecola* a presque totalement remplacé *A. pomi* dans les vergers commerciaux. Les deux espèces semblables morphologiquement sont impossibles à distinguer sur le terrain, même à la loupe. Des outils moléculaires sont nécessaires pour les distinguer (Naaum et *al.*, 2012 ; Agnello et *al.*, 2018).

Ensuite, les analyses concernant les comptages dans les foyers moyennent l'ensemble des foyers. Étant donné la méthodologie appliquée : (i) certains foyers sont jeunes (donc peu densément peuplés) et d'autres plus anciens (donc plus densément peuplés) ; (ii) le nombre de foyers suivis n'est pas le même pour tous les pommiers selon la date, certains foyers sont apparus plus tardivement que d'autres, d'autres ont disparu au cours du temps, d'autres foyers sont introuvables (disparition des marquages avec le vent ou à la suite de travaux faits sur les pommiers, etc.). Même si les foyers disparus ou ceux pour lesquels le nombre de pucerons est descendu à 0 sont remplacés par le suivi d'un autre foyer, une grande variabilité existe dans le jeu de données avec des valeurs des écart-types souvent supérieures aux valeurs des moyennes. Les différents boxplots présentés en annexe illustrent bien cette forte variabilité (p. ex. annexes 25 p 89 et 28 p 91).

En somme, l'utilisation des cartes de prédation est controversée comme indicateur de l'activité de prédation en ce qui concerne la méthodologie développée et la fiabilité potentielle (Lövei et Ferrante, 2017 ; Lauri P.E., communication personnelle). Les trois pucerons posés par carte de prédation fourniraient rarement des taux de prédation représentatifs de la pression de prédation dans son entièreté et les arthropodes attaquant ces proies ne consomment pas nécessairement cette cible. De plus, du fait de la congélation des cartes avant leur installation sur la parcelle, les pucerons ne seraient pas toujours en bon état (comparé à des pucerons frais) (Franck P., communication personnelle).

Aussi, la fréquence de réalisation des comptages est élevée ce qui permet de suivre précisément la dynamique de l'infestation des pucerons mais engendre une saisie des données très chronophage. Au vue de la faible évolution des effectifs entre certaines dates, elle pourrait être réduite. D'autant plus que les comptages répétés des mêmes colonies au cours du temps peuvent endommager les

feuilles en les déroulant, affecter les effectifs présents et biaiser les résultats (Simon et Capowiez, 2010).

De plus, l'étude menée au cours de ce stage se focalise sur la dynamique des populations de pucerons mais pas sur l'évaluation des symptômes eux-mêmes. Il aurait pu être intéressant d'attribuer à chaque pommier une classe, en fonction de la proportion de rameaux présentant des dégâts conformément au protocole de Simon (2010). Egalement, élargir l'étude en reliant l'incidence des pucerons (dynamiques des populations et symptômes) au rendements des pommiers en fin de saison (septembre-octobre) en fonction des contextes agroforestiers serait intéressant et plus parlant d'un point de vue de la communication auprès d'un public de nature agricole (agriculteurs et techniciens).

Egalement, les données concernant le suivi des auxiliaires dans les foyers ont été analysées en confondant tous les stades (œufs, larves, nymphes, adultes). Or, tous les stades de développement des auxiliaires ne sont pas actifs pour la prédation : seules les larves de syrphes, les larves de coccinelles et les coccinelles adultes sont actives. Le choix de combiner l'ensemble des stades est lié au fait que l'on considère qu'ils s'enchaînent très vite et que chaque individu peut s'avérer actif dans la régulation des pucerons d'un jour à l'autre. P. ex., les larves de coccinelles sortent de leurs œufs en deux à 10 jours, ou bien, les coccinelles adultes sortent de leur stade nymphal en sept à 15 jours (les espèces et les variables environnementales, telles que la température, peuvent raccourcir ou allonger ce délai) (Auximore, 2014). Toutefois, suivre les auxiliaires en fonction de leur stade de développement pourrait davantage préciser la dynamique de régulation des pucerons par les auxiliaires.

Par ailleurs, des jeunes plants de romarins de différentes variétés ont été installés le 12/03/2021 aux pieds des pommiers de chaque modalité. Le romarin (*R. officinalis*) présente un effet répulsif et anti-appétant pour certaines espèces de pucerons comme le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*) au travers de la diffusion de COV (Composés Organiques Volatiles) (Ben Issa, 2014). Il faudra cependant attendre plusieurs années avant qu'un possible effet soit perceptible sur la parcelle GAFAM.

5.2. Influence de la proximité des noyers sur l'incidence du carpocapse

5.2.1. Une infestation modeste pour la première génération de carpocapse

En combinant les résultats à 50 % et à 100 % d'éclosion, 71 % des pommiers sélectionnés présentent au moins un fruit avec symptôme(s) de carpocapse et en moyenne 10 % des inflorescences ont au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse. Si près de trois quarts des pommiers, ou presque, sont infestés, le pourcentage d'inflorescences infestées par pommier reste relativement modeste pour une parcelle respectant le cahier des charges de l'AB, conduite avec des niveaux très bas d'intrants et ne mobilisant aucunes méthodes « classiques » de lutte respectueuse de l'environnement (filets anti-insectes « AltCarpo », confusion sexuelle, etc.). Toutefois, cette incidence peut être sous-estimée puisque les possibles dommages causés par la deuxième génération (voire troisième) n'ont pas été étudiés et sont susceptibles de limiter encore plus le rendement.

5.2.2. Une incidence du carpocapse allant en crescendo au cours du temps

L'incidence du carpocapse est significativement plus importante à la fin de la première génération (le 05/07/2021) comparée au début de la première génération (le 17/06/2021). Au 17/06/2021 ce sont 60 % des pommiers qui présentent des symptômes contre près de 82 % au 05/07/2021. Au 17/06/2021 ce sont en moyenne 4.4 % des inflorescences qui sont atteintes par pommier contre 15.6 % au 05/07/2021. Cette incidence plus importante en fin de première génération est techniquement plus problématique car elle se développe après l'opération d'éclaircissage et limite le nombre de fruits qui pourront être récoltés à la fin de la saison.

5.2.3. Une non-significativité du contexte agroforestier mais une tendance possible

Le contexte agroforestier n'influence pas significativement l'incidence du carpocapse à l'échelle de la parcelle et du pommier ainsi que la prédation des œufs de carpocapse. Mais, il y a tendance à avoir davantage de pommiers en AC qui présentent des symptômes de carpocapse (comparativement aux pommiers en AFIR et AFR) notamment en début de première génération. Egalement, les pommiers en AC ont tendance à avoir davantage d'inflorescences atteintes par le carpocapse. De ce fait, la proximité des noyers aurait tendance à défavoriser, directement et/ou indirectement, les symptômes de carpocapse dans les pommiers. Cette défaveur peut être liée au fait que les noyers limitent directement la dispersion du carpocapse et leur capacité à explorer l'environnement par l'intermédiaire d'un effet barrière (Josso et *al.*, 2013 ; Schroth et *al.*, 2000). Elle peut également être liée aux bouleversements microclimatiques liés à la proximité des noyers (Dupraz et *al.*, 2008). Le début des éclosions a lieu aux alentours du 15/05/2021 (voir en annexe 71 p 109). Or, le risque de pontes est nul tant que les températures crépusculaires (entre 17h et 22/23h) sont inférieures à 14°C et la plage de températures idéales pour la reproduction du carpocapse est comprise entre 15°C et 23°C (IFPC, 2009 ; Ephytia(e), 2018). La proximité des noyers entraînant un microclimat plus doux (Gosme et *al.*, 2016 ; Pitchers, 2021), les pommiers en AFR pourraient être défavorables à la ponte et donc au développement du carpocapse (effet direct). Enfin, il y a tendance à avoir une prédation plus faible au niveau des pommiers en AC (comparativement aux pommiers en AFR) notamment en début de première génération. Une troisième hypothèse serait que l'agroforesterie influence positivement les auxiliaires qui régulent le carpocapse (au stade larvaire et/ou imagal), résultant en une meilleure régulation biologique du carpocapse à proximité des noyers (effet indirect).

5.2.4. Une incidence supérieure dans le bloc 2

Il y a un effet significatif du bloc sur le pourcentage d'inflorescences atteintes par le carpocapse et sur la prédation des œufs de carpocapse en fin de première génération. Les pommiers du bloc 1 ont un pourcentage moyen d'inflorescences atteintes significativement supérieur à ceux du bloc 2. La prédation des œufs de carpocapse est significativement plus importante pour les pommiers du bloc 2 comparé aux pommiers du bloc 1. Cet effet bloc est difficile à interpréter d'autant plus qu'il n'a pas été mis en avant pour la dynamique d'infestation des pucerons. Les conditions microclimatiques pourraient être plus favorables au carpocapse dans le bloc 2, la présence en ennemis naturels du carpocapse pourrait être plus importante dans le bloc 1, etc.

5.2.5. Un potentiel de prédation des œufs de carpocapse bien présent

Toutes dates confondues, le taux de prédation des œufs de carpocapse est de l'ordre de 52.8 % ce qui souligne la présence d'auxiliaires oophages (organismes se nourrissant d'œufs) et possiblement d'ennemis naturels du carpocapse sur la parcelle. La prédation des œufs de carpocapse est significativement plus importante au 04/06/2021 comparée au 07/05/2021 (88 % contre 17.5 %). Un équilibre écologique se serait mis en place depuis le 04/06/2021, et donc une stabilité des services écosystémiques engendrant une plus grande prédation au 07/05/2021.

5.2.6. Limites éventuelles, perspectives, ouvertures possibles et recommandations

D'abord, il semble difficile d'établir l'impact du contexte agroforestier sur l'incidence du carpocapse en général d'autant plus que la deuxième génération (voire troisième) n'a pas été suivie.

Ensuite, l'utilisation de la technique des cartes de prédation est controversée comme indicateur de l'activité de prédation en ce qui concerne la méthodologie développée et la fiabilité potentielle (Lövei et Ferrante, 2017 ; Lauri P.E., communication personnelle). En effet, les dix œufs posés par carte

de prédation fourniraient rarement des taux de prédation représentatifs de la pression de prédation dans son entièreté et les arthropodes attaquant les proies ne consomment pas nécessairement cette cible. Du fait de la congélation des cartes avant leur installation sur la parcelle, les œufs ne seraient pas toujours en bon état (comparé à des œufs frais) (Franck P., communication personnelle). Les cartes de prédatons créées pour la première session présentaient davantage d'œufs agglomérés que celles de la deuxième session ce qui pourrait biaiser les différences de résultats obtenues entre les deux. Il s'est également avéré assez difficile de distinguer, sur certaines cartes, les œufs consommés des œufs non-consommés malgré l'utilisation de la loupe binoculaire.

Puis, le suivi des arthropodes et notamment des auxiliaires dans les pommiers ainsi que dans les inter-rangs (BE et BF) et autres IAE a été stoppé après le 08/06/2021 ne permettant pas de faire le lien entre l'incidence du carpocapse et l'abondance des auxiliaires. En effet, à partir de cette date, les foyers de pucerons ont quasiment entièrement disparu, les BE fauchées sur l'intégralité de la parcelle au 26/05/2021 se dessèchent et la phacélie est en fin de grenaison ce qui diminue l'intérêt de poursuivre les inventaires. Du temps devait être consacré à une prise de recul et à une analyse des données.

Aussi, le suivi de l'incidence du carpocapse est basé sur la présence de symptôme(s) de carpocapse sur les fruits (légères morsures et zones rongées en surface, trous avec notamment des traces de déjection, etc.). Toutefois, cette présence de symptômes (parfois difficile à distinguer des morsures de tordeuse de forficules, de guêpes, de coups de bec d'oiseaux, etc.) ne certifie pas l'infestation du fruit par au moins une larve. L'infestation propre a pu être surestimée voir sous-estimée. Deux observateurs ont été nécessaire à ce suivi. Or, les observations restent propres à la personne observatrice et auraient pu fluctuer selon une autre personne observatrice.

De plus, tous les auxiliaires de régulation du carpocapse ne sont pas des arthropodes. Les oiseaux constituent le groupe prédateur du carpocapse le plus évident et étudié depuis longtemps. Les petites espèces telles que les sitelles (Sittidae) et les plus grandes comme certains pics (Picidae) peuvent attaquer les larves en cocon dans leurs sites d'hivernation. Peuvent également être citées les fauvelles, rouges-gorges et grimpeurs, les mésanges, etc. Les chauves-souris sont également des prédateurs de tordeuses, elles consomment des adultes de carpocapse tout au long de l'année (Ricard et al., 2012). Un suivi de l'impact du contexte agroforestier sur ces deux prédateurs pourrait compléter le suivi de la prédation du carpocapse.

Par ailleurs, une stratégie de lutte biologique par introduction-acclimatation a été mise en œuvre sur la parcelle GAFAM. Il s'agit d'introduire le *M. ridens* qui est un hyménoptère de la famille des Ichneumonidae et plus particulièrement un parasitoïde spécialiste des larves du carpocapse utilisé notamment pour la lutte biologique dite « classique » en verger de pommiers (Mills, 2005 ; Tortosa et al., 2014). Il a été lâché sur la parcelle GAFAM grâce à l'aide du CTIFL en septembre 2020 et risque d'avoir des effets partiels sur les interactions écologiques. Il n'est manifestement pas encore actif pour l'étude 2021. Son effet sera certainement plus visible pour 2022.

5.3. Diversité végétale et invertébrés présents dans la parcelle

Toutes les essences semées dans la BF ne se sont pas développées de la même manière : la phacélie était l'espèce prédominante d'où une plus grande fréquentation par les arthropodes observés. L'ensemble phacélie et flore spontanée, du fait d'une production importante de nectar et de pollen, attire de nombreux pollinisateurs (abeilles, bourdons et syrphes), des ennemis naturels aussi bien généralistes (araignées) que spécialistes (futurs larves de syrphes) ainsi qu'une diversité d'invertébrés potentiellement proies alternatives (coléoptères, pucerons, etc.) pour les ennemis

naturels des pucerons et carpocapse. Toutefois, les BF situées dans les inter-rangs des AFR et des AFIR ont un développement quasiment nul comparé à celles situées dans les inter-rangs des AC. Cela peut être lié à un effet d'ombrage et/ou un phénomène d'allélopathie des noyers (notamment la libération d'un composé aromatique appelé juglone pouvant empêcher la croissance des plantes en contact avec les feuilles de noyer). Pour favoriser davantage les invertébrés sur l'ensemble de la parcelle et donc remédier à l'absence de pousses sous les noyers, il pourrait être intéressant de mettre en place une couverture végétale composée de plantes pouvant à la fois se développer à l'ombre et résister à la juglone comme les bugles (floraison de mai à juin), les pervenches (floraison de avril à juin), les iris (floraison de avril à juin), les narcisses (floraison de mai à juin), etc. (Russel, 2021).

Il est difficile de confirmer l'hypothèse traitant du fait que la diversité végétale installée au niveau des inter-rangs (BE et BF) favorise la diversité des invertébrés et plus particulièrement des auxiliaires et les services écosystémiques connexes. Les résultats obtenus sont un aperçu de la diversité d'invertébrés présents et sont largement influencés par les méthodes d'échantillonnages. Tout d'abord, l'identification des arthropodes directement sur le terrain sans prélèvements (dans les foyers de pucerons, dans les pommiers, dans les inter-rangs via les transects) a été réalisée en autonomie. Les connaissances entomologiques limitées de l'observateur associées au suivi d'arthropodes en perpétuels mouvements engendrent un risque d'erreur non-négligeable. Même si des photographies sont prises, leur qualité ne permet pas toujours l'identification (variations de la luminosité, effets d'ombrage, la taille des arthropodes, etc.). De plus, les assiettes colorées, méthode attractive et donc sélective, ne rendent pas compte de la diversité réelle des diptères et hyménoptères parasitoïdes présents sur la parcelle (Robert, 2021). Les pots Barber sont des pièges aléatoires peu performants pour déterminer l'abondance (les espèces plus petites et moins actives sont sous-représentées dans les échantillons) mais efficaces pour connaître la richesse spécifique (Robert et Tosser, 2015). Ces deux méthodes ayant été mises en place à une seule reprise limitent la quantité d'individus collectés. Il y a également un déséquilibre du nombre de pièges installés en fonction des différentes IAE, des traitements, etc. pouvant influencer la diversité et le nombre d'invertébrés récoltés et donc biaiser l'interprétation des résultats. Enfin, l'identification en laboratoire à la loupe binoculaire présente des limites liées à la conservation des insectes, aux connaissances entomologiques et à la chronophagie. Pour une étude plus précise des arthropodes peuplant la parcelle, il serait plus pertinent de faire un suivi des arthropodes de la mi-mars jusque début juillet avec un minimum de quatre sessions de piégeage sur cette période et il pourrait être envisagé de faire identifier les insectes collectés par des entomologistes.

5.4. Validité des modèles statistiques utilisés

Tout d'abord l'interprétation de la distinction significative/non-significative peut être critiquée. En effet, un seuil à 0.01 pour la valeur de p-value a été établi comme base de toutes les comparaisons réalisées alors que la majorité des articles scientifiques fixent ce seuil à 0.05. Ce choix a été fait dans le but de limiter au maximum le rejet d'une hypothèse significative ou bien la validation d'une hypothèse non-significative. Cependant, le fait qu'un effet soit désigné non-significatif au vue de la p-value obtenue ne signifie pas qu'il n'y a pas d'effet (Amrhein et *al.*, 2019). De plus, des Modèles Linéaires Généralisés à effets Mixtes (GLMM) auraient pu être réalisés en partant du principe que nos données ne sont pas indépendantes : un pommier avec un « défaut » de développement, etc. aurait davantage ou moins de pucerons dans les colonies ou de pousses infestées. Dans ce cas, toutes les observations réalisées sur ce pommier sont impactées. Les effectifs ou pourcentages observés dans ces pommiers sont plus semblables entre eux que ceux observés sur deux pommiers différents (Della Vedova, 2019). Enfin, la distribution de probabilité utilisée (soit Binomial, Quasibinomial, Poisson ou Quasipoisson) pourrait ne pas s'adapter à toutes les données.

5.5. Limites du dispositif expérimental en général

La mesure des effets possibles ou non du contexte agroforestier dans la régulation des bioagresseurs du pommier peut être limitée par le dispositif expérimental lui-même.

D'abord, les 45 pommiers sélectionnés pour les différents suivis peuvent ne pas être représentatifs de la parcelle. Il serait intéressant d'envisager un suivi sur les 150 pommiers disponibles mais cela supposerait de mobiliser plus d'une personne pour les observations. Egalement, les deux blocs pour le suivi des 45 pommiers ne présentent pas le même nombre de répétitions par modalité ce qui peut influencer une partie des résultats obtenus. Ensuite, l'échelle d'étude (distance entre les différents blocs et/ou les différentes modalités) est trop faible sur le site pour observer des différences liées aux modalités agroforestières ainsi que pour établir un lien de causalité entre une IAE et l'abondance d'un taxon. D'autant plus que les mesures portent sur des organismes vivants pouvant migrer sur de longues distances : les syrphes et coccinelles adultes ont par exemple un rayon de déplacement de l'ordre du kilomètre (Tosser, NA). Il est actuellement impossible de travailler à une échelle d'étude supérieur à celle du facteur bloc, or cela permettrait de nuancer les résultats.

Ensuite, le milieu environnant peu nuire à l'évaluation de l'effet du contexte agroforestier (Marshall et al., 2003 ; Holland et al., 2017). En effet, la flore est complexe et diversifiée à l'intérieur (bandes enherbées, bandes fleuries, etc.) et aux abords (haies, cours d'eau, etc.) de la parcelle. Elle fournit aux ennemis naturels diverses niches et ressources alternatives (pollen, nectar, proies alternatives, etc.) (Landis et al., 2000) pouvant potentiellement détourner les ennemis naturels des ravageurs des pommiers (Kozár et al., 1994 ; Koss et Snyder, 2005) ou augmenter la prédation intra-guilde (Straub et al., 2008) ; expliquant en partie le faible impact du contexte agroforestier sur les auxiliaires observés. La matrice paysagère est susceptible d'influencer les mécanismes de régulation biologique évalués à l'échelle parcellaire et de brouiller l'interprétation des résultats (Pelosi et al., 2010 ; Power, 2010). Pour vérifier ces hypothèses, davantage d'échantillonnages devraient être réalisés dans les IAE environnantes mais également au-delà de la parcelle A1.

Aussi, Duru et al. (2015) mentionnent une période de transition entre la mise en place de pratiques et/ou d'aménagements et l'atteinte d'un nouvel équilibre écologique, donc d'une stabilité des services écosystémiques. Le dispositif expérimental étudié étant composé de pommiers relativement jeunes (sixième année de plantation) et d'IAE récentes (première année de plantation), les résultats de l'étude pourraient, par conséquent, ne pas encore correspondre à un équilibre écologique. Une poursuite des études sur les années à venir permettrait de confirmer cette tendance.

Enfin, les facteurs impliqués dans la régulation biologique sont multiples et il est souvent difficile de déterminer la part de chacun dans la réduction des populations de ravageurs (Jaloux, 2011). L'étude n'étant pas réalisée dans un espace clos et contrôlé, cette régulation va varier en fonction des caractéristiques propres du site (Le Roux et al., 2008 ; Malézieux, 2012 ; Shennan, 2008). Différents facteurs vont affecter les organismes vivants et leur environnement : (i) facteurs abiotiques (rayonnement solaire, la température de l'air, l'eau, le vent, etc.) ; (ii) conditions biotiques associées à la cohabitation des micro-organismes, des animaux, des plantes ; (iii) facteurs environnementaux anthropiques (effet cumulatif des interventions humaines sur la parcelle, etc.).

5.6. Perspectives générales et communes aux suivis des deux ravageurs

D'abord, les principales interprétations présentées dans cette discussion ne se basent pas sur les données climatiques de la parcelle A1 concernée par l'étude mais sur celle d'une parcelle voisine A2 et peuvent donc ne pas être représentatives des conditions expérimentales. Mettre en place des capteurs de température et de rayonnement aux pieds de pommiers aux modalités agroforestières

différentes permettrait de récolter des informations précises sur les bouleversements microclimatiques liés à la proximité des noyers et pourrait renforcer les hypothèses établies.

Ensuite, d'autres facteurs peuvent être explorés et qui peuvent jouer un rôle clé dans le processus d'infestation. C'est le cas par exemple de l'architecture et de la vigueur du pommier (Simon, 2012). La présence de noyers aura des effets sur la température, l'hygrométrie, la concurrence pour la lumière et les éléments nutritifs, ces dernières pouvant être susceptibles d'influencer indirectement le développement des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels via un changement d'architecture et de croissance des fruitiers (Pitchers, 2021). On peut également supposer que les plantes soumises à des contraintes concurrentielles sont moins tolérantes/résistantes aux ravageurs (Schroth et al., 2000). Grechi et al. (2008) conclue que *Myzus persicae* (puceron vert du pêcher) attaque plus sévèrement les pêchers avec des proportions plus élevées de pousses en croissance. Egalement, les populations de *A. pomi* sont positivement corrélées avec la croissance et la longueur des pousses (Stoeckli et al., 2008). De même, les résultats issues du suivi de l'incidence du carpocapse moyennent aussi bien des données issues de pommiers présentant plus de 50 fruits comme des pommiers présentant moins de cinq fruits. Or, les populations de carpocapse peuvent, comme pour celles du puceron, être positivement corrélées avec la croissance et la longueur des pousses ou bien avec le nombre de fruits, etc. Il pourrait être intéressant d'intégrer une description plus précise de la dynamique de chaque pousse, de chaque inflorescence, de chaque fruit étudiés dans les pommiers (p. ex. le nombre total de pousses par pommiers, le nombre de feuilles en croissance par pousses, la surface foliaire cumulée, etc.).

De plus, les effets spatiaux à l'échelle des parcelles n'ont pas été pris en compte dans cette analyse, bien qu'ils ne doivent pas être négligés. En effet, un arbre avoisinant d'autres arbres infestés pourrait être plus enclin à avoir des proportions élevées de pousses infestées et vice-versa. De plus, le paysage peut entraîner des tendances spatiales dans la répartition des ravageurs et auxiliaires dans les parcelles, les haies en bordure pouvant influencer (de manière directe et indirecte) positivement les colonies de pucerons cendrés, le carpocapse ainsi que les populations d'ennemis naturels (Albert et al., 2017). Il pourrait donc être intéressant d'intégrer les distances entre pommiers et IAE, etc.

Enfin, il semblerait pertinent de reproduire les suivis réalisés dans la parcelle GAFAM dans des vergers aux caractéristiques différentes (vergers conventionnels, vergers moins diversifiés, etc.) mais situés à proximité. Cela permettrait d'avoir des comparaisons claires sur les dynamiques des ravageurs et auxiliaires entre différents systèmes de cultures et donnerait des résultats peut-être plus parlants pour un public de nature agricole (techniciens, agriculteurs, etc.). Toutefois, l'étude menée dans le cadre de ce stage est basée sur une parcelle de 0.18 ha composée d'un nombre relativement faible de pommiers (150 individus) avec des traitements contigus (0.06 ha par modalités agroforestières). Cette disposition s'avère éloignée de celle d'un système de verger traditionnel et pourrait ne pas recréer un environnement de verger pour les ravageurs et auxiliaires, empêchant des comparaisons représentatives.

Conclusion

Les suivis des dynamiques du puceron cendré (*D. plantaginea*), du puceron vert (*A. pomi*), du carpocapse (*C. pomonella*) et de leurs ennemis naturels sur la parcelle GAFAM, conduite en AB et bas intrants, visant à cultiver du pommier entre une strate haute (noyer à bois) et une strate basse (BE et BF), le tout entouré de haies, font ressortir différents résultats.

Tout d'abord, la dynamique de distribution des ennemis naturels n'est pas liée au contexte agroforestier mais dépend de la dynamique de distribution de leurs proies, ici les pucerons. Ensuite, la dynamique générale d'infestation des pucerons est rythmée par : (i) leur phase de migration ; (ii) l'action de prédation (coccinelles et syrphes) ; (iii) la hausse des températures de l'air. Cependant, un phénomène inverse de l'impact du contexte agroforestier sur la dispersion des colonies entre les deux pucerons est observé avec davantage de pousses infestées par *D. plantaginea* dans les pommiers en AC et AFIR et à l'inverse davantage de pousses infestées par *A. pomi* dans ceux en AFR. Il s'expliquerait par la formation d'un microclimat plus doux créé par les noyers dans les pommiers en AFR favorisant la prospection des *A. pomi* ailés des pommiers en AC vers les pommiers en AFR et la prospection des *D. plantaginea* aptères d'une pousse à l'autre des pommiers en AC. Toutefois, les pommiers en AC ont plus de pousses infestées par *D. plantaginea* mais moins d'individus par foyer. Les conditions microclimatiques plus douces apportées par les noyers (pommiers en AFR et AFIR) favoriseraient la reproduction de *D. plantaginea* dans les foyers. Or, *A. pomi* pouvant se reproduire à des températures plus importantes, sa dynamique au sein des foyers n'est pas impactée par le contexte agroforestier. Ainsi, la dynamique d'infestation des pucerons serait davantage liée à l'impact des noyers sur leurs préférences microclimatiques (effet direct de la proximité des noyers) plutôt qu'à l'impact des noyers sur leurs ennemis naturels et le contrôle biologique connexe (effet indirect de la proximité des noyers).

D'autre part, le contexte agroforestier n'influence pas significativement l'incidence de la première génération de *C. pomonella*. Mais, la proximité des noyers aurait tendance à défavoriser directement et/ou indirectement ses symptômes en début de première génération. Cela peut s'expliquer par : (i) une dispersion du carpocapse limitée par un effet barrière des noyers (effet direct) ; (ii) un microclimat plus doux créé par les noyers au niveau des pommiers en AFR défavorable à la ponte et donc au développement du carpocapse (effet direct) ; (iii) des auxiliaires positivement influencés par la proximité des noyers résultant en une meilleure régulation biologique de *C. pomonella* au niveau des pommiers en AFR (effet indirect). Le suivi de la deuxième génération compléterait ces résultats. Le cortège d'IAE, notamment la phacélie constitutive de la BF, est peuplé par une diversité d'invertébrés du fait des diverses ressources en nectar, pollen et proies alternatives. Mais, le rôle précis des IAE sur les auxiliaires et leur action de régulation biologique des ravageurs doit d'être approfondi.

Enfin, même si l'impact du contexte agroforestier et du cortège d'IAE sur les mécanismes de régulation biologique des principaux ravageurs du pommier n'est pas significatif ici, les résultats doivent être nuancés au regard du dispositif expérimental et de la méthodologie employée. Une comparaison à d'autres vergers, en intégrant une évaluation des symptômes et des rendements en fin de saison, agrandirait l'échelle d'étude et renforcerait les résultats obtenus et leur communication. L'architecture et la vigueur des pommiers, susceptibles d'influencer le développement des bioagresseurs et de leurs ennemis naturels, pourraient être explorées pour approfondir les suivis.

Ainsi, de nouvelles références locales reposant sur un système de production de fruits innovants, les pommiers en agroforesterie, sont émises. Ces dernières sont primordiales et doivent être mobilisées dans le cadre du plan Ecophyto2 EXPE dont l'objectif est de réduire voire abolir le recours aux pesticides. Pouvoir aboutir à des systèmes agroécologiques améliorant la durabilité à long terme d'une culture autant développée sur le territoire français s'avèrerait prometteur et initiateur.

Références bibliographiques

ACTA LES INSTITUTS TECHNOLOGIQUES AGRICOLES. (2019). Index acta biocontrôle. 3ème édition, Paris.

AGNELLO A., CHOUINARD G., FIRLEJ A., TURECHEK W., VANOOSTHUYSE F., VINCENT C. (2018). Guide d'identification – Maladies, ravageurs et organismes bénéfiques des arbres fruitiers. Traduction et adaptation de Tree Fruit Field Guide to Insect, Mite, and Disease Pests and Natural Enemies of Eastern North America. p. 40-46.

AGRESTE(a). (2020). FRUITS – Pomme. A sept mois de campagne 2019-2020, hausse des exportations françaises de pommes dans un contexte de rebond de la production **[en ligne]**. Synthèses conjoncturelles, n°356, 4 p. Disponible sur : <<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/SynFru20356/consyn356202005Pomme.pdf>> (consulté le : 16/03/2021).

AGRESTE(b). (2020). Pomme. En 2020, le recul de la production de pommes s'accompagne d'une hausse des prix **[en ligne]**. Conjoncture – Infos Rapides Fruits, n° 2020-143, 4 p. Disponible sur : <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Irafru20143/2020_143inforappommeV2.pdf> (consulté le : 29/05/2021).

AGRESTE. (2018). Apports de produits phytopharmaceutiques en arboriculture : nombre de traitements et indicateur de fréquence de traitements. Campagnes agricoles 2015 et 2012. Les Dossiers, n° 43, 1-27.

AHDB DEPARTMENT FOR ENVIRONMENTAL FOOD & RURAL AFFAIRS. (2021). Apple Best Practice Guide – Rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea* (Passerini)) **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://apples.ahdb.org.uk/rosy-apple-aphid/>> (consulté le : 02/07/2021).

ALBERT L., FRANCK P., GILLES Y., PLANTEGENEST M. (2017). Impact of Agroecological Infrastructures on the dynamics of *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae) and its Natural Enemies in Apple Orchards in northwestern France. *Environmental Entomology*, 46(3), 528–537.

ALBERT L., GILLES Y., PLANTEGENEST M., FRANCK P. (2016). Régulation naturelle du puceron cendré en verger cidricole : rôle des aménagements fleuris. Cahier technique de l'IFPC - Pomme à cidre, n°41.

ALIGNIER A., RAYMOND L., DECONCHAT M., MENOZZI P., MONTEIL C., SARTHOU J.P., VIALATTE A., OUIN A. (2014). The effect of semi-natural habitats on aphids and their natural enemies across spatial and temporal scales. *Biological Control*, 77, 76-82.

ALTIERI M.A. (1995). *Agroecology : The science of Sustainable Agriculture*. Westview Press, 433 p.

ALTIERI M.A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74, 19–31.

AMRHEIN V., GREENLAND S. et MCSHANE B. (2019). Scientists rise up against statistical significance. *Nature*, vol. 567, n° 7748, p. 305-307.

ANDRES C., COMO E., BEERLI A., SCHNEIDER M., RIST S., JACOBI J. (2016). Cocoa in Monoculture and Dynamic Agroforestry. E. Lichtfouse (ed.). *Sustainable Agriculture Reviews*, 19, 121-153.

ASSOCIATION FRANCAISE D'AGROFORESTERIE (2020). L'agroforesterie qu'est-ce que c'est ? [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.agroforesterie.fr/definition-agroforesterie.php>> (consulté le : 15/09/2021)

AUBERTOT J.N., BARBIER J.M., CARPENTIER A., GRIL J.J., GUICHARD L., LUCAS P., SAVARY S., SAVINI I., VOLTZ M. (2005). Pesticides, agriculture et environnement, Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA & Cemagref, France, 64 p.

AUXIMORE. (2014). Optimiser le contrôle biologique des bioagresseurs en systèmes de grandes cultures – La coccinelle. Chambre régionale d'agriculture de Picardie, 2 p.

BARRITT B.H. (1992). Intensive orchard management. Good Fruit Grower (Yakima, Washington, USA: Washington State Fruit Commission).

BEER J., BONNEMANN A., CHAVEZ W., FASSBENDER H.W., IMBACH A.C., MARTEL I. (1990). Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, vol 12, 3, 229-249 p.

BEN ISSA R. (2014). Etude de l'effet de plantes de service (PdS) sur l'installation d'une population du puceron *Myzus persicae* (Hemiptera Aphididae) : mise en évidence du rôle des composés organiques volatils (COV). *Agronomie*, Université d'Avignon, 202 p.

BIANCHI F.J.J.A., BOOIJ C.J.H., TSCHARNTKE T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings. Biological Science*, B273(1595), 1715–1727.

BISCHOFF A., POLLIER A., LAMARRE E., SALVADORI O., CORTESERO A. M., LE RALEC A., TRICAULT Y., Jaloux B. (2016). Effect of spontaneous field margin vegetation and surrounding landscape on Brassica oleracea crop herbivory. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 223, 135-143.

BLOMMERS L.H.M., HELSEN H.H.M., VAAL F.W.N.M. (2004). Life history data of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homopt.,Aphididae) on plantain and as migrant to apple. *Journal of Pest Science*, 77(3), 155–163.

BOIVIN T., SAUPHANOR B. (2017). Phénologie et optimisation de la protection contre le carpocapse des pommes. *Innovations Agronomiques*, 1, 23-31.

BOLLER E.F., HÄNI F., POEHLING H.M. (2004). Ecological infrastructures: ideabook on functional biodiversity at the farm level. Swiss Centre Agricultural Extension and Rural Development, *Environmental Science*, 211 p.

BONNEMAISON L. (1959). Le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea* Pass.) – Morphologie et biologie – Méthodes de lutte. In : Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Série C, *Epiphyties*, 10, p. 257-322.

BOTTO E., GLAZ P. (2009). Potential for controlling codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) in Argentina using the sterile insect technique and egg parasitoids. *Journal of Applied Entomology*, 134(3), 251–260.

BOUVIER J.C. (2004). Exposition et réponse de l'avifaune aux pratiques phytosanitaires en vergers : Possibilités de traduction en termes de bio indication et de transfert vers la profession agricole, Mémoire d'Ingénieur Diplômé par l'État, spécialité Agriculture, ENSA Montpellier, 62 p. + annexes.

- BOWIE M.H. (1999). Effects of distance from field edge on aphidophagous insects in a wheat crop and observations on trap design and placement. *International Journal of Pest Management*, 45, 69–73.
- BOYER F., ULRYCH R., SELLAM M., LEJEUNE V. (2017). Les auxiliaires des cultures – biologie, écologie, méthodes d'observation et intérêt agronomique. Acta Editions, 4ème édition, 264 p.
- BROWN S.K., MALONEY K.E. (2003). Genetic improvement of apple: breeding, markers, mapping and biotechnology. In Apples - Botany, Production and Uses, D.C. Ferree, and I.J. Warrington, eds. (Wallingford, Cambridge, UK: CABI Publishing), p.31–59.
- BRUNDTLAND G.H. (1987). Our Common Future. Report of the world commission on environment and development. Chapter 2, Part I, 41-43.
- BUGG R.L., WADDINGTON C. (1994). Using cover crops to manage arthropod pests of orchards: a review. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 50(1), 11-28.
- CAHENZLI F., SIGSGAARD L., DANIEL C., HERZ A., JAMAR L., KELDERER M., JACOBSEN S. T., KRUCZYNSKA D., MATRAY S., PORCEL M., SEKRECKA M., SWIERGIEL W., TASIN M., TELFSER J., PFIFFNER L. (2019). Perennial flower strips for pest control in organic apple orchards – A pan-European study. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 278, 43-53.
- CAPORALI F. (2010). Agroecology as a Transdisciplinary Science for a Sustainable Agriculture. *Biodiversity, biofuels, agroforestry and conservation agriculture*, pp.1-71.
- CAPOWIEZ Y. (2012). Performances agronomiques et environnementales en verger de pommiers : 8 années d'expérimentation système. *Journées Techniques Légumes & Cultures pérennes Biologiques*, Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), FRA, Avignon, France, 4 p.
- CARROLL D.P., HOYT S.C. (1984). Natural enemies and their effects on apple aphid., *Aphis pomi* DeGeer (Homoptera: Aphididae), colonies on young apple trees in Central Washington. *Environmental Entomology*, 13, 469-48.
- CASTEL L., PLESSIX S., GASPARIN C., WARLOP F., FOURRIE L., et al. (2019). Concevoir et expérimenter des vergers agroforestiers en Agriculture Biologique (VERTiCAL). *Innovations Agronomiques*, INRAE, 76, 273-289.
- CCLSITE. (2021). Oviphyt [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.cclsite.fr/index.php/mg-protection/huiles-insecticides/mg-pdp-insecticide-oviphyt>> (consulté le : 10/07/2021).
- CHANDER K., GOYAL S., NANDAL D.P., KAPOOR K.K. (1998). Soil organic matter, microbial biomass and enzyme activities in a tropical agroforestry system. *Biology and Fertility of Soils*, vol 27, 2, 168-172 p.
- CHAPLIN-KRAMER R., O'ROURKE M.E., BLITZER E.J., KREMEN C. (2011). A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*, 14, 922–932.
- CHARMILLOT P.J., PASQUIER D., SAUPHANOR B., BOUVIER J.C., OLIVIER, R. (1999). Carpopapse des pommes : premier cas de résistance au diflubenzuron en Suisse. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, 31, 129–132.
- CHEVASSUS-AU-LOUIS B. (2012). Biodiversité et développement durable : Les enjeux de la « recapitalisation haies ». *Annales des Mines, Responsabilité et environnement*, 68 (4), 15-20.
- CODRON J.M., JACQUET F., HABIB R., SAUPHANOR B. (2003). Bilan et perspectives environnementales de la filière arboriculture fruitière, in: Quae (Ed.), Les Dossiers de l'Environnement de l'INRA 23 : *Agriculture, territoire, environnement dans les politiques européennes*, 31–36.

- COLLINS K.L., BOATMAN N.D., WILCOX A., HOLLAND J.M., CHANEY K. (2002). Influence of beetle banks on cereal aphid predation in winter wheat. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 93, 337–350.
- CUYPERS L., DURIER M., EMONET E., LE BARS J., ROUGIER M. (2019). Projets lauréats des Appels à Projets 2017 & 2018 – DEPHY EXPE [en ligne]. Disponible sur : <https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2020-05/Nouveaux_Projets_EXPE2_2.pdf> (consulté le : 9 février 2021).
- DALIVAL(a). (NA). DALINETTE C.O.V. [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.dalival.com/pommes/dalinette/>> (consulté le : 09/09/2021).
- DALIVAL(b). (NA). Geneva® G202 C.O.V. [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.dalival.com/portegrefe/g202-c-o-v/>> (consulté le : 09/09/2021)
- DAMBREVILLE A., LAURI P.É., TROTTIER C., GUEDON Y., NORMAND F. (2013). Deciphering structural and temporal interplays during the architectural development of mango trees. *Journal of Experimental Botanique*, 64, 2467–2480.
- DAMOS P., COLOMAR L.-A. E., IORIATTI C. (2015). Integrated fruit production and pest management in Europe: the apple case study and how far we are from the original concept? *Insects*, 6, 626–657.
- DE BERARDINIS E., BARONIO P., BAUMGÄRTNER G. (1994). The effect of aphid (*Dysaphis plantaginea* Pass., Hom., Aphididae) feeding on apple fruit growth. *Ecological Modelling*, 72, 115–127.
- DEBRAS J.-F. (2007). Rôles fonctionnels des haies dans la régulation des ravageurs : Le cas du psylle *Cacopsylla pyri* L. dans les vergers du sud-est de la France. Thèse de doctorat de l'Université d'Avignon, *Sciences de la vie*, 239 p.
- DEBRAS J.-F., DUSSAUD A., RIEUX R., DUTOIT T. (2007). Recherche prospective sur le rôle « source » des haies en production fruitière intégrée. Le cas des perce-oreilles : *Forficula auricularia* L. et *Forficula pubescens* Gêné A prospective research on the hedgerow's 'source' function. *Comptes Rendus Biologie*, 330(9), 664-673.
- DEGUINE J. P., GLOANEC C., LAURENT P., RATNADASS A., AUBERTOT J.N. et coordinateurs. (2016). Protection agroécologique des cultures. Editions Quae, 288 p.
- DELLA VEDOVA. (2019). Introduction aux GLMM avec données de proportion [en ligne]. Disponible sur : <<https://delladata.fr/introduction-aux-glmm-avec-donnees-de-proportion/>> (consulté le : 30/08/2021).
- DELORME R., AUGÉ D., TOUTON P., VILLATTE F. (1997). Insecticide resistance in *Dysaphis plantaginea* in France. Fourth interantional conference on pests in agriculture, 6-7-8 january 1997, le Corum, Montpellier, France, Volume 1., 45-52 ; 6 ref.
- DEMESTIHAS C., PLENET D., GENARD M., RAYNAL C., LESCOURRET F. (2017). Ecosystem services in orchard. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37 (12), 21 p.
- DEN HERDER, M., MORENO, G., MOSQUERA-LOSADA R.M., PALMA J.H.N., SIDIROPOULOU A., SANTIAGO FREIJANES J.J., CROUS-DURAN J., PAULO J.A., TOMÉ M., PANTERA A., et al. (2017). Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 121–132.
- DENYS C., TSCHARNTKE T. (2002). Plant-insect communities and predator-prey ratios in field margin strips, adjacent crop fields, and fallows. *Oecologia*, 130, 315–324.

DUPRAZ C., LIAGRE F. (2008). *Agroforesterie – Des arbres et des cultures*. Paris, Editions France Agricole, 413 p.

DURU M., THEROND O., (2019). Agriculture et biodiversité : les services écosystémiques, une voie de réconciliation ? *Innovations Agronomiques*, INRAE, 75, pp.29-47.

DURU M., THEROND O., MARTIN G., MARTIN-CLOUAIRE R., MAGNE M. A., JUSTES E., JOURNET E. P., AUBERTOT J. N., SAVARY S., BERGEZ J. E., SARTHOU J. P. (2015). How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services : a review. *Agronomy of Sustainable Development*, 35, 1259-1281.

E-PHY.ANSES. (2021). OVISPRAY **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://ephy.anses.fr/ppp/ovispray>> (consulté le : 10/07/2021).

EPHYTIA(a). (2018). *Dysaphis plantaginea* (Passerini, 1860) **[en ligne]**. Portail de recherche INRAE. <<http://ephytia.inra.fr/fr/C/21750/Pomme-Dysaphis-plantaginea-puceron-cendre>> (consulté le : 01/03/2021).

EPHYTIA(b). (2016). *Aphis pomi* – Puceron vert du pommier **[en ligne]**. Portail de recherche INRAE. <<http://ephytia.inra.fr/fr/C/21751/Pomme-Aphis-pomi-puceron-vert-du-pommier>> (consulté le : 01/03/2021).

EPHYTIA(c). (2015). *Cydia pomonella* - Carpocapse des pommes et des poires **[en ligne]**. Portail de recherche INRAE. <<http://ephytia.inra.fr/fr/C/21751/Pomme-Aphis-pomi-puceron-vert-du-pommier>> (consulté le : 01/03/2021).

EPHYTIA(d). (2016). Fiche 2 – Lutte biologique par conservation **[en ligne]**. Portail de recherche INRAE. Disponible sur : <<http://ephytia.inra.fr/fr/C/21466/Guide-Eco-Fruits-Lutte-biologique-par-conservation>> (consulté le : 14/07/2021).

EPHYTIA(e). (2018). Carpocapse du prunier (*Cydia funebrana*) **[en ligne]**. Portail de recherche INRAE. Disponible sur : <<http://ephytia.inra.fr/fr/C/23748/Prunier-d-Ente-Carpocapse-du-prunier-Cydia-funebrana>> (consulté le : 27/08/2021).

FAO. (2018). Progress in apple production (million ton) and cultivation area (million ha) (a), and apple productivity (t ha⁻¹) (b) in total world from 1961 to 2016 **[en ligne]**. Disponible sur : <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>> ; for 'apple', 'all countries', 'all years', 'area harvested', 'production quantity' and 'yield' (consulté le : 29 mars 2018).

FRANCEAGRIMER. (2020). La pomme en 2019-2020 **[en ligne]**. Bilan de campagne. 6 p. Disponible sur : <https://rnm.franceagrimer.fr/bilan_campagne?pomme> (consulté le : 16/03/2021).

FRANK T., REICHHART B. (2004). Staphylinidae and Carabidae overwintering in wheat and sown wildflower areas of different age. *Bulletin of Entomological Research*, 94(3), 209–217.

GALERIE DU MONDE DES INSECTES. <<http://www.galerie-insecte.org/>> (consulté le : 15/07/2021).

GEVES. (2020). Qu'est-ce que l'agroforesterie **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://www.geves.fr/expertises-varietes-semences/especes-forestieres/lagroforesterie/>> (consulté le : 15/09/2021).

GOSME M., DUPRAZ C., DUFOUR L. (2016). Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle. 3rd European Agroforestry Conference – Montpellier, 23-25 May 2016, *Agroforestry and climate change* (oral), Abstract number 44, INRA, UMR 1230 SYSTEM, F-34000, 5 p.

- GRAF B., BAUMGÄRTNER J., DELUCCHI V. (1985). Life table statistics of three apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, *Rhopalosiphum insertum*, and *Aphis pomi* (Homoptera, Aphididae), at constant temperatures. *Journal of Applied Entomology*, Vol. 99, p. 285-294.
- GRANATSTEIN D., KIRBY E, OSTENSON H, WILLER H. (2016). Global situation for organic tree fruits. *Scientia Horticulturae*, 208, 3–12.
- GRECHI I., SAUGE M.H., SAUPHANOR B., HILGERT N., SENOUSSE R., LESOURRET F. (2008). How does winter pruning affect peach tree-Myzus persicae interactions? *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 128, 369-379.
- GRIFFITHS J.G.K., HOLLAND J.M., BAILEY A., THOMAS M.B. (2008). Efficacy and economics of shelter habitats for conservation biological control. *Biological Control*, 45(2), 200–209.
- GRUYS P. (1982). Hits and misses. The ecological approach to pest control in orchards. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 31(1), 70-87.
- GUENARD B. (2007). Mutualisme fourmis pucerons et guildes aphidiphage associée : le cas de la prédation furtive. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en biologie. 133 p.
- GUND N.A., WAGNER A., TIMM A.E., SCHULZE-BOPP S., JEHLE J.A., JOHANNESSEN J., REINEKE A. (2012). Genetic analysis of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) populations with different levels of sensitivity towards the *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV). *Genetica*, 140, 235–247.
- HATT S., BOERAEVE F., ARTRU S., DUFRENE M., FRANCIS F. (2018). Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulating services: An agroecological perspective. *Science of the Total Environment*, vol. 621, n° April, p. 600-611.
- HCERES HAUT CONSEIL DE L'ÉVALUATION DE LA RECHERCHE ET DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR. (2020). Résumé final de l'évaluation de l'Unité Agrosystèmes Biodiversifiés (UMR ABSys) [en ligne]. Campagne d'évaluation 2019-2020. Disponible sur : <<https://www.hceres.fr/sites/default/files/media/downloads/a2021-ev-0342222f-der-pur210019356-029600-rf.pdf>> (consulté le : 23/03/2021).
- HEIMPEL, G. E. AND JERVIS, M. A. (2005). Does floral nectar improve biological control by parasitoids?, In *Plant-Provided Food for Carnivorous Insects: A Protective Mutualism and Its Applications* (edited by Wacker, F. L., van Rijn, P. C. and Bruin, J.). Cambridge University Press, Cambridge. pp. 267–304.
- HERZOG F., BALAZS K., DENNIS P., FRIEDEL J., GEIJENDORFFER IR., JEANNERET P., KAINZ M., POINTÉREAU P. (2012). Biodiversity indicators for European farming systems. A guidebook, ART-Schriftenreihe 17. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich.
- HOLLAND J.M., JAMES L., STEVENSON D.R.W., KOR L., DOUMA J.C., CROWLEY L., SMITH B.M. (2017). Semi-natural habitats support biological control, pollination and soil conservation in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 37, n° 4, p. 23.
- HOUGH W.S. (1928). Relative resistance to arsenical poisoning of two codling moth strains. *Journal of Economic Entomology*, 21, 325–329.
- HULLE M., TURPEAU E., LECLANT F., RAHN M.J. (1998). Les pucerons des arbres fruitiers – Cycles biologiques et activités de vol. INRA, ACTA, 80 p.

INFLUENTIALPOINTS.COM.(a). (NA). *Dysaphis plantaginea* – Rosy apple aphid **[en ligne]**. Disponible sur : <https://influentialpoints.com/Gallery/Dysaphis_plantaginea_Rosy_apple_aphid.htm> (consulté le : 01/03/2021).

INFLUENTIALPOINTS.COM.(b). (NA). *Dysaphis plantaginea* – Rosy apple aphid **[en ligne]**. Disponible sur : <https://influentialpoints.com/Gallery/Aphis_pomi_green_apple_aphid.htm> (consulté le : 01/03/2021).

INRAE HYPPZ(a). (NA). *Dysaphis plantaginea* (Passerini) – Puceron cendré du pommier **[en ligne]**. Base de données encyclopédique. Résultat du travail de P. Fraval assisté d'E. Fèvre, R. Coutin, C. Minost et V. Laporte (INRA), F.A. Ilharco, F. Neves Evaristo et J.C. Silva Dias (MA Lisbonne), de C. Knobloch et M. Carrascal (TUM Munich) et des zoologistes et agronomes de l'INRA, de l'ENSAM et de l'ORSTOM, sollicités pour relire, compléter et valider les fiches. Disponible sur : <<http://www7.inra.fr/hyppz/RAVAGEUR/3dyspla.htm>> (consulté le : 01/03/2021).

INRAE HYPPZ(b). (NA). *Aphis pomi* de Geer – Puceron vert non migrant du pommier **[en ligne]**. Base de données encyclopédique. Résultat du travail de P. Fraval assisté d'E. Fèvre, R. Coutin, C. Minost et V. Laporte (INRA), F.A. Ilharco, F. Neves Evaristo et J.C. Silva Dias (MA Lisbonne), de C. Knobloch et M. Carrascal (TUM Munich) et des zoologistes et agronomes de l'INRA, de l'ENSAM et de l'ORSTOM, sollicités pour relire, compléter et valider les fiches. Disponible sur : <<http://www7.inrae.fr/hyppz/RAVAGEUR/3aphpom.htm>> (consulté le : 01/03/2021).

INRAE HYPPZ(c). (NA). *Cydia pomonella* (L.) – Carpocapse des pommes et des poires **[en ligne]**. Base de données encyclopédique. Résultat du travail de P. Fraval assisté d'E. Fèvre, R. Coutin, C. Minost et V. Laporte (INRA), F.A. Ilharco, F. Neves Evaristo et J.C. Silva Dias (MA Lisbonne), de C. Knobloch et M. Carrascal (TUM Munich) et des zoologistes et agronomes de l'INRA, de l'ENSAM et de l'ORSTOM, sollicités pour relire, compléter et valider les fiches. Disponible sur : <<http://www7.inra.fr/hyppz/RAVAGEUR/3cydpom.htm>> (consulté le : 01/03/2021).

INSPECTION.CANADA.CA. (2014). La biologie du *Malus domestica* Borkh. (pommier commun) **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://inspection.canada.ca/varietes-vegetales/vegetaux-a-caracteres-nouveaux/demandeurs/directive-94-08/documents-sur-la-biologie/malus-domestica/fra/1404417088821/1404417158789?chap=2>> (consulté le : 28/06/2021).

INSTITUT FRANÇAIS DES PRODUCTIONS CIDRICOLES IFPC. (2009). Le cahier technique de l'IFPC – Le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*), situation et lutte biologique possible en verger cidricole biologique. *Pomme à cidre*, 22, 14-17.

IORIATTI C., TASIN M., CHARMILLOT P. J., REYES M., SAUPHANOR B. (2007). Early detection of resistance to tebufenozide in field populations of *Cydia pomonella* L.: methods and mechanisms. *Journal of Applied Entomology*, 131, 453–459.

IRIIS PHYTOPROTECTION. (2021). Carpocapse de la pomme – Codling moth **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/Insecte?imageId=4226>> (Consulté le : 10/07/2021).

JOSE S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1–10.

JOSSO C., LE RALEC A., RAYMOND L., SAULAIS J. (2013). Effects of fields and landscape variables on crop colonization and biological control of the cabbage root fly *Delia radicum*. *Landscape Ecology*, 28(9), 1697-1715.

- KENNEDY J.S., DAY M.F., EASTOP V.F. (1962). A Conspectus of Aphids as vectors of plant viruses. London Comm. *Inst. Entomology*, 1, 114 p.
- KIENZLE, J., AND KELDERER, M. (2017). Growing organic apples in Europe. In *Achieving Sustainable Cultivation of Apple*, K. Evans, ed. (Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing), p.551–578.
- KOSS A. M., SNYDER, W. E. (2005). Alternative prey disrupt biocontrol by a guild of generalist predators. *Biological Control*, vol. 32, n° 2, p. 243-251.
- KOZÁR F., BROWN M. W., LIGHTNER, G. (1994). Spatial distribution of homopteran pests and beneficial insects in an orchard and its connection with ecological plant protection. *Journal of Applied Entomology*, vol. 117, n° 1-5, p. 519-529.
- LANDIS D. A., WRATTEN S. D., GURR G. M. (2000). Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45, 175-201.
- LAUBERTIE E.A., WRATTEN S.D., MAGRO A., HEMPTINNE J.L. (2016). The behaviour of hoverfly larvae (Diptera, Syrphidae) lessens the effects of floral subsidy in agricultural landscapes. *Biology*, bioRxiv, 22 p.
- LAURI P. E., PITCHERS B., DUFOUR L., SIMON S. (2020). Apple farming systems – Current initiatives and some prospective views on how to improve sustainability. *Acta Horticulturae*, 1281, 307-321.
- LAURI P. E., SIMON S. (2019). Advances and challenges in sustainable apple cultivation. Chapter taken from: Lang G. A. (ed.), *Achieving sustainable cultivation of temperate zone tree fruits and berries Volume 2 : Case studies*, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, 261-288.
- LAURI P.E. (2021). Site Restinclières – ALTO [en ligne]. Disponible sur : <<https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/site-restinclières-alto>> (consulté le : 21/07/2021).
- LAURI, P.E., BARKAOUI, K., ATER, M., ROSATI, A. (2019). Agroforestry for fruit trees in the temperate Europe and dry Mediterranean. *Agroforestry for Sustainable Agriculture*, M. Mosquera-Losada, and R. Prabhu, eds. (Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing Limited).
- LAVANDERO B., WRATTEN S., SHISHEHBOR P., WORNER S. (2005). Enhancing the effectiveness of the parasitoid *Diadegma semiclausum* (Helen): Movement after use of nectar in the field. *Biological Control*, 34, 152–158.
- LE ROUX X., BARBAULT R, BAUDRY J., BUREL F., DOUSSAN I., GARNIER E., HERZOG F., LAVOREL S., LIFRAN R., ROGERESTRADE J., SARTHOU J. P., TROMMETTER M. (2008). Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France).
- LECLANT F. (2000). Les pucerons des plantes cultivées Clefs d'identification – III – Cultures fruitières. INRA Editions. 128 p.
- LETOURNEAU D.K., ARMBRECHT I., RIVERA B.S., LERMA J.M., CARMONA E.J., DAZA M.C., et al. (2011). Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological Applications*, 21, pp. 9-21.
- LÖVEI G. L., FERRANTE M. (2017). A review of the sentinel prey method as a way of quantifying invertebrate predation under field conditions. *Insect science*, 24(4), 528-542.
- LOVELL, S.T., DUPRAZ, C., GOLD, M., JOSE, S., REVORD, R., STANEK, E., AND WOLZ, K. (2018). Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems*, 92(5), 1397– 1415.

- LUBY J. J. (2003). Taxonomic classification and brief history. Pages 1-14 in D. C. Ferree, I. J. Warrington, eds. *Apples: Botany, production and uses*. CABI International, Cambridge, UK.
- MALEZIEUX E. (2012). Designing cropping systems from nature. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 15–29.
- MALEZIEUX E., REBOUD X. (2015). Vers une agroécologie biodiverse : enjeux et principaux concepts mobilisés. *Innovations Agronomiques*, INRAE, 43, pp.1-6.
- MARC P. (2004). ADALIA : Dossier technique n°2 - Juin 2004.
- MARCHETTI E., CIVOLANI S., LEIS M., CHICCA M., TJALLINGII W.F., PASQUALINI E., BARONIO P. (2009). Tissue location of resistance in apple to the rosy apple aphid established by electrical penetration graphs. *Bulletin of Insectology*, 62(2), 203-208.
- MARKO V., KERESZTES B., FOUNTAIN M.T., CROSS J.V. (2009). Prey availability, pesticides and the abundance of orchard spider communities. *Biological control*, 48(2), 115-124.
- MARSHALL E. J. P., BROWN V. K., BOATMAN N. D., LUTMAN P. J. W., SQUIRE G. R., WARD L. K. (2003). The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research*, vol. 43, n° 2, p. 77-89.
- MICHAELIDES G., SFENTHOURAKIS S., PITSILLOU M., SERAPHIDES N., 2018. Functional response and multiple predator effects of two generalist predators preying on *Tuta absoluta* eggs: Multiple predator responses on South American tomato pinworm. *Pest Management Science*, 74, 332–339.
- MIGLIORINI P., WEZEL A. (2017). Converging and diverging principles and practices of organic agriculture regulations and agroecology. A review. *Agronomy for sustainable development*, 37(6), 63.
- MILICZKY E. R., HORTON D.R. (2005). Densities of beneficial arthropods within pear and apple orchards affected by distance from adjacent native habitat and association of natural enemies with extra-orchard host plants. *Biological Control*, 33, 249–259.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC. 155 p.
- MILLS N.J. (2005). Selecting effective parasitoids for biological control introductions:codling moth as a case study. *Biological Control*, 34, 274–282.
- MIÑARRO M., FERNENDEZ-MATA G., MEDINA P. (2010). Role of ants in structuring the aphid community on apple. *Ecological Entomology*, 35, 206-215.
- MIÑARRO M., PRIDA E. (2013). Hedgerows surrounding organic apple orchards in north-west Spain: potential to conserve beneficial insects. *Agricultural and Forest Entomology*, 15: 382–390.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION. (2019). Pomme de reinette et pomme d'api... **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://agriculture.gouv.fr/pomme-de-reinette-et-pomme-dapi>> (consulté le : 29/05/2021).
- NAAUM A. M., FOOTTIT R. G., MAW H. E. L., HANNER R. (2012). Differentiation between *Aphis pomi* and *Aphis spiraecola* using multiplex real-time PCR based on DNA barcode sequences: Differentiation between *Aphis pomi* and *Aphis spiraecola*. *Journal of Applied Entomology*, Vol. 136, n° 9, p. 704-710.

- NAGY C., CROSS J.V., MARKO V. (2013). Sugar feeding of the common black ant, *Lasius niger* (L.), as a possible indirect method for reducing aphid populations on apple by disturbing ant-aphid mutualism. *Biological Control*, 65(1), 24-36.
- NAGY C., CROSS J.V., MARKO V. (2015). Can artificial nectaries outcompete aphids in ant-aphid mutualism? Applying artificial sugar sources for ants to support better biological control of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini in apple orchards. *Crop Protection*, 77, 127-138.
- NAIR P.K.R. Classification of agroforestry systems. (1985). *Agroforestry Systems*, 3, 97-128.
- NAUDET PEPINIERES. (NA). Noyer hybride (Juglans x Regia x Nigra). Disponible sur : <<https://www.pepinieres-naudet.com/boutique/arbres-forestiers/159-noyer-hybride-juglans-x-regia-x-nigra-3546868964322.html#:~:text=Histoire%20et%20usage.%20Le%20noyer%20hybride%20est%20utilis%C3%A9,souvent%20utilis%C3%A9%20en%20agroforesterie%20avec%20d%27autres%20feuillus%20pr%C3%A9cieux>> (consulté le : 10/09/2021).
- NICHOLLS C. I., PARRELLA M., ALTIERI M. A. (2001). The effect of a vegetational corridor on the abundance and dispersal of insect biodiversity within a northern California organic vineyard. *Landscape Ecology*, 16, 133-146.
- NICOLAS A., DAGBERT T., LE GOFF G., HANCE T. (2013). La lutte biologique contre le puceron cendré du pommier par des lâchers d'auxiliaires en verger [en ligne]. Disponible sur : <http://www.proverbio-interreg.eu/images/medias/puceron_reduit.pdf> (consulté le : 05/03/2021).
- OBSERVATOIRE AGRICOLE DE LA BIODIVERSITE. (2013). Guide de terrain – A l'attention des animateurs et observateurs – Transects Papillons, p. 30-34.
- OILB/SROP. (1997). Guidelines for integrated production of stone fruits in Europe. *Bulletin OILB/SROP*, 20(3), 11-20.
- PALMA J.H.N., GRAVES A.R., BUNCE R.G.H., BURGESS P.J., FILIPPI R., DE KEESMAN K.J., VAN KEULEN H., LIAGRE F., MAYUS M., MORENO G., REISNER Y., HERZOG F. (2007). Modelling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture Ecosystem & Environment*, vol 119, 6-12 p.
- PELOSI G., GOULARD M., BALENT G. (2010). The spatial scale mismatch between ecological processes and agricultural management: do difficulties come from underlying theoretical frameworks? *Agriculture Ecosystem & Environment*, 139, 455–462.
- PIFFNER L., SCHÄRER G.J., LUKA H. (2013). Functional biodiversity to improve pest control in organic cropping systems. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 78, 215–222.
- PISSONNIER S., LAVIGNE C., TOUBON J.-F., LE GAL P.-Y. (2016). Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level. *Crop Protection*, 88, 109-117.
- PITCHERS B. (2021). Architecture and fruiting of apple tree in agroforestry – linking architectural development, flowering and xylem flow. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'institut agro : montpellier supagro. Ecologie fonctionnelle et sciences agronomiques école doctorale gaia. Portée par l'umr absys cirad – inrae – iamm – montpellier supagro. 214 p.
- POWER A.G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Phil. Trans R Soc B* 365:2959–2971.

- PRETTY J. (2008). Agricultural Sustainability: Concepts, Principles and Evidence. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, 363(1491), 447–465.
- PUMARIÑO L., WELDESEMAYAT SILESHI G., GRIPENBERG S., KAARTINEN R., BARRIOS E., NYAWIRA MUCHANE M., MIDEGA C., JONSSON M. (2015). Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, 16(7), 573-592.
- QUBBAJ T., REINEKE A., 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*, Vol. 115, n° 1, p. 145-152.
- RICARD J. M., GARCIN A., JAY M., MANDRIN J. F. et collaborateurs. (2012). Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière. CTIFL. 471 p.
- RICCI C., PONTI L., PIRES A. (2005). Migratory flight and pre-diapause feeding of *Coccinella septempunctata* (Coleoptera) adults in agricultural and mountain ecosystems of Central Italy. *European Journal of Endocrinology*, 102, 531–538.
- RIEGER M. (2006). Introduction to Fruit Crops (1st ed.). *Food Products Press*, Binghamton, 520 p.
- RIEUX R. (1994). Et si l'on pouvait aménager l'environnement végétal des cultures pour manipuler les auxiliaires ? *Fruit belge*, 447, 9-16.
- RITCHER R., LEISSO R., MENDREY K., MILLER Z. (2021). Backyard Guide to Codling Moth Management **[en ligne]**. MSU Montana State University Extension. Disponible sur : <<https://apps.msuextension.org/montguide/guide.html?sku=MT202106AG>> (consulté le : 02/07/2021).
- ROBERT C. (2021). La cuvette jaune, le piège incontournable pour détecter l'arrivée des ravageurs du colza **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://www.terresinovia.fr/-/la-cuvette-jaune-le-piege-incontournable-pour-detecter-l-arrivee-des-ravageurs-du-colza>> (consulté le : 13/09/2021).
- ROBERT C., TOSSER V. (2015). Auxiliaires rampants – Les bons comptes font les bons amis. Perspectives agricoles, n°422, 3 p.
- ROBINSON T.L. (2003). Apple-orchard planting systems. *Apples - Botany, Production and Uses*, D.C. Ferree, and I.J. Warrington, eds. (Wallingford, Cambridge, UK: CABI Publishing), p.345–407.
- RUSCH A., CHAPLIN-KRAMER R., GARDINER M.M., HAWRO V., HOLLAND J., LANDIS D., THIES C., TSCHARNTKE T., WEISSER W.W., WINQVIST C. (2016). Agricultural Landscape Simplification Reduces Natural Pest Control: A Quantitative Synthesis. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 221, 198–204.
- RUSCH A., VALANTIN-MORISON M., SARTHOU J. P. ROGER-ESTRADE J. (2010). Biological Control of Insect Pests in Agroecosystems : Effets of Crop Management, Farming Systems, and Seminal Habitats at the Landscape Scale : A Review. *Advances in Agronomy*, 109(6), 219-259.
- RUSSEL E. M. (2021). 132 juglone tolerant plants that can grow near black walnut trees **[en ligne]**. Disponible sur : <<https://www.gardeningchannel.com/juglone-tolerant-plants-grow-black-walnut/>> (consulté le : 30/08/2021).
- RUSSELL E. P. (1989). Enemies Hypothesis : A review of the Effect of Vegetational Diversity on Predatory Insects and Parasitoids. *Environmental Entomology*, 18(4), 590–599.
- SANCHEZ-BAYO F., WYCKHUYS K.A.G. (2019). Worldwide Decline of the Entomofauna: A Review of Its Drivers. *Biological Conservation*, 232, 8–27.

SARTHOU J. P. (2016). Infrastructure agroécologique : Définition. Dictionnaire d'Agroécologie [en ligne]. Disponible sur : <<https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/infrastructure-agroecologique-2/>> (consulté le : 14/07/2021).

SARTHOU J. P., BADOZ A., VAISSIERE B., CHEVALLIER A., RUSCH A. (2014). Local more than landscape parameters structure natural enemy communities during their overwintering in semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 194, 17-28.

SARTHOU J. P., OUIN A., ARRIGNON F., BARREAU G., BOUYJOU B. (2005). Landscape parameters explain the distribution and abundance of *Episyrphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). *European Journal of Entomology*, 102(3), 539–545.

SARTHOU J.P., SIMON S. (2018). Auxiliaires entomophages et contrôle des ravageurs : du paysage aux pratique de gestion. Colloque de ENSAT-INRA UMAR AGIR Toulouse et INRA UERI Gotheron, Services écosystémiques rendus par l'agroforesterie dans les territoires et exploitations agricoles.

SARTHOU J.P., SMITS N. (2006). Effet des systèmes agroforestiers sur l'écologie et la gestion des populations d'insectes ravageurs. Colloque du Groupe d'Etude de l'Arbre, Montpellier.

SAUPHANOR B., ALLEMOZ P., BERLING M., DELNATTE J., REYES M., TOUBON J.F. (2006). Carpopapse des pommes : cas de résistance au virus de la granulose en verger biologique. *Phytoma*, 590, 24- 27.

SAUPHANOR B., BENOIT M., BOUVIER J.C., PERRON G., FREMOND J.C. (1994). Un cas de résistance du carpopapse des pommes au diflubenzuron dans le sud-est de la France. *Phytoma*, 458, 46–49.

SAUPHANOR B., DIRWIMMER C., BOUTIN S., CHAUSSABEL A.-L., DUPONT N., FAURIEL J., GALLIA V., LAMBERT N., NAVARRO E., PARISI L., PLENET D., RICAUD V., SAGNES J.-L., SAUVAITRE D., SIMON S., SPEICH P., ZAVAGLI F. (2009). Analyse comparative de différents systèmes en arboriculture fruitière, *Ecophyto R&D : vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires*, Rapport d'Expertise Collective INRA, INRA Ed., Tome IV, 49 p.

SCHROTH G, KRAUSS U., GASPAROTTO L., DUARTE AGUILAR J.A. VOHLAND K. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 50(3), 199-241.

SHENNAN C. (2008). Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363(1492), 717–739.

SIMON S, CAPOWIEZ Y. (2010). Rosy apple aphid dynamics on apple in spring. *QuantiPest*, INRA, 2 p.

SIMON S. (2010). Evaluation of severity of rosy apple aphid infestation in spring. *Quantipest*, INRA, 2 p.

SIMON S., BOUVIER J. C., DEBRAS J.F., SAUPHANOR B. (2010). Biodiversity and pest management in orchard systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, SpringerVerlag/EDP Sciences/INRA, 2010, 30(1), 139-152.

SIMON S., LESUEUR-JANNOYER M, PLENET D, LAURI P.E., LE BELLEC F. (2017). Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. *European Journal of Agronomy*, 82, 320–330.

SIMON S., MOREL K., DURAND E., BREVALLE G., GIRARD T., LAURI P. E. (2012). Aphids at crossroads : when branch architecture alters aphid infestation patterns in the apple tree. *Trees - Structure and Function*, Springer Verlag, 26 (1), pp.273-282.

- SIMON S., SAUPHANOR B., DEFRANCE H., LAURI P.E. (2009). Manipulations des habitats du verger biologique et de son environnement pour le contrôle des bio-agresseurs. Des éléments pour la modulation des relations arbre-ravageurs-auxiliaires. *Innovations Agronomiques*, 4, 125-134.
- SMIRLE M., ZUROWSKI C.L., LOWERY T., FOOTIT R.G. (2010). Relationship of Insecticide Tolerance to Esterase Enzyme Activity in *Aphis pomi* and *Aphis Spiraecola* (Hemiptera : Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 103(2), 374-378.
- SNYDER W.E. (2019). Give predators a complement : Conserving natural biodiversity to improve biocontrol. *Biological control*, 135, 73-82.
- SNYDER W.E., SNYDER G.B., FINKE D.L., STRAUB C.S. (2006). Predator biodiversity strengthens herbivore suppression. *Ecology Letters*, 9, 789–796.
- SOLOMON G. (1981). Windbreaks as a source of orchard pests and predators. In: Thresh J.M. (Ed.), Pests, pathogens and vegetation: the role of weeds and wild plants in the ecology of crop pests and diseases. Pitman Books Ltd., London, p. 273-283.
- STADLER B., DIXON A. F. G. (2005). Ecology and Evolution of Aphid-Ant Interactions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 345-372.
- STAMPS W. T., LINIT M. J. (1998). Plant diversity and arthropod communities: Implications for temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 39, 73-89.
- STANG M., KLINKHAMER P.G.L., VAN DER MEIJDEN E. (2006). Size constraints and flower abundance determine the number of interactions in a plant – flower visitor web. *Oikos*, 112(1), 111–121.
- STATON T., WALTERS R., SMITH J., BREEZE T., GIRLING R. (2021). Management to Promote Flowering Understoreys Benefits Natural Enemy Diversity, Aphid Suppression and Income in an Agroforestry System. *Agronomy*, 11, 651, 17 p.
- STEWART-JONES A., POPE T. W., FITZGERALD J. D., POPPY G. M. (2008). The effect of ant attendance on the success of rosy apple aphid populations, natural enemy abundance and apple damage in orchards. *Agricultural and Forest Entomology*, 10, 37-43.
- STOECKLI S., MODY K., DOENR S. (2008). *Aphis pomi* (Hemiptera: Aphididae) population development, shoot characteristics, and antibiosis resistance in different apple genotypes. *Journal of Economic Entomology*, 101(4), 1341-1348.
- STRAUB C.S., FINKE, D.L., SNYDER W.E. (2008). Are the conservation of natural enemy biodiversity and biological control compatible goals? *Biological Control*, 45(2), 225-237.
- SUDARBO. (2012). Les pucerons du pommier et du poirier. Fiches techniques, 4 p.
- TAMAS N., DOJNOV B., MARGETIC A., VUJCIC M., ŠPIROVIC B., MILETIC N., STEVIC M., VUJCIC Z. (2015). Resistance to common organophosphate and carbamate insecticides in *Aphis pomi* (Hemiptera: Aphididae). *Fruits*, 70, 135–142.
- THIES C., STEFFAN-DEWENTER I., TSCHARNTKE T. (2003). Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales. *Oikos*, 101, 18-25.
- THOMAS C., CORTELLO J., LAVIGNE C. (2016). Evaluation du potentiel de régulation biologique en vergers à l'aide de « carte de prédation ». Plantes et systèmes de culture horticoles, INRA, Agroparc, Domaine Saint-Paul, 84814, Avignon cedex 9, France, 205-212.

- TILMAN, D., CASSMAN K.G., MATSON P.A., NAYLOR R., POLASKY S. (2002). Agricultural Sustainability and Intensive Production Practices. *Nature*, 418, 671–677.
- TORTOSA O.E., CARMONA A., MARTINEZ E., MANZANO P., GIARDINA M. (2014). Liberación y establecimiento de *Mastrus ridens* (Hymenoptera: Ichneumonidae) para el control de *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) en Mendoza Argentina. *Revista de la Sociedad Entomologica Argentina*, 73, 109-118.
- TOSSER V. (NA). Les syrphes, mieux les connaître pour favoriser leur présence dans les parcelles [**en ligne**]. Disponible sur : <<https://arena-auximore.fr/syrphes-mieux-les-connaître-pour-favoriser-leur-presence-dans-les-parcelles/>> (consulté le : 30/08/2021).
- TRILLOT M., MASSERON A., MATHIEU V., BERGOUGNOUX F., HUTIN C., LESPINASSE Y. et collaborateurs (2002). Le pommier. Monographie. CTIFL. 392 p.
- TSCHARNTKE T., BOMMARCO R., CLOUGH Y., O. CRIST T., KLEIJN D., RAND T. A., TYLIANAKIS J. M., VAN NOUHUYS S., VIDAL S. (2007). Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biological Control*, 43, 294-309.
- VERES A., PETIT S., CONORD C., LAVIGNE C. (2013). Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies ? A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 166, 110-117.
- VILLENAVE J., THIERRY D., AL MAMUN A., LODE T., RAT-MORRIS E. (2005). The pollens consumed by *Chrysoperla lucasina* and *Ch. affinis* (Neuroptera: Chrysopidae) in cabbage crop environment in western France. *Aphidophaga 9 Proceedings. European Journal of Entomology*, 102(3), 547-562.
- VILLENAVE-CHASSET J., LEBLOND S. (2019). Des bandes fleuries pour les auxiliaires dans les grandes cultures ? Oui mais lesquelles ? *Innovations Agronomiques*, INRA, 75, pp.137-151.
- VOGT, H., WEIGEL, A. (1999). Is it possible to enhance the biological control of aphids in an apple orchard with flowering strips? *Bulletin OILB/SROP*, 22, 39-46.
- VOUDOURIS C., SAUPHANOR B., FRANCK P., REYES, M., MAMURIS, Z., TSITSIPIS, J.A., VONTAS J., MARGARITOPOULOS, J.T. (2011). Insecticide resistance status of the codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) From Greece. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 100(3), 229–238.
- WAAGE J.K. (1991). Biodiversity as a Resource for Biological Control. In : Hawksworth DL (ed) *The Biodiversity of Microorganisms and Invertebrates : its role in sustainable agriculture*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 149-163.
- WAGNER D.L. (2020). Insect Declines in the Anthropocene. *Annual Review of Entomology*, 65, 457–480.
- WALDNER W. (1993). Rückblick und Vorschau auf die Bekämpfung des Apfelwicklers. *Obstbau-Weinbau*, 12, 355–357.
- WALGENBACH J. (2014). Codling moth [**en ligne**]. NC State Extension Publications. Disponible sur : <<https://content.ces.ncsu.edu/codling-moth>> (consulté le : 05/03/2021).
- WANNER H., GU H., HATTENDORF B., GÜNTHER D., DORN S. (2006). Using the stable isotope marker ⁴⁴Ca to study dispersal and host-foraging activity in parasitoids. *Journal of Applied Ecology*, 43(5), 1031–1039.
- WATSON et collaborateurs. (2005). Ecosystems and human well-being : a framework for assessment. *Millennium Ecosystem Assessment*. 266 p.

- WELCH K.D., HARWOOD J.D. (2014). Temporal dynamics of natural enemy–pest interactions in a changing environment. *Biological Control*, 75, 18–27
- WEZEL A., BELLON S., DORE T., FRANCIS C., VALLOD., DAVID C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 503-515.
- WEZEL A., CASAGRANDE M., CELETTE F., VIAN J.F., FERRER A., PEIGNE J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 1–20.
- WILKANIEC B., TRZCINSKI P. (1997). Effect of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homoptera; Aphididae), feeding on fruits of the Primula variety. *Progress in Plant Protection*, 37, 36–39.
- WINQVIST C, BENGTSSON J, AAVIK T, et al. (2011). Mixed effects of organic farming and landscape complexity on farmland biodiversity and biological control potential across Europe. *Journal of Applied Ecology*, 48, 570–579.
- WOLZ, K.J., AND DELUCIA, E.H. (2018). Alley cropping: global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 252, 61–68.
- WYSS E. (1995). The effects of weed strips on aphids and aphidophagous predators in an apple orchard. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 75(1), 43-49.
- ZHANG W., RICKETTS T.H., KREMEN C., CARNEY K., SWINTON S.M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64(2), 253–260.

Liste des annexes

Annexe 1 : Les principaux ravageurs du pommiers.....	78
Annexe 2 : Points clés de la Production Fruitière Intégrée (PFI), de l'Agriculture Biologique (AB) et de l'Agroécologie (AE).....	78
Annexe 3 : Principaux groupes d'arthropodes rencontrés dans les vergers et ayant au moins un représentant prédateur ou parasitoïde.....	79
Annexe 4 : Les trois types de lutte biologique.....	79
Annexe 5 : Lutte biologique par conservation.....	80
Annexe 6 : Les caractéristiques favorables à la biodiversité en arboriculture fruitière.....	80
Annexe 7 : Localisation du Domaine de Restinclières et des différentes parcelles d'expérimentation en agroforesterie qui le composent.....	80
Annexe 8 : Descriptif du Noyer Hybride (<i>Juglans nigra</i> x <i>Juglans regia</i> NG23).....	81
Annexe 9 : Fiche technique de la variété Dalinette C.O.V.....	81
Annexe 10 : Descriptif du porte-greffe Geneva® G202 C.O.V.....	81
Annexe 11 : Calendrier de réalisation des évaluations de l'incidence de <i>D. plantaginea</i> et <i>A. pomi</i> à l'échelle du pommier et au niveau de la pousse ainsi que du suivi du complexe d'ennemis naturel dans leurs colonies respectives.....	82
Annexe 12 : Cycle carpocapse sensible d'après le Modèle Inra – 2020/2021 – stations Aude, Hérault et Gard (% des éclosions).....	82
Annexe 13 : Somme des degrés jours (via somme de moyennes journalières) avec station climatique de la parcelle A2.....	82
Annexe 14 : Inventaire des différents taxons d'ennemis naturels considérés pour l'étude.....	83
Annexe 15 : Les ennemis naturels observés dans les foyers de pucerons.....	84
Annexe 16 : Conditions d'observation via la marche le long d'un transect linéaire.....	85
Annexe 17 : Plan d'échantillonnage pour les marches le long d'un transect linéaire.....	85
Annexe 18 : Plan d'échantillonnage pour les pots Barber.....	85
Annexe 19 : Plan d'échantillonnage pour les assiettes colorées.....	85
Annexe 20 : Récapitulatif des différentes variables étudiées dans le cadre de ce stage.....	86
Annexe 21 : Synthèse des modèles statistiques utilisés dans le cadre de ce stage.....	86
Annexe 22 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron cendré à l'échelle du pommier.....	88
Annexe 23 : Dynamique du pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré en fonction du traitement.....	88
Annexe 24 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique des proportions de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré.....	89
Annexe 25 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron cendré (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (toutes dates confondues).....	89
Annexe 26 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) en fonction du bloc.....	90
Annexe 27 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre de pucerons cendrés par foyer.....	90
Annexe 28 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron cendré (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (séparément par date).....	91
Annexe 29 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron vert à l'échelle du pommier (toutes dates confondues).....	92
Annexe 30 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique des proportions de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert.....	92
Annexe 31 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron vert (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (toutes dates confondues).....	93
Annexe 32 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) en fonction du traitement.....	93
Annexe 33 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre de pucerons verts par foyer.....	94
Annexe 34 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron vert (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (séparément par date).....	95
Annexe 35 : Boxplots suivi de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier (toutes dates confondues).....	96
Annexe 36 : Boxplots suivi de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	96
Annexe 37 : Boxplots suivis de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier au 17/06/2021.....	96
Annexe 38 : Boxplots suivis de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier au 05/07/2021.....	96
Annexe 39 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse (toutes dates confondues).....	97

Annexe 40 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	97
Annexe 41 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse au 07/05/2021.....	97
Annexe 42 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse au 04/06/2021.....	97
Annexe 43 : Boxplots suivi de la prédation des A. pisum (toutes dates confondues).....	98
Annexe 44 : Boxplots suivi de la prédation des A. pisum en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	98
Annexe 45 : Boxplots suivi de la prédation des A. pisum au 04/05/2021.....	98
Annexe 46 : Boxplot suivi de la prédation des A. pisum au 01/06/2021.....	98
Annexe 47 : Boxplots nombre d'auxiliaires (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons cendrés (toutes dates confondues).....	99
Annexe 48 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires (tous taxons et tous stades confondus) par foyer de pucerons cendrés en fonction du bloc.....	99
Annexe 49 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés.....	99
Annexe 50 : Boxplots suivi du nombre d'auxiliaires (tous stades confondus) par foyer de pucerons verts (toutes dates confondues).....	100
Annexe 51 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires (tous taxons et tous stades confondus) par foyer de pucerons verts en fonction du bloc.....	100
Annexe 52 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons verts.....	100
Annexe 53 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons cendrés (toutes variables explicatives confondues).....	101
Annexe 54 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons cendrés toutes dates confondues en fonction du traitement et du bloc.....	101
Annexe 55 : Somme du nombre d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons cendrés en fonction de la date (traitements et bloc confondus).....	102
Annexe 56 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons verts (toutes variables explicatives confondues).....	102
Annexe 57 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons verts toutes dates confondues en fonction du traitement et du bloc.....	103
Annexe 58 : Somme du nombre d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons vert en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	103
Annexe 59 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les pommiers (toutes variables explicatives confondues).....	104
Annexe 60 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les pommiers toutes dates confondues en fonction du traitement et du bloc.....	104
Annexe 61 : Somme du nombre d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les pommiers en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	105
Annexe 62 : Dynamique du nombre moyen de (A) coccinelles (tous stades confondus), (B) syrphes (tous stades confondus) et (C) fourmis dans les pommiers en fonction du bloc.....	105
Annexe 63 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les inter-rangs (BE et BF) via la marche le long d'un transect linéaire (toutes variables explicatives confondues).....	106
Annexe 64 : Somme du nombre d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les inter-rangs (BE et BF) via la marche le long d'un transect linéaire en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	106
Annexe 65 : Répartition en pourcentage des différentes plantes fréquentées par les arthropodes observés dans les inter-rangs via la marche le long d'un transect linéaire (toutes variables explicatives confondues).....	107
Annexe 66 : Somme du nombre d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) via la marche le long d'un transect linéaire en fonction des principales plantes fréquentées (toutes variables explicatives confondues).....	107
Annexe 67 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les assiettes colorées (toutes variables explicatives confondues).....	108
Annexe 68 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les assiettes colorées en fonction des blocs.....	108
Annexe 69 : Répartition du pourcentage d'invertébrés observés par taxon (tous stades confondus) dans les pots barber des inter-rangs (BE et BF) (toutes variables explicatives confondues).....	109
Annexe 70 : Répartition du pourcentage d'invertébrés observés (tous stades confondus) dans les pots barber en fonction des IAE.....	109
Annexe 71 : Températures moyennes, maximales et minimales journalières (avec station climatique de la parcelle A2).....	109

Annexes

Annexe 1 : Les principaux ravageurs du pommiers (Trillot et al., 2002)

	Ordre	Principaux	Secondaires
Acariens	Phytoptes		Phytoptes libres
	Tétranyques	Acarien rouge	
		Acarien jaune	
	Coléoptères		Hannetons Anthonomes Charançons Scolytes
Insectes	Dermaptères		Forficules
	Diptères		Mouche méditerranéenne
	Hémiptères	Puceron vert	Punaises
		Puceron cendré	Puceron vert migrant
		Puceron lanigère	Cochenilles
	Lépidoptères	Carpocapses	Tordeuses
		Mineuses	Cossus gâte-bois
		Sésie	Cheimatobie
		Zeuzère	Noctuelles
			Hyponomeute
	Thysanoptères		Thrips

Annexe 2 : Points clés de la Production Fruitière Intégrée (PFI), de l'Agriculture Biologique (AB) et de l'Agroécologie (AE)

PFI	<ul style="list-style-type: none"> - Interventions en fonction de nombreux paramètres tels que : contrôle visuel en verger, historique de la parcelle, informations techniques locales, prévisions météorologiques, modèles piégeages, etc. - Prise en compte des avertissements agricoles qui donnent les risques au niveau de la région, pour les adapter au niveau de son exploitation, parcelle par parcelle. - En cas d'intervention, choix du ou des produits en fonction de leurs actions secondaires sur la faune auxiliaire. - Utilisation alternée de matières actives à différents modes d'action est un facteur important pour limiter les risques de résistance (Trillot et al., 2002). - Privilégier les pesticides biorationnels exprimant une sélectivité à des stades de développement précis (p. ex., biopesticides et régulateurs de croissance des insectes) ; par des substances sémi-chimiques (p. ex., les phéromones sexuels) et par du contrôle biologique (à l'aide des ennemis naturels des ravageurs) (Damos et al., 2015).
AB	<ul style="list-style-type: none"> - En Europe, l'AB obéit à des spécifications qui définissent des techniques de production et de transformation précises (Migliorini et Wezel, 2017). - Une des principales différences entre la PFI et l'AB est que l'AB vise à gérer le système de vergers dans son ensemble en interdisant les intrants synthétiques et leurs dérivés et en utilisant des substances naturelles (composés organiques) et adoptant de méthodes alternatives telles que le désherbage mécanique et la mise en place de la lutte biologique.
AE	<ul style="list-style-type: none"> - Etudie les interactions entre les organismes (plantes et animaux sauvages ou domestiqués ainsi que les microorganismes du sol) au service de l'activité agricole (Wezel et al., 2009). - Vise à concevoir des agroécosystèmes qui s'appuient sur les services écosystémiques. Elle combine les connaissances de l'agronomie et de l'écologie à un ensemble défini de principes pour la gestion écologique des agroécosystèmes.

Annexe 3 : Principaux groupes d'arthropodes rencontrés dans les vergers et ayant au moins un représentant prédateur ou parasitoïde (d'après Trillot *et al.*, 2002 ; Ricard *et al.*, 2012 ; Boyer *et al.*, 2017 et inspiré de Masquin, 2020)

Classe	Ordre	Super-famille, famille ou sous famille	Nom commun	Fonction ou Type de régulation	Stade de régulation	Ravageurs(s) cible(s) & stade de la prédation	
						Puceron	Carpocapse
Insectes	Dermatères	Forficulidae	Forficule ou Pince-oreille	Prédateur / Ravageur	L + I *	Oui	C
	Neuroptères / Névrotères	Chrysopidae	Chrysope	Prédateur	L + (I)	Oui	O + L
		Hemerobiidae	Hémérobe	Prédateur	L + I	Oui	O + L
		Coniopterygidae	Conioptérygide	Prédateur	L + I	Oui	Non
	Hémiptères hétéroptères	Anthocoridae	Punaises prédatrices	Prédateur	L + I *	Oui	O
		Nabidae		Prédateur	L + I *	Oui	L
		Miridae		Prédateur	L + I *	Oui	L
	Coléoptères	Carabidae	Carabe	Prédateur (parasitoïde)	L + I	Oui	L
		Coccinellidae	Coccinelle	Prédateur	L + I	Oui	(L)
		Staphylinidae	Staphylin	Prédateur (parasitoïde)	L + I	Oui	L
		Cantharidae	Cantharide	Prédateur (partiellement)	L + I	Oui	Non
	Hyménoptères	Ichneumonidae	Hyménoptères parasitoïdes	Parasitoïde	L + I	Oui	O + L
		Braconidae		Parasitoïde	L + I	Oui	O + L
		Aphelinidae		Parasitoïde	L + I	Oui	O + L
		Bethylinae		Parasitoïde	L + I	Oui	O + L
		Trichogrammatidae		Parasitoïde	L + I	Oui	O + L
	Diptères	Syrphidae	Syrphe	Prédateur (partiellement)	L	Oui	(L)
Cecidomyiidae		Cécidomyie	Prédateur (partiellement)	L	Oui	Non	
Tachinidae		Tachinaire	Parasitoïde	L	Non	C	
Arachnides	Trombidiformes	Trombidiidae	Acariens	Ectoparasite Prédateur	Juv + A **	Oui	Non
	Araneae	Lycosidae	Araignées	Prédateur	Juv + A **	Oui	L + I
		Linyphiidae		Prédateur	Juv + A **	Oui	L + I
		Salticidae		Prédateur	Juv + A **	Oui	L + I
		Miturgidae		Prédateur	Juv + A **	Oui	L + I
		Aranéidae		Prédateur	Juv + A **	Oui	L + I
		Thomisidae		Prédateur	Juv + A **	Oui	L + I
		Philodromidae		Prédateur	Juv + A **	Oui	L + I
	Opilions	Cosmetidae	Faucheur	Prédateur	Juv + A **	Oui	Non
Myriapodes	Chilopode Diplopede	Polyxenida	Mille-pattes	Prédateur			

O : Stade œuf ; L : Stade larvaire ; I : Stade imagal ⁽¹⁾ ; (I) : Impact minime ; Juv : Juvénile ; A : Adulte

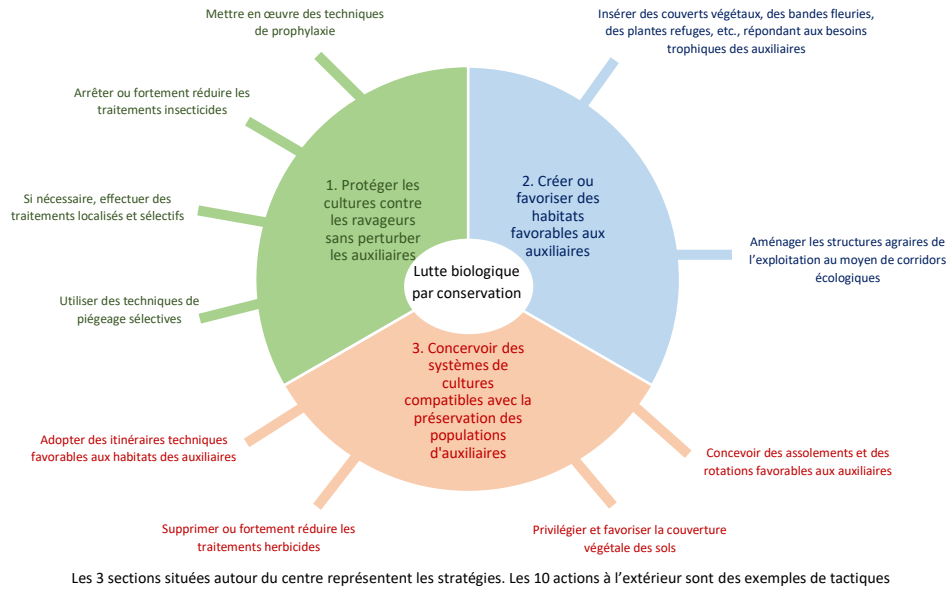
* : Les hémiptères et les dermatères ont un développement hétérométabole. En ce sens, il n'y a pas ou peu de différences entre le stade larvaire et le stade imagal.

** : Chez les arachnides, il n'y a pas ou peu de différences fonctionnelle importante entre les adultes et les juvéniles. Les arachnides ne grandissent pas mues successives.

Annexe 4 : Les trois types de lutte biologique (Simon *et al.*, 2010 ; Ricard *et al.*, 2012 ; Deguine *et al.*, 2016 ; Thomas *et al.*, 2016)

Lutte biologique dite « classique »	<ul style="list-style-type: none"> - Repose sur l'identification et la sélection d'auxiliaires indigènes et exotiques ainsi que leur introduction en vue de leur acclimatation. - Historiquement, de tels travaux ont été développés pour lutter contre des ravageurs exotiques, introduits malencontreusement dans une nouvelle aire géographique
La lutte par lâchers augmentatifs	<ul style="list-style-type: none"> - Repose sur le principe d'augmenter à un moment donné la population d'un auxiliaire naturellement présent dans une culture, mais qui se trouve au moment voulu en quantité insuffisante pour assurer à lui seule la suppression du ravageur concerné. - Se traduit, soit par des lâchers inoculatifs (pour reconstituer une population décimée), soit par des lâchers inondatifs (pour lutter temporairement contre un ravageur grâce à la surpopulation de l'auxiliaire introduit)
La lutte biologique par conservation	<ul style="list-style-type: none"> - S'attache à favoriser la présence, la préservation et l'efficacité des ennemis naturels contre les ravageurs, grâce à <ul style="list-style-type: none"> o la mise en œuvre de pratiques culturales favorables à ces populations d'auxiliaires naturellement présentes et potentiellement efficaces contre les bioagresseurs (traitements biologiques, raisonnement des applications, taille, etc.). o la gestion des habitats et donc des aménagements des cultures (diversification) et de leurs abords (zones non cultivées telles que haies, bandes fleuries, bandes enherbées, jachères...) en vue de fournir aux agents de biocontrôle, abris, nourriture et sites d'hivernation. Cela inclut aussi l'élimination ou la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires les plus toxiques.

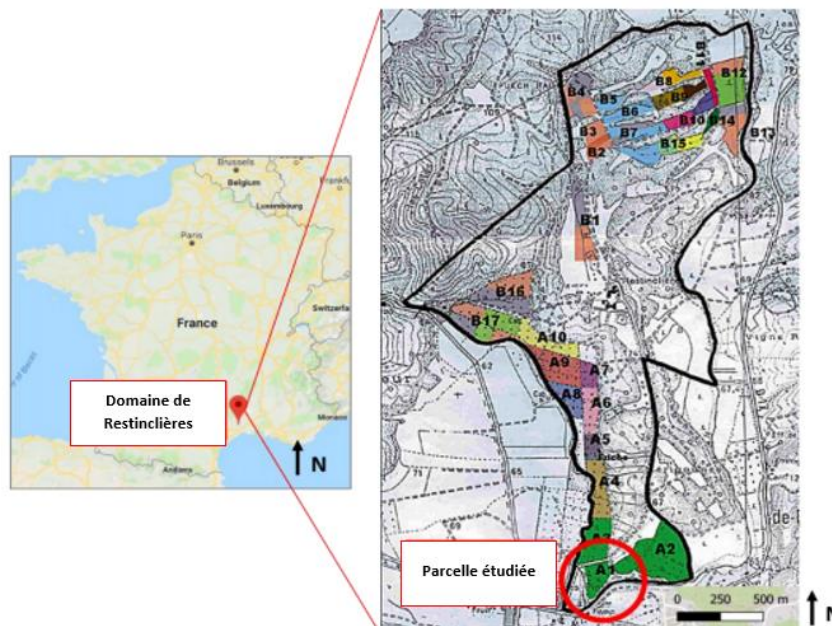
Annexe 5 : Lutte biologique par conservation (Deguine et al., 2016)



Annexe 6 : Les caractéristiques favorables à la biodiversité en arboriculture fruitière (Ricard et al., 2012 ; Simon et al., 2017).

Caractéristiques des vergers	Avantages apportés
La pérennité	Culture pérenne par définition, les systèmes arboricoles sont installés pour une ou plusieurs décennies, ce qui laisse du temps à l'évolution de la flore et de la faune. La matière organique peut s'accumuler, ce qui va favoriser les organismes détritatives, la vie microbienne du sol et l'établissement de réseaux trophiques.
La présence, quasi généralisée, d'une strate herbacée permanente, au moins dans les inter-rangs	Cet enherbement permanent, dont la composition floristique est le plus souvent constitué d'un mélange de graminées et de légumineuses, mais qui peut contenir des dicotylédones, est favorable à l'entomofaune et aux arthropodes du sol, comparativement à un sol nu. Lorsqu'elle est située en bordure de verger, la strate herbacée, qui reçoit alors moins de produits phytosanitaires, va pouvoir abriter une faune plus diversifiée et/ou abondante, et ce d'autant plus que sa gestion est extensive, car elle constitue alors un milieu interstitiel.
La présence d'une strate arborée	Elle crée un milieu complexe qui est favorable, p. ex., aux araignées vivant dans les frondaisons des arbres. On peut y retrouver des espèces communes aux haies et aux habitats forestiers.
La présence assez fréquente de haies	Installées en priorité dans les régions ventées pour leur effet brise-vent, les haies, lorsqu'elles sont mixtes et pluristratifiées contribuent en tant qu'habitats à héberger une faune diversifiée (insectes, petits mammifères et oiseaux), dont la richesse est liée à la qualité de leurs structures. Les haies peuvent former des corridors et assurer la connectivité entre des zones boisées.

Annexe 7 : Localisation du Domaine de Restinclières et des différentes parcelles d'expérimentation en agroforesterie qui le composent



Annexe 8 : Descriptif du Noyer Hybride (*Juglans nigra* x *Juglans regia* NG23) (Naudet Pépinières, NA)

Nom français	Noyer hybride
Nom latin	<i>Juglans regia nigra</i>
Famille	Juglandacées
Feuillage	Feuilles caduques et alternes d'un vert foncé
Description	Le noyer hybride est issu du croisement entre le noyer commun et le noyer noir. Sa croissance est très rapide.
Contraintes	Sols profonds et bien aérés avec une bonne alimentation en eau.
Températures mini	- 15°C
Histoire et usage	Le noyer hybride est utilisé pour la production de bois car il est de croissance très rapide. Il est souvent utilisé en agroforesterie avec d'autres feuillus précieux.
Hauteur adulte	30 m
Exposition	Ensoleillée à ombre légère

Annexe 9 : Fiche technique de la variété Dalinette C.O.V (Dalival(a), NA)

ORIGINE : hybride X4598 x X3174, France
- obtenteur : DL / INRA
- éditeur : DL

MATURITE : entre Braeburn et Fuji, 20 jours après Golden Delicious

CALIBRE :

FLORAISON : précoce (quelques jours avant Gala)

POLLINISATEURS :
- Goldrush® Coop 39, Idared
- Malus INRA Baugène®, Malus Golden Gem

TYPE D'ARBRE / FRUCTIFICATION :
port ouvert, buissonnant, type III (Golden Delicious)

VIGUEUR : faible


PRODUCTIVITE :
- productivité : très bonne
- mise à fruit : rapide
- sensibilité à l'alternance : non
- éclaircissage : à bien gérer, sinon petits calibres

SENSIBILITE / RESISTANCE :
- résistant à la tavelure (gène Vf)
- peu sensible au feu bactérien
- peu sensible à l'oïdium

FRUIT / CHAIR :
- fruit bicolore rouge lavé sur fond vert tournant
- légère rugosité pédonculaire
- fruit très ferme, acidulé et très sucré

CONSERVATION : très sucrée en sortie de frigo
- affinage nécessaire
- FN : février
- AC : juillet

UTILISATION :
- variété réservée à la vente à la ferme, sur les marchés et en culture biologique pour laquelle elle est très adaptée
- bonne variété pour le sud de la France



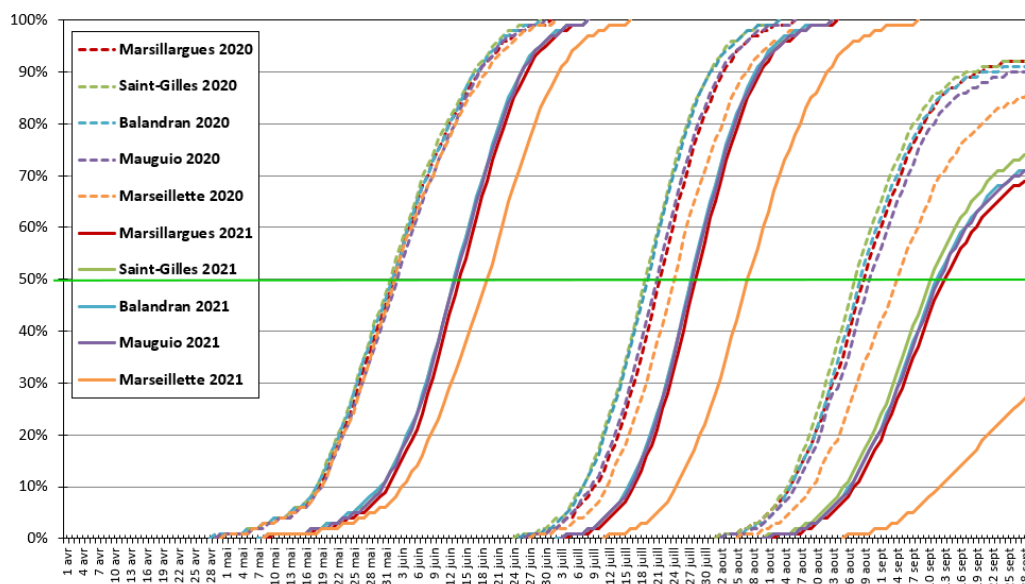
Annexe 10 : Descriptif du porte-greffe Geneva® G202 C.O.V (Dalival(b), NA)

Origine	M27 x Robusta 5, Cornell University, USA
Description	Porte-greffe de POMMIER Vigueur équivalente au M26 Production équivalente au M9
Caractéristiques	Tolérant au puceron lanigère, feu bactérien et phytophthora Peu sensible au froid Très bon comportement par rapport à la fatigue du sol Très bonne compatibilité. Mise à fruit rapide
Utilisations	A utiliser en remplacement du M26 notamment dans les zones sensibles au feu bactérien
Particularités	Malgré le fait que ce nouveau porte-greffe ait été expérimenté depuis un certain nombre d'années dans beaucoup de régions arboricoles dans le monde, il est encore relativement nouveau, les informations sont indicatives et pourront évoluer dans le futur selon les observations des années à venir.

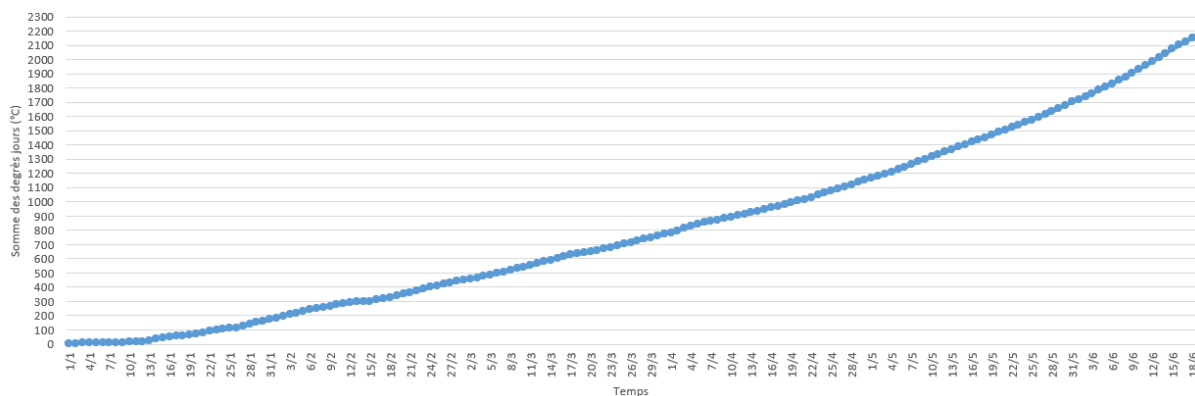
Annexe 11 : Calendrier de réalisation des évaluations de l'incidence de *D. plantaginea* et *A. pomi* à l'échelle du pommier et au niveau de la pousse ainsi que du suivi du complexe d'ennemis naturel dans leurs colonies respectives

Suivis de <i>D. plantaginea</i>		Suivis de <i>A. pomi</i>	
Date 1	25/03/2021		
Date 2	29/03/2021		
Date 3	02/04/2021		
Date 4	06/04/2021	Date 1	06/04/2021
Date 5	09/04/2021	Date 2	09/04/2021
Date 6	12/04/2021	Date 3	12/04/2021
Date 7	16/04/2021	Date 4	16/04/2021
Date 8	20/04/2021	Date 5	20/04/2021
Date 9	23/04/2021	Date 6	23/04/2021
Date 10	27/04/2021	Date 7	27/04/2021
Date 11	04/05/2021	Date 8	04/05/2021
Date 12	07/05/2021	Date 9	07/05/2021
Date 13	12/05/2021	Date 10	12/05/2021
Date 14	18/05/2021	Date 11	18/05/2021
Date 15	25/05/2021	Date 12	25/05/2021
Date 16	01/06/2021	Date 13	01/06/2021
Date 17	08/06/2021	Date 14	08/06/2021

Annexe 12 : Cycle carpopapse sensible d'après le Modèle Inra – 2020/2021 – stations Aude, Hérault et Gard (% des éclosions)




















Annexe 13 : Somme des degrés jours (via somme de moyennes journalières) avec station climatique de la parcelle A2



Annexe 14 : Inventaire des différents taxons d'ennemis naturels considérés pour l'étude

Classe	Ordre	Famille	Taxon	Groupe fonctionnel	Rôle 1	Groupe 1	Rôle 2		
Insecte	Coléoptère	Buprestidae	Argile du frêne	Argile du frêne	Coléoptère	Xylophage	Ravageur		
		Cantharidae	Cantharide	Cantharide	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
		Carabidae	Carabe	Carabe	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
		Cerambycidae	Coléoptère	Coléoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Cetonidae	Cétoine	Coléoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Chrysomelidae	Altise	Coléoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Coccinellidae	Coccinelle	Coléoptère prédateur	Auxiliaire	Prédateur	Aphidiphage		
		Curculionidae	Charançon	Coléoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Melyridae	Coléoptère	Coléoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Nitidulidae	Coléoptère	Coléoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Oedemeridae	Coléoptère	Coléoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Pyrochroidae	Cardinal	Coléoptère prédateur	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
		Staphylinidae	Staphylin	Staphylin	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
		Etc.							
		Diptère	Syrphidae	Syrphe	Syrphe	Auxiliaire	Prédateur	Aphidiphage	
			Tipulidae	Cousin	Cousin	Détritivore	Détritivore	Détritivore	
			Tachinidae	Tachinaire	Tachinaire	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde	
			Chloropidae	Petite mouche	Diptère	Neutre	Détritivore	Détritivore	
			Agromyzidae/sciomyzidae/ calliphoridae/sarcophagidae/etc.	Mouche	Diptère	Neutre	Détritivore	Détritivore	
			Xylophagidae/psilidae/megamerinidae/ bibionidae/spaeroceridae/etc.	Petite mouche	Diptère	Neutre	Détritivore	Détritivore	
			Cecidomyiidae	Cécidomyie	Cécidomyie	Auxiliaire	Prédateur	Aphidiphage	
			Chironomidae	Petite mouche	Diptère	Neutre	Détritivore	Détritivore	
	Empididae		Petite mouche	Diptère	Neutre	Prédateur	Spécialiste		
	Muscidae		Mouche d'automne	Diptère	Neutre	Détritivore	Détritivore		
	Phoridae		Petite mouche	Diptère	Détritivore	Détritivore	Détritivore		
	Sciaridae		Petite mouche	Diptère	Neutre	Détritivore	Détritivore		
	Etc.								
	Hémiptère/Hétéroptère		Anthracoridae	Anthoricide	Punaise prédatrice	Auxiliaire	Prédateur	Spécialiste	
			Cercopidae	Cercopidae	Cicadelle	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique	
			Cicadellidae	Cicadelle	Cicadelle	Phytophage	Herbivore	Ravageur occasionnel	
			Coreidae	Coreidae	Punaise phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur occasionnel	
			Miridae	Miride prédatrice	Punaise prédatrice	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Pentatomidae	Pentatomide	Punaise phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique	
			Pyrrhocoridae	Pyrrhocore	Punaise phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur occasionnel	
			Reduviidae	Punaise prédatrice	Punaise prédatrice	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Tingidae	Tigre du poirier	Punaise phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur occasionnel	
		Nabidae	Nabidae	Punaise prédatrice	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
		Etc.							
		Hyménoptère	Aphelinidae	Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Auxiliaire	Parasitoïde	
			Apoidea	Abeille	Abeille	Auxiliaire poll	Pollinisateur	Pollinisateur	
			Bourdon	Bourdon	Bourdon	Auxiliaire poll	Pollinisateur	Pollinisateur	
			Bethylidae	Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde	
	Braconidae		Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde		
	Chrysoidea		Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde		
	Figitidae		Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde		
	Formicidae		Fourmi	Fourmi	Fourmi	Fourmi	Fourmi		
	Ichneumonidae		Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde		
	Sapygidae		Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde		
	Tenthredinidae		Tenthrede	Hyménoptère phytophage	Phytophage	Herbivore	Ravageur occasionnel		
	Trichogrammatidae		Hyménoptère parasitoïde	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde		
	Vespidae		Guêpe commune	Guêpe	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
	Hyménoptère		Hyménoptère	Hyménoptère parasitoïde	Auxiliaire	Parasitoïde	Parasitoïde		
	Etc.								
	Dermaptère		Forficulidae	Forficule	Forficule	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
	Lépidoptère		Adelidae	Papillon	Papillon	Phytophage	Herbivore	Pollinisateur/Ravageur anecdotique	
			Papillon	Papillon	Papillon	Phytophage	Herbivore	Pollinisateur/Ravageur anecdotique	
	Etc.								
	Névroptère	Chrysopidae	Chrysope	Chrysope	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
		Hemeroptidae	Hémérobe	Hémérobe	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
		Etc.							
	Ephéméroptère	Ephemeridae	Ephemeridae	Ephémère	Phytophage	Phytophage	Détritivore		
	Orthoptère	Acrididae	Criquet	Criquet	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Tettigoniidae	Sauterelle	Sauterelle	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Gryllidae	Grillon	Grillon	Phytophage	Herbivore	Ravageur anecdotique		
		Etc.							
	Zygoptère	Libellule	Libellule	Libellule	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste		
	Trichoptère	Polycentropodidae	Trichoptère	Trichoptère	Phytophage	Herbivore	Ravageur		
	Homoptère	Aphididae	Puceron vert	Puceron	Phytophage	Herbivore	Ravageur		
			Puceron cendré	Puceron	Phytophage	Herbivore	Ravageur		
	Arachnide	Araneae	Araneidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Linyphiidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Lycosidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Salticidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Thomisidae	Araignée crabe	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Miturgidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Philodromidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Cosmetidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Gnaphosidae	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Araignée	Araignée	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste	
			Etc.						
			Opilion	Cosmetidae	Opilion	Araignée	Auxiliaire	Prédateur	Généraliste
			Acarien	Tetranychidae	Acarien	Acarien	Phytophage	Herbivore	Ravageur
			Collembola	Collembola	Collembola	Collembola	Neutre	Détritivore	Détritivore
		Crustacea	Cloporte	Cloporte	Cloporte	Détritivore	Détritivore	Décomposeur	
	Myriapode	Myriapode	Mille-pattes	Myriapode	Détritivore	Détritivore	Décomposeur		
	Mollusque	Gastéropode	Limace	Limace	Phytophage	Herbivore	Décomposeur		
			Escargot	Escargot	Escargot	Phytophage	Herbivore	Décomposeur	

Annexe 15 : Les ennemis naturels observés dans les foyers de pucerons

Ennemis naturels observés	Stade de développement			
	Œufs	Larves	Nymphes/Pupes	Adultes
Syrphes				
Coccinelles				
Chrysopes				
Hémérobes				
Hyménoptères parasitoïdes				 Ichneumonidae, Aphelinidae, etc.
Cantharides				
Forficules				
Araignées				 Salticidae, Linyphiidae, etc.

Annexe 16 : Conditions d'observation via la marche le long d'un transect linéaire (Observatoire Agricole de la Biodiversité, 2013)

Temps de parcours	10 voire 15 minutes, ce qui correspond à une distance d'environ 100 à 300 mètres, selon la richesse du milieu
Période d'observation	Entre 9h et 16h (possibilité de passer plus tôt ou plus tard en cas de très forte chaleur)
Ensoleillement	Privilégier des journées ensoleillées (présence d'une couverture nuageuse d'au maximum 75 %)
Température	Au moins 13°C par temps ensoleillé, au moins 17°C par temps nuageux (10 à 50 % de couverture)
Vent	Sans vent fort (inférieur à 30 km/h soit 5 sur l'échelle de Beaufort : les petites branches se plient et les poussières s'envolent)

Annexe 17 : Plan d'échantillonnage pour les marches le long d'un transect linéaire

Transect	Rang	Modalité	Bloc	Orientation
1	1	AC	1	Nord
2	1	AFIR	1	Nord
3	2	AC	1	Nord
4	2	AFR	1	Nord
5	3	AC	1	Nord
6	3	AFIR	1	Nord
7	4	AFR	2	Nord
8	5	AFIR	2	Nord
9	6	AC	2	Sud
10	7	AFIR	2	Sud
11	8	AFIR	2	Sud
12	9	AFR	2	Sud
13	10	AFIR	2	Sud

Annexe 18 : Plan d'échantillonnage pour les pots Barber

	Pot	Rang	Modalité	Bloc	IAE	Orientation Rang
Au cœur de la parcelle	1	1	AC	1	BE	Nord
	2	1	AFIR	1	BE	Nord
	3	2	AC	1	BF	Nord
	4	2	AFR	1	BE	Nord
	5	3	AC	1	BF	Nord
	6	3	AFIR	1	BF	Nord
	7	4	AFR	2	BF	Nord
	8	5	AFIR	2	BE	Nord
	9	6	AC	2	BE	Sud
	10	6	AC	2	BF	Sud
	11	7	AFIR	2	BF	Sud
	12	8	AFIR	2	BE	Sud
	13	9	AFR	2	BE	Sud
	14	9	AFR	2	BF	Sud
	15	10	AFIR	2	BF	Sud
Aux alentours de la parcelle	16				H1	
	17				H2	
	18				H3	
	19				H4	
	20				H5	
	21				H6	
	22				H7	
	23				TCR1 H6	
	24				TCR2 H3	
	25				TCR3 H4	

Annexe 19 : Plan d'échantillonnage pour les assiettes colorées

Cuvette	Couleur	Etage	Bloc
1	Jaune	Supérieur	1
2	Bleu		
3	Blanc		
4	Jaune	Inférieur	
5	Bleu		
6	Blanc		
7	Jaune	Supérieur	2
8	Bleu		
9	Blanc		
10	Jaune	Inférieur	
11	Bleu		
12	Blanc		
13	Jaune	Supérieur	
14	Bleu		
15	Blanc		
16	Jaune	Inférieur	
17	Bleu		
18	Blanc		

Annexe 20 : Récapitulatif des différentes variables étudiées dans le cadre de ce stage

Les variables potentiellement explicatives sont en orange et les variables à expliquer sont en vert

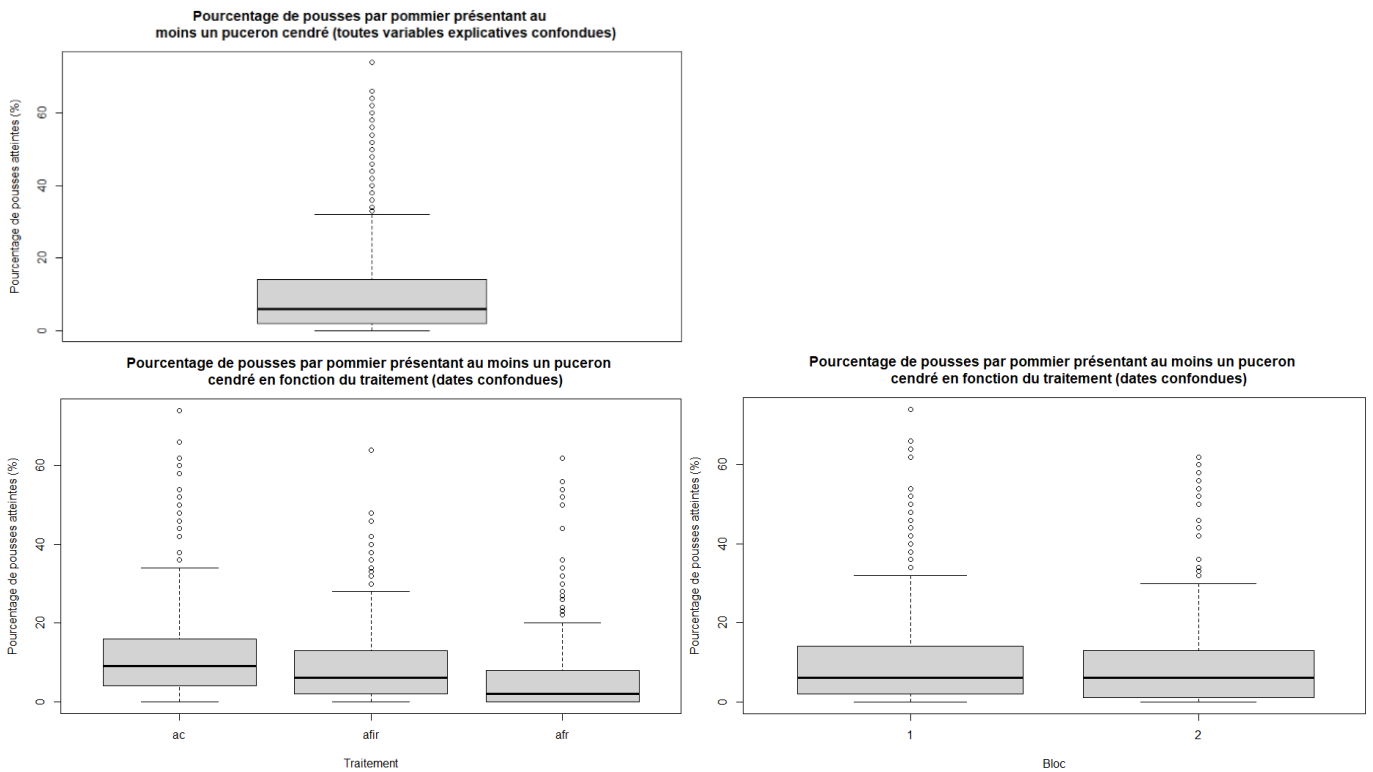
Variable	Unité	Contenu	Abréviation
Numéro de l'arbre	/	Chiffres de 1 à 148	apple_tree
Rang	/	Chiffres de 1 à 10	rang
Date	/	Date sous format jj/mm/aaaa	date date_observation
Traitement appliqué	/	ac,afir, afr	moda
Bloc	/	1, 2 ou 3	bloc
% d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse	%	Données chiffrées	%_inflo_carpo
Nombre d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse	/(comptage)	Données chiffrées	nb_tot_inflo_fruit_carpo
Nombre d'inflorescences par pommier avec aucun fruit présentant des symptômes de carpocapse	/(comptage)	Données chiffrées	nb_tot_inflo_fruit_intact
Taux de prédation des œufs de carpocapse	%	Données chiffrées	taux_preda
Nombre d'œufs de carpocapse initialement posés sur la carte de prédation	/(comptage)	Données chiffrées	nb_oeufs_carpo_ini
Nombre d'œufs de carpocapse restants après quatre journées de pose	/(comptage)	Données chiffrées	nb_oeufs_carpo_intacts
Présence de fruits avec symptômes de carpocapse sur le pommier	/	oui, non	presence_symptome
Taux de prédation du puceron	%	Données chiffrées	taux_preda
Nombre de pucerons aptères initialement posés sur la carte de prédation	/(comptage)	Données chiffrées	nb_puc_apteres_ini
Nombre de pucerons aptères restants après une journée de pose	/(comptage)	Données chiffrées	nb_pucerons_apteres_fin
Pourcentage de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré	%	Données chiffrées	pourcen_sev
Nombre de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré	/(comptage)	Données chiffrées	nb_pousses_pucerons_tot
Nombre de pousses par pommier ne présentant pas de pucerons cendrés	/(comptage)	Données chiffrées	nb_pousses_intacts
Pourcentage de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert	%	Données chiffrées	pourcen_sev
Nombre de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert	/(comptage)	Données chiffrées	nb_pousses_pucerons_tot
Nombre de pousses par pommier ne présentant pas de pucerons cendrés	/(comptage)	Données chiffrées	nb_pousses_intacts
Nombre de pucerons cendrés (tous stades confondus) par foyer	/(comptage)	Données chiffrées	pucerons_tot
Nombre de pucerons verts (tous stades confondus) par foyers	/(comptage)	Données chiffrées	pucerons_tot
Nombre d'auxiliaires (tous stades confondus) par foyer de pucerons cendrés	/(comptage)	Données chiffrées	nb_auxi_tot
Nombre d'auxiliaires (tous stades confondus) par foyer de pucerons verts	/(comptage)	Données chiffrées	nb_auxi_tot
Nombre d'auxiliaires (tous stades confondus) dans les pommiers	/(comptage)	Données chiffrées	nb_cocci_tot nb_syrphes_tot nb_fourmis_tot
Nombre d'arthropodes (tous stades confondus) dans les pommiers	/(comptage)	Données chiffrées	nb_observés
Nombre d'invertébrés observés dans les BF, BE, haies et TCR	/(comptage)	Données chiffrées	nb_observés

Annexe 21 : Synthèse des modèles statistiques utilisés dans le cadre de ce stage

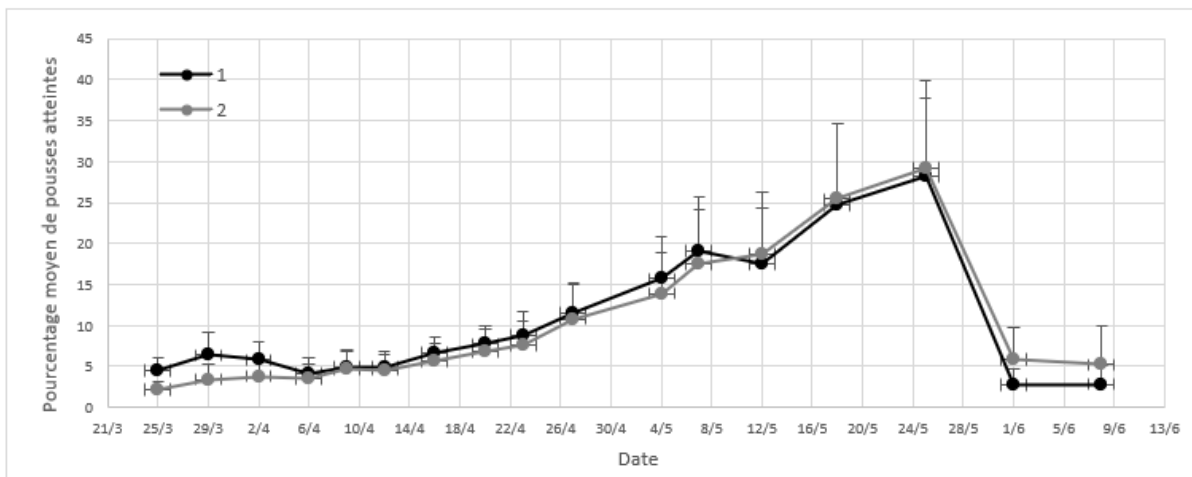
Variables étudiées			Equation du modèle
Incidence de <i>Dysaphis plantaginea</i> sur les pommiers	Incidence à l'échelle du pommier	Toutes dates confondues	Avec interactions : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{date_observation}:\text{moda} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family} = \text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PC})$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{date_observation}:\text{moda} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PC})$ Sans l'interaction date :traitement : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family} = \text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PC})$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PC})$
		Séparément par date	Avec interactions : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} * \text{bloc}, \text{family}=\text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PC_dateX})$ $\text{sev_PC_GLMQB_date17} <-$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} * \text{bloc}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PC_dateX})$ Sans interactions : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc}, \text{family}=\text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PC_dateX})$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PC_dateX})$
	Incidence à l'échelle de la pousse	Toutes dates confondues	Avec interactions : $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{date_observation}:\text{moda} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family} = \text{"poisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC})$ $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{date_observation}:\text{moda} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family} = \text{"quasipoisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC})$ Sans interactions : $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation}, \text{family} = \text{"poisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC})$ $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation}, \text{family} = \text{"quasipoisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC})$
		Séparément par date	Avec interactions : $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} * \text{bloc}, \text{family}=\text{"poisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC_dateX})$ $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} * \text{bloc}, \text{family}=\text{"quasipoisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC_dateX})$ Sans interactions : $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} + \text{bloc}, \text{family}=\text{"poisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC_dateX})$ $\text{glm}(\text{pucerons_tot} \sim \text{moda} + \text{bloc}, \text{family}=\text{"quasipoisson"}, \text{data}=\text{dyna_PC_dateX})$
Incidence de <i>Aphis pomi</i> sur les pommiers	Incidence à l'échelle du pommier	Toutes dates confondues	Avec interactions : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{date_observation}:\text{moda} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family} = \text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PV})$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{date_observation}:\text{moda} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PV})$ Sans interactions : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family} = \text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PV})$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc} + \text{date_observation} + \text{bloc}:\text{moda}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PV})$
		Séparément par date	Avec interactions : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} * \text{bloc}, \text{family}=\text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PV_dateX})$ $\text{sev_PC_GLMQB_date17} <-$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} * \text{bloc}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PV_dateX})$ Sans interactions : $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc}, \text{family}=\text{"binomial"}, \text{data}=\text{sev_PV_dateX})$ $\text{glm}(\text{cbind}(\text{nb_pousses_pucerons_tot}, \text{nb_pousses_intacts}) \sim \text{moda} + \text{bloc}, \text{family}=\text{"quasibinomial"}, \text{data}=\text{sev_PV_dateX})$

Dans foyers de <i>Aphis pomi</i>	Toutes dates confondues	$glm(nb_auxi_tot \sim moda * bloc, family = "quasipoisson", data = dyna_PC_dateX)$ Avec interactions : $glm(nb_auxi_tot \sim moda + bloc + date_observation + date_observation : moda + bloc : moda, family = "poisson", data = dyna_PV)$ $glm(nb_auxi_tot \sim moda + bloc + date_observation + date_observation : moda + bloc : moda, family = "quasipoisson", data = dyna_PV)$ Sans interactions : $glm(nb_auxi_tot \sim moda + bloc + date_observation, family = "poisson", data = dyna_PV)$ $glm(nb_auxi_tot \sim moda + bloc + date_observation, family = "quasipoisson", data = dyna_PV)$
	Séparément par date	Avec interactions : $glm(nb_auxi_tot \sim moda * bloc, family = "poisson", data = dyna_PV_dateX)$ $zeroinfl(nb_auxi_tot \sim moda * bloc, data = dyna_PV_dateX)$ $glm(nb_auxi_tot \sim moda * bloc, family = "quasipoisson", data = dyna_PV_dateX)$ Sans interactions : $glm(nb_auxi_tot \sim moda + bloc, family = "poisson", data = dyna_PV_dateX)$ $zeroinfl(nb_auxi_tot \sim moda + bloc, data = dyna_PV_dateX)$ $glm(nb_auxi_tot \sim moda * bloc, family = "quasipoisson", data = dyna_PV_dateX)$

Annexe 22 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron cendré à l'échelle du pommier (toutes dates confondues)



Annexe 23 : Dynamique du pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré en fonction du traitement

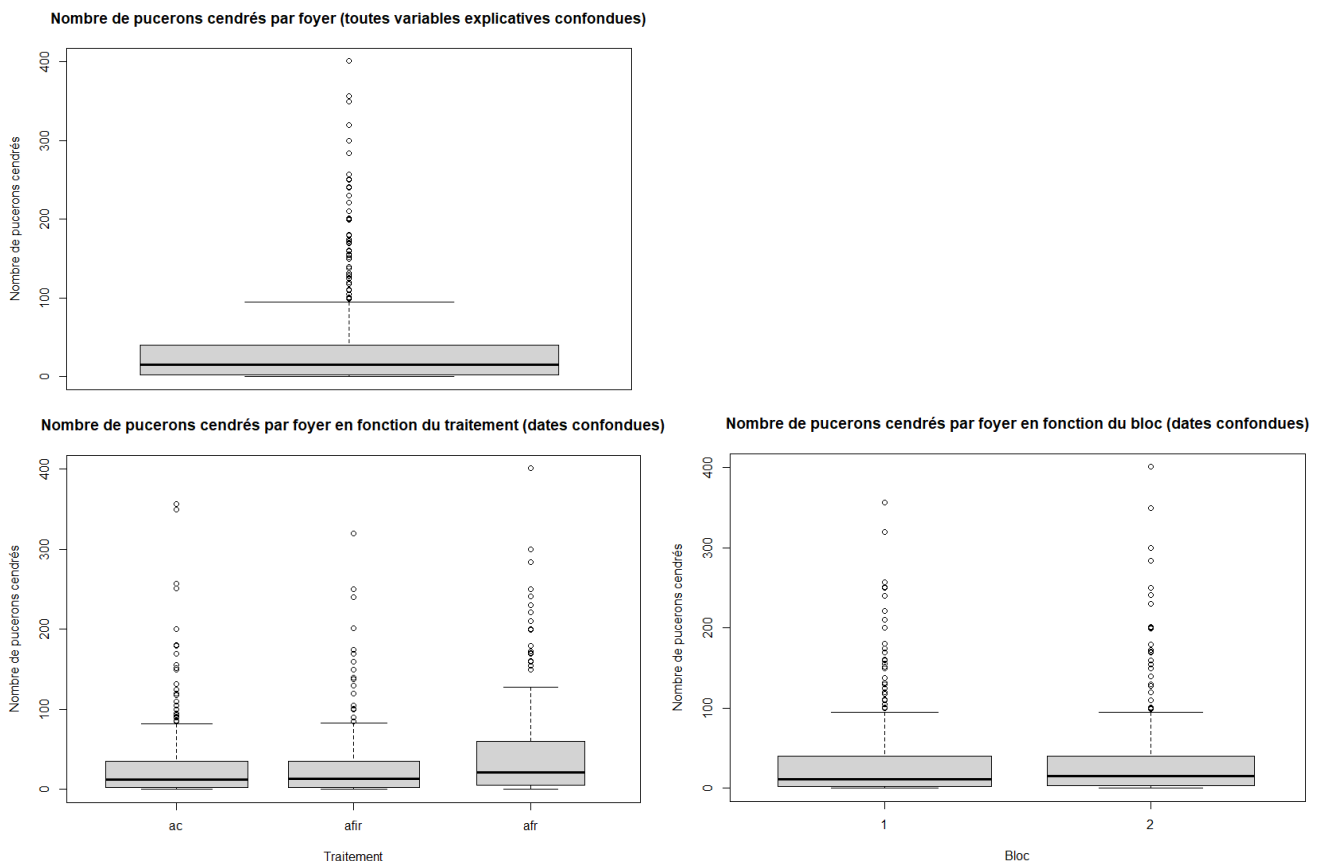


Annexe 24 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique des proportions de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré

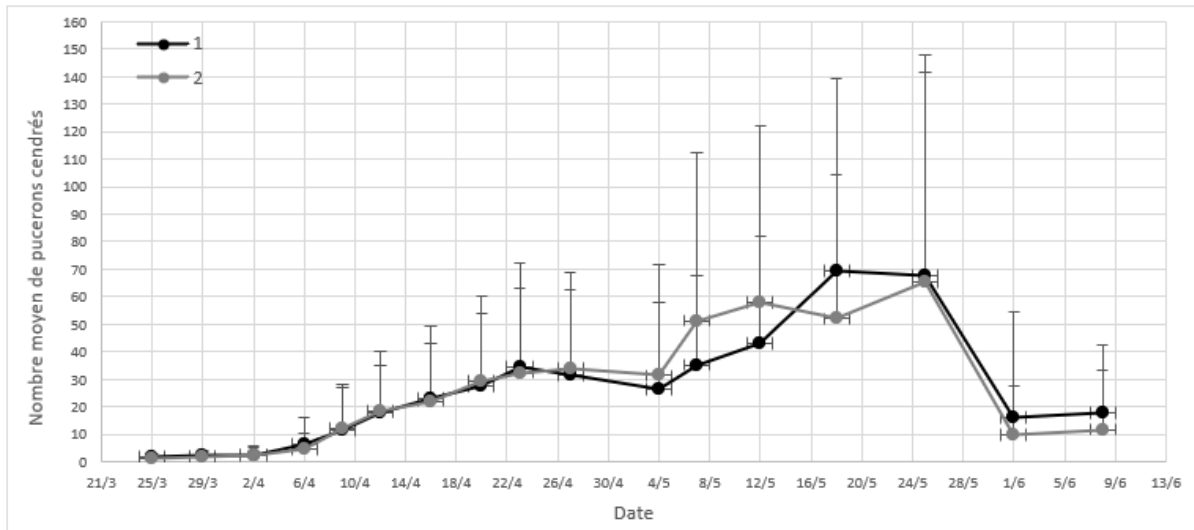
Date d'observation	Interaction traitement:bloc p-value	Effet traitement et Effet bloc p-value
25/03/2021	0.7341 (binomiale, type II)	Traitement : 1.255e-07 (binomiale, type II) *** – contradiction du post-hoc Bloc : 0.2101 (binomiale, type II)
29/03/2021	0.97440 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.01234 (quasibinomiale, test F) . Bloc : 0.15128 (quasibinomiale, test F)
02/04/2021	0.79940 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.01458 (quasibinomiale, test F) . Bloc : 0.21295 (quasibinomiale, test F)
06/04/2021	0.3382 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.2310 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.5694 (quasibinomiale, test F)
09/04/2021	0.57329 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.1017 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.9105 (quasibinomiale, test F)
12/04/2021	0.1782 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.07248 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.81545 (quasibinomiale, test F)
16/04/2021	0.1088 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.2364 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.5369 (quasibinomiale, test F)
20/04/2021	0.5601 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.1023 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.9255 (quasibinomiale, test F)
23/04/2021	0.11107 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.05237 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.77089 (quasibinomiale, test F)
27/04/2021	0.3355 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.3835 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.9600 (quasibinomiale, test F)
04/05/2021	0.6554 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.4028 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.8410 (quasibinomiale, test F)
07/05/2021	0.11702 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.1080 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.9268 (quasibinomiale, test F)
12/05/2021	0.03868 (quasibinomiale, test F) .	Traitement : 0.04179 (quasibinomiale, test F) . Bloc : 0.35141 (quasibinomiale, test F)
18/05/2021	0.015580 (quasibinomiale, test F) .	Traitement : 0.01732 (quasibinomiale, test F) . Bloc : 0.36660 (quasibinomiale, test F)
25/05/2021	0.007219 (quasibinomiale, test F) *	Traitement : 0.004239 (quasibinomiale, test F) * Bloc : 0.304338 (quasibinomiale, test F)
01/06/2021	0.3952 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.3853 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.1610 (quasibinomiale, test F)
08/06/2021	0.3321 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.3812 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.3560 (quasibinomiale, test F)

Signif. codes: 0 '***' 0.0001 '**' 0.001 '*' 0.01 '.' 0.05 '' 0.1

Annexe 25 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron cendré (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (toutes dates confondues)



Annexe 26 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) en fonction du bloc

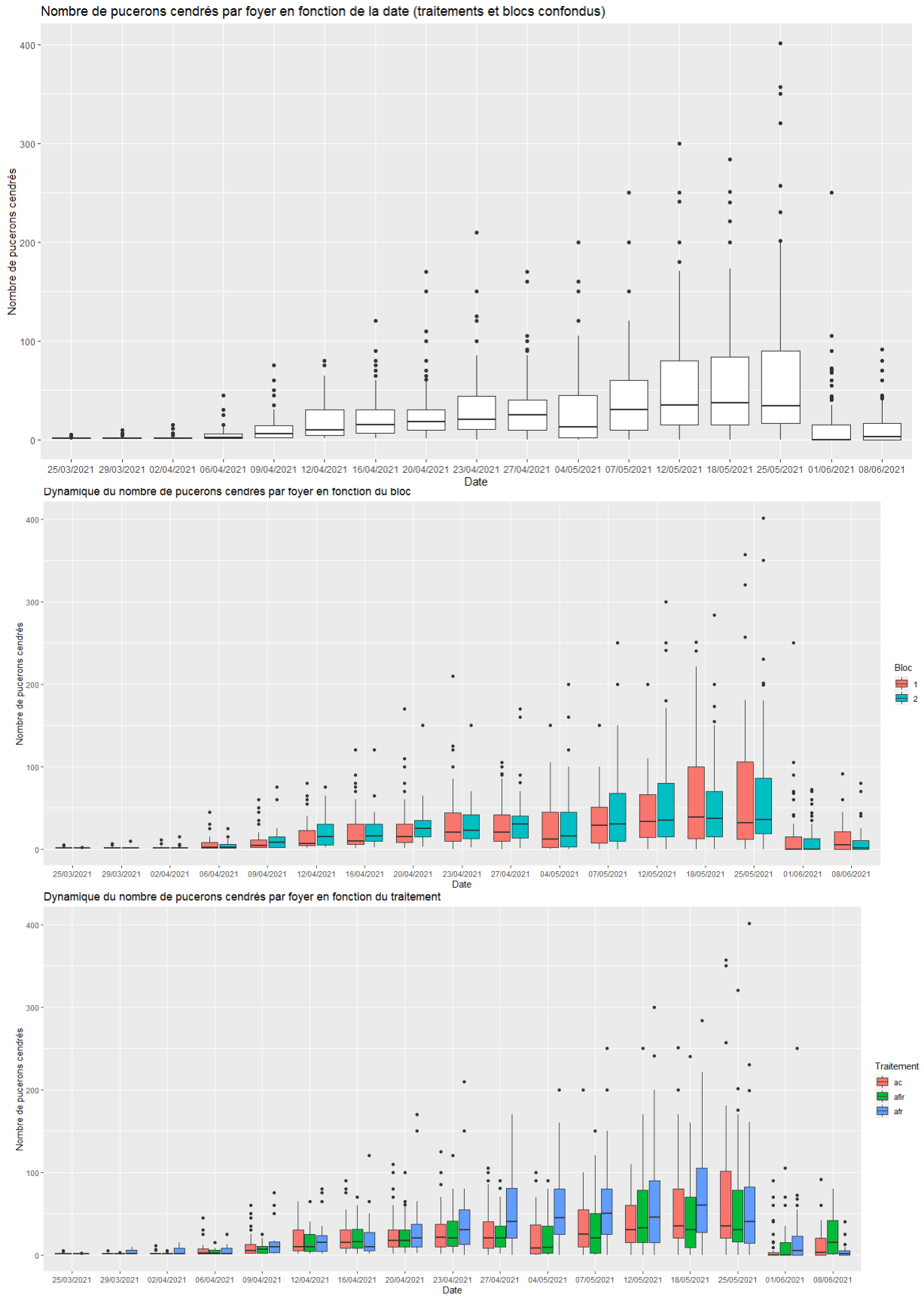


Annexe 27 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre de pucerons cendrés par foyer

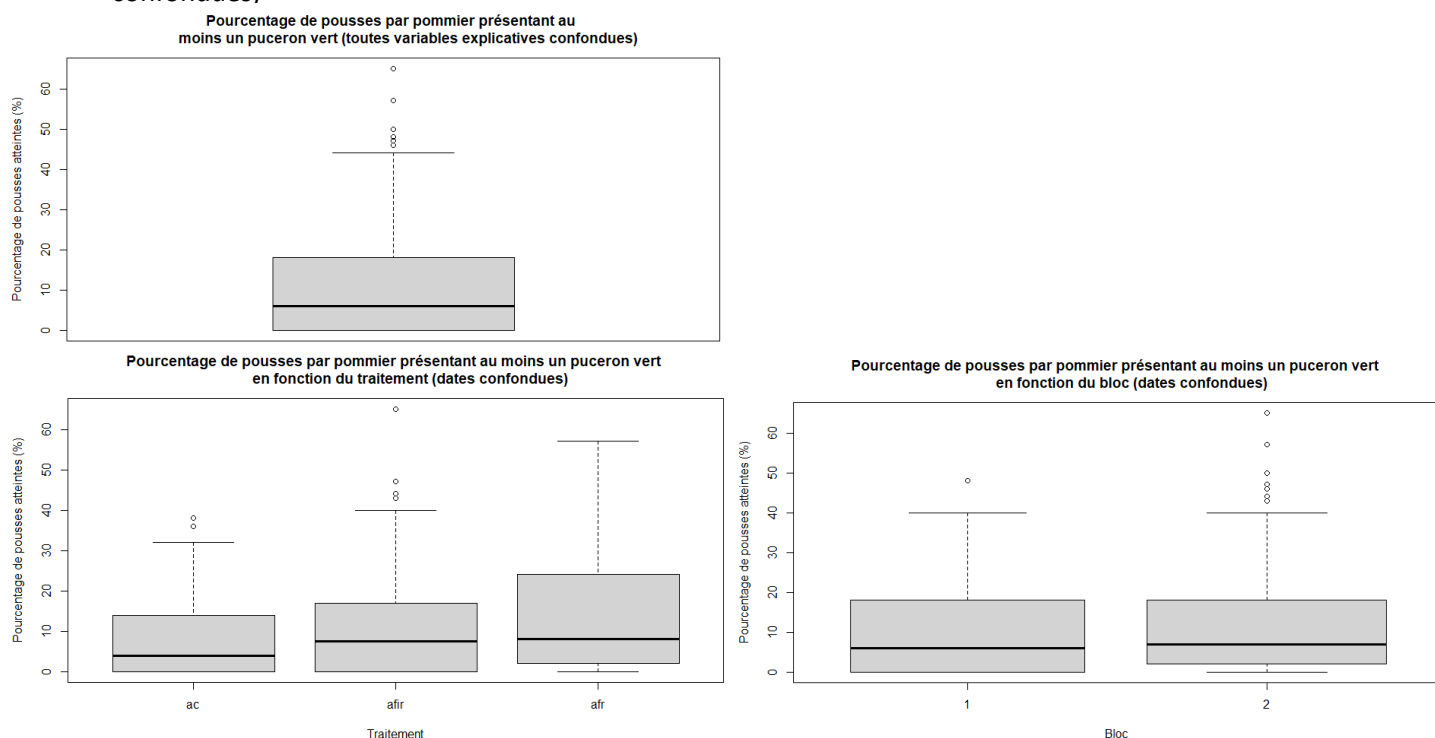
Date d'observation	Interaction traitement:bloc p-value	Effet traitement et Effet bloc p-value
25/03/2021	0.14897 (poisson, test F)	Traitement : 0.0930 (poisson, test F) Bloc : 0.2779 (poisson, test F)
29/03/2021	0.576178 (poisson, test F)	Traitement : 0.007936 (poisson, test F) * Bloc : 0.402668 (poisson, test F)
02/04/2021	0.52576 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.02869 (quasipoisson, test F) . Bloc : 0.93823 (quasipoisson, test F)
06/04/2021	0.9704 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.6777 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.5503 (quasipoisson, test F)
09/04/2021	0.9845 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.1441 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.9827 (quasibinomiale, test F)
12/04/2021	0.9518 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.4322 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.8117 (quasipoisson, test F)
16/04/2021	0.9683 (quasipoisson test F)	Traitement : 0.6428 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.6788 (quasipoisson, test F)
20/04/2021	0.9752 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.5292 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.8739 (quasipoisson, test F)
23/04/2021	0.7832 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.1299 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.6259 (quasipoisson, test F)
27/04/2021	0.547165 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.001688 (quasipoisson, test F) * Bloc : 0.867726 (quasipoisson, test F)
04/05/2021	0.7720 (quasipoisson, test F)	Traitement : 1.039e-05 (quasipoisson, test F) *** Bloc : 0.8243 (quasipoisson, test F)
07/05/2021	0.382455 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.002043 (quasipoisson, test F) * Bloc : 0.083837 (quasipoisson, test F)
12/05/2021	0.63951 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.05915 (quasipoisson test F) Bloc : 0.34678 (quasipoisson, test F)
18/05/2021	0.03269 (quasipoisson, test F) .	Traitement : 0.02787 (quasipoisson, test F) . Bloc : 0.06477 (quasipoisson, test F)
25/05/2021	0.1679 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.8163 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.9584 (quasipoisson, test F)
01/06/2021	0.73746 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.01847 (quasipoisson, test F) . Bloc : 0.02245 (quasipoisson, test F) .
08/06/2021	0.02588 (quasipoisson, test F) .	Traitement : 0.05077 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.76054 (quasipoisson, test F)

Signif. codes: 0 '***' 0.0001 '**' 0.001 '*' 0.01 '.' 0.05 '' 0.1

Annexe 28 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron cendré (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (séparément par date)



Annexe 29 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron vert à l'échelle du pommier (toutes dates confondues)

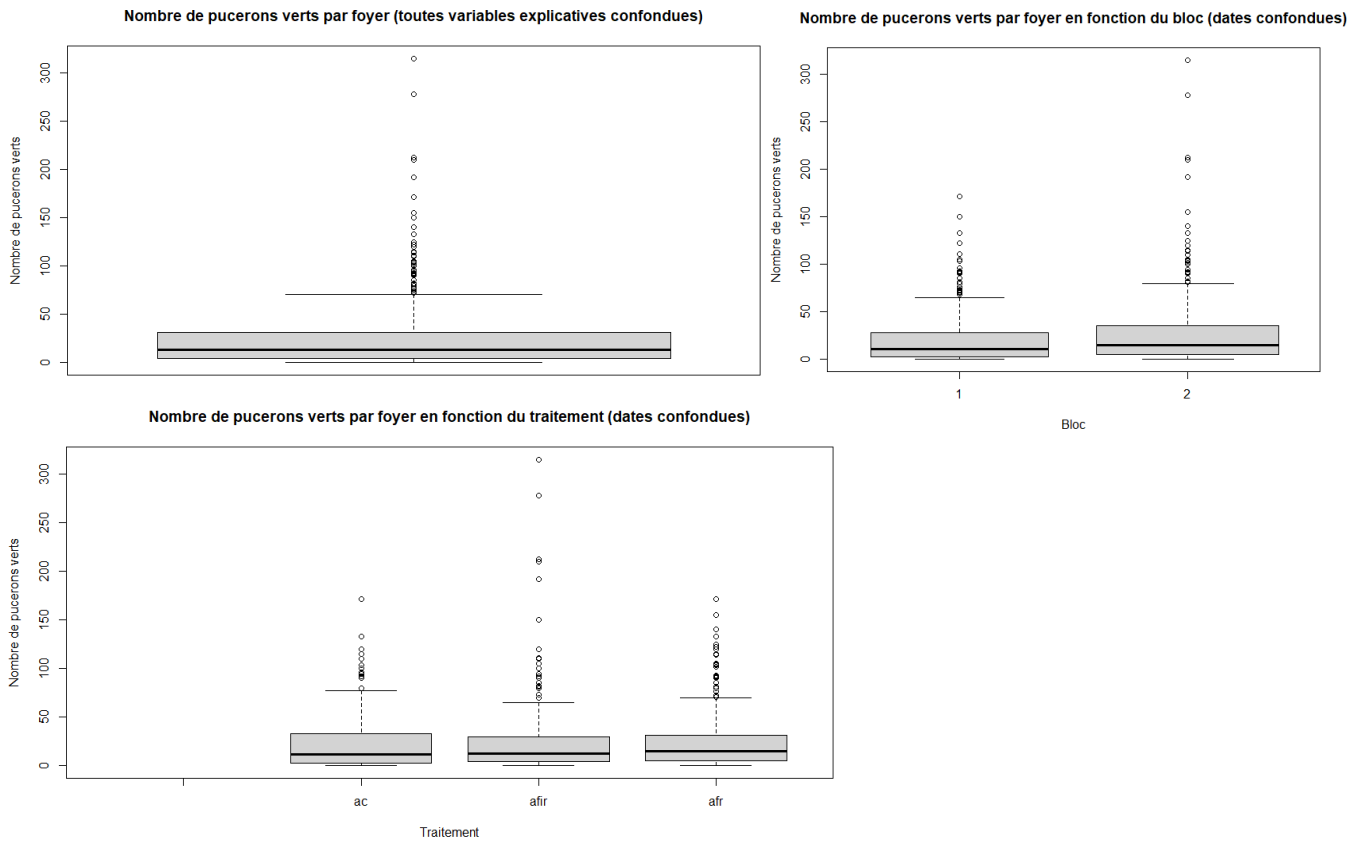


Annexe 30 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique des proportions de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert

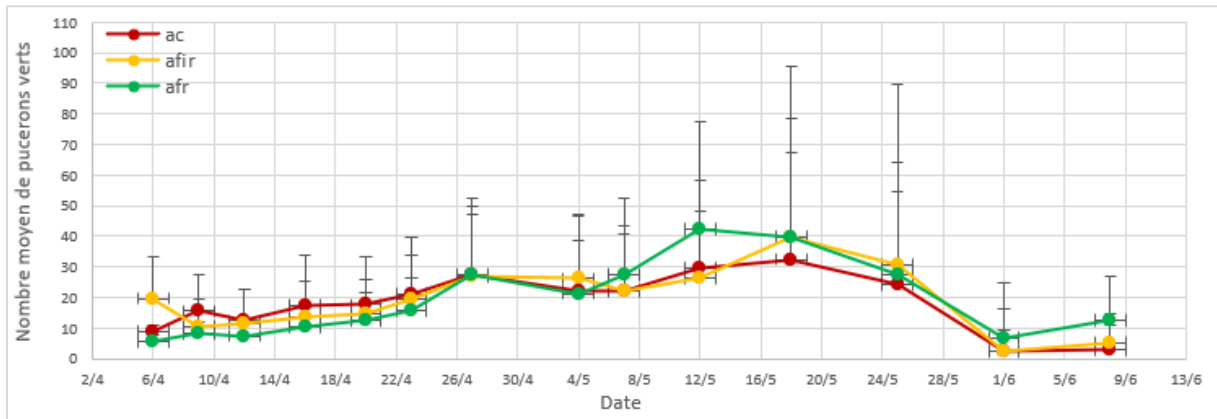
Date d'observation	Interaction traitement:bloc p-value	Effet traitement et Effet bloc p-value
06/04/2021	0.7095 (binomiale, type II)	Traitement : 0.9106 (binomiale, type II) Bloc : 0.3000 (binomiale, type II)
09/04/2021	0.5031 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.6834 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.5183 (quasibinomiale, test F)
12/04/2021	0.8954 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.9141 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.9447 (quasibinomiale, test F)
16/04/2021	0.9679 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.1801 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.4698 (quasibinomiale, test F)
20/04/2021	0.8777 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.1619 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.2204 (quasibinomiale, test F)
23/04/2021	0.65780 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.04325 (quasibinomiale, test F) . Bloc : 0.46743 (quasibinomiale, test F)
27/04/2021	0.72540 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.01432 (quasibinomiale, test F) . Bloc : 0.31416 (quasibinomiale, test F)
04/05/2021	0.49216 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.03638 (quasibinomiale, test F) . Bloc : 0.02339 (quasibinomiale, test F)
07/05/2021	0.603869 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.003663 (quasibinomiale, test F) * Bloc : 0.186231 (quasibinomiale, test F)
12/05/2021	0.569826 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.006618 (quasibinomiale, test F) * Bloc : 0.833032 (quasibinomiale, test F)
18/05/2021	0.02292 (quasibinomiale, test F) .	Traitement : 0.1496 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.1557 (quasibinomiale, test F)
25/05/2021	0.46696 (quasibinomiale, test F) *	Traitement : 0.09079 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.09361 (quasibinomiale, test F)
01/06/2021	0.733027 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.009033 (quasibinomiale, test F) * Bloc : 0.008472 (quasibinomiale, test F) *
08/06/2021	0.1801 (quasibinomiale, test F)	Traitement : 0.2094 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.2243 (quasibinomiale, test F)

Signif. codes: 0 '***' 0.0001 '**' 0.001 '*' 0.01 '.' 0.05 '' 0.1

Annexe 31 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron vert (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (toutes dates confondues)



Annexe 32 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) en fonction du traitement



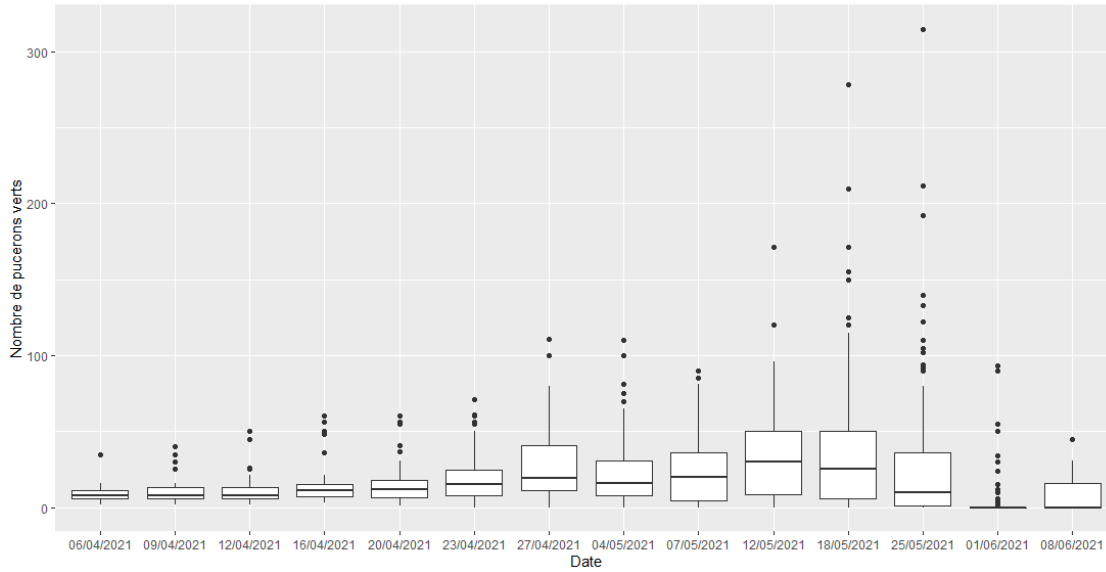
Annexe 33 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre de pucerons verts par foyer

Date d'observation	Interaction traitement:bloc p-value	Effet traitement et Effet bloc p-value
06/04/2021	0.24321 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.02417 (quasipoisson, test F) . Bloc : 0.16279 (quasipoisson, test F)
09/04/2021	0.02048 (quasipoisson, test F) .	Traitement : 0.2611 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.9591 (quasibinomiale, test F)
12/04/2021	0.05502 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.3408 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.5536 (quasipoisson, test F)
16/04/2021	0.06347 (quasipoisson test F)	Traitement : 0.2149 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.9871 (quasipoisson, test F)
20/04/2021	0.04889 (quasipoisson, test F) .	Traitement : 0.2852(quasipoisson, test F) Bloc : 0.9586 (quasipoisson, test F)
23/04/2021	0.0694 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.2445 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.7675 (quasipoisson, test F)
27/04/2021	0.0916 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.9902(quasipoisson, test F) Bloc : 0.8422 (quasipoisson, test F)
04/05/2021	0.0796 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.5184 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.1499(quasipoisson, test F)
07/05/2021	0.6177 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.4037 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.6492 (quasipoisson, test F)
12/05/2021	0.81781 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.02902 (quasipoisson test F) . Bloc : 0.22960 (quasipoisson, test F)
18/05/2021	0.415256 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.924342 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.009441 (quasipoisson, test F) *
25/05/2021	0.25857 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.99715(quasipoisson, test F) Bloc : 0.01749 (quasipoisson, test F) .
01/06/2021	0.1716 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.2814 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.7695 (quasipoisson, test F)
08/06/2021	0.2849 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.1970 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.7211 (quasipoisson, test F)

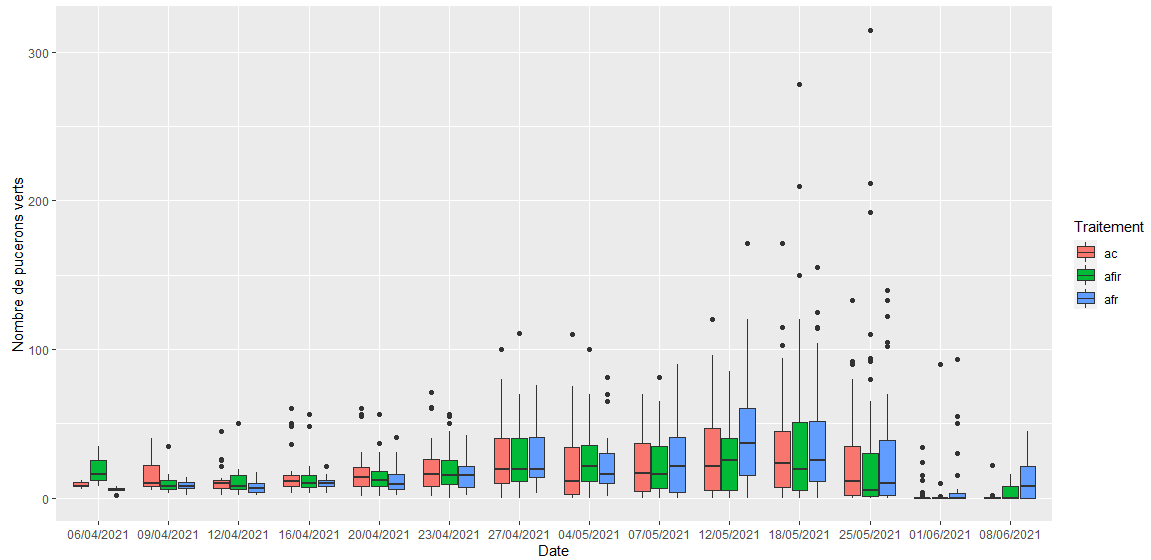
Signif. codes: 0 '***' 0.0001 '**' 0.001 '*' 0.01 '.' 0.05 '' 0.1

Annexe 34 : Boxplots dynamique de l'incidence du puceron vert (tous stades confondus) à l'échelle de la pousse (séparément par date)

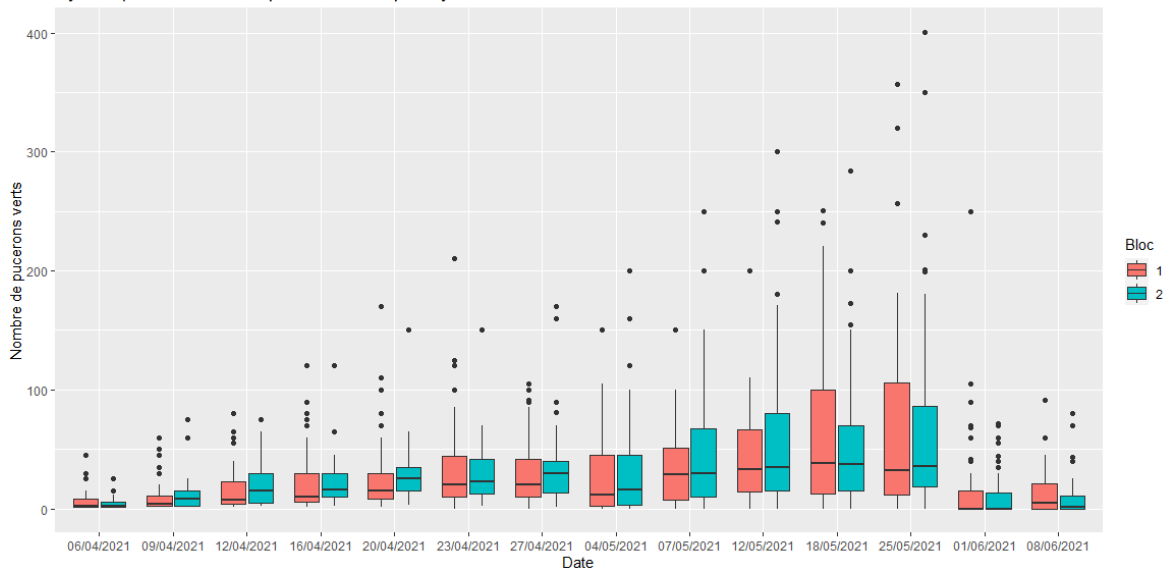
Nombre de pucerons verts par foyer en fonction de la date (traitements et blocs confondus)



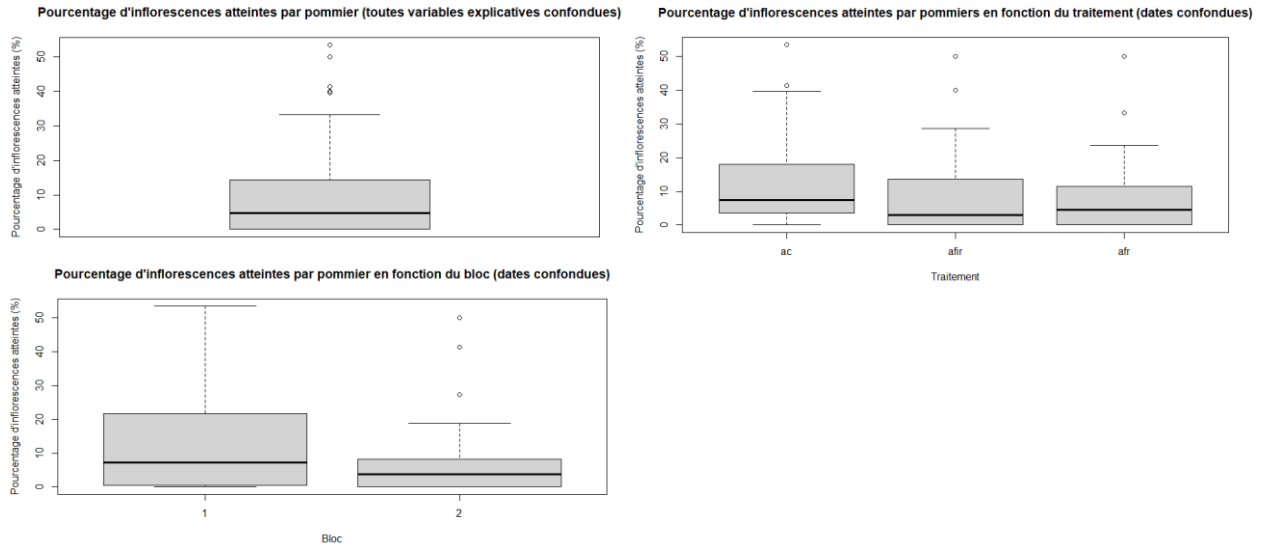
Dynamique du nombre de pucerons verts par foyer en fonction du traitement



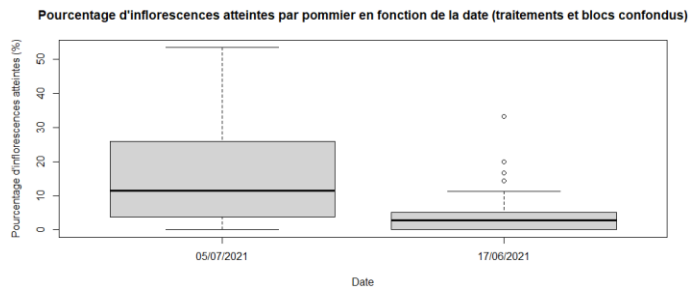
Dynamique du nombre de pucerons verts par foyer en fonction du bloc



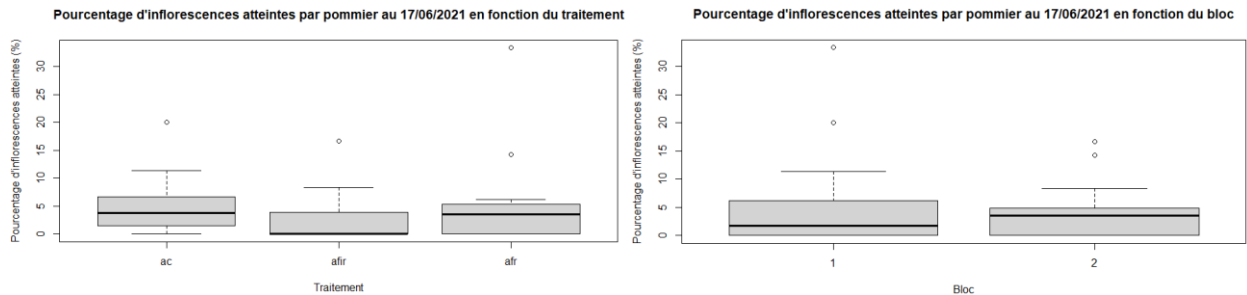
Annexe 35 : Boxplots suivi de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier (toutes dates confondues)



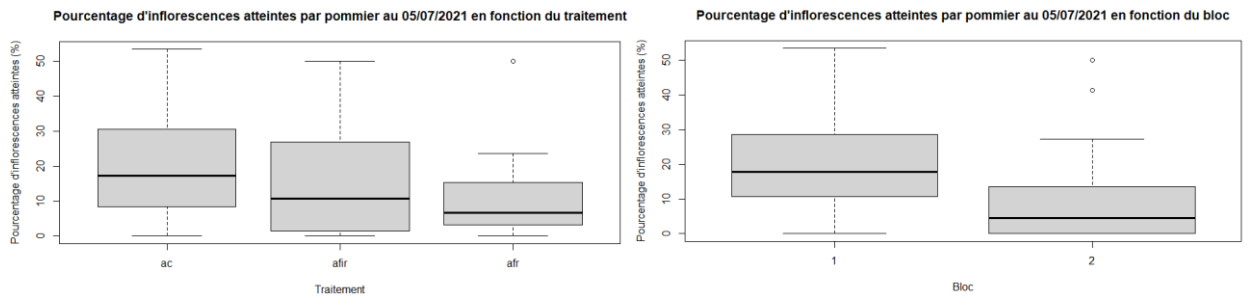
Annexe 36 : Boxplots suivi de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier en fonction de la date (traitements et blocs confondus)



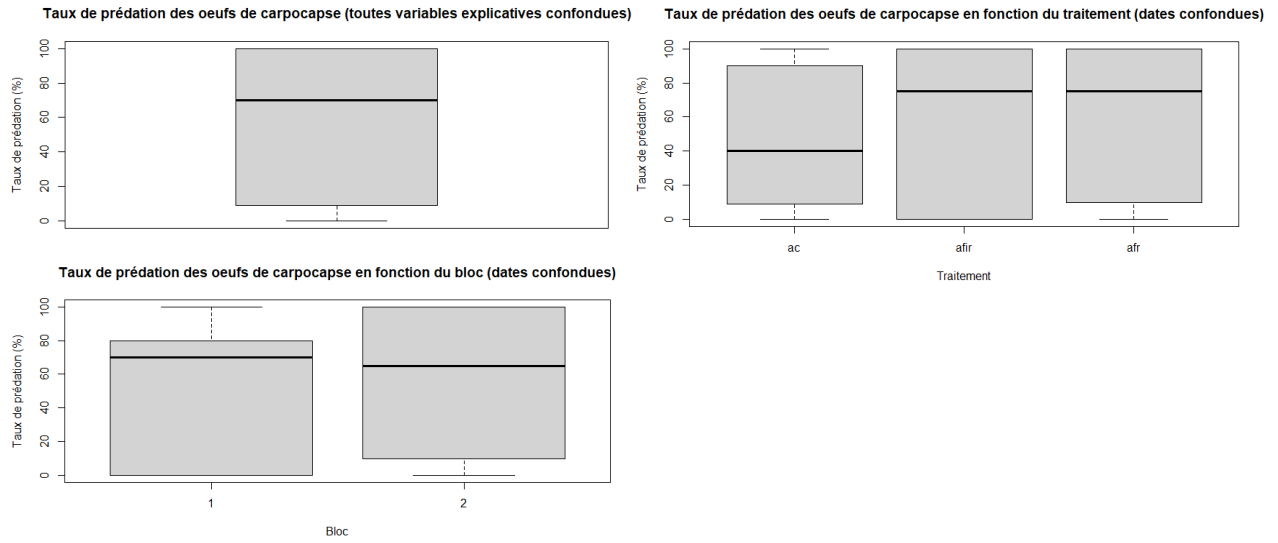
Annexe 37 : Boxplots suivis de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier au 17/06/2021



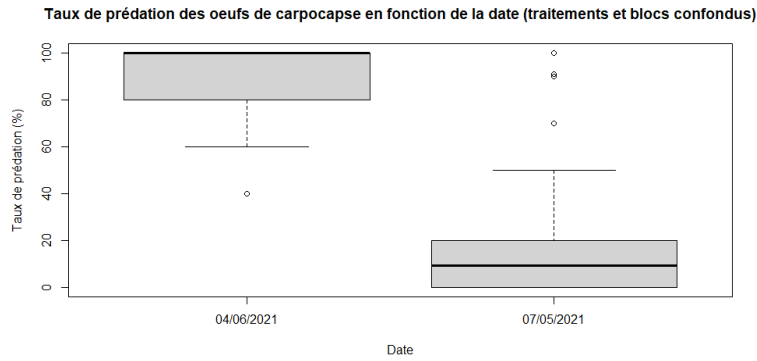
Annexe 38 : Boxplots suivis de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier au 05/07/2021



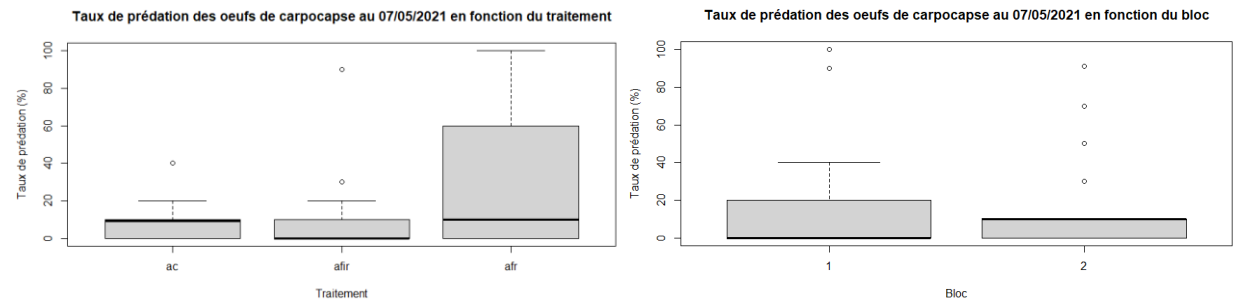
Annexe 39 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse (toutes dates confondues)



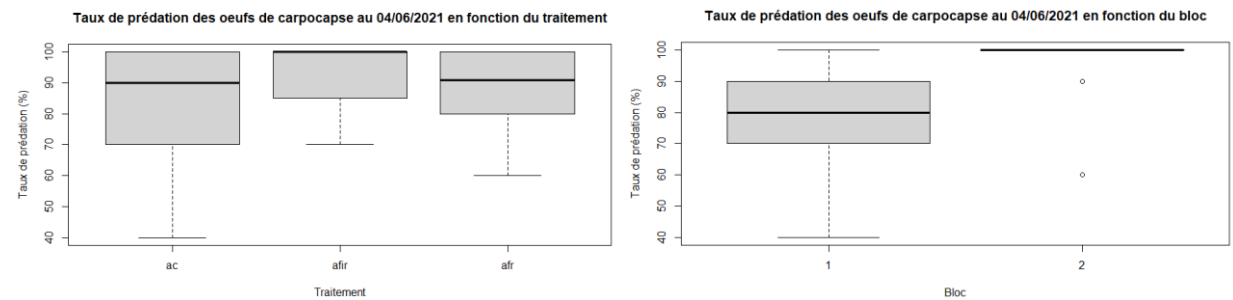
Annexe 40 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse en fonction de la date (traitements et blocs confondus)



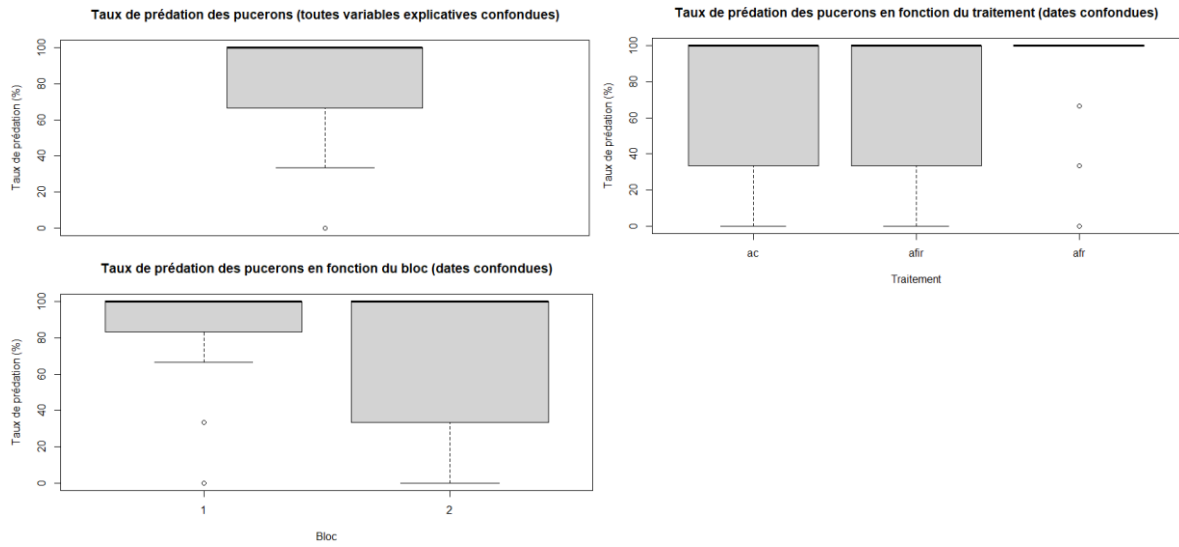
Annexe 41 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse au 07/05/2021



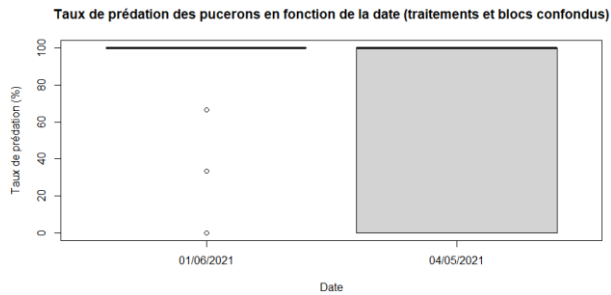
Annexe 42 : Boxplots suivi de la prédation des œufs de carpocapse au 04/06/2021



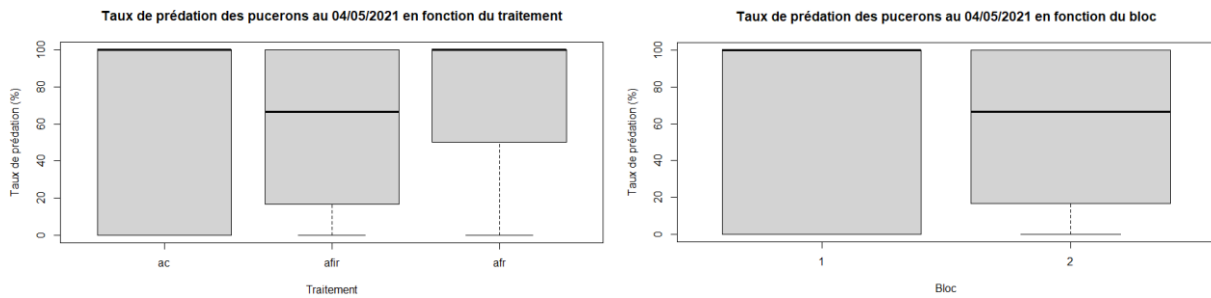
Annexe 43 : Boxplots suivi de la prédation des *A. pisum* (toutes dates confondues)



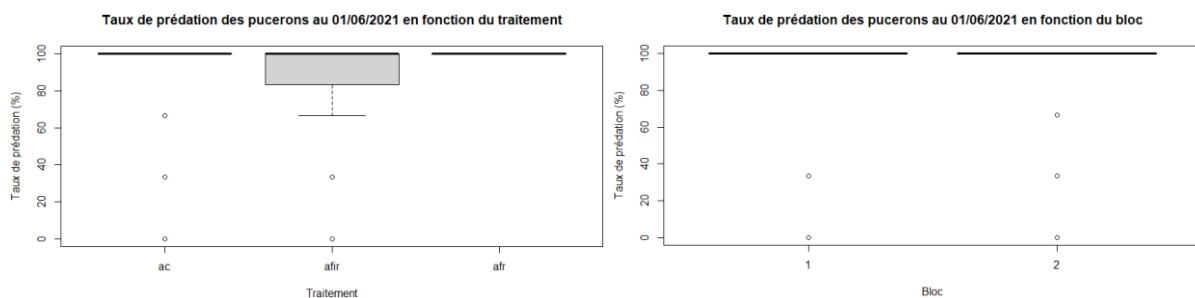
Annexe 44 : Boxplots suivi de la prédation des *A. pisum* en fonction de la date (traitements et blocs confondus)



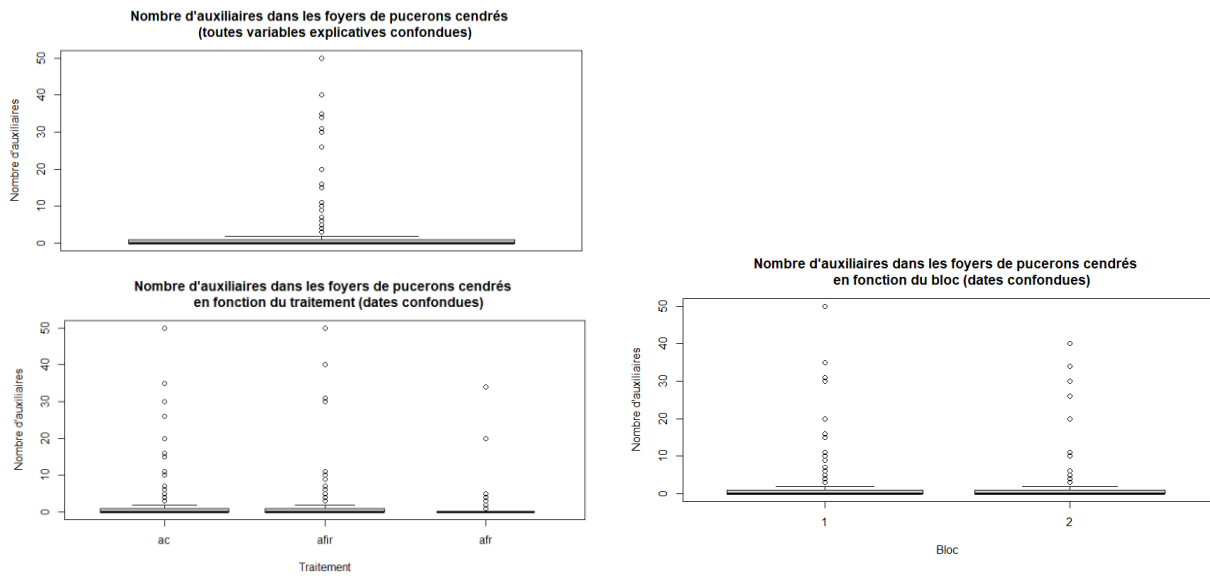
Annexe 45 : Boxplots suivi de la prédation des *A. pisum* au 04/05/2021



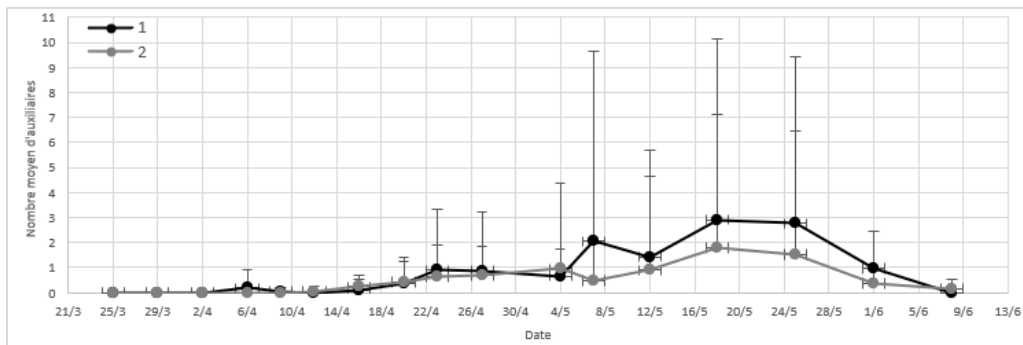
Annexe 46 : Boxplot suivi de la prédation des *A. pisum* au 01/06/2021



Annexe 47 : Boxplots nombre d'auxiliaires (tous stades confondus) par foyer de pucerons cendrés (toutes dates confondues)



Annexe 48 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires (tous taxons et tous stades confondus) par foyer de pucerons cendrés en fonction du bloc

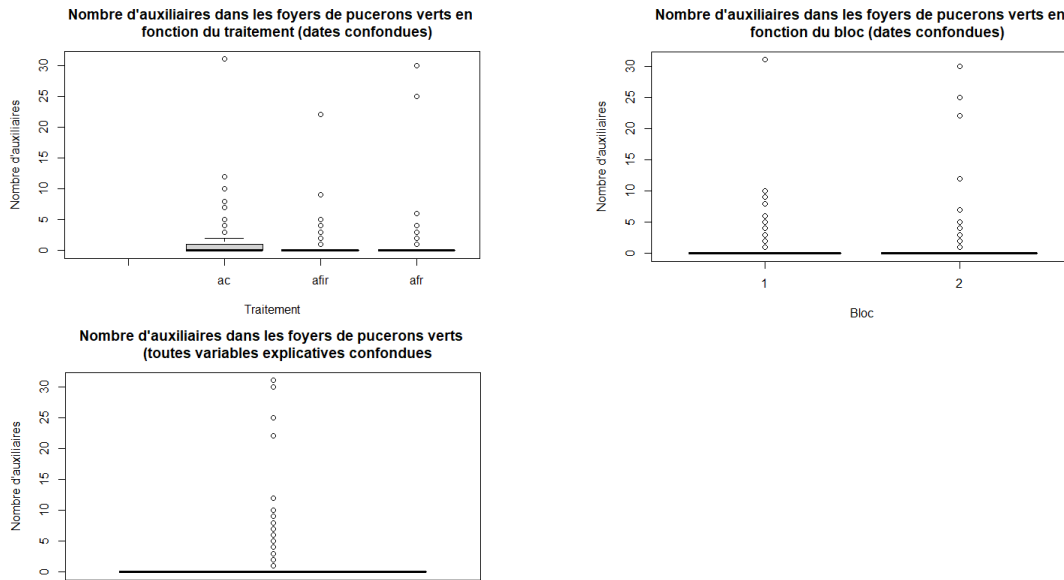


Annexe 49 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés

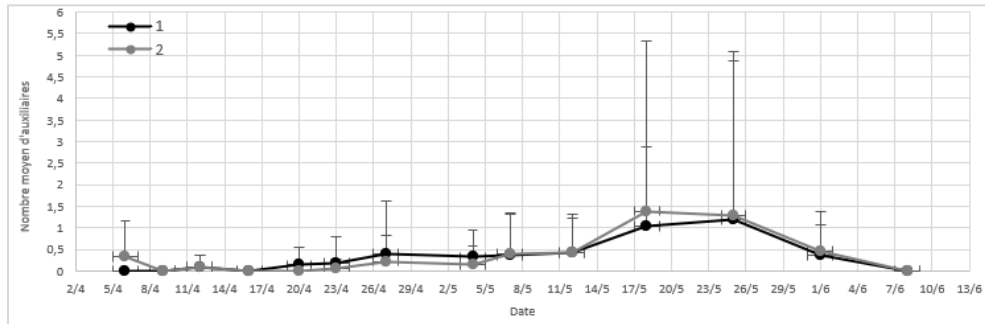
Date d'observation	Interaction traitement:bloc p-value	Effet traitement et Effet bloc p-value
25/03/2021	NA	NA
29/03/2021	NA	NA
02/04/2021	NA	NA
06/04/2021	1 (zero-inflated poisson, test F)	Traitement : 1 (zero-inflated poisson, test F) Bloc : 1 (zero-inflated poisson, test F)
09/04/2021	1 (zero-inflated poisson, test F)	Traitement : 1 (zero-inflated poisson, test F) Bloc : 0.9998 (zero-inflated poisson, test F)
12/04/2021	1 (zero-inflated poisson, test F)	Traitement : 1 (zero-inflated poisson, test F) Bloc : 0.9995 (zero-inflated poisson, test F)
16/04/2021	0.0002603 (poisson, test F) **	Traitement : 0.4283686 (quasibinomiale, test F) Bloc : 0.0446984 (quasibinomiale, test F) .
20/04/2021	0.01516 (poisson, test F) .	Traitement : 0.9225 (poisson, test F) Bloc : 0.7554 (poisson, test F)
23/04/2021	0.2532 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.3880 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.7699 (quasipoisson, test F)
27/04/2021	0.6047 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.9495 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.6741 (quasipoisson, test F)
04/05/2021	0.2176 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.4840 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.3031 (quasipoisson, test F)
07/05/2021	0.74371 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.32757 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.06687 (quasipoisson, test F)
12/05/2021	0.96089 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.0188 (quasipoisson, test F) . Bloc : 0.2141 (quasipoisson, test F)
18/05/2021	0.89222 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.0425 (quasipoisson, test F) . Bloc : 0.2542 (quasipoisson, test F)
25/05/2021	0.1170 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.2213 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.3847 (quasipoisson, test F)
01/06/2021	0.549921 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.854346 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.002465 (quasipoisson, test F) * - contradiction du post-hoc
08/06/2021	1 (zero-inflated poisson, test F)	Traitement : 0.3107 (zero-inflated poisson, test F) Bloc : 0.9999 (zero-inflated poisson, test F)

Signif. codes: 0 '***' 0.0001 '**' 0.001 '*' 0.01 '.' 0.05 '' 0.1

Annexe 50 : Boxplots suivi du nombre d'auxiliaires (tous stades confondus) par foyer de pucerons verts (toutes dates confondues)



Annexe 51 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires (tous taxons et tous stades confondus) par foyer de pucerons verts en fonction du bloc

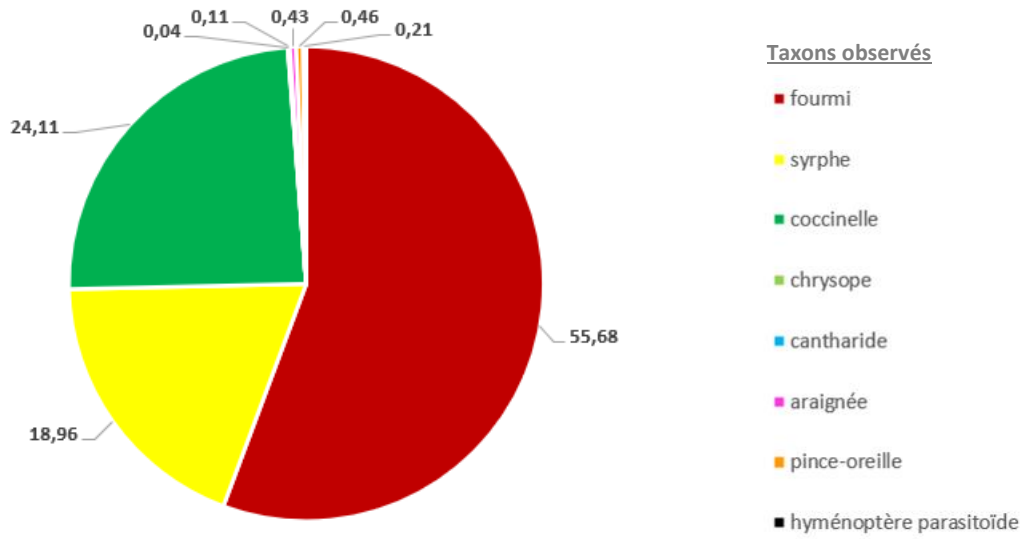


Annexe 52 : Récapitulatif des p-values obtenues pour les analyses statistiques de la dynamique du nombre d'auxiliaires par foyer de pucerons verts

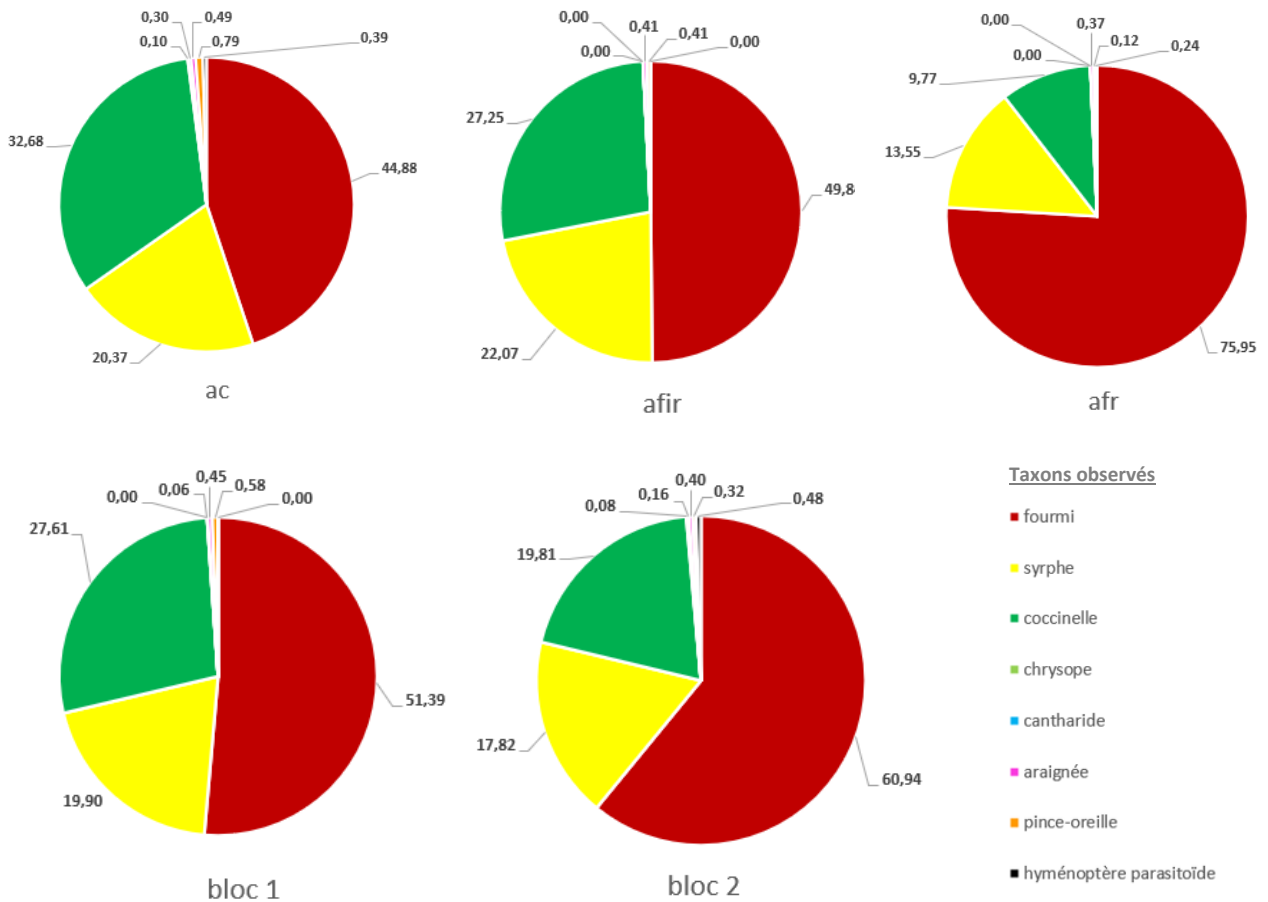
Date d'observation	Interaction traitement:bloc p-value	Effet traitement et Effet bloc p-value
06/04/2021	7.490e-07 (zero-inflated poisson, test F) ***	Traitement : 0.0002444 (zero-inflated poisson, test F) ** - contradiction du post-hoc Bloc : 4.159e-05 (zero-inflated poisson, test F)
09/04/2021	NA	NA
12/04/2021	1 (zero-inflated poisson, test F)	Traitement : 0.8837 (zero-inflated poisson, test F) Bloc : 0.8854 (zero-inflated poisson, test F)
16/04/2021	NA	NA
20/04/2021	1 (zero-inflated poisson, test F)	Traitement : 0.4401 (zero-inflated poisson, test F) Bloc : 1 (zero-inflated poisson, test F)
23/04/2021	1 (zero-inflated poisson, test F)	Traitement : 0.962669 (zero-inflated poisson, test F) Bloc : 0.002598 (zero-inflated poisson, test F) * - contradiction du post-hoc
27/04/2021	0.9226 (poisson, test F)	Traitement : 0.6600 (poisson, test F) Bloc : 0.3949 (poisson, test F)
04/05/2021	0.62285 (poisson, test F)	Traitement : 0.75722 (poisson, test F) Bloc : 0.05614 (poisson, test F)
07/05/2021	0.5209 (poisson, test F)	Traitement : 0.2987 (poisson, test F) Bloc : 0.5496 (poisson, test F)
12/05/2021	0.07356 (poisson, test F)	Traitement : 0.1639 (poisson, test F) Bloc : 0.7199 (poisson, test F)
18/05/2021	0.6998 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.5220 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.3673 (quasipoisson, test F)
25/05/2021	0.09479 (quasipoisson, test F)	Traitement : 0.7488 (quasipoisson, test F) Bloc : 0.8178 (quasipoisson, test F)
01/06/2021	0.7002 (poisson, test F)	Traitement : 0.1693 (poisson, test F) Bloc : 0.5107 (quasibinomiale, test F)
08/06/2021	NA	NA

Signif. codes: 0 '***' 0.0001 '**' 0.001 '*' 0.01 '.' 0.05 '' 0.1

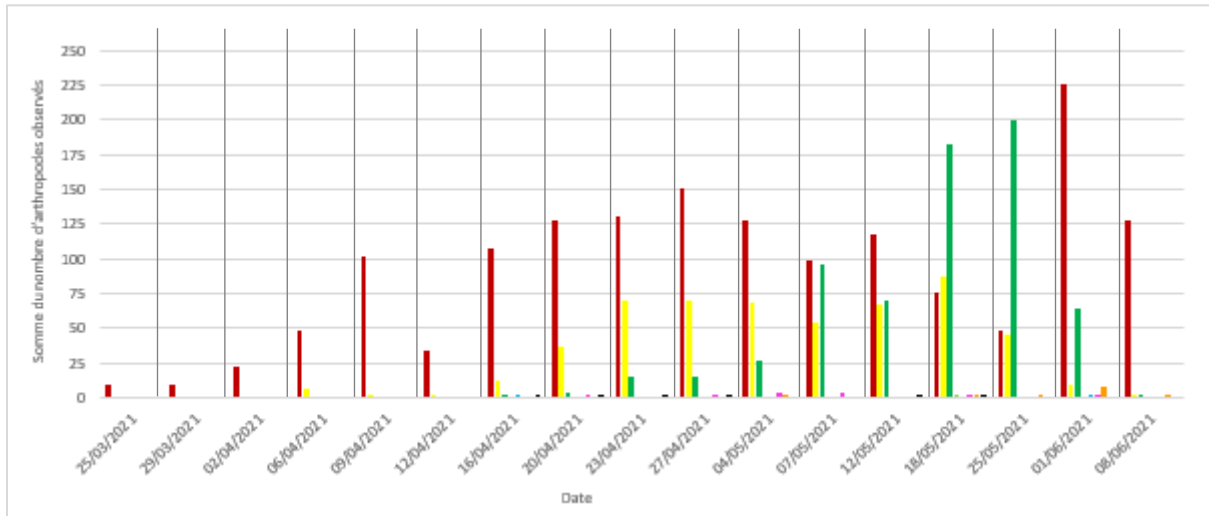
Annexe 53 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons cendrés (toutes variables explicatives confondues)



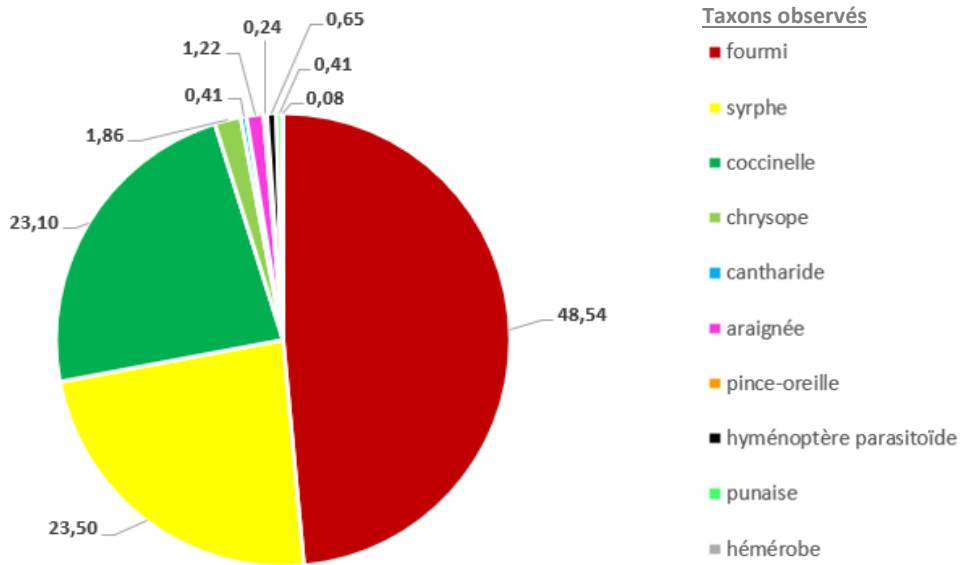
Annexe 54 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons cendrés toutes dates confondues en fonction du traitement et du bloc



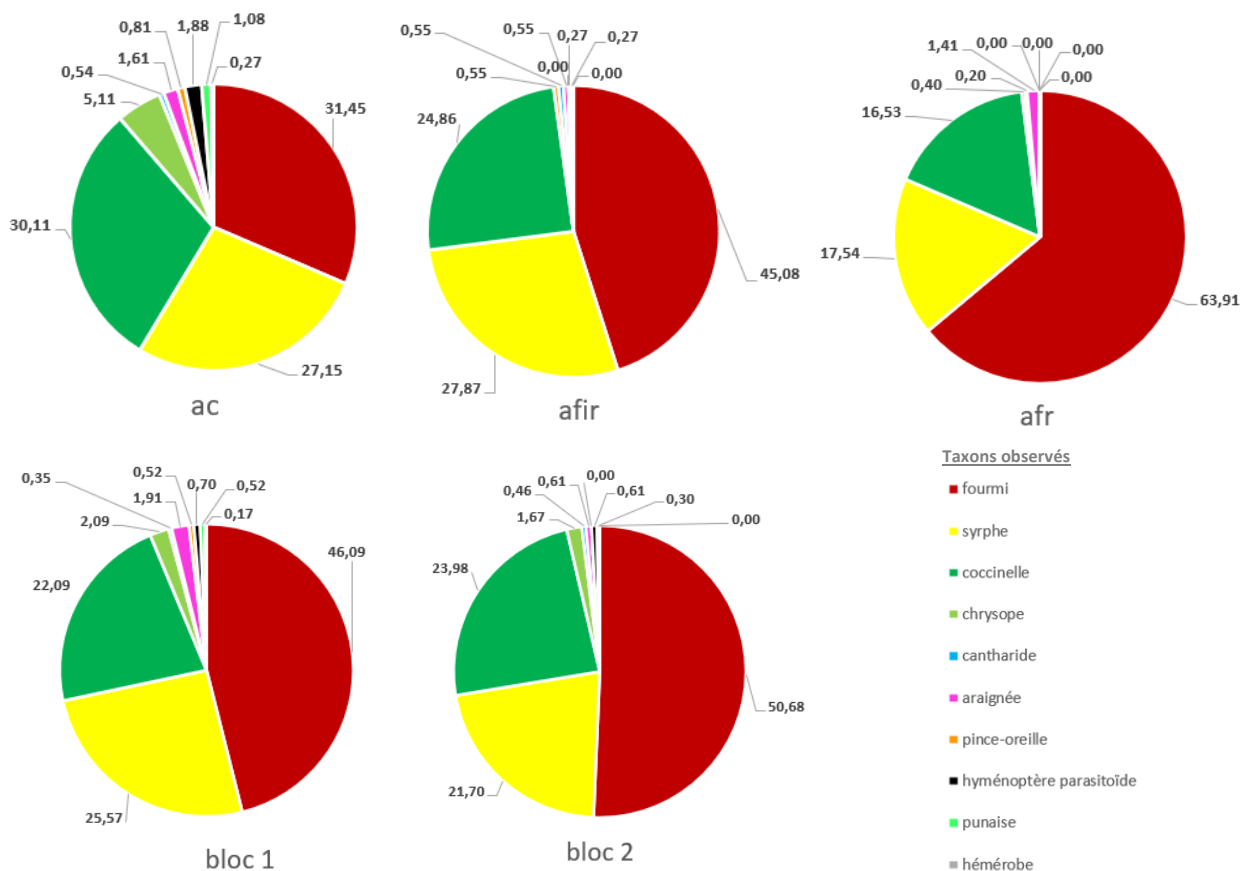
Annexe 55 : Somme du nombre d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons cendrés en fonction de la date (traitements et bloc confondus) (légende similaire aux annexes 53 et 54 p 101)



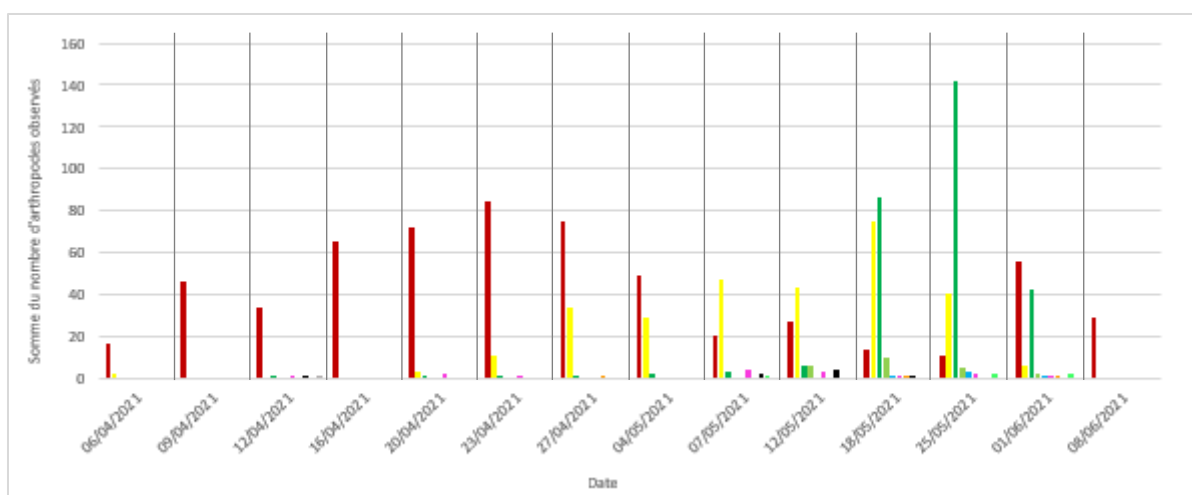
Annexe 56 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons verts (toutes variables explicatives confondues)



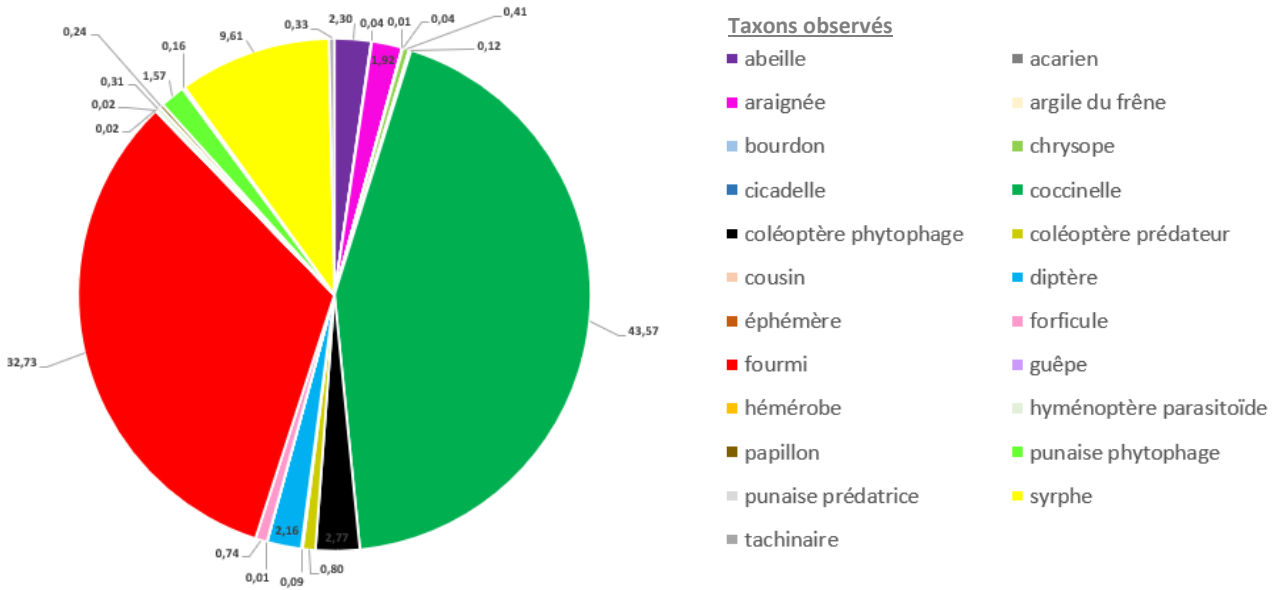
Annexe 57 : Répartition du pourcentage d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons verts toutes dates confondues en fonction du traitement et du bloc



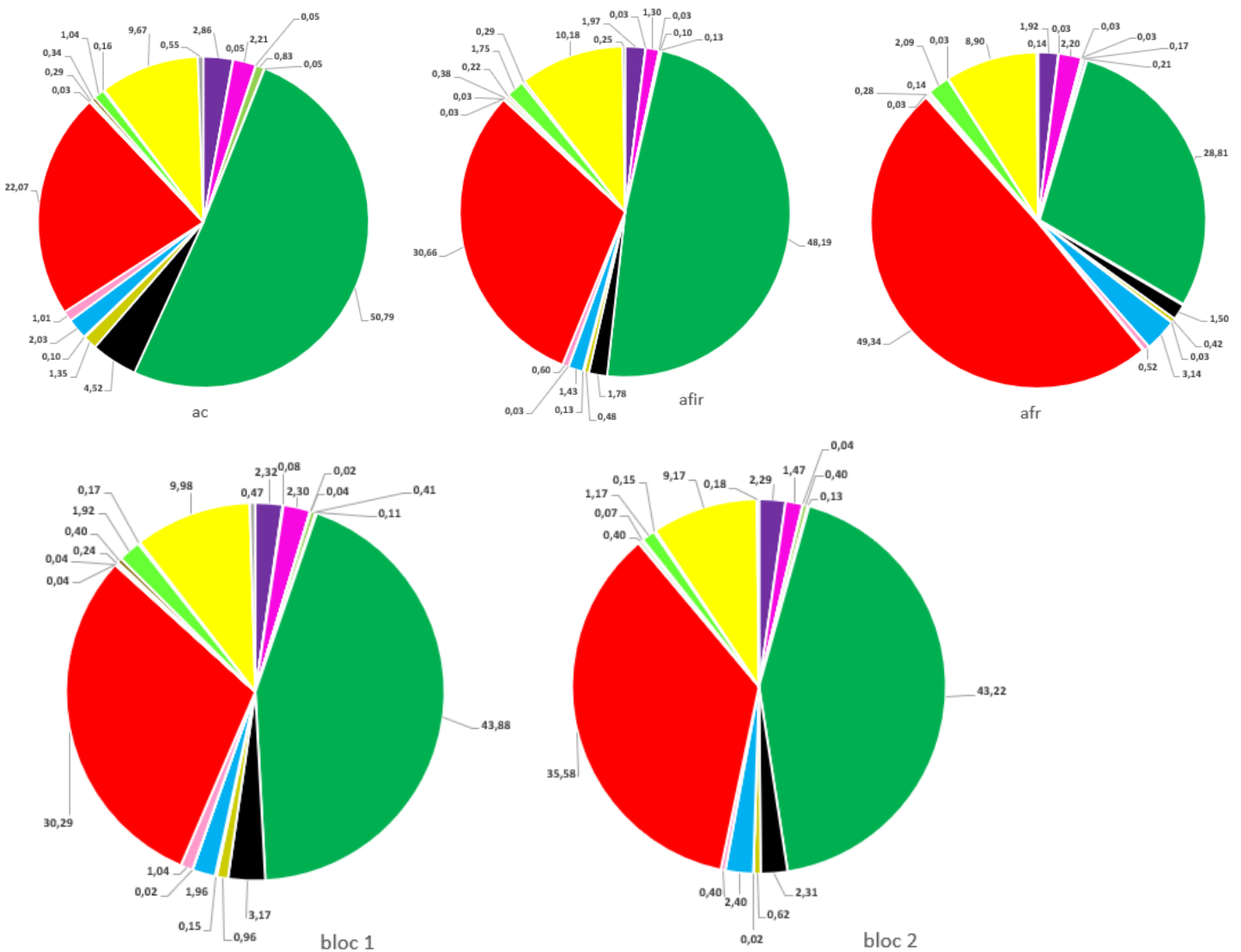
Annexe 58 : Somme du nombre d'arthropodes (auxiliaires et fourmis) observés par taxon (tous stades confondus) dans les foyers de pucerons vert en fonction de la date (traitements et blocs confondus) (légende similaire aux annexes 56 p 102 et 57 p 103)



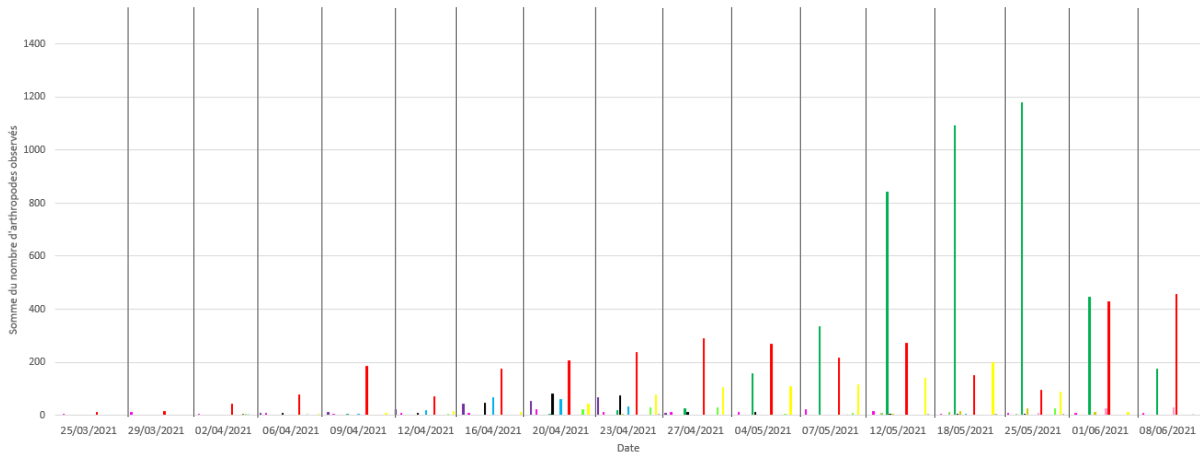
Annexe 59 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les pommiers (toutes variables explicatives confondues)



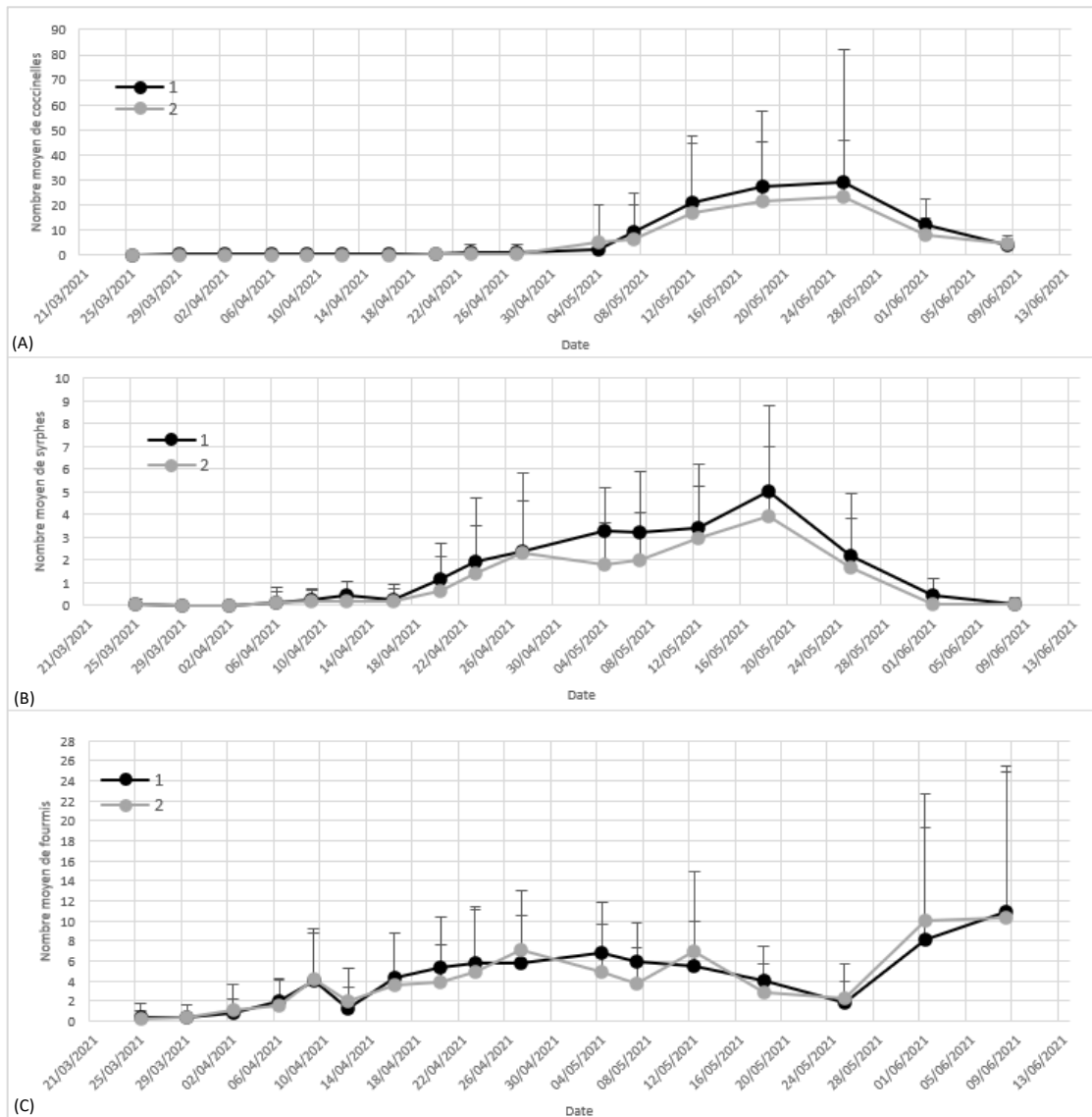
Annexe 60 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les pommiers toutes dates confondues en fonction du traitement et du bloc (légende similaire à l'annexe 59 p 104)



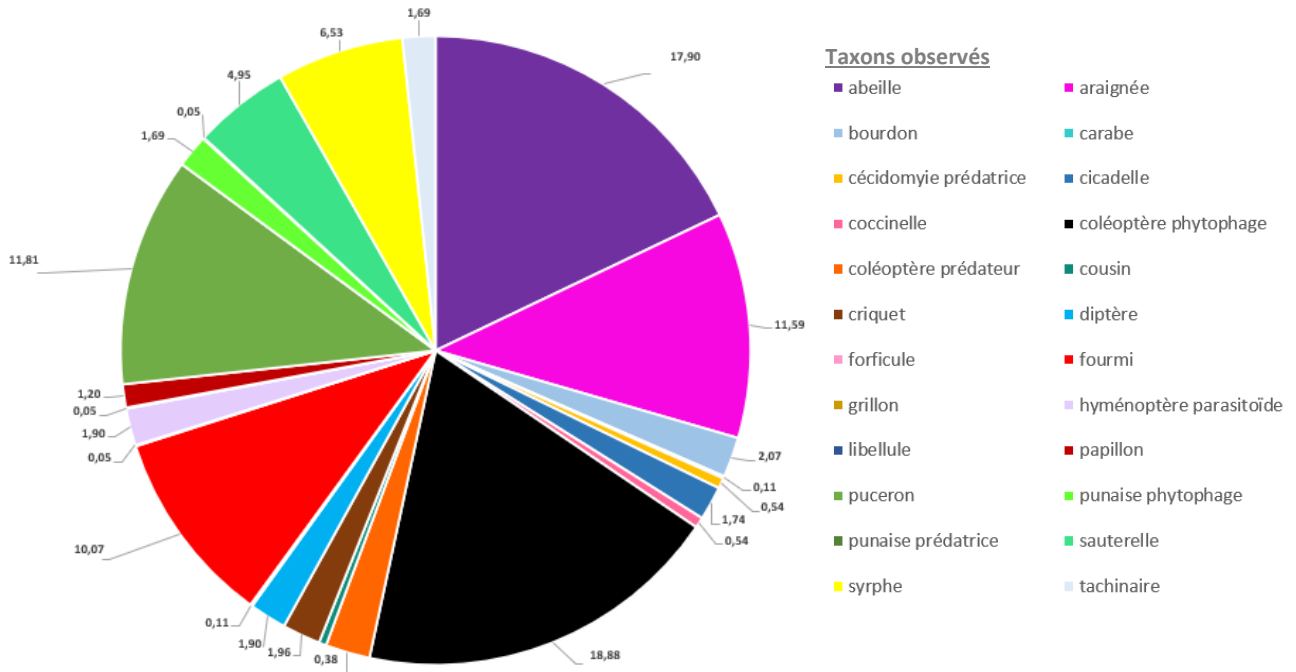
Annexe 61 : Somme du nombre d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les pommiers en fonction de la date (traitements et blocs confondus) (légende similaire à l'annexe 59 p 104)



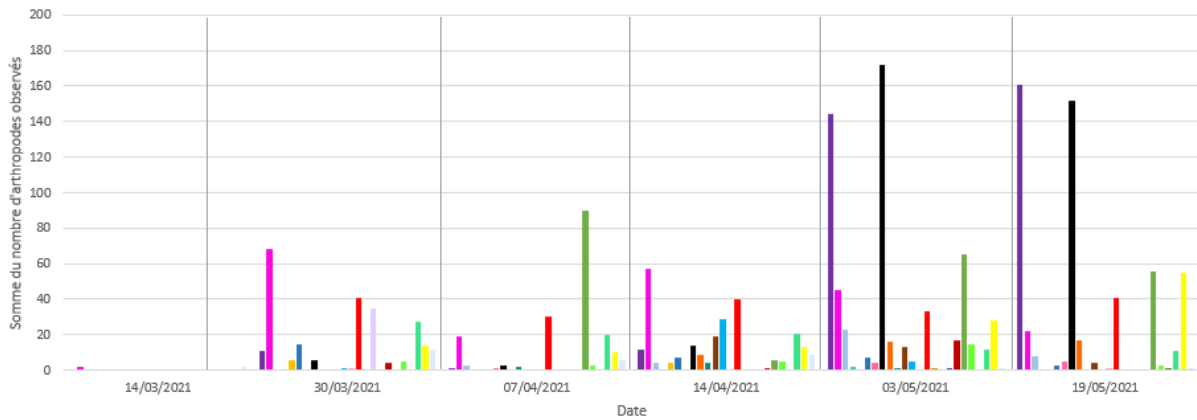
Annexe 62 : Dynamique du nombre moyen de (A) coccinelles (tous stades confondus), (B) syrphes (tous stades confondus) et (C) fourmis dans les pommiers en fonction du bloc



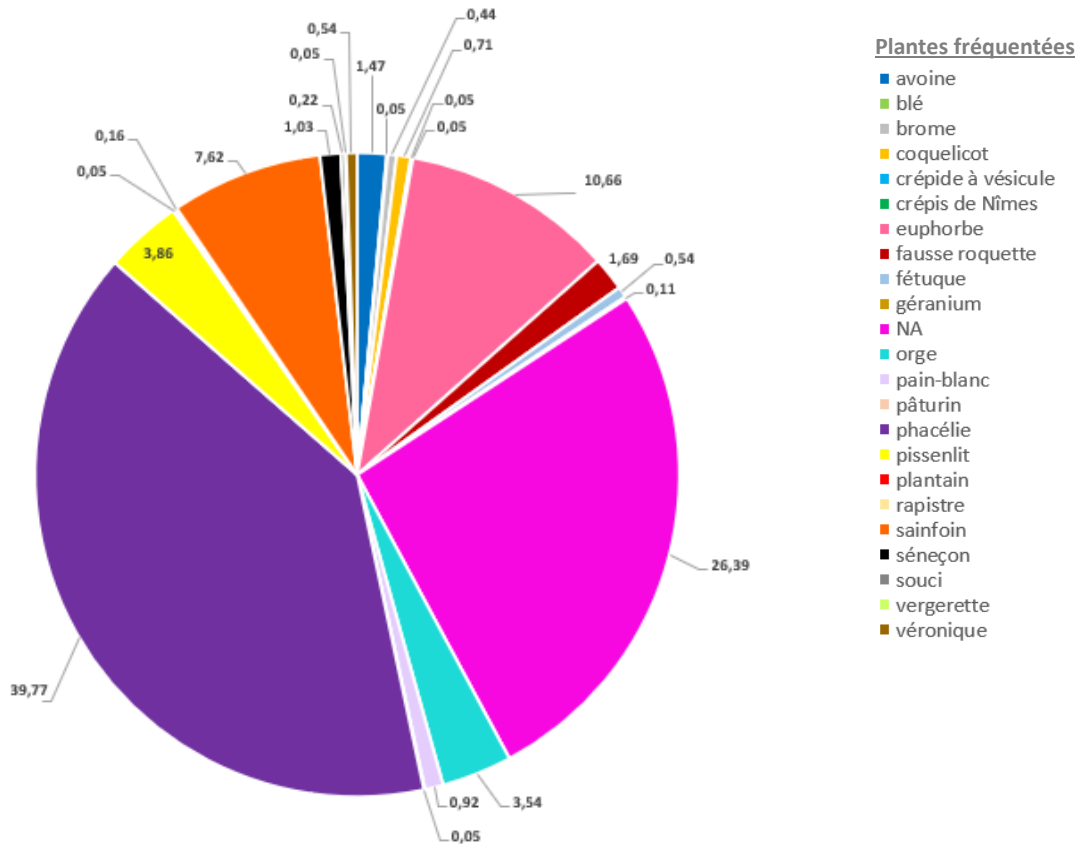
Annexe 63 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les inter-rangs (BE et BF) via la marche le long d'un transect linéaire (toutes variables explicatives confondues)



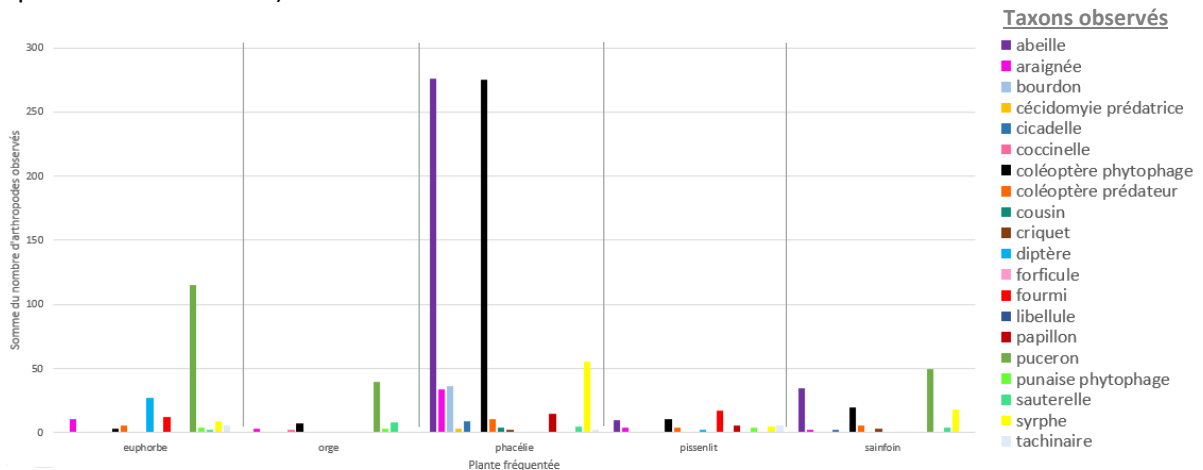
Annexe 64 : Somme du nombre d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les inter-rangs (BE et BF) via la marche le long d'un transect linéaire en fonction de la date (traitements et blocs confondus) (légende similaire à l'annexe 63 p 106)



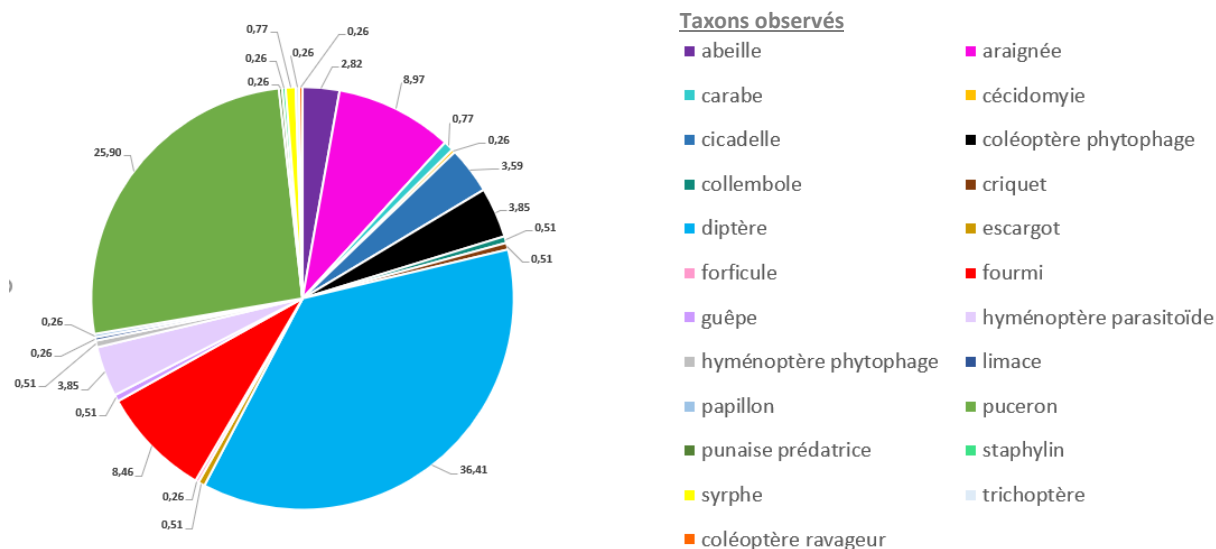
Annexe 65 : Répartition en pourcentage des différentes plantes fréquentées par les arthropodes observés dans les inter-rangs via la marche le long d'un transect linéaire (toutes variables explicatives confondues)



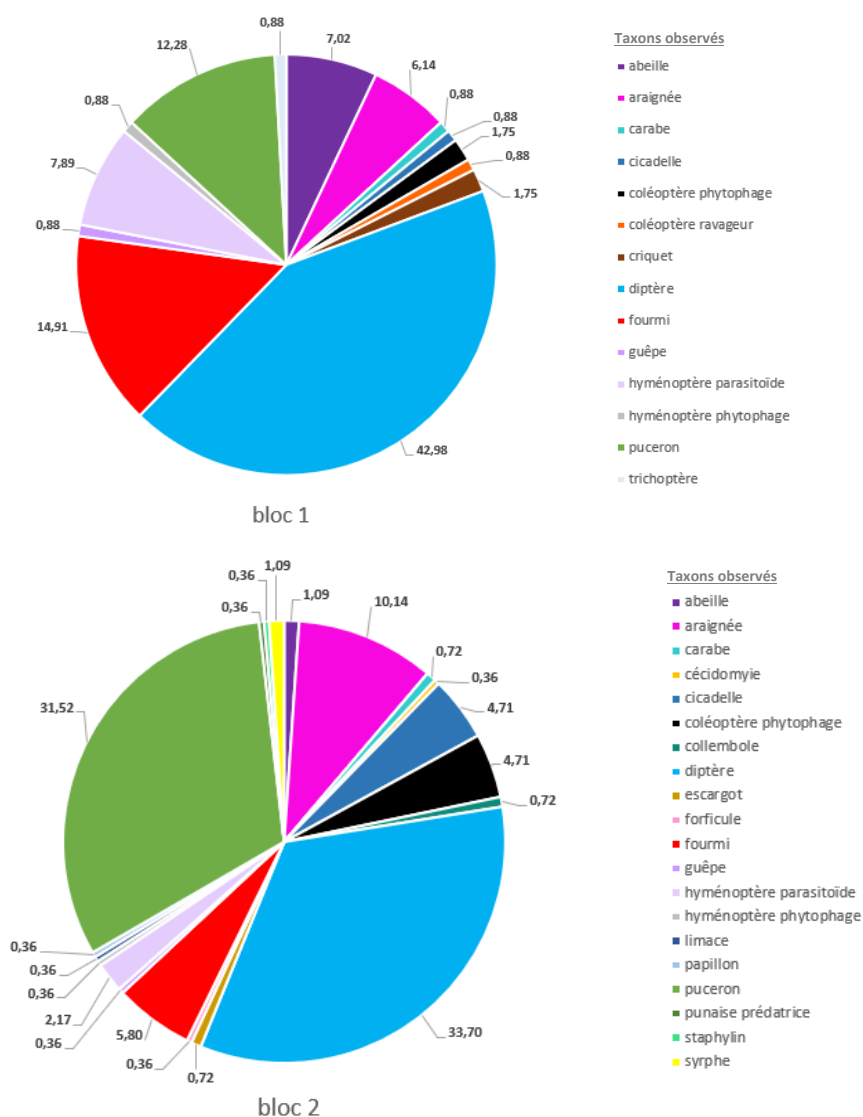
Annexe 66 : Somme du nombre d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) via la marche le long d'un transect linéaire en fonction des principales plantes fréquentées (toutes variables explicatives confondues)



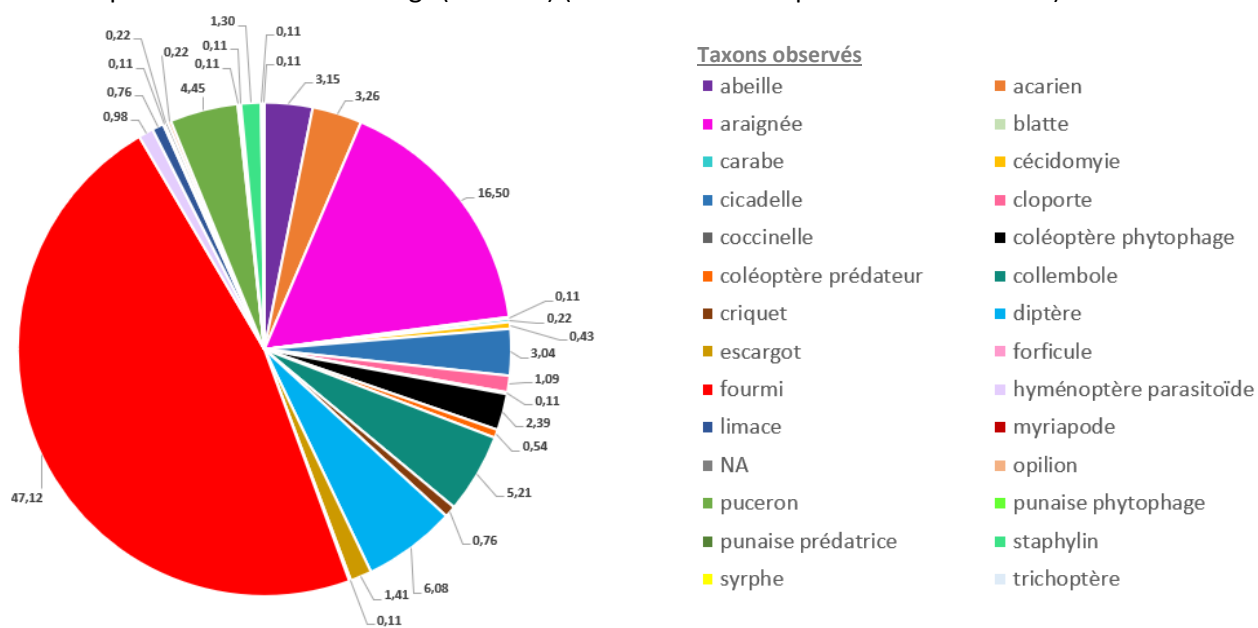
Annexe 67 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les assiettes colorées (toutes variables explicatives confondues)



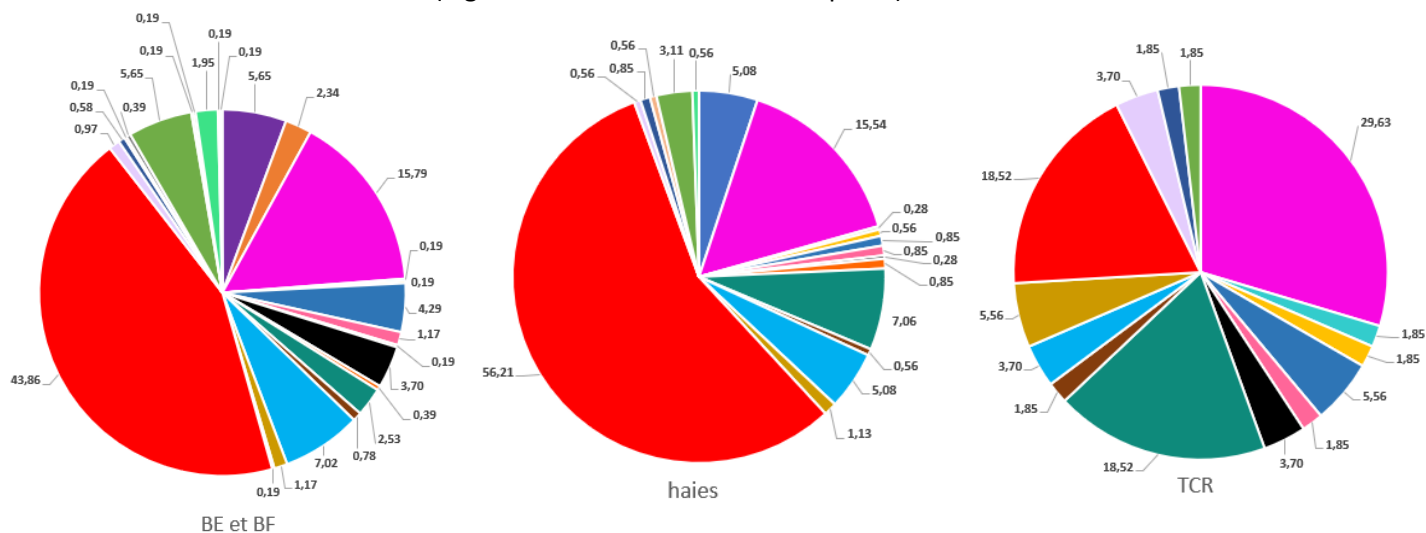
Annexe 68 : Répartition du pourcentage d'arthropodes observés par taxon (tous stades confondus) dans les assiettes colorées en fonction des blocs



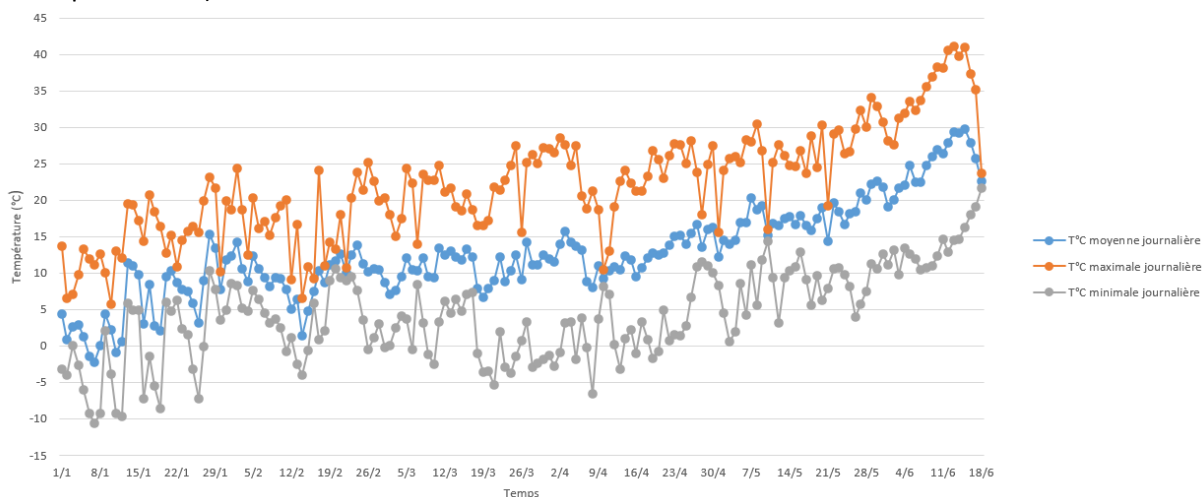
Annexe 69 : Répartition du pourcentage d'invertébrés observés par taxon (tous stades confondus) dans les pots barber des inter-rangs (BE et BF) (toutes variables explicatives confondues)



Annexe 70 : Répartition du pourcentage d'invertébrés observés (tous stades confondus) dans les pots barber en fonction des IAE (légende similaires à l'annexe 68 p 108)



Annexe 71 : Températures moyennes, maximales et minimales journalières (avec station climatique de la parcelle A2)



Tables des figures

Figure 1 : Les grandes thématiques fédératrices de l'UMR ABSys.....	2
Figure 2 : Les bases de reconception des vergers d'après le projet ALTO.....	2
Figure 3 : Fleurs du <i>M. domestica</i>	3
Figure 4 : Fruits du <i>M. domestica</i>	3
Figure 5 : Progress in apple production (million ton) and cultivation area (million ha) (a), and apple productivity (t ha-1) (b) in total world from 1961 to 2016.....	3
Figure 6 : Pucerons cendrés aptères (1) et ailés (2).....	6
Figure 7 : Cycle de développement de <i>D. plantaginea</i>	6
Figure 8 : Colonie de pucerons cendrés aptères.....	6
Figure 9 : Feuilles infestées par <i>D. plantaginea</i>	7
Figure 10 : Fruits impactés par <i>D. plantaginea</i>	7
Figure 11 : Pucerons verts aptères (1) et ailés (2).....	8
Figure 12 : Cycle de développement de <i>A. pomi</i>	8
Figure 13 : Feuilles infestées par <i>A. pomi</i>	8
Figure 14 : Relation mutualiste Fourmis/ <i>D. plantaginea</i>	9
Figure 15 : <i>C. pomonella</i> à différents stades du cycle de vie : adulte (1), œuf (2), larve (3), chrysalide (4).....	10
Figure 16 : Schématisation d'une génération de <i>C. pomonella</i>	10
Figure 17 : Schématisation de l'enchaînement dans le temps des générations de <i>C. pomonella</i> dans le sud de la France.....	11
Figure 18 : Point de pénétration d'une larve au niveau de la cavité de l'œil.....	11
Figure 19 : Services écosystémiques et services à l'agriculture et à partir de l'agriculture.....	14
Figure 20 : En quoi les IAE favorisent-elles les ennemis naturels ?.....	18
Figure 21 : Principales dimensions à considérer lors de la conception d'un verger système.....	20
Figure 22 : Les bénéfiques engendrés par les systèmes agroforestiers.....	20
Figure 23 : Schématisation des modalités agroforestières étudiées.....	25
Figure 24 : Schématisation des différentes IAE présentes sur la parcelle étudiée.....	25
Figure 25 : Synthèse de l'ensemble des variables suivies et protocoles étudiés.....	27
Figure 26 : Carte de prédation exposant des œufs de <i>C. pomonella</i>	28
Figure 27 : Inter-rang (BE et BF) dans la parcelle GAFAM.....	30
Figure 28 : Pot Barber utilisé.....	30
Figure 29 : Support utilisé pour les assiettes colorées.....	31
Figure 30 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	33
Figure 31 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	33
Figure 32 : Dynamique du pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron cendré en fonction du traitement.....	34
Figure 33 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) par foyer toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	34
Figure 34 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) par foyer en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	34
Figure 35 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons cendrés (tous stades confondus) par foyer en fonction du traitement.....	35
Figure 36 : Pourcentage de foyers de pucerons cendrés disparus toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	35
Figure 37 : Pourcentage de foyers de pucerons cendrés disparus en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	35
Figure 38 : Dynamique du pourcentage de foyers de pucerons cendrés disparus en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	36
Figure 39 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	36
Figure 40 : Pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	36
Figure 41 : Dynamique du pourcentage moyen (+ écart-type) de pousses par pommier présentant au moins un puceron vert en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	37
Figure 42 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) par foyer toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	38
Figure 43 : Nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) par foyer en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	38

Figure 44 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de pucerons verts (tous stades confondus) par foyer en fonction du bloc.....	38
Figure 45 : Pourcentage de foyers de pucerons verts disparus toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	39
Figure 46 : Pourcentage de foyers de pucerons verts disparus en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	39
Figure 47 : Dynamique du pourcentage de foyers de pucerons verts disparus en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	39
Figure 48 : Pourcentage de pommiers présentant au moins un fruit avec symptôme(s) de carpocapse toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	40
Figure 49 : Pourcentage de pommiers présentant au moins un fruit avec symptôme(s) de carpocapse en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	40
Figure 50 : Pourcentage de pommiers avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement (B) et du bloc au 17/06/2021.....	40
Figure 51 : Pourcentage de pommiers avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 05/07/2021.....	40
Figure 52 : Pourcentage moyen (+ écart-type) d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	41
Figure 53 : Pourcentage moyen (+ écart-type) d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse (traitements et blocs confondus) en fonction de la date.....	41
Figure 54 : Pourcentage moyen (+ écart-type) d'inflorescences par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 17/06/2021.....	41
Figure 55 : Pourcentage moyen d'inflorescences (+ écart-type) par pommier avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 05/07/2021.....	41
Figure 56 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des œufs de carpocapse toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	42
Figure 57 : Taux de prédation moyen (+ écart type) des œufs de carpocapse (traitements et blocs confondus) en fonction de la date.....	42
Figure 58 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des œufs de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 07/05/2021.....	42
Figure 59 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des œufs de carpocapse en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 04/06/2021.....	42
Figure 60 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons <i>Acyrtosiphon pisum</i> toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	43
Figure 61 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons <i>Acyrtosiphon pisum</i> (traitements et blocs confondus) en fonction de la date.....	43
Figure 62 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons <i>Acyrtosiphon pisum</i> en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 04/05/2021.....	43
Figure 63 : Taux de prédation moyen (+ écart-type) des pucerons <i>Acyrtosiphon pisum</i> en fonction (A) du traitement et (B) du bloc au 01/06/2021.....	43
Figure 64 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	44
Figure 65 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	44
Figure 66 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons cendrés en fonction du traitement.....	44
Figure 67 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons verts toutes dates confondues en fonction (A) du traitement et (B) du bloc.....	45
Figure 68 : Nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyer de pucerons verts en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	45
Figure 69 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) d'auxiliaires par foyers de pucerons verts en fonction du traitement.....	46
Figure 70 : Dynamique du nombre moyen (+ écart-type) de (A) coccinelles (tous stades confondus), (B) syrphes (tous stade confondus) et (C) fourmis dans les pommiers en fonction du traitement.....	47
Figure 71 : Nombre moyen d'auxiliaires (coccinelles et syrphes, tous stades confondus) dans les pommiers et de pucerons dans les foyers en fonction de la date (traitements et blocs confondus).....	50

Table des tableaux

Tableau 1 : La production européenne de pommes.....	3
Tableau 2 : Principaux pucerons nuisibles aux pommiers français.....	5
Tableau 3 : Les catégories de tordeuses.....	9
Tableau 4 : Les types de régimes alimentaires des macro-organismes présents dans les cultures.....	15
Tableau 5 : Les différentes modalités agroforestières.....	25
Tableau 6 : Composition des blocs du dispositif expérimental.....	25
Tableau 7 : Synthèse des opérations techniques réalisées sur la parcelle GAFAM depuis septembre 2020.....	26
Tableau 8 : Récapitulatif du matériel utilisé pour les cartes de prédation.....	29
Tableau 9 : Nombre de cartes par session (N) et dates de pose et de collecte des cartes en 2021.....	29
Tableau 10 : Date de réalisation des marches le long d'un transect linéaire.....	30
Tableau 11 : Les différents types de GLM utilisés pour l'analyse des données.....	32

Résumé

Trouver des méthodes alternatives afin de réduire l'usage des pesticides dans les vergers de pommiers est primordial. Le contrôle biologique des ravageurs constitue un des services écosystémiques pour lequel les attentes sont les plus fortes. Il peut être favorisé par l'intégration d'infrastructures agroécologiques (bandes fleuries, haies, etc.), mises en œuvre dans le cadre de la lutte par conservation, et l'agroforesterie. La parcelle GAFAM conduite en agriculture biologique et bas intrants, aspire à cultiver du pommier entre une strate haute (noyer à bois) et une strate basse (bandes enherbées et fleuries). Le tout est bordé de haies. **Le contexte agroforestier et la présence d'un cortège d'infrastructures agroécologiques impactent-ils les mécanismes de régulation biologique des principaux ravageurs du pommier que sont le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*), le puceron vert (*Aphis pomi*) et le carpocapse (*Cydia pomonella*) ?** Les suivis des dynamiques de ces ravageurs et de leurs ennemis naturels sont réalisés sur un échantillon de 45 pommiers en fonction d'un gradient de distance aux noyers. Les résultats obtenus montrent que la dynamique de distribution des ennemis naturels n'est pas liée à la proximité des noyers mais dépend de la dynamique de distribution des pucerons. La dynamique d'infestation des pucerons serait davantage liée à l'impact des noyers sur leurs préférences microclimatiques plutôt qu'à l'impact des noyers sur leurs ennemis naturels et le contrôle biologique connexe. La proximité des noyers n'influence pas significativement l'incidence de la première génération de *C. pomonella*, mais le suivi de la deuxième génération compléterait ces résultats. Le cortège d'IAE est peuplé par une diversité d'invertébrés mais le rôle précis de cette diversité végétale sur les auxiliaires et leur action de régulation biologique des ravageurs doit être approfondi. Ces résultats doivent être nuancés au regard du dispositif expérimental et de la méthodologie employée.

Mots-clés : Pommiers – Agroforesterie – Lutte biologique par conservation – Pucerons - Carpocapse

Abstract

Finding alternative methods to reduce the use of pesticides in apple orchards is critical. Biological pest control is one of the ecosystem services for which expectations are highest. It can be promoted by the integration of agroecological infrastructures (flowering strips, hedges, etc.), implemented in the context of conservation biological control, and agroforestry. The GAFAM plot, conducted in organic agriculture and low inputs, aspires to grow apple trees between a high stratum (walnut trees) and a low stratum (grassy and flowering strips). The whole is lined with hedges. **Do the agroforestry context and the presence of a cortège of agroecological infrastructures affect the biological control mechanisms of the main apple pests such as the rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*), the green apple aphid (*Aphis pomi*) and the codling moth (*Cydia pomonella*)?** The dynamics of these pests and their natural enemies are tracked on a sample of 45 apple trees according to a distance gradient to walnut trees. The results show that the distribution dynamics of natural enemies are not related to the proximity of walnut trees but depends on the distribution dynamics of aphids. The dynamics of aphid infestation are thought to be more related to the impact of walnut trees on their microclimatic preferences than to the impact of walnut trees on their natural enemies and related biological control. Proximity to walnut trees does not significantly influence the incidence of the first generation of *C. pomonella*, but the monitoring of the second generation would complement these results. The cortège of agroecological infrastructures is populated by a diversity of invertebrates but the precise role of this plant diversity on the natural enemies and their biological control of pests needs to be deepened. These results must be qualified in terms of the experimental design and methodology used.

Keywords: Apple trees – Agroforestry – Conservation biological control – Aphids – Codling moth